T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ÜRETİMİNDE KALIP İÇİNDEKİ ISI GEÇİŞİ VE DONMA SÜRESİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Ömer Alp ATİCİ

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı Proses Programı

Danışman
Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Eylül 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ÜRETİMİNDE KALIP İÇİNDEKİ ISI GEÇİŞİ VE DONMA SÜRESİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Ömer Alp ATİCİ tarafından hazırlanan tez çalışması 05.09.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Erhan BÖKE, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ebru MANÇUHAN, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cenk ONAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç .Dr. Özgen AÇIKGÖZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ÜRETİMİNDE KALIP İÇİNDEKİ ISI GEÇİŞİ VE DONMA SÜRESİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ömer Alp ATİCİ

İmza

Bu doktora tezini, hayatım boyunca bana destek olan ve her zaman yanımda olan sevgili aileme ve değerli eşim Damla'ya ithaf ediyorum. Sizin sevginiz, sabrınız ve inancınız olmasaydı, bu başarıya ulaşmam mümkün olmazdı. Her birinize, benimle birlikte bu yolculuğa çıktığınız için sonsuz teşekkürler.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkısı bulunan ve desteğini esirgemeyen herkese sonsuz teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Öncelikle, her zaman yanımda olan, bana destek veren ve sevgileriyle güç veren aileme ve sevgili eşim Damla'ya sonsuz minnettarım. Onların desteği olmadan bu yolculuk mümkün olmazdı.

Akademik yolculuğum boyunca bana rehberlik eden, değerli bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan danışmanım Derya Burcu Özkan'a teşekkürlerimi sunarım. Yıldız Teknik Üniversitesi'ne de sağladığı imkanlar ve akademik ortam için teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen yöneticim Tolga Susuzlu'ya, deneysel çalışmalarda yardımcı olan Servet Yeter, Fatih Yılmaz, Önder Ok ve Muhittin Semiz'e de minnettarlığımı ifade etmek isterim. Onların yardımları bu çalışmanın tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Herkese en içten teşekkürlerimle.

Ömer Alp ATİCİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.1.1 Sütlü Buz Ürünlerin Isıl Özelliklerinin Bulunması 1

1.1.2 Sütlü Buz Ya Da Dondurmaların Donma Sürelerinin Modellenmesi Ve Deneysel Olarak Bulunması 8

1.2 Tezin Amacı 21

1.3 Hipotez 21

2 KALIP İÇİNDE DONDURULAN SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ISI GEÇİŞİNİN MODELLENMESİ 23

2.1 Isıl Özelliklerin Bulunması 23

2.1.1 Donma Noktasının ve Isıl İletkenliğin Hesaplanması 24

2.1.2 Yeni Özgül Isı Korelasyonunun Önerilmesi 25

3 DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMALARI 31

3.1 Deney Düzeneği ve Deneysel Yöntem 31

3.2 Sayısal Analiz 34

3.2.1 Hava Taşınım Katsayısının Donma Süresine Etkisi 36

3.2.2 Modellemenin Çözüm Ağı Sayısından Bağımsız Olduğunun İspat Edilmesi 37

3.2.3 Ansys Mechanical İle Sayısal Analiz Çalışmalarının Yapılması . 41

3.3 Sayısal Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 46

4 SONUÇ **49**
4.1 Sonuçlar 49
4.2 Öneriler 53

KAYNAKÇA **55**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **59**

SİMGE LİSTESİ

ice	Buz fazı
I	Dondurma
b	Donmadan kalan su
f	Donma noktası
u	Donma noktası üstü
H	Entalpi
L	Gizli ısı
ε	Hava oranı
λ	Isı iletim kaysayısı
s	Katı fazlar
X	Kütlesel yüzde
M	Moleküler ağırlık
C	Özgül ısı
p	Protein
j	Reçete içindeki hammadde çeşidi
$para$	Reçete içindeki hammaddelerin ağırlıklı ortalaması
wo	Reçete içindeki su miktarı
T	Sıcaklık
mix	Sıvı dondurma karışımı
c	Sıvı fazın temsili
L_f	Suyun gizli ısısı
a_w	Su aktivitesi
M_s	Şekerin moleküler ağırlığı

e	Toplam
R	Universal gaz sabiti
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

A	100 g Suda Çözünen Şeker Miktarı
B	Donma Noktası Düşüş Miktarı
CSS	Mısır Şurubu
DE	Dekstroz Eşitliği
F	Fruktoz
IC	Dondurma
MSNF	Yağ İçermeyen Süt Tozu
S	Sükroz
SE	Sükroz Eşitliği
W	Reçete İçindeki Su Miktarı
WS	Peyniraltı Suyu Tozu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Donma eğrisi örneği 8
Şekil 2.1 Farklı hava oranları içeren dondurmaların ısı iletkenlik katsayılarının sıcaklıkla değişiminin gösterimi 26
Şekil 2.2 Tez çalışmasında kullanılan ve %30 hava içeren deneysel sütlü buz numunesinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminin gösterimi 26
Şekil 2.3 Literatür verilerine göre özgül ısı hesaplamaları 30
Şekil 3.1 Deney tesisatının gösterimi 32
Şekil 3.2 Deney tesisatının şematik gösterimi 33
Şekil 3.3 Ölçüm yeterliliği analizi sonuçları 35
Şekil 3.4 Sütlü buz deneysel numunesinin merkez noktasının sıcaklık değişiminin gösterilmesi 36
Şekil 3.5 Modelin sıcaklık değişiminin gösterimi 36
Şekil 3.6 Modelin çözüm ekranının gösterimi 37
Şekil 3.7 Taşınım katsayısına bağlı sıcaklık değişiminin gösterimi 38
Şekil 3.8 Çözüm ağı eleman sayısının modelleme sonucuna etkisinin gösterimi 38
Şekil 3.9 Sütlü buz Karışımının özgül ısı değerlerinin sıcaklığa bağlı gösterimi 40
Şekil 3.10 Sütlü buz Karışımının ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklığa bağlı gösterimi 40
Şekil 3.11 Sütlü buz karışımının hammadde olarak tanımlanması 41
Şekil 3.12 Isıl özelliklerin tanımlanması 41
Şekil 3.13 Özgül ısının tanımlanması 42
Şekil 3.14 Isıl iletkenlik değerinin tanımlanması 42
Şekil 3.15 Çözüm ağı yapısının gösterimi 43
Şekil 3.16 Sınır tabaka çözüm ağı yapısının gösterimi 44
Şekil 3.17 Özgül ısı denklemlerinin karşılaştırması 46
Şekil 3.18 Karışım hacminin % 32'si kadar hava eklendiğinde deneysel sonuçlarla modellemenin karşılaştırılması 46
Şekil 3.19 Karışım hacminin %83'ü kadar hava eklendiğinde deneysel sonuçlarla modellemenin karşılaştırılması 47
Şekil 4.1 Tez çalışmasında kullanılan dondurma numunesinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminin gösterimi 49

Şekil 4.2 Su-glikol çözeltisi çözeltisi sıcaklığının diğer parametrelere göre etkisinin normalleştirilerek karşılaştırılması 51
Şekil 4.3 Donma süresi üzerine hava oranı ve kalıp içine dolum ilk sıcaklığı parametlerinin karşılaştırılması 51
Şekil 4.4 %30 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi 52
Şekil 4.5 %50 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi 52
Şekil 4.6 %80 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi 53

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Şekerkamışı çözeltilerine göre donma noktası sıcaklıkları 6
Tablo 1.2 Sükroz çözeltilerine göre donma noktası düşümü 7
Tablo 1.3 Literatürde sayısal ve deneysel olarak yapılan faz değiştirme çalışmaları 17
Tablo 1.4 Dondurmanın donma prosesi üzerine literatürde yapılan çalışmaların özeti 19
Tablo 1.5 Genel gıda maddeleri üzerine literatürde yapılan çalışmaların özeti 20
Tablo 2.1 Örnek karışımın bileşenlerinin kütlesel oranları ve maddesel özellikleri 24
Tablo 2.2 Çikolatalı dondurmanın fiziksel özellikleri 29
Tablo 2.3 Donma noktasının üstünde ve altında özgül ısı değerleri 29
Tablo 3.1 Ölçüm yeterliliği analizi sonuçları 34
Tablo 3.2 Parametrik donma süresi modelleme sonuçları 48

ÖZET

SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ÜRETİMİNDE KALIP İÇİNDEKİ ISI GEÇİŞİ VE DONMA SÜRESİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Ömer Alp ATİCİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

Dondurma üretiminde donma süresi, nihai ürün kalitesi ve üretim verimliliği açısından en kritik parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Donma süresi, dondurmanın dokusu, tadı ve genel kalitesini doğrudan etkilediği için, bu sürecin doğru bir şekilde hesaplanması üretim sürecinin optimize edilmesi açısından büyük önem taşır. Bu çalışmada, dondurma tariflerine dayanarak donma süresini belirlemek amacıyla, dondurma örneklerinin ısıl özellikleri teorik ve deneysel yöntemlerle analiz edilmiştir. Özellikle suyun gizli ısısını hesaba katmak için yeni bir özgül ısı korelasyonu geliştirilmiş ve bu korelasyon literatürdeki deneysel ve teorik sonuçlarla karşılaştırıldığında %2.5'lik bir uyum sağlanmıştır. Deneysel çalışmalara başlanmadan önce, ölçüm yeterliliği analizi yapılmış ve bu sayede elde edilen verilerin güvenilirliği sağlanmıştır. Çalışmada ayrıca, donma sürecine etki eden parametrelerin birbirlerine göre önem sıralamaları araştırılmıştır. Parametrik analizler sonucunda su-glikol karışım sıcaklığının donma süresi üzerinde en önemli etken olduğu, buna karşın dondurma içindeki hava miktarının en az önemli parametre olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hava taşınım katsayısının donma süresi üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı bulunmuştur. İleride yapılması planlanan çalışmalarda, su-glikol çözeltisine alternatif olarak farklı soğutma sıvıları kullanılabilir ve bu yeni sıvıların donma süresi üzerindeki etkileri araştırılabilir. Aynı zamanda kalıp boyutlarının donma süresi üzerindeki etkisi de araştırmaya değer bir konu olarak öne çıkmaktadır. Farklı dondurma tarifelerine göre ortaya atılan özgül ısı denkleminde yapılacak sınamalar, bu denklemin farklı formülasyonlarda da geçerliliğini doğrulayabilir. Ayrıca, farklı dondurma tarifeleri ile

yapılacak deneysel çalışmalar ve sayısal analizlerin karşılaştırmaları, üretim sürecinin optimizasyonu açısından önemli bilgiler sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Dondurmanın donması;Sayısal analiz; ısıl özellikler; deneysel çalışma; özgül ısı

ABSTRACT

THE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FREEZING OF MILK AND WATER ICE PRODUCTS IN THE MOULD

Ömer Alp ATİCİ

Department Of Mechanical Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Derya Burcu ÖZKAN

The freezing time in ice cream production is one of the most critical parameters affecting the final product quality and production efficiency. Since the texture, taste, and overall quality of ice cream are directly influenced by the freezing time, accurately determining this time is crucial for optimizing the production process. In this study, the thermal properties of ice cream samples were analyzed using theoretical and experimental methods to determine freezing time based on different ice cream formulations. A new specific heat correlation was developed to account for the latent heat of water, which showed a 2.5% agreement with experimental and theoretical results from the literature. Before starting the experimental studies, a measurement adequacy analysis was conducted to ensure the reliability of the data. The study also investigated the relative importance of the parameters affecting the freezing process. Parametric analyses revealed that the temperature of the water-glycol mixture was the most significant factor influencing freezing time, while the amount of air in the ice cream was found to be the least significant. Initial temperature of ice cream inside mould is the second important parameter for the freezing time. Additionally, the heat transfer coefficient of air was found to have no meaningful effect on the freezing time. Different convection heat transfer coefficients were tried for the upper boundary of ice cream sample but there were almost no effect on the centre point temperature change of sample. Future studies could explore the use of alternative cooling fluids to the water-glycol solution, and the impact of mold size on freezing time. Furthermore, the validity of the proposed specific heat equation can be tested for different ice cream

recipes, and comparisons between experimental studies and numerical analyses using various ice cream formulations could provide valuable insights for optimizing the production process.

Keywords: ice cream freezing; numerical simulation; thermal properties; experimental studies; specific heat

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Literatür araştırması dört ana başlıkta incelenmiştir. Bunların ilki sütlü buz ürünlerin ısıl özelliklerini belirlemek için yapılmış çalışmalardır. İkincisi sütlü buz ürünlerin ya da dondurmaların donma sürelerinin bulunması için yapılan çalışmalardır. Burada donma prosesine bağlı buz oluşumunun modellenmesi çalışmaları ve deneysel olarak buz kalınlığının bulunması için yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Isıl özellik olarak özgül ısı ve ısıl iletkenlik değerleri ele alınmıştır.

1.1.1 Sütlü Buz Ürünlerin Isıl Özelliklerinin Bulunması

Sütlü buz ürünleri içerisinde donmamış halde su, şeker, yağ ve hava içerdiklerinden ısıl özellikleri donma prosesi gerçekleşirken sabit kalmayıp literatürde sıcaklığı bağlı olarak ifade edilmiştir. Isıl özellikten kasıt ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerleridir. Ayrıca sütlü buz ürünlerin donma noktalarının da hesaplanması için yapılmış çalışmalar bu bölümde özetlenmiştir.

Cogne ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [1] dondurma üretiminde ısı geçişi olayını anlamak için dondurmanın ısıl özelliklerinin belirlenmesi gerektiğine vurgu yapılmıştır. Isıl iletkenik ve entalpi değerleri deneysel olarak ortaya konmuş, bulunan deneysel sonuçlar, daha önce literatürde ortaya konan modellerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Isıl iletkenliğün deneysel olarak bulunması için sıcak tel probu yöntemi kullanılmıştır. Entalpinin belirlenmesi için DSC ısıl analiz aletleri kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle daha önce ortaya konan modellerle karşılaştırma yapılmıştır.

Entalpi karşılaştırması yapılması için literatürde daha önce ortaya konan, içinde farklı bileşenler olan karışımların özgül ısı modelleri de belirtilmiştir. Bu modelleri üç başlıkta inceleyebiliriz.

1.1.1.1 Özgül Isı Değerlerinin Bulunması

- Ağırlık Eklemeli Model

Bu modelde karışım içindeki her bir bileşenin özgül ısı değerleri, karıım içindeki kütlesel ağırlık yüzdelerine göre toplanır, ayrıca faz değiştiren maddelerin gizli ısıları da denklem içinde ifade edilmiştir. Bu denklem (4.2)'de gösterildiği gibidir.

$$C_p = \sum_j X_j C_{pj} - L_f(T_f)\frac{dX_{ice}(T)}{dT} \tag{1.1}$$

Bu denklemde j farklı bileşenleri temsil etmektedir. X_j bu bileşenlerin kütlesel yüzdeleridir. C_{pj} bileşenlerin ısıl kapasiteleri olup, X_{ice} toplam kütle içinde buzun kütlesel yüzdesini ifade etmektedir. T_f karışımın donmaya başlama sıcaklığını ifade etmektedir. Donma noktasının bulunması da ilerideki bölümlerde açıklanacaktır. $dX_{ice}(T)/dT$ ifadesi [2]'de ifade edildiği gibidir. Bu da denklem 1.2'de verilmiştir.

$$X_{ice}T = X_w(1 - \frac{T_f}{T}) \tag{1.2}$$

Gizli ısı L_f ile denklemde ifade edilmiştir ve denklem (1.3)'de gösterildiği gibidir.

$$L_f = (333.802 + 2.1165T)x1000 \tag{1.3}$$

Denklem (1.3)'de sıcaklık T ile ifade edilmiştir ve Celcius cinsindendir.

- Schwartzberg Modeli

Literatürde karşılaşılan bir diğer özgül ısı değerini modellemek için kullanılan denklem Schwartzberg'in yaptığı çalışmada [3] verilmiştir. Burada verilen özgül ısı ifadeleri iki aşamada ifade edilmiştir. Eğer karışım sıcaklığı donma noktasından yüksek ise ağırlık eklemeli modeldeki gibi her bir bileşenin özgül ısısı ve kütlesel oranına göre özgül ısı değeri ifade edilmiştir. Eğer karışım sıcaklığı donma sıcaklığından küçükse, özgül ısı değeri bileşenlerin moleküler ağırlıklarına göre ifade edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
T &> T_f \\
C_p &= X_s C_{ps} + X_w C_{pw} \\
T &< T_f \\
C_p(T) &= X_s C_{ps} + X_w C_{pw} + (X_b - X_w)(C_{pw} - C_{pice}) \\
&+ \frac{M_w}{M_s} X_s \left[\frac{R T_0^2}{M_w (T_0 - T)^2} - (C_{pw} - C_{pice}) \right]
\end{aligned}
\tag{1.4}
$$

Denklem (4.3)'de gösterilen s alt indisi katı bileşenleri ifade etmektedir. R sabit gaz sabiti, T_0 saf suyun donma noktası, T'de karışımın anlık sıcaklığını ifade etmektedir. Bütün sıcaklıklar Celcius cinsindendir. M_s değeri yapılan çalışmalarda 0.55 $kgmol^{-1}$ olarak bulunmuştur. b alt indisi ise dondurma içindeki donmadan kalan su miktarının kütlesek yüzdesini ifade etmektedir.

- Chen ve Cornillon Modeli

Cogne'nin yaptığı çalışmada [1] son olarak Chen'in yaptığı çalışmada [4] ilk olarak ifade ettiği ve sonrasında Cornillon'un yaptığı çalışmada [5] kullandığı özgül ısı ifadesi denklemini belirtmiştir. Burada yaklaşım bir önceki Schwartzberg's modeline benzemektedir.

$$
\begin{aligned}
T &> T_f \\
C_p &= 4180 - 2299 X_s - 627 X_s^3 \\
T &< T_f \\
C_p(T) &= 1547 + 1254 X_s + \frac{X_s}{M_s} \frac{R T_0^2}{(T - T_0)^2}
\end{aligned}
\tag{1.5}
$$

Cogne'nin yaptığı çalışmada [1]deneysel olarak bulunan özgül ısı değerleri, bu üç model ile karşılaştırılmıştır ve en yakın sonucun, ağırlık eklemeli model ile bulunduğu görülmüştür. Bu tezde de ağırlık eklemeli model özgül ısının modellenmesinde kullanılacaktır.

Dondurma ya da sütlü buz ürünler donarken içlerinde faz değiştiren bileşenin serbest su olduğu bilinmektedir. Sütlü buzlar su çözeltisi içinde şeker, süt tozu, kıvam artırıcı gibi bileşenlerin çözünmesi ile oluştuğundan belli bir su miktarı serbest durumda değildir ve serbest kalan su sıcaklık düştükçe buza dönüştüğünden serbest olmayan

suya doğru sürekli bir kütle transferi olur ve donma noktası sürekli düşer. Bu nedenle buz oluşumu sıcaklıkla düşümü gibi sabit hızda olmayıp, azalarak artan bir değişime sahiptir.

Serbest su miktarının bulunması ile ilgili çalışmaları Pyenson ve arkadaşları [6] özetlenmiştir. Buradaki çalışmaya göre dondurma içindeki kıvam artırıcılar suyu bağladıklarından bu su bağlanmış su olarak ifade edilmektedir ve artık içerisinde şeker gibi bileşenler çözünmemektedir. Bu bağlanmış su miktarının da dondurma içerisinde % 8.02 ile % 8.19 arasında bağlanmış su olduğu bulunmuştur. Cogne'nin yaptığı[1] çalışmada ise -35°C'de bile hala tüm suyun ancak %90'ının donduğu tespit edilmiştir.

1.1.1.2 Isı İletim Katsayılarının Bulunması

Literatürde araştırılmış ısıl özelliklerden bir diğeri de ısı iletim katsayısıdır. Yine Cogne [1]literatürdeki bir çok ısı iletim katsayısı modellemesi özetlenmiş ve yapılan deneysel çalışmalara göre bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi dondurmalar içlerinde üç fazı birden bulundururlar, bunlar katı halde bulunan buz, sıvı fazı hiç donmamış halde bulunan su oluşturur ve gaz fazını da dondurma içinde dağılmış hava oluşturmaktadır. Bu nedenle dondurmaların ısı iletim katsayısı bulunurken her faz hesaba katılarak ısı iletim katsayısı bulunmuştur.

Çalışmada ilk olarak dondurma içinde sürekli faz olarak adlandırılan ve içerisinde karbonhidrat, protein, yağ ve donmamış suyun olduğu kısmın ısı iletim katsayısı bulunmuştur. Cogne [1] paralel ve seri olarak belirtilen sürekli fazın ısı iletim katsayısı formüllerinden sadece paralel olan kullanılacaktır, çünkü yapılan çalışmada paralel olanın kullanılması önerilmiştir. Paralel ve seri formüllerin detayları Choi'nin yaptığı çalışmada [7] bulunabilir.

$$\lambda_c^{para} = \sum_j \varepsilon_j \lambda_j \tag{1.6}$$

Denklem (2.1)'de gösterilen c indisi, sürekli fazı ifade etmektedir. j ise bileşenlerin sayısını ifade etmektedir. ε ifadesi ise denklem (2.2)'de gösterildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_j &= X_j \frac{\rho_c}{\rho_j} \\ \rho_c &= \frac{1}{\sum_j \frac{X_j}{\rho_j}} \end{aligned} \tag{1.7}$$

Isı iletim katsayısının bulunması için sürekli fazın ısı iletim katsayısı ifadesine buzun ısı iletim katsayısı da eklenmelidir. Bunu yapmak için yine Cogne'de [1] verilen De Vries' modeli kullanılacaktır. De Vries' denkleme denklem (2.4)'de verilmiştir.

$$\lambda_{mix} = \lambda_c^{para} \frac{1 - \varepsilon_{ice} + \varepsilon_{ice} F \frac{\lambda_{ice}}{\lambda_c^{para}}}{1 - \varepsilon_{ice} + \varepsilon_{ice} F}$$
$$F = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{3} [1 + (\frac{\lambda_{ice}}{\lambda_c^{para}} - 1) g_i]^{-1} \tag{1.8}$$

Denklem (2.4)'de verilen g değerleri sırası ile g_1=g_2=1/11, g_3=9/11'dir.

Son olarak dondurmanın ısı iletim katsayısını bulabilmek için havanın ısı iletim katsayısı da De Vries' modeline eklenmiştir ve bu denklem de literatürde Maxwell denklemi olarak verilmiştir.

$$\lambda_{IC}(T) = \lambda_{mix}(T) \frac{2\lambda_{mix}(T) + \lambda_{air} - 2\varepsilon_{air}(\lambda_{mix}(T) - \lambda_{air})}{2\lambda_{mix}(T) + \lambda_{air} + \varepsilon_{air}(\lambda_{mix}(T) - \lambda_{air})} \tag{1.9}$$

Bütün bu denklemlerde λ ifadesi ile ısı iletim katsayısı ifade edilmiştir. λ_{IC} ise son olarak dondurmanın ısı iletim katsayısıdır.

1.1.1.3 Buz Oluşumu Başlama Sıcaklığı

Sütlü buzların kalıp içinde ısı transferini modelleyebilmek için gerekli bir diğer önemli parametre donmaya başlama sıcaklığının bulunmasıdır. Sütlü buzlar donma esnasında içlerinde üç farklı fazı da bulundururlar ve karışım içinde çözünmüş ya da çözünmemiş halde bulunan bir çok bileşen vardır. Başlıca bu bilşenlerin yağlar, şeker, su, protein olduğu ve her birinin farklı oranlarda olduğundan bahsedilmişti. Bu nedenle her bir karışımın donmaya başlama sıcaklığı ayrı ayrı bulunmalıdır.

Leighton'un yaptığı [8] çalışmaya göre donma noktası için iki bileşenden gelen donma sıcaklığı düşümü hesaplanmış, toplam donma noktası değişiminin bu iki bileşenden gelen donma sıcaklığı düşüşlerinin toplamına eşit olduğu bulunmuştur. Bu iki bileşen şeker ve tuzdur. Sütlü buzların ya da dondurmaların içerisinde en temelde su içinde çözünmüş şeker ve tuzlar bulunmaktadır. Sütlü buzlarda ya da dondurmada çözücü madde su olduğundan suyun donma noktasının içinde çözünmüş şeker ve tuz dolayısı ile ne kadar düştüğü hesaplanmıştır. Denklem (1.10)'de sütlü buz ya da dondurma içerisinde ne kadar 100 parça suda kaç parça şekerin çözündüğü ifade edilmiştir.

$$A = \frac{(MSNFx0.545 + S)100}{W} \tag{1.10}$$

Denklem (1.10)'de görüleceği üzere şeker olarak sükroz şekeri hesaba katılmıştır. $MSNF$ olarak ifade edilen değer yüzde olarak yağ içermeyen süt tozu miktarını anlatmaktadır. W olarak gösterilen ifade yüzde ne kadar su olduğunu ifade etmektedir. A ise 100 g su içinde kaç g sükroz çözündüğünü ifade etmektedir. Bu değer sayesinde daha önce su içinde şeker çözme ile deneysel olarak bulunan donma sıcaklığı düşüşü tablosundan (Tablo 1.1) şeker nedeniyle sütlü buzun ya da dondurmanın donma noktası sıcaklığı hesaplanır.

Tablo 1.1 Şekerkamışı çözeltilerine göre donma noktası sıcaklıkları

100 g Suda Çözünmüş Şekerkamışı Miktarı (g)	**Şekerkamışı Miktarı (%)**	**Donma Noktası Düşüşü (°C)**
3.59	3.47	0.21
6.85	6.41	0.40
10.84	9.78	0.65
15.83	13.67	0.95
19.80	16.53	1.23
22.58	18.42	1.37
25.64	20.41	1.58
28.51	22.19	1.77
32.22	24.37	1.99
35.14	26.00	2.15
37.86	27.46	2.33
43.72	30.42	2.71
45.62	31.33	2.82
50.02	33.35	3.13

Çözünen şeker miktarı nedeniyle donma noktasındaki azalma bulunduktan sonra karışım içindeki tuz nedeniyle olan donma noktasının bulunması gerekmektedir. Denklem (1.11)'de tuz çözünmesi nedeniyle donma sıcaklığının ne kadar düştüğü ifade edilmiştir.

$$B = \frac{MSNFx2.37}{W} \tag{1.11}$$

B direkt olarak Celcius cinsinden sıcaklık düşümünü ifade eder. Tablodan hesaplanan şeker nedeniyle donma sıcakığı düşüşü ifade ile B değeri toplanarak karışımın donmaya başlama sıcaklığı bulunur.

Leighton'un [8] yaptığı çalışmada görüleceği üzere şeker nedeniyle sıcaklık düşümü

hesaplanırken şekerkamışı ile yapılmış deneysel sonuçlar kullanılmıştır ve karışım içinde şeker olarak sadece sükroz olduğu görülmüştür. Ancak karışımlarda sükroz yerine dekstroz gibi şekerler de kullanılmaktadır. Bu durumda bütün bileşenlerin bir sükroz eşitliğinin bulunması gerektiği ortaya komuştur. Goff ve Hartel yazdıkları kitapta [9] yapılan çalışmada, şekerden dolayı olan donma noktası düşümü hesaplanırken bütün bileşenlerin sükroz eşitliklerini ortaya koyacak denklem (1.12) kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} SE = (MSNFx0.545) + (WSx0.765) + S + (10DECSSx0.2) \\ +(36DECSSx0.6) + (0.42CSSx0.8) + (62DECSSx1.2) \\ +(HFCSx1.8) + (Fx1.9) \end{aligned} \tag{1.12}$$

Burada SE ile sükroz eşitliği ifade edilmektedir. WS ile peynir altı suyu tozu miktarı ifade edilmektedir. DE dekstroz eştliğini ifade etmektedir ve CSS de mısır şurubunu ifade etmektedir. $HFCS$, yüksek fruktozlu mısır şurubunu ifade ederen F ise fruktoz miktarını ifade etmektedir. Buradan bulunan sükroz eşitliği değeri, tablo 1.2'de gösterilen değerler arasında yerine konur ve şekere bağlı donma noktası düşüşü hesaplanmış olur.

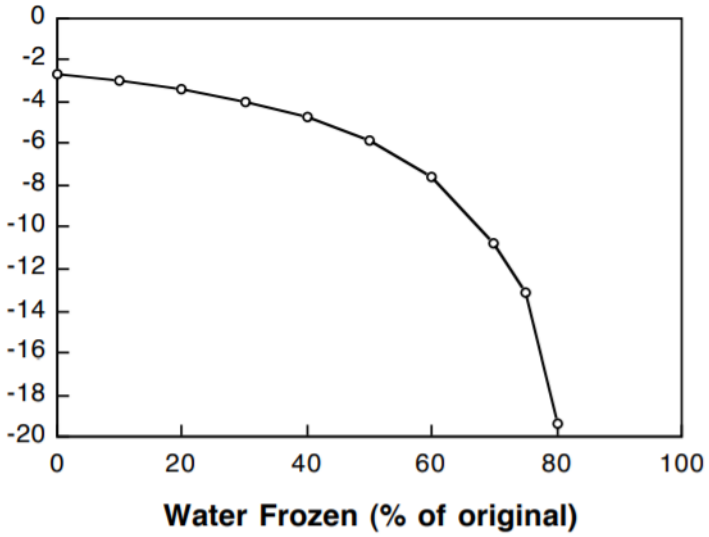
Tablo 1.2 Sükroz çözeltilerine göre donma noktası düşümü

100 g Suda Çözünmüş Sükroz Miktarı (g)	**Donma Noktası Düşüşü (°C)**
3	0.18
6	0.35
9	0.53
12	0.72
15	0.90
18	1.10
21	1.29
24	1.47
27	1.67
30	1.86
33	2.03
36	2.21
39	2.40
42	2.60
45	2.78
48	2.99
51	3.20

Tablo 1.2'den bulunan donma noktası düşüşü miktarı ile denklem (1.11)'den

bulunacak değer toplanarak toplam donma noktası miktarı düşüşü bulunabilir. Bu çalişmada da [9]'da yapılan donma noktası düşümü çalışması referans olarak kullanılacaktır.

Donma noktası bulunduktan sonra dondurmaların donma eğrileri de donma noktası bulma yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Daha önce de belirildiği üzere dondurma içerisinde sadece suyun donduğu kabulü yapılmaktadır. Goff ve Hartel'in yazdığı kitapta [9] belirtildiği üzere donan su içerisindeki çözünenler, su buza dönüştüğünde, buz içinden suya doğru kütle transferi yaparlar. Bu durumda serbest su içerisindeki çözünen miktar sürekli artar, bu durumda sürekli olarak donma noktası düşer diyebiliriz. Bu aynı zamanda buz oluşum hızının yavaşlamasına da neden olur. Örnek bir donma eğrisi şekil 1.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 1.1 Donma eğrisi örneği

1.1.2 Sütlü Buz Ya Da Dondurmaların Donma Sürelerinin Modellenmesi Ve Deneysel Olarak Bulunması

Literatürde sütlü buz ya da dondurmaların donma sürelerinin bulunması ile pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar daha çok dondurmaya hava ve yapı verilerek soğutan dondurucu cihazında gerçekleşen donma prosesini modellemeye yönelik çalışmalardır. Bu çalışmalar daha çok dinamik donma prosesi olarak adlandırılmıştır. Bir de literatürde statik donma olarak adlandırabileceğimiz kalıp içinde dondurmaların dondurulduğu prosesi modelleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar ise sayıca çok daha azdır.

Cogne ve arkadaşlarının [10] daha önceki deneysel çalışmasında [1] bulduğu ısıl özellikleri kullanarak dondurmaların kalıp içinde ya da hava ortamında zorlanmış

ve doğal taşınım altında merkezinin -18 °C'ye ulaşmasını modellemiştir. Ayrıca çalışmasında donma prosesine etki eden parametrelerin etkileri inceleyerek donma süresine nasıl etkileri olduğunu bulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmalarda yaptığı modelin ne kadar örtüştüğünü bulmuştur. Bu çalışmada üç boyutlu zamana bağlı ısı iletim denklemi Ansys programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Üç boyutlu zamana bağlı ısı iletim denklemi denklem (1.13)'te gösterildiği gibidir.

$$[\frac{d}{dx}(\lambda(T)\frac{dT}{dx}) + \frac{d}{dy}(\lambda(T)\frac{dT}{dy}) + \frac{d}{dz}(\lambda(T)\frac{dT}{dz})] = \rho\frac{dH}{dT}\frac{dT}{dt} \tag{1.13}$$

Donma parametreleri olarak dondurma başlangıç sıcaklığı, kalıp içinde donmada $CaCl_2$ çözeltisi, hava ile dondurmada hava olmak üzere soğutucu akışkan sıcaklığı ve donma olayının zorlanmış mı yoksa doğal taşınımla mı olduğuna göre donma sürelerine etkileri araştırılmıştır. Beklendiği üzere dondurmanın ilk sıcaklığını ve soğutucu akışkan hızını azaltmak donma süresini azaltmışken, zorlanmış taşınımla donma prosesinin gerçekleştirilmesi, doğal taşınıma göre daha hızlı olmuştur. Ancak çalışmada belirtildiğine göre $CaCl_2$ çözeltisi içinde donma işlemi hava ile donma işlemine göre 5 kat daha hızlı olmaktadır.

Daha önce bahsedildiği gibi literatürde dinamik donma olayını modelleyen çalışma sayısı çok daha fazladır.Boccardi'nin [11] yaptığı çalışmada dinamik donma işlemi sırasında gerçekleşen ısı geçişi katsayısının bulunması için iki adet ısı geçişi katsayısı bağıntısı verilmiştir. Çalışma deneysel sonuçlara göre ısı geçişi katsayısı bağıntısı elde etmek üzerine kuruludur. Dondurma sıyırıcı yüzey ısı değiştirici tipi bir ısı değiştiricinin içinde dondurularak üretilmektedir. Dondurmanın çıkış sıcaklığını bulabilmek için iki adet ısı geçişi katsayısı bağıntısı ortaya konmuştur.

Bongers ve arkadaşlarının [12] yaptığı çalışmada yine dinamik dondurma prosesi için matematiksel bir bağıntı ortaya konmuştur. Bu bağıntıya dondurma giriş ve çıkışındaki enerji değişimini, dolayısı ile giriş sıcaklığına göre çıkış sıcaklığını hesaplamaya yarayacak bir matematiksel bağıntıdır. Bu çalışmada dondurucu içinde gerçekleşen bütün enerji dengeleri bağıntı içinde verilmeye çalışılmıştır. Bu enerji dengeleri ifadeleri sırası ile, dondurma viskoz bir yapıda olduğundan viskoz kuvvetlerden dolayı ortaya çıkan ısı, yüzey kazıyıcının sürtünmesinde dolayı ortaya çıkan ısı, faz değişiminden dolayı oraya çıkan gizli ısı ve donma prosesini gerçekleştiren soğutucu akışkanın soğutma enerjisi hesaba katılmıştır. Bu model sayesinde dondurma prosesinde bir optimizasyon yapılabileceği ve böölgesel dondurma sıcaklıklarının tespit edilebileceği öne sürülmüştür.

Malek'in [13] yaptığı çalışmaya göre amorf yapılardaki malzemelerin kristallenmesi

DSC ısıl analiz aleti kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada daha çok buzlanmanın hangi formda başladığı ve buzların büyümesinin hangi formda olduğu incelenmiştir. Elektron mikroskobu ile malzemeler her 1, 2 ve 20 °C düşüşte incelenmiştir. Donmaya başladığı anda homojen şekilde buz taneciklerinin oluştuğu gözlemlenmiş, ardından heterojen şekilde buzların farklı formlarda geliştiği görülmüştür.

Devireddy'nin [14] yaptığı çalışmada farklı çözeltilerin gizlı ısı değerleri deneysel olarak bulunmuştur. Faz değişimi donma prosesinin en kritik olayı olduğundan bu çalışmada DSC ısı analiz cihazı kullanılarak gizli ısı değerleri bulunmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre tartışmaya açılan konu, faz değişimi oldukça çözünen maddeler buz fazından sıvı fazına geçtiğinden sürekli olarak sıvı fazın donma sıcaklığı düşmektedir ve gizlı ısı değeri de buna bağlı olarak sürekli değişmektedir.

Chen ve Monhan'ın [15] yaptığı çalışmada faz değişiminin modellenmesi için Devireddy'nin [14] belirttiği gibi çözücü miktarı faz değişimi ile sürekli değiştiğinden deneysel olarak donma olayı incelenmiştir. Burada saf suyun faz değişimi olduğunda sıcaklık sabit kalmaktadır ancak suyun içinde bir çözünen olduğundan faz değişimi sırasında sıcaklığın sabit kalmadığı ancak değişimin miktarının çok az olduğu ortaya konmuştur.

Lopez [16] yaptığı çalışmada %20 ve %60 sükroz çözeltilerinin donmaları modellenmiştir. Bu çalışmada asıl amaçlanan donma hızına göre oluşan buz kristallerinin büyüklüklerini belirlemektir. Dondurulan gıda içerisine hava eklendiğinde ve donma hızı ne kadar yavaş olursa büz büyüklüklerinin o kadar büyük olduğu ortaya çıkmıştır.

Buyruk [17] yaptığı çalışmada Ansys Fluent paket programı kullanılarak dikdörtgen bir tank içerisinde silindir borular etrafında buz oluşumunun modellemesi yapılmıştır. Tankın içerisindeki buz/su oranı farklı silindir konfigürasyonları ve sıcaklıklarına göre incelenmiştir.

Tombarevic [18] iç içe geçmiş borular arasında su buz faz değişimi entalpi-gözeneklilik yöntemi ile modellenmiştir. Bu entalpi-gözeneklilik yöntemi (enthaply-porosity) daha çok metal metal alaşımların erime ve katılaşması için kullanılırken literatürde çözeltilerin ve karışımların faz değişimini modellemek için kullanıldığı da gözlenmiştir. Bu yöntemin detaylı açıklaması bölüm 2'de yapılacaktır. Bu çalışmada ise bu yöntem iki boyutlu olarak faz değişiminin modellenmesi ve faz değiştiren bölgede su-buz oranının belirlenmesi için kullanılmıştır.

Chaudhary [19] entalpi-gözeneklilik yöntemini kullanarak sıvı azot ile soğutulan bir

yüzeye damlatılan su damlacığının donmasının modellenmesi yapılmıştır. Ayrıca oluşturulan model ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buz oluşumunun görsellenmesi için kamera ile deneysel süreç kaydedilmiş olup, hangi sürede su-buz oranının ne kadar olduğu bilinebilmiştir.

Jin ve arkadaşlarının[20] yaptığı deney tasarımı Chaudharry'de [19] yapılan deneysel çalışmaya benzemektedir. Su banyonu ile şartlandırılan yüzeye damlatılan su damlacığının donma hızı ve yüzeye olan tutunma açısının yüzey sıcaklığına bağlı olarak değişimi ortaya konmuştur. Burada da yine donmanın görsellenmesi bir kamera ile yapılmıştır.

Van [21] şekerli su çözeltisinde başlangıçta var olan buzların donma süresince nasıl geliştiğinin modellenmesi yapılmıştır. Burada kullanılan sayısal yöntem faz alanı simülasyonu yöntemidir. Şekerli su çözeltilerinde donma süresince su fazından buz fazına geçen alanda çözünmüş şeker buza dönüşen alandan halen su olarak kalan alana kütle transferi olduğundan bu modelde ısı geçişi ile birlikte kütle geçişi de sayısal model içinde çözülmektedir. Şekerin kütle geçişi mevcut su olarak kalan alanda donma sıcaklığını düşürmekte ve buz oluşum hızını azalttığından ısı geçişi ile birlikte kütle geçişinin de modellenmesi önemlidir.

Entalpi-gözeneklilik yöntemi metal metal alaşımların modellenmesi haricinde literatürde faz değiştiren maddelerin erime ve katılaşma modellenmesi için de sıkça kullanılmaktadır. Jurcevic [22] bir tank içerisinde suyun donması deneysel olarak incelenmiş olup, deneysel sonuçlar entalpi-gözeneklilik yöntemi ile yapılan sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu olarak büyük boyutta sayısal modellemeye gidildiğinden çok faz bilgisayar işlem gücü gerekmektedir. Bu durum çözü yapmayı zorlaştırdığından daha kaba çözüm ağları ve büyük zaman adımları ile donma prosesi modellenmiştir. Daha kaba çözüm ağlarına ve büyük zaman adımlarına rağmen deneysel sonuçlar ile tutarlı sonuçlar bulunmuştur. Faz değiştiren maddelerde entalpi-gözeneklilik yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışma Patel'in [23] çalışması örnek verilebilir. Bu çalışmada farklı geometrilerde (küresel, kübik, üçgensel, artı şeklinde) faz değiştiren maddelerin entalpi-gözeneklilik yöntemi ile sayısal modellemesi yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır.

[24]'da ise yine şartlandırılmış yüzeye damlatılan su damlacığının sayısal olarak modellenmesi incelenmiştir. Burada entalpi-gözeneklilik yöntemi kullanılmıştır. Burada su damlacığının yüzeye temas açısının modelleme üzerinde en önemli parametre olduğu ortaya konmuştur.

[25]'de yapılan çalışmada entalpi-gözeneklilik yöntemi saf maddelerin faz değişimini modellemek için kullanılmıştır. Entalpi gözeneklilik yöntemi alaşımlar ve çözeltiler

yani saf olmayan maddeler için kullanılabilecek bir modeldir. Bu çalışmada enerji denkleminde su-buz karışımının hissedilir ısının yazıldığı kısımda entalpi bulunurken sadece entalpi değeri sıcaklık olarak sadece erime sıcaklığına bağlı yazılırken farklı olarak mevcut sıcaklığın erime sıcaklığına olan farkına bağlı yazılarak çözüm yapılmıştır. Enerji denkleminde yapılan bu değişiklik sayesinde saf maddelerin de faz değişiminin entalpi-gözeneklilik yöntemi ile yapılabileceği ortaya konmuştur.

Ayrıca bu tezde kalıp içinde donma prosesinin ısı geçişi modellemesi yapılacağı gibi kalıp içinde oluşan buzun kalınlığının belirlenmesi ile ilgili de çalışmalar yapılmıştır. Bu nedenle literatürde buz oluşumunu ve buz kalınlığını belirlemeyi deneysel olarak çalışmış çalışmalar da incelenmiştir.

Ezan [26] yaptığı çalışmada küresel bir cismin içine konulmuş suyun donması modellenmiştir. Küresel bir geometride çalışıldığından ve sınır şartları her yerde aynı olduğundan problem 1 boyutlu olarak kabul edilebilmiştir. Deneysel olarak da donma prosesi incelenmiş olup üç adet T tipi ısıl çift küresel geometride konumlandılışmıltır. 2 adet ısıl çift kürenin y ekseninde en uçlara konumlandırılmıştır. Tam merkeze de bir adet ısıl çift bir çubuk yardımıyla yerleştirilmiştir.

Sevda [27] yaptığı çalışmada deneysel olarak buzdolabında buz yapma süresi incelenmiş olup, her bir buz yapma bölmesi içine merkezlere gelecek şekilde birer adet ısıl çift yerleştirilmiştir ve farklı hava hızlarında ve buzdolabı dondurucu bölmesi sıcaklığına göre buz oluşum süreleri incelenmiştir.

Lind ve arkadaşlarının [28] yaptığı çalışmada termal özelliklerin ve ölçüm yöntemlerinin matematiksel modellemesi üzerine bir literatür incelemesi sunulmuştur. Üç farklı gıda ürününün bazı ölçülmüş termal özellik değerleri sunulmaktadır. Bu ürünler: mayasız beyaz ekmek hamuru, yağsız kıyma ve yağ, nişasta, tuz ve baharatlarla karıştırılmış yağsız kıymadır. Bu üç ürünün termal özellikleri ayrıca hesaplanmış ve mevcut bazı formüllerin bu ürün türleri için geçerliliğini kontrol etmek amacıyla ölçülen özelliklerle karşılaştırılmıştır. Spesifik ısı ve entalpiyi ölçmek için adımlı diferansiyel taramalı kalorimetri kullanıldığında sıcaklık adımlarının önemi tartışılmıştır. Sonuçlar, bu üç çok farklı gıda ürünü için görünür spesifik ısı ve entalpi değişimini doğru bir şekilde hesaplamak için mevcut formüllerin olduğunu göstermektedir. Termal iletkenlik, spesifik ısı ve buz içeriği hesaplamaları, özellikle faz geçiş bölgesinde, ölçülen değerlerle o kadar iyi uyuşmamıştır. Görünür spesifik ısı ölçümleri, yeterince küçük sıcaklık adımlarının seçilmesinin önemini göstermiştir.

Sanz'ın [29] yaptığı çalışmada farklı türdeki etlerin termofiziksel özelliklerine ait deneysel değerler sunulmaktadır: termal iletkenlik, entalpi, ısı kapasitesi, termal yayınım ve yoğunluk. Bu değerlerin tamamı mevcut literatürün kapsamlı bir

seçkisinden elde edilmiştir. Bu ölçümler, soğutma ve dondurma süreçleri sırasında normal sıcaklık aralığında yapılmıştır. Mevcut çalışmada, deneysel veriler, ölçüm teknikleri ve matematiksel denklemler hakkında bilgi edinmeyi kolaylaştırmak amacıyla kapsamlı ve detaylı bir literatür tablosu sunulmaktadır.

Simion [30] üzüm suyunun termo-fiziksel özelliklerinin modellenmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. Araştırma, üzüm suyunun termal iletkenlik ve termal yayınım özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır. Çalışmada, mevcut literatürdeki deneysel veriler, ölçüm teknikleri ve matematiksel denklemler detaylı bir şekilde gözden geçirilmiştir. Üzüm suyu gibi sıvı gıda ürünlerinin termal özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesinin önemi vurgulanmıştır. Özellikle soğutma ve dondurma süreçlerinde bu özelliklerin kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, üzüm suyu gibi sıvı gıda ürünlerinin termal iletkenlik ve termal yayınım özelliklerini hesaplamak için kullanılan mevcut formüllerin doğruluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı sıcaklık aralıklarında yapılan deneysel ölçümlerin, hesaplamalarla uyumlu olup olmadığı tartışılmıştır. Çalışmada, adım adım diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) kullanarak spesifik ısı ve entalpi ölçümlerinin önemine de değinilmiştir. Özetle, bu çalışma üzüm suyu gibi sıvı gıda ürünlerinin termo-fiziksel özelliklerinin modellenmesi ve ölçülmesi konusundaki mevcut literatürü kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Telis ve Romero [31] brezilya portakal suyunun spesifik ısı, termal iletkenlik, termal yayınım ve yoğunluğu, 0.34 ve 0.73 (a/a) su içeriği arasında ve 0.5 ile 62 °C sıcaklık aralığında belirlenmiştir. Deneysel veriler, sıcaklık ve su içeriğinin fonksiyonları olarak modellenmiştir ve tüm özelliklerin bu değişkenlerle doğrusal bir bağımlılık gösterdiği bulunmuştur. Test edilen aralıkta, analiz edilen özellikler üzerinde su içeriğinin sıcaklıktan daha büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Magarremov [32] yaptığı çalışmada, doğal elma, kiraz ve ahududu sularının ve konsantrelerinin 10 ila 120° arasındaki sıcaklıklarda ve 0.1 ile 2 MPa basınçta özgül ısı kapasiteleri incelenmiştir. Araştırmalar adyabatik kalorimetre yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerin doğruluğu %0.8 hata payı ile belirlenmiştir. Meyve suları için 175 farklı özgül ısı değeri elde edilmiştir. Elde edilen veriler sıcaklık ve kuru madde içeriğine bağlı olarak fonksiyonel denklemlerle ifade edilmiştir. Çalışmada, meyve suları ve konsantrelerinin termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi ve bu özelliklerin teknolojik uygulamalara entegrasyonu amacıyla kapsamlı deneysel veriler sağlanmıştır. Özellikle, meyve suyu konsantrelerinin işlenmesi sırasında uygulanan yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında termofiziksel özelliklerin belirlenmesi, endüstriyel proseslerin optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. Deneysel veriler, belirli sıcaklık ve konsantrasyon aralıklarında doğrusal

bağımlılık göstermektedir. Araştırmalar sırasında meyve sularının kimyasal bileşenleri de analiz edilmiştir ve bu bileşenlerin özgül ısı kapasiteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, endüstriyel gıda işleme ekipmanlarının tasarımında ve üretiminde kullanılabilecek önemli bilgiler sunmaktadır.

Magerramov ve arkadaşları [33] geliştirdiği çalışmada ise şeftali, ahududu, kiraz ve erik sularının termal iletkenliğini geniş bir sıcaklık ve konsantrasyon aralığında ölçülmüştür. Bu meyve sularının termal iletkenliğini doğru bir şekilde ölçmek ve bu verilerden sıcaklık ve konsantrasyonun etkilerini değerlendirmek hedeflenmiştir. Ölçüm tekniği olarak koaksiyel silindir (durağan-hal) tekniği kullanılarak meyve sularının ısıl iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Numunelerin sıcaklık aralığı 20° - 120° aralığındadır ve konsantrasyon aralığı: 9.8 - 60.0 brix aralığındadır. Sıcaklık ve konsantrasyonun termal iletkenliğin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıcaklık ve konsantrasyonun her ikisinin de termal iletkenlik üzerinde belirgin etkileri olduğu, ancak konsantrasyonun daha büyük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, meyve sularının karmaşık fiziksel ve kimyasal yapıları nedeniyle teorik olarak doğru bir şekilde tahmin edilemediği için, doğru ölçümlere dayalı daha iyi tahmin modellerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir.

Sudhir [34] dondurma ve toplu olarak depolanan donmuş bezelyelerin termal özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Her ürün için termal iletkenlik, sıcaklık ve toplu yoğunluğun bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Her ürün için entalpi-sıcaklık verileri kalorimetrik yöntemler kullanılarak toplanmıştır. Ticari işletme koşulları altında dolma midyelerin dondurulması için gerekli enerji de belirlenmiştir. Dondurmanın termal iletkenliğinin, sıcaklık ve toplu yoğunluk arttıkça arttığı bulunmuştur. Donmuş bezelyeler için iletkenlik sonuçları, her iki değişkenle de belirgin bir eğilim göstermemiştir. Gözenekli veya granüler toplu depolanan donmuş gıdalar, sıcaklık ile birlikte karmaşık mikro yapı değişikliklerine uğruyor gibi görünmektedir ve bu etkiler üzerine daha fazla araştırma yapılması uygundur. Entalpi-sıcaklık verileri karakteristik eğilimler göstermiştir. Dolma midyelerin dondurulması için gerekli enerji, genel nem içeriğinin düşük olması nedeniyle düşük bulunmuştur.

Heldman [35] dondurma karışımının dondurulması sırasında uzaklaştırılan ısının, bileşim gibi çeşitli değişkenlerin bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Deneysel kalorimetrik sonuçlar, tahmin edilen soğutma gereksinimleriyle karşılaştırılmıştır. Tahminler, başlangıç donma noktasının üzerindeki karışımın duyusal ısısı, donmamış karışım kısmının duyusal ısısı, latent ısı ve buzun duyusal ısısı katkıları eklenerek elde edilmiştir. Bu katkıların her biri karışımın bileşimi ile değişmiştir. Deneysel sonuçlar, şekerin %100 sakkaroz, %79 sakkaroz ve %21 mısır şurubu katıları ve %50

sakkaroz ve %50 mısır şurubu katıları olduğu karışım bileşimleri ile elde edilmiştir. Mısır şurubu katıları azaldıkça ve sakkaroz arttıkça soğutma gereksinimleri artmıştır. Tahmin edilen ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Toplam soğutma gereksinimlerine en büyük katkılar, donmamış karışımın duyusal ısısı ve ürün sıcaklığında dondurulan buzun latent ısısı olmuştur.

Imran [36] yüzeyden kazıyan ısı değiştirici içindeki akış özelliklerini daha iyi anlamak için matematiksel modelleme yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, ikinci dereceden bir akışkanın durağan, sıkıştırılamaz ve izotermal akışı incelenmiştir. Modelleme sırasında, yüzeyden kazıyan ısı değiştirici'nin dar boşlukları ve bu boşluklardaki akış dinamikleri dikkate alınarak yağlama yaklaşımları teorisi (LAT) kullanılmıştır. Araştırmada, alt duvarın hareketli ve üst duvarın sabit olduğu bir kanalda yer alan pivotlu kazıyıcı bıçaklar dizisi üzerinde yoğunlaşılmıştır. Bu bağlamda, akışın hız profilleri, akım fonksiyonları ve akış oranları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, basınç dağılımı ve cihazın farklı bölgelerindeki bıçaklar ve duvarlar üzerindeki kuvvetler de belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çeşitli akış parametrelerinin grafiksel temsilleri ile desteklenmiştir. Bu grafikler, yüzeyden kazıyan ısı değiştirici içindeki akış dinamiklerini görsel olarak anlamamızı sağlamış ve cihazın performansını optimize etmek için önemli bilgiler sunmuştur. Bu çalışma, yüzeyden kazıyan ısı değiştirici'lerin tasarımı ve işletilmesi sırasında karşılaşılan akış problemlerini çözmeye yönelik önemli bir adım olup, gıda endüstrisinde daha verimli üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Masuda ve arkadaşları [37] yapılan çalışmada bir parti dondurucusu kullanarak dondurma dondurma sürecinde karıştırma hızının etkisini araştırmaktadır. Dondurma işlemi sırasında görünen viskozitedeki zamansal değişim Metzner–Otto yöntemi ile ölçülmüş ve karıştırma hızının artmasıyla dondurma işlemi sonrası görünen viskozitenin azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, karıştırma hızının artmasıyla dondurmaya dahil edilen hava kabarcıklarının sayısı da artmış, daha yüksek kesme kuvveti nedeniyle bu kabarcıklar daha küçük kabarcıklara ayrılmıştır. Daha yüksek karıştırma hızlarında daha dar bir kabarcık boyutu dağılımı elde edilmiştir. Bu bulgular, dondurmanın reolojik özelliklerinin ve mikro yapısının karıştırma işlemi ile kontrol edilebileceğini göstermektedir. Çalışma, dondurma üretiminde karıştırma hızının optimize edilmesiyle dondurmanın viskozitesi ve içeriğindeki hava kabarcıklarının kontrol edilebileceğini, bunun da nihai ürünün dokusunu ve lezzetini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Chang ve arkadaşları [38] yapılan çalışmada, su oranı %74 ila %94 arasında değişen gıda sistemlerinin entalpileri, 230–310°K (–50 ila 95°F) sıcaklık aralığında sunulmaktadır. Bu korelasyonlarla, bu çalışmada kullanılan veri tabanının sınırları

içinde, gıdaların dondurulması ve çözülmesi sırasında gerekli enerji miktarı hesaplanabilir. Bunun için, gıda grubunun (et, meyve suyu veya sebze/meyve) kimliği, su içeriği, başlangıç ve son sıcaklıklarının belirtilmesi gerekmektedir. Bu yöntem, farklı gıda kategorileri için enerji gereksinimlerini doğru bir şekilde tahmin etmek ve bu süreçleri daha verimli hale getirmek amacıyla kullanılabilir. Dondurulmuş gıda üreticileri ve işleyicileri, bu korelasyonları kullanarak enerji tüketimini optimize edebilir ve ürün kalitesini artırabilir. Özellikle dondurma ve çözme işlemlerinde doğru su içeriği ve sıcaklık bilgileriyle, hem enerji tasarrufu sağlanabilir hem de gıdaların besin değerleri korunabilir. Bu bulgular, gıda endüstrisinde enerji yönetimi ve süreç optimizasyonu açısından büyük öneme sahiptir.

Fricke [39] gıdaların termofiziksel özelliklerinin, işlem sürelerinin hesaplanmasının ve gıda depolama ve muhafaza ekipmanlarının tasarımının gerekliliği vurgulanmıştır. Mevcut olan çok sayıda gıda maddesi bulunmakta olup, bu maddelerin özellikleri büyük ölçüde kimyasal bileşime ve sıcaklığa bağlıdır. Bileşime dayalı termofiziksel özellik modelleri, gıdaların özelliklerini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tahmin etmenin bir yolunu sunar. Birçok model geliştirilmiş olup, gıda işleme ekipmanı tasarımcısı mevcut modeller arasından uygun olanları seçme zorluğuyla karşı karşıyadır. Bu makalede, seçilmiş termofiziksel özellik modelleri, literatürden derlenen kapsamlı bir deneysel termofiziksel özellik veri seti ile karşılaştırılarak niceliksel olarak değerlendirilmiştir. Buz fraksiyonu tahmini için, Chen (1985b) tarafından geliştirilen denklem en iyi performansı gösterirken, Tchigeov (1979) tarafından geliştirilen model onu yakından takip etmiştir. Görünür özgül ısı kapasitesi için, Schwartzberg (1976) modelinin en iyi performansı gösterdiği bulunmuş ve özgül entalpi tahmini için Chen (1985a) denklemi en iyi sonuçları vermiştir, bu modeli Miki ve Hayakawa (1996) yakından takip etmiştir. Son olarak, termal iletkenlik için, Levy (1981) tarafından geliştirilen model en iyi performansı göstermiştir. Bu bulgular, gıda işleme ekipmanı tasarımcıları ve mühendisleri için önemli bir rehber niteliği taşımaktadır, çünkü doğru model seçimi, gıda işleme süreçlerinin verimliliğini ve doğruluğunu büyük ölçüde artırabileceği bulunmuştur.

Donma süresinin modellenmesi ve deneysel olarak incelenmesinin yapıldığı çalışmaların özeti Tablo 1.3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 1.3 Literatürde sayısal ve deneysel olarak yapılan faz değiştirme çalışmaları

Referans	Yayımlanma Yılı	Deneysel	Sayısal	Sayısal Modelleme Yöntemi	Deney Tesisatı Açıklaması ve Bulgular
[20]	2017	X	-	-	-Su banyosu ile şartladırılmış donmuş yüzey üzerinde kamera ile buz oluşumunun izlenmesi yapılmıştır. -Yüzey sıcaklığı düştükçe donma hızı artmaktadır. -Yüzey sıcaklığı düştükçe buzun yüzeye temas açısı azalmaktadır.
[40]	2020	X	X	Hızlı Katılaşma	-Bir su banyosu ile şartlandırılan yüzeye damlatılan su damlacığının donması kamera ile sürekli olarak izlenerek incelenmiştir. -Buz oluşumunun başlama sıcaklığı maddenin donma sıcaklığından daha düşük olduğundan diğer katılaşma modellerinden farklı olarak hızlı katılaşma modelinin kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur.
[21]	2016	-	X	Faz-Bölge	-2 boyutlu sayısal olarak şekerli su çözeltilerinin donma prosesi sırasında oluşan buzların nasıl büyüdüklerini modelleyen bir çalışmadır. -Şeker oranı arttıkça daha küçük buzlar elde edilirken soğutma oranı arttıkça daha büyük buzlar elde edilmektedir.
[19]	2014	X	X	Entalpi-Gözeneklilik	-Sıvı azot ile sıcaklığı şartlandırılmış yüzeyde kamera ile buz oluşumunun görüntülenmesi. -Buz oluşum yüzdesi ile modelleme çok yakın bulunmuştur.
[18]	2011	-	X	Entalpi-Gözeneklilik	-2 boyutlu olarak bir boru içinde boru sisteminde buz oluşumunun modellenmesi incelenmiştir. -Donma gerçekleşirken ara yüzde doğal taşınım ve zorlanmış taşınımın ihmal edilebilir olduğu, oluşan buz katmanı nedeniyle iletimin gittikçe azaldığı bulunmuştur.
[22]	2020	X	X	Entalpi-Gözeneklilik	-Isı pompası ile glikol-su karışımı şartlandırılmış olup bir tankın içerisine plastik borularla yönlendirilmiştir. -Tankın içerisinde faz değiştiren madde olarak su bulunmaktadır. -3 boyutlu olarak bir tank içinde suyun donması sayısal olarak incelenmiştir. -3 boyutlu olarak sayısal modelleme yapıldığında çok fazla bilgisayar gücü gerektiğinden daha kaba çözüm ağları ve büyük zaman adımları kullanılarak çözüm yapılabilmiştir.

Sadece dondurma özelinde yapılan çalışmaların literatür özeti ise 1.4'de gösterildiği gibidir.

Meyve sularıi etler gibi diğer gıda maddeleri özelinde yapılan çalışmaların literatür özeti ise 1.5'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1.4 Dondurmanın donma prosesi üzerine literatürde yapılan çalışmaların özeti

Referans	**Yayımlanma Yılı**	**Deneysel-Sayısal**	**Gıda Türü**	**Çalışma Özeti**
[35]	1970	Deneysel	Dondurma	-Dondurma içindeki sakkaroz, sükroz gibi farklı şekerlerin ve farklı konsantrasyonunun donması için gerekli olan enerji miktarının belirlenmesi için çalışma yapılmıştır.
[3]	1976	Deneysel	Dondurma	-Dondurmanın özgül ısı değerini ortaya koyacak bir denklem belirlenmiştir.
[34]	1984	Deneysel	Dondurma	-Dondurma ve donmuş bezelyelerin, ısıl iletkenlik, özgül ısı gibi özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir.
[4]	1985	Deneysel	Dondurma	-Dondurmanın özgül ısı değerini ortaya koyacak bir denklem belirlenmiştir.
[1], [10]	2003	Deneysel- Sayısal	Dondurma	-Dondurmanın özgül ısı,ısıl iletkenlik, entalpi eğrisi gibi değerler deneysel yöntemlerle belirlenmiş olup sayısal analizlerle de donma davranışı incelenmiş olup son ürün kalitesi değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 1.5 Genel gıda maddeleri üzerine literatürde yapılan çalışmaların özeti

Referans	**Yayımlanma Yılı**	**Deneysel-Sayısal**	**Gıda Türü**	**Çalışma Özeti**
[30]	2009	Deneysel	Üzüm Suyu	-Üzüm suyunun özgül ısı, ısıl iletkenlik gibi değerlerinin deneysel olarak bulunması üzerine çalışılmıştır.
[31]	1998	Deneysel	Portakal Suyu	-Portakal suyunun ısıl özelliklerinin sıcaklığa ve içerisindeki kuru madde oranına göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir.
[32], [33]	2006-2007	Deneysel	Meyve Suları	-Çok çeşitli meyve sularının özgül ısıları deneysel olarak belirlenmiş ve sıcaklığa bağlı olarak korele edilmiştir. Aynı zamanda çeşitli meyve sularının ısıl iletkenlikleri yine sıcaklığa bağlı olarak korele edilmiştir.
[28]	1991	Deneysel	Et - Hamur	-Et ve hamurun ısıl özelliklerinin deneysel olarak bulunması ile ilgili yapılan çalışmaları özetleyen bir inceleme makalesidir.
[29]	1987	Deneysel	Et	-Et ürünlerinin özgül ısı, donması için gerekli ısı geçişi miktarları için yapılan deneysel çalışmaları özetleyen bir inceleme makalesidir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, sütlü buz kategorisindeki dondurmaların ısıl özelliklerini belirlemek ve donma süreçlerini deneysel ve teorik olarak incelemektir.

Literatür özetinde de görüldüğü gibi, ısıl özellikler için çeşitli bağıntılar ve çalışmalar, ürünün içeriğine ve sıcaklığına göre belirlenmiştir. Tezin ısı geçişinin modellenmesi bölümünde bu bağıntılar detaylıca açıklanacak ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan ürün içeriğine göre özgül ısı ve ısıl iletkenlik değerleri hesaplanacaktır. Bu tezde, literatüre katkı olarak yeni bir özgül ısı denklemi de önerilmiştir. Literatürdeki özgül ısı denklemlerinde, dondurma içeriğinde bulunan kıvam artırıcıların bağladığı su miktarı hesaba katılmadan denklemler önerilmiştir. Bu çalışmada ise, bağlanan su miktarı denklemde bir parametre olarak verilmiştir. Her ne kadar bu denklemin literatürdeki denklemlerden çok farklı olmadığı görülse de, donma sürecini modellemede daha başarılı olduğu ortaya konulmuştur.

Deneysel çalışmalara geçildiğinde, gerçek üretim koşullarının simüle edilmesi hedeflenmiştir. Buradaki amaç, mevcut üretim koşullarına en yakın şartlarda dondurmanın donma sürecini izleyebilecek bir çalışma yapmaktır. Bu amaçla, dondurmanın merkez sıcaklığından sürekli veri alacak sıcaklık sensörleri kullanılacaktır.

Deneysel çalışmalardan sonra amaçlanan bir diğer adım ise bu deneysel sonuçları sayısal analizlerle doğrulamaktır. Sayısal analizlerin deneysel çalışmaları doğrulaması, daha sonra yapılacak olan üretim parametrelerinin donma performansı üzerindeki etkilerinin inceleneceği analiz çalışmalarını kolaylaştırmak içindir. Çünkü her bir parametre için yapılması gereken deneyler süre olarak kısa olsa bile, dondurma numunelerinin hazırlanması, deneyin gerçekleştirilmesi ve deney tesisatının yeni bir deneye hazırlanması zaman alıcı süreçlerdir.

Son olarak, dondurmayı kalıp içinde donduran soğutucu sıvının, dondurmanın kalıp içindeki ilk sıcaklığının ve dondurma içindeki hava oranının donma sürecine etkisi sayısal analizlerle karşılaştırılarak, donma performansının nasıl gerçekleştiği incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Tezin ısıl özelliklerinin bulunması kısmında da detaylıca bahsedileceği üzere dondurma olarak bildiğimiz bazı ürünler Türk Gıda Kodeksi'ne göre yenilebilir buzlar olarak isimlendirilmiş olup sütlü buz, bitkisel yağlı sütlü buz olarak sınıflandırılmış ve içeriklerine göre kategorize edilmiştir.

Bu tezde sütlü buzların seçilmesinin nedeni seri üretimler daha çok sütlü buz denen ürünlerin kullanılmasıdır. Literatür özetinde de belirtildiği üzere çeşitli ürünlerinin donmasını modellemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır ve dondurma özelinde de detaylı çalışmalar bulunmaktadır. Bu tezde dört ana hipotez üzerinde durulmuştur. Bunlar sırasıyla, dondurma içeriğinde bulunan kıvam artırıcı maddelerin bağladığı su miktarının, dondurmanın özgül ısısını anlamlı ölçüde etkilediği ve bağlanmış su miktarının hesaba katılarak yapılan modellemelerin daha doğru sonuç verdiğidir. Gerçek üretim koşullarına en yakın şartlarda yapılan deneysel çalışmalar, sayısal analizlerle doğrulandığında, üretim parametrelerinin donma performansı üzerindeki etkileri daha güvenilir bir şekilde tahmin edilebilir.Dondurmayı kalıp içinde donduran soğutucu sıvının sıcaklığı, dondurma içindeki hava oranı ve dondurmanın başlangıç sıcaklığı, donma sürecinin hızını ve verimliliğini anlamlı ölçüde etkiler. Literatürdeki özgül ısı denklemleri ile kıyaslandığında, bu tezde önerilen yeni özgül ısı denklemi, dondurmanın donma sürecini modellemede daha yüksek bir doğruluk sağlar.

2
KALIP İÇİNDE DONDURULAN SÜTLÜ BUZ ÜRÜNLERİN ISI GEÇİŞİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde literatürde bulunan ısıl özellik bağıntıları kullanılarak yapılan sayısal analiz anlatılmıştır. Sayısal analizin yapılması için Ansys Mechanical ticari programı kullanılmıştır. Tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında Ansys Transient Thermal aracı ile de çözümler yapılacak ve deneysel çalışmalarla sonuçlar karşılaştırılacaktır. Literatürde donma süresi modellemelerinde karışımın donmaya başlama sıcaklığı ve özgül ısı bağıntıları kullanıldığı görülmüş olup, bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ısı iletim katsayısı bağıntısı modellemeye ilave edilmiştir. Çalışmada şu ana kadar yapılan modellemede sadece karışımın donmaya başlama sıcaklığı ve özgül ısı için bağıntılar kullanılmıştır. Isı iletim katsayısı için bir bağıntı kullanılmamış olup, sabit kabul edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda ısı iletim katsayısı için de bağıntılar kullanılacaktır.

2.1 Isıl Özelliklerin Bulunması

Çalışmada incelenen ürünler yenebilir sütlü buz kategorisindedir. Yenebilir sütlü buz ürünler dondurmalardan farklı olup, bütün bu farklar Türk Gıda Kodeksinde belirtilmiştir. Su buzu, buz karışımları genel tanımına uyan, meyve ve/veya aroma maddeleri içeren, kuru maddesi ağırlıkça en az %12 olan buz karışımlarını, meyveli buz karışımları genel tanımına uyan, kuru maddesi ağırlıkça en az %12 olan ve ağırlıkça en az %15 meyve içeren buz karışımlarını, sorbe, buz karışımları genel tanımına uyan, kuru maddesi ağırlıkça en az %12 olan ve ağırlıkça en az %25 meyve içeren buz karışımlarını, sütlü buz sütlü buz ürünleri genel tanımına uyan, ağırlıkça en az %2,5 süt yağı ve ağırlıkça en az %6 yağsız süt kurumaddesi içeren, süt orjinli olmayan protein ve yağ içermeyen sütlü buz ürünlerini, Bitkisel yağlı sütlü buz: Sütlü buz ürünleri genel tanımına uyan, bitkisel yağ ve/veya süt yağı ve/veya yumurta yağını ağırlıkça en az %5 oranında içeren ve süt proteini dışında protein içermeyen ve süt proteini içeriği ağırlıkça en az %2,2 olan sütlü buz ürünlerini ifade etmektedir.

Dondurma ise hacim artış oranı en fazla %100 olan, meyve veya sebze kullanılarak üretilen çeşnili dondurmada meyve veya sebze oranı kütlece en az %15 olan, meyve suyunda kütlece en az %2,5 oranında titre edilebilir asit bulunduran meyveler ve tropik bölgelerde yetişen aroması yüksek ve/veya yoğun kıvama sahip meyve ilaveli çeşnili dondurmalarda ve aroması yüksek ve/veya yoğun kıvama sahip sebze ilaveli çeşnili dondurmalarda ise meyve veya sebze oranı kütlece en az %10 oranında olan gıdalardır. Fındık, fıstık, ceviz, antepfıstığı, badem gibi sert kabuklu meyve çeşnileri katılarak üretilen çeşnili dondurmalarda bu çeşnilerin bir veya birkaçının birlikte kullanılması halinde toplam çeşni oranı kütlece en az %5 oranında olur

Isıl özellik olarak biraz önce bahsedildiği gibi sadece donmaya başlama sıcaklığı, özgül ısılar ve ısı iletim katsayısının bulunması ile başlamıştır.

2.1.1 Donma Noktasının ve Isıl İletkenliğin Hesaplanması

Donmaya başlama sıcaklığını bulmak için [9]'de anlatılan sükroz eşitliği yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak bulunan donmaya başlama sıcaklığı -1.5 °C'dir.

Tablo 2.1 Örnek karışımın bileşenlerinin kütlesel oranları ve maddesel özellikleri

Sembol	Açıklama	Birim	Değer
X_s	Katı maddelerin karışımdaki kütlesel oranı	%	14
C_{ps}	Katı maddelerin özgül ısısı	$Jkg^{-1}C^{-1}$	1256
X_w	Suyun karışımdaki kütlesel oranı	%	76
C_{pw}	Suyun özgül ısısı	$Jkg^{-1}C^{-1}$	4187
X_b	Bağlı suyun karışımdaki kütlesel oranı	%	8
C_{pice}	Buzun özgül ısısı	$Jkg^{-1}C^{-1}$	2040
M_w	Suyun moleküler kütlesi	$kgmol^{-1}$	0.018
M_s	Katı maddelerin moleküler kütlesi	$kgmol^{-1}$	0.3423
R	Mükemmel gaz sabiti	$Jmol^{-1}C^{-1}$	8.3145

Isı iletim katsayısı, Cogne ve diğerlerinin çalışmasına göre bulunmuştur [1]. İlk olarak, yalnızca bileşenin ısı transfer katsayısının etkileri Denklem (2.1)'te dikkate alınmıştır.

$$\lambda_c^{para} = \sum_j \varepsilon_j \lambda_j \tag{2.1}$$

λ iletkenliği temsil eder, c bileşenlerin sürekli fazını, yani dondurma karışımının sıvı fazını temsil eder. j bileşen sayısını ve ε Denklem (2.2) ve Denklem (2.3)'te tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_j = X_j \frac{\rho_c}{\rho_j} \tag{2.2}$$

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_j \frac{X_j}{\rho_j}} \tag{2.3}$$

ρ karışımın yoğunluğunu temsil eder. Dondurma ısı transfer katsayısını bulabilmek için, ısı transfer katsayısı formülasyonlarına buzu da dahil etmek gerekmektedir. Bunu yapmak için, [1]'den Denklem (2.4) ve Denklem (2.5) kullanılır.

$$\lambda_{mix} = \lambda_c^{para} \frac{1 - \varepsilon_{ice} + \varepsilon_{ice} F \frac{\lambda_{ice}}{\lambda_c^{para}}}{1 - \varepsilon_{ice} + \varepsilon_{ice} F} \tag{2.4}$$

$$F = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{3} [1 + (\frac{\lambda_{ice}}{\lambda_c^{para}} - 1) g_i]^{-1} \tag{2.5}$$

g değerleri sırasıyla g_1=g_2=1/11, g_3=9/11'dir. Son olarak, ısı transfer katsayısı bağıntısını tamamlamak için havanın da ısı transfer katsayısı formülasyonuna dahil edilmesi gerekir.

$$\lambda_{IC}(T) = \lambda_{mix}(T) \frac{2\lambda_{mix}(T) + \lambda_{air} - 2\varepsilon_{air}(\lambda_{mix}(T) - \lambda_{air})}{2\lambda_{mix}(T) + \lambda_{air} + \varepsilon_{air}(\lambda_{mix}(T) - \lambda_{air})} \tag{2.6}$$

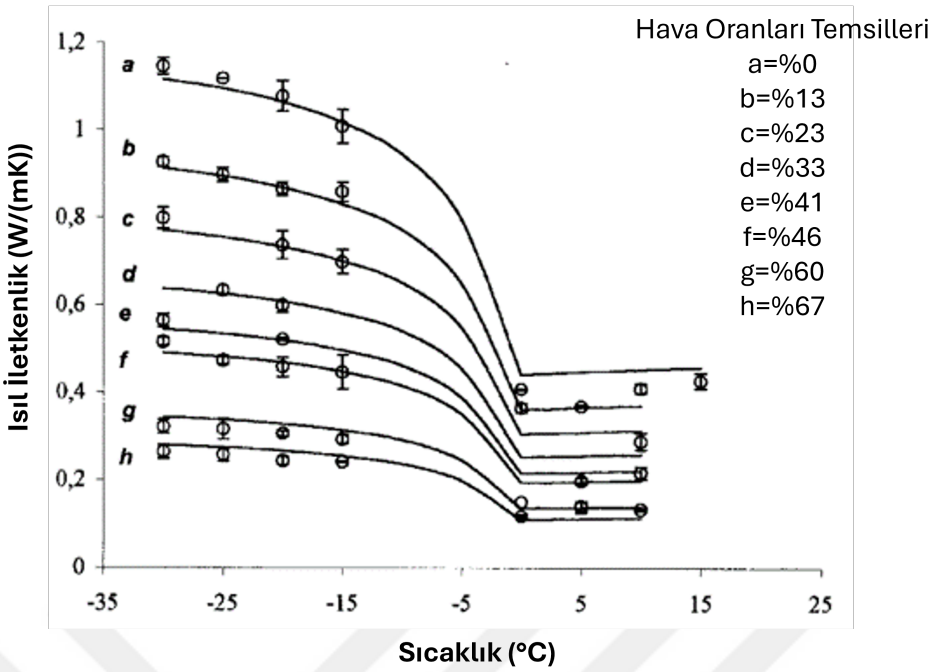
λ ısı iletkenlik katsayısını ve λ_{IC} dondurmanın ısı iletkenlik katsayısını temsil eder. Şekil 2.1'de görüleceği üzere literatür sonuçlarına göre donma noktasına kadar ısıl iletkenlik değeri sabit giderken faz değiştirdikten ve donma gerçekleştikten sonra artış göstermektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda Şekil 2.1'de görüleceği üzere literatür sonuçlarına benzer karakteristikte ısıl iletkenlik değeri bulunmuştur.

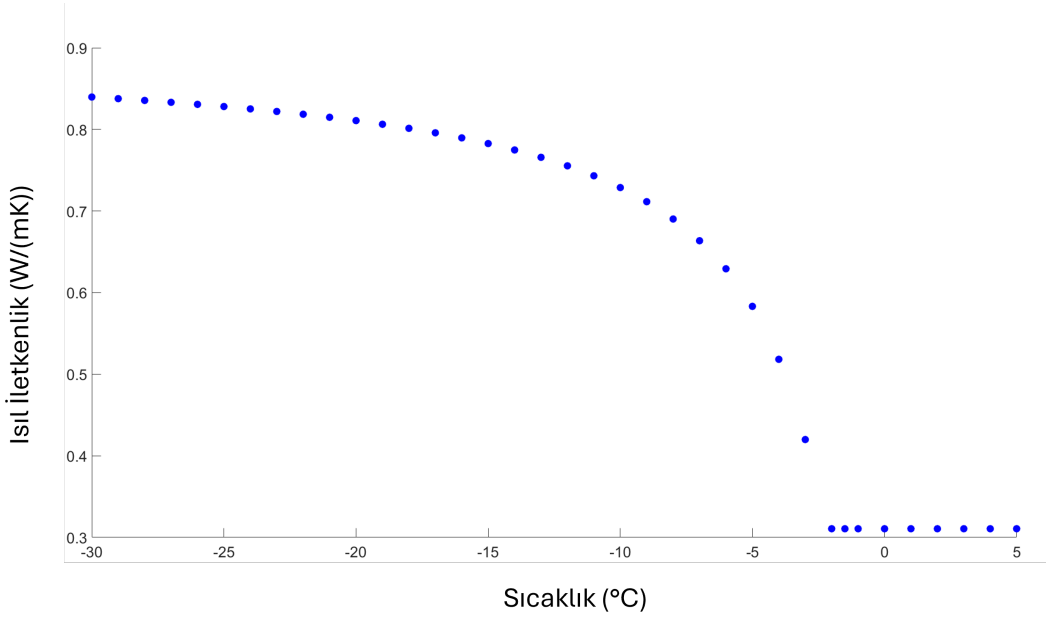
2.1.2 Yeni Özgül Isı Korelasyonunun Önerilmesi

Çalışmanın bu kısmında ağırlık eklemeli modele Tablo 2.1 kullanılarak, Schwartzberg ve Chen modellerine göre özgül ısı değerleri hesaplanmış ve önerilen yeni özgül ısı korelasyonu ile karşılaştırma yapılmıştır.

Literatür incelemesinde önerilen korelasyonlarda donmadan kalan su miktarının hesaba katılmadığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalara göre dondurma donma prosesinde reçete içindeki su miktarının %8 kadarı donmadan kalmaktadır [7]. Bu



Şekil 2.1 Farklı hava oranları içeren dondurmaların ısı iletkenlik katsayılarının sıcaklıkla değişiminin gösterimi



Şekil 2.2 Tez çalışmasında kullanılan ve %30 hava içeren deneysel sütlü buz numunesinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminin gösterimi

nedenle donmadan kalan suyu hesaba katacak bir özgül ısı denkleminin önerilmesinin donma prosesini modellemede yararlı olacağı öngörülmüştür.

Özgül ısı değeri entalpi değerinden türetilmiş olup, bu kısımda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

$$H = H_s X_s + H_w X_w + H_I X_I \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} = C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I X_I + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} + H_I \frac{\partial X_I}{\partial T} \tag{2.8}$$

$$\partial X_I = -\partial X_w \tag{2.9}$$

$$C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I X_I + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} - H_I \frac{\partial X_w}{\partial T} \tag{2.10}$$

$$\Delta H_T = H_w - H_I \tag{2.11}$$

$$C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I X_I + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} (H_w - H_I) \tag{2.12}$$

$$C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I X_I + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} \Delta H_T \tag{2.13}$$

$$X_I = n_{wo} - X_w \tag{2.14}$$

$$C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I (X_{wo} - X_w) + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} \Delta H_T \tag{2.15}$$

$$C_e = C_s X_s + C_w X_w + C_I X_{wo} - C_I X_w + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} \Delta H_T \tag{2.16}$$

$$C_e = C_s X_s + C_I X_{wo} - X_w (c_w - C_I) + H_w \frac{\partial X_w}{\partial T} \Delta H_T \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial X_w}{\partial T} = \frac{\partial a_w}{\partial T} \frac{\partial X_w}{\partial a_w} \tag{2.18}$$

Chen [4] çalışmasında su aktivitesinin sıcaklığa göre dönüşümü için denklem 2.19 ve su oranının su aktivitesine göre değişimi için denklem 2.20 kullanmıştır.

$$1 - a_w \approx \frac{18 \Delta H}{R T T_0} (T_0 - T) \tag{2.19}$$

$$X_w \approx b n_s + \frac{E n_s a_w}{1 - a_w} \tag{2.20}$$

Schwartzberg ise su oranının su aktivetisine göre değişimi için aynı denklemi kullanmışken su aktivitesinin sıcaklığa göre değişimi için denklem 2.21 kullanmıştır.

$$1-a_w=\frac{LM_w}{RTT_0}(T_0-T) \tag{2.21}$$

Denklem 2.17 yazımına devam ederken Chen'in kullandığı su aktivitesinin sıcaklığıa göre dönüşümü denklemi yerine Schwartzberg'in kullandığı denklem kullanılacaktır. Su oranının su aktivitesine göre değişimi için iki araştırmacı da aynı denklemi kullandığından aynı denklem kullanılarak özgül ısı denklemi yazımına devam edilecektir.

İlk olarak su aktivitesinin sıckalığa bağlı denkleminin yazımından 2.21 devam edilirse,

$$\frac{\partial a_w}{\partial T}=\frac{\partial}{\partial T}\Big(1-\frac{LM_w}{RTT_0}(T_0-T)\Big) \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial a_w}{\partial T}=-\frac{LM_w}{RTT_0}\Big(-\frac{1}{T^2}(T_0-T)-\frac{1}{T}\Big) \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial a_w}{\partial T}=\frac{LM_w}{RT^2} \tag{2.24}$$

Su oranının su aktivitesine göre değişimi için denklem 2.20 yazımına devam edilirse,

$$\frac{\partial X_w}{\partial a_w}=\frac{\partial(bX_s)}{\partial a_w}+\frac{\partial}{\partial a_w}\Big(\frac{EX_s a_w}{1-a_w}\Big) \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial X_w}{\partial a_w}=EX_s\frac{\partial}{\partial a_w}\Big(a_w(1-a_w)^{-1}\Big) \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial X_w}{\partial a_w}=EX_s\Big(\frac{1}{1-a_w}+\frac{a_w}{(1-a_w)^2}\Big) \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial X_w}{\partial a_w}=\frac{EX_s}{(1-a_w)^2} \tag{2.28}$$

Denklem 2.18'da denklem 2.24 ve denklem 2.28'da bulunan değerler yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial X_w}{\partial T}=\frac{LM_w}{RT^2}\frac{EX_s}{(1-a_w)^2} \tag{2.29}$$

Denklem 2.29'de hala su aktivitesine bağlı ifade bulunmaktadır. Onu da sıcaklığa bağlı yazabilmek için denklem 2.21'deki eşitlik yerine yazılırsa denklem 2.29 tekrar yazıldığında eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{\partial X_w}{\partial T} = \frac{EX_s T_0^2 R}{LM_w} \frac{1}{(T_0 - T)^2} \tag{2.30}$$

Denklem 2.30 denklem 2.17'da yerine yazılırsa ve aşağıdaki dönüşümler de yapılırsa yeni özgül ısı denklemi 4.4'daki gibi ifade edilebilir.

$$E = \frac{18}{M_s} \tag{2.31}$$

$$M_w = 18.01 \tag{2.32}$$

$$\Delta H_T = 0.5(C_w - C_I)(T_0 - T) \tag{2.33}$$

$$C_e = C_s X_s + C_I X_{wo} - X_w(c_w - C_I) + \frac{X_s T_0^2 R}{LM_s} \frac{1}{(T_0 - T)^2} \Big(L - 0.5(C_w - C_I)(T_0 - T) \Big) \tag{2.34}$$

Önerilen özgül ısı bağıntısının geçerliliğini kontrol etmek, diğer özgül ısı bağıntıları dikkate alınarak önemlidir. ASHRAE, 2006 [41]'dan çikolatalı dondurma karışımının bileşimi Tablo 2.2'da gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Çikolatalı dondurmanın fiziksel özellikleri

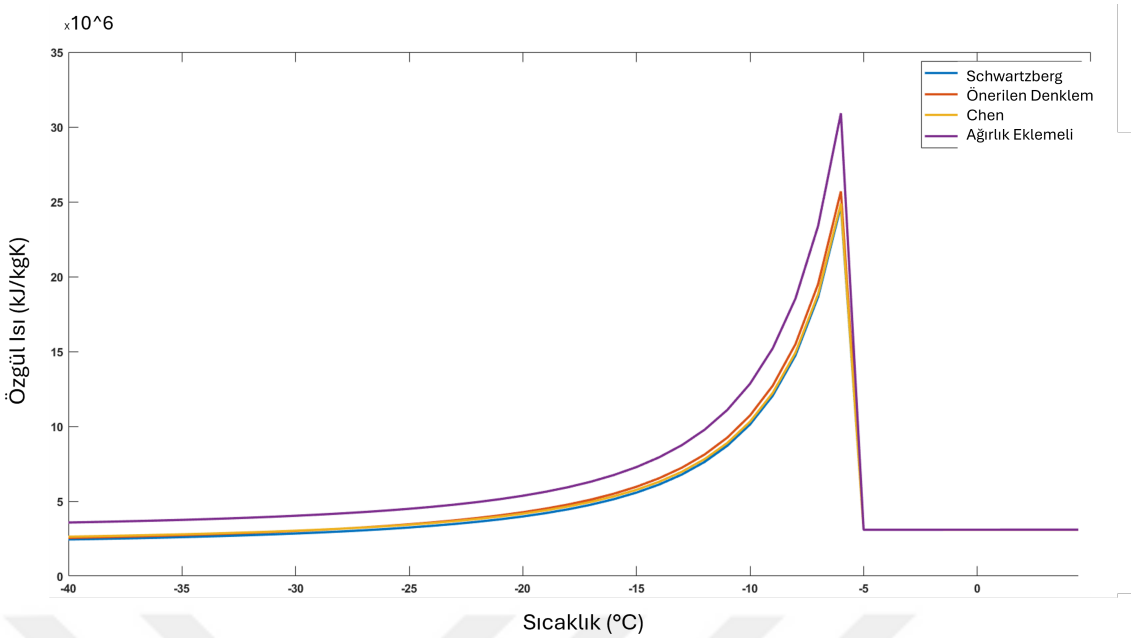
Gıda Maddesi	**Su**	**Protein**	**Yağ**	**Karbonhidrat**	**Kül**
	X_{wo}	X_p	X_f	X_c	X_a
Çikolatalı dondurma	55.7	3.8	11	29.4	1

Su, protein, yağ, karbonhidrat ve külün bireysel özgül ısı değerleri Choi ve Okos [7] çalışmasında bulunabilir. Literatüre ve önerilen özgül ısı formülasyonlarına göre, özgül ısı sonuçları Tablo 2.2'de karşılaştırılmıştır. Özgül ısı değeri, seçilen −35 °C sıcaklığında belirlenmiştir.

Tablo 2.3 Donma noktasının üstünde ve altında özgül ısı değerleri

Korelasyon	**Donma Noktasının Üstünde Özgül Isı kJ/(kg K)**	**Donma Noktasının Altında Özgül Isı kJ/(kg K)**
ASHRAE	3.11	2.75
Chen	3.09	2.79
Schwartzberg	3.10	2.60
Ağırlık Toplamı	3.10	3.75
Önerilen	3.10	2.74

Önerilen formülasyonun da literatür verileriyle çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Özgül ısı değerlerinin sıcaklığa göre değiştiği bilinmektedir ve önerilen özgül ısı bağıntıları ile diğer literatür özgül ısı değerleri verilen çikolatalı dondurma



Şekil 2.3 Literatür verilerine göre özgül ısı hesaplamaları

bileşimine göre karşılaştırılmıştır. Her bir bağıntı için özgül ısı hesaplamaları ve karşılaştırmaları Şekil 2.3'te bulunabilir.

3
DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMALARI

3.1 Deney Düzeneği ve Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmada kalıp içinde bulunan sütlü buz ürünlerinin donma süresi ve donma prosesi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada sütlü buz kalıplarının dışındaki soğutucu akışkan su-glikol çözeltisi olup, çalışma sıcaklığı -25°C ile -32°C arasında olabilmektedir.

Sütlü buzların sıcaklık değişiminin izlenmesi için PT100 tipi sıcaklık sensörü kullanılacaktır. Bu sensörün ölçüm hassasiyeti ± 0.05°C'dir. Özellikle faz değişimi sıcaklığının deneysel olarak en doğru şekilde belirlenebilmesi için bu hassasiyette bir ölçüm cihazı ile çalışmaya karar verilmiştir.

Deney sisteminin ölçüm yeterliliği analizi Minitab programında "Gage R&R", yani ölçüm aletinin ölçümlerinin tekrarlanması ve ölçülen numunelere göre çıkan sonuçların tekrarlanabilirliğini ve yeniden üretilebilirliğini tespit edebildiğimiz analiz yöntemidir. Ölçüm yeterliliği analizinin detayları verilmeden önce deney tesisatı açıklanacaktır.

Kalıp içinde dondurmaların donmasının modellemesi yapılacağından zamana bağlı sıcaklık değişimlerini yüksek hassasiyetle incelemek gerekmektedir. Özellikle donmaya başladığı sıcaklığı ve donma gradyenenini gözlemleyebilmek için en azından 0.2 °C hassasiyete ihtiyaç olduğuna karar verilmiştir. PT100 tipi bir sıcaklık probu ile sıcaklık değişimi izlenmiş olup, probun hassasiyeti ± 0.05 °C'dir. Deney tesisatının görseli Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir.

Deneysel çalışmalar için hazırlanan numunenin kuru madde oranı % 31.3'tür. İçerisinde %5.4 oranında yağ bulunmaktadır.

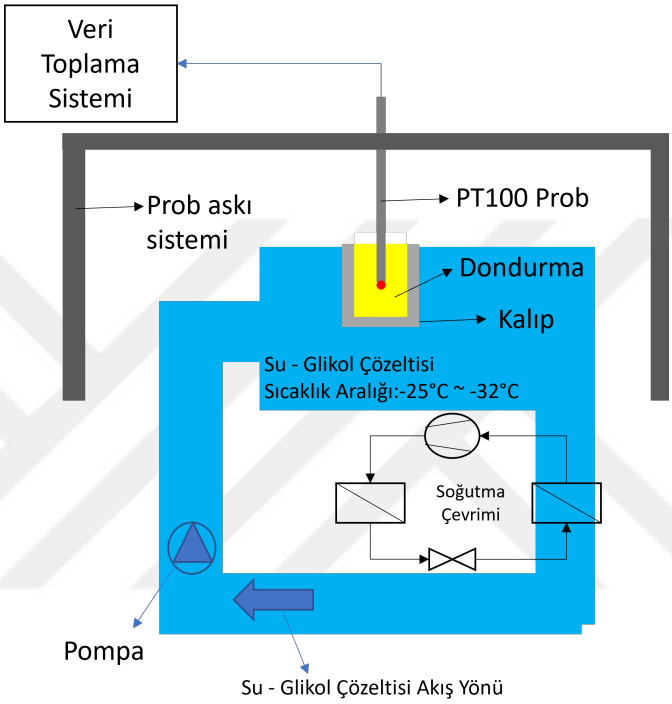
Şekil 3.1'de gösterildiği üzere "1" ile su-glikol çözeltisi, 2 ile kalıplar ve 3 numara ile de PT100 tipi prob gösterilmiştir. 4 numara ile PT100 probun taşıma aparatı gösterilmişken 5 numara ile veri toplama cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deney tesisatının gösterimi

Deneysel çalışmaları olabildiğince doğru yapmanın bir diğer önemli parametresi de probun doğru konumlanmasıdır. Prob, her seferinde kalıp içinde aynı yerde konumlanmalıdır. Bu nedenle su banyosundan ve kalıplardan ayrı bir sistem olarak bir iskelet sistem oluşturulmuş ve prob bu iskelet sisteme asılarak her seferinde kalıbın aynı noktasına asılması sağlanmaktadır. Şekil 3.2'de prob askı sistemi ve veri toplama sistemi fotoğrafı gösterilmiştir.

Deney tesisatının şematik gösterimi Şekil 3.2'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Deney tesisatının şematik gösterimi

Deney tesisatı ve kullanılacak ekipmanlar belirlendikten sonra ölçüm sistemi analizi kısmına geçilmiştir. Bu analiz Minitab programının "Gage R&R" denilen araacı kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm sistem yeterliliği analizinin daha hızlı yapılabilmesi için havalı sütlü buz ürünü yerine su buzu dondurmalar kullanılmıştır. Su buzu dondurmaların üretimi, saklanma süresi ve içinde hava olmaması nedeniyle ölçüm sistemi analizinde kullanılmasına karar verilmiştir. Kuru madde oranları % 17.5 ve % 16 olan iki farklı su buzu ürününün donmaları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. İki adet numune ile ölçüm sistem analizi yapılmıştır. Ölçümlerin insandan bağımsız olduğunu kanıtlamak için iki adet operatör kullanılmıştır. Her bir numune beş kez ölçülmüş olup toplamda 20 adet ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Tablo 3.1'de gösterildiği gibidir.

Sonuçlar yine Minitab programında çaprazlı ölçüm sistem yeterliliği kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre çalışma varyasyon oranı ,% Study Var, %20,61

Tablo 3.1 Ölçüm yeterliliği analizi sonuçları

Ölçüm Sırası	Numune Adı	Operatör	Faz Değişimi Başlangıç Sıcaklığı °C
1	1	1	-2,30
2	2	1	-2,87
3	1	2	-2,39
4	2	2	-2,78
5	2	1	-2,88
6	1	1	-2,34
7	2	2	-2,79
8	1	2	-2,36
9	2	1	-2,89
10	1	1	-2,36
11	2	2	-2,82
12	1	2	-2,34
13	2	1	-2,90
14	1	1	-2,30
15	1	2	-2,34
16	2	2	-2,7
17	2	1	-2,89
18	1	1	-2,35
19	2	2	-2,85
20	1	2	-2,39

olarak bulunmuştur. Ölçüm sisteminin yeterli olduğunu söyleyebilmek için bu değerin %30'un altında olduğu bulunmalıdır. Bu değer %30'un altında olduğundan ölçüm sisteminin yeterli olduğu değerlendirilmiştir.

Ayrıca birbirinden çok farklı ölçülen parça sayısının da belirli bir değerde olması gerekmektedir. Bu değer Minitab programında "Number of Distinct Categories" olarak verilmiştir. Bu değer de 5 ve 7 arasında olursa sistem geçerlidir. Bizim analizlerimiz sonucunda 6 adet birbirinden farklı ölçüm bulunduğundan ölçüm sistemimiz yeterlidir diyebiliriz.

Minitab programında yapılan analizlerin sonuçları da Şekil 3.3'te verilmiştir.

3.2 Sayısal Analiz

Isı geçişinin modellemesi için Ansys Mechanical programı altında 'Transient Thermal Tool' kullanılarak modellemeler yapılmıştır. Bu aracın adı tezin ilerleyen bölümlerinde süreksiz ısıl çözüm aracı olarak kullanılacaktır.

Bu modellemede 40 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindir şeklindeki bir sütlü

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (5,15 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,072102	0,37132	20,61	92,83
Repeatability	0,036028	0,18555	10,30	46,39
Reproducibility	0,062455	0,32164	17,85	80,41
Operators	0,000000	0,00000	0,00	0,00
Operators*Parts	0,062455	0,32164	17,85	80,41
Part-To-Part	0,342397	1,76335	97,85	440,84
Total Variation	0,349907	1,80202	100,00	450,50

Number of Distinct Categories = 6

Şekil 3.3 Ölçüm yeterliliği analizi sonuçları

buz ürününün kalıp içinde donma prosesi modellenmeye çalışılmıştır. Modellemenin kolay olması açısından kalıbın etkisi modellemede göz ardı edilmiştir. Tezin ilerleyen aşamalarında kalıbın da etkisi hesaba katılacaktır. Modellemenin hızlı olması simetri sınır şartı kullanılmıştır ancak sadece geometrik modelin yarısı çözülmüştür. Modelin dörtte birinin de çözülmesi yeterli olabilecekken sadece yarısı donma prosesinin görsellerini daha iyi alabilmek için kullanılmıştır.

Süreksiz ısıl çözüm aracının Ansys Fluent programından farkı enerji denklemi olarak sadece üç boyutlu sürekli ya da süreksiz ısı geçişi denklemeni çözmesidir. Bu araçta harekete bağlı yani momentum enerji denklemi çözülmemektedir.

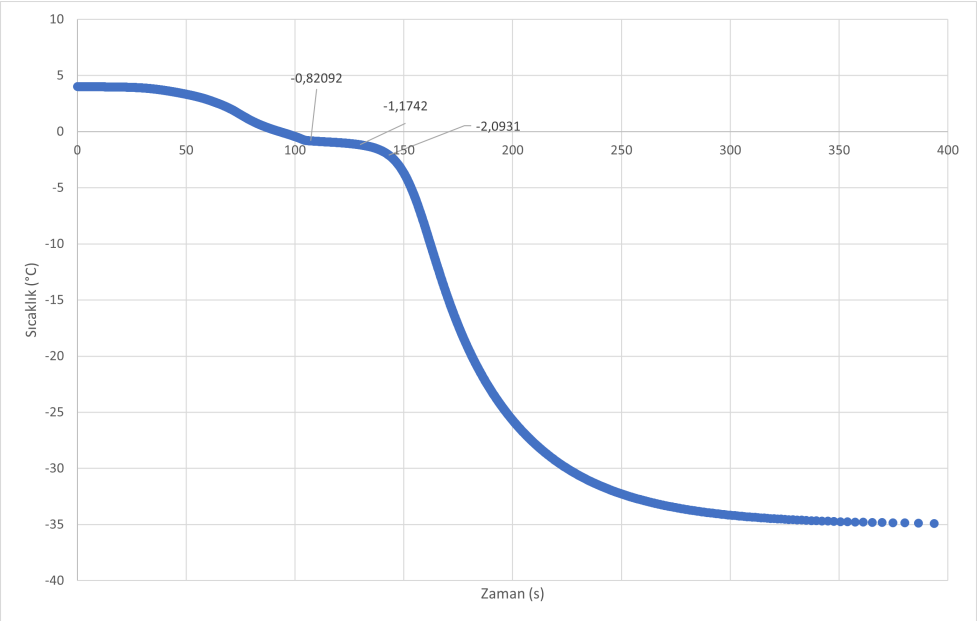
Ayrıca çözülen maddelerin bütün özellikleri ya sabit bir sayı ya da tablo olarak verilmektedir. Bir fonksiyon olarak ya da kullanıcı tanımlı bir kod ile ifade edilmesi mümkün değildir. Ancak tüm bu farklılıklar bu çözücüyü aynı zamanda daha kullanışlı bir program olmasına neden olmaktadır. Sadece ısı geçişi problemleri çözmek için yeterli olabileceği söylenebilir.

Özgül ısıların bir fonksiyon olarak ifade edilmesi çok zor olduğundan, süreksiz ısıl çözüm aracının kullanılması ve özgül ısının tablo'da verilmesi kullanıcı için kolaylık sağlamaktadır. Ancak çözümün doğruluğu için deneysel karşılaştırmalar yapılması da gerekmektedir.

Modellemede sınır şartları olarak yan yüzey ve alt yüzey için sabit sıcaklık sınır şartı kullanılmıştır. Sabit sıcaklık olarak -40 °C kabul edilmiştir. üst yüzeyde ise 10 $Wm^{-1}K^{-1}$ taşınım katsayısı ile taşınımla ısı geçişi yapıldığı kabul edilmiştir.

Buna göre modelleme yapılmış ve sütlü buz numunesinin merkez noktasının sıcaklık değişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

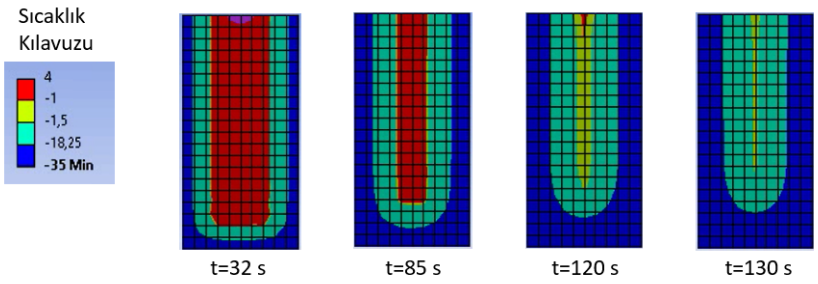
Şekil 3.4'de görüldüğü üzere -0.82 °C ve -1.17°C arasında faz değişiminin olduğu



Şekil 3.4 Sütlü buz deneysel numunesinin merkez noktasının sıcaklık değişiminin gösterilmesi

görülmektedir. Sayısal analizin doğruluğu çözüm ağı bağımsızlığı çalışması ile sorgulanmalıdır.

Bu model ile buz oluşumu kalınlığının tespit edilebilmesi için belirli zamanlarda sıcaklık değişimi görsellemesi yapılmıştır. Bu sayede deneysel olarak bulunacak buz kalınlıkları ile modelde elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. Çözülen modelin sıcaklık değişimi Şekil 3.5'te verildiği gibidir.

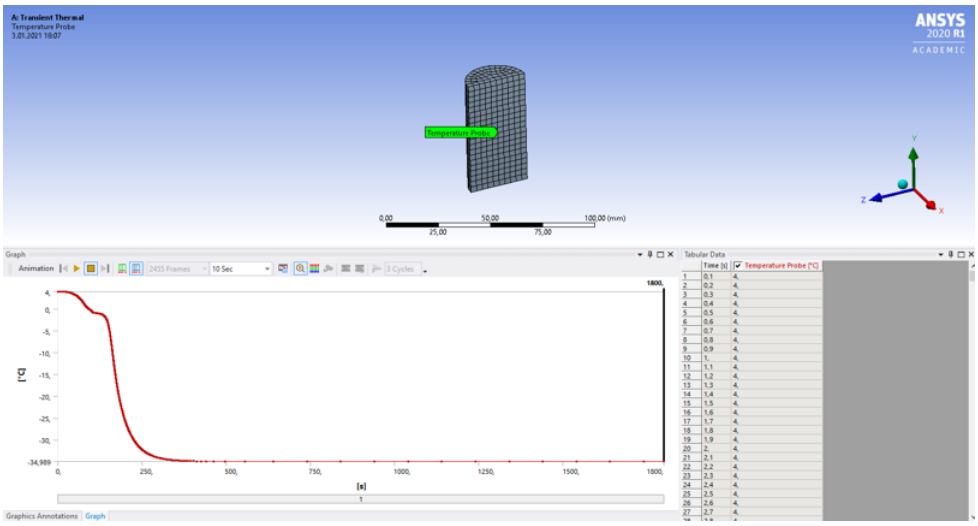


Şekil 3.5 Modelin sıcaklık değişiminin gösterimi

Çözücünün çözüm ekranı da Şekil 3.6'de verildiği gibidir.

3.2.1 Hava Taşınım Katsayısının Donma Süresine Etkisi

Dondurmanın kalıp içinde donması gerçekleşirken dondurmanın altı yüzeyi kalıp ile temas halinde iken üst tarafı havaya açık olup taşınım ile ısı kazancı söz konusudur.



Şekil 3.6 Modelin çözüm ekranının gösterimi

Literatür çalışmalarında farklı büyüklüklerde hava taşınım katsayısı değerleri, üst yüzey ile ısı geçişini modellemek için ifade edilmiştir. Modellemede önemli bir parametre olup olmadığını irdelemek için farklı büyüklüklerde ısı taşınım katsayısı girilerek donma süresinde ve zamana bağlı sıcaklık değişiminde bir değişiklik olup olmadığına bakılmıştır.

5,10 ve 20 W/m^2K değerlerine ısı taşınım katsayısı kabul edilerek modelleme yapılmış ve dondurmanın orta noktasındaki sıcaklık değişimi incelenmiştir. Bulunan sonuçların karşılaştırması Şekil 3.7'de gösterildiği gibidir.

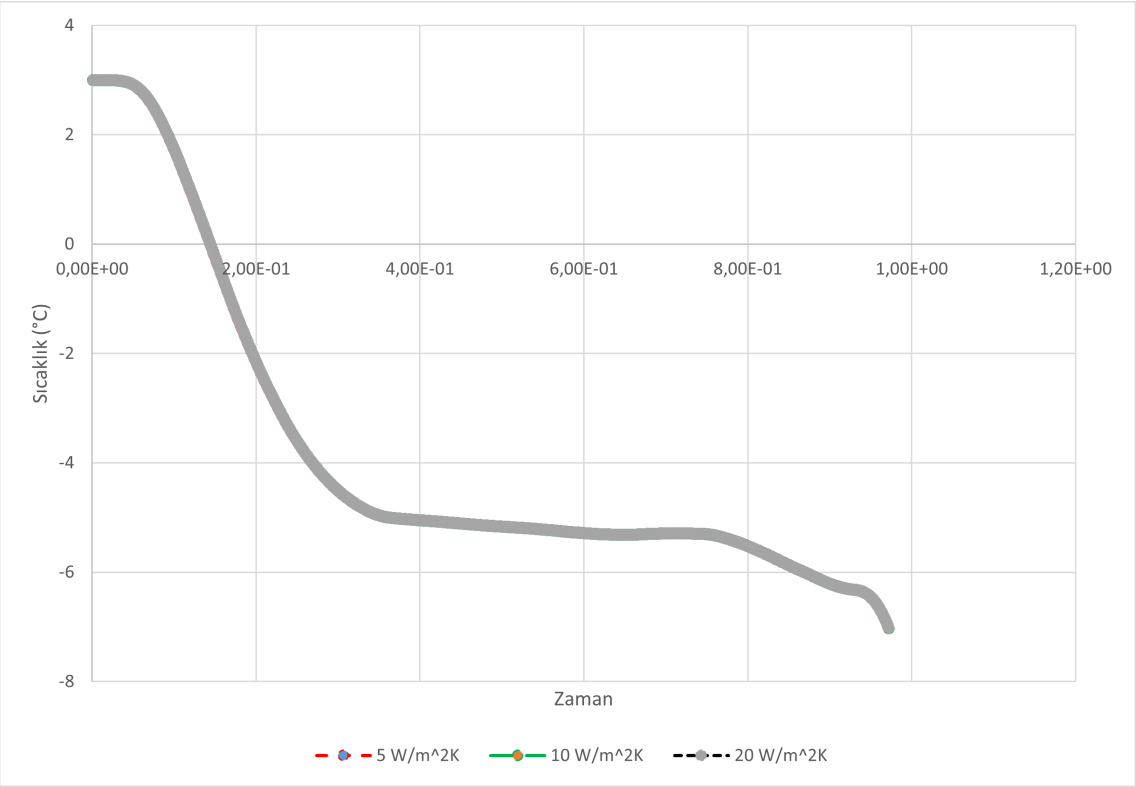
Şekilden de belli olmadığı üzere taşınım katsayısının değişimi donma noktasında herhangi bir değişime neden olmamaktadır. Bu nedenle kalıbın üst kısmındaki taşınımla gerçekleşen ısı transferi değeri 10 W/m^2K olarak alınmıştır.

3.2.2 Modellemenin Çözüm Ağı Sayısından Bağımsız Olduğunun İspat Edilmesi

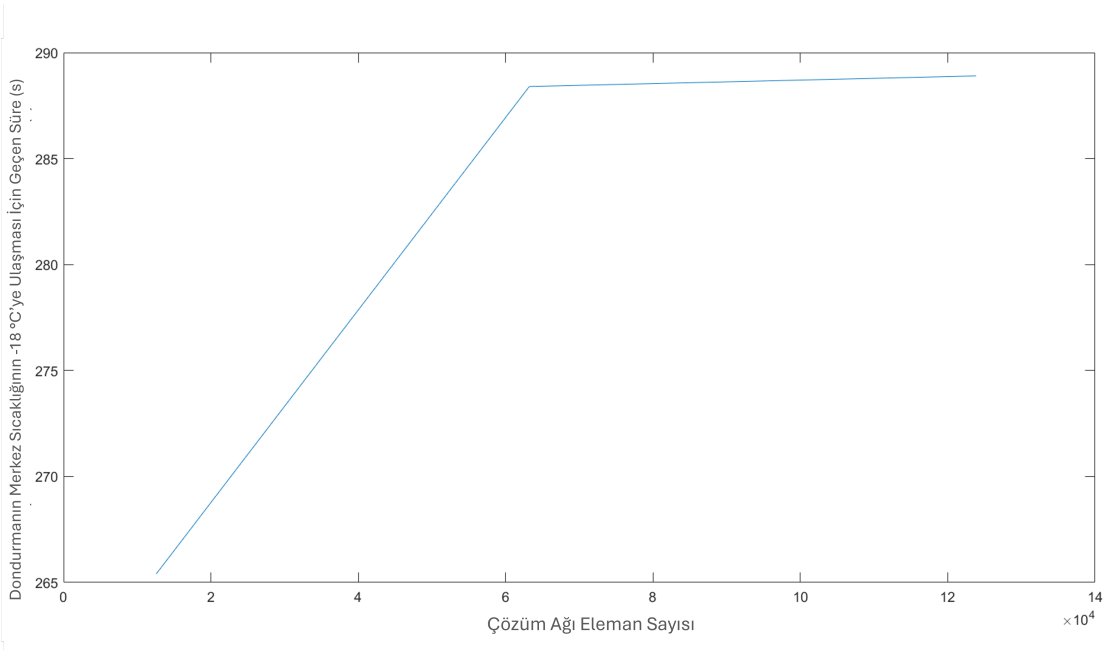
Modellemelerde yapılması gereken en önemli kontrollerden biri de çözüm elemanı sayısından çözümün bağımsız olduğunu kanıtlamaktır. Literatürde buna "mesh independence" denir.

Bu bölümde 3 farklı çözüm elemanı sayısına göre sonuçların nasıl değiştiği gösterilmiştir. 12576, 63210 ve 123845 element kullanılarak 3 farklı modelleme yapılmıştır ve 63210 element kullanmanın en optimum sonuç olduğu bulunmuştur. Çıkan sonuçların karşılaştırması Şekil 3.8'de görülebilir.

Deneysel çalışmaların devamında havalı sütlü buz karışımının kalıp içerisinde donması deneysel olarak ölçülmüş ve modellemesi Ansys ticari yazılım programının Süreksiz



Şekil 3.7 Taşınım katsayısına bağlı sıcaklık değişiminin gösterimi



Şekil 3.8 Çözüm ağı eleman sayısının modelleme sonucuna etkisinin gösterimi

Isıl Aracı (Transient Thermal Tool) kullanılarak yapılmıştır.

Burada kullanılan sütlü buz karışımı soğutulmadan ve hava verilmeden önce karışım olarak labaratuvar ortamında hazırlanmıştır. Karışım içerisine daha önce belirtilen oranlarda hammaddeler eklenmiş olup Thermomixer isimli karıştırıcıda 10 dakika boyunca karıştırılarak homejen bir karışım ve çözünme sağlanmıştır. Ardından soğutmaya bırakılan karışım 4 °C'de 4 saat bekletilmiştir.

Hava verme ve soğutma işlemi "freezer" denilen özel ekipmanlarla yapılsa da bu çalışmada gerekli olan numune miktarı 2 kg kadar olduğundan, dondurma ve hava verme işlemi yine Thermomixer isimli karıştırıcının soğutma bölmesinde yapılmış ve dondurma -1.5 °C'ye kadar soğutulmıştur.

Ticari büyük dondurma ve hava verme cihazlarında hava verme olayı basınçlı havanın soğutma silindiri içine verilmesi şeklinde yapılsa da labaratuvar ortamında hava verme için silindir içine basınçlı hava verme opsiyonu olmadığından ortam havasından çırpma dolayısı ile dondurma içerisine ne kadar hava girerse o kadar havalandırma gerçekleşmiştir. Burada belirli oranlarda hava verme işlemi yapılamamaktadır.

Dondurma içerisinde ne kadar hava olduğu bilgisi denklem 3.1'de verilen formul ile bulunmaktadır.

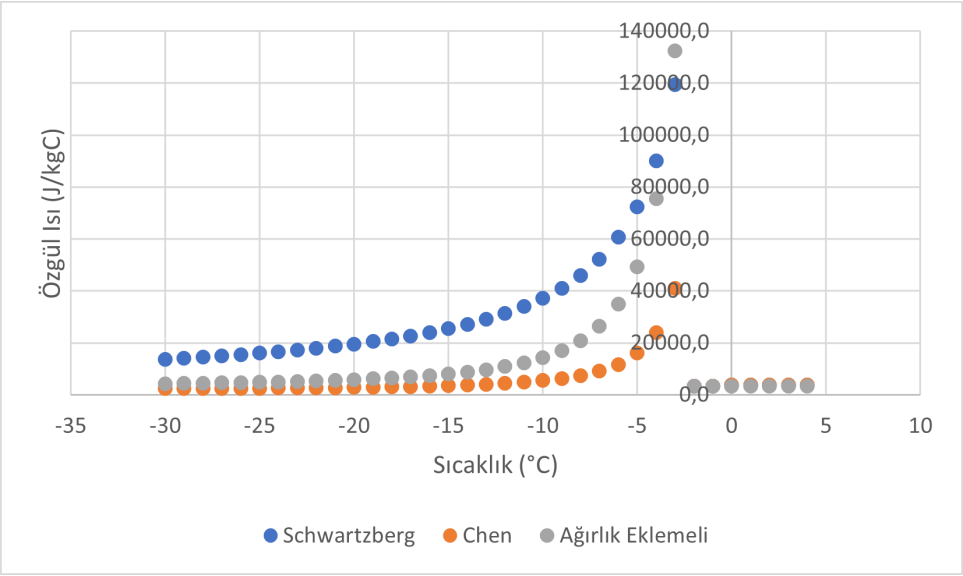
$$\%Hava\ Miktari = \frac{Dondurma\ Dolum\ Hacmi - Kullanilan\ Karisim\ Hacmi}{Kullanilan\ Karisim\ Hacmi} x100 \tag{3.1}$$

Kalıp içerisine 45 ml havalı dondurma karışımı dozlandığında dondurma ağırlığının 40 g geldiği tespit edilmiştir. Dondurma yoğunluğu da 1.2 g/ml olarak kabul edildiğinde içerisindeki hava oranının % 25.9 oranında olduğu bulunmuştur.

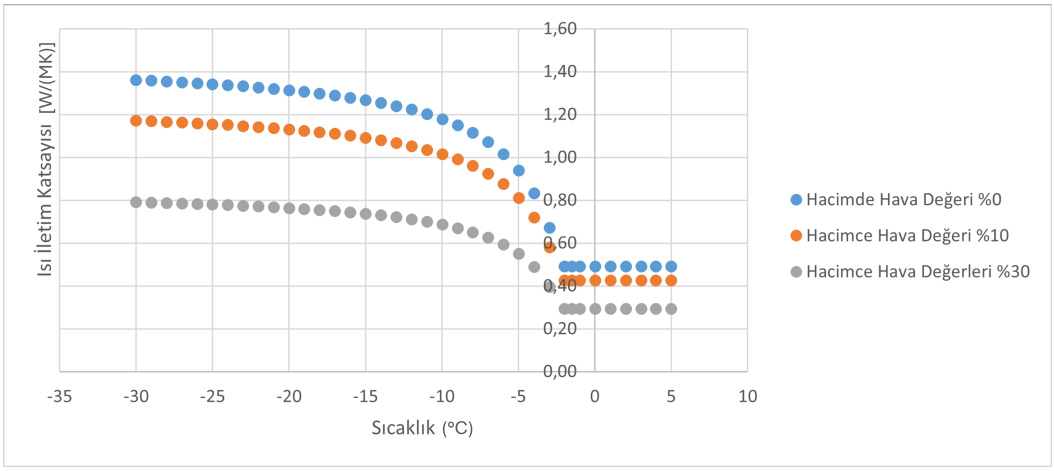
Daha önceki çalışmada Chen ve Schwartzberg korelasyonları kullanıldığında deneysel sonuçlara daha yakın bir sonuç verdiği bulunmuştu. Ancak burada deneysel numunenin özgül ısı değeri literatürde daha önce verilmiş üç farklı korelasyona göre tekrar hesaplanmıştır. Deneysel reçetenin özgül ısı değeleri aşağıdaki Şekil 3.9'da gösterildiği gibidir.

İçerisinde hava olduğundan, ısı iletim katsayısı da yeniden hesaplanmıştır. İçerisinde hava oranı arttıkça kalıp içerisindeki dondurmanın ısı iletim katsayısı düşmektedir.

Isı iletim katsayısının sıcaklıkla ve farklı hava değerlerine göre gösterimi aşağıdaki Şekil 3.10'te gösterdildiği gibidir.



Şekil 3.9 Sütlü buz Karışımının özgül ısı değerlerinin sıcaklığa bağlı gösterimi

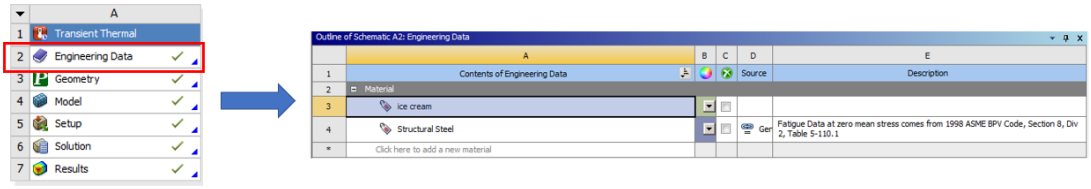


Şekil 3.10 Sütlü buz Karışımının ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklığa bağlı gösterimi

3.2.3 Ansys Mechanical İle Sayısal Analiz Çalışmalarının Yapılması

Modelleme çalışmalarında daha önce söylendiği gibi Ansys programının Transient Thermal aracı kullanılmıştır. Bu araçta da yaygınca kullanılan Ansys Fluent programına benzer olarak öncelikle yeni malzememizin yani sütlü buz karışımımızın yukarıda verilen değerler kapsamında tanımlanması gerekmektedir. Bunun için sırasıyla aşağıdaki adımlar incelenmiştir.

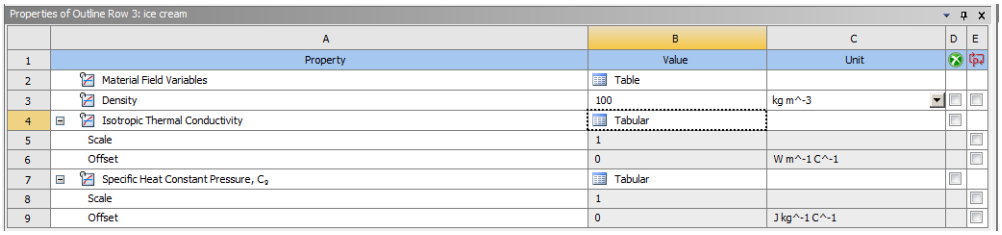
Araç çalışma listesinde seçildikten sonra yönlendirmeleri yapmaktadır. Öncelikli olarak hammaddenin ısıl değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Bunun için Şekil 3.11'de gösterildiği üzere yeni hammadde tanımlaması yapılmıştır.



Şekil 3.11 Sütlü buz karışımının hammadde olarak tanımlanması

Mühendislik verisi kısmına çift tıklanır ve oluşturulacak yeni hammaddeye isim verilir.

Ardından hammdenin ısıl özelllikleri aşağıdaki kısımlara eklenir. Burada dikkat edilmesi gereken kısım yoğunluğun sabit sıcaklık boyunca değişmeyeceği kabulü yapılırken özgül ısı ve ısıl iletkenlik değerleri tablo olarak verilmiştir. Program içine ısıl özelliklerin girilmesi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.12 Isıl özelliklerin tanımlanması

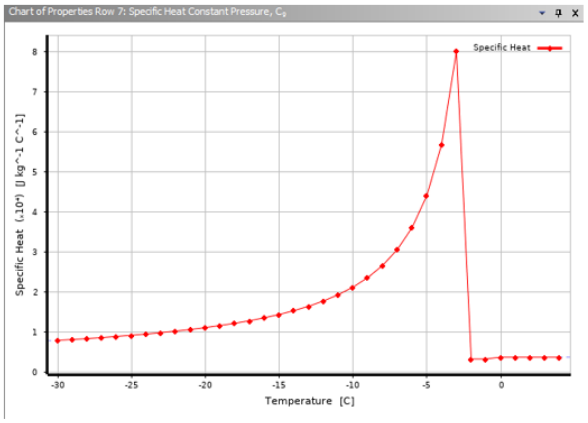
Ardından bahsedildiği gibi özgül ısı değerinin tablo olarak listelenmesi sağlanmıştır. Ayrıca yazılım bizlere bu tablonun grafik olarak da nasıl değiştiğini göstermektedir.

Son olarak ısıl iletkenlik değerinin tablo olarak listelenmesi sağlanmıştır. Ayrıca yazılım bizlere bu tablonun grafik olarak da nasıl değiştiğini Şekil 3.14'te göstermektedir.

Bu işlemlerden sonra çözüm ağı oluşturma kısmına gelinmiştir. Çözüm ağında fluent çözümlerde genellikle kullanılan Tetrahedrons çözüm ağı yapısı kullanılmış olup toplamda 63210 çözüm ağı yaratılmıştır ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Kullanılan

Table of Properties Row 7: Specific Heat Constant Pressure, C_p

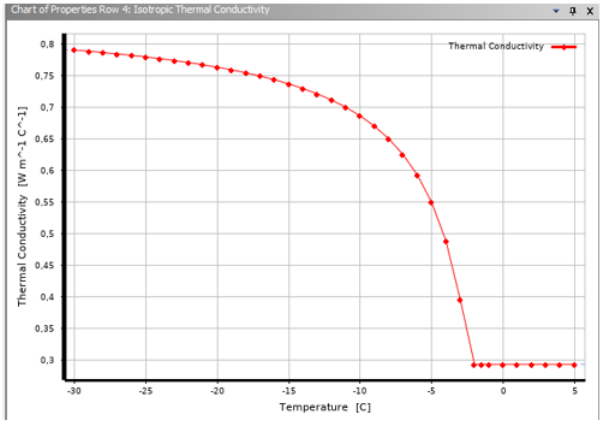
	A	B
1	Temperature (C)	Specific Heat (J kg^-1 C^-1)
22	-10	21313
23	-9	23684
24	-8	26708
25	-7	30696
26	-6	36188
27	-5	44212
28	-4	56983
29	-3	80224
30	-2	3347,2
31	-1	3347,2
32	0	3816,5
33	1	3816,5
34	2	3816,5
35	3	3816,5
36	4	3816,5



Şekil 3.13 Özgül ısının tanımlanması

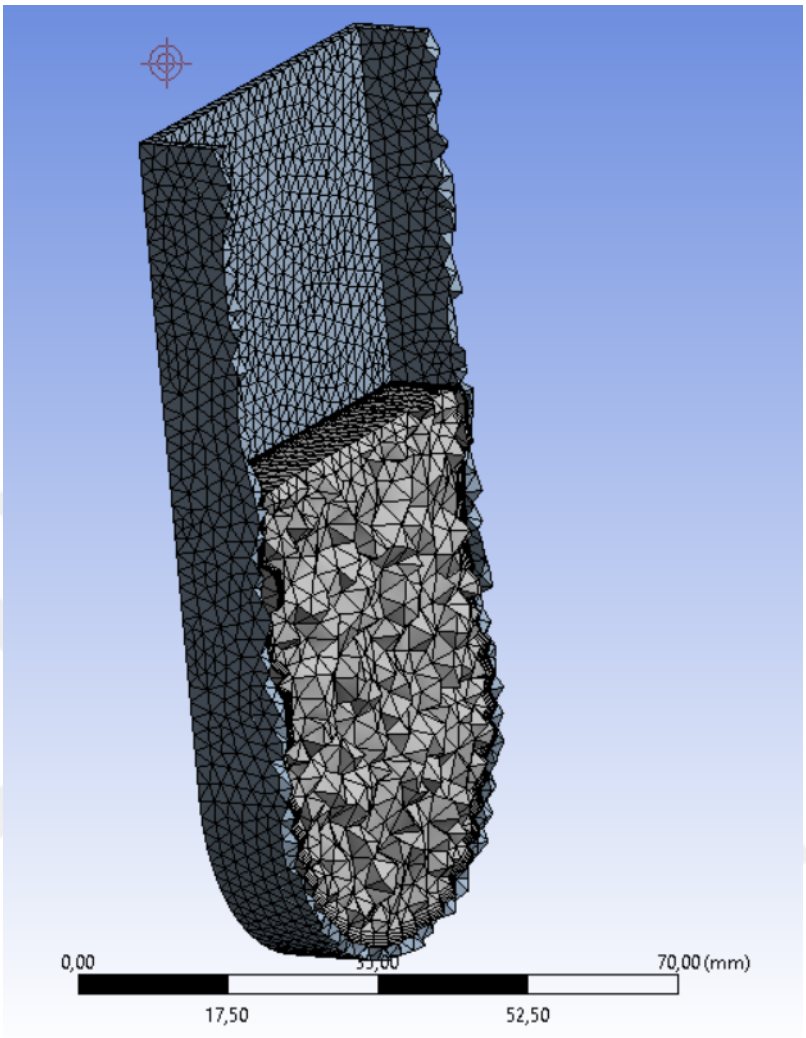
Table of Properties Row 4: Isotropic Thermal Conductivity

	A	B
1	Temperature (C)	Thermal Conductivity (W m^-1 C^-1)
23	-9	0,6699
24	-8	0,64995
25	-7	0,62494
26	-6	0,59266
27	-5	0,54941
28	-4	0,48844
29	-3	0,39606
30	-2	0,29337
31	-1,5	0,29337
32	-1	0,29337
33	0	0,29337
34	1	0,29337
35	2	0,29337
36	3	0,29337
37	4	0,29337
38	5	0,29337



Şekil 3.14 Isıl iletkenlik değerinin tanımlanması

Ansys sürümü versiyon 18.1 öğrenci sürümü olduğundan 157000 adet çözüm ağından daha fazla çözüm ağı yaratmaya yazılım izin vermemektedir.



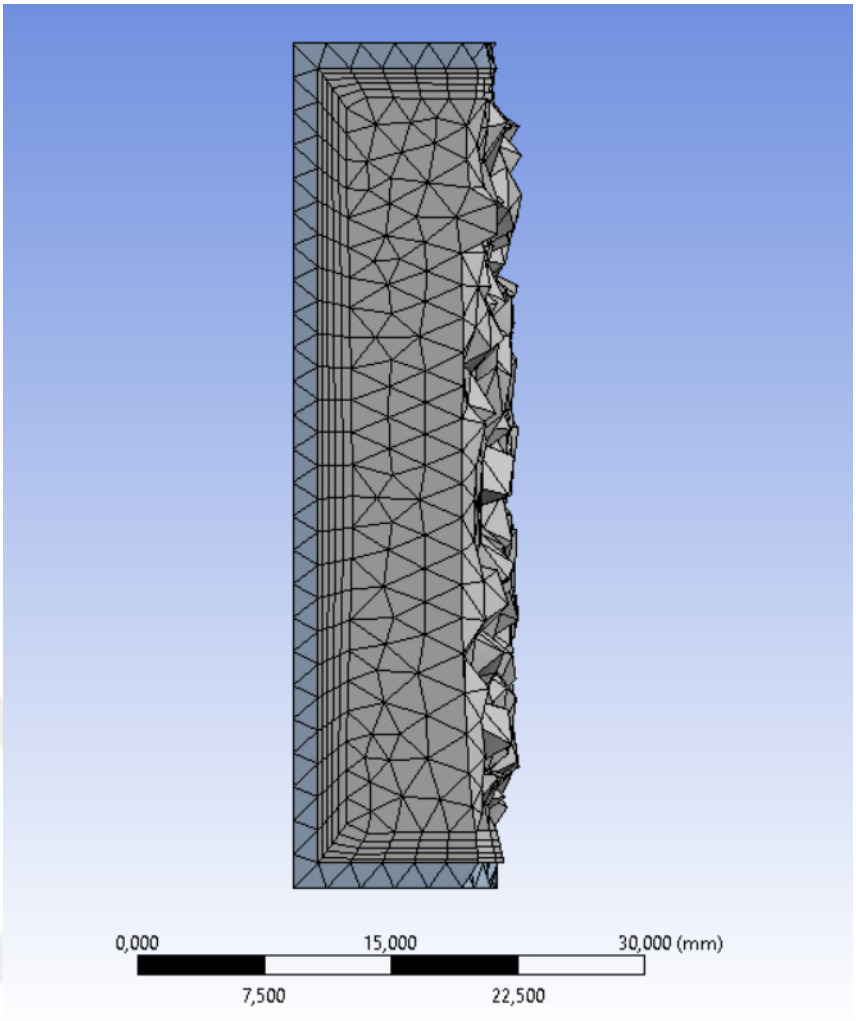
Şekil 3.15 Çözüm ağı yapısının gösterimi

Ortalama çarpıklık değeri 0.25159 olarak bulunmuştur. Kalıp ile dondurma arasındaki ısı transferini daha iyi inceleyebilmek için inflation yapısı kullanılmıştır ve bu yapı Şekil 3.16'da gösterilidiği gibidir. Bu yapı çözüm doğruluğunu artırsada çarpıklığı da artırmaktadır.

Ansys Transient Thermal Tool aracı, üç boyutlu zamana bağlı ısı transfer denklemine açık bir biçimde çözüm getirir. Üç boyutlu zamana bağlı ısı transfer formülasyonu, Denklem (3.2)'te bulunabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \tag{3.2}$$

q, bu araştırmada uygulanmayan ısı üretimini temsil eder ve α ise termal difüziviteyi



Şekil 3.16 Sınır tabaka çözüm ağı yapısının gösterimi

temsil eder; bu, Denklem (3.3)'te gösterilmiştir.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \tag{3.3}$$

Dondurma örneğinin yan ve alt yüzeyleri önceden soğutulmuş bir kalıpla doğrudan temas halindedir. Simülasyonda, dondurma ve kalıp arasında mükemmel bir termal iletim olduğu ve direnç bulunmadığı varsayılmaktadır. Kalıp kendisi bir glikol-su karışımı ile temas halindedir ve temas yüzeylerinde sabit bir sıcaklık sağlanır; sınır koşulları Denklem (3.4) ile (3.8) arasında yazılabilir.

$$T(x, y, 0, t) = T_0 \tag{3.4}$$

$$T(x, 0, z, t) = T_0 \tag{3.5}$$

$$T(x, y, L, t) = T_0 \tag{3.6}$$

$$T(0, y, z, t) = T_0 \tag{3.7}$$

$$T(L, y, z, t) = T_0 \tag{3.8}$$

T_0, glikol-su karışımı sıcaklığını temsil eder. Sadece dondurmanın üst yüzeyi çevre sıcaklığı ile temas halindedir ve Denklem (3.9)'de yazılabilecek bir konveksiyon ısı transferi sınır koşulu bulunmaktadır.

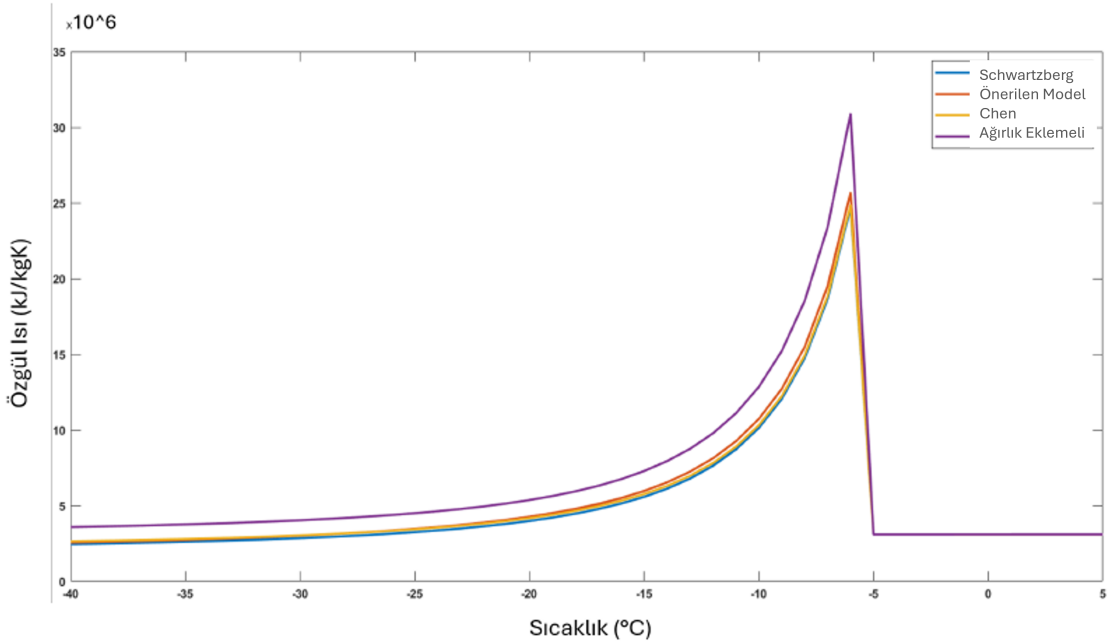
$$-k\frac{\partial T}{\partial z} = h\,(T(x, y, L, t) - T\infty) \tag{3.9}$$

h, konveksiyon katsayısını ve T_∞ ise çevre sıcaklığını temsil eder.

Çözüm ağı da oluşturulduktan sonra çözümlere geçilmiştir. 3 farklı dondurma ısıl özellik değeri için modelleme yapılmış olup deneysel çalışma ile karşılaştırması yapılmıştır.

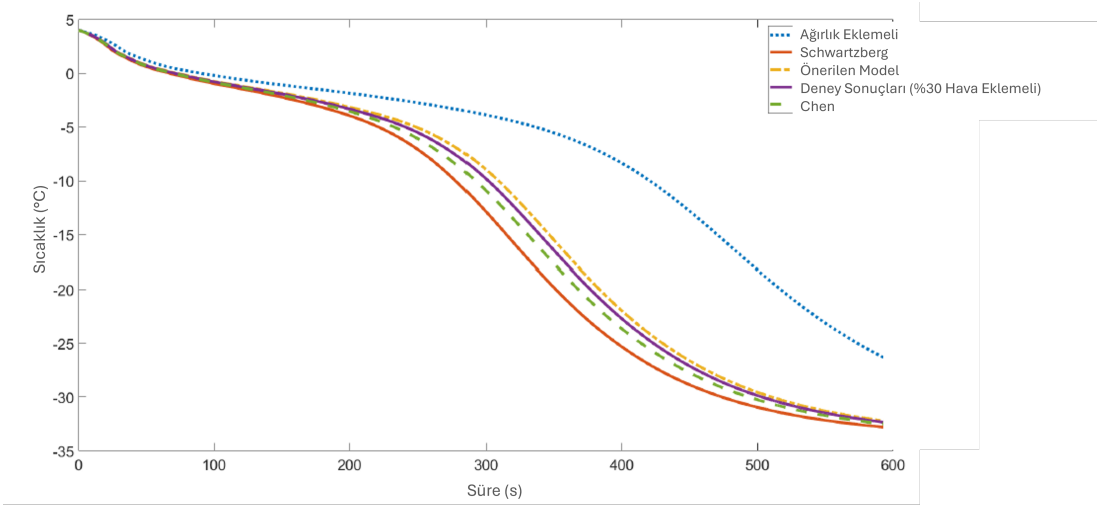
3.3 Sayısal Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yeni önerilen özgül ısı denkleminin literatür verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.17 gibidir.



Şekil 3.17 Özgül ısı denklemlerinin karşılaştırması

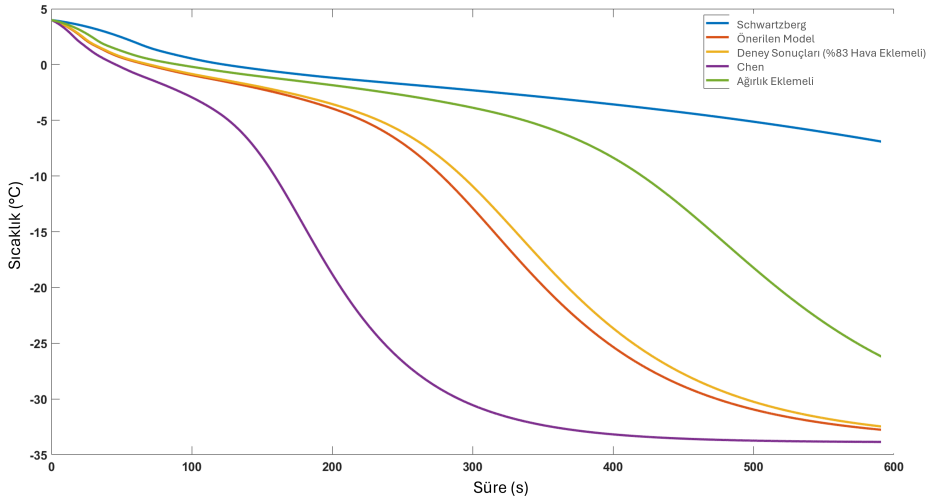
Bu özgül ısı değerleri kullanılarak dondurma karışımı hacmine dondurma karışımı hacminin %32'si kadar hava eklenip kalıpta donma işlemi başlatıldığında Şekil 3.18 gibi donma eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 3.18 Karışım hacminin % 32'si kadar hava eklendiğinde deneysel sonuçlarla modellemenin karşılaştırılması

Görüldüğü üzere yeni önerilen özgül ısı denklemi ile yapılan modelleme literatür özgül ısı denklemlerine göre deneysel sonuçlara daha yakın çıkmıştır.

Literatür araştırıldığında en fazla dondurma karşımına dondurma karışımının hacminin %67'si kadar hava verildiği görülmüştür. Bu çalışmada ise daha fazla hava oranı denenmiş olup %83'ü kadar hava verilebilmiştir. Bu durum için tekrar deneysel çalışma yapılmış ve modelleme ile deneysel sonuçlar karşılaştırılması Şekil 3.19'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.19 Karışım hacminin %83'ü kadar hava eklendiğinde deneysel sonuçlarla modellemenin karşılaştırılması

İki deney sonucu karşılaştırıldığında görülmüştür ki 10 dakika sonundaki merkez sıcaklıkları en fazla 1 °C kadar fark etmiştir. Deneyin bu şartında eklenen hava oranı % 50'dir.

Deneysel sistemde kalıp içerisine konan dondurma hacmi sabittir. Her çalışma için 40 ml kadar dondurma konmuştur. Hava eklenmesi ısıl direnci artıracaktır ancak kalıp içindeki dondurma yoğunluğu azalacağı için donma hızının nasıl değişeceğini söylemek güç olmaktadır.

Cogne ve arkadaşlarının [10] yaptığı çalışmaya de bakıldığında hava oranının değişimi ile donma hızının değişimi arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığı çıkarımları yapılmıştır.

Donma hızına etki eden parametreleri araştırmak için parametrik bir modelleme çalışması yapılmaya karar verilmiş ve su-glikol çözeltisinin sıcaklığının, dondurma başlangıç sıcaklığının ve hava oranının etkisinin inceleneceği bir deney seti oluşturulmuştur. Bu deney setinde her bir parametre 3 farklı seviyede incelenmiştir. Su-glikol çözeltisi sıcakığı -40, -37, -34 °C olarak, başlangıç dondurma sıcaklığı -1,1,4 °C ve hava oranı %30,50 ve 80 olarak ele alınmıştır.

Her bir modellemede çıktı olarak dondurma merkez sıcaklığının -18°C'e gelme süresi

ele alınmıştır. Sonuçlar Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Parametrik donma süresi modelleme sonuçları

Su-Glikol Sıcaklığı (°C)	**Numunenin Kalıba Dolum Sıcaklığı (°C)**	**Hava Oranı (%)**	**Numunenin Merkez Sıcaklığının -18°C'ye Ulaşması İçin Geçen Süre (s)**
-40	-1	30	229.6
-40	-1	50	238.4
-40	-1	80	311.0
-40	1	30	242.4
-40	1	50	251.6
-40	1	80	328.2
-40	4	30	260.2
-40	4	50	269.8
-40	4	80	351.6
-37	-1	30	254.0
-37	-1	50	263.6
-37	1	80	344.0
-37	1	30	268.4
-37	1	50	278.6
-37	1	80	363.2
-37	4	30	288.4
-37	4	50	299.2
-37	4	80	389.6
-34	-1	30	284.8
-34	-1	50	303.2
-34	-1	80	385.6
-34	1	30	301.2
-34	1	50	312.6
-34	1	80	407.3
-34	4	30	324.4
-34	4	50	336.4
-34	4	80	437.8

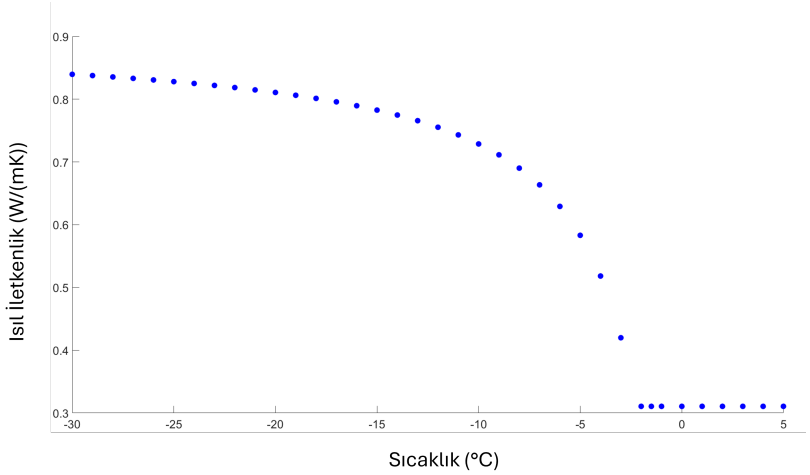
Yapılan parametrik çalışmadan da anlaşılacağı üzere donma süresi üzerinde en fazla etkiye su-glikol çözeltisi sıcaklığı sahiptir. İkinci olarak dondurma ilk sıcaklığı parametresinin etkili olduğu görülebilir. Hava oranının doğrusal bir etkisi olmadığı da yapılan çalışmada ortaya çıkmıştır. Hava oranının artması donma için gerekli süreyi her koşulda artırmıştır ancak %30 kadar hava eklenmiş bir dondurma ile %50 kadar hava eklenmiş dondurma arasındaki fark %80 ile %50 kadar eklenmiş dondurma numuneleri arasındaki farktan daha azdır.

4
SONUÇ

Bu tez çalışmasında sütlü buz ürünlerinin donma prosesi incelenerek, kalıp içindeki sütlü buz ürünlerinin donma sürecindeki sıcaklık dağılımları ve donma süresi deneysel ve sayısal modelleme ile tespit edilmiştir. Donma süresine etki eden parametreler incelenmiştir.

4.1 Sonuçlar

Bu çalışmada literatür verileri kullanılarak sütlü buz ürünlerinin sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değerleri teorik olarak bulunmuştur. Isı iletkenlik değeri donma noktasına kadar sabit kalırken sıcaklık düşüşüne bağlı faz değişimi başladıktan sonra artarak devam etmektedir. Literatürde de sonuçlar bu şekilde bir eğğilim gösterirken tez çalışmasında kullanılan dondurma numunesi için de şekil 4.1'de görüleceği üzere benzer sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 4.1 Tez çalışmasında kullanılan dondurma numunesinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişiminin gösterimi

Özgül ısı değerinin belirlenmesi de ayrıca literatürde araştırılmış ve gıda maddelerinin özgül ısılarının hesaplanması için genelde üç farklı denklemin kullanıldığı

bulunmuştur. Ancak bu üç denklemde de donma faz değişimi gerçekleşse de dondurma içinde donmadan kalan su miktarı hesaba katılmadığı görülmüştür. Donmadan kalan su miktarının da değerlendirilerek bir özgül ısı denklemi önerilmiştir. Literatürdeki bu üç denklem ve yeni önerilen denklem yalnızca faz değişimi başladıktan sonra geçerli olacakları şekilde aşağıda tekrar ifade edilmiştir.

- Schwartzberg Modeli

$$C_p(T) = X_s C_{ps} + X_w C_{pw} + (X_b - X_w)(C_{pw} - C_{pice}) + \frac{M_w}{M_s} X_s \left[\frac{RT_0^2}{M_w (T_0 - T)^2} - (C_{pw} - C_{pice})\right] \quad (4.1)$$

- Ağırlık Eklemeli Model

$$C_p = \sum_j X_j C_{pj} - L_f(T_f) \frac{dX_{ice}(T)}{dT} \quad (4.2)$$

- Chen ve Cornillon Modeli

$$C_p(T) = 1547 + 1254 X_s + \frac{X_s}{M_s} \frac{RT_0^2}{(T - T_0)^2} \quad (4.3)$$

- Önerilen Model

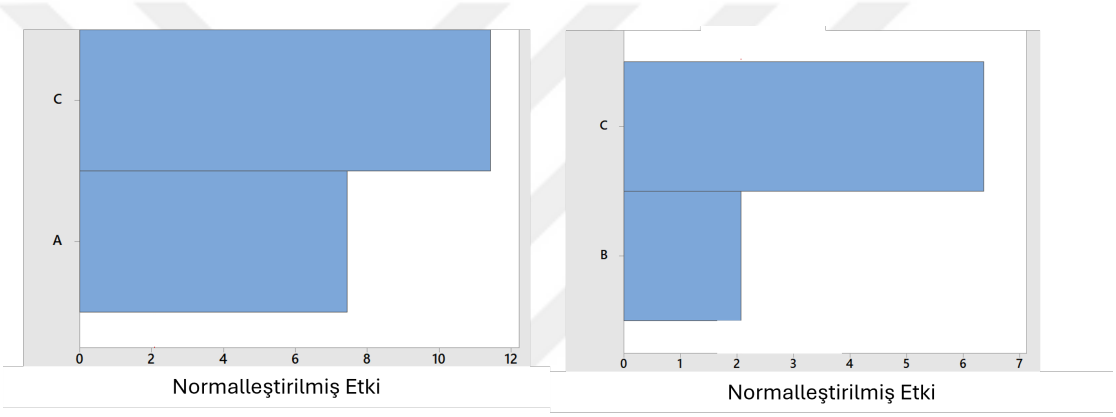
$$C_p = C_s X_s + C_I X_{wo} - X_w (c_w - C_I) + \frac{X_s T_0^2 R}{L M_s} \frac{1}{(T_0 - T)^2} \Big(L - 0.5(C_w - C_I)(T_0 - T)\Big) \quad (4.4)$$

Bu dört denklem de birbiri ile karşılaştırılmış ve önerilen yeni denklemin ±% 1.8 aralığında Chen'in önerdiği denklem ile çok benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen denklemin geçerliliğini göstermek için deneysel çalışmalarla da karşılaştırma yapılmıştır ve ±% 2.5 doğrulukla diğer denklemlere göre de daha geçerli olduğu ortaya konmuştur.

Dondurmanın donma prosesini etkileyen en önemli üç parametre de sayısal analizle parametrik olarak araştırılmıştır. Donma süresinin etkisi üzerinde su-glikol çözeltisi sıcaklığı, dondurma karışımının başlangıç sıcaklığı ve hava oranının etkisi incelenmiştir. Bu parametrelerin her biri üç farklı seviyede analiz edilmiştir. Soğutucu sıvı sıcaklığı -40°C, -37°C, -34°C olarak; başlangıç dondurma sıcaklığı -1°C, 1°C, 4°C olarak; ve hava oranı %30, %50, %80 olarak ele alınmıştır. Su-glikol çözeltisi sıcaklığı

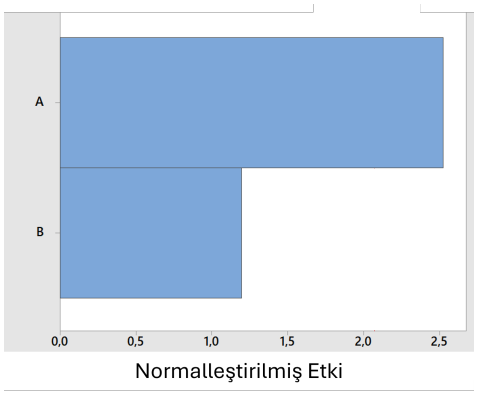
-40°C'den -37°C'ye yükseltildiğinde donma süresi %10.9 artmış, -37°C'den -34°C'ye yükseltildiğinde ortalama %9.8 artmıştır. Dondurma başlangıç sıcaklığı ise -1°C'den 1°C'ye artırıldığında donma süresi %5.7 artmış, 1°C'den 4°C'ye artırıldığında donma süresi ortalama %13 artmıştır. Hava oranının değişimine bakıldığında hava oranı %30'dan %50'ye ve %50'den %80'e çıkartıldığında donma süresi sırasıyla ortalama %3.8 ve %17 artmıştır.

Minitab programında parametrik üç etkinin normalleştirilmiş etkileri karşılaştırılmıştır. Bu etkiler Minitab programında harflerle kodlanarak analiz edilmektedir. A ile dondurma kalıp içine ilk dolum sıcaklığı, B ile hava oranı ve C ile su-glikol çözeltisi ifade edilmektedir. Su-glikol çözeltisi sıcaklığının donma süresi üzerine etkisinin dondurmanın kalıp içine ilk dolum sıcaklğından ve hava oranından daha fazla olduğu Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



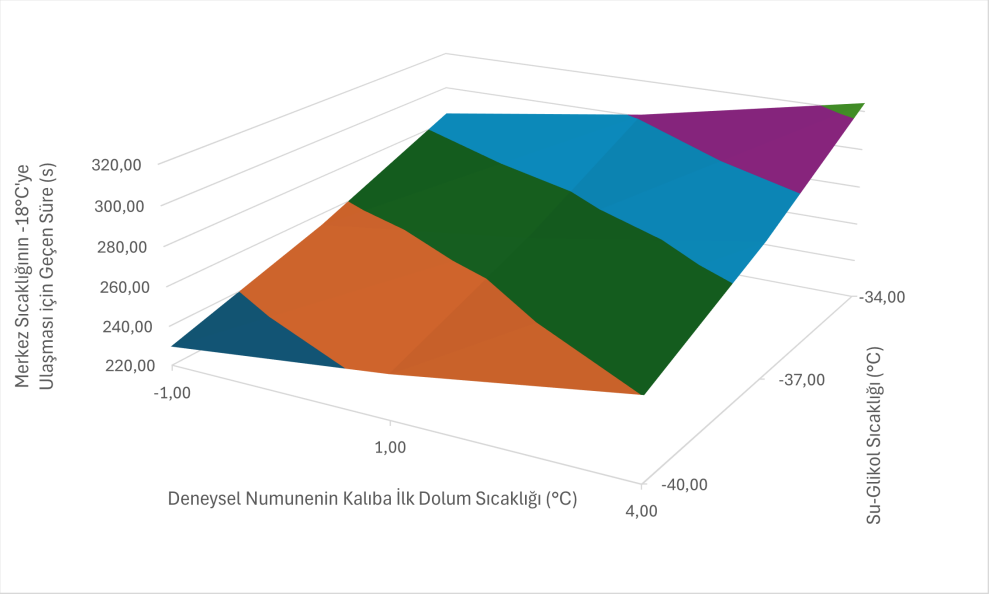
Şekil 4.2 Su-glikol çözeltisi çözeltisi sıcaklığının diğer parametrelere göre etkisinin normalleştirilerek karşılaştırılması

Hava oranı ve kalıp içine dolum ilk sıcaklığı karşılaştırıldığında ise kalıp içine dondurma ilk dolum sıcaklığının hava oranından daha etkili olduğu Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



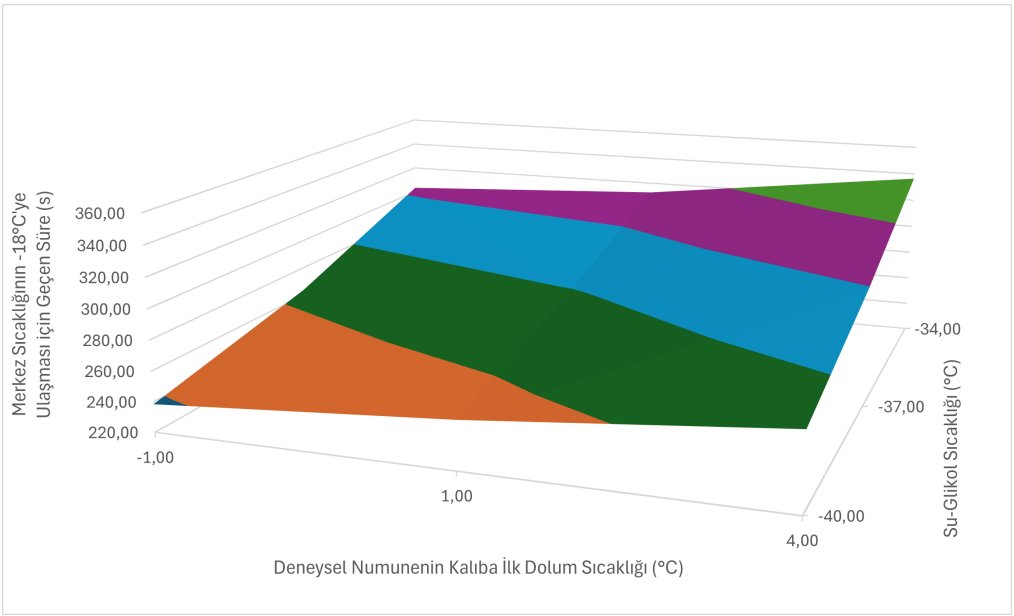
Şekil 4.3 Donma süresi üzerine hava oranı ve kalıp içine dolum ilk sıcaklığı parametlerinin karşılaştırılması

Parametrik analiz sonuçları görselleştirilerek çeşitli karşılaştırmalar da yapılmıştır. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere %30 hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre 229.6 ve 324.4 saniye arasında değişmektedir.



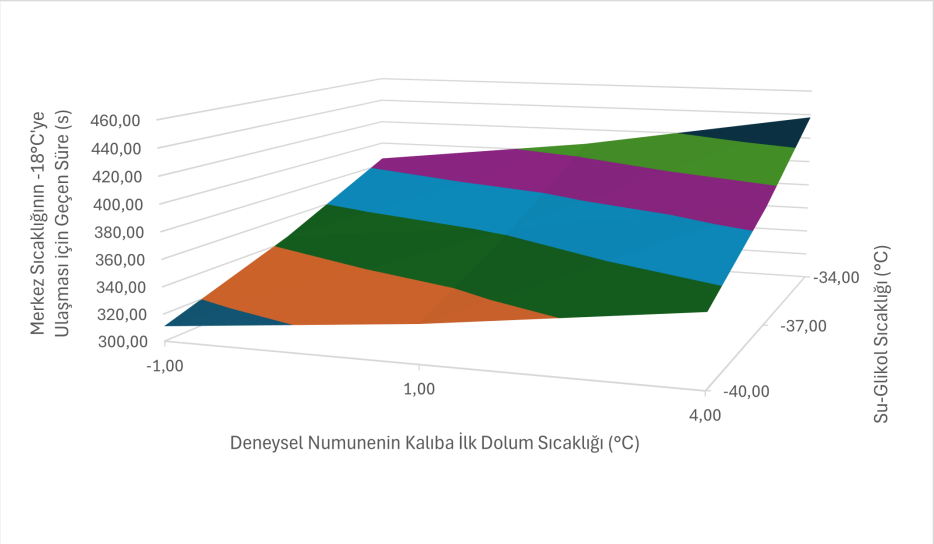
Şekil 4.4 %30 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere %50 hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre 238.4 ve 336.4 saniye arasında değişmektedir.



Şekil 4.5 %50 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi

Şekil 4.6'te görüldüğü üzere %80 hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre 311.0 ve 437.8 saniye arasında değişmektedir.



Şekil 4.6 %80 Hava eklenmiş numunelerin merkez sıcaklıklarının -18°C'ye ulaşana kadar geçen süre üzerine su-glikol çözeltisinin ve kalıba ilk dolum sıcaklıklarının etkisinin gözlenmesi

4.2 Öneriler

Bu tez çalışması, sütlü buz kategorisindeki dondurmaların ısıl özelliklerini ve donma süreçlerini incelemiş, literatüre katkı sağlayacak yeni bir özgül ısı denklemi önermiştir. Ancak, elde edilen sonuçlar, daha geniş kapsamlı ve farklı değişkenlerin etkilerini inceleyen ek çalışmaların yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, aşağıdaki öneriler gelecekteki araştırmalar için dikkate alınabilir:

Farklı Dondurma Türlerine Yönelik Araştırmalar: Bu çalışma, belirli bir dondurma türü üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak, farklı içerik ve bileşenlere sahip dondurma türlerinin ısıl özellikleri ve donma süreçleri de benzer şekilde incelenmelidir. Özellikle meyveli dondurmalar, sorbeler, ve düşük yağ içeriğine sahip diyet dondurmalar gibi ürünlerin donma davranışları, kullanılan özgül ısı denklemi ve diğer termal modeller açısından farklılık gösterebilir. Bu nedenle, bu tür dondurmalar üzerinde de kapsamlı deneysel ve teorik çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Daha Yüksek Hava Oranlarının Etkileri: Mevcut çalışmada hava oranı %83'e kadar incelenmiş ve donma süresi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ancak, ticari dondurma üretiminde, bazı ürünlerde hava oranı %120'ye kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle, daha yüksek hava oranlarının dondurmanın termal özelliklerine, donma süresine ve nihai ürün kalitesine etkilerinin incelenmesi önemlidir. Bu tür yüksek hava

oranlarının, dondurmanın tekstürel özellikleri ve soğutma performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyacak çalışmalar yapılmalıdır.

Soğutucu Sıvının Akışlı Sistemlerde İncelenmesi: Mevcut deneylerde, dondurmanın donma süreci durgun bir soğutucu sıvı içinde incelenmiştir. Ancak, endüstriyel ölçekte soğutma sistemleri genellikle soğutucu sıvının akışta olduğu sistemlerdir. Soğutucu sıvının hareketi, ısı transferini etkileyerek donma sürecini hızlandırabilir veya yavaşlatabilir. Bu nedenle, soğutucu sıvının da bir akışta olduğu sistemlerde deneylerin yapılması, donma sürecinin endüstriyel koşullarda nasıl değiştiğini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu tür çalışmalar, daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyacaktır.

Farklı Soğutucu Sıvıların Etkilerinin Denenmesi: Bu çalışmada belirli bir soğutucu sıvı kullanılmıştır. Ancak, farklı soğutucu sıvılar (örneğin glikol, tuzlu su veya organik bazlı soğutucular) ile yapılan deneyler, dondurmanın termal özellikleri ve donma süreci üzerinde farklı sonuçlar verebilir. Farklı soğutucu sıvıların, dondurmanın donma sürecine etkileri, ısıl iletkenlikleri ve enerji tüketimleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmesi, dondurma üretim süreçlerinin optimizasyonu için faydalı olacaktır.

Modelleme Çalışmalarının Genişletilmesi: Mevcut modelleme çalışmaları, belirli parametreler için gerçekleştirilmiştir. Ancak, dondurma üretim sürecinde birçok değişken bulunmaktadır. Bu nedenle, farklı üretim koşulları ve parametrelerin kombinasyonlarının da modellendiği daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır. Örneğin, soğutma hızı, dondurmanın kalınlığı, soğutma sistemi türü gibi faktörlerin etkilerini bir arada inceleyen parametrik çalışmalar, üretim sürecinin daha iyi optimize edilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu öneriler, dondurma üretim süreçlerinin daha derinlemesine anlaşılmasına ve daha verimli, kaliteli ürünlerin üretilmesine yönelik gelecekteki araştırmalara rehberlik edebilir. Özellikle farklı dondurma türlerinin ve değişkenlerin incelenmesi, endüstride uygulanabilir sonuçların elde edilmesini sağlayarak, hem akademik literatüre hem de pratik uygulamalara önemli katkılar sunacaktır.

KAYNAKÇA

[1] C. Cogné, J. Andrieu, P. Laurent, A. Besson, J. Nocquet, "Experimental data and modelling of thermal properties of ice creams," *Journal of food engineering*, vol. 58, no. 4, pp. 331–341, 2003.

[2] C. Miles, G. V. Beek, C. Veerkamp, "Calculation of thermophysical properties of foods," *Physical properties of foods/edited by R. Jowitt... et al*, 1983.

[3] H. G. Schwartzberg, "Effective heat capacities for the freezing and thawing of food," *Journal of Food Science*, vol. 41, no. 1, pp. 152–156, 1976.

[4] C. Chen, "Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Enthalpy and apparent specific heat," *Journal of food science*, vol. 50, no. 4, pp. 1158–1162, 1985.

[5] P. Cornillon, J. Andrieu, J.-C. Duplan, M. Laurent, "Use of nuclear magnetic resonance to model thermophysical properties of frozen and unfrozen model food gels," *Journal of food engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1–19, 1995.

[6] H. Pyenson, C. Dahle, "Bound water and its relation to some dairy products: I. the bound water content of some milk products and other products used in the dairy industry," *Journal of Dairy Science*, vol. 21, no. 4, pp. 169–185, 1938.

[7] Y. Choi, "Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods," *Transport phenomena*, 1986.

[8] A. Leighton, "On the calculation of the freezing point of ice-cream mixes and of the quantities of ice separated during the freezing process," *Journal of Dairy Science*, vol. 10, no. 4, pp. 300–308, 1927.

[9] H. D. Goff, R. W. Hartel, *Ice cream*. Springer Science & Business Media, 2013.

[10] C. Cogné, P. Laurent, J. Andrieu, J. Ferrand, "Experimental data and modelling of ice cream freezing," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 81, no. 9, pp. 1129–1135, 2003.

[11] G. Boccardi, G. Celata, R. Lazzarini, L. Saraceno, R. Trinchieri, "Development of a heat transfer correlation for a scraped-surface heat exchanger," *Applied thermal engineering*, vol. 30, no. 10, pp. 1101–1106, 2010.

[12] P. M. Bongers, "A heat transfer model of a scraped surface heat exchanger for ice cream," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 21, Elsevier, 2006, pp. 539–544.

[13] J. Málek, "Kinetic analysis of crystallization processes in amorphous materials," *Thermochimica Acta*, vol. 355, no. 1-2, pp. 239–253, 2000.

[14] R. V. Devireddy, P. H. Leo, J. S. Lowengrub, J. C. Bischof, "Measurement and numerical analysis of freezing in solutions enclosed in a small container," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 9, pp. 1915–1931, 2002.

[15] V. Chégnimonhan, C. Josset, H. Peerhossaini, "Ice slurry crystallization based on kinetic phase-change modeling," *International journal of refrigeration*, vol. 33, no. 8, pp. 1559–1568, 2010.

[16] E. Lopez-Quiroga, R. Wang, O. Gouseti, P. Fryer, S. Bakalis, "Modelling freezing processes of high concentrated systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 1, pp. 749–754, 2015.

[17] E. Buyruk, A. Fertelli, N. Sonmez, "Numerical investigation for solidification around various cylinder geometries," *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 68, pp. 122–129, Feb. 2009.

[18] E. Tombarevic, I. Vusanovic, "Modeling of ice-water phase change in horizontal annulus using modified enthalpy method," *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 3, no. 3, pp. 354–369, 2011.

[19] G. Chaudhary, R. Li, "Freezing of water droplets on solid surfaces: An experimental and numerical study," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 57, pp. 86–93, 2014.

[20] Z. Jin, X. Cheng, Z. Yang, "Experimental investigation of the successive freezing processes of water droplets on an ice surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 107, pp. 906–915, 2017.

[21] R. Van der Sman, "Phase field simulations of ice crystal growth in sugar solutions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 95, pp. 153–161, 2016.

[22] M. Jurćević, Ž. Penga, B. Klarin, S. Nižetić, "Numerical analysis and experimental validation of heat transfer during solidification of phase change material in a large domain," *Journal of Energy Storage*, vol. 30, p. 101 543, 2020.

[23] J. R. Patel, V. Joshi, M. K. Rathod, "Thermal performance investigations of the melting and solidification in differently shaped macro-capsules saturated with phase change material," *Journal of Energy Storage*, vol. 31, p. 101 635, 2020.

[24] A. Dash, A. K. Sahoo, A. Yadav, V. Patel, "Computational modelling of freezing of water droplet impacting on an ice surface," *Materials Today: Proceedings*, vol. 41, pp. 156–160, 2021.

[25] P. R. Chakraborty, "Enthalpy porosity model for melting and solidification of pure-substances with large difference in phase specific heats," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 81, pp. 183–189, 2017.

[26] M. A. Ezan, M. Uzun, A. Erek, "A study on evaluation of effective thermal conductivity for spherical capsules," in *Environmental Science and Engineering*, International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2014.

[27] S. Simsek, "Ev tipi buzdolaplarinda buz yapma süresinin deneysel ve teorik incelenmesi," M.S. thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2016.

[28] I. Lind, "The measurement and prediction of thermal properties of food during freezing and thawing — a review with particular reference to meat and dough," *Journal of Food Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 285–319, 1991, ISSN: 0260-8774. DOI: https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90048-W.

[29] P. Sanz, M. Alonso, R. Mascheroni, "Thermophysical properties of meat products: General bibliography and experimental values," *Transactions of the ASAE*, vol. 30, pp. 283–289, 296, Jan. 1987. DOI: 10.13031/2013.30441.

[30] A. Simion, P. Dobrovici, R. Lacramioara, L. Gavrilă, "Modeling of the thermo-physical properties of grape juice i. thermal conductivity and thermal diffusivity," *Annals. Food Science and Technology*, vol. 10, pp. 363–368, Nov. 2009.

[31] J. Telis-Romero, V. Telis, A. Gabas, F. Yamashita, "Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content," *Journal of Food Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 27–40, 1998, ISSN: 0260-8774. DOI: https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00107-1. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001071.

[32] M. A. Magerramov, "Heat capacity of natural fruit juices and of their concentrates at temperatures from 10 to 120°c," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 80, pp. 1055–1063, 5 2007. DOI: 10.1007/s10891-007-0138-1.

[33] M. A. Magerramov, A. I. Abdulagatov, I. M. Abdulagatov, N. D. Azizov, "Thermal conductivity of peach, raspberry, cherry and plum juices as a function of temperature and concentration," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 29, pp. 304–326, 2006. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37170044.

[34] K. S. Sudhir, K. D. Ashis, "Thermal properties of frozen peas, clams and ice cream," *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 242–246, 1984, ISSN: 0315-5463. DOI: https://doi.org/10.1016/S0315-5463(84)72565-X.

[35] D. Heldman, T. Hedrick, "Refrigeration requirements for ice cream freezing1," *Journal of Dairy Science*, vol. 53, no. 9, pp. 1194–1200, 1970, ISSN: 0022-0302. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(70)86367-6.

[36] A. Imran, M. Rana, A. Siddiqui, M. Shoaib, "Flow of second grade fluid in a scraped surface heat exchanger," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 40, no. 2, e12393, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.12393.

[37] H. Masuda, M. Sawano, K. Ishihara, M. Shimoyamada, "Effect of agitation speed on freezing process of ice cream using a batch freezer," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 43, 2020. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:213494444.

[38] H. D. CHANG, L. C. TAO, "Correlations of enthalpies of food systems," *Journal of Food Science*, vol. 46, no. 5, pp. 1493–1497, 1981. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04205.x.

[39] B. Fricke, B. Becker, "Evaluation of thermophysical property models for foods," *HVACR Research*, vol. 7, pp. 311–330, Oct. 2001. DOI: 10.1080/10789669.2001.10391278.

[40] D. Singh, A. Kumar, "Numerical and experimental analysis of rapid solidification considering undercooling effect during water droplet impact on a substrate," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, p. 100 722, 2020.

[41] ASHRAE, *Thermal Properties of Foods* (ASHRAE Handbook—Refrigeration). Atlanta, GA: ASHRAE, 2006, ch. 9, pp. 9.1–9.28, http://membership.ashrae.org/template/AssetDetail?assetid=42305, ISBN: 978-1-931862-61-1.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgileri: alp.atici@std.yildiz.edu.tr

Makale

1. Ö. A. Atici, D. B. Özkan, “Experimental and theoretical investigation of thermal parameters influencing the freezing process of ice cream.,” Applied Sciences (2076-3417), vol. 14, no. 14, 2024.

Konferans Bildirisi

1. Ö. A. Atici, D. B. Özkan, T. Susuzlu, “Modelling ice cream freezing time with finite difference methods,” in Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey, Dec. 2019, pp. 2307–2313.