

**GIDALARIN DONMA ZAMANLARI İLE İLGİLİ MODELLERİN
MATEMATİKSEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Gıda Müh. Senem UMUT
506031512**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Pof. Dr. Y. Onur DEVRES
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Özgül EVRANUZ
Doç. Dr. Ahmet SİRKECİOĞLU**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında beni yönlendiren, yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Y. Onur DEVRES'e teşekkürlerimi sunarım. Eğitimimde emeği geçen tüm hocalarıma ve İTÜ Gıda Mühendisliği Ailesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Mersin Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'nde yaptığım araştırmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ferruh Erdoğan'ya ve konukseverliklerinden ötürü başta Bölüm Başkanı Prof. Dr. Mahir TURHAN olmak üzere tüm bölüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Dr. Rodolfo H. Mascheroni ve Dr. Viviana O. Salvadori'ye aramızdaki mesafelere rağmen yaptıkları yardımlar için teşekkürlerimi sunarım.

Eclipse kullanmamda ilk adımları atmama teşvik ve yardım ederek Java Applet uygulamaları yazarken yükümü hafifleten ve hatalarımı daha kolay görmemi sağlayan Altuğ Bilgin ALTINTAŞ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında benimle beraber geçirdikleri yorgun saatler ve cesaretimin hiç kırılmaması adına verdikleri manevi destekleri için Şericiğim'e ve Miniş Teyze'ye çok teşekkür ederim.

Hayatı yaşanabilir kılan ve hep varlıklarını yakınımnda hissetmek istediğim arkadaşlarım Songül ve Özge'ye; "ütü" Banu ve Denizciğim'e, az zamanda "çok" olan "çikolu pastam" Deryacığim'a; neredeyse bir yarı ömrü beraber geçirdiğim ve kalanında da yanımda olmasını dilediğim Aslı ve nice 5,5'lar umut ettiğim, geniş zamanlardaki olabirlikleriyle sevgili Çide'me teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana destek olan "Umut"lar sevgili anneciğime ve babacığım çok teşekkür ederim.

Haziran, 2007

Senem UMUT

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Donma İşlemi	3
2.1.1. Donma süresi tanımı	3
2.1.2. Donma işleminin termodinamiği	4
2.2. Donma Zamanı Tahmin Yöntemleri	6
2.2.1. Gıdalar için tek aşamalı donma zamanı tahmin yöntemleri	8
2.2.1.1. Plank eşitliği	8
2.2.1.2. Plank eşitliğinin modifikasyonları ile elde edilen eşitlikler	13
2.2.1.3. Deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmiş eşitlikler	25
2.2.2. Gıdalar için iki aşamalı donma zamanı tahmin yöntemleri	26
2.3. Java	29
2.4. MATLAB	31
3. MATERYAL VE METOT	32
3.1. Java Programları	32
3.1.1. Plank sınıfı	33
3.1.2. Rjutov sınıfı	34
3.1.3. Nagaoka1955 sınıfı	34
3.1.4. Levy1958 sınıfı	34
3.1.5. Cowell1969 sınıfı	34
3.1.6. Backstrom1970 sınıfı	35
3.1.7. Mellor1976 sınıfı	35
3.1.8. ClelandveEarle7779 sınıfı	35
3.1.9. HungveThompson sınıfı	36
3.1.10. ClelandveEarle84 sınıfı	35
3.1.11. ClelandveEarleHungDuzenlemesi sınıfı	36
3.1.12. Pham1984 sınıfı	36
3.1.13. IRR1986 sınıfı	37
3.1.14. Pham1986 sınıfı	37
3.1.15. LacroixveCastaigne sınıfı	37
3.1.16. SalvadoriveMascheroni1991 sınıfı	38

3.1.17. LopezveHallstrom sınıfı	38
3.1.18. ClelandveEarleSekilFaktoru1982 sınıfı	38
3.1.19. ClelandveEarleSekilFaktoru1987 sınıfı	38
3.1.20. HossainSekilFaktoru sınıfı	39
3.1.21. IlicaliSekilFaktoru sınıfı	39
3.1.22. PveR sınıfı	39
3.1.23. Ambalaj sınıfı	39
3.1.24. TermalOzellik sınıfı	40
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	55
EKLER	58
ÖZGEÇMİŞ	87

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 :Geometrik Şekiller İçin P ve R Sabitleri.....	11
Tablo 2.2 : P_2 ve R_2 Değerleri İçin Eşitlikler.....	15
Tablo 2.3 :Donma Süresi Tahmin Yöntemindeki Değişken Tanımlamaları.....	18
Tablo 2.4 :Sonsuz Düzlemin Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri.....	21
Tablo 2.5 :Sonsuz Silindir Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri.....	22
Tablo 2.6 :Küre Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri.....	22
Tablo 2.7 :Geometrik Şekiller İçin P_4 ve R_4 Sabitleri.....	24
Tablo 2.8 :Salvadori ve Mascheroni Donma Zamanı Tahmin Yönteminde Kullanılan Parametreler.....	26
Tablo 2.9 :Şekil Faktörü Hesaplamak İçin Geometrik Katsayılar.....	28
Tablo 2.10 :Çok Boyutlu Düzenli Şekillerde E Hesaplanması İçin Asimptotik Formüller.....	29
Tablo 4.1 :On Altı Yarı-Analitik/Amprik Yöntem Kullanılarak Hesaplanan Donma Süreleri ile Deneysel Verilerden Elde Edilen Donma Sürelerinin Karşılaştırılması.....	42
Tablo 4.2 :On Altı Yarı-Analitik/Amprik Yöntem Kullanılarak Hesaplanan Donma Süreleri ile Deneysel Verilerden Elde Edilen Donma Süreleri Arasındaki Farkların Standart Sapmaları.....	43
Tablo A.1 :Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri.....	58
Tablo D.1 :Levha Şeklindeki Karlsruhe Deney Materyalinin Deneysel Donma Süreleri.....	82
Tablo D.2 :Levha Şeklindeki Gıdaların Deneysel Donma Süreleri.....	83
Tablo D.3 :Levha Şeklindeki Çeşitli Gıdaların Deneysel Donma Süreleri.....	84
Tablo D.4 :Levha Şeklindeki Karlsruhe Örneğinin Deneysel Donma Süreleri...	85
Tablo E.1 :Donma Deney Materyallerinin Termo-Fiziksel Özellikleri.....	86

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 :Saf Suyun ve Tek Bir Çözünen İçeren Sulu Bir Çözeltinin Donma Eğrilerinin Karşılaştırılması.....	5
Şekil 2.2 :Donma Sırasındaki Sıcaklık Profili.....	8
Şekil 2.3 :Dikdörtgenler Prizması İçin P ve R Değerleri.....	12
Şekil 2.4 :Java Kaynak Kodlarının Çalışma Evreleri.....	30

SEMBOL LİSTESİ

A	: Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı (m^2)
Bi	: Biot sayısı, $Bi = hd / k$
Bi_c	: Biot sayısı, $Bi_c = hl / k_c$
Bi_d	: Biot sayısı, $Bi_d = hd / k_d$
Bi_l	: Biot sayısı, $Bi_l = hl / k$
Bi_{ls}	: Biot sayısı, $Bi_{ls} = hl / k_s$
Bi_s	: Biot sayısı, $Bi_s = hd / k_s$
C_c	: $(T_d + T_c) / 2$ Sıcaklığındaki donmuş gıdanın hacimsel özgül ısısı ($kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
C_d	: Donmuş haldeki gıdanın hacimsel özgül ısısı ($kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
C_l	: Donmamış fazın hacimsel özgül ısısı ($kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
C_p	: Hacimsel özgül ısı ($kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
C_s	: Donmuş fazın hacimsel özgül ısısı ($kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$)
d	: Karakteristik uzunluk, termal merkezden yüzeye olan en kısa mesafenin iki katı; levha kalınlığı veya küre veya silindirin çapı (m)
D	: Cowell eşitliğinde bir parametre, $D = P$
E	: Eşdeğer ısı transfer boyutudur (EHTD)
f	: Isı yayılım eğrisinde logaritmik olarak bir artış periyodu için geçmesi gereken süre (s)
Fo	: Fourier sayısı, $Fo = \alpha t / d^2$
Fo_s	: Fourier sayısı, $Fo_s = \alpha_s t / d^2$
G	: Cowell eşitliğinde bir parametre, $G = R / P$
h	: Yüzey ısı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
j	: Isı yayılım eğrisinin y-eksenini kestiği nokta
k	: Gıda maddesinin ısı iletkenlik katsayısı ($W \cdot ^\circ C$)
k_c	: $(T_d + T_c) / 2$ Sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı ($W \cdot ^\circ C$)
k_d	: Tamamen donmuş gıda maddesinin ısı iletkenlik katsayısı ($W \cdot ^\circ C$)
k_r	: Ortalama ısı iletkenlik katsayısı $(k_s + k_c) / 2$, ($W \cdot ^\circ C$)
k_s	: Donmamış gıdanın ısı iletkenlik katsayısı
Ko	: Kossovitch sayısı, $1 / Ste$

l	: Termal merkezden yüzeye en kısa mesafe; yarım levha kalınlığı veya küre veya silindirin yarıçapı (m)
L	: Hacimsel gizli ısı (J/m ³)
P	: Plank şekil faktörü
Pk	: Plank sayısı; $Pk = C_l(T_i - T_d) / \Delta H$
Q_1	: Ön soğuma sırasındaki uzaklaştırılan ısı
Q_2	: Faz değişimi sırasındaki uzaklaştırılan ısı
Q_3	: Son soğuma sırasındaki uzaklaştırılan ısı
R	: Plank şekil faktörü
Ste	: Stefan sayısı $Ste = C_s(T_d - T_c) / \Delta H$
t	: Süre (s)
t_{plank}	: Plank eşitliğine göre hesaplanmış donma süresi (s)
T	: Gıdanın x/l konumundaki sıcaklığı
T_c	: Donma çevre sıcaklığı (°C)
T_d	: Gıdanın donma başlangıç sıcaklığı (°C)
T_i	: Gıdanın ilk sıcaklığı (°C)
T_s	: Isıl merkezin son sıcaklığı
T_{od}	: Donma başlangıç sıcaklığının 1.5K aşağısında olduğu kabul edilen ortalama donma noktası
T_{os}	: Ortalama son sıcaklık
T_{ref}	: Donma işleminin bittiği referans sıcaklık (°C)
T_y	: Gıdanın yüzey sıcaklığı (°C)
X	: Gıdanın merkezine olan uzaklık koordinatı, (m)
V	: Gıda maddesinin hacmi
ΔH	: Hacimsel entalpi değişimi (kJ/m ³)
ΔH_{10}	: Donma başlangıç sıcaklığı T_d ve -10 °C arasındaki hacimsel entalpi değişimi (J/m ³)
ΔH_{18}	: Donma başlangıç sıcaklığı T_d ve -18 °C arasındaki hacimsel entalpi değişimi (J/m ³)
ΔH_{d-s}	: Donma başlangıç sıcaklığından son sıcaklığa kadar olan toplam entalpi değişimi (J/m ³)
$\Delta H'_d$	: Nagaoka ve diğ. tarafından geliştirilen eşitlikte yer alan toplam entalpi değişimi (J/m ³)
ΔH_p	: Prosesteki toplam entalpi değişimi (J/m ³)
α	: Isıl difüzivite katsayısı (m ² /s)
α_r	: Ortalama ısı difüzivite katsayısı $(\alpha_s + \alpha_c) / 2$, (m ² /s)
α_s	: Donmamış gıdanın ısı difüzivite katsayısı, (m ² /s)
α_c	: $(T_d + T_c) / 2$ Sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, (m ² /s)
β_1	: En uzun kenarın en kısa kenara oranı
β_2	: İkinci uzun kenarın en kısa kenara oranı
P	: Yoğunluk (g/cm ³)

Alt indisler	:	
1	:	Ön soğuma
2	:	Faz değişimi
3	:	Son soğuma

GIDALARIN DONMA ZAMANLARI İLE İLGİLİ MODELLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

ÖZET

Donma, en önemli gıda muhafaza yöntemlerinden biridir ve bu sebeple dünyada yaygın olarak kullanılan endüstriyel bir işlem olmuştur. Donma süresi, gıdanın birçok kalite karakteristiğini ve bunun yanı sıra işlem maliyetini de etkilemektedir. Optimal bir gıda donma işlemi tasarlamak ve dondurulmuş gıdanın besinsel değerini ve kalitesini maksimum düzeyde tutmak için donma süresinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Donma zamanının tahmin edilebilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Genel olarak donma zamanı tahmin yöntemleri amprik yöntemler ve sayısal yöntemler olarak iki kategori altında analiz edilebilmektedirler. Bu çalışma gıdaların donma zamanlarını tahmin etmede kullanılan yarı-analitik/amprik yöntemler üzerine odaklanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, donma zamanı modellerinin matematiksel olarak analiz edilerek karşılaştırılması ve kişisel kullanıma sunulmak için bir bilgisayar programına uyarlanmasıdır. Kullanıcıdan işlem koşulları ve dondurulmak istenen gıdanın ısı özellikleri girdisi alınarak, geliştirilen formüller yardımıyla, donma zamanını hesaplayan, kullanıcı-dostu bir java programı yazılmıştır. Java programlama dili kullanılarak yazılan ve HTML sayfası içerisine yerleştirilip web tarayıcılarında çalıştırılan küçük Java uygulamaları olan appletlerin geliştirilmesinde Eclipse Platform Versiyon 3.0.2 kullanılmıştır. Donma süresini hesaplayan 17 eşitlik, gıdaların donma süresini eşdeğer boyuta sahip levha şeklindeki gıda ile ilişkilendirilmesi yoluyla hesaplayan dört şekil faktörü eşitliği, istenen bir sıcaklıkta ısı özellikleri, ambalajlı gıdalarda taşınım ısı transfer katsayısını ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalarda P ve R geometrik faktörleri hesaplayan eşitlikler appletlere uyarlanmıştır.

Bu çalışmada, geniş yelpazedeki ortam koşullarında, farklı gıda materyalleri ile yapılan deneylerden elde edilen donma zamanları literatürden derlenmiş ve çeşitli yarı-analitik/amprik tahmin yöntemleri kullanılarak hesaplanan süreler ile karşılaştırılmıştır.

Plank, Rjutov, Nagaoka ve diğ., Levy, Cowell, Bäckström, Mellor, Cleland ve Earle, Pham, Hung ve Thompson, Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü (IIR), Lacroix ve Castaigne, Salvadori ve Mascheroni, López-Leiva ve Hallström tarafından geliştirilen eşitlikler kullanılarak Cleland ve Earle, Hung ve Thompson'dan derlenen deneysel olarak ölçülen donma süresi verileri ile karşılaştırmak üzere levha, silindir ve küre şeklindeki gıdaların donma süreleri hesaplanmıştır. Bu eşitlikler içerisinde

Plank eşitliği kullanılarak hesaplanan süreler %34.3 deneysel sonuçlardan farklılık göstererek doğruluğu en az olan sonuçlar vermiştir. López-Leiva ve Hallström (%32.3 fark), Bäckström (%30.4 fark), Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü (%26.4 fark), Rjutov (%22.4 fark) ve Mellor (%20.5 fark) tarafından geliştirilen eşitliklerden elde edilen donma süreleri ile deneysel donma süreleri arasında tatmin edici olmayan farklar bulunmuştur. Hung ve Thompson (%15.9 fark), Levy (%12.3 fark), Nagaoka ve diğ. (%10 fark), Cowell (%9.6 fark), Salvadori ve Mascheroni (%6.9 fark), Lacroix ve Castaigne (%6.7 fark) ve Pham (%5.6 ve %5.8 fark) tarafından geliştirilen eşitliklerden elde edilen sonuçlar kabul edilebilir düzeydedir. Tüm eşitlikler içerisinde Cleland ve Earle (%4.6) eşitliği kullanılarak ulaşılan sonuçlar maksimum doğrulukta olmuştur.

Plank, Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü, López-Leiva ve Hallström tarafından geliştirilen yöntemler dışındaki diğer tüm yöntemler farklı başlangıç sıcaklıkları için kullanılabilir. Cleland ve Earle'ün yöntemi, eşitliklerdeki katsayıların ürün son sıcaklığı -10°C olacak şekilde yapılan donma deneyleri sonucuna dayandığından, ürünün son sıcaklığının -10°C olması ile sınırlayıcı bir faktöre sahiptir. Son sıcaklığın farklı olduğu durumlarda formülün daha iyi sonuç vermesi amacıyla eşitlik modifiye edilmiş ve son sıcaklığın -10°C 'den farklı olduğu durumlarda eşitliğin modifiye edilmiş hali kullanılmıştır. Ancak, modifiye edilmiş eşitlik kullanılarak hesaplanan değerler Hung ve Thompson'ın son sıcaklığın -18°C olarak alındığı deneysel verileri ile karşılaştırıldığında (%7), kendi verileri ile elde edilen sonuçlara (%3.3) göre daha az doğrulukta değerler verdiği gözlenmiştir.

16 yöntem birbiri ile karşılaştırıldığında kuvvetli ve zayıf yönleri görülmektedir. Yöntemlerdeki zayıf yönler gelecekte yapılacak çalışmalar ile modifiye edilebilir. Kullanışlı bir donma zamanı tahmin yönteminin tüm deneysel verilere uygun, kullanımının kolay ve farklı başlangıç ve bitiş sıcaklıkları gibi çeşitli koşullar ve farklı ısı özellikleri için geçerli olması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, ürünün farklı son sıcaklıklara kadar soğutulmasının hesaba katıldığı deneysel çalışmalara, düzgün şekillerin yanı sıra düzgün olmayan farklı şekillerdeki gıdaların, farklı işlem ve çalışma koşullarında donma sürelerinin hesaplanabilmesi için basitleştirilmiş eşitlikler geliştirilmesine olan ihtiyaçları karşılaması beklenmektedir.

MATHEMATICAL ANALYZING OF FOODSTUFF FREEZING TIME PREDICTION MODELS

SUMMARY

Freezing is the one of the most important methods in food preservation so has become a widespread industry in the world. Many quality characteristics of foodstuffs as well as operating costs are influenced by freezing time. In order to design a food freezing process to be optimal and frozen foodstuff' nutritional value and quality to be maximized, it is necessary to estimate the freezing time. Many methods have been proposed to predict the freezing time. In general, the freezing time prediction methods can be analyzed in two categories as analytical methods and numerical methods. The following study focuses on semi-analytical/emprical methods used in predicting the freezing time of foodstuffs.

The aim of this study is mathematically analyzing the foodstuff' freezing time prediction methods and adapting them to a computer program for making available by public. A user-friendly Java programs are written which compute the freezing time, depending of the each formula developed, by taking user input on the conditions of the process and the thermal properties of the food materials to be frozen. Eclipse Platform Version 3.0.2 is used for developing the applets which are Java programs that are embedded in a Web page. In this study, numerical calculations are adapted to applets such as 17 equations computing the freezing time, 4 shape factor equations which are used for calculating the freezing time of foods by making relation with slab shaped food having equivalent dimension, and equations that can be used for calculating food thermal properties at the specific temperature and surface heat transfer coefficient of packed foods and P and R geometric factors of brick shaped foods.

In this study, experimental measurements of the freezing times which were made over a wide range of conditions using different food materials were collected from the literature and were compared to freezing times calculated from various available semi-analytical/emprical prediction methods.

Formulas derived by Plank, Rjutov, Nagaoka et al., Levy, Cowell, Bäckström, Mellor, Cleland and Earle, Pham (1984 study), Hung ve Thompson, International Institute of Refrigeration (IIR), Lacroix and Castaigne, Salvadori and Mascheroni, López-Leiva and Hallström are used for calculating the freezing time of slabs, cylinders and spheres for comparing to results with experimentally measured freezing time data gathered from Cleland and Earle, Hung and Thompson. Among

them the results calculated from Plank equation gave the less accurate freezing time with 34.3% difference between the predicted and the experimental. The methods by López-Leiva and Hallström (32.3% difference), Bäckström (30.4% difference), International Institute of Refrigeration (26.4% difference), Rjutov (22.4% difference), Mellor (20.5% difference) gave unsatisfactory results. An acceptable outcomes gained by the formulas developed by Hung and Thompson (15.9% difference), Levy (12.3% difference), Nagaoka et al. (10% difference), Cowell (9.6% difference), Salvadori and Mascheroni (6.9% difference), Lacroix and Castaigne (6.7% difference), Pham (1984 study) (5.6% difference) and Pham (1986 study) (5.8% difference). Results obtained from Cleland and Earle (4.6% difference) gave the maximum accuracy over all.

Except Plank, International Institute of Refrigeration and López and Hallström methods all other methods are applicable to different initial temperature with high accuracy. Cleland and Earle's method has a limiting factor that they obtained their coefficients used in their formula from the experiments done until the final product temperature is reached -10°C . Although they modified their equation to perform better when applying to situations with different final temperature, the modified version gave poor accuracy (7.0% difference with experimental data obtained from Hung and Thompson which accounted the final temperature as -18°C) comparing the results (3.3% difference) obtained from using their own experimental data.

The comparison of the 16 methods shows the strengths and weakness of them which might highlight future research to strengthen them by modifying their weakness. As expected a useful freezing time prediction method is the one which can fit all available data, simple to use and be valid for a range of conditions like different initial and final temperatures, different thermal properties. Future research might be expected to meet the needs for experimental data in which varied final product temperature is accounted, to develop simpler equations for different shapes, irregular ones as well as the regular, and for different operating and process conditions.

1. GİRİŞ

Son yıllarda birçok ülkede dondurulmuş gıda tüketimi yüksek seviyelere ulaşmıştır. Gıda maddelerinin muhafazası, dondurma işleminin en önemli uygulama alanlarından biri olup, donma prosesinin uzun süreli muhafaza sağlaması, diğer muhafaza yöntemlerine göre gıdanın duyusal niteliklerinin ve besleyici özelliklerinin işlem sırasında korunmasında daha etkili olması, gıda endüstrisinde kullanımını yaygınlaştırmıştır (Becker ve Fricke, 1999; Singh ve Heldman, 2001). Donma prosesi, gıdanın sıcaklığı düşürülerek gıdada mevcut bulunan suyun büyük bir kısmının buza çevrilmesi esasına dayanmaktadır (Delgado ve Sun, 2001). Gıdaların dondurulmasının mikroorganizma ve enzimlerin aktivitesini azalttığı, hücre metabolik reaksiyonlarını ve bunlara bağlı olarak bozulma reaksiyonlarını yavaşlattığı bilinmektedir (Delgado ve Sun, 2001). Ayrıca suyun kristalleşmesi sonucu gıdada sıvı halde bulunan su miktarının azalması da mikrobiyal gelişmenin önüne geçilmesini sağlayan diğer önemli faktördür (Becker ve Fricke, 1999).

Gıda dondurma prosesinin uygun bütçeyle gerçekleştirilebilmesi, soğutma ekipmanının optimum koşulları yerine getirecek şekilde tasarlanmasını gerektirmektedir (Becker ve Fricke, 1999). Donma sistemi için gereksinimleri tahmin etmek, etkin ve optimum koşulların gerçekleştiği bir proses için gerekli ekipmanları tasarlamak, gıdaların soğuma ve donma sürelerinin tahmin edilmesi ihtiyacının duyulmasına sebep olmuştur (Delgado ve Sun, 2001; Becker ve Fricke, 1999). Enerji tüketimini minimize etmek ve kaliteli ürün elde edilmesini sağlamak da donma süresi tahminini gerektiren, göz önünde tutulan diğer sebepler arasında yer almaktadır (Delgado ve Sun, 2001; Salvadori ve diğ., 1997).

Gıdaların donma zamanını tahmin edebilmek için çeşitli yöntemler önerilmiş olup (Becker ve Fricke, 1999; Cleland ve Earle, 1977a, 1977b, 1979a, 1979b, 1982, 1984, 1987; Delgado ve Sun, 2001; Heldman ve Singh, 1989; Hung ve Thompson, 1983; Ilıcalı ve diğ., 1999; Lacroix ve Castaigne, 1987a, b, 1988, LeBlanc ve diğ., 1990; López-Leiva ve Hallström, 2003; Pham, 1984, 1986; Salvadori ve Mascheroni, 1991) donma süresini tahmin etmede kullanılan modeller bir dizi kabule dayanan basit amprik eşitliklerden sayısal yöntemlere çok geniş bir yelpazede yer almaktadır (Delgado ve Sun, 2001).

Bu çalışmanın amacı, donma zamanı modellerinin matematiksel olarak analiz edilerek karşılaştırılması ve kullanıcı dostu bir bilgisayar programı yordamıyla kişisel kullanıma sunulmasıdır.

Donma zamanının tahmin edilebilmesi amacıyla geliştirilmiş yarı-analitik/amprik eşitlikler, gerekli düzenlemeler yapılarak bilgisayar ortamına aktarılmış ve kullanıcıdan alınan veriler ile donma süresinin hesaplanmasını sağlayan java applet uygulamaları yazılmıştır.

Literatürdeki çeşitli şekillerdeki gıda maddeleri için, farklı ortam koşullarında gerçekleştirilmiş donma deney sonuçlarından elde edilen donma süreleri derlenerek, bugüne kadar geliştirilmiş bağıntıların kullanılmasıyla hesaplanan donma süreleri ile karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Donma İşlemi

Donma işleminin gerçekleştiği zaman dilimi ön soğuma, faz değişim periyodu ve temperleme fazı olarak da adlandırılan son soğuma olmak üzere üçe ayrılabilir. Gıdanın başlangıç sıcaklığından donma noktasına soğutulduğu süreç ön soğuma aşamasıdır. Gıda maddesinde mevcut donabilen su, belirli sıcaklık aralığında yer alan faz değişim periyodunda kristalize olmaktadır. Donma sonrası gıdanın son sıcaklığına ulaşması için geçen evre son soğuma olarak belirtilmektedir (Delgado ve Sun, 2001; López-Leiva ve Hallström, 2003). Gıda içindeki su saf halde olmadığından dolayı su-buz hal değişimi kademeli gerçekleşmekte ve bu nedenle üç periyodun kesin sınırı tam olarak belirlenemeyebilmektedir (López-Leiva ve Hallström, 2003).

2.1.1 Donma süresi tanımı

Ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı donma prosesi sırasında değişim gösterdiğinden donma süresi ölçüm yapılan pozisyona göre tanımlanmalıdır. Genellikle sıcaklık değişiminin en yavaş gerçekleştiği bölge olan ısıl merkez referans olarak alınmaktadır (Delgado ve Sun, 2001). Isıl merkez gelmesi istenen sıcaklığa geldiğinde ya da belirli bir kütle ortalama sıcaklığına ulaşıldığında donma prosesinin tamamlandığı belirtilebilmektedir (Delgado ve Sun, 2001; López-Leiva ve Hallström, 2003). Kütle ortalama sıcaklığını kullanmanın dezavantajı ortalama yığın sıcaklığının ölçülmesinin veya çok sayıda sıcaklık verisi olmadan pratikte tahmin edilmesinin zor olmasıdır. Bu nedenle donma süresi tanımı yapılırken genellikle en yavaş soğuyan noktanın (ısıl merkez) belirli bir sıcaklığa erişmesi dikkate alınmaktadır (Delgado ve Sun, 2001). Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü son sıcaklık olarak gıdanın ısıl merkezindeki sıcaklığın kabul edilmesini tavsiye etmektedir

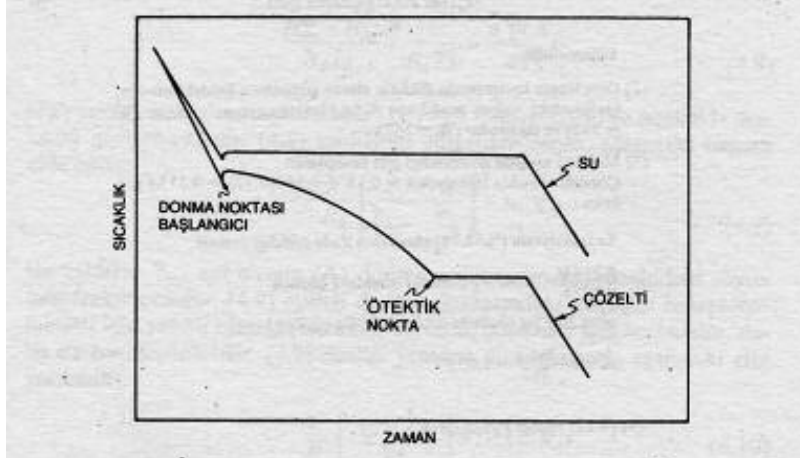
(López-Leiva ve Hallström, 2003).

Donma süresi için nominal ve efektif donma süresi olmak üzere iki tanımlama belirtilmektedir. Nominal donma süresi, belirli boyutlara sahip, başlangıç sıcaklığı tekdüze ve 0°C olan bir ürünün ısı merkezinin donma başlangıç sıcaklığının 10°C altına gelmesi için geçmesi gereken süredir. Bir diğer tanım ise efektif donma süresi veya standart donma süresi olarak da bilinen bir ürünün ısı merkezinin ilk sıcaklık değerinden istenen son sıcaklık değerine düşürülmesi için gerekli toplam süredir. İlk tanım buz oluşumu için geçen süreyi dikkate aldığı için ürün kalitesi ile ilgilidir, ikinci tanım ise ürünün ekipman içerisinde kaldığı toplam süreyi içermektedir. Çoğu yöntem ve literatür donma süresi tahmininde efektif donma süresini kullanmaktadır. Son merkez sıcaklığı olarak -5°C, -10°C, -18°C değerleri kullanılabilir. Isı merkezin olması istenen son sıcaklık değeri belirlenirken tüm gizli ısının o sıcaklığın üstünde bir sıcaklıkta uzaklaştığından emin olunması yerinde bir tercih olacaktır. Birçok çalışmada -10°C sıcaklık, o değerde donma işlemi ile ilgili yayınlanmış veri çokluğu göz önüne alınarak, son merkez sıcaklığı olarak seçilmektedir (Delgado ve Sun, 2001).

2.1.2 Donma işleminin termodinamiği

Gıdanın donması karmaşık bir işlemdir. Saf suyun donmasına göre daha karmaşık olmasının önde gelen sebebi, gıda içerisinde mevcut suyun bir anda, tek bir sıcaklıkta değil bir sıcaklık aralığında donmasıdır (Pham, 2002).

Donma öncesinde gıdanın mevcut bulunduğu ilk sıcaklıktan donma başlangıç sıcaklığına düşürülmesi için görünür ısının uzaklaştırılması gereklidir. Gıdanın donmaya başladığı ilk sıcaklık, gıdada çözünmemiş maddeler bulunması dolayısıyla saf suyun donma sıcaklığından farklı bir sıcaklıktır (Becker ve Fricke, 1999). Şekil 2.1’de saf suyun ve tek bir çözünen içeren sulu bir çözeltinin donma eğrileri gösterilmektedir (Heldman ve Singh, 1989).



Şekil 2.1: Saf Suyun ve Tek Bir Çözünen İçeren Sulu Bir Çözeltinin Donma Eğrilerinin Karşılaştırılması (Heldman ve Singh, 1989)

Donma sırasında her türde gıdaya göre karakteristik olan T_d donma sıcaklığında buz formasyonu oluşmaya başlayarak geniş bir sıcaklık aralığında bu oluşum devam eder (Salvadori ve diğ., 1997). Gıda içerisinde bulunan suyun bir kısmının donma başlangıç sıcaklığında kristalize olması geri kalan çözeltinin konsantrasyonunun artmasını sağlar ve bu donma sıcaklığının düşmesine sebep olur (Becker ve Fricke, 1999; López-Leiva ve Hallström, 2003). Sıcaklık düştükçe buz kristali oluşumu ve çözeltideki çözünmemiş kısmın konsantrasyonu artar ve bu durum donma noktasının daha da düşmesine sebep olur. Sonuç olarak donma prosesinde donmuş gıda içerisindeki buz ve su fraksiyonlarının sıcaklığa bağlı olduğu açıktır. Buz ve sıvı haldeki suyun termofiziksel özellikleri farklı olduğu için donmuş gıda maddesinin özellikleri de sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Faz değişiminin tek sıcaklıkta gerçekleşmemesi, buz ve sıvı haldeki suyun termofiziksel özelliklerinin farklı olması gıdanın karakteristik fiziksel özelliklerinde (ρ , C_p , k) sıcaklığa bağlı olarak önemli ve sürekli bir değişime neden olur. Bu sebepten ötürü donma koşullarında prosesin süresini tahmin etmek için kesin, genel bir analitik çözüm mevcut değildir (Becker ve Fricke, 1999; Salvadori ve diğ., 1997).

Teorik olarak gıdanın donması aşağıda gösterilen Fourier'in ısı iletim eşitliği ile tanımlanabilmektedir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (2.1)$$

Eşitlikteki T sıcaklığı, t zamanı, ρ gıdanın yoğunluğunu, c gıdanın özgül ısısını, k gıdanın ısı iletim katsayısını, x, y ve z koordinat eksenlerini ifade etmektedir. İdeal, düzgün şekilli, sabit termofiziksel özelliklere sahip, tekdüze başlangıç koşullarında, dış koşulların sabit olduğu, belirli yüzey sıcaklığı veya taşınım sınır koşullarında gıda maddeleri için Fourier eşitliğinden yola çıkılarak donma süresini bulmayı sağlayacak kesin analitik çözümler yapılabilmektedir. Ancak pratik donma prosesinde genellikle gıdalar düzgün şekillerde değildir. Ayrıca termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı olarak değişmesinden ötürü donma süresini hesaplamak için kesin bir çözüm getirilemeyip bazı kabuller yapılarak yaklaşık analitik çözümler üretilmektedir (Cleland ve Earle, 1979a; Becker ve Fricke, 1999).

2.2 Donma Zamanı Tahmin Yöntemleri

Gıda maddelerinin donma ve çözündürme sürelerini tahmin etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir (López-Leiva ve Hallström, 2003). Donma işlemini tanımlayan yöntemler analitik, sayısal ve deneysel olmak üzere üç ana grup altında toplanabilir (Delgado ve Sun, 2001).

Deneysel yaklaşımda üzerinde araştırma yapılması istenen işlem laboratuvar ortamında gerçeğine benzetilerek (simülasyon) veya pilot ölçekli olarak kurulur. Bu yaklaşım sistem performansı hakkında önemli veriler elde edilmesini sağlarken elde edilen katsayılar, deney materyali ve işlem koşullarına bağlı olduğundan işlemin genelleştirilerek teorik olarak tarif edilebilmesinde yetersiz kalabilmektedir. Ancak analitik yöntemlerin doğruluğunun kontrolü için olmazsa olmaz olarak da nitelendirilebilir (Delgado ve Sun, 2001).

Gıdaların donma süreleri için sayısal tahminler bilgisayar programları yardımıyla sonlu elemanlar veya sonlu farklar yöntemleri ile hesaplanabilmektedir. Sayısal analiz yöntemlerinde, ürün küçük kontrol hacimlerine veya elemanlarına

bölünmektedir. Her bir kontrol hacmi veya elemanı için ısı iletim eşitliği yazılarak yüzlerce, binlerce veya bazı zamanlarda milyonlarca eşitlik seti oluşturulmaktadır. Bu eşitlikler daha sonra her bölgedeki sıcaklığın zamanla değişimini hesaplamak için çözülmektedir. Sonlu farklar yönteminde ürün düzgün bölümlere ayrılarak ısı transfer eşitlikleri yazılarak bilgisayar tarafından hesaplanmaktadır (Pham, 2002). Bu yöntem yalnızca dikdörtgenler prizması, sonlu silindir, küre şeklinde düzgün şekilli ve homojen gıdalar için kullanılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kompleks, düzgün şekilli veya homojen olmayan gıda maddeleri için donma süresi hesaplanabilmektedir. Sayısal analiz yöntemlerinin uygulanması pratik değildir. İki veya üç boyutlu olarak hazırlanan simülasyonlar ile veri elde etmek ve bu verileri kullanmak oldukça zaman almakta ve karışık bilgisayar hesaplamaları gerektirmektedir (Hung ve Thompson, 1983; Pham, 2002). Ayrıca gıda materyalinin ısı özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak ölçümünün doğru olarak yapılabilmesindeki güçlük, ısı transfer katsayısının bölgesel olarak doğruluğundaki şüpheler ve bilgisayar kaynaklı hesaplamalar için gerekli maliyet dikkate alındığında sayısal analiz yöntemlerinin kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir (Cleland ve Earle, 1979b). Bu sebeple araştırmaların çoğu basitleştirilmiş eşitlikler elde etmek için yarı-analitik/ampirik tahmin etme yöntemleri geliştirme üzerine yoğunlaşmaktadır (Becker ve Fricke, 1999).

Analitik yaklaşım fiziksel ilkelere dayanmaktadır (Delgado ve Sun, 2001). Yarı-analitik/ampirik donma süresi tahmini gerçekleştirme yöntemleri iki ana kategoride incelenebilir. İlk kategori gıdanın şekline göre kurulmuş bağıntıları direk kullanarak hesaplama yapılmasını sağlarken yalnızca çalışma yapılmış belirli şekillerde hesaplama yapılabilir. İkinci kategori, ilk önce sonsuz levha şeklinde olan gıdalar için kullanılan yöntemlerden birinin kullanımını da içeren iki adımlı çözüm yöntemini içermektedir (Becker ve Fricke, 1999).

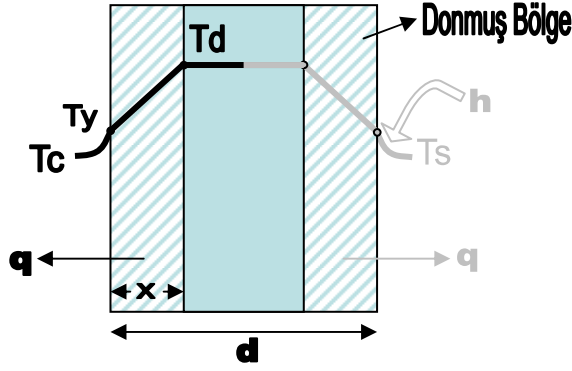
2.2.1 Gıdalar için tek aşamalı donma zamanı tahmin yöntemleri

Genel olarak orijinal Plank eşitliği başlangıç noktası olarak kullanılmaktadır ancak bu eşitlik donma öncesi ve sonrası zamanları içermediğinden yeni terimler ve parametreler ekleme yoluyla tüm donma prosesine uygun hale getirmek için birçok çalışma yapılmıştır (Becker ve Fricke, 1999). EK A’da donma zamanını hesaplamak üzere geliştirilmiş eşitlikler gösterilmekte ve EK B’de donma zamanı eşitlikleri ile ilgili örnek sorular verilmektedir.

2.2.1.1 Plank eşitliği

Plank tarafından geliştirilmiş eşitlik gıdaların donma zamanlarının tahmin edilmesinde en yaygın olarak bilinen yöntemdir (Becker ve Fricke, 1999). Plank ilk olarak 1913 yılında silindir, levha gibi çeşitli şekillerdeki buz bloğu için donma süresini hesaplayan bir formül geliştirmiştir. 1941 yılındaki ikinci çalışmasında benzer bir hesaplama yöntemini gıdalar için kullanmıştır (López-Leiva ve Hallström, 2003). Plank yönteminde aşağıdaki kabuller yapılmıştır (López-Leiva ve Hallström, 2003; Becker ve Fricke, 1999):

- Gıda maddesi, donma prosesi başlangıcında donma sıcaklığında bulunmaktadır ve bu sıcaklık donma prosesi boyunca değişmemektedir.
- Gıda maddesi ve onu çevreleyen ortam arasındaki ısı alışverişi yalnızca ısı iletim yoluyla gerçekleşmektedir.
- Fiziksel özellikler sıcaklıkla değişim göstermemektedir.
- Hacim değişimi ihmal edilmektedir.



Şekil 2.2: Donma Sırasındaki Sıcaklık Profili (Heldman ve Singh, 1989)

Şekil 2.2’de levha şeklindeki bir ürün tabakasının dondurulması tek boyutlu olarak gösterilmektedir. Plank’in donma süresi için geliştirdiği eşitliğin elde edilmesi için üç temel eşitlikten yararlanılmaktadır. Birinci bağıntıda d kalınlığındaki ürünün donmuş halde bulunan x kesimi için temel ısı iletim eşitliği gösterilmektedir (Heldman ve Singh, 1989).

$$q = \frac{k_d A}{x} (T_d - T_y) \quad (2.2)$$

Eşitlikte, T_d ürünün donma başlangıç noktası olup ürünün donmamış halde bulunan tüm bölgelerinin sıcaklığını; T_y yüzey sıcaklığı; k_d donmuş haldeki gıdanın ısı iletim katsayısını göstermektedir.

Ürün yüzeyinden, ürünü çevreleyen ortama olan ısı transferi (2.3) numaralı bağıntıyla tanımlanabilmektedir.

$$q = hA(T_y - T_c) \quad (2.3)$$

Eşitlikte, h , ürün yüzeyindeki taşınım ısı transfer katsayısıdır. (2.2) ve (2.3) numaralı eşitlikleri birleştirilerek seri halindeki ısı transferi için (2.4) numaralı eşitlik elde edilmektedir.

$$q = \frac{(T_d - T_c)A}{\frac{x}{k_d} + \frac{1}{h}} \quad (2.4)$$

Donma işleminin ilerlediği yönde faz değişimi ile gerçekleşen ısı üretim debisi (2.5) numaralı eşitlikle gösterilmektedir.

$$q = \frac{AdxL}{dt} = AL \frac{dx}{dt} \quad (2.5)$$

Eşitlikteki diferansiyel terim donma yayılma çizgisinin hızını, L hacimsel gizli ısıyı göstermektedir. (2.4) ve (2.5) numaralı eşitlikler birbirine eşitlenerek düzenlenir ve (2.6) numaralı eşitlik elde edilir; bu eşitlik $t=0$ ve $x=0$ 'dan $t=t$ ve $x=d/2$ arasında integre edilirse (2.7) numaralı eşitlik elde edilir. Elde edilen eşitlik genel formda yazılarak (2.8) numaralı eşitlik kurulmaktadır.

$$(T_d - T_c) \int_0^t dt = L \int_0^{d/2} \left(\frac{x}{k_d} + \frac{1}{h} \right) dx \quad (2.6)$$

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{d}{2h} + \frac{d^2}{8k_d} \right) \quad (2.7)$$

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

L hacimsel gizli ısı, T_d gıdanın donma başlangıç sıcaklığı, T_c donma çevre sıcaklığı, d levha kalınlığı, küre veya silindirin çapı, h yüzey ısı transfer katsayısı, k_d tamamen donmuş gıdanın ısı iletim katsayısı, P ve R geometrik faktörlerdir (Heldman ve Singh, 1989). Çeşitli şekiller için geometrik faktörler Tablo 2.1 ve Şekil 2.3'te gösterilmektedir (ASHRAE,1993). Şekil 2.3'te yer alan grafik Ede tarafından 1949 yılında hazırlanmıştır. Ancak şekilde de görülebileceği gibi grafik, β_1 ve β_2 değerlerinin 10'dan küçük olduğu koşullar için geçerlidir (López-Leiva ve Hallström, 2003). Dikdörtgenler prizması şekli için P ve R geometrik faktörleri ayrıca (2.9)-(2.13) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanabilmektedir (Cleland ve Earle, 1979b).

$$P = \frac{\beta_1 \beta_2}{2(\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2)} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{Q}{2} \left[(m-1)(\beta_1 - m)(\beta_2 - m) \ln \left(\frac{m}{m-1} \right) - (n-1)(\beta_1 - n)(\beta_2 - n) \ln \left(\frac{n}{n-1} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$+ \frac{1}{72} (2\beta_1 + 2\beta_2 - 1)$$

$$\frac{1}{Q} = 4 \left[(\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

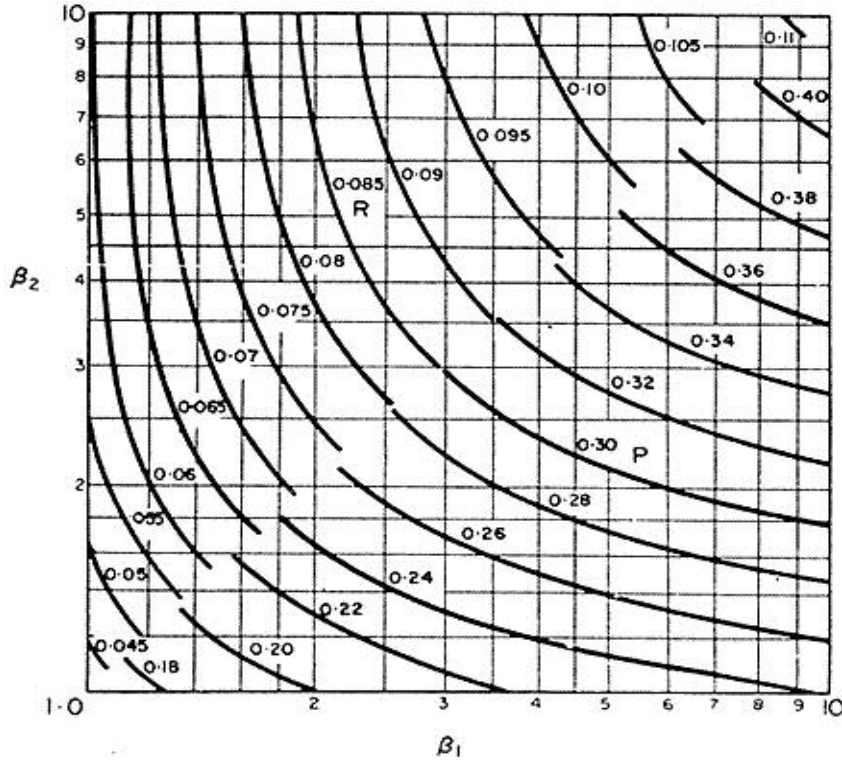
$$m = \frac{1}{3} \left\{ \beta_1 + \beta_2 + 1 + \left[(\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.12)$$

$$n = \frac{1}{3} \left\{ \beta_1 + \beta_2 + 1 - \left[(\beta_1 - \beta_2)(\beta_1 - 1) + (\beta_2 - 1)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2.13)$$

Tablo 2.1: Geometrik Şekiller İçin P ve R Sabitleri (ASHRAE,1993; Earle ve Earle, 2004)

Şekil	P	R
Levha	1/2	1/8
Silindir	1/4	1/16
Küre ve küp	1/6	1/24
Dikdörtgenler Prizması ¹	Şekil 2.3'e bakınız	Şekil 2.3'e bakınız

¹Şekil 2.3'de β_1 ve β_2 iki uzun kenarın en kısa kenara oranıdır ve hangi sıra ile alındığı fark etmemektedir (Earle ve Earle, 2004).



Şekil 2.3: Dikdörtgenler Prizması İçin P ve R Değerleri (ASHRAE, 1993; Earle ve Earle, 2004).

P ve R geometrik faktörleri, şeklin donma süresi üzerindeki etkisini göstermektedir. Plank'ın şekil faktörleri, d kalınlığında sonsuz levha, d çaplı sonsuz silindir ve d çapında küre aynı koşullar altında dondurulduğunda donma süreleri arasında 6:3:2 oran olduğunu belirtmektedir. Buna göre silindir, levhanın yarı süresinde, küre ise levhanın 1/3 süresinde donmaktadır (Becker ve Fricke, 1999).

Çeşitli araştırmacılar Plank yönteminin gıdaların donma sürelerini doğru olarak tahmin etmediğini belirtmişlerdir. Buna sebep olarak Plank yönteminin gıdanın donma sürecinin sabit sıcaklıkta gerçekleştiğini, donmuş gıdanın ısı iletkenliğinin sabit olduğunu kabul etmesi gösterilmektedir (Becker ve Fricke, 1999). Gıdanın faz değişimi bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği için ısı iletkenlik katsayısı da donma sırasında önemli ölçüde değişmektedir. Plank eşitliğinin kullanımının bir diğer sınırlaması ise donma noktası öncesindeki görünür ısı iletkenliğinin ihmal etmesidir (Becker ve Fricke, 1999; Hung ve Thompson, 1983). Plank eşitliğinin türetilmesi sırasında yapılan bu kabuller donma süresinin olması gerekenden daha kısa olarak hesaplanmasına sebep olmaktadır (Earle ve Earle, 2004; Hung ve Thompson, 1983). Buna rağmen Plank yöntemi gıdanın donma süresinin tahmin edilmesinde basit bir model olma avantajına sahiptir (Becker ve Fricke, 1999).

2.2.1.2 Plank eşitliğinin modifikasyonlarıyla elde edilen eşitlikler

Araştırmacılar Plank eşitliğinden yararlanarak, donma öncesi ve sonrası soğuma süreçlerini, sabit olmayan ısı özellikleri ve belli sıcaklık aralığında gerçekleşen faz değişim durumunu hesaba katan geliştirilmiş yarı-analitik/ampirik soğuma ve dondurma süresi tahmin etme yöntemleri geliştirme üzerine odaklanmış ve çıkış noktası Plank eşitliği olan birçok eşitlik geliştirmişlerdir (Becker ve Fricke, 1999).

Rjutov, 1936 yılında Plank eşitliğinin atası olarak sayılabilecek (2.14) numaralı eşitliği geliştirdikten sonra levha şeklindeki et bloğu ile ön soğuma süresinin tahmini için Plank yöntemine göre hesaplanan donma süresine bağlı olarak deneysel bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntının Plank tarafından 1941 yılında düzenlenmesi ve Rjutov'un son soğuma süresini Fourier serilerinin sıcaklık profil değişimini temel alan geliştirdikleri formülle beraber toplam donma süresi (2.15) numaralı eşitlik halini almıştır (López-Leiva ve Hallström, 2003).

$$t = \frac{\Delta H_d}{(T_d - T_c)} \frac{V}{A} \left(\frac{1}{h} + \frac{d}{4k_d} \right) \quad (2.14)$$

$$t = t_{plank} [1 + R_j(T_i - T_d)] + 0.266 \left(\frac{d^2}{\alpha} \right) \frac{1}{Bi^{0.05}} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) \left(\ln \frac{T_d - T_c}{T_s - T_c} - 0.0913 \right) \quad (2.15)$$

Burada, R_j Rjutov katsayısıdır ve Rjutov et için bu katsayıyı 0.0053 olarak bulmuştur. López-Leiva ve Hallström ayrıca Hung ve Thompson'ın 1983 ve Pham ve Willix'in 1990 yıllarında çalışmalarından aldıkları verilerle eşitlikteki Rjutov katsayısını, Tylose (Karlsruhe deney materyali), yağsız sığır eti, patates püresi, sazan balığı ve kıyma için 0.026 olarak bulmuştur (López-Leiva ve Hallström, 2003).

Rjutov'un et için bulduğu 0.0053 ile López-Leiva ve Hallström'un veri yaklaştırma ile hesapladığı 0.026 değerleri arasındaki farkın sebebi Rjutov'un bu katsayıyı yalnızca ön soğuma deneyleri ile elde ederken López-Leiva ve Hallström'un ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma olmak üzere tüm prosesi dikkate almasından kaynaklanmaktadır (López-Leiva ve Hallström, 2003).

Nagaoka ve diğ. 1955 yılında taze balığın dondurulması çalışmalarında Plank eşitliğini (2.16) numaralı eşitlikte gösterildiği gibi düzenlemişlerdir. Geliştirdikleri

eşitlikte donma başlangıç noktası altında ve üstündeki duyulur ısı hesaba katılmış ancak tüm gizli ısının sabit bir sıcaklıkta (T_d) uzaklaştığı kabulü yapılmıştır (Heldman ve Singh, 1989).

$$t = \frac{\Delta H_d'}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.16)$$

Eşitlikte;

$$\Delta H_d' = [1 + 0.00445(T_i - T_d)] [C_s(T_i - T_d) + L + C_d(T_d - T_s)] \quad (2.17)$$

Levy 1958 yılında Nagaoka'nın çalışmasını baz alarak toplam donma süresi için (2.18) numaralı eşitliği oluşturmuştur. Eşitlikte ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma aşamaları toplam entalpi kullanılarak hesaplanan donma süresi içine dahil edilmiştir (López-Leiva ve Hallström, 2003).

$$t = \frac{\Delta H_p}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) [1 + 0.008(T_i - T_d)] \quad (2.18)$$

Cowell, Plank eşitliğini kullanarak 1969 yılında aşağıdaki boyutsuz eşitliği geliştirmiştir (López-Leiva ve Hallström, 2003).

$$\frac{Fo}{Ko} = D \cdot \left[\frac{1}{Bi} + G \right] \quad (2.19)$$

Bäckström 1970 yılında Plank Eşitliği'ni modifiye ederek toplam donma süresini eşitlik (2.20) ile gösterildiği şekilde geliştirmiştir (López-Leiva ve Hallström, 2003).

$$t = t_{Plank} \cdot \left[1 + 0.017 \cdot (T_f - T_m) \cdot \ln \frac{(T_i - T_m)}{T - T_m} \right] \quad (2.20)$$

Mellor 1976 yılında Plank eşitliğinde yer alan L hacimsel gizli ısı yerine tanımladığı entalpi değişimi ile ön soğuma ve son soğuma periyotlarını da içeren (2.21) numaralı donma süresi eşitliğini geliştirmiştir. Mellor eşitliği gizli ısının tek bir sıcaklıkta uzaklaştırıldığını, faz değişiminin tek sıcaklıkta gerçekleştiği kabulünü yapmıştır (LeBlanc ve diğ., 1990).

$$t = [0.5C_s(T_i - T_d) + L + 0.5C_d(T_d - T_s)] \cdot \frac{1}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) \quad (2.21)$$

Cleland ve Earle (1977, 1979a, 1979b), görünür ısıнын uzaklaştırılmasını, ilk donma sıcaklığı öncesini, sonrasını ve donma sırasındaki sıcaklık değişimini dikkate alarak Plank'ın oluşturduğu modeli modifiye etmişlerdir. Sonsuz levha, sonsuz silindir, küre ve dikdörtgenler prizması için geometrik faktörlerin tahmin edilmesi için regresyon eşitlikleri geliştirilmiştir. Bu regresyon eşitliklerinde boyutsuz Biot, Plank ve Stefan sayıları kullanılarak sırasıyla yüzey ısı transferi, ön soğuma ve son soğuma safhalarının donma zamanı üzerindeki etkileri dikkate alınmıştır (Cleland ve Earle, 1979b).

Cleland ve Earle'ün yönteminde gıda donma süresi Plank eşitliğinin modifiye edilmiş versiyonuyla hesaplanmıştır (2.24 numaralı eşitlik). Plank'ın orijinal geometrik faktörleri P ve R Tablo 2.2'de verilen modifiye edilmiş P_2 ve R_2 geometrik faktörleri ile değiştirilmiştir. Ayrıca Plank eşitliğindeki gizli ısı L , gıdanın T_d donma sıcaklığı ile -10°C olarak kabul edilen son merkez sıcaklığı arasındaki hacimsel entalpi değişimi ΔH_{10} ile değiştirilmiştir. P ve R geometrik faktörleri yerine kullanılması önerilen P_2 ve R_2 geometrik faktörleri, ΔH_{10} entalpi değişim değeri kullanılarak hesaplanan Plank ve Stefan sayılarının fonksiyonudur, (2.22, 2.23) numaralı eşitlik ve Tablo 2.2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlikte yer alan P ve R Plank eşitliğinde kullanılan geometrik faktörlerdir. Sonuç olarak modifiye Plank eşitliği (2.24) numaralı eşitlikteki halini almıştır.

$$P_1 = P \left[1.026 + 0.5808Pk + Ste \left(0.2296Pk + \frac{0.0182}{Bi} + 0.1050 \right) \right] \quad (2.22)$$

$$R_1 = R [1.202 + Ste(3.410Pk + 0.7336)] \quad (2.23)$$

Tablo 2.2: P_2 ve R_2 Değerleri İçin Eşitlikler (Cleland ve Earle, 1979b)

Şekil	P_2 ve R_2 Eşitlikleri
Sonsuz Levha	$P_2 = P_1$ $R_2 = R_1$
Sonsuz Silindir ve küre	$P_2 = P_1 + 0.1278P$ $R_2 = R_1 - 0.1888R$
Dikdörtgenler prizması	$P_2 = P_1 + P[0.1136 + Ste(5.766P - 1.242)]$ $R_2 = R_1 + R[0.7344 + Ste(49.89R - 2.900)]$

$$t = \frac{\Delta H_{10}}{(T_d - T_c)} \left(\frac{P_2 d}{h} + \frac{R_2 d^2}{k_d} \right) \quad (2.24)$$

Eşitliğin uygulama aralığı şu şekilde belirtilmektedir:

$$0.155 \leq Ste \leq 0.345$$

$$0 \leq Pk \leq 0.55$$

$$0.2 \leq Bi \leq 20 \text{ Levha için (Cleland ve Earle, 1977)}$$

$$0.5 \leq Bi \leq 4.5 \text{ Silindir ve küre için (Cleland ve Earle, 1979a)}$$

$$0.5 \leq Bi \leq 22 \text{ Dikdörtgenler prizması için (Cleland ve Earle, 1979b)}$$

$$1 \leq \beta_1 \leq 4 \text{ Dikdörtgenler prizması için (Cleland ve Earle 1979b)}$$

$$1 \leq \beta_2 \leq 4 \text{ Dikdörtgenler prizması için (Cleland ve Earle 1979b)}$$

Eşitlik gıda dondurulması prosesindeki pratik uygulamaların çoğunu kapsayan bu aralıklar dışında da kullanılabilir, ancak aralıklar dışında doğruluğu test edilmemiştir (Cleland ve Earle, 1977, 1979a, 1979b).

Cleland ve Earle 1984 yılındaki çalışmalarında, (2.24) numaralı eşitliğin son merkez sıcaklığının -10°C 'den farklı olduğu durumlarda uygulanamamasından ötürü son merkez sıcaklığının -10°C 'den farklı olduğu durumlar için aşağıdaki formülü geliştirmiştir (Becker ve Fricke, 1999).

$$t = \frac{\Delta H_{10}}{(T_d - T_c)E} \left(\frac{P_2 d}{h} + \frac{R_2 d^2}{k_d} \right) \left[1 - \frac{1.65 Ste}{k_d} \ln \left(\frac{T_s - T_c}{T_{ref} - T_c} \right) \right] \quad (2.25)$$

Hung ve Thompson (1983) sonsuz levha için Plank eşitliğinden yola çıkarak (30) numaralı eşitlikte gösterildiği gibi alternatif bir donma süresi tahmin yöntemi geliştirmiştir. Geliştirdikleri eşitlikte hacimsel entalpi değişimi ΔH_{18} ve gıdanın ilk sıcaklığı ile donma ortamının ortalama ağırlıklı sıcaklık farkı dâhil edilmiştir. Bu ağırlıklı ortalama sıcaklık farkı ΔT , (2.26) numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde formüle edilmiştir.

$$\Delta T = (T_d - T_c) + \frac{(T_i - T_d)^2 \frac{C_s}{2} - (T_d - T_s)^2 \frac{C_d}{2}}{\Delta H_{18}} \quad (2.26)$$

$$U = \Delta T / (T_d - T_c) \quad (2.27)$$

$$P_3 = 0.7306 - 1.083 Pk + Ste \left(15.40U - 15.43 + 0.01329 \frac{Ste}{Bi} \right) \quad (2.28)$$

$$R_3 = 0.2079 - 0.2656U \cdot Ste \quad (2.29)$$

$$t = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{P_3 d}{h} + \frac{R_3 d^2}{k_d} \right) \quad (2.30)$$

Cleland ve Earle (1984) Hung ve Thompson modeline kendi buldukları düzeltme faktörünün eklenmesi ile son sıcaklığın -18°C dışında bir sıcaklık olması durumunda da modelin doğruluğunun arttığını göstermiştir. Hung ve Thompson modelinin düzeltme faktörü ile oluşturulan son hali (2.31) numaralı eşitlikte gösterilmektedir.

$$t = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{P_3 d}{h} + \frac{R_3 d^2}{k_d} \right) \left[1 - \frac{1.65 Ste}{k_d} \ln \left(\frac{T_s - T_c}{T_{ref} - T_c} \right) \right] \quad (2.31)$$

Eşitlikte T_{ref} -18°C , T_s son merkez sıcaklığı ve ΔH_{18} ilk sıcaklık T_i ve -18°C arasındaki hacimsel entalpi değişimini ifade eder. Ağırlıklı ortalama sıcaklık farkı ΔT , Plank sayısı ve Stefan sayısı, ΔH_{18} kullanılarak hesaplanmaktadır.

Pham (1984) donma süresinin hesaplanmasında görünür ısı etkisini, ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma süreleri için ayrı ayrı eşitlikler geliştirerek Plank eşitliğine benzer bir yöntem oluşturmuştur. Ön soğuma ve son soğuma eşitlikleri Newton'un soğuma kanunun ve faz değişim süresini hesaplayan eşitlik Plank eşitliğinin modifiye edilmesiyle elde edilmiştir. Ek olarak Pham, donma sürecinin tek bir sıcaklıkta değil de belirli sıcaklık aralığında gerçekleştiğini hesaba katmak için gıdanın ilk donma sıcaklığının 1.5°C altında kabul ettiği "ortalama donma sıcaklığı" kullanımını önermektedir. Pham'ın donma süresi tahmin yöntemi, gıdanın hacim, yüzey alanı gibi veriler kullanılarak hesaplama yapmayı içerdiğinden herhangi bir şekle sahip gıda maddesine uygulanabilmektedir. Yöntem (2.32) numaralı eşitlikle ifade edilmektedir.

$$t_i = \frac{Q_i}{hA \Delta T_{oi}} \left(1 + \frac{Bi_i}{k_i} \right) \quad ; i = 1, 2, 3 \quad (2.32)$$

Eşitlikte yer alan t_1 ön soğuma, t_2 faz değişim ve t_3 son soğuma sürelerini ifade etmektedir, diğer değişkenler Tablo 2.3’de gösterilmektedir.

Tablo 2.3: Donma Süresi Tahmin Yöntemindeki Değişken Tanımlamaları (Pham, 1984)

İşlem	Değişkenler
Ön Soğuma $i = 1$ $k = 6$ $Q_1 = C_s (T_i - T_{od})V$ $Bi_1 = (Bi_s + Bi_d)/2$ $\Delta T_{o1} = \frac{(T_i - T_c) - (T_{od} - T_c)}{\ln \left[\frac{T_i - T_c}{T_{od} - T_c} \right]}$	$t_1 = \frac{Q_1}{hA \Delta T_{o1}} \left(1 + \frac{Bi_1}{6} \right)$
Faz Değişimi $i = 2$ $k = 4$ $Q_2 = L$ $Bi_2 = Bi_d$	$t_2 = \frac{Q_2}{hA (T_{od} - T_c)} \left(1 + \frac{Bi_2}{4} \right)$
Son Soğuma $i = 3$ $k = 6$ $Q_3 = C_d (T_{od} - T_{os})V$ $Bi_3 = Bi_d$ $T_{os} = T_s - \frac{T_s - T_c}{2 + \frac{4}{Bi_d}}$ $\Delta T_{o3} = \frac{(T_{od} - T_c) - (T_{os} - T_c)}{\ln \left[\frac{T_{od} - T_c}{T_{os} - T_c} \right]}$	$t_3 = \frac{Q_3}{hA \Delta T_{o3}} \left(1 + \frac{Bi_3}{6} \right)$

Uluslar arası Soğutma Enstitüsü 1986 yılında Plank eşitliğinde yer alan L hacimsel gizli ısı yerine ilk donma sıcaklığından son soğutulan sıcaklığa kadar olan entalpi değişiminin kullanıldığı (2.33) numaraları eşitliği önermiştir. (LeBlanc ve diğ., 1990).

$$t = \frac{\Delta H_{d-s}}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) = \frac{L + C_d (T_d - T_c)}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) \quad (2.33)$$

Pham 1986 yılında, 1984 yılında geliştirdiği donma süresi tahmin yöntemini, ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma periyotlarını içeren tek bir eşitlik ile ifade ederek basitleştirmiştir (2.34 numaralı eşitlik).

$$t = \frac{V}{hA} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(1 + \frac{Bi_d}{4} \right) \quad (2.34)$$

$$T_{od} = 1.8 + 0.263T_s + 0.105T_c \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= C_s (T_i - T_{od}) \\ \Delta H_2 &= L + C_d (T_{od} - T_s) \end{aligned} \quad (2.36), (2.37)$$

$$\Delta T_1 = \frac{T_i + T_{od}}{2} - T_c \quad (2.38)$$

$$\Delta T_2 = T_{od} - T_c \quad (2.39)$$

Eşitliklerde kullanılan C_s ve C_d sırasıyla donma noktasının üstünde ve altında hacimsel özgül ısıyı, T_i gıdanın ilk sıcaklığını, L hacimsel gizli ısıyı ve V gıda maddesinin hacmini ifade etmektedir. Pham (1986) var olan deneysel sonuçlara eğri yaklaştırma yöntemini uygulayarak ortalama donma sıcaklığını T_{od} için (2.34) numaralı eşitliği geliştirmiştir. T_s ısı merkezini son sıcaklığı, T_c donma ortam sıcaklığıdır.

Lacroix ve Castaigne 1987 yılındaki çalışmasında toplam donma süresini geliştirdikleri eşitlikte, ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma sürelerinin toplamı olarak göstermiştir. Ön soğuma süresini $X/l = 0.5$ noktasının ilk sıcaklıktan gıdanın ilk donma sıcaklığına kadar geçmesi gereken süre olarak, son soğuma süresini ise ürünün merkezinin donmaya başladığı sıcaklıktan gelmesi istenen son sıcaklığa

kadar geçmesi gereken süre olarak tanımlamıştır. Levha şeklindeki gıdalar için Lacroix ve Castaigne $X/l = 0.4$ kullanılmasını önermektedir (Lacroix ve Castaigne, 1987a, 1987b). Lacroix ve Castaigne'nin araştırmasında (Lacroix ve Castaigne, 1988) belirtilen Ball ve Olson; Pflug ve diğ.'in çalışması, gıda maddesini soğutmak için geçen sürenin (2.40) numaralı eşitlikte gösterildiği şekliyle hesaplanabileceğini bildirmiştir. Lacroix ve Castaigne, ön soğuma ve son soğuma sürelerini bu eşitlikten yola çıkarak benzer olarak (2.41) ve (2.42) numaralı eşitliklerle ifade etmektedir (Lacroix ve Castaigne, 1987a, 1988).

$$t = f \log \left[j \frac{T_c - T_i}{T_c - T} \right] \quad (2.40)$$

Ön soğuma için:

$$t_1 = f_1 \log \left[j_1 \frac{T_c - T_i}{T_c - T_d} \right] \quad (2.41)$$

Son soğuma için:

$$t_3 = f_3 \log \left[j_3 \frac{T_c - T_d}{T_c - T_s} \right] \quad (2.42)$$

Tablo 2.4, Tablo 2.5 ve Tablo 2.6'da sonsuz levha, sonsuz silindir ve küre için f ve j değerlerinin hesaplanması için kullanılan eşitlikler verilmektedir (Lacroix ve Castaigne, 1987a).

f_1 ve j_1 faktörleri ortalama ısı iletkenlik katsayısı, k_r kullanılarak hesaplanan Biot sayısı, Bi_r , kullanılarak bulunmaktadır. Ortalama ısı iletkenlik katsayısı, k_r ; donmamış gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_s ile $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_c 'nin ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Benzer olarak f_1 hesaplamasında ortalama ısıl difüzivite katsayısı α_r kullanılmaktadır. Ortalama ısıl difüzivite katsayısı α_r , donmamış gıdanın ısıl difüzivite katsayısı α_s ile $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı α_c 'nin ortalaması olarak tanımlanmaktadır (Lacroix ve Castaigne, 1987a).

f_3 ve j_3 faktörleri $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_c kullanılarak bulunan Biot sayısı, Bi_c ile hesaplanmaktadır. Benzer olarak f_3 hesaplanırken $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, α_c kullanılmaktadır (Lacroix ve Castaigne, 1987a).

Lacroix ve Castaigne (1987a, 1987b, 1988) faz değişim süresi t_2 'yi Plank eşitliği ile modellemiştir:

$$t_2 = \frac{Ld^2}{(T_d - T_c)k_c} \left(\frac{P_4}{2Bi_c} + R_4 \right) \quad (2.43)$$

Tablo 2.4: Sonsuz Düzlemin Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri (Lacroix ve Castaigne, 1987a)

Biot sayı aralığı	f ve j Faktörleri için eşitlikler
$Bi \leq 0.1$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{Bi}$ $j_1 = j_3 = 1.0$
$0.1 < Bi \leq 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{u^2}$ $j_3 = \frac{2 \sin u}{u + \sin u \cos u}; j_1 = j_3 \cdot \cos(u/2)$ $u = 0.860972 + 0.312133 \ln(Bi) + 0.007986 [\ln(Bi)]^2 - 0.016192 [\ln(Bi)]^3 - 0.001190 [\ln(Bi)]^4 + 0.000581 [\ln(Bi)]^5$
$Bi > 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = 0.9332$ $j_3 = 1.273; j_1 = 0.900$

Tablo 2.5: Sonsuz Silindir Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri (Lacroix ve Castaigne, 1987a)

Biot sayı aralığı	f ve j Faktörleri için eşitlikler
$Bi \leq 0.1$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{2Bi}$ $j_3 = j_1 = 1.0$
$0.1 < Bi \leq 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{v^2}$ $j_3 = \frac{2J_1(v)}{v[J_0^2(v) - J_1^2(v)]}; j_1 = j_3 \cdot J_0(V/2)$ $v = 1.257493 + 0.48794 \ln(Bi) + 0.025322[\ln(Bi)]^2 - 0.026568[\ln(Bi)]^3$ $- 0.002888[\ln(Bi)]^4 + 0.001078[\ln(Bi)]^5$ $J_0(x) = 1 - (x/2)^2 + 0.25 \cdot (x/2)^4 - 0.02778 \cdot (x/2)^6 + 0.00174 \cdot (x/2)^8$ $J_1(x) = (x/2) - 0.5 \cdot (x/2)^3 + 0.08333 \cdot (x/2)^5 - 0.00693 \cdot (x/2)^7 + 0.00035 \cdot (x/2)^9$ $J_0(v)$ ve $J_1(v)$ sırasıyla sıfır ve birinci dereceden Bessel Fonksiyonlarıdır.
$Bi > 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = 0.3982$ $j_3 = 1.6015; j_1 = 1.0730$

Tablo 2.6: Küre Isıl Merkez Sıcaklığı İçin f ve j Tahmin Eşitlikleri (Lacroix ve Castaigne, 1987a)

Biot sayı aralığı	f ve j Faktörleri için eşitlikler
$Bi \leq 0.1$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{3Bi}$ $j_3 = j_1 = 1.0$
$0.1 < Bi \leq 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{w^2}$ $j_3 = \frac{2(\sin w - w \cos w)}{w - \sin w \cos w}; j_1 = j_3 \cdot \frac{\sin(w/2)}{w/2}$ $w = 1.573729 + 0.642906 \ln(Bi) + 0.047859[\ln(Bi)]^2 - 0.03553[\ln(Bi)]^3$ $- 0.004907[\ln(Bi)]^4 + 0.001563[\ln(Bi)]^5$
$Bi > 100$	$\frac{f\alpha}{l^2} = 0.2333$ $j_3 = 2.0; j_1 = 1.2732$

Pratikte β veya β_2 'nin 10'dan büyük olması o boyut için sonsuz olarak kabul edilmesine neden olur (Lacroix ve Castaigne, 1987b).

Lacroix ve Castaigne dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdaların donma süresini hesaplamak için f ve j değerlerinin, dikdörtgenler prizmasının her bir kenarı için o kenar kalınlığında bir sonsuz levha olarak kabul edilerek hesaplama yapılmasını ve oradan aşağıda belirtildiği gibi f ve j değerlerine geçilmesini önermektedir (Lacroix ve Castaigne, 1977b):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_{k1}} + \frac{1}{f_{k2}} + \frac{1}{f_{k3}} \quad (2.44)$$

$$j = j_{k1} \cdot j_{k2} \cdot j_{k3} \quad (2.45)$$

f_{k1} , f_{k2} , f_{k3} ; k_1 , k_2 , k_3 kenar uzunluklarına sahip dikdörtgenler prizmasının bu kalınlıklara sahip sonsuz levha şeklinde kabul edilerek yapılan hesaplamalar sonucu bulunan değerlerdir. Aynı şekilde j_{k1} , j_{k2} , j_{k3} ; k_1 , k_2 , k_3 kenar uzunluklarına sahip dikdörtgenler prizmasının bu kalınlıklara sahip sonsuz levha şeklinde kabul edilerek bulunmaktadır (Lacroix ve Castaigne, 1987b).

Lacroix ve Castaigne sonlu silindir şeklindeki gıdaların donma süresini hesaplamak için f ve j değerlerinin, sonlu silindirin yüksekliği kadar kalınlığa sahip sonsuz levha ve sonlu silindirin çapı kadar çapı olan sonsuz bir silindir kabulü yapılarak hesaplama yapılmasını ve oradan aşağıda belirtildiği gibi f ve j değerlerine geçilmesini önermektedir (Lacroix ve Castaigne, 1977b):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_y} + \frac{1}{f_c} \quad (2.46)$$

$$j = j_y \cdot j_c \quad (2.47)$$

f_y ve f_c sırasıyla; sonlu silindirin yüksekliğinde kalınlığa sahip sonsuz levha için ve sonlu silindirin çapı uzunluğunda çapı olan sonsuz silindir için hesaplanan değerlerdir. Aynı şekilde j_y ve j_c değerleri hesaplanmaktadır (Lacroix ve Castaigne, 1987b).

Lacroix ve Castaigne (1987a, 1987b) P ve R olan Plank geometrik faktörlerinde düzeltmeler yapılarak tahmin edilen donma süreleri ile deneysel olarak hesaplanmış

verilerin birbirlerine daha fazla uyum göstereceğini belirtmiştir. Regresyon analizi kullanarak hesapladıkları P_4 ve R_4 geometrik faktörleri Tablo 2.7’de belirtildiği gibidir.

Tablo 2.7: Geometrik Şekiller İçin P_4 ve R_4 Sabitleri (Lacroix ve Castaigne, 1987a)

Şekil	P_4	R_4
Sonsuz levha	0.51233	0.15396
Sonsuz silindir	0.27553	0.07212
Küre	0.19665	0.03939

Lacroix ve Castaigne 1987a yılındaki çalışmalarında geliştirdikleri P_4 ve R_4 şekil faktörleri yerine, yüzey taşınım katsayısı ve donma işleminin gerçekleştiği ortam sıcaklığının etkisini donma süresi hesabına katmayı amaçlayarak boyutsuz Bi_c ve Ste sayılarını içeren P_5 ve R_5 şekil faktörünü aşağıdaki formüllerde gösterildiği gibi tanımlamıştır:

$$P_5 = P \cdot \left[-0.02175 \cdot \frac{1}{Bi_c} - 0.01956 \cdot \frac{1}{Ste} - 1.69657 \right] \quad (2.48)$$

$$R_5 = R \cdot \left[5.57519 \cdot \frac{1}{Bi_c} + 0.02932 \cdot \frac{1}{Ste} + 1.58247 \right] \quad (2.49)$$

López-Leiva ve Hallström 2003 yılındaki çalışmalarında, Plank Eşitliği’nde yer alan P ve R geometrik şekil faktörlerinin oranının, P/R , düzgün şekilli gıdalar ile düzgün olmayan şekilli gıdalar için 3.5 ile 4 (düzgün şekiller için) arasında değiştiğini göstermektedir. Çalışmalarında ortalama P/R oranı olarak 3.7’yi kabul edip $R=P/3.7$ ve $P=V/Ad$ tanımını kullanarak (2.50) ve (2.51) numaralı eşitliği geliştirmişlerdir (López-Leiva ve Hallström, 2003).

$$t = \frac{Ld}{h(T_d - T_c)} P \left(1 + \frac{Bi}{3.7} \right) \quad (2.50)$$

$$t = \frac{LV}{h(T_d - T_c)A} \left(1 + \frac{Bi}{3.7} \right) \quad (2.51)$$

2.2.1.3 Deneysel yöntemler kullanılarak elde edilmiş eşitlikler

Becker ve Fricke 1999 yılındaki çalışmalarında, gıdaların donma zamanının tahmin edilmesi amacıyla birçok deneysel yöntem geliştirildiğini ancak bu yöntemleri çoğunun yalnızca bazı gıdalar veya bazı şekiller için uygulanabilir olduğunu veya kullanımlarının zor ve pratik olmadığını belirtmiştir. Bu yöntemlerden Salvadori ve Mascheroni tarafından geliştirilen yöntem, istisnai olarak değişik şekillerdeki çeşitli gıdalarda kullanılabilmektedir (Salvadori ve Mascheroni, 1991).

Salvadori ve Macheroni tarafından geliştirilen bu yöntem, pratikteki endüstriyel dondurma koşulları için uygulanabilmektedir. Çalışma, gıda içerisindeki sıcaklık değişiminin boyutsuz X değişkeninin bir fonksiyonu olarak gösterildiği genelleştirilmiş bir grafiği temel almaktadır (Salvadori ve diğ., 1987). Ayrıca hesaplamalarda gıdanın donmamış haldeki özelliklerini dikkate almaktadır (Salvadori ve Mascheroni, 1996).

Boyutsuz donma süresi parametresi X , süre, proses parametreleri, gıdanın termofiziksel özellikleri ve boyutlarının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Salvadori ve Mascheroni, 1991):

$$X = \frac{Fo_s \left[\frac{T_c - T_d}{T_d} \right]^m}{\left(\frac{1}{Bi_{ls}} \right) + c \left[\frac{T_d - T_i}{T_d} \right]^n} \quad (2.52)$$

Eşitlikteki m , n ve c gıdanın şekline bağlı olarak değişen deneysel katsayılardır ve Tablo 2.8’de değerleri verilmektedir.

Salvadori ve Macheroni 1991 yılındaki çalışmasında, boyutsuz donma zamanı parametresi X ile gıdanın termal merkezindeki son sıcaklık arasında lineer bir ilişki kurmuştur (Salvadori ve Mascheroni, 1991). Bu ilişki (2.53) numaralı eşitlikte görülmektedir.

$$X = aT_s + b \quad (2.53)$$

Eşitlikteki a ve b katsayıları aynı şekilde gıdanın şekline bağlı olarak değişmektedir ve Tablo 2.8’de değerleri verilmektedir. (2.52) ve (2.53) numaralı eşitliklerin birleştirilmesiyle eşitlik aşağıdaki halini almaktadır:

$$t = \frac{l^2}{\alpha_s} (aT_s + b) \left(\frac{1}{Bi_s} + c \right) (1 + T_i)^n (-T_c - 1)^{-m} \quad (2.54)$$

Salvadori ve Mascheroni, (2.52), (2.53) ve (2.54) numaralı eşitliklerin $-18 \leq T_s \leq -5^\circ\text{C}$ aralığında geçerli olduğunu belirtmiştir (Salvadori ve Mascheroni, 1991).

Tablo 2.8: Salvadori ve Mascheroni Donma Zamanı Tahmin Yönteminde Kullanılan Parametreler (Salvadori, 1994)

Şekil	a	b	c	m	n
Sonsuz levha	-1.272	65.489	0.184	1.070	0.096
Sonsuz silindir	-0.750	32.198	0.179	1.032	0.037
Küre	-0.439	24.804	0.167	1.078	0.073

2.2.2 Gıdalar için iki aşamalı donma zamanı tahmin yöntemleri

Çeşitli şekillerde gıda maddeleri endüstriyel olarak dondurulmaktadır. Çok boyutlu ve düzgün şekilli olmayan gıdaların donma sürelerinin belirlenebilmesi için Cleland ve Earle, basit şekiller için geliştirilmiş yöntemlerin şekil faktörleri vasıtasıyla donma süresini hesaplamak istediğimiz gıdalar için uyarlanmasını önermektedir (Cleland ve Earle, 1982).

Şekil faktörü EHTD ya da E , eşdeğer ısı transfer boyutu olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak herhangi bir şekle sahip gıda maddesinin donma süresi aşağıdaki eşitlik yordamıyla hesaplanabilmektedir (Cleland ve Earle, 1982).

$$t = \frac{t_{levha}}{E} \quad (2.55)$$

E parametresi, çok boyutlu gıda maddesinin tüm yüzeylerinden olan ısı transferinin toplam katkısını, aynı koşullarda, kısa kenara eşit uzunlukta, levha şeklindeki gıda maddesi ile karşılaştırmaktadır. Sonsuz düzlem plaka için $E = 1$, sonsuz silindir için $E = 2$ ve küre için $E = 3$ olup diğer şekillerdeki gıdalar için E değeri öncelikle

şekle ve daha az oranlarda proses koşullarına bağlı olmak üzere sonsuz düzlem şeklindeki plaka ile küre arasında değişmektedir (Cleland ve Earle, 1982).

Şekil faktörü, E , hesaplanmasında Cleland ve Earle iki yol önermektedir:

1- Şekil faktörü, donma süresi deneysel verileri (2.55) numaralı eşitlik kullanılarak yapılan regresyon ile elde edilmiştir. E parametresi; β_1 , β_2 ve Bi sayılarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. E faktörünün genel formu (Cleland ve Earle, 1982):

$$E = 1 + W_1 + W_2 \quad (2.56)$$

İki boyutlu paketler veya sonsuz dikdörtgen çubuklar için eşitlik:

$$E = 1 + W_1 \quad (2.57)$$

Ve sonlu silindirler için eşitlik aşağıdaki formu alır:

$$E = 2 + W_2 \quad (2.58)$$

W_1 ve W_2 fonksiyonları boyut oranları olan β_1 , β_2 ve Biot sayısı Bi 'ye bağlıdır.

$$W_1 = \left(\frac{Bi}{Bi + 2} \right) \frac{5}{8\beta_1^3} + \frac{2}{(Bi + 2)} \frac{2}{\beta_1(\beta_1 + 1)} \quad (2.59)$$

$$W_2 = \left(\frac{Bi}{Bi + 2} \right) \frac{5}{8\beta_2^3} + \frac{2}{(Bi + 2)} \frac{2}{\beta_2(\beta_2 + 1)} \quad (2.60)$$

2- Cleland ve diğ. sonlu farklar sayısal yöntemini kullanarak elde ettiği sonuçları (2.55) numaralı eşitlikte kullanılarak deneysel bir eşitlik kurmuştur (Cleland ve diğ., 1987).

$$E = G_1 + G_2 E_1 + G_3 E_2 \quad (2.61)$$

G_1 , G_2 ve G_3 faktörleri Tablo 2.9'da görülebileceği gibi yalnızca geometriye bağlıdır. Ayrıca E_1 ve E_2 , Biot sayısı Bi ve boyut oranları olan β_1 , β_2 'nin fonksiyonudur (Cleland ve diğ., 1987).

$$E_1 = \frac{X \left(\frac{2.32}{\beta_1^{1.77}} \right)}{\beta_1} + \left[1 - X \left(\frac{2.32}{\beta_1^{1.77}} \right) \right] \frac{0.73}{\beta_1^{2.5}} \quad (2.62)$$

$$E_2 = \frac{X\left(\frac{2.32}{\beta_2^{1.77}}\right)}{\beta_2} + \left[1 - X\left(\frac{2.32}{\beta_2^{1.77}}\right)\right] \frac{0.50}{\beta_2^{3.69}} \quad (2.63)$$

$$X(x) = \frac{x}{(Bi^{1.34} + x)} \quad (2.64)$$

Tablo 2.9: Şekil Faktörü Hesaplamak İçin Geometrik Katsayılar (Cleland ve diğ., 1987)

Şekil	G ₁	G ₂	G ₃
Sonsuz levha	1	0	0
Sonsuz silindir	2	0	0
Küre	3	0	0
Sonlu silindir	2	0	1
Sonsuz çubuk	1	1	0
Dikdörtgenler prizması	1	1	1
İki boyutlu düzensiz şekiller	1	1	0
Üç boyutlu düzensiz şekiller	1	1	1

Ilıcalı ve diğ. 1999 yılındaki çalışmasında sonsuz silindir ve küre için şekil faktörlerini aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplamıştır.

$$E = 1.9621 - 0.0104T_s + 0.0015T_i + 0.0045T_c + \frac{0.0112}{Bi_s} \quad (2.65)$$

$$E = 2.8842 - 0.0271T_s + 0.00457T_i + 0.0113T_c + \frac{0.0341}{Bi_s} \quad (2.66)$$

Hossain ve diğerlerinin 1992 yılında eşleştirilmiş asimptotik yöntem ile geliştirdikleri şekil faktörü (Tablo 2.10) kolay olma avantajına sahipken düşük Biot sayıları ($Bi < 0.16$) için geçerlidir (Delgado ve Sun, 2001).

Tablo 2.10: Çok Boyutlu Düzenli Şekillerde E Hesaplanması İçin Asimptotik

Şekil	Geometrik faktör, E
Sonsuz dikdörtgen çubuk	$\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_1}\right) \cdot \left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{3 \left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right)} + \frac{(1 + \beta_1)}{3} \right]^{-1}$
Sonlu silindir (yükseklik > çap)	$\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{\beta_1}\right) \cdot \left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{6\beta_1 \left(2 + \frac{1}{\beta_1}\right)} + (3 + 18\beta_1 + 4\beta_1^2) \right]^{-1}$
Sonlu silindir (yükseklik < çap)	$\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_1}\right) \cdot \left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{6\beta_1 \left(1 + \frac{2}{\beta_1}\right)} + (4 + 18\beta_1 + 3\beta_1^2) \right]^{-1}$
Dikdörtgenler prizması	$\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right) \cdot \left[\frac{2}{Bi} + \frac{2}{3 \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)} + \frac{(1 + \beta_1 + \beta_2)}{3} \right]^{-1}$

2.3. JAVA

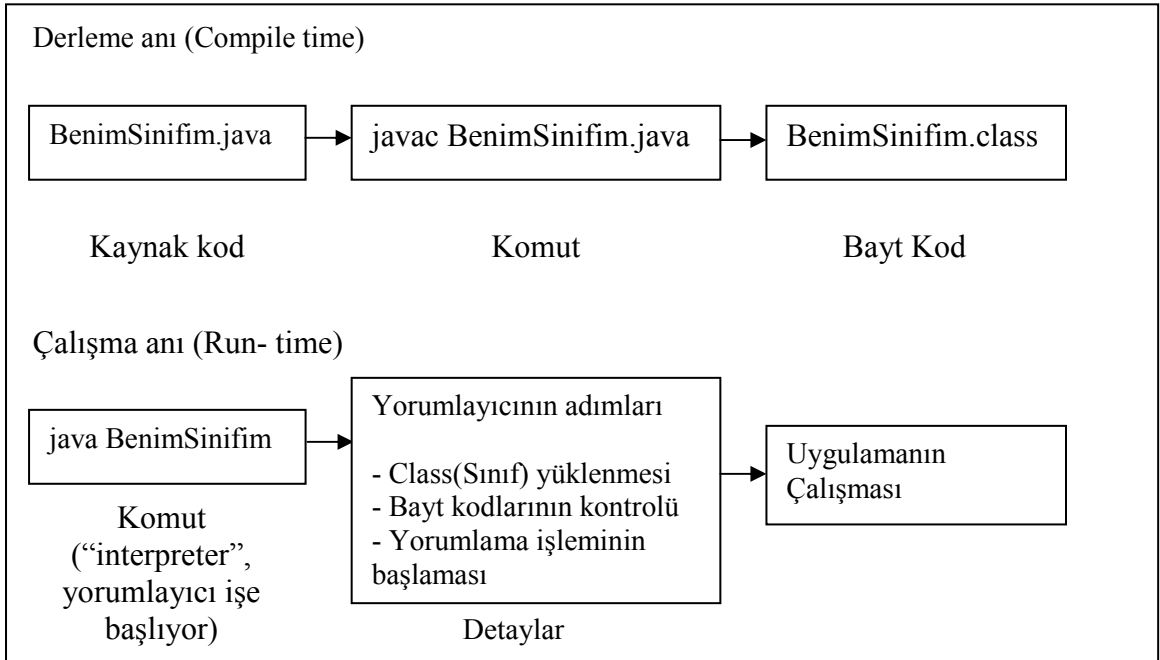
Java 1991 yılında, Sun Microsystem tarafından "Yeşil Proje" isimli proje kapsamında bir bilgisayar programlama dili olarak geliştirilmiştir. James Gosling liderliğinde, 13 kişiden oluşan “Yeşil Ekip”, dijital olarak kontrol edilen tüketici aygıtları ile bilgisayarların aynı teknolojiye birleşme eğilimi göstereceği konusunda fikir birliğine vararak “Oak” kod adı verilen, aygıttan bağımsız bir programlama dili geliştirerek kablolu dijital televizyonculuk sektörüne yönelik olarak ev elektronik aygıtları için etkileşimli bir el kumandası tasarlamıştır (Anon., 2007a).

Java teknolojisi, 1995’te Netscape Navigator Internet tarayıcısının Java’yı desteklemesi ile büyük bir atılım yapmıştır. Platformlar arasında taşınabilmesi, esnekliği ve güvenliği sayesinde ağlarda kendine yer edinen Java, internetten dizüstü bilgisayarlara, cep telefonlarından oyun konsollarına ve kredi kartlarına kadar çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmaktadır (Anon., 2007a).

Bir Java yazılımının geliştirilmesi esnasında yazılan Java kodu Java derleyicisi (javac) ile derlenir ve .class uzantılı, byte (sekizli) kod adı verilen bir tür makine kodu oluşur (Altıntaş, 2003). Java'nın platform bağımsızlığını sağlayan byte kodlar ("byte code"), "Java Virtual Machine" (Java Sanal Makinesi) tarafından adım adım işletilerek çalıştırılır (Akın, 1998).

Java Sanal Makinesi donanımdan bağımsız yazılım geliştirme ihtiyacına cevap vermek amacıyla geliştirilmiş bir teknolojidir. Sanal makine işletim sisteminin en tepesinde bulunur. Bu sayede yazılmış Java uygulamaları değişik işletim sistemlerinde, herhangi bir değişiklik yapılmadan çalışabilir. Bu şekilde Java programlama dilinin felsefesi olan "Bir kere yaz her yerde çalıştır" sözü gerçekleştirilmiştir (Altıntaş, 2003).

Java nesneye yönelik bir dil olduğundan tüm yazılım sınıflar ve nesneler üzerinden yürütülür. Çalıştırılabilir Java kodunun her satırı mutlaka bir sınıf tanımına aittir. Java temsil edeceği her şey (düğme, applet, URL, dosya ve hatta sınıfların kendisi) için sınıfları kullanır. Sınıflar uygulamadaki nesnelerin tanımlandığı kod parçalarıdır. Java'da her bir sınıf .java uzantılı, aynı adlı bir dosya içerisinde yer alır (Akın, 1998).



Şekil 2.4: Java Kaynak Kodlarının Çalışma Evreleri (Altıntaş, 2003).

Yazılan Java kaynak kodlarının javac komutu ile derlenmesiyle (“compile”) byte koduna çevirilen kaynak kodu Java Sanal Makinesi tarafından yorumlanarak çalıştırılır. Java kaynak kodu içerisinde belirttiğimiz her sınıf (“class”) için fiziksel olarak bir class dosyası oluşturulur. Java’nın kaynak kodundan, çalışmasına kadar olan evreleri Şekil 2.4’de gösterilmektedir (Altıntaş, 2003).

Applet, Java programlama dili kullanılarak yazılan ve HTML sayfası içerisine yerleştirilip web tarayıcılarında çalıştırılan küçük Java uygulamaları olarak tanımlanabilmektedir. Applet içeren bir sayfa Java teknolojisi-uyumlu bir internet tarayıcı ile açıldığında applet kodu istemci bilgisayara transfer olarak tarayıcının Java Sanal Makinesi (JVM) yordamıyla derlenir ve çalışır (Anon., 2007b). Applet’ler sisteme zarar veremeyecek bir şekilde tasarlanmıştır. Tarayıcı html dosyasını işlerken bir <applet> etiketine rastladığı zaman otomatik olarak Java sanal makinesini çalıştırarak tanımlanan gösterim alanı içerisinde uygulamanın çalışmasını sağlar. Applet sınıfından türetilmiş Java kodlarının derlenmesiyle oluşan .class uzantılı dosyaların html içerisinde <applet> </applet> html etiketlerinin (tag) arasına gömülmesiyle, applet uygulamaları, Java çalıştırma ortamına sahip makinede internet tarayıcısı tarafından çalıştırılabilir hale gelir (Akın, 1998).

2.4. MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory- Matris Laboratuvarı), algoritma geliştirmek, verilerin görselleştirilmesi, veri çözümlemesi ve sayısal hesaplamalar için kullanılan bir yazılımdır. MATLAB yazılımı kontrol tasarımı, test ve ölçüm, finansal modelleme ve analiz, haberleşme, mühendislik ve bilimsel uygulama gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Lyshevski, 2003).

3. MATERYAL VE METOT

Çalışmada donma zamanı ile ilgili mevcut modellerin uygulaması “web sayfaları” üzerinde çalıştırılan “applet” olarak adlandırılan Java programları ile gerçekleştirilmektedir. Programların yazılımı sırasında Intel Pentium M Processor, 1.73 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılmıştır. Yöntemlerin değerlendirilmesi sırasında MATLAB 7.1.0.246 (R14) Service Pack 3 versiyonu ile çalışılmıştır.

3.1. Java Programları

Bu çalışmada yazılan programların tümü applet tipi programlardır. Applet programlarının hazırlanması sırasında Altuğ B.Altıntaş’ın “Java ve Yazılım Tasarımı”, Sun Microsystems sitelerinde yer alan Java eğitim notları (Anon., 2007c), Senyurt (2007) ve Anon. (2004) kaynaklarından yararlanılmıştır.

Applet yazımı sırasında bir java yazılım geliştirme aracı olan Eclipse Platform Versiyon 3.0.2 kullanılmıştır. Eclipse, açık kaynak kodlu bir tümleşik geliştirme ortamıdır (IDE). Bu program kullanılarak kaynak kodların yazılması, geliştirilmesi ve derlenmesi gerçekleştirilmiştir. Java programları bir editör yardımıyla yazıldıktan sonra Java Development Kit aracılığıyla DOS ortamında gerekli komutlarla derlenmektedir. Eclipse kullanılarak programlama süreci tek bir programla gerçekleştirilebilmektedir. Debugger (Hata ayıklayıcı) ile kod yazımı sırasındaki hatalar daha kolay fark edilmekte ve kodların takibini yapmak kolaylaşmaktadır.

Appletler, web sayfası içinde çalışan java uygulamalar olduğundan hazırlanan appletlerin çalıştırılabilmesi için “Hiper Metin İşaret Dili” html dosyalarına yerleştirilmiştir.

Çalışmada donma süresini hesaplayan 17 eşitlik, levha tipi gıda maddeleri için hesaplanan eşitliklerden yola çıkarak diğer şekillerdeki gıdaların donma süresinin hesaplanmasında kullanılan 4 şekil faktörü eşitliği ve bazı eşitliklerde kullanılabilecek yardımcı hesaplamalar yapan formüller için appletler hazırlanmıştır. Hazırlanan appletlerin kodları EK C’de verilmektedir.

3.1.1 Plank sınıfı

Plank eşitliğinin kullanımına yönelik olarak hazırlanmış bir sınıftır. Levha, silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalar için donma süresi hesaplanmaktadır. Dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri, web sayfası yüklenirken otomatik açılan Ede tarafından 1949 yılında hazırlanmış grafik yordamıyla okunabilir. Ayrıca bu amaçla hazırlanan “PveR.class” sınıfını içeren, P ve R bulma web sayfasında gıdanın boyutlarına ilişkin değerler girilerek de P ve R geometrik faktörleri hesaplanabilmektedir. Gıdanın şekli, gerekirse P ve R faktörleri, yoğunluk, kalınlık/çap, iletim katsayısı, taşınım katsayısı, gıdanın donma başlangıç sıcaklığı, dondurmanın gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, gıdanın donma gizli ısısı veya suyun donma gizli ısısından yola çıkarak yaklaşık hesaplanabilmesi için nem içeriği seçeneklerinden biri bilgileri kullanıcı tarafından alınarak Plank formülü işletilmektedir. Gıdanın ambalajlı olması durumunda ambalaj materyalinin ısı iletim katsayısı ve kalınlığı bilgileri yine kullanıcının verileriyle formülde kullanılacak yeni taşınım ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Hesaplama sonrasında belirtilen koşullardaki gıdanın donma süresi saniye ve saat/dakika/saniye cinsinden applet üzerinde gösterilmektedir.

3.1.2 Rjutov sınıfı

Rjutov eşitliği kullanılarak, ilk soğuma, faz değişim ve son soğuma evrelerinin ayrı ayrı hesaplanıp, toplam donma süresinin tahmin edilmesine yönelik olarak hazırlanmış bir sınıftır. Levha, silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalar için yoğunluk, kalınlık/çap, iletim katsayısı, taşınım katsayısı, gıdanın donma başlangıç sıcaklığı, dondurmanın gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, gıdanın donma gizli ısısı veya nem içeriği, donmuş haldeki gıdanın ısıl difüzivite katsayısı, Rjutov katsayısı bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesiyle donma süresi hesaplanmaktadır. Hesaplama sonrasında belirtilen koşullardaki gıdanın donma süresi saniye ve saat/dakika/saniye cinsinden applet üzerinde gösterilmektedir.

3.1.3 Nagaoka1955 sınıfı

Nagaoka'nın 1955 yılında geliştirdiği eşitliğin donma süresi hesaplamasında kullanılması amacıyla hazırlanmış bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıda maddeleri için, gıdanın ilk sıcaklığı, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısısı, kalınlığı, donma gizli ısısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgileri kullanıcı tarafından girilerek hesaplama yapılmaktadır.

3.1.4 Levy1958 sınıfı

Levy tarafından 1958 yılında geliştirilen eşitliğin kullanımına yönelik olarak hazırlanmış bir sınıftır. Gıdanın şekli levha, sonsuz silindir, küre veya dikdörtgenler prizması olarak seçilerek, kalınlık, iletim katsayısı, ilk sıcaklığı, donma sıcaklığı, taşınım katsayısı, ortam sıcaklığı ve toplam prosesteki hacimsel entalpi değişimi bilgileriyle hesaplama yapılmaktadır.

3.1.5 Cowell1969 sınıfı

Cowell'ın 1969 yılındaki çalışması ile gösterdiği eşitliğin kullanımı için oluşturulmuş bir sınıftır. Gıdanın şekli levha, sonsuz silindir, küre veya dikdörtgenler prizması olarak seçilir, kalınlık, iletim katsayısı, ilk sıcaklığı, donma sıcaklığı, taşınım katsayısı, ortam sıcaklığı, gıdanın donmuş haldeki hacimsel özgül ısısı, ısıl

difüzivite katsayısı ve prosesteki hacimsel entalpi değişimi bilgileriyle hesaplama yapılmaktadır.

3.1.6 Backstrom1970 sınıfı

Backström tarafından 1970 yılında geliştirilen eşitlik ile donma süresi hesaplanması için yazılmış bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıda maddeleri için, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, kalınlığı, donma gizli ısısı veya nem içeriği, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgileri kullanıcı tarafından girilerek hesaplama yapılmaktadır.

3.1.7 Mellor1976 sınıfı

Mellor tarafından 1976 yılında geliştirilen eşitliğin uygulaması için hazırlanmış bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki gıda maddeleri için, gıdanın ilk sıcaklığı, donma sıcaklığı, son sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısısı, kalınlığı, donma gizli ısısı veya nem içeriği, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgileri kullanıcı tarafından girilerek hesaplama yapılmaktadır.

3.1.8 ClelandveEarle7779 sınıfı

Cleland ve Earle'ün 1977 ve 1979 yıllarında, Plank eşitliğinde, görünür ısının uzaklaştırılmasını, donma öncesi ve sonrasındaki sıcaklık değişimlerini dikkate alarak yaptıkları değişikliklerle elde ettikleri eşitliğin kullanılması için hazırlanmış bir sınıftır. Levha, silindir ve küre şekillerinden biri seçilerek, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısısı, kalınlığı, donma gizli ısısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerinin kullanıcısı tarafından girilmesi ile son sıcaklığı -10°C olacak şekilde hesaplanmaktadır.

3.1.9 HungveThompson sınıfı

Hung ve Thompson'ın 1983 yılında levha şeklindeki gıda maddeleri için geliştirdiği eşitliğin kullanılmasına yönelik olarak hazırlanmış bir sınıftır. Gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısı, kalınlığı, donma gizli ısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesi ile son sıcaklığı -18°C olacak şekilde hesaplanmaktadır.

3.1.10 ClelandveEarle 84 sınıfı

Cleland ve Earle'ün 1977 ve 1979 yıllarında geliştirdikleri eşitliğin, son sıcaklığın -10°C 'den farklı olduğu durumlarda deneysel sonuçlara daha yakın tahminler alınabilmesi için 1984 yılında geliştirilmesiyle elde edilen formülün kullanımını sağlayan bir sınıftır. Levha, silindir ve küre şekillerinden biri seçilerek, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısı, kalınlığı, donma gizli ısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgiler kullanıcı tarafından girilir. Hesaplama sonucunda son sıcaklığın -10°C 'den farklı olduğu dondurma işlemlerinin donma süresi saniye, dakika ve saat olarak ekrana basılmaktadır.

3.1.11 ClelandveEarleHungDüzenlemesi sınıfı

Hung ve Thompson'ın 1983 yılında levha şeklindeki gıda maddeleri için geliştirdiği eşitliğin Cleland ve Earle tarafından 1984 yılında -18°C 'den farklı son sıcaklıklar için modifiye ettiği eşitliğin kullanılmasına yönelik olarak hazırlanmış bir sınıftır. Gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısı, kalınlığı, donma gizli ısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesi ile hesaplanmaktadır.

3.1.12 Pham1984 sınıfı

Pham tarafından 1984 yılında geliştirilen eşitliğin kullanımına yönelik hazırlanmış bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir, küre ve dikdörtgenler prizması şekilleri için oluşturulmuş formül, kullanıcının şekil, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, son

sıcaklık, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, boyutları, donma gizli ısısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerini girmesi ile donma süresini ön soğuma, faz değişim ve son soğuma olarak hesaplayabilmektedir.

3.1.13 IIR1986 sınıfı

Uluslararası Soğutma Enstitüsü (“International Institute of Refrigeration”) tarafından 1986 yılında donma zamanının tahmin edilmesi hesaplamaları için önerdiği eşitliğin kullanılması amacıyla yönelik oluşturulmuş bir sınıftır. Gıdanın şekli levha, sonsuz silindir, küre veya dikdörtgenler prizması olarak seçilir, kalınlık, donma sıcaklığı, hacimsel gizli ısısı, donmuş haldeki hacimsel özgül ısısı, iletim katsayısı, taşınım katsayısı bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesiyle hesaplama yapılmaktadır.

3.1.14 Pham1986 sınıfı

Pham’ın 1984 yılında geliştirdiği eşitliği modifiye ederek 1986 yılındaki çalışmasında belirttiği eşitliğin çalıştırılmasına yönelik hazırlanmış Pham1986 sınıfında kullanıcı levha, sonsuz silindir, küre, dikdörtgenler prizması ve hacim/alan oranını bildiği gıda maddelerinin tahmini donma süreleri hesaplanmaktadır. Sınıfın gerekli hesaplamayı yapabilmesi için kullanıcının şekil, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, son sıcaklık, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın hacimsel özgül ısısı, boyutları, donma gizli ısısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerini girmesi gerekmektedir. Donma süresi ön soğuma, faz değişim ve son soğuma sürelerinin ayrı ayrı görülebileceği şekilde ekrana basılmaktadır.

3.1.15 LacroixveCastaigne sınıfı

Lacroix ve Castaigne’nin 1987-1988 yılında geliştirdiği eşitliğin çalıştırılması amacıyla oluşturulmuş bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir, küre, dikdörtgenler prizması ve sonlu silindir şekillerinden biri seçilerek, gıdanın ilk sıcaklık, donma sıcaklığı, son sıcaklık, donmuş haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, donmamış haldeki gıdanın iletim katsayısı, hacimsel özgül ısısı, seçilen şekle göre boyutları, donma gizli ısısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı

bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesi ile donma süresi ilk soğuma, faz değişim ve son soğuma olarak ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

3.1.16 Salvadori ve Mascheroni 1991 sınıfı

Salvadori ve Mascheroni'nin 1991 yılında geliştirdikleri eşitliğin kullanılması amacıyla oluşturulmuş bir sınıftır. Levha, sonsuz silindir ve küre şekillerinden biri seçilerek gıdanın ilk sıcaklığı, son sıcaklığı, donmamış haldeki iletim katsayısı ve ısı difüzyon katsayısı, dondurulan ortam sıcaklığı ve taşınım katsayısı gibi bilgilerin kullanıcıdan alınmasıyla hesaplama yapılmaktadır.

3.1.17 López ve Hallström 2003 sınıfı

López ve Hallström tarafından 2003 yılında geliştirilmiş eşitlik kullanılarak hesap yapılabilmesi amacıyla oluşturulmuş bir sınıftır. Gıdanın kalınlık, hacim, yüzey alanı, ilk sıcaklığı, iletim katsayısı, donma gizli ısı veya nem içeriği, taşınım katsayısı, dondurulduğu ortamın sıcaklığı bilgileri girilerek hesaplama yapılmaktadır.

3.1.18 Cleland ve Earle Şekil Faktörü 1982 sınıfı

Cleland ve Earle'ün 1982 yılında levha şeklindeki gıdaların donma zamanından yola çıkarak çok boyutlu gıda maddeleri için donma zamanının hesaplanmasında kullanılmak üzere tanımladığı şekil faktörünün hesaplanması için yazılmış bir sınıftır. Gıdanın şekli dikdörtgenler prizması, sonlu silindir veya diğer olarak seçilerek applette istenen kenar uzunlukları, karakteristik uzunluk, donmuş haldeki gıdanın ısı iletim katsayısı, taşınım katsayısı bilgilerinin girilmesi ile hesaplama gerçekleştirilmektedir.

3.1.19 Cleland ve Earle Şekil Faktörü 1987 sınıfı

Cleland ve Earle tarafından 1987 yılında levha şeklindeki gıdalarla çok boyutlu gıdaların donma süresi arasındaki ilişkiyi gösteren şekil faktörü eşitliğinin kullanılması için hazırlanmış bir sınıftır. Gıdanın şekli iki boyutlu, üç boyutlu veya sonlu silindir seçeneklerinden biri olarak seçilip applette istenen kenar uzunlukları, karakteristik uzunluk, donmuş haldeki gıdanın ısı iletim katsayısı, taşınım katsayısı bilgilerinin girilmesi ile hesaplama gerçekleştirilmektedir.

3.1.20 HossainSekilFaktoru sınıfı

Hossain ve arkadaşları tarafından 1992 yılında geliştirilen şekil faktörü eşitliğinin kullanılması amacıyla hazırlanmış bir sınıftır. Gıdanın şekli sonsuz dikdörtgen çubuk, sonlu silindir veya dikdörtgenler prizması olarak seçilip seçilen şekle göre applette istenen kenar uzunlukları, donmuş haldeki gıdanın ısı iletim katsayısı, taşınım katsayısı bilgilerinin girilmesi ile hesaplama yapılmaktadır.

3.1.21 IlıcalıSekilFaktoru sınıfı

Ilıcalı ve arkadaşları tarafından 1999 yılında geliştirilmiş şekil faktörü eşitliğinin kullanılması için yazılmış bir sınıftır. Gıdanın şekli sonlu silindir veya küre olarak seçilip gıdanın çapı, donmuş haldeki gıdanın ısı iletim katsayısı, ilk ve son sıcaklığı, dondurma işleminin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, taşınım katsayısı bilgilerinin girilmesi ile hesaplama yapılmaktadır.

3.1.22 PveR sınıfı

Gıda maddesinin, en uzun, ikinci uzun ve kısa kenar uzunluklarının girilmesi ile Plank ve Rjutov eşitliklerinde kullanılan P ve R sabitlerinin, dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalar için aldığı değeri hesaplamak için geliştirilmiş bir sınıftır.

3.1.23 Ambalaj sınıfı

Ambalajlı gıda maddeleri için ısı transfer katsayısı hesaplanması için oluşturulmuş bir sınıftır. Ambalajın ısı iletim katsayısı, kalınlığı, taşınım ısı transfer katsayısı bilgilerinin kullanıcı tarafından girilmesi ile hesaplama gerçekleştirilir.

3.1.24 TermalÖzellik sınıfı

Devres tarafından 1991 yılında geliştirilmiş, gıdanın istenen sıcaklıktaki entalpi, yoğunluk, özgül ısı, iletim katsayısı özelliklerinin hesaplanabildiği eşitliklerin kullanımına yönelik yazılmış bir sınıftır. Gıda maddesi tuzlu veya şekerli olarak seçilir, özelliklerin hesaplanması istenen sıcaklık, donma başlangıç sıcaklığı, % su içeriği, % bağlı su, çözünmüş madde moleküler ağırlığı bilgilerinin girilmesi ile belirtilen sıcaklıktaki % donmamış su miktarı, % ortalama donmamış su miktarı, yoğunluk, özgül ısı, iletim katsayısı, entalpi değerleri hesaplanmaktadır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Literatürden levha şeklindeki gıdalar için 114, silindir şeklindeki gıdalar için 30 ve küre şeklindeki gıdalar için 30 olmak üzere, toplam 174 adet donma deneyleri verisi bir araya getirilmiştir (Cleland ve Earle, 1977, 1979a; Hung ve Thompson, 1983). Karlsruhe deney materyali (125 adet veri), yağsız sığır eti (15 adet veri), patates püresi (15 adet veri), sazan balığı (9 adet veri) ve kıyma (9 adet veri) kullanılarak yapılan deneylerin gerçekleştirildiği koşullar EK D’de, gıda maddelerinin termofiziksel özellikleri ise EK E’de verilmektedir. Deneyler sanayide gıda donma prosesindeki koşulları içerecek şekilde geniş aralıkları kapsamaktadır. Donmanın gerçekleştiği ortam sıcaklığı -19°C ’den -40.50°C ’ye, gıdanın bulunduğu ilk sıcaklık 1.5°C ’den 30.4°C ’ye, kalınlığı 0.01 m’den 0.15 m’ye ve ısı transfer katsayısı $8.5\text{W/m}^2\text{C}$ ’den $430\text{W/m}^2\text{C}$ ’ye olacak şekilde deney sonuçları mevcuttur. Cleland ve Earle, 1977 ve 1979a yıllarındaki çalışmalarında dondurulan gıdanın son sıcaklığı -10°C olacak şekilde deneysel veriler elde ederken Hung ve Thompson gıdanın son sıcaklığı olarak -18°C ’yi donmanın bitme noktası olarak kabul edip verilerini elde etmişlerdir.

Donma süreleri, literatürden derlenen yöntemler kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar deneysel donma süreleri ile karşılaştırılarak aralarındaki yüzde fark bulunmuştur. Tablo 4.1’de, eşitliklerden elde edilen süreleri ile deneysel donma süreleri karşılaştırılarak hesaplanan yüzde fark değerleri ve Tablo 4.2’de eşitlikler kullanılarak elde edilen süreler ile deneysel donma süreleri arasındaki yüzde fark değerlerinin standart sapmaları gösterilmektedir.

Tablo 4.1: On Altı Yarı-Analitik/Amprik Yöntem Kullanılarak Hesaplanan Donma Süreleri İle Deneysel Verilerden Elde Edilen Donma Sürelerinin Karşılaştırılması

Veri Kaynağı	Yöntem														
	Plank ¹	Rjutov ²	Nagaoka ve diğ. ³	Levy ⁴	Cowell ⁵	Bäckström ⁶	Mellor ⁷	Cleland ve Earle ⁸	Hung ve Thompson ⁹	Pham ¹⁰	Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü ¹	Pham ¹²	Lacroix ve Castaigne ¹³	Salvadori ve Mascheroni ¹⁴	López ve Hallström ¹⁵
	% fark														
Cleland ve Earle ¹⁶	30.6	23.1	10.9	15.4	6.9	27.4	16.8	3.3	29.6	4.8	24.3	4.6	4.6	5.8	28.4
Karlsruhe deney materyali (levha)	29.0	17.9	12.3	17.6	6.9	26.1	15.2	3.0	23.5	5.4	23.0	6.4	3.1	7.1	27.4
Karlsruhe deney materyali (silindir)	31.6	21.9	9.5	13.3	7.5	28.8	18.4	2.9	-	4.1	25.7	4.1	4.4	5.3	29.9
Karlsruhe deney materyali (küre)	31.2	33.9	10.7	14.7	7.3	28.4	18.0	4.3	-	4.9	25.3	2.8	6.8	5.3	29.0
Patates püresi	33.8	17.1	6.1	11.9	3.3	25.1	15.4	1.9	27.2	3.3	22.5	4.0	6.4	3.7	26.8
Yağsız sığır eti	31.5	18.3	12.9	19.1	6.8	26.4	15.1	4.4	29.9	4.8	23.4	5.7	4.8	3.9	27.8
Hung ve Thompson ¹⁷	41.3	21.1	8.4	6.0	14.8	36.2	27.6	7.0	3.2	8.1	30.9	8.1	10.7	9.0	39.7
Karlsruhe deney materyali	39.8	19.1	8.2	6.3	14.3	35.1	26.9	6.0	2.7	7.0	30.0	7.0	10.1	5.7	38.6
Yağsız sığır eti	42.4	16.3	9.7	5.4	16.5	38.1	29.4	7.8	3.8	10.3	33.5	10.0	13.0	9.1	41.4
Patates püresi	39.5	20.7	8.6	8.8	15.0	34.9	27.2	6.2	3.6	5.1	30.8	3.5	8.1	8.3	38.7
Sazan balığı	39.7	27.4	7.4	5.1	13.9	35.1	26.8	6.8	3.6	8.7	29.2	9.5	10.1	12.6	39.0
Kıyma	48.7	28.3	8.2	3.9	14.1	37.5	27.6	9.6	3.1	10.8	31.1	13.3	12.6	14.0	41.2
Tüm Deneysel Veriler	34.3	22.4	10.0	12.3	9.6	30.4	20.5	4.6	15.9	5.6	26.4	5.8	6.7	6.9	32.3
¹ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						⁷ (LeBlanc ve diğ., 1990)						¹³ (Lacroix ve Castaigne, 1987a, b, 1988)			
² (López-Leiva ve Hallström, 2003)						⁸ (Becker ve Fricke, 1999; Cleland ve Earle, 1977, 1979a, 1979b)						¹⁴ (Salvadori ve Mascheroni, 1991, 1996)			
³ (Heldman ve Singh, 1989)						⁹ (Hung ve Thompson, 1983)						¹⁵ (López-Leiva ve Hallström, 2003)			
⁴ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹⁰ (Pham, 1984)						¹⁶ (Cleland ve Earle, 1977, 1979a)			
⁵ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹¹ (LeBlanc ve diğ., 1990)						¹⁷ (Hung ve Thompson, 1983)			
⁶ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹² (Pham, 1986)									

Tablo 4.2: On Altı Yarı-Analitik/Amprik Yöntem Kullanılarak Hesaplanan Donma Süreleri İle Deneysel Verilerden Elde Edilen Donma Süreleri Arasındaki Farkların Standart Sapmaları

Veri Kaynağı	Yöntem														
	Plank ¹	Rjutov ²	Nagaoka ve diğ. ³	Levy ⁴	Cowell ⁵	Bäckström ⁶	Mellor ⁷	Cleland ve Earle ⁸	Hung ve Thompson ⁹	Pham ¹⁰	Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü ¹	Pham ¹²	Lacroix ve Castaigne ¹³	Salvadori ve Mascheroni ¹⁴	López ve Hallström ¹⁵
% farkların standart sapmaları															
Cleland ve Earle ¹⁶	5.6	14.1	7.3	11.3	5.3	5.4	4.5	2.4	16.3	2.6	6.1	3.0	4.6	3.8	5.5
Karlsruhe deney materyali (levha)	5.5	10.8	8.7	12.9	5.7	5.2	4.7	1.9	10.1	2.3	6.0	2.8	2.1	4.2	5.2
Karlsruhe deney materyali (silindir)	5.5	13.4	5.8	9.2	5.2	5.3	4.5	2.2	-	2.9	6.0	2.8	3.0	3.9	5.5
Karlsruhe deney materyali (küre)	5.1	15.1	6.1	10.5	5.1	4.7	3.5	3.3	-	2.5	5.5	2.0	7.3	3.0	5.3
Patates püresi	5.4	8.1	6.1	9.8	3.1	6.4	3.5	1.6	4.7	2.4	7.3	3.5	4.8	2.0	6.3
Yağsız sığır eti	8.6	11.9	9.3	14.0	5.7	7.6	5.4	1.3	11.6	3.0	8.7	3.0	1.9	2.4	7.4
Hung ve Thompson ¹⁷	10.5	11.3	4.1	4.1	4.1	8.4	5.9	4.9	1.8	5.4	9.7	5.9	6.4	6.1	8.4
Karlsruhe deney materyali	9.0	10.9	4.4	4.5	3.0	8.5	5.2	4.2	1.4	4.8	9.9	4.8	6.3	4.4	8.6
Yağsız sığır eti	10.2	9.3	4.6	5.1	5.3	10.4	7.4	5.4	2.4	5.8	11.8	6.9	8.1	71.	10.2
Patates püresi	6.2	10.0	6.8	5.9	3.6	5.9	3.0	3.0	2.4	3.5	7.0	3.0	5.8	4.4	6.2
Sazan balığı	10.5	13.4	4.5	2.9	6.0	10.7	8.0	6.9	2.3	7.2	12.4	7.3	7.8	8.2	10.6
Kıyma	21.7	16.6	3.2	2.9	7.0	12.8	10.2	7.5	2.3	7.9	15.1	8.8	8.9	6.0	12.8
Tüm Deneysel Veriler	9.7	13.5	6.6	10.6	6.3	8.1	7.4	4.1	14.3	4.3	8.6	4.8	6.3	5.1	8.8
¹ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						⁷ (LeBlanc ve diğ., 1990)						¹³ (Lacroix ve Castaigne, 1987a, b, 1988)			
² (López-Leiva ve Hallström, 2003)						⁸ (Becker ve Fricke, 1999; Cleland ve Earle, 1977, 1979a, 1979b)						¹⁴ (Salvadori ve Mascheroni, 1991, 1996)			
³ (Heldman ve Singh, 1989)						⁹ (Hung ve Thompson, 1983)						¹⁵ (López-Leiva ve Hallström, 2003)			
⁴ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹⁰ (Pham, 1984)						¹⁶ (Cleland ve Earle, 1977, 1979a)			
⁵ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹¹ (LeBlanc ve diğ., 1990)						¹⁷ (Hung ve Thompson, 1983)			
⁶ (López-Leiva ve Hallström, 2003)						¹² (Pham, 1986)									

Plank (López-Leiva ve Hallström, 2003) eşitliği kullanılarak hesaplanan donma süresi deneysel olarak bulunan donma süresinden ortalama olarak %34.3 düşük bulunmuştur, ayrıca hesaplanan donma süreleri ile deneysel donma süreleri arasındaki farkların standart sapması %9.7'dir. Hung ve Thompson'ın (1983) deneysel sonuçları ile Plank eşitliği kullanılarak hesaplanan sonuçlar arasındaki farkın ortalama değerinin %41.3, standart sapmanın %10.5 olduğu ve ilk sıcaklığın donma sıcaklığının çok üstünde ve son sıcaklığın donma sıcaklığından çok düşük olduğu noktalarda farkın %50'lerin üzerine çıktığı gözlenebilmektedir.

Hung ve Thompson'ın deneysel çalışmalarında donma süresi olarak gıda maddesinin ilk sıcaklığından, son sıcaklığın -18°C olduğu sıcaklığa kadar olan süreyi dikkate aldığı düşünülürse, Cleland ve Earle'ün (1977, 1979a) son sıcaklığı -10°C olarak kabul ettikleri çalışmaları ile aralarındaki farkın (%30.6) ve standart sapmanın (%5.6), Hung ve Thompson'ın deneysel verileri ile hesaplama yapıldığında daha az olması şaşırtıcı değildir. Plank, donma süresini bir bağıntı ile ifade ederken, gıdanın proses başlangıcında gıdanın donma noktasında olduğu ve donma süresince sıcaklığının ve termal özelliklerinin değişmediği ve gıdanın faz değiştirdikten sonra son soğuma evresinin olmadığı kabulünü yapmaktadır. Bu durumda eşitlikte dikkat edilen ve hesaba katılan yalnızca faz değişimi olup, ön soğuma ve son soğuma süreleri hesaplanmamaktadır. Gıdanın ilk sıcaklığından donma sıcaklığına gelineye kadar olan ilk soğuma ve donma sonrası gıdanın son sıcaklığına getirildiği son soğuma evrelerini dikkate almamasından ötürü bu eşitliği kullanarak elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen donma sürelerinin altında kalmaktadır.

Rjutov (López-Leiva ve Hallström, 2003) eşitliği ile hesaplanan donma süreleri deneysel olarak elde edilmiş verilerle karşılaştırıldığında %22.4 fark ve %13.5 standart sapma olduğu gözlenmektedir.

Nagaoka ve diğ. (Heldman ve Singh, 1989) tarafından geliştirilen eşitlik ile hesaplanan donma zamanları ile deneysel olarak bulunmuş donma zamanları arasında %10.0 fark ve farklar arasında %6.6 standart sapma olduğu sonucu elde edilmiştir. Yöntem gıdanın ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma aşamalarını da içermektedir. Farklı ilk ve son sıcaklıkların dikkate alındığı eşitlikle hesaplanan sürelerin ilk sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda deneysel donma süreleri ile

arasındaki farkın yükseldiği gözlenmektedir. Aynı ortam koşullarında ve aynı son sıcaklığa soğutulmak istenen iki farklı ilk sıcaklıktaki maddelerin donma sürelerinin deneysel donma sürelerinden farkı incelendiğinde ilk sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda farkın da daha fazla olduğu görülmüştür. Nagaoka ve diğ. tarafından geliştirilen eşitlik balık ile yapılan çalışmalar sonucu oluşturulmuştur. Bu durumda sazan balığı kullanılarak yapılmış deneysel veriler ile eşitliğin kullanılması ile elde edilen donma süreleri arasındaki farkın %7.4 olarak diğer gıda maddeleri için elde edilen sonuca göre daha düşük olması şaşırtıcı değildir.

Levy'nin (López-Leiva ve Hallström, 2003) geliştirdiği yöntem ile hesaplanan donma süreleri ile literatürden derlenen donma süreleri arasındaki fark %12.3, farkların standart sapması %10.6 olarak hesaplanmıştır. Yöntemde Plank eşitliğindeki gizli ısı yerine prosetteki toplam entalpi değişimi kullanılmaktadır. Bu şekilde ilk ve son sıcaklıkların donma sıcaklığından farklı olduğu durumlar dikkate alınmaktadır. Ancak Nagaoka ve diğ. (Heldman ve Singh, 1989) tarafından eşitlikte olduğu gibi yüksek ilk sıcaklıklar için deneysel süreler ile hesaplanan süreler arasında fark yüksek olmaktadır. Yine Nagaoka ve diğ. tarafından geliştirilen eşitlik gibi Levy tarafından geliştirilen eşitlik balık ile yapılan çalışmalar sonucu kurulmuştur. Eşitlik kullanılarak sazan balığı için yapılan hesaplamalarda elde edilen süreler deneysel süreler ile karşılaştırıldığında %5.1'lik bir fark ve %2.9'luk bir standart sapma olduğu sonucuna varılmıştır.

Cowell (López-Leiva ve Hallström, 2003) tarafından geliştirilen eşitlik ile %9.6 farkla deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir, ayrıca farkların standart sapması %6.3 olarak bulunmuştur. Yöntemde tüm prosetteki entalpi değişiminin dikkate alınması Plank (López-Leiva ve Hallström, 2003) yöntemine göre deneysel verilere daha yakın sonuç vermesini sağlamaktadır.

Bäckström (López-Leiva ve Hallström, 2003) eşitliği kullanılarak yapılan hesaplamalarda ulaşılan donma sürelerinin deneysel verilerden %30.4 farklı olduğu bulunmuştur. Hesaplanan donma süreleri ile deneysel donma süreleri arasındaki farkların standart sapması %8.1 olarak hesaplanmıştır. İlk sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda %50'lere varan farklar gözlenmekte olup, eşitlik ile elde edilen donma sürelerinin deneysel sonuçlara en yakın %13.6 olduğu görülmektedir.

Mellor (LeBlanc ve diğ., 1990) tarafından oluşturulan bağıntı ile deneysel sürelerle göre %20.5 farkla donma süreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan sürelerin deneysel sürelerle olan farklarının standart sapması %7.4 şeklinde bulunmuştur. Mellor, Plank (López-Leiva ve Hallström, 2003) eşitliğini, (L) hacimsel gizli ısı yerine $L + 0.5C_s(T_i - T_d) + 0.5C_d(T_d - T_c)$ kullanarak geliştirmiştir. Ancak hesaplanan donma sürelerinin deneysel donma sürelerinden farkının yüksek olması, bu modifikasyon sonucu hesaplanan donma sürelerinin kabul edilebilir düzeyde olması için yeterli olmadığının göstergesi olarak görülebilir. Mellor eşitliği, Cleland ve Earle'e (1977, 1979a) ait deneysel sonuçlara %16.8, Hung ve Thompson'a (1983) ait deneysel sonuçlara %27.6 farklılıkta donma sürelerinin hesaplanmasını sağlamıştır.

Cleland ve Earle (1977, 1979a, 1979b) tarafından geliştirilen eşitlik ile elde edilen donma süreleri deneysel verilerle karşılaştırıldığında ortalama %4.6'lık bir fark ve %4.1 standart sapma olduğu gözlenmektedir. Cleland ve Earle eşitliği kullanılarak hesaplanan süreler deneysel sürelerden daha düşüktür. Bu fark, Cleland ve Earle'ün geliştirdiği bağıntıda belirtilen toplam entalpi farkının donma noktası üstündeki duyulur ısıyı içermemesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum ilk sıcaklık donma noktasının ne kadar üstündeyse hesaplamada kullanılması beklenen toplam entalpi farkının daha düşük olmasına ve donma süresinin de buna paralel olarak azalmasına sebep olmaktadır.

Cleland ve Earle (1977, 1979a, 1979b) eşitlikleri Karlsruhe deney materyali kullanılarak geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra patates püresi ve yağsız sığır eti kullanılarak yapılan çözümler de deneysel olarak bulunan donma sürelerine yakın sonuçlar vermektedir (sırasıyla %1.9, %4.4 fark). Ayrıca standart sapmanın patates püresi ve yağsız sığır eti için %1.6 ve %1.3'e düştüğü gözlenmektedir.

Cleland ve Earle 1977 yılında geliştirdiği bağıntıda, aynı çalışmada Karlsruhe deneysel materyali ile son sıcaklığı -10°C olacak şekilde elde ettiği verilerle yaptığı regresyon analizi sonrası ulaştığı katsayıları kullanmıştır. Cleland ve Earle'ün de çalışmalarında belirttiği gibi bağıntılar gıdanın son sıcaklığının -10°C olduğu durumlar için daha doğru sonuçlar vermektedir. Cleland ve Earle'ün son sıcaklığın -10°C 'den farklı sıcaklıklar için 1984 yılında geliştirdiği ve 1977 yılında geliştirilen formülün sonuna yapılan bir eklenti içeren formül Hung ve Thompson'ın (1983) verileri hesaplatılırken kullanılmıştır. Ancak bu yaklaşım son sıcaklığı -10°C 'den

farklı olan gıdalar için kullanılan eşitlikten elde edilen sonuçların iki veri tipinde farklı olmasına engel olamamıştır. Cleland ve Earle'ün çalışmasında verdiği deneysel sonuçlarla farkı (%3.3) ve standart sapması (%2.4), Hung ve Thompson'ın çalışmasında verdiği deneysel sonuçlar ile farkından (%7.0) ve standart sapmasından (%4.9) küçüktür.

Hung ve Thompson (1983) tarafından geliştirilen eşitlik ile hesaplanan donma sürelerinin deneysel donma sürelerinden %15.9 farklı ve standart sapmasının %14.3 olduğu bulunmuştur. Cleland ve Earle (1977, 1979a) tarafından yapılan çalışmaların deneysel sonuçları ile eşitlik kullanılarak hesaplanan donma süreleri arasındaki ortalama fark %29.6 ve standart sapma %16.3 iken kendi deneysel sonuçları ile hesaplanan donma süreleri arasındaki farkın %3.2 ve standart sapmanın %1.8 olduğu gözlenmiştir. Hung ve Thompson, çalışmalarında donma süresini gıdanın bulunduğu ilk sıcaklıktan -18°C 'ye kadar geçen süre olarak hesaplandığı için yaptıkları regresyon analizi ile elde ettikleri sabitleri bu son sıcaklığa göre bulmuş ve bağıntıyı bu sabitlerle geliştirmişlerdir. Cleland ve Earle tarafından yapılan deneysel çalışmada gıdanın son sıcaklığı -10°C olacak şekilde donma süreleri elde edilmiştir. İki veri kaynağı kullanılarak hesaplanan donma sürelerinin kaynaklarda gösterilen donma sürelerinden farklarının büyük olması verilerin farklı son sıcaklıklar için elde edilmiş olması ve kullanılan eşitliğin bunlardan yalnız biriyle uyumlu olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Hung ve Thompson çalışmasında hesaplamaları kolaylaştırmak amacıyla yoğunluğun sıcaklığa bağlı olmadığı ve donmanın tek bir sıcaklıkta gerçekleştiği kabulünü yapmıştır.

Pham (1984) eşitliğinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçların deneysel verilerle arasında %5.6 fark ve farkların standart sapması %4.3 bulunmuştur. Pham eşitliği donma sürelerinin deneysel olarak elde edilmiş sürelerden yüksek çıkmasına neden olmuştur. Pham eşitliğinde donma noktasının gıdanın ilk donmaya başladığı sıcaklıktan 1.5°C düşük olarak kabul etmiş ve bu şekilde donmanın bir sıcaklık aralığında gerçekleşiyor olmasının etkisini minimum düzeyde tutmaya çalışmıştır. Cleland ve Earle'ün (1977, 1979a) verileri kullanıldığında deneysel olarak verilen süre ile Pham eşitliği kullanılarak hesaplanan sürelerin farklarının ortalaması %4.8 ve standart sapması %2.6 olurken, Hung ve Thompson (1983) tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında ortalama farkın %8.1'e ve standart sapmanın %5.4'e yükseldiğini görmekteyiz.

Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü (LeBlanc ve diğ., 1990) tarafından geliştirilen eşitlikte, Plank (López-Leiva ve Hallström, 2003) eşitliğindeki (L) hacimsel gizli ısı yerine, donma başlangıç noktasından gıdanın gelmesi istenen son sıcaklığa kadar olan entalpi değişimi kullanılmaktadır. Geliştirilen eşitliğin kullanılması ile elde edilen donma sürelerinin deneysel verilerden farkının %26.4 ve farkların ortalama standart sapmasının %8.6 olduğu hesaplanmıştır. Eşitlikte gıdanın ilk sıcaklığının dikkate alınmaması ilk sıcaklığın donma başlangıç sıcaklığından yüksek olduğu durumlarda hesaplanan sürenin olması beklenen süreden düşük kaldığı gözlenmiştir.

Pham (1986) tarafından geliştirilen eşitliğin kullanılmasıyla yapılan hesaplarda donma süresinin deneysel donma sürelerinden %5.8 farklı olduğu ve farkların ortalama standart sapmasının %4.8 olduğu sonucuna varılmıştır. Pham gıdanın donma sürecinin tek bir sıcaklıkta değil bir sıcaklık aralığında gerçekleşiyor olmasının etkisini hesaplamalarına katmak amacıyla ortalama donma sıcaklığı tanımlamaktadır. Bu şekilde faz değişiminin bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesinin etkilerini hesaplanan süreye katmaktadır.

Lacroix ve Castaigne'nin (Lacroix ve Castaigne, 1987a, 1987b) geliştirdikleri eşitlik kullanılarak hesaplanan donma sürelerinin deneysel olarak belirlenmiş donma sürelerinden ortalama farkı %6.7 ve farkların ortalama standart sapması %6.3'tür. Cleland ve Earle (1977, 1979a) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ile eşitlik kullanılarak tahmin edilen süre arasındaki fark %4.6 iken Hung ve Thompson'ın (1983) deneysel sonuçları ile farkın %10.7 olduğu gözlenmektedir. Eşitliğin doğruluğunun özellikle Cleland ve Earle'ün verileri göz önüne alındığında yüksek olduğu söylenebilse de hesaplama kademeleri diğer eşitliklere göre daha karmaşık bir yapıda olduğu ve kullanımının daha zor olduğu gözlenmiştir.

Salvadori ve Mascheroni (1991, 1996) tarafından geliştirilen eşitlik ile elde edilen donma sürelerinin deneysel donma sürelerinden ortalama farkı %6.9 ve farkların ortalama standart sapması %5.1'dir. Cleland ve Earle'ün (1977, 1979a) deneysel verileri ile ortalama farkı %5.8 ve farkların standart sapması %3.8, Hung ve Thompson'ın (1983) deneysel verileri ile ortalama farkı %9.0, farkların standart sapması %6.1 olarak görülmüştür. Salvadori ve Mascheroni çalışmalarındaki bağıntıyı sığır etinin donma işlemini modelleyen sayısal bir çözümleme ile geliştirmiştir. Ancak eşitlik sürekli bir yapı gösteren yüksek su içerikli gıdalar için de

kullanılabilmektedir. Cleland ve Earle'ün (1977) sığır eti kullanarak elde ettiği deneysel veriler ile eşitlik yardımıyla hesaplanan süreler arasındaki farkın (%3.9) ve farkların standart sapmasının (%2.4) yüksek olmadığı fark edilmektedir.

López ve Hallström (2003) tarafından geliştirilen ve faz değişim süresinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik yardımıyla elde edilen donma sürelerinin deneysel veriler ile arasındaki farkın %32.3 ve farkların ortalama standart sapmasının %8.8 olduğu hesaplanmıştır. Farkın Cleland ve Earle'ün (1977, 1979a) verileri kullanılarak yapılan hesaplamada %28.4, Hung ve Thompson'ın (1983) verileri kullanılarak yapılan hesaplamada %39.7 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar arasındaki farkın büyük olması şaşırtıcı değildir. Hung ve Thompson verileri gıdanın son sıcaklığının -18°C olduğu donma sürelerini içermekte ve yalnızca faz değişim süresini hesaplayan López ve Hallström eşitliği kullanılarak hesaplanan sürelerden farkının -10°C son sıcaklığına gelinceye kadar yapılmış Cleland ve Earle verileri kullanılarak hesaplanan sürelerden farkına kıyasla daha büyük olması kaçınılmazdır.

Yarı-analitik/Amprık tahmin yöntemler kullanılarak tahmin edilen donma sürelerinin deneysel verilerle arasında fark olması deneysel hatalardan, seçilen eşitliğin o aralıklar ve koşullarda uygulanabilir olup olmamasından kaynaklanabildiği gibi, gıdanın ısı ve fiziksel özelliklerinin suyun hal değişiminden ötürü farklı olması ve tam değerinin belirlenememesinden kaynaklanmaktadır. Suyun hacmi katıdan sıvıya faz değişimi gerçekleştiği zaman artmaktadır ve bu gıdanın yoğunluğunun değişmesinin ve hacminin artmasının başlıca sebebidir (Hung ve Thompson, 1983).

Isıl iletkenlik, ürün kompozisyonu ve sıcaklığına bağlıdır. Doğru sonuçların elde edilmesi direk ölçüm yapılarak dahi güçtür. İşlem sırasında iletim katsayısının değişimi ortalama bir ısı iletkenlik katsayısı kullanılarak ihmal edilemez. Ancak yukarıda bahsedilen on altı eşitlikte ısı iletkenlik katsayısı için donmuş fazda tek bir ısı iletkenlik katsayısı tanımlıdır. Salvadori ve Mascheroni (1991, 1996) geliştirdikleri bağıntıda gıdanın donmamış haldeki özelliklerini kullandıkları için, sıcaklık ve faz değişiminin donma süresi hesaplanması sırasındaki etkisi de az olmaktadır. Hung ve Thompson (1983) çalışmalarında düşük ısı iletkenlik katsayısının kullanılmasının donma süresinin gerçek değerden daha uzun hesaplanmasına sebep olduğunu ancak etkisinin (%2.7) olduğunu belirtmiştir.

Özgöl ısı da ürün kompozisyonu ve sıcaklığa bağlıdır. Yüksek özgöl ısı toplam entalpi farkının yüksek olmasına ve daha uzun (%2.6) donma süresine sebep olmaktadır (Hung ve Thompson, 1983).

Donma prosesinde gıda maddesi içerisindeki tüm su donmamaktadır. Ürün içerisinde donmadan kalan su, uzaklaştırılması gereken gizli ısıyı etkilediği gibi ayrıca ürünün termal özelliklerini de etkilemektedir (Hung ve Thompson, 1983).

Ürün içerisindeki bir kısım su (genellikle %2'nin altında) donma sırasında buharlaşmaktadır. Suyun bir kısmının buharlaşması üründen uzaklaştırılması gereken toplam entalpinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu sürecin büyük bir kısmı işlem başlangıcında olmaktadır. Modellerde kütle transferi gerçekleşmediği kabulü yapılmaktadır. Kütle transferi toplam donma süresinin azalmasına neden olur. Kütle transferinin hızı, havanın hızına, ürünün ilk sıcaklığına, nem içeriğine ve havanın nemliliğine bağlıdır (Hung ve Thompson, 1983).

Isı transfer katsayısı ölçüm yapılan konuma ve sıcaklığa bağlıdır. Hung ve Thompson'ın (1983) çalışmasındaki deneysel veriler pürüzsüz alüminyum tabaka kullanılarak elde edilmiştir. Ancak gıda örneklerinin yüzeyleri alüminyum tabaka kadar pürüzsüz değildir. Isı transfer katsayısının doğru hesaplanamaması elde edilen verilerde hataya neden olmaktadır.

Hung ve Thompson (1983) tarafından çalışmada verilen sonuçlara göre hacim artışı ve donmamış su içeriği donma zamanı tahmini yaparken hataya sebep olabilen en önemli parametrelerdir.

Sonuç olarak yarı-analitik/deneysel yöntemler ile hesaplanan donma süreleri deneysel verilerle karşılaştırıldıklarında değişen doğruluklarda olduğu gözlenmektedir ve hepsi belirli işlem koşullarında ve belirli şekilde gıdalarda uygulanabildikleri için bazı kısıtlamaları mevcuttur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, donma zamanının tahmin edilmesi amacıyla geliştirilmiş 17 eşitlik, dört şekil faktörü eşitliği, istenen sıcaklıktaki ısı özellikleri, ambalajlı gıdalar için taşınım ısı transferi katsayısı, dikdörtgenler prizması şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri hesaplayan yardımcı eşitlikler kişisel kullanıma sunulmak üzere applet olarak hazırlanmıştır. Donma zamanı ile ilgili literatürden toplanan deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen süreler, yarı-analitik/ampirik yöntemler kullanılarak appletler yardımıyla hesaplanan süreler ile karşılaştırılmış ve matematiksel olarak analizi yapılmıştır.

Levha, silindir ve küre şeklindeki gıdalar ile literatürde yapılmış çalışmalardan derlenen, Karlsruhe deney materyali ile 125 adet, yağsız sığır eti ile 15 adet, patates püresi ile 15 adet, sazan balığı ile 9 adet ve kıyma ile 9 adet olmak üzere toplamda 174 veri, donma zamanının tahmin edilebilmesini sağlayan on altı adet yarı-analitik/ampirik yöntem kullanılarak deneylerin gerçekleştiği işlem koşulları için donma süresi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Plank, Rjutov, Nagaoka ve diğ., Levy, Cowell, Bäckström, Mellor, Cleland ve Earle, Pham (1984 çalışması), Pham (1986), Hung ve Thompson, Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü (IIR), Lacroix ve Castaigne, Salvadori ve Mascheroni, López ve Hallström tarafından geliştirilen eşitlikler, Cleland ve Earle'ün 1977, 1979a ve Hung ve Thompson'ın 1983 yıllarında yaptıkları çalışmalardan elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Cleland ve Earle'ün çalışması dondurulan gıdanın son sıcaklığı -10°C olacak şekilde yürütülürken Hung ve Thompson çalışmasında son sıcaklık olarak -18°C 'yi uygun bulmuştur.

Yapılan hesaplamalar sonucunda doğruluğu en az olan eşitlik Plank eşitliği olarak bulunmuştur. Deneysel donma süreleri ile hesaplanan donma süreleri arasındaki fark %34.3 olarak hesaplanmıştır. Plank eşitliğinde işlem başlangıcında gıdanın donma başlangıç sıcaklığında olduğu, faz değişimi gerçekleşirken sıcaklığının değişmediği ve faz değişimi sonrasında donma noktasının altında bir sıcaklığa soğutulmadığı

kabulleri yapılmaktadır. Bu durumda Plank eşitliğinin yalnızca faz değişim sürecini dikkate alması ve yapılan hesaplamalarda çıkan sonucun ilk ve son soğumayı içermiyor olması deneysel sonuçlar ile arasındaki farkın en önemli sebepleri olarak gösterilebilir.

Rjutov eşitliği ile hesaplanan donma süreleri deneysel olarak elde edilmiş verilerle karşılaştırıldığında farkın %22.4 olduğu bulunmuştur.

Nagaoka ve diğ. tarafından geliştirilen eşitlik ile hesaplanan donma zamanları ile deneysel olarak bulunmuş donma zamanları arasında %10.0 fark elde edilmiştir. Eşitlikte kullanılan entalpi gıdanın ön soğuma, faz değişimi ve son soğuma evrelerini içermektedir. Ancak yöntem farklı son sıcaklıklar için yaklaşık sonuçlar verirken ilk sıcaklıkların yüksek olduğu durumlarda farkın %27.7'ye çıktığı gözlenmiştir. Eşitliğin en iyi sonuçları sazan balığı kullanılarak yapılmış deneysel veriler ile elde edildiği saptanmıştır (%7.4).

Levy'nin geliştirdiği bağıntı ile hesaplanan donma süreleri ile literatürden derlenen donma süreleri arasındaki fark %12.3 olarak hesaplanmıştır. Yöntemde prosesteki toplam entalpi değişimi kullanılmaktadır ancak ilk sıcaklıkların yüksek olduğu durumlarda deneysel süreler ile hesaplanan süreler arasındaki farkın %39.4'e kadar çıktığı saptanmıştır. Eşitlik, sazan balığı için yapılan hesaplamalarda elde edilen sürelerin deneysel süreler ile karşılaştırılması sonucunda %5.1 bir farkın olduğu dikkate alındığında en iyi sonuçları sazan balığı ile vermekte olduğu sonucuna varılmıştır.

Cowell tarafından geliştirilen eşitlik ile %9.6 farkla deneysel verilere yakın sonuçlar bulunmuştur. Yöntemde tüm prosesteki entalpi değişimi hesaba katılmakta ve farklı ilk ve son sıcaklıklarda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara yakınlığında büyük farklılıklar oluşmadan kullanılabilir.

Bäckström eşitliği kullanılarak yapılan hesaplamalarda ulaşılan donma sürelerinin deneysel verilerden %30.4 farklı olduğu, ilk sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda bu farkın %50'lere vardığı sonucuna varılmıştır.

Mellor tarafından oluşturulan bağıntı ile deneysel süreler göre %20.5 farkla donma süreleri hesaplanmıştır. Mellor eşitliği, Cleland ve Earle'e ait deneysel sonuçlara

%16.8, Hung ve Thompson'a ait deneysel sonuçlara %27.6 farklılıkta donma sürelerinin hesaplanmasını sağlamıştır.

Cleland ve Earle tarafından geliştirilen eşitlik kullanılarak hesaplanan değerlerin, deneysel verilerden elde edilen süreler ile farkı %4.6 olup on altı yöntem arasında gerçek değerlere en yakın sonucu vermiştir. Ancak eşitlik son sıcaklığın -10°C 'den farklı olduğu durumlarda deneysel verilerden uzaklaşmaktadır. Son sıcaklığın -10°C 'den farklı olduğu durumlar için yapılan modifikasyonlar ile yapılan hesaplar sonucu elde edilen süreler, son sıcaklığın -18°C olduğu Hung ve Thompson'ın verileri ile karşılaştırıldığında gözlenen farkın %7.0 olması yapılan bu modifikasyonların yeterli olmadığı sonucuna götürmektedir. Ayrıca Cleland ve Earle eşitliği ile hesaplanan donma sürelerinin deneysel sürelerden farklı olmasının bir diğer önemli sebebi yöntemin gıdanın donma noktası üstündeki duyulur ısıyı hesaplamaya katmamasından kaynaklanmaktadır.

Pham eşitliği (1984 çalışması) %5.6 ile deneysel verilere çok yaklaşan yöntemlerdendir. Pham gıdanın faz değişiminin belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleşiyor olmasının etkisini, donma noktasını donma başlangıç noktasının 1.5°C altında kabul ederek dikkate almaktadır.

Uluslar Arası Soğutma Enstitüsü tarafından geliştirilen eşitlik ile hesaplanan süreler ile deneysel veriler arasındaki fark %26.4'tür.

Pham (1986 çalışması) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen donma süreleri deneysel donma sürelerine %5.8 ile en yaklaşık ikinci sonuçları vermiştir. Pham, eşitliklerinde faz değişiminin tek bir sıcaklıkta değil, bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesinin etkilerini hesaplanan süreye dahil etmek amacıyla ortalama donma sıcaklığı tanımlamaktadır.

Lacroix ve Castaigne tarafından geliştirilen eşitlik ile elde edilen donma sürelerinin deneysel donma sürelerinden farkı %6.7 olarak hesaplanırken Salvadori ve Mascheroni için bu değer %6.9'dur.

López ve Hallström eşitliğinin kullanılmasıyla hesaplanan donma sürelerinin deneysel veriler ile arasındaki fark %32.3 olarak bulunmuştur.

Yarı-analitik/ampirik tahmin yöntemlerin kullanılmasıyla tahmin edilen donma zamanının deneysel verilerden farklı olması deneysel hatalara, seçilen eşitliğin o aralıklarda uygulanabilir olmasına bağlı olabileceği gibi gıdanın ısı ve fiziksel özelliklerinin suyun hal değişiminden ötürü farklı sıcaklıklarda değişmesi ve tam değerinin belirlenememesinden kaynaklanabilmektedir. Ancak bunu yanı sıra yarı_analitik/ampirik tahmin yöntemlerinin ortak zayıflıklarının yalnızca belirli deneysel koşullar için doğruluklarının yüksek olması ve farklı son sıcaklıklarda gerçek değerlerden sapma görülebilmesi ve geniş kullanılamamaları gösterilebilir.

Kullanışlı bir donma zamanı tahmin yönteminin öncelikle doğruluğunun yüksek olması beklenmektedir. Bunun yanı sıra tüm deneysel verilere uygun, kullanımının kolay ve farklı başlangıç ve bitiş sıcaklıkları gibi çeşitli koşullar ve farklı ısı özellikler için geçerli olması ve minimum veri ile hesaplama yapabilmesi geniş aralıklarda kolaylıkla uygulanabilir olmasını sağlayacak diğer etkenlerdir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, farklı son sıcaklığa soğutma sürelerinin hesaba katıldığı deneysel çalışmalara, farklı şekillerdeki, farklı ısı özelliklere sahip gıdaların çeşitli koşullardaki donma sürelerinin hesaplanabilmesini sağlayan basitleştirilmiş eşitliklerin geliştirilmesine olan ihtiyaçları karşılaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akın C.**, 1998. Java 1.1. Uygulama geliştirme Kılavuzu. Alfa Basım Yayım Dağıtım, İstanbul.
- Altıntaş A. B.**, 2003. Java ile Nesneye Yönelik Programlama. Java ve Yazılım Tasarımı. Papatya Yayıncılık Eğitim. <http://www.kodcu.com/pdf/Bolum-1.pdf>
- Anonim**, 2004. Learn Java 1.1 Programming. Soft Lookup Corp. <http://www.softlookup.com/tutorial/java/index.asp>.
- Anonim**, 2007a. Java Teknolojisi ile İlgili Bilgi Edinin. <http://java.com/tr/about/>
- Anonim**, 2007b. Code Samples and Apps. Sun Microsystems. <http://java.sun.com/applets/>
- Anonim**, 2007c. Trail: Learning the Java Language: Table of Contents. Sun Microsystems. <http://java.sun.com/docs/books/tutorial/java/TOC.html>.
- ASHRAE**, 1993. Cooling and freezing times of foods. ASHRAE Handbook of Fundamentals (SI edn). ASHRAE, Atlanta, ch7.
- Becker, B.R. and Fricke B.A.**, 1999. Evaluation of semi-analytical/emprical freezing time estimation methods part I: regularly shaped food items, *HVAC&R Research*, **5**, 149-167.
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.**, 1977. A comparison of analytical and numerical methods of predicting the freezing times of foods, *Journal of Food Science*, **42**, 1390-1395.
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.**, 1979a. A comparison of methods for predicting the freezing times of cylindrical and spherical foodstuffs, *Journal of Food Science*, **44**, 958-963.
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.**, 1979b. Prediction of freezing times for foods in rectangular packages, *Journal of Food Science*, **44**, 964-971.
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.**, 1982. Freezing time prediction for foods –a simplified procedure, *Revue Internationale du Froid*, **5**, 134-140.
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.**, 1984. Assessment of freezing time prediction methods, *Journal of Food Science*, **49**, 1034-1042.

- Cleland, D.J., Cleland, A.C. and Earle, R.L.,** 1987. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by simple formulae part 1: regular shapes, *International Journal of Refrigeration*, **10**, 156-164.
- Delgado, A.E. and Sun, D.,** 2001. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes – a review, *Journal of Food Engineering*, **47**, 157-174.
- Devres, Y.O.,** 1991. An analytical model for thermophysical properties of frozen foodstuffs, *XVIIIth International Congress of Refrigeration*, Montreal, Kanada, 10-12 Ağustos. Paper no :367.
- Earle, R.L and Earle, M.D.,** 2004. Unit Operations in Food Processing, Web Edition. The New Zealand Institute of Food Science & Technology (Inc.), chapter 6, <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/index.htm>.
- Heldman, D.R. and Singh, R.P.,** 1989. Gıda İşleme Mühendisliği, İnkılap Kitabevi, İstanbul. pp. 162, 182.
- Hung, Y.C. and Thompson, D.R.,** 1983. Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method, *Journal of Food Science*, **48**, 555-560.
- Ilicali, C., Teik, T.H. and Shian, L.P.,** 1999. Improved formulations of shape factors for the freezing and thawing time prediction of foods, *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **32**, 312-315.
- Lacroix, C. and Castaigne, F.,** 1987a. Simple method for freezing time calculations for infinite flat slabs, infinite cylinders and spheres, *Canadian Institute of Food Science and Technology*, **20**, 251-259.
- Lacroix, C. and Castaigne, F.,** 1987b. Simple method for freezing time calculations for brick and cylindrical shaped food products, *Canadian Institute of Food Science and Technology*, **20**, 342-349.
- Lacroix, C. and Castaigne, F.,** 1988. Freezing time calculation for products with simple geometrical shapes, *Journal of Food Process Engineering*, **10**, 81-104.
- LeBlanc, D.I., Kok, R. and Timbers, G.E.,** 1990. Freezing of a parallelepiped food product. Part 2. Comparison of experimental and calculated results, *Revue Internationale du Froid*, **13**, 379-392.
- López-Leiva, M. and Hallström, B.,** 2003. The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions, *Journal of Food Engineering*, **58**, 267-275.
- Lyshevski, S.E.,** 2003. Engineering and Scientific Computations Using MATLAB, John Wiley&Sons, Inc., Kanada.

- Pham, Q.T.**, 1984. Extension to Planck's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes, *Revue Internationale du Froid*, **7**, 377-383.
- Pham, Q.T.**, 1986. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs, *Journal of Food Technology*, **21**, 93-99.
- Pham, Q.T.**, 2002. Calculation of processing time and heat load during food refrigeration, *Food for Thought – Cool AIRAH Conference*, Sydney, Australia, May 2002.
- Salvadori, V.O.**, 1994. Transferencia de calor durante la congelación, el almacenamiento y la descongelación de alimentos, *Tesis doctoral*, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Salvadori, V.O., De Michelis, A. and Mascheroni, R.H.**, 1996. Freezing of strawberry pulp in large containers: experimental determination and prediction of freezing times, *International Journal of Refrigeration*, **19**, 87-94.
- Salvadori, V.O., De Michelis, A. and Mascheroni, R.H.**, 1997. Prediction of freezing times for regular multi-dimensional foods using simple formulae, *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, **30**, 30-35.
- Salvadori, V.O. and Mascheroni, R.H.**, 1991. Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method, *Journal of Food Engineering*, **13**, 67-78.
- Salvadori, V.O., Reynoso, R.O., De Michelis, A. and Mascheroni, R.H.**, 1987. Freezing time predictions for regular shaped foods: a simplified graphical method, *Revue Internationale du Froid*, **10**, 357-361.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R.**, 2001. Introduction to Food Engineering, Academic Press, London. ch:7.
- Senyurt B.**, 2007. Java ile kahve molası makaleleri. <http://www.bsenyurt.com/Java24.aspx>.

EKLER

EK A.

Tablo A.1: Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri

Eşitlik Adı	Tarih	Ön soğuma Eşitliği	Donma Eşitliği	Son Soğuma Eşitliği
Rjutov	1936	$t(T_i) = t(-1C^\circ)0.0053T_i$	$t = \frac{\Delta H_d}{(T_d - T_c)} \frac{V}{A} \left(\frac{1}{h} + \frac{d}{4k_d} \right)$	$t_{son} = \frac{0.233n}{\alpha} d \left(d + \frac{4k_d}{h} \right) \left(\ln \frac{T_d - T_c}{T_s - T_c} - 0.0913 \right)$
Plank	1941	$t_{ilk} = t \cdot 0.0053(T_i - T_d)$	$t = \frac{\Delta H_d}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right)$	
Rjutov&Plank	1941	$t = t_{plank} [1 + Rj(T_i - T_d)] + 0.266 \left(\frac{d^2}{\alpha} \right) \frac{1}{Bi^{0.05}} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) \left(\ln \frac{T_d - T_c}{T_s - T_c} - 0.0913 \right)$		
Nagaoka ve diğ.	1955	$t = \frac{\Delta H_d'}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right)$	$\Delta H_d' = [1 + 0.00445(T_i - T_d)] [C_s(T_i - T_d) + L + C_d(T_d - T_s)]$	

Tablo A.1: Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri (Devamı)

Levy	1958	$t = \frac{\Delta H_p}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) [1 + 0.008(T_i - T_d)]$
Cowell	1969	$\frac{Fo}{Ko} = D \left[\frac{1}{Bi} + G \right], Ko = 1 / Ste, Ste = C_d(T_d - T_c) / \Delta H, G = R / P, D = P$
Bäckström	1970	$t = t_{plank} \left[1 + 0.0017(T_d - T_c) \ln \left(\frac{T_i - T_c}{T_s - T_c} \right) \right]$
Mellor	1976	$t = [0.5C_s(T_i - T_d) + L + 0.5C_d(T_d - T_s)] \cdot \frac{1}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right)$
Cleland ve Earle	1977-79-82	$t = \frac{\Delta H_{10}}{(T_d - T_c)E} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right)$ $P = 0.5 \left[1.026 + 0.5808Pk + Ste \left(0.2206Pk + \frac{0.0182}{Bi} + 0.1050 \right) \right]$ $R = 0.125 [1.202 + Ste(3.410Pk + 0.7336)]$

Tablo A.1: Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri (Devamı)

Hung ve Thompson	1983	$t = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad \Delta T = (T_d - T_c) + \frac{(T_i - T_d)^2 \frac{C_s}{2} - (T_d - T_s)^2 \frac{C_d}{2}}{\Delta H_{18}} \quad U = \Delta T / (T_d - T_c)$ $P = 0.7306 - 1.083Pk + Ste \left(15.40U - 15.43 + 0.01329 \frac{Ste}{Bi} \right)$ $R = 0.2079 - 0.2656U \cdot Ste$
Cleland ve Earle	1984	$t = \frac{\Delta H_{10}}{(T_d - T_c)E} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \left[1 - \frac{1.65Ste}{k_d} \ln \left(\frac{T_s - T_c}{T_{ref} - T_c} \right) \right] \quad \begin{aligned} P &= 0.5 \left[1.026 + 0.5808Pk + Ste \left(0.2206Pk + \frac{0.0182}{Bi} + 0.1050 \right) \right] \\ R &= 0.125 [1.202 + Ste(3.410Pk + 0.7336)] \end{aligned}$
Cleland ve Earle	1984	$t = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \left[1 - \frac{1.65Ste}{k_d} \ln \left(\frac{T_s - T_c}{T_{ref} - T_c} \right) \right] \quad \begin{aligned} P &= 0.7306 - 1.083Pk + Ste \left(15.40U - 15.43 + 0.01329 \frac{Ste}{Bi} \right) \\ R &= 0.2079 - 0.2656U \cdot Ste \end{aligned}$

Tablo A.1: Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri (Devamı)

Pham	1984	$t_1 = \frac{Q_1}{hA\Delta T_{o1}}\left(1 + \frac{Bi_1}{6}\right)$ $Q_1 = C_s(T_i - T_{od})V$ $Bi_1 = (Bi_s + Bi_d)/2$ $\Delta T_{o1} = \frac{(T_i - T_c) - (T_{od} - T_c)}{\ln\left[\frac{T_i - T_c}{T_{od} - T_c}\right]}$	$t_2 = \frac{Q_2}{hA(T_{od} - T_c)}\left(1 + \frac{Bi_2}{4}\right)$ $Q_2 = LV$ $Bi_2 = Bi_d$	$t_3 = \frac{Q_3}{hA\Delta T_{o3}}\left(1 + \frac{Bi_3}{6}\right)$ $Q_3 = C_d(T_{od} - T_{os})V$ $Bi_3 = Bi_d$ $T_{os} = T_s - \frac{T_s - T_c}{2 + \frac{4}{Bi_d}}$ $\Delta T_{o3} = \frac{(T_{od} - T_c) - (T_{os} - T_c)}{\ln\left[\frac{T_{od} - T_c}{T_{os} - T_c}\right]}$
IRR	1986		$t = \frac{\Delta H_{d-s}}{(T_d - T_c)}\left(P\frac{d}{h} + R\frac{d^2}{k_d}\right) = \frac{L + C_d(T_d - T_c)}{(T_d - T_c)}\left(P\frac{d}{h} + R\frac{d^2}{k_d}\right)$	
Pham	1986	$t = \frac{V}{hA}\left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2}\right)\left(1 + \frac{Bi_d}{4}\right)$ $\Delta H_1 = C_s(T_i - T_{od}) \quad \Delta T_1 = \frac{T_i + T_{od}}{2} - T_c$ $\Delta H_2 = L + C_d(T_{od} - T_s) \quad \Delta T_2 = T_{od} - T_c \quad T_{od} = 1.8 + 0.263T_s + 0.105T_c$		

Tablo A.1: Donma Zamanı Hesaplama Eşitlikleri (Devamı)

Lacroix ve Castaigne	1987	$t_1 = f_1 \log \left[j_1 \frac{T_c - T_i}{T_c - T_d} \right]$	$t_2 = \frac{Ld^2}{(T_d - T_c)k_c} \left(\frac{P}{2Bi_c} + R \right)$	$t_3 = f_3 \log \left[j_3 \frac{T_c - T_d}{T_c - T_s} \right]$
Salvadori ve Mascheroni	1991	$t = \frac{l^2}{\alpha_s} (aT_s + b) \left(\frac{1}{Bi_{ls}} + c \right) (1 + T_i)^n (-T_c - 1)^{-m}$		
López-Leiva ve Hallström	2003	$t = \frac{Ld}{h(T_d - T_c)} P \left(1 + \frac{Bi}{3.7} \right)$	$R = P / 3.7$	$P = V / Ad$

EK B. ÖRNEK SORU ÇÖZÜMLERİ

B.1 Plank Eşitliği

B.1.1 Örnek soru 1

Boyutları 1m, 0.25 m, 0.6 m olan yağsız biftek, $h = 30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 5°C olan ürünün -10°C 'de dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Donmamış yağsız biftek için $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$ ve donmuş yağsız biftek için $k = 1.108 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, donma başlangıç sıcaklığı -1.75°C ve su içeriği % 74.5 olarak kabul edilebilir) (Heldman ve Singh, 1989).

Çözüm:

Suyun gizil ısısı 335 kJ/kg olduğu için %74.5 ne içeriğine sahip et için hacimsel gizli ısı,

$$L = 0.745 \cdot 335 \cdot 1050 = 262053.75 \text{ kJ/m}^3 = 262053.75 \times 10^3 \text{ J/m}^3.$$

P ve R değerlerinin saptanabilmesi için tuğla şeklindeki ürün için β_1 ve β_2 değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\beta_1 = \frac{0.6}{0.25} = 2.4$$

$$\beta_2 = \frac{1}{0.25} = 4$$

Bu değerler ile Şekil 2.3'den $P = 0.3$ ve $R = 0.085$ olarak bulunur.

Verilen diğer değişkenler eşitlikte yerlerine yerleştirildiğinde donma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

$$t = \frac{262053.75 \times 10^3}{(-1.75 - (-30))} \left[\frac{0.3(0.25)}{30} + \frac{0.085(0.25)^2}{(1.108)} \right]$$

$$t = 67667.149 \text{ sn. (18.79 saat).}$$

B.1.2 Örnek soru 2

Levha şeklinde 10 cm kalınlığında ve levhanın iki yüzü de 1mm kalınlığındaki karton ambalajla kaplı et, -34°C sıcaklığında plaka tipi dondurucuda dondurulacaktır. Plaka tipi dondurucu için yüzey ısı transfer katsayısı 600 J/m²s°C, karton ambalaj için ısı iletim katsayısı 0.06 J/m.s.°C ve donmuş etin ısı iletim katsayısı 1.6 J/m.s.°C, gizli ısı 2.56 · 10⁵ J/kg ve yoğunluğu 1090 kg/m³ olup et -2°C’de donmaktadır. Donma süresini hesaplayınız.(Earle ve Earle, 2004).

Çözüm:

$$\text{Karton ambalajın iletimi} = x/k = 0.001/0.06 = 0.0166$$

$$1/h_s = x/k + 1/h = 0.0166 + 1/600 = 0.01826$$

$$h_s = 54.764 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$$

Plaka tipi dondurucuda levha kalınlığı dikkate alınacak tek değerdir. Bu nedenle sonsuz levha gibi düşünülerek Plank eşitliğindeki sabitler P ve R sırasıyla $1/2$ ve $1/8$ olarak alınır.

Değerleri eşitlikte yerlerine yerleştirilerek donma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

$$t = \frac{2.56 \cdot 10^5 \cdot 1090}{(-2 - (-34))} \left[\frac{0.5 \cdot (0.1)}{54.764} + \frac{0.125 \cdot (0.1)^2}{(1.6)} \right]$$

$$t = 14773.86 \text{ sn. (4.1 saat).}$$

B.1.3 Örnek soru 3

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla $1/2$ ve $1/8$ ’dir.

$$t = \frac{209000000}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.125 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 3932.81 \text{ sn.}$$

B.2 Rjutov&Plank Eşitliği

B.2.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Rjutov eşitliğinin Plank tarafından düzenlenmesi ile ve Rjutov’un son soğuma için geliştirdiği bağıntıyla toplam donma süresinin hesaplanması için kullanılabilen (2.15) numaralı eşitlik yardımıyla donma süresi hesaplanabilmektedir.

$$t = t_{plank} \left[1 + Rj(T_i - T_d) \right] + 0.266 \left(\frac{d^2}{\alpha} \right) \frac{1}{Bi^{0.05}} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) \left(\ln \frac{T_d - T_c}{T_s - T_c} - 0.0913 \right) \quad (2.15)$$

Toplam donma süresinin hesaplanabilmesi için öncelikle Plank eşitliği (8) kullanılarak donma için geçmesi gereken süre bulunmalıdır.

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8’dir.

$$t = \frac{209000000}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.125 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 3932.81 \text{ sn.}$$

Rjutov eşitliğinde yer alan Rjutov katsayısı olarak López-Leiva ve Hallström’ün Hung ve Thompson’ın 1983 ve Pham ve Willix’in 1990 yıllarındaki çalışmalarından aldıkları verilerle bulduğu 0.026 alınarak, Plank eşitliği ile hesaplanan donma süresi ve veriler Rjutov eşitliğinde yerlerine konduğunda donma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$t = 393281 \left[1 + 0.026(30 - (-1)) \right] + 0.266 \left(\frac{0.0485^2}{0.000000815} \right) \frac{1}{2.81^{0.05}} \left(1 + \frac{4}{2.81} \right) \cdot \left(\ln \frac{-1 - (-25.4)}{(-18) - (-25.4)} - 0.0913 \right)$$

$$t = 7752.96 \text{ sn.}$$

$$t = 2.15 \text{ saat.}$$

B.3 Nagaoka ve Diğ. Eşitliği

B.3.1 Örnek soru

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Nagaoka ve diğ. tarafından geliştirilen (2.16) numaralı eşitlikte kullanılmak üzere (2.17) numaralı eşitlik ile entalpi bulunur.

$$t = \frac{\Delta H_d'}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{4k_d} \right) \quad (2.16)$$

$$\Delta H_d' = [1 + 0.00445(T_i - T_d)] [C_s(T_i - T_d) + L + C_d(T_d - T_s)] \quad (2.17)$$

$$\Delta H_d' = [1 + 0.00445(30 - (-1))] [3650000(30 - (-1)) + L + 1900000(T_d - T_s)]$$

$$\Delta H_d' = 386049537.5 \text{ J/m}^3$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8’dir. Veriler ve bulunan entalpi değeri (2.16) numaralı eşitlikte yerine konarak donma süresi hesaplanır.

$$t = \frac{386049537.5}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.125 \cdot 0.0485^2}{4 \cdot 1.55} \right)$$

$$t = 7264.40 \text{ sn.}$$

$$t = 2.01 \text{ saat.}$$

B.4 Levy Eşitliği

B.4.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Levy tarafından geliştirilen (2.18) numaralı eşitlik kullanılarak soru çözülebilir.

$$t = \frac{\Delta H_p}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) [1 + 0.008(T_i - T_d)] \quad (2.18)$$

Eşitlikte yer alan toplam entalpi aşağıdaki şekilde basitçe hesaplanabilir.

$$\Delta H_p = C_s(T_i - T_d) + L + C_d(T_d - T_s)$$

$$\Delta H_p = 3650000(30 - (-1)) + 209000000 + 1900000(-1 - (-10))$$

$$\Delta H_p = 339250000 \text{ J} / \text{m}^3$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8’dir. Veriler ve bulunan entalpi değeri (2.18) numaralı eşitlikte yerine konarak donma süresi hesaplanır.

$$t = \frac{339250000}{(-1 - (-24.5))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.1250 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right) [1 + 0.008(30 - (-1))]$$

$$t = 7966.94 \text{ sn.}$$

$$t = 2.21 \text{ saat.}$$

B.5 Cowell Eşitliği

B.5.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Cowell'ın geliştirdiği boyutsuz eşitlik aşağıda gösterilmektedir.

$$\frac{Fo}{Ko} = D \cdot \left[\frac{1}{Bi} + G \right] \quad (2.19)$$

Eşitlikte; Fo Fourier sayısı, $Fo = \alpha t / d^2$; Ko Kossovitch sayısı, $1/Ste$, $D = P$ ve $G = R / P$ 'dir. Eşitliği açık şekliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\left(\frac{\alpha t}{d^2} \right)}{\left(\frac{1}{Ste} \right)} = P \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{hd}{k} \right)} + \frac{R}{P} \right] \quad (2.19a)$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla $1/2$ ve $1/8$ 'dir.

$$Ste = C_s (T_d - T_c) / \Delta H$$

Eşitlikte yer alan entalpi aşağıdaki şekilde basitçe hesaplanabilir.

$$\Delta H = C_s (T_i - T_d) + L + C_d (T_d - T_s)$$

$$\Delta H = 3650000(30 - (-1)) + 209000000 + 1900000(-1 - (-10))$$

$$\Delta H = 339250000 \text{ J/m}^3$$

$$Ste = 1900000(-1 - (-24.5)) / 339250000$$

$$Ste = 0.136$$

$$\alpha = \frac{k_d}{C_d} = \frac{1.55}{1900000} = 8.15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

(2.19a) numaralı eşitlikte veriler yerine konduğunda çözüme ulaşılır.

$$t = 6389.76 \text{ saniye}$$

$$t = 1.8 \text{ saat}$$

B.6 Bäckström Eşitliği

B.6.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1'de verilmektedir).

Çözüm:

Bäckström tarafından Plank Eşitliği'nin modifiye edilmesiyle oluşturulmuş ve toplam donma süresini hesaplayan eşitlik (2.20) numara ile gösterilmiştir.

$$t = t_{Plank} \times \left[1 + 0.017 \times (T_d - T_c) \times \ln \frac{(T_i - T_c)}{T_s - T_c} \right] \quad (2.20)$$

Toplam donma süresinin hesaplanabilmesi için öncelikle Plank eşitliği (2.8) kullanılarak donma için geçmesi gereken süre bulunmalıdır.

$$t = \frac{L}{(T_d - T_c)} \left(\frac{Pd}{h} + \frac{Rd^2}{k_d} \right) \quad (2.8)$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8'dir.

$$t = \frac{209000000}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.125 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$
$$t = 3932.81 \text{ sn.}$$

Plank eşitliği ile hesaplanan donma süresi ve soruda verilen diğer veriler (2.20) numaralı eşitlikte yerine konulduğunda toplam donma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$t = 3932.81 \times \left[1 + 0.017 \times (-1 - (-25.4)) \times \ln \frac{(30 - (-25.4))}{-10 - (-25.4)} \right]$$
$$t = 4141.65 \text{ sn.}$$
$$t = 1.2 \text{ saat.}$$

B.7 Mellor Eşitliği

B.7.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1'de verilmektedir).

Çözüm:

Mellor, Plank eşitliğinde yer alan L hacimsel gizli ısı yerine tanımladığı entalpi değişimi ile ön soğuma ve son soğuma periyotlarını da içeren (2.21) numaralı donma süresi eşitliğini geliştirmiştir.

$$t = [0.5C_s(T_i - T_d) + L + 0.5C_d(T_d - T_s)] \cdot \frac{1}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) \quad (2.21)$$

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8'dir.

(2.21) numaralı eşitlikte veriler yerine konduğunda çözüme ulaşılır.

$$t = [0.5 \cdot 3650000 (30 - (-1)) + 209000000 + 0.5 \cdot 1900000 ((-1) - (-30))] \cdot \frac{1}{(-1 - (-25.4))} \left(0.5 \cdot \frac{0.0485}{90} + 0.125 \cdot \frac{0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 5158.29 \text{ saniye}$$

$$t = 1.4 \text{ saat}$$

B.8 Cleland ve Earle Eşitliği

B.8.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1'de verilmektedir).

Çözüm:

Cleland ve Earle'ün yönteminde gıda donma süresi Plank eşitliği (2.24) numaralı eşitlikte görüldüğü şekliyle modifiye edilmiştir. Geliştirdikleri eşitlikte, Plank'in orijinal geometrik faktörleri P ve R yerine, P_2 ve R_2 geometrik faktörleri, Plank eşitliğindeki gizli ısı L yerine, gıdanın T_d donma sıcaklığı ile -10°C olarak kabul edilen son merkez sıcaklığı arasındaki hacimsel entalpi değişimi ΔH_{10} ile hesaplama yapılmaktadır. P_2 ve R_2 geometrik faktörleri (2.22,2.23) eşitlikleri ve Tablo 2.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_1 = P \left[1.026 + 0.5808 Pk + Ste \left(0.2296 Pk + \frac{0.0182}{Bi} + 0.1050 \right) \right] \quad (2.22)$$

$$R_1 = R [1.202 + Ste(3.410 Pk + 0.7336)] \quad (2.23)$$

$$t = \frac{\Delta H_{10}}{(T_d - T_c)} \left(\frac{P_2 d}{h} + \frac{R_2 d^2}{k_d} \right) \quad (2.24)$$

Öncelikle eşitlikte yer alan P_2 ve R_2 geometrik faktörleri ve ΔH_{10} hesaplanır.

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8'dir.

Plank, Stefan ve Biot sayıları hesaplanarak (2.22,2.23) numaralı eşitlikte yerine konur.

$$\Delta H_{10} = L + C_d (T_d - (-10)) = 209000000 + 3650000(-1 - (-10)) = 226100000 \text{ J/m}^3$$

$$Pk = \frac{C_s \cdot (T_i - T_d)}{\Delta H_{10}} = \frac{3650000 \cdot (30 - (-1))}{226100000} = 0.500$$

$$Ste = \frac{C_d \cdot (T_d - T_c)}{\Delta H_{10}} = \frac{1900000 \cdot (-1 - (-25.4))}{226100000} = 0.205$$

$$Bi = \frac{h \cdot d}{k_d} = \frac{90 \cdot 0.0485}{1.55} = 2.816$$

$$P_1 = 0.5 \left[1.026 + (0.5808 \cdot 0.500) + 0.205 \left((0.2296 \cdot 0.500) + \frac{0.0182}{2.816} + 0.1050 \right) \right] = 0.681$$

$$R_1 = 0.125 [1.202 + 0.205 ((3.410 \cdot 0.500) + 0.7336)] = 0.212$$

Tablo 2.2'den levha şeklindeki gıdalar için;

$$P_2 = P_1$$

$$R_2 = R_1$$

olduğu görülmektedir. Bu durumda;

$P_2 = 0.681$ ve $R_2 = 0.212$ olarak bulunur.

(2.24) numaralı eşitlik yardımıyla donma süresi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$t = \frac{226100000}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.681 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.212 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 6395.65 \text{ saniye}$$

$$t = 1.8 \text{ saat}$$

B.9 Hung ve Thompson Eşitliği

B.9.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1'de verilmektedir).

Çözüm:

Hung ve Thompson'ın sonsuz levha için geliştirdikleri eşitlikte (2.30), hacimsel entalpi değişimi ΔH_{18} , gıdanın ilk sıcaklığı ile donma ortamının ortalama ağırlıklı sıcaklık farkı ve Plank eşitliğindeki P ve R geometrik faktörleri yerine P_3 ve R_3 geometrik faktörleri kullanılmaktadır. Ortalama sıcaklık farkı ΔT , (2.26) numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. P_3 ve R_3 geometrik faktörlerinin hesaplanabilmesi için (2.27,2.28 ve 2.29) numaralı eşitlikler kullanılmaktadır.

$$\Delta T = (T_d - T_c) + \frac{(T_i - T_d)^2 \frac{C_s}{2} - (T_d - T_s)^2 \frac{C_d}{2}}{\Delta H_{18}} \quad (2.26)$$

$$U = \Delta T / (T_d - T_c) \quad (2.27)$$

$$P_3 = 0.7306 - 1.083Pk + Ste \left(15.40U - 15.43 + 0.01329 \frac{Ste}{Bi} \right) \quad (2.28)$$

$$R_3 = 0.2079 - 0.2656U \cdot Ste \quad (2.29)$$

$$t = \frac{\Delta H_{18}}{\Delta T} \left(\frac{P_3 d}{h} + \frac{R_3 d^2}{k_d} \right) \quad (2.30)$$

Öncelikle eşitlikte yer alan P_3 ve R_3 geometrik faktörleri ve ΔH_{18} hesaplanır.

Levha şeklindeki gıdalar için P ve R geometrik faktörleri sırasıyla 1/2 ve 1/8'dir.

Plank, Stefan ve Biot sayıları hesaplanarak (2.28,2.29) numaralı eşitlikte yerine konur.

$$\begin{aligned} \Delta H_{18} &= C_s (T_i - T_d) + L + C_d (T_d - (-18)) \\ &= 3650000 \cdot (30 - (-1)) + 209000000 + 1900000 \cdot (-1 - (-18)) = 354450000 \text{ J/m}^3 \end{aligned}$$

$$Pk = \frac{C_s \cdot (T_i - T_d)}{\Delta H_{18}} = \frac{3650000 \cdot (30 - (-1))}{354450000} = 0.319$$

$$Ste = \frac{C_d \cdot (T_d - T_c)}{\Delta H_{18}} = \frac{1900000 \cdot (-1 - (-25.4))}{354450000} = 0.130$$

$$Bi = \frac{h \cdot d}{k_d} = \frac{90 \cdot 0.0485}{1.55} = 2.816$$

$$\Delta T = (-1 - (-25.4)) + \frac{(30 - (-1))^2 \frac{3650000}{2} - (-1 - (-10))_s^2 \frac{1900000}{2}}{354450000} = 29.130$$

$$U = 29.13 / (-1 - (-25.4)) = 1.193$$

$$P_3 = 0.7306 - (1.083 \cdot 0.319) + 0.130 \left((15.40 \cdot 1.193) - 15.43 + 0.01329 \frac{0.130}{2.816} \right) = 0.771$$

$$R_3 = 0.2079 - (0.2656 \cdot 1.193 \cdot 0.130) = 0.166$$

$$t = \frac{354450000}{29.130} \left(\frac{0.771 \cdot 0.0485}{90} + \frac{1.166 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 8132.21 \text{ saniye}$$

$$t = 2.3 \text{ saat}$$

B.10 Pham 1984 Eşitliği

B.10.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Yöntem, Plank eşitliğinin modifiye edilmesi ile elde edilmiştir (2.32). Pham eşitliğinde “ortalama donma sıcaklığı” olarak tanımlanan gıdanın ilk donma sıcaklığının 1.5°C altındaki sıcaklık değeri kullanılarak donma sürecinin belirli bir sıcaklık aralığında gerçekleştiği hesaba katılmaktadır.

$$t_i = \frac{Q_i}{hA \Delta T_{oi}} \left(1 + \frac{Bi_i}{k_i} \right); \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.32)$$

Eşitlikte yer alan t_1 ön soğuma, t_2 faz değişim ve t_3 son soğuma sürelerini ifade etmektedir, diğer değişkenler Tablo 2.3’de gösterilmektedir.

$$t_1 = \frac{Q_1}{hA \Delta T_{o1}} \left(1 + \frac{Bi_1}{6} \right)$$

$$\Delta T_{o1} = \frac{(30 - (-25.4)) - ((-1 - 1.5))}{\ln \left[\frac{30 - (-25.4)}{(-1 - 1.5) - (-25.4)} \right]} = 36.787$$

$$Bi_1 = (Bi_s + Bi_d) / 2$$

$$Bi_s = \frac{h \cdot d}{k_s} = \frac{90 \cdot 0.0485}{0.51} = 8.558$$

$$Bi_d = \frac{h \cdot d}{k_d} = \frac{90 \cdot 0.0485}{1.55} = 2.816$$

$$Bi_1 = (8.558 + 2.816) / 2 = 5.687$$

$$t_1 = \frac{V \cdot C_s \cdot (T_i - T_{od})}{A \cdot h \cdot \Delta T_{o1}} \left(1 + \frac{Bi_1}{6} \right)$$

$$t_1 = \frac{0.0485}{2} \cdot \frac{3650000 \cdot (30 - (-1 - 1.5))}{90 \cdot 36.787} \left(1 + \frac{5.687}{6} \right) = 1692.42 \text{ sn.}$$

$$t_2 = \frac{Q_2}{hA(T_{od} - T_c)} \left(1 + \frac{Bi_2}{4} \right)$$

$$t_2 = \frac{VL}{Ah(T_{od} - T_c)} \left(1 + \frac{Bi_2}{4} \right)$$

$$Bi_2 = Bi_d = 2.816$$

$$t_2 = \frac{0.0485}{2} \cdot \frac{209000000}{90 \cdot ((-1 - 1.5) - (-25.4))} \left(1 + \frac{2.816}{4} \right)$$

$$t_2 = 4190.42 \text{ sn.}$$

$$t_3 = \frac{Q_3}{hA\Delta T_{o3}} \left(1 + \frac{Bi_3}{6} \right)$$

$$Bi_3 = Bi_d = 2.816$$

$$T_{os} = T_s - \frac{T_s - T_c}{2 + \frac{4}{Bi_d}}$$

$$T_{os} = -10 - \frac{-10 - (-25.4)}{2 + \frac{4}{2.816}} = -14.502$$

$$\Delta T_{o3} = \frac{(T_{od} - T_c) - (T_{os} - T_c)}{\ln \left[\frac{T_{od} - T_c}{T_{os} - T_c} \right]}$$

$$\Delta T_{o3} = \frac{((-1 - 1.5) - (-25.4)) - (-14.502 - (-25.4))}{\ln \left[\frac{(-1 - 1.5) - (-25.4)}{-14.502 - (-25.4)} \right]} = 16.162$$

$$t_3 = \frac{VC_d(T_{od} - T_{os})}{Ah\Delta T_{o3}} \left(1 + \frac{Bi_d}{6} \right)$$

$$t_3 = \frac{0.0485}{2} \cdot \frac{1900000((-1 - 1.5) - 14.502)}{90 \cdot 16.162} \left(1 + \frac{2.816}{6} \right)$$

$$t_3 = 558.601 \text{ sn.}$$

$$\text{Toplam süre} = t_1 + t_2 + t_3$$

$$\text{Toplam} = 6441.450 \text{ sn.}$$

$$\text{Toplam} = 1.8 \text{ saat.}$$

B.11 Uluslararası Soğutma Enstitüsü Eşitliği

B.11.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Uluslar arası Soğutma Enstitüsü tarafından önerilen (2.33) numaralı eşitlikte Plank eşitliğinde yer alan L hacimsel gizli ısı yerine ilk donma sıcaklığından son soğutulan sıcaklığa kadar olan entalpi değişimi kullanılmaktadır.

$$t = \frac{\Delta H_{d-s}}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) = \frac{L + C_d (T_d - T_c)}{(T_d - T_c)} \left(P \frac{d}{h} + R \frac{d^2}{k_d} \right) \quad (2.33)$$

$$t = \frac{209000000 + 1900000 \cdot (-1 - (-25.4))}{(-1 - (-25.4))} \left(\frac{0.5 \cdot 0.0485}{90} + \frac{0.125 \cdot 0.0485^2}{1.55} \right)$$

$$t = 4254.59 \text{ sn.}$$

$$t = 1.2 \text{ saat.}$$

B.12 Pham 1986 Eşitliği

B.12.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Pham'ın 1986 yılında geliştirdiği eşitlik (2.34), ön soğuma, faz değişim ve son soğuma periyotlarını içerir. “Ortalama donma sıcaklığı” için son sıcaklığa ve ortam sıcaklığına bağlı olarak (2.35) numaralı eşitlikte gösterildiği şekilde bir bağıntı kurulmuştur. Donma süresinin (2.34) numaralı eşitlikle hesaplanması için (2.35-2.39) numaralı formüller kullanılır.

$$t = \frac{V}{hA} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(1 + \frac{Bi_d}{4} \right) \quad (2.34)$$

$$T_{od} = 1.8 + 0.263T_s + 0.105T_c \quad (2.35)$$

$$\Delta H_1 = C_s (T_i - T_{od}) \quad (2.36), (2.37)$$

$$\Delta H_2 = L + C_d (T_{od} - T_s)$$

$$\Delta T_1 = \frac{T_i + T_{od}}{2} - T_c \quad (2.38)$$

$$\Delta T_2 = T_{od} - T_s \quad (2.39)$$

$$T_{od} = 1.8 + (0.263 \cdot (-10)) + (0.105 \cdot (-25.4)) = -3.497$$

$$\Delta H_1 = C_s (T_i - T_{od}) = 3650000 \cdot (30 - (-3.497)) = 122264050 \text{ J/m}^3$$

$$\Delta H_2 = L + C_d (T_{od} - T_s) = 209000000 + 1900000 \cdot (-3.497 - (-10))$$

$$= 221355700 \text{ J/m}^3$$

$$\Delta T_1 = \frac{T_i + T_{od}}{2} - T_c = \frac{30 - 3.497}{2} - (-25.4) = 38.651$$

$$\Delta T_2 = T_{od} - T_c = -3.497 - (-25.4) = 21.903$$

$$t = \frac{0.0485}{2 \cdot 90} \left(\frac{122264050}{38.651} + \frac{221355700}{21.903} \right) \left(1 + \frac{90 \cdot 0.0485}{4 \cdot 1.55} \right) = 6092550 \text{ sn.}$$

$$t = 1.7 \text{ saat.}$$

B.12 Lacroix ve Castaigne Eşitliği

B.12.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

Lacroix ve Castaigne tarafından geliştirilen eşitlikte ön soğuma, son soğuma ve faz değişim evreleri (2.41, 2.42 ve 2.43) numaralı eşitliklerle gösterilmektedir.

Ön soğuma için:

$$t_1 = f_1 \log \left[j_1 \frac{T_c - T_i}{T_c - T_d} \right] \quad (2.41)$$

Son soğuma için:

$$t_3 = f_3 \log \left[j_3 \frac{T_c - T_d}{T_c - T_s} \right] \quad (2.42)$$

Faz değişimi için:

$$t_2 = \frac{Ld^2}{(T_d - T_c)k_c} \left(\frac{P_4}{2Bi_c} + R_4 \right) \quad (2.43)$$

Eşitliklerde yer alan f ve j değerleri lavha şeklindeki gıdalar için Tablo 2.4 kullanılarak hesaplanmaktadır. Tablo 2.4 incelendiğinde ön soğumadan önce son soğuma ile ilgili f ve j değerlerinin hesaplanması gerektiği görülecektir.

f_3 ve j_3 faktörleri, $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_c kullanılarak bulunan Biot sayısı, Bi_c ile hesaplanmaktadır. Benzer olarak f_3 hesaplanırken $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, α_c kullanılmaktadır.

Örnekte verilen $k_d=1.55\text{W/mK}$ ve $C_d=1900000\text{ J/m}^3\text{K}$ ısı iletkenlik katsayısı ve hacimsel özgül ısının $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı ve hacimsel özgül ısı değerlerine eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca gıdanın donma başlangıç sıcaklığı olarak ortalama donma sıcaklığı alınmıştır.

$$\alpha_c = \frac{k_c}{C_s} = \frac{1.55}{1900000} = 8.15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sn}.$$

$$Bi_c = \frac{hl}{k_c} = \frac{90 \cdot 0.02425}{1.55} = 1.408$$

Tablo 2.4'den yararlanarak Biot sayısının bulunduğu aralığa göre kullanılması gereken eşitlikler aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{u^2}$$

$$j_3 = \frac{2 \sin u}{u + \sin u \cos u}$$

$$u = 0.860972 + 0.312133 \ln(Bi) + 0.007986 [\ln(Bi)]^2 - 0.016192 [\ln(Bi)]^3 - 0.001190 [\ln(Bi)]^4 + 0.000581 [\ln(Bi)]^5$$

$$u = 0.860972 + 0.312133 \ln(1.408) + 0.007986 [\ln(1.408)]^2 - 0.016192 [\ln(1.408)]^3 - 0.001190 [\ln(1.408)]^4 + 0.000581 [\ln(1.408)]^5$$

$$u = 0.968$$

$$f = \frac{\ln 10 \cdot l^2}{u^2 \cdot \alpha} = \frac{\ln 10 \cdot 0.02425}{0.968^2 \cdot 8.15 \cdot 10^{-7}} = 1772.916$$

$$j_3 = \frac{2 \sin 0.968}{0.968 + \sin 0.968 \cos 0.968} = 1.148$$

$$t_3 = 1772.916 \log \left[1.148 \frac{-25.4 - (-1 - 1.5)}{-25.4 - (-10)} \right] = 411.41 \text{ sn.}$$

f_1 ve j_1 faktörleri ortalama ısı iletkenlik katsayısı, k_r kullanılarak hesaplanan Biot sayısı, Bi_r , kullanılarak bulunmaktadır. Ortalama ısı iletkenlik katsayısı, k_r ; donmamış gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_s ile $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı, k_c 'nin ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Benzer olarak f_1 hesaplamasında ortalama ısıl difüzivite katsayısı α_r kullanılmaktadır. Ortalama ısıl difüzivite katsayısı α_r , donmamış gıdanın ısıl difüzivite katsayısı α_s ile $(T_d + T_c)/2$ sıcaklığındaki donmuş gıdanın ısı iletkenlik katsayısı α_c 'nin ortalaması olarak tanımlanmaktadır.

$$k_r = \frac{k_s + k_c}{2} = \frac{1.55 + 0.51}{2} = 1.03$$

$$\alpha_r = \frac{\alpha_s + \alpha_c}{2}$$

$$\alpha_s = \frac{k_s}{C_s} = \frac{0.51}{3650000} = 1.39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sn.}$$

$$\alpha_r = \frac{1.39 \cdot 10^{-7} + 8.15 \cdot 10^{-7}}{2} = 4.77 \cdot 10^{-7}$$

$$Bi_r = \frac{h \cdot l}{k_r} = \frac{90 \cdot 0.02425}{1.03} = 2.118$$

Tablo 2.4'den yararlanarak Biot sayısının bulunduğu aralığa göre kullanılması gereken eşitlikler aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\frac{f\alpha}{l^2} = \frac{\ln 10}{u^2}$$

$$j_3 = \frac{2 \sin u}{u + \sin u \cos u}; j_1 = j_3 \cdot \cos(0.4u)$$

$$u = 0.860972 + 0.312133 \ln(Bi) + 0.007986 [\ln(Bi)]^2 - 0.016192 [\ln(Bi)]^3 - 0.001190 [\ln(Bi)]^4 + 0.000581 [\ln(Bi)]^5$$

$$u = 0.860972 + 0.312133 \ln(2.118) + 0.007986 [\ln(2.118)]^2 - 0.016192 [\ln(2.118)]^3 - 0.001190 [\ln(2.118)]^4 + 0.000581 [\ln(2.118)]^5$$

$$u = 1.092$$

$$f = \frac{\ln 10 \cdot l^2}{u^2 \cdot \alpha} = \frac{\ln 10 \cdot 0.02425}{1.092^2 \cdot 4.77 \cdot 10^{-7}} = 2373.442$$

$$j_1 = \frac{2 \sin 1.092}{1.092 + \sin 1.092 \cos 1.092} \cdot \cos(0.4 \cdot 1.092) = 1.071$$

$$t_1 = 2373.442 \log \left[1.071 \frac{-25.4 - 30}{-25.4 - (-1 - 1.5)} \right] = 981.99 \text{ sn.}$$

Faz değişim süresinin hesaplandığı eşitlikte yer alan P_4 ve R_4 geometrik faktörleri Tablo 2.7'den bulunabilir.

$$t_2 = \frac{2090000000 \cdot 0.0485^2}{((-1 - 1.5) - (-25.4))1.55} \left(\frac{0.51233}{2 \cdot 1.408} + 0.15396 \right)$$

$$t_2 = 4652.17 \text{ sn.}$$

$$\text{Toplam donma süresi} = t_1 + t_2 + t_3$$

$$\text{Toplam süre} = 6045.58 \text{ sn.}$$

$$\text{Toplam süre} = 1.7 \text{ saat.}$$

B.13 López-Leiva ve Hallström Eşitliği

B.13.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

$$t = \frac{Ld}{h(T_d - T_c)} P \left(1 + \frac{Bi}{3.7} \right)$$
$$t = \frac{2090000000 \cdot 0.0485}{90 \cdot (-1 - (-25.4))} 0.5 \cdot \left(1 + \frac{90 \cdot 0.0485}{3.7 \cdot 1.55} \right)$$
$$t = 4064.56 \text{ sn.}$$

$$t = 1.1 \text{ saat.}$$

B.14 Salvadori ve Mascheroni Eşitliği

B.14.1 Örnek soru 1

Kalınlığı 0.0485m olan levha şeklinde yağsız biftek, $h = 90 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ olan -25.4°C sıcaklığındaki konveksiyon dondurucuda dondurulmaktadır. İlk sıcaklığı 30°C olan ürünün -10°C son sıcaklığına dondurmak için gereken süreyi hesaplayınız (Yağsız biftek için termo-fiziksel özellikler Tablo E.1’de verilmektedir).

Çözüm:

$$t = \frac{l^2}{\alpha_s} (aT_s + b) \left(\frac{1}{Bi_{ls}} + c \right) (1 + T_i)^n (-T_c - 1)^{-m} \quad (2.54)$$

Eşitlikte yer alan a, b, c, m ve n katsayıları gıdanın geometrisine göre Tablo 2.8’den bulunmaktadır.

$$\alpha_s = \frac{k_s}{C_s} = \frac{0.51}{3650000} = 1.39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sn.}$$

$$Bi_{ls} = \frac{hl}{k_s} = \frac{90 \cdot 0.02425}{0.51} = 4.279$$

$$t = \frac{0.02425^2}{1.39 \cdot 10^{-7}} \left((-1.272 \cdot (-10)) + 65.489 \right) \left(\frac{1}{4.279} + 0.184 \right) (1 + 30)^{0.096} \left(-(-25.4) - 1 \right)^{-1.070}$$

$$t = 6264.79 \text{ sn.}$$

$$t = 1.7 \text{ saat.}$$

EK D.**Tablo D.1:** Levha Şeklindeki Karlsruhe Deney Materyalinin Deneysel Donma Süreleri (Cleland ve Earle, 1977)

T_i (°C)	T_c (°C)	h (W/m ² K)	d (m)	$t_{deneyse}$ (saat)
28.0	-20.0	320	0.100	4.28
3.0	-23.0	310	0.100	3.46
3.0	-22.0	410	0.072	1.92
10.5	-24.5	330	0.072	1.82
11.0	-21.7	90	0.072	3.02
30.0	-40.0	51.9	0.072	2.62
30.0	-20.0	51.9	0.072	4.80
10.0	-40.0	51.9	0.072	2.22
10.0	-20.0	51.9	0.072	4.50
30.0	-40.0	21.6	0.072	4.74
30.0	-20.0	21.6	0.072	8.96
10.0	-40.0	21.6	0.072	4.02
10.0	-20.0	21.6	0.072	7.96
28.0	-26.7	16.7	0.072	8.50
3.0	-26.0	13.6	0.072	8.42
11.0	-21.0	410	0.0485	1.00
3.0	-23.5	360	0.0485	0.88
34.5	-22.0	90	0.0485	2.04
13.7	-24.3	90	0.0485	1.54
20.0	-30.0	30.6	0.0485	2.74
20.0	-30.0	30.6	0.0485	2.74
20.0	-30.0	30.6	0.0485	2.74
20.0	-30.0	30.6	0.0485	2.70
20.0	-30.0	30.6	0.0485	2.66
15.3	-25.3	16.7	0.0485	5.26
28.6	-29.5	13.6	0.0485	5.82
3.0	-26.0	13.6	0.0485	5.34
3.0	-19.0	430	0.025	0.34
21.6	-22.0	400	0.025	0.32
28.0	-24.0	90	0.025	0.68
11.0	-20.0	90	0.025	0.74
30.0	-40.0	51.9	0.025	0.64
30.0	-20.0	51.9	0.025	1.26
10.0	-40.0	51.9	0.025	0.56
10.0	-20.0	51.9	0.025	1.12
30.0	-40.0	21.6	0.025	1.42
30.0	-20.0	21.6	0.025	2.74
10.0	-40.0	21.6	0.025	1.26
10.0	-20.0	21.6	0.025	2.44
28.7	-26.0	16.7	0.025	2.68
3.0	-24.5	16.7	0.025	2.40
22.0	-25.3	13.6	0.025	3.10
5.8	-29.6	13.6	0.025	2.32

Tablo D.2: Levha Şeklindeki Gıdaların DeneySEL Donma Süreleri (Cleland ve Earle, 1977)

	T_i (°C)	T_c (°C)	h (W/m ² K)	d (m)	$t_{deneySEL}$ (saat)
Patates Püresi	28.0	-24.3	90.0	0.0720	3.12
	11.8	-24.9	51.9	0.0720	3.72
	18.3	-26.7	90.0	0.0485	1.58
	15.0	-25.0	21.6	0.0485	4.48
	28.4	-25.9	30.6	0.0250	1.76
	4.7	-25.9	13.6	0.0250	3.02
Yağsız Sığır Eti	28.0	-25.0	220.0	0.0720	2.32
	3.0	-23.9	51.9	0.0720	3.84
	30.0	-25.4	90.0	0.0485	1.68
	3.0	-28.4	21.6	0.0485	3.30
	28.6	-25.7	30.6	0.0250	1.54
	16.5	-28.8	16.7	0.0250	2.34

Tablo D.3: Levha Şeklindeki Çeşitli Gıdaların Deneysel Donma Süreleri (Hung ve Thompson, 1983)

	T_i (°C)	T_c (°C)	h (W/m ² K)	d (m)	$t_{deneyset}$ (dk)
Yağsız Sığır Eti	30.8	-28.0	107.0	0.0300	58.5
	17.4	-25.2	106.0	0.0480	108.3
	4.8	-20.3	104.0	0.0190	32.2
	4.3	-27.6	69.0	0.0470	104.8
	29.8	-25.8	68.0	0.0140	34.8
	17.9	-20.8	67.0	0.0360	118.0
	17.2	-30.3	8.5	0.0140	163.5
	4.8	-25.2	8.5	0.0330	390.0
	30.8	-20.7	10.5	0.0470	946.0
Patates Püresi	30.4	-30.9	108.0	0.0280	44.0
	16.8	-25.5	106.0	0.0440	88.0
	4.6	-20.0	104.0	0.0100	17.6
	4.0	-30.6	69.0	0.0460	89.8
	29.2	-26.0	68.0	0.0100	23.0
	17.5	-20.2	67.0	0.0280	88.5
	17.8	-29.6	8.5	0.0100	130.8
	4.0	-25.4	10.5	0.0320	356.3
	30.2	-20.5	10.5	0.0450	811.0
Sazan Balığı	31.3	-30.2	108.0	0.0290	49.0
	18.2	-23.9	105.5	0.0460	103.0
	5.3	-20.2	104.0	0.0120	18.2
	3.9	-28.7	68.5	0.0480	99.0
	29.9	-25.1	68.0	0.0100	27.0
	18.1	-20.1	67.0	0.0300	96.5
	17.4	-29.6	8.5	0.0100	124.8
	6.1	-25.0	8.5	0.0300	362.0
	30.4	-20.0	10.5	0.0450	869.0
Kıyma	30.6	-27.9	107.0	0.0270	48.5
	17.6	-25.0	106.0	0.0450	85.5
	5.0	-20.1	104.0	0.0150	21.8
	3.9	-30.9	69.0	0.0480	79.0
	30.2	-25.4	68.0	0.0120	30.4
	17.8	-20.3	67.0	0.0310	91.3
	17.3	-30.1	8.5	0.0110	124.5
	4.3	-25.0	8.5	0.0310	317.0
	30.3	-19.0	10.5	0.0450	885.0

Tablo D.4: Levha Şeklindeki Karlsruhe Örneğinin Deneysel Donma Süreleri (Hung ve Thompson, 1983)

T_i (°C)	T_c (°C)	h (W/m ² K)	d (m)	$t_{deneysel}$ (dk)
5.1	-19.9	9.0	0.0130	184.0
18.3	-25.0	11.5	0.0280	302.0
2.9	-30.1	9.0	0.0130	122.0
3.7	-30.1	11.0	0.0480	374.0
29.6	-30.1	11.0	0.0120	138.0
30.2	-20.4	11.0	0.0470	791.0
3.5	-29.3	108.0	0.0290	33.0
26.3	-32.4	110.0	0.0110	12.5
29.6	-29.3	108.0	0.0450	87.5
16.8	-30.9	108.0	0.0120	13.3
4.2	-29.4	108.0	0.0480	73.5
4.4	-25.7	106.0	0.0110	12.7
30.2	-20.3	104.0	0.0100	20.0
4.5	-20.0	104.0	0.0480	111.0
4.4	-20.1	104.0	0.0110	16.0
3.8	-30.6	69.0	0.0110	14.8
18.0	-25.6	68.0	0.0440	116.0
30.9	-24.9	68.0	0.0270	74.0
17.4	-20.1	67.0	0.0300	93.0
17.3	-25.0	68.0	0.0270	61.8
17.3	-24.7	68.0	0.0270	62.0
17.4	-25.2	68.0	0.0270	60.0
17.9	-25.1	68.0	0.0280	67.0

EK E.

Tablo E.1: Donma Deney Materyallerinin Termo-Fiziksel Özellikleri (Hung ve Thompson, 1983)

	Karlsruhe deney materyali*	Yağsız sığır eti	Patates püresi	Kıyma (sığır)	Sazan balığı
Donmamış haldeki gıdanın ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)	0.55	0.51	0.53	0.40	0.70
Donmuş haldeki gıdanın ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)	1.65	1.55	1.90	1.62	1.72
Donmamış haldeki gıdanın özgül ısısı (J/m ³ K)	3.71·10 ⁶	3.65·10 ⁶	3.66·10 ⁶	3.38·10 ⁶	3.58·10 ⁶
Donmuş haldeki gıdanın özgül ısısı (J/m ³ K)	1.90·10 ⁶	1.90·10 ⁶	1.95·10 ⁶	2.20·10 ⁶	2.22·10 ⁶
Gizli ısı(J/m ³)	209·10 ⁶	209·10 ⁶	235·10 ⁶	188·10 ⁶	218·10 ⁶
Donma başlangıç sıcaklığı (°C)	-0.6	-1.0	-0.6	-1.2	-0.8
Su içeriği (%)	77	62.67	71.85	74.80	82.84
Yağ içeriği (%)	-	18.36	11.86	1.70	-
Yoğunluk (kg/m ³)	-	1041.7	1035.5	1098.7	1089.3

*Karlsruhe deney materyali, donma ile ilgili çalışmalarda test materyali olarak kullanılmaktadır. Entalpi-sıcaklık verileri yağsız sığır etine (%74 su içerikli) benzerlik göstermektedir. Bu deney materyali %23 metil hidroksi etil selüloz jelinden (Tylose) oluşmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul’da doğdu. Lise eğitimini 1998 yılında Çemberlitaş Kız Lisesi’nde tamamladı. 1998-2003 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi aldı. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Sodexo Toplu Yemek ve Servis bünyesinde Aralık 2004 – Eylül 2005 tarihleri arasında Philip Morris İşletme Şefliği ve Eylül 2005- Aralık 2005 tarihleri arasında Philip Morris İşletme Müdürlüğü görevini yürüttü. Aralık 2005 tarihinden itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen İTÜ Gıda Mühendisliği Bölümü’nde görevine devam etmektedir.