ÖNSÖZ

Bu çalışmada, değişik sıcaklıklarda ve sabit hava hızında tek tabaka mısırın kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelenmiş olup, elde edilen deneysel sonuçları mısırın kuruma davranışını ifade eden ve edebileceği düşünülen sekiz farklı model sonuçlarıyla karşılaştırılmış, mısırın kuruma davranışını ifade etmedeki uygunluğun veya deneysel sonuçlara en yakın modelin Page modeli olduğu görülmüştür.

Bu tezi hazırlamam esnasında deneysel ve teorik çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen başta sayın hocam Prof.Dr. Ahmet CİHAN' a (Trakya Üniversitesi), Yrd.Doç.Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU' na (Trakya Üniversitesi), tecrübelerinden yararlandığım Yrd.Doç.Dr. Kamil KAHVECİ' ye (Trakya Üniversitesi) ve aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Cem KORKMAZ
Makine Mühendisi

ÖZET

MISIRIN KURUMA DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ VE DEĞİŞİK MODELLERLE SİMÜLASYONU

Cem KORKMAZ

Bu tez çalışması Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalı kapsamında hazırlanmıştır.

Mısır, insanların gıda ihtiyacını karşılayan önemli bir tahıl olup, hasat sırasında yüksek nem oranlarına sahiptir. Hasat sonrası uygun bir kurutma işleminden geçirilmelidir. Kurutmanın amacı tahıl üretim verimliliğini artırmak, ekim alanlarından daha fazla yararlanmak, hasat sonrasında yüksek nem oranına sahip tahılın bozulmadan uzun süre saklanabilmesi için küf ve çürümeden meydana gelen kayıplarla, zararlı böceklerin etkileri azaltmaktır. Ürünün güneş altına bırakılarak doğal olarak kurutulması bir çok olumsuzluğu beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı doğal kurumanın olumsuz etkilerinden kurtulunup, yapay yolla kurutmanın avantajlarından yararlanılacaktır.

Mısırın kurutma davranışı incelendiğinde, kurutma başlangıcının ilk zamanlarında, kuruma hızının yüksek olduğu, zaman ilerledikçe kurutma hızının azaldığı gözlenmektedir. Mısırın kurutulması genellikle ısıtılmış havanın cebri konveksiyonu yardımıyla gerçekleştirilir. Bu çalışmada, mısırın tek tabaka kuruma davranışı deneysel ve teorik olarak incelendi. Deneyler, kuru baza göre nem oranı %25 olan mısır kullanılarak gerçekleştirildi. Deneylerde kurutma havası sıcaklıkları sırasıyla 40°C, 45°C 50°C, 55°C 60°C, 65°C, 70°C, kurutma havası hızı da 2 m/s alınmıştır.

Mısırın kuruma davranışını simüle etmek için Newton, Page, Henderson&Pabis, Wang&Singh, Geometric, Logaritmic, Two Term, Midilli et. vb.sekiz adet ince tabaka kurutma modelleri kullanılmıştır.

Her bir model için, tek tabaka mısırın kuruma davranışını ifade etmedeki uygunluğu belirlemek için korelasyon katsayısı r, standart hata e_s ve ortalama karesel sapma χ^2 hesaplandı.

r >0.90 olmak kaydıyla Korelasyon katsayısı 1'e en yakın, en küçük standart hata ve ortalama karesel sapma üreten model mısırın kuruma davranışını en iyi ifade eden modeldir. Buna göre en uygun modelin Page olduğu tespit edildi. Burada FORTRAN programlama dilinden ve GRAF4WIN programlarından istifade edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mısır kuruma davranışı, Mısırın ince tabaka kurutulması, Mısır kurutmanın simülasyonu, Matematik model

ABSTRACT

THE SİMULATİON OF CORN DRYİNG BY VARIOUS THEORETICAL AND SEMI THEORETICAL MODELS

Cem KORKMAZ

This thesis has been prepared in the context of Science Institute, Department of Mechanical Engineering

Corn is one of the most important nutritious grains which have high moisture rates during harvest. It has to be drought properly after harvests. The reasons for drying are to increase productivity of grains, to benefit more from the fields and to decrease the harmful effects of moisture, mould, rotting and insects upon the corn which has also high moisture rates after the harvest. Sun has lots of a negative effects in the drying process therefore artificial drying processes are going to be used rather than natural method in order to decrease the negative effects .

In the beginning of the drying treatment, drying speed is high but it descends later on according to the observations. Drying process is mainly conducted by forced convection of the high temperature air. Single layer drying treatment of corn was observed theoretically and pratically in this experimental study. Experiments were conducted with corns which have %25 moisture rates. Drying air temperature and veolcity of the drying air were 40°C, 45°C 50°C, 55°C 60°C, 65°C, 70°C and 2 m/s respectively in the experiments.

In order to simulate the drying treatment eight semi theoretic and empirical thin layer mathematical drying models such as Newton, Page, Henderson&Pabis, Wangh&Singh, Geometric, Logarithmic, Two term, Midilli were applied. The drying coefficients of the models explained above were found by minimizing the experimental data and theoretical model results.

For the availability of describing single layer drying treatment , correlation coefficient, Standard error and mean square deviation were considered as r, e_s and χ^2 respectively for each model. Under the condition of $r > 0.90$ and being the closest to 1,

the best describing model for the drying treatment of corn is the one that produces the minimum standart error and mean square deviation. Page model was proved to be the most available model for these conditions. FORTRAN programming language and GRAF4WIN program were applied to the experimental data drying curves were obtained for each model.

Cem KORKMAZ

Keywords : Drying treatment of corn, Thin layer drying of corn, Simulation of corn drying, Experimental drying curves, Page model

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ…….	i
ÖZET…….	ii
ABSTRACT……..	iv
İÇİNDEKİLER……..	vi
SEMBOLLER…….....	viii
ŞEKİL LİSTESİ…….	xi
TABLO LİSTESİ……...	xii
1.GİRİŞ……..	1
2. KURUTMA……	2
2.1 Mısır kurutulmasının önemi…….	3
2.2 Mısır kurutma sistemleri……...	4
Doğal hava sıcaklıklı kurutma sistemleri……..	4
Düşük hava sıcaklıklı kurutma sistemleri……..	4
Yüksek hava sıcaklıklı kurutma sistemleri……	5
Kombine sıcaklıklı kurutma sistemleri……..	5
2.3 Nem oranı……..……....	6
2.4 Mısırın kuruma davranışı……...	7
a-Sabit hızda kurutma süreci……..	9
b-Azalan hızda kurutma süreci……...	9
1.Kapilarite……..	10
Kapiler çekme kuvveti……..	10
2.Buhar akışı……	12
3.Buhar difüzyonu……	15
Çift yönlü difüzyon……	15
Buharın tek yönlü difüzyonu……	18
2.5 Sorpsiyon izotermi……...	20
2.6 Denge Nemi…….	22

3. DENEY TESİSATI VE PROSEDÜRÜ……... 24
3.1 Deney tesisatı ve ölçüm elemanları……. 24
3.2 Mısırın hazırlanması…… 26
3.3 Deneyin yapılışı…….. 26
4. AMPİRİK MODELLER……. 28
Newton modeli…… 28
Page modeli……. 28
Pabis modeli…… 29
Wang&Singh modeli…….. 29
Geometrik model…… 29
Logaritmik model…… 29
İki terimli model……. 30
Midilli model…….. 30
Korelasyon katsayısı…….. 30
Standart hata……... 31
Ortalama karesel sapma……. 31
5.KURUTMA SICAKLIKLARINDA AMPİRİK MODELLERİN
İSATATİKSEL ANALİZİ…… 32
6.DENEY SONUÇLARI…….. 39
7.DENEYSEL EĞRİLER İLE AMPİRİK MODEL SONUÇLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI…….. 46
8.SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME…… 60
ÖZGEÇMİŞ……. 61

SEMBOLLER

a_0 : Kurutma sabiti

a : Kurutma sabiti

a' : Delik alanı

a_1 : Kurutma sabiti

a_2 : Kurutma sabiti

b : Kurutma sabiti

b^* : Hareket katsayısı

C_{AB} : Gazların özelliklerini içeren sabit

D : Difüzyon katsayısı

d : Boru çapı

e_s : Standart hata

H : Kapiler boruda suyun yükselme miktarı

h' : Kütle transfer katsayısı

I_0 : Sıvı yükselmesi

k : kurutma sabiti

k_1 : kurutma sabiti

k_2 : kurutma sabiti

l_0 : boru uzunluğu

M : Nem oranı

M_A : A boşluğundan B boşluğuna birim zamanda geçen A gazının kütlesi

M_B : B boşluğundan Aboşluğuna birim zamanda geçen B gazının kütlesi

M_e : Denge nemindeki mısır kütlesi

M_s : Mısırın içerdiği sıvı miktarı

M_y : Yaş mısırın kütlesi

M_g : Gazın moleküler kütlesi

$M_{t,i}$: Teorik boyutsuz nem oranı

$M_{d,i}$: Deneysel boyutsuz nem oranı

m : Mısırın kuru baza göre içeriği

$\dot{m}_a$: Birim zamanda buharlaşan nem miktarı

$\dot{m}_b$: Birim zamanda buharlaşan nem miktarı

m_0 : Mısırın başlangıçtaki nem içeriği

m_y : Mısırın yaş baza göre nem oranı

N : Ölçüm sayısı

N_c : Kurutma denklemindeki parametre sayısı

n : Deneysel sabit

P : Toplam basınç

P_a : A gazının basıncı

P_b : Bgazının basıncı

P_{b0} : l_1 mesafesindeki hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı

P_{b1} : l_1 mesafesindeki hava içerisindeki kuru havanın kısmi basıncı

P_{bm} : Ortalama kısmi buhar basıncı

P_e : Efektif basınç

P_{ho} : Doymuş hava içerisindeki su buharının basıncı

P_{h1} : l_1 mesafesindeki hava içindeki kuru havanın kısmi basıncı

P_k : Kapiler basınç

R : Üniversal gaz sabiti

R_a : A gazının sabiti

R_b : B gazının sabiti

R_g : Üniversal gaz sabiti

R_0 : Menisk yarı çapı

r : Korelasyon katsayısı

r_0 : Gözenek yarıçapı

T_a : A gazının sıcaklığı

T_b : B gazının sıcaklığı

V_a : A gazının akış hızı

V_b : B gazının akış hızı

ρ_A : A gazının yoğunluğu

ρ_B : B gazının yoğunluğu

ρ_b : Buharın yoğunluğu

ρ_h : Havanın yoğunluğu

σ_0 : Sıvının yüzey gerilmesi

θ : Menisk kenar açısı

γ_0 : Özgül ağırlık

χ^2 : Ortalama karesel sapma

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1: Mısırın nem oranının zamana göre değişimi 7
Şekil 2.2: Kuruma hızının zamanla değişimi 8
Şekil 2.3: Kuruma hızının nem oranı değişimi 8
Şekil 2.4: Yan yana bulunan iki kılcal 10
Şekil 2.5: Kapiler çekme kuvveti 11
Şekil 2.6: Kapiler sıvı içerisinde basınç dağılımı 11
Şekil 2.7: Küçük bir delik aralığında molekül hareketi 12
Şekil 2.8: Dar bir boru içinde moleküllerin hareketi 14
Şekil 2.9: Gazların çift yönlü difüzyonu 15
Şekil 2.10: Gözenek içerisinde tek yönlü difüzyon 19
Şekil 2.11: Sorpsiyon izotermi 21
Şekil 3.1: Şematik kurutma deney tesisatı 25
Şekil 7.1: Newton ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 47
Şekil 7.2: Page ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 49
Şekil 7.3: Henderson&Pabis ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 51
Şekil 7.4: Wang&Singh ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 53
Şekil 7.5: Logaritmik ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 55
Şekil 7.6: İki terimli ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 57
Şekil 7.7: Midilli ampirik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma 59

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1: T= 40°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 32
Tablo 5.2: T= 45°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 33
Tablo 5.3: T= 50°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 34
Tablo 5.4: T= 55°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 35
Tablo 5.5: T= 60°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 36
Tablo 5.6: T= 65°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 37
Tablo 5.7: T= 70°C Kurutma sıcaklığı için ampirik modellerin istatiksel analizi 38
Tablo 6.1: T= 40°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 39
Tablo 6.2: T= 45°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 40
Tablo 6.3: T= 50°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 41
Tablo 6.4: T= 55°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 42
Tablo 6.5: T= 60°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 43
Tablo 6.6: T= 65°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 44
Tablo 6.7: T= 70°C Tek tabaka deneysel kuruma değerleri 45
Tablo 7.1: Newton ampirik model sonuçları 46
Tablo 7.2: Page ampirik model sonuçları 48
Tablo 7.3: Henderson&Pabis ampirik model sonuçları 50
Tablo 7.4: Wang&Singh ampirik model sonuçları 52
Tablo 7.5: Logaritmik ampirik model sonuçları 54
Tablo 7.6: İki terimli ampirik model sonuçları 56
Tablo 7.7: Midilli ampirik model sonuçları 58

1.GİRİŞ

Türkiye'de tahıllar içinde buğday ve arpadan sonra en geniş ekim alanına sahip bitki mısırdır. Tahıllar içinde ilk sırayı buğday almakla birlikte, özellikle bazı bölgelerimizde (Karadeniz Bölgesi) mısır ekmeği de yaygın olarak tüketilmektedir. Mısır bitkisin tanesi ve gövdesinden istifade edilir. Mısır taneleri ekmek yapımında kullanıldığı gibi sıvı yağ, nişasta, glikoz ve yem sanayisinde de değerlendirilmektedir. Mısır bitkisinin ana vatanı hakkında çeşitli görüşler ileri sürülmektedir. Ancak bir çok kaynakta bu bitkinin anayurdunun Amerika kıtası olduğu belirtilmektedir. Mısırın dünyaya yayılması ise bu kıtanın keşfinden sonra olmuştur. Ülkemize ise ilk olarak 1600 yılında getirildiği belirtilmektedir. Dünya'da mısır yetiştiren ülkeler arasında A.B.D. ilk sırayı alır. Ayrıca; Çin, Brezilya, Arjantin, Meksika ve Fransa da mısır üretiminde önde gelen ülkelerdir. Dünya'da yetiştirilen mısır çeşitleri başlıca 7 grupta incelenir. Bunlar; atdişi mısır, sert mısır, cin mısır, şeker mısır, kavuzlu mısır, unlu mısır ve mumlu mısırdır. Bunlardan en çok yetiştirilenler atdişi mısır ve sert mısırdır. Cin mısır ve şeker mısır çeşitleri ise genellikle çerezlik olarak değerlendirilir. Diğerlerinin fazla ekonomik bir değeri yoktur. Ülkemizde üretilen mısırın % 80' ine yakınını sert mısır çeşidi oluşturur.

Mısırın en önemli sorunu kurutmadır. Zira iyi kurutulmamış ve nem içeriği depolama seviyesine indirilmemiş mısırlar depolarda küflenerek kısa zamanda bozulurlar. Mısır üretici ve tüccarlarının maddi zarara uğramasına sebep olurlar. Bu çalışmada mısırın nemi, kurutma ile depolama nem değerinin altına düşürülecek ve mısırın kuruma davranışını en iyi ifade eden model belirlenecektir.

2.KURUTMA

Yaş veya nemli malzemeden sıvının alınması işlemine **kurutma** denir. Teknikte çeşitli yöntemlerle malzemeden sıvı uzaklaştırılabildiği gibi, birkaç prosesten sonra malzemeden sıvının alındığı da görülmektedir. Örneğin süt tozu ve hazır çorba üretiminde olduğu gibi bir çözeltinin sıcak gaz akımı içerisine damlacıklar halinde püskürtülmesi ve sıvının buharlaştırılarak alınması; bir prosesle gerçekleştirilen kurutma yöntemidir. Tekstil sanayisinde kullanılan elyafların nemlerinin bir kısmı önce, bir preste veya santrifüjde çıkarıldıktan sonra sıcak hava ile neminin bir kısmı daha alınmaktadır. Bu işlemle yapılan kurutma iki proseste gerçekleşmektedir.

Bir çözelti kazana konup ısıtılırsa çözelti kaynayarak buharlaşacak ve bir müddet sonra kuruyacaktır. Veya aynı çözelti, kazan içerisine konup hiç ısıtılmadan beklenirse yine çözeltinin yüzeyinden buğulaşma olacak ve çevre havasının nem durumuna göre belirli seviyeye kadar kuruyacaktır. Burada buharlaşma ile buğulaşma arasındaki farka işaret etmekte fayda vardır. Buharlaşmada sıvı yüzeyinde yalnız sıvının serbest kalan kendi buharı vardır ve bu buharın basıncı toplam basınca eşittir. Buğulaşma ise sıvı yüzeyinde, sıvının kendi buharı ile havanın karışımı vardır ve toplam basınç bu karışım gazlarının kısmi basınçları toplamına eşittir. Kurutma aynı zamanda eş zamanlı ısı ve kütle geçişine dayalıdır. Kurutmanın türleri kurutulacak madde çeşidi kadar değişik olabilir. Tarım ürünlerindeki kurutmanın ana amacı ürünün bozulmadan uzun süre saklanmasıdır.

2.1- Mısır kurutulmasının önemi

Mısır tahılının hasat nemi yaklaşık olarak kuru baza göre % 25 civarındadır. Hasat nemine sahip mısır tahılının, bozulmadan veya küflenmeden uzun süre saklanabilmesi için kuru baza göre nem değeri, % 13 – 14' ün altına muhakkak kurutma işlemiyle düşürülmelidir. Tahılların kurutulmasında kullanılan yöntemlerden biri ve en ilkeli 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 arttırıcı etkiye sahip olan havanın bağıl nemini düşürmektir. En ekonomik kurutma güneşte yapılmaktadır.

2.2 – Mısır kurutma sistemleri

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

- Doğal hava sıcaklıklı kurutma sistemleri
- Düşük hava sıcaklıklı kurutma sistemleri
- Yüksek hava sıcaklıklı kurutma sistemleri
- Kombine kurutma sistemleri

Doğal hava sıcaklıklı 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 mısırın 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). Kurutmanın üretici tarafından yapılması halinde, doğal hava ile kurutma, basitliği ve kolay uygulanabilmesi nedeniyle önem kazanmaktadır. Kullanılan depo tipi kurutucular aynı zamanda ürünün kış sezonu boyunca saklanması için kullanılabilmektedirler.

Düşük hava sıcaklıklı kurutma sistemleri

Bu tür kurutuculardа 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. Enerji girdisi doğal havalı kurutucuya oranla daha yüksektir. Bu da kurutma maliyetini etkileyen bir faktördür (Kunze, 1985).

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)

Kombine kurutma sistemleri

Yukarıdaki üç gruptan birkaçının bir arada bulunduğu kurutma sistemleridir. Kombine sistemlerde kurutma iki aşamada tamamlanır. Hasat sonrası elde edilen, ilk nemi %20 (y.b.) den fazla olan ürün, yüksek sıcaklıkta çalışan bir kurutucuyla ön kurutmaya alınır. Nemi kısa sürede %20-%18 neme indirildikten sonra çevre havası veya düşük sıcaklıkta çalışan ikinci bir kurutucuya aktarılarak kurutmaya devam edilir. Bu yöntemin, ürünün baştan sona sıcak hava ile kurutulmasına göre en az %25 daha az enerji tüketimi sağladığı görülmüştür.

2.3- Nem oranı

Mısırın nem oranı, yaş ve kuru baza göre iki şekilde tanımlanır. mısır içindeki su kütlesinin, toplam mısır kütlesine oranına yaş baza göre nem oranı denir.

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

Burada, M_s mısırın içerdiği su kütlesini, M_y yaş mısırın kütlesini, m_y mısırın yaş baza göre (yb) nem oranını göstermektedir. Mısır içindeki nem kütlesinin, mısırın kuru kütlesine oranına mısırın kuru baza göre nem oranı denir.

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

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

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

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

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

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

$$m = m_y m + m_y \qquad \Rightarrow \qquad m_y = m(1 - m_y) \qquad \textbf{(2.7)}$$

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

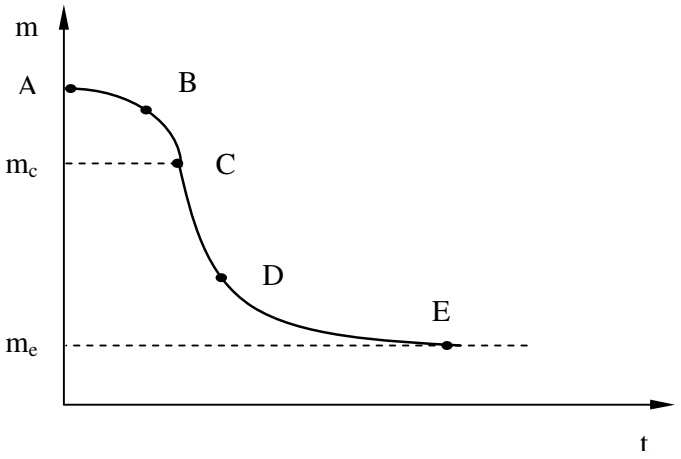
$$m = \frac{m_y}{1 - m_y} \qquad \textbf{(2.8)}$$

Mısırın kuru baza göre nem oranı, mısırın değişmeyen kuru kütlesi kullanılarak tanımlandığı için, daha güvenilir bir değişkendir 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.

2.4-Mısırın kuruma davranışı

Mısırın kurutulması hangi türde olursa olsun, kuruma davranışının değişmediği görülmektedir. Nem içeriği %70'in üstünde olan bir mısır herhangi bir şekilde kurutulursa, kurutma hızının, belli süreçte farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Mısırın belirli bir nem seviyesine kadar kurutma hızının sabit kaldığı, yani kurutma şartları değişmediği sürece, birim zamanda mısırdan alınan nemin değişmediği gözlenmiştir. Bu sürece **sabit kuruma süreci** denir**.** Kuruma hızının azalmaya başladığı andaki mısırdaki nem oranına da **mısır kritik nemi** denir. Şekil 2.1' de şematik olarak gösterilmiştir.

Kritik nem seviyesinden daha az nem içeren mısırlarda ise kuruma zamanı ilerledikçe, mısırda sürekli azalan miktara da nem alınmakta olduğu gözlenmiştir. Bu sürece de **azalan hızda kurutma süreci** adı verilir. Bir çok tahılda azalan hızda kuruma sürecinin birkaç kademeden oluştuğu belirlenmiştir. Bu süreçler **1.nci azalan hız süreci** ve **2.nci azalan hız süreci** gibi isimlerle adlandırılmıştır.



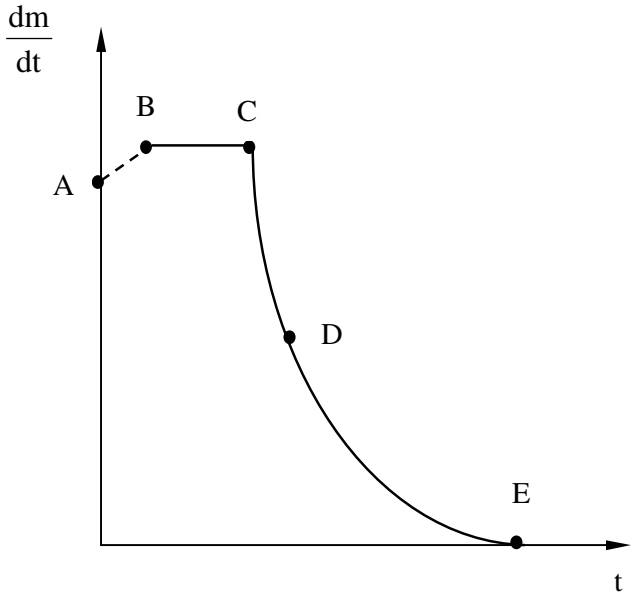
Şekil 2.1: Mısırın nem oranının zamana göre değişimi

AB : Isıtma veya soğutma süreci

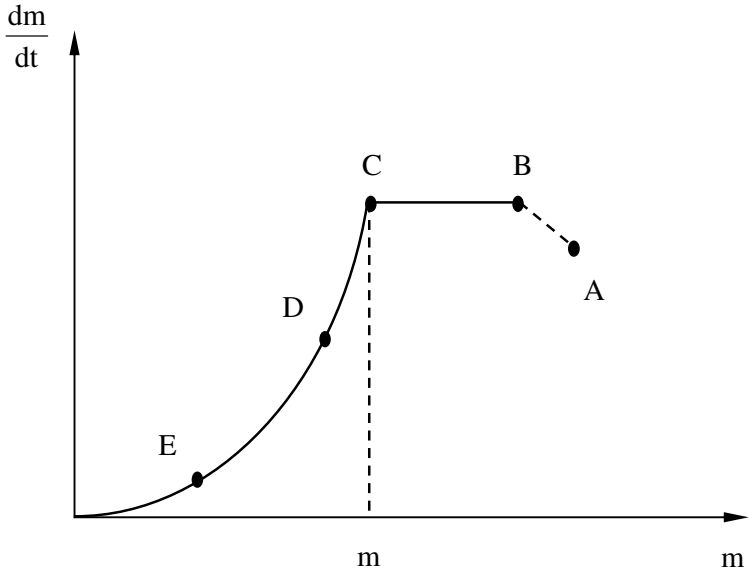
BC : Sabit hızda kurutma süreci

CD : 1. Azalan hızda kurutma süreci

DE : 2. Azalan hızda kurutma süreci



Şekil 2.2: Kuruma hızının zamanla değişimi



Şekil 2.3: Kuruma hızının nem oranı değişimi

a- Sabit hızda kurutma süreci

Nemli veya ıslak olan malzemenin dış yüzeyinde, bütün sıvı yüzeylerinde olduğu gibi, doymuş hava filmi olur. Bu doymuş havanın sıcaklığı, havanın yaş termometre sıcaklığıdır. Doymuş hava içindeki su buharının kısmi basıncı P_{b0}, dış hava içindeki (malzemeyi kurutan) su buharının kısmi basıncıda $P_{b\infty}$ olsun. Birim malzeme yüzeyinden, birim zamanda buharlaşan nem miktarı, aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\dot{m}_b \cong \frac{h'}{R_b T}(P_{b0} - P_{b\infty}) \qquad \textbf{(2.9)}$$

Burada;

$\dot{m}_b$: Birim zamanda buharlaşan nem miktarı (kg/sn)

h': Kütle transfer katsayısı olup

$h' = \frac{D}{\delta}$ tanımlanmıştır. **(2.10)**

δ: Derişiklik sınır tabaka kalınlığı (1/m)

D: Difüzyon katsayısı (m^2/sn)

Dış şartlar sabit kaldığı sürece buna bağlı olarak P_{b0}, $P_{b\infty}$ sabit kalır ve kuruma sabit hızla devam eder. Malzeme yüzeyine gelen sıvı beslemesi azalmaya başladığı an azalan hız süreci başlar.

b-Azalan hızda kurutma süreci

Azalan hız süreci sabit hız sürecinin ardından sonra ortaya çıkar. Kritik nem oranı bu iki süreç arasında meydana gelir.

Hasat edilen mısırın nem oranı kritik nem oranından daha düşük olduğundan kuruma azalan hız sürecinde gerçekleşmektedir. Azalan hız süreci geniş ölçüde ürün tarafından kontrol edilmektedir. Kurutmada amaç malzeme içerisindeki nemin uzaklaştırılması olduğuna göre malzemedeki nemin hangi şekil ve koşullarda hareket ettiğinin bilinmesi önem kazanmaktadır. Nemin iç hareketini kontrol eden mekanizmaların en önemlileri Şunlardır ;

1-Kapilerite

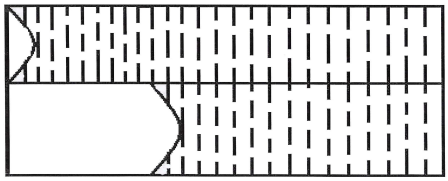
2-Sıvı difüzyonu hareketi

3-Buhar akışı

4-Buhar difüzyonu

1- Kapilarite

Sıvı hareketinde itici kuvvet, kapiler çekme kuvvetidir. Bu kuvvet gözenek içerisindeki katı yapı ile sıvı ve gaz boşluğu arasındaki sınır yüzeylerin gerilmesinden doğan iç kuvvettir. Gözenek ne kadar ufak olursa sıvıdaki çekme kuvveti o oranda büyük olur. Yan yana bulunan iki kılcal düşünelim. Kılcalların çapları şekil 2.4'te gösterildiği gibi birbirinden farklı olsun.



Şekil 2.4: Yan yana bulunan iki kılcal

Sabit kurutma sürecinin bitiminde gözeneklerdeki sıvı seviyeleri şekil 2.4'te görüldüğü gibi olur. Her iki kılcalda menisk oluşur ve çapı küçük olan kılcalın çekme kuvveti, büyük olan kılcalın çekme kuvvetinden daha büyük olur. Şayet iki kılcal arasında bağıntı varsa kaba kılcaldaki sıvı ince kılcal tarafından emilir. Bu harekete **kapilarite** denir. Gözenekli tahıllardaki sıvı hareketinde kapilarite önemli bir yer tutar

Kapiler sıvı hareketini formüle etmek için hareket eden sıvı içerisindeki basınç dağılımının bilinmesi gerekir. Ancak malzeme gözenekleri arasında harekete eden sıvı içerisinde basıncın ölçülmesi mümkün değildir. Kapiler sıvı hareketinin sonucu olarak genellikle bir nem gradyandı meydana gelir. Bu nem değişmesinin ölçülmesi mümkün olur. Bu nedenle kapiler sıvı hareketini formüle ederken basınç değişmesi yerine nem değişmesini kullanmak daha uygun olur.

$$m_s = -k_m \rho \frac{dM}{dz} \qquad \textbf{(2.11)}$$

Burada ;

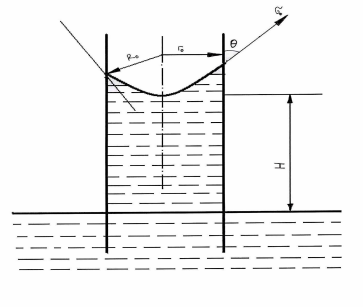
k_m : M 'e bağlı sabit bir katsayı

ρ : Tahıl nemi

M : Nem oranıdır.

Kapiler çekme kuvveti:

Yarıçapı r_0 olan kapiler bir boru sıvı içerisine daldırılınca, sıvının boru içerisinde H yüksekliğine kadar yükseldiği görülür. Sıvının yüzeyinde buğulaşma ve atmosfer basıncı farkı ihmal edilirse H yüksekliği aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.



Şekil 2.5 : Kapiler çekme kuvveti

$$P_k = H\gamma_0 = 2\sigma_0 \frac{\cos\theta}{r_0} \qquad \textbf{(2.12)}$$

Burada;

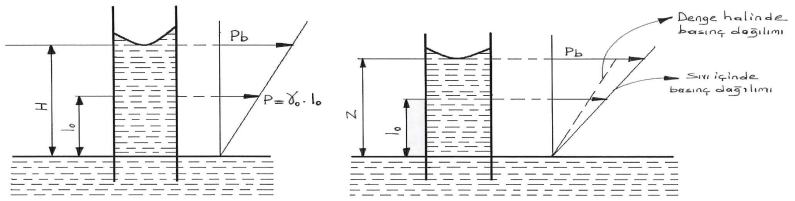
P_k **:** Kapiler basınç (N/m^2)

σ_0 : Sıvının yüzey gerilmesi (N/m)

θ : Menisk kenar açısı

γ_0 : Özgül ağırlık (N/m^3)

Sıvının kapiler boru içinde yükselmesi sıvı yüzeyinde negatif bir basıncın etkisi olduğu düşünülebilir. Kapiler basınç olarak adlandırılan bu basınç (2.12) bağıntısı ile hesaplanabilir. Düşey bir kapilerde, negatif çekme kuvveti ile yerçekimi kuvveti denge haline gelince, sıvı sütunun da hareketi durmuş olur ve sıvı içinde lineer bir basınç dağılımı meydana gelir.



Şekil 2.6 : Kapiler sıvı içerisinde basınç dağılımı

1. Hareketsiz sıvı sütunu
2. Yükselen sıvı sütunu

Şayet bir t anında meniks z durumunda bulunursa ve kapiler içinde hareketin laminer olduğu kabul edilirse basınç dağılımı yine lineer olur, ancak denge halindeki basınç dağılımından farklı bir dağılım elde edilir. Sıvı içerisindeki basınç ile hidrostatik denge halindeki basınç arasındaki fark, I_0 noktasındaki sıvının yükselmesini sağlayan efektif basıncı verir.

$$P_e = P_k \frac{I_0}{z} - \gamma_0 I_0 = \left(\frac{P_k}{z} - \gamma_0 \right) \cdot I_0 \qquad \textbf{(2.13)}$$

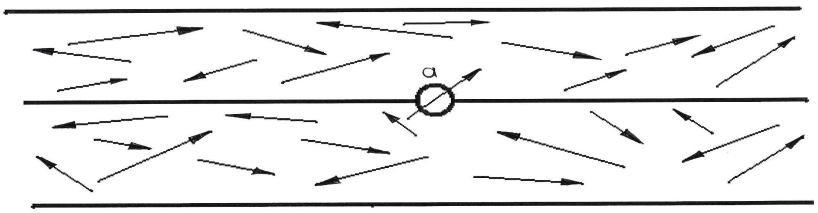
Burada;

P_e **:** Efektif basınç (N/m^2)

Bütün akış olaylarında olduğu gibi, kapiler hareketin meydana gelmesi için bir basınç farkına gerek vardır. Sıvı içindeki basınç dağılımının, denge halindeki basınç dağılımından farklı olması kapiler hareketi doğurur.

2- Buhar akışı:

Bir gaz ile dolu olan malzeme gözeneklerindeki nem su buharı şeklinde bulunursa o zaman buhar hareketi söz konusudur. Gözenek duvarları ara mesafesi buhar moleküllerinin ortalama serbest yolundan küçük olursa, nem hareketi Krudsen'in moleküler konumuna uygun bir hareket olur. Şekil 2.7 'de çok ince duvar ile ayrılmış olan A ve B boşluklarında bulunan moleküllerin ortama serbest yolu, duvarda bulunan deliğinin çapından büyük olduğu zaman ve T_A, T_B sıcaklıkları, P_A, P_B basınçları bilinirse gazların kinetik teorisine göre a' deliğine düşen molekül sayısı hesaplanabilir.



Şekil 2.7 : Küçük bir delik aralığında moleküllerin hareketi

Ayrıca duvar kalınlığı ihmal edilecek kadar ince olursa a' deliği kesitine düşen moleküllerin tümü delikten geçer ve neticede A boşluğundan B boşluğuna birim zamanda geçen gazın kütle debisi ;

$$\dot{m}_a = a' \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \cdot \frac{P_a}{\sqrt{R_a T_a}} \qquad \textbf{(2.14)}$$

Burada;

$\dot{m}_a$: a' yüzeyine düşen A gazının kütle debisi (kg/sn)

P_a : A gazının basıncı (N/m^2)

R_A : A gazının sabitesi (J/kg°C)

T_a : A gazının sıcaklığını göstermektedir.(°C)

Aynı şekilde B boşluğundan A boşluğuna geçen gazın kütle debisi

$$\dot{m}_b = a'\sqrt{\frac{1}{2\pi}} \cdot \frac{P_b}{\sqrt{R_b T_b}} \qquad \textbf{(2.15)}$$

olarak ifade edilir.

Burada;

$\dot{m}_b$: a' yüzeyine düşen B gazının kütle debisi (kg/sn)

P_b : B gazının basıncını (N/m^2)

R_b :B gazının sabitesini göstermektedir. (J/kg°C)

T_b : B gazının sıcaklığı(°C)

Boru çapı, moleküllerin ortalama serbest yolundan büyük ve boru iç yüzeyi pürüzsüzse, boru kesitine düşen moleküllerin tümünün boru içinden geçeceği kabul edilir. Bu koşullarda moleküllerin harekete karşıt yönde yansıması söz konusu olamaz ve boru uzunluğu borudan geçen gaz miktarını etkilemez. Ancak boru çapı moleküllerin ortalama serbest yolundan küçük olduğu zaman durumun farklı olduğu görülür ve moleküllerin, boru duvarları pürüzlüymüş gibi hareket ettiği anlaşılır. Duvarlara çarpan moleküllerin sayılarının l uzunluğu ile orantılı olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Çapı d ve kesit alanı a'olan dairesel borudan birim zamanda geçen gaz kütlesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

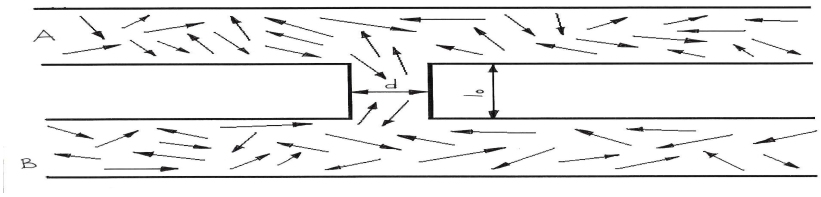
$$\dot{m}_a = \left(\frac{4a'}{3}\right) \cdot \left(\frac{d}{l_0}\right) \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{P_a}{\sqrt{R_a T_a}} \qquad \textbf{(2.16)}$$

$$\dot{m}_b = \left(\frac{4a'}{3}\right) \cdot \left(\frac{d}{l_0}\right) \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{P_b}{\sqrt{R_b T_b}} \qquad \textbf{(2.17)}$$

Burada;

d : Boru çapı (m)

l_0 : Boru uzunluğudur. (m)



Şekil 2.8 : Dar bir boru içinde moleküllerin hareketi

A ve B boşluklarında aynı gazın bulunduğu ($R_A = R_B = R_g$) ve sıcaklıkların eşit olduğu ($T_A = T_B = T$) kabul edilirse, farklı P_A ve P_B basınçları tesiri altında A'dan B'ye $\dot{m}_A$ ve B'den A'ya $\dot{m}_B$ kadar gaz geçer. Bu iki debi arasındaki fark ise A ve B boşluklarındaki gaz moleküllerinin kütlesel akış miktarını verir.

$$\dot{m} = \dot{m}_a - \dot{m}_b = \left(\frac{4a'}{3}\right) \cdot d \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{R_g T}}\right) \cdot \left[\frac{P_a - P_b}{l_0}\right] \qquad \textbf{(2.18)}$$

Diferansiyel mertebede basınç farkı $P_A - P_B = dp$ ve kısa boru uzunluğu dl için (2.19) bağıntısı aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{m} = (-\frac{4a'}{3}) \cdot d \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi R}} \cdot \left(\sqrt{\frac{M_g}{T}}\right) \cdot \frac{dP}{dl_0} \qquad \textbf{(2.19)}$$

Burada;

M_g : Gazın moleküler kütlesi(kg/mol)

R_g : Üniversal gaz sabitesidir.(j/kg°C)

Yukarıdaki bağıntının elde ediliş şekline göre basınç P'nin, toplam basınç veya kısmi basınç olması sonucu etkilemez ve moleküler hareket halinde difüzyon akışıyla buhar akışı ayırt edilemez. Krsher'e göre (2.20) bağıntısı hareketin meydana geldiği ortamın ve akış özelliklerini içeren bir katsayı kullanmak suretiyle sabit sıcaklıkta ve tek yönlü hareket halinde kütle hareketinin genel denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m = -a' \cdot b \cdot \frac{dP}{dl} \qquad \textbf{(2.20)}$$

Burada b^* ile gösterilen katsayı hareket katsayısı olarak tanınır. Hareketin laminer veya türbülanslı olmasına göre hareket katsayısı farklı olur. (2.21) eşitliği ile verilen hareket için hareket katsayısı aşağıdaki gibi olur.

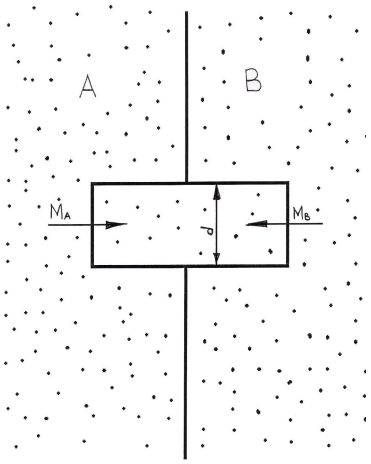
$$b^* = \left(\frac{4}{3}\right) \cdot d \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \cdot \left(\frac{M_g}{T}\right) = 5{,}83 \cdot 10^{-3} d \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}} \qquad \textbf{(2.21)}$$

3- Buhar difüzyonu:

Kısmi basınç farkının veya derişiklik farkının sebeb olduğu moleküler harekete **difüzyon** denir.

Çift yönlü difüzyon :

Aynı sıcaklık ve basınçta bulunan A ve B gazları bir duvarla ayrılmış olsun. (Şekil 2.9) Duvarda kesit alanı a ve uzunluğu l_0 olan bir irtibat borusu bulunsun.



Şekil 2.9 : Gazların çift yönlü difüzyonu

Gazların akış hızları V_a ve V_b olursa, Stefan'a göre karşılıklı hareket eden moleküller arası çekici kuvvet, bağıl hız $(V_a - V_b)$, mol ağırlık $\frac{\rho_a}{M_a}$ ve $\frac{\rho_b}{M_b}$ ile gazların özelliklerini içeren C_{ab} sabiti ile orantılıdır. Ayrıca gazların hareket edebilmesi için itici kuvvet olan kısmi basınç gradyanlarının moleküler arası çekici kuvveti yenmesi gerekir. Toplam basınç $P_a + P_b = P$ sabit olursa, Kısmi basınç gradyanı için;

$$-\frac{dP_a}{dl} = \frac{dP_b}{dl} \qquad \textbf{(2.22)}$$

yazılabilir.

Stefan'ın moleküler arası kuvvet ifadesine uygun olarak aşağıdaki

$$-\frac{dP_a}{dl}=\frac{dP_b}{dl}=C_{ab}\cdot\frac{\rho_a}{M_a}\cdot\frac{\rho_b}{M_b}\cdot\left(V_a-V_b\right) \qquad \textbf{(2.23)}$$

bağıntısı elde edilir .

Avagadro kanununa göre sabit sıcaklık ve basınçta belirli bir hacmi dolduran gazların mol sayısı eşit olur. O halde A ve B hacimlerinde basıncın değişmemesi için irtibat borusundan A' dan B' ye geçen mol sayısı, B' den A' ya geçen mol sayısına eşit olmalıdır. Başka bir deyimle her iki gazdan irtibat borusundan birim zamanda geçen molekül sayısı eşit olmalıdır.

$$\frac{V_a\cdot\rho_a}{M_a}=-\frac{V_b\cdot\rho_b}{M_b},\ -V_b=V_a\cdot\frac{\rho_a}{M_a}\cdot\frac{M_b}{\rho_b} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Bu eşitlikten yararlanarak

$$\frac{dP_a}{dl_0}=C_{ab}\cdot V_a\cdot\frac{\rho_a}{M_a}\left(\frac{\rho_b}{M_b}+\frac{\rho_a}{M_a}\right)=-\frac{dP_b}{dl_0}=-C_{ab}\frac{V_b\rho_b}{M_b}\left(\frac{\rho_a}{M_a}+\frac{\rho_b}{M_b}\right)$$

$$\frac{dP_a}{dl_0}=-C_{ab}\cdot V_a\cdot\frac{\rho_a}{M_a}\left(\frac{\rho_b}{M_b}+\frac{\rho_a}{M_a}\right) \qquad \textbf{(2.25)}$$

$$\frac{dP_b}{dl_0}=C_{ab}\cdot V_b\cdot\frac{\rho_b}{M_b}\left(\frac{\rho_b}{M_b}+\frac{\rho_a}{M_a}\right) \qquad \textbf{(2.26)}$$

ideal gaz kanununa göre $\rho_a=\frac{P_a}{R_aT},\ \rho_b=\frac{P_b}{R_bT}$

(2.26) ifadesine üniversal gaz sabiti R yerleştirilirse,

$$\frac{dP_a}{dl}=-C_{ab}\cdot V_a\cdot\frac{\rho_a}{M_a}\left(\frac{P_a}{RT}+\frac{P_b}{RT}\right)$$

$$M_a=\frac{R}{R_a},\ M_b=\frac{R}{R_b}$$

$$\frac{dP_a}{dl}=-C_{ab}\cdot V_a\cdot\frac{\rho_a}{M_aRT}\left(P_a+P_b\right)=-C_{ab}\cdot V_a\frac{\rho_a\cdot P}{M_aRT}$$

$$\frac{dP_b}{dl}=C_{ab}\cdot V_b\cdot\frac{\rho_b\cdot P}{M_bRT} \qquad \textbf{(2.27)}$$

bulunur.

Boru içindeki difüzyonla A' dan B' ye ve B' den A' ya geçen gaz debi akışkanların süreklilik kanununa göre;

$$\dot{m}_a = a' \cdot V_a \cdot \rho_a = -a' \cdot M_a \cdot \frac{RT}{C_{ab} \cdot P} \cdot \frac{dP_a}{dl}$$

$$\dot{m}_b = a' \cdot V_b \cdot \rho_b = a' \cdot M_b \cdot \frac{RT}{C_{ab} \cdot P} \cdot \frac{dP_b}{dl}$$

olduğundan, Burada;

$M_a = \frac{R}{R_a}$, $M_b = \frac{R}{R_b}$ olarak kullanılırsa gaz debilerini veren bağıntılar bulunur.

$$\dot{m}_a = -a' \cdot \frac{1}{R_a T} \cdot \frac{(RT)^2}{C_{ab} \cdot P} \cdot \frac{dP_a}{dl} \qquad \textbf{(2.28)}$$

$$\dot{m}_b = -a' \cdot \frac{1}{R_b T} \cdot \frac{(RT)^2}{C_{ab} \cdot P} \cdot \frac{dP_b}{dl} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Burada;

P_a : A gazının kısmi basıncı (N/m^2)

P_b : B gazının kısmi basıncı (N/m^2)

P : Toplam basınç (N/m^2)

R_a : A gazının sabiti (j/kg°C)

R_b : B gazının sabiti (j/kg°C)

C_{ab} : Gazlarla ilgili katsayı

Her iki akış bağıntısındaki ortak büyüklük $\frac{(RT)^2}{C_{ab} \cdot P}$ difüzyon katsayısı D (m^2/s) olarak adlandırılır.

$$D = \frac{(RT)^2}{C_{ab} \cdot P} \qquad \textbf{(2.30)}$$

$$\dot{m}_a = -a' \cdot \frac{D}{R_a T} \cdot \frac{dP_a}{dl} \qquad \textbf{(2.31)}$$

$$\dot{m}_b = -a' \cdot \frac{D}{R_b T} \cdot \frac{dP_b}{dl} \qquad \textbf{(2.32)}$$

Kütle hareketi genel denklemi ile karşılaştırılınca hareket katsayısı b ile difüzyon katsayısı D arasındaki bağıntı bulunur.

$b_{difA} = \frac{D}{R_a T}$, $b_{difB} = \frac{D}{R_b T}$ olur.

Buharın tek yönlü difüzyonu

Buharın sıvı yüzeyinden difüzyonla sıvı üzerindeki bir gaza taşmasına **buğulaşama** denir. Buğulaşmanın buharlaşmadan farkı, buğulaşmada sıvı üzerindeki buharın gazla karışım halinde bulunmasıdır. Bu koşullarda buhar basıncı karışımın toplam basıncından ufak olur. Buhar basıncı toplam basınca eşit olur. Kurutma tekniğinde genellikle malzemedeki nemin çevre havasına karışması buğulaşma şeklinde olur. Havanın malzeme içine akışı olamayacağına göre (malzeme içindeki gözeneğin dibi kapalı olduğundan) sadece malzeme içinden dışarıya kütle akışı vardır. Bu nedenle tek yönlü difüzyon denmektedir. Bu akışa Stefan'ın çift yönlü difüzyon bağıntısı, buğulaşmaya uygulanınca ve hava için h, buhar için b indisleri kullanılırsa;

$-\frac{dP_b}{dl} = C_{bh} \cdot \frac{\rho_b}{M_b} \cdot \frac{\rho_h}{M_h} \cdot V_b$ yazılabilir.

Buradan da a kesitinden birim zamanda difüzyonla geçen buhar kütlesini veren bağıntı bulunur.

$$\dot{m}_b = a' \cdot V_b \cdot \rho_b = -a' \frac{M_b}{C_{bh}} \cdot \frac{M_h}{\rho_h} \cdot \frac{dP_b}{dl} \qquad \textbf{(2.33)}$$

ideal gaz kanununa göre ;

$\rho_h = \frac{P_h}{R_h T}$ ve R üniversal gaz sabiti kullanılırsa;

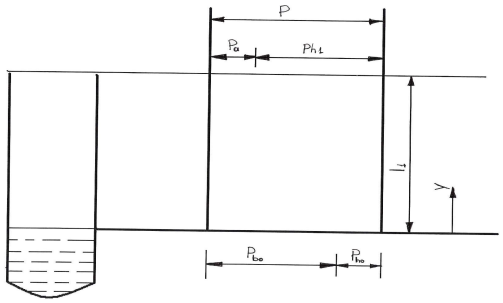
$$\dot{m}_b = -a' \cdot \frac{1}{R_b T} \cdot \frac{(RT)^2}{C_{bh} \cdot P_h} \cdot \frac{dP_b}{dl}$$

$P_h = P - P_b$ idi. Buğulaşma hızı;

$$\dot{m}_b = -a' \cdot \frac{D}{R_b T} \cdot \frac{P}{P - P_b} \cdot \frac{dP_b}{dl} \qquad \textbf{(2.34)}$$

$P = P_b$ halinde $b_{buğ} \to \infty$ olur ve olay bir buhar akışına dönüşür.

Herhangi bir gözenekli malzemenin bir gözeneğinden tek yönlü difüzyonla (buğulaşmayla) kurumayı düşünürsek, Şekil (2.10) deki gibi gözenek içerisinde bir kısmi buhar basıncı oluşur.



Şekil 2.10 : Gözenek içerisinde tek yönlü difüzyon

(2.35) bağıntısını bu sistem için yazıp integre edersek;

$$m_b \int_0^P dy = -a' \frac{D}{R_b T} P \cdot \int_{P_{b0}}^{P_1} \frac{dP_b}{P - P_b} = -a' \frac{DP}{R_b T} \ln\left(P - P_b\right) \Big|_{P_{b0}}^{P_{b1}}$$

$$m_b l_1 = a' \cdot \frac{D}{R_b T} P \cdot \ln \frac{P - P_{b1}}{P - P_{b0}} \quad \text{bağıntısı elde edilir.} \qquad \textbf{(2.35)}$$

Burada,

P_{b0} : l_1 mesafesinde hava içindeki su buharının kısmi basıncı (N/m^2)

P_{b1} : l_1 mesafesinde hava içindeki kuru havanın kısmi basıncı (N/m^2)

$\frac{P - P_{b1}}{P - P_{b0}} = S$ dersek

$\ln S = S - 1$, $\frac{P - P_{b1}}{P - P_{b0}} - 1 = \frac{P_{b0} - P_{b1}}{P - P_{b0}}$ olur. $P_{b0} <<< P$ olduğunda

$$\ln S = \frac{P_{b0} - P_{b1}}{P} \quad \text{olur.}$$

$$m_b = a' \cdot \frac{D}{1} \cdot \frac{1}{R_b T} \left(P_{b0} - P_{b1}\right) \qquad \textbf{(2.36)}$$

olur ve kuruma gözenek içindeki sıvı yüzeyindeki doymuş buharın kısmi basıncı ile, yüzeydeki hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı farkı ile doğru orantılıdır.

$$P_{bm} = \frac{P_{b0} + P_{b1}}{2} \qquad \textbf{(2.37)}$$

Burada;

P_{bm} : Ortalama kısmi buhar basıncıdır. (N/m^2)

2.5- Sorpsiyon İzotermi

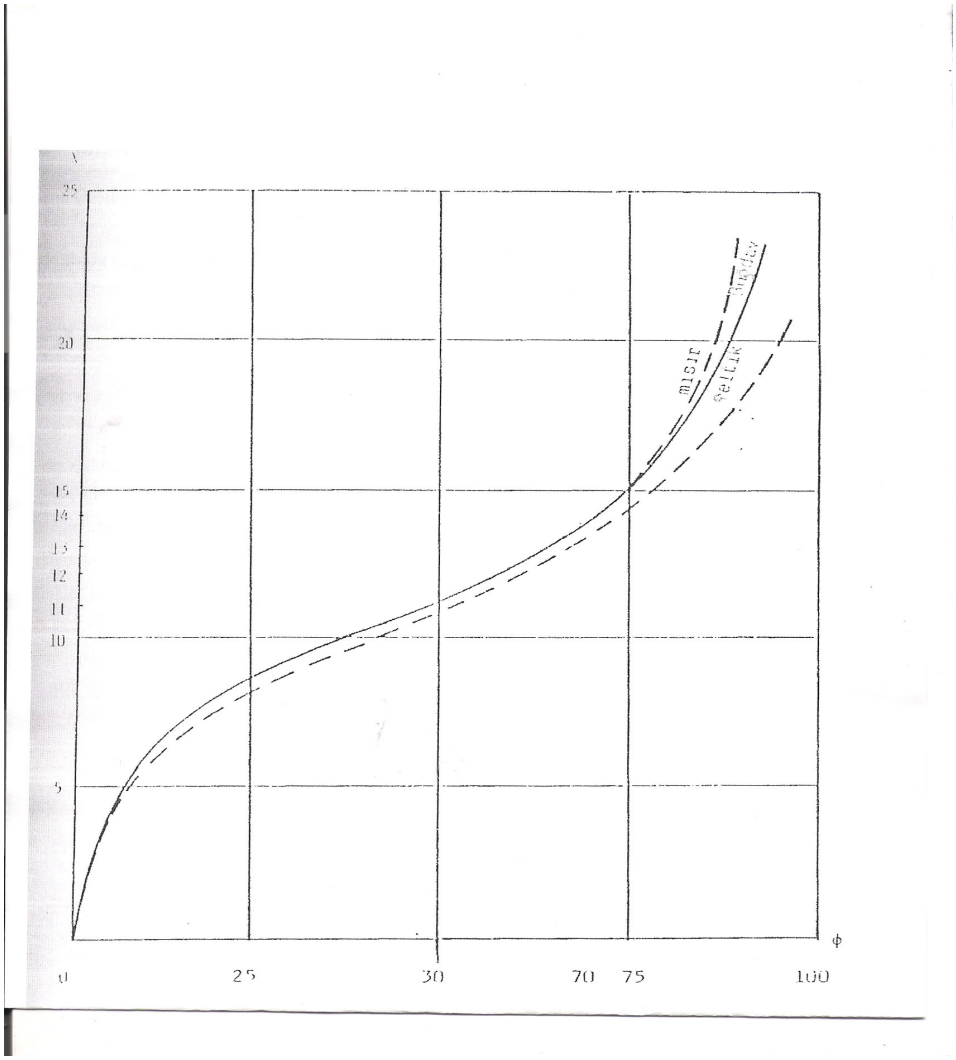
Malzeme nem içeriği (M) ile malzeme üzerindeki havanın bağıl nemi arasındaki ilişkiyi, başka bir deyişle, malzemedeki sıvı miktarı ile havadaki buhar basıncı arasındaki dengeyi gösteren eğriye **"sorpsiyon izotermi "** denir.

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

Sıcaklığın artması sorpsiyon izoterm eğrilerinin aşağı doğru kaymasına neden olur.

ÇEŞİTLİ TAHILLARIN SORPSİYON İZOTERMİ

Tahıl nem içeriği (m)



Havanın bağıl nemi (φ)

Şekil 2.11: Sorpsiyon izotermi

2.6- Denge nemi

Mısırın kurutulmasında kullanılan dış havanın bağıl nemi, deney süresince deney sonucunu etkiyecek kadar değişmedi. Kaldı ki dış hava deney şartlarına kadar ısıtıcılarda ısıtıldığı için, oda havasının bağıl neminin değişmesinden doğabilecek hata patı azaltılmış oldu. Genelde kurutma havasının bağıl nemi deney süresince sabit kaldı denebilir.

Sorpsiyon izotermlerinden de görüldüğü gibi, havanın belli bir φ değeri için mısır ancak belirli seviyeye kurutulabilir. Bu değere mısırın **"denge nemi"** denir. Mısırın denge nemi sorpsiyon izotermlerinden bulunmuştur.

3. DENEY TESİSATI ve PROSEDÜRÜ

3.1- 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.

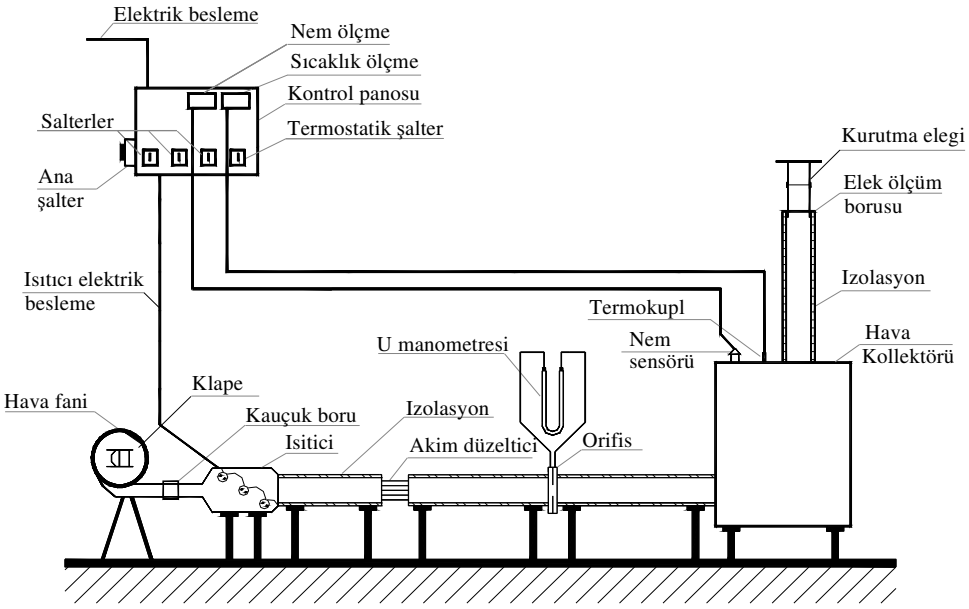
Kurutma havası 500 m^3/h hacimsel debi sağlayan 2 kW gücünde bir fanla yatay kanallardan geçirilmek suretiyle kurutma odasına gönderilmektedir. Havanın hacimsel debisini istenilen değerlere ayarlamak amacıyla fan girişine bir klape monte edildi. Kurutma havası, fan çıkışındaki ısıtıcıda bulunan üç adet 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. Mısırları 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 sıkılıkta 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 3.1 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 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.

3.2- Mısırın hazırlanması

Deneylerde kullanılacak mısır Edirne Tarımsal Araştırma Enstitüsünden temin edilmiştir. Deneye başlayana kadar mısır hasat nem değerini kaybetmiştir. Bunun için ürün hasat nemi seviyesine getirildi.

3.3- Deneylerin yapılışı

Tesisat çalıştırıldı ve istenilen hava hızı elde edilinceye kadar fan girişinde bulunan klape 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, kavanozlarda muhafaza edilen mısırlar kurutma işlemine tabi tutulmadan önce kütleleri tespit edilerek eleklere koyuldu ve bu elekler de ölçüm boruları üzerine yerleştirildi. Bu eleklerin üzerine kuruma sürecinde kurutma havasının çıkış sıcaklığını tespit etmek amacıyla termometreler yerleştirildi. Deney esnasında kurutma eleklerinde bulunan mısırın kütlesi bir terazi yardımıyla yarım saatlik periyotlarla belirlendi. Tartım işlemleri ±0.0001 g hassasiyetindeki dijital bir terazide yapıldı. Her bir kurutma işlemi 6 saat gerçekleşti. Hasat sonrasında genellikle %25 k.b nem oranına sahip olan mısırın depolama ömrünü ve kalitesini artırmak için 40°-70°C kurutma sıcaklıklarında hava hızı 2 m/sn alınarak nem oranı %14 ‘ün altına düşürülmüştür. Her kurutma sıcaklığı için yapılan deneysel çalışmalarda mısırdan, yarım saat aralıklı yaş kütle ölçülecek şekilde toplam 12 ölçüm alınmıştır. Mısırın başlangıç nemi, denge nemi, nem oranı, kuru baza göre nemi, kuru kütlesi, denge nemindeki kütlesi belirlenmiştir.

4.MODELLER

Newton modeli

Bu tez çalışmasında mısır tek tabakada kurutulmuştur. Kuruma davranışını simüle etmek için sekiz model kullanılmıştır. Mısır kurutma üzerine çalışan araştırmacıların bazıları kurutma denklemini, Newton'un soğutma yasasına benzetmişlerdir. Tanecik içinde nem gradyanı ihmal edilerek, tanecik yüzeyinden ortama olan nem transfer hızı, tanecik nemi ve denge nemi farkı ile orantılı olduğu varsayılarak,

$$\frac{dm}{dt} = k(m - m_e) \qquad \textbf{(4.1)}$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklem t = 0 için, $m = m_0$ başlangıç koşulu ile çözülürse,

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = e^{-kt} \qquad \textbf{(4.2)}$$

bulunur. Burada;

k : Kurutma sabiti $\left(saat^{-1}\right)$

m : Mısır nem içeriği (% kb)

m_e : Mısır denge nemi (% kb)

m_0 : Mısırın başlangıçtaki nem içeriği (% kb)

t : Kurutma zamanı (saat)

Bu denklem bir çok araştırmacı tarafından başarılı bir şekilde kullanılmış olup tam manasıyla başarı elde edememiş araştırmacılarda mevcuttur. Simmonds ve arkadaşları /3/ (4.2) denklemi ile deneysel veriler arasında iyi uyum bulmuşlardır. Aynı şekilde Hustrulid, Flikkke ve Allen /3/ tanecikli kurutmaya maruz kalan tanelerin yukarıdaki denkleme bağlı olarak kuruduğunda hem fikirdiler.

Page modeli

Henderson ve Pabis /3/ bu denklemi mısırın tanecikli kurutulmasında kullanmışlardır. F.W. Bakker Arkema, 1999, mısırın kurtulması çalışmasında bu denklemi kullanmıştır. Page /3/, kabuklu mısırın kurutma oranını araştıran çalışmasında (4.2) denkleminde küçük değişiklikler yaparak aşağıdaki biçimiyle kullanmıştır.

$$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e} = e^{-kt^n} \quad \textbf{(4.3)}$$

Burada;

k : Kurutma sabiti (1 / saat)

n : Deneysel sabit

Yine page modeli, mısır kurutma çalışmasında deneysel datalara iyi uygunluk göstermiştir. (Doymaz & Pala, 2003)

Pabis modeli

Henderson&Pabis 2.Fick yasasının genel seri çözümünün ilk terimi olan aşağıda verilen denklemi kullanmışlardır Doymaz&Pala 2002, mısırı kurutma çalışmasında bu modeli kullanmışlardır.

$$M = a\exp(-kt) \quad \textbf{(4.4)}$$

Wang&Singh modeli

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

$$M = 1 + at + bt^2 \quad \textbf{(4.5)}$$

ifadesini kullanmışlardır. Burada a ve b, sağ tarafın boyutsuzluğunu sağlayacak şekilde tanımlı, birimli sabitlerdir. Wang&Singh,1978, tarafından yapılan çalışmada, teorik analiz için kullanılan (4.5) denkleminin sonuçlarıyla deneysel datalar karşılaştırılmış ve teorik ve deneysel değerler arasında iyi bir uygunluk elde edilmiştir.

Geometrik model

Bu çalışmada mısırın kuruma davranışını belirlemede kullanılan bir modelde geometrik modeldir.

$$M = at^{-n} \quad \textbf{(4.6)}$$

ifadedeki a ve n kurutma sabitleridir.

Logaritmik model

Jain&Pathane, 2004, 35, 40, 45°C kurutma havası sıcaklıkları ve 1.0, 1.25, 1.5m/s hava hızlarını kullanarak, infrared radyasyon ve konveksiyon yardımıyla soğan dilimlerini kurutmuştur. Elde ettiği deneysel sonuçlarla, dokuz farklı matematiksel model ele alarak bir karşılaştırma yapmış ve soğanın kuruma kinetiğini en iyi ifade eden modelin logaritmik (asimptotik) model olduğunu tespit etmişlerdir. Logaritmik denklemin ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$M = a_0 + a\exp(-kt) \quad \textbf{(4.7)}$$

İki terimli model

Yaygın olarak kullanılan iki terimli ampirik model mısır tanelerinin tek tabaka kurutulmasında kullanılmıştır. Ampirik model sonuçları deneysel datalarla iyi uygunluk göstermiştir. (Sharaf-Eldeen et al., 1980), Tu Tu Tran vd., 1999, patlamış mısır olarak kullanılacak mısırın kuruma davranışını ifade etmek içinde bu ampirik modeli kullanmıştır.

Bu model aşağıdaki gibidir.

$$M = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t) \quad \textbf{(4.8)}$$

Midilli model

Alternatif olarak midilli modeli kullanılacaktır. Bu model çoğu araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmıştır.

$$M = a\exp(-kt^n) + bt \quad \textbf{(4.9)}$$

Ele alınan modellerdeki sabitler, deneysel data ve model sonuçları arasındaki hataların kareleri toplamı minimize edilerek bulundu. Her bir model için tek tabaka mısırın kuruma davranışını ifade etmedeki uygunluğunu belirlemek için korelasyon katsayısı r, standart hata e_s ve ortalama karesel sapma χ^2 hesaplanmıştır.

Korelasyon katsayısı

Korelasyon katsayısının fiziksel anlamı tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki uygunluğu gösterir. Pearson katsayısı olarak ta bilinen bu katsayı genelde r ile gösterilir. Korelasyon katsayısı -1 ila +1 arasında değişen değerler alabilir. Korelasyon katsayısının 0'a yakın ya da 0 olması demek tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında hiçbir bağıntının olmadığı anlamına gelir. Genel olarak r>0.90 olduğunda tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında bir uygunluk olduğu söylenebilir. Ayrıca korelasyon katsayısı hangi modelde 1'e daha yakın ise aynı zamanda standart hata ve ortalama karesel sapma da en küçük değerleri alacaktır. Bu ifadeler aşağıdaki şekilde tanımlıdır (Jain, 2004).

$$r = \frac{N\sum_{i=1}^{N} M_{t,i}M_{d,i} - \sum_{i=1}^{N} M_{t,i}\sum_{i=1}^{N} M_{d,i}}{\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}(M_{t,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} M_{t,i}\right)^2}\sqrt{N\sum_{i=1}^{N}(M_{d,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} M_{d,i}\right)^2}} \quad \textbf{(4.10)}$$

Standart hata

$$e_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(M_{t,i} - M_{d,i})^2}{N}} \quad \textbf{(4.11)}$$

Ortalama karesel sapma

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_{t,i} - M_{d,i})^2}{N - N_C} \quad \textbf{(4.12)}$$

Burada N ölçüm sayısını, Nc kurutma denklemindeki parametre sayısını ifade etmektedir. Mt,i ve Md,i i. teorik ve deneysel boyutsuz nem oranıdır.

Deney kurutma sıcaklıklarında, sekiz ampirik model için r , e_s, χ^2 değerleri hesaplandı ve sonuçlar aşağıdaki tablolarda verildi

5.KURUTMA SICAKLIKLARINDA MODELLERİN İSTATİKSEL ANALİZİ

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9830	$5.69x10^{-2}$	$3.50x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	1	$1.8x10^{-3}$	$0.367x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9787	$3.94x10^{-2}$	$1.837x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9861	$4.35x10^{-2}$	$1.924x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8375	$10.41x10^{-2}$	$1.282x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9953	$1.84x10^{-2}$	$4.39x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9999	$3.2x10^{-3}$	$1.521x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	1	$1.9x10^{-3}$	$0.515x10^{-5}$

Tablo5.1: T=40°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9806	$6.38x10^{-2}$	$4.415x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	0.9999	$2.4x10^{-3}$	$0.708x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9752	$4.48x10^{-2}$	$2.372x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9818	$4.921x10^{-2}$	$2.861x10^{-3}$
Geometrik	$M = at^{-n}$	0.8510	$10.53x10^{-2}$	$1.384x10^{-2}$
Logaritmik	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9938	$2.22x10^{-2}$	$6.42x10^{-4}$
Two term	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9996	$6.0x10^{-3}$	$5.12x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	0.9999	$0.25x10^{-2}$	$0.868x10^{-5}$

Tablo5.2:T=45°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9813	$6.43x10^{-2}$	$3.509x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	0.9999	$3.0x10^{-3}$	$1.031x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9760	$4.56x10^{-2}$	$2.462x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9805	$5.283x10^{-2}$	$3.298x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8526	$10.82x10^{-2}$	$1.385x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9933	$2.39x10^{-2}$	$7.42x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9998	$4.3x10^{-3}$	$5.12x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	0.9999	$0.3x10^{-2}$	$1.270x10^{-5}$

Tablo5.3:T=50°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9853	$5.94x10^{-2}$	$3.826x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	1	$2.1x10^{-3}$	$0.541x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9806	$4.34*10^{-2}$	$2.222x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9831	$5.1x10^{-2}$	$3.073x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8444	$11.67x10^{-2}$	$1.609x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9952	$2.12x10^{-2}$	$5.85x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9996	$5.8x10^{-3}$	$4.794x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	1	$0.21x10^{-2}$	$0.664x10^{-5}$

Tablo5.4:T= 55°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9873	$5.82x10^{-2}$	$3.667x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	0.9998	$5x10^{-3}$	$2.953x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9830	$4.37x10^{-2}$	$2.62x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9797	$6.018x10^{-2}$	$4.281x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8489	$12.33x10^{-2}$	$1.796x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9941	$2.53x10^{-2}$	$8.33x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9998	$4.2x10^{-3}$	$2.523x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	0.9998	$0.5x10^{-2}$	$3.619x10^{-5}$

Tablo5.5:T= 60°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9858	$6.12x10^{-2}$	$4.061x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	0.9997	$5.3x10^{-3}$	$3.303x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9810	$4.64x10^{-2}$	$2.547x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9770	$6.481x10^{-2}$	$4.963x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8561	$12.11x10^{-2}$	$1.656x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9932	$2.71x10^{-2}$	$9.52x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9998	$4.1x10^{-2}$	$2.472x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	0.9997	$0.53x10^{-2}$	$4.066x10^{-5}$

Tablo 5.6:T= 65°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

	Model	r	e_s	χ^2
Newton	$M = \exp(-kt)$	0.9846	$6.47x10^{-2}$	$4.539x10^{-3}$
Page	$M = \exp(-kt^n)$	0.9999	$3.5x10^{-3}$	$1.427x10^{-5}$
Henderson&Pabis	$M = a\exp(-kt)$	0.9785	$5.12x10^{-2}$	$3.104x10^{-3}$
Wangh&Singh	$M = 1 + at + bt^2$	0.9728	$7.276x10^{-2}$	$6.257x10^{-3}$
Geometric	$M = at^{-n}$	0.8696	$11.84x10^{-2}$	$1.657x10^{-2}$
Logaritmic	$M = a_0 + a\exp(-kt)$	0.9933	$2.39x10^{-2}$	$7.42x10^{-4}$
Two term exponential	$M = a_1\exp(-k_1t) + a_2\exp(-k_2t)$	0.9997	$6.3x10^{-3}$	$5.68x10^{-5}$
Midilli	$M = a\exp(-kt^n) + bt$	0.9999	$0.35x10^{-2}$	$1.7534x10^{-5}$

Tablo5.7:T= 70°C kurutma sıcaklığı için modellerin istatiksel analizi

6.DENEY SONUÇLARI

	T=40°C		U=1.5 m/sn		
N	**t (dak.)**	**M_y(gr.)**	**M_s (gr.)**	**m(%)**	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	22,2028	4,2778	23,8649	1
1	30	21,6488	3,7238	20,7743	0,8002
2	60	21,3678	3,4428	19,2067	0,6989
3	90	21,1788	3,2536	18,1523	0,6307
4	120	21,0328	3,1078	17,338	0,5781
5	150	20,9048	2,9798	16,6237	0,5319
6	180	20,7908	2,8658	15,9877	0,4908
7	210	20,6938	2,7688	15,4466	0,4556
8	240	20,5998	2,6748	14,9222	0,4219
9	270	20,5268	2,6018	14,5149	0,3956
10	300	20,4588	2,5338	14,1356	0,3711
11	330	20,3958	2,4708	13,784	0,3484
12	360	20,3348	2,4098	13,4438	0,3264
	M_k = 17,925 gr.				
	M_e =19,464 gr.				
	m_e = 0,0859				

Tablo 6.1: 40°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

	T=45°C		U=1.5 m/sn		
N	**T(dak.)**	**M_y(gr.)**	**M_s (gr.)**	**m(%)**	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	25,1668	4,9088	24,2314	1
1	30	24,3618	4,1038	20,2577	0,7575
2	60	24,0528	3,7948	18,7323	0,6645
3	90	23,8048	35.468	17,5151	0,5898
4	120	23,6098	3,3518	16,5456	0,5311
5	150	23,4508	3,1928	15,7607	0,4832
6	180	23,3148	3,0568	15,0893	0,4422
7	210	23,1978	2,9398	14,5118	0,407
8	240	23,0968	2,8388	14,014	0,3765
9	270	23,0028	2,7448	13,5492	0,3482
10	300	22,9178	2,6598	13,1296	0,3226
11	330	22,8478	2,5898	12,7526	0,3016
12	360	22,7878	2,5298	12,4036	0,2835
	Mk = 22,258 gr.				
	M_e = 21,8465gr.				
	m_e = 0,0784				

Tablo 6.2: 45°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

	T=50°C		U=1.5 m/sn		
N	**t (dak.)**	**M_y(gr.)**	**M_s (gr.)**	**m(%)**	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	25,9468	5,0618	24,236	1
1	30	25,0588	4,1738	19,9847	0,7473
2	60	24,7008	3,8158	18,2705	0,6442
3	90	24,4398	3,5548	17,0208	0,5697
4	120	24,2428	3,3578	16,0776	0,5135
5	150	24,0698	3,1848	15,2492	0,4641
6	180	23,9238	3,0388	14,5502	0,4224
7	210	23,7928	2,9078	13,9229	0,385
8	240	23,6828	2,7978	13,3962	0,3536
9	270	23,5838	2,6988	12,9272	0,3253
10	300	23,4918	2,6068	12,4817	0,299
11	330	23,4188	2,5338	12,1321	0,2782
12	360	23,3458	2,4608	11,7826	0,2573
	M_k = 20,885 gr.				
	M_e = 22,4444gr.				
	m_e = 0,0748				

Tablo 6.3: 50°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

	T=55°C		U=1.5 m/sn		
N	**T (dak.)**	**M_y(gr.)**	**M_s (gr.)**	**m(%)**	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	25,1298	4,8538	23,9386	1
1	30	24,2628	3,9868	19,6626	0,7463
2	60	23,8778	3,6018	17,7638	0,6351
3	90	23,6028	3,3268	16,4075	0,5549
4	120	23,3918	3,1158	15,3669	0,4934
5	150	23,1908	2,9148	14,3756	0,4348
6	180	23,0328	2,7568	13,5964	0,3888
7	210	22,9168	2,6408	13,0243	0,3549
8	240	22,8018	2,5258	12,4571	0,3214
9	270	22,7088	2,4328	11,9984	0,2943
10	300	22,6218	2,3458	11,5693	0,269
11	330	22,5456	2,2696	11,1935	0,2467
12	360	22,4808	2,2048	10,8739	0,2278
	M_k = 20,276				
	M_e = 21,6991gr.				
	m_e = 0,0702				

Tablo 6.4: 55°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

	T=60°C		U=1.5 m/sn		
N	T (dak.)	M_y(gr.)	M_s (gr.)	m(%)	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	37,8668	7,2698	23,7598	1
1	30	36,3368	5,7398	18,7593	0,7107
2	60	357.008	5,1038	16,6807	0,5904
3	90	35,2388	4,6418	15,1707	0,5031
4	120	34,8988	4,3018	14,0595	0,4388
5	150	34,6068	4,0098	13,052	0,3836
6	180	34,3668	3,7698	12,3208	0,3382
7	210	34,1578	3,5608	11,6377	0,2987
8	240	33,9748	3,3778	11,0397	0,2641
9	270	33,7748	3,1778	10,386	0,2263
10	300	33,6828	3,0858	10,0853	0,2088
11	330	33,5688	2,9718	9,7127	0,1873
12	360	33,4668	2,8698	9,379	0,168
	M_k = 30,597 gr.				
	M_e =32,5781gr.				
	m_e = 0,0648				

Tablo 6.5: 60°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

	T=65°C		U=1.5 m/sn		
N	T (dak.)	M_y(gr.)	M_s(gr.)	m(%)	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	24,7138	5,0108	25,4316	1
1	30	23,5488	3,8458	19,5189	0,6967
2	60	23,0858	3,3828	17,1690	0,5761
3	90	22,7478	3,0448	15,4555	0,4881
4	120	22,4888	2,7858	14,1390	0,4207
5	150	22,2978	2,5948	13,1696	0,3709
6	180	22,1388	2,4358	12,3626	0,3295
7	210	21,9718	2,2688	11,5170	0,2860
8	240	21,8553	2,1523	10,9257	0,2557
9	270	21,7100	2,0060	10,0764	0,2179
10	300	21,6400	1,9135	9,8288	0,1997
11	330	21,5614	1,8584	9,4322	0,1792
12	360	21,4826	1,7786	9,0267	0,1587
	M_k = 19,703 gr.				
	M_e = 20,8732gr.				
	m_e = 0,0594				

Tablo 6.6: 65°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

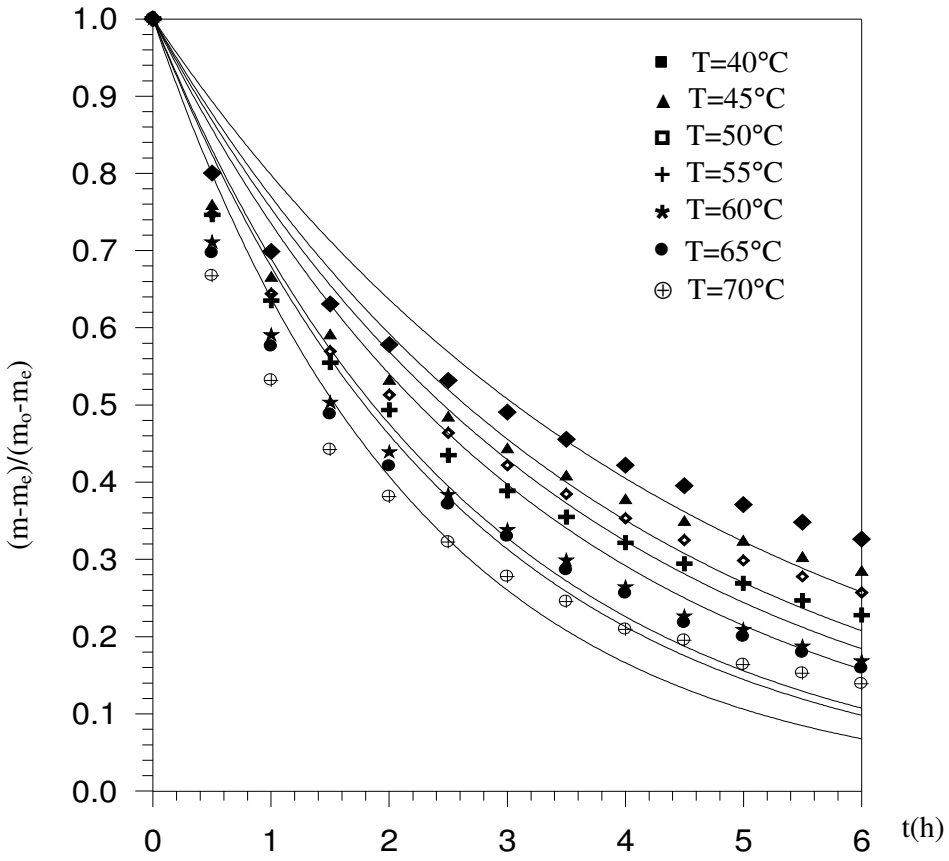
	T=70°C		U=1.5 m/sn		
N	t (dak.)	M_y(gr.)	M_s (gr.)	m(%)	$\frac{m - m_e}{m_0 - m_e}$
0	0	28,3438	5,5438	24,3149	1
1	30	26,8958	4,0958	17,9641	0,6672
2	60	26,3068	3,5068	15,3807	0,5318
3	90	25,9168	3,1168	13,6701	0,4422
4	120	25,6518	2,8518	12,5079	0,3812
5	150	25,3948	2,5948	11,3807	0,3222
6	180	25,2008	2,4008	10,5298	0,2776
7	210	25,0598	2,2598	9,9114	0,2452
8	240	24,9038	2,1038	9,2272	0,2093
9	270	24,8418	2,0418	8,9553	0,1951
10	300	24,7048	1,9048	8,3544	0,1636
11	330	24,6568	1,8568	8,1439	0,1526
12	360	24,5968	1,7968	7,8071	0,1349
	M_k = 22,800 gr.				
	M_e = 23,9931gr.				
	m_e = 0,0523				

Tablo 6.7: 70°C için tek tabaka deneysel kuruma değerleri

7. DENEYSEL EĞRİLER İLE MODEL SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Newton modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	1	1	1	1	1	1	1
0.5	0.8932	0.8772	0.8772	0.8685	0.8572	0.8241	0.7989
1	0.7977	0.7695	0.7542	0.7349	0.6893	0.6791	0.6383
1.5	0.7125	0.6750	0.6551	0.6300	0.5723	0.5596	0.5099
2	0.6363	0.5921	0.5689	0.5401	0.4752	0.4612	0.4074
2.5	0.5684	0.5194	0.4941	0.4630	0.3946	0.3800	0.3255
3	0.5076	0.4556	0.4291	0.3669	0.3276	0.3132	0.2600
3.5	0.4533	0.3997	0.3727	0.3403	0.2720	0.2581	0.2077
4	0.4050	0.3506	0.3237	0.2917	0.2258	0.2127	0.1660
4.5	0.3617	0.3076	0.2811	0.2500	0.1875	0.1752	0.1326
5	0.3230	0.2698	0.2441	0.2144	0.1557	0.1444	0.1059
5.5	0.2885	0.2367	0.2120	0.1838	0.1293	0.1167	0.0846
6	0.2577	0.2076	0.1842	0.1575	0.1073	0.0980	0.0676

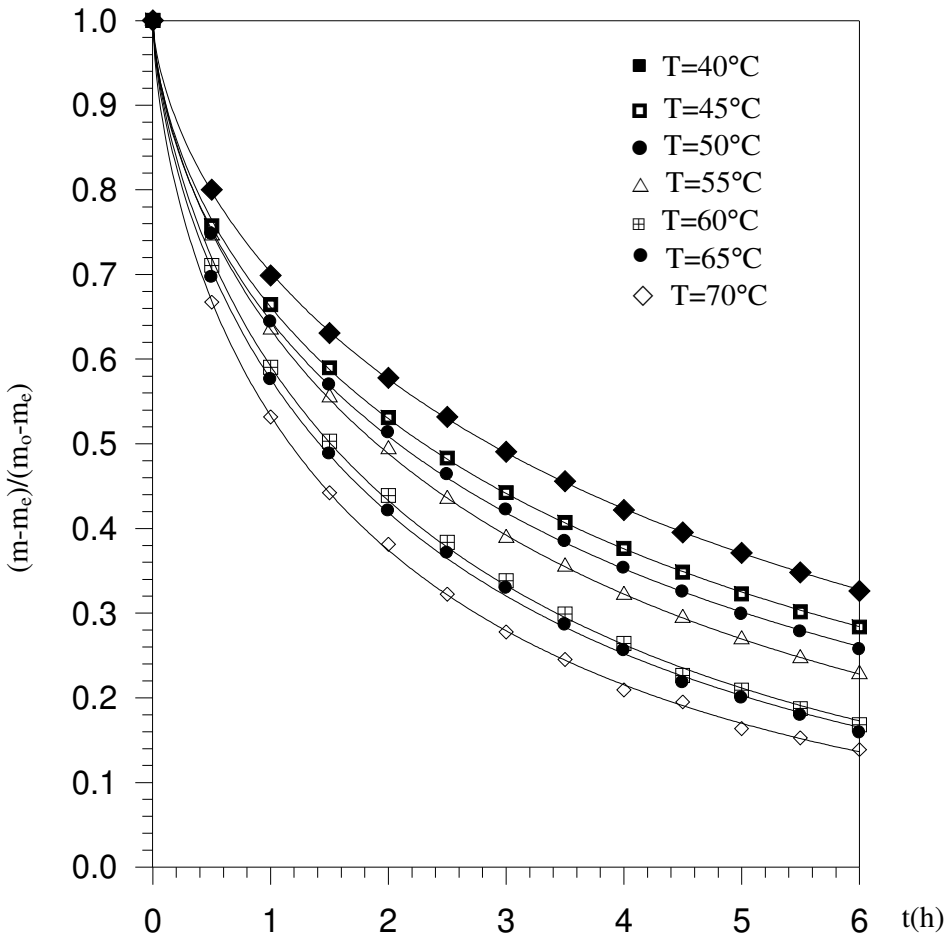
Tablo 7.1: Newton ampirik model sonuçları



Şekil 7.1: Newton model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

Page modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	1	1	1	1	1	1	1
0.5	0.7975	0.7646	0.7529	0.7501	0.7196	0.7058	0.6686
1	0.7026	0.6616	0.6453	0.6351	0.5916	0.5764	0.5331
1.5	0.6326	0.5877	0.5686	0.5526	0.5016	0.4866	0.4419
2	0.5765	0.5296	0.5087	0.4883	0.4327	0.4184	0.3742
2.5	0.5296	0.4818	0.4596	0.4359	0.3777	0.3643	0.3215
3	0.4894	0.4413	0.4184	0.3920	0.3325	0.3201	0.2791
3.5	0.4543	0.4064	0.3831	0.3546	0.2948	0.2833	0.2443
4	0.4233	0.3760	0.3523	0.3224	0.2628	0.2522	0.2153
4.5	0.3957	0.340	0.3253	0.2493	0.2353	0.2256	0.1907
5	0.3708	0.3250	0.3013	0.2694	0.2115	0.2026	0.1691
5.5	0.3483	0.3035	0.2799	0.2475	0.1908	0.1826	0.1517
6	0.3279	0.2840	0.2606	0.2280	0.1727	0.1651	0.1361

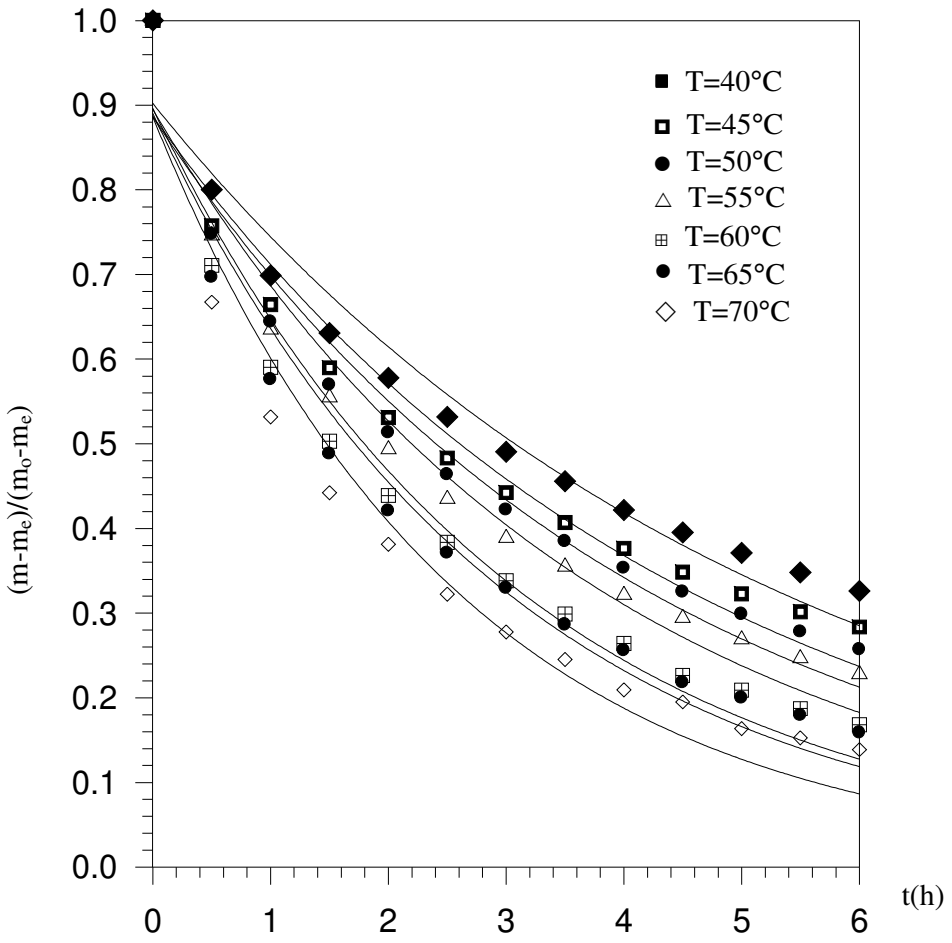
Tablo 7.2: Page model sonuçları



Şekil 7.2: Page model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

Henderson&Pabis modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	0.9020	0.8870	0.8860	0.8950	0.8960	0.8899	0.8860
0.5	0.8194	0.7946	0.7866	0.7839	0.7616	0.7524	0.7298
1	0.7444	0.7118	0.6983	0.6866	0.6474	0.6360	0.6011
1.5	0.6763	0.6377	0.6199	0.6014	0.5503	0.5376	0.4951
2	0.6144	0.5713	0.5504	0.5268	0.4677	0.4545	0.4078
2.5	0.5581	0.5118	0.4887	0.4614	0.3976	0.3842	0.3359
3	0.5071	0.4584	0.4339	0.4042	0.3380	0.3248	0.2766
3.5	0.4606	0.4107	0.3852	0.3540	0.2873	0.2746	0.2279
4	0.4185	0.3679	0.3420	0.3100	0.2442	0.2321	0.1877
4.5	0.3802	0.3296	0.3036	0.2716	0.2076	0.1962	0.1546
5	0.3454	0.2952	0.2695	0.2379	0.1764	0.1659	0.1273
5.5	0.3565	0.3125	0.2877	0.2602	0.1998	0.1915	0.1667
6	0.3700	0.3340	0.3099	0.2859	0.2320	0.2260	0.2140

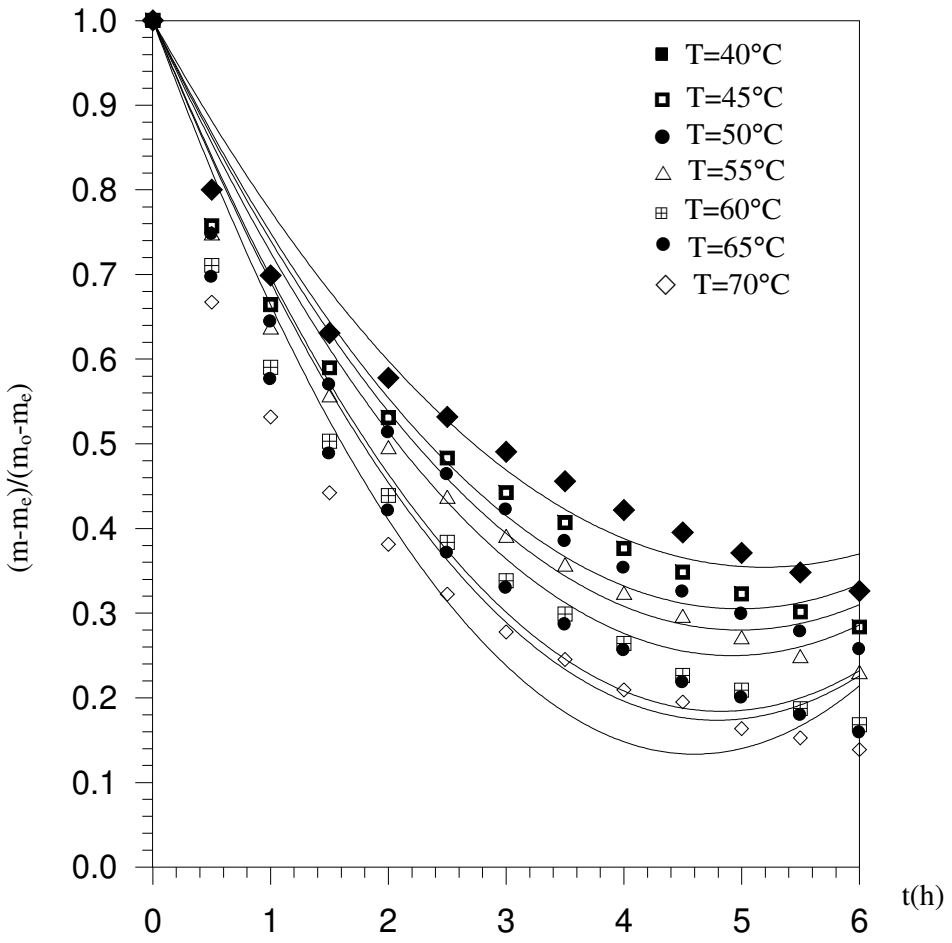
Tablo 7.3: Henderson&Pabis model sonuçları



Şekil 7.3: Henderson&Pabis model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

Wangh&Singh modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	1	1	1	1	1	1	1
0.5	0.8815	0.8675	0.8627	0.8552	0.8397	0.8365	0.8217
1	0.7750	0.7490	0.7399	0.726	0.6970	0.6909	0.6640
1.5	0.6805	0.6445	0.6317	0.6122	0.5717	0.5635	0.5267
2	0.5980	0.5540	0.5380	0.5140	0.4640	0.4540	0.4099
2.5	0.5275	0.4775	0.4587	0.4312	0.3738	0.3625	0.3137
3	0.4690	0.4150	0.3940	0.3639	0.3010	0.2890	0.2380
3.5	0.4225	0.3665	0.3437	0.3122	0.2457	0.2335	0.1827
4	0.3880	0.3320	0.3080	0.2759	0.2080	0.1959	0.1480
4.5	0.3655	0.3115	0.2867	0.2552	0.1878	0.1765	0.1337
5	0.3550	0.3050	0.2799	0.2499	0.1850	0.1749	0.1400
5.5	0.3565	0.3125	0.2877	0.2602	0.1998	0.1915	0.1667
6	0.3700	0.3340	0.3099	0.2859	0.2320	0.2260	0.2140

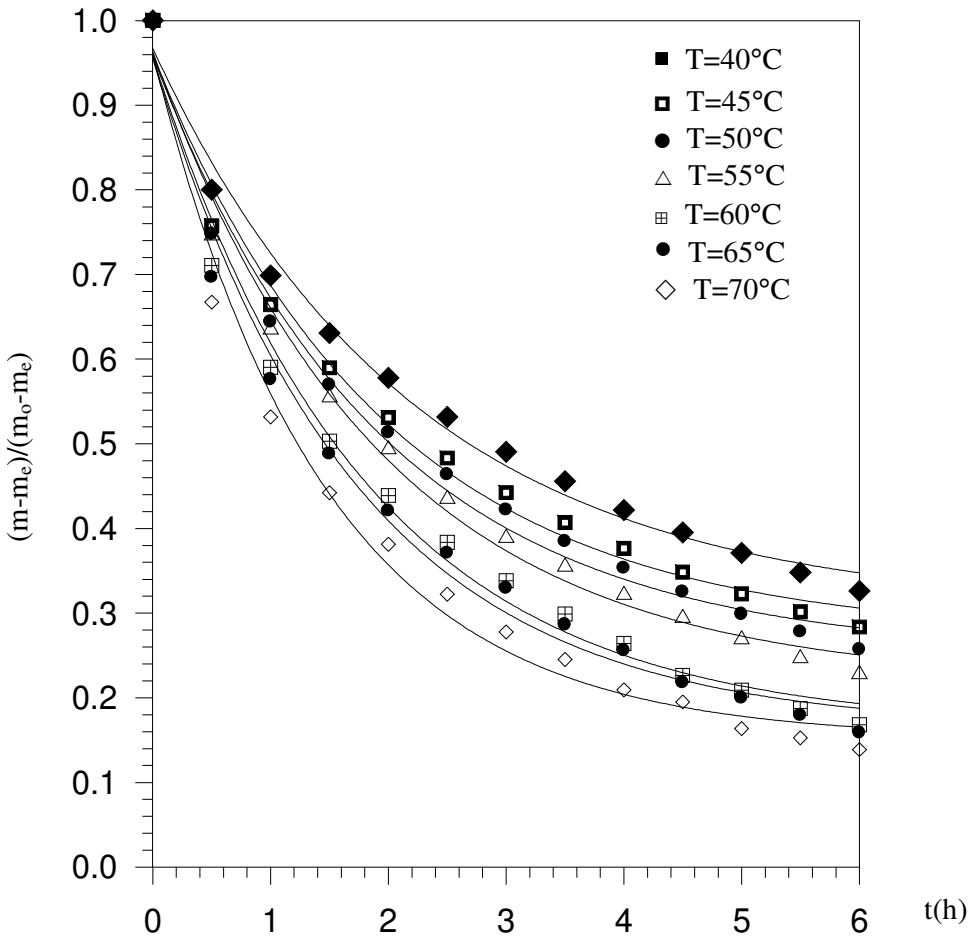
Tablo 7.4: Wangh&Singh model sonuçları



Şekil 7.4: Wang & Singh model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

Logaritmik modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	0.9669	0.9599	0.9579	0.9630	0.9569	0.9549	0.9599
0.5	0.8323	0.8064	0.7966	0.7919	0.7644	0.7541	0.7254
1	0.7250	0.6872	0.6721	0.6600	0.6188	0.6042	0.5589
1.5	0.6395	0.5946	0.5760	0.5585	0.5084	0.4924	0.4407
2	0.5714	0.5227	0.5019	0.4802	0.4249	0.4090	0.3569
2.5	0.5171	0.4669	0.4446	0.4200	0.3618	0.3467	0.2974
3	0.4730	0.4235	0.4004	0.3736	0.3139	0.3003	0.2552
3.5	0.4393	0.3899	0.3664	0.3379	0.2777	0.2657	0.2252
4	0.4118	0.3637	0.3400	0.3103	0.2503	0.2398	0.2040
4.5	0.3899	0.3435	0.3197	0.2891	0.2295	0.2206	0.1888
5	0.3724	0.3272	0.3040	0.2727	0.2139	0.2062	0.1781
5.5	0.3585	0.3154	0.2919	0.2602	0.2020	0.1955	0.1705
6	0.3475	0.3060	0.2826	0.2505	0.1930	0.1875	0.1652

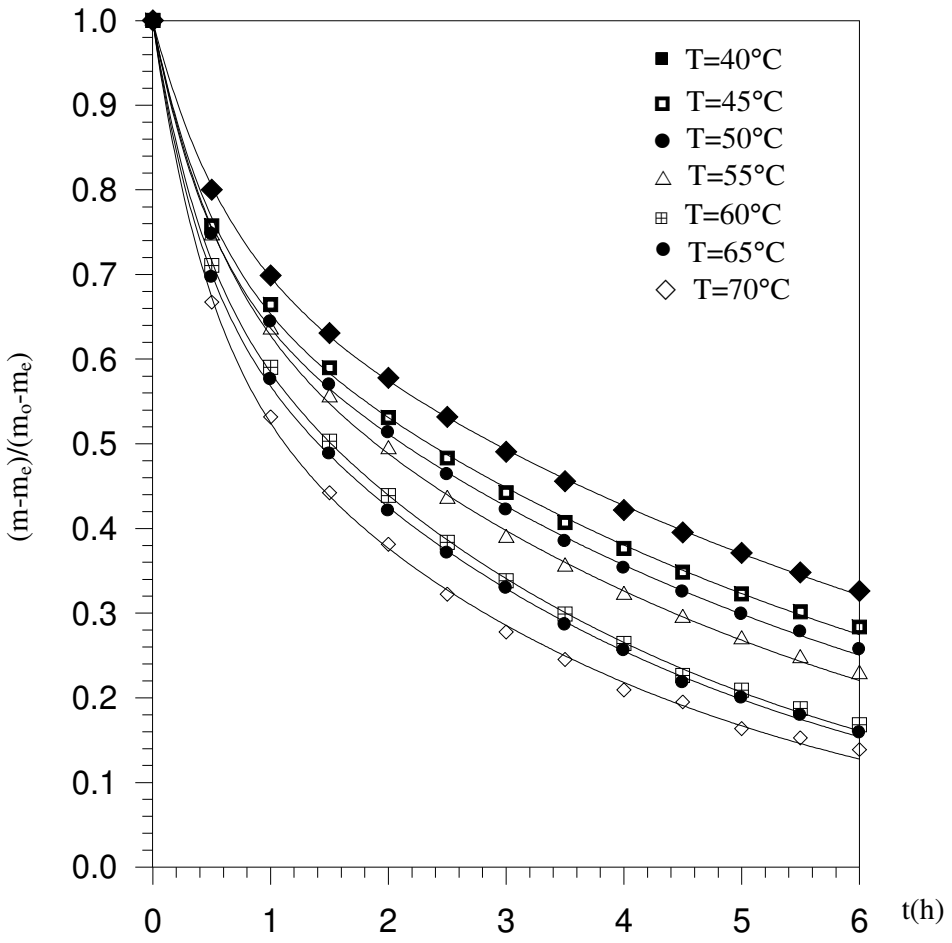
Tablo 7.5 : Logaritmik model sonuçları



Şekil 7.5: Logaritmik model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

İki terimli ampirik modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	0.9989	0.9979	0.9989	0.9979	0.9989	0.9989	0.9989
0.5	0.8046	0.7671	0.7535	0.7550	0.7158	0.7010	0.6732
1	0.6966	0.6533	0.6364	0.6277	0.5843	0.5679	0.5245
1.5	0.6267	0.5833	0.5651	0.5476	0.5020	0.4867	0.4381
2	0.5744	0.5310	0.5114	0.4883	0.4391	0.4250	0.3765
2.5	0.5312	0.4871	0.4662	0.4396	0.3864	0.3734	0.3272
3	0.4931	0.4481	0.4261	0.3974	0.3407	0.3288	0.2855
3.5	0.4587	0.4128	0.3898	0.3598	0.3006	0.2896	0.2494
4	0.4269	0.3804	0.3567	0.3261	0.2652	0.2552	0.2181
4.5	0.3975	0.3506	0.3265	0.2956	0.2410	0.2249	0.1907
5	0.3702	0.3231	0.2988	0.2960	0.2066	0.1981	0.1667
5.5	0.3449	0.2978	0.2735	0.2406	0.1823	0.1745	0.1459
6	0.3212	0.2745	0.2503	0.2202	0.1608	0.1538	0.1275

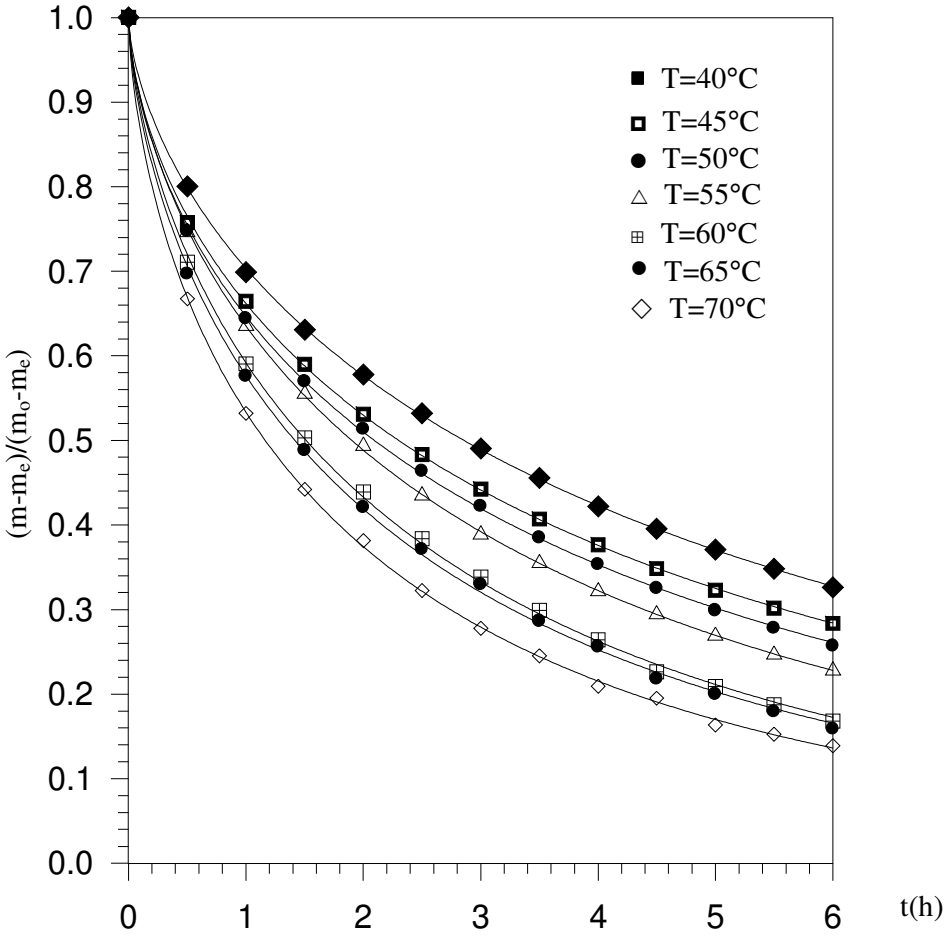
Tablo 7.6: İki terimli model sonuçları



Şekil 7.6: İki terimli model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

Midilli modeli							
M							
	T (°C)						
t(h)	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0	0.9989	0.9989	0.9989	0.9989	0.9979	0.9979	0.9989
0.5	0.7986	0.7647	0.7543	0.7502	0.7196	0.7056	0.6688
1	0.7032	0.6617	0.6467	0.6352	0.5916	0.5764	0.5332
1.5	0.6328	0.5878	0.5699	0.5527	0.5016	0.4867	0.4419
2	0.5764	0.5296	0.5098	0.4883	0.4327	0.4186	00.3742
2.5	0.5292	0.4818	0.4606	0.4358	0.3776	0.3645	0.3214
3	0.4889	0.4413	0.4192	0.3919	0.3324	0.3203	0.2790
3.5	0.4537	0.4064	0.3877	0.3546	0.2946	0.2835	0.2442
4	0.4227	0.3760	0.3529	0.3223	0.2625	0.2523	0.2152
4.5	0.3950	0.3489	0.3257	0.2941	0.2350	0.2233	0.1907
5	0.3702	0.3249	0.3017	0.2694	0.2112	0.2028	0.1698
5.5	0.3478	0.3033	0.2802	0.2474	0.1906	0.1828	0.1518
6	0.3275	0.2839	0.2609	0.2279	0.1724	0.1654	0.1362

Tablo 7.7: Midilli model sonuçları



Şekil 7.7: Midilli model sonuçları ile deneysel değerleri karşılaştırma

8.SONUÇLARI DEĞERLENDİRME

Tahılların tek tabaka kuruma davranışını simule etmek için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen edilen yarı teorik ve ampirik modeller, değişken olarak kuruma zamanını içermekte olup, kuruma şartlarının nem atımına etkisi, modellerdeki kurutma sabitleri aracılığıyla ifade edilmiştir. Newton, Page, Henderson&Pabis, Logaritmic, Geometric, Two term exponential, Wang and Singh, Midilli verilen tek tabaka kuruma modelleri, çeşitli tahılların kuruma davranışını simüle etmede kullanılmıştır. Modellerde yer alan sabitler, deneysel değerler ile model sonuçları arasındaki hataların kareleri toplamı minimize edilerek hesaplanmıştır.

Bu çalışmada mısır taneleri, 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C sıcaklıklarında, 2 m/sn hava hızında tek tabakada kurutulmuştur. Elde edilen deneysel sonuçlar ile sekiz farklı modele ait sonuçlar ile karşılaştırılmış ve deneysel değerlere en yakın model, en uygun model olmuştur. Belirtilen deney sıcaklıklarında mısırın kuruma davranışını en iyi ifade eden modeli belirlemede, sekiz model için hesaplanmış r, e_s, χ^2 değerlerine bakılır. Bu değerler Tablo 5.1, Tablo 5.2, Tablo5.3, Tablo5.4, Tablo5.5, Tablo5.6 ve Tablo 5.7 de verilmiştir. korelasyon katsayısı 1' e en yakın olan ve en küçük standart hata ve ortalama karesel sapma üreten model kuruma davranışını ifade eden en uygun model olacaktır. Tablolardaki sonuçlara göre en uygun model Page modelidir. Diğer bir ifade ile Page model sonuçları, deneysel datalara, ele alınan sekiz model içerisinde en iyi uygunluk göstermiştir. Genel olarak Geometrik model hariç r > 0.90 olduğu için diğer modellerin deneysel datalarla iyi bir uygunluk içinde olduğu söylenebilir.

ÖZGEÇMİŞ

Cem KORKMAZ 24.01.1978 tarihinde Adana' da doğdu. İlk, Orta, Lise tahsilini Adana' da tamamladı. 1995-2000 yılları arasında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 04.01.2001 tarihinde Trakya Üniversitesi Hayrabolu Meslek Yüksekokulu Makina Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Hala bu kurumda görevine devam etmektedir. 2002 Şubat ayında T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Bekar ve İngilizce bilmektedir.

KAYNAKLAR

1-) Abel, T. vd., Thin layer infrared radiation drying of rough rice, J.Agric.Engng. Res.,67, 289-297, 1997.

2-) Abalone, R., vd., Thin layer drying of amaranth seeds, Biosystems engineering, 179-188, Postharvest Technology, 2006.

3-) Cihan, A., Çeltik kurutmasının deneysel ve teorik araştırılması, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1991.

4-) Chiachung, C., Thin layer drying model for rough rice with high moisture content J.Agric., Engng., Res., 2001

5-) Da-Wen Sun, Comparison and selection of EMC/ERH isoterm equations for drying on storage of grain oilseed, Department of Agriculture and Food Engineering, University College Dublin

6-) Doymaz İ., vd., Hot air drying characteristics of red pepper, Chemical Enginering Department, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2002.

7-) Doymaz İ., Effect of dipping treatment on air drying of plums, Department of Chemical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2003.

8-) Doymaz İ., Thin layer drying behaviour of mint leaves, Department of Chemical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2005.

9-) Doymaz İ., Influnce of pretreatment solution on the drying of sour chery, Chemical Enginering Department, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2005.

10-) Doymaz İ., Thin layer drying characteristics of corn, Chemical Enginering Department, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2003.

11-) Doymaz İ., Drying behaviour of grenbeans, Chemical Enginering Department, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey, 2004.

12-) Ertekin C., Drying eggplant and selection of suitable thin layer drying model Journal of Food Engineering (63) , 2004.

13-) Fortes, M., Second law analysis of drying : modeling and simulation of fluidized grain drying , UNA University, Brasil.

14-) Hacohafızoğlu, O., vd., Çeltiğin kuruma davranışının değişik teorik modellerle simülasyonu, ULIBTK' 05 15. Ulusal ısı bilimi ve tekniği kongresi, Trabzon, 2005.

15-) Hacohafızoğlu, O., Çeltiğin kuruma davranışının teorik olarak incelenmesi ve sonuçların elipsoid modele uygulanması, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2005.

16-) Hacohafızoğlu, O., Çeltik kurutmada optimizasyon, Yüksek lisans tezi, Trakya üniversitesi, Edirne, 1995.

17-) Hossain M.A. vd., Simulation of natural air drying of maize cribs., Simulation modelling and theory, Volume 11, Pages 571-583, 2003.

18-) Hurburg C.R. vd., Grain moisture and weight, Agriculture and Biosystems Engineering, Iowa State University

19-) Kahveci K., Çeltiğin yığın halinde kuruma davranışı, Trakya Üniversitesi, Edirne, 1998.

20-) Kashinejad vd., Thin layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts, Depatment of Food Science and Technology Gorgan University, Gorgan, Iran, 2005.

21-) Krokida, M.K., vd., Drying kinetics some vegetables, Department of Chemical Engineering, National Journal of food engineering, 59, pages 391-403, 2003.

22-) Liu, Q. And Bakker – Arkema, F.W., Capacity estimation of high temparature grain dryers –A simplified calculation method, Department of Agricultre and Biosystems Engineering, Iowa State University.

23-) Smote, I.N., simulation ofthe mixed-mode natural convection solar drying of maize, Department of Agricultre Engineering, University of Zambia.

24-) Şahin, S., Türkiyede mısır ekim alanlarının dağılışı ve mısır üretimi, G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi yayınları, Cilt 21, 2001.

25-) Toksoy, M., TÜBİTAK, TOAG-508, Isıtılmayan çevre havası ile düşük sıcaklıkta tahıl kurutulmasının Türkiye de uygulanması, 1986.

26-) Tu Tu Tran vd., Effects of aeration on the quality of popcorn. Department of food science and technology, The University of New South Wales.

27-) Jayas S.D., vd., Storage and drying of grain in Canada : Low cost approaches, Department of Biosystems Enginnering Univesity of Manitoba Canada, 2003.