

168441


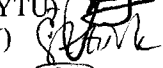


**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELTİĞİN KURUMA DAVRANIŞININ TEORİK OLARAK  
İNCELENMESİ ve SONUÇLARIN ELİPSOİD MODELE  
UYGULANMASI**

Makine Yük. Müh. Oktay HACIHAFIZOĞLU

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında  
Hazırlanan

**DOKTORA TEZİ**

Tez Savunma Tarihi : 25/11/2004  
Tez danışmanı : Prof. Dr. Doğan ÖZGÜR (YTÜ)   
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN (YTÜ)   
: Prof. Dr. İlhan T. ÖZTÜRK (KOÜ)   
: Doç. Dr. Z. Düriye BİLGE (YTÜ)  
: Doç. Dr. Ahmet CİHAN (TÜ) 

**İSTANBUL, 2004**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURUTMA.....	10
2.1 Çeltik Kurutma Sistemleri.....	10
2.1.1 Doğal Havalı Kurutma Sistemleri.....	11
2.1.2 Düşük Sıcaklıklı Kurutma Sistemleri.....	11
2.1.3 Yüksek Sıcaklıklı Kurutma Sistemleri.....	12
2.2 Kurutmada Kullanılan Diğer Yöntemler.....	13
2.3 Çeltik Danesinin Yapısı.....	15
2.4 Çeltiğin Nem Oranı.....	16
2.5 Sorpsiyon İzotermi.....	18
2.6 Çeltiğin Kuruma Kinetiği.....	20
2.6.1 Sabit Hızda Kuruma Süreci.....	22
2.6.2 Azalan Hızda Kuruma Süreci.....	23
3. MATEMATİKSEL MODEL ve ANALİZ.....	24
3.1 Küre Modeli.....	24
3.2 Sonlu Silindir Modeli.....	27
3.3 Elipsoid Modeli.....	32
4. DENEY TESİSATI ve PROSEDÜRÜ.....	38
4.1 Deney Tesisatı ve Ölçüm Elemanları.....	38
4.2 Çeltiğin Hazırlanması.....	40
4.3 Deneylelerin Yapılışı.....	41
4.4 Deneysel ve Teorik Sonuçlar.....	42
5. GENEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER.....	53
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	59

## SİMGE LİSTESİ

A	Kurutma ile ilgili boyutsuz sabit
B	Kurutma ile ilgili boyutsuz sabit
b	İntegrasyon sabiti
C	Volümetrik nem konsantrasyonu
$C_e$	Denge nemi konsantrasyonu
$C_o$	Başlangıç nemi konsantrasyonu
c	Boyutsuz nem konsantrasyonu
D	Sıvı difüzyon katsayısı
$f_j$	Galerkin fonksiyonu
h	Kütle transfer katsayısı
$J_k$	k. mertebe birinci tip Bessel fonksiyonu
K	Orantı katsayısı
k	Kuruma hızı orantı sabiti
L	Çeltik tanesi uzunluğu
$\ell$	Boyutsuz çeltik uzunluğu
$M_b$	Buharlaşan nem kütlesi
$M_e$	Çeltiğin denge nemindeki kütlesi
$M_k$	Çeltiğin kuru kütlesi
$M_y$	Çeltiğin yaş kütlesi
m	Kuru baza göre nem oranı
$m^*$	Boyutsuz nem oranı
$m_c$	Kritik nem oranı
$m_e$	Denge nemi oranı
$m_o$	Başlangıç nem oranı
$m_y$	Yaş baza göre nem oranı
$P_{bo}$	Doymuş hava içindeki su buharı basıncı
$P_{bo\infty}$	Derişiklik tabakası sonunda su buharı basıncı
R	Çeltik tanesi yarıçapı
$R_b$	Su buharı gaz sabiti
r	Radyal koordinat
T	Mutlak sıcaklık
t	Zaman
V	Hacim
$Y_k$	k. mertebe ikinci tip Bessel fonksiyonu
x,y,z	Kartezyen koordinatlar

## Greek Alfabeti

$\alpha_j$	$J_k(x)$ 'in j. kökü
$\beta_i$	$\cos(x)$ fonksiyonunun i. kökü
$\delta$	Derişiklik sınır tabaka kalınlığı
$\eta$	Boyutsuz aksel koordinat
$\tau$	Boyutsuz zaman
$\xi$	Boyutsuz radyal koordinat
$\Psi_n$	n. özfonksiyon
$\gamma_n$	n. özdeğer
$\varphi$	Havanın bağıl nemi



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Çeltik danesinin yapısı.....	15
Şekil 2.2 Çeltik için değişik sıcaklıklarda sorpsiyon izotermi.....	19
Şekil 2.3 Higroskopik maddelerin kuruma oranı eğrisi.....	20
Şekil 2.4 Higroskopik maddelerin kuruma hızının zamanla değişimi.....	21
Şekil 2.5 Higroskopik maddelerin kuruma hızının nem oranıyla değişimi.....	21
Şekil 3.1 Küre geometri ve koordinat sistemi.....	25
Şekil 3.2 Silindir geometri ve koordinat sistemi.....	28
Şekil 3.3 Elipsoid geometri ve koordinat sistemi.....	32
Şekil 4.1 Şematik kurutma deney tesisatı.....	39
Şekil 5.1 Küre geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması.....	47
Şekil 5.2 Silindir geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması...	48
Şekil 5.3 Elipsoid geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması..	49
Şekil 5.4 Kurutma havası sıcaklığı ile hataların kareleri toplamının değişimi.....	51
Şekil 5.5 Difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	52

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 5.1 Kurutma sıcaklığı 40°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri.....	42
Çizelge 5.2 Kurutma sıcaklığı 45°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri.....	43
Çizelge 5.3 Kurutma sıcaklığı 50°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri.....	44
Çizelge 5.4 Kurutma sıcaklığı 55°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri.....	45
Çizelge 5.5 Kurutma sıcaklığı 60°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri.....	46
Çizelge 5.6 Kurutma sıcaklığı 40°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları.....	50
Çizelge 5.7 Kurutma sıcaklığı 45°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları.....	50
Çizelge 5.8 Kurutma sıcaklığı 50°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları.....	50
Çizelge 5.9 Kurutma sıcaklığı 55°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları.....	50
Çizelge 5.10 Kurutma sıcaklığı 60°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları.....	50

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, değişik sıcaklıklarda tek tabaka çeltiğin kuruma davranışı deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlarla çeltiğin geometrisinin küre, sonlu bir silindir ve elipsoide benzetilmek suretiyle elde edilen teorik sonuçları ile mukayese edilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlara en yakın değerlerin, çeltik geometrisinin elipsoide benzetilerek elde edilen teorik çözüm sonuçlarının olduğu görülmüştür.

Bu konuda araştırma yapmam için bana imkan sağlayan danışmanım sayın Prof. Dr. Doğan Özgür'e, tez çalışmama yön veren ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Ahmet Cihan'a, Yrd. Doç. Dr. Kamil Kahveci'ye, eleştirilerinden dolayı değerli jüri üyelerine ayrıca eşim Emel Hacıhafizoğlu'na ve biricik kızım Naz Hacıhafizoğlu'na da sonsuz teşekkür ederim.

Oktay Hacıhafizoğlu  
Makine Y. Mühendisi



## ÖZET

Çeltik insanların gıda ihtiyacını karşılayan önemli bir kültür bitkisi olup hasat sırasında yüksek nem oranlarına sahiptir ve hasat sonrası uygun bir kurutma işleminden geçirilmelidir. Kurutmanın amacı böceklenme ve küflenmeyi önleyici bir ortam yaratarak ürünü korumaktır. Çeltiğin kurutulması genellikle ısıtılmış havanın cebri konveksiyonu yardımıyla gerçekleştirilir. Bu çalışmada küre, silindir ve elipsoid geometrili modeller için çeltiğin tek tabaka kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelendi. Deneyler kuru baza göre nem oranı %24 olan rocco tipi çeltik kullanılarak gerçekleştirildi. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları 40°C, 45°C 50°C, 55°C ve 60°C, kurutma havası hızı da 1.5 m/s alınmıştır. Teorik model olarak küre için Luikov (1968), silindir için Ece ve Cihan (1993), elipsoid için Lima ve Farias (2003) tarafından elde edilen ve 2.Fick yasasına dayanan, daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denkleminin çözümü kullanılmıştır. Küre ve silindir için teorik sonuçları elde etmek için Fortran programlama dilinden istifade edilmiştir. Elipsoid model için sonuçları elde etmek için Mathematica programlama dilinden yararlanılmıştır. İzlenen prosedürün amacı kurutma sıcaklığına bağlı olarak elde edilmiş deneysel sonuçları referans olarak bir difüzyon katsayısı belirlemektir. Küre için, genel olarak teorik ve deneysel değerler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusu olmasına rağmen, verilen bir hacim için minimum yüzey alanına sahip geometrinin küre olması nedeniyle çeltik için küre modelinin kullanılması yüksek difüzyon katsayıları vermektedir. Küre, silindir ve elipsoid için teorik ve deneysel dataların karşılaştırılması grafikler halinde gösterilmiştir. Grafiklerde, analitik çözümlerin üretmiş olduğu datalar birbirine çok yakın olduğundan eğriler arasındaki farklılığı anlamak için farkların kareleri toplamının minimum değerlerine bakılabilir. Efektif difüzyon katsayısını belirlemek için kurutma havası sıcaklığına bağlı Arrhenius tipi bir korelasyon kullanılmıştır. Farkların kareleri toplamına bakıldığında, deneysel sonuçlara en yakın modelin elipsoid olduğu görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Çeltik kurutma, küre, silindir, elipsoid, analitik çözüm, green fonksiyonları, integral metodu.



## ABSTRACT

Rice constitutes a major part of the World food supply. The rice grain is harvested at a high moisture content and it must be properly dried soon after separation from the parent plant. The aim of the drying is to preserve the product by creating an environment which is unfavorable to the growth and development of insects and microflora. Driers for rough rice are usually based on a drying process consists of a forced convection of warm air. In this study, drying of single-layer rough rice for various models was experimentally and theoretically investigated. The experiment were carried out with samples of rough rice having an initial moisture content of 24% with respect to the dry basis. Temperature of drying air used in the experiments were set as 40°C, 45°C, 50°C, 55°C and 60°C and the velocity of the drying air was 1.5 m/s. Analytical solution of liquid diffusion equation for which is developed for sphere by Luikov(1968), for cylinder by Ece and Cihan(1993) and for ellipsoid by Lima and Farias(2003) was used in theoretical analysis. Computer codes was written in Fortran for sphere and cylinder and in Mathematica for ellipsoid. The aim of procedure followed was to determine a coefficient of diffusion by considering experimental results which were done for different drying temperatures. Although reasonable agreement was obtained between theoretical and experimental results for sphere, this assumption results in higher diffusion coefficient, since sphere has minimum surface area for given volume. Theoretical and experimental data were compared in graphics for sphere, cylindrical and ellipsoid cases. Since the analytical solutions are very close to each other, the difference of drying curves can be understand from least square error. In order to determine effective diffusion coefficient was used a Arrhenius type correlation which is contained drying air temperature. It is shown by minimizing the summation of squared of differences, ellipsoid model is very close to experimental values.

**Keywords:** Rough rice drying, sphere, cylinder, ellipsoid, analytical solution, green's functions, integral methods.

## 1.GİRİŞ

Çeltik ve buğday gibi tahıllar hasat zamanında yüksek nem içeriğine sahiptirler ve hasat sonrası uygun bir kurutma işleminden geçirilmezlerse böceklenme ve küflenme gibi nedenlerle bozulmaktadırlar. Çeltiğin hasat sırasında kuru baza göre nem oranı genellikle %24 civarındadır ve bozulmadan uzun süre saklanabilmesi için uygun bir kurutma işleminden geçirilerek kuru baza göre nem oranının %14'ün altına düşürülmesi gerekmektedir (Pfof, 1978). Tahılların kurutulmasında kullanılan yöntemlerden biri ve en ilkel güneşte kurutmadır. Diğer bir yöntem ise, ısıtılmış havanın bir fan vasıtasıyla kurutulacak tahıl üzerine gönderilmesi ile yapılan kurutmadır. Kurutma havasının belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasındaki amaç; kurutma potansiyelini artırıcı etkiye sahip olan havanın bağıl nemini düşürmektir. En ekonomik kurutma güneşte yapılmaktadır. Ancak, hasat edilen tahılın kurutulması için iklim şartları her zaman uygun olmayabilir ve uygun iklim şartları beklenerek kurutma yapılacak olursa, bu kez bekleme sürecinde tahıl taneleri daha fazla olgunlaşır ve başaktaki tane kaybı artar. Cebri kurutma yöntemi kullanılırsa, iklim şartlarına bağlı olmaksızın çeltik hasat edilebilir ve ürün kaybı azalır. Ayrıca üretici, ürünü istediği zaman pazarlama olanağına sahip olur. Böyle bir kurutma yöntemi kullanıldığında, ısı gerilmelerin neden olduğu üründeki çatlak oluşumu; kurutma hızının kontrol edilebilmesi ile azaltılabilir.

Kurutma sistemlerinin verimini yükseltebilmek için çeltikten nem atılması mekanizmasının doğru olarak anlaşılması ve çeltiğin kuruma analizinin iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Çeltik ve buğday gibi higroskopik yapıya sahip olan tahılların kuruma kinetiği hakkında teorik bir değerlendirme Chen ve Johnson (1969) tarafından yapılmıştır. Bu teorik değerlendirmede higroskopik malzemelerde kurumanın iki farklı periyotta gerçekleştiği ifade edilmiştir. Bu periyotlar sırasıyla, sıcaklık, nem ve hava hızı gibi dış şartlar tarafından yönetilen sabit hızda kuruma süreci ve sıvı veya buharın materyal içindeki akışının yönlendirdiği azalan hızda kuruma periyodudur. Higroskopik malzemeler içindeki kuruma sürecinde gerçekleşen iç akışın, genellikle ya nem konsantrasyonu gradyanının ya da buhar basınç gradyanının itici kuvveti oluşturduğu kabul edilir. Bu esaslar çerçevesinde kuruma dinamiği, ikinci Fick kanunu olarak bilinen difüzyon denklemiyle tanımlanmaktadır. Her iki tür iç akış için difüzyon denklemi Chen ve Johnson (1969) tarafından verilmiştir. Difüzyon denklemlerinde bulunan difüzyon katsayısının sabit olduğu kabulüne dayalı olarak yapılan çalışmalarda, deneysel dataların teorik değerlerden azalan

hızda kuruma sürecinde farklılıklar gösterdiğini ifade eden Chen ve Johnson (1969) bu farkın nedeninin, difüzyon katsayısının azalan hızda kuruma sürecinde sabit bir davranış göstermemesinden kaynaklandığını ileri sürmüştür. Difüzyon denklemi çözümü ile elde edilen teorik sonuçlar ile deneysel datalar arasında oluşan farkın diğer bir nedeni de, analizi yapılan sistemlerin hacimlerinin kuruma sürecinde sabit kaldığı kabulüdür. Bununla birlikte, biyolojik malzemelerin kuruma esnasında dikkate değer bir büzülme gösterdikleri yani hacimlerinin küçüldüğü iyi bilinen bir gerçektir.

Bir higroskopik malzemenin kurutulması, malzeme içerisindeki nemin buharlaştırılması ve buharın havaya difüzyonu veya buharın malzeme merkezinden yüzeye doğru taşınması ve havaya difüzyonu şeklinde gerçekleşir. Tahıllar hasat sırasında yüksek nem oranlarına sahip higroskopik malzemeler olup bünyelerinde sudan hariç kuru madde ve o tahıla ait sıvı bileşikler bulundurlar. Yapılan analizlerde difüze olan tek maddenin su olduğu kabul edilir. Tahılların bünyelerinde bulundurdukları nemin, sıvı, buhar veya her ikisinin karışımı halinde olduğu durumlar söz konusu olabilir. Nem taşınım analizleri bu durumlara uygun olarak yapılmalıdır. Tahıllarda kuruma mekanizmasının, konsantrasyon gradyanının itici gücü oluşturduğu difüzyonla olduğu kabul edilir (Chen ve Johnson, 1969).

Tahılların kurutulması konusunda pek çok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çoğunlukla tek tabaka kurutma üzerine yoğunlaşmıştır (Henderson, 1974). Deneysel çalışmalara bir model olarak çoğunlukla Newton soğuma kanununa analogiyle yarı teorik bir ifade olan

$$\frac{dm}{dt} = -k(m - m_e) \quad , \quad (1.1)$$

ilişkisi kullanılmıştır. Burada  $m$  çeltiğin kuru baza göre nem oranı,  $m_e$  denge nemi oranı,  $t$  kurutma zamanı,  $k$  ise kurutma katsayısı olarak adlandırılan boyutlu bir orantı sabitidir. Bu eşitliğin integrasyonu ile

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = e^{-kt} \quad , \quad (1.2)$$

elde edilir. Burada  $m_0$  başlangıç nem oranıdır. Çeşitli tahılların kuruma davranışını simüle etmek amacıyla (1.2) eşitliği ile tanımlanan model pek çok araştırmacı tarafından başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Simmonds, Ward ve McEven (1953) buğdayın, Henderson ve Pabis (1961) mısırın, Boyce (1965) arpanın, O'Callaghan, Menzies ve Bailey (1971) arpanın ve buğdayın, Watson ve Bhargava (1974) buğdayın kuruma davranışını belirlemede model olarak (1.2) denklemini kullanmışlar ve deneysel datalarla teorik model sonuçları arasında karşılaştırma yaparak difüzyon katsayısı için sıcaklığa bağlı Arrhenius tipi bir ilişki elde

etmişlerdir. Bununla birlikte, Allen (1960) tarafından çeltik ve kabuklu mısır için yapılan çalışmalar, difüzyon katsayısının sıcaklığın yanı sıra başlangıç nem oranının da bir fonksiyonu olması gerektiğini göstermektedir.

Kurutma ile ilgili yapılan araştırmaların bir kısmında (1.2) ile tanımlı denklem, üzerinde bir takım küçük değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Page (1949), (1.2) denklemini, n deneysel bir sabit olmak üzere, t yerine  $t^n$  olarak kabuklu mısır ve fındığın, Overhults, White, Hamilton ve Ross (1973), White, Bridges, Loewer ve Ross (1978) kt yerine  $(kt)^n$  olarak soya fasulyesinin kuruma davranışını incelerken kullanmışlardır.

Alternatif olarak Wang ve Singh (1978), orta büyüklükteki çeltik tanesinin tek tabaka kuruma davranışına model olarak

$$\frac{m - m_e}{m_o - m_e} = 1 + At + Bt^2 \quad , \quad (1.3)$$

ifadesini kullanmışlardır. Burada A ve B, zaman t dakika olarak alındığında, sağ tarafın boyutsuzluğunu sağlayacak şekilde tanımlı birimli sabitlerdir. Wang ve Singh (1971) tarafından yapılan çalışmada, teorik analiz için kullanılan (1.3) modelinin sonuçlarıyla deneysel dotalar karşılaştırılmış ve teorik ve deneysel değerler arasında iyi bir uygunluk elde edilmiştir.

Diğer taraftan Sharaf-Eldeen vd. (1979), tarafından yapılan çalışmada soya fasulyesi kuruma davranışının simülasyonu için

$$\frac{m - m_e}{m_o - m_e} = Ae^{-kt} + (1 - A)e^{-3kt} \quad , \quad (1.4)$$

eşitliği kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deneysel dotalar arasında, kuruma sürecinin geniş bir aralığında, yalnızca %1'den daha az bir fark ortaya çıkmaktadır. Böylece, teorik model ve deney sonuçları arasında tatmin edici bir uygunluk olduğu söylenebilir.

Bazı araştırmacılar çeltiğin kabuk, gövde ve öz şeklinde üç ayrı katmandan oluştuğunu ve kuruma davranışının her bir katman için ayrı ayrı incelenmesi gerektiğini ifade etmektedir. İki katlı kuruma modeli olarak bilinen ve çeltiğin kabuk ve gövde kısmının birbirinden farklı olan kuruma davranışlarını belirlemek amacıyla Sharma vd. (1982) ve Noomhorm ve Verma (1986a) tarafından

$$\frac{m - m_e}{m_o - m_e} = A_1e^{-k_1t} + A_2e^{-k_2t} \quad , \quad (1.5)$$

şeklinde bir simülasyon denklemi önerilmiştir. Eksponansiyel terimlerden her biri çeltik tanesi içindeki iki tabakadan birinin kuruma davranışını tanımlamak için kullanılmıştır. Burada,  $A_1$  ve  $A_2$  kurutulan materyale ait sabit katsayılar,  $k_1$  ve  $k_2$  deneysel dotaların nümerik

analizde kullanılması sonucu hesaplanan kurutma sabitleridir. Teorik inceleme için model olarak (1.5) denkleminin kullanılmasıyla her ne kadar deneysel datalarla iyi bir uygunluk ortaya çıksa da iki adet eksponansiyel terimin varlığı çeltikteki kabuk ve gövde katmanlarının varlığıyla açıklanamaz. Çeltik tanesinin homojen bir yapıya sahip olduğu kabulüyle dahi sıvı difüzyon denkleminin *Fourier-Bessel serilerine göre değişkenlerine ayırma* metoduyla çözümü sonsuz sayıda eksponansiyel terimin lineer bir toplamını vermektedir. Bu nedenle, (1.2) denklemindeki eksponansiyel terimlerin arttırılması doğal olarak kullanılan modelin deney sonuçlarıyla olan uyumluluğunu arttırmaktadır.

Dung vd. (1981a), tarafından çeltiğin kuruma hızı için, deneysel datalar kullanılarak elde edilmiş olan, bir ampirik ifade verilmiştir.

$$\frac{dm}{dt} = -k_1 \left[ 1 + k_3 (\phi)^{k_4} \right] (m - m_e) e^{k_2 m} \quad (1.6)$$

Burada  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  parametreleri sıcaklığın fonksiyonu,  $k_4$  ise sıcaklığın ve nem oranının fonksiyonudur. Verilen bu ampirik denklem 15-35°C hava sıcaklıkları ve kuru baza göre %18-28 başlangıç nem oranları ve 0.02 m/s hava hızı için geçerlidir ve havanın bağıl neminin değişmesinden etkilenmemektedir. Dung vd. (1981a), tarafından yapılan bu çalışmada teorik sonuçlar ile deneysel datalar arasında %0.19 mertebesinde bir hata ortaya çıkmıştır. Böylece, teorik ve deneysel değerler arasında tatmin edici bir uygunluğun olduğu söylenebilir.

Çeltiğin kurutulması detaylı bir şekilde Wasserman ve Calderwood (1974) tarafından incelenmiştir. Son zamanlarda yapılan deneysel çalışmalar, çeltikten nem atılmasını etkileyen en baskın parametrenin kurutma sıcaklığı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kurutma sıcaklığına ilave olarak kurutma sürecini etkileyen diğer bir ikinci mertebeden önemli faktör, kurutma havası hızıdır.

Çeltik ve buğday gibi tahılların kuruma davranışını modellemede genellikle yarı teorik ilişkiler kullanılmasına rağmen daha kesin analizlerin yapılması durumunda problem daha iyi tanımlanabilecek ve dolayısıyla daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilecektir. Tahıllarda nem transferinin sıvı veya buhar fazında mı gerçekleştiğinin henüz tam olarak belirlenememiş olması analizlerin daha gerçekçi olarak yapılmasına bir engel teşkil etmektedir.

Yer fıstığının kurutulmasını deneysel olarak gerçekleştiren ve sıvı difüzyon denklemini çözümleriyle deneysel dataları karşılaştıran Chhinnan (1976) sonuçlarda iyi bir uygunluk elde etmiştir. Bu tür çalışmalar, tahıl tanelerinden nem atılması fiziksel olayının, en iyi şekilde ikinci Fick kanununa dayanan daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denkleminin açıkladığını göstermektedir. Sherwood (1929, 1931) ve Newman (1931) tarafından önerilen izotermal sıvı difüzyon denkleminin çözümüyle kuruma hızı, difüzyon katsayısına göre



belirlenebilmektedir. Becker ve Sallans (1955), difüzyon katsayısının sıcaklığın bir fonksiyonu olduğunu göstermek amacıyla, buğdayın kurutulmasını deneysel olarak incelemişler ve elde ettikleri dataları daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denklemi sonuçları ile karşılaştırmışlardır ve deneysel ve teorik değerler arasında iyi bir uygunluk elde etmişlerdir.

Husain vd. (1973), izotermal ve izotermal olmayan difüzyon modellerini karşılaştırmak ve değişik difüzyon katsayıları için uygun bir model elde etmek amacıyla, ısı ve sıvı difüzyon denklemlerini birlikte nümerik olarak çözmüşlerdir. Husain vd. (1973), tarafından çeltiğin kuruma davranışını belirlemek için yapılan bu çalışmada, difüzyon katsayısı hem sıcaklığa hem de başlangıç nem değerine bağlı olarak alınmıştır. Çeltik geometrisi sonsuz uzunlukta bir silindir olarak kabul edilerek analizlerde çeltiğin büzülme faktörü ihmal edilmiştir. Deneysel çalışmada izlenen prosedür ise şu şekildedir. Deney başlamadan önce deney düzeneği yaklaşık bir saat çalıştırılarak, sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı stabil hale getirilmiştir. Kurutma sıcaklıkları olarak 49°C, 65°C ve 82°C alınmıştır. Ayrıca havanın bağıl nemi olarak %20 ve %60 ve kuru baza göre başlangıç nemi olarak ta %26 ve %53 alınmıştır. Deney süresince çeltik ağırlığındaki düşüş periyodik olarak  $\pm 0.0001$  g hassasiyetindeki bir teraziyile ölçülmüştür. Sıcaklık ise kurutma odasının orta kısmına yerleştirilen termometreler vasıtasıyla, periyodik olarak saptanmıştır. Deney sonuçları, izotermal ve izotermal olmayan sıvı difüzyon denklemlerinin nümerik çözümleri ile karşılaştırılmış ve deneysel datalar ve nümerik çözümler arasında tatmin edici bir uygunluk elde edilmiştir.

Çeltiğin kuruma davranışının belirlenmesi amacıyla daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denklemi, çeltik tanesinin bir küre geometrisinde olduğu varsayımıyla Aguerre vd. (1982), tarafından analitik olarak çözülmüştür. Yapılan analizde çeltik tanesinin difüzyon rezistansının üniform olduğu kabul edilmiştir. Aguerre vd. (1982), yaptıkları bu çalışmada hasat çeltiği ile nemlendirilerek hasat şartlarına getirilen çeltiğin difüzyon değerlerinde bir farklılığın ortaya çıkmadığını da belirlemişlerdir. Analitik çözüm sonuçları ile 12-18 m/s arasındaki hava hızlarında yapılmış olan deneysel çalışmalardan elde edilen dataları karşılaştıran ve Arrhenius tipi bir sıcaklık bağımlılığı elde eden Aguerre vd. (1982), hava hızının değişmesinin çeltiğin kuruma hızına etki etmediği sonucuna varmıştır. Bunun nedeni, muhtemelen, deneylerde hava hızının çok büyük seçilmesidir. Hava akımının kuruma üzerindeki tek etkisi tane yüzeyine ulaşan nemin yüzeyden uzaklaşmasına yardımcı olmaktan ibarettir. Bu etki belirli bir hava hızına kadar artar ve daha sonra kuruma hızında herhangi bir değişim söz konusu olmaz. Dung vd. (1980) ve Cihan (1991) tarafından yapılan deneysel

çalışmalar, hava hızının, kuruma hızına etki eden parametrelerden biri olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Dung vd. (1980), çeltiğin kuruma hızına etki eden parametreleri belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Hava sıcaklığını, bağıl nemini ve hızını ve çeltiğin başlangıç nem oranını kurutma parametreleri olarak alan Dung vd. (1980), bu değişkenler arasında bir etkileşimin olup olmadığını da yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. Deneysel çalışma için kullanılacak çeltik yığınları önce bir depoda kuru baza göre %14.5 nem oranına kadar kurutulmuş ve daha sonra yabancı maddelerden ayıklanmıştır. Ayıklama işlemi sonrasında çeltik yığınları alüminyum tepsilere yayılarak ve üzerlerine gerekli miktarlarda damıtılmış su püskürtülerek deneysel çalışmanın yapılacağı başlangıç nem oranlarına getirilmiştir. Deney çeltiği, nemin taneler içine tam olarak nüfuz etmesi için 5°C sıcaklığa sahip bir ortamda bir hafta bekletilmiştir. Çeltik yığınları belirtilen ve deneyler için yapılan ön hazırlık işlemlerinden geçirildikten sonra kurutulmaya başlatılmış ve 25-35°C arasındaki hava sıcaklıkları, %25-50 arasında bağıl nem değerleri, 0.008-0.02 m/s arasında hava hızları ve %18-28 arasında kuru baza göre başlangıç nem değerleri için kuruma davranışı belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde çeltiğin kuruma esnasındaki nem oranını etkileyen en önemli parametrenin hava sıcaklığı olduğu görülmektedir.

Cihan (1991), değişik sıcaklık ve hava hızlarında rocco tipi çeltiğin kuruma davranışını incelemiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada, kuruma sıcaklıkları olarak 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, kurutma havası hızları olarak ta 1.5 m/s ve 3 m/s alınmıştır. Ayrıca çeltiğin durgun havada (etüvde) kuruma davranışı da incelenmiştir. Elektrikli ısıtıcılarla kontrollü olarak ısıtılan havayı bir fan vasıtasıyla kurutma kanallarına gönderen Cihan (1991), kurutma işlemini çeltik numunesini kurutma kanallarında bulunan esnek kasnaklara yerleştirerek gerçekleştirmiştir. Deney sırasında her 30 dakikada yaptığı tartım işlemleriyle de çeltiğin kuruma davranışını belirlemiştir. Cihan (1991), sıvı difüzyon denklemini, sonsuz uzunlukta bir silindirik çeltik geometrisi için çözerek elde ettiği teorik kuruma eğrileri ile deneysel kuruma eğrilerini karşılaştırmıştır. Sonuçlar, çeltik için kabul edilen silindirik geometrinin oldukça iyi bir model oluşturduğunu, bu geometrik modele sıvı difüzyona dayalı teorik yaklaşımın, deney sonuçlarını çok iyi sağladığını, kurutmada en baskın etkenin kurutma sıcaklığı olduğunu ve artan sıcaklığın kurutmayı hızlandırdığını, kurutma havasının hızının kurumaya etkisinin ikinci mertebeden olup kurutmayı bir miktar kolaylaştırdığını ve difüzyon katsayısının Arrhenius tipi bir sıcaklık bağımlılığı sergilediğini göstermektedir.

Çeltiğin kuruma davranışını belirlemek amacıyla 35-55°C arasında kurutma sıcaklıklarında deneysel çalışmalar yapmış olan Steffe ve Singh (1980a), çeltik için küresel

geometri kabulü yaparak ve çeltik tanesinin kabuk, gövde ve öz şeklinde iç içe üç bölgeden oluştuğunu dikkate alarak, kurumayı teorik olarak ta incelemiş ve nümerik çözümler elde etmiştir. Yapılan teorik incelemede çeltikten nem atılması mekanizmasının sadece sıvı difüzyonu ile gerçekleştiği, difüzyon katsayısının nem konsantrasyonunun bir fonksiyonu olmadığı, çeltiğin kuruma sürecinde izotermal kaldığı, çeltiği oluşturan kabuk, gövde ve özün homojen oldukları ve kuruma prosesinde büzülme olayının gerçekleşmediği varsayılmıştır. Teorik ve deneysel kuruma eğrileri arasındaki farkların kareleri toplamını minimize ederek difüzyon katsayısını belirleyen Steffe ve Singh (1980a), difüzyon katsayısı için Arrhenius tipi bir sıcaklık bağımlılığı elde etmiştir. Verilen belirli bir hacim için minimum yüzey alanına sahip geometrinin küre olması nedeniyle çeltik için küre modelinin kullanılması yüksek difüzyon katsayıları vermektedir. Ancak genel olarak teorik ve deneysel değerler arasında kabul edilebilir bir uygunluk söz konusu olmaktadır.

Dung vd. (1981b) tarafından çevre havasının bir silo içinde depolanmış yığın halindeki çeltik üzerinden geçirilmesiyle gerçekleştirilen kurutma olayının simülasyonu için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Fortran IV programlama dilinde yazılmış olan program, silo içinden geçirilen havanın sıcaklık ve nemini, çeltiğin sıcaklık ve nemini, zamana ve çeltiğin yığın halinde bulunduğu ve kurutma havasının giriş yeri olan silonun tabanı referans olarak alınmak kaydıyla yüksekliğe bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yatak içinde herhangi bir bölgede ortalama hacimde materyal ve enerji balansını tanımlayan diferansiyel denklemler, dördüncü mertebeye Runge-Kutta metodu kullanılarak çözülmüştür. Çözümlerde adım uzunlukları olarak, mesafe için 10 mm, zaman için 5 dakika alınmıştır. Çok büyük adım uzunluklarının kullanımı yatak içerisinde bir yoğuşmanın var olduğu sonucunu vermektedir. Böyle bir hatadan kaçınmak için program içerisine bir kontrol prosedürü ilave edilmiştir. Program, havanın ventilasyonu süresince çevre havasındaki değişimleri ve havanın çeltik tarafından soğutulması ile ortaya çıkan yoğuşmayı da hesaba katmaktadır. Simülasyondan elde edilen sonuçların deneysel datalarla karşılaştırılması ile tatmin edici bir uygunluk elde edilmektedir. Fortran IV programı olarak geliştirilen simülatör, silindirik ve dikdörtgen kesitli silolarda yığın halinde kurutma durumları için kullanılabilir.

Ece ve Cihan (1993) tarafından çeltik tanesi için sonlu uzunlukta bir silindir geometrisi esas alınarak, bir çeltik tanesinin kuruması, kurutma havasının şartlarını içerecek şekilde teorik olarak belirlenmiştir. Sıvı difüzyon denkleminin çözümünü içeren teorik yaklaşım kullanılarak kurutma sürecinde çeltiğin ortalama nem içeriği sıvı difüzyon katsayısı ve çeltiğin geometrik boyutlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Cihan (1991) tarafından yapılan ve kurutma parametreleri olarak sıcaklık ve hızın alındığı rocco tipi çeltiğin tek tabaka



kurutulması ile ilgili deneysel çalışma sonuçları teorik ve deneysel kuruma davranışını karşılaştırmak için kullanılmıştır. Cihan (1991) tarafından elde edilen deneysel data ve yapılan analize bağlı olarak belirlenen analitik sonuçlar arasındaki farkların kareleri toplamı minimize edilerek bir efektif difüzyon katsayısı elde edilmiştir. Rocco tipi çeltik için elde edilen deneysel ve teorik nem oranları arasındaki maksimum sapma kurutmanın başlarında olmaktadır. Bununla birlikte deneysel ve teorik değerler genel olarak iyi bir uygunluk içindedir. Ece ve Cihan (1993) tarafından yapılan bu çalışma ile efektif difüzyon katsayısı için sıcaklık ve hava hızına bağlı olarak Arrhenius tipi bir korelasyon belirlenmiştir. Ayrıca, yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, çeltiğin kuruma kinetiğinde sıcaklığın en baskın parametre olduğu ve hava hızının ikinci mertebeden etkin olduğu da görülmektedir.

Haji-Sheikh&Sparrow (1966) eliptik koordinat sistemini kullanarak, yüzey sıcaklığı sabit ve boyut oranları farklı değişik spheroidler için daimi olmayan rejimde ısı iletim problemini incelemişlerdir. Luikov (1968), Skelland (1974) ve Crank (1975) tarafından küre, silindir ve düzlemsel geometrili cisimler için daimi olmayan rejimde kütle transferi için kısmi türevli denklemler çözülmüştür. Lima ve ark. (1999), elipsoid geometrili ürünler için eliptik koordinat sisteminde sabit difüzyon katsayısı kabulü altında sıvı difüzyon denkleminin analitik çözümünü elde etmiş ve konvektif sınır koşulları altında cisim içerisinde büzülme olması ve olmaması durumunu da göz önüne alarak ısı ve kütle difüzyonu problemlerini analitik olarak çözmüştür.

Igathinathane&Chattopadhyay (1999) spheroidal koordinat sisteminde, sıvı difüzyon denkleminin çözümünü sonlu farklar metodu kullanarak elde etmiş ve çeltik için elde ettiği teorik değerleri, 50-100°C kurutma havası sıcaklıklarında yapmış olduğu deney sonuçlarıyla mukayese ederek difüzyon katsayıları belirlemiştir.

Payne ve ark. (1986), cismin yüzeyinde denge sınır şartlarını göz önüne alarak ve integral metodu vasıtasıyla düzensiz sınırdaki ısı iletim denkleminin analitik çözümünü sunmuş ve elde ettiği sonuçları Haji-Sheikh&Sparrow (1966) tarafından verilen sonuçlarla karşılaştırarak sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Lima&Farias (2004), elipsoid geometri için difüzyon katsayısını sabit ve cismin yüzeyinde denge sınır şartlarını göz önüne alarak Galerkin integral metodu vasıtasıyla, silindirik koordinatlarda yazılmış difüzyon denklemlerinin analitik çözümünü elde etmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda, çeltik tanesinin küre veya sonlu bir silindir olduğu varsayılarak, 2. Fick yasasına dayanan daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denkleminin çözümünü içeren teorik yaklaşımlar mevcuttur. Gerçekte ise çeltik geometrisi elipsoide daha

çok benzemektedir. Fakat literatürde kesit alanı elips olan elipsoid geometri için analitik bir çözüm mevcut değildir. Kesit alanı dairesel olan spheroidler için analitik çözümler mevcuttur. Dairesel kesitli spheroid için Lima&Farias (2004) tarafından elde edilen analitik çözüm kullanılarak çeltiğin teorik kuruma datalarının deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağlayacağı düşünülmüş ve çalışma bu yönde yapılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada 40, 45, 50, 55 ve 60°C kurutma havası sıcaklıklarında tek tabaka çeltik kurutma için elde edilen deneysel sonuçlara, küre, silindir ve elipsoid modellerin ne derece uygun olduğu ve farkların kareleri toplamının minimum değerleri göz önüne alınarak çeltiğin tek tabaka kuruma davranışına en uygun model araştırılacaktır.



## 2. KURUTMA

Yaş veya nemli bir malzemeden sıvı veya nemin alınması işlemine kurutma denir. Kurutma işlemi, eş zamanlı gerçekleşen ısı ve kütle transferi içeren bir prosestir. Nemlilik farklı şekillerde kendini gösterebilir.

- Asıl maddeyi, bünyesinde süspansiyon veya eriyik halinde bulunduran sıvı kütlesi veya eritken olarak,
- Yıkama veya çökertme suretiyle arıtma gibi işlemler sonunda, asıl madde üzerinde kalan bir yüzey nemliliği olarak,
- Gözenekli veya geçirgen bir madde tarafından sıvı halde absorbe edilmiş higroskopik nemlilik, ya da yapışmak suretiyle yüzeyler üzerinde tutunmuş sıvı halde nemlilik olarak,
- Kristal yapıli hidratlar halinde görüldüğü gibi, kimyasal bileşikler şeklinde bir nemlilik olarak,

Desorpsiyon olarak da adlandırılan nem alma veya kurutma işleminin tam anlamıyla gerçekleşmesi, yani bir maddenin sahip olduğı mevcut nem miktarını ortadan kaldırılması genellikle mümkün ise de bu işlem sonunda bazen nemi alınan veya kurutulan maddenin hasara uğraması söz konusu olur. Bununla birlikte atmosferin etkisine maruz bırakılan bütün higroskopik yani nem tutma yeteneğine sahip olan maddeler temas halinde buldukları atmosferin bağıli nemlilik derecesine bağıli olarak söz konusu maddenin nem oranını belirleyen higrometrik denge eğrisine erişilinceye kadar havadan nem almaya devam ederler.

### 2.1 Çeltik Kurutma Sistemleri

Çeltik kurutma sistemlerinde genellikle sıcak hava kullanılmaktadır ve kullanılan hava sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır.

- Doğal havalı kurutma sistemleri
- Düşük sıcaklıklı kurutma sistemleri
- Yüksek sıcaklıklı kurutma sistemleri

### 2.1.1 Doğal Havalı Kurutma Sistemleri

Çevre havasının, herhangi bir ısıtma işlemine tabi tutulmadan doğrudan kurutma havası olarak kullanıldığı sistemlerdir. Bağıl nemin düşük olduğu ve hava sıcaklığının göreceli olarak yüksek olduğu durumlarda kurutma işlemi gerçekleştirilebilir. Kurutma işleminin olabilmesi için çevre havasının sıcaklığına ve nemine bağlı denge neminin çeltiğin o andaki nem değerinden küçük olması gerekir. Bu tür kurutma daha çok silo tip kurutucularda görülür. Kurutma havası bir fan vasıtasıyla siloya gönderilir. Havayı siloya gönderen fan, hava sıcaklığının 1-2.5°C artmasını sağlar. Bu sıcaklık farkı ilave olarak bir kurutma potansiyeli sağlar (Kunze, 1985).

### 2.1.2 Düşük Sıcaklıklı Kurutma Sistemleri

Bu tür kurutucularda kurutma havasının kurutma potansiyelini arttırmak amacı ile, çevre havası 2-10°C arasında ısıtılır. Bu sıcaklık artışı, kurutma havasının bağıl neminde hissedilir oranda bir düşme sağlar. Bu durum kurutma havasının denge nemi değerinin düşmesine ve kurutma potansiyelinin artmasına neden olur. Tip olarak yine doğal havalı kurutmadaki silo tipi kullanılır. Ancak fan girişine veya çıkışına hava ısıtıcısının ilave edilmesi gerekir. Hava ısıtıcısı, nem kontrollü olarak çalıştırılır. Havanın bağıl nemi belli bir değerin altında iken, sistem doğal havalı kurutucu olarak kullanılır. Bağıl nem değeri, belirlenen limiti aştığı takdirde ısıtıcı devreye girer. Sistemin doğal havalı kurutucuya göre avantajlı yanı, çevre koşullarına olan bağımlılığın söz konusu olmamasıdır. Bir miktar ısınan havanın silo içinde üst tabakalara doğru doyması ve üst tabakalardaki tahılın hava sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olması sonucu tahıl taneciği üzerinde yoğuşma meydana gelebilir. Bu da beraberinde tahılın küflenme tehlikesini ortaya çıkarır. Enerji girdisi doğal havalı kurutucuya oranla daha yüksektir. Bu da kurutma maliyetini etkileyen bir faktördür (Kunze, 1985).

### 2.1.3 Yüksek Sıcaklıklı Kurutma Sistemleri

Çevre havasının, kurutma işleminden önce 10-80°C arasında ısıtıldığı sistemlere yüksek sıcaklıklı kurutucular denir. Sabit yataklı veya hareketli yataklı olmak üzere iki ayrı tipi vardır; sabit yataklı tip, silo tipi kurutucu olup tahıl kuruma sürecinde hareketsizdir, hareketli tipte ise tahıl sürekli hareket halinde olup kurutucunun bir tarafından giren nemli tahıl, çıkış bölgesinden kurumuş olarak çıkmaktadır. Bu sistemler ısı transferini ve bunun sonucunda kütle transferini arttırmak amacıyla çeşitli formlarda yapılmaktadırlar. Paralel akımlı, karşıt akımlı, çapraz akımlı kurutucular gibi. Bu tür kurutucuların üstünlükleri; kuruma hızının yüksek olması, kurutma kapasitesinin büyük olması, hava koşullarına bağımlılığın söz konusu olmamasıdır. Dezavantajları ise yatırım, bakım ve işletme giderlerinin yüksek olması, sıcaklığın iyi kontrol edilemediği koşullarda yangın tehlikesinin söz konusu olmasıdır (Steffe&Singh, 1980b).



## 2.2 Kurutmada Kullanılan Diğer Yöntemler

### **Infrared Radyant Kurutma:**

Isı, termal radyasyon, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır. Tahıl içindeki nemin buhar basıncını arttırmak için tahıl direkt olarak infrared radyasyonla ısıtılır. Isı transferi termal radyasyon yayan malzemenin yapısı ve karakteristiği ile kurutulan maddenin özelliklerine bağlıdır ve ısı verim düşük olabilir.

### **İletimle Kurutma:**

İçine tahıl konulan kabın duvarları dışarıdan ısıtılır. Böylece ısı iletimle tahıla aktarılarak tahıldaki nemin buhar basıncı artırılır ve ortam şartlarındaki havayla temas ettirilerek tahıldaki nem uzaklaştırılır.

### **Desikatörden Geçirilmiş Hava ile Kurutma:**

Hava silikajel gibi nem absorplayan bir madde üzerinden geçirilerek mutlak nemi azaltılır. Desikatörden geçirilen havanın bağıl nemi düşerek, sıcaklığı bir miktar artar. Islak tahıl üzerinden bu hava geçirilerek, havadan tahıla konveksiyonla ısı aktarılırken tahıldan havaya kütle aktarımı olmaktadır.

### **Vakum Kurutma:**

Vakum altında kurutma düşük basınçlarda suyun düşük sıcaklıklarda kaynaması gibi avantaja sahiptir. Vakum kurutma, atmosferik kurutmanın aksine su buharı basıncını düşürür ve kurutma ortamıyla ürün arasında daha büyük sıcaklık farkı sağlar. Kereste kurutulmasında ve kağıt sanayiinde uygulanmaktadır. Vakum kurutmada kerestenin geçirgenliği, nem hareketini kontrol eden baskın faktör olarak ifade edilmektedir.

### **Flaş Kurutma:**

Flaş kurutmada çok küçük yapıdaki malzeme sıcak gaz akımında dağıtılmıştır. Pigment, sentetik, reçene, gıda ürünleri ve kağıt üretiminde uygulama örnekleri vardır.

### **Püskürtmeli Kurutucular:**

Püskürtmeli kurutucular genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılır. Kuruma süreleri 5-15 saniye arasında değişir. Giriş gaz sıcaklığı 93-760°C arasında değişir.

**Dielektrik Kurutma:**

Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilir ve malzeme içinde ısı üretilir. Nemli bölgelerde, kuru bölgelere nazaran daha fazla ısı üretilir.

**Akışkan Yatakta Kurutma:**

Akışkan yataklı kurutucularda homojen bir kurutma sağlanır. Fakat kurutma için gereken havanın yanı sıra akışkanlaştırma için de hava gerektiğinden enerji tüketimi fazladır.

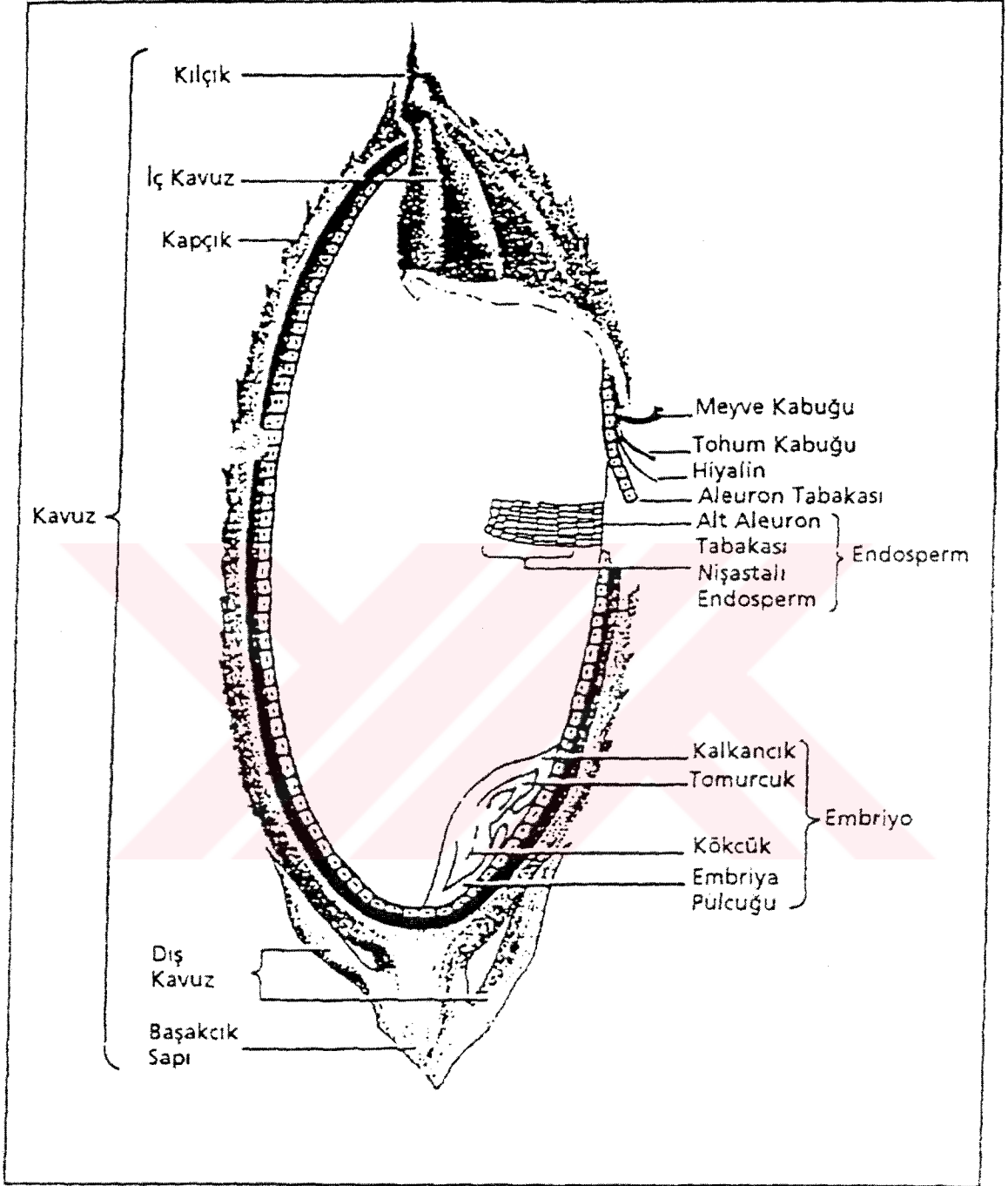
**Tepsili(Rafli) Kurutucular:**

Isı kaynağı olarak mazot kullanılır. Kurutucunun çalışması esnasında fan ısınmış havayı emer ve kurutucudaki çelikten yapılmış delikli raf boyunca üfler. Bu tip kurutucular, havanın tahıldan nem uzaklaştırma kapasitesini arttırmak için bir fırınla birlikte tasarlanırlar. Kurutma havası sıcaklığı 43°C de tutulur ve tahıl değerinin bozulmamasına dikkat edilir.

**Derin Yataklı (Silo) Kurutucular:**

Hem kurutma hem de depolama işlemleri için tasarlanan bu kurutucularda ortam şartlarındaki hava kurutma için yeterlidir. Bu tip kurutucularda hava kurutucuya alttan girip silo boyunca yukarıya doğru hareket eder. Kurutmanın başlangıcında nem aktarımının olduğu kuruma bölgesi yatağın alt kısmındadır. Bu bölgenin üstünde kalan tahıl doymuş hava ile karşılaştığından kurumaz. Kuruma işlemi süresince kuruma bölgesi yatağın alt kısmından üst kısmına doğru ilerler. Silo tipi kurutucularda düşük bağıl nemli sıcak hava kullanılıyorsa tahıl tabakasının üst bölgeleri istenilen neme erişinceye kadar alt bölgelerde aşırı kuruma meydana gelir. Yüksek bağıl neme sahip hava kullanılıyorsa, kuruma bölgesi yukarıya doğru çok yavaş ilerlediği için silonun üst kısmında kalan pirinçte küflenme görülür. Bu nedenle düşük bağıl nemli sıcak hava ve yüksek bağıl nemli hava deri yataklı kurutucular için uygun değildir. Kuruma hızı, hava hızı, yatak yüksekliği, hava sıcaklığı ve bağıl nemine bağlıdır.

## 2.3 Çeltik Danesinin Yapısı



Şekil 2.1 Çeltik danesinin yapısı (Juliano, 1985)



## 2.4 Çeltiğin Nem Oranı

Çeltiğin nem oranı, yaş ve kuru baza göre iki şekilde tanımlanır. Çeltik içindeki su kütlesinin, toplam çeltik kütlesine oranına yaş baza göre nem oranı denir.

$$m_y = \frac{M_s}{M_y} \quad (2.1)$$

Burada,  $M_s$  çeltiğin içerdiği su kütlesini,  $M_y$  yaş çeltiğin kütlesini,  $m_y$  çeltiğin yaş baza göre (yb) nem oranını göstermektedir.

Çeltik içindeki nem kütlesinin, çeltiğin kuru kütlesine oranına çeltiğin kuru baza göre nem oranı denir.

$$m = \frac{M_s}{M_k} \quad (2.2)$$

Burada,  $M_k$  çeltiğin kuru kütlesini,  $m$  çeltiğin kuru baza göre nem oranını göstermektedir.

$$M_s = M_y - M_k \quad \Rightarrow \quad m = \frac{M_y - M_k}{M_k} \quad (2.3)$$

$$m = \frac{M_y}{M_k} - 1 \quad (2.4)$$

$$m = \frac{M_s}{M_k m_y} - 1 \quad \Rightarrow \quad m = \frac{m}{m_y} - 1 \quad (2.5)$$

$$m + 1 = \frac{m}{m_y} \quad \Rightarrow \quad m = m_y(m + 1) \quad (2.6)$$

$$m = m_y m + m_y \quad \Rightarrow \quad m_y = m(1 - m_y) \quad (2.7)$$

olduğundan kuru baza göre nem oranı ile, yaş baza göre nem oranı arasında, aşağıdaki bağıntı vardır.

$$m = \frac{m_y}{1 - m_y} \quad (2.8)$$

Çeltiğın kuru baza göre nem oranı, çeltiğın değışmeyen kuru kütlesi kullanılarak tanımlandığı için, daha güvenilir bir değışkendir ve literatürde daha sık kullanılmaktadır. Bu çalışmada da kuru baza göre nem oranı kullanılmıştır. Nem oranından bahsedildiğinde bunun kuru baza göre hesaplanmış nem oranı olduğu anlaşılmalıdır.

## 2.5 Sorpsiyon İzotermi

Higroskopik maddelerin nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki dengeyi gösteren eğriye “sorpsiyon izotermi” denir.

Malzemenin iç yapısı değişik olunca, bu malzemeye ait sorpsiyon izotermi de farklı olur. Bu eğriler ancak deneysel olarak elde edilebilir. Ayrıca malzemenin çevreden sıvı alması (adsorpsiyon) veya kurutmada olduğu gibi sıvının çekilmesi (desorpsiyon) hali için elde edilen  $m=f(\varphi)$  sorpsiyon eğrileri de farklı olur. Bunun nedeni gözeneklerde sıvının artması veya azalmasına göre kapiler sıvı hareketinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

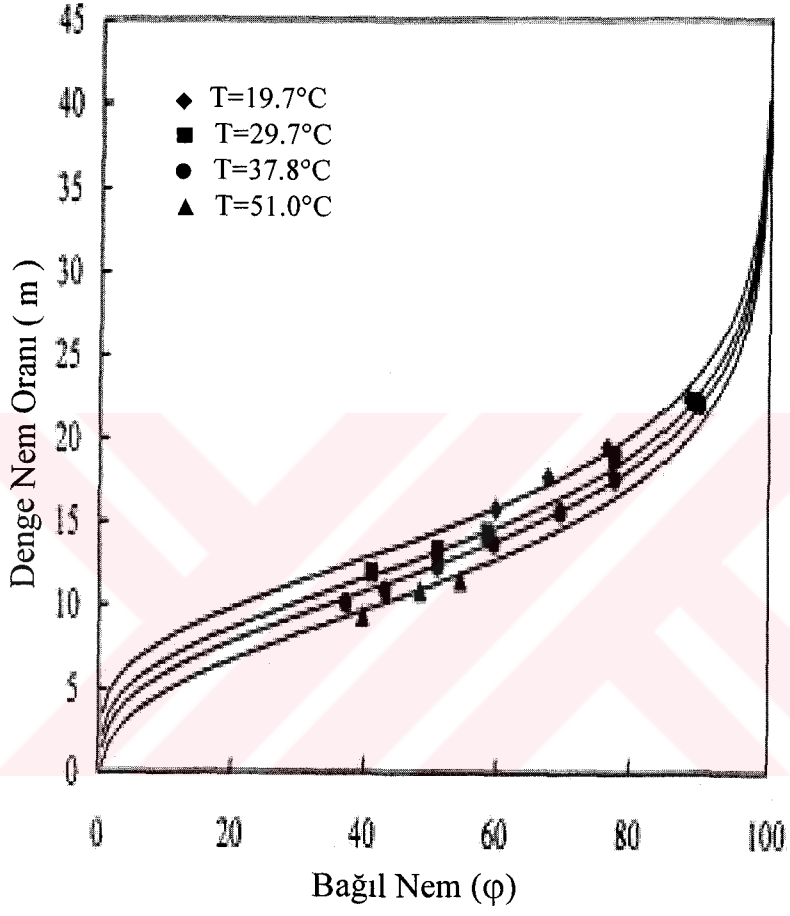
Sıcaklığın artması sorpsiyon izotermi eğrilerinin aşağı doğru kaymasına neden olur. Belirli bir  $\varphi$  değeri için sıcaklığın artışının sebep olacağı nem içeriği değişimi yaklaşık olarak aşağıdaki lineer bağıntı ile hesaplanabilir (Simmonds, 1953).

$$\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_p = K m \quad (2.9)$$

K: Orantı katsayısı

m: Nem oranı (kg)

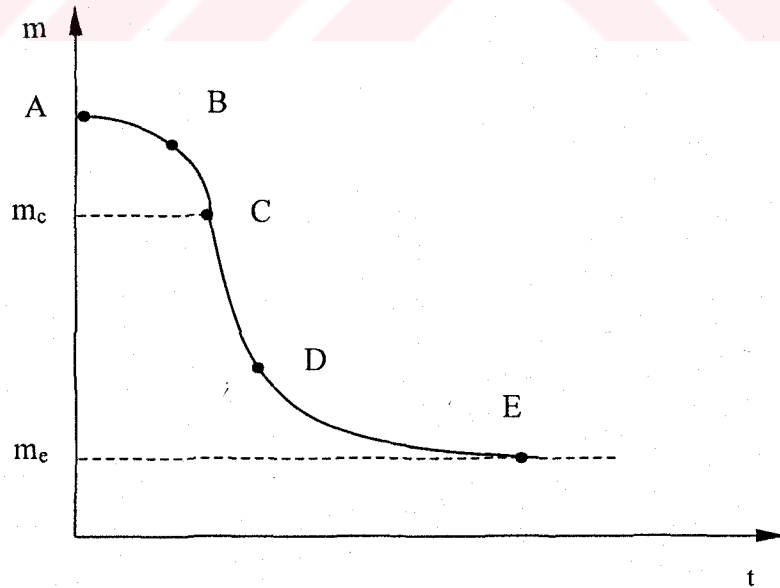
$\varphi$ : Havanın bağıl nemi



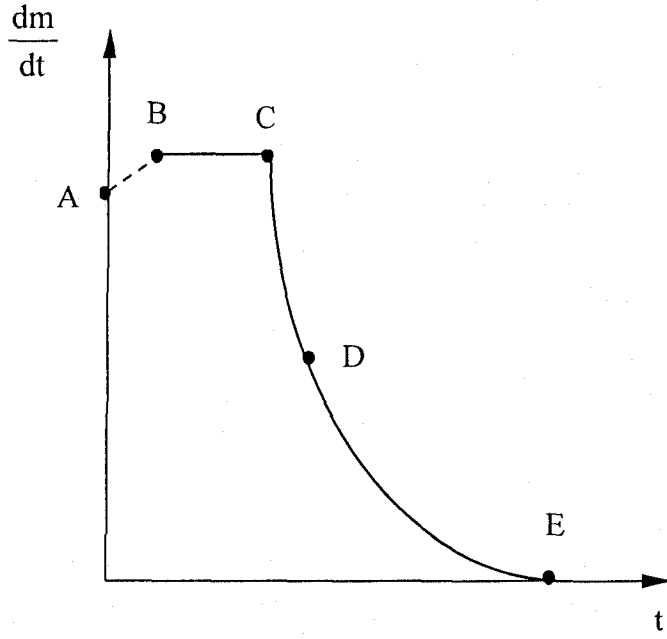
Şekil 2.2 Çeltik için değişik sıcaklıklarda sorpsiyon izotermi (Basunia&Abe, 2001)

## 2.6 Çeltiğin Kuruma Kinetiği

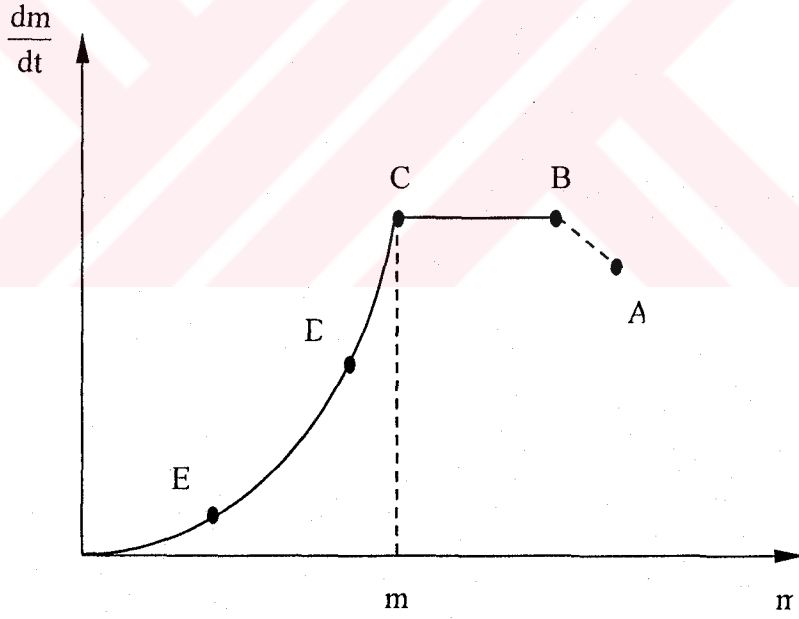
Çeltiğe ne tür bir kurutma işlemi uygulanırsa uygulansın, kuruma davranışı değişmemektedir ve kuruma hızı, kuruma sürecinde belirli periyotlarda farklılıklar göstermektedir. Yapılan incelemeler, çeltiğin kuruma hızının belirli bir nem seviyesine kadar sabit kaldığını, diğer bir deyişle birim zamanda çeltikten alınan nemin sabit kaldığını göstermektedir. Bu sürece sabit hızda kuruma süreci denir. Çeltiğin sabit hızda kuruma süreci sonundaki nem oranına, çeltiğin kritik nemi denir. Kritik nem seviyesinden daha az oranda nem içeren çeltiklerde ise kurutma zamanı arttıkça çeltikten alınan nemin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sürece azalan hızda kuruma süreci adı verilmektedir. Bir çok tahılda azalan hızda kuruma sürecinin birkaç kademede olduğu bilinmektedir. Bu süreçler, 1. azalan hızda kuruma süreci, 2. azalan hızda kuruma süreci şeklinde isimlendirilmiştir. Şekil 2.3' de çeltiğin kuruma oranı eğrisi gösterilmektedir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5' de ise çeltiğin kuruma hızının zamana göre değişimi ile kuruma hızının nem oranıyla değişimi verilmiştir (Chen ve Johnson, 1969). Şekillerden de görüleceği gibi farklı periyotlarda birbirinden farklı davranış gösteren kuruma sürecinde AB aralığı ısıtma veya soğutma sürecini, BC aralığı sabit hızda kuruma sürecini, CD aralığı 1.azalan hızda kuruma sürecini, DE aralığı ise 2. azalan hızda kuruma sürecini göstermektedir.



Şekil 2.3 Higroskopik maddelerin kuruma oranı eğrisi



Şekil 2.4 Higroskopik maddelerin kuruma hızının zamanla değişimi



Şekil 2.5 Higroskopik maddelerin kuruma hızının nem oranıyla değişimi

### 2.6.1 Sabit Hızda Kuruma Süreci

Nemli veya ıslak malzemelerin dış yüzeyinde, bütün sıvı yüzeylerinde olduğu gibi, bir doymuş hava filmi oluşur. Bu doymuş havanın sıcaklığı, havanın yaş termometre sıcaklığıdır. Doymuş hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı  $P_{bo}$ , dış hava içindeki (malzemeyi kurutan) su buharının kısmi basıncı da  $P_{bo}$  olmak üzere birim malzeme yüzeyinden, birim zamanda buharlaşan nem miktarı  $M_b$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$M_b \cong \frac{h'}{R_b T} (P_{bo} - P_{bo}) \quad (2.10)$$

Burada  $h'$  kütle transfer katsayısı [m/s] olup,

$$h' = \frac{D}{\delta} \quad (2.11)$$

şeklinde tanımlıdır. Burada  $\delta$  derişiklik sınır tabaka kalınlığı [m],  $D$  difüzyon katsayısıdır [ $m^2/h$ ],  $R_b$  su buharı gaz sabiti [kJ/kg K] ve  $T$  mutlak sıcaklıktır [K].

Dış şartlar sabit kaldığı sürece  $P_{bo}$ ,  $P_{bo}$  basınçları sabit kalırlar ve kuruma sabit bir hızda devam eder. Malzeme yüzeyine gelen sıvı beslemesi azalmaya başladığı an azalan hızda kuruma süreci başlar.

Sabit hız bölgesinde, serbest nem yüzeyde veya büyük kılcal kanallarda bulunur ve kısmi basıncı ortam şartlarındaki buhar basıncına eşittir. Materyalin yüzey sıcaklığı, havanın yaş termometre sıcaklığına yaklaşır. Sabit hız bölgesinde materyalden ortama olan kütle aktarım hızı, ortamdaki materyale olan ısı aktarım hızına eşittir ve kütle aktarımı için itici güç katı yüzey ile ortam arasındaki nemlilik farkı, ısı aktarımı için de ortam ile katı yüzey arasındaki sıcaklık farkıdır. Sabit hız bölgesinde konsantrasyon ve sıcaklık itici güçleri sabit kaldığı için kuruma hızı sabittir. Hasat edilmiş çeltikte sabit hızda kuruma süreci nem oranının çok büyük olmaması nedeniyle söz konusu olmaz (Simmonds, 1953).

## 2.6.2 Azalan Hızda Kuruma Süreci

Azalan hızda kuruma süreci, sabit hızda kuruma sürecinin ardından ortaya çıkar. Sabit hızda kuruma sona erdiğinde çeltiğin kuruma hızı azalmaya ve cismin yüzeyinde kuru bölgeler meydana gelmeye başlar. Kurutma başlangıcından itibaren cismin yüzeyindeki ilk kuru bölgenin görüldüğü ana kadar geçen süreye “Kritik nem miktarına ulaşma zamanı” bu anda cismin bünyesinde bulunan nemin cismin kuru kütlelerine oranına “Kritik nem oranı” denir.

Kritik noktadan itibaren kurutma havasından, yaş cisme transfer edilen ısı miktarı ile yaş cisimden kurutma havasına transfer olan nem miktarı arasındaki denge bozulur ve ısı transferindeki küçük azalmalara karşın, kütle transferinde de büyük azalmalar olur. Bu olay kurutma prosesinin sonuna kadar böylece devam eder ve kurutma hızı sürekli olarak azalır. Kurutma hızının sürekli olarak azaldığı bu sürece “Azalan Hızda Kuruma Süreci” denir. Azalan hızda kuruma süreci geniş ölçüde ürün tarafından kontrol edilmektedir yani dış şartlardan bağımsız olarak gerçekleşir.

Gıda maddelerinde azalan hızda kuruma süreci gıda maddesinin türüne göre çeşitli durumlar gösterebilir. Bunlar birinci ve ikinci azalan hız periyotlarıdır. Gözeneksiz higroskopik cisimlerde azalan hız sürecinde konsantrasyon farkı nedeniyle sıvı difüzyonu vasıtasıyla cismin içerisinden yüzeye doğru bir nem hareketi meydana gelir. Kuruma hızı cismin yüzeyi ile iç bölge arasındaki konsantrasyon farkına göre süreç içerisinde azalarak devam eder. Cisim içerisinde ince ve kalın kılcallar vardır. Birinci azalan hız sürecinde kuruma ince kılcallarda gerçekleşir. Kalın kılcallar ince kılcallara su takviyesi yaparlar. İkinci azalan hız sürecinde artık kalın kılcallarda hiç su kalmamıştır ve kurutma ince kılcalda devam eder (Simmonds, 1953).



### 3. MATEMATİKSEL MODEL ve ANALİZ

Çeltiğin kuruma davranışını simüle etmek amacıyla, çeltik tanesinin küre, silindir veya elipsoid geometrisine sahip olduğu kabul edilebilir. Zira daha önce yapılan çalışmalarda, çeltik tanesinin küre veya silindir olduğu varsayılarak, 2. Fick yasasına dayanan daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denklemi teorik olarak çözülmüş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştı. Bu çalışmada da küre, silindir ve elipsoid için mevcut analitik çözümler kullanılarak teorik sonuçlar elde edilecek ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak difüzyon katsayıları belirlenecektir. Çeltik için ele alınan geometrik modellerin sıvı difüzyon denkleminin analitik çözümleri aşağıda verilmektedir.

#### 3.1 Küre Modeli

Aguerre vd. (1982), Luikov (1968) tarafından elde edilen daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denkleminin analitik çözümünü kullanarak, çeltik tanesinin bir küre geometrisinde olduğu varsayımıyla, çeltik için teorik kuruma değerlerini elde etmişlerdir. Yapılan analizde çeltik tanesinin difüzyon direncinin üniform olduğu kabul edilmiştir. Aguerre vd. (1982), yaptıkları bu çalışmada hasat çeltiği ile, namlendirilerek hasat şartlarına getirilen çeltiğin kuruma davranışının farklı olmadığını ifade etmişlerdir ve teorik sonuçlarla 12-18 m/s arasındaki hava hızlarında yapılmış olan deneysel sonuçları karşılaştırarak, kurutma havası hızının değişmesinin çeltiğin kuruma hızına pek etki etmediği sonucuna varmıştır. Hava akımının kuruma üzerindeki tek etkisi tane yüzeyine ulaşan nemin yüzeyden uzaklaşmasına yardımcı olmaktan ibarettir. Küre modelindeki çeltik tanesinin geometrisi ve koordinat sistemi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

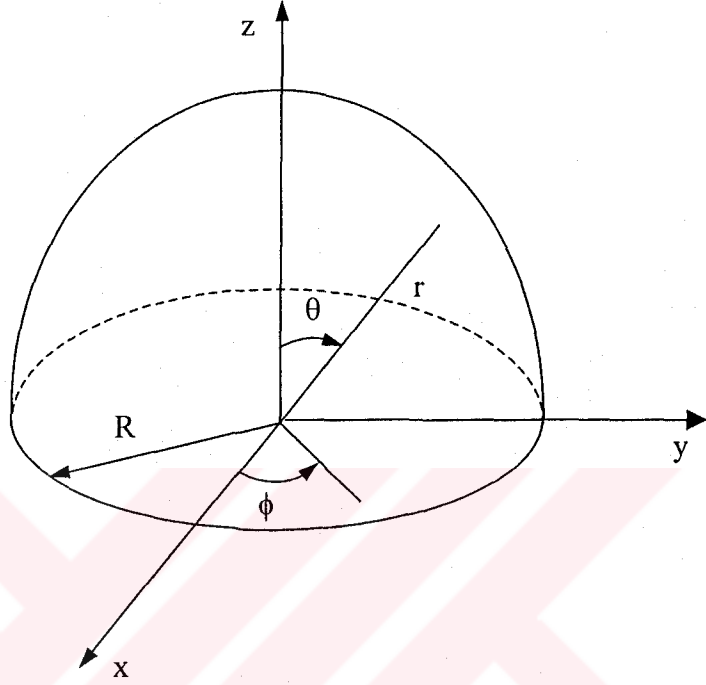
Daimi olmayan rejimde iki bileşenli sistemler için 2. Fick kanunu aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (3.1)$$

Küresel koordinatlarda 2. Fick kanunu;

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right] \quad (3.2)$$

burada C volümetrik nem konsantrasyonu, D sıvı difüzyon katsayısı, t zaman ve r radyal yöndeki boyutlu değişkendir.



Şekil 3.1 Küre geometri ve koordinat sistemi

(3.2) denklemin sınır şartları;

kurutma başlangıcında, çeltik tanesi içindeki nem konsantrasyonunun üniform olduğu kabul edilir.

$$C(0, r) = C_0 \quad (3.3)$$

Çeltik yüzeyi üzerindeki nem konsantrasyonunun, kuruma prosesinin başlamasıyla, ani olarak denge nemi değerine ulaştığı kabul edilir.

$$C(t, R) = C_e, \quad t > 0 \quad (3.4)$$

Simetri şartları ise,

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (3.5)$$

Bu sınır şartları altında sıvı difüzyon denkleminin analitik çözümü Luikov (1968) tarafından aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$\frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D t}{R^2}\right) \quad (3.6)$$



### 3.2 Sonlu Silindir Modeli

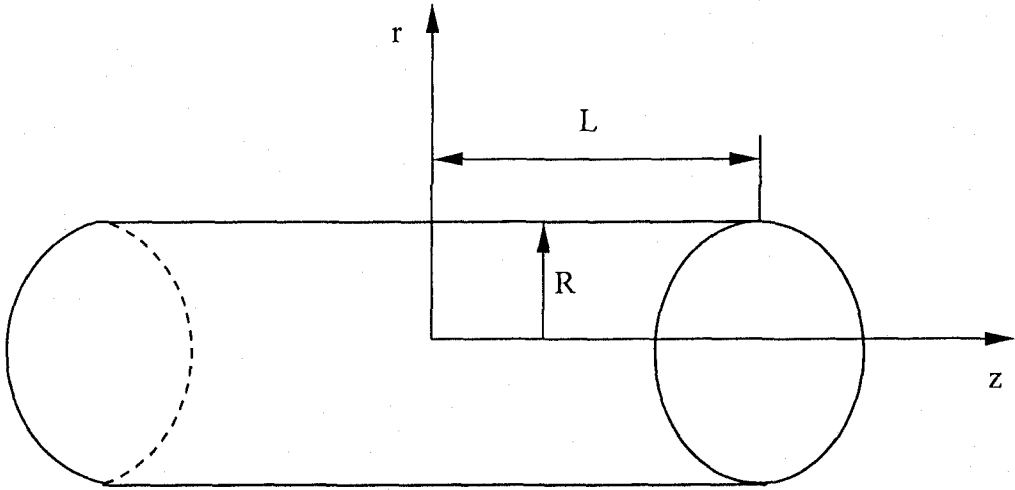
Çeltiğin kuruma davranışını simüle etmek amacıyla, çeltik tanesinin silindir geometrisine sahip olduğu kabulüyle daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denklemi, Ece ve Cihan (1993) tarafından teorik olarak çözülmüştür. Bu modelde çeltik tanesi geometrisi R yarıçapında ve 2L uzunluğunda sonlu bir silindir olarak ele alınmıştır. Geometri ve koordinat sistemi Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Çeltikten nem atılması olayının sıvı difüzyonu ile gerçekleştiği kabul edilmiş ve kuruma süreci 2. Fick yasasına dayanan daimi olmayan rejimde sıvı difüzyon denklemiyle ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

Burada C volümetrik nem konsantrasyonu, D sıvı difüzyon katsayısı, t zaman, r ve z sırasıyla, radyal ve aksel yönlerdeki boyutlu değişkenlerdir. Cihan (1991) rocco tipi çeltik için yaptığı deneysel çalışmada çeltik tanesinin sıcaklığının, kurutma işleminin yapılmaya başlanmasından çok kısa bir süre sonra, kurutma sıcaklığına eriştiğini gözlemlemiştir. Becker ve Sallans'ın (1955) buğday kurutma ile ilgili deneysel çalışmaları da tane sıcaklığının hava sıcaklığına çok kısa bir sürede eriştiğini göstermektedir. Vaccazera vd. (1975) ve Augerre vd. (1982) yaptıkları çalışmalarda tane içindeki sıcaklık değişimlerinin ihmal edilebilir olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle yapılan teorik incelemede çeltiğin kurutma sürecinde izotermal olduğu varsayılır.

Ece ve Cihan'da Augerre gibi, kurutma başlangıcında çeltik içinde nem konsantrasyonunun üniform olduğunu kabul etmiştir.

$$C(0, r, z) = C_0 \quad (3.8)$$



Şekil 3.2 Silindir geometri ve koordinat sistemi

Ayrıca çeltik yüzeyinde nem konsantrasyonunun, kuruma prosesinin başlamasıyla, ani olarak denge nemi değerine ulaştığı kabul edilir.

$$C(t,R,z)=C_e \quad , \quad C(t,r,\pm L)=C_e \quad , \quad t > 0 \quad . \quad (3.9)$$

Simetri şartları ise

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad , \quad \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad , \quad (3.10)$$

şeklindedir. Analizlerde kullanılan boyutsuz değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$c = \frac{C - C_e}{C_o - C_e} \quad , \quad \xi = \frac{r}{R} \quad , \quad \eta = \frac{z}{L} \quad , \quad \tau = \frac{D}{R^2} t \quad , \quad \ell = \frac{L}{R} \quad , \quad (3.11)$$

Böylece difüzyon denklemi

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial c}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} \quad , \quad (3.12)$$

formunu almış

$$c(0, \xi, \eta) = 1 \quad , \quad (3.13)$$

başlangıç şartı ile

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0 \quad , \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = 0 \quad , \quad (3.14)$$

$$c(\tau, l, \eta) = 0 \quad , \quad c(\tau, \xi, \pm l) = 0 \quad , \quad \tau > 0 \quad , \quad (3.15)$$

sınır şartları seçilmiştir.

Değişkenlerine ayrılabilir bir diferansiyel denklem olan boyutsuz sıvı difüzyon denkleminin çözümü için

$$c(\tau, \xi, \eta) = F(\tau)G(\xi)H(\eta) \quad , \quad (3.16)$$

tanımlanmıştır. Bu eşitlik (3.12) ile tanımlı sıvı difüzyon denklemi içine yerleştirilmiş ve

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{d\tau} = \frac{1}{G} \left( \frac{d^2 G}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dG}{d\xi} \right) + \frac{1}{H} \frac{d^2 H}{d\eta^2} \quad , \quad (3.17)$$

elde edilmiştir. Bu denklemde eşitliğin sol tarafındaki ifade sadece  $\tau$  değişkeninin, sağ tarafındaki ifadeler ise ayrı ayrı sadece  $\xi$  ve  $\eta$  değişkenlerinin fonksiyonlarıdır. Eşitliğin sağlanması için ifadelerin her biri bir sabite eşit olmalıdır. Bu sabitler  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  ile gösterilirse F, G ve H fonksiyonları için

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{d\tau} = -\gamma^2 \quad , \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{H} \frac{d^2 H}{d\eta^2} = -\beta^2 \quad , \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 G}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dG}{d\xi} = -\alpha^2 G \quad , \quad (3.20)$$

denklemleri elde edilir. (3.18) ve (3.19) diferansiyel denklemlerinin çözümleri  $b_1$ ,  $b_2$  ve  $b_3$  integrasyon sabitleri olmak üzere

$$F = b_1 e^{-(\alpha^2 + \beta^2)\tau} , \quad (3.21)$$

$$H = b_2 \cos(\beta\eta) + b_3 \sin(\beta\eta) , \quad (3.22)$$

şeklinde kolayca elde edilebilir. (3.20) denklemi  $\zeta = \alpha\xi$  dönüşümü ile sıfıncı mertebe Bessel denklemi haline gelir.

$$\zeta^2 \frac{d^2 G}{d\zeta^2} + \zeta \frac{dG}{d\zeta} + \zeta^2 G = 0 . \quad (3.23)$$

$b_4$ ,  $b_5$  integrasyon sabitleri ve  $J_0$ ,  $Y_0$  sıfıncı mertebe Bessel fonksiyonları olmak üzere (3.23) Bessel denkleminin çözümü

$$G = b_4 J_0(\zeta) + b_5 Y_0(\zeta) , \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. (3.18) ve (3.20) denklemleri için elde edilen çözümler (3.16) eşitliği içine yerleştirilirse, boyutsuz sıvı difüzyon denkleminin çözümü

$$c = b_1 e^{-(\alpha^2 + \beta^2)\tau} [b_2 \cos(\beta\eta) + b_3 \sin(\beta\eta)] [b_4 J_0(\alpha\xi) + b_5 Y_0(\alpha\xi)] , \quad (3.25)$$

şeklinde elde edilir. (3.14) ile verilen sınır şartlarının uygulanmasıyla,  $b_3$  ve  $b_5$  integrasyon sabitlerini içeren terimlerin çözümde olmaması gerekliliği ortaya çıkar. (3.15) ile tanımlı sınır şartlarının uygulanmasıyla

$$\cos(\beta\ell) = 0 , \quad J_0(\alpha\xi) = 0 , \quad (3.26)$$

elde edilir. Bu eşitliklerden birincisinin sağlanması için

$$\beta_i = \frac{(2i-1)\pi}{2\ell} , \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.27)$$

olmalıdır. Diğer parametre  $\alpha$  da,  $J_0$  fonksiyonunun köklerinin değerlerini almalıdır. Sonuç olarak çözüm  $\alpha$  ve  $\beta$  değerlerinin tümü üzerinden bir toplam olarak

$$c = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_i a_j e^{-(\alpha_i^2 + \beta_j^2)\tau} J_0(\alpha_j \xi) \cos(\beta_i \eta) \quad , \quad (3.28)$$

şeklinde yazılabilir. (3.13) ile verilen başlangıç şartı uygulanır ve (3.28) denkleminde bulunan Fourier ve Bessel fonksiyonları için ortogonalite özelliği kullanılırsa

$$a_i = \frac{2}{\ell \beta_i} (-1)^{i+1} \quad , \quad a_j = \frac{2}{\alpha_j} \frac{1}{J_1(\alpha_j)} \quad , \quad (3.29)$$

olarak elde edilir ki burada  $J_1$ , birinci mertebe Bessel fonksiyonudur. Böylece boyutsuz sıvı difüzyon denkleminin çözümü

$$c = \frac{4}{\ell} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1}}{\alpha_j \beta_i J_1(\alpha_j)} e^{-(\alpha_j^2 + \beta_i^2)\tau} J_0(\alpha_j \xi) \cos(\beta_i \eta) \quad , \quad (3.30)$$

şeklinde elde edilir.  $J_k(x)$ , k. mertebe Bessel fonksiyonu olmak üzere,  $\alpha_j$  ( $j=1,2,\dots$ )  $J_0(x)$  Bessel fonksiyonunun kökleridir ve Abromowitz&Stegun (1972) tarafından tablolar halinde verilmiştir.

Herhangi bir andaki, başlangıçtaki ve denge nem oranları, sırasıyla,  $m$ ,  $m_0$  ve  $m_e$  ve çeltik tanesinin hacmi  $V$  olmak üzere

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{1}{V} \int_V c dV \quad , \quad (3.31)$$

yazılabilir. (3.31) denklemini  $V=2\pi R^2 L$  alınarak integre edilirse

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\ell^2} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_j^2 \beta_i^2} e^{-(\alpha_j^2 + \beta_i^2)\tau} \quad , \quad (3.32)$$

elde edilir.

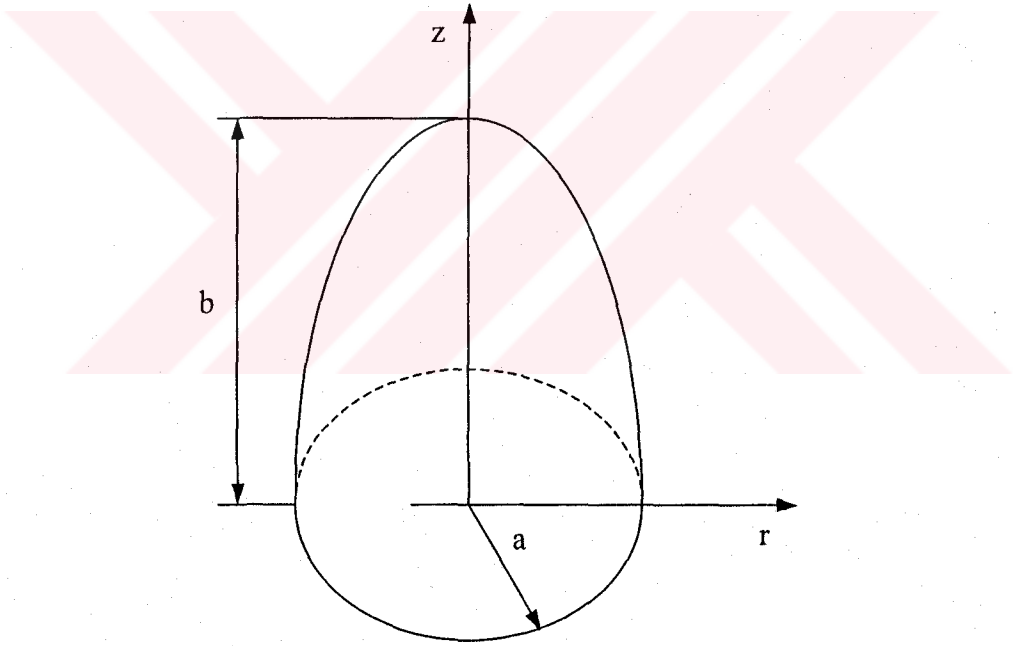


### 3.3 Elipsoid Modeli

Lima&Farias (2003), sıvı difüzyon modelini kullanarak elipsoidal cisimler için difüzyon katsayısını sabit ve cismin yüzeyinde denge sınır şartlarını göz önüne alarak integral metodu vasıtasıyla, difüzyon denklemlerinin analitik bir çözümünü elde etmiştir.

İki boyutlu durum için silindirik koordinatlarda difüzyon denklemi aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3.33)$$



Şekil 3.3 Elipsoid geometri ve koordinat sistemi

(3.33) numaralı denklem için, başlangıç ve sınır şartları aşağıdaki gibidir.

$$C(0, r, z) = C_o \quad (3.34a)$$

$$C(t, r, z) = C_e \quad (3.34b)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{t, 0, z} = 0 \quad (3.34c)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{t, r, 0} = 0 \quad (3.34d)$$

Başlangıçta tane içindeki nem konsantrasyonunun üniform olduğu ve kuruma prosesinin başlamasıyla yüzeyin ani olarak denge nemine ulaştığı varsayılmaktadır.

(3.34a-d) ile verilen başlangıç ve sınır şartlarına bağlı olarak (3.33) numaralı denklemin çözümü için aşağıdaki boyutsuz parametreler tanımlanmıştır.

$$r^* = \frac{r}{a}; \quad z^* = \frac{z}{a}; \quad V^* = \frac{V}{a^3}; \quad c = \frac{C - C_e}{C_o - C_e}; \quad \tau = \frac{Dt}{a^2} \quad (3.35a-e)$$

Difüzyon katsayısının sabit olduğu varsayılarak, boyutsuz formda difüzyon denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla^2 c \quad (3.36)$$

(3.35a-e) denklemlerinde, “a” cismin karakteristik boyutudur. (3.36) denkleminin çözümü Payne vd. (1986) tarafından aşağıdaki gibi verilir:

$$c(r^*, z^*, \tau) = \sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r^*, z^*) e^{-\gamma_n \tau} \quad (3.37)$$

burada  $\gamma_n$  n. özdeğer ve  $C_n$  ise bir sabittir. Cismin sonlu boyutlara sahip olduğu varsayılmıştır.

Galerkin esaslı integral metodu kullanılarak (Beck vd., 1992),  $\psi_n(r^*, z^*)$  fonksiyonu homojen sınır koşullarını sağlayacak şekilde seçilir. (3.37) numaralı eşitlik, (3.36) numaralı denklemin çözümü olarak verildiğinden, (3.36) numaralı denklemini sağlamalıdır.

(3.37) denkleminin, (3.36) denkleminde yerine yazılmasıyla, ifade edilen bu son şart sağlanır.

$$\nabla^2 \psi_n(r^*, z^*) + \gamma_n \psi_n(r^*, z^*) = 0 \quad (3.38)$$

Bu durumda difüzyon denklemi, bir özdeğer problemi haline gelmektedir ve  $\psi_n(r^*, z^*)$  fonksiyonu özfonksiyon olacaktır.  $\psi_n(r^*, z^*)$  fonksiyonu, fonksiyonlar kümesinin lineer kombinasyonu olarak tanımlıdır. Bu fonksiyonlar kümesinin elemanları geçerli sınır koşullarını sağlayacak şekilde lineer bağımsızdır. Böylece bu fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\psi_n(r^*, z^*) = \sum_{n=1}^N d_{nj} f_j(r^*, z^*) \quad (3.39)$$

Burada  $f_j(r^*, z^*)$  ana fonksiyonlar kümesinin bir elemanıdır ve  $d_{nj}$  değerleri sabittir.

$f_j$  fonksiyonu Galerkin fonksiyonu olarak adlandırılır ve  $\psi_n(r^*, z^*)$  fonksiyonu ile fonksiyonların tam kümesindeki bir elemanla çarpılarak elde edilir.  $f_j$  fonksiyonu  $j=1,2,\dots,N$  ana fonksiyonlar kümesinin elemanlarından biridir.

1. tip sınır şartına karşılık gelecek şekilde ana fonksiyonların seçimi literatürde (Kantorovich&Krylov, Özışık, Haji-Sheikh&Mashena ve Beck, 1992) verilmiştir. Ana fonksiyonlardan herbiri cismin sınırında sıfıra yaklaşmaktadır. Cismin içerisinde bir noktada ana fonksiyonların hepsi olmasa da bir kısmı sıfıra yaklaşmalıdır.

(3.38) denkleminin heriki tarafının  $f_i dV^*$  ile çarpılması ve hacim üzerinden integraline karşılık gelen Galerkin metodu kullanılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\int_V f_i \nabla^2 \psi_n dV^* + \gamma_n \int_V f_i \psi_n dV^* = 0 \quad (3.40)$$

(3.39) denklemi, (3.40) numaralı eşitlikte yerine yazılıp, elde edilen denklem cismin hacmine bölünürse,

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} \left[ \frac{1}{V^*} \int_V f_i \nabla^2 f_j dV^* + \gamma_n \frac{1}{V^*} \int_V f_i f_j dV^* \right] = 0 \quad i=1,2,\dots,N. \quad (3.41)$$

elde edilir. (3.41) denklemi matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (3.42)$$

burada  $\bar{A}$  ve  $\bar{B}$  NxN elemanlı kare matrislerdir.  $\bar{A}$  ve  $\bar{B}$  matrisinin elemanları aşağıdaki şekilde verilir.

$$a_{ij} = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} f_i \nabla^2 f_j dV^* \quad (3.43a)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} f_i f_j dV^* \quad (3.43b)$$

(3.39) denkleminde yer alan  $d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nN}$  katsayıları, (3.42) denklemindeki  $\bar{d}_n$  vektörünün elemanlarıdır.  $\bar{B}$  matrisinin simetrik olduğu görülmektedir ve böylece  $b_{ij} = b_{ji}$  dir.  $\bar{A}$  matrisi de simetriktir.

(3.42) denkleminde elde edilen lineer denklemler homojen olduklarından  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$  ve  $(\bar{A} + \gamma \bar{B})$  matrisinin determinantı sıfır yapan değerlere karşılık gelecek şekilde elde edilirler.  $\gamma_n$  elde edildikten sonra, bu özdeğerlere karşılık gelen  $d_{nj}$  katsayıları elde edilebilir.

Genelliği kaybetmeden (3.42) denklemindeki simultane denklemlerin homojen olmaları nedeniyle,  $d_{nj}$  katsayılarından bir tanesi 1'e eşit olacak şekilde keyfi seçilebilir. Böylece  $d_{n2}, d_{n3}, \dots, d_{nN}$  katsayılarını elde etmek için N-1 bilinmeyenli N-1 denklem sistemi söz konusu olur.

$\gamma_n$  özdeğerleri belirlendikten sonra denklem (3.34a) ile verilen başlangıç şartı kullanılarak bu özdeğerlere karşılık gelen  $C_n$  katsayıları elde edilebilir. Böylece  $\tau = 0$  da (3.37) denkleminde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$c(r^*, z^*) = \sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r^*, z^*) \quad (3.44)$$

(3.44) denkleminin her iki tarafı  $f_i dV^*$  ile çarpılır ve hacim üzerinden integre edilirse,

$$\int_{V^*} f_i c(r^*, z^*) dV^* = \int_{V^*} \sum_{n=1}^N f_i C_n \psi_n(r^*, z^*) dV^* \quad (3.45)$$

elde edilir.

(3.45) denkleminin sonucu, N tane  $C_1, C_2, \dots, C_n$  bilinmeyenler olmak üzere lineer cebirsel denklem sistemini oluşturur.

c büyüklüğünün ortalama değeri Whitaker (1980), tarafından verilmektedir:

$$\bar{c} = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} c(r^*, z^*, \tau) dV^* \quad (3.46)$$

Cismin konturları, aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.47)$$

$r^2 = x^2 + y^2$  olduğu için, (3.47) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$z = b \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (3.48)$$

Denklem (3.35a-e)' de tanımlanan boyutsuz parametreleri kullanarak,

$$z^* = \frac{b}{a} \sqrt{1 - (r^*)^2} \quad (3.49)$$

elde edilir.

Boyutsuz formdaki başlangıç ve sınır şartları aşağıdaki gibidir.

$$c(\tau = 0, r^*, z^*) = 1 \quad (3.50a)$$

$$c\left(\tau, r^* = 1, z^* = \frac{b}{a} \sqrt{1 - (r^*)^2}\right) = 0 \quad (3.50b)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial z^*} \right|_{\tau, 0, z^*} = 0 \quad (3.50c)$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial r^*} \right|_{r^*, z^*, 0} = 0 \quad (3.50d)$$

$f_j$  ana fonksiyonlar aşağıdaki gibidir.

$$f_j(r, z) = \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right) r^{(p-q)} z^q \quad (3.51)$$

(3.51) numaralı eşitlik boyutsuz formda tekrar yazılırsa,

$$f_j(r^*, z^*) = \left[ 1 - (r^*)^2 - \frac{a^2}{b^2} (z^*)^2 \right] a^p (r^*)^{p-q} (z^*)^q \quad (3.52)$$

elde edilir.

Burada  $p=0, 2, 4, \dots, NP$  ve  $q=0, 2, 4, \dots, p$  dir. Bu çalışmada  $NP=8$ 'e karşılık gelen 15 ana fonksiyon kullanılmıştır. Bu ana fonksiyonlar ortogonal değildir fakat Payne vd. (1986)'e göre  $\psi_n$  fonksiyonları ortogonaldir.

Prolate ve oblate spheroid geometriler için yüzey alanı (S) ve hacim (V) hesaplamalarında aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir (Beyer, 1987).

$$S = 2\pi a^2 + \frac{2\pi ab}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}} \sin^{-1} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right) \quad (3.53)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (3.54)$$

## 4. DENEY TESİSATI ve PROSEDÜRÜ

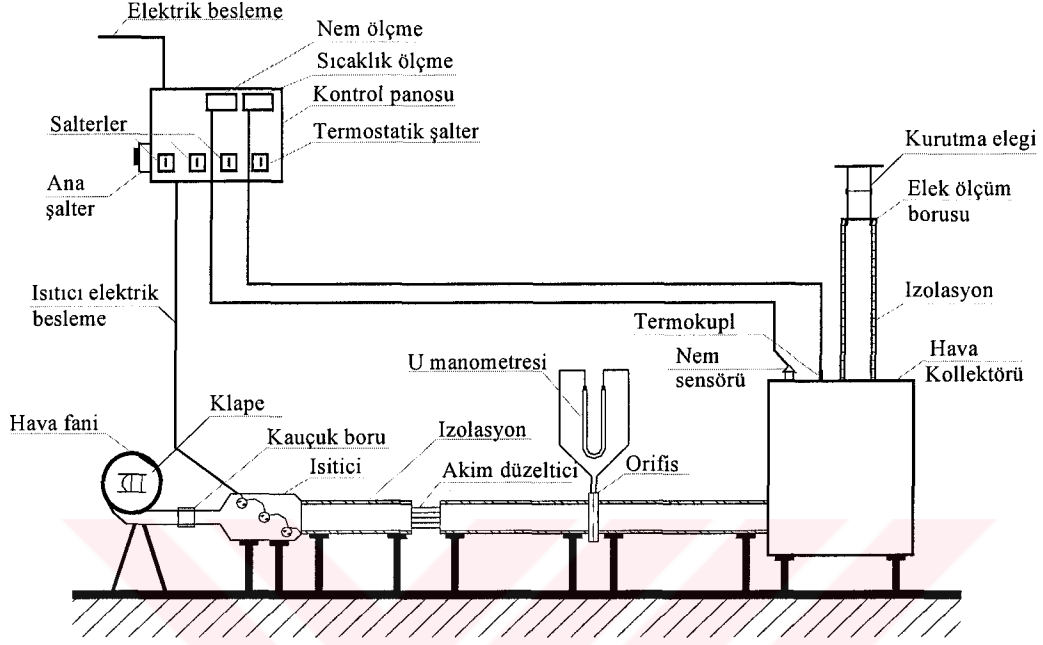
### 4.1 Deney Tesisatı ve Ölçüm Elemanları

Deney tesisatı bir hava fanı, elektrikli ısıtıcılar, bir hava kanalı, bir kurutma odası, dört kurutma eleği ve kurutma havası sıcaklığı, hızı ve hacimsel debisini belirlemede kullanılan ölçüm elemanlarından oluşmaktadır. Deney tesisatı ve aparatlarının şematik şekli Şekil 4.1' de gösterilmektedir.

Kurutma havası  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  hacimsel debi sağlayan 2 kW gücünde bir fanla yatay kanallardan geçirilmek suretiyle kurutma odasına gönderilmektedir. Havanın hacimsel debisini istenilen değerlere ayarlamak amacıyla fan girişine bir klape monte edildi. Kurutma havası, fan çıkışındaki ısıtıcıda bulunan üç adet 1 kW ve üç adet 1.5 kW gücünde Cr-Ni elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmaktadır. Hava sıcaklığını otomatik olarak izlemek amacıyla 1 kW gücündeki ısıtıcılardan birine bir termostat bağlandı. Diğer ısıtıcılar ise kontrol paneline yerleştirilmiş olan şalterler aracılığıyla elle kontrol edildi. Kanal boyunca uniform akış sağlamak amacıyla, kanalın ısıtıcılardan sonraki kısmı içerisine 20 cm uzunluk ve 6 mm çapında çelik borular yerleştirildi. Debi ölçer, akım düzenleyicisine 2 m ve kollektöre 1.5 m mesafede monte edildi. Hava debisi, daralma oranı 0.5 olan keskin kenarlı bir dairesel orifise bağlı etil alkol içeren bir U manometresi kullanılmak suretiyle basınç düşüşü ölçülerek hesaplandı.

Hava kanalı 2 m x 1.5 m x 1.5 m ebatlarındaki kollektöre bağlandı. Kurutma odası içerisine yerleştirilen bir nem sensörü ve termokupl vasıtasıyla kurutma havası sıcaklığı ve nemi kontrol paneli üzerinden dijital olarak okundu. Dört adet 10 cm çapında ölçüm borusu flanşlarla kollektöre bağlandı. Kollektörden çıkan sıcak hava akımının uniform hale gelmesine olanak sağlamak amacıyla ölçüm borularının her birinin boyu 1 m alınmış olup yüzeyi ısı kayıplarına karşı izole edildi. Çeltikleri ölçüm borusu üzerine koyarak kurutmak amacıyla katman yüksekliklerine eşit uzunluklarda PVC borulardan elekler imal edildi. Elek tellerinin aralıkları mümkün olduğunca büyük alınarak hava akış kesitinin daraltılmamasına çalışıldı. Elek telleri bir kasnak vasıtasıyla PVC boruya perçinle tutturuldu. Kasnağın 10 mm uzunluğundaki kısmı elek tellerinden daha aşağıda alınarak bu kısmın ölçüm borusuna tatlı bir sıklıkta geçmesine olanak sağlandı. Elek ile ölçüm borusu, sızdırmazlığının sağlanması amacıyla kauçuk malzeme ile sıkıca sarıldı. Deney tesisatı için yapılan kontrol panelinde 1 adet sıcaklık çeviricisi ve göstergesi, 1 adet bağıl nem çeviricisi ve göstergesi ile ısıtıcıları

kumanda eden 4 adet şalter bulunmaktadır. Sıcaklık çeviricisi ve göstergesi, hava kollektörüne yerleştirilen NiCr-Ni termokupl sayesinde, kurutma havası sıcaklığının deney süresince gözlemlenmesini sağladı.



Şekil 4.1 Şematik kurutma deney tesisatı

Kullanılan termostat sayesinde kontrol paneli üzerine yerleştirilmiş olan sıcaklık göstergesinde sıcaklık istenilen bir değere ayarlanarak deney boyunca sıcaklığın bu değere yakın değerlerde kalması sağlandı. Hava kollektörüne yerleştirilen E-RH-101 nem sensörü ile, kurutma havası bağıl nemi, Elimko 4000 bağıl nem göstergesinden sürekli olarak izlendi.

Hava hızının klape ile ayarlanan değerlerde olup olmadığı, eleklerin çıkışındaki hava hızı 0.6÷40 m/s aralığında, 0.1 m/s hassasiyette bir dijital anemometre ile ölçülerek kontrol edildi.



## 4.2 Çeltiğin Hazırlanması

Deneylerde kullanılacak çeltik Türkiye Ziraî Araştırma Kurumu'ndan temin edilmiştir. Deneylere başlamadan önce çeltik, arzulanan deney şartlarında olması için aşağıda anlatılan işlemlerden geçirildi. Deney tesisatı çalıştırılıp, hava hızını ayarlama da kullanılan klape tam olarak açılarak, ikisi kapatılmış dört ölçüm borusundan ikisine pnöm atik nakil şartı sağlanacak miktarda çeltik koyulmuş elekler yerleştirildi. Bu şartlar altında deney tesisatı bir süre çalıştırılarak çeltiklerin hafif ve küçük boyutta olanları ayıklandı ve böylece bu çeltiklerin kurutma işlemi sırasında elekten düşerek deney sonuçlarında bir hatanın meydana gelmesi durumu engellenmiş oldu. Sıcak havanın cebri konveksiyonu ile kurutulacak olan çeltiklerin deneyler başlatılmadan önce hasat sırasındaki nem oranlarına (%22-24 kb) getirilmesi gerekiyordu. Bu amaçla ayıklanmış çeltiklerin nem oranları bir nem ölçme cihazında belirlendi ve istenilen nem oranlarına gelmesi için gerekli olan su miktarı hesaplandı. Daha sonra gereken su miktarından biraz daha fazla olacak şekilde yağmur suyu çeltik taneleri üzerine püskürtülerek suni olarak nemlenmeleri sağlandı. Hasat sırasındaki doğal durumuna en yakın şartlarda olması amacıyla yağmur suyuyla nemlendirilmiş olan çeltikler cam kavanozlara koyuldu. Kavanozlardan dış ortama olabilecek nem transferinin engellenmesi amacıyla kavanozların kapakları naylon malzemed en örtüler kullanılarak sıkıca kapatıldı. Böylece deneylerin başlamasına kadar olan bekleme sürecinde nem transferine karşı yapılan bu izolasyon ile çeltiklerin istenilen nem oranlarından sapmaları minimize edilmiş oldu. Cam kavanozlar yapılan bu işlemler sonrasında bir soğutucu içine yerleştirilerek yaklaşık 1 hafta süreyle bu ortamda bekletildi. Böylece nemin taneler içinde homojen bir şekilde difüze olması sağlandı. Bu süre sonunda soğutucudan çıkarılan çeltiklerin nem oranları dijital bir nem ölçme cihazıyla belirlendi. Ölçüm sonuçlarının bir kısmı istenilen nem değerlerinden daha büyük nem değerleri verdi. Çeltiklerin, deney başlangıcına kadar olan bekleme sürecinde cam kavanozlardan dış ortama olan nem transferi dikkate alınarak, çeltiğin gerekenden biraz daha fazla nemlendirilmiş olması dikkate alınarak, fazla olan nemin atılması için, çeltikler bir masa üzerine yayılarak ve ara sıra harmanlanarak bir miktar kurutuldu. Daha sonra tekrar kavanozlara doldurulup bir müddet daha soğutucu içinde bekletildi. Bu prosedür çeltik nem oranı hasat sırasındaki nem değerleri elde edilinceye kadar tekrar edildi.

### 4.3 Deneilerin Yapılışı

Kuru baza göre nem oranı %22-24 olan rocco tipi çeltik kullanılarak tek tabaka çeltiğin kurutulduğu deneysel çalışmada deneylere başlamadan önce, nemlendirme işlemine tabi tutulmamış olan çeltik yığınıyla doldurulmuş elekler, ölçüm boruları üzerine yerleştirilerek tesisat çalıştırıldı ve istenilen hava hızı elde edilinceye kadar fan girişinde bulunan klappe kaydırılarak ayar yapıldı. Daha sonra elektrikli ısıtıcılar çalıştırılarak, termostat deney sıcaklığa ayarlandı. Hava sıcaklığının daimi hale gelmesine müsaade etmek amacıyla yaklaşık olarak 1 saat tesisat bu şekliyle çalıştırıldı. Kontrol panelinden de sürekli olarak izlenebilen sıcaklık sabitlenince, daha önceden nemlendirilmiş ve kavanozlarda muhafaza edilen çeltikler kurutma işlemine tabi tutulmadan önce kütleleri tespit edilerek eleklere koyuldu ve bu elekler de ölçüm boruları üzerine yerleştirildi. Kurutma havasının çeltik yığını içinden geçerken ortaya çıkan basınç farklarının neden olabileceği çeltiklerin yukarıya doğru hareketine engel teşkil etmesi amacıyla, içerisinde çeltik yığını bulunduran eleklerin üst kısımları, bu eleklere benzer şekilde hazırlanmış içi boş eleklerle kapatıldı. Bu eleklerin üzerine kuruma sürecinde kurutma havasının çıkış sıcaklığını tespit etmek amacıyla termometreler yerleştirildi. Deney esnasında kurutma eleklerinde bulunan çeltiğin kütlesi bir terazi yardımıyla ilk yarım saatlik süreçte 15 dakikalık daha sonra yarım saatlik periyotlarla belirlendi. Tartım işlemleri  $\pm 0.0001$  g hassasiyetindeki dijital bir terazide yapıldı. Kurutma işlemi 5 saat süreyle 1.5 m/s hava hızında ve 40°C, 45°C, 50°C, 55°C ve 60°C kurutma havası sıcaklıkları için tekrarlandı. Kurutma işlemi sonrasında çeltikler, kuru kütlelerinin belirlenmesi amacıyla 110°C sıcaklıktaki bir etüvde 48 saat bekletildi. Etüvden çıkarılan ve tamamen kurumuş olan çeltiklerin kuru kütleleri bir terazi yardımıyla belirlendi. Çeltiğin başlangıçtaki yaş külesinden kuru kütlesi çıkartılarak ihtiva ettiği su miktarı belirlendi. Daha sonra kuru baza göre çeltiğin nem oranları hesaplandı. Çeltiğin denge neminin havanın bağıl nemine bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Cihan (1991), kurutma havasının şartlarına bağlı olarak rocco tipi çeltiğin denge nemini, 96 saatlik kurutma süreci sonunda yaptığı ölçümlerle belirlemiştir. Bu çalışmada Cihan (1991) tarafından elde edilen bu denge nemi değerleri kullanılmıştır. Cihan (1991) kendi çalışmasında tek tabaka çeltiğin kuruma davranışını, aynı sıcaklıklar için 1.5 m/s ve 3 m/s hava hızlarında deneysel olarak incelemiştir. Cihan (1991)'in çalışmasında kurutmanın hemen başlangıcında yani 15 dakikadaki ölçümler mevcut değildi ve bizde hem bu değeri elde etmek hem de deneyleri tekrarlamak suretiyle sonuçları karşılaştırmak istedik.

#### 4.4 Deneysel ve Teorik Sonuçlar

Çizelge 5.1 Kurutma sıcaklığı 40°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri

$M_k=19.353 \text{ g}$ $M_e=21.165 \text{ g}$ $m_e=0.072$				$m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$			
				Deneysel	Teorik		
t(dak)	$M_y \text{ (g)}$	$M_s \text{ (g)}$	m		Küre	Silindir	Elipsoid
0	24.015	4.662	0.2409	1.0	1.0	1.0	1.0
15	23.692	4.339	0.2242	0.9012	0.825966	0.826384	0.828921
30	23.456	4.103	0.2120	0.8289	0.759003	0.759587	0.761745
60	23.094	3.741	0.1933	0.7182	0.669425	0.670175	0.672051
90	22.794	3.441	0.1778	0.6264	0.604760	0.605545	0.606874
120	22.566	3.213	0.1660	0.5565	0.552991	0.553727	0.554510
150	22.376	3.023	0.1562	0.4985	0.509463	0.510085	0.51035
180	22.223	2.870	0.1483	0.4517	0.471788	0.472246	0.472033
210	22.099	2.746	0.1419	0.4139	0.438549	0.438802	0.438161
240	21.997	2.644	0.1366	0.3825	0.408822	0.408836	0.407823
270	21.921	2.568	0.1327	0.3594	0.381965	0.381714	0.380388
300	21.884	2.531	0.1308	0.3481	0.357510	0.356977	0.355396

Çizelge 5.2 Kurutma sıcaklığı 45°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri

$M_k=19.330 \text{ g}$ $M_e=20.547 \text{ g}$ $m_e=0.063$				$m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$			
				Deneysel	Teorik		
t(dak)	$M_y$ (g)	$M_s$ (g)	m		Küre	Silindir	Elipsoid
0	23.986	4.656	0.2409	1.0	1.0	1.0	1.0
15	23.602	4.272	0.2210	0.8881	0.817265	0.817559	0.819811
30	23.312	3.982	0.2060	0.8041	0.747252	0.747665	0.749635
60	22.935	3.605	0.1865	0.6942	0.653918	0.654423	0.655930
90	22.632	3.302	0.1708	0.6062	0.586811	0.587287	0.588140
120	22.384	3.054	0.1580	0.5343	0.533281	0.533644	0.533872
150	22.170	2.840	0.1469	0.4715	0.488427	0.488613	0.488264
180	22.057	2.727	0.1411	0.4388	0.449735	0.449694	0.448830
210	21.914	2.584	0.1337	0.3973	0.415714	0.415405	0.414097
240	21.806	2.476	0.1281	0.3658	0.385390	0.384783	0.383106
270	21.702	2.372	0.1227	0.3355	0.358096	0.357160	0.355190
300	21.653	2.323	0.1202	0.3213	0.333313	0.332053	0.329862

Çizelge 5.3 Kurutma sıcaklığı 50°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri

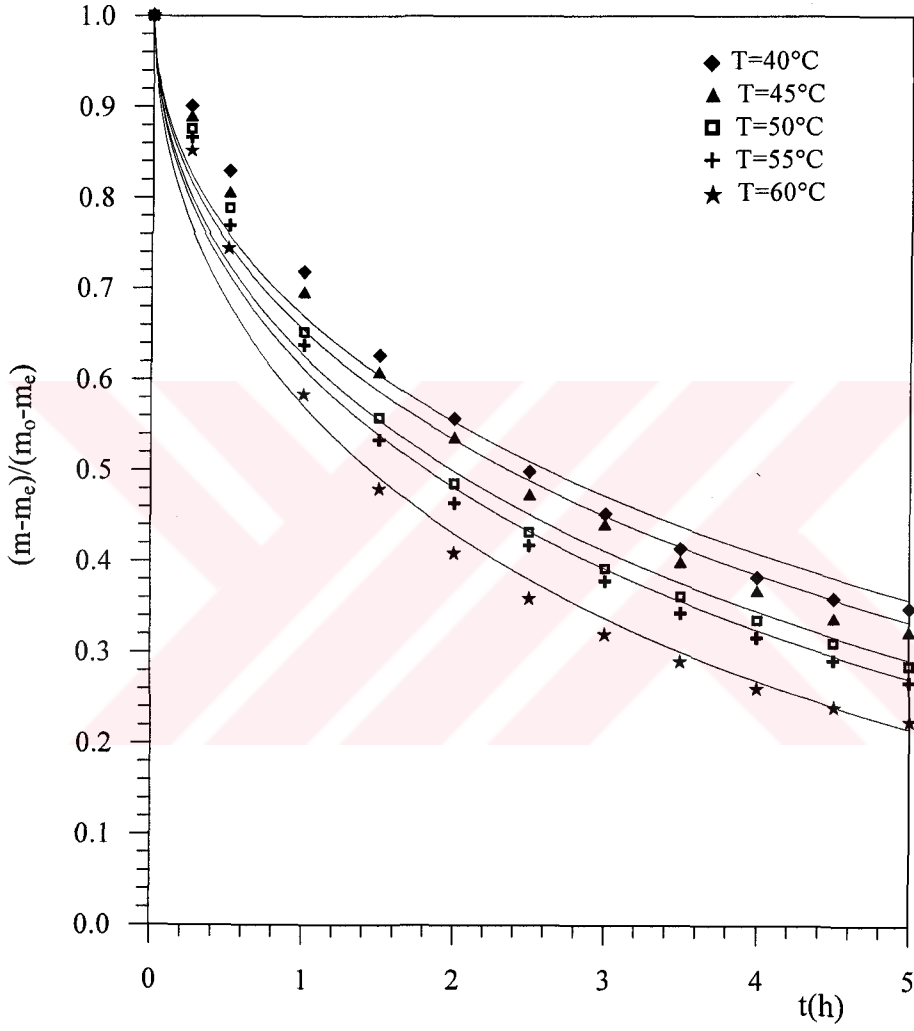
$M_k=19.336 \text{ g}$ $M_e=20.638 \text{ g}$ $m_e=0.057$				$m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$			
				Deneysel	Teorik		
T(dak)	$M_y$ (g)	$M_s$ (g)	m		Küre	Silindir	Elipsoid
0	24.023	4.687	0.2424	1.0	1.0	1.0	1.0
15	23.578	4.242	0.2194	0.8759	0.801618	0.802075	0.804339
30	23.265	3.929	0.2032	0.7886	0.726203	0.726828	0.729002
60	22.776	3.440	0.1779	0.6521	0.626308	0.627053	0.628626
90	22.438	3.102	0.1604	0.5577	0.555025	0.555719	0.556576
120	22.178	2.842	0.1470	0.4854	0.498552	0.499085	0.499268
150	21.987	2.651	0.1371	0.4320	0.451543	0.451832	0.451415
180	21.844	2.508	0.1297	0.3921	0.411258	0.411240	0.410316
210	21.734	2.398	0.1240	0.3614	0.376066	0.375697	0.374367
240	21.641	2.305	0.1192	0.3355	0.344908	0.344156	0.342522
270	21.552	2.216	0.1146	0.3106	0.317046	0.315897	0.314052
300	21.289	1.953	0.1010	0.2856	0.291944	0.290394	0.288426

Çizelge 5.4 Kurutma sıcaklığı 55°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri

$M_k=19.405 \text{ g}$ $M_e=20.249 \text{ g}$ $m_e=0.0435$				$m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$			
				Deneysel	Teorik		
t(dak)	$M_y$ (g)	$M_s$ (g)	m		Küre	Silindir	Elipsoid
0	24.052	4.647	0.2395	1.0	1.0	1.0	1.0
15	23.545	4.140	0.2133	0.8666	0.793392	0.794006	0.796560
30	23.175	3.770	0.1943	0.7692	0.715180	0.716008	0.718602
60	22.675	3.270	0.1685	0.6379	0.611939	0.612922	0.614952
90	22.277	2.872	0.1480	0.5332	0.538572	0.539505	0.540849
120	22.013	2.608	0.1344	0.4638	0.480669	0.481419	0.482112
150	21.836	2.431	0.1253	0.4174	0.432649	0.433119	0.433240
180	21.687	2.282	0.1176	0.3781	0.391648	0.391770	0.391421
210	21.553	2.148	0.1107	0.3429	0.355967	0.355693	0.354984
240	21.452	2.047	0.1055	0.3164	0.324497	0.323798	0.322838
270	21.357	1.952	0.1006	0.2915	0.296469	0.295336	0.294223
300	21.266	1.861	0.0959	0.2674	0.271321	0.269762	0.268582

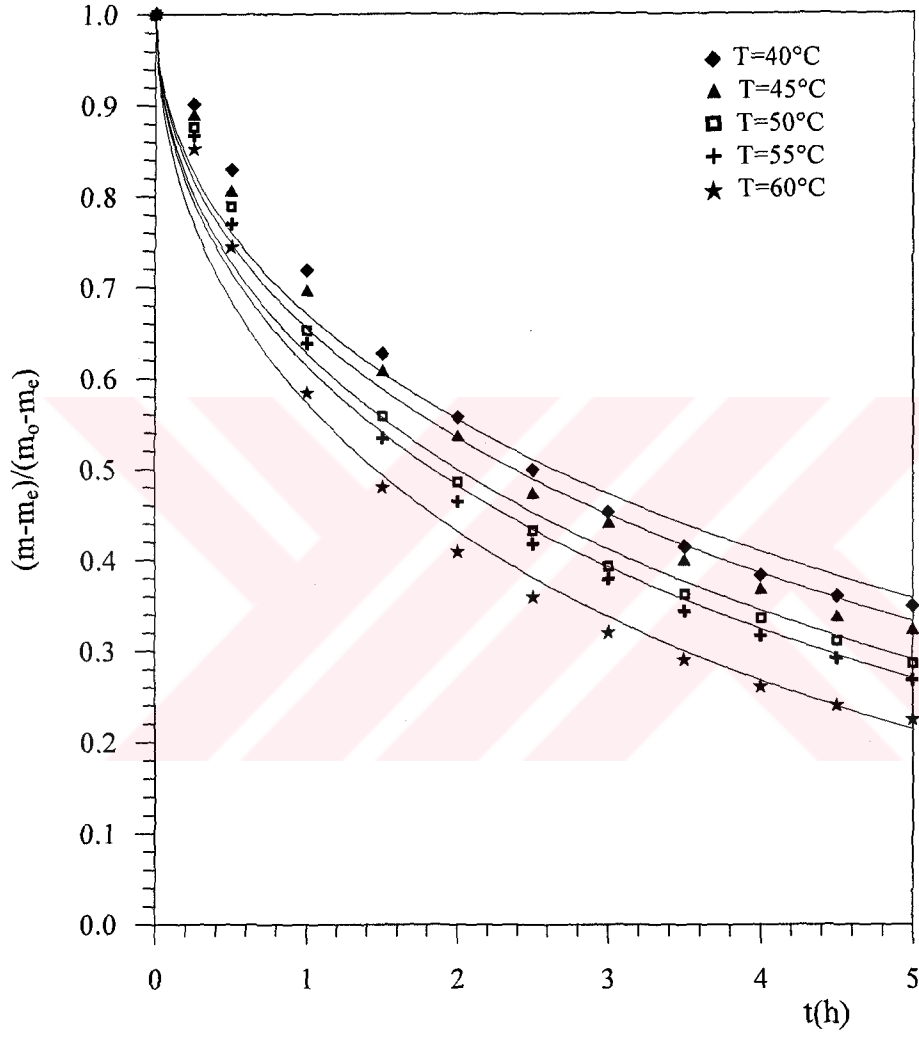
Çizelge 5.5 Kurutma sıcaklığı 60°C için tek tabaka deneysel ve teorik kuruma değerleri

$M_k=19.497 \text{ g}$ $M_c=20.200 \text{ g}$ $m_e=0.0352$				$m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$			
				Deneysel	Teorik		
t(dak)	$M_y$ (g)	$M_s$ (g)	m		Küre	Silindir	Elipsoid
0	24.020	4.523	0.2320	1.0	1.0	1.0	1.0
15	23.451	3.954	0.2028	0.8516	0.769515	0.770346	0.773129
30	23.036	3.539	0.1815	0.7434	0.683354	0.684445	0.687253
60	22.422	2.925	0.1500	0.5833	0.570813	0.572039	0.574110
90	22.022	2.525	0.1295	0.4792	0.491852	0.492933	0.494215
120	21.751	2.254	0.1156	0.4085	0.430274	0.431032	0.431618
150	21.560	2.063	0.1058	0.3587	0.379805	0.380123	0.380163
180	21.410	1.913	0.0981	0.3196	0.337226	0.337033	0.336693
210	21.295	1.798	0.0922	0.2896	0.300625	0.299894	0.299326
240	21.182	1.685	0.0864	0.2602	0.268758	0.267486	0.266832
270	21.103	1.606	0.0824	0.2398	0.240759	0.238984	0.238346
300	21.043	1.546	0.0793	0.2240	0.215994	0.213772	0.213323

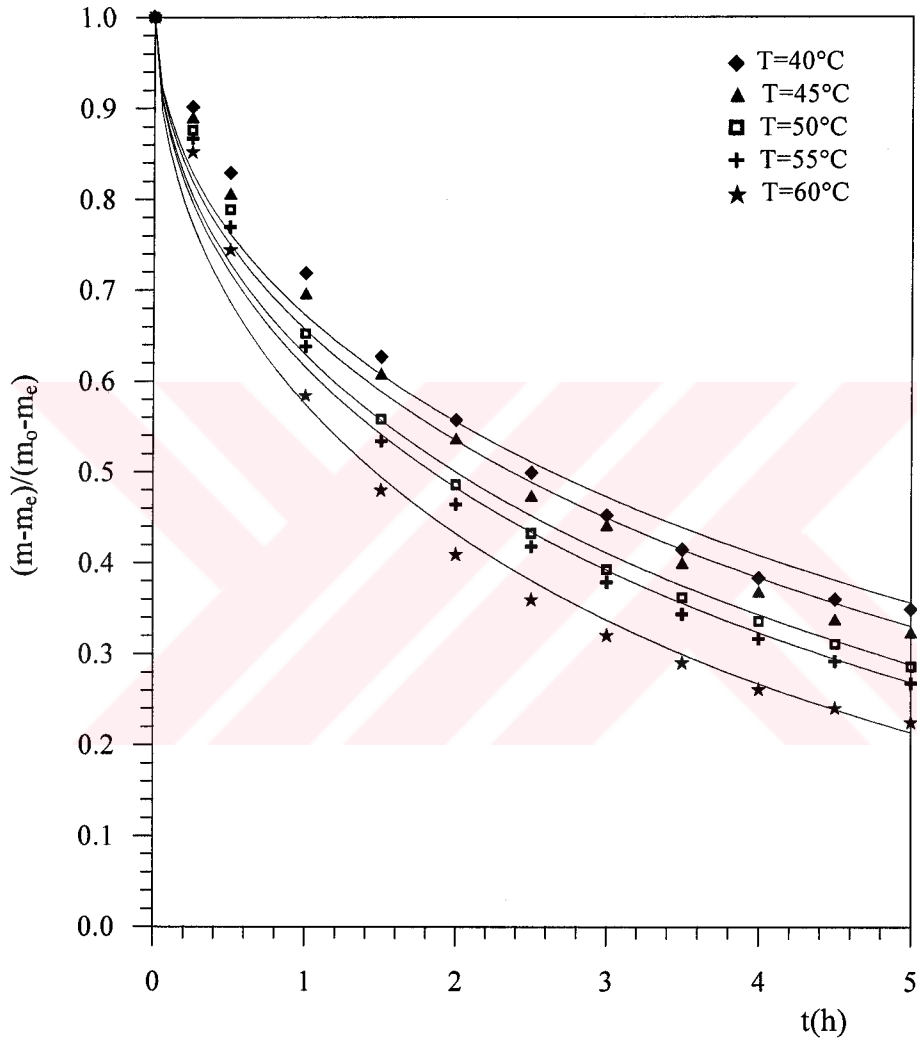


Şekil 5.1 Küre geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması





Şekil 5.2 Silindir geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 5.3 Elipsoid geometri için deneysel ve teorik kuruma eğrilerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.6 Kurutma sıcaklığı 40°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları

Modeller	B	D(m <sup>2</sup> /h)	E
Küre	5307	4.3646171896 10 <sup>-8</sup>	1.582701 10 <sup>-2</sup>
Silindir	5466	2.6268530817 10 <sup>-8</sup>	1.559723 10 <sup>-2</sup>
Elipsoid	5321	4.173787124 10 <sup>-8</sup>	1.452630 10 <sup>-2</sup>

Çizelge 5.7 Kurutma sıcaklığı 45°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları

Modeller	B	D(m <sup>2</sup> /h)	E
Küre	5359	4.8376282355 10 <sup>-8</sup>	1.203229 10 <sup>-2</sup>
Silindir	5520	2.9164699155 10 <sup>-8</sup>	1.178581 10 <sup>-2</sup>
Elipsoid	5372	4.643942402 10 <sup>-8</sup>	1.084510 10 <sup>-2</sup>

Çizelge 5.8 Kurutma sıcaklığı 50°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları

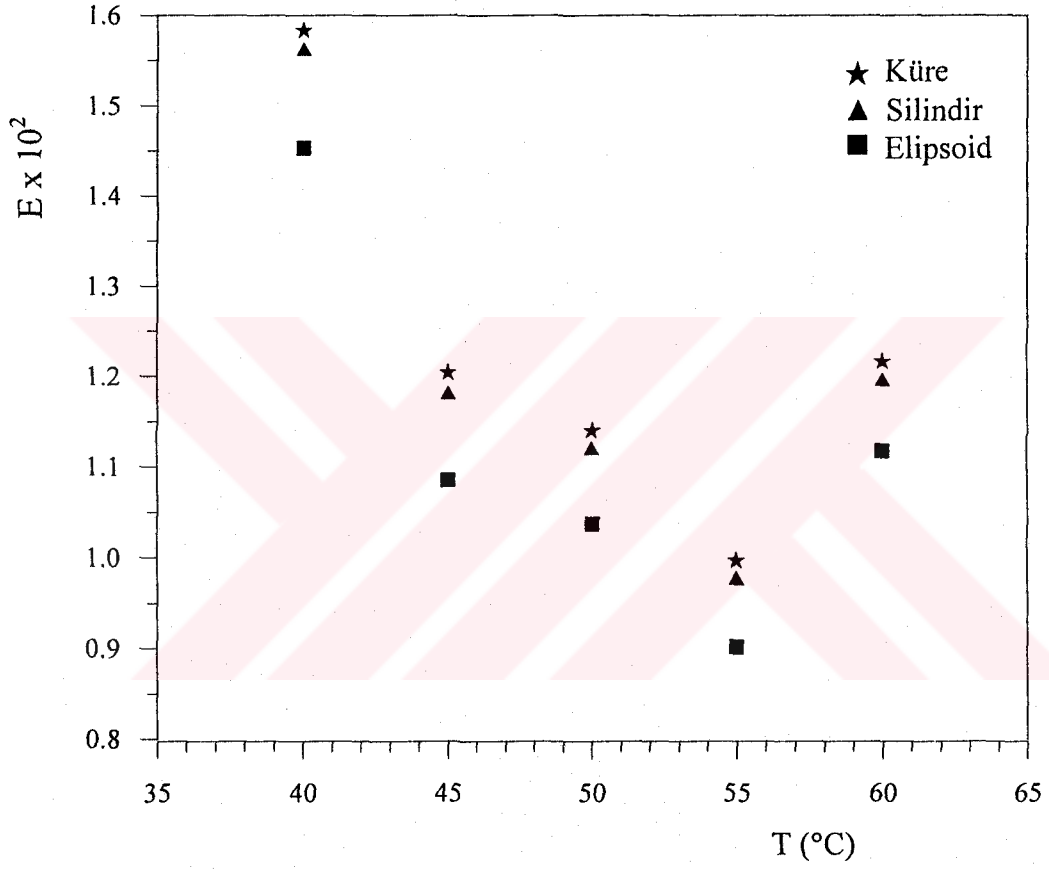
Modeller	B	D(m <sup>2</sup> /h)	E
Küre	5387	5.7569249420 10 <sup>-8</sup>	1.139090 10 <sup>-2</sup>
Silindir	5551	3.4656465278 10 <sup>-8</sup>	1.117434 10 <sup>-2</sup>
Elipsoid	5401	5.512841831 10 <sup>-8</sup>	1.036370 10 <sup>-2</sup>

Çizelge 5.9 Kurutma sıcaklığı 55°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları

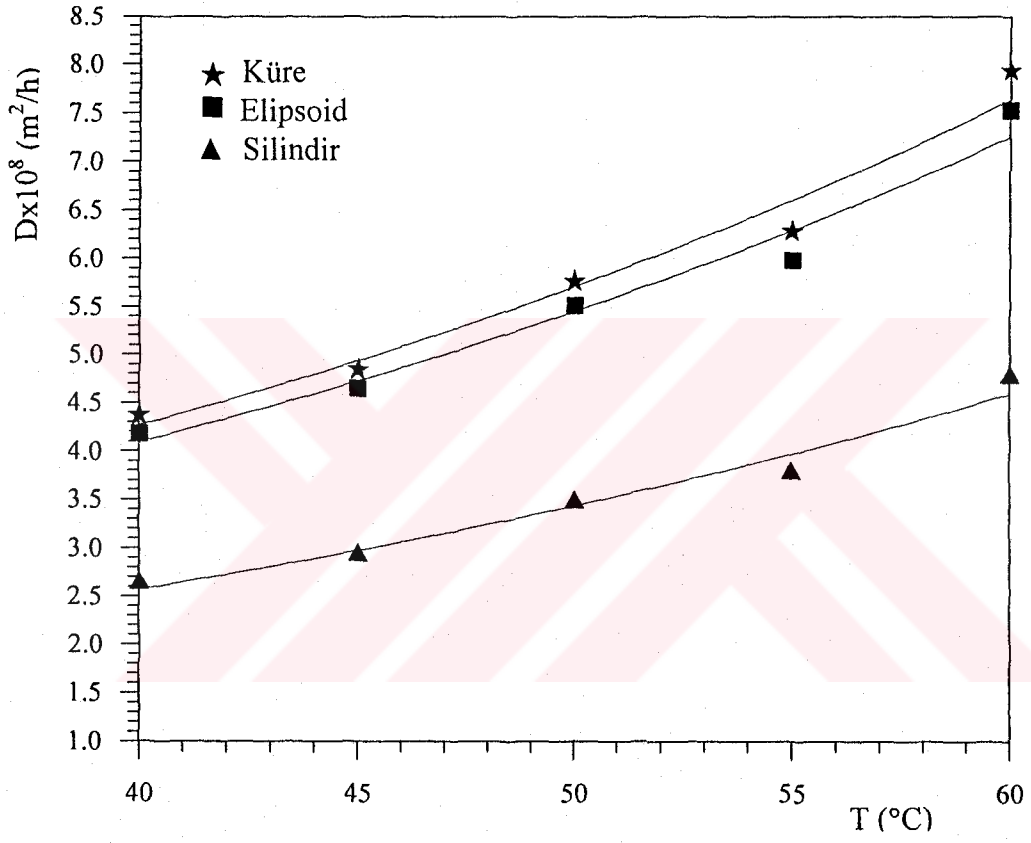
Modeller	B	D(m <sup>2</sup> /h)	E
Küre	5442	6.2764285220 10 <sup>-8</sup>	0.995748 10 <sup>-2</sup>
Silindir	5609	3.7730643490 10 <sup>-8</sup>	0.974599 10 <sup>-2</sup>
Elipsoid	5458	5.97774395 10 <sup>-8</sup>	0.901082 10 <sup>-2</sup>

Çizelge 5.10 Kurutma sıcaklığı 60°C için tek tabaka efektif difüzyon katsayıları

Modeller	B	D(m <sup>2</sup> /h)	E
Küre	5447	7.9302768640 10 <sup>-8</sup>	1.214949 10 <sup>-2</sup>
Silindir	5617	4.7607598355 10 <sup>-8</sup>	1.192824 10 <sup>-2</sup>
Elipsoid	5464	7.535763718 10 <sup>-8</sup>	1.116400 10 <sup>-2</sup>



Şekil 5.4 Kurutma havası sıcaklığı ile hataların kareleri toplamının değişimi



Şekil 5.5 Difüzyon katsayısının sıcaklıkla değişimi

## 5. GENEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMELER

Çizelge 5.1-5.5'de  $M_y$  çeltiğin yaş kütleini,  $M_s$  çeltiğin içerdiği su kütleini,  $M_k$  çeltiğin kuru kütleini,  $M_e$  denge nemindeki çeltiğin kütleini,  $m$ ,  $m_o$  ve  $m_e$  sırasıyla kuru baza göre herhangi bir andaki, kurutma başlangıcındaki ve denge nemindeki çeltiğin nem oranlarını,  $m^* = (m - m_e)/(m_o - m_e)$  boyutsuz nem oranını ve  $t$  de kurutma zamanını ifade etmektedir. Çizelge 5.1-5.5'den de görülebileceği gibi kurutmanın başlangıç aşamasında çeltikten nem atılması çok hızlı bir şekilde gerçekleşmekte, daha sonraki aşamalarda giderek yavaşlamaktadır. Tüm kurutma şartlarında, kurutmanın başlangıcından itibaren 1-2 saatlik bir süreçte, çeltiğin içerdiği nemin büyük bir kısmı atılmaktadır. Kurutma işleminin ilk 3 saatinden sonra çeltikten nem atılması daha yavaş bir şekilde gerçekleşmekte ve ilk 4 saatten sonra çeltiğin nem oranı çok az değişerek denge nemine doğru gitmektedir.

0.01 hassasiyetli bir dijital mikrometre yardımıyla 300 adet Rocco tipi çeltiğin mevcut üç boyutu tek tek ölçüldü. Daha sonra ölçülen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak çeltiğin kalınlığı, eni ve boyu sırasıyla 2.20 mm, 3.40 mm ve 9.21 mm olarak belirlendi. Bir çeltik tanesinin ortalama hacmini belirlemek amacıyla aşağıdaki işlemler yapıldı. 600 adet çeltik tanesi, hacim değişimi kolaylıkla okunabilen bir tüpe konuldu. Daha sonra, hacmi bilinen ve çeltik içine nüfuz etmeyen brombenzen, yavaş yavaş tüp içine boşaltıldı. Böylece tüp içindeki çeltik yığınının ara boşlukları brombenzen sıvısı ile doldurulmuş oldu. Tüpün gösterdiği hacimle brombenzen sıvısının hacimleri arasındaki farktan 600 adet çeltiğin hacmi bulundu. Bulunan bu hacim, çeltik sayısına bölünerek bir çeltik tanesinin hacmi  $V=30.33 \text{ mm}^3$  olarak bulundu. Elipsoid için, merkezi dairesel kesitli prolate spheroid geometri kabul edilmiştir. Bu hacme karşılık gelen kürenin, silindirin ve elipsoidin boyutları;

$$\text{Küre için: } V = \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow R=1.93 \text{ mm}$$

$$\text{Silindir için: } V = \pi R^2 (2L) \Rightarrow L=3.5 \text{ mm seçilerek } R=1.17 \text{ mm}$$

$$\text{Elipsoid için: } V = \frac{4}{3} \pi R^2 L \Rightarrow L=4.605 \text{ mm seçilerek } R=1.25 \text{ mm}$$

olarak hesaplandı.

Hesaplanan efektif difüzyon katsayılarının kurutma havası sıcaklığı ile değişimi incelenerek, aşağıda verilen Arrhenius tipi bir korelasyon ile ifade edilmiştir.

$$D = e^{-B/T} \quad (5.1)$$

$$E = \sum_{i=1}^n (m_{\text{teorik}}^* - m_{\text{deneysel}}^*)^2 \quad (5.2)$$

Burada T kurutma havası sıcaklığını [K], D difüzyon katsayısını [ $m^2/h$ ] ve E hataların kareleri toplamını göstermekte olup, B bir sabittir.

Küre modeli için Luikov (1968) tarafından elde edilen ve bu çalışmada da (3.6) eşitliği ile verilen analitik çözüm kullanıldı. Efektif difüzyon katsayıları deneysel sonuçlar referans alınarak, farkların kareleri toplamının minimize edilmesi yöntemine göre belirlendi. Hesaplanan bu difüzyon katsayıları kullanılarak, kurutma zamanına göre çeltiğin teorik boyutsuz nem oranları hesaplanmıştır.

Silindir modeli için Ece ve Cihan (1993) tarafından elde edilen ve bu çalışmada (3.32) eşitliği ile verilmiş olan analitik çözüm kullanıldı. Analitik çözüm için Fortran programlama dilinde yazılan bir programda, yukarıda silindir için verilen boyutlar kullanılarak, çeltiğin efektif difüzyon katsayıları belirlendi. Daha sonra bulunan bu difüzyon katsayıları kullanılarak teorik boyutsuz nem oranları elde edildi. Ece ve Cihan (1993) kendi çalışmalarında difüzyon katsayılarının hesaplanması sırasında  $J_0(x)$  Bessel fonksiyonu için 20 adet kök değeri kullanmışlardır. Bu çalışmada ise ben teorik sonuçları elde etmek için  $J_0(x)$  Bessel fonksiyonu için, Mathematica programında elde ettiğim 200 adet kök değeri kullandım.

Elipsoid model için Lima&Farias (2004) tarafından elde edilen ve bu çalışmada da (3.37) eşitliği ile verilen çözüm kullanıldı. Elipsoidin boyutları için, yukarıda hesaplanan değerler kullanıldı ve bu değerler (3.37) eşitliğinde yerine yazılarak Mathematica programında yazılmış integral metodu vasıtasıyla çeltiğin efektif difüzyon katsayıları belirlendi. Hesaplanan bu difüzyon katsayıları kullanılarak zamana bağlı olarak çeltiğin teorik boyutsuz nem oranları elde edildi.

Şekil 5.4'de tüm modeller için hesaplanmış farkların kareleri toplamını minimum yapan değerler ile kurutma havası sıcaklığının değişimi verilmektedir. Bu grafikte E değerlerinin, 40°C ile 55°C arasındaki trendi azalan yöndedir fakat bu trend 60°C için tekrar artışa geçmektedir. Bizim için E değerlerinin mertebelerinin aynı olması daha önemlidir. Bu

çalışmadaki deneysel sonuçlara göre, teorik çözümlerde 55°C kurutma havası sıcaklığı optimum bir değer olabilir. Şekil 5.5'de teorik hesaplanmış efektif difüzyon katsayılarının kurutma havası sıcaklığıyla olan değişimi gösterilmektedir. Bu çalışmada kullanılan analitik çözümler her model için farklı olduğundan, efektif difüzyon katsayılarının da farklı olması doğal bir sonuçtur. Teorik model sonuçları incelendiğinde seçilen modele göre efektif difüzyon katsayılarında belirli mertebelerde bir değişim gözlemlenirken, aynı sıcaklık için teorik çözümlerin sonuçları birbirine çok yakın değerlerdedir. Deneysel kuruma eğrisine en yakın geçen teorik modelin hangisi olduğunu belirlemek için Çizelge 5.6-5.10'da verilen hataların kareleri toplamına bakıldığında, ele alınan modeller arasında en küçük hata değerlerinin elipsoid modele ait olduğu görülmektedir yani sıralama kötüden iyiye doğru küre, silindir ve elipsoid şeklindedir. Fakat bu sıralama difüzyon katsayılarında yüksekten alçağa doğru küre, elipsoid ve silindir düzenindedir. Gerçekten de elipsoid geometri seçilen geometriler arasında çeltik formuna en yakın geometridir. Elipsoidin kesit alanı dairesel alındığından, analitik çözümü de daha kolaydır. Gerçekte ise kesit alanı elips olan elipsoid için henüz bir analitik çözüm mevcut değildir.

Şekil 5.1-5.3'de tek tabaka çeltik kurutma için deneysel nem oranları ile teorik nem oranlarının karşılaştırılması verilmektedir. Kuruma eğrileri incelendiğinde teorik ve deneysel değerler arasındaki en büyük farkın kurutma periyodunun başlangıcında olduğu görülmektedir. Bu periyot kurumanın en hızlı gerçekleştiği periyot olup ölçüm aralıklarının bu periyot için daha sık alınmasıyla bu periyottaki hatanın azaltılabileceği kanaatindeyim.



## KAYNAKLAR

- Abramowitz, M ve Stegun, I. A., (1972), Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications Inc., New York.
- Allen, J. R., (1960), "Application of Grain Drying Theory to the Drying of Maize and Rice", Journal of Agricultural Engineering Research, 5:363-385.
- Aguerre, R., Suarez, C. ve Viollaz, P. E., (1982), "Drying Kinetics of Rough Rice", Journal of Food Tecnology, 17:679-686.
- Basunia, M. A. ve Abe, T., (2001), "Moisture desorption isotherms of medium-grain rough rice", Journal of Stored Products Research, 37:205-219.
- Becker, H. A. ve Sallans, H. R., (1955), "A Study of Internal Moisture Movement in the Drying of the Wheat Kernel", Cereal Chemistry, 32(6):212-226.
- Beyer, W. H., (1987), CRC Standart Mathematical Tables, 28<sup>th</sup> ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Boyce, D. S., (1965), "Grain Moisture and Temperature Changes with Position and Time During Through Drying", Journal of Agricultural Engineering Research, 10:333-341.
- Chen, Chin Shu ve Johnson, W. H., (1969), "Kinetics of Moisture Movement in Hygroscopic Materials", Transactions of the ASAE, 3:109-113.
- Chhinnan, M. S., (1976), Bulk Thin-Layer Models for Drying of Peanuts in Pods, Unpublished PhD thesis, North Carolina State University, Raleigh.
- Cihan, A., (1991), Çeltik Kurutmasının Deneysel ve Teorik Araştırılması, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Crank, J., (1975), The Mathematics of Diffusion, Oxford Science Publications, New York, USA.
- Dung, N. V., Bowrey, R. G. ve Fowler, R. T., (1980), "Variables Affecting the Drying Rate of Paddy Rice", Food Technology in Australia, 32(12):604-606.
- Dung, N. V., Bowrey, R. G. ve Fowler, R. T., (1981a), "An Equation for the Rate of Drying of Padyy Rice", Food Technology in Australia, 32(1):20-21.
- Dung, N. V., Bowrey, R. G. ve Fowler, R. T., (1981b), "Simulation of Drying in Ventilated Paddy Rice Stores", Food Technology in Australia, 33(4):173-175.
- Ece, M.C. ve Cihan, A., (1993), "A Liquid Diffusion Model for Drying Rough Rice", Transactions of the ASAE, 36(3):837-840.
- Farias, S. N., (2002), "Drying of spheroidal solids using Galerkin method", Master Thesis, Mechanical Engineering Department, Center of Sciences and Technology, Federal University of Paraíba, Campina Grande-PB, Brazil.

Haji-Sheikh, A. ve Sparrow, E. M., (1966), "Transient Heat Conduction in a Prolate Spheroidal Solid", *Journal of Heat Transfer*, 88(3):331-333.

Haji-Sheikh, A., (1965), *Application of Monte Carlo Methods to Thermal Conduction Problems*, PhD thesis, University of Minnesota, USA.

Henderson, S. M. ve Pabis, S., (1961), "Grain Drying Theory", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3):169-174.

Henderson, S. M., (1974), "Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation", *Transactions of the ASAE*, 17(6):1167-1168, 1172.

Husain, A., Chen, C. S. ve Clayton, J. T., (1973), "Simultaneous Heat and Mass Diffusion in Biological Materials", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 18:343-352.

Igathinathane, C. ve Chattopadhyay, P. K., (1999), "Moisture Diffusion Modelling of Drying in Parboiled Paddy Components. Part II: Bran and Husk", *Journal of Food Engineering*, 41:89-101.

Juliano, B. O., (1985). *Rice Chemistry and Technology*. 2nd. Ad. St. Paul, MN, USA, Am. Assoc. Cereal. Chem. 774 pp.

Kahveci, K., (1998), Çeltiğin Yığın Halinde Kuruma Davranışı, Doktora Tezi, TÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Kunze, O. R. ve Calderwood, D. L., (1985), "Rough Rice drying", In *Rice Chemistry and Technology*, B. O. Juliano ed. Am. Assn. Of Cereal Chemists, St, Paul, MN.

Lima, Antonio G. B., Farias, S. N. ve Lima, D. R., (2004), "Mass Transport in Spheroids Using The Galerkin Method", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Brazil, 21(4):667-680.

Luikov, A. V., (1968), *Analytical Heat Diffusion Theory*, Academic Press, Inc. Ltd., London.

Newman, A. B., (1931), "Drying in Porous Solids", *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 27:203-220, 310-313.

Noomhorm, A. ve Verma, L. R., (1986a), "Generalized Single-Layer Rice Drying Models", *Transactions of the ASAE*, 29:587-591.

Pfost, H.U., (1978), "High Temperature, High Humidity Grain Storage", *Proceeding of the Workshop on Grains Post-harvest technology, Bangkok, Thailand. South East Asia Co-operative Post-harvest Research and Development Programme*, p: 462-467.

O'Callaghan, J.R., Menzies, D. J. ve Bailey, P. H., (1971), "Digital Simulation of Agricultural Dryer Performance", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3):223-244.

Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E. ve Ross, I. J., (1973), "Drying Soybeans

with Heated Air”, Transactions of the ASAE, 16(1):112-113.

Page, G., (1949), “Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers”, Unpublished Master of Science Thesis, Purdue University, Lafayette, IN.

Sharaf-Eldeen, Y. M., Hamdy, Y., Keener, H. M. ve Blaisdell, J. L., (1979), “Mathematical Description of Drying Fully Exposed Grains”, ASAE, Paper No. 79-3034, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Sharma, A. D., Kunze, O. R. ve Tolley, H.D., (1982), “Rough Rice Drying as a Two-Compartment Model”, Transactions of the ASAE, 25:221-224.

Sherwood, T. K., (1929), “Drying of Solids”, Ind. Eng. Chem., 21:976-980.

Sherwood, T. K., (1931), “Application of Theoretical Diffusion Equations to the Drying of Solids”, Trans. Am. Nst. Chem. Eng., 27:190-202.

Simmonds, W. H. C., Ward, G. T. ve McEwen, E., (1953), “The Drying of Wheat Grain. I. The Mechanism of Drying”, Transactions of the Inst. Chem. Eng., 31(3):265-276.

Skelland, A. H. P., (1974), Diffusional Mass Transfer, John Wiley&Sons.

Steffe, J. F. ve Singh, R. P., (1980a), “Liquid Diffusivity of Rough Rice Components”, Transactions of the ASAE, 23(3):767-774.

Steffe, J. F. ve Singh, R. P. ve Miller G. E., (1980b), “Harvest, Drying and Storage of Rough Rice”, In Rice Production and Utilization. B. S. Luh. AVI Pub. Co. Inc. Westport CT.

Stratton, J. A., Morse, P. M., Chu, L. J., Little, J. D. C. and Corbato, F. J., (1956), Spheroidal Wave Functions, The Tech. Press of M. I. T. and John Wiley&Sons, Inc., New York.

Vaccazera, L. M., Lombardi, J. L. ve Chirife, J., (1974), “Heat Transfer Effects on Drying Rate of Food Dehydration”, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 52:576-579.

Watson, E. L. ve Bhargava, V. K., (1974), “Thin Layer Drying Studies on Wheat”, Canadian J. Agr. Eng., 16(1):18-22.

White, G. M., Bridges, T. C., Loewer, C. ve Ross, I. J., (1978), “Seed Coat Damage in Thin Layer Drying of Soybeans Affected by Drying Conditions”, ASAE, Paper No.78-3052, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Wang, C.Y. ve Singh, R. P., (1978), “A Single-Layer Drying Equation for Rough Rice”, ASAE Meeting Paper No.78-3001, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Wasserman, T. ve Calderwood, D. L., (1974), “Rough Rice Drying”, Rice Chemistry and Technology, ed. D. F. Houston, St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemist.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	01.12.1968	
Doğum yeri	Samsun-Bafra	
Lise	1980-1986	İstanbul Alibeyköy Lisesi
Lisans	1986-1990	Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1993-1995	Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora	1997-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı kurum**

1993-Devam ediyor

Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü  
Araştırma Görevlisi