T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
GIDA TEKNOLOJİSİ ANABİLİM DALI

Gıdaların Donmasının Sayısal Yöntemle İncelenmesi ve Donma Sürelerinin Öngörülmesi

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hazırlayan : SEMİH TEVFİK ENGEZ
Danışman : Doç. Dr. COŞKAN ILICALI

Bornova - İZMİR
1988

Ö N S Ö Z

Dondurularak saklama yöntemlerini son yıllarda diğer dayanıklı kılma yöntemlerinden daha yaygın bir uygulama alanı bulduğu gözlenmektedir. Dondurulma teknolojisinin gelişmesi yanında teknolojinin verimli olarak kullanılması gerekmektedir.

Dondurulan gıda maddesinin çözündürüldükten sonra istenen kalitede olması için dondurma işlemi mümkün olan en kısa sürede gerçek - leştirilmelidir. Gerek dondurulan ürün kalitesi gerekse enerji ta - sararufu ve işletme kapasitesi açısından gıdaların donma süreleri - nin önceden belirlenmesinde büyük yararlar olduğu saptanmıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÇİZELGE LİSTESİ

ŞEKİL LİSTESİ

EKLER LİSTESİ

ABSTRAKT

Basit geometrik şekle sahip sonsuz levha, sonsuz silindir ve küre şeklindeki gıda maddelerinin donma sürelerini sonlu farklar yöntemiyle hesaplayabilmek için bilgisayar programları oluşturulmuş ve değişik ısı aktarım katsayısı, şekil ve gıda maddeleri ile yapılan deneme sonuçları ve literatürden alınan Tylose, patates, kıyma ve yağsız et için donma verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sonsuz levha için % +0.7, sonsuz silindir için % -6.2, küre için % -6.2, dikdörtgenler prizması için % -4.8 ve sonlu silindir için % +4.6 ortalama hata ile bulunmuştur. Sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıda maddeleri için bir eşdeğer çap kavramı geliştirilmiş, bulunan sonuçlardan bu kavramın kullanılabilir olduğu bulunmuştur.

ABSTRACT

It was the aim of this thesis computer programmes for calculating the freezing times of the materials with simple geometrical shapes was prepared and the numerical predictions were compared with experimental freezing time data. Computer programmes employing an implicit finite difference technique were prepared and these programmes were run using freezing data Tylose, mashed potato, ground beef and lean beef from the literature and using the experimental data obtained in this work. The composite data was predicted with mean errors -6.2 % for infinite cylinders, +0.7 % for infinite slabs, -6.2 % for spheres, -4.8 % for brick-shapes and +4.6 % for finite cylinders. The equivalent diameter concept used in freezing time calculations of the finitely cylindrical and brick-shaped foods seemed to be a valid formulation.

1. GİRİŞ

Gıdaların bir kısmı taze olarak tüketilirken bir kısmı da daha sonra hammadde olarak ya da gerektiği zaman kullanılmak üzere korunulmaya çalışılmaktadır. Meyve-sebze ve et gibi gıda maddeleri su niceliklerinin fazla olması nedeniyle bozulmaya aşırı duyarlıdırlar.

Suyun, bozulmaya neden olan mikroorganizmalar tarafından kullanılabilmesi için sıvı fazda olması gerekmektedir. Dondurma işlemi ile su katı faza geçirilerek mikroorganizmalar tarafından kullanılabilirliği engellenmektedir. Dondurma işleminin ikinci ve esas etkisi, belirli bir sıcaklık derecesinin altında mikroorganizma faaliyetlerini tamamen durdurmasıdır. Gerek gıda zehirlenmesine neden olan mikroorganizmaların gerekse psikrofilik mikroorganizmaların faaliyetleri $-10^{0}C$'ın altında kesinlikle durmaktadır.

Dondurma işleminin yeteri kadar etkili olması ve dondurulan gıdanın çözündürüldüğünde istenen kalitede olabilmesi için dondurma işleminin mümkün olan en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu zorunluluk gıda maddesinin en geç soğuyan noktasının (ısıl merkez) en kısa zamanda istenilen sıcaklığa düşürülmesi anlamına gelmektedir.

Dondurulma süresi donmuş ürün kalitesine etkisi yanında, enerji kullanımı ve işletme kapasitesine de etkimektedir. Dondurulacak ürünün gereğinden fazla dondurucuda kalması enerji tüketimini arttıracak ve işletme kapasitesini düşürecektir. En iyi dondurulma koşullarının saptanması için gerekli donma süresinin önceden tahmin edilmesi yani öngörülmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada basit geometrik şekillere sahip gıda maddelerinin donma sürelerini "sonlu farklar" ("finite differences") yöntemiyle hesaplayabilmek amaçlanmıştır. Bu amaçla bilgisayar programları yazılmış ve değişik ısı aktarım katsayıları, şekil ve gıda maddeleri ile yapılan denemelerden elde edilen sonuçlar ile bilgisayar programlarının çalıştırılmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Oluşturulan bilgisayar programları dondurulmuş gıda maddeleri üreten bir işletmede işlem koşullarını belirlemede ve yeni ürünler için işletmenin adaptasyonunu sağlamada kullanılabilir.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Donma Hızı, Donma Süresi ve Donma Süresini Etkileyen Faktörler

Donmuş gıdanın kalite karekteristiklerinin çoğu donma hızının fonksiyonu olan buz kristali boyutundan etkilenir. Donma süresi bir dizayn parametresi olmasına rağmen, dondurma sistemlerinin kapasitesi direkt olarak üründen uzaklaştırılan ısı enerjisine bağlıdır (HELDMAN 1983).

Uluslararası Soğuk Enstitüsü'nce (IIR 1972) benimsenen tanımına göre bir gıda maddesinin donma hızı yüzeyden ısıl merkezine en kısa mesafe ile yüzeyinin 0^{o}C'a gelmesi ve ısıl merkezinin buz oluşum sıcaklığından 10^{o}C daha soğuk olması arasında geçen süre arasındaki orandır. Mesafe cm, süre saat(h) ve donma hızı cm/saat olarak ifade edilir.

Yüksek donma hızı istenmesinin nedenleri ve yararları şöyle özetlenebilir (CEMEROĞLU 1986):

a- Hücre içinde küçük buz kristalleri oluştuğundan hücre fazla zedelenmez ve böylece hücre içi sıvısının birbirine aşırı derecede karışması önlenir.

b- Su, bulunduğu yerde buz kristaline dönüşür ve böylece hücreler arası boşluğa geçmesi sınırlandırılır.

c- Hücreler arası boşluklarda küçük buz kristalleri oluşumu sağlanarak hücrenin fiziksel yapısının bozulması önlenir.

d- Birçok gıda maddesi için kritik bölge olan donmanın olduğu 0^{o}C ile -4^{o}C arası hızla aşılmış olur.

e- Mikroorganizmaların faaliyetlerinin tamamen durduğu sıcaklık derecelerine hızla erişildiğinden, donma sırasında mikrobiyolojik bozulma olasılığı ortadan kalkar.

f- Ekipmanların uzun süre işgal edilmesi önlendiğinden dondurma sisteminin kapasitesi arttırılabilir.

"Donma süresi" deyimi değişik yayınlarda çok farklı şekillerde tanımlanmaktaysa da bunların içinde en geçerli olanı IIR (1972) tarafından yapılan tanımlamadır. Bu tanıma göre belirli boyutlarda ve 0°C tekdüze bir başlangıç sıcaklığında belirli bir ürünün **nominal donma süresi** ısıl merkezinin, donma başlangıç sıcaklığından 10°C daha soğuk olması için geçen süredir.

Donma süresi gıdaya ve soğutma ortamına ait bazı faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler (HELDMAN 1983):

- Ürünün boyutları
- Dondurucu ortam sıcaklığı
- Ürün ilk sıcaklığı
- Isı aktarım katsayısı
- Donma başlangıç sıcaklığı
- Ürünün su içeriği
- Donmamış ürün yoğunluğu
- Donmayan su yüzdesi

2.2. Donma Süresinin Öngörülmesi ve Öngörme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Gıdalar için donma sürelerinin hesaplanması eşzamanlı faz değişimi, değişen ısıl özellikler ve daha bir çok nedenlerden dolayı karışık bir ısı aktarım modelidir (MASCHERONI ve CALVELO 1982).

Donma süresi hesaplama yöntemleri genellikle iki grupta toplanır. Sayısal yöntemler ve basit formüller (analitik yöntemler). Son grubun içinde analitik olarak çıkartılmış formüllere dayanan yöntemler bulunmaktadır ve bunların bazıları deneysel verilerin bir eğriye uydurulmaları ile çıkarılmışlardır. Herhangi bir donma süresi öngörme yönteminin kullanıldığı yerlerde belirsizlik kaçınılmaz olacaktır. Bu belirsizliğin kaynakları şunlardır:

a- Materyalin donmaya başladığı zaman için ısıl verilerdeki (k, ρ, c) belirsizlik.

b- Kesin olarak bilinmeyen donma koşulları, özellikle yüzey ısı aktarım katsayısı (h)

c- Öngörme yönteminin çıkartılışında yapılan kabuller ve yaklaşımlar

Genel bir yaklaşım en iyi donma süresi öngörme formülünün bu üç gruptaki hataların en düşük tutulması ile gerçekleşeceğidir (CLELAND ve EARLE 1984 a).

2.3. Donma Süresi Öngörme Yöntemleri

2.3.1. Basit formüller (Analitik yöntemler)

Analitik yöntem olarak çoğunlukla Plank (1913) denklemi veya bu denklemin uyarlamaları kullanılmaktadır (MASCHERONI ve CALVELO 1982).

Genellikle analitik öngörme modellerinde hesaplamalardaki karışıklıkları gidermek için kabuller yapılmıştır. Yapılan kabullerin bazıları şunlardır:

a- Dondurulan materyal tekdüze bir ilk sıcaklığa sahiptir ve soğutulduğu ortam sıcaklığı sabittir

b- Isı aktarımı, materyal içinden iletimle olmaktadır. Yüzey ısı aktarım katsayısı tekdüze ve sabittir

c- Materyalin özellikleri donmuş ve donmamış durumda değişmemektedir. Bununla birlikte iki konum için kesinlikle farklı olmaktadır.

d- Gıda maddesi bütün donma ısısını bıraktığı belirli bir donma noktasına sahiptir.
(RAMASWAMY ve TUNG 1984).

Analitik yöntemler hakkında bir fikir verebilmek amacıyla çok kullanılan bazıları aşağıda verilmiştir:

Plank Denklemi: 1913 yılında Plank tarafından öne sürülen bu model basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan donma süresi öngörme yöntemidir. Bu model esas olarak üç basit ilişkiye dayanır.

a- Yüzeyden soğutma ortamına ısı aktarımı

b- Donma noktasında latent ısının açığa çıkması

c- Donmuş materyalde iletimle olan ısı aktarımı

Bu üç ilişkinin bileşiminden donma süresini öngören formül:

$$t = \frac{\rho' . L}{(T_f - T_a)} \left[P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k'} \right] \qquad (1)$$

Formülde, t donma süresini, ρ' donma noktasının altındaki yoğunluğu, L latent ısı, T_f donma noktası sıcaklığını, T_a ortam sıcaklığını, h ısı aktarım katsayısını, k' donma noktasının altındaki ısıl iletkenlik katsayısını, D küre ya da sonsuz silindir için çap, sonsuz levha için kalınlığı, P ve R dondurulacak materyalin geometrisine bağlı olarak değişen sabitleri göstermektedir. P ve R sırası ile sonsuz levha için 0.5 ve 0.125, sonsuz silindir için 0.250 ve 0.0625, ve küre için 0.167 ve 0.0416'dır. Dikdörtgenler prizması şeklindeki materyaller için P ve R değerleri EDE (1949) tarafından verilen grafikten bakılmaktadır.

Plank denkleminin çıkartılmasında bazı ek varsayımlar bulunmaktadır.

a- Dondurulacak materyalin sıcaklığı donma işleminin başlangıcından sonuna kadar donma noktasındadır

b- Materyal ve donma ortamı arasında kararlı bir ısı aktarımı vardır

c- Ürün içindeki bütün su donma işleminden önce sıvı fazdadır

Bu varsayımlardan ötürü Plank modeli soğuma ve donma sonrası soğuma peryodlarını dikkate almaz (RAMASWAMY ve TUNG 1984). Bir çok araştırmacı Plank modelinde modelin dikkate almadığı noktaları dikkate alarak bir takım uyarlamalar yapmışlardır. Bu uyarlamaların bazıları şunlardır:

Nagaoka Uyarlaması: NAGAOKA ve ark. (1955), Plank denklemini hava akımlı dondurucuda taze balığın donma süresini öngörmek için aşağıda görüldüğü gibi uyarlamışlardır.

$$t = \left[1+0.008\ T_i \right] \frac{Q.\rho'}{(T_f - T_a)} \left[P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k'} \right] \qquad (2)$$

Burada T_i ürün ilk sıcaklığını, Q ön soğuma, faz değişimi ve donma sonrası soğuma peryodlarında materyalin birim kütlesinden uzaklaştırılan ısıyı gösterir (Denklem 3).

$$Q = C(T_i - T_f) + L + C'(T_f - T_a) \qquad (3)$$

Denklem (3)'te C ürünün donma sıcaklığı üstündeki, C' ürünün donma sıcaklığı altındaki özgül ısısını göstermektedir (RAMASWAMY ve TUNG 1984).

Cleland ve Earle uyarlaması: CLELAND ve EARL (1977) uyarlaması şöyledir:

$$t = \frac{\Delta H}{(T_f - T_a)} \left[P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k'} \right] \quad (4)$$

CLELAND ve EARL (1977), Plank denklemindeki P ve R değerlerini aşağıdaki gibi ifade etmiştir:

$$P = 0.5072 + 0.2018\ Pk + Ste\ (0.3224\ Pk + 0.0105\ /Bi + 0.0681) \quad (5)$$

$$R = 0.1684 + Ste\ (0.2740\ Pk - 0.0135) \quad (6)$$

Denklem (4), (5) ve (6)'daki terimler şunlardır:

ΔH: T_f ve $-10^{o}C$ arasındaki entalpi değişimi

Pk : Plank sayısı

$$Pk = \left[C\ (T_i - T_f) \right] / \Delta H \quad (7)$$

Ste: Stefan sayısı

$$Ste = \left[C'\ (T_f - T_a) \right] / \Delta H \quad (8)$$

(CLELAND ve EARLE 1977).

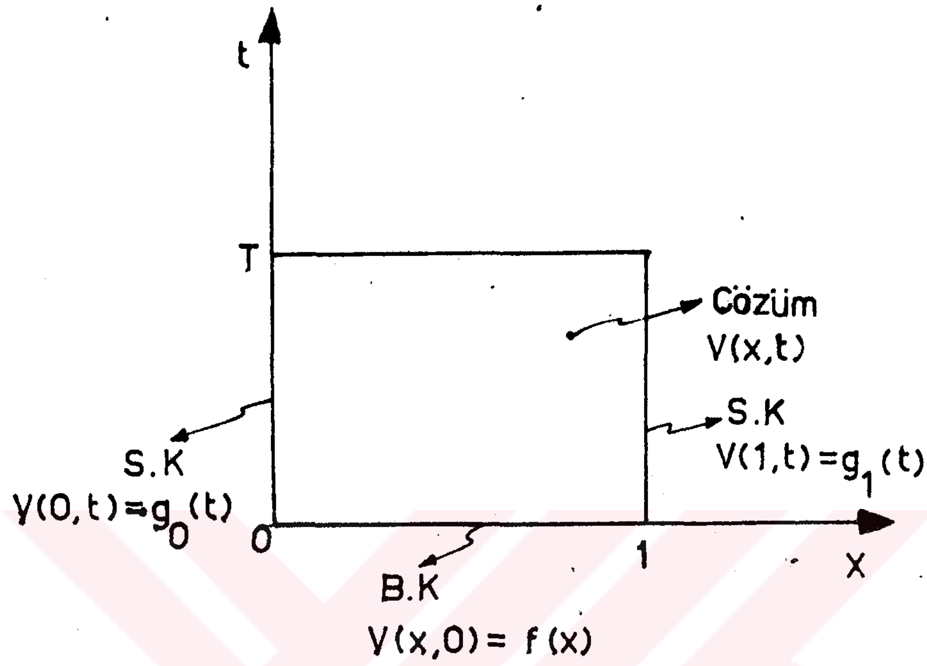
Yukarıdaki uyarlamalara ek olarak LEVY (1958), PLANK (1963), MOTT (1964), COWEL (1967), LUIKOV (1968), BAKAL ve HAYAKAWA (1970), IIR (1972), MELLOR (1976), RAMASWAMY (1979), CLELAND ve EARLE (1979 a, b), CLELAND ve EARLE (1982), MASCHERONI ve CALVELO (1982), HUNG ve THOMPSON (1983), CLELAND ve EARLE (1984), PHAM (1984), ILICALI ve SAĞLAM (1987) donma zamanını öngörmek için çeşitli analitik yöntemler geliştirmişlerdir.

2.3.2. Sayısal yöntemler

Donma süresinin öngörülmesinde kullanılan iki tip sayısal yöntem vardır. Bunlar "Sonlu Farklar" ve "Sonlu Elemanlar" (Finite Elements) yöntemleridir. Sonlu elemanlar yöntemi düzgün olmayan, yani belirgin bir geometriye sahip olmayan materyallerin donma sürelerinin öngörülmesinde kullanılaktadır. Genellikle, yapılan çalışmalarda deneysel veri setleri düzgün şekiller ve tekdüze materyaller için olduğundan sonlu elemanlar yerine sonlu farklar yöntemi kullanılmaktadır (CLELAND ve EARLE 1984 a).

Bir kısmi diferansiyel denklemini sonlu farklar tekniği kullanarak çözmek için ilk olarak bağımsız değişkenlerce işgal edilmiş ilgili bölgenin her yerinde yatay ve dikey çizgilerin kesişmesinden oluşan noktalar (grid) ağı kurulur. Örneğin, bağımsız değişkenler olarak uzaklık (x) ve zaman (t) ve sırası ile nokta yerlerinin aralarındaki fark Δx ve Δt olduğu varsayılsın. (i) ve (n) alt indisleri nokta olarak adlandırılan $i\Delta x$, $n\Delta t$ koordinatlarına sahip yerleri belirtmek için kullanılır.

$t = 0$ da bir ilk sıcaklık dağılımı ile sonradan zamanın fonksiyonu olabilecek sıcaklıkta korunan uçlara sahip izole edilmiş bir çubuk düşünülürse (CARNAHAN ve ark. 1969). Herhangi bir $t > 0$ anında çubuktaki sıcaklık dağılımı $V(x,t)$, uygun boyutsuz değişkenlerin belirlenmesi ve çubukta fiziksel özelliklerin sabit olduğu varsayılarak çözülebilir. Problem şekil 1.'de gösterildiği gibi denklem (10)'daki ilk ve sınır koşulları ile diferansiyel eşitlik olarak tanımlanabilir.(Denklem (9)).



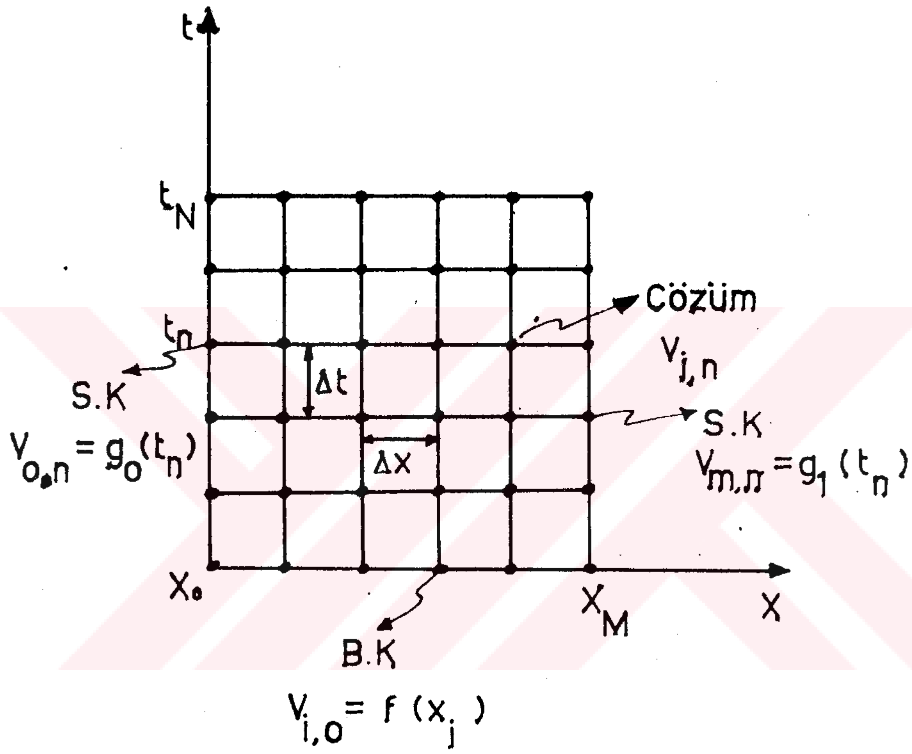
Şekil 1. Fark problemi

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \qquad 0 < x < 1, \qquad 0 < t < T \tag{9}$$

$$\begin{aligned} V(x,0) &= f(x) & 0 \le x \le 1 \\ V(0,t) &= g_0(t) & 0 < t \le T \\ V(1,t) &= g_1(t) & 0 < t \le T \end{aligned} \tag{10}$$

Burada f(x) başlangıç, $g_0(t)$ ve $g_1(t)$ sınır koşullarıdır.

Denklem (9) ve (10)'un çözümüne yaklaşmak için ilk olarak şekil 2.'de gösterilen $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq t \leq T$ bölgesinin her yerinde noktalar ağı kurulur.



Şekil 2. Fark probleminde noktalar ağının oluşturulması.

Nokta yerleşimleri $\Delta x = 1/M$, $\Delta t = T/N$'dir. M ve N keyfi tamsayı sabitlerdir. Bu problemde (x) ve (t) sınırlarındaki noktaları belirlemek kolaydır, bununla birlikte, bu kolaylık, düzensiz şekillerin sınırları olduğunda iki boyutlu problemlerde nadiren mümkündür. $i = 0$, $i = M$ veya $n = 0$'ın dışında herhangi bir nokta (i,n) için denklem (9) sonlu farklar formu haline getirilirse;

$$\frac{V_{i,n+1} - V_{i,n}}{\Delta t} = \frac{V_{i-1,n} - 2V_{i,n} + V_{i+1,n}}{(\Delta x)^2} \qquad (11)$$

şeklini alır. Veya;

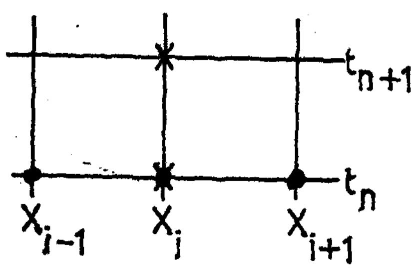
$$\lambda = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \qquad (12)$$

ise;

$$V_{i,n+1} = \lambda V_{i-1,n} + (1-2\lambda)V_{i,n} + \lambda V_{i+1,n} \qquad (13)$$

olur.

Şekil 3.'deki çarpılar ve daireler bu noktaların sırasıyle, zaman ve yer farklarını göstermektedir.



Şekil 3. Açık form.

Eğer herhangi bir t_n zamanında bütün $V_{i,n}$ 'ler biliniyorsa denklem (13), $V_{i,n+1}$'in $1 \leq i \leq M-1$ için t_{n+1} zamanında direkt olarak hesaplanmasını mümkün kılar. i=0 ve i=M sınır noktaları için denklem (14) ve (15) vardır.

$$V_{0,n+1} = g_0(t_{n+1}) \tag{14}$$

$$V_{1,n+1} = g_1(t_{n+1}) \tag{15}$$

t=0'dan V'nin ilk değerleri denklem (16)'daki gibi düzenlendiğinden, V'nin değerleri denklem (13),(14) ve (15)'in tekrarlanması ile bütün noktalarda açıkça belirlenebilir.

$$V_{i,0} = f(x_i) \tag{16}$$

Bir sonraki zaman dilimi için hesaplamalara geçmeden önce bir evvelki zaman diliminde bütün noktalarda hesaplamaları yapmak gerekir (CARNAHAN ve ark. 1969).

Donma zamanı öngörülmesinde kullanılan sayısal yöntemler levha şekline sahip gıdalarda denklem (17)'nin uygun sınır şartları ve sıcaklığa bağımlı fiziksel özelliklerle çözümünü içerirler.

$$\rho(T)\, c_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \tag{17}$$

Geçici rejimde ısı aktarım denkleminde (denklem (17)) ρ, c_p ve k sıcaklık ve konuma bağlı olarak değiştiğinden denklem (17) analitik olarak çözülememektedir. Bu nedenle sayısal olarak çözülmesi gerekmektedir. Sayısal çözüm için çeşitli sonlu farklar şemaları oluşturulmuştur. Çözüm için kullanılan bu şemaların bazıları şunlardır:

A- Lees şeması:

$$(\rho C)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^{i-1}}{2\Delta t} = \frac{1}{3(\Delta x)^2} \Big[k_{n+1/2}^i \Big[(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) +$$

$$+ (T_{n+1}^i - T_n^i) + (T_{n+1}^{i-1} - T_n^{i-1}) \Big] - k_{n-1/2}^i \Big[(T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}) +$$

$$+ (T_n^i - T_{n-1}^i) + (T_n^{i-1} - T_{n-1}^{i-1}) \Big] \Big] \quad (18)$$

B- Uyarlanmış Crank-Nicholson şeması:

$$(\rho C)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \Big[k_{n+1/2}^i \Big[(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) +$$

$$+ (T_{n+1}^i - T_n^i) \Big] - k_{n-1/2}^i \Big[(T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}) + (T_n^i - T_{n-1}^i) \Big] \Big] \quad (19)$$

C- Tam "Implicit" şema:

$$(\rho C)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \Big[k_{n+1/2}^i (T_{n+1}^i - T_n^i) -$$

$$- k_{n-1/2}^i (T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}) \Big] \quad (20)$$

D- Tam "Explicit" şema:

$$(\rho C)_n^i \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \Big[k_{n+1/2}^i (T_{n+1}^i - T_n^i) -$$

$$- k_{n-1/2}^i (T_n^i - T_{n-1}^i) \Big] \quad (21)$$

E- Entalpi değişim şeması:

$$\frac{H_n^{i+1} - H_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left[k_{n+1/2}^i \left(T_{n+1}^i - T_n^i \right) - k_{n-1/2}^i \left(T_n^i - T_{n-1}^i \right) \right] \quad (22)$$

F- Isıl geçirgenliğin kullanıldığı uyarlanmış Crank-Nicholson şeması:

$$\frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left[(k/\rho C)_{n+1/2}^i \left[\left(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1} \right) + \right.\right.$$

$$\left. + \left(T_{n+1}^i - T_n^i \right) \right] - (k/\rho C)_{n-1/2}^i \left[\left(T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1} \right) + \right.$$

$$\left.\left. + \left(T_n^i - T_{n-1}^i \right) \right] \right] \quad (23)$$

CLELAND ve EARLE (1984 a).

HOHNER ve HELDMAN (1970), FLEMİNG (1971), BONANICA ve ark. (1973), HELDMAN (1974), HELDMAN ve GORBY (1975), SCHWARTZBERG ve ark. (1977), SCHWARTZBERG (1977), HAYAKAWA (1977), CLELAND ve EARLE (1977), CHARM (1978), CLELAND ve EARLE (1979 a,b) sonlu farklar yöntemini kullanmışlardır. Sonlu elemanlar yönteminin BONANİCA ve COMİNI (1973), REBELLATIO ve ark. (1978), PURWADARıA (1980), HELDMAN ve PURWADARIA (1982) tarafından kullanıldığı RAMASWAMY ve TUNG (1984)'te belirtilmektedir.

2.4. Sayısal ve Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması (CLELAND ve EARLE (1977)).

Uyarlanmış Plank Eşitliği	Sonlu Farklar Yöntemi
1- Sadece el hesaplaması gerektirir.	1- Bilgisayar gerektirir. Yaklaşık 2000 zaman adımı ve her biri 50000 işlem gerektirir.
2- Çok hızlıdır.	2- Bilgisayar programını çalıştırmak için zaman gerektirir. Paket programlar ender olarak kullanılır.
3- Kullanma maliyeti çok azdır.	3- Hesaplama zamanının ve program hazırlanmasının dikkate değer maliyeti olabilir.
4- Gerekli ısıl özellikler için az bir bilgi gerektirir. Sadece k ve c'nin iki değerine gerek vardır.	4- Isıl özelliklerin sıcaklıkla değişimine ilişkin ayrıntılı bilgi gerektirir.
5- Sıcaklık/zaman dağılımını vermez.	5- Sıcaklık/zaman dağılımını verir.
6- Kullanmak için donma hakkında az bilgi gerektirir.	6- Paket program olmadığı taktirde sonlu farklar ve donma işleminin ayrıntılı olarak bilinmesi gerekir.
7- Bütün işlem değişkenlerinin etkisini görmek mümkündür. Her parametreye göre denklem düzenlenir.	7- İşlem değişkenlerinin etkisi programın tekrar çalıştırılması ile belirlenir.

2.5. Öngörme Yönteminin Değerlendirilmesi

CLELAND ve EARLE (1984 a), genel olarak öngörme yönteminin değerlendirilmesi için işlem sırasını şu şekilde vermiştir:

1- Aşağıdaki parametrelerin geniş aralıklarla değiştiği deneysel verileri toplamak:

a- Biot sayısı

b- İlk ve son sıcaklıklar

c- Soğutma ortam sıcaklığı

d- Dondurulan materyal

2- Elde edilen verilere literatürden alınan verileri eklemek. Burada ana problem diğer çalışanlar tarafından kullanılan ısıl özelliklerin belirlenmesidir. Eğer bu özelliklerin bulunduğu bir yayın ele geçirilemezse birçok gıda için bileşenlerinin etkisini gözönüne alan özellikler HELDMAN (1982) vb. kaynaklardan yaklaşık değerler olarak elde edilebilir.

3- Bir sayısal donma süresi öngörme yöntemi için çeşitli deney setleri ile öngörmeleri tamamlamak. Herhangi bir dondurulmuş materyal için aynı ısıl verileri kullanmak, ısıl verilerden gelebilecek hataları ortadan kaldırır.

4- Bulunan yeni yöntem sonuçlarının diğer yöntem sonuçları ile istatistiksel olarak karşılaştırılması.

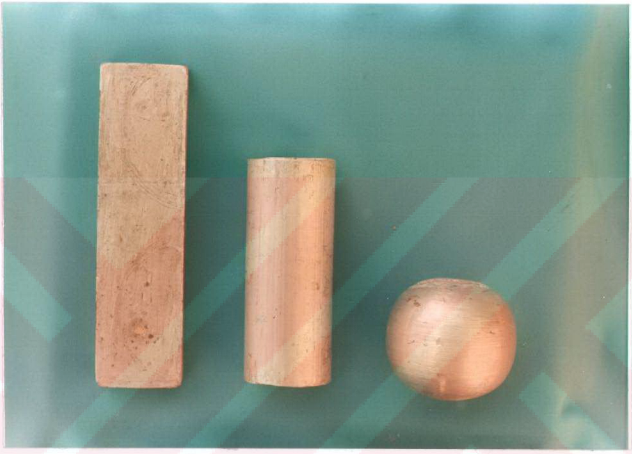
3. MATERYAL ve METOD

3.1. Materyal

Bu çalışmada donma verileri alınmak üzere yapılan denemelerde ısıl özellikleri belli olan patates püresi (% 79-81 su) ve iyi homojenize edilmiş kıyma (% 63-65 su) kullanılmıştır. Patates ve kıymaya dikdörtgenler prizması (2x4x15 cm) ve sonlu silindir (4x10 cm) şeklini verebilmek için Şekil 4.'de görülen bakır levhadan yapılmış kalıplar kullanılmıştır.

Şekil 4. Patates ve kıymaya şekil vermek için kullanılan bakır levhadan yapılmış kalıplar.

Isı aktarım katsayısını hesaplayabilmek için soğuma eğrilerini belirlemek üzere Şekil 5.'de görülen küre (5.85 cm), dikdörtgenler prizması (2x4x15 cm) ve sonlu silindir (4x10 cm) şeklinde alüminyum bloklar kullanılmıştır.



Şekil 5. Isı aktarım katsayılarını belirlemek için kullanılan alüminyum bloklar.

Dondurulma işlemleri Frigoscandia firmasına ait hava akımlı laboratuvar tipi dondurucuda (Şekil 6.) gerçekleştirilmiş, donma verileri şekillendirilmiş gıda maddelerinin ısıl merkezlerine yerleştirilmiş bakır-konstant (T tipi) ısıleşlerle, Omega firmasına ait 2175 A tipi dijital termometre ve yine aynı firmaya ait 10 kanallı Dataplex otomatik sinyal tarayıcısı ile her dakikada bir ısıl merkez sıcaklıkları -18^{o}C'a düşünceye kadar alınmıştır. Benzer ölçümler alüminyum bloklar için de yapılmıştır.

Şekil 6. Dondurulma işlemlerinin yapıldığı hava akımlı dondurucu.

Denemelerde kullanılan patatesler semt pazarından, kıyma Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü Et Pilot Tesisi'den sağlanmıştır. Bakır kalıp ve alüminyum bloklar boyutları belirlenerek piyasada yaptırılmıştır.

Bilgisayar programının oluşturulması ve çalıştırılması için Ege Üniversitesi Bilgi İşlem Merkezi'ne ait IBM 370 model bilgisayardan yararlanılmıştır.

3.2. Metod

3.2.1. Geçici rejimde ısı aktarım denklemleri ve sınır koşulları

Geçici rejimde levhadan tek yönlü ısı aktarım denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k \frac{\partial T}{\partial x}\right] \tag{24}$$

Yukarıdaki denklemde T sıcaklığı, k ısıl iletkenlik katsayısını, yoğunluğu ve c_p özgül ısıyı göstermektedir. Soğutma ve ısıtma işlemlerinde k, ρ ve c_p sabit alınabildiği için denklem (24) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{25}$$

Burada;

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

dir.

Ancak gıdaların dondurulması işlemlerinde ısıl özellikler olan k, ρ ve c_p sıcaklıkla değişmektedir. Isıl özellikler sıcaklığın fonksiyonu olarak yazıldığında; T_a ortam sıcaklığında, $2\Delta x$ kalınlığında bir sonsuz levha için geçici rejimde ısı aktarım denkleminin başlangıç ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

$$\rho(T)\ c_p\ (T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ t} = \frac{\partial}{\partial\ x}\left[k(T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ x}\right] \qquad (26)$$

Başlangıç koşulu;

$$T = T_i \qquad t \leq 0 \qquad 0 \leq x \leq \Delta x \qquad (27)$$

sınır koşulları;

$$-k\ \frac{\partial\ T}{\partial\ x}\bigg|_{x=\ \Delta x} = h\ (\ T_w - T_a\ ) \qquad x \leq \Delta x, \quad t > 0 \qquad (28)$$

$$\frac{\partial\ T}{\partial\ x} = 0 \qquad x = 0 \qquad t > 0 \qquad (29)$$

Isıl özellikleri sıcaklıkla değişen yarıçapları R olan küre ve sonsuz silindir için benzer sınır koşullarına sahip geçici rejimde ısı aktarım denklemleri aşağıdaki gibidir:

Sonsuz silindir için;

$$\rho\ (T)\ c_p\ (T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ t} = \frac{1}{r}\ \frac{\partial}{\partial\ r}\left[r\ k(T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ r}\right] \qquad (30)$$

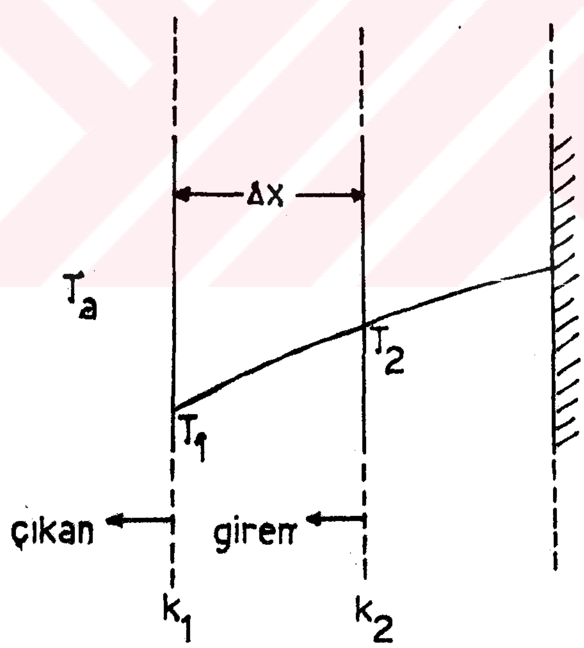
Küre için;

$$\rho\ (T)\ c_p\ (T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ t} = \frac{1}{r^2}\ \frac{\partial}{\partial\ r}\left[r^2\ k(T)\ \frac{\partial\ T}{\partial\ r}\right] \qquad (31)$$

3.2.2. Denklemlerin sonlu farklar haline getirilmesi

Isıl özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi halinde geçici rejimde ısı aktarım denklemlerinin analitik yöntemlerle çözülmesi olanaksızdır. Bu yüzden denklemlerin sayısal yöntemler kullanılarak çözülmesi gerekmektedir.

Bir sonsuz levha T_a sıcaklığına sahip bir ortama konulduğunda yüzey için sonlu farklar denklemi aşağıdaki gibi çıkartılmaktadır:



Şekil 7. Sonsuz bir levhada tek yönlü ısı aktarımı

Şekil 7.'deki sistemde ortam, sonsuz levha yüzeyi ve sıcaklığın doğrusal olarak değiştiği kabul edilebilecek Δx kadar içeride bir nokta için enerji denkliğini yazarsak;

$$Q_{giren} - Q_{çıkan} = Q_{birikim} \tag{32}$$

$$Q_{giren} = \frac{k.A}{\Delta x}(T_{2,n} - T_{1,n}) \tag{33}$$

Burada $T_{1,n}$ n. zamanda yüzey sıcaklığının, $T_{2,n}$ yüzeyden Δx kadar içerdeki sıcaklığı, A ısı aktarım alanını, k yüzey (k_1) ve Δx kadar içerideki (k_2) noktanın ısıl iletkenlik katsayılarının ortalamasını göstermektedir(denklem (34)).

$$k = (k_1 + k_2)/2 \tag{34}$$

$$Q_{çıkan} = h.A.(T_{1,n} - T_a) \tag{35}$$

Burada h yüzey ısı aktarım katsayısıdır.

$$Q_{birikim} = \frac{A.\Delta x.\ \rho\ .c_p}{\Delta t}\ (T_{1,n} - T_{1,n+1}) \tag{36}$$

Burada ρ ve c_p yüzeydeki yoğunluğu ve özgül ısıyı, Δt zaman aralığını, $T_{1,n+1}$ Δt zaman sonraki yüzey sıcaklığını göstermektedir. Denklem (33), (35) ve (36) düzenlendiğinde bir sonsuz levha için Δt zaman kadar sonra yüzey sıcaklığının ulaştığı değer aşağıdaki denklemden bulunabilir:

$$T_{1,n+1} = \frac{\Delta x^2 \rho c_p}{\Delta t} \left[k(T_{2,n} - T_{1,n}) - h\, \Delta x\, (T_{1,n} - T_a) \right] + T_{1,n} \qquad (37)$$

Denklem (37) sonsuz silindir ve küre için çıkartılmak istenirse, konumla ısı aktarım alanının değiştiği gözönüne alınmalıdır. Bu dikkate alınarak yarı çapları $M.\Delta x$ olan sonsuz silindir ve küre için sonlu farklar denklemleri;

Sonsuz silindir için;

$$T_{1,n+1} = \frac{\Delta x^2 \rho c_p}{\Delta t} \left[k(T_{2,n} - T_{1,n}) - \left[\frac{M}{M-0.5} \right] h\, \Delta x (T_{1,n} - T_a) \right] + T_{1,n} \qquad (38)$$

Küre için;

$$T_{1,n+1} = \frac{\Delta x^2 \rho c_p}{\Delta t} \left[k(T_{2,n} - T_{1,n}) - \left[\frac{M}{M-0.5} \right]^2 h\, \Delta x (T_{1,n} - T_a) \right] + T_{1,n} \qquad (39)$$

şeklindedir.

3.2.3. Isı aktarım katsayısının hesaplanması

Isı aktarım katsayısını bulmak için HUNG ve THOMPSON (1983)'da anlatılan yöntem kullanılmıştır. Kütlesi M, ısı aktarım alanı A, özgül ısısı c_p , ilk sıcaklığı T_i olan ısıl iletkenlik katsayısı yüksek bir madde olan alüminyum T_a ortam sıcaklığına konarak belirli zaman aralıklarında sıcaklıkları (T) kaydedilmiştir.

$$M.c_p.\ln \frac{T - T_a}{T_i - T_a} = - h.A.t \qquad (40)$$

Zamana (t) karşı $-\ln \frac{T - T_a}{T_i - T_a}$ grafiği çizildiğinde sıfır noktasından geçen doğrunun (Ek. 1., 2. ve 3.) eğimi denklem (40)'a göre;

$$m = \frac{h.A}{M.c_p} \tag{41}$$

olmaktadır. Buradan ısı aktarım katsayısı (h) hesaplanabilir. Bu şekilde hesaplanan ısı aktarım katsayıları kullanılarak yapılan donma süresi hesaplamalarında donma süreleri genel olarak düşük bulunmuş ve bu yüzden ısı aktarım katsayısının % 90'ı alınarak hesaplamalarda bu yeni değerler kullanılmıştır.

3.2.4. Isıl özellikler

Kıyma ve patates püresine ait ısıl özellikler CLELAND ve EARLE (1984 a) den alınmıştır. Bu ısıl özellikler programın akışı içinde her sıcaklık için kullanılmakta, ara değerler interpolasyonla hesaplanmaktadır.

3.2.5. Eşdeğer çap hesaplanması

Sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şeklindeki cisimler için donma süreleri küreye benzetilerek bulunmuştur. Bu işlem için bir eşdeğer çap tanımlaması gerekmektedir. Eşdeğer çapı bulmak üzere ILICALI (1987) tarafından geliştirilen formül kullanılmıştır (denklem (42)).

$$D_{eş} = \frac{1}{1+\beta} D_v + \frac{\beta}{1+\beta} D_{sv} \tag{42}$$

Formülde $D_{eş}$ eşdeğer çapı, β cisim boyutlarının en büyüğünün en küçüğüne oranını, D_v cisimle aynı hacma sahip kürenin çapını, D_{sv} cisimle eşit hacım/alan oranına sahip kürenin çapını göstermektedir. Yani;

$$D_v = \left[V_p \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \quad (43)$$

$$D_{sv} = 6 \frac{V_p}{S_p} \quad (44)$$

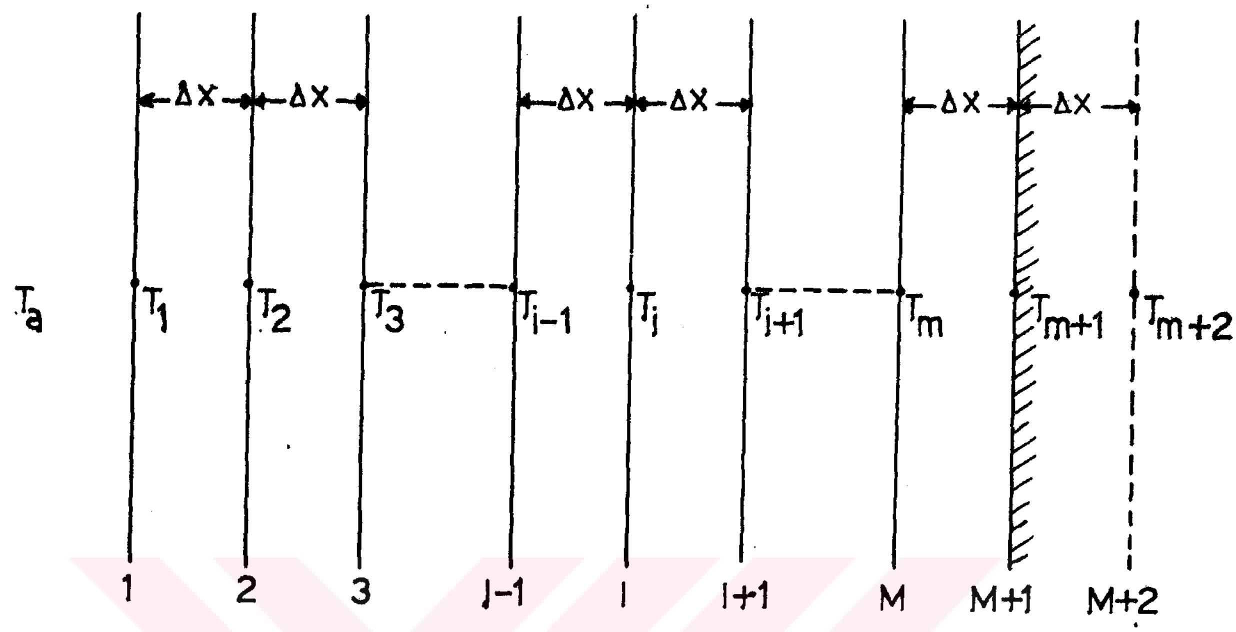
dir.

Burada V_p cismin hacmı, S_p cismin alanıdır.

3.2.6. Sayısal çözüm yöntemi

Sonlu farklar yönteminin,implicit formunda tridiagonal matrisini oluşturmak için aşağıdaki işlemler yapılmış ve oluşturulan matris Gauss eliminasyon yöntemiyle çözülmüştür.

M. Δx yarı kalınlığındaki bir sonsuz levha için tridiagonal matrisin oluşturulması şöyledir:



Şekil 8. M. Δx kalınlığında bir sonsuz levhada sıcaklık dağılımı

Şekil 8.'deki ikinci nokta için enerji denkliğini yazacak olursak;

$$\frac{KIP12(2).A}{\Delta x}(T_{3,n+1} - T_{2,n+1}) - \frac{KIM12(2).A}{\Delta x}(T_{2,n+1} - T_{1,n+1}) =$$

$$= \frac{A.\ \Delta x.CAP(2)}{\Delta t}(T_{2,n+1} - T_{2,n}) \tag{45}$$

Burada KIP12(2) ikinci ve üçüncü noktalardaki ısıl iletkenlik katsayılarının ortalamalarını, KIM12(2) birinci ve ikinci noktalardaki ısıl iletkenlik katsayılarının ortalamalarını göstermektedir. Yani;

$$KIP12(2) = (K(3) + K(2))/2 \tag{46}$$

$$KIM12(2) = (K(2) + K(1))/2 \tag{47}$$

Sıcaklık $T_{i,n}$ ifadesi ile gösterilmektedir. i bulunduğu noktayı, n zaman dilimini göstermektedir. CAP(2) ikinci noktadaki yoğunlukla özgül ısının çarpımına eşittir (denklem (48)).

$$CAP(2) = \rho\,(2)\;.\;c_p(2) \tag{48}$$

Denklem (45) düzenlendiği taktirde;

$$KIP12(2)\,(T_{3,n+1} - T_{2,n+1}) - KIM12(2)\,(T_{2,n+1} - T_{1,n+1}) = \frac{\Delta x^2 . CAP(2)}{\Delta t}\,(T_{2,n+1} - T_{2,n}) \tag{49}$$

halini alır.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} = RATIO \tag{50}$$

$$\gamma = \frac{CAP(2)}{RATIO} \tag{51}$$

yazılıp denklem (45) tekrar düzenlenirse:

$$\left[\, KIP12(2) + KIM12(2) + \gamma \,\right] T_{2,n+1} - KIP12(2)\,T_{3,n+1} = \gamma\,T_{2,n} + KIM12(2)\,T_{1,n+1} \tag{52}$$

$T_{1,n+1}$ denklem (37)'ye eşittir ve yüzey sınır koşulunu göstermektedir. Denklem (52) $2 \leq i \leq M-1$ için düzenlenirse:

$$- KIM12(I)\ T_{i-1,n+1} + \left[KIP12(I) + KIM12(I) + \gamma \right] T_{i,n+1} -$$

$$- KIP12(I)\ T_{i+1,n+1} = \gamma\ T_{i,n} \qquad (53)$$

Denklem (52) i=M+1 için düzenlenirse:

$$\left[KIP12(M+1) + KIM12(M+1) + \gamma \right] T_{M+1,n+1} - KIP12(M+1)\ T_{M+2,n+1} =$$

$$= \gamma\ T_{M+1,n} + KIM12(M+1)\ T_{M,n+1} \qquad (54)$$

$$KIP12(M+1) = KIM12(M+1) = \frac{K(M+1)+K(M)}{2} \qquad (55)$$

$$T_{m+2,n+1} = T_{m,n+1} \qquad (56)$$

Denklem (55) ve (56) gözönüne alınarak denklem (54) tekrar düzenlenirse:

$$\left[2KIM12(M+1) + \gamma \right] T_{M+1,n+1} - 2KIM12(M+1)\ T_{M,n+1} = \gamma\ T_{M+1,n} \qquad (57)$$

Denklem (53);

$$\begin{aligned} -KIM12(I) &= a_i \\ KIP12(I) + KIM12(I) + \gamma &= b_i \\ -KIP12(I) &= c_i \\ \gamma . T_{i,n} &= d_i \\ \gamma . T_{1,n} + KIM12(2) . T_{1,n+1} &= d_1 \end{aligned} \qquad (58)$$

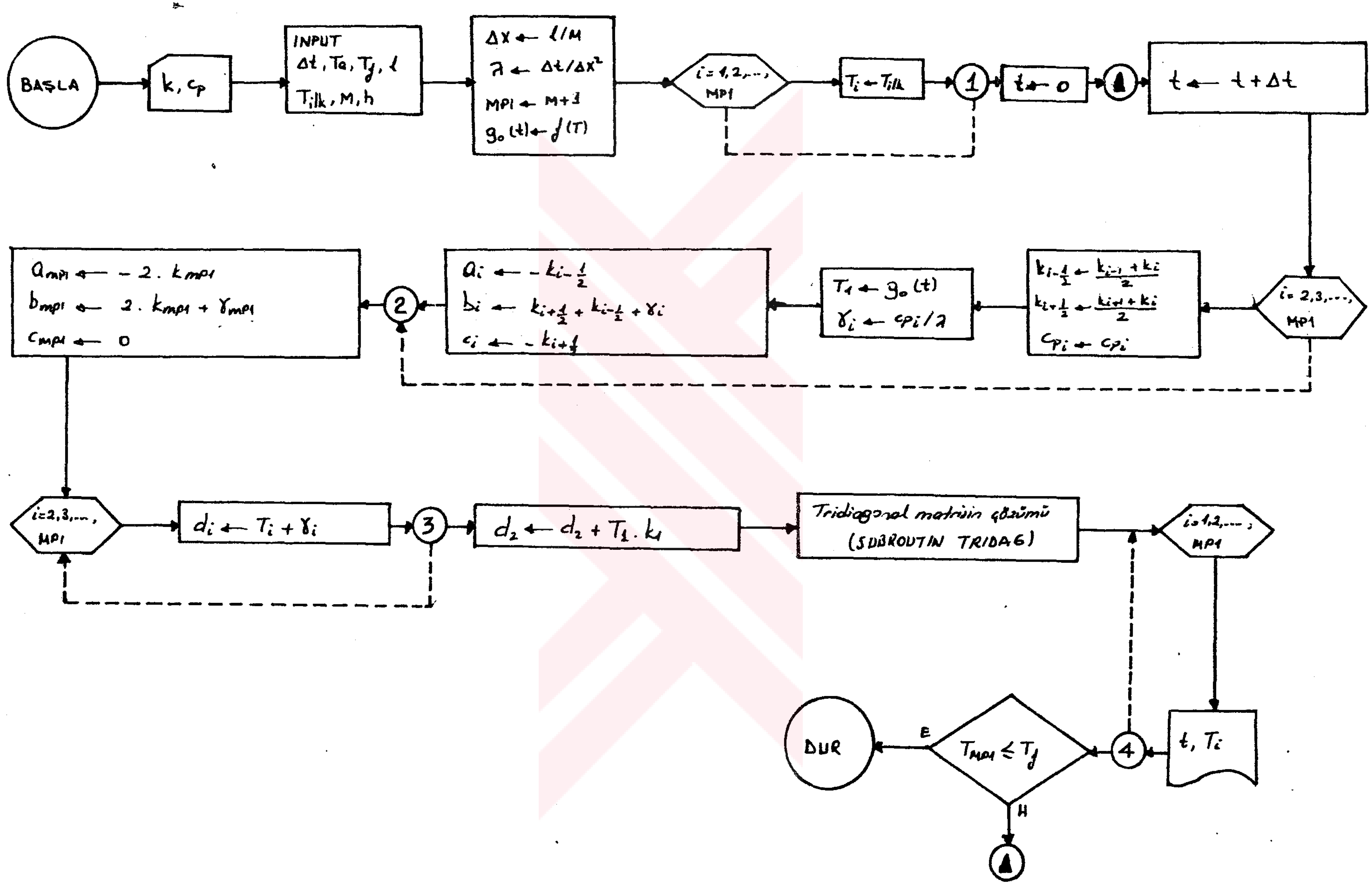
şeklinde sadeleştirilip n+1'ler kaldırılırsa, tridiagonal matris;

$$\begin{aligned} b_1T_1 + C_1T_2 \cdots\cdots &= d_1 \\ a_2T_1 + b_2T_2 + C_2T_3 \cdots\cdots &= d_2 \\ a_3T_2 + b_3T_3 + C_3T_4 \cdots\cdots &= d_3 \\ \text{-------------------} & \\ a_iT_{i-1} + b_iT_i + C_iT_{i+1} \cdots\cdots &= d_i \\ \text{-------------------} & \\ a_{M-1}T_{M-1} + b_{M-1}T_{M-1} + c_{M-1}T_M \cdots\cdots &= d_m \\ a_MT_{M-1} + b_MT_M \cdots\cdots &= d_{m+1} \end{aligned} \qquad (59)$$

şeklinde oluşur.

3.2.7. Bilgisayar programlarının oluşturulması

Bilgisayar programı CARNAHAN ve ark. (1969)'daki sabit ısıl özelliklere sahip sonsuz bir levha için geçici rejimde ısı aktarımı denklemi çözümünün alınarak gerekli uyarlamaların (sıcaklıkla değişen ısıl özellikler, başlangıç ve sınır koşulları) yapılması ile oluşturulmuştur. Programın akış şeması Şekil 9.'da, sonsuz levha, sonsuz silindir ve küre için oluşturulan programlar sırasıyle Ek. 4., 5. ve 6.'da verilmiştir.



Şekil 9. Bilgisayar programı akış şeması

4. BULGULAR

Farklı geometrik şekillerde dondurulan kıyma ve patates püresinin deneysel ve öngörülen donma süreleri ve bunların karşılaştırılmalarına ait bulgular Çizelge 1., 2. ve 3.'de gösterilmiştir. Sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için ana grup olarak geometrik şekil, ara grup olarak dondurulacak materyal bazında gruplandırma yapılmıştır.

4.1. Dikdörtgenler Prizması Şeklinde Dondurma

Dikdörtgenler prizması şekline getirilerek dondurulan patates püresi ve kıymaya ait donma verileri Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Dikdörtgenler prizması şeklindeki patates püresi ve kıymaya ait donma verileri ve öngörülen donma süreleri.

MATERYAL	$D_{eş}$ (m)	h W/m^2K	T_i (^oC)	T_a (^oC)	$t_{den.}$ (s) -10^oC	$t_{say.}$ (s) -10^oC	% E	$t_{den.}$ (s) -18^oC	$t_{say.}$ (s) -18^oC	% E
	0.04	57.0	24.2	-23.6	1913	1996	+4.3	2232	2268	+1.6
	"	"	23.8	-29.0	1715	1649	-3.9	1882	1757	-6.6
	"	"	24.6	-34.7	1485	1407	-5.3	1638	1453	-11.0
	"	63.1	23.0	-24.3	1683	1803	+7.1	1880	2011	+7.0
	"	"	23.2	-27.7	1567	1601	+2.2	1729	1716	-0.8
KIYMA	"	"	25.0	-34.5	1221	1338	+9.6	1315	1376	+4.6
	"	67.4	22.0	-23.6	1548	1776	+14.7	1880	1992	+6.0
	"	"	26.6	-27.0	1470	1615	+9.9	1740	1731	-0.5
	"	"	24.2	-33.1	1223	1324	+8.3	1361	1368	+0.5
	0.04	57.0	26.0	-24.5	2175	2004	-7.9	2420	2200	-9.1
	"	"	23.4	-28.4	1856	1698	-8.5	2020	1799	-10.9
	"	"	26.6	-33.4	1687	1519	-10.0	1791	1564	-12.7
PATATES	"	63.1	26.6	-24.7	1807	1848	+2.3	2021	2010	-0.5
PÜRESİ	"	"	23.6	-28.5	1453	1600	+10.1	1577	1683	+6.7
	"	"	27.2	-34.7	1461	1364	-6.6	1552	1393	-10.0
	"	67.4	27.2	-24.1	1824	1814	-0.6	2066	1975	-4.4
	"	"	23.2	-28.3	1360	1537	+13.0	1630	1612	-1.1
	"	"	18.8	-28.6	1337	1476	+10.4	1526	1548	+1.4
	"	"	27.2	-32.6	1290	1383	+7.2	1429	1419	-0.7

$t_{den.}$: Deneysel donma süresi

$t_{say.}$: Öngörülen donma süresi

% E : Hata yüzdesi

4.2. Sonlu Silindir Şeklinde Dondurulma

Sonlu silindir şekline getirilerek dondurulan patates püresi ve kıymaya ait donma verileri Çizelge 2.'de verilmiştir.

Çizelge 2. Sonlu silindir şeklindeki patates püresi ve kıymaya ait donma verileri ve öngörülen donma süreleri.

MATERYAL	$D_{eş}$ (m)	h W/m^2K	T_i (^0C)	T_a (^0C)	$t_{den.}$ (s) -10^0C	$t_{say.}$ (s) -10^0C	% E	$t_{den.}$ (s) -18^0C	$t_{say.}$ (s) -18^0C	% E
	0.0535	58.7	24.6	-23.8	2622	2924	+11.5	2970	3259	+8.7
	"	"	26.6	-29.2	2382	2433	+2.1	2574	2541	-1.3
KIYMA	"	78.8	24.0	-24.6	2199	2394	+8.9	2445	2568	+5.0
	"	"	24.4	-28.2	1940	2124	+9.5	2086	2208	+5.8
	0.0535	58.7	23.8	-24.4	2684	2856	+6.4	2970	3069	+3.3
PATATES	"	"	22.6	-28.0	2284	2502	+9.5	2475	2608	+5.4
PÜRESİ	"	78.8	23.0	-24.4	2307	2378	+3.1	2505	2515	+0.4
	"	"	22.6	-28.9	1990	2000	+0.5	2095	2052	-2.1

$t_{den.}$: Deneysel donma süresi

$t_{say.}$: Öngörülen donma süresi

% E : Hata yüzdesi

4.3. Küre Şeklinde Dondurulma

Küre şekline getirilerek dondurulan patates püresi ve kıymaya ait donma verileri Çizelge 3.'de verilmiştir.

Çizelge 3. Küre şeklindeki patates püresi ve kıymaya ait donma verileri ve öngörülen donma süreleri

MATERYAL	$D_{eş}$ (m)	h W/m^2K	T_i (^oC)	T_a (^oC)	$t_{den.}$ (s) -10^oC	$t_{say.}$ (s) -10^oC	% E	$t_{den.}$ (s) -18^oC	$t_{say.}$ (s) -18^oC	% E
	0.061	76.5	7.0	-20.3	3216	3157	-1.8	3750	3762	+0.3
	0.058	"	3.2	-26.7	2136	2145	+0.4	2340	2270	-3.0
	0.058	76.5	31.8	-20.3	3353	3364	+0.3	3750	3811	+1.6
	"	"	6.0	-27.6	2164	2134	-1.4	2322	2206	-5.0

$t_{den.}$: Deneysel donma süresi

$t_{say.}$: Öngörülen donma süresi

% E : Hata yüzdesi

Öngörülen donma sürelerinin ortalama hataların ($\overline{x}$) ve standart sapmaları (σ_{n-1}) Çizelge 4.'de verilmiştir.

Çizelge 4. Öngörülen donma sürelerinin ortalama hataları ve standart sapmaları

Materyal	Şekil	- 10^{0}C için		-18^{0}C için	
		$\overline{x}$	σ_{n-1}	$\overline{x}$	σ_{n-1}
9 Kıyma	Dikdörtgenler prizması	+5.2	6.6	+0.1	5.9
10 Patates	Dikdörtgenler prizması	+0.9	8.9	-4.1	6.3
4 Kıyma	Sonlu silindir	+8.0	4.1	+4.6	4.2
4 Patates	Sonlu silindir	+4.9	3.9	+1.8	3.3
2 Kıyma	Küre	-0.7	1.6	-1.4	2.3
2 Patates	Küre	-0.6	1.2	-1.7	4.7

Oluşturulan bilgisayar programları CLELAND ve EARLE (1977, 1979 a,b), HUNG ve THOMPSON (1983) ve MICHELIS ve CALVELO (1983)'deki çeşitli materyaller için donma verileri ile çalıştırılmış ve bulunan sonuçlar Çizelge 5.' de verilmiştir.

Çizelge 5. Literatürden alınan donma verilerinin değerlendirilmesi

VERİ KAYNAĞI	$\overline{x}$	n-1	son sıcaklık (^{o}C)
CLELAND ve EARLE (1977)			
43 Tylose sonsuz levha	+2.2	5.0	-10.
6 Patates sonsuz levha	-1.5	2.9	-10.
6 Yağsız et sonsuz levha	+0.2	5.3	-10.
CLELAND ve EARLE (1979 a)			
72 Tylose dikdörtgenler prizması	-6.7	5.4	-10.
CLELAND ve EARLE (1979 b)			
30 Tylose sonsuz silindir	-6.2	4.6	-10.
30 Tylose küre	-6.0	4.3	-10.
MICHELIS ve CALVELO (1983)			
17 Yağsız et dikdörtgenler prizması	+1.6	8.3	-10.
2 Yağsız et dikdörtgenler prizması	-4.5	0.9	-18.
4 Yağsız et sonlu silindir	+3.9	8.3	-18.
5 Yağsız et sonsuz levha	+0.4	7.0	-18
HUNG ve THOMPSON (1983)			
23 Tylose sonsuz levha	-2.6	8.2	-18.
9 Patates sonsuz levha	-3.9	10.0	-18.
9 Kıyma sonsuz levha	+4.5	4.5	-18.
9 Yağsız et sonsuz levha	+3.2	12.5	-18

Hesaplamalarda kullanılan ısı aktarım katsayılarını bulmak üzere çizilen soğuma eğrileri dikdörtgenler prizması(üç konumda), sonlu silindir (iki konumda) ve küre için sırasıyle, Ek. 1., 2. ve 3.'te verilmiştir.

5. TARTIŞMA

Oluşturulan bilgisayar programlarının CLELAND ve EARLE (1977), CLELAND ve EARLE (1979 a,b), MICHELIS ve CALVELO (1983), HUNG ve THOMPSON (1983)'deki çeşitli materyallere ait donma verilerini kullanarak çaliştırılması ile bulunan değerlerin CLELAND ve EARLE (1984 a)'da aynı yöntem (sonlu farklar yöntemi) ve donma verileri kullanılarak bulunan değerlerle uyum içinde olduğu gözlenmiştir (Çizelge 6.).

Çizelge 6. CLELAND ve EARLE (1984 a)'daki sonlu farklar yöntemi sonuçlarının bu çalışmadaki yöntem sonuçları ile karşılaştırılması.

VERİ KAYNAĞI	SONLU FARKLAR YÖNTEMİ (CLELAND ve EARLE 1984 a)		BU ÇALIŞMA	
	x	σ_{n-1}	x	σ_{n-1}
CLELAND ve EARLE (1977)				
43 Tylose sonsuz levha	0.0	5.3	+2.2	5.0
6 Patates sonsuz levha	-0.5	5.1	-1.5	2.9
6 Yağsız et sonsuz levha	+4.8	4.7	+0.2	5.3
CLELAND ve EARLE (1979 a)				
72 Tylose dikdörtgenler prizması	-3.8	5.8	-6.7	5.4
CLELAND ve EARLE (1979 b)				
30 Tylose sonsuz silindir	-1.8	5.2	-6.0	4.6
30 Tylose küre	-0.3	3.3	-6.2	4.3
MICHELIS ve CALVELO (1983)				
5 Yağsız et sonsuz levha	-0.1	7.4	+0.4	7.0
23 Yağsız et dikdörtgenler prizması, sonlu silindir	+8.6	6.3	+1.5	8.0
HUNG ve THOMPSON (1983)				
23 Tylose sonsuz levha	-1.3	8.7	-2.6	8.2
9 Patates sonsuz levha	-3.9	4.9	-3.9	10.0
9 Kıyma sonsuz levha	+6.6	16.6	+4.5	4.5
9 Yağsız et sonsuz levha	+2.8	11.6	+3.2	12.5

Sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şeklindeki cisimler için donma süresini bulurken bu cisimler küreye benzetilerek çözülmüştür. Bu benzetme eşdeğer çap formülü (denklem (42)) kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 1., 2. ve 5.'de görülebileceği gibi deneysel ve öngörülen sürelerin uyumluluğu eşdeğer çap formülünün kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Bilgisayar programları çalıştırılırken yaklaşık 1000 işlem yapması amaçlanmıştır. İşlem adedinin arttırılması daha iyi sonuç vermesine rağmen 1000 işlemden daha fazlasının zaman kaybı olduğu, sonucu fazla etkilemediği gözlenmiştir. Ancak sınır şartının explicit yazılması, buna karşılık sonlu farklar denklemlerinin implicit yöntemle çözülmesi denklem (60)'ın sağlanmasını gerektirmektedir.

$$M \geq N+1 \tag{60}$$

Burada;

$$M = \frac{(\Delta x)^2}{\dfrac{k}{\rho c_p} \Delta t} \qquad N = \frac{h \, \Delta x}{k} \tag{61}$$

dır.

Yüksek ısı aktarım katsayısı değerlerinde sağlanan bu denklem düşük ısı aktarım katsayısı ve küçük Δx 'lerde sağlanmamaktadır. Bunu sağlamak üzere Δt değerinin küçültülmesi ve dolayısıyla 1000'den fazla ($\approx$4000) işlem yaptırmak gerekmektedir. Bu problemle karşılaştığımız HUNG ve THOMPSON (1983)'de Δt'yi küçülterek sonuç bulmamıza karşın, HAYAKAWA ve ark. (1983)'deki 6 Tylose sonlu silindir için başarılı olunamamış, sonuçlar % 45 civarında (+) hatalı bulunmuştur. HAYAKAWA ve ark.(1983)'deki veriler iki değişik koşulda üçer deneme sonuçlarını içermektedir. Hatanın oluşturulan modelden gelip gelmediğini araştırmak için HAYAKAWA ve ark. (1983)'deki veriler CLELAND ve EARLE (1984 b) ve PHAM (1986)'daki analitik yöntemlerle çözülmüştür. Sonuçlar veri setinin birinde ortalama % 55, diğerinde ise ortalama % 105 hatalı çıkmıştır. PHAM (1986)'da veri setlerinin biri için % -9 ile % + 15 arasında değişen sonuçlar bulunduğu yazılıyorsa da bu sonuçların çap yerine yarıçap değerlerinin alınması ile bulunduğu saptanmıştır. PHAM (1986),ikinci veri seti için hata nedenlerini, deney koşullarının ve materyal özelliklerinin belinmesindeki hatalar ve eşdeğer ısı aktarım boyutunun bulunduğu ifadedeki hatalardan kaynaklanabileceği şeklinde yorumlamaktadır.

Bu çalışmada yapılan denemelerin CLELAND ve EARLE (1984 b) ve PHAM (1986)'daki yöntemlerle analitik çözüm sonuçları Çizelge 7.'de verilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi analitik yöntemler yaklaşık sonuç vermelerine rağmen sonlu farklar yöntemine göre daha fazla hatalıdır. Bunun nedeni yöntemlerin az sayıda deneye dayandırılmasıdır.

Çizelge 7. Bu çalışmada yapılan denemelerin analitik yöntemlerle değerlendirilmesi.

MATERYAL ve ŞEKİL	PHAM (1986)				CLELAND ve EARLE (1984 b)				BU ÇALIŞMA			
	-10^oC		-18^oC		-10^oC		-18^oC		-10^oC		-18^oC	
	$\bar{x}$	σ_{n-1}	$\bar{x}$	σ_{n-1}	$\bar{x}$	σ_{n-1}	$\bar{x}$	σ_{n-1}	$\bar{x}$	σ_{n-1}	$\bar{x}$	σ_{n-1}
9 Kıyma dikdörtgenler prizması	+7.0	6.5	+7.7	6.9	+14.2	6.9	+18.0	6.4	+5.2	6.6	+0.1	5.9
10 Patates dikdörtgenler prizması	+12.7	9.5	+14.6	7.8	+16.4	9.9	+15.1	7.6	+0.9	8.9	-4.1	6.3
4 Kıyma sonlu silindir	+7.5	3.9	+12.6	3.1	+17.2	3.6	+25.5	3.9	+8.0	4.1	+4.6	4.2
4 Patates sonlu silindir	+14.7	4.9	+21.3	3.8	+20.2	4.2	+23.2	2.9	+4.9	3.9	+1.8	3.3
2 Kıyma küre	+1.1	1.3	+4.7	4.1	+6.8	2.8	+16.5	0.1	-0.7	1.6	-1.4	2.3
2 Patates küre	+7.4	0.1	+16.9	1.4	+14.4	0.7	+19.1	3.3	-0.6	1.2	-1.7	4.7

Dondurulma işlemi sırasında materyalde meydana gelen ısıl genleşmeden dolayı hacım artışı ve yüzeyde buz oluşumu, ısı aktarım katsayısını düşürerek, ısı aktarımını olumsuz yönde etkilemektedir. Isı aktarım katsayısını bulmakta kullanılan alüminyum bloklarda böyle bir şey sözkonusu olmadığı için Ek. 1., 2. ve 3.'ten bulunan ısı aktarım katsayılarının % 90'ı alınarak kullanılmıştır.

Veri almak için kullanılan ısıleşlerin dondurulacak materyal içine yerleştirilmeleri sırasında soğuk noktadan sapmaları hataya neden olacağından ısıleşlerin yerleştirilmesine aşırı özen gösterilmiştir. Hatalı yerleşimin belirgin olarak farkedildiği denemelerde bu deneyler iptal edilmiş ve yinelenmiştir.

Isı aktarım katsayısını bulmak için soğuma verileri alınırken alüminyum blokların dondurucu içine yerleştirildikleri yer ve konumları kesin olarak belirlenerek dondurulma işlemi sırasında dondurulacak materyaller aynı yer ve konumlara yerleştirilmişlerdir.

Kullanılan dondurucuda ortam sıcaklığının $\mp$ 1.5^{o}C oynama yaptığı belirlenmiştir. Bu oynamanın etkisini araştırmak üzere ortam sıcaklığının sinüsoidal değiştiğini varsayarak ortam sıcaklığı program içinde zamanın fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucunda ortam sıcaklığındaki oynamanın öngörülen donma süresi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı, ortalama bir sıcaklığın kullanılabileceği belirlenmiştir.

Oluşturulan model soğuma Biot sayısının 0.08 - 39.42 değerleri arasında test edilmiştir. Ortam sıcaklıkları -14.7^{o}C ile -45.1^{o}C arasında, karekteristik uzunluk 0.010 m ile 0.1850 m arasında değişmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada çeşitli materyal ve geometrik şekiller için bulunan deneysel donma süreleri ile öngörülen donma süreleri arasında $-10^{0}C$ için % -10. ile % +14.7, $-18^{0}C$ için % -12.7 ile % +8.7 arasında değişen değerler bulunmuştur. Bu değerler her materyal ve geometrik şekil için Çizelge 8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Deneysel ve öngörülen donma süreleri arasındaki maksimum ve minimum hatalar

		$-10^{0}C$		$-18^{0}C$	
MATERYAL	ŞEKİL	maks %	min %	maks %	min %
Kıyma	dikdörtgenler prizması	+14.7	-5.3	+7.0	-11.0
Patates	dikdörtgenler prizması	+13.0	-10.0	+6.7	-12.7
Kıyma	sonlu silindir	+11.5	+2.1	+8.7	-1.3
Patates	sonlu silindir	+9.3	+0.5	+5.4	-2.1

Çeşitli yayınlarda bulunan donma verilerinin değerlendirilmesi sonunda geometrik şekillere göre bulunan ortalama değerler Çizelge 9.'da gösterilmiştir.

Çizelge 9. Çeşitli yayınlardaki geometrik şekillere göre bulunan ortalama değerler

ŞEKİL	Ortalama % hata
Sonsuz levha	+0.75
Sonsuz silindir	-6.2
Dikdörtgenler prizması	-4.8
Sonlu silindir	+4.6
Küre	-6.2

Çizelge 9.'da da görüldüğü gibi oluşturulan model donma zamanının öngörülmesi için uygundur. Dikdörtgenler prizması ve sonlu silindir için geliştirilen eşdeğer çap formülünün kullanılabilir olduğu bulunmuştur.

ÖZET

Bu çalışmada basit geometrik şekle sahip sonsuz levha, sonsuz silindir ve küre şeklindeki gıda maddelerinin donma sürelerini sonlu farklar yöntemi ile hesaplayabilmek için bilgisayar programları oluşturmak ve değişik ısı aktarım katsayısı, şekil ve gıda maddeleri ile yapılan deneme sonuçları ve literatürden alınan donma verileri ile bilgisayar program sonuçlarını karşılaştırmak amaçlanmıştır.

Basit geometrik şekle sahip gıda maddelerinin değişik koşullarda dondurulma sürelerini öngörebilmek için bilgisayar programları oluşturulmuş ve oluşturulan bilgisayar programları literatürden alınan Tylose (% 23 CMC, % 77 Su), patates püresi, yağsız et ve kıyma için donma verileri ile çalıştırılarak, literatürdeki deneysel donma süreleri, sonsuz levha için % +0.75, sonsuz silindir için % -6.2 ve küre için % -6.2'lik ortalama hata ile hesaplanmıştır.

Bilgisayar programları sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıda maddeleri için kullanılamadığından, geliştirilen bir eşdeğer çap formülü ile bu şekle sahip gıda maddeleri küreye benzetilerek, küre için hazırlanan program kullanılmak suretiyle donma süreleri bulunmuştur. Geliştirilen eşdeğer çap formülünün geçerliliğini araştırmak için patates püresi ve kıymaya sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şekli verilerek ısıl merkezleri -18°C'a gelinceye kadar bir hava akımlı dondurucuda dondurulmuşlardır. Hesaplamalarda kullanılan ısı aktarım katsayıları gıda maddeleri ile aynı boyutlara sahip alüminyum blokların soğuma eğrilerinden hesaplanmıştır. Alüminyum bloklar dondurucuya değişik konumlarda

yerleştirilerek değişik ısı aktarım katsayıları elde edilmiştir.

Yapılan denemelerde bulunan deneysel donma süreleri ve bilgisayar programı ile öngörülen donma süreleri karşılaştırıldığında $-10^{o}C$ için % -10. ile % +14.7, $-18^{o}C$ için % -12.7 ile % +8.7 arasında değişen hatalar bulunmuştur. Literatürden alınan donma verileri de değerlendirildiğinde dikdörtgenler prizması için % -4.8, sonlu silindir için % +4.6 ortalama hata değerleri bulunmştur.

Sonsuz levha, sonsuz silindir ve küre için hazırlanan bilgisayar programlarının yeterli hassasiyette sonuç verdiği ve bu şekillere sahip materyallerin donma sürelerinin öngörülmesinde kullanılabilir olduğu bulunmuştur. Sonlu silindir ve dikdörtgenler prizması şeklindeki materyaller için geliştirilen eşdeğer çap kavramının da geçerli olduğu belirlenmiştir.

SUMMARY

The object of this study was to establish the computer programmes for calculating the freezing times of the materials with simple geometrical shapes and comparing the numerical predictions with experimental freezing time data.

For calculating the freezing times of materials in simple geometrical shapes, computer programmes employing a finite difference technique were prepared and these programmes were run using freezing data for Tylose (23 % CMC, 77 % Water), mashed potato, lean beef and ground beef, experimental freezing data obtained from the literature were predicted with mean errors + 0.7 % for infinite slabs, -6.2 % for infinite cylinders and -6.2 % for spheres.

The freezing times of finitely cylindirical or brick-shaped foods were computed by utilizing an equivalent diameter. The equivalent diameter used is based on the diameter of the sphere equivalent of the finitely cylindirical or brick-shaped food. In order to check the equivalent diameter concept, mashed potato and ground beef in finitely cylindirical and brick-shape form were frozen in an air blast freezer until their thermal center reached -18^{o}C. The heat transfer coefficient used in the calculations were calculated from the cooling curves of aluminium blocks located at the position of the test object in the freezer. The positions of the aluminium blocks were changed to obtain different heat transfer coefficients.

The errors between the experimental and predicted freezing times were in the range of the final center temperature of -10 % to + 14.7 %

for -10.^{o}C, -12.7 % to +8.7 % for ,18^{o}C.

The mean errors between freezing time data from literature and predicted times were -4.8 % for brick-shaped, and +4.6 % for finitely cylindirical shaped materials.

It was observed that the established computer programmes can be used for freezing time predictions of infinitely slab and cylinder and sphere shaped foods. The equivalent diameter used for the finitely cylindirical and brick-shaped foods seemed to be a valid formulation.

LİTERATÜR LİSTESİ

ARKUN, M.E ve GÜNGÖR, I., 1977, Fundamentals of Programming and FORTRAN IV, Middle East Technical University Dept. of Computer Sci., Publication No: 3, Ayyıldız Matbaası A.Ş., Ankara

BAKAL, A. ve HAYAKAWA, K.I., 1970, Heat Conduction in an Infinite Slab During Freezing or Defrosting When the Phase Change Occurs in a Range of Temperature. I. Initial Freezing or Thawing Period, Presented at the Anniversary Meeting of the Inst. Food Technologists San Francisco, C.A., Alınmıştır:"RAMASWAMY ve TUNG (1984).

BONANICA, A.C. ve Ark., 1973, Numerical Solution of Phase-Change Problems, Int. J. of Heat Mass Transfer., 16,1825, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

CARNAHAN, B. ve ark., 1969, Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons, Inc., USA

CEMEROĞLU, B. ve ACAR, J., 1986, Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi, Gıda Teknolojisi Derneği, Yayın No:6, Sanem Matbaası, Ankara

CHARM, S.E., 1978, Fundamentals of Food Engineering, Second Edition, AVI Publishing Co., Westport, CT.

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1977, A Comparison of Analytical and Numerical Methods for Predicting Freezing Times of Foods, J. of Food Sci., 42, 1390.

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1979 a, Predicting Freezing Times of Foods in Rectangular Packages, J. of Food Sci., 44, 964.

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1979 b, A Comparison of Methods for Predicting the Freezing Times of Cylindirical and Spherical Foodstuffs, J. of Food Sci., 44, 958.

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1982, A Simple Method for Predicting Heating and Cooling in Solids of Various Shapes, Int. J. of Refrigeration, 5(2), 98, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1984 a, Assessment of Freezing Time Prediction Methods, J. of Food Sci., 49(4), 1034.

CLELAND, A.C. ve EARLE, R.L., 1984 b, Freezing Time Predictions for Different Final Product Temperatures, J. Food Sci., 49(4), 1230.

COWEL, N.D., 1967, The Calculation of Freezing Time, Proc. XII. Int. Congr. Refrigeration, 2, 667, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

EDE, A.J., 1949, The Calculation of Freezing and Thawing of Foodstuffs, Modern Refrigeration, 52, 52, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

FLEMING, A.K., 1971, The Numerical Calculation of Freezing Processes, Proc. XIII. Int. Congr. Refrigeration, 2,219, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

HAYAKAWA, K.I., 1977, Estimation of Heat Transfer During Freezing or Defrosting of Foods, IIR. Commissions C1, C2., Karlsruhe, 293, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

HAYAKAWA, K.I. ve ark., 1983, Two Dimensional Heat Conduction in Food Undergoing Freezing: Predicting Freezing Time of Rectangular or Finitely Cylindrical Food, J. of Food Sci., 48, 1841.

HELDMAN, D.R., 1974, Computer Simulation of Food Freezing Processes, Proc. VI. Int. Congr. Food Sci. and Tech. IV., 397, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

HELDMAN, D.R. ve GORBY, D.P., 1975, Computer Simulation of Individual Quick Freezing of Foods, ASAE Paper No: 75-6016, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

HELDMAN, D.R., 1982, Food Properties During Freezing, Food Tech., 36(2), 92.

HELDMAN, D.R., 1983, Factor Influencing Food Freezing Rates, Food Tech., 37(4), 103.

HOHNER, G.A. ve HELDMAN, D.R., 1970, Computer Simulation of Freezing Rates in Foods, Presented at the Ann. Meeting of the Inst. of Food Technologists, San Francisco, C.A. Alınmıştır:RAMASWAMY ve TUNG (1984).

HUNG, Y.C. ve THOMPSON, D.R., 1983, Freezing Time Prediction for Slab Shape Foodstuffs by an Improved Analytical Methods, J. of Food Sci., 48,555.

IIR, 1972, Recomandations for the Processing and Handling of Frozen Foods, Second Edition, Paris

ILICALI, C., 1987, Özel Görüşme, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, İzmir

ILICALI, C. ve SAĞLAM, N., 1987, A Simplified Analytical Model for Freezing Time Calculation in Foods, J. of Food Proc. Eng., 9, 299.

LEVY, F.L., 1958, Calculating Freezing Time of Fish in Air Blast Freezers, J. of Refrigeration, 1, 55, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG, (1984).

LUIKOV, A.V., 1968, Analytical Heat Diffusion Theory, Academic Press., New York, N.Y., Alınmıştır:RAMASWAMY ve TUNG (1984).

MASCHERONI, R.H. ve CALVELO, A., 1982, A Simplified Model for Freezing Time Calculation in Foods, J. of Food Sci., 47(4), 1201.

MOTT, L.F., 1964, Prediction of Product Freezing Time, Aus. Refrigeration Air Cond. Heat, 18,16, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

NAGAOKA, J. ve ark., 1955, Experiments on the Freezing of Fish by the Air Blast Freezer, J. of Tokyo Univ. Fish, 42(1), 65, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

PHAM, Q.T., 1984, An Extension to Plank's Equation for Predicting Freezing Times of Foodstuffs of Simple Shapes, Reuve Internasyonale du Froid, 7, 377.

PHAM, Q.T., 1986, Simplified Equation for Predicting the Freezing Time of Foodstuffs, J. of Food Tech., 21, 209.

PLANK, R., 1913, The Calculation of Freezing and Thawing of Foodstuffs, Modern Refrigeration, 52, 52, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

PLANK, R., 1963, EL Empleo del Frio en la Industria de la Alimentación, Editorial Reverte, Barcelona, Alınmıştır: CLELAND ve EARLE (1979 b).

PURWADARIA, H.K., 1980, A Numerical Prediction Model for Food Freezing Using Finite Elements Methods, Ph. D. Dissertation, Agricultural Engineering Dept. Michigan State Univ., East Lansing, MI., Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

PURWADARIA, H.K. ve HELDMAN, D.R., 1982, A Finite Element Model for Prediction of Freezing Rates in Food Products with Anomalysis Shapes, Trans. ASAE, 25(3), 827, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

RAMASWAMY, H.S., 1979, Thermophysical Properties of Apples and Prediction of Freezing Times, M.Sci.Thesis, Dept. of Food Sci. Univ. of British Columbia, Vencouver, Canada, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

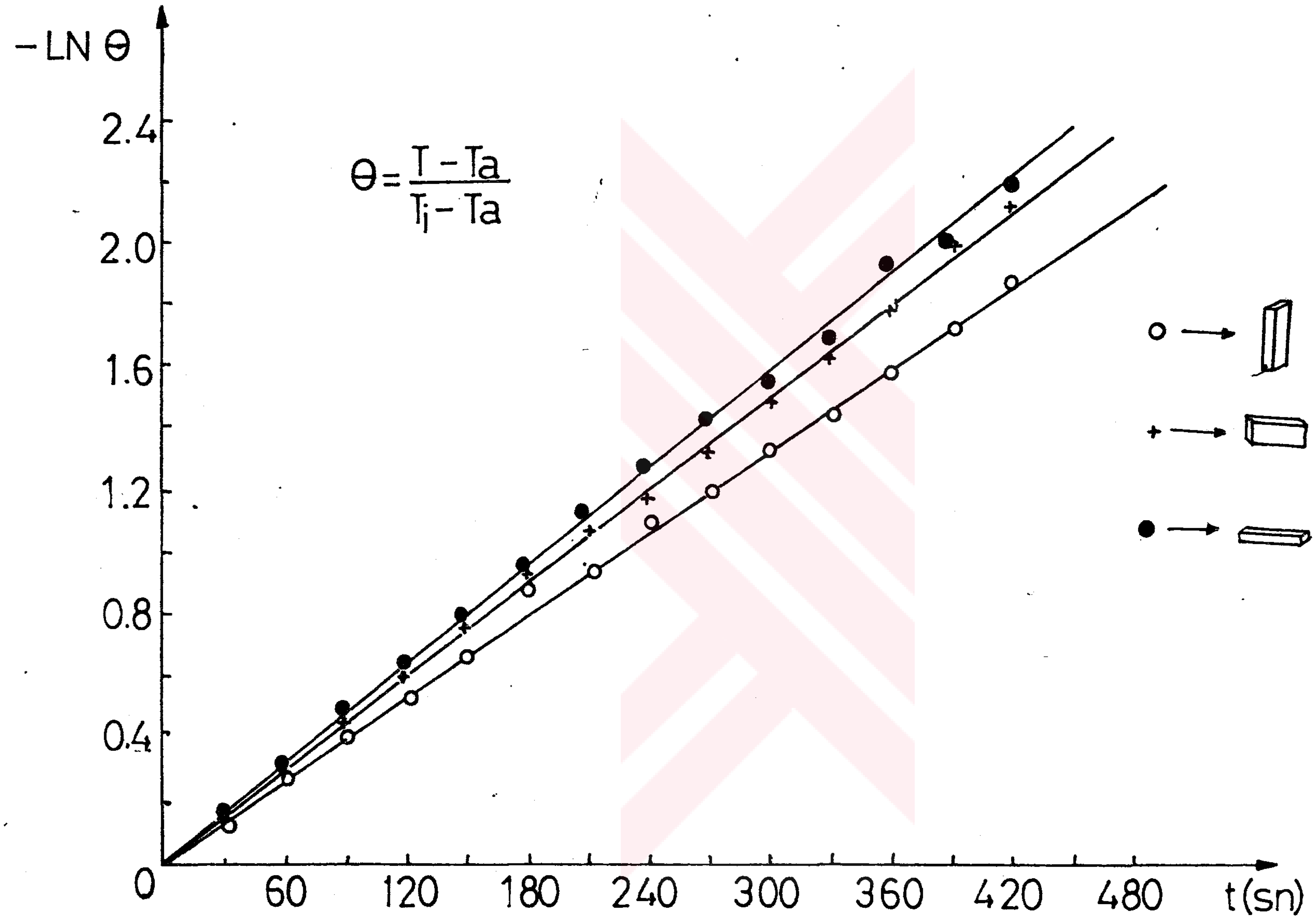
RAMASWAMY, H.S. ve TUNG, M.A., 1984, A Review on Predicting Freezing Times of Foods, J. of Food Proc. Eng., 7, 169.

REBELLATIO, L. ve ark., 1978, Finite Element Analysis of Freezing Processes in Foodstuffs, J. of Food Sci., 43, 239, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

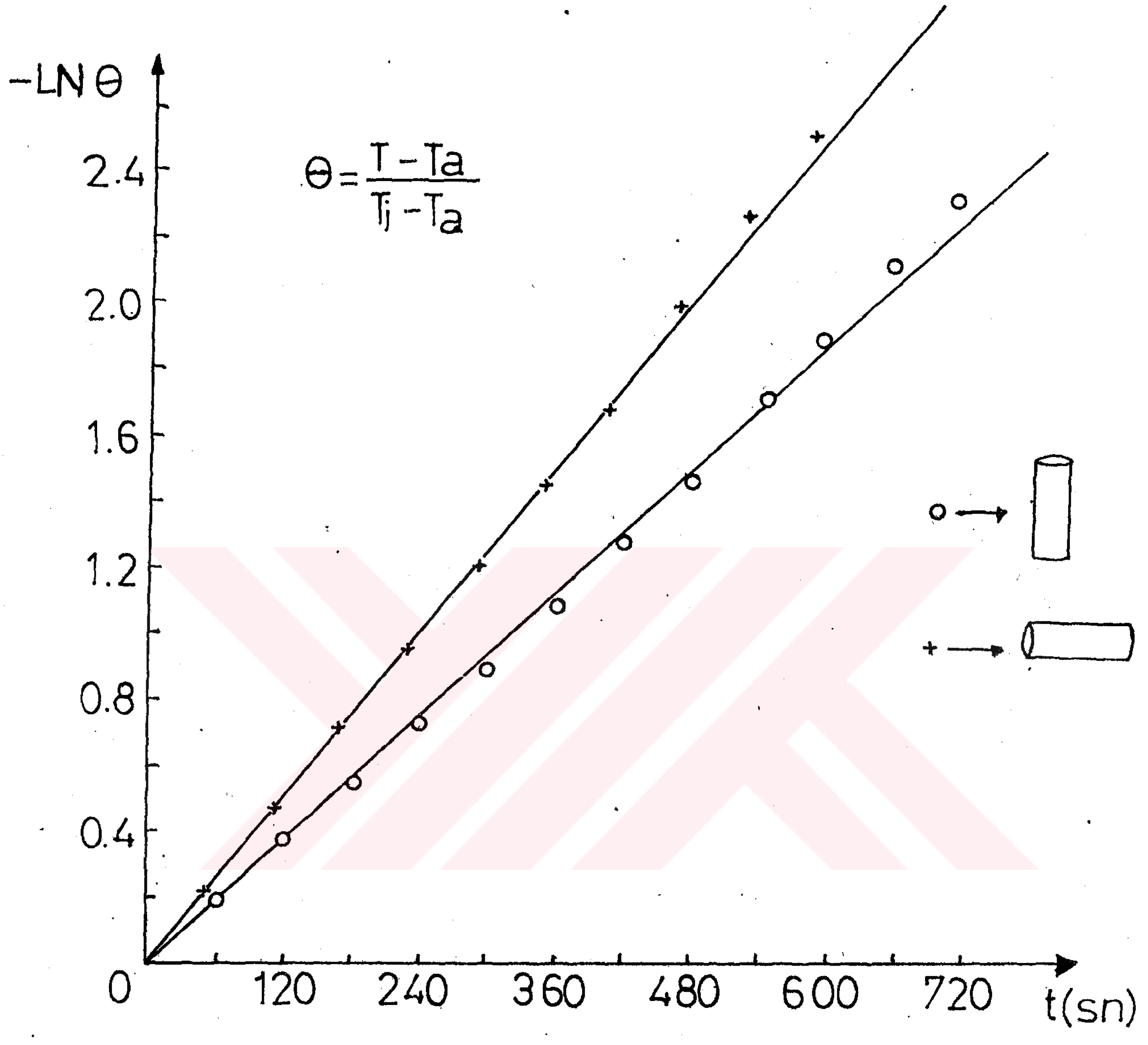
SCHWARTZBERG, H.G., 1977, Effective Heat Capacities for Freezing and Thawing of Foods, IIR. Commissions C1, C2., Karlsruhe, 303, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

SCHWARTZBERG, H.G. ve ark., 1977, The Prediction of Freezing and Thawing Temperatures vs. Time Behavior Through the Use of Effective Heat Capacity Equations, IIR. Commissions C1, C2., Karlsruhe, 311, Alınmıştır: RAMASWAMY ve TUNG (1984).

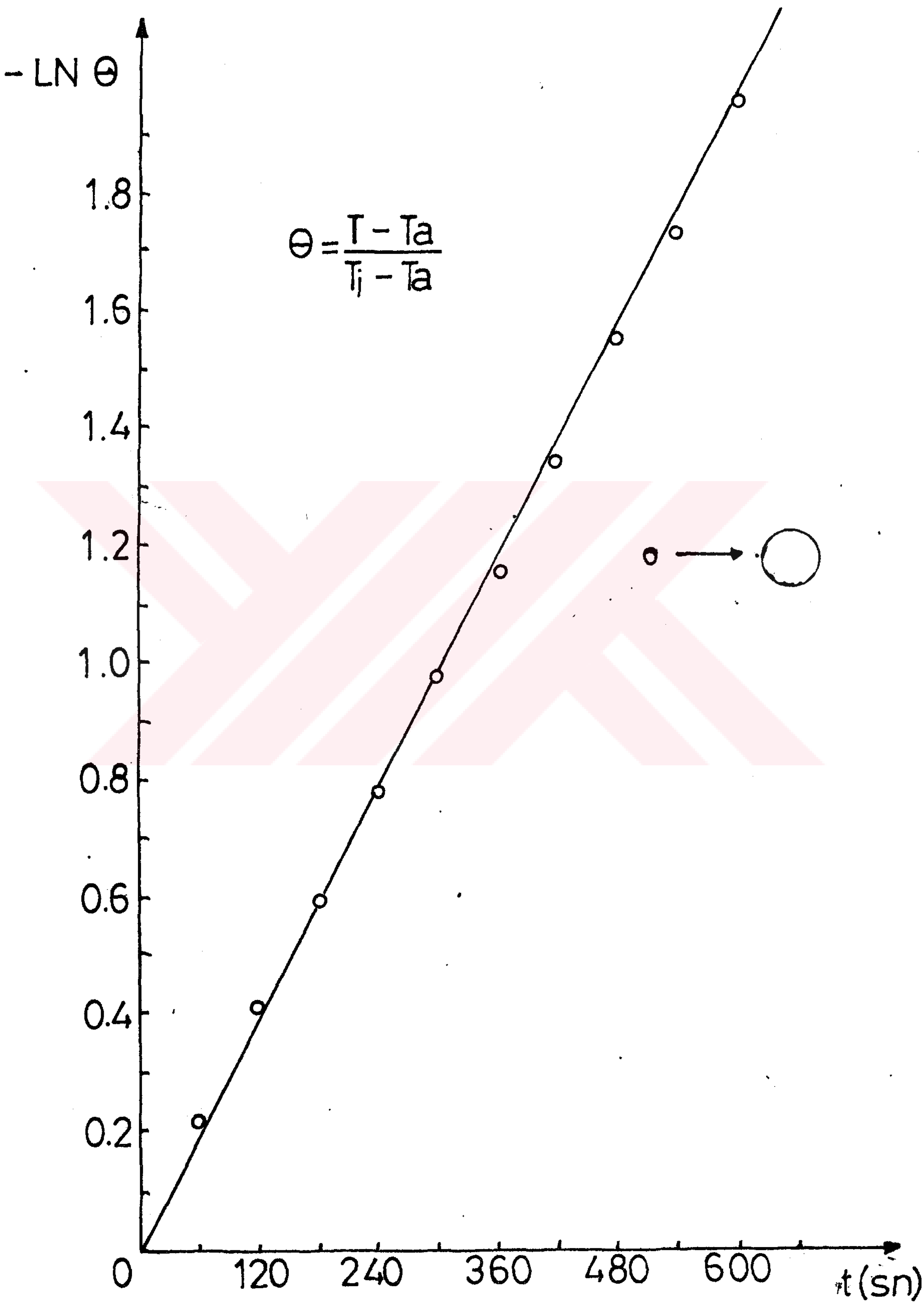
EKLER



Ek 1. Dikdörtgenler prizması için soğuma eğrileri.



Ek 2. Sonlu silindir için soğuma eğrileri.



Ek 3. Küre için soğuma eğrisi.

SEMBOLLER

A	:	Alan (m^2)
Bi	:	Biot sayısı
C	:	Donma noktasının üstündeki özgül ısı (kj/kg K)
C'	:	Donma noktasının altındaki özgül ısı (kj/kg K)
CAP(I)	:	Özgül ısı x yoğunluk (kj/m^3 K)
$D_{eş}$	:	Eşdeğer çap (m)
D_{sv}	:	Cisimle aynı hacım/alan oranına sahip kürenin çapı (m)
D_v	:	Cisimle aynı hacme sahip kürenin çapı (m)
Δ H	:	Entalpi farkı (kj/m^3)
KIM12(I)	:	Isıl iletkenlik katsayısı ortalaması (W/m K)
KIP12(I)	:	Isıl iletkenlik katsayısı ortalaması (W/m K)
L	:	Latent ısı (kj/kg)
M	:	Sabit
N	:	Sabit
P	:	Geometrik şekil faktörü
Pk	:	Plank sayısı
Q	:	Ön soğuma ısısı (kj/kg)
R	:	Geometrik şekil faktörü
S_p	:	Cismin alanı (m^2)
Ste	:	Stefan sayısı
T_a	:	Ortam sıcaklığı (^{0}C)
T_f	:	Son sıcaklık (^{0}C)
T_i	:	İlk sıcaklık (^{0}C)
T_w	:	Yüzey sıcaklığı (^{0}C)
V_p	:	Cismin hacmı (m^3)

c_p	:	Özgül ısı (kj/kg K)
h	:	Isı aktarım katsayısı (W/m² K)
i	:	Konum gösteren alt indis
k	:	Donma noktasının üzerindeki ısıl iletkenlik katsayısı (W/m K)
k'	:	Donma noktasının altındaki ısıl iletkenlik katsayısı (W/m K)
n	:	Zaman gösteren alt indis
Δt	:	Zaman farkı (s)
Δx	:	Uzaklık farkı (m)
β	:	En uzun boyutun en kısa boyuta oranı
ρ	:	Donma noktasının üzerindeki yoğunluk (kg/m³)
ρ'	:	Donma noktasının altındaki yoğunluk (kg/m³)
$\bar{x}$	:	Ortalama hata
σ_{n-1}	:	Hata standart sapması

BİLGİSAYAR PROGRAMLARINDA KULLANILAN DEĞİŞKENLER

CP(I)	:	Sıcaklıkla değişen özgül ısı x yoğunluk değerleri (kj/m³ K)
DTAU	:	Zaman artışı (time increment) (s)
GO(TIME)	:	Başlangıç koşulu
H	:	Isı aktarım katsayısı (W/m² K)
KP(I)	:	Sıcaklıkla değişen ısıl iletkenlik katsayısı değerleri (W/m K)
L	:	Merkez uzaklığı (m)
MTABLE	:	Sıcaklıkla değişen ısıl iletkenlik katsayısı adedi
NTABLE	:	Sıcaklıkla değişen özgül ısı x yoğunluk değerleri adedi
TAMB	:	Ortam sıcaklığı (°C)
TAUMAX	:	Maksimum zaman (s)
TIN	:	İlk sıcaklık (°C)
TLOW	:	Son sıcaklık (°C)

68

T E Ş E K K Ü R

Tez çalışmamı hassasiyetle yöneten ve çalışmalarıma emeği geçen hocam Sayın Doç. Dr. Coşkan ILICALI'ya, donma verilerini kaydedilmesinde yardımcı olan Ar. Gör. Taner BAYSAL ve İlknur KAZAZLAR'a ve tezimin daktilo edilmesinde gerekli sabır ve özeni gösteren dostum Erhan KEŞFEDEN'e teşekkürlerimi sunarım.