

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN ve FAZ DEĞİŞİMİ YAPAN
KAPSÜLLERDE ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Zafer GEMİCİ**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ENERJİ PROGRAMI

ŞUBAT 2008

**TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILAN ve FAZ DEĞİŞİMİ YAPAN KAPSÜLLERDE
ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Zafer GEMİCİ
(503992055)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Şubat 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. A. Nilüfer EĞRİCAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. İsmail TEKE (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Sibel ÖZDOĞAN (M.Ü.)
Prof.Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Taner DERBENTLİ (İ.T.Ü.)**

ŞUBAT 2008

ÖNSÖZ

Enerji ve su kaynaklarımızın giderek tükendiği dünyamızda alternatif arayışları her geçen gün daha da artmaktadır. Bu çalışmada da yeni bir alternatif ele alınmıştır. Umarım burada verilen bilgiler dünyamızın enerji ve su kaynaklarının iyi yönetilmesinde az da olsa bir katkı oluşturur.

Araştırma ve Geliştirme (ARGE)'yi ve yenilik üretmeyi bir ülkenin bağımsızlığı için olmazsa olmaz olarak gören ve bu doğrultuda desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen Dizayn Grup'un Yönetim Kurulu Başkanı Sn. İbrahim MİRMAHMUTOĞULLARI'na, benim bir ARGE sevdalı olmamı sağlayan, elimden tutup sanayi ile daha lisans öğrencisi iken tanıştıran saygıdeğer hocam, tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Nilüfer EĞRİCAN'a, bunun gibi endüstriye dönüştürülebilir projelerin Üniversite ve Sanayi İşbirliği çerçevesinde yürütülmesi için çaba sarf eden, bilgi ve deneyimi ile yol gösteren Sn. Prof. Dr. İsmail TEKE'ye ve izleme komitesi üyesi Sn. Prof. Dr. Taner DERBENTLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca başta Tamer BİRTANE ve Saim KENDİLİŞLER olmak üzere Dizayn Grup ARGE departmanı çalışanlarına ve deneylerin yapılması esnasında yoğun desteklerini esirgemeyen laboratuvar sorumlusu Volkan UÇAR'a da teşekkür etmeliyim.

Tabii ki teşekkür ederken tüm tez süresi içerisinde onlara ait olan zamanımdan feragat eden ve her türlü sıkıntıya katlanan eşim Evrim ve biricik kızım Ezgi'yi de unutmamalıyım. Tezimi kendilerine atfediyorum.

Bu tezin ileride endüstriye dönüşmesi ve yapılacak çalışmalar için faydalı bir kaynak olması dileğiyle.

Aralık, 2007

Zafer GEMİCİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.2 İçten eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama (internal melt ice-on-coil storage)	6
1.3 Kapsül içerisinde buz (encapsulated ice).....	6
1.4 Kar ve Buzun Özellikleri	7
1.4.1 Karın sınıflandırılması	10
1.4.2 Kar ve Buz Kristalleri.....	13
1.4.3 Kar ve Buzun Termofiziksel Özellikleri	17
1.4.3.1 Buzun ısı iletkenliği	17
1.4.3.2 Buzun Özgül Isısı	18
1.4.3.3 Buzun Yoğunluğu	18
1.4.3.4 Buzun Gizli Isısı	19
1.4.3.5 Karın ısı iletkenliği	19
1.4.3.6 Karın özgül ısısı	21
1.5 Kar içerisinde ısı ve kütle geçişi	21
1.5.1 Kar içerisinde enerji ve kütle geçişi	24
1.5.1.1 Isı iletimi	24
1.5.1.2 Su buharı geçişi	24
1.5.1.3 Kar birikmesi.....	25
1.5.2 Karın İç Yapısı.....	25
1.6 Saf Malzemelerde Erime Ve Donma	26
1.6.1 Tek boyutlu donma problemi	26
1.6.2 Tek boyutlu erime problemi.....	28
2. BUGÜNE KADAR YAPILAN ÇALIŞMALAR	31
2.1 Kar ve Buzun Özellikleri	31
2.2 Erime ve Katılaşma	38
2.3 Termal Enerji Depolama Sistemleri	50
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	54
3.1 Deney Tesisatı.....	55
3.1.1 Numune Hazırlama Aparatı.....	55
3.1.2 Veri Toplama Sistemi	57
3.1.3 Şartlandırma Sistemleri	59
3.1.4 Hassas Terazî.....	59

3.1.5	Çekme Cihazı	60
3.1.6	Termoelemanlar	60
3.1.7	Referans Termometre	61
3.2	Termoelemanların Kalibre Edilmesi	61
3.3	Deneylerin Yapılması (Deney Prosedürü)	63
3.4	Deney Sonuçları	65
3.4.1	Ön Deneyler	65
3.4.2	Nihai Deneyler	67
3.5	Deney Sonuçlarının Birbirleri İle Karşılaştırılması	77
3.6	Isı Taşınım Katsayısının Belirlenmesi	81
3.6.1	Işınım Etkisi	84
4.	NÜMERİK (SAYISAL) ÇALIŞMALAR	86
4.1	Sayısal (Nümerik) Teknikler	86
4.1.1	Sayısal Çözüm Yöntemleri	86
4.1.1.1	Ayrı Ayrı Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)	87
4.1.1.2	Birarada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver)	88
4.1.2	Lineerleştirme	89
4.1.2.1	Örtülü 'Implicit' Yöntem	89
4.1.2.2	Açık 'Explicit' Yöntem	89
4.1.3	Korunum Denklemlerinin Cebirsel Denklemlere Dönüştürülmesi (Discretization)	90
4.1.3.1	Birinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi (First-Order Upwind Scheme)	94
4.1.3.2	Üssel Enterpolasyon Yöntemi (Power Law Scheme)	94
4.1.3.3	İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi (Second-Order Upwind Scheme)	95
4.1.3.4	Hızlı Enterpolasyon Yöntemi (QUICK SCHEME)	95
4.1.4	Zamana Bağlı Terimlerin Lineerleştirilmesi	96
4.1.4.1	Örtülü (Implicit) Zaman Entegrasyonu	97
4.1.4.2	Açık (explicit) Zaman Entegrasyonu	97
4.1.5	İterasyon Yapılırken Kullanılacak Düzeltme (URF, Under Relaxation Factor) Katsayısının Tanımlanması	97
4.1.6	Ayrı Ayrı Çözücü 'Segregated Solver' İçin Artık R 'Residual' Değerinin Tanımı	98
4.1.7	Yakınsama ve Kararlılık	99
4.2	Yöneten Denklemler ve Boyutsuzlaştırma	99
4.2.1	Boyutsuzlaştırma	101
4.3	Fluent ile Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları	101
4.3.1	Sayısal Modelin Literatürdeki Modellerle Karşılaştırılması ve Modelin Doğrulanması	102
4.3.2	Katı Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi ve Sınır Koşulları	105
4.3.3	Sayısal Sonuçlar ve Deneylerle Karşılaştırılması	111
5.	SONUÇLAR	121
5.1	Bu Alanda Yapılabilecek Diğer Çalışmalar ve Öneriler	127
	KAYNAKLAR	128
	EKLER	133

Ek A. Deney sonuçları ile sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırmaları	133
Ek B. Kar küreler için yapılan sayısal analizlerde bulunan donma süreleri ve çekilen ısı miktarları tablosu	141
Ek C. Arayüzey Pozisyonunun Zamanla Değişimi ve Çekilen Isı	144
Ek D. Farklı Gözenekliliğe Sahip Numunelerde, Farklı Taşınım Katsayıları İçin Donma Süreleri Ve Çekilen Isı Miktarlarının Sıcaklıkla Değişimi.....	153
Ek E. Sayısal Analiz Sonuçları İle Ampirik Fonksiyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	156
Ek F. S. Colbeck ve Diğerleri Tarafından Yapılan Sınıflandırma	159
Ek G. Magono ve Lee Tarafından Yapılan Sınıflandırma.....	166
Ek H. Uluslararası Sınıflandırma	168
Ek I. Kalibrasyonlar.....	169
Ek I.1 Referans Termometre Kalibrasyonu	169
Ek I.2 Hassas Terazî Kalibrasyonu	173
Ek I.3 Soğutucu Dolap Kalibrasyonu	176
ÖZGEÇMİŞ	180

KISALTMALAR

PCM	: Phase Change Material
HVAC	: Heating, Ventilation and Air Conditioning
AMG	: An Algebraic Multigrid
URF	: Under Relaxation Factor
R	: Residual
COP	: Coefficient of Performance
HTF	: Heat Transfer Fluid
PVC	: Polyvinyl Chloride
TLC	: Thermochromic Liquid Crystal
DPIV	: Digital Particle Image Velocitymeter
PIV	: Particle Image Velocitymeter
TDMA	: Tri-Diagonal Matrix Algorithm
AL	: Alüminyum
SOR	: Succesive Over Relaxation
EHC	: Effective Heat Capacity Method
LHTES	: Latent Heat Thermal Energy Storage
ATGM	: Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Müdürlüğü
CNC	: Computerized Numerical Control
IO	: Input-Output
TC	: Thermocouple
ÖDYK	: Ön Deney Yarım Küre
NDYK	: Nihai Deney Yarım Küre

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1: Duyulur ısı depolama sistemlerinde sıvı depoları [1].....	3
Tablo 1.2: Uygulamada kullanılan duyulur ısı depolama ortamları [1].....	3
Tablo 1.3: Bilinen bazı maddelerin 20 °C'deki ısı kapasiteleri [1]	4
Tablo 1.4: Literatürde karşılaşılan bazı faz değişim malzemeleri	5
Tablo 1.5: Granül büyüklüğü	10
Tablo 1.6: Karın su içeriği	11
Tablo 1.7: Karın sertliği	12
Tablo 1.8: Karın sıcaklığı.....	12
Tablo 1.9: Yüzey pürüzlülüğü.....	12
Tablo 2.1: L.F. Cabeza ve diğ.'nin deney sonuçları	43
Tablo 2.2: Faz değişim malzemesinden istenen temel özellikler	50
Tablo 3.1: Kalibrasyon Katsayıları	62
Tablo 3.2: Deney numuneleri.....	66
Tablo 3.3: Deney numunelerine ait kütleler.....	67
Tablo 3.4: Deney numunelerine ait yoğunluk ve gözeneklilik değerleri	68
Tablo 4.1: Buzun özelliklerinin sıcaklıkla değişimi [60]	108
Tablo 4.2: Fluent'e tanımlanan malzeme özellikleri.....	108
Tablo 4.3: Su emme yüzdelерinin dağılımı	112
Tablo 4.5: Donma süresi fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri	118
Tablo 4.6: Çekilen ısı fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri	119
Tablo 5.1: Donma süresi fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri	125
Tablo 5.2: Çekilen ısı fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri	126
Tablo B.1: Donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarları (J/m^2)	141

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Dıştan eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama	6
Şekil 1.2: İçten eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama	6
Şekil 1.3: Buz granüller ve arayüzeyleri.....	8
Şekil 1.4: Nakaya tarafından önerilen morfoloji diyagramı [5]	13
Şekil 1.5: Temel buz kristalinin altıgen prizma şekli [6].....	14
Şekil 1.6: Kar kristallerinin üzerindeki sanki sıvı bölge [6].....	14
Şekil 1.7: Kar kristalinin oluşumu	15
Şekil 1.8: Kar kristali örneği 1 [7]	15
Şekil 1.9: Kar kristali örneği 2 [7]	16
Şekil 1.10: Kar kristali örneği 3 [7]	16
Şekil 1.11: Buzun ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi [8]	17
Şekil 1.12: Buzun özgül ısısının sıcaklıkla değişimi [8]	18
Şekil 1.13: Buzun yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi [8].....	19
Şekil 1.14: Karın ısı iletim katsayısının yoğunlukla değişimi [8], [9].....	20
Şekil 1.15: Karın ısı iletim katsayısının sıcaklık ve yoğunlukla değişimi [8]	20
Şekil 1.16: Saf maddelerde tek boyutlu donma	27
Şekil 1.17: Saf maddelerde tek boyutlu erime	29
Şekil 2.1: Buzun mukavemetinin dış basınçla değişimi	33
Şekil 2.2: Zamana bağlı mukavemet değişimi	35
Şekil 2.3: Deformasyona bağlı mukavemet değişimi	35
Şekil 2.4: Kapsül içerisindeki su ve hava miktarları	38
Şekil 2.5: Sınır şartları	40
Şekil 2.6: Katı yoğunluğu yüksek bir sıvıda erime.....	46
Şekil 2.7: Suyun faz diyagramı [45]	49
Şekil 2.8: Katılaşma geçiş bölgesi	50
Şekil 3.1: Deney tesisatı	56
Şekil 3.2: Numune hazırlama aparatı katı model görüntüsü.....	56
Şekil 3.3: Numune hazırlama aparatı teknik çizim.....	57
Şekil 3.4: GeniDAQ'ta yapılan programın ekranı	58
Şekil 3.5: GeniDAQ'ta sıcaklık değişimlerinin izlendiği görüntü ekranı	58
Şekil 3.6: Data toplama kartı Adventec PCL-818HD model IO kartı	59
Şekil 3.7: Hassas terazi	59
Şekil 3.8: Çekme cihazı	60
Şekil 3.9: Termoelemanların uç kısımlarının kaynatıldığı tesisat	60
Şekil 3.10: Referans termometre	61
Şekil 3.11: Termoeleman kalibrasyon sistemi.....	62
Şekil 3.12: Deney numunesi ve yalıtım	63
Şekil 3.13: Termoelemanların (TC1-TC5) yerleşim detayı.....	64
Şekil 3.14: Test anındaki deney numunesi	64
Şekil 3.15: Buz küre üzerine test esnasında havanın üflenmesi	65
Şekil 3.16: ÖDYK01- Kar kürenin soğuma eğrileri	66
Şekil 3.17: ÖDYK02- Kar kürenin soğuma eğrileri	66
Şekil 3.18: ÖDYK03- Kar kürede sıcaklıkların zamanla değişimi	67
Şekil 3.19: NDYK01- yarım kürede sıcaklığın zamanla değişimi	68

Şekil 3.20: Farklı sıkıştırma aşamalarında karın mikro yapısı (I- 0,35 g/cm ³ kar, II- 0,64 g/cm ³ kar, III- 0,78 g/cm ³ kar ve IV- Buz) [52]	69
Şekil 3.21: NDYK02- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi	70
Şekil 3.22: NDYK03- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi	70
Şekil 3.23: NDYK04- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi	71
Şekil 3.24: NDYK05A- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi	71
Şekil 3.25: NDYK05B- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi.....	72
Şekil 3.26: NDYK06- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi	72
Şekil 3.27: NDYK07- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	73
Şekil 3.28: NDYK08- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	73
Şekil 3.29: NDYK09- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	74
Şekil 3.30: NDYK10- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	74
Şekil 3.31: NDYK11- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	75
Şekil 3.32: NDYK12- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	75
Şekil 3.33: NDYK13- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	76
Şekil 3.34: NDYK14- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma).....	76
Şekil 3.35: 9 ve 10 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması	77
Şekil 3.36: 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması	77
Şekil 3.37: $x = 0$ 'da 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.	78
Şekil 3.38: $x = 8$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 3.39: $x = 16$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 3.40: $x = 24$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 3.41: $x = 32$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.....	80
Şekil 3.42: Alüminyum yarım kürenin sıcaklığının zamanla değişimi	81
Şekil 3.43: Al Yarım Küre üzerinde taşınım katsayısının zamanla değişimi	82
Şekil 3.44: Işınım için eşdeğer direnç	84
Şekil 4.1: Ayrı ayrı çözüm algoritması.....	87
Şekil 4.2: Birarada çözüm algoritması.....	88
Şekil 4.3: İki boyutlu bir kontrol hacminin şematik gösterimi.....	91
Şekil 4.4: Tek boyutlu sayısal çözümde düğüm noktaları.....	92
Şekil 4.5: Farklı Peclet sayıları için x ile ϕ 'nin değişimi.....	94
Şekil 4.6: Hücrelere bölünmüş bir geometride ele alınan hücre ve komşu hücreler.....	95
Şekil 4.7: Küre üzerinde arayüzeyin pozisyonu	100
Şekil 4.8: Arayüzey pozisyonunun zaman göre değişimi ($Bi = 100$, $Ste = 0,1$ ve $r = 5$ cm).....	103

Şekil 4.9: R = 5 cm çaplı su kürede, taşınımın soğuma halinde sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması	104
Şekil 4.10: Farklı çözüm ağlarının karşılaştırılması	104
Şekil 4.11: (a – Çözüm Ağı 1) 31232 eleman, 15855 düğüm noktası, (b – Çözüm Ağı 2) 12610 eleman, 12805 düğüm noktası, (c – Çözüm Ağı 3) 32500 eleman, 33001 düğüm noktası.	105
Şekil 4.12: Model Geometri ve çözüm ağı	106
Şekil 4.13: Fluent'in ana ekranı	106
Şekil 4.14: Katılaşma ve erime ekranı	107
Şekil 4.15: Çözücü ekranı	107
Şekil 4.16: Malzeme tanımlaması	108
Şekil 4.17: Sınır koşulları	109
Şekil 4.18: Çözücü kontrolleri	109
Şekil 4.19: İlk sıcaklığın atanması	110
Şekil 4.20: Çözüm sonuçlarının izlenmesi	110
Şekil 4.21: Çözüm sonuçlarının izlenmesi	110
Şekil 4.22: Çözüm sonuçlarının izlenmesi	111
Şekil 4.23: Sayısal analizde kullanılan modelin farklı alanlara bölünmesi	112
Şekil 4.24: 13 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun farklı bölgelerde farklı gözeneklilikler verilerek karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))	113
Şekil 4.25: Katılaşma Arayüzeyi Pozisyonunun Zamanla Değişimi (R = 20 mm, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)	115
Şekil 4.26: Çekilen Isı Miktarının Zamanla Değişimi (R = 20 mm, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)	116
Şekil 4.27: R=20 mm yarıçaplı ve 0,1 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi	116
Şekil 4.28: R=20 mm yarıçaplı ve 0,2 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi	117
Şekil 4.29: R=20 mm yarıçaplı ve 0,3 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarları (J/m^2)'nın sıcaklıkla değişimi	117
Şekil 4.30: 20 mm yarı çaplı ve taşınım katsayısı $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ olan kürede sayısal donma süresi (s) ile ampirik fonksiyon sonuçlarının karşılaştırılması..	119
Şekil 4.31: 20 mm yarı çaplı ve taşınım katsayısı $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ olan kürede sayısal ve ampirik olarak hesaplanan ısı miktarı (J/m^2)'nın karşılaştırılması..	120
Şekil 5.1: Katılaşma Arayüzeyi Pozisyonunun Zamanla Değişimi (R = 20 mm, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)	123
Şekil 5.2: Çekilen Isı Miktarının Zamanla Değişimi (R = 20 mm, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)	124
Şekil 5.3: R=20 mm yarıçaplı ve 0,1 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi	124
Şekil A.1: 7 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))	133
Şekil A.2: 8 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))	134

Şekil A.3: 9 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	135
Şekil A.4: 10 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	136
Şekil A.5: 11 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	137
Şekil A.6: 12 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	138
Şekil A.7: 13 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	139
Şekil A.8: 14 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C)).....	140
Şekil C.1: R=20 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	144
Şekil C.2: R=20 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	144
Şekil C.3: R=20 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	144
Şekil C.4: R=20 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	145
Şekil C.5: R=20 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	145
Şekil C.6: R=20 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	145
Şekil C.7: R=20 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	146
Şekil C.8: R=20 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	146
Şekil C.9: R=20 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	146
Şekil C.10: R=40 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	147
Şekil C.11: R=40 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	147
Şekil C.12: R=40 mm, $\emptyset=0,1$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	147
Şekil C.13: R=40 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	148
Şekil C.14: R=40 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	148
Şekil C.15: R=40 mm, $\emptyset=0,2$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	148
Şekil C.16: R=40 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	149
Şekil C.17: R=40 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	149
Şekil C.18: R=40 mm, $\emptyset=0,3$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi.....	149

Şekil C.19: $R=60$ mm, $\phi=0,1$ ve $h=10$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	150
Şekil C.20: $R=60$ mm, $\phi=0,1$ ve $h=20$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	150
Şekil C.21: $R=60$ mm, $\phi=0,1$ ve $h=40$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	150
Şekil C.22: $R=60$ mm, $\phi=0,2$ ve $h=10$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	151
Şekil C.23: $R=60$ mm, $\phi=0,2$ ve $h=20$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	151
Şekil C.24: $R=60$ mm, $\phi=0,2$ ve $h=40$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	151
Şekil C.25: $R=60$ mm, $\phi=0,3$ ve $h=10$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	152
Şekil C.26: $R=60$ mm, $\phi=0,3$ ve $h=20$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	152
Şekil C.27: $R=60$ mm, $\phi=0,3$ ve $h=40$ W/m ² K için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi	152
Şekil D.1: $R = 40$ mm, $\phi = 0,1$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	153
Şekil D.2: $R = 40$ mm, $\phi = 0,2$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	153
Şekil D.3: $R = 40$ mm, $\phi = 0,3$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	154
Şekil D.4: $R = 60$ mm, $\phi = 0,1$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	154
Şekil D.5: $R = 60$ mm, $\phi = 0,2$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	155
Şekil D.6: $R = 60$ mm, $\phi = 0,3$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m ²)	155
Şekil E.1: $R = 20$ mm, $h = 10$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	156
Şekil E.2: $R = 20$ mm, $h = 20$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	156
Şekil E.3: $R = 20$ mm, $h = 40$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	156
Şekil E.4: $R = 40$ mm, $h = 10$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	157
Şekil E.5: $R = 40$ mm, $h = 20$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	157
Şekil E.6: $R = 40$ mm, $h = 40$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	157
Şekil E.7: $R = 60$ mm, $h = 10$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	158
Şekil E.8: $R = 60$ mm, $h = 20$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	158
Şekil E.9: $R = 60$ mm, $h = 40$ W/m ² K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m ²)	158
Şekil F.1: Sınıf 2dc, Kısmi ayrışık yağın partikülleri (partly decomposed precipitation particles)	159

Şekil F.2: Sınıf 2bk ve 9wc, Fazla parçalanmış partiküller (üst kısım) ve rüzgar buzu (alt kısım) (highly broken particles (on top) and wind crust (on bottom)) ve Sınıf 3sr, Küçük küresel partiküller (small rounded particles)	159
Şekil F.3: Sınıf 3lr, Büyük küresel partiküller (large rounded particles)	160
Şekil F.4: Sınıf 3mx, Düzlemsel yüzeyleri gelişen küresel partiküller (rounded particles with developing facets)	160
Şekil F.5: Sınıf 4fa, Katı düzlemsel yüzeyli partiküller (solid faceted particles)....	160
Şekil F.6: Sınıf 4sf, Yüzey katmanında küçük düzlemsel yüzeyli partiküller (small faceted particles in surface layer)	161
Şekil F.7: Sınıf 4mx, Henüz yuvarlaklaşmış düzlemsel yüzeyli partiküller (faceted particles with recent rounding)	161
Şekil F.8: Sınıf 5cp, Kupa şeklinde çizgili kristaller (cup-shaped, striated crystals)	161
Şekil F.9: Sınıf 5dh, Kolon şeklinde dizilmiş kupa şekilli kristaller (cup-shaped crystals arranged in columns)	162
Şekil F.10: a) Sınıf 5cl, Büyük kolonsu kristaller (large columnar crystals), b) Sınıf 6cl, Düşük sıvı içeren kümelenmiş tek bir yapı (clustered single at low liquid content), c) Sınıf 6mf, Donma erime çevrimleri sonucu oluşmuş polikristal partikül (polycrystalline particle from melt-freeze cycles)	162
Şekil F.11: Sınıf 6sl, Çok sulu kar (slush)	163
Şekil F.12: Sınıf 7sh, Yüzeyde beyaz buz (kırağı) (surface hoar)	163
Şekil F.13: Sınıf 7ch, Oyuk beyaz buzu (cavity hoar) and Sınıf 8il, Yatay buz katmanı (horizontal ice layer)	163
Şekil F.14: Sınıf 8ic and 8il, Dikey ve yatay yapılar (vertical and horizontal bodies)	164
Şekil F.15: Sınıf 8bi, temel buz katmanı (basal ice layer)	164
Şekil F.16: Sınıf 9sc, Güneşli buzkar yüzeyi (sun crust-firn spiegel)	165
Şekil G.1: Magono ve Lee tarafından yapılan sınıflandırma sistemi [4]	166
Şekil G.2: Magono ve Lee tarafından yapılan sınıflandırma sistemi (devam) [4] ..	167
Şekil H.1: Uluslararası sınıflandırma	168

SEMBOL LİSTESİ

$\vec{A}, \vec{A}_f$	: Yüzey alan vektörü ve f yüzeyinin alanı
Bi	: Biot sayısı
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı
c_k	: Katı bölgenin özgül ısısı
C	: Kohezyon
D_v	: Su buharının difüzivitesi
D	: Yoğunluk
d	: Deformasyon
E	: Aktivasyon enerjisi
F	: Kütlesel akı
F_{12}	: 1. yüzeyin 2. yüzeyi görme faktörü
g	: Yer çekimi
H, h_{ks}	: Entalpi, Katı sıvı faz değişim entalpisi
h, h_r	: Hava tarafı ısı taşınım katsayısı ve ışıınının taşınım eşdeğeri
I_1	: Gerilme tansörünün ilk invaryantı
J_2	: Gerilme gradyeninin ikinci invaryantı
k	: Isı iletim katsayısı
l	: Boy
L, L^s, L^v	: Gizli ısı geçişi, süblimasyon ve buharlaşma
M_w	: Emilen su miktarı
m	: Kütle
$N_{yüzey}$	: Hacim elemanını çevreleyen yüzey sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
Pe	: Peclet sayısı
Pr	: Prandtl sayısı
P^*	: Buzun erime basıncı
p, p^*, p'	: Basınç, iterasyon esnasında bir önceki adımdaki basınç ile mevcut adımdaki basınç farkı ve bir önceki basınç
Q_{sw}	: Kısa dalga radyasyon
Q_{pc}	: Faz değişim ısısı
q_{12}	: 1. yüzeyden 2. yüzeye ışıınınla geçen ısı
R	: Evrensel gaz sabiti, Residual (artık)
Re	: Reynolds sayısı
r	: Yarı çap
S	: Yüzey alanı
S_ϕ	: Birim hacimdeki kaynak terimi
Ste	: Stefan sayısı
t	: Zaman
T_0, T_k, T_s, T_f	: Ortam, katı bölge, sıvı bölge ve faz değişim sıcaklıkları
T_i	: İlk sıcaklık
u, u^*, u'	: x eksenindeki hız, iterasyon esnasında bir önceki adımdaki hız ile mevcut adımdaki hız farkı ve bir önceki hız
V	: Hacim elemanının hacmi
W, P, E	: Düğüm noktaları
w, e	: Düğüm noktalarının orta noktaları
X	: Arayüzeyin pozisyonu
x	: Yatay koordinat

z	: Yüzeye dik koordinat
$\rho_i, \rho_a, \rho_w, \rho_v$	: Buzun, havanın, suyun ve su buharının yoğunluğu
$\theta_i, \theta_a, \theta_w$	: Buzun, havanın ve suyun hacimsel oranı
τ	: Tortusity
ϵ_s	: Karın birim uzaması
η_s, η_{zz}	: Karın viskozitesi, sıkışma viskozitesi
σ_s	: Kardaki gerilme
α_s, α_k	: Sıvı ve katının ısı difüzyon katsayıları
$\vec{U}$	: Hız vektörü
Γ_ϕ	: Difüzyon katsayısı
ϕ	: kütle için 1, momentum için hız vektörü, enerji için ise toplam enerji
$\nabla\phi$	: ϕ 'nin gradyenti
ϕ_f	: f yüzeyinden taşınan ϕ değeri
Δx	: w ile e arasındaki mesafe
$\partial x_w, \partial x_e$	: Düğüm noktaları W-P ve P-E arasındaki mesafeler
$\Delta \vec{S}$	: Bir önceki hücre merkezi ile bir sonraki arasındaki yer değişim vektörü
θ	: QUICK şemasında kullanılan enterpolasyon yöntemine göre belirlenen katsayı
$\phi^{n-1}, \phi^n, \phi^{n+1}$	: $t-\Delta t$, t ve $t+\Delta t$ zamanlarındaki ϕ değerleri
α	: Düzeltme katsayısı (URF)
τ_i^*, τ_i	: Buzun mekanik dayanımı ve oktahedral kayma gerilmesi
$\dot{\gamma}_i$	: Oktahedral sabit kayma gerilmesi
Φ	: İç sürtünme
δ	: Film kalınlığı
φ	: Gözeneklilik
μ_s	: Yüzey sıcaklığında havanın dinamik viskozitesi
μ	: Ortam sıcaklığındaki dinamik viskozite
ν	: Kinematik viskozite
ϵ_1, ϵ_2	: 1 ve 2 nolu yüzeylerin emisivitesi

TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ve FAZ DEĞİŞİMİ YAPAN KAPSÜLLERDE ISI TRANSFERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Hızla gelişen ve nüfusu artan dünyamızda enerji ve su kaynaklarımız giderek azalmakta ve bu kaynaklara erişim her geçen gün daha pahalı ve zahmetli olmaktadır. Enerjinin önemli bir kısmı ise soğutma amacıyla tüketilmektedir. 2000 yılında OECD ülkelerinde tüketilen elektrik enerjisinin %6,4'ü soğutmada tüketilmiştir.

Yapılan bu çalışmada soğutma sistemlerinde tüketilen enerjinin azaltılmasını sağlayacak bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde hem soğutma hem de su ihtiyacı karşılanabilmektedir.

Termal enerji depolama sistemlerinde su faz değişim malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Su, gizli ısısının yüksek olması, sabit sıcaklıkta faz değiştirmesi, yaygın olarak bulunması, çevreye zararsız ve kimyasal olarak stabil olması vb. özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu sistemlerde su genellikle kapsül içerisine yerleştirilmektedir. Enerjinin ekonomik olduğu zamanlarda kapsül içerisindeki su dondurulmakta ve enerjinin pahalı ve soğutma yükünün fazla olduğu durumlarda buradaki soğudan yararlanılmaktadır. Bu şekilde sistem maksimum yüke göre tasarlanmayacağı için daha düşük ilk yatırım maliyetleri söz konusu olmaktadır.

Bir diğer yaklaşım da mevcut kar veya buzun soğutma sistemlerinde kullanılmasıdır. Bu durumda depolama ve taşıma problemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Literatürde küresel veya silindirik kapsüllerde yer alan suyun katılaşması veya erimesine ait oldukça fazla çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar tez kapsamı içerisinde özetlenmiştir. Kardan buz kürelerinin oluşturulması ve taşınmasına yönelik çalışma ise yoktur.

Dağlarda bulunan karlar yaz aylarında soğutma amacı ile kullanılabilir. Günümüzde kar uzak mesafelere kar+su karışımı (salamura) olarak transfer edilmektedir. Bu çalışmada ise karların küresel buz topları haline

getirilerek, buz topu halinde izole plastik borularla kullanım yerine taşınabileceği önerilmektedir. Bu şekilde hem soğu enerjisi kullanılabilecek hem de getirilen buzların erimesiyle elde edilen su kullanılabilecektir.

Burada yapılan çalışmada karın soğusundan yararlanılmak istenmektedir. Ancak karın yoğunluğunun düşük olması ve düşük gerilmeler altında çok hızlı bir şekilde deforme olması, küresel kapsüller kullanılmadan borularla taşınmasını ve depolanmasını imkansız hale getirmektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için sıkıştırma ve su verme ile karın buzlaştırılması deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

1. Bölümde, ilk olarak tez kapsamını oluşturan problem tanımlanmıştır. Daha sonra, özellikle Türkiye’de, depolama sistemleri, kar ve buz özellikleri ve bunların modellenmesi ile ilgili yeterli çalışma olmadığı için geniş bir literatür bilgisi verilmiştir. Termal enerji depolama sistemleri, karın ve buzun termofiziksel ve yapısal özellikleri, kar içerisinde enerji ve kütle geçişi ve tek boyutlu hal için saf malzemelerde erime ve donma problemlerinin matematiksel olarak çözümü bu bölümde kapsamlı olarak ele alınmıştır.

2. Bölümde ise bugüne kadar yapılan çalışmalar irdelenmiştir. Literatür taraması kar ve buzun özellikleri, erime ve katılaşma ve termal enerji depolama sistemleri başlıkları altında toplanmıştır.

Kar kürelerinin oluşturulması ve bu kürelerin 0 °C’ye getirilerek su emdirilip soğutulması işlemlerini içeren deneysel çalışmalar, bu deneysel çalışmaların birbirleriyle karşılaştırmaları 3. Bölümde verilmiştir. Deneysel çalışmalar eksenel simetri nedeniyle yarım küre üzerinde yapılmıştır. Bu bölümde, kurulan deney tesisatı, kullanılan deney ekipmanı ve yapılan ölçümler detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca karşılaştırma deneyleri ve elde edilen deney sonuçları da bu bölümde verilmiştir. Yine bu bölümde deneysel veriler kullanılarak hava tarafı ısı taşınım katsayısının belirlenmesi ve ışıınım etkisi anlatılmıştır.

4. bölümde sayısal çalışmalar ve sayısal sonuçlarla deneysel sonuçların karşılaştırılması ele alınmıştır. Bölümün ilk kısmında kullanılan sayısal teknikler kapsamlı olarak verilmiştir. Daha sonra yöneten denklemler ve boyutsuzlaştırma anlatılmıştır. Model eksenel simetrik olarak iki boyutlu olarak oluşturulmuştur. Kar kürelerin içermiş oldukları su miktarları gözeneklilikleri ile ifade edilmiştir. Gözeneklilik tüm kar kürede eşit olarak

kabul edilmiştir. İçerilen su miktarı sayısal modelde suyun faz değişim ısısının gözeneklilik katsayısı ile çarpılarak dikkate alınmıştır. Tüm sayısal çalışmalar Fluent ile yapılmıştır. Faz değişimi Fluent'in erime ve donma modülü kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan çözüm ağının yeteri kadar hassas olup olmadığı literatürde verilen problemler aynı model üzerinde çözülerek tespit edilmiştir. Daha sonra mevcut problem çözümü yapılmıştır. Bu bölümde aynı deney numunesi üzerinde çok fazla sayıda sayısal analizler yapılmış ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

5. Bölümde ise sonuçlar verilmiştir. Deneysel verilerle doğrulanan sayısal model kullanılarak farklı çap ve koşullar için yüzün üzerinde analiz yapılarak çok genel bir ampirik formülasyon çıkarılmıştır. Yine bu bölümde ileride yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN THE PHASE CHANGING CAPSULES USED IN THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS

SUMMARY

In our developing and populating earth, energy and water resources gradually decline and accessing to these resources becomes more and more expensive and harder. An important percentage of the energy used is consumed for the purpose of refrigeration. In the year 2000, 6.4% of the electric energy consumed in OECD countries is used for refrigeration.

In this study, a method for decreasing the amount of energy consumed in refrigeration systems is suggested. In the suggested method, both refrigeration and water requirements could be met.

In the thermal energy storage systems, water is extensively used as a phase change material. Water is preferred due to its high latent heat, its phase change at fixed temperature, its availability, and its environmentally harmless and chemically stable nature. In these systems, water is generally allocated within capsules. When energy is economic, water in the capsule will be frozen and when energy is expensive and refrigeration load is so much, the coldness within there will be utilized. So that lower investment costs arise because the system are not designed for maximum load.

Another approach is the usage of existing ice and snow in the refrigeration systems. In this case, the problems of storage and conveyance should be solved. In the literature, there are so much studies available relating to the solidifying and melting of the water in spherical or cylindrical capsules. These studies are summarized under the scope of this thesis. There is no study relating with forming ice spheres from snow.

Snow available in the mountains can be used for the refrigeration purposes during the summer time. Currently, snow is conveyed to long distances as slurry (snow water mixture). In this study, it is suggested that snow can be conveyed to the usage area in the form of ice balls via isolated plastic

pipes, after converting them to spherical ice balls. In this way, both cold energy and the water from molten ices can be used.

In this study, it is required to be utilized from the coldness of the snow. However, it is impossible to convey it in the pipes and to store it without using spherical capsules due to its low density and very fast deformation under low stresses. In order to overcome this problem, icing of the snow by compression and water feeding is investigated experimentally and numerically.

In the first chapter, the problem constituting the scope of thesis has been defined and a broad literature study has been supplied because there are no satisfactory studies, especially in Turkey, on specifications of snow and ice and modeling them. Thermal energy storage systems, thermophysical and structural specifications of snow and ice, energy and mass transfer in snow and the mathematical solution for the problem of melting and freezing in pure materials for one dimensional phase are comprehensively investigated in this chapter.

In the second chapter, studies performed up to now have been investigated. Literature study has been classified under the sections of specifications of snow and ice, melting and solidification and thermal energy storage systems.

In the third chapter, the experimental studies including the formation of ice spheres and the cooling of these spheres by saturating them with water at 0 °C, and the comparison of these studies have been supplied. The experimental studies are performed on half-sphere due to axial symmetry. In this chapter, experimental setup installed, testing equipment used and the measurements made have been given in detail. In addition to this, comparison tests and test results obtained have been supplied in this chapter. Also in this chapter, determination of air-side heat transfer coefficient and radiation effect has been expressed by using experimental data.

In the fourth chapter, numerical studies and the comparison of numerical results with experimental results have been investigated. At the first section of the chapter, the numerical methods used have been expressed in detail. Then, governing equations and nondimensionalization have been expressed. Model has been developed in axially symmetric two

dimensions. The water content of the snow spheres has been defined with their porosities. The porosity is assumed homogeneous over whole snow sphere. The water content has been considered in numerical model as the multiplication of porosity coefficient with the phase change latent heat of water. All numerical studies have been performed on Fluent. Phase change has been modeled by using the melting and freezing modules of Fluent. The precision of the solution network formed has been determined by solving the problems given in the literature on the same model. Then available problem is solved. In this chapter, lots of numerical analyses have been performed on the same test sample and the results have been compared with the experimental data.

In the fifth chapter, conclusions have been given. A very comprehensive empirical formula has been determined after performing more than one hundred analyses for different diameters and conditions by using a numerical model verified by experimental data. Additionally in this chapter, some studies, that might be performed in future, have been proposed.

1. GİRİŞ

Enerji depolama sistemlerinde su faz değişim malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Su, gizli ısısının yüksek olması, sabit sıcaklıkta faz değiştirmesi, yaygın olarak bulunması, çevreye zararsız olması, kimyasal olarak stabil olması vb. özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu sistemlerde su genellikle kapsül içerisine yerleştirilmektedir. Enerjinin ekonomik olduğu zamanlarda kapsül içerisindeki su dondurulmakta ve ısı yükünün fazla olduğu durumlarda buradaki soğudan yararlanılmaktadır. Bu şekilde sistem maksimum yüke göre tasarlanmayacağı için daha düşük ilk yatırım maliyetleri söz konusu olmaktadır.

Bir diğer yaklaşım da mevcut kar veya buzun soğutma sistemlerinde kullanılmasıdır. Bu durumda depolama ve taşıma problemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Literatürde küresel veya silindirik kapsüllerde yer alan suyun katılaşması veya erimesine ait oldukça fazla çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar tez kapsamında özetlenmiştir. Kardan buz toplarının oluşturulması ve taşınmasına yönelik çalışma ise yoktur.

Dağlarda bulunan karlar yaz aylarında soğutma amacı ile kullanılabilir. Günümüzde kar uzak mesafelere kar+su karışımı (slush) olarak transfer edilmektedir. Bu çalışmada ise karların küresel topar haline getirilerek, buz topu halinde izole plastik borularla kullanım yerine taşınabileceği önerilmektedir.

Burada yapılan çalışmada karın soğusundan yararlanılmak istenmektedir. Ancak karın yoğunluğunun düşük olması ve düşük gerilmeler altında çok hızlı bir şekilde deforme olması borularla taşınmasını ve depolanmasını imkansız hale getirmektedir. Bu nedenle sıkıştırma ve su verme ile karın buzlaştırılması düşünülmektedir. Bu çalışmada karın sıkıştırılarak ve su emdirilerek buzlaştırılması deneysel ve teorik olarak incelenecektir.

Bu bölümde ilk olarak termal enerji depolama sistemlerinden bahsedilecek daha sonra, Türkçe literatürde yeteri kadar yer almadığı için detaylı bir şekilde kar ve buzun özellikleri ve kar ve buzda ısı ve kütle geçişi anlatılacaktır.

Antik çağlardan beri toprağın altı yiyecek depolamak için sabit sıcaklık bölgesi olarak kullanılmaktadır. Yaz aylarında kullanılmak üzere kuyulara kar doldurulurdu. En eski termal enerji depolama yöntemlerinden biri de donmuş göl ve/veya nehirlerden buz almaktır. Bugün buz her türlü soğutma amacıyla kullanılmaktadır.

Enerji depolama sistemleri, enerjiyi bol ve ucuz olduğu zamanlarda depolayarak kıt ve pahalı olduğu zamanlarda kullanılmasını sağlayan sistemlerdir. Ayrıca bu sistemler, maksimum yüke göre değil, ortalama yüke göre dizayn edildikleri için ilk yatırım maliyetleri düşük olan sistemlerdir. Tüketilen enerjinin tasarım değerinden az olduğu zamanlarda artan enerji (kullanılmayan) depolanır ve tasarım değerinin üzerine çıkıldığında depolanan bu enerjiden yararlanılır. Bu ve diğer avantajları sıralayacak olursak;

Enerji depolama sistemlerinde,

- daha düşük enerji maliyetleri
- daha düşük enerji tüketimi
- daha konforlu koşulların sağlanabilmesi
- daha esnek işletme
- daha düşük ilk yatırım ve işletme maliyetleri

sözkonusudur.

Enerji depolama enerji tüketiminin optimize edilmesi için kullanılabilecek en önemli yöntemlerden biridir. Termal enerji depolama, enerji ihtiyacı ile enerji sağlayıcısı arasındaki dengesizliği ortadan kaldırmaktadır. Bu şekilde en efektif ve çevreci ısıtma veya soğutma sistemleri kurulabilmektedir.

İki tip termal enerji depolama sistemi mevcuttur;

- Duyulur ısı depolama
- Gizli ısı depolama

Maddenin sıcaklık değiştirmesine neden olan enerji transferi duyulur ısı geçişi olarak adlandırılır. Geçen enerji kütle, sıcaklık farkı ve özgül ısı ile doğru orantılıdır. Duyulur ısı depolama sistemleri su, hava, yağ, beton, kaya, tuğla, kum ve toprak gibi ortamların sıcaklığını arttırarak/azaltarak yapılan bir depolama işlemidir. Bir ortamın duyulur ısı depolama kapasitesi

yoğunluk x özgül ısı değerine bağlıdır. Su bu özellikleri iyi olan bir maddedir. Ancak, sıvı olması nedeniyle depolama detayları çözülmelidir. Tablo 1.1’de sıvı ile enerji depolamada kullanılan yöntemler özetlenmiştir. Duyulur ısı depolama ortamlarından istenen bir diğer özellik de iyi ısıl difüzyon kabiliyetidir. Ortam istenilen termal enerjiyi kısa sürede depolayabilmeli veya atabilmelidir.

Tablo 1.1: Duyulur ısı depolama sistemlerinde sıvı depoları [1]

Tip	Şematik Görünüm	Etkenlik	Açıklamalar
Sürekli çoklu tank tip		Orta	Yeraltına dönebilir. Montajı zor
Bentli tip		Orta Yüksek	Üretimi zor
Isıl katmanlaştırılmış tip		Yüksek	Yer yüzü geniş kapasiteli uygulamalarda en iyi
Hareket edebilen diyaframlı tip		Yüksek	Diyafram malzemesi sorun oluşturabilir. Uygulaması zor.
Çoklu tank		Yüksek	Isı kayıpları çok yüksek. Yer altı uygulamalarında kullanılabilir.

Tablo 1.2: Uygulamada kullanılan duyulur ısı depolama ortamları [1]

Kısa Dönem	Uzun Dönem
- Kayaçlar - Toprak - Su tankları	- Kayaçlar - Toprak - Büyük su tankları - Yeraltı su rezervleri - Havuz veya göller

Tablo 1.3: Bilinen bazı maddelerin 20 °C'deki ısı kapasiteleri [1]

Malzeme	Yoğunluk kg/m ³	Özgül Isı J/kgK	Isıl Kapasite 10 ⁶ J/m ³ K
Kil	1458	879	1,29
Tuğla	1800	837	1,51
Kaya	2200	712	1,57
Odun	700	2390	1,67
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	465	3,68
Toprak	2050	1840	3,77
Magnetit	5177	752	3,89
Su	988	4182	4,17

Maddenin faz değiştirerek bir halden diğer bir hale geçmesine neden olan enerji transferi ise gizli ısı geçişi olarak adlandırılır. Gizli ısı geçişi esnasında saf maddelerin sıcaklıkları değişmez. Ayrıca gizli ısı geçişinde transfer edilen enerji miktarı duyulur ısıya göre daha yüksektir. Bu da kurulan depolama sisteminin boyutlarının daha küçük olmasını sağlar. Depolama sistemlerinde kullanılan ve faz değiştiren akışkana faz değişim malzemesi (PCM- Phase change material) adı verilmektedir.

En eski faz değişim malzemesi uygulaması 1800'lü yılların sonunda arabalarda koltukları ısıtmak amacıyla İngilizler tarafından kullanılmıştır. Soğutma amaçlı ilk deneysel çalışma ise 1970'li yılların başında Delaware Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. 1970-1980 yılları arasında bir çok organizasyon güneş enerjisinin depolanması amacıyla faz değişimi materyalleri üretmiştir. 1982 yılında Transphase System tarafından ilk ötektik tuz depolama sistemi soğuk depolama amacıyla binalar için kullanılmıştır.

Faz değişim malzemelerinin seçiminde erime ya da donma, aşırı soğuma, çekirdek oluşumu, ısıl çevrim, kapsülleme ve seçilen sisteme uygunluk gibi bir çok kriterin dikkate alınması gerekir.

Yaygın olarak kullanılan faz değişim malzemeleri; su-buz, sulandırılmış tuzlar, polimerler, kafes yapılı karışımlar (clathrates), karbondioksit ve parafin vaks. Su-Buz en yaygın olarak bulunan ve termofiziksel özelliklerinin yanında bir çok özelliğiyle de tercih edilen önemli bir faz değişim malzemesidir. Tablo 1.4'te literatürde karşılaşılan bazı faz değişim malzemelerinin ısıl özellikleri verilmiştir

Tablo 1.4: Literatürde karşılaşılan bazı faz değişim malzemeleri

Malzeme	Erime Sıcaklığı* (°C)	Erime ısısı kJ/kg	Isıl İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m ³)
Inorganikler				
MgCl ₂ .6H ₂ O	117	168,6	0,570 sıvı 120 °C 0,694 katı 90 °C	1450 sıvı 120 °C 1569 katı 20 °C
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89	162,8	0,490 sıvı 95 °C 0,611 katı 37 °C	1550 sıvı 94 °C 1636 katı 25 °C
Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	78	265,7	0,653 sıvı 85,7 °C 1,255 katı 23 °C	1937 sıvı 84 °C 2070 katı 24 °C
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36	146,9	0,464 sıvı 39,9 °C -	1828 sıvı 36 °C 1937 katı 24 °C
CaBr ₂ .6H ₂ O	34	115,5	- -	1956 sıvı 35 °C 2194 katı 24 °C
CaCl ₂ .6H ₂ O	29	190,8	0,540 sıvı 38,7 °C 1,088 katı 23 °C	1562 sıvı 32 °C 1802 katı 24 °C
Organikler				
Parafin vaks	64	173,6	0,167 sıvı 63,5 °C 0,346 katı 33,6 °C	790 sıvı 65 °C 916 katı 24 °C
Poliglikol E400	8	99,6	0,187 sıvı 38,6 °C -	1125 sıvı 25 °C 1228 katı 3 °C
Poliglikol E600	22	127,2	0,189 sıvı 38,6 °C -	1126 sıvı 25 °C 1232 katı 4 °C
PoliglikolE6000	66	190	- -	1085 sıvı 70 °C 1212 katı 25 °C
Yağ Asitleri				
Stearic asit	69	202,5	- -	848 sıvı 70 °C 965 katı 24 °C
Palmitic asit	64	185,4	0,162 sıvı 68,4 °C -	850 sıvı 65 °C 989 katı 24 °C
Capric asit	32	152,7	0,153 sıvı 38,5 °C -	878 sıvı 45 °C 1004 katı 24 °C
Caprylic asit	16	148,5	0,149 sıvı 38,6 °C -	901 sıvı 30 °C 981 katı 13 °C
Aromatikler				
Biphenyl	71	119,2	- -	991 sıvı 73 °C 991 katı 73 °C
Naftalin	80	147,7	0,132 sıvı 83,8 °C 0,341 katı 49,9 °C	976 sıvı 84 °C 1145 katı 20 °C

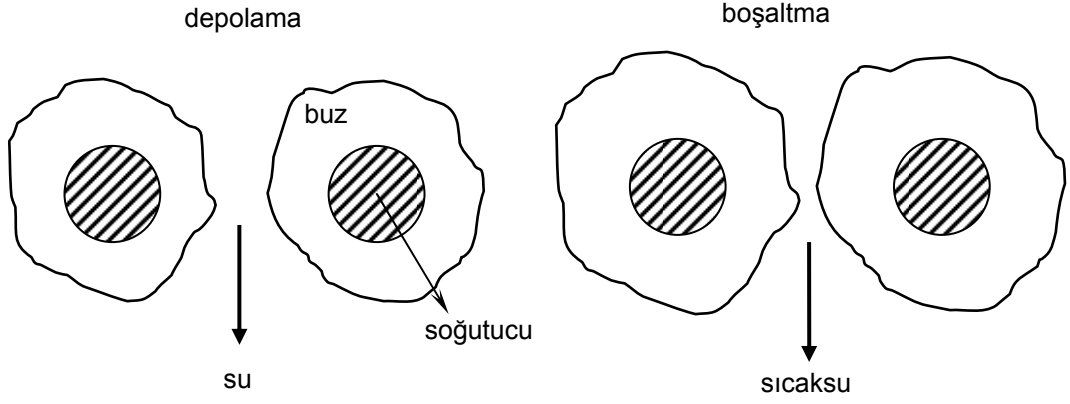
* 1 atm basınçta

Aşağıda mevcut gizli ısı termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan depolama metodları özetlenmektedir.

1.1 Dıştan eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama (external melt ice-on-coil storage)

Serpantin içerisinden soğutucu akışkan, dışından ise su geçirilir. Buz üretici olarak kullanılır. Soğutucu akışkana aktarılan ısıdan dolayı serpantin dış yüzeylerinde buz oluşturulur. Depolanan soğu enerjisinin geri alınması ise serpantin üzerinde yığılan buza sıcak dönüş suyu gönderilerek

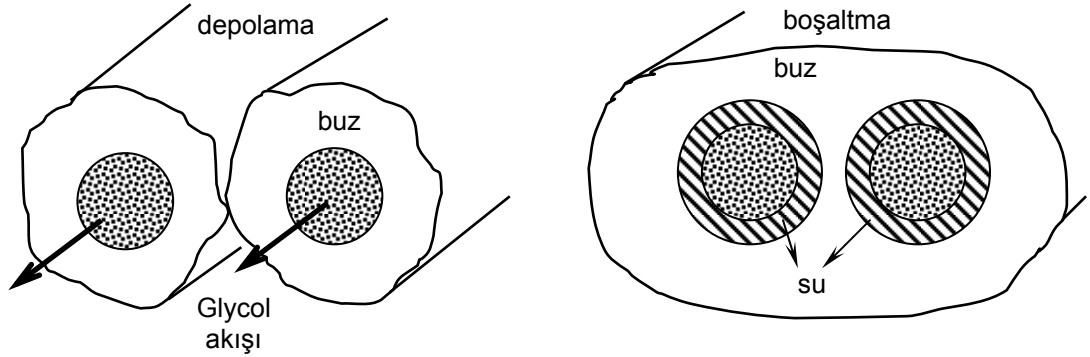
yapılır. Bu tarz depolamada 1- aşırı kompresör enerjisi ihtiyacını engellemek için buz kalınlığı, 2- oluşan buzun su akışını engellememesi için iki serpantin arasındaki kemerleşme kontrol edilmelidir.



Şekil 1.1: Dıştan eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama

1.2 İçten eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama (internal melt ice-on-coil storage)

Deponun %10'u serpantin, %80'i su ile kaplanmıştır. %10 genişleme için boşluk bırakılmıştır.



Şekil 1.2: İçten eritmeli, serpantin üzeri buzlu depolama

1.3 Kapsül içerisinde buz (encapsulated ice)

Plastik taşıyıcı, iyonlarından ayrılmış su ve buzlaştırma ajanı ile doldurularak kullanılır. Ticari sistemlerde 100 mm çaplı küre ve 35x300x760 mm dikdörtgenler prizması şeklinde taşıyıcılar kullanılmaktadır. Plastik taşıyıcılar esnek olmalıdır.

Depolama malzemesinden beklenenler; yaygın olarak bulunması, düşük fiyatlı olması, doğaya zararsız olması, yanıcı olmaması, patlayıcı olmaması, zehirli olmaması, yaygın HVAC materyalleri ile uyumlu olması,

aşındırıcı olmaması, inert olması, fiziksel özelliklerinin iyi dökümante edilmiş olması, yüksek yoğunlukta olması, yüksek özgül ısıya sahip olması (duyulur ısı depolama), yüksek faz değişim entalpisinin olması, iletkenliğinin yüksek olması, normal basınçta depolanabilmesi, uzun zamanlı kullanımda karakteristik özelliklerinin değişmemesi.

1.4 Kar ve Buzun Özellikleri

Termal enerji depolama sistemlerinde daha önce de belirtildiği gibi su-buz sistemi yoğun olarak kullanılmaktadır. Buzun elde edilmesi için iki farklı metot söz konusudur. Ya mevcut kar kullanılır ya da mekanik soğutma ile buz elde edilir. Her iki durum için de kar veya buzun özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

Bu kısımda, ısı depolama için kullanılacak olan, gerek mekanik ve gerekse ısı özellikleri diğer malzemelerden çok farklı, bulunduğu ortam koşullarına bağlı olarak iç yapısı sürekli olarak değişen kar ve buz tanıtılacaktır.

Kar, içerisinde hava, buz granülleri ve su bulunan bir karışımdır. Buz granüllerinin aralarında buz bağları oluşur. Granüller hakkında literatürde bir çok çalışma mevcuttur. Ancak aralarındaki bağlarla ilgili çalışma çok azdır. Bunun nedenleri ise 1- mikroskopta görülemeyecek kadar küçükler, 2- şekilleri tam olarak anlaşılamadığı için büyümelerinin fiziği bilinmemektedir.

Buz granülleri arasındaki bağların şekli, büyüklüğü ve sıklığı karın bir çok fiziksel özelliğini etkiler. Sinterleme bu bağların oluşumu prosesidir. Büyüklüğü, şekli ve sayıları (görülme sıklığı) ile ilgilenir.

Bağlar incelenirken ıslak kar ve kuru kar ayrı olarak ele alınmalıdır. Islak karda sıcaklığın yüksek olması nedeniyle değişiklikler daha hızlı gerçekleşir. Islak karda esas fark üçüncü fazın (suyun) var olması ve suyun granül ve bağlarda yeniden yapılanmalara neden olmasıdır. Kuru ve ıslak karın geometrileri ve bir çok nedenden dolayı fiziksel özellikleri belirgin bir şekilde farklıdır. Yüksek sıcaklık ve suyun mevcudiyetinden dolayı ıslak kar termodinamik olarak aktiftir. Makroskopik sıcaklık farklılıkları nedeniyle sadece kuru karda buhar akışı söz konusudur.

Su miktarına ve büyüme hızına göre iki farklı sınıflandırma daha yapılabilir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- Su miktarına göre: az miktarda su içeren ıslak kar, çok miktarda su içeren ıslak kar
- Büyüme hızına göre: büyüme hızı az olan kuru kar, büyüme hızı çok olan kuru kar

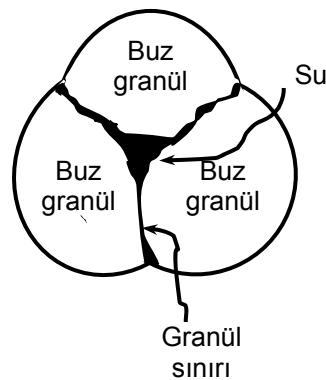
İçerisinde fazla su bulunan ıslak karda bağlar çok zayıftır ve suludur (slushy). Aksi durumda ise bağlar güçlüdür. Eğer buz granülleri hızlı büyüyorsa aradaki bağlar zayıf olur.

Islak Kar;

Islak kar, iki farklı temel doyma halinden birinde, göz ile görülebilir miktarda su içerir. Birincisi, az miktarda su mevcut, hava gözenekli bölgede sürekli olarak mevcut. Su granül kümeleri tarafından tutulur ve sıvı pendular rejimdedir (sarkaç gibi). İkincisi, fazla miktarda su mevcut, hava gözeneklerin arasında sıkışmış olarak izole kabarcık şeklindedir. Sıvı gözenekli bölgelerde sürekli haldedir. Yarı sıvı bir hal söz konusudur (slush). Su funicular (gergin bir ip gibi) rejimdedir.

Granül kümeleri;

Düşük miktarda sıvı içerilen durumda su, kümelerin birleşim yerlerinde, çatlaklarda ve damarlarda yer alır. Diğer gözeneklerde de hava mevcuttur. Kümenin temel birimi tam yuvarlak bir buz kristalidir. Bu tek kristallerin iki veya daha fazlası biraraya gelerek grup oluştururlar. Aralarındaki bağ buz-buz bağıdır. Kapileriden dolayı oluşmuş bir bağ değildir.



Şekil 1.3: Buz granüller ve arayüzeyleri

Az miktarda su içeren karda buz granüllerinin büyüme hızı, çok sulu kardan daha düşükken kümelerin büyüme hızı daha büyüktür.

Tamamen gelişmiş buz kümeleri, 24 saat içerisinde yarı sıvı kardan elde edilebilir. Bu durumda kümenin erime sıcaklığında olması nedeniyle sıvı boyunca geçiş mümkün olmaktadır. Kümeler granüller bir araya gelerek çoklu kristal bir yapı oluşturur. Kümelerin büyüme prosesi tek bir granülün büyüme prosesinden farklıdır. Komşu kümeler birbirlerine iyi bağlanmışlardır. Bu bağlar buz-buz bağlarıdır. Buz-buz bağları karın yeteri kadar kuvvetli olmasını sağlar. Kümelerin bu şekilde oluşmasının nedeni buhar/buz, buhar/su ve su/buz ara yüzeylerinin toplam yüzey enerjilerini küçültmesidir.

İyi bağlı bir diğer kar formu da kuru kar ile ıslak kar arasındaki geçiş formudur. Erime donma çevrimleri nedeniyle amorf çoklu kristal partiküller oluşur.

Yarı eriyik kar (slush);

Yüksek miktarda su içerir ve hava sürekli olarak değil, gözenekler arasında sıkışmış olarak mevcuttur. Bu hava kabarcıkları gözeneklerin büyük kısmını kapladığı için hacimsel olarak hava miktarı su miktarından fazladır. Fakat sadece sıvı fazı hareketlidir. Sıvı geçirgenliği sıvı içeriği miktarının artmasıyla artar ve slush bu nedenle suyu daha iyi iletir. Ek olarak, buz partikülleri su ile çevrili oldukları için slush içerisinde partiküller daha hızlı büyür. Slush içindeki granüllerin arasındaki bağ, kuru karda olduğu gibi, zayıftır. Ancak bu benzerliğin nedenleri farklıdır. Slushta bağlar stabil değildir. Stres uygulandığı zaman bağlar basınç altında erirler. Kümeler arasındaki bağlarda ise basınçlı erimeye karşı dayanım yüksektir.

Kuru kar;

Yuvarlak granüllerden oluşan ve bu granüller arasında bağlar bulunan, literatürde en çok çalışılan kardır.

Yuvarlak granüller: Kuru karda yuvarlak granüller, düşük sıcaklıkta ve/veya yüksek yoğunluklarda büyür. Küresel formdaki granüller arasındaki bağ oluşurken biri diğerine doğru boyun yapar. Granüllerden birinin formu değişirken diğeri aynı kalır.

Su buharı kar içerisinde sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket eder. Bu proses iki nedenden dolayı su difüzyonunu hızlandırır. 1- Buhar sadece porozlardan hareket eder. Bu şekilde akış yolu kısaltılır. 2- Porozlar boyunca sıcaklık farkı büyür. Çünkü suyun ısı iletkenliği havadan büyüktür [2].

1.4.1 Karın sınıflandırılması

S. Colbeck ve diğ. [3], yeryüzü üzerindeki karların sınıflandırmasını aşağıdaki gibi yapmışlardır.

Kar çok porozdur ve hava, su ve buzdan oluşan bir karışımdır. Buz kristal formdadır ve granül halinde bulunur. Bu granüller birbirine bağlanarak karın belirli bir mekanik dayanımda olmasını sağlarlar. Granüller bir araya gelerek bir yapı (texture) oluşturur. Bir kar kütlesinin fiziksel özellikleri yapıya, sıcaklığa ve içeriğinin oranlarına bağlıdır. Bu özellikler; yoğunluk, granül şekli, granül büyüklüğü, sıvı su miktarı, yabancı maddeler, dayanım (basma, çekme, kesme), sertlik ve sıcaklıktır.

Yoğunluk (ρ): Birim hacmin kütlesidir. Bilinen bir hacmin kütlesi tespit edilerek belirlenir. Bazen toplam yoğunluk ve kuru kar ya da buz yoğunluğu ayrı ayrı olarak ölçülür.

Granül şekli (F): Karın oluştuğu yere göre morfolojik olarak sınıflandırma yapılmış ve Ek F’de yer alan detaylı şekiller verilmiştir.

Genel görünüşe göre: katı, boşluklu, kırılmış, yıpranmış, kısmi erimiş, yuvarlak, açısız

Granül yüzeyine göre: yuvarlak yüzeyler, basamaklı, üzeri buzlu

Granül ara yüzeylerine göre: bağlı, bağısız, bağ büyüklüğü, kümelenmiş, bir granüle düşen bağ sayısı, yapı, kolon şeklinde

Granül büyüklüğü (E): Karın granül büyüklüğü karakteristik granüllerin büyüklüklerinin ortalamasıdır. Eğer fazla miktarda farklı granül tipleri veya büyüklükleri söz konusu ise farklı sınıflar tek tek karakterize edilebilir. Granülün boyu milimetrelerle ölçülür.

Tablo 1.5: Granül büyüklüğü

Tanım	Boyut (mm)
çok iyi	< 0,2
iyi	0,2 - 0,5
orta	0,5 – 1,0
kötü	1,0 – 2,0
Çok kötü	2,0 – 5,0
berbat	> 5,0

Su içeriği (θ): Sıvı miktarı hacimsel olarak ölçülür. Sıcak (erime) ve katı (donma) kalorimetre, seyreltme ve dielektrik ölçümleri yapılır.

Eğer su miktarı %3'den fazla olursa su hareket eder. Bu yüzde karın yapısına, granül boyutuna ve granül şekline bağlıdır. Su miktarı yer çekimine karşı yüzey kuvvetlerinin tutabildiği su miktarıdır.

Tablo 1.6: Karın su içeriği

Tarif	Tanım	Su miktarı	Şekil
Kuru	Genellikle sıcaklık 0 °C'den düşüktür. 0 °C'ye kadar her sıcaklıkta olabilir.	0 %	
Nemli	T = 0 °C. 10 kat büyütmede dahi su görülemez. Yavaş bir şekilde hasar verilince belirgin birbirine yapışma eğilimi vardır.	< 3 %	
Islak	T = 0 °C. 10 kat büyütme ile su görülebilir. Ancak sıkarak suyu çıkartmak mümkün değildir.	3 – 8 %	
Çok ıslak	T = 0 °C. Su el ile çok kuvvetli bir şekilde sıkılarak çıkarılabilir. Poroz bölgede hava mevcuttur.	8 – 15 %	
Slush	T = 0 °C. Kar su ile beraberdir. Suyun içinde yüzer. Çok az miktarda hava içerir.	>15 %	

Yabancı maddeler (J): Karın fiziksel özelliklerini etkiler. Bu nedenle yabancı maddelerin cinsi ve ağırlıkça oranı tam olarak belirtilmelidir. En çok karşılaşılan yabancı maddeler toz, kum, organik maddeler ve çözülebilir maddelerdir. Çok az miktarda yabancı madde karın fiziksel özelliklerini etkilemez.

Karın dayanımı (Σ): Dayanım gerilme türüne (basma, çekme, kayma), gerilme oranına, gerinme ve gerinme oranına bağlıdır. Ek olarak karın homojen olmaması nedeniyle örnek hacme (numuneye) de bağlıdır. Ölçümlerin anlamlı olabilmesi için tüm bu parametrelerin dikkate alınması gerekir.

Karın sertliği (R): Sertlik ölçümleri subjektiftir ve cihaza bağlı bir değerdir. Bu nedenle sertlik hangi cihazla ölçülmüşse belirtilmelidir. Yaygın olarak kullanılan Swiss Rommsonde (uç konik açısı 60 °, baz çapı 40 mm, ağırlığı 10 N/m, koç ağırlığı 10 N)

Tablo 1.7: Karın sertliği

Tanım	Swiss Romsonde (N)	Değer (Pa)	El testi	Sembol	Şekil
Çok az	0-20	$0-10^3$	El	R1	
Az	20-150	10^3-10^4	4 parmak	R2	/
Orta	150-500	10^4-10^5	1 parmak	R3	X
Yüksek	500-1000	10^5-10^6	Kalem	R4	//
Çok yüksek	>1000	$>10^6$	Bıçak ucu	R5	⊗
Buz				R6	—

Karın sıcaklığı (T): °C olarak verilmesi gerekir.

Tablo 1.8: Karın sıcaklığı

Sıcaklık	T (°C)
1,5 m yükseklikteki hava sıcaklığı	T_a
Kar yüzey sıcaklığı	T_s
Zemin sıcaklığı	T_g
H yüksekliğinde kar sıcaklığı (m)	
Zemin üstünde	$TH+0,5$
Yüzeyin altında	$TH-0,5$

Yüzey pürüzlülüğü: Karın granüler yapısından kaynaklanan pürüzlülük değil, yüzeydeki rüzgar, yağmur, buharlaşma ya da erimeden kaynaklanan pürüzlülüktür. Düzensizliklerin ortalama derinliği sembollerle ifade edilir ve milimetre olarak ölçülür [3].

Tablo 1.9: Yüzey pürüzlülüğü

Tanım	Simge	Şekil
Düz	S_a	—
Dalgalı	S_b	~~~~~
Konkav oyuk	S_c	~~~~~
Konveks oyuk	S_d	~~~~~
Rastgele oyuk	S_e	~~~~~

Magono ve Lee [4] tarafından da bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma Ek G’de verilmiştir. Ayrıca uluslararası bir sınıflandırma da kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmaya ait tablo Ek H’de verilmiştir.

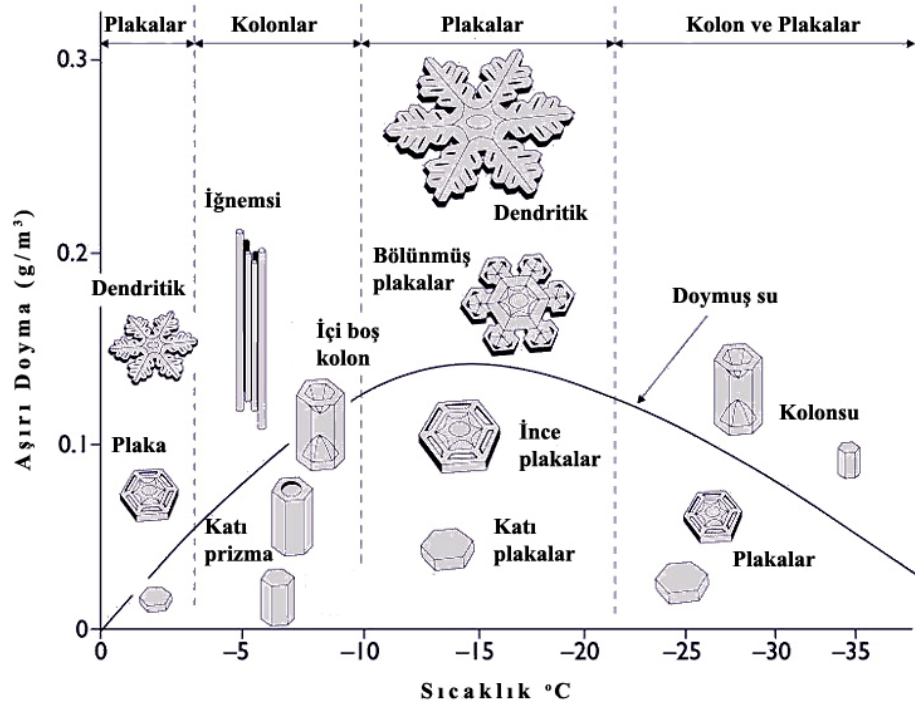
1.4.2 Kar ve Buz Kristalleri

Kar içerisindeki buz kristalleri havadaki su buharının doğrudan katı faza geçmesi ile oluşur. Proses çekirdeklenme ile başlar. Su molekülleri bu çekirdeğe tutunarak kristali oluşturur. Havanın nemi %100'ü geçtiği zaman (aşırı doymuş hava) su molekülleri toz çekirdekleri üzerinde donar ve sonuçta kar veya buz kristali oluşur (Şekil 1.7).

Kar kristali (Şekil 1.5) içerisindeki gerçek buz, bir buz kalıbı içerisindeki buzdan moleküler seviyede farklı değildir. Buzun temel moleküler yapısı ilk 1935 yılında Linus Pouling tarafından belirlenmiştir.

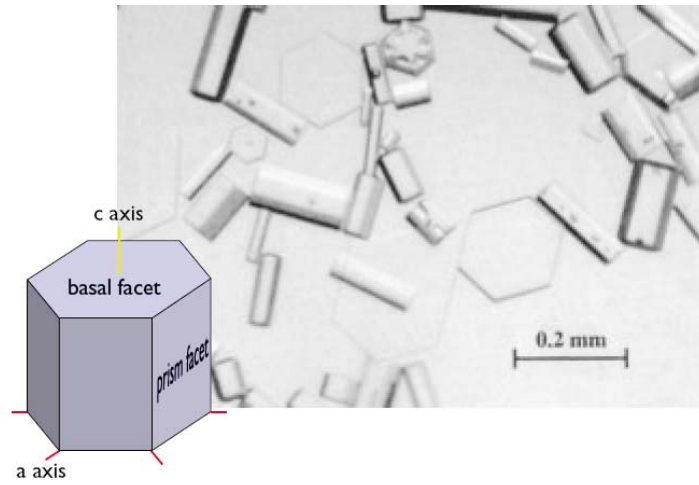
Buz kristalinin altıgen prizma şeklindeki kristal yapısı gökyüzünden düşen kar kristalinin simetrik altı kollu olmasının sebebidir.

Kar kristallerinin şekilleri üzerine ilk çalışma Japon araştırmacı Nakaya [5] tarafından yapılmıştır. 1930'larda Nakaya kar kristallerinin bulunduğu ortamdan etkilendiğini tespit etmiştir. Sıcaklık ve havanın aşırı doyma miktarına (super saturation) bağlı olarak kar kristallerinin yapısı değişmektedir.



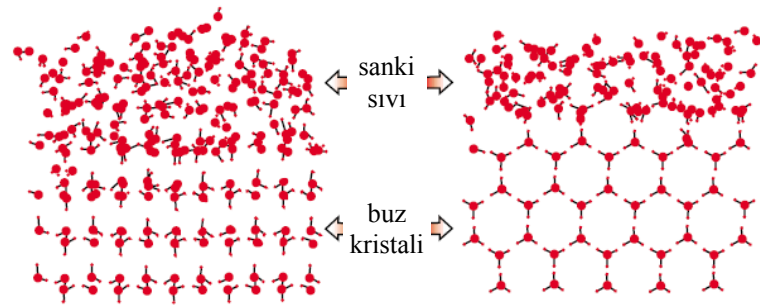
Çalışmalarının neticesinde bugün hala geçerli olan bir morfoloji diyagramı çıkarmıştır (Şekil 1.4). Bu diyagrama göre doğada -2 °C civarında levha şeklinde, -5 °C'de kolon şeklinde, -15 °C'de tekrar levha şeklinde ve

-25 °C'nin üzerinde levha ve kolon şeklinde kristaller görülmektedir. Nem yüksek olduğu zaman kolonsu yapı hızla büyüyerek ince uzun ve birbirine yapışık kristaller haline gelirken, levha şeklindeki yapı dallanarak (dendritik) büyür. Bir kaç derece değişiklik ile ince uzun yapı dar levha yapı haline dönüşür (-5 °C, -15 °C). Bu hızlı morfolojik değişim sadece buzda gözlemlenmektedir. Morfoloji diyagramındaki bu durum iki faktörle açıklanabilir. Birincisi kristal büyüme oranı, ikincisi ise difüzyon. Altıgen prizmanın (Şekil 1.5) yanıl yüzeyleri alt ve üst yüzeylerden daha yavaş büyüdüğü zaman kolonsu yapı, daha hızlı büyüdüğü zaman levhasal yapı gözlemlenir. Bu olay sıcaklıktan fazlasıyla etkilenir.



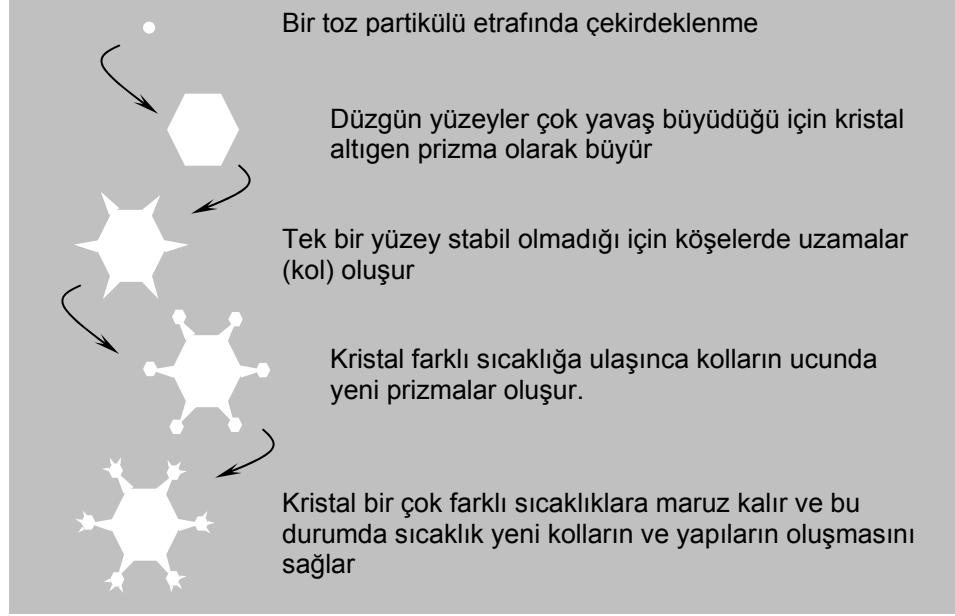
Şekil 1.5: Temel buz kristalinin altıgen prizma şekli [6]

Sıcaklık ve aşırı doyma kar kristallerinin yapısı üzerinde etkilidir. Bunun yanında yapılan çalışmalarda kristalleşme ortamındaki gazın da etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kar kristali yüzeyindeki yüzeysel erime ve oluşan sanki-sıvı bölge de büyüme hızını etkiler (Şekil 1.6). Çok düşük sıcaklıklarda buz kristallerinin yüzeyleri çok pürüzsüz olduğu için yeni moleküllerin tutunması çok zor olur ve büyüme hızı düşer. Aksi durumda pürüzlü yüzey nedeniyle büyüme hızı artar.



Şekil 1.6: Kar kristallerinin üzerindeki sanki sıvı bölge [6]

Kristalin şeklini etkileyen bir diğer faktör de suyun kristal içerisine difüzyonudur. Nemli hava içerisindeki su buharı kar kristali üzerine difüze olur. Kristalin köşeleri daha dışarda olduğu için su molekülleri buraya daha kolay tutunur. Bu şekilde kollar hızlı bir şekilde büyür.



Şekil 1.7: Kar kristalinin oluşumu



Şekil 1.8: Kar kristali örneği 1 [7]



Şekil 1.9: Kar kristali örneği 2 [7]



Şekil 1.10: Kar kristali örneği 3 [7]

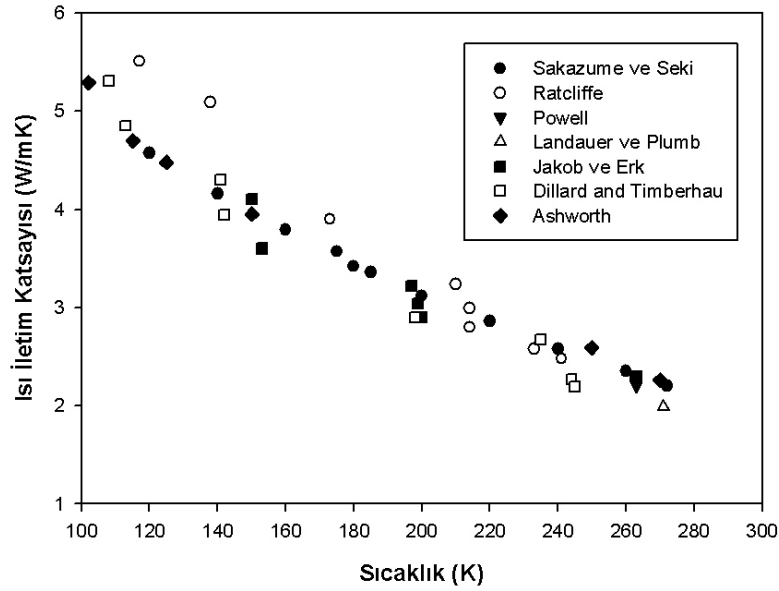
1.4.3 Kar ve Buzun Termofiziksel Özellikleri

1.4.3.1 Buzun ısı iletkenliği

Araştırmacıların kullandıkları yöntemlere ve testleri yaptıkları şartlara bağlı olarak çok farklı ısı iletim katsayısı literatürde verilmiştir. Ölçülen ısı iletim katsayılarının farklı olmasına neden olan bu etkenler şu şekilde sıralanabilir;

- numune hazırlama
- numunenin saflığı
- ölçüm metodu

Literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarını gösterir grafik aşağıda verilmiştir.



Şekil 1.11: Buzun ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi [8]

Sakazume ve Seki [8] tarafından verilen ve Şekil 1.11’de de gösterilen ısı iletim dataları aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

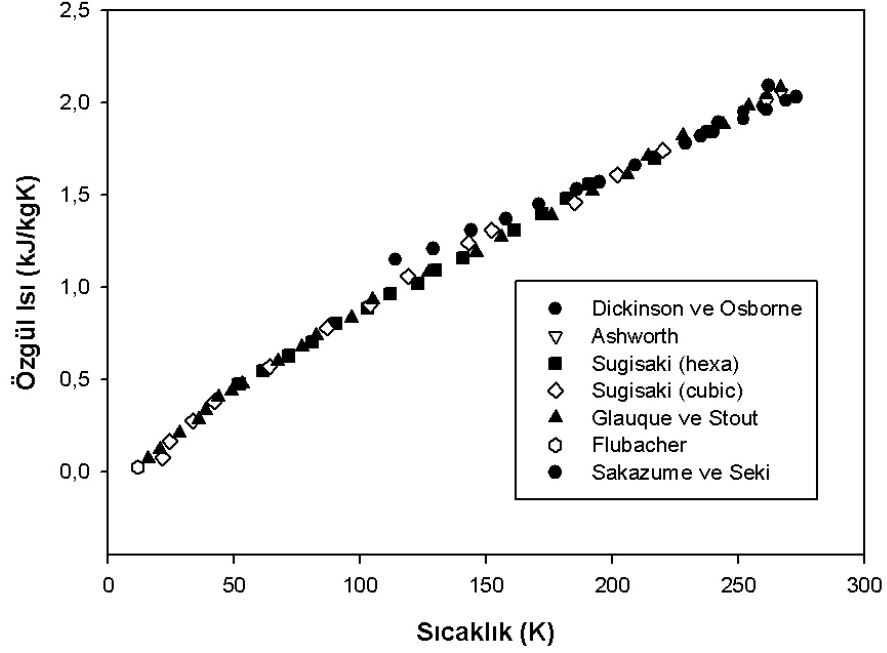
$$k_i = 1,16 \cdot (1,91 - 8,88 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,97 \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \quad (1.1)$$

k ısı iletim katsayısı (W/mK)

T sıcaklık (°C)

1.4.3.2 Buzun Özgöl Isısı

Literatürde yer alan çalışmalar Fukusako [8] tarafından derlenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 1.12: Buzun özgül ısısının sıcaklıkla değişimi [8]

Şekil 1.12'de verilen özgül ısı dataları aşağıdaki ifade ile temsil edilebilir.

$$c_{pi} = 0,185 + 0,689 \cdot 10^{-2} \cdot T \quad (1.2)$$

c_p buzun özgül ısısı (kJ/kgK)

T sıcaklık (273 K $\geq T \geq$ 90 K)

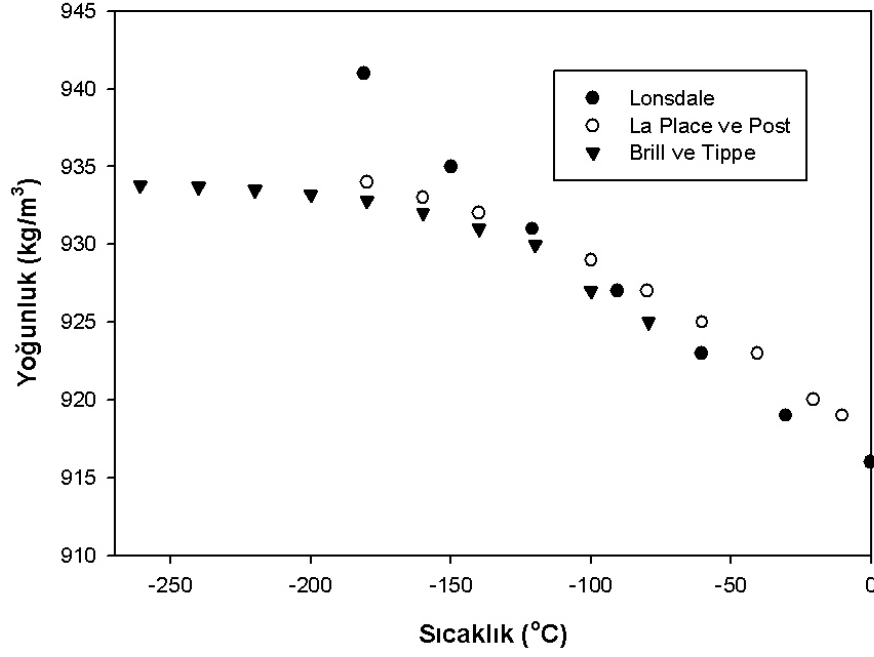
1.4.3.3 Buzun Yoğunluğu

Fukusako [8] tarafından derlenen buzun yoğunluğunun sıcaklıkla değişimini gösteren sonuçlar Şekil 1.13'te verilmiştir. Şekilde yer alan, Brill ve Tippe [8] tarafından verilen datalar aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \rho_i &= 917 \cdot (1 - 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot T) & 0^\circ\text{C} \geq T \geq -140^\circ\text{C} \\ \rho_i &= 930 \cdot (1 - 1,54 \cdot 10^{-5} \cdot T) & -140^\circ\text{C} \geq T \geq -260^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ρ buzun yoğunluğu (kg/m³)

T sıcaklık (°C)



Şekil 1.13: Buzun yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi [8]

1.4.3.4 Buzun Gizli Isısı

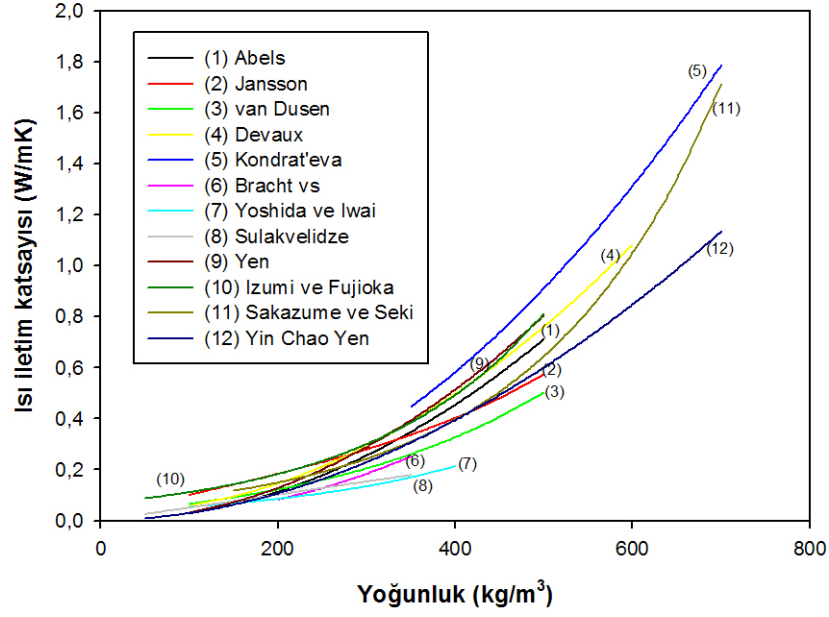
Buzun gizli ısısı literatürde yapılan çalışmalarda birbirine çok yakın olarak tespit edilebilmiştir. Fukusako [8] tarafından derlenen çalışmada 333,9 kJ/kg, 333,6 kJ/kg ve 333,5 kJ/kg gibi değerlere yer verilmiştir.

1.4.3.5 Karın ısı iletkenliği

Limitli yoğunluk aralığı için literatürde yer alan ısı iletim katsayıları Fukusako [8] tarafından yoğunluğa bağlı olarak verilmiştir. Şekil 1.14'te farklı araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalar sonucunda elde edilen, ısı iletim katsayısının yoğunlukla değişimini gösteren eğriler tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.

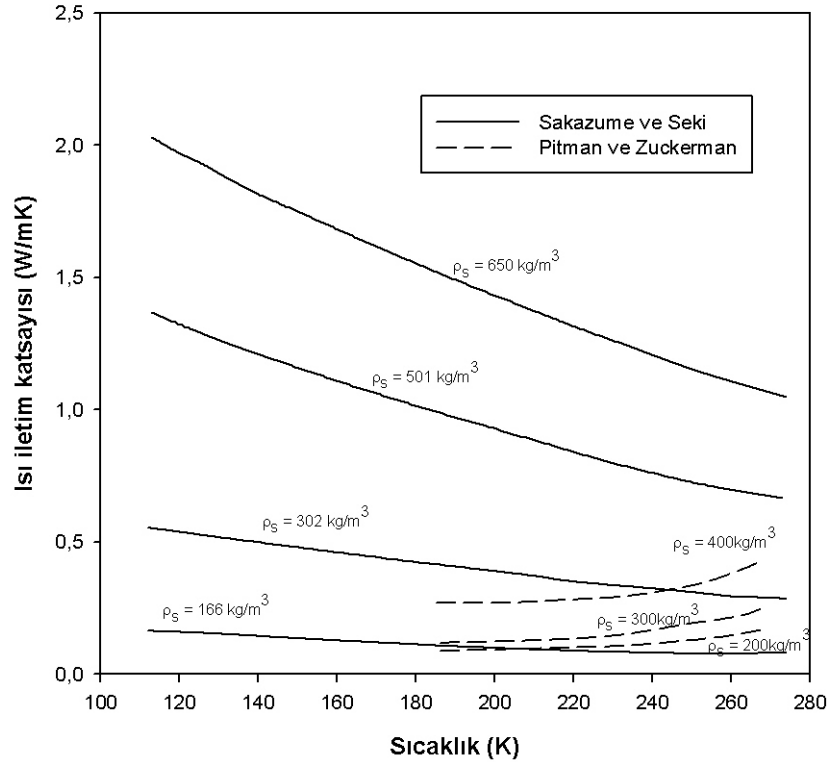
Karın ısı iletim katsayısında görülen bu farklılıkların nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

- yaşlanma (karın bekleme süresi)
- granül büyüklüğü
- kütle geçişi (nem geçişi)
- ölçüm yöntemleri



Şekil 1.14: Karın ısı iletim katsayısının yoğunlukla değişimi [8], [9]

Karın ısı iletim katsayısı sıcaklıkla da değişim gösterir. Şekil 1.15'te bu değişim gösterilmektedir.



Şekil 1.15: Karın ısı iletim katsayısının sıcaklık ve yoğunlukla değişimi [8]

Isı iletim katsayısı yukarıda verilen grafiklerde de görüldüğü gibi çok değişkendir. Yapılan tüm çalışmalarda karın ısı iletim katsayısının yoğunlukla değişimi için maksimum yoğunluk seviyesi olarak 700 kg/m^3

alınmıştır. Bazı durumlarda daha yüksek yoğunlukta ısı iletim katsayısına ihtiyaç olabilir. Bu durumda Y. C. Yen [9] tarafından yapılan çalışmada, Schwerdtfeger'in Maxwell'in heterojen ortamların elektrik iletkenliği ile ilgili yaptığı çalışmadan yararlanarak elde ettiği teorik ifade verilmiştir. Bu ifadeye göre ısı iletim katsayısı karın gözenekliliğine bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$k_{ia} = \frac{2k_i + k_a - 2\eta(k_i - k_a)}{2k_i + k_a - \eta(k_i - k_a)} k_i \quad (1.4)$$

$$\eta = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_i} \quad (1.5)$$

η karın gözenekliliği

k_i buzun ısı iletim katsayısı

k_a havanın ısı iletim katsayısı

k_{ia} içerisinde hava boşlukları bulunan buzun ısı iletim katsayısı

ρ_i buzun yoğunluğu

ρ_s karın yoğunluğu

$k_a \ll k_i$ olduğu için yoğun kar için yukarıda verilen eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$k_{ia} = \frac{2\rho_s}{3\rho_i - \rho_s} k_i \quad (1.6)$$

1.4.3.6 Karın özgül ısısı

Kar içerisinde hava boşlukları bulunan buz zerreciklerinin bir araya gelerek oluşturduğu gözenekli bir yapıdır. Bir kilogramının sıcaklığını bir derece arttırmak için verilmesi gereken ısı miktarı buz ile aynıdır.

1.5 Kar içerisinde ısı ve kütle geçişi

Kar farklı fazları bir arada bulundurur. Ayrı bir su buharı fazı düşünüldüğünde farklı buhar basınçları nedeniyle düşey doğrultuda kütle geçişi olacaktır. Buhar fazında buz molekülleri buz matrisi içerisine girdiği zaman faz değişimleri oluşması nedeniyle belirgin miktarda ısı geçişi

sözkonusu olur. Kar içerisinde giren buharlar aynı zamanda karın kristal yapısını ve büyüklüğünü değiştirir.

Mevcut kar üzerine yağmur yağınca kar hala faz değişim sıcaklığının altında ise yağmur suyunun donması esnasında büyük miktarda enerji açığa çıkar. Eğer yağmur faz değişim sıcaklığından daha sıcaksa bu durumda bir miktar enerji yağmur suyunun donma sıcaklığına gelmesi için harcanır.

Kar ile kaplı yüzeylerde radyasyon en önemli ısı transfer mekanizmasıdır. Genelde iki tip radyasyonla ısı geçişi sözkonusudur. Kısa dalga ve uzun dalga radyasyonla ısı geçişi şeklinde ikiye ayrılabilir. Açık gecelerde kar yüzeyi uzundalga ışınlama ile daha fazla enerji kaybeder. Eğer güneşli bir hava sözkonusu ise kar yüzeyi kısa dalga ışıma ile enerji kazanır. Kısa dalga ışınlar derinlere nüfuz eder. Penetrasyon kar yoğunluğuna, kar içerisindeki yabancı maddelere ve granül şekline bağlıdır. Aynı zamanda dalga boyuna da bağlıdır. Kısa dalga boylu ışın daha derinlere nüfuz edebilir.

Radyasyonun yanında nem ve ısı akıları da enerji dengesi açısından önemlidir. Nem geçişi sadece enerji ile ilgili bir olgu değil aynı zamanda kütle giriş çıkışını da etkileyen bir olgudur.

Kar tabakası oluşuktan sonra kristallerin şekilleri ve boyutları değişmeye başlar. İlk proses olarak her bir kar kristali ya da tanesi yanındaki diğer bir kristal ile bağ kurar. Bu proses kristallerin daha küçük yuvarlak granüllere dönüşmesi süresince devam eder (decomposing metamorphism). Bu yapısal değişim kar tabakası içerisinde zayıf sıcaklık gradyanlarının olduğu durumda daha baskındır. Eğer büyük sıcaklık gradyanları yoksa su buharı sadece yüzeydeki lokal enerji farklılıkları ile oluşur ve bunun sonucu olarak dallantılı (dendritic) kristallerin kenarları yok olur, yuvarlak granüller oluşur ve bağlar gelişerek büyür. Aynı zamanda granüller arasındaki bağlar zamanla büyürler ve kar giderek yoğunlaşır.

Eğer kar tabakası içerisindeki sıcaklık farklılıkları (gradyeni) büyükse düz yüzeyli kristaller oluşur. Yani yeni kristaller oluşur. Bu yeniden kristalleşme kar matrisi içerisinde olan yoğun buhar akısı nedeniyle gözlenir. Sıcaklık gradyanı nedeniyle mevcut kar granüllerinin en üst bölgesinde yüksek buhar basıncında buhar oluşur. Yukarıya doğru difüze olur ve yine faz değişimine maruz kalır.

Makroskopik buhar akıları aynı zamanda ısı geçişine de neden olur. Çünkü buhar oluşma esnasında enerji tüketilirken, yeniden kristalleşme esnasında enerji açığa çıkar. Karın ısı iletkenliği iç yapısına bağlıdır. Küçük porozların ve granüllerin yer aldığı karda buhar akışı kolay olmaz ve bu nedenle daha az ısı transferi olur. Aynı yoğunlukta porozite ve granüllerin büyük olduğu karda buhar daha rahat ilerleyebildiği için daha fazla ısı transfer edilebilir. Bu nedenle makroskopik ısı iletimi karın yoğunluğunun bir fonksiyonu değildir.

Faz değişim prosesleri kar tabakasının gelişimini etkiler. Yeterli miktarda enerji olduğu zaman kar erir ve su oluşur. Aynı zamanda yağmurdan da ek su gelebilir. Bu suyun belirli bir miktarı kar içerisinde tutulur. Kalanı ise yer çekiminin etkisiyle aşağıya doğru hareket eder. Bu akış toprak içerisindeki akışa benzer bir akıştır. Ne kadar miktarda suyun kar tabakası içerisinde tutulabileceğinin ve suyun akma hızının tahmin edilmesi çok zordur. Çünkü su hızlı bir şekilde matrisi değiştirir. İlk olarak kar granülleri büyük yuvarlak granüllere dönüşür ve kümeler oluşturur. İkincil olarak suyun hızla hareket ettiği yollar oluşur.

Kar, hava ve suyun karışımıdır. Eşdeğer sıcaklıkta olduğu için su hızlı bir şekilde faz değiştirir. Kar içerisinde su her zaman iki halde yer alır. Katı (buz) ve buhar halindedir. Bazı durumlarda sıvı olarak da bulunabilir. Doğal karda su ve havanın yanında bir çok farklı madde de mevcuttur. Organik maddeler ve inorganik tuzlar kar içerisinde yer alır. Yüksek yüzey alanı nedeniyle kar iyi bir kimyasal reaktördür. Bir çok fazdan oluşan kar farklı şekillerde tarif edilebilir. Genelde kar homojen bir materyal olarak düşünülür. Bu durumda ortalama yoğunluk, efektif ısı iletkenliği, viskozite ve elastisite kabulü yapılır. Karın mikro yapısı ihmal edilir (farklı fazlar dikkate alınmaz). Basit homojen kar yaklaşımına göre karın diğer özellikleri ortalama yoğunluğun fonksiyonu olarak belirlenir. Fakat efektif ısı iletim katsayısının aynı yoğunluktaki (ortalama) farklı karlarda on kata kadar farklı değerler aldığı daha önceki yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. İkinci yaklaşım ise karın bir karışım olarak ele alınmasıdır. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri karışım için yazılır. Karışım teorisi karın mikro yapısını dikkate almaktadır. Bu durumda ortalama özellikler karın mikro yapısının bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Snowpack modeli [10] bu yaklaşımı kullanmaktadır. Kar üç bileşenden oluşan bir karışım olarak ele alınır.

$$\underbrace{\theta_i}_{\text{Buzun hacimsel Oranı}} + \underbrace{\theta_a}_{\text{Havanın hacimsel Oranı}} + \underbrace{\theta_w}_{\text{Suyun hacimsel Oranı}} = 1 \quad (1.7)$$

$$\rho = \theta_i \rho_i + \theta_a \rho_a + \theta_w \rho_w \quad (1.8)$$

Kar tanımını daha geliştirmek için mikro yapıyı da değişken olarak ele almak gerekir. Kar özellikleri mikro yapıyı gösteren değişkenlerle ifade edilir. Bunlar granül büyüklüğü, bağ büyüklüğü, dallantılılık (dendritiklik) ve küresellik'tir. Bu bağımsız parametrelerin kendilerine ait, çevre koşulları altında değişimlerini gösteren eşitlikler mevcuttur.

1.5.1 Kar içerisinde enerji ve kütle geçişi

Enerji ve kütle geçişi, buz ve poroz yapı içerisinde ısı iletimini, buhar geçişini, kısa dalga ışıınımını (iç kısımlara nüfuz eder), su geçişini ve faz değişimini kapsamaktadır. Faz değişimi su-buz, buz-buhar ve su-buhar arasında olmaktadır.

1.5.1.1 Isı iletimi

Enerjinin korunumu kanunu kar tabakasına uygulandığında karın sıcaklığındaki değişime neden olan enerji ile giren veya çıkan enerji miktarı eşit olacaktır. En basit şekliyle (su buharı geçişinin efektif ısı iletimine veya faz değişim kaynak veya çukuruna giydirildiği durum)

$$\rho_s c_p \frac{\partial T}{\partial t} + k_e \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = Q_{sw} + Q_{pc} \quad (1.9)$$

ρ_s yığın (bulk) yoğunluk

c_p yığın (bulk) ısı kapasite (sabit basınçta)

T bulk kar sıcaklığı

z yüzeye dik koordinat

Q_{sw} kısa dalga radyasyon

Q_{pc} faz değişim enerjisi ve su buharı geçişini içeren enerji terimi

Şu anda literatürde kullanılan üç ayrı kar modelinde de bu denklem kullanılmaktadır. Crocus [11], Sntherm [12] ve Snowpack [10].

1.5.1.2 Su buharı geçişi

Su buharı belirgin miktarda ısıyı faz değişimi ile buz yüzeyine transfer eder ve karın metamorfik yapısını değiştirir. Fick kanununa göre poroz ortama su buharının difüzyonu aşağıdaki denklemle ifade edilir [10].

$$\theta_a \frac{\partial \rho_v}{\partial t} - \frac{\theta_a D_v}{\tau} \frac{\partial^2 \rho_v}{\partial z^2} = \frac{Q_{pc}^{s/v}}{L^{s/v}} \quad (1.10)$$

ρ_v	su buharı yoğunluğu (kg/m ³)
D_v	su buharının difüzivitesi. Sıcaklık ve basıncın etkisi çok azdır (2.2.10 ⁻⁵ m ² /s)
τ	Tortusity. 2 civarındadır.
L, Q_{pc}	faz değişimi ve gizli ısı geçişi boyunca kaynak terimleri
s/v	sublimasyon veya buharlaşma
L^s	2.83.10 ⁶ J/kg
L^v	2.5.10 ⁶ J/kg
θ_a	havanın hacimsel oranı

1.5.1.3 Kar birikmesi

Kar tabakası üzerindeki diğer bir kütle geçişi de karın yüzeyde birikmesidir. Taze kar ilk etapta hızlı bir şekilde birikir ve sonra yavaşlar.

Kar viskoelastik bir materyaldir. Yük altında geri dönüşsüz büyük deformasyonlar sözkonusu olabilmektedir. Tek boyut için reolojik Maxwell kanunu viskos strain oranı (dε_v/dt) η_s viskozitesindeki bir kar için σ_s gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{d\epsilon_v}{dt} = \frac{-\sigma_s}{\eta_s} \quad (1.11)$$

Bu kanun elastik deformasyonların az olduğu durumda geçerlidir. Dolayısıyla sadece kendi ağırlığının sözkonusu olduğu durumlarda uygulanabilir. Karın viskozitesi bir kaç kat mertebede yoğunluktan etkilenir. Viskozite mikroyapıya çok bağlı olduğu için belirlenmesi çok zordur. Bunu formüle etmek için karın iç yapısını da dikkate alan bir çalışma Lehning [10] tarafından yapılmıştır. Fakat daha fazla çalışma yapmak gerekmektedir.

1.5.2 Karın İç Yapısı

Kuru karın iç yapısındaki değişimin esas nedeni su buharı akısından kaynaklanan faz değişimidir. İç yapının değişimi karın yüzeye düşmesinden hemen sonra başlar. Dallantılı (dendritic) kristaller yüksek yüzey enerjisine sahiptirler. Köşelerde buhar oluşur ve kristalik yapıdaki boşluklarda toplanır. Bu şekilde granüller ve bağlar oluşur. Bundan sonraki değişimler

sıcaklığa bağlıdır. İki tip metamorfizm tanımı vardır. Kinetik metamorfizm, eşdeğer metamorfizm.

Eşdeğer metamorfizm:

Denge halindeki iç yapı değişimi global buhar akısı olmadığı durumda ortaya çıkar.

Kinetik metamorfizm:

Makroskopik sıcaklık gradyenleri buhar basıncı farklılıklarına neden olduğu zaman gerçekleşir. Granül büyüklüğündeki mesafelerde sıcaklık farklılıkları oluşunca ortaya çıkar. Eğer poroz yapı yeterli ise su buharı hareket etmeye başlar. Sonuç olarak küçük granüller yok olmaya başlarken diğer bölgelerde buhar depolanır ve geniş düz yüzeyli kristaller oluşur. Bu yapı değişimi aynı zamanda karın yeniden kristalleşmesi olarak da bilinir. Büyüme hızının fazla olması nedeniyle kristaller 6 köşeli bir hal alır. Sıcaklıklara bağlı olarak prizmatik, levha şekilli yada kupa şeklinde formlar oluşur. Eğer yeterli poroz alan varsa bu yapısal değişikliğin sonunda, yüksek sıcaklık gradyenleri altında kupa şeklinde kristaller oluşur. Bu yapı “depth hoar” olarak adlandırılır.

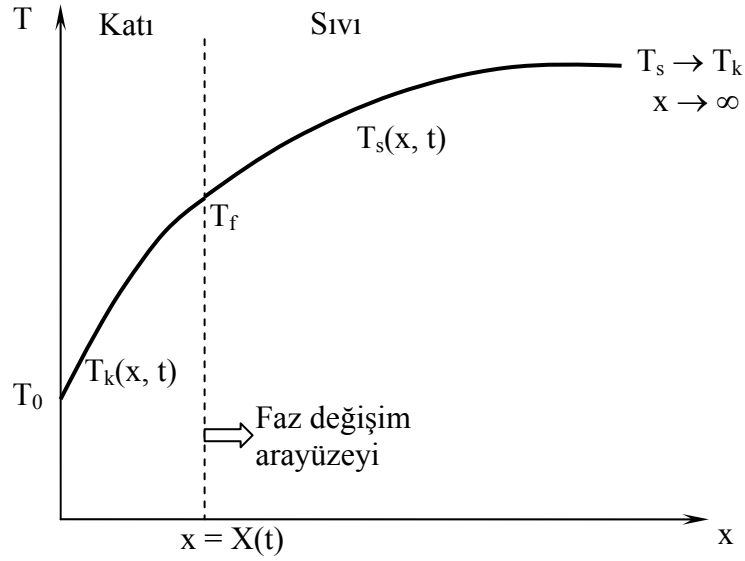
Modellemeler ampirik veya yarı ampirik olarak yapılmıştır. SNOWPACK’de ise granül büyümesi, bağ büyümesi ve küreselliğin değişimini veren eşitlikler vardır [13].

1.6 Saf Malzemelerde Erime Ve Donma

Saf malzemeler tek bir sıcaklıkta faz değiştirirler. Su saf malzemelere verilebilecek güzel bir örnektir. Aşağıda akışın söz konusu olmadığı, tek boyutlu, kartezyen koordinatlardaki problemlere ait genel denklemler verilmiştir.

1.6.1 Tek boyutlu donma problemi

İlk sıcaklığı donma sıcaklığından yüksek ($T_i > T_f$) bir sıvı kütlesi ele alalım. Sonsuz uzunlukta ($x \rightarrow \infty$) bu sıvının $x = 0$ ’daki yine sonsuz büyüklükteki yüzeyi $t = 0$ anında sıcaklığı füzyon sıcaklığından (T_f) daha düşük bir sıcaklığa (T_0) maruz bırakılırsa sıvı yüzeyden donmaya başlayacak ve ara yüzeyin pozisyonu $x = X(t)$ zamanla ilerleyecektir.



Şekil 1.16: Saf maddelerde tek boyutlu donma

Buradaki ısı geçişinin sadece iletimle olduğu düşünülürse;

Sıvı Bölgede;

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} \quad X(t) < x < \infty \text{ ve } t > 0 \quad (1.12)$$

$$T_s(x, t) = T_i \quad x > 0 \text{ ve } t = 0 \quad (1.13)$$

$$T_s(x \rightarrow \infty, t) \rightarrow T_i \quad t > 0 \quad (1.14)$$

α_s sıvının ısı difüzyon katsayısı

Katı Bölgede;

$$\frac{\partial T_k(x, t)}{\partial t} = \alpha_k \frac{\partial^2 T_k(x, t)}{\partial x^2} \quad 0 < x < X(t) \text{ ve } t > 0 \quad (1.15)$$

$$T_k(0, t) = T_0 \quad t > 0 \quad (1.16)$$

α_k katının ısı difüzyon katsayısı

Diğer sınır koşulları olan arayüzeyde sıcaklık eşitliği ve ısı denge ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır;

$$T_s[X(t)] = T_k[X(t)] = T_f \quad t > 0 \quad (1.17)$$

$$k_k \left(\frac{\partial T_k}{\partial x} \right)_{[X(t)]} - k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho h_{ks} \frac{dX(t)}{dt} \quad t > 0 \quad (1.18)$$

Bu durumda problemin analitik çözümü literatürde şu şekilde verilmiştir [14];

Sıvı bölgede sıcaklık dağılımı,

$$T_s(x,t) = T_i - (T_i - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\lambda \sqrt{\frac{\alpha_k}{\alpha_s}}\right)} \quad (1.19)$$

Katı bölgede sıcaklık dağılımı,

$$T_k(x,t) = T_0 - (T_f - T_0) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_k t}}\right)}{\operatorname{erfc}(\lambda)} \quad (1.20)$$

λ aşağıdaki eşitlikten çekilir. Sayısal olarak tespit edilebilir.

$$\frac{e^{\lambda^2}}{\operatorname{erf}(\lambda)} - \frac{k_s}{k_k} \sqrt{\frac{\alpha_k}{\alpha_s}} \frac{T_i - T_f}{T_f - T_0} \frac{e^{(\alpha_k \alpha_s) \lambda^2}}{\operatorname{erfc}\left(\lambda \sqrt{\frac{\alpha_k}{\alpha_s}}\right)} = \frac{\lambda \sqrt{\pi}}{\operatorname{Ste}_k} \quad (1.21)$$

Katı bölgede Stefan sayısı,

$$\operatorname{Ste}_k = \frac{c_k (T_f - T_0)}{h_{ks}} \quad (1.22)$$

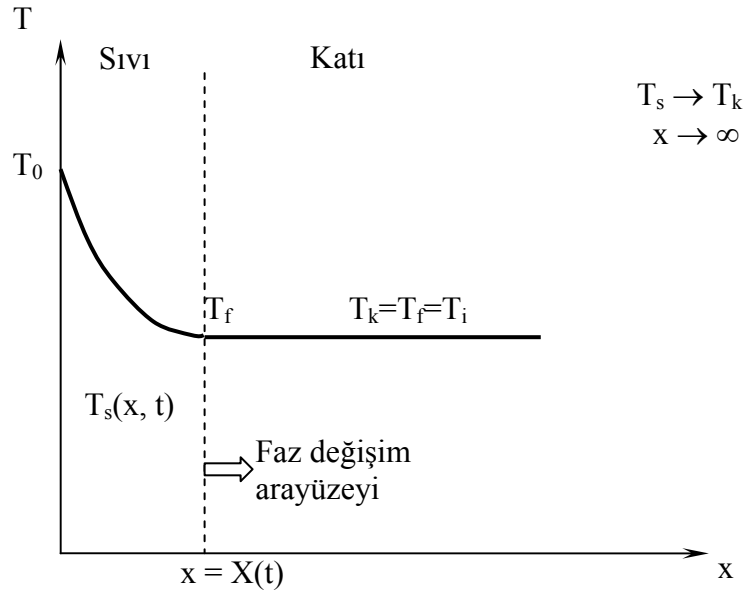
c_k katı bölgenin özgül ısısı

Arayüzeyin zamana bağlı pozisyonu,

$$X(t) = 2\lambda (\alpha_k t)^{1/2} \quad (1.23)$$

1.6.2 Tek boyutlu erime problemi

İlk sıcaklığı erime sıcaklığında olan yarı sonsuz katı bir kütle ele alalım. Yüzey sıcaklığı $t = 0$ anında füzyon sıcaklığından (T_f) daha yüksek bir sıcaklığa (T_0) maruz bırakılırsa sıvı yüzeyden erimeye başlayacak ve arayüzeyin pozisyonu $x = X(t)$ zamanla ilerleyecektir.



Şekil 1.17: Saf maddelerde tek boyutlu erime

Buradaki ısı geçişinin sadece iletimle olduğu düşünülürse;

Sıcaklık değişimi sadece eriyen bölgede sözkonusu olacaktır,

$$\frac{\partial T_s(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T_s(x, t)}{\partial x^2} \quad 0 < x < X(t) \text{ ve } t > 0 \quad (1.24)$$

İlk halde,

$$T_s(x, t) = T_f \quad t > 0, t = 0 \quad (1.25)$$

Sınır koşulu,

$$T_s(0, t) = T_0 \quad t > 0 \quad (1.26)$$

Katı-sıvı arayüzeyinde sıcaklık ve ısı dengesi ifadeleri aşağıdaki gibidir,

$$T_s[X(t)] = T_f \quad t > 0 \quad (1.27)$$

$$-k_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial x} \right)_{[X(t)]} = \rho h_{ks} \frac{dX(t)}{dt} \quad t > 0 \quad (1.28)$$

Bu durumda problemin analitik çözümü literatürde şu şekilde verilmiştir [14];

Sıvı bölgede sıcaklık dağılımı,

$$T_s(x,t) = T_0 - (T_0 - T_f) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right)}{\operatorname{erfc}(\lambda')} \quad t > 0 \quad (1.29)$$

λ' aşağıdaki eşitlikten çekilir. Sayısal olarak tespit edilebilir.

$$\lambda' e^{\lambda'^2} \operatorname{erf}(\lambda') = \frac{\operatorname{Ste}_s}{\sqrt{\pi}} \quad (1.30)$$

Katı bölgede Stefan sayısı,

$$\operatorname{Ste}_s = \frac{c_s (T_0 - T_f)}{h_{ks}} \quad (1.31)$$

Arayüzeyin zamana bağlı pozisyonu,

$$X(t) = 2\lambda' (\alpha_s t)^{1/2} \quad (1.32)$$

2. BUGÜNE KADAR YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde daha önce literatürde yapılan çalışmalar özetlenmektedir. Çalışmalar üç ayrı grupta altında toplanmıştır.

- Kar ve buzun özellikleri
- Erime ve katılaşma
- Termal enerji depolama sistemleri

2.1 Kar ve Buzun Özellikleri

D. Diemand ve V. Klovov, çalışmalarında sıkıştırma ile daha iy granüllü buz oluşturmuşlardır. Kar sıkıştırılarak bağların kuvvetlenmesi, dolayısıyla da mukavemetin artması sağlanır. Buz küpler kullanılarak yapılan evlerde ve buzdan yapılmış yollarda sıkıştırma metodu kullanılmaktadır. Buralarda oluşturulabilen maksimum yoğunluk 500-700 kg/m³ arasında değişir.

Sıkıştırma nispeten sıcak bir ortamda yapılırken bağların oluşması soğuk bir ortamda gerçekleşir. Düşük sıcaklıklarda karın içerisindeki nem miktarı az olduğu için sıkıştırma çok zordur. Bu çalışmada yüksek mukavemetli buz oluşturmak için 6.87 MPa'a kadar basıncı arttırmanın ekonomik olduğu belirtilmiştir.

Çok yüksek yoğunluklu (800-900 kg/m³) buz üretilmesi hedeflendiğinde hem mukavemet yüksek olacak hem de buhar difüzyonu ve infiltrasyon minimize edilecektir. 820 kg/m³ sıkıştırılmış kar ile buz arasındaki geçiş bölgesinin yoğunluğudur. Araştırmacı tarafından hazırlanan numunelere çeşitli testler yapılmıştır;

Basınç testi: Ölçülen gerilme değeri, granül boyu, tipi ve oryantasyonu, sıcaklık, yoğunluk, birim uzama, yabancı partiküller ve tuzluluktan etkilenir. 4,5 cm'lik küpler üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde bağların oluşumunun zamandan ve sıcaklıktan bağımsız olduğu ortaya çıkmıştır.

Bükme testi: Çeşitli buzların karşılaştırılması yapılmıştır. Flexural modül için tablolar ve grafikler verilmiştir.

Sıkıştırma ve uygulanan basıncın etkisi: Yüksek basınç ve uzun süre daha yoğun buz oluşmasını sağlar [15].

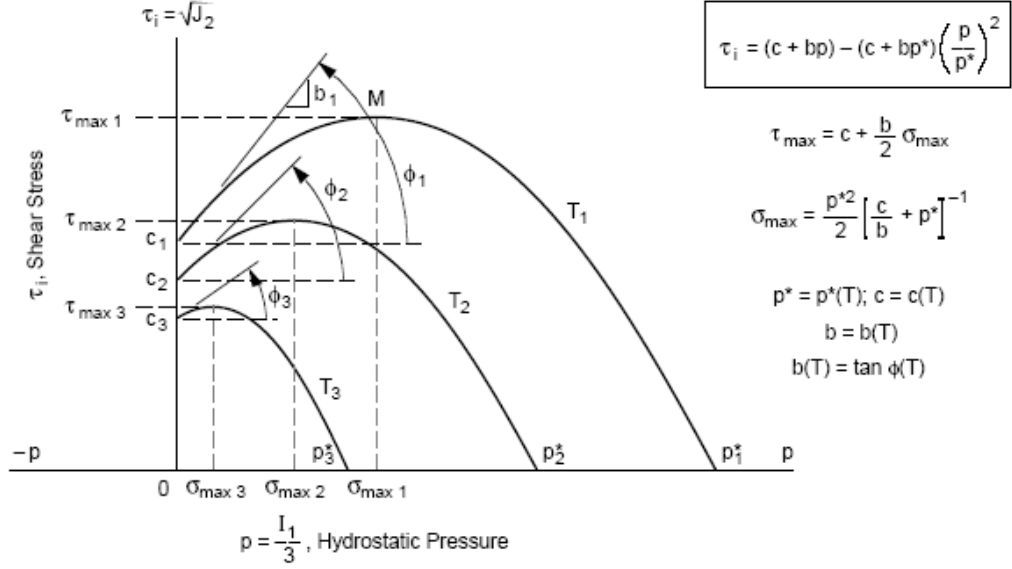
R. Prapainop ve K. Maneeratana, çalışmalarında sonlu hacimler yöntemini kullanarak buz oluşumunu sayısal olarak modellemişlerdir. Tek ve iki boyutlu olarak çözüm yapılmıştır. Model sabit grid (hücre) üzerinde çözülmüş, ısı iletim denklemi temel alınmıştır. Üç ayrı çözüm şeması kullanılmıştır. Bunlar; explicit, cranck-nicolson ve fully implicit şemalarıdır. Gizli ısı geçişi ise kaynak teriminde dikkate alınmıştır. Ara yüzey iletimi için 1- aritmetik ortalama, 2- harmonik ortalama olmak üzere iki ayrı yaklaşım yapılmıştır [16].

A.M. Fish ve Y.K. Zaretsky, yapmış oldukları bu çalışmada buzun mukavemetini, sıcaklık ve hidrostatik basıncın fonksiyonu olarak incelemişlerdir.

Buzun mekanik mukavemetinin birim uzamanın, sıcaklığın, granül büyüklüğünün ve diğer faktörlerin fonksiyonu olarak belirlenmesi yönünde literatürde bir çok çalışma mevcuttur. Genel halde diğer tüm özellikler sabitken çok yönde stres altındaki buz için aşağıdaki ifade yazılabilir;

$\tau_i^* = \tau_i^* (\dot{\gamma}_i, p, T)$	mekanik dayanım
$\tau_i = \sqrt{J_2}$	sekiz yüzeyle (octahedral) kayma gerilmesi
J_2	gerilme gradyeninin ikinci invariantı
$\dot{\gamma}_i$	oktahedral sabit kayma gerinimi
$P = I_1/3$	hidrostatik basınç
I_1	gerilme tansörünün ilk invariantı
T	sıcaklık

Buzun mukavemeti dış basınçla non-lineer olarak değişir. Belirli bir basınca kadar artar ve erime gerçekleştikten sonra hızla düşer. Mekanik mukavemet kohezyona (C), sürtünme açısına (Φ) ve hidrostatik basınca (σ_{max}) bağlıdır. Sürtünme açısı ve kohezyon birim uzamanın fonksiyonudurlar. Sıcaklığın mukavemete etkisi de incelenmiştir.



Şekil 2.1: Buzun mukavemetinin dış basınçla değişimi

$P < \sigma_{\max}$ için;

Yüksek hidrostatik basınç, daha yüksek vizkozite sabiti, daha düşük birim uzama ve daha yüksek mekanik mukavemet anlamına gelir.

$P > \sigma_{\max}$ için;

Daha büyük hidrostatik basınç, daha düşük vizkozite sabiti, daha yüksek birim uzama ve daha düşük mekanik mukavemet anlamına gelir.

Çalışmanın sonucunda;

- 1- Buzun mukavemetini çok geniş bir spektrumda belirleyen bir sıcaklık modeli geliştirilmiştir.
- 2- Gerilmenin basınca ve sıcaklığa bağlı değişimini formülüle eden aşağıdaki ifade çıkarılmıştır.

$$\tau_{i0}(P, T) = (c + bP) - (c + bP^*) \left(\frac{P}{P^*} \right)^2 \quad (2.1)$$

$C(T)$ kohezyon

$\Phi(T)$ yada $b(T)$ iç sürtünme

$P^*(T)$ buzun erime basıncı

Bu parametreler literatürde sıcaklığın fonksiyonu olarak yer almaktadır.

Yapılan çalışmada deneyler hem bir buzdağından alınan örnekler üzerinde hem de laboratuvar ortamında oluşturulan buzlar üzerinde 100'den fazla

deney yapılmıştır. Numunelerin granül çapları 1 ile 8 mm, sıcaklıkları ise -1 °C ile -40 °C arasında değişmektedir. Gerinim hızı ise 10^{-3} - 10^{-5} s⁻¹ olarak seçilmiştir [17].

C. Vigneault ve S. Gameda, çalışmalarında karın sıkıştırılmasında su ilavesinin etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada efektif sıkıştırma ile karın yoğunluğunu 920 kg/m³'e kadar arttırmışlar ve daha düşük enerji vererek karı daha fazla sıkıştırabilmişlerdir. Sıkıştırılabilirliği arttıracak yeni bir yöntem geliştirerek test edilmiştir. Sonuçta özellikleri iyileştirilen kar sıkıştırılarak 1,2 MPa (max) da yoğunluğu 920 kg/m³ olan, buza eşdeğer yoğunlukta kar elde edilmiştir. Bu esnada sıkıştırma için gerekli olan enerji %50 düşürülmüş, bununla beraber %47 yoğunluk artışı sağlanmıştır.

Soğutmada buz kullanımının ekonomik olduğu literatürde gösterilmiştir. En büyük dezavantaj buz bloklarının üretimidir. Kar, buz blokları üretiminde kullanılabilir. Karın dezavantajı ise yoğunluğunun düşük olmasıdır. Büyük depolama hacimleri gerektirir. Eğer sıkıştırılabilirse avantaj sağlar.

- Karın sıkıştırma karakteristikleri ve su eklenmesi ile sıkışma basıncının, dolayısıyla da enerji ihtiyacının tespiti
- Kar sıkıştırılarak buz yoğunluğuna ulaşıp ulaşılamayacağının tespit edilmesi
- Literatürde verilen, kurulu bir sistemde buz bloğu ve sıkıştırma ile elde edilen karın kullanılması durumunda enerji sarfiyatlarının karşılaştırılabilmesi

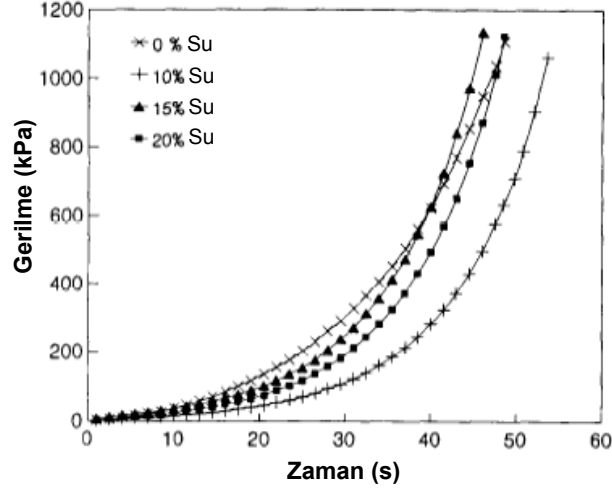
için bu çalışma yapılmıştır.

Karın yoğunluğu 200-600 kg/m³ arasında değişir. Çok küçük kuvvetlerle geri dönüşümü olmayan deformasyonlar gerçekleştirilebilir. Deformasyon tepkisi ilk yoğunluğa, sıcaklığa, sıkıştırma hızına ve yaşlandırma süresine bağlıdır. Mekanik olarak kar yüksek sıkıştırılabilme kabiliyetine sahip viskoelastik bir malzemedir.

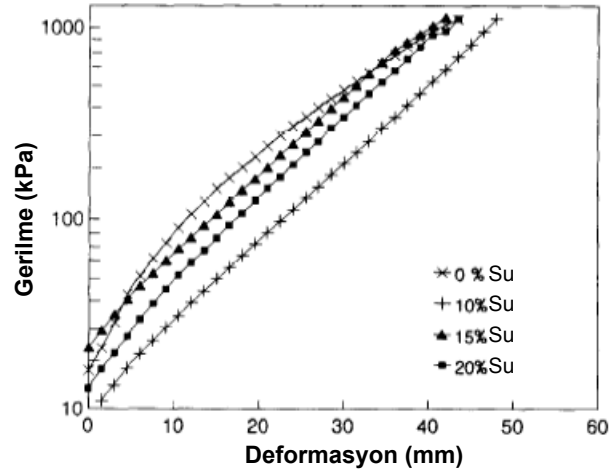
5 °C'de farklı miktarlarda su kar ile karıştırılarak ağırlıkça %0-10-15 ve 20 su içeren kar örnekleri hazırlanmıştır. Her gün yağan kar 1-3 °C'de depolanmış ve 101 mm çapında, 178 mm yüksekliğindeki PVC silindir içerisinde sıkıştırılmıştır. Kar, silindir içerisine doldurularak yoğunluğu ölçülmüştür. Daha sonra istenilen miktarda 102 mm/dk hızda sıkıştırılarak karın yoğunluğu arttırılmıştır. Yapılan deneylerde kar ilk başta -11 °C'dedir.

Yapılan ön deneylerde kara herhangi bir su ilavesi olmadan sıkıştırma yapılmış ve çok farklı davranışlar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak sıcaklık ve iç yapıdaki farklılıklar gösterilmiştir.

Farklı su ekleme durumlarında sabit sıkıştırma hızı söz konusu olduğu halde karın davranışını gösteren aşağıdaki eğriler çıkarılmıştır.



Şekil 2.2: Zamana bağlı mukavemet değişimi



Şekil 2.3: Deformasyona bağlı mukavemet değişimi

Yapılan deneysel çalışmada çıkan sonuçlara eksponansiyel eğri uydurulmuştur.

$$\sigma = ae^{bd} \quad (2.2)$$

d deformasyon (m)

σ gerilme (kPa)

a ve b sabitler (%0,10-15 ve 20 için tespit edilmiştir)

Deformasyonla yoğunluk arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$d = l - \frac{m}{SD} \quad (2.3)$$

l numunenin ilk boyu

m karın kütlesi (kg)

S numunenin yüzey alanı (m^2)

D numunenin yoğunluğu (kg/m^3)

Ana denklemde yerine konulursa (2.4) elde edilir.

$$\sigma = a^1 e^{b^1 D^{-1}} \quad (2.4)$$

Harcanan enerji için (2.5) ifadesi kullanılabilir;

$$W = \int_{D_1}^{D_f} \sigma S M^{-1} dD \quad (2.5)$$

Bir soğutma sisteminin COP'si buzun gizli ısısının bu buzı üretmek için gerekli olan mekanik enerjiye oranıdır. Bu tarif kullanılarak yaklaşık 25 kat daha yüksek COP elde edildiği tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre COP 1365 ile 1584 arasında çıkarken buz bloğu üretilen bir sistemde COP değeri 56 olarak tespit edilmiştir [18].

S. Gameda ve diğerleri çalışmalarında sıkıştırma ile buz üretimi prosesinde karın davranışını incelemişlerdir.

Deneyssel olarak yapılan çalışmada daha önce yapılan çalışmadan farklı olarak kara katılan su oranları ve karın ilk sıcaklık değerleri farklı seçilmiştir. Buna göre %3, 6, 9 ve 12 su oranı, -5, -8, -11 ve -18 °C kar sıcaklıkları kullanılmıştır. Burada da kar 102 mm/dk hızda sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonucu elde edilen maksimum basınç 1,2 MPa dır. Minimum enerji sarfiyatı ile en yüksek sıkıştırılabilirlik -18 ve -15 °C'lerde %12 su katıldığı durumda gözlemlenmiştir.

Deneyler;

2 °C'deki su -18, -11, -8 ve -5 °C'deki karlarla karıştırılarak %0, 3, 6 ve 12 su içeren kar elde edilmiştir. Su, plastik bir kap içerisinde yer alan, ağırlığı bilinen kar üzerine dökülerek karıştırılmıştır.

Çapı 101 mm ve yüksekliği 178 mm olan PVC silindir sıkıştırma için kullanılmıştır. Yapılan test sonuçlarından aşağıda verilen ampirik eşitlik elde edilmiştir [19].

$$\sigma = ke^{at+bT+cM_w} \quad (2.6)$$

σ gerilme (kPa)

t zaman (1,2 MPa'a çıkma süresi)

T ilk sıcaklık (°C)

M_w eklenen su oranı (%)

A, b, c ve k sabitler

H.P. Marshall ve diğerleri, yapmış oldukları bu çalışmada yağın yağmurun kar tabakasında oluşturduğu yoğunluk artışını incelemişlerdir. Çalışma deneysel olarak yürütülmüş ve ampirik bir model çıkarılmıştır.

İlk nemlenme durumunda yoğunlaşma hızının 3 kat arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak, hızlı iç yapı değişimi ve granüllerin yeniden şekillenmesi olarak belirtilmiştir. Zamanla yoğunlaşma hızı düşmektedir. Bu durumda dahi kuru kardan iki kat daha hızlı yoğunlaşma söz konusudur. Çalışmada kar lineer viskoz akışkan olarak ele alınmış, iç yapı ve yer çekiminin sıkıştırmaya etkileri ise parametre olarak değerlendirilmiştir.

Sıkışma hızı, yada yoğunlaşma hızı literatürde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{1}{\rho(t)} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\eta_{zz}} (\sigma_m(t) + \sigma_{zz}(t)) \quad (2.7)$$

η_{zz} compactive viscosity (yoğunlukla değişmektedir)

$$\eta_{zz}(t) = A_1(w) A_2 e^{A_3 \frac{\rho(t)}{\rho_i}} e^{\frac{E}{RT}} \quad (2.8)$$

A_1 su ile değişir (kuru karda 1 ile %14 sulu karda 10^{-5} tir)

A_2 $6,6 \cdot 10^{-7}$ Pas

A_3 19,3

ρ_i 917 kg/m^3 buzun yoğunluğu

E 6730 J/mol aktivasyon enerjisi

R 8,31 J/mol.K gaz sabiti

$\sigma_m(t)$ iç yapıdaki değişimi dikkate alan terimdir.

$$\sigma_{zz}(t) = \int \rho(t) g dz \quad (2.9)$$

Yapılan bu çalışmada yer çekimi ihmal edilmiştir. Buna göre aşağıdaki model oluşturulmuştur.

$$\frac{1}{\rho(t)} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{A_1 \eta_{zz}(\text{dry})} (\sigma_m(t) + 0) \quad (2.10)$$

$\frac{\sigma_m(t)}{A_1}$ terimi ani yoğunlaşmayı dikkate alabilmesi için zamana bağlı bir fonksiyon olarak aşağıdaki gibi yazılmıştır [20].

$$\frac{\sigma_m(t)}{A_1} = \frac{B_1}{t} + B_2 \quad (2.11)$$

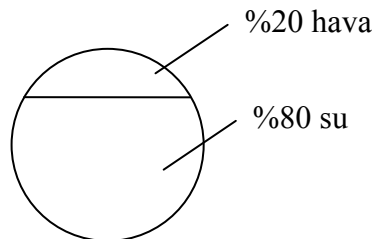
2.2 Erime ve Katılaşma

Ian W. Eames ve diğerleri, küresel elemanlar içerisinde suyun erimesini ve donmasını deneysel olarak incelemişlerdir.

Donma ya da erime süresince küre içerisindeki buz miktarını tahmin edebilen yarı ampirik eşitlikler bulmuşlardır.

Isı depolama sistemlerinde en önemli amaç, donma ve erime sürelerinde, çevreleyen ısı transfer akışkanı (HTF) ile kapsül içerisindeki faz değişim akışkanı arasında yüksek ısı geçiş oranları yakalayabilmektir.

Zamanla kapsül içerisindeki katı-sıvı ara yüzeyinin hareketi (moving boundary), HTF (ısı transfer akışkanı) sıcaklığının donma-erime prosesine etkisi ve küre büyüklüğünün donma-erime prosesine etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.4: Kapsül içerisindeki su ve hava miktarları

Deney esnasında hava basıncının zamanla değişimi kaydedilmiş, buna göre boyutsuz yarıçap ve zaman tanımı yapılmıştır.

Sonuç olarak;

Buz depolama elemanının tamamen erimesi için gereken sürenin %70'inde soğunun %90'ı açığa çıkar.

Depolama ve boşaltma (donma-erime) oranlarını veren yarı ampirik formüller çıkarılmıştır [21].

K.A.R. Ismail ve J.R. Henriguez, küresel bir kabuk içerisindeki faz değişim malzemesinin katılaşmasını sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözmüşlerdir.

Faz değişim malzemesi için sadece ısı iletimi dikkate alınarak matematik model kurulmuştur. Dış yüzeyde sabit sıcaklık veya taşınım sınır koşulları irdelenmiştir.

Model, küresel kabuğun boyutlarının, kalınlığının, malzemesinin, başlangıçtaki faz değişim malzemesi sıcaklığının ve dış yüzey sıcaklığının, katılan kütle miktarının ve zamanın bulunmasındaki etkilerini dikkate almıştır [22].

James M.Hill ve diğerleri tarafından küresel bir kap içerisindeki doymuş sıvının, taşıyıcı kap ile olan radyasyon da dikkate alınarak, yarı-analitik bir şekilde donma prosesinin çözümlenmesi incelenmiştir (seriye açılıyor). Sınır tabaka analizleri gerektirmeden toplam katılaşma süresinin belirlenebildiği bir model geliştirilmiştir. Ek olarak, toplam katılaşma süresi için bağımsız olarak alt ve üst sınırlar belirlenebilmektedir.

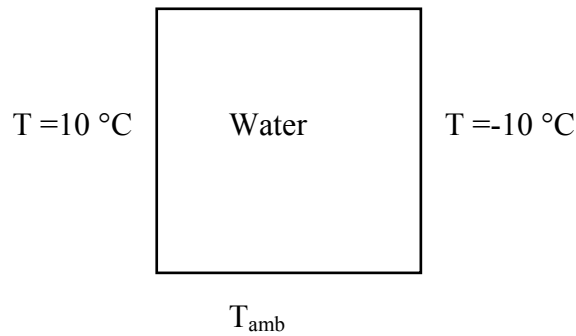
Literatürle karşılaştırmalı eğriler ve katılaşma sınırının zamanla değişimi verilmiştir [23].

T. Wu ve diğerleri, küresel bir kap içerisindeki sıvının içe doğru katılaşmasında yüzey geriliminin (Gibbs-Thomson effect) etkisini analitik olarak, zamana bağlı iletim denkleminin küçük-zaman serilerine açılması tekniği ile çözülmesini incelemişlerdir. Yöneten denklem küresel koordinatlarda yazılmış tek boyutlu ve zamana bağlı ısı iletim denklemdir. Çözümde uzun zamanlarda serinin yakınsama özelliğinin iyileştirilmesi için nonlineer Shank transformasyonu kullanılmıştır. Sabit Stefan sayısında yüzey geriliminin donma hızını arttırdığı görülmüştür [24].

J.J. Milo ve diğerleri tarafından soğuk depolama proseslerinde kullanılan silindirik kapsüller içerisindeki suyun aşırı soğuma olayını incelemek amacıyla bir deney sistemi geliştirilmiştir. Transfer akışkanı su-alkol karışımıdır ve sıcaklığı sabit sıcaklık banyosu ile kontrol edilmektedir. Kapsül içinde ve dışında sıcaklık değişimi ölçülmektedir. İç çapı 45 mm ve et kalınlığı 1,5 mm olan, akrilik, PVC, prinç ve alüminyumdan mamul silindirler kullanılmıştır. Farklı transfer akışkanı sıcaklıklarında suyun aşırı soğuma periyodu ve çekirdekleşme (nucleation) sıcaklığı tespit edilmiştir [25].

Marilena Giangi ve diğerleri tarafından zamana bağlı olarak suyun donması esnasındaki doğal konveksiyon deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Girdap-hız formülasyonunda, entalpi-porozite yöntemine dayanan matematiksel model oluşturulmuş ve sonlu hacimler metodu sabit gride (ağ) uygulanmıştır. Kütle ve momentum denklemlerinde implicit (örtülü) metod uygulanmıştır. Etrafı hava ile çevrili küp içerisindeki su deneysel olarak incelenmiştir. Akış ve sıcaklık dağılımı ölçümlerinde sıvı kristal izleyiciler (TLC- thermochromic liquid crystal) ve DPIV (digital particle image velocymeter) kullanılmıştır. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sadece taşınımın söz konusu olduğu donma proseslerinde iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Ancak zamanın artan değerlerinde deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar arasında fark oluşmaya başlamıştır. Aşırı soğuma etkisi sayısal yöntemde dikkate alınmamış fakat yazarlar bu hususta çalışılmasını önermişlerdir.

Sıcaklık ve hız ölçümlerinde PIV kullanılmıştır [26].



Şekil 2.5: Sınır şartları

D. Buddhi tarafından sayısal çalışma yapılmıştır. Modelde entalpi metodu kullanılmıştır. Bu şekilde hareketli sınır problemi çözümlenmiştir.

Modelleme iki boyutludur. Patankar algoritması ve TDMA çözümü uygulanmıştır.

Entalpi yöntemiyle;

- Yöneten denklem tek faz denklemine benzer.
- Sıvı-katı ara yüzeyi için herhangi bir ek tanımlama gerekmez.
- Bu formülasyon katı-sıvı ara yüzeyinde bir geçiş bölgesine izin verir.

Hesaplamalar ısı iletkenliği, ısı kapasite (PCM), ısı transfer malzemesinin kalınlığı ve ısı iletim katsayısı ve taşıyıcının etkilerini incelemiştir.

Sadece iletim düşünülmüş olup faz değişim malzemesinin ve kanat malzemesinin termofiziksel özellikleri sıcaklıktan bağımsız olarak alınmıştır. Faz değişim malzemesi ilk anda katı fazdadır. Faz değişim malzemesi homojen ve izotropiktir. Çıkan sonuçlara göre; 1) Taşıyıcı kabın ısı kapasitesi faz değişim malzemesinin erime hızında etkisizdir, 2) Taşıyıcı kabın ısı iletim katsayısı ve faz değişim malzemesinin efektif ısı iletim katsayısı erime hızını doğrudan etkilemektedir [27].

H. Mehling ve diğerleri, faz değişim malzemesinin düşük ısı iletkenliğinin arttırılması için faz değişim malzemesini mikro-poroz grafit bir matris içerisine yerleştirilerek kompozit bir faz değişim malzemesi oluşturulmuştur. Bu şekilde ısı kapasitesi yüksek olan faz değişim malzemesi için yaklaşık 20 kat daha yüksek ısı iletkenliği elde edilmiştir. Buna mukabil ısı kapasitede çok az bir düşüş olmuştur [28].

X. Tong ve diğerleri, faz değişim malzemesi içerisine yüksek poroziteli metal matris yerleştirilerek erime ve katılaşma esnasındaki ısı transferini iyileştirmişlerdir. $r_i \leq r \leq r_0$ ve $0 \leq z \leq h$ ölçülerinde silindirik bir kap içerisine su ve alüminyum matris yerleştirilmiştir. Darcy etkisi dikkate alınacak şekilde Navier Stokes denklemleri düzenlenmiştir. Suyun yoğunluk değişimi dikkate alınmıştır. Sayısal sonuçlar metal matrisin ısı geçişini 10 kat iyileştirdiğini göstermiştir.

Su ve bir çok faz değiştiren malzemenin en büyük problemi katılaşma büyüdükçe kendi kendini izole etmesidir.

Matematik model hem iletimi hem de taşınımı dikkate almaktadır.

Çözümde sabit grid kullanılmıştır. Geometrik koordinat transformasyonu uygulanmış ve bu şekilde hareketli sınır dikkate alınmıştır.

Alüminyum matris köpük (AL matrix foam) ısı iletimini iyileştirmesine rağmen sıvı bölgedeki taşınımı engellemekte ve sistemin depolama kapasitesini düşürmektedir.

Burada kullanılan modelde faz değişimi esnasında iletim ve taşınım dikkate alınmıştır.

Su 1 bar basınç, +4 °C'de maksimum yoğunluktadır.

Metal matris porozite (ϕ) (gözenekliliğin hacimsel oranı) ile temsil edilmektedir.

Kabuller;

- Metal matris homojen olarak dağılmış olup su veya buz ile tam doludur.
- Sıvı bölgedeki akış iki boyutlu ve laminardır.
- Yerel olarak termodinamik denge sözkonusudur.
- Buz, su ve metal matrisin termodinamik özellikleri sabittir.
- Akış alanındaki erime ve donma esnasındaki yoğunluk değişimi ihmal edilebilir.

Sonuçlar;

- Isıl iletkenliği düşük faz değişim malzemeleri içerisine metal matrisin yerleştirilmesi ısı geçişini 10 kat artırır ve katılaşma-erime süresini kısaltır.
- Yüksek Ra ve geçirgenlik sözkonusu ise erime esnasındaki konveksiyonun etkisi ihmal edilemez. Taşınım katı-sıvı ara bölgesinin gelişmesinde ve ısı transfer oranında oldukça etkilidir. Eğer metal matrisin hacimsel oranı yüksek ise ($\phi < 0,9$) taşınım ihmal edilebilir.
- Donma esnasında taşınım, eğer boyutsuz donma sıcaklığı $\geq 0,7$ ise ihmal edilebilir.
- Isı transferinin iyileşmesinde egemen olan değişken metal matrisin hacim oranıdır ($1-\phi$). Ra, boyutsuz donma sıcaklığı ve geometrik boyutlar ikincil etkidir [29].

L.F. Cabeza ve diğerleri tarafından yapılmış bu deneysel çalışmada, su/buz (PCM)'da ısı geçişinin iyileştirilmesi için üç yöntem

karşılaştırılmıştır. 1- paslanmaz çelik parçaların eklenmesi, 2- bakır parçaların eklenmesi, 3- faz değişim malzemesi-grafit kompozit malzeme.

Sonuçlar;

- PCM içerisine ısı iletim katsayısı bakıra göre çok düşük olan paslanmaz çelik parçaları (14 W/mK) karıştırmak ısı akısını kaydadeğer ölçüde artırmaz.
- Bakır parçaların (384 W/mK) eklenmesi ısı akısının belirgin bir şekilde artmasını sağlar.
- Grafit kompozit kullanıldığında ısı akısı bakırdan da fazla artar.
- Grafitli durumda ısı akısı suya göre ısıtmada 4 kat soğutmada ise 3 kat daha yüksektir.

Tablo 2.1: L.F. Cabeza ve diğ.'nin deney sonuçları

Depolama Malzemesi	Zaman (dk)		Ortalama güç (W/m ²)	
	Isıtma	Soğutma	Isıtma	Soğutma
Su	55	30	1,1	2,2
Su+paslanmaz çelik	45	30	1,5	2,1
Su+bakır	25	20	2,6	3,1
Su+grafit kompoziti	15	10	4,2	5,9

PCM içerisine metal parçalar atılarak yapılmak istenen kanat etkisi oluşturmaktı. Ancak ısı iletimi çok yüksek değilse bu parçaların katkısı çok az olmaktadır [30].

Jun Fukai ve diğerleri çalışmalarında enerji depolama ortamının ısı iletkenliğinin yüksek iletkenliği olan karbon fiberleri ile arttırılmasını amaçlamışlardır. İki tip iyileştirme metodu kullanılmıştır. 1- Rastgele dizilen karbon fiberleri, 2- Düzgün dizilen karbon fiberleri. Rastgele dizilen yapıda fiberlerin uzunluğu iletkenlikte çok etkili değildir.

Faz değişim malzemesi olarak parafin kullanılmıştır. Parafin 100 °C'den düşük sıcaklıkta depolama yapmak için uygundur. Fakat ısı iletkenliği çok düşüktür. Parafinler için bir çok araştırmacı, kanatlar, balpeteği ve poroz ortam gibi iyileştirmeleri iletimi arttırmak için yapmıştır.

Karbon fiberleri metallerden düşük yoğunluklu, korozyona dayanıklı ve ısı iletkenlikleri yüksektir. Isıl iletkenlik, iletkenliği arttırıcı maddelerin

hacimsel oranı arttıkça artar ancak, enerji depolama yoğunluğu azalır. Bu çalışmada fiberlerin hacimsel oranı %2'den az tutulmuştur [31].

Lazaradis, bu çalışmada faz değişimi bulunan bir ısı-transfere problemini sayısal olarak çözümlemeyi amaçlamıştır. Hareketli ara yüzeydeki koşullar nedeniyle bu problem lineer değildir. Oluşturulan sayısal teknik, ilgili denklemleri çözerek her iki fazdaki sıcaklık dağılımlarını çok boyutlu olarak belirlemektedir. İki boyutlu çubuk ve 2 ve 3 boyutlu köşeler model olarak seçilmiştir.

Sadece iletim dikkate alınmıştır. Explicit sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [32].

S.H. Cho ve J.E. Sunderland, çalışmalarında küresel bir yapıda içe doğru ve dışa doğru faz değişimini incelemişlerdir. Sistemin ilk sıcaklığı faz değişim sıcaklığında sabit kabul edilmiştir. Basit bir yaklaşım elde edilmiş ve sonlu elemanlar yöntemiyle yaklaşımın hassasiyeti test edilmiştir.

Elde edilen yaklaşık çözüm faz değişim entalpisinin gizli ısıya oranı olan L değerinin büyük olduğu durumlarda daha iyi sonuç vermektedir [33].

D.S. Riley ve diğerleri çalışmalarında dairesel bir silindir ve kürede içe doğru katılma olayını analitik olarak çözmüşlerdir. Geometri ilk olarak eriyik halde ve füzyon sıcaklığındadır. Dış yüzeyin birden soğutulduğundaki davranış modellenmiştir. İletim denklemleri kullanılmıştır. Yapılan kabuller; sabit ısıl özellikler ve β parametresi (gizli ısının duyulur ısıya oranı) büyük. Seriyeye açılarak çözüm yapılmıştır. $\beta = 10$ ve 20 silindirde, $\beta = 10$ kürede elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlarla uyumlu çıkmıştır [34].

N. Shamsunder ve E.M. Sparrow tarafından tek bir faz değişim sıcaklığı olan bir ortamda faz değişiminin çok boyutlu olarak entalpi modeli kurulmuş ve sayısal uygulamaları yapılmıştır. Kurulan model (entalpi modeli) konvansiyonel korunum denklemleri ile eşdeğerdir. Implicit sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Implicit modelin seçilme nedeni geniş Stefan sayısı aralığında geçerli olmasıdır. Denklem integral formda oluşturulmuştur. Stefan sayısının $0,01$, $0,05$ ve $0,1$ ve Biot sayısının $0,1$, 1 ve 10 değerleri için çözüm sonuçları verilmiştir [35].

J.S. Goodling ve M.S. Khader tarafından iç kısmında sabit ısı akısı olan (bir yüzeyinde) silindir veya kürede dışa doğru katılma sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözümlemede türevler (koordinatlar) central

difference (merkezi farklar), zaman terimleri ise backward implicit (geriye doğru örtülü) olarak alınmıştır. Problem tek boyutludur [36].

N. Shamsundar ve E.M. Sparrow faz değişimi için kullanılan entalpi modelinde yoğunluk değişimini dikkate alarak bir boyuttaki katılaşmayı modellemişlerdir. Model bir kavitedeki üstten katılaşma içindir. Kurulan model implicit sonlu elemanlar ile çözülmüştür. Bir çok ısı transferi büyüklüklerinin zamana, katılaşmanın oluşumuna, Biot sayısına, katı-sıvı yoğunluk oranına ve Stefan sayısına bağlı sonuçları verilmiştir. Yoğunluk oranının ve Stefan sayısının ısı transferine etkisi katılaşmanın sonlarına doğru daha fazla olmaktadır. Buna mukabil Biot sayısı, bütün katılaşma süresince etkilidir [37].

R.G. Kemink ve E.M. Sparrow tarafından deneysel çalışma, faz değişim ortamına daldırılmış, dikey pozisyonda duran silindir etrafındaki erime için yapılmıştır. Amaç ısı geçiş katsayısının bulunmasıdır. Faz değişim bölgesinin üzeri kapalı veya hava ile kaplıdır. %99 saf n-eicosane parafin kullanılmıştır. Silindir yüksekliğinin çapa oranı 10 dur. Faz değişim bölgesinin üzerinin açık veya kapalı olması ısı geçişini etkilemektedir. Aşırı soğuma ısı transfer prosesinin konveksiyon ağırlıklı olmasını ertelemektedir. Aşırı soğumanın olduğu durumda ısı geçiş katsayısı, olmadığı durumdan %10-15 daha düşüktür. Sürekli rejimde ısı geçiş katsayısı Nu ve Ra sayıları ile kolaylıkla belirlenebilir. Ayrıca bu ifadeler erime olmayan paralel duvarlı kapalı hacimlerdeki doğal taşınımına benzerdir [38].

M. Costa ve diğerleri tarafından yapılmış bu sayısal çalışmada üç boyutlu olarak çözüm yapılmıştır. Sonuçlar bazı iki boyutlu sayısal sonuçlarla ve deneylerle kıyaslanmıştır. Rayleigh sayısı $3,68 \times 10^5$ ve $1,22 \times 10^6$ ve Stefan sayısının 0,04 ve 0,133 değerleri için sonuçlar verilmiştir.

Newtonian ve sıkıştırılamaz akışkan, laminar akış, boussinesq yaklaşımı, ihmal edilebilir yoğunluk değişimi, sabit sıcaklıkta erime noktası kabulleri yapılmıştır.

Aşağıda araştırmacı tarafından kullanılan yöneten denklemler verilmiştir. Bu denklemlerin çözümünde sonlu hacimler metodu kullanılmıştır.

Yöneten denklemler;

$$\Delta(\rho u) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + v \nabla(\rho u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + v \nabla(\rho v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + v \nabla(\rho w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + \rho g \beta (T - T_0) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + v \nabla(\rho H) = \nabla(k \nabla T) \quad (2.16)$$

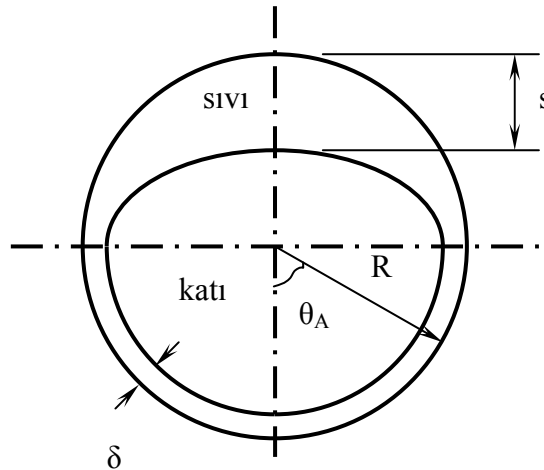
Daha fazla aralıkta boyutsuz sayılar üzerinde çalışarak bir korelasyon çıkartılması önerilmektedir [39].

S.K. Roy ve S. Sengupta bu çalışmalarında duvar sıcaklığı sabit, katı yoğunluğu daha yüksek kabulleri yapılarak, tüm erime prosesini kapsayacak şekilde problemi analitik olarak analiz etmişlerdir.

Silindirik ve küresel depolama elemanları faz değişim malzemelerinin depolanmasında sıkça kullanılmaktadır. Literatürde silindir için daha fazla çalışma mevcuttur.

Sıvı film boyunca ısı geçişi tek boyutlu iletimle gerçekleşmektedir. Problem sanki-dengeli ve aksis simetriktr.

Modelle elde edilen erime oranı literatürde verilen sonuçlarla uyumludur. Erime oranı katı ve duvar arasındaki sıcaklık farkının, taşıyıcının büyüklüğünün ve katı ve sıvı yoğunlukları arasındaki farkın artmasıyla artmaktadır. Bu oran erime gizli ısısının ve akışkanın viskozitesinin artmasıyla düşmektedir [40].



Şekil 2.6: Katı yoğunluğu yüksek bir sıvıda erime

Zamanla film kalınlığı arttığı için erime hızı düşer.

δ = film kalınlığı

M.A. Khan ve P.K. Rohatgi, silindirik alüminyum, grafit, demir, bakır içeren kompozit malzemenin katılaşmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Katılaşma bölgesi hareketli bir bölgedir. Katı-sıvı arayüzeyinin ilerleme hızı güçlendirme katkılarının (reinforcement) ısı iletim katsayısının eriyiğin ısı iletim katsayısına oranına bağlıdır. Isıl iletkenliği düşük katkılar katılaşma esnasında eriyikten daha sıcak kalırken, iletkenliği yüksek olanlar daha düşük sıcaklıkta kalmaktadır.

Sayısal çalışmada implicit sonlu elemanlar ve SOR (succesive over relaxation) kullanılmıştır.

Elde edilen çözüm metodu Ste (Stefan number)'den bağımsızdır. Stefan sayısının çok yüksek değerlerinde sayısal modelin hata değerleri büyüyebilir.

Katkı maddesinin ısı iletkenliğinin (K_p) eriyiğin ısı iletkenliğine (K_L) oranına bağlı olarak katılaşma davranışı incelenmiş ve sonuçlar çıkarılmıştır [41].

M.M. Farid ve diğerleri tarafından daha önce bir boyutlu katılaşma ve erime için çıkarılan model burada iki boyut için test edilmiştir. Isı transfer oranının tespit edilebilmesi için erime ve katılaşmada ara yüzeyin hareketinin bilinmesi (modellenmesi) gerekir. Katılaşma veya erime sabit bir sıcaklıkta gerçekleşmez kabulü yapılmıştır. Gizli erime ısı etkisi seçilen erime aralığında efektif ısı kapasite ile dikkate alınmıştır.

EHC (effective heat capacity method)

Bu metotta iletim denklemi katı, sıvı ve faz değişim bölgesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada explicit sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yoğunluk ve ısı iletim katsayısı katı ve eriyik bölge için farklıdır. Faz değişim bölgesinde ise ortalama değerler alınmıştır [42].

K. T. Adref ve I. W. Eames yapmış oldukları bu deneysel çalışmada küresel kapsül içerisindeki suyun dinamik davranışını incelemişlerdir. Su-buz arayüzeyi fotoğraflama yöntemiyle tespit edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda ampirik bir ifade çıkarılmıştır. Küre üzerinde bulunan hava basıncının zamana bağlı değişimi ölçülerek katılaşma arayüzeyinin pozisyonu belirlenmiştir. Şarj ve deşarj enerjileri boyutsuz

zamana, ısı iletim katsayısına ve küre yarıçapına bağlıdır. Çıkarılan sonuçlar ise şöyledir;

- Isı iletimi baskın ısı geçiş mekanizmasıdır.
- Erime için gerekli olan sürenin %70'i kadar sürede buzun %90'ı erimektedir.
- Farklı sıcaklıklarda ısı transfer akışkanını ve farklı küre çaplarını dikkate alarak zamanla küreden çekilen enerjiyi veren bir ampirik formül çıkarılmıştır. Bu ifade soğu depolama sistemlerinin dinamik modellenmesinde de kullanılabilir.
- Isı transfer akışkanı ve küresel kapsüllerin boyutları erime prosesini fazlasıyla etkilemektedir. Küçük çaplı kapsül ve yüksek sıcaklıkta ısı transfer akışkanı sözkonusu iken daha yüksek miktarda kapsülden ısı çekilebilir [43].

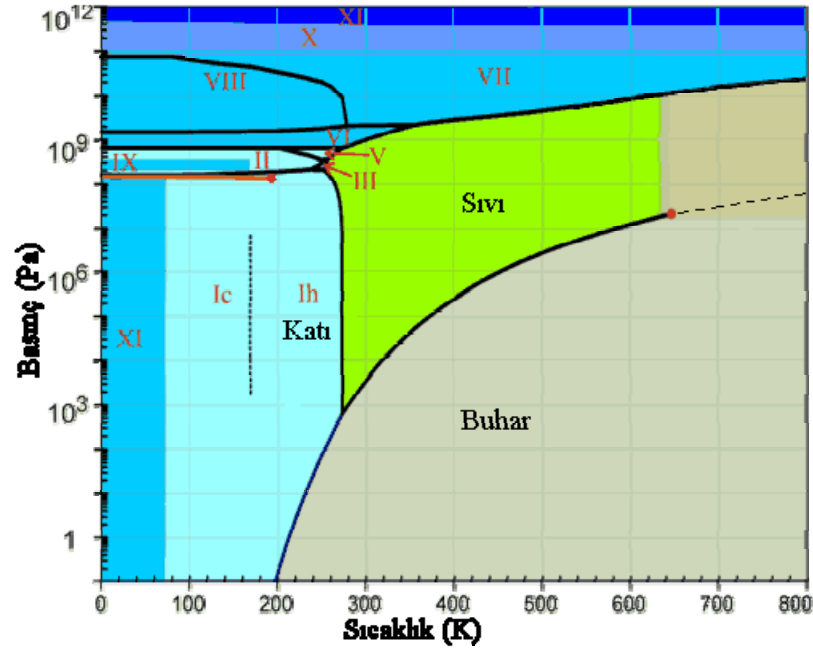
Shi-Li Chen ve diğerleri çalışmalarında soğu depolamada içerisinde çekirdeklenmeyi hızlandırıcı madde bulunan veya bulunmayan silindirik kapsüllerdeki aşırı soğumuş (supercooled) suda çekirdeklenmeyi deneysel olarak incelemişlerdir.

- Soğutucu sıcaklığı düştükçe çekirdeklenme olasılığı artmaktadır.
- Su hacmi arttıkça daha düşük sıcaklıkta çekirdeklenme gerçekleşmektedir.
- Demir cevheri, gümüş iyot (AgI) vs. su içerisine katılınca çekirdeklenme olasılığı artmaktadır.

Gümüş İyot'un kristal yapısı buza benzediği için çekirdeklenme hızlandırıcısı olarak diğerlerinden daha iyidir. Suda aşırı soğuma çekirdeklenme olana kadar devam eder. Bu esnada sadece duyulur ısı geçişi olur [44].

M. Akyurt ve diğerleri buz-su sistemlerinde donma olayını incelemişlerdir. Bu çalışmada erime ve donma karakteristikleri gözden geçirilmiş, suyun ve buzun özellikleri ve suyun faz diyagramı irdelenmiştir. Ayrıca boruların donma nedeniyle patlaması da incelenmiştir. Aşağıda araştırmacı tarafından verilen bilgiler kısaca özetlenmiştir.

Erime ve donma problemleri Stefan problemleri olarak adlandırılır. Doğada görülen buzlar Şekil 2.7’de görülen ve **Ih** olarak adlandırılan altı köşeli buzlardır.



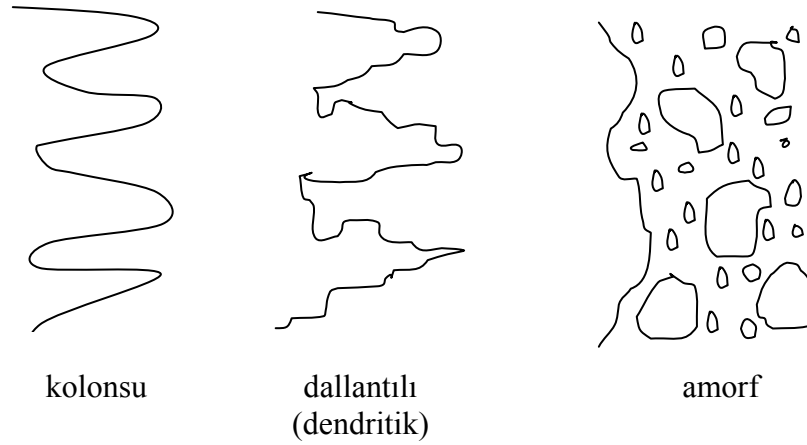
Şekil 2.7: Suyun faz diyagramı [45]

Katıların çoğu kristal yapıdadır. Bu durumda atomlar, birbirini tekrar eden kafes yapılar şeklinde dizilmiştir. Kristalleşme esnasında atomların bu şekilde dizilebilmesi biraz zaman almakta ve ancak erime sıcaklığının altına düşülerek katılaşma sağlanabilmektedir (supercooling). Bu hal termodinamik olarak sanki-dengeli (quasi steady state) bir haldir.

Ara yüzeyin kalınlığı bir kaç angstromdan bir kaç santimetreye kadar değişebilir ve mikro yapısı çok kompleks olabilir. Bu yapı, malzemenin özellikleri, soğutma oranı, sıcaklık gradyeni ve yüzey gerilimi gibi bir çok faktöre bağlıdır. Bir çok saf malzeme için normal dondurma koşulları altında ara yüzey düzlemsel ve çok incedir. Bu nedenle katı ile sıvı arasında keskin bir geçiş kabulü yapılır.

Eğrisel yüzeyli katı bir malzeme sıvı ile karşılaştığında yerel donma sıcaklığı, katı-sıvı yüzey gerilimine ve yerel eğriselliğe (curvature) bağlı olarak değişir. Bu durum Gibbs-Thomson etkisi olarak adlandırılır. Toplam donma prosesinde etkisi azdır ancak ara yüzeyin mikro yapısını etkiler.

Eğer aşırı soğuma varsa geçiş bölgesi kalın olacaktır. Bu bölge macunsu bölge (mushy zone) olarak adlandırılır. Bu halde görülebilecek yapılar şu şekildedir.



Şekil 2.8: Katılaşma geçiş bölgesi

Suyun geçiş bölgesi dendritiktir. Ancak bugüne kadar yapılan tüm çalışmalarda bu durum ihmal edilmiştir.

Çalışma sonucuna göre çekirdeklenme sıcaklığı taşıyıcının özelliklerinden ve soğutma miktarından bağımsızdır [46].

2.3 Termal Enerji Depolama Sistemleri

Belen Zalba ve diğerleri faz değişim malzemeleri içeren ısı enerji depolama sistemlerinde ısı geçişi ve uygulamaları hakkında literatürde çıkan son 20 yılın makalelerini derlemişlerdir. Makalede 200'ün üzerinde referans yer almaktadır. Çalışmalar 3 alanda toplanmıştır.

- Faz değişim malzemeleri
- Isı transferi analizleri
- Uygulamalar

Faz değişim malzemeleri

Tablo 2.2: Faz değişim malzemesinden istenen temel özellikler

Isıl	- Uygulamaya uygun faz değişim sıcaklığı - Kullanım sıcaklığında yüksek entalpi değişimi - Her iki faz için de yüksek ısı iletim katsayısı
Fiziksel	- Düşük yoğunluk değişimi - Yüksek yoğunluk - Aşırı soğumanın olmaması
Kimyasal	- Stabil olmalı - Faz ayrımı (phase seperation) olmamalı - Taşıyıcı materyalle uyumlu olmalı - Zehirsiz, yanmaz ve çevreye zararsız olmalı
Ekonomik	- Ucuz olmalı - Kolay bulunmalı

Faz değişim materyallari iki ayrı gruba ayrılmaktadır. 1) Ticari olmayan/Ticari olan ve 2) Organik/İnorganik.

Thermofiziksel özellikler irdelenmiş ve Faz değişim malzemesinden istenen temel özellikler tablo olarak verilmiştir.

Isı geçişı

Teori ve simülasyon: Genel olarak analizlerde düzensizlik (tersinmezlik) ve ikinci kanun kullanılmaktadır. Bu anlamda ekzerji metodunun kullanımı da termal enerji depolama sisteminin termodinamik davranışı için öne çıkmaktadır.

Hareketli sınır problemleri: Erime ve katılaşma esnasında sınırdaki gizli ısıнын alınma veya atılma hızına bağlı olarak sınır hareket eder. Bu nedenle ilk anda sınır belli değildir, bu da çözümün bir parçası olmalıdır.

Eğer faz değişim malzemesi saf bir malzeme ise katılaşma tek bir sıcaklıkta olur. Eğer bir karışım sözkonusu ise katılaşma bir sıcaklık aralığında gerçekleşecektir. Bu aralıkta malzeme sakız (macun) gibidir. Bu durumda enerji denklemi entalpi cinsinden yazılmalıdır.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \bar{\nabla} \cdot (\lambda \bar{\nabla} T) \quad (2.17)$$

Bu eşitliğin çözülebilmesi için entalpi-sıcaklık ve sıcaklık iletim katsayısı ilişkilerinin bilinmesi gerekir. Bu işlemin ana amaçları,

- Eşitlik üç faza da uygulanabilir
- Her bir noktada sıcaklık ve buna bağlı olarak termofiziksel özellikler belirlenebilir.
- Sıcaklık alanına bağlı olarak sınırın pozisyonu belirlenebilir.

Sadece iletimi dikkate alan sayısal çalışmalar: Normalde baskın ısı geçişı mekanizması olarak iletim ve taşınım sözkonusudur. Literatürde ilk çalışmalar (saf maddeler için) sadece iletimi dikkate almıştır.

İletim ve taşınımın dikkate alındığı çalışmalar: Yapılan çalışmalarda ortaya çıkan en önemli sonuç; 'en kolay metod entalpi metodu'dur.

Değişik ısı değiştiricisi geometrilerinde sayısal çalışmalar: Bir çok sayısal çalışma yapılmıştır.

Isı geçişinin iyileştirilmesi; değişik konfigürasyonlarda kanatlı boru üretimi, faz değişim malzemesini metal bir matris içerisine yerleştirme (alüminyum, grafit gibi)

Uygulamalar

Endüstride kullanım alanları bir tablo olarak verilmiştir. Bu uygulamalar iki ana gruba ayrılıyor; ısı koruma ve depolama.

Buz depolamada literatürde iki ana problemle karşılaşılmaktadır.

1- Kristalleşmenin rastgele olması, 2- Katılaşmanın başlamasındaki gecikme [47].

B. Hafner ve K. Schwarzer tarafından parafinli bir gizli ısı depolama sistemi geliştirilmiştir. Raporda iki farklı yaklaşım açıklanmıştır.

1- Kısa dönem faz değişim malzemesi depolama; konvansiyonel su depolama ve gizli ısı elemanları ile, 2- Uzun dönem faz değişim malzemesi depolama.

Her ikisinden de beklenenler; Yüksek teknik güvenlik, zehirsizlik, farklı boyutlara adaptasyon, üretimi kolay ve ucuz, su depolama ile aynı mertebelerde fiyat ve enerji ihtiyacı.

Parafinli bir sistemde faz değişim malzemesi deposu çalışma sıcaklığına su olması haline göre çok daha düşük bir enerji ile gelir ve çalışma sıcaklığında enerjinin hemen hemen tamamını depolar.

Parafinin temel problemi düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasıdır. Çalışmada hedef ısı iletimini arttırmaktır.

Parafindeki ısı geçişi metal (alüminyum matris gibi) yapılarla iyileştirilmiştir. Bu iyileştirme bulunan ısı iletim katsayısı ile gözlemlenmektedir [48].

M. Costa ve diğerleri tarafından entalpi formülasyonu ve implicit sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, kanatlı veya kanatsız bir gizli ısı depolama sistemi analiz edilmiştir. Bir boyutlu analizde sadece iletim dikkate alınmıştır. Kanatlı yapıda erime oranı daha yüksek olmaktadır.

Katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya faz değişimleri tercih edilmektedir. Çünkü işletme basınçları katı-gaz veya sıvı-gaz'a göre daha düşüktür.

Entalpi formülasyonunun avantajları;

Yöneten denklemler tek faz denklemlerine benzerler.

Katı-sıvı ara yüzeyinde ek bir durum (modelleme açısından) gerekmez. Ara yüzey bölgesi otomatik olarak dikkate alınır.

Entalpi modeli ara yüzeyde macun gibi bir bölgenin oluşmasını da modeller.

Elektriğin az kullanıldığı ölü zamanlardaki elektrik enerjisi ile faz değişim malzemesi eritilerek ısı depolama yapan, bir gizli ısı depolama (LHTES-latent heat thermal energy storage) sistemi dizayn edilmiştir.

Faz değişim malzemesi → n-octadecane

Termo fiziksel özellikler sıcaklıktan bağımsızdır, faz değişim malzemesi ilk halde katıdır, faz değişim malzemesi homojen ve izotropiktir.

Tek boyutlu simulasyonda kanat etkisi ihmal edilebilir.

İki boyutlu simulasyonda sadece iletim vardır.

Kanatlı yapıda ısı transferi ve buna bağlı olarak faz değişim malzemesinin erimesi belirgin bir şekilde iyileşmektedir [49].

S. L. Chen yapmış olduğu bu çalışmada kapsül içerisinde bulunan suyun katılaşması prensibine göre çalışan bir depolama sisteminin performansını incelemiştir. Bir deney sistemi de oluşturmuştur. Matematik modelleme ile zamana bağlı davranış irdelenmiştir. Farklı debilerde ve porozitelerde oluşan sıcaklık dağılımları hem deneysel hem de teorik olarak bulunmuş ve her iki sonucun birbiriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Matematik modelde soğutucu akışkan sanki-dengede kabul edilmiştir. Deneysel ve teorik datalar yardımıyla iç kısımdaki taşınım katsayısını veren bir korelasyon oluşturulmuştur [50].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kışın yüksek ve soğuk yerlerde biriken karın depolanarak yaz aylarında soğutma amacıyla kullanılması mümkündür. Bu çalışmada dağlarda biriken karın yaz aylarında soğu ihtiyacı olan bölgelere taşınması amaçlanmaktadır. Yapılan literatür çalışmasında karın taşınması için kar+su karışımının salamura şeklinde taşındığı görülmüştür. Salamura akışının en büyük riski dirseklerde birikerek tıkanmalara neden olmasıdır. Bir diğer önemli dezavantajı ise uzun mesafelerde erime nedeniyle depolanabilecek kadar büyüklükte buz partiküllerinin kalmama olasılığıdır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için karın küresel buz topları haline getirilerek bir yerden başka bir yere transfer edilmesi düşünülmektedir. Bu tezde karın önce kartopu haline getirilmesi, ardından sıkıştırarak ve su vererek yoğunluğunun artırılması ve buz topu haline getirilmesi amaçlanmaktadır. Küresel topların boru hattında tıkanmamaları için küre çaplarının boru yarı çapından büyük seçilmesi gerekmektedir. Aksi taktirde literatürde çamur akışı olarak bilinen, salamura akışı sözkonusu olacaktır. Burada öngörülen ya da incelenmek istenen akış ise tıkaç akış olarak adlandırılan akıştır. Daha önce plastik kürelerin tıkaç akışı (kapsül akışı) deneysel olarak D. Ulusarslan tarafından incelenmiştir [51]. Bu çalışmada kapsüllerin tıkaç akışı incelenmiş ve basınç düşümleri deneysel olarak tespit edilmiştir.

Yapılan literatür çalışmasında belirli miktarda ve özelliklerde kar kütlesinin sıkıştırılarak ve su emdirilerek küresel buz topları haline getirilmesi konusunda bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Dağlarda bulunan karın soğutma amacıyla kullanılması için karın ekonomik bir şekilde soğutma yapılacak bölgeye taşınması gerekmektedir. Kar küresel hale getirilerek izolasyonlu borularla su ile beraber taşınabilir. Ancak taşıma esnasında kar kürenin su içerisinde parçalanmaması için buz haline getirilmesi gerekmektedir. Bu işlem ise kar küre basınç altında sıkıştırılarak ve su emdirilerek gerçekleştirilebilir. Su bir bağlayıcı olarak kullanılabilir. Buradaki en önemli husus ne kadar miktarda su emdirilmesi gerektiğinin tespitidir. Eğer fazla miktarda su verilirse küre donma

sırasında parçalanabilir. Eksik olması durumunda da yeterli bağlanma sağlanamayacaktır. Sıkıştırma ile karın içerisindeki hava boşlukları ortadan kaldırılır. Karın yoğunluğu giderek artar ve granüller daha homojen hale gelerek aradaki bağlar kuvvetlenir. Sıkıştırma miktarı, yani uygulanan basınç, sıkıştırma hızı ve sıcaklık burada etkili parametrelerdir.

Benzer bir durum ekonomik olarak üretilen küçük buz parçalarının birleştirilmesi için de geçerlidir. Bu şekilde komple küresel buz topu elde etmek için gerekli olan süre daha kısa olacaktır. Dış yüzeyden soğutma ile büyük parçaların dondurulması, katılaştıran dış yüzeylerin zamanla direnç oluşturması nedeniyle daha uzun sürer.

Dağlarda bulunan karın borularla ihtiyaç duyulan yere taşınması için karın sıkıştırılarak küresel hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kar toplarının taşınması esnasında parçalanmayacak kadar mukavemete sahip olması için hangi şartlarda sıkıştırılması gerektiği tespit edilmelidir. Bu şartların tespit edilmesi amacıyla aşağıda tariflenen deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Deneylerde kullanılacak olan buz kürelerinin çapı, daha önce D. Ulusarslan [51] tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarından ve kurulan deney sisteminden faydalanabilmek amacıyla bu çalışmada kullanılan küresel deney numunelerinin çapı ile aynı seçilmiştir. Buna göre 8 cm çapında kar küreleri oluşturulmuştur. Eksenel simetri olması nedeniyle yarım küre kullanılmıştır. Yarım küreler aşağıda şekli verilen numune hazırlama aparatı ile oluşturulmuştur. Bu kürenin alt kısmı yalıtılarak deneyler yapılmıştır.

3.1 Deney Tesisatı

Deney sistemi Dizayn Grup ATGM (Araştırma ve Teknoloji Geliştirme Müdürlüğü) laboratuvarlarında kurulmuştur.

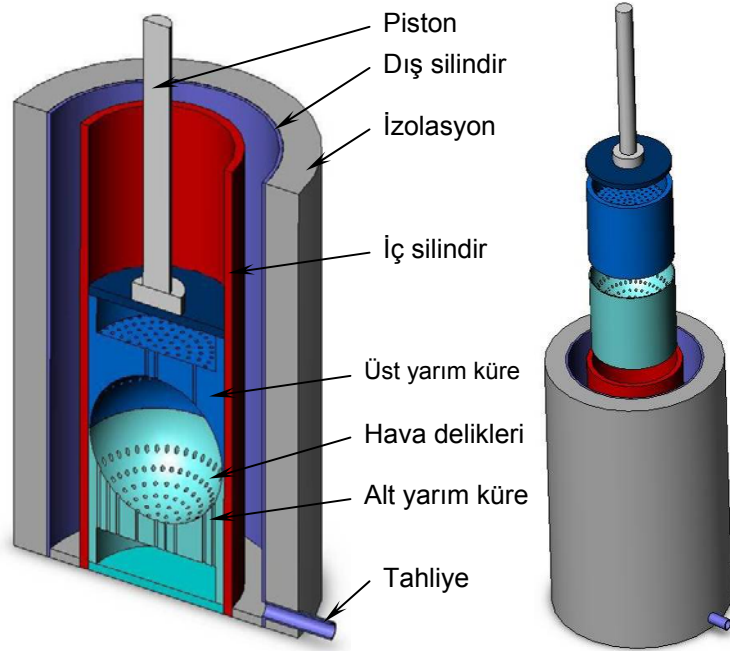
3.1.1 Numune Hazırlama Aparatı

Deney numuneleri hazırlamak için kar sıkıştırma aparatı hazırlanmıştır. Sıkıştırma aparatının şekli aşağıda verilmiştir. Sıkıştırma esnasında dışarıya doğru olan ısı kaçaklarının engellenmesi amacıyla sistem iç içe iki silindir olarak dizayn edilmiştir. Dıştaki silindir dış ortamdan 3 cm kalınlığında poliüretan ile yalıtılmıştır. İki silindir arasına, 0 °C elde

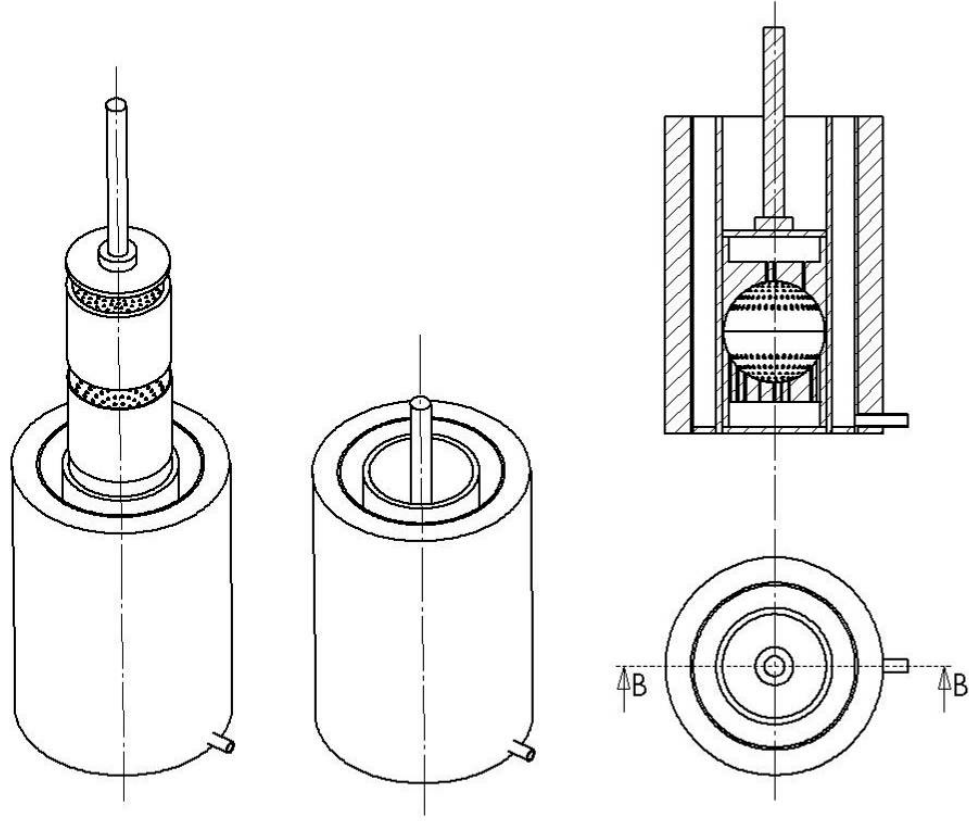
edilebilmesi için, su-buz karışımı konulmuştur. Sistemin alt kısmında yer alan tahliye musluğu sayesinde gerektiğinde içerisindeki su boşaltılabilmektedir. Deneylerin yapılması esnasında sistem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye şartlandırılmıştır. Numune hazırlama aparatı hem tam küre hem de yarım küre hazırlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Karın sıkıştırılması esnasında kar bünyesinde yer alan havanın dışarıya atılabilmesi için sıkıştırma aparatının küre yüzeyleri delikli olarak işlenmiştir. Aparat Dizayn Grup ATGM laboratuvarında yer alan ZWICK marka universal çekme cihazında kullanılabilecek şekildedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Deney tesisatı



Şekil 3.2: Numune hazırlama aparatı katı model görüntüsü

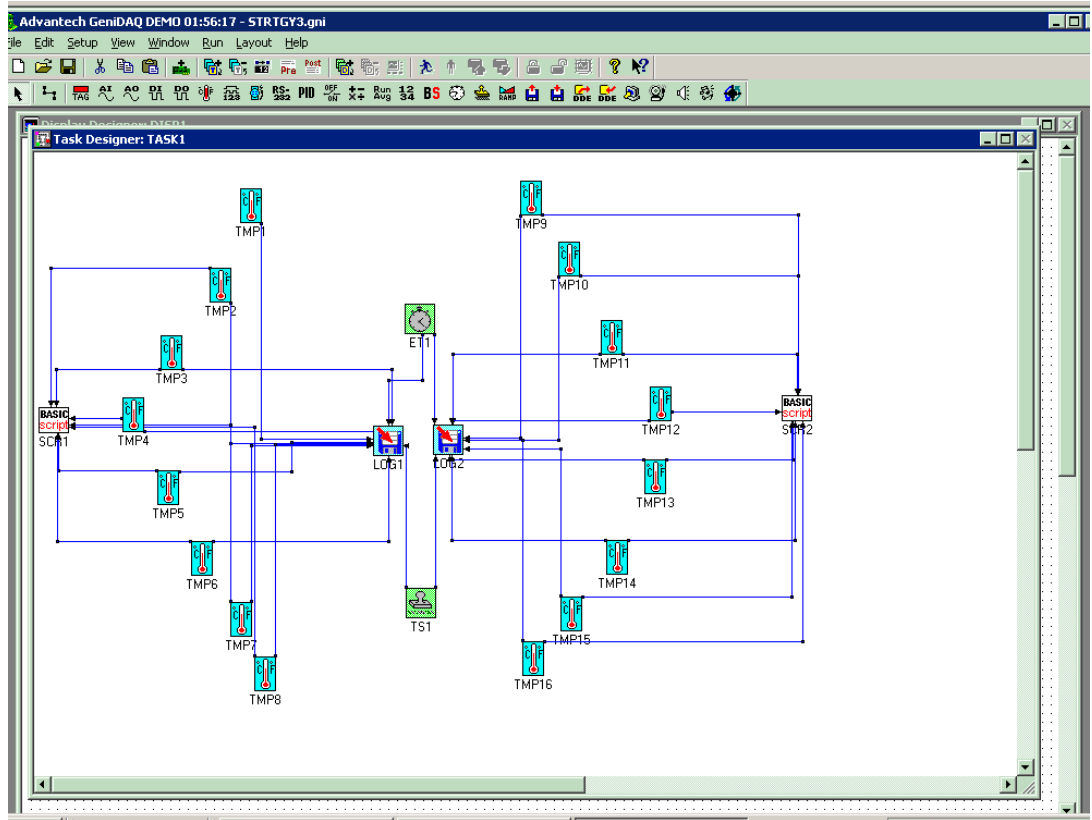


Şekil 3.3: Numune hazırlama aparatı teknik çizim

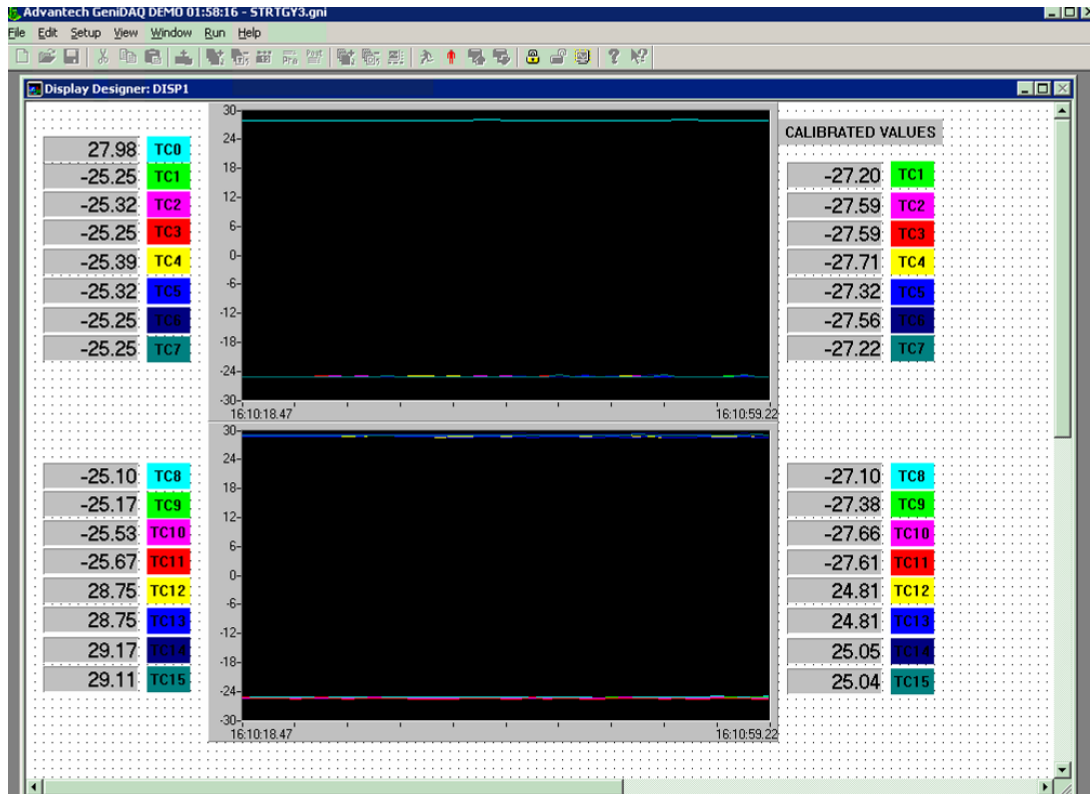
Sıkıştırma işlemi bu cihaz ile sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi üst pistonun hareketi ile gerçekleştirilmektedir. Üst piston yukarıya doğru hareket ettirilerek silindir gövdeden ayrılır ve içerisine istenilen miktarda kar konularak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Silindir bloğu ve pistonlar sarı malzemedan (prinç) CNC tezgahlarda işlenmiştir. Bu sistem ile 8 cm çapında küre ve yarım küre elde etmek mümkün olmaktadır.

3.1.2 Veri Toplama Sistemi

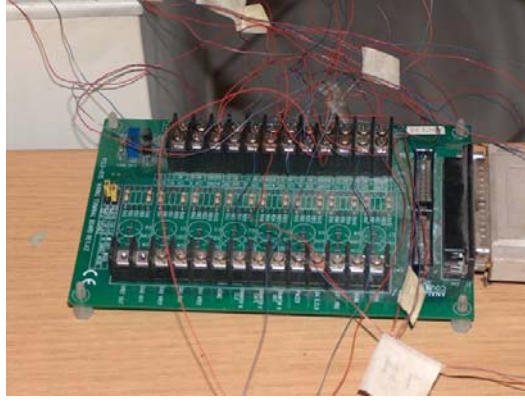
Veri toplama amacıyla aşağıda şekli verilen Advantech firmasının PCL-818HD model IO kartı kullanılmıştır. Bu kart aracılığıyla toplam 15 kanaldan sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Dataların bilgisayar vasıtasıyla okunabilmesi için Advantech firmasının GeniDAQ adlı programı ile bir arabirim yazılmıştır. Bu arabirim vasıtasıyla kalibrasyon fonksiyonları otomatik olarak ölçülen değerlere uygulanmaktadır. IO kart aracılığıyla deney sisteminden her saniyede bir okuma yapılabilmektedir. Ayrıca okunan her değer bir text dosyasına kaydedilmektedir. Kaydedilen tüm değerler Excel 2003 ve Sigma Plot 9.0 kullanılarak işlenmiştir.



Şekil 3.4: GeniDAQ'ta yapılan programın ekranı



Şekil 3.5: GeniDAQ'ta sıcaklık değişimlerinin izlendiği görüntü ekranı



Şekil 3.6: Data toplama kartı Adventec PCL-818HD model IO kartı

3.1.3 Şartlandırma Sistemleri

Deneyler esnasında hem 0 °C'ye hem de -20 °C'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle iki ayrı soğutma sistemi kullanılmıştır. 0 °C elde edebilmek için bir buz dolabının derin dondurucusu kullanılmıştır. Burada buzdolabının mekanik termostatu devre dışı bırakılarak yerine ENDA marka sıcaklık kontrolörü kullanılmıştır. Bu cihaz vasıtasıyla kabinin sıcaklığı okunmakta ve referans değer ile karşılaştırılarak kompresör kontrol edilmektedir. Bu şekilde kabin istenilen sıcaklıkta tutulmuştur.

-20 °C elde edebilmek için Dizayn Grup ATGM laboratuvarında bulunan endüstriyel tip derin dondurucu kullanılmıştır. Kalibrasyon dataları Ek l'da verilmiştir.

3.1.4 Hassas Terazi

Deney numunelerinin tartılması için hassas terazi kullanılmıştır. METTLER TOLEDO marka bu terazinin hassasiyeti $\pm 0,1$ mg'dır. Cihaz 01/03/2005 tarihinde METKAL firmasına kalibre ettirilmiştir. Kalibrasyon dataları Ek l'da verilmiştir.



Şekil 3.7: Hassas terazi

3.1.5 Çekme Cihazı

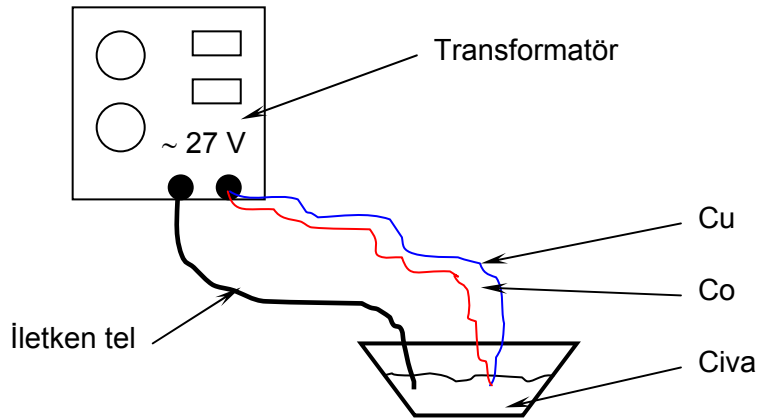
Numunelerin hazırlanması esnasında karın sıkıştırılması için kullanılmıştır. ZWICK markalı üniversal çekme cihazı 20 kN'luk bir cihazdır.



Şekil 3.8: Çekme cihazı

3.1.6 Termoelemanlar

Deneylerde kullanılan tüm termoelemanlar laboratuvarında hazırlanmıştır. T tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Cu (bakır) ve Co (konstanten), 0,2 mm çapında, bobin halindeki tellerden istenilen boylarda termoeleman yapılmıştır. Termoelemanların uçları, ayarlı transformatör kullanılarak 27 V uygulanan civa içerisinde ark kaynağı ile birleştirilmiştir.



Şekil 3.9: Termoelemanların uç kısımlarının kaynatıldığı tesisat

Termoelemanların uçlarının birleştirilmesi:

Transformatör 27 V'a ayarlanır. Bakır ve konstanten tellerin uç kısımları birbirine birleştirilir ve bir uç transformatördeki soketlerden birine takılır. Transformatörün diğer soketine ise iletken bir tel takılır. Telin diğer ucu

civa içerisine daldırılır. Termoelemanların birbirine bağlanmış boşta kalan ucu civa içerisine daldırılınca kısa devre oluşur. Ark şeklinde açığa çıkan enerji ile termoelemanların uçları bir top şeklinde birbirine kaynar.

3.1.7 Referans Termometre

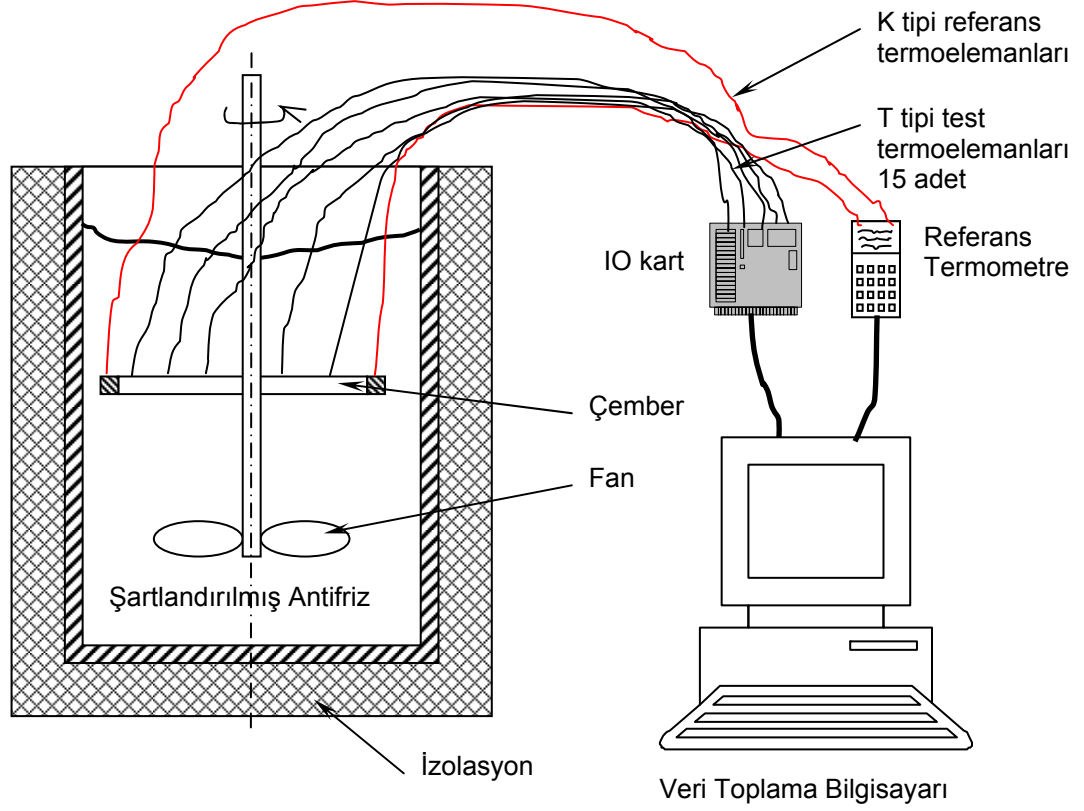
Hazırlanan tüm termoelemanlar OMEGA marka HH506R model termometre ile kalibre edilmiştir. Termometre üzerinde iki adet K tipi termoeleman yer almaktadır. Aynı anda iki ölçüm yapma imkanı doğmaktadır. Bu cihazın kalibrasyon dataları Ek I’da verilmiştir.



şekil 3.10: Referans termometre

3.2 Termoelemanların Kalibre Edilmesi

Termoelemanlar aşağıda şekli verilen sistem içerisinde kalibre edilmiştir. Sistemin dış kısmı 5 cm’lik poliüretan ile yalıtılmıştır. Sıcaklığın homojen olması için içeride bulunan sıvı pervane ile sürekli olarak karıştırılmaktadır. Kalibrasyona başlamadan önce $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye getirilen antifiriz kap içerisine boşaltılmıştır. Silindirik kap içerisine termoelemanlar ve referans termometrenin iki probu şekilde görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Sıvı içerisine daldırılan termoelemanlardan ve referans termometrelerden her saniyede bir ölçüm alınarak tüm datalar kaydedilmiştir. İşlem, sıvı sıcaklığı oda sıcaklığına gelene kadar devam ettirilmiştir. Yaklaşık 4 saat sürmüştür. Elde edilen datalara aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi 2. dereceden bir fonksiyon uydurulmuştur. Regresyon analizi Sigma Plot 9.0 ile yapılmıştır. Her bir termoeleman için yapılan regresyon analizinde elde edilen hata değerleri ve Denklem 3.1’de gösterilen fonksiyon katsayıları Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.11: Termoeleman kalibrasyon sistemi

Ölçülen değerlere uydurulan ikinci dereceden fonksiyon;

$$y = y_0 + a.T + b.T^2 \quad (3.1)$$

T sıcaklık

y_0 , a, b katsayılar

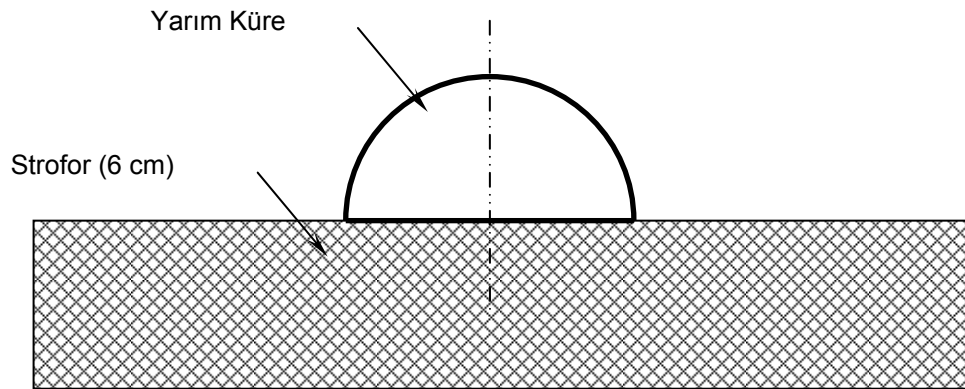
Tablo 3.1: Kalibrasyon Katsayıları

	y_0	a	b	R^2
TC1	-2,712527522	0,965217375	-0,00018063	0,9994
TC2	-2,753473648	0,969131494	-0,000465838	0,9994
TC3	-2,801746738	0,970996592	-0,000417767	0,9997
TC4	-2,776608952	0,970263395	-0,000461259	0,9998
TC5	-2,754235869	0,96544406	-0,00019668	0,9998
TC6	-2,841914191	0,968470304	-0,000418163	0,9995
TC7	-2,77837805	0,962564812	-0,000206905	0,9995
TC8	-2,595276466	0,963294311	-0,000503895	0,9984
TC9	-2,654624927	0,969366721	-0,00050215	0,9998
TC10	-2,754924123	0,967110331	-0,000328909	0,9996
TC11	-2,719330725	0,965100919	-0,000182835	0,9989
TC12	-2,760120759	0,96841901	-0,000325043	0,9994
TC13	-2,758719299	0,966075999	-0,000255075	0,9997
TC14	-2,836895741	0,969316295	-0,000456724	0,9997
TC15	-2,824887102	0,968005596	-0,000371897	0,9998

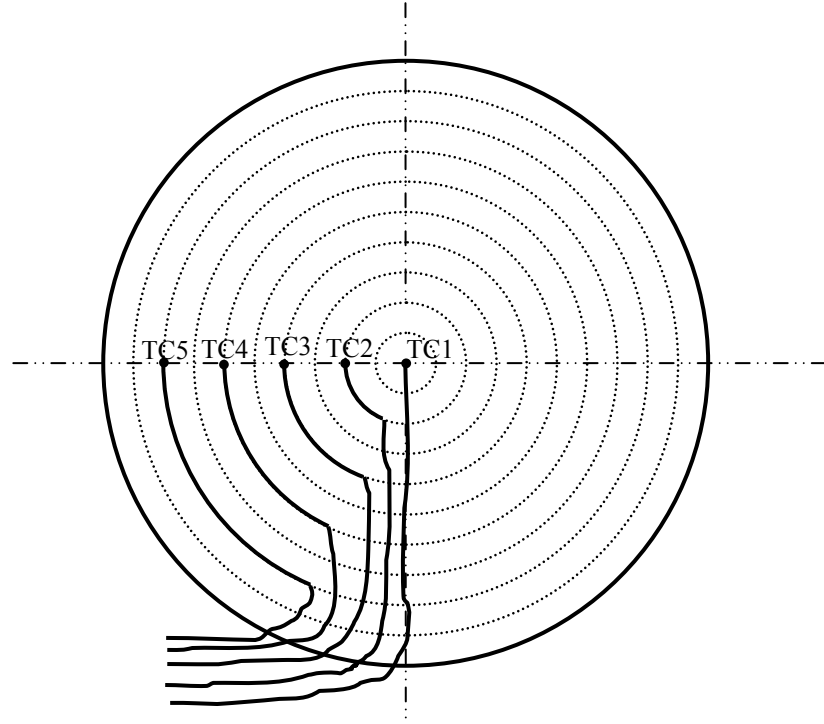
3.3 Deneylerin Yapılması (Deney Prosedürü)

Numune hazırlama aparatı önce -20°C 'ye şartlandırılır. Daha sonra şartlandırılan aparatın iki silindir arasında kalan hacmine buz + su karışımı yerleştirilir. Bu şekilde deney süresince aparatın sıcaklığının sıfırın altına düşmesi engellenmiş olur. Aparat çekme cihazına yerleştirilir. Piston geriye hareket ettirilerek içerisine tespit edilen miktarda -20°C 'ye şartlandırılmış kar konulur. Daha sonra kar 10 mm/dk hızla sıkıştırılır. Hazırlanan yarım küre formundaki deney numunelerinin ağırlıkları, şartlandırılacağı ortama konulmadan önce hassas terazi ile tartılır. Numuneler tam küreyi simüle etmek amacıyla alt kısımlarından yalıtılmıştır. Yalıtım için 6 cm et kalınlığında strofor kullanılmıştır (Şekil 3.12). Küre içerisindeki sıcaklık dağılımının tespit edilebilmesi için termoelemanlar strofor ile numune arayüzüne Şekil 3.13'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Deney hazırlama aparatından çıkarılan numuneler -20°C 'de şartlandırılan, üzerine termoeleman yerleştirilmiş stroforda belirtilen yere konulur. Daha sonra stroforla beraber deney numunesi (Şekil 3.14) 0°C 'deki ortama yerleştirilir. Numunenin tamamı 0°C 'ye gelene kadar beklendikten sonra tekrar hassas terazide tartılır. Bu aşamadan sonra numune 0°C 'deki suya sadece dış küre yüzeyleri gelecek şekilde daldırılarak bünye içerisine su geçişine izin verilir. Numune belirli bir süre sıfır derecedeki su içerisinde bekletilir ve çıkarılarak tekrar tartılır. Bu şekilde ne kadar su emdiği tespit edilir. Daha sonra sıfır dereceye şartlandırılmış olan strofor üzerine konularak -20°C 'deki derin dondurucuya konulur. Numunenin tamamının -20°C 'ye gelene kadar sıcaklık değişimleri kaydedilir.

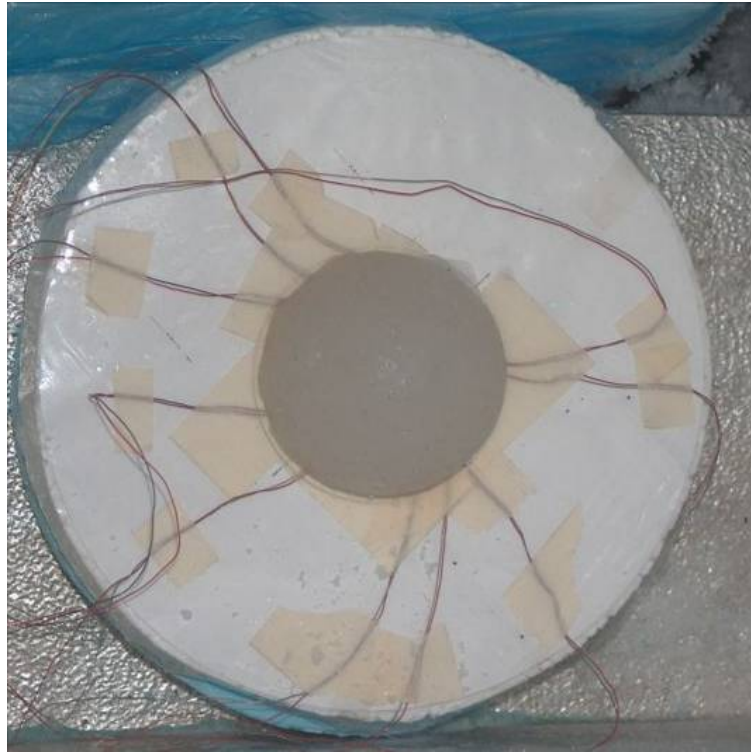
Yukarıda bahsedilen süreç farklı kar yoğunlukları (kürenin hacmi ve kütlesinden tespit edilir) için tekrar edilmiştir.



Şekil 3.12: Deney numunesi ve yalıtım



Şekil 3.13: Termoelemanların (TC1-TC5) yerleşim detayı



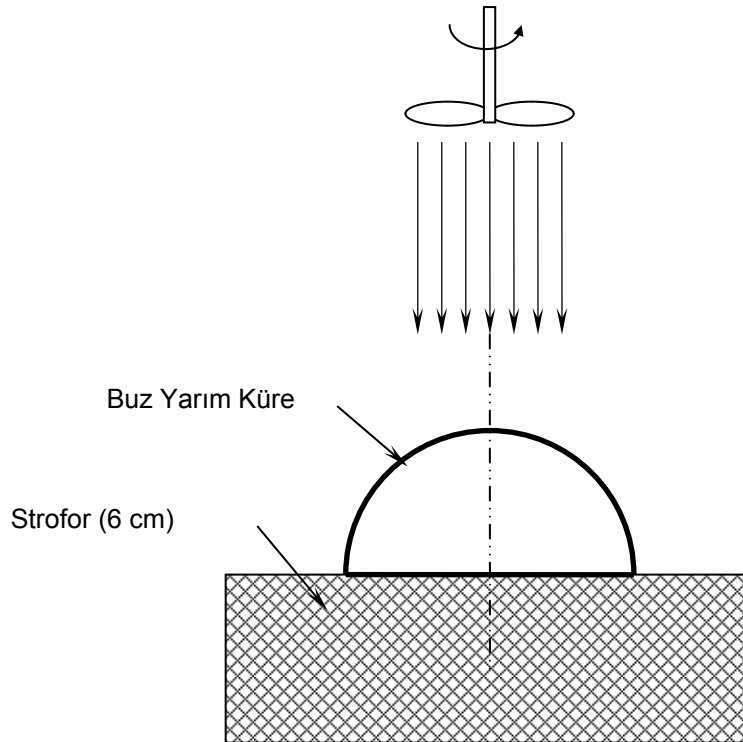
Şekil 3.14: Test anındaki deney numunesi

3.4 Deney Sonuçları

Yukarıda detaylı olarak tarif edilen deney sisteminde aşağıda sonuçları verilen 3 adet ön deney ve 14 adet nihai deney olmak üzere toplam 17 adet deney yapılmıştır.

Nihai deneylerden NDYK05A ve NDYK05B kodlu deneyler aynı buz küre üzerinde yapılmıştır. Buz küre, yarım küre şeklindeki kap içerisine doldurulan su dondurularak oluşturulmuştur. Su donarken genişlediği için kabın açık kısmında bir bombe oluşmaktadır. Yarım kürenin açık tabanında oluşan kütle kesilerek alınmış ve tam yarım küre oluşturulmuştur.

Buz küreler nihai deneylerin ilk altısında doğal taşınım ile diğer deneylerde ise zorlanmış taşınım ile soğutulmuştur. Soğutma, deney numunesi üzerine bir fanla soğutulmuş hava gönderilerek yapılmıştır. Şekil 3.15'te bu durum gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Buz küre üzerine test esnasında havanın üflenmesi

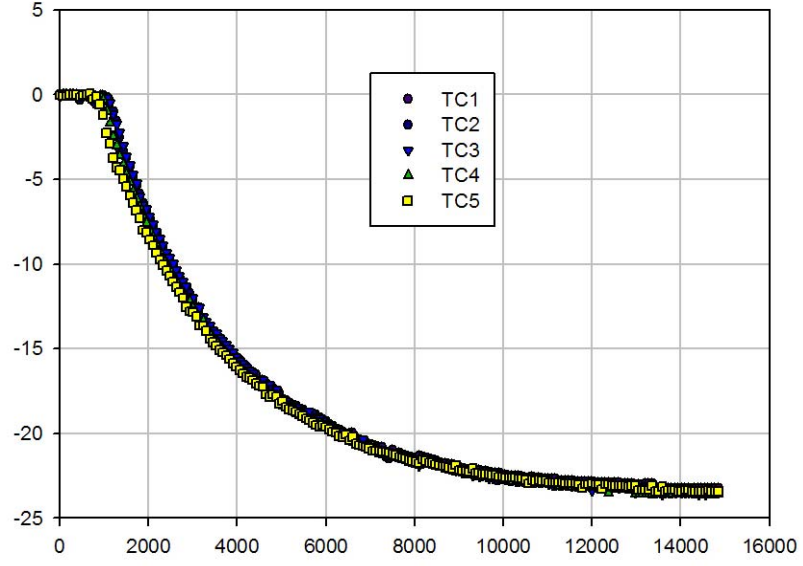
3.4.1 Ön Deneyler

Ön deneyler, deney sisteminde yer alan deney ekipmanlarının kontrolü ve deney prosedürünün oturtulması amacıyla yapılmıştır. Aşağıda bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir. Deney süresi boyunca her bir saniyede

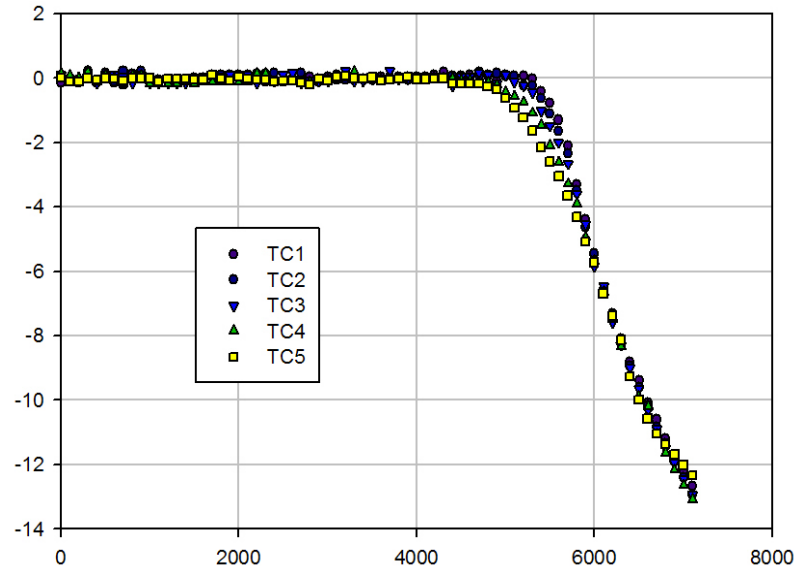
tüm termo-elemanlardan kayıt alınmıştır. Aşağıda verilen eğriler bu kayıtlar kullanılarak Sigma Plot 9.0'da oluşturulmuştur.

Tablo 3.2: Deney numuneleri

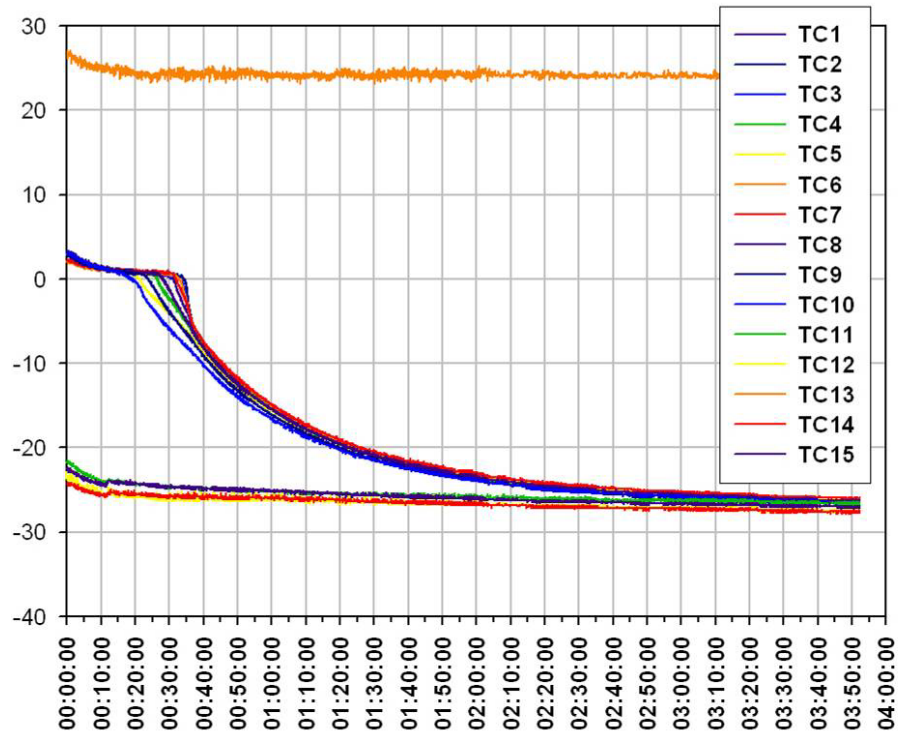
No	Numune Kodu
1	ÖDYK01
2	ÖDYK02
3	ÖDYK03



Şekil 3.16: ÖDYK01- Kar kürenin soğuma eğrileri



Şekil 3.17: ÖDYK02- Kar kürenin soğuma eğrileri



Şekil 3.18: ÖDYK03- Kar kürede sıcaklıkların zamanla değişimi

3.4.2 Nihai Deneyler

Kardan çeşitli yoğunluklarda elde edilen yarım küreler yukarıda anlatılan deney prosedürüne uygun olarak test edilmiştir.

Tablo 3.3: Deney numunelerine ait kütleler

No	Numune Kodu	Numunenin İlk Kütlesi (g)	Numunenin Son Kütlesi (g)	Emilen Su Miktarı (g)
1	NDYK01	116,0020	116,7065	-0,7045
2	NDYK02	71,5214	113,7580	-42,2366
3	NDYK03	119,7100	129,4035	-9,6935
4	NDYK04	94,5777	118,5375	-23,9598
5A	NDYK05A	113,7185	113,7185	0,0000
5B	NDYK05B	113,7185	113,7185	0,0000
6	NDYK06	92,1263	107,4050	-15,2787
7	NDYK07	87,1012	119,4969	-32,3957
8	NDYK08	68,5590	110,5161	-41,9571
9	NDYK09	87,9126	110,9306	-23,0180
10	NDYK10	86,3550	109,1539	-22,7989
11	NDYK11	105,3910	106,4760	-1,0850
12	NDYK12	102,6930	102,7022	-0,0092
13	NDYK13	58,8255	113,0205	-54,1950
14	NDYK14	78,1992	111,4466	-33,2474

0 °C'deki buzun yoğunluğu $\rho_{\text{buz}} = 920 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu değer kullanılarak aşağıda verilen hesap yöntemiyle deney numunelerinin yoğunlukları ve gözeneklilikleri bulunmuştur. Bulunan sonuçlar Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: Deney numunelerine ait yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

No	Numune Kodu	İlk Yoğunluk (g/cm ³)	Son Yoğunluk (g/cm ³)	İlk Gözeneklilik %	Son Gözeneklilik %
1	NDYK01	0,865	0,865	5,97	5,97
2	NDYK02	0,5336	0,849	42	7,7
3	NDYK03	0,893	0,965	2,93	~0
4	NDYK04	0,706	0,884	23,26	3,9
5A	NDYK05A	0,848			
5B	NDYK05B	0,848			
6	NDYK06	0,687	0,801	25,33	12,93
7	NDYK07	0,6498	0,892	29,37	3,04
8	NDYK08	0,511	0,825	44,45	10,32
9	NDYK09	0,656	0,827	28,7	10,1
10	NDYK10	0,644	0,814	30	11,5
11	NDYK11	0,786	0,794	14,5	13,7
12	NDYK12	0,766	0,766	16,7	16,7
13	NDYK13	0,439	0,843	52,3	8,3
14	NDYK14	0,583	0,831	36,6	9,6

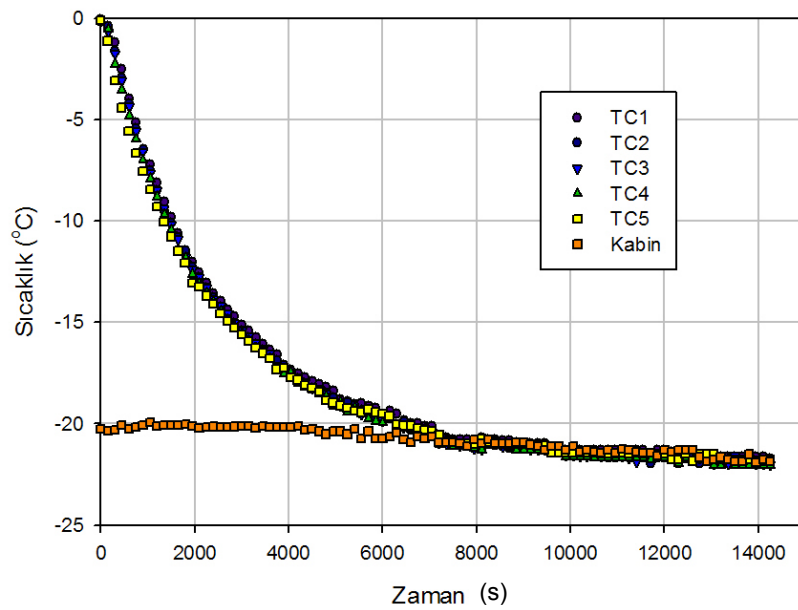
Sırası ile yarım kürenin hacmi (V), yoğunluğu (ρ) ve gözenekliliği (ϕ) aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır;

$$V = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 = 0,5 \frac{4}{3} \pi 4^3 = 134,04 \text{ cm}^3 \quad (3.2)$$

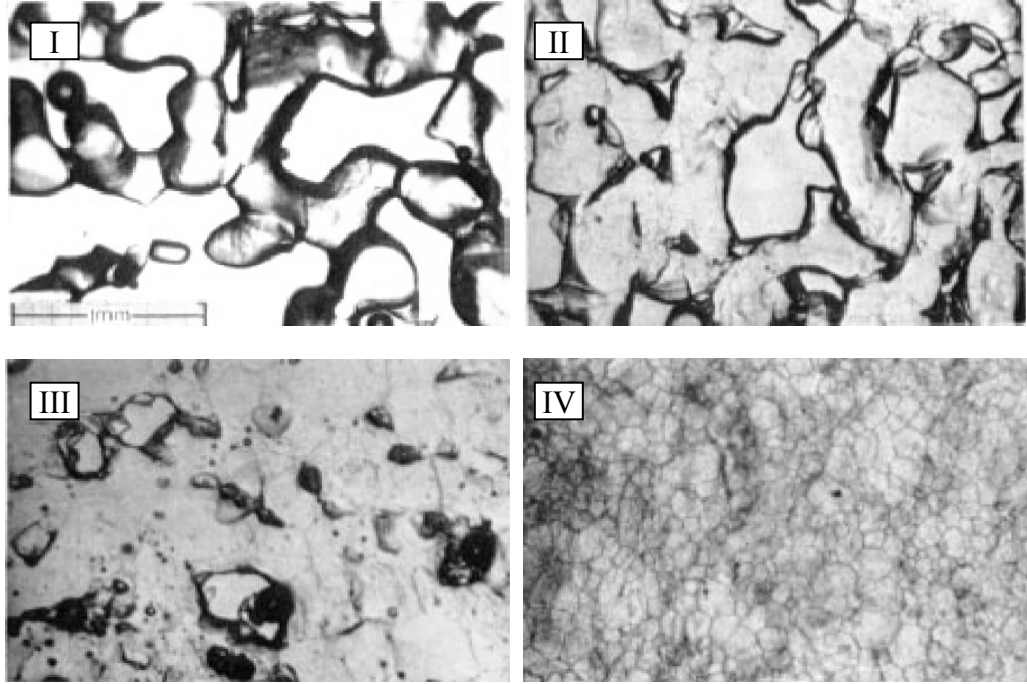
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{buz}}} \quad (3.4)$$

m kar kürenin kütlesi

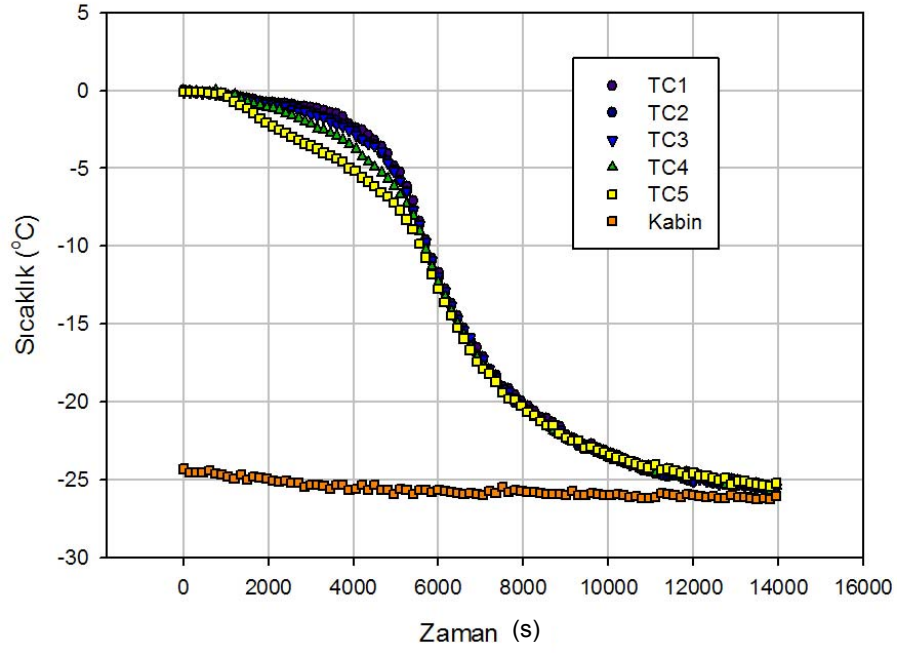
**Şekil 3.19:** NDYK01- yarım kürede sıcaklığın zamanla değişimi

Şekil 3.19'da soğuma eğrisi verilen numunede fansız soğutma yapılmıştır. Numunenin ilk ve son kütlesi aynı kalmıştır ($m = 116$ g). Yarım küre hiç su emmemiştir. [15] nolu referansta da belirtildiği gibi ilk yoğunluk $0,82$ g/cm³'ten büyük olduğu ($0,865$ g/cm³) için su emme söz konusu olmamıştır. Gözenekler arasındaki boşluklar birbiri ile temas etmemektedir. Şekil 3.20'de karın sıkıştırma ile gözenekliliğinin değişimi verilmiştir. Sıkıştırma miktarı arttıkça karın içerisinde yer alan, suyun hareket edebileceği boşlukların oluşturduğu kanallar giderek kapanmaktadır. Bu durum deneylerde de görülmüştür. Artan yoğunlukla (azalan gözeneklilik) karın emebildiği su miktarı azalmıştır. Buradan da görüldüğü gibi sıkıştırma sonucunda boşlukların birbiri ile olan bağlantıları kesilmektedir. Bu nedenle de ara bölgelerde su ve nem transferi söz konusu olmamaktadır.

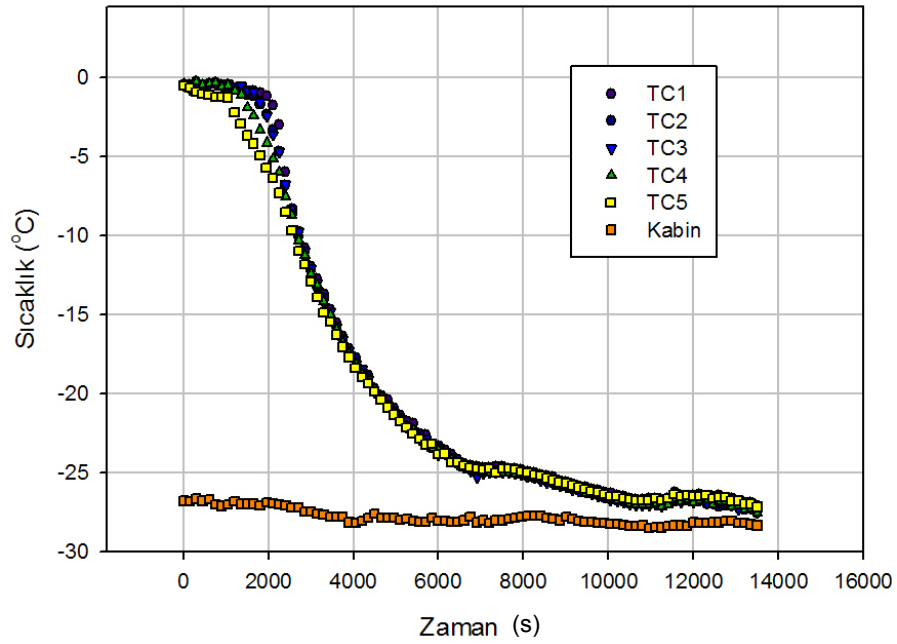


Şekil 3.20: Farklı sıkıştırma aşamalarında karın mikro yapısı (I- $0,35$ g/cm³ kar, II- $0,64$ g/cm³ kar, III- $0,78$ g/cm³ kar ve IV- Buz) [52]

Şekil 3.21'de soğuma eğrisi verilen numunede kar küre $\Delta m = 42$ g su emmiştir. Fansız soğutma yapılmıştır. İlk yoğunluk $\rho_1 = 0,53$ g/cm³ değeri $0,82$ g/cm³'ten küçüktür. Bünye içerisine su emildiği için soğuma eğrisinin karakteristiği Şekil 3.19'da görülen soğuma karakteristiğinden farklıdır. Denge daha uzun sürede söz konusudur. Çünkü emilen suyun faz değişimi için daha fazla enerji vermek gerekmektedir.

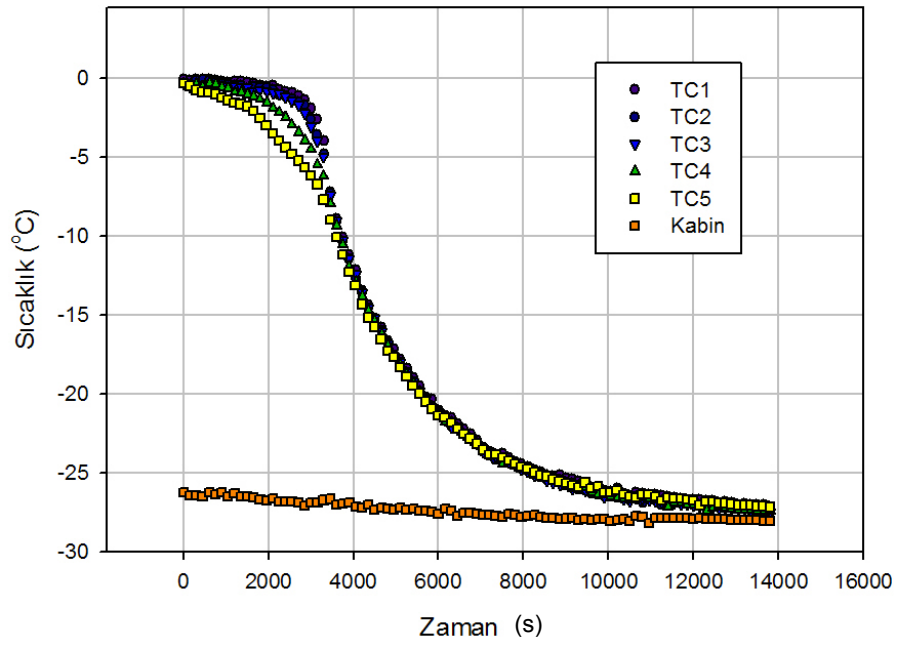


Şekil 3.21: NDYK02- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi



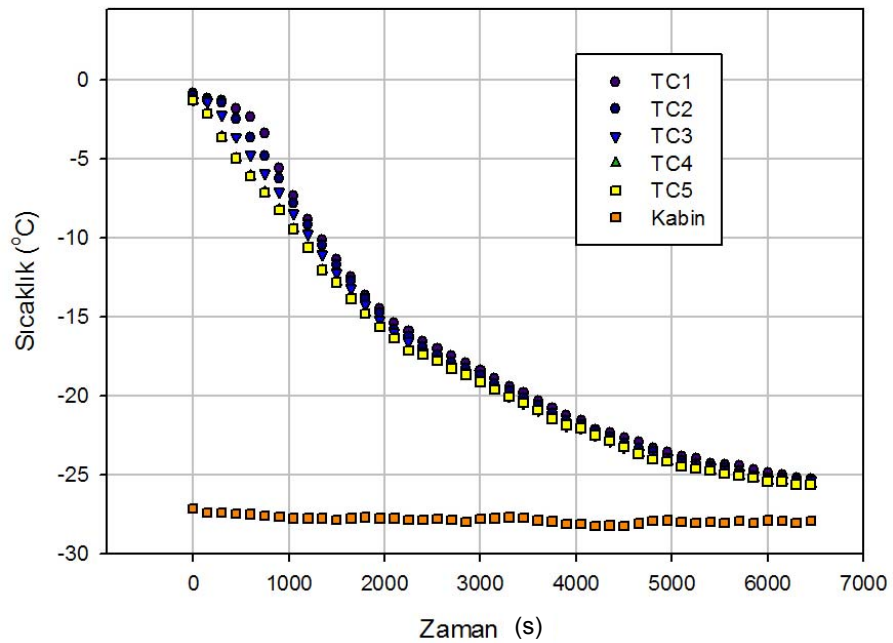
Şekil 3.22: NDYK03- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 3.22'de soğuma eğrisi verilen yarım kar küre fansız olarak soğutulmuştur. İlk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ 'ten büyük olduğu için numune çok az, ihmal edilebilir miktarda su emmiştir. Eğrinin genel karakteristiği Şekil 3.19'da verilen eğri karakteristiği ile benzerdir. Sistem yaklaşık 4 saatte dengeye gelmiştir.

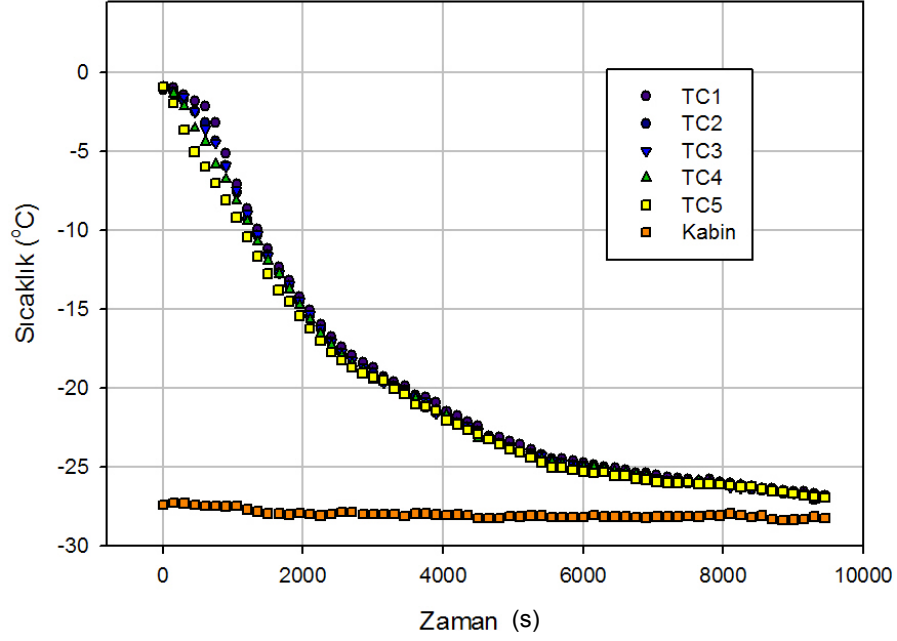


Şekil 3.23: NDYK04- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 3.23'te soğuma eğrisi verilen deney numunesine ait soğuma davranışı görülmektedir. Soğutma fansız olarak yapılmıştır. İlk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ 'ten küçük olduğu için yarım küre bünyesine $\Delta m = 24 \text{ g}$ su almıştır. Sistem yaklaşık 4 saatte dengeye gelmiştir.

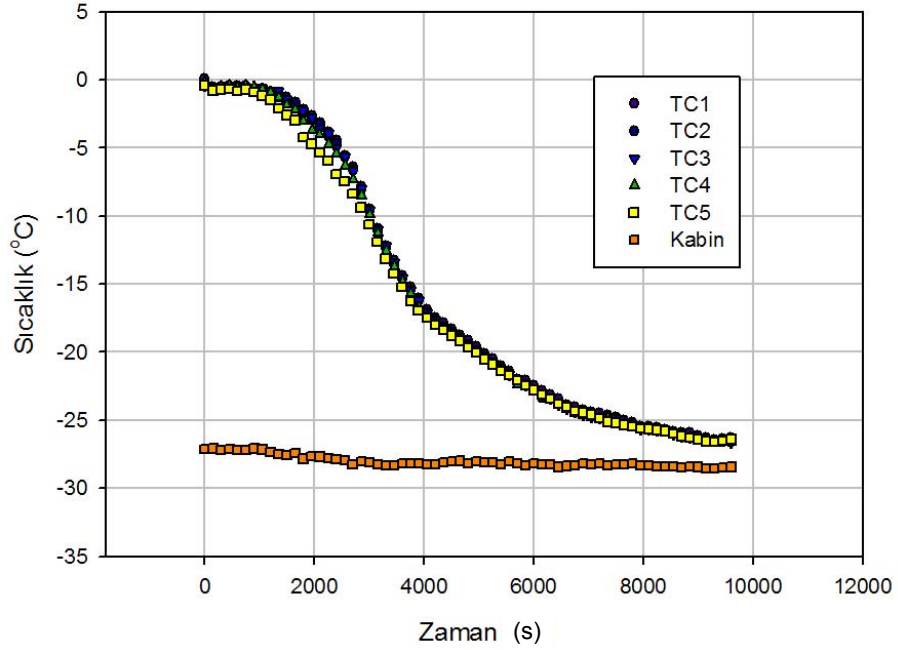


Şekil 3.24: NDYK05A- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi



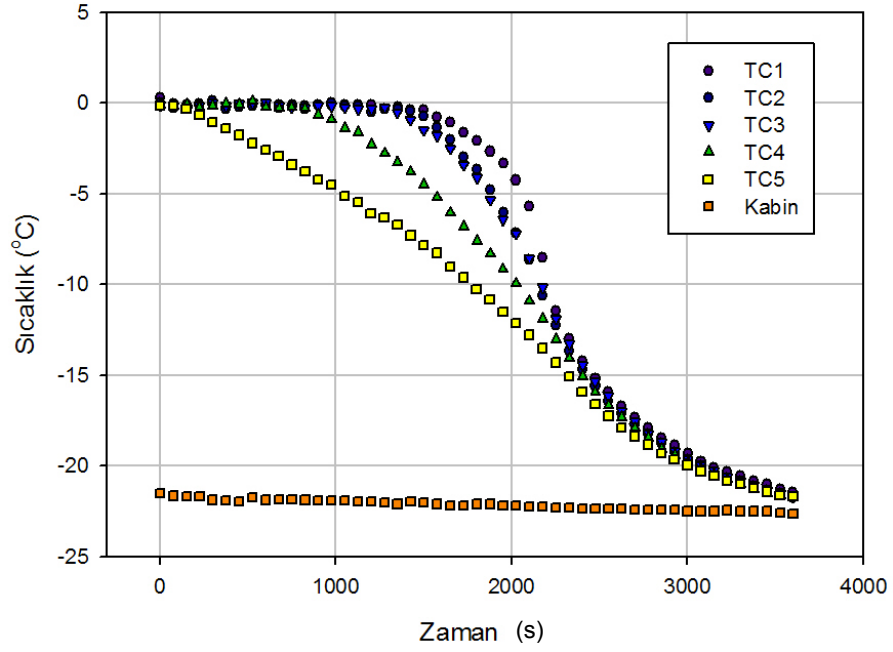
Şekil 3.25: NDYK05B- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te sıfır derecedeki buz yarım kürenin soğutulması süresince yarım küre içerisindeki sıcaklık dağılımları verilmiştir.



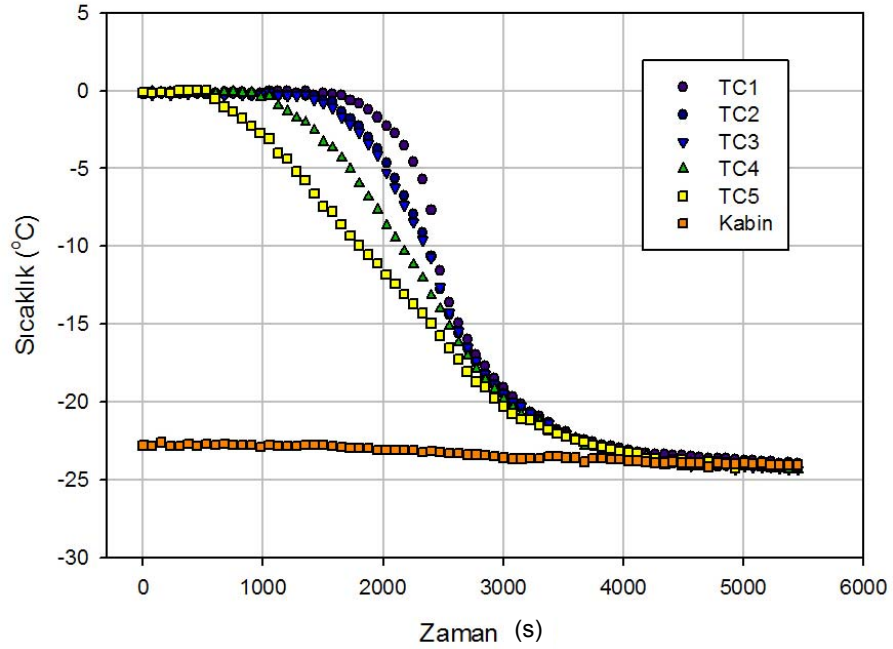
Şekil 3.26: NDYK06- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

Şekil 3.26'da kar yarım kürenin fansız soğutma halindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. İlk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ 'ten küçük olduğu için $\Delta m = 15 \text{ g}$ su kar yarım küre içerisine nüfuz etmiştir. Eğrinin karakteristiği diğer su emen kar yarım kürelerin karakteristiği ile benzerdir.



Şekil 3.27: NDYK07- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

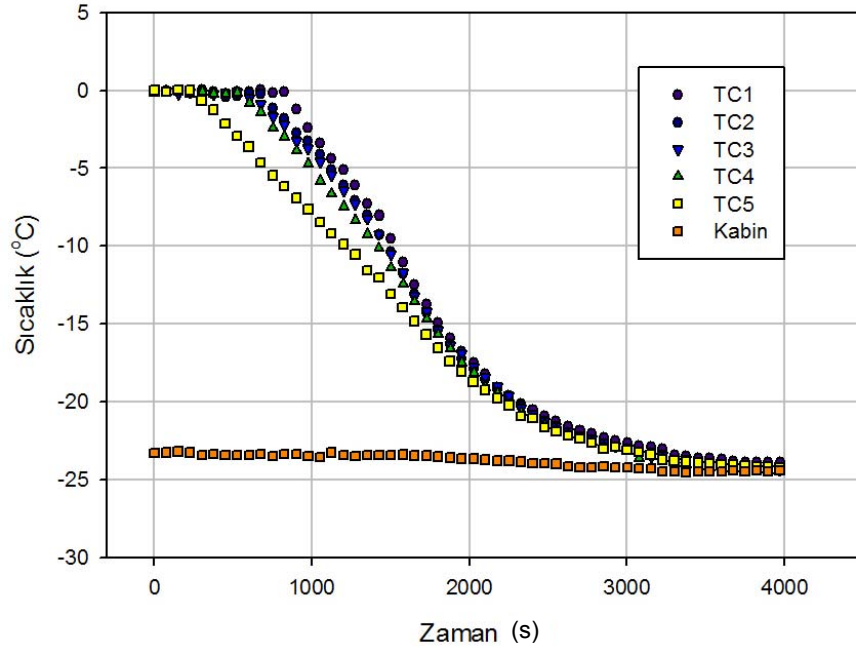
Şekil 3.27’de fanlı soğutma halindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. İlk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ ’ten küçük olduğu için yarım küreye su girişi olmuştur. $\Delta m = 32 \text{ g}$ dır. Yarım küre yaklaşık 2 saatte dengeye gelmiştir. Eğrilerin arası daha açıktır.



Şekil 3.28: NDYK08- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

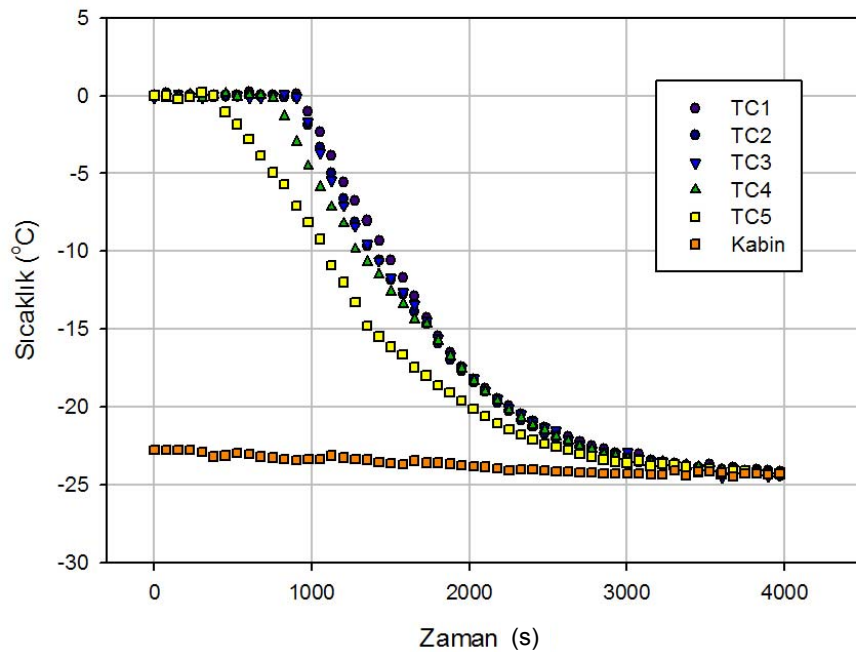
Şekil 3.28’de ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0,51 \text{ g/cm}^3$ olan yarım küreye ait sıcaklık dağılımı görülmektedir. İlk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ ’ten küçük olduğu için

bünye içerisine su girişi olmuştur. $\Delta m = 42$ g'dır. Soğutma fanlı olarak yapılmıştır.



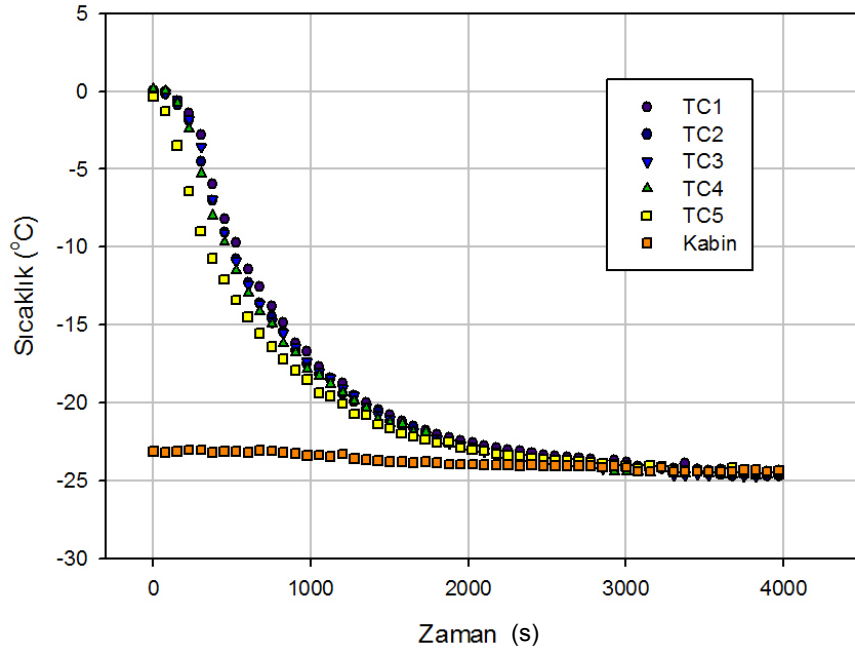
Şekil 3.29: NDYK09- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 3.29'da ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0,65$ g/cm³ olan yarım kürenin soğutma sürecindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Emilen su miktarı $\Delta m = 29$ g dır. Soğutma fanlı olarak yapılmıştır.



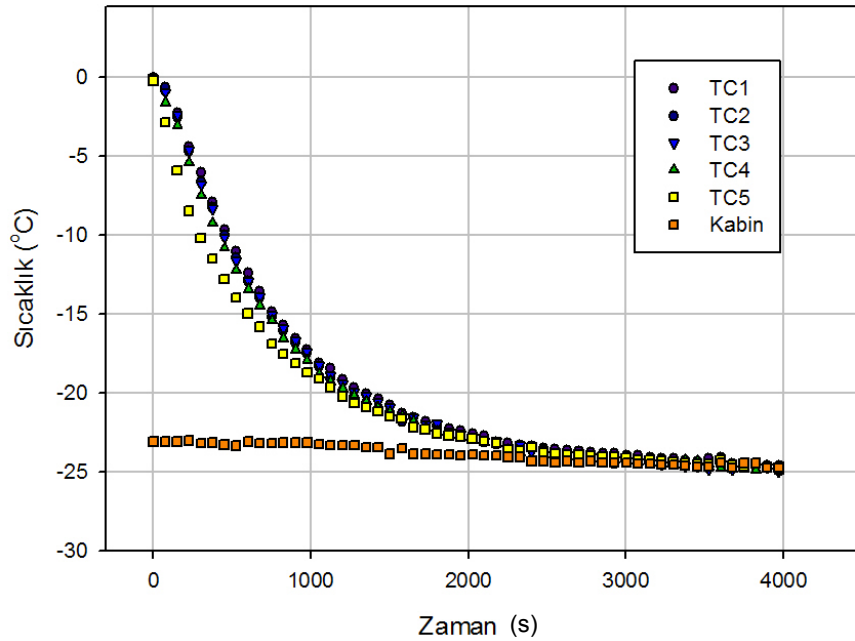
Şekil 3.30: NDYK10- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 3.30'da ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0,64 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin zamanla sıcaklık dağılımı verilmiştir. Emilen su miktarı $\Delta m = 23 \text{ g}$ dır.



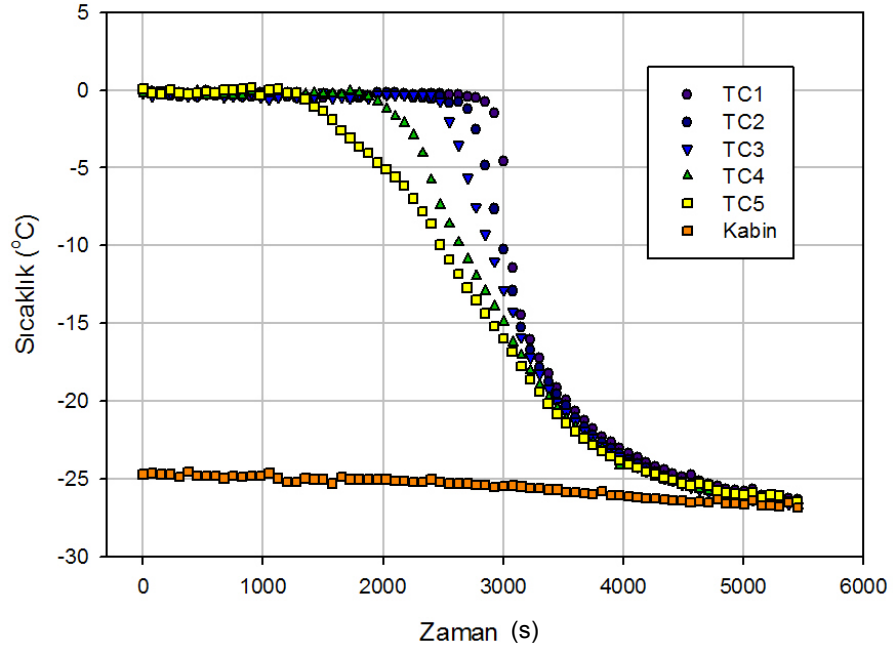
Şekil 3.31: NDYK11- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 3.31'de ilk yoğunluk $0,82 \text{ g/cm}^3$ 'ten yüksek olduğu için yarım küre su emmemiştir. Eğriler birbirine yakındır ve yaklaşık bir saatte hemen hemen dengeye ulaşılmıştır.



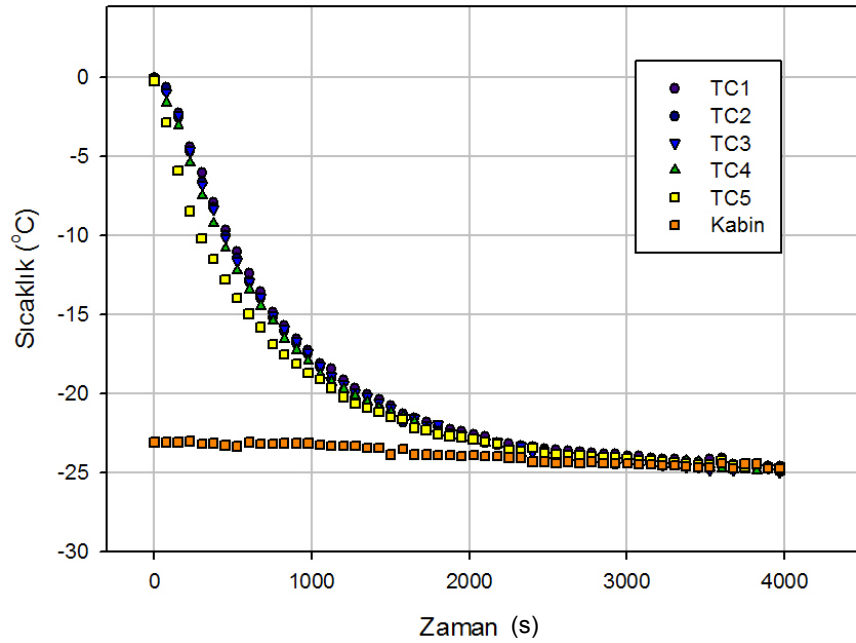
Şekil 3.32: NDYK12- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 3.32’de de Şekil 3.31’de olduğu gibi bünye içerisine, ilk yoğunluğun $0,82 \text{ g/cm}^3$ ’ten büyük olması nedeniyle su girişi olmamıştır. Eğriler her iki şekilde de görüldüğü gibi birbirine yakındır.



Şekil 3.33: NDYK13- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 3.33’te ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0,439 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin sıcaklık dağılımı görülmektedir. Emilen su miktarı fazla olduğu için soğuma daha uzun sürmüştür ve eğrilerin arası açılmıştır.

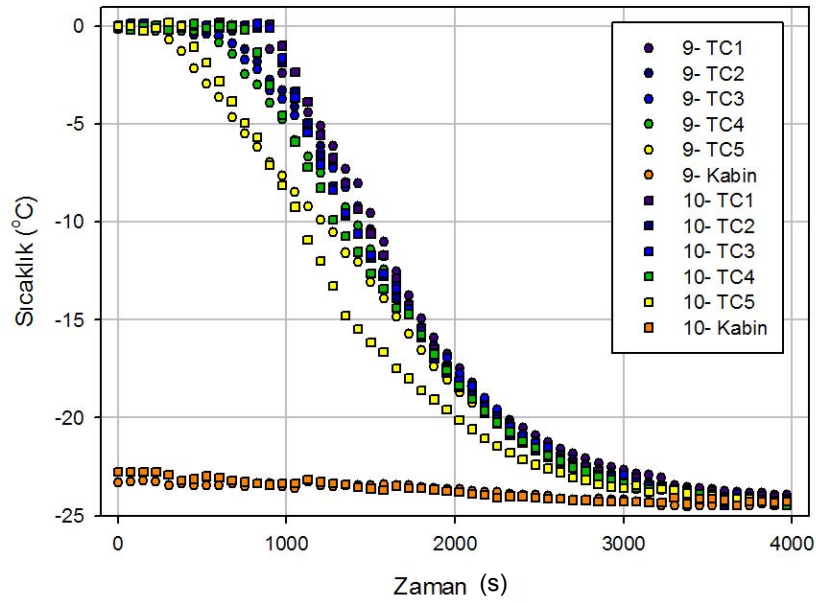


Şekil 3.34: NDYK14- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

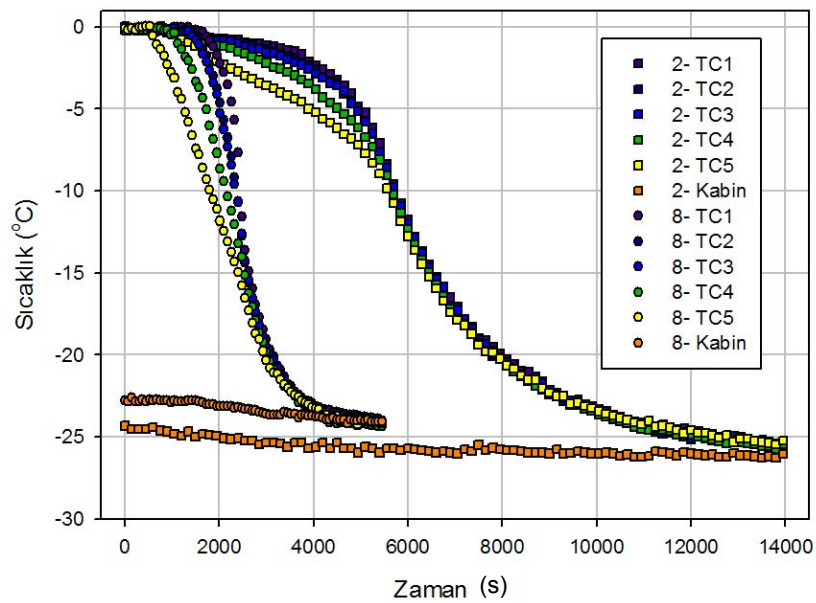
Şekil 3.34'te ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0,583 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bir önceki numuneye benzer bir karakteristik göstermektedir.

3.5 Deney Sonuçlarının Birbirleri İle Karşılaştırılması

Bu kısımda farklı koşullar için elde edilen deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar grafik olarak verilmiş ve davranışları her bir grafiğin altında izah edilmiştir.



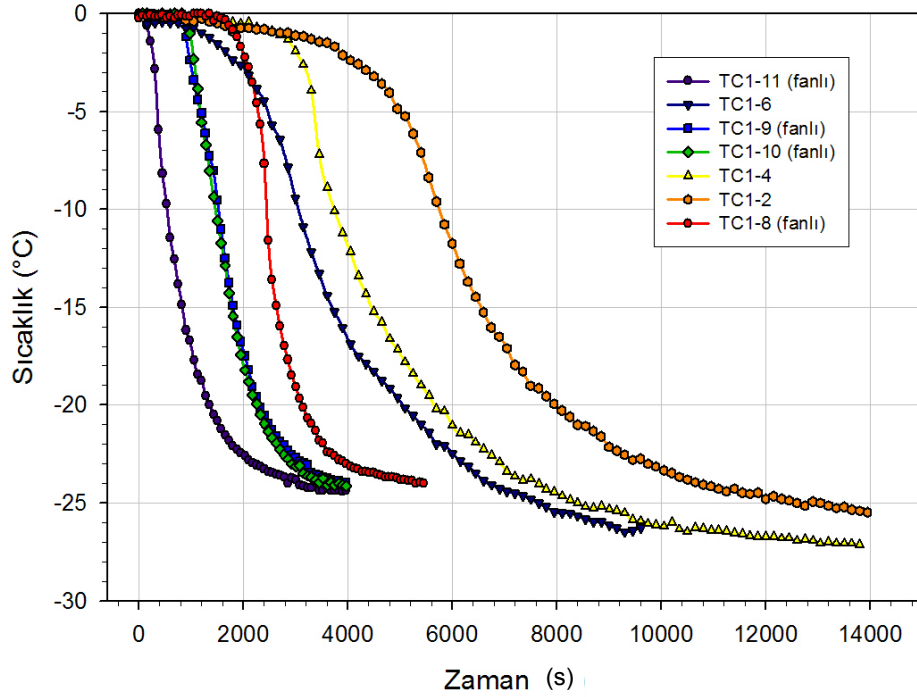
Şekil 3.35: 9 ve 10 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.36: 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması

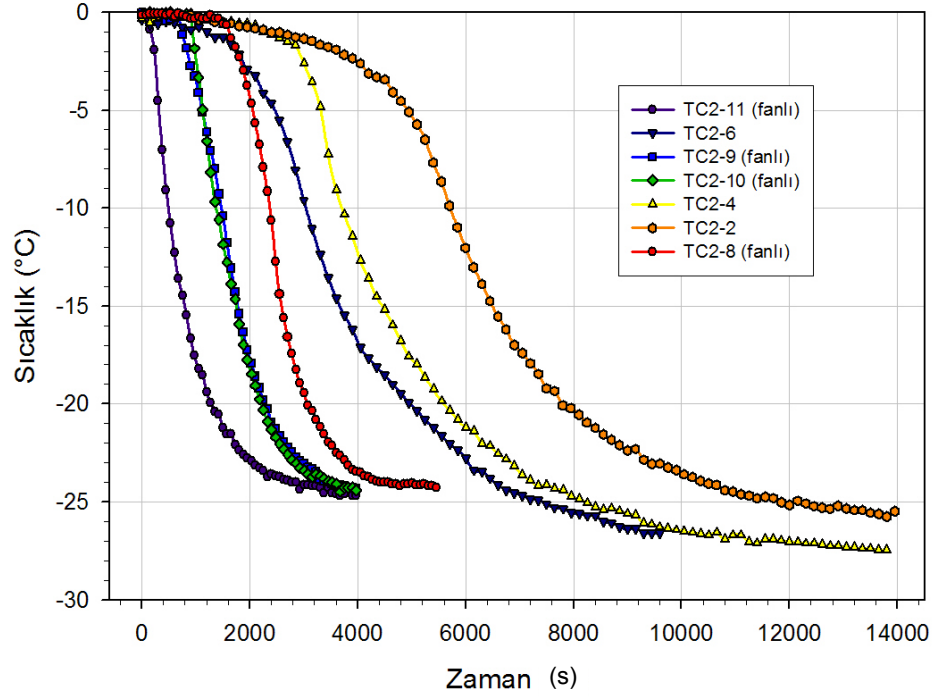
Eğrileri sırasıyla Şekil 3.29 ve Şekil 3.30'da verilen ve kütleleri hemen hemen aynı olan 9 ve 10 numaralı numunelerin zamanla sıcaklık değişimlerinin karşılaştırması Şekil 3.35'te verilmiştir. Her iki numunede de soğuma karakteristiği aynıdır.

Şekil 3.36'da ilk ve son yoğunlukları birbirine çok yakın olan 2 ve 8 nolu deney sonuçları karşılaştırılmıştır. 2 nolu deneyde kabin sıcaklığı biraz daha yüksektir. Buna rağmen fanlı soğutmanın neden olduğu yüksek taşınım ile ısı geçişi nedeniyle şekilden de görüldüğü gibi eğrilerin arası açıktır. Soğuma daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

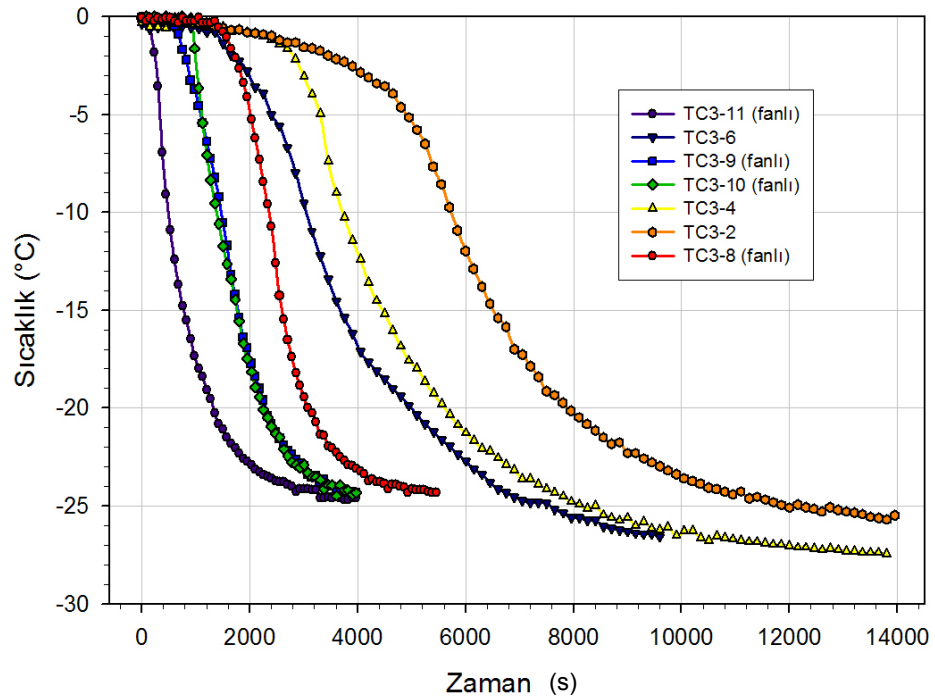


Şekil 3.37: x = 0'da 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.

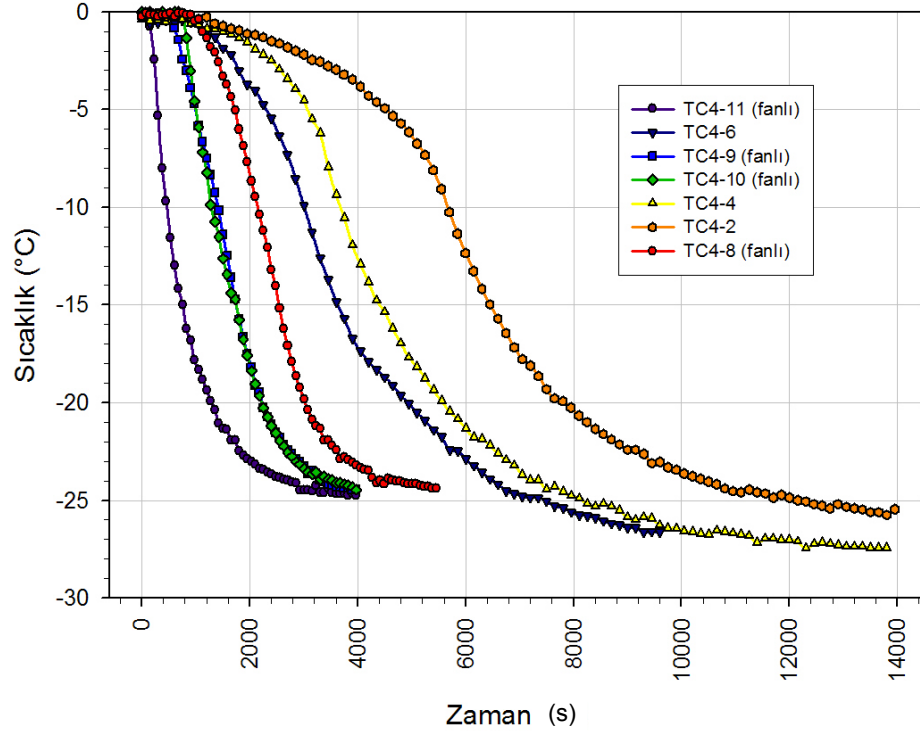
Şekil 3.37'de emilen su miktarının artışına göre grafik oluşturulmuştur. Yarım kürenin tam merkezindeki sıcaklık değişimleri 11, 6, 9, 10, 4, 2, ve 8 nolu numuneler için verilmiştir. Emilen su miktarı arttıkça soğuma süresinin arttığı eğrilerin ötelenmesinden görülmektedir. Fanlı soğutmaya maruz kalan 11 (1 g), 9 (23 g) , 10 (23 g) ve 8 (42 g) nolu numuneler emilen su miktarının artışına göre sıralanmıştır. 9 ve 10 nolu numunelerin eğrileri emilen su miktarlarının aynı olması nedeniyle çakışmıştır. 6 (15 g), 4 (24 g) ve 2 (42 g) nolu numunelerde de benzer bir davranış vardır. Bu numunelerde de emilen su artışlarına göre sıralama yapılmıştır. Su miktarı arttıkça soğuma süresi uzamaktadır.



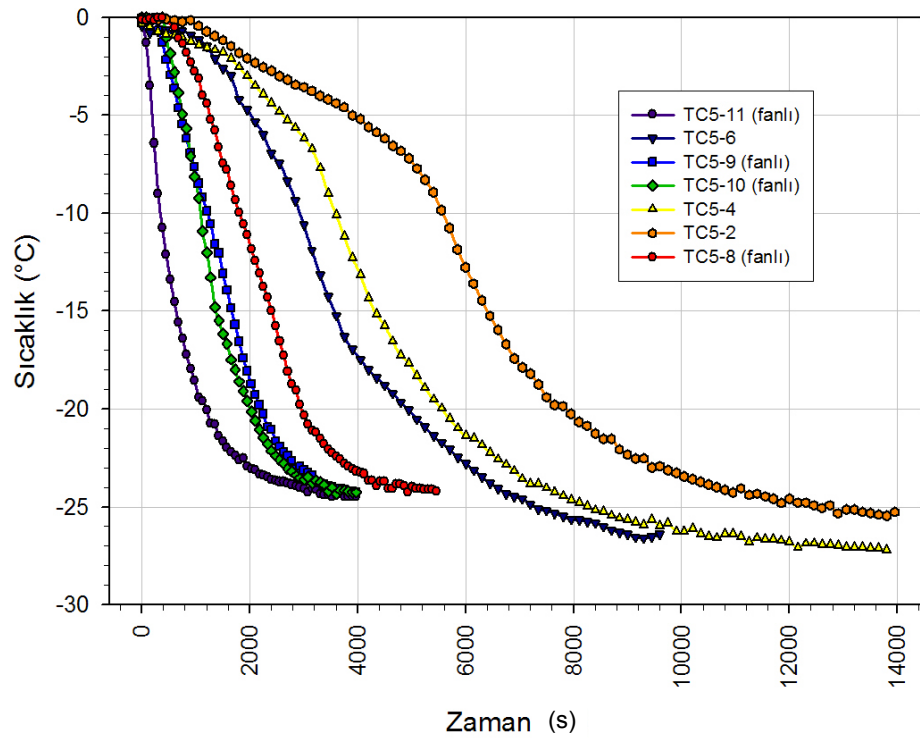
Şekil 3.38: $x = 8$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.39: $x = 16$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.



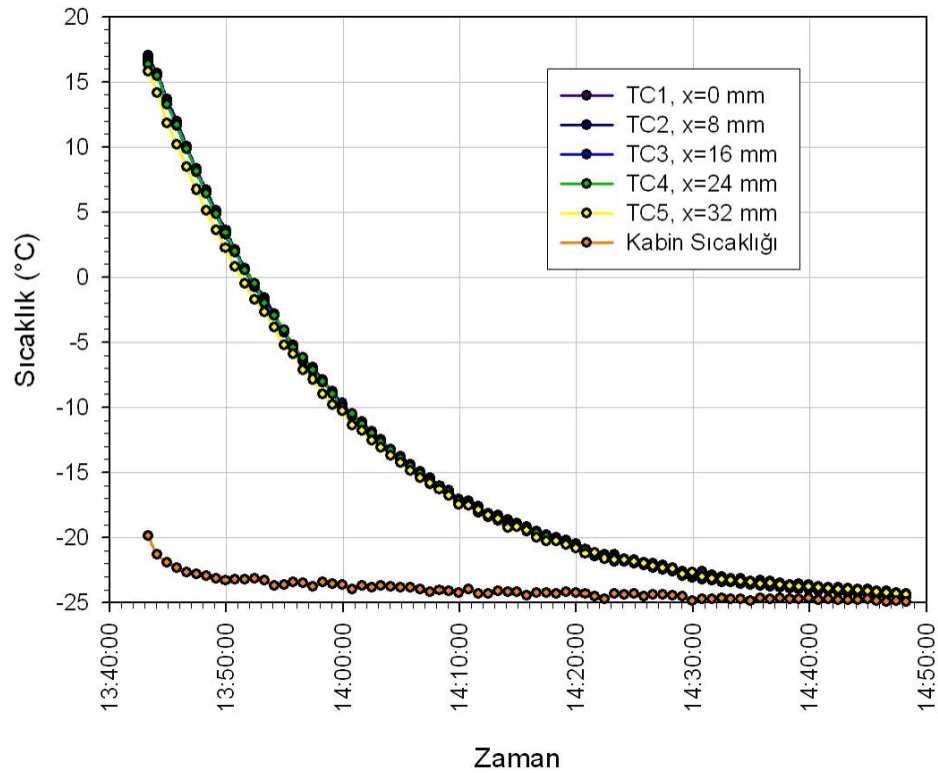
Şekil 3.40: $x = 24$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.41: $x = 32$ mm'de 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması.

3.6 Isı Taşınım Katsayısının Belirlenmesi

Deneysel dataların değerlendirilebilmesi için hava tarafı ısı taşınım katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Isı taşınım katsayısını belirlemek üzere aynı deney sisteminde ısı iletim katsayısı çok yüksek alüminyum yarım küre kullanılmıştır. Oda sıcaklığındaki alüminyum yarım küre, deneylerin yapıldığı ortama konulmuş ve zamanla sıcaklık değişimi kaydedilmiştir. Aşağıdaki grafikte deney sonuçları görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, herhangi bir zamanda tüm kütlenin aynı sıcaklıkta olduğu kabul edilebilir.



Şekil 3.42: Alüminyum yarım kürenin sıcaklığının zamanla değişimi

$$\delta Q = mc dT = hA(T - T_{\infty})dt \quad (3.5)$$

$$\frac{mc}{hA} \int \frac{1}{(T - T_{\infty})} dT = \int dt \quad (3.6)$$

$$h = \frac{mc}{A} \frac{\ln \left[\frac{T_2 - T_{\infty}}{T_1 - T_{\infty}} \right]}{\Delta t} \quad (3.7)$$

m; Alüminyum kürenin kütlesi

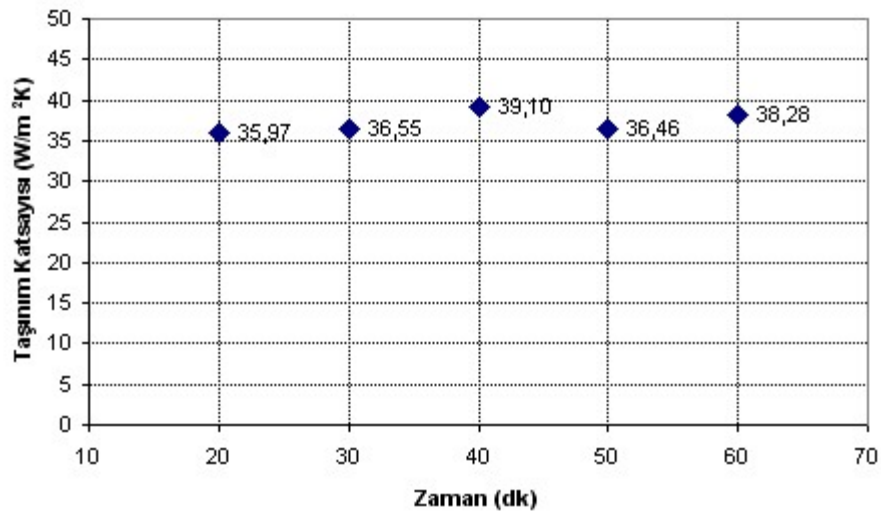
$$m = \rho \cdot V = \rho \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (3.8)$$

$$\rho_{al} = 2702 \text{ kg/m}^3, \quad c_{al} = 903 \text{ J/kgK}$$

$$m = 2,702 \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi 4^3 = 362,18 \text{ g} = 0,36218 \text{ kg} \quad (3.9)$$

$$A = \frac{1}{2} 4\pi R^2 = 2\pi 4^2 = 100,53 \text{ cm}^2 \quad (3.10)$$

Formülasyonu kullanılarak ortalama ısı taşınım katsayısı $37 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir. Ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplanırken ortam sıcaklığının hemen hemen sabit kaldığı 20. dakikadan sonraki deneysel değerler kullanılmıştır.



Şekil 3.43: Al Yarım Küre üzerinde taşınım katsayısının zamanla değişimi

Kütlenin belli bir sıcaklıkta her bölgesindeki sıcaklığın aynı olduğunu kabul edebilmemiz için Biot sayısının 0,1'den küçük olması gerekir [53]. Aşağıda Biot sayısı hesaplanmıştır.

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (3.11)$$

L = Hacim/Yüzey alanı olarak tarif edilmiştir.

$$Bi = \frac{37 \frac{\frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi 0,04^3}{\frac{1}{2} 4\pi 0,04^2}}{237} = 0,0021 < 0,1 \quad (3.12)$$

Bu sonuç yapılan kabulün doğruluğunu göstermektedir.

Yüzey sıcaklığının sürekli olarak değişmesi nedeniyle taşınım katsayısı zamanla değişecektir. Aşağıda bu durumun etkisi teorik olarak gösterilmiştir.

$h = 36.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Bu değer kullanılarak Reynolds sayısı şu şekilde hesaplanır [53].

$$\overline{Nu_D} = 2 + \left(0,4Re_D^{1/2} + 0,06Re_D^{2/3}\right)Pr^{0,4}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{1/4} \quad (3.13)$$

$$3,5 < Re_D < 7,6.10^4 \quad (3.14)$$

$$0,71 < Pr < 380$$

μ_s hariç tüm değişkenler ortam sıcaklığında (T_∞) hesaplanmaktadır.

μ_s yüzey sıcaklığında havanın dinamik viskozitesi (N.s/m^2)

μ ortam sıcaklığındaki dinamik viskozite

Re_D küre çapına göre Reynolds sayısı

Pr ortam sıcaklığındaki Prandtl sayısı

$$T_\infty = -24 \text{ }^\circ\text{C'de}$$

$$k = 2,23.10^{-2} \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,72$$

$$\mu = 159,6.10^{-7} \text{ N.s/m}^2$$

$$\nu = 11,44.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ortalama yüzey sıcaklığı $T_s = (-15-24)/2 = -19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır. Bu durumda dinamik viskozite;

$$\mu_s = 161,4.10^{-7} \text{ N.s/m}^2$$

$$\overline{Nu_D} = \frac{hD}{k} \quad (3.15)$$

İfadesi kullanılarak $\overline{Nu_D} = 132$ olarak bulunur. Bu değerler yukarıdaki ifadede yerine konulursa $Re_D = 3,931.10^4$ değeri elde edilir.

Kürenin ilk andaki sıcaklığı $T_{s1} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu sıcaklıktaki dinamik viskozite ise $\mu_{s1} = 179,6 \cdot 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$ dir. Kürenin son sıcaklığı $T_{s2} = -24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve bu sıcaklıktaki dinamik viskozite $\mu_{s2} = 159,6 \cdot 10^{-7} \text{ N.s/m}^2$ dir. Bu iki haldeki ısı taşınım katsayılarının oranı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{(\overline{\text{Nu}}_D)_1}{(\overline{\text{Nu}}_D)_2} = \frac{h_1}{h_2} = \frac{2 + (0,4 \text{Re}_D^{1/2} + 0,06 \text{Re}_D^{2/3}) \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{\mu}{(\mu_s)_1} \right)^{1/4}}{2 + (0,4 \text{Re}_D^{1/2} + 0,06 \text{Re}_D^{2/3}) \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{\mu}{(\mu_s)_2} \right)^{1/4}} = 0.971 \quad (3.16)$$

Hesaptan da görüldüğü gibi küre sıcaklığının taşınım katsayısına etkisi ihmal edilebilir mertebededir. Bu sonuç yukarıdaki grafikte verilen deney sonuçlarından da görülmektedir.

3.6.1 Işınım Etkisi

$$\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} \quad \frac{1}{F_{12} A_1} \quad \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}$$


Şekil 3.44: Işınım için eşdeğer direnç

$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{F_{12} A_1} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = \frac{A_1 \sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1-\varepsilon_2) A_1}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.17)$$

A_2 (kabin yüzey alanı)'nin çok büyük olması nedeniyle $A_1/A_2 \cong 0$ 'dır. Küre yüzeyinin görme faktörü $F_{12} = 1$ olarak alınırsa yukarıdaki ifade aşağıdaki hali alır.

$$q_{12} = \varepsilon_1 A_1 \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.18)$$

Maksimum ısı geçiş miktarının belirlenebilmesi için hesaplarda kürenin en yüksek sıcaklığı ($T_1 = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$) dikkate alınmıştır. Buna göre ışınlımla geçen ısı miktarı;

$$q_{12} = 0,075,67 \cdot 10^{-8} \cdot 100,53 \cdot 10^{-4} \cdot (290,15^4 - 149,15^4) = 0,129 \text{ W} \quad (3.19)$$

Taşıyım katsayısına etkisi;

$$q_{12} = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (3.20)$$

$h_r = 0,313 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak bulunur. Bu değeri de toplam ısı taşıyım katsayısı içerisinde ihmal edilebilir mertebede kalmaktadır.

Taşıyım katsayısı sadece zorlanmış taşıyım için hesaplanmıştır. Doğal taşıyım için herhangi bir hesap yapılmamıştır. Çünkü doğal taşıyım kürenin yüzey sıcaklığı taşıyım katsayısının sürekli olarak değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle teorik ve sayısal çalışmalarda sadece zorlanmış taşıyımın sözkonusu olduğu durumlar ele alınmıştır.

4. NÜMERİK (SAYISAL) ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez kapsamında yürütülen sayısal çalışmalar detaylandırılmıştır. Bu bölümün birinci kısmında kullanılan sayısal teknikler, ikinci kısmında problemin boyutsuzlaştırılması ve son kısımda ise Fluent ile yapılan çalışmalar ve sonuçları verilmiştir.

4.1 Sayısal (Nümerik) Teknikler

Bu bölümde Fluent'in [54] sayısal çözüm metodolojisi anlatılmaktadır. Sayısal çözüm yöntemleri günümüzde bilgisayarların gelişmesiyle daha çok önem kazanmaya başlamıştır. Bir çok karmaşık problem için sayısal yöntemler kullanılarak, lineerleştirilen denklem sistemlerinin iteratif olarak çözülmesiyle oldukça gerçekçi sonuçlar alınabilmektedir.

4.1.1 Sayısal Çözüm Yöntemleri

Fluent iki ayrı çözüm yönteminin kullanılmasına imkan vermektedir. Ayrı Ayrı Çözüm Yöntemi (Segregated Solver) ve Birarada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver). Bu metodlar kullanılarak süreklilik, momentum ve enerji denklemleri gibi korunum denklemlerinin integral formlarının yanı sıra türbülans enerjisi gibi skaler büyüklükler de çözülür. Her iki çözüm tekniğinde de sonlu hacimler kullanılır [55]. Bu yöntem;

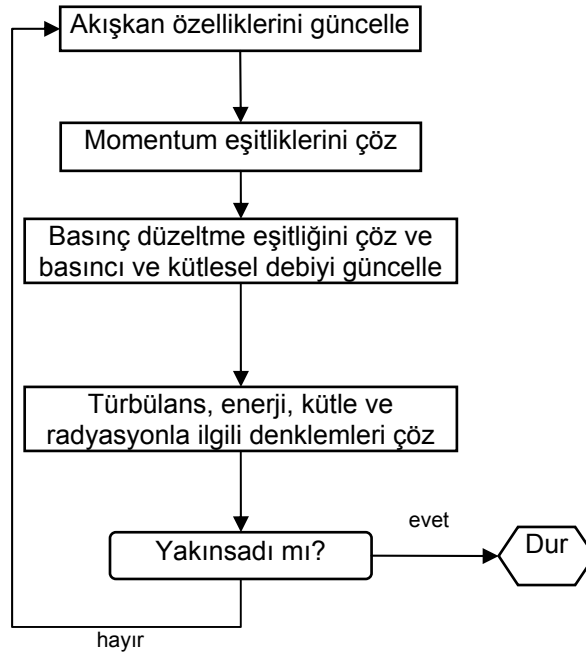
- Çözüm alanının sonlu hacimlere bölünerek bir ağ oluşturulmasını
- Her bir hacim elemanı üzerinde, yöneten denklemlerin bağımlı değişkenler (hız, basınç, sıcaklık ve diğer skalerler) için cebirsel denklemler elde edilecek şekilde integrasyonunu
- Elde edilen ayrık denklemlerin lineerleştirilmesini ve denklem takımının çözümünü

içerir.

Yukarıda bahsedilen her iki yöntemde aynı ayrıştırma (discretization) tekniğini kullanırlarken lineerleştirme ve çözüm yöntemleri farklıdır [54].

4.1.1.1 Ayrı Ayrı Çözüm Yöntemi (Segregated Solver)

Bu yöntem süreklilik, enerji ve momentum denklemlerini ardarda (ayrı ayrı) çözer. Yöneten denklemler lineer olmadığı için çözüm elde edilene kadar (yakınsama sağlanana kadar) aşağıda verilen iterasyon döngüsü devam ettirilir. Daha çok sıkıştırılamaz akışkanların bulunduğu ortamlarda tercih edilir.



Şekil 4.1: Ayrı ayrı çözüm algoritması

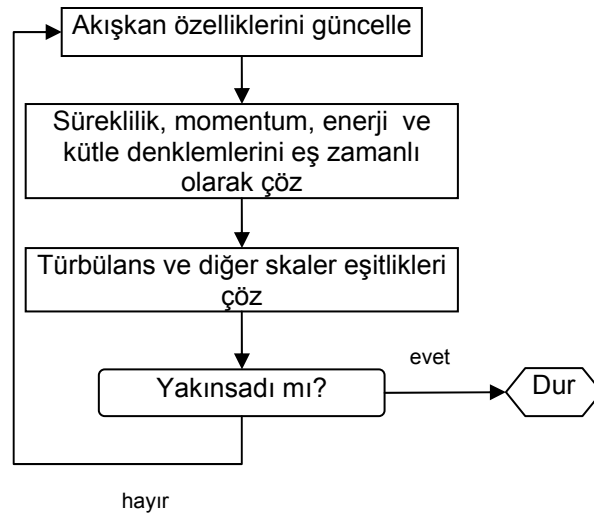
Her iterasyon aşağıdaki basamaklardan oluşur:

- Akışkanın fiziksel özellikleri, bir önceki iterasyondan elde edilen sıcaklık dağılımları kullanılarak yeniden hesaplanır. İterasyonun ilk adımındaki akışkan özellikleri, genellikle giriş sıcaklığı olan başlatma sıcaklığında (initialization) hesaplanır.
- u , v ve w yönlerindeki momentum denklemleri, hız dağılımının güncelleştirilmesi amacıyla, o anki basınç ve yüzey kütle akısı değerleri yardımıyla çözülür.
- Elde edilen hız değerleri yerel süreklilik denklemini sağlamıyorsa bir 'Poisson' tipi basınç düzeltmesi denklemi, süreklilik ve lineerize edilmiş momentum denklemlerinden türetilir. Bu basınç düzeltme denklemi; hız ve basınç dağılımları için gerekli düzeltmeleri elde etmek ve kütleli debinin süreklilik denklemini sağlaması için çözülür.

- Türbülans, enerji, kütle ve radyasyonla ilgili denklemler, daha evvelden güncelleştirilen değişkenlere ait değerler yardımıyla çözülür.
- Denklemlerin çözümünün yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilir. Eğer yakınsama varsa hesaplama işlemleri (iterasyon) durdurulur, yoksa tekrar başa dönülüp iterasyona devam edilir.

4.1.1.2 Birarada Çözüm Yöntemi (Coupled Solver)

Süreklilik, momentum, uygun olması durumunda enerji, kütle transferi denklemleri eş zamanlı olarak çözülür. Diğer skaler denklemler ardarda çözülür (segregated). Daha çok yüksek hızlı sıkıştırılabilir akışlarda eş zamanlı olarak enerji, momentum ve süreklilik denklemlerini çözer. İlgili denklemlerin lineer olmamasından dolayı yakınsama sağlanıncaya kadar iterasyonlar devam ettirilir.



Şekil 4.2: Birarada çözüm algoritması

Her bir iterasyon aşağıdaki basamaklardan oluşur:

- Akışkan özellikleri o anki çözüme göre güncelleştirilir. Başlangıçta ise giriş değerleri kullanılır.
- Süreklilik, momentum, enerji ve kütle denklemleri eş zamanlı olarak çözülür.
- Türbülans, radyasyon gibi skaler denklemler daha evvelden güncelleştirilen değişkenlere ait değerler yardımıyla çözülür.

- Denklem kümelerindeki yakınsamanın olup olmadığı kontrol edilir. Yakınsama varsa iterasyon durdurulur, yoksa tekrar başa dönülür ve iterasyonlara devam edilir.

4.1.2 Lineerleştirme

Her iki (segregated ve coupled) çözüm yönteminde, non-lineer yöneten denklemler (governing equations) her kontrol hacmi için bağımlı değişkenlere ait denklemler sistemi oluşturmak üzere lineerleştirilirler. Elde edilen lineer denklem sistemi, güncelleştirilmiş akış alanı elde etmek için çözülür.

Bu denklemlerin lineerleştirilmesi bağımlı değişkene göre Örtülü ‘Implicit’ veya Açık ‘Explicit’ olarak gerçekleştirilir.

4.1.2.1 Örtülü ‘Implicit’ Yöntem

Verilen bir değişkenin, her hücredeki bilinmeyen değerinin; komşu hücrelere ait bilinen ve bilinmeyen değerleri kullanılarak hesap edilmesi yöntemidir. Bu nedenle her bir bilinmeyen değişken sistemde birden fazla denklemde görülebilir ve bu denklemler bilinmeyenleri tespit edebilmek için eş zamanlı olarak çözülür.

4.1.2.2 Açık ‘Explicit’ Yöntem

Verilen bir değişkenin, her hücredeki bilinmeyen değerinin sadece bilinen değerler yardımıyla bulunmasıdır. Her bir bilinmeyen, sistemde sadece bir tek denklemde yer alacağından, her hücredeki bilinmeyen değerlere ait denklemlerin her biri ayrı ayrı çözülür.

‘Segregated Solution’ ayrık çözüm metodu sadece örtülü ‘Implicit’ yöntemiyle lineerize (ayrıklaştırılır) edilir. Bunun sonucunda her bir hücre için bir denklem elde edilir. Bu nedenle elde edilen denklemlere skaler denklemler sistemi de denilir. Her bir hücredeki bağımlı değişken için elde edilen skaler sonuç denklemler sisteminin çözümünde AMG (an algebraic multigrid) metodu ile beraber Gauss-Seidel lineer denklem çözücüsü kullanılır.

Özetle, ‘Segregated Solver’ tek bir değişken dağılımını (örneğin P için) tüm hücreleri aynı anda dikkate alarak çözer. Daha sonra diğer değişken dağılımını tekrar tüm hücreleri ele alarak çözer. Bu işlem tüm değişkenler için bu şekilde devam eder. Segregated Solver için Explicit yöntemi yoktur.

'Coupled Solver' da ise her iki (Implicit ve Explicit) yöntem de kullanılabilir. Sadece türbülans, radyasyon gibi skaler denklemler daha önce anlatılan örtülü 'Implicit' olarak 'Segregated Solver' yöntemi ile çözülür.

Eğer Coupled Implicit seçilirse, bütün bağımlı değişkenler için yazılan yöneten denklemlerden oluşan denklem seti implicit olarak lineerleştirilir. Bunun sonucunda akış alanındaki her bir hücre için N adet eşitlikten oluşan lineer denklemler seti elde edilir. N, eşitlik seti içerisinde bir araya getirilen denklem sayısını gösterir (örneğin; süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aynı anda çözülürse). Her bir hücrede N adet denklem yer aldığı için bu denklem seti "blok" denklem sistemi olarak da adlandırılır. Blok Gauss-Seidel lineer denklem çözücüsü AMG ile beraber kullanılarak her bir hücredeki N adet bağımlı değişken için elde edilen blok denklem sistemi çözülür.

Özetle 'Coupled Implicit' yaklaşımı, tüm değişkenleri (P, u, v, w, T) tüm hücrelerde aynı anda çözer.

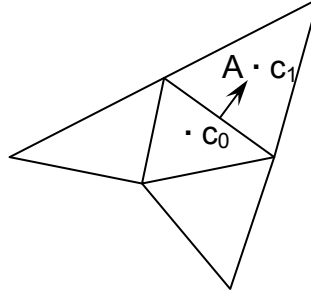
Eğer Coupled Explicit seçilirse, her bir yöneten denklemler seti explicit olarak lineerleştirilir. Implicit metotta olduğu gibi burada da her bir hücre için N adet eşitlikten oluşan lineer denklemler seti elde edilir. Benzer şekilde denklemler sisteminde yer alan bütün bağımlı değişkenler bir kez güncellenir. Bununla birlikte denklemler sisteminde yer alan bilinmeyen bağımlı değişkenler açıktır (explicit). Bu nedenle lineer eşitlik çözücüsüne gerek kalmaz. Bu durumda denklemlerin çözümü için Runge-Kutta kullanılır.

Özetle 'Coupled Explicit' yaklaşımı tüm değişkenleri (P, u, v, w, T) bir hücrede bir anda çözer.

4.1.3 Korunum Denklemlerinin Cebirsel Denklemlere Dönüştürülmesi (Discretization)

Fluent, kontrol hacim formülasyonunu kullanarak denklemleri, sayısal olarak çözülebilen cebirsel denklemlere dönüştürür. Bu teknik, yöneten denklemleri her bir kontrol hacminde integre ederek toplam kontrol hacmindeki her bir değişkenin korunduğu (örn: kütlenin) farklı denklemler oluşturmak suretiyle çözüme ulaşır.

Cebirsel denkleme dönüşüm işlemi, taşınan ϕ (kütle için 1, momentum için hız vektörü, enerji için ise toplam enerjidir) skaler değerinin kararlı halde korunumu denklemi yardımıyla gerçekleştirilir.



Şekil 4.3: İki boyutlu bir kontrol hacminin şematik gösterimi

Belirli bir kontrol hacmi için;

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (4.1)$$

- ρ yoğunluk
- $\vec{v}$ hız vektörü
- $\vec{A}$ yüzey alan vektörü
- Γ_{ϕ} difüzyon katsayısı
- $\nabla \phi$ ϕ 'nin gradyenti
- S_{ϕ} birim hacimdeki kaynak terimi

İki boyutlu bir elemanda yukarıdaki eşitliği cebirsel olarak ifade edersek.

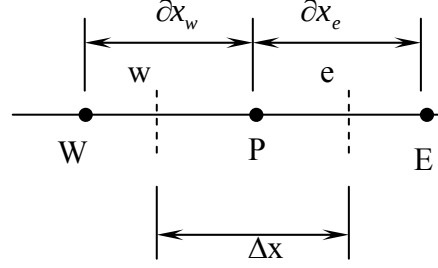
$$\sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \rho_f \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{yüzey}}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (4.2)$$

- $N_{\text{yüzey}}$ hacim elemanını çevreleyen yüzey sayısı
- ϕ_f f yüzeyinden taşınan ϕ değeri
- $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ yüzeyden geçen kütle miktarı
- $\vec{A}_f$ f yüzeyinin alanı
- $(\nabla \phi)_n$ f yüzeyine dik $\nabla \phi$ değeri
- V hacim elemanının hacmi

Korunum denkleminde Γ_ϕ difüzyon katsayısı olup, birim hacim için üretim olmaksızın ($S_\phi=0$) yeniden yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) \quad (4.3)$$

Bu denklem tek boyutlu olarak ele alınırsa, e - w sınırları arasında :



Şekil 4.4: Tek boyutlu sayısal çözümde düğüm noktaları

$$(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w = (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x})_e - (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x})_w \quad (4.4)$$

yazılabilir.

$$\phi_e = \frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P) \quad \phi_w = \frac{1}{2}(\phi_W + \phi_P) \quad (4.5)$$

Bunlar yukarıdaki denklemde yerine koyulursa:

$$\frac{1}{2}(\phi_E + \phi_P)(\rho u)_e - \frac{1}{2}(\phi_W + \phi_P)(\rho u)_w = \Gamma_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{(\Delta x)_e} - \Gamma_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{(\Delta x)_w} \quad (4.6)$$

elde edilir. Düğüm noktalarında bağımlı değişkenin değerleri cinsinden denklem,

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W \quad (4.7)$$

şeklini alır. Burada;

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{(\Delta x)_e} - \frac{1}{2}(\rho u)_e \quad (4.8)$$

$$a_W = \frac{\Gamma_w}{(\Delta x)_w} - \frac{1}{2}(\rho u)_w \quad (4.9)$$

$$a_p = \frac{\Gamma_e}{(\partial x)_e} + \frac{\Gamma_w}{(\partial x)_w} + (\rho u)_e - (\rho u)_w = a_E + a_W + F_e - F_w \quad (4.10)$$

Kütlesel akı ;

$$F = \rho u \quad (4.11)$$

Süreklilik denkleminden $F_e - F_w = 0$ olduğundan $a_p = a_E + a_W$ şeklinde yazılabilir.

Üretimi de dikkate alarak genelleme yapılırsa (nb: komşu düğüm noktası):

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.12)$$

Üç boyutlu durum için ise

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \quad (4.13)$$

Bu denklemin geçerli olabilmesi için, dört ana kuralın sağlanması gerekir.

1. Bir yüzey iki ayrı hacme ait bir yüzey ise bu yüzeyden olan akı iki hacim için de lineer denklemlerde (korunum) aynı gösterilmelidir.
2. a_p ve a_{nb} değerleri daima pozitif olmalıdır.
3. $\bar{S} = S_C + S_P T_p$ üretim ifadesindeki S_p değeri daima sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olmalıdır.
4. $a_p = \sum a_{nb}$ eşitliği daima sağlanmalıdır. Yani bağımlı değişken ϕ , örneğin T sıcaklık değeri c kadar artırılrsa da diferansiyel denklemi sağlamalıdır.

Fluent, ϕ skalerinin değerlerini kontrol hacminin merkezinde tutar. Bununla beraber taşınım değerlerinin hesaplanması için gerekli olan yüzeydeki ϕ_f değerleri kontrol hacimlerinin merkezlerindeki değerlerden enterpolasyonla elde edilir (Upwind Scheme). Fluent'te first-order upwind, second-order upwind, power law, ve QUICK upwind şemaları kullanılabilmektedir.

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan difüzyon terimleri her zaman ikinci dereceden hassasiyette ve merkezi farklar ile lineerleştirilir.

4.1.3.1 Birinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi (First-Order Upwind Scheme)

Birinci dereceden hassasiyet istendiği zaman, hacim elemanının her bölgesindeki değişkenlerin değerleri merkezdeki değişkenlerin değerleri ile aynıdır. Birinci dereceden Upwind Şeması seçildiği zaman yüzeylerdeki ϕ_f değerleri akış doğrultusundaki (upstream) hacim elemanının merkezindeki ϕ değeriyle aynıdır.

4.1.3.2 Üssel Enterpolasyon Yöntemi (Power Law Scheme)

Bu metod, ϕ değişkeninin yüzey değerlerini aşağıda verilen bir boyutlu konveksiyon-difüzyon eşitliğinin çözümünden elde eder.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4.14)$$

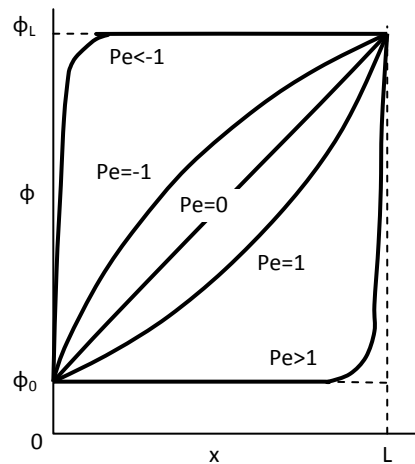
Γ ve ρu değerleri ∂x boyunca sabittir. Yukarıdaki eşitliğin integrasyonu ile aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(\text{Pe} \frac{x}{L}\right) - 1}{\exp(\text{Pe}) - 1} \quad (4.15)$$

$$\phi_0 = \phi|_{x=0}$$

$$\phi_L = \phi|_{x=L}$$

Pe Peclet sayısı $\text{Pe} = \frac{\rho u L}{\Gamma}$



Şekil 4.5: Farklı Peclet sayıları için x ile ϕ 'nin değişimi

$x = 0$ ile $x = L$ arasında ϕ nin değişimi Peclet sayısına bağlı olarak yukarıdaki şekilde verilmiştir. Peclet sayısının büyük değerleri için

$x = L/2$ 'de ϕ 'nin değeri hemen hemen akış doğrultusunun arkasında kalan (upstream, bir önceki hücre) ϕ değerine eşittir. Bu ise standart birinci dereceden enterpolasyondur. Akış olmadığında veya sadece difüzyon olduğunda Peclet sayısı sıfır olur. Bu durumda ϕ lineer olarak x ile değişir.

4.1.3.3 İkinci Dereceden Enterpolasyon Yöntemi (Second-Order Upwind Scheme)

Bu yöntemde hücre yüzeyindeki değişkenler, çok boyutlu lineer yeniden yapılandırma yaklaşımı kullanılarak çözülür. Yüzey değerleri ϕ_f Taylor serisi yardımıyla;

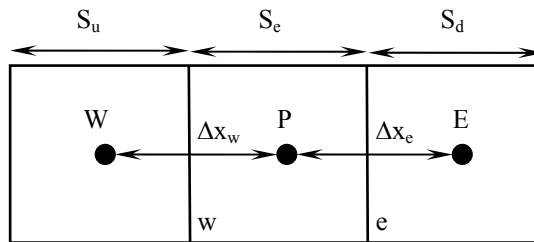
$$\phi_f = \phi + \nabla\phi\Delta\vec{S} \quad (4.16)$$

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{\text{faces}}} \tilde{\phi}_f \cdot \vec{A} \quad (4.17)$$

İkinci dereceden enterpolasyon yöntemi yüksek derecede güvenilirlik sağlar. Burada $\Delta\vec{S}$ bir önceki hücre merkezi ile yüzey merkezi arasındaki yer değişim vektörü, $\nabla\phi$ ise ikisi arasındaki ϕ 'nin değişim miktarıdır.

4.1.3.4 Hızlı Enterpolasyon Yöntemi (QUICK SCHEME)

Dört köşeli ve 6 köşeli hücrelerin söz konusu olduğu durumda (akış yönünde veya zıt yönde tek bir yüzeyin söz konusu olabildiği hal) kullanılır. Hızlı enterpolasyon ikinci dereceden enterpolasyon yönteminin ağırlıklı ortalamalarına ve hücre merkezindeki değişkenlerin enterpolasyonuna dayanır.



Şekil 4.6: Hücrelere bölünmüş bir geometride ele alınan hücre ve komşu hücreler

e yüzeyindeki ϕ değeri için akışın soldan sağa doğru olduğu halde aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (4.18)$$

$\theta = 1$ olduğu durumda merkez değerlere dayalı ikinci dereceden enterpolasyon yöntemi, $\theta = 0$ iken ikinci dereceden enterpolasyon yöntemi sözkonusu olur. Genellikle $\theta = 1/8$ olarak alınır. θ 'nın değerlerine göre çözüm değişir.

QUICK şeması yapısal ağ oluşturulabilen geometrilerde daha hassas sonuç verir.

4.1.4 Zamana Bağlı Terimlerin Lineerleştirilmesi

Zamana bağlı iterasyonlarda yöneten denklemler hem zamana hem de konuma bağlı olarak lineerleştirilmelidir. Zamana bağlı terim içeren eşitliklerde zaman teriminin dışındaki terimler sürekli rejimdeki gibi lineerleştirilirken zamana bağlı terimler bir Δt zaman adımı üzerinden integre edilerek lineerleştirilir. Zamana bağlı genel bir eşitlik aşağıdaki gibi ise;

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (4.19)$$

$F(\phi)$ daha önceki yöntemlerden herhangi biri ile lineerleştirilebilir. Eğer zaman türevi geriye doğru farklar yöntemi ile lineerleştirilirse birinci dereceden hassasiyette zamana bağlı ifade aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (4.20)$$

İkinci dereceden hassasiyette zamana bağlı ifade ise aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (4.21)$$

ϕ Skaler bir büyüklük

$n+1$ $(t+\Delta t)$ bir sonraki zaman adımıdaki değer

n t zaman adımıdaki değer (mevcut zaman)

$n-1$ $(t-\Delta t)$ bir önceki zaman adımıdaki değer

Zaman türevi lineerleştirildikten sonra $F(\phi)$ 'nin hangi zaman adımındaki değerlere göre lineerleştirileceği kararlaştırılmalıdır.

4.1.4.1 Örtülü (Implicit) Zaman Entegrasyonu

$F(\phi)$ 'nin lineerleştirilmesinde kullanılacak metodlardan birisi bir sonraki zaman adımındaki değerleri kullanmaktır.

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (4.22)$$

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (4.23)$$

ϕ^i başlangıçta ϕ^n olarak alınır ve iterasyon yapılarak aşağıdaki gibi birinci dereceden veya ikinci dereceden hassasiyette yazılan eşitlikler çözülür;

$$\phi^i = \phi^n + \Delta t F(\phi^i) \quad (4.24)$$

Ya da,

$$\phi^i = \frac{4}{3}\phi^n - \frac{1}{3}\phi^{n-1} + \frac{2}{3}\Delta t F(\phi^i) \quad (4.25)$$

4.1.4.2 Açık (explicit) Zaman Entegrasyonu

Bu metod $F(\phi)$ değerlerini içinde bulunulan zaman adımında hesaplar.

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^n) \quad (4.26)$$

ϕ^{n+1} bilinen ϕ^n değerleri ile hesaplanır;

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^n)$$

Bu metotta Δt zaman adımının stabilite sağlayacak şekilde seçilmesi gerekir. Sonuçların hassas olabilmesi için tüm hücrelerde aynı zaman adımı kullanılmalıdır. Stabilite için bu zaman adımı akış alanındaki tüm yerel zaman adımlarının en küçüğü olmalıdır.

4.1.5 İterasyon Yapılırken Kullanılacak Düzeltme (URF, Under Relaxation Factor) Katsayısının Tanımlanması

Denklemlerin lineer olmamasından dolayı ϕ değişimi kontrol edilmelidir. Bu da 'URF' ile olur. Her bir iterasyon sonucunda elde edilen değerler, bir

önceki değerlerle bu iki değer farkının bir katsayı ile çarpımının toplamına eşittir.

$$\phi = \phi_{\text{eski}} + \alpha \Delta \phi \quad (4.27)$$

$\Delta \phi$ ϕ değerindeki hesaplanan değişim miktarı

$$u = \alpha u^* + u' \quad (4.28)$$

$$p = \alpha p^* + p' \quad (4.29)$$

4.1.6 Ayrı Ayrı Çözücü ‘Segregated Solver’ İçin Artık R ‘Residual’ Değerinin Tanımı

Ayrıştırma işleminden sonra, bir P hücresindeki ϕ değerinin korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4.30)$$

$$S = S_c + S_p \phi \quad (4.31)$$

$$a_p = \sum_{nb} a_{nb} - S_p \quad (4.32)$$

Denklemdaki eşitliğin sağlanması gerekir, ancak iterasyon esnasında ilgili denklemin sağ ve sol tarafında farklı değerler elde edilebilir ve bu iki taraf arasındaki farkın tüm P hücreleri boyunca olan toplam değerine ϕ değişkeninin artık R^ϕ değeri adı verilir.

$$R^\phi = \sum_{P_{\text{hücreleri}}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (4.33)$$

Bu formüldeki artık ‘Residual’ değeri ile yakınsamanın olup olmadığını anlamak zordur, çünkü bir boyutsuzlaştırma yapılmamıştır.

FLUENT programında boyutsuz artık değeri ‘Residual’ aşağıdaki şekilde bulunur:

$$R^\phi = \frac{\sum_{P_{\text{hücreleri}}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right|}{\sum_{P_{\text{hücreleri}}} |a_p \phi_p|} \quad (4.34)$$

Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri aşağıdaki gibidir:

$$R^c = \sum_{P_{\text{hücreleri}}} |P \text{ Hücresindeki Kütle Üretimi}| \quad (4.35)$$

$$\text{Süreklilik denklemi için boyutsuz artık değeri : } \frac{R^c_{N. \text{ iterasyon}}}{R^c_{5. \text{ iterasyon}}} \quad (4.36)$$

Paydadaki artık (R^ϕ) değeri ilk 5 iterasyondaki en büyük mutlak değerdir.

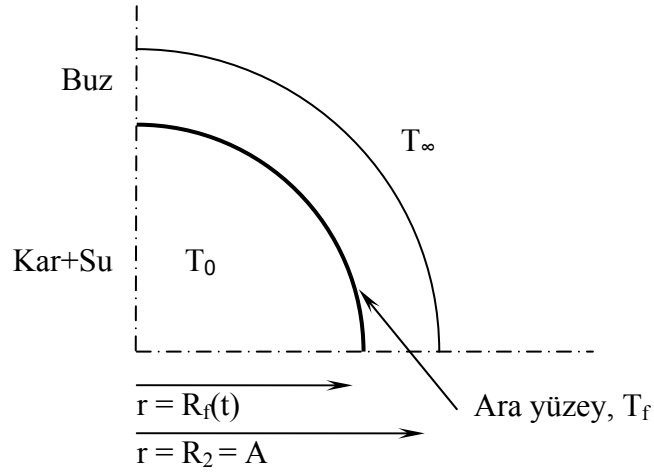
4.1.7 Yakınsama ve Kararlılık

Yakınsama bir çok faktörden dolayı sağlanamayabilir. Genellikle buna çok fazla sayıda hücre bulunması, uygun olmayan düzeltme faktörleri ve kompleks akış geometrileri neden olur. Yakınsamanın sağlanıp sağlanmadığını anlamak çoğu zaman güçtür. Aşağıda anlatılan şekillerde yakınsama olup olmadığı anlaşılır.

FLUENT programının önceden tanımladığı yakınsama kriteri artık değerleri ile ilgilidir. Buna göre enerji hariç diğer tüm değişkenlerin artık değeri 10^{-3} ten küçük ise yakınsama sağlanmıştır. Enerji için ise artık değerinin 10^{-6} dan küçük olması yakınsama için gereklidir. Bu çalışmada yakınsama bu kriterlere göre izlenmiştir.

4.2 Yöneten Denklemler ve Boyutsuzlaştırma

Bu çalışmada ele alınan problemin yöneten denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir. Yukarıda anlatıldığı gibi küresel formda bir deney numunesi hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sıkıştırılmış kar küre 0 °C'ye getirildikten sonra 0 °C sıcaklıktaki suya daldırılarak su emdirilmektedir. Bu durumda su, kar kürenin yüzeyinden merkezine doğru kapiler etki ile, kar kürede yer alan boşlukları doldurarak ilerleyecektir. Suda bekletme süresine bağlı olarak buz küre içerisinde belirli bir kalınlık su ile doyurulmuş olacaktır. Deneylerde kar kürenin tamamen su emmesi için yeteri kadar uzun süre beklenilmiştir. Yapılan tüm deneysel ve sayısal çalışmalarda su emen kalınlıktaki gözenekli bölgelerin tamamen su ile dolduğu kabul edilmektedir. Yöneten denklemler küresel koordinatlarda yazılmıştır.



Şekil 4.7: Küre üzerinde arayüzeyin pozisyonu

Buz Bölgesi;

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \alpha_{\text{buz}} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} \right] \quad R_f(t) < r < R_2 = A \quad \text{ve } t > 0 \quad (4.37)$$

$$\alpha_{\text{buz}} = \frac{k_{\text{buz}}}{\rho_{\text{buz}} c_{\text{buz}}}, \text{ buzun ısı difüzyon katsayısı}$$

Sınır şartları,

$$k_{\text{buz}} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = h(T - T_{\infty}) \quad r = R_2 = A \quad \text{ve } t > 0 \quad (4.38)$$

$$T(r,0) = T_0 \quad t = 0 \quad (4.39)$$

Ara yüzeyde,

$$k_{\text{buz}} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \phi \rho_{\text{su}} L \frac{dR_f(t)}{dt} \quad r = R_f(t) \quad \text{ve } t > 0 \quad (4.40)$$

Kar ve su bulunan bu bölgede sadece su faz değiştirecektir.

$$L \quad \text{faz değişim ısısı} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$R_f(t) \quad \text{ara yüzey}$$

$$\phi \quad \text{gözeneklilik}$$

$$h \quad \text{dış yüzeydeki ısı taşınım katsayısı} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

T_{∞} ortam sıcaklığı $[^{\circ}\text{C}]$

k ısı iletim katsayısı $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$

c özgül ısı $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right]$

ρ yoğunluk $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

Ara yüzeyde ele alınan sonsuz küçük kalınlıktaki diferansiyel eleman içerisinde bulunan su faz değiştirecektir.

4.2.1 Boyutsuzlaştırma

$$R = \frac{r}{A}, \quad \tau = \frac{\alpha_{\text{buz}} t}{A^2}, \quad S = \frac{R_f(t)}{A}, \quad \text{Ste} = \frac{c_{\text{p}_{\text{buz}}} (T_f - T_{\infty})}{L}, \quad \theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_f - T_{\infty}} \quad \text{ve} \quad \text{Bi} = \frac{hA}{k_{\text{buz}}}$$

Yöneten denklem;

$$\frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{2}{R} \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial R} + \frac{\partial^2 \theta(R, \tau)}{\partial R^2} \quad (4.41)$$

Sınır koşulları;

$$\frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial R} = \text{Bi} \cdot \theta \quad R = 1 \quad \text{ve} \quad \tau > 0 \quad (4.42)$$

$$\text{Ste} \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial R} = \frac{\rho_{\text{su}}}{\rho_{\text{buz}}} \phi \frac{dS}{d\tau} \quad S = R \quad \text{ve} \quad \tau > 0 \quad (4.43)$$

4.3 Fluent ile Yapılan Çalışmalar ve Sonuçları

Sayısal çalışmalar Fluent 6.2 ile yapılmıştır. Fluent çözümlmeyi entalpi denklemleri üzerinden yapmaktadır. Aşağıda en genel haldeki yöneten denklemler verilmiştir. Çözümlemede ise sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır.

Entalpi, duyulur entalpi h ve gizli ısı ΔH 'ın toplamı olarak ele alınmaktadır.

$$H = h + \Delta H \quad (4.44)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (4.45)$$

h_{ref} referans entalpi

T_{ref} referans sıcaklık

c_p sabit basınçtaki özgül ısı

sıvı oranı β aşağıdaki gibi tarif edilir.

$$\beta = 0 \quad T < T_{donma}$$

$$\beta = 1 \quad T > T_{erime}$$

$$\beta = \frac{T - T_{donma}}{T_{erime} - T_{donma}} \quad T_{donma} < T < T_{erime}$$

$\Delta H = \beta L$ olarak yazılabilir. Bu değer “0” (katı hal için) ile “1” (sıvı hal için) arasında değişir.

Katılaşma/erime problemleri için enerji eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{q} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (4.46)$$

H entalpi

ρ yoğunluk

$\vec{q}$ akış hızı

S kaynak terimi

T sıcaklığının bulunabilmesi için enerji eşitliği ile sıvı oranı eşitliği arasında iterasyon yapılır.

Fluent'in kullandığı sayısal çözüm yöntemleri Bölüm 4'te detaylı olarak anlatılmıştır.

4.3.1 Sayısal Modelin Literatürdeki Modellerle Karşılaştırılması ve Modelin Doğrulanması

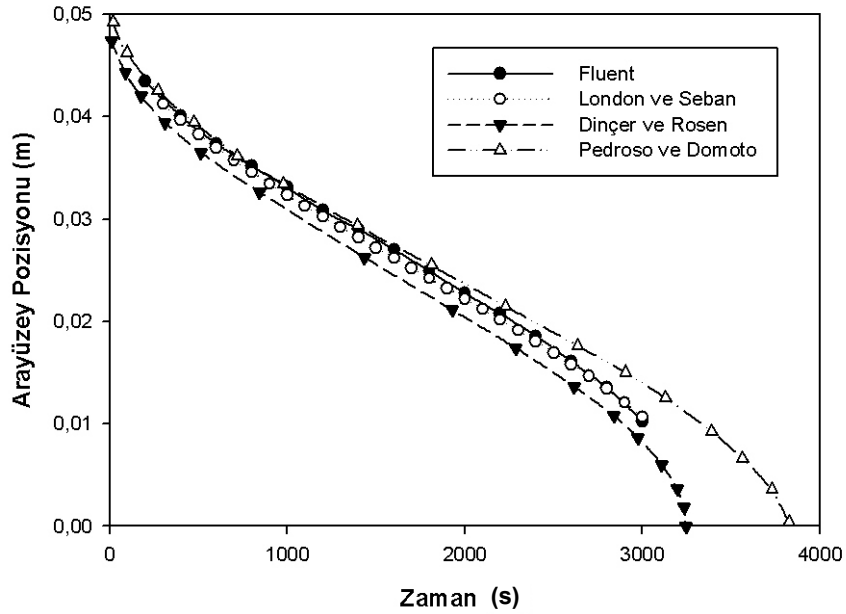
Fluent'in faz değişim modülü ve oluşturulan çözüm ağı (mesh) aşağıda tarif edilen problem için analizler yapılarak doğrulanmıştır.

ilk sıcaklığı faz değişim sıcaklığında olan bir buz küre ele alınmıştır. Buz küre taşınımıyla soğutulmaya başlanarak katılaşma hattının (arayüzey) zamanla dışarıdan içeriye doğru ilerlemesi modellenmiştir.

Arayüzeyin pozisyonunun zamanla değişimi sayısal olarak tespit edilmiş ve sonuçlar Pedroso ve Domato [56], Shih ve Chou [57], Hill ve Kucera [58], London ve Seban [59] ve Dinçer ve Rosen [1] tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Dinçer ve Rosen [1], sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözüm yapmışlardır. Sayısal modelde hareketli çözüm ağı kullanılmıştır. Pedroso ve Domato [56], perturbasyon tekniğini, London ve Seban [59], sanki dengeli hal yaklaşımını kullanmıştır.

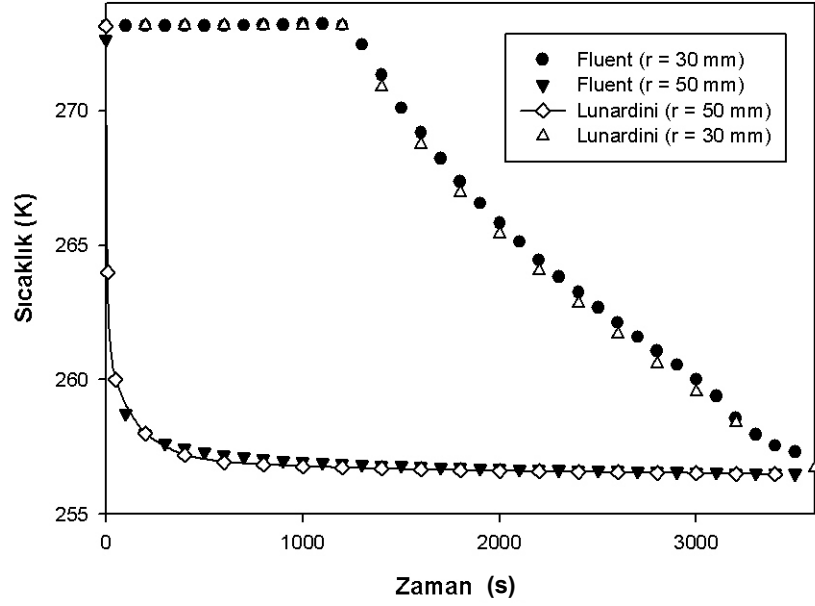
Şekil 4.8'den de görüldüğü gibi Fluent ile yapılan sayısal çalışma sonuçları literatürde yer alan çalışma sonuçları ile uyumludur. London ve Seban [59] tarafından yapılan çalışma ile burada yapılan çalışma sonuçları birbirine çok yakinken diğer çalışmalarla zamanın ilerleyen değerlerinde bir miktar farklılık görülmektedir. Ancak bulunan sonuçlar literatürde yer alan diğer ([56] ve [1]) çalışma sonuçlarının ortalamasında yer almaktadır.



Şekil 4.8: Arayüzey pozisyonunun zaman göre değişimi
($Bi = 100$, $Ste = 0,1$ ve $r = 5$ cm)

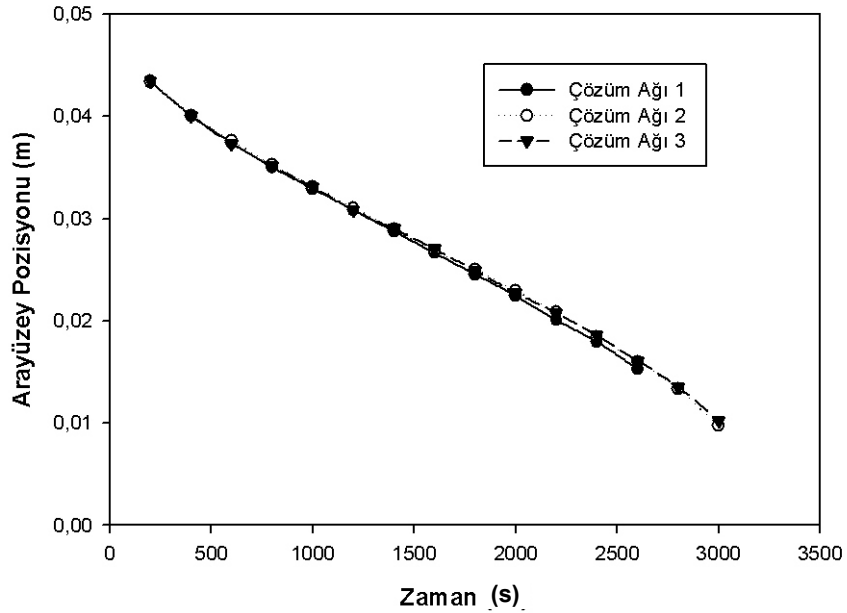
Lunardini [60] kitabında, taşınımıyla soğutulan ve ilk anda faz değişim sıcaklığında olan küre için diğer araştırmacıların [58], [59] çalışmalarını derleyerek sıcaklık değişimi ve arayüzey konumu için formülasyonlar

vermiştir. Bu formülasyonlar kullanılarak sıcaklıklar hesaplanmış ve sonuçlar Fluent ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9’da sonuçlar verilmiştir. Görüldüğü gibi sonuçlar birbirine çok yakındır.



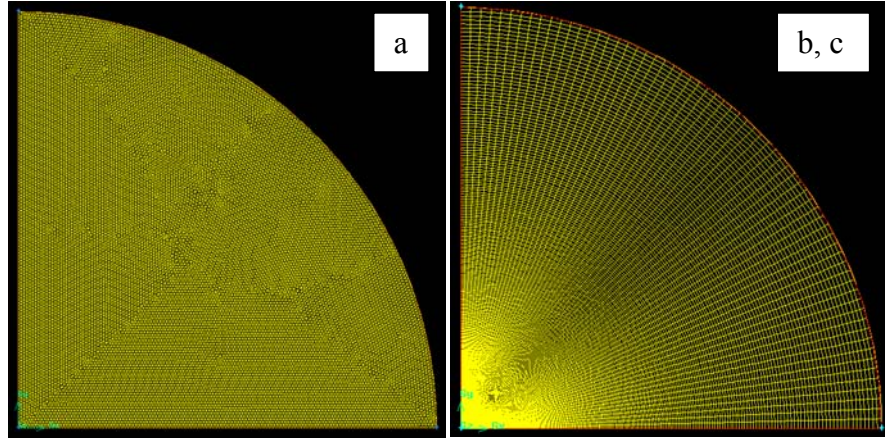
Şekil 4.9: R = 5 cm çaplı su kürede, taşınım ile soğuma halinde sıcaklık değişimlerinin karşılaştırılması

Sayısal çalışmalarda en optimum çözüm ağının oluşturulması için bir çok farklı çözüm ağları için deneme yapılmıştır. Farklı çözüm ağları üzerinde yapılan çalışmaların sonuçları ve şekilleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.10: Farklı çözüm ağlarının karşılaştırılması

Şekil 4.11’de sayısal çalışmalarda denenen farklı çözüm ağları verilmiştir. (a)’da gösterilen çözüm ağı üçgen elemanlarla oluşturulmuştur. Bu nedenle eleman sayısının yüksek olmasına rağmen düğüm noktası sayısı düşüktür. (b) ve (c)’de ise kontrollü çözüm ağı oluşturulmuştur. Dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Bu şekilde düğüm noktalarının sayısı daha yüksek olmaktadır. (b) ve (c)’de verilen çözüm ağları daha iyi sonuç vermektedir. Şekil 4.10’dan da görüldüğü gibi sonuçların birbirine çok yakın olması nedeniyle, daha az sayıda eleman içeren (b) çözüm ağı tüm modellerde kullanılmıştır.

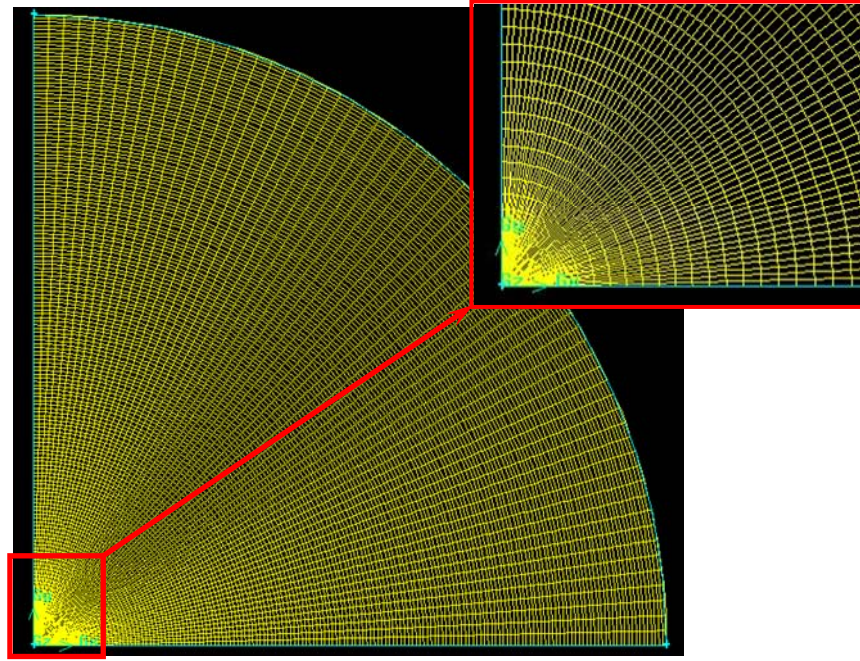


Şekil 4.11: (a – Çözüm Ağı 1) 31232 eleman, 15855 düğüm noktası,
(b – Çözüm Ağı 2) 12610 eleman, 12805 düğüm noktası,
(c – Çözüm Ağı 3) 32500 eleman, 33001 düğüm noktası.

Ayrıca yapılan doğrulama çalışmaları esnasında zaman adımı için de bir çok deneme yapılmış ve zaman adımı 1 saniye olarak seçilmiştir. Bu denemelerde Fluent’in otomatik zaman adımı belirleme modülü de kullanılmıştır. Bu modül ile bulunan zaman adımları 1 saniyeden daha büyük olmaktadır. Fluent’in zaman adımlarını belirleme kriterleri referans [54]’de yer almaktadır.

4.3.2 Katı Modelin Sonlu Elemanlara Bölünmesi ve Sınır Koşulları

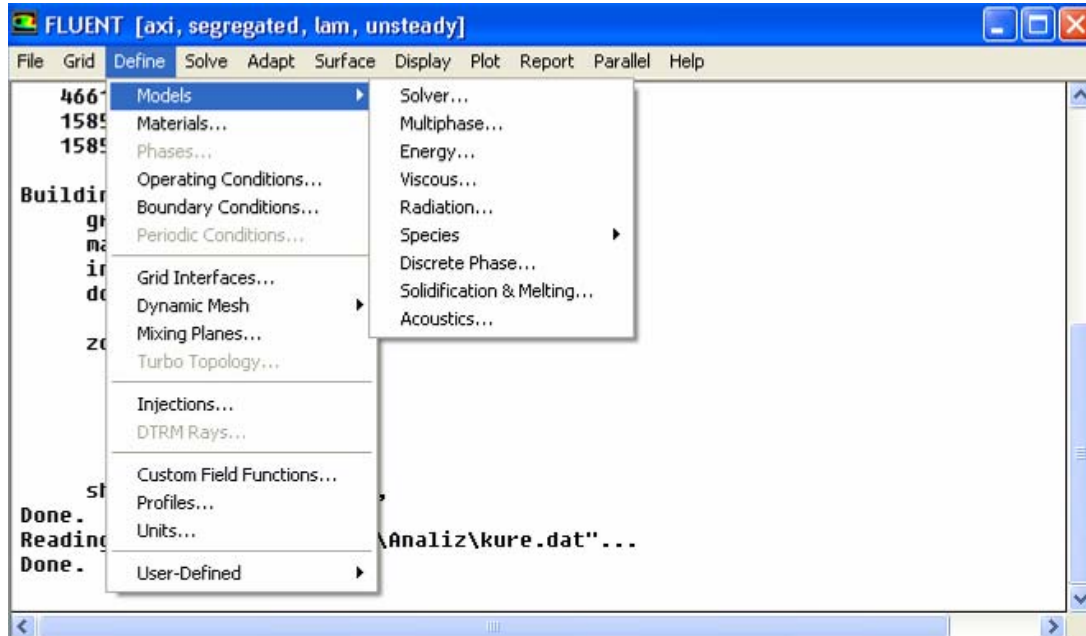
Gambit 2.3.16 kullanılarak iki boyutlu model oluşturulmuş ve aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi sonlu elemanlara bölünmüştür. Geometri aksis simetriktir. Yani x eksenini aksis olarak kabul ettiğimizde, iki boyutlu model bu aksis etrafında çevrilerek yarım küre elde edilebilir. Fluent bu tarz bir çözüme imkan vermektedir. Bu nedenle model iki boyutlu olarak düşünülmüştür. Bu durum analiz süresini çok daha kısaltmaktadır.



Şekil 4.12: Model Geometri ve çözüm ağı

Çözüm ağı oluşturulan geometride toplam 12610 eleman, 12805 düğüm noktası yer almaktadır. En kötü skewness ise 0,992634'tür.

Analizlerde Fluent'in 2 boyutlu modülü kullanılmıştır. Aşağıda Fluent'teki ayarlamalar detaylı olarak verilmiştir. Model Fluent'e transfer edildikten sonra çözüm ağı kontrol edilip program m.k.s birim sistemine ayarlanmıştır.



Şekil 4.13: Fluent'in ana ekranı

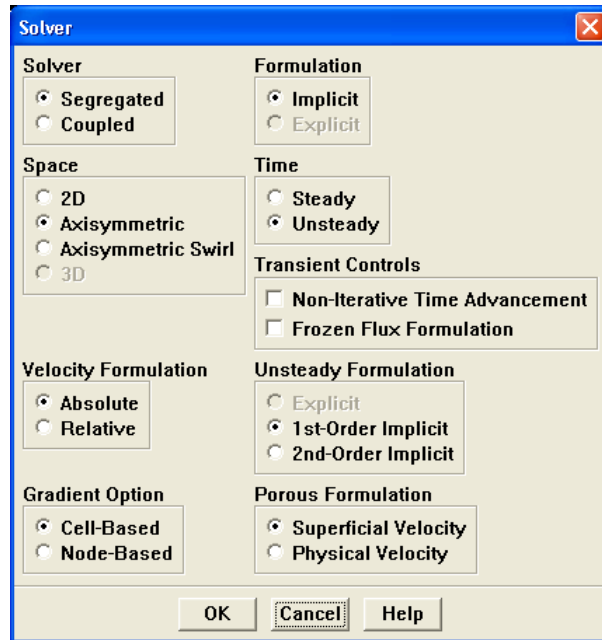
Şekil 4.14'te katılaşma ve erime modülünün aktive edilmesi gösterilmektedir. Herhangi bir akış söz konusu olmadığı için ve tek bir

sıcaklıkta faz değişimi gerçekleştiği için parametrelerde bir değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 4.14: Katılaşma ve erime ekranı

Şekil 4.15’de verilen solver ekranında Fluent’in çözüm ayarları seçilmiştir. Buna göre Segregated, aksis simetrik ve zamana bağlı çözüm seçilmiştir. Fluent’te Segregated çözücü kullanıldığı için Explicit seçeneği kapalıdır. Bu çalışmada Katılaşma ve Erime çözümü yapılacak, herhangi bir akış çözülmeyecektir. Bu nedenle sıkıştırılamaz akışta kullanılan Segregated çözüm tercih edilmiştir. ‘Segregated Solver’ seçildiğinde denklemler sadece örtülü olarak lineerleştirilebildiğinden ‘Implicit’ metodu kendiliğinden uygulanır (Bölüm 4.1.2).



Şekil 4.15: Çözücü ekranı

Şekil 4.16’da malzeme tanımlaması yapılmaktadır. Su ve buz için tanımlama yapmak gerekmektedir. Deneysel verilere göre bu ekrandan malzeme özellikleri değiştirilerek aşağıdaki analizlerde kullanılan parametreler verilmiştir.

The screenshot shows the 'Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is set to 'ice', 'Material Type' is 'solid', and 'Chemical Formula' is 'ice'. The 'Order Materials By' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows three properties: Density (kg/m3) with a value of 917, Cp (J/kg-K) with a value of 1960, and Thermal Conductivity (W/m-K) with a value of 2.4. The bottom of the dialog has buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Şekil 4.16: Malzeme tanımlaması

Suyun özellikleri ve buzun özellikleri bu ekranda polinom olarak girilmiştir. $0 < T < 273,15$ K aralığı için buz özellikleri $T > 273,5$ K için ise su özellikleri parçalı denklemler şeklinde Fluent'e tanımlanmıştır.

Tablo 4.1: Buzun özelliklerinin sıcaklıkla değişimi [61]

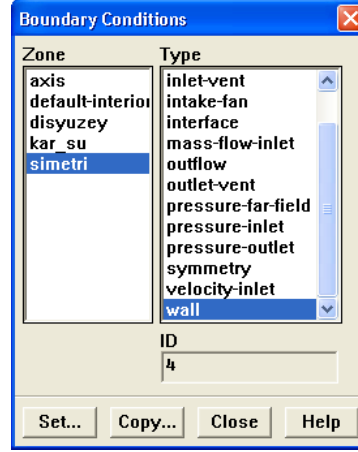
Sıcaklık - T - (K)	Yoğunluk - ρ - (kg/m ³)	Isı İletim Katsayısı - k - (W/mK)	Özgül Isı - Cp - (J/kgK)
273,15	916,20	2,22	2.050,00
268,15	917,50	2,25	2.027,00
263,15	918,90	2,30	2.000,00
258,15	919,40	2,34	1.972,00
253,15	919,40	2,39	1.943,00
248,15	919,60	2,45	1.913,00
243,15	920,00	2,50	1.882,00

Tablo 4.2: Fluent'e tanımlanan malzeme özellikleri

	$0 < T < 273,15$ K	$T > 273,5$ K
ρ , Yoğunluk (kg/m ³)	917 (buz yoğunluğu her deney için hacim ve ağırlıktan bulunmuştur)	998
Cp, Özgül Isı (J/kgK)	$-2,31804E+04 - 4,77417E+01 \cdot T + 3,06644E+00 \cdot T^2 - 1,15994E-02 \cdot T^3 - 3,04615E-05 \cdot T^4 + 2,29277E-07 \cdot T^5 - 3,20657E-10 \cdot T^6$	4182
k, Isı İletim Katsayısı (W/mK)	$-9,58451E-02 + 1,88171E-02 \cdot T + 3,97658E-05 \cdot T^2 - 1,02751E-07 \cdot T^3 - 1,04038E-09 \cdot T^4 - 2,76140E-12 \cdot T^5 + 1,51509E-14 \cdot T^6$	0,6

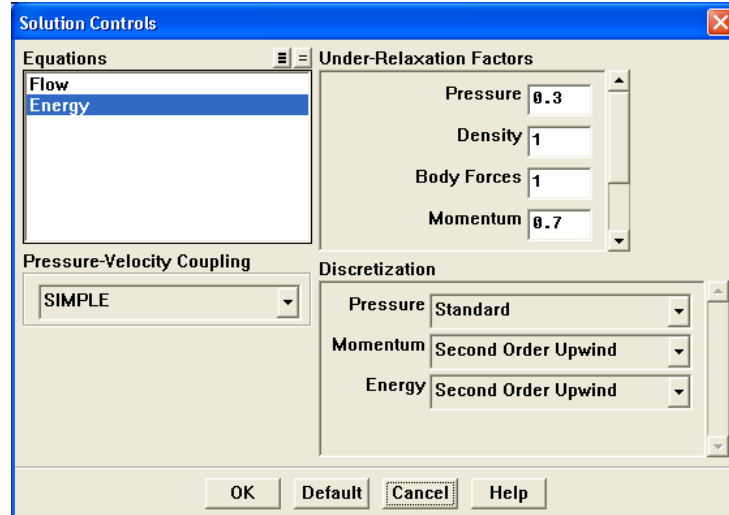
Buzun özelliklerinin değişimi Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu değerlere eğri uydurularak Tablo 4.2’de verilen buz özellikleri elde edilmiştir.

Şekil 4.17’de sınır koşulları tanımlanmaktadır. Modelde x eksenindeki kenar aksis olarak, y eksenindeki kenar adyabatik olarak ve küre yüzeyinde ise taşınım katsayısı tarif edilmiştir. Burada deney sonuçlarından elde edilen taşınım katsayısı kullanılmıştır.



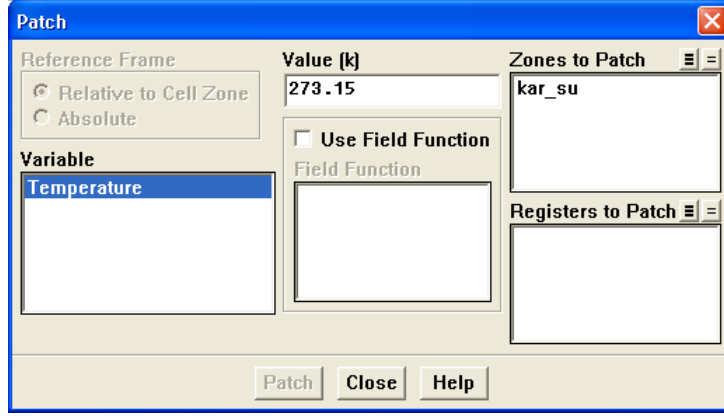
Şekil 4.17: Sınır koşulları

Şekil 4.18’de çözücünün hassasiyetini belirleyen discretizasyon (ayrıştırma) ayarları yapılmaktadır. Sadece enerji denklemi çözülecektir. Bu nedenle sadece enerji eşitlikleri seçilmiş ve diğer ayarlarda değişiklik yapılmamıştır.



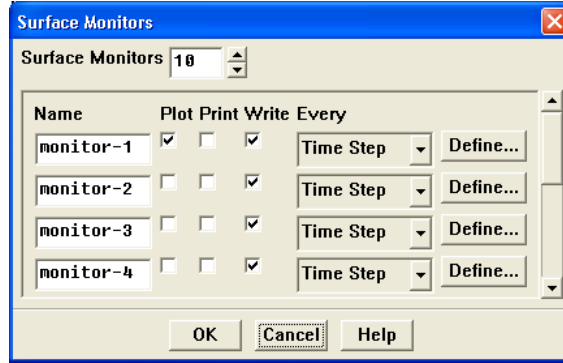
Şekil 4.18: Çözücü kontrolleri

Şekil 4.19’da tüm kürenin ilk haldeki sıcaklığı girilmektedir. Bu değerdeki küre daha sonra soğutucu ortam sıcaklığına maruz bırakılarak analiz yapılmıştır.



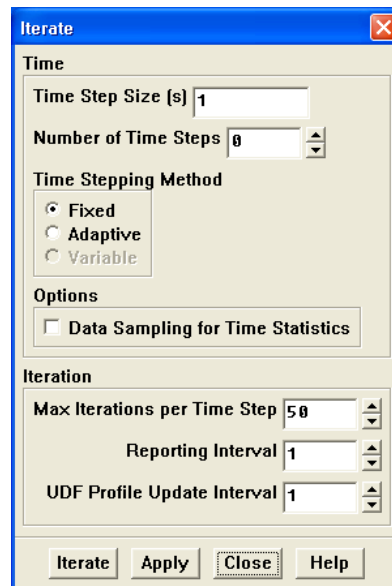
Şekil 4.19: İlk sıcaklığın atanması

Şekil 4.20’de çözüm esnasında analiz sürecini izlemek için ekranda görmek istediğimiz ve bir text dosyasına yazmak istediğimiz değişkenler ayarlanmıştır.



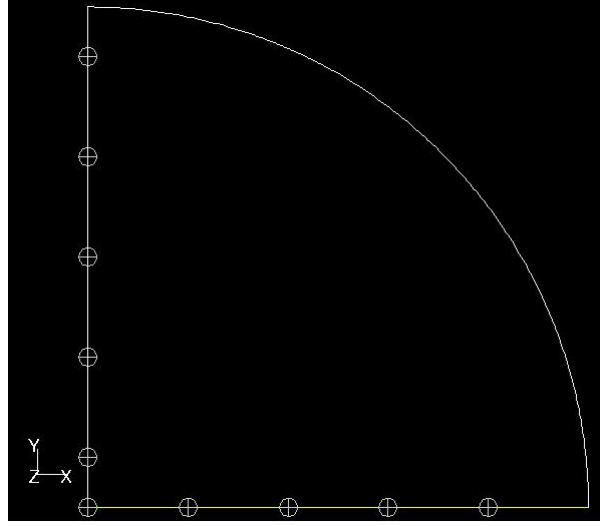
Şekil 4.20: Çözüm sonuçlarının izlenmesi

Şekil 4.21’de iterasyon ayarlarının yapıldığı ekran görülmektedir.



Şekil 4.21: Çözüm sonuçlarının izlenmesi

Şekil 4.22’de ise Fluent’in ekranındaki model görüntüsü verilmiştir. Kenarlardaki daireler termoelemanların yerleştirildiği noktalardır. Her bir nokta üzerinde zamanla sıcaklık değişimi Fluent tarafından kaydedilmektedir. Bu eğrilerle deneysel eğriler karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22: Çözüm sonuçlarının izlenmesi

4.3.3 Sayısal Sonuçlar ve Deneylerle Karşılaştırılması

Bu bölümde sadece fanlı soğutma yapılan deneyler Fluent ile sayısal olarak çözülmüştür. Doğal taşınımın söz konusu olduğu durumda yüzey sıcaklığının zamanla değişmesi nedeniyle ısı taşınım katsayısı da değişecektir. Bu durumda hava tarafı ısı taşınım katsayısı tek bir değer olarak belirlenemeyecektir. Isı taşınım katsayısının sayısal olarak hesaplanabilmesi için hava tarafının da modellenmesi gerekmektedir. Bu ise çok daha karmaşık sayısal analiz anlamına gelmektedir. Oysa zorlanmış taşınımda hava tarafı sabit bir ısı taşınım katsayısı ile tariflenebilmektedir. Bu taşınım katsayısı deneysel olarak tespit edilmiştir.

İlk halde tüm yarım küre sıfır derecede olduğu için dışarıdan soğutulmaya başlanıldığında küre içerisine ilerledikçe sadece emilen su miktarı faz değiştirmektedir. Dışarıdan içeriye doğru faz değişim arayüzeyinin gerisinde kalan bölge buz haline gelmekte ve sıcaklığı düşmektedir. Önünde kalan bölgede ise herhangi bir ısı geçişi söz konusu değildir. Sürekli üniform ilk sıcaklık 0 °C’dir.

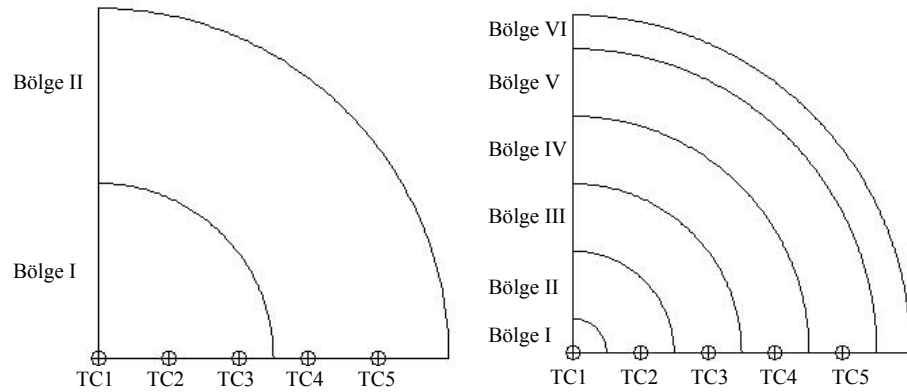
Yapılan analizlerde yarım küreye emdirilen suyun homojen bir şekilde emildiği kabulü yapılmıştır. Bu durumda faz değişimi ile geçen ısı miktarının belirlenebilmesi için Fluent’in malzeme özellikleri girilirken suyun

faz değişim ısısı gözeneklilik ile çarpılarak belirlenmiştir. Denklem 4.40'ta bu durum görülmektedir.

Deney sonuçları ile sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırmaları Ek A'da grafikler halinde verilmiştir.

Eğrilerden de görüldüğü gibi emilen su miktarı arttıkça sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbirinden farklılaşmaktadır. Bunun nedenleri ise;

- Kar küre homojen su emmemektedir. Bu durum eğrilerde de gözlemlenmektedir. Su emme miktarı çok olan (54 g) 13 nolu deneyde, merkezdeki (TC1) deneysel sıcaklık değişimi ile sayısal sıcaklık değişimi arasındaki fark en dışta yer alan noktadaki (TC5) farktan daha fazladır. Analizlerde de bu farklılığı dikkate alabilmek için model birden fazla alt bölgelere bölünmüş ve her bölgeye farklı su emme yüzdeleri verilerek analizler yapılmıştır. Bu durumda analiz sonuçları deney sonuçlarına yaklaşmıştır.

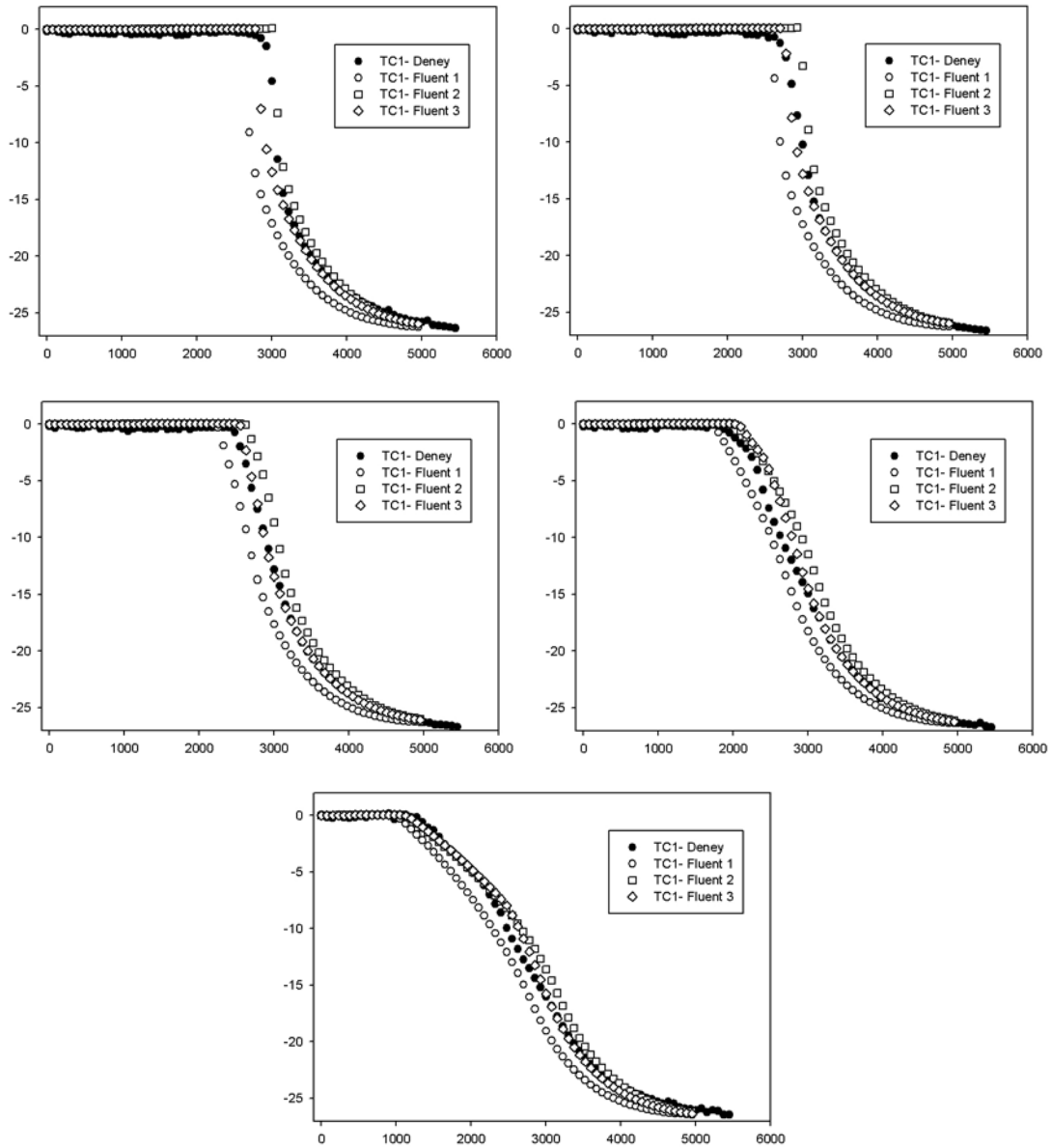


şekil 4.23: Sayısal analizde kullanılan modelin farklı alanlara bölünmesi

Fluent 1, Fluent 2 ve Fluent 3 adı verilerek farklı koşullar için analizler yapılmıştır.

Tablo 4.3: Su emme y zdelерinin dağılımı

	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge	6. Bölge
Fluent 1	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
Fluent 2	0,3	0,3	0,44	0,6	0,6	0,6
Fluent 3	0,2	0,6	Model iki bölgeye bölünmüştür			



Şekil 4.24: 13 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun farklı bölgelerde farklı gözeneklilikler verilerek karşılaştırılması (x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Fluent 3 kodlu analizde model iki alt bölüme ayrılmış ve dış kısma daha yüksek gözeneklilik, iç kısma ise daha düşük gözeneklilik verilerek analiz yapılmıştır. DeneySEL sonuçlarla analiz sonuçları daha iyi birbiri ile örtüşmüştür. Bu durum da yukarıda bahsetmiş olduğumuz gözenekliliğin içeride homojen olarak dağılmadığı tezini desteklemektedir. Emilen su miktarının yüksek olduğu durumlarda dış kısım daha fazla su emerken iç kısma yeteri kadar su iletilememektedir.

- Karın termofiziksel özellikleri sadece sıcaklıkla değil yoğunluk değişimi ile de farklılık göstermektedir.

- Sıkıştırma esnasında karın dış yüzeyinden merkezine doğru homojen bir sıkışma yoktur. Dış yüzeyler daha çok sıkışır. Bundan dolayı da gözeneklilik farklı olur.
- Zamanla kar kürenin morfolojisi değişmektedir. Buna bağlı olarak ısı özellikler değişir.
- Kar kürenin altında kullanılan 6 cm'lik ısı izolasyon katmanından olan ısı geçişi az da olsa sıcaklık dağılımını etkilemektedir.
- Su içerisine daldırılarak su emdirilen kar kürenin dış yüzeyinde bir sınır tabaka şeklinde kalan su filmi sıcaklık dağılımını etkiler. Eğer sıkışma az ise deneye başlayana kadar yüzeydeki su filmi emilecektir. Sıkışmanın derecesine göre su filmi daha az emilir veya hiç emilemeyebilir. Bu durumda da sıcaklık dağılımlarında yüzeydeki sıvı filminin etkisi olacaktır.

4.3.4 Faz Arayüzeyinin Zamanla Değişiminin Modellenmesi

Yukarıdaki bölümde sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bölümde geliştirilen sayısal model kullanılarak, su emdirilen kar kürenin buzlaştırılması esnasında faz değişim bölgesinin (arayüzey) zamanla ilerlemesi farklı koşullar için sayısal olarak çözülecek ve elde edilen sonuçlar kullanılarak ampirik formülasyonlar geliştirilecektir. Bu şekilde buzlaştırılmak istenen bir kürenin, bilinen bir soğutma sıcaklığında, ne kadar sürede, ne kadarlık bir tabakasının tamamen donarak buz haline geçeceği tespit edilebilecektir.

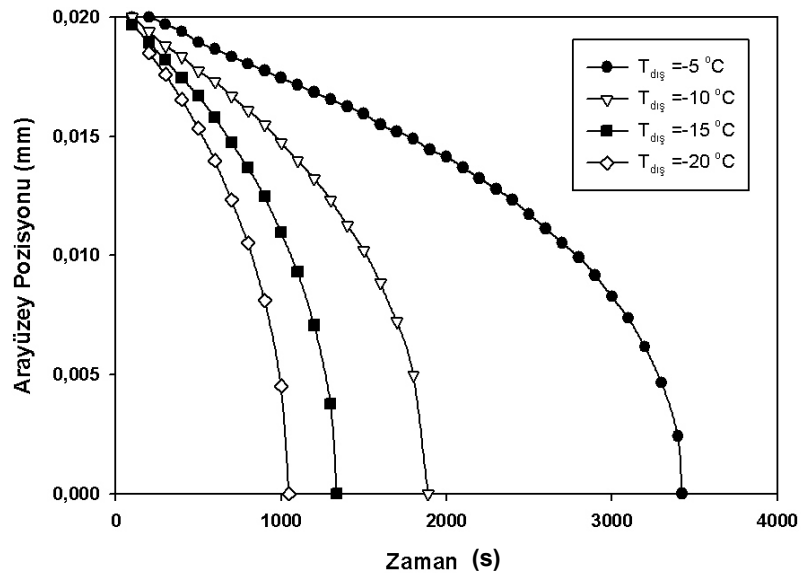
Karın küre şekline getirilerek yüksek yerlerden borularla taşınması için, daha önce de bahsedildiği gibi, buz haline getirilmesi gerekmektedir. Ancak tüm kürenin buz haline getirilmesi için gerekli olan süre ve harcanacak enerji daha fazla olacaktır. Oysa istenilen yere gidene kadar parçalanmayacak kadar kalınlıkta bir tabakanın buz haline getirilmesi yeterli olmaktadır. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanacak ve üretim hızı da artacaktır. Taşıma esnasında buz küre dış yüzeyden başlayarak eriyeceği için dışarıdan içeriye doğru buzlaştırılan tabaka tamamen erimedenden buzun istenilen yere iletilmesi gerekir. Bu tabakanın kalınlığının belirlenebilmesi için bir optimizasyon yapmak gerekmektedir. Böyle bir optimizasyonun yapılabilmesi için gözenekliliği, emdirilen su miktarı, soğutma sıcaklığı ve çapı bilinen bir kürenin katılma bölgesinin hangi zamanda hangi

mesafede olduğunun hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bu bölümde bu hesabın gerçekleştirilebilmesi için yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan yararlanılarak bir model oluşturulmuştur.

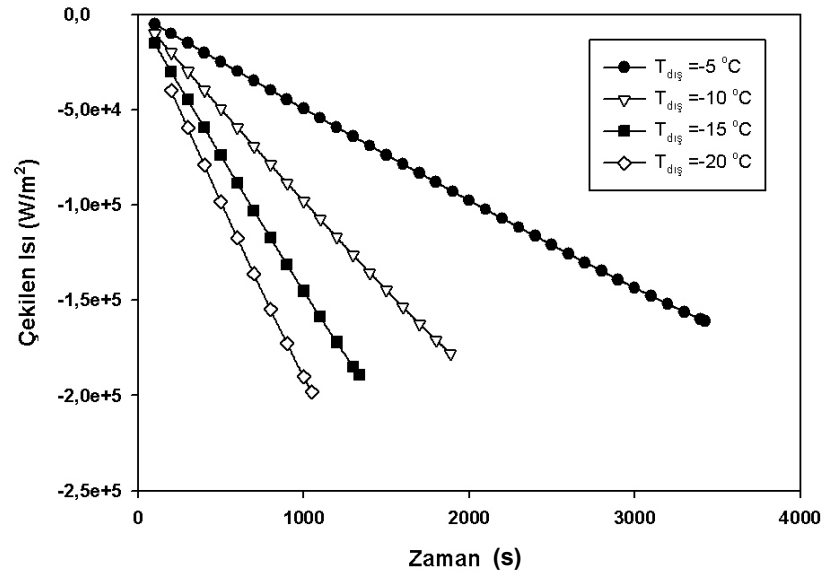
Ek B’de yapılan analizlere ait parametreler ve bu analiz sonucunda elde edilen bütün kürenin donma süresi ve çekilen ısı miktarı değerleri verilmiştir.

Analizlerde üç farklı gözeneklilik dikkate alınmıştır. Bunlar 0,1, 0,2 ve 0,3 değerleridir. Şekil A.7’den de görüldüğü gibi gözenekliliğin arttığı durumda deneysel sonuçlarla analiz sonuçları birbirinden uzaklaşmaktadır. Ayrıca 0,3 gözenekliliğin üzerine pratikte çıkmak çok kolay olmamaktadır. Bu nedenlerle maksimum 0,3 değeri alınmıştır. Herbir gözeneklilik değerinde farklı hava tarafı ısı taşınım katsayıları ve hava sıcaklıkları seçilmiş ve bunlar üç farklı yarı çap için analiz edilmiştir. Taşınım katsayısı için 10 W/m²K, 20 W/m²K ve 40 W/m²K, dış ortam sıcaklığı için -5 °C, -10 °C, -15 °C ve -20 °C ve yarı çaplar için 20 mm, 40 mm ve 60 mm değerleri dikkate alınmıştır.

Yapılan analizlerde arayüzey pozisyonunun ve çekilen ısının zamanla değişimi de ayrıca grafik olarak elde edilmiştir. Analizlerden bir bölümünü içeren eğriler aşağıda yer almaktadır. Eğrilerin tamamı ise Ek C’de verilmiştir.

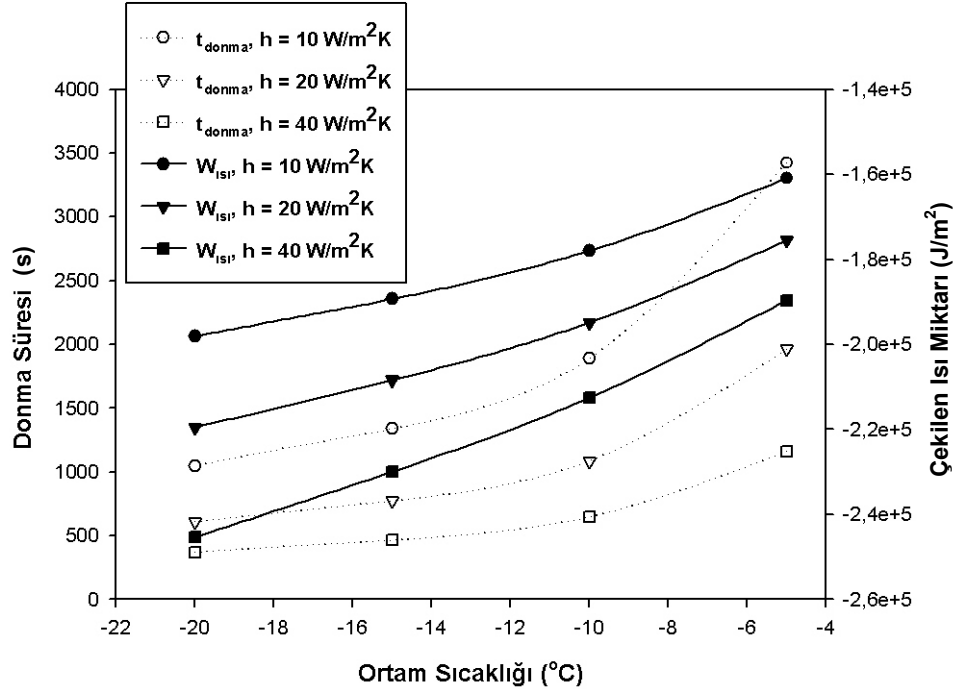


Şekil 4.25: Katılaşma Arayüzeyi Pozisyonunun Zamanla Değişimi
(R = 20 mm, ϕ = 0,1, h = 10 W/m²K)

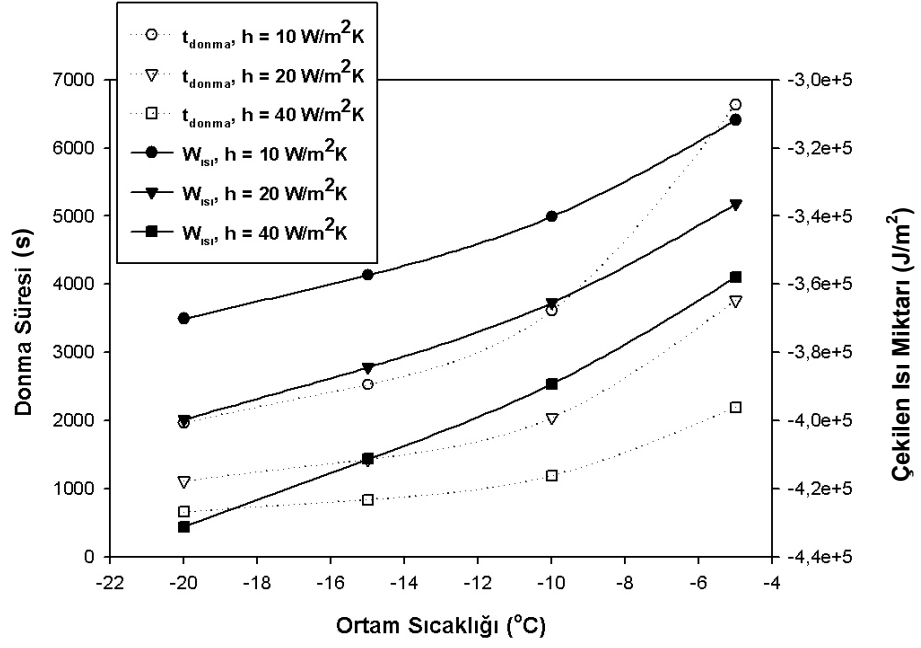


Şekil 4.26: Çekilen Isı Miktarının Zamanla Değişimi
($R = 20 \text{ mm}$, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)

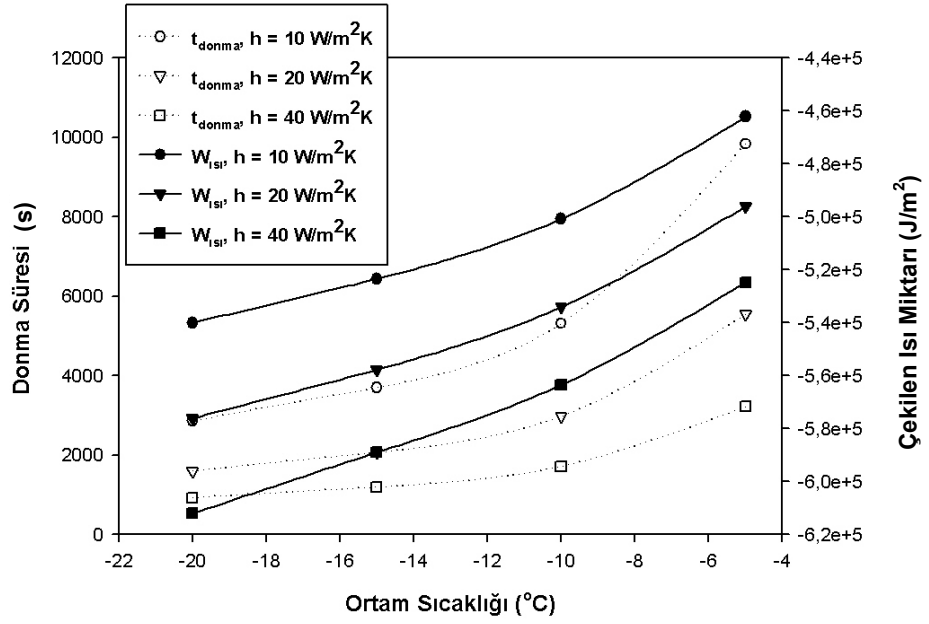
Ayrıca farklı yarıçaplara sahip kar kürelerinin farklı su emme koşullarında sıcaklık, taşınım katsayısı gibi değişkenler değiştirilerek donma süreleri ve bu sürede çektikleri ısı miktarları da grafik olarak verilmiştir. Isı miktarlarında dış yüzey alanı esas alınmıştır.



Şekil 4.27: $R=20 \text{ mm}$ yarıçaplı ve $0,1$ gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.28: R=20 mm yarıçaplı ve 0,2 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.29: R=20 mm yarıçaplı ve 0,3 gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarları (J/m^2)'nin sıcaklıkla değişimi

Diğer çap ve gözeneklilikler için oluşturulmuş olan grafikler Ek D'de verilmiştir.

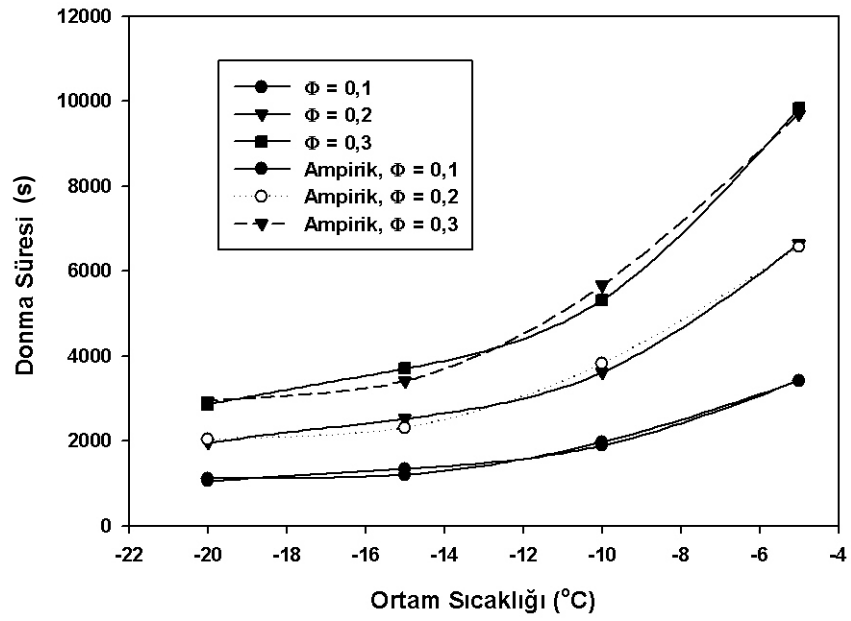
Sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen veriler kullanılarak farklı çaplar için (R=20 mm, R=40 mm ve R=60 mm) hava tarafı ısı taşınım katsayısını, hava sıcaklığını ve gözenekliliği içeren, toplam donma süresini veren

aşağıdaki ampirik fonksiyon regresyon analizi ile elde edilmiştir. Regresyon analizi SigmaPlot 9.0 programı kullanılarak yapılmıştır. Her bir çap için elde edilen farklı katsayılar ve hata oranları Tablo 4.4'te verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi toplam dokuz katsayısı bulunan bu fonksiyon ile elde edilen en yüksek hata değeri $R^2 = 0,9963$ tür. Ampirik fonksiyon ile elde edilen grafiklerin tamamı Ek E'de verilmiştir. Şekil 4.30'da ise en kötü hata değerini veren $R = 20$ mm'ye ait karşılaştırma sonuçları yer almaktadır.

$$t_{\text{donma}} = \left[(a_1 + b_1T + c_1T^2) + (a_2 + b_2T + c_2T^2)h + (a_3 + b_3T + c_3T^2)h^2 \right] + \left[(a_4 + b_4T + c_4T^2) + (a_5 + b_5T + c_5T^2)h + (a_6 + b_6T + c_6T^2)h^2 \right] \varphi + \left[(a_7 + b_7T + c_7T^2) + (a_8 + b_8T + c_8T^2)h + (a_9)h^2 \right] \varphi^2 \quad (4.47)$$

Tablo 4.4: Donma süresi fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri

Katsayı	R 20 mm	R 40 mm	R 60 mm
R^2	0,9963	0,9977	0,9968
a_1	342,4179	1439,3531	6040,5510
b_1	18,8452	121,5432	639,9477
c_1	0,4951	3,5392	18,7459
a_2	-10,2032	-79,1812	-364,8399
b_2	-0,6373	-8,8600	-42,2843
c_2	-0,0175	-0,2717	-1,2450
a_3	0,1278	1,3494	5,5208
b_3	0,0072	0,1590	0,6305
c_3	0,0002	0,0049	0,0182
a_4	84843,2205	107746,4989	142975,5825
b_4	7400,2045	7997,0312	10893,9072
c_4	197,9648	202,5802	288,6715
a_5	-3874,5216	-3818,1400	-5345,9520
b_5	-335,5725	-250,1703	-417,4420
c_5	-8,9469	-5,9661	-11,5197
a_6	54,4054	48,5714	79,6410
b_6	4,7109	2,9328	6,8627
c_6	0,1257	0,0665	0,2007
a_7	-519,9435	-8455,9637	4455,0249
b_7	71,5294	-1060,1699	1283,7142
c_7	3,0596	-35,9670	48,8076
a_8	3,6313	204,6313	-724,4683
b_8	-2,7035	35,7677	-119,4792
c_8	-0,1092	1,1919	-4,5057
a_9	-0,1559	1,0048	1,3575



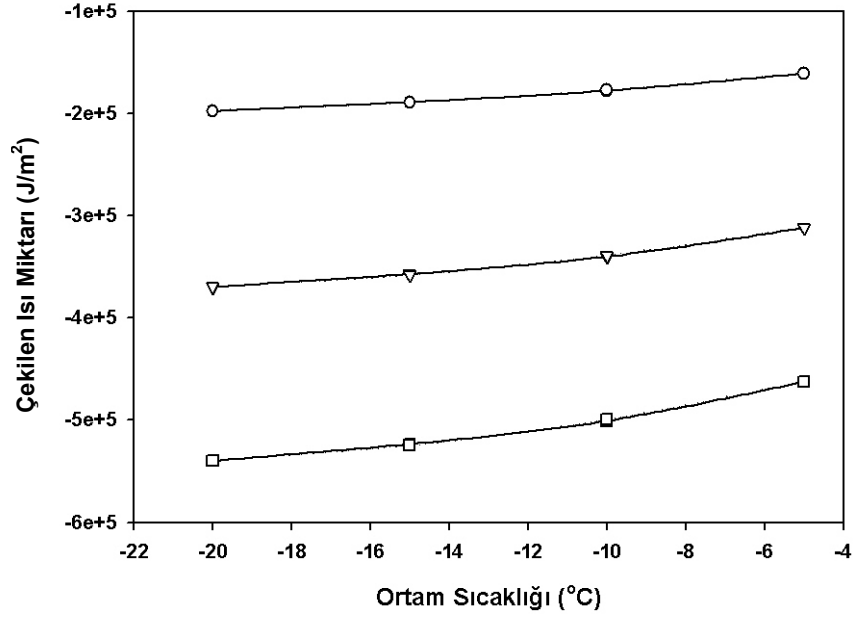
Şekil 4.30: 20 mm yarı çaplı ve taşınım katsayısı 10 W/m²K olan kürede sayısal donma süresi (s) ile ampirik fonksiyon sonuçlarının karşılaştırılması

Tablo 4.5: Çekilen ısı fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri

Katsayı	R 20 mm	R 40 mm	R 60 mm
R^2	1,0000	0,9999	0,9996
a_1	-3556,7817	-42591,2381	-154318,4091
b_1	220,0309	-3694,5464	-7411,4053
c_1	-2,1917	-128,3607	-47,9549
a_2	2,3455	3137,3708	8941,2802
b_2	107,4688	674,1481	859,2314
c_2	1,4681	14,6518	0,2861
a_3	-0,6557	-61,3660	-97,5201
b_3	-0,7981	-9,7676	-1,0572
c_3	-0,0120	-0,2402	0,4035
a_4	-1190204,2487	-791056,8505	-1394742,1590
b_4	39628,8461	159909,9795	86244,3414
c_4	902,2637	3220,3983	-1089,0332
a_5	-20214,8924	-91888,4636	-61070,0530
b_5	-583,8247	-2537,6879	10981,5830
c_5	-17,1938	-49,2857	421,5219
a_6	251,8632	1308,2118	-306,4207
b_6	4,9725	40,8787	-346,7152
c_6	0,0966	0,7145	-13,1402
a_7	-60225,1222	229528,6385	-1812438,1447
b_7	-9880,7858	49556,0290	-212856,0905
c_7	-223,1226	1912,0502	-7171,8356
a_8	5247,7091	6281,8060	182151,2232
b_8	9,0785	-2567,3486	18710,8071
c_8	7,8567	-49,4059	778,2556
a_9	-76,9305	-427,2224	-1512,9237

$$W = \left[(a_1 + b_1 T + c_1 T^2) + (a_2 + b_2 T + c_2 T^2) h + (a_3 + b_3 T + c_3 T^2) h^2 \right] + \left[(a_4 + b_4 T + c_4 T^2) + (a_5 + b_5 T + c_5 T^2) h + (a_6 + b_6 T + c_6 T^2) h^2 \right] \varphi + \left[(a_7 + b_7 T + c_7 T^2) + (a_8 + b_8 T + c_8 T^2) h + (a_9) h^2 \right] \varphi^2 \quad (4.48)$$

Aşağıda, türetilen fonksiyon kullanılarak elde edilen veriler ile deneysel verilerin karşılaştırıldığı bir örnek verilmiştir. Eğriler tamamen çakışıktır. Eğrilerin tamamı Ek E’de yer almaktadır.



Şekil 4.31: 20 mm yarı çaplı ve taşınım katsayısı 10 W/m²K olan kürede sayısal ve ampirik olarak hesaplanan ısı miktarı (J/m²)’nin karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, soğu enerjisinin depolanmasında kullanılabilecek olan ve dağlarda yaz kış bulunabilen karın, küreler haline getirilerek uzak mesafelere taşınması için buzlaştırılması ve buzlaştırma sırasında kürelerdeki ısı geçişi sayısal ve deneysel olarak detaylı incelenmiştir.

Kar ve buz özellikleri ile ilgili geniş bir literatür taraması yapılmış ve daha sonra bu konuda çalışacak araştırmacılara kaynak oluşturabilmek amacıyla geniş bir şekilde tez kapsamında verilmiştir.

Yarım kar kürelerin oluşturulması için Şekil 3.2’de gösterilen mekanik tesisat tasarlanarak üretilmiştir. Bu aparat ile istenilen miktarda kar sıkıştırılarak farklı yoğunluklarda (gözeneklilikte) yarım kar küreler oluşturulmuştur. Bu yarım kar küreler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sisteminde kullanılan termoelemanlar laboratuvarda hazırlanmıştır. Şekil 3.11’de detayı verilen sistem geliştirilmiş ve bu sistemde sözkonusu termoelemanlar kalibre edilmiştir. Farklı gözenekliliklerde kar kürelerin oluşturulması, kar kürelerin sıfır dereceye getirilmesi, sıfır derecedeki kar kürelere sıfır derecede su emdirilmesi, daha sonra kürelerin soğutulması ve bu esnada sıcaklıkların kaydedilebilmesi için bir deney sistemi kurularak deney prosedürü oluşturulmuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, sıkıştırılarak küresel hale getirilen kar kürelerin, sıfır derecede su emdirildikten sonra soğutulması süresince bünyesindeki sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimi deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde farklı gözeneklilik oluşturulacak şekilde çok sayıda koşul için deneysel veri elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda yoğunluğu $0,82 \text{ g/cm}^3$ ’ten büyük olan numunelerin su emmediği gözlemlenmiştir. Kar içerisindeki boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları sıkıştırmanın etkisiyle kesilmiştir.

Farklı koşullardaki deney verileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda;

- Aynı koşullardaki numunelerde aynı karakterde eğriler elde edilmiştir (Şekil 3.35).
- Zorlanmış taşınımli soğutma ile doğal taşınımli soğutma arasındaki fark aynı miktarda su emen yarım küreler için tespit edilmiştir (Şekil 3.36). Doğal taşınımda toplam donma süresi yaklaşık 4 saat sürerken zorlanmış taşınımda yaklaşık 1 saat olmuştur.
- Emilen su miktarı arttıkça soğuma süresinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.37).

Zorlanmış taşınımın söz konusu olduğı deneylerde ortalama taşınım katsayısı $36,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiş ve ışıının etkisinin çok az olduğı tespit edilmiştir.

Kürenin ekstenel simetriye sahip olması nedeniyle çeyrek daire şeklinde iki boyutlu bir model üzerinde sayısal analizler yapılmıştır. Model ile literatürde verilen bazı problemler çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en hassas sonucu verecek şekilde çözüm ağı ve çözücü değişkenleri optimize edilerek oluşturulan model doğrulanmıştır (Şekil 4.8). Modelde faz değişiminin dikkate alınabilmesi için entalpi formülasyonu kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan modelde gözenekli kar kürelerin emdiği suyun dikkate alınabilmesi için emilen su miktarını da gösteren gözeneklilik ile suyun faz değişim ısısı çarpılmış ve elde edilen değer Fluent'e malzemenin faz değişim ısısı olarak girilmiştir. Karın ısı iletim katsayısı ve özgül ısısı sıcaklığa bağılı birer fonksiyon olarak tanımlanmıştır (Tablo 4.2). Farklı gözeneklilikte ve farklı miktarda su emen kar kürelerin sıcaklıklarının zamanla değişimi sayısal olarak kurulan model ile çözülmüş ve her bir deney sonucu için bir de sayısal sonuç oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil A.1 - Şekil A.8).

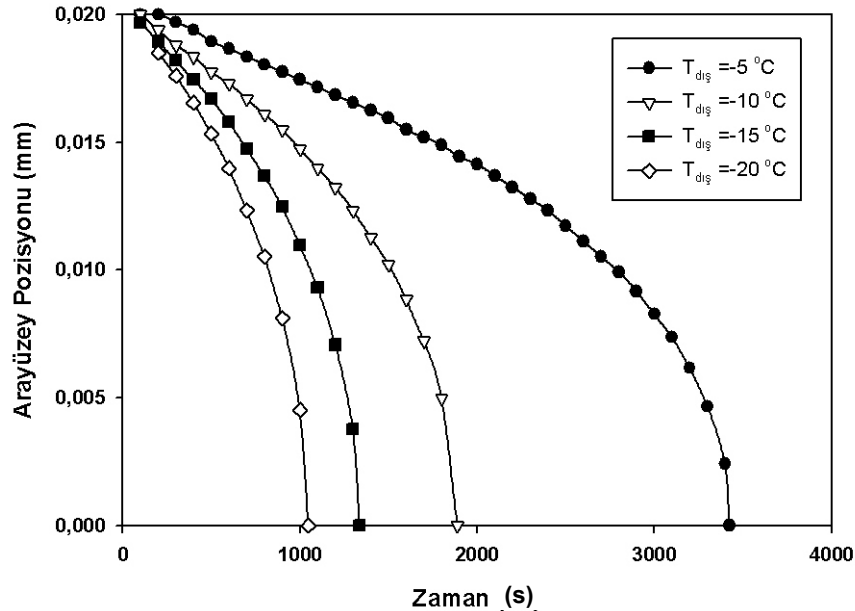
Emilen su miktarı arttıkça sayısal sonuçlarla deneysel sonuçlar birbirinden farklılaşmıştır. Bunun nedenleri aşağıdaki gibi olabilir;

- Kar küre homojen su emmemektedir.
- Karın termofiziksel özellikleri sadece sıcaklıkla değil yoğunluk değişimi ile de farklılık göstermektedir.
- Sıkıştırma esnasında karın dış yüzeyinden merkezine doğru homojen bir sıkışma yoktur. Dış yüzeyler daha çok sıkışır. Bundan dolayı da gözeneklilik farklı olur.

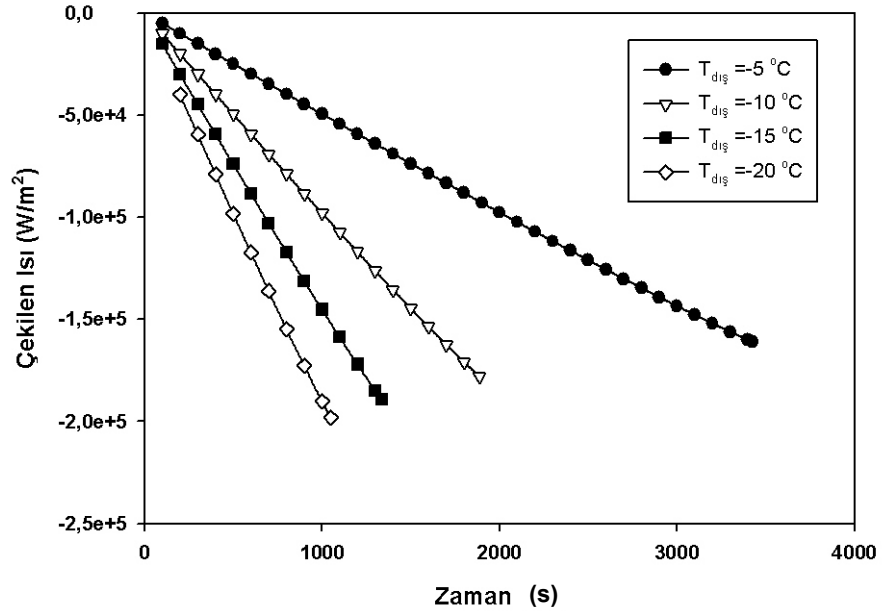
- Zamanla kar kürenin morfolojisi değişmektedir. Buna bağlı olarak ısı özellikler değişir.
- Kar kürenin altında kullanılan 6 cm'lik ısı izolasyon katmanından olan ısı geçişi az da olsa sıcaklık dağılımını etkilemektedir.
- Su içerisine daldırılarak su emdirilen kar kürenin dış yüzeyinde bir sınır tabaka şeklinde kalan su filmi sıcaklık dağılımını etkiler. Eğer sıkışma az ise deneye başlayana kadar yüzeydeki su filmi emilecektir. Sıkışmanın derecesine göre su filmi daha az emilir veya hiç emilemeyebilir. Bu durumda da yüzeydeki sıvı filminin sıcaklık dağılımlarına etkisi olacaktır.

Daha sonra elde edilen sayısal model ile daha fazla veri oluşturularak farklı koşullarda kar kürelerdeki ısı transferlerinin analizleri yapılmıştır. Analizlerde üç farklı gözeneklilik dikkate alınmıştır. Bunlar 0,1, 0,2 ve 0,3 değerleridir. Taşınım katsayısı için $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $40 \text{ W/m}^2\text{K}$, dış ortam sıcaklığı için -5°C , -10°C , -15°C ve -20°C ve yarı çaplar için 20 mm, 40 mm ve 60 mm değerleri dikkate alınmıştır. Toplam 108 farklı koşul için analiz yapılmıştır (Tablo B.1).

Zamanla arayüzeyin pozisyonunu ve çekilen ısıyı farklı koşullar altında gösteren aşağıdaki gibi eğriler (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) oluşturulmuştur.

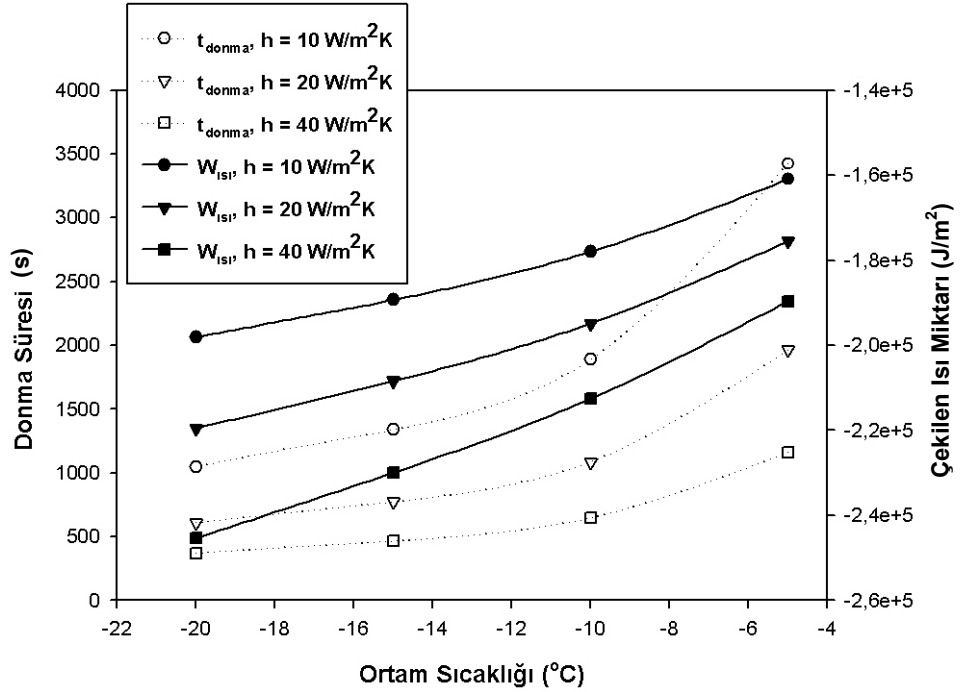


Şekil 5.1: Katılaşma Arayüzeyi Pozisyonunun Zamanla Değişimi
($R = 20 \text{ mm}$, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)



Şekil 5.2: Çekilen Isı Miktarının Zamanla Değişimi
($R = 20 \text{ mm}$, $\phi = 0,1$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Ayrıca farklı yarıçaplara sahip kar kürelerinin farklı su emme koşullarında sıcaklık, taşınım katsayısı gibi değişkenler değiştirilerek donma süreleri ve bu sürede çektikleri ısı miktarları da grafik olarak (Şekil 5.3) elde edilmiştir.



Şekil 5.3: $R=20 \text{ mm}$ yarıçaplı ve $0,1$ gözenekli numunede, farklı taşınım katsayıları olması halinde donma süreleri ve çekilen ısı miktarlarının (J/m^2) sıcaklıkla değişimi

Elde edilen tüm veriler kullanılarak farklı çaplar için (R=20 mm, R=40 mm ve R=60 mm) hava tarafı ısı taşınım katsayısını, hava sıcaklığını ve gözenekliliği içeren, toplam donma süresini veren aşağıdaki ampirik fonksiyon regresyon analizi ile elde edilmiştir. Her bir çap için elde edilen farklı katsayılar ve hata oranları aşağıda tablo haline getirilmiştir.

$$t_{donma} = \left[(a_1 + b_1T + c_1T^2) + (a_2 + b_2T + c_2T^2)h + (a_3 + b_3T + c_3T^2)h^2 \right] + \left[(a_4 + b_4T + c_4T^2) + (a_5 + b_5T + c_5T^2)h + (a_6 + b_6T + c_6T^2)h^2 \right] \varphi + \left[(a_7 + b_7T + c_7T^2) + (a_8 + b_8T + c_8T^2)h + (a_9)h^2 \right] \varphi^2 \quad (5.1)$$

Tablo 5.1: Donma süresi fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri

Katsayı	R 20 mm	R 40 mm	R 60 mm
R^2	0,9963	0,9977	0,9968
a_1	342,4179	1439,3531	6040,5510
b_1	18,8452	121,5432	639,9477
c_1	0,4951	3,5392	18,7459
a_2	-10,2032	-79,1812	-364,8399
b_2	-0,6373	-8,8600	-42,2843
c_2	-0,0175	-0,2717	-1,2450
a_3	0,1278	1,3494	5,5208
b_3	0,0072	0,1590	0,6305
c_3	0,0002	0,0049	0,0182
a_4	84843,2205	107746,4989	142975,5825
b_4	7400,2045	7997,0312	10893,9072
c_4	197,9648	202,5802	288,6715
a_5	-3874,5216	-3818,1400	-5345,9520
b_5	-335,5725	-250,1703	-417,4420
c_5	-8,9469	-5,9661	-11,5197
a_6	54,4054	48,5714	79,6410
b_6	4,7109	2,9328	6,8627
c_6	0,1257	0,0665	0,2007
a_7	-519,9435	-8455,9637	4455,0249
b_7	71,5294	-1060,1699	1283,7142
c_7	3,0596	-35,9670	48,8076
a_8	3,6313	204,6313	-724,4683
b_8	-2,7035	35,7677	-119,4792
c_8	-0,1092	1,1919	-4,5057
a_9	-0,1559	1,0048	1,3575

Aynı şekilde çekilen ısı miktarını veren ampirik formülasyon, SigmaPlot kullanılarak regresyon analizi ile türetilmiştir. Regresyon ile elde edilen bu fonksiyonların ne kadar iyi gerçek değerlerle örtüştüğünü gösteren R^2

(coefficient of determination) değerleri tablolarda verilmiştir. R^2 değerleri 1'e ne kadar yakınsa yapılan tahmin o kadar iyidir. Elde edilen R^2 değerleri incelendiğinde oldukça iyi gerçek değerlere yaklaşıldığı görülebilir. Bu durum Ek C'de tamamı verilen eğrilerden de görülmektedir.

$$W = \left[(a_1 + b_1T + c_1T^2) + (a_2 + b_2T + c_2T^2)h + (a_3 + b_3T + c_3T^2)h^2 \right] + \left[(a_4 + b_4T + c_4T^2) + (a_5 + b_5T + c_5T^2)h + (a_6 + b_6T + c_6T^2)h^2 \right] \varphi + \left[(a_7 + b_7T + c_7T^2) + (a_8 + b_8T + c_8T^2)h + (a_9)h^2 \right] \varphi^2 \quad (5.2)$$

Tablo 5.2: Çekilen ısı fonksiyonu için katsayılar ve hata değerleri

Katsayı	R 20 mm	R 40 mm	R 60 mm
R^2	1,0000	0,9999	0,9996
a_1	-3556,7817	-42591,2381	-154318,4091
b_1	220,0309	-3694,5464	-7411,4053
c_1	-2,1917	-128,3607	-47,9549
a_2	2,3455	3137,3708	8941,2802
b_2	107,4688	674,1481	859,2314
c_2	1,4681	14,6518	0,2861
a_3	-0,6557	-61,3660	-97,5201
b_3	-0,7981	-9,7676	-1,0572
c_3	-0,0120	-0,2402	0,4035
a_4	-1190204,2487	-791056,8505	-1394742,1590
b_4	39628,8461	159909,9795	86244,3414
c_4	902,2637	3220,3983	-1089,0332
a_5	-20214,8924	-91888,4636	-61070,0530
b_5	-583,8247	-2537,6879	10981,5830
c_5	-17,1938	-49,2857	421,5219
a_6	251,8632	1308,2118	-306,4207
b_6	4,9725	40,8787	-346,7152
c_6	0,0966	0,7145	-13,1402
a_7	-60225,1222	229528,6385	-1812438,1447
b_7	-9880,7858	49556,0290	-212856,0905
c_7	-223,1226	1912,0502	-7171,8356
a_8	5247,7091	6281,8060	182151,2232
b_8	9,0785	-2567,3486	18710,8071
c_8	7,8567	-49,4059	778,2556
a_9	-76,9305	-427,2224	-1512,9237

Yapılan tüm çalışmalar neticesinde elde edilen ve bu tezde verilen tüm bilgiler (grafikler ve fonksiyonlar) kullanılarak karın buzlaştırılması, buzlaştırma esnasında arayüzey pozisyonunun zamanla değişimi, zamanla

çekilen ısı miktarları, toplam karın donma süresi ve bu sürede çekilen toplam ısı kolaylıkla tespit edilebilir.

5.1 Bu Alanda Yapılabilecek Diğer Çalışmalar ve Öneriler

Kar kürenin buzlaştırılması ile ilgili yürütülen bu tez kapsamı içerisine alınamayan fakat bu konuya yakın olan bazı ileriye dönük çalışmalar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Buz kürenin boru hattı içindeki akış esnasında erimesinin incelenmesi. Boru hatlarında tıkaç akış şeklinde taşınacak olan buz kürelerin akış süresince ısı transferi deneysel ve teorik olarak incelenebilir. Bir boru hattında buz kürenin ne kadarlık bir kısmının eriyeceği belirlenebilir. Elde edilen bu bilgi ile tez kapsamında yapılan çalışmada verilen eğrilerden yararlanarak tüm kürenin buzlaştırılması yerine sadece eriyecek kadarlık kısmının katılaştırılması sağlanabilir. Bu da daha az enerji sarfiyatı anlamına gelir.
- Gözenekliliğin modellenmesi. Yapılan çalışmada tüm kürenin aynı gözenekliliğe sahip olduğu düşünülmüştür. Oysa deneylerden de görüldüğü gibi gözeneklilik dışarıdan içeriye doğru farklılık göstermektedir. Bu farklılık daha detaylı çalışmalar yapılarak modellenebilir.
- Küçük buz parçalarının sıkıştırılarak su emdirilmesi ve küresel buz haline getirilmesi. Burada yapılan çalışmada kar sıkıştırılarak buzlaştırılmıştır. Benzer bir çalışma mekanik olarak elde edilen buz partikülleri sıkıştırılarak da yapılabilir. Suyun ne kadar bağlayıcı olacağı, gözenekliliğin etkisi gibi parametreler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dinçer, İ. and Rosen, M. A.**, 2002. Thermal energy storage systems and applications, John Wiley&Sons Ltd, England.
- [2] **Colbeck, S.C.**, 1997. A review of sintering in seasonal snow, CRREL Report, 97-10.
- [3] **Colbeck, S.C., Akitaya, E., Armstrong, R., Gubler, H., Lafuille, J., Lind, K., McClung, D. and Morris, E.**, 1997. The international classification for seasonal snow on the ground, The International Commission on Snow and Ice of the Int. Association of Scientific Hydrology and Coissued by Int. Glaciological Soc.
- [4] **Magono, C. and Lee, C.W.**, 1966. Meteorological Classification of Natural Snow Crystals, *Journal of the Faculty of Science*, Hokkaido University.
- [5] **Nakaya, U.**, 1954. Snow Crystals: Natural and Artificial, Harvard University Press.
- [6] **Libbrecht, K.G.**, 2001. Morphogenesis on Ice: The Physics of Snow Crystals, *Engineering & Science*, California Institute of Technology, Volume LXIV, No: 1
- [7] <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>, 2006.
- [8] **Fukusako, S.**, 1990. Thermophysical properties of ice, snow and sea ice, *International Journal of Thermophysics*, **11**, No. 2.
- [9] **Yen, Y.C.**, 1991. Review of thermal properties snow, ice and sea ice, CRREL Report, 81-10.
- [10] **Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C. and Satyawali, P.**, 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part II: Snow Microstructure, *Cold Reg. Sci. Technol.*, **35(3)**, 147-167.
- [11] **Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C. and Coléou, C.**, 1989. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting", *J. Glaciol.*, **35**, 333-342.
- [12] **Jordan, R.**, 1991. A one dimensional temperature model for a snowcover, CRREL Special Report, 91-16.
- [13] **Lehning, M.**, 2006. Energy balance and thermophysical process in snowpacks, *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Part 14, Snow and Glacier Hydrology.

- [14] **Özişik, M.N.**, 1993. Phase change problems in Heat conduction, Wiley-Interscience.
- [15] **Diemand, D. and Klovov, V.**, 2001. A method for producing fine-grained ice snow by compaction, CRREL Report TR-01-12.
- [16] **Prapainop, R. and Maneeratana, K.**, 2004. Simulation of ice formation by the finite volume method, *J. Sci. Technology*, **26(1)**, 55-70.
- [17] **Fish, A.M. and Zaretsky, Y.K.**, 1997. Ice strength as a function of hydrostatic pressure and temperature, CRREL Report, 97-6.
- [18] **Vigneault, C. and Gameda, S.**, 1994. Effect of addition of water on snow compaction, *Energy (Oxford)*, **19(2)**, 187-194.
- [19] **Gameda, S., Vigneault, C. and Raghavan, G.S.V.**, 1996. Snow behaviour under compaction for the production of ice, *Energy (Oxford)*, **21(1)**, 15-20.
- [20] **Marshall, H.P., Conway, H. and Rasmussen, L.A.**, 1999. Snow densification during rain, *Cold Regions Science and Technology*, **30**, 35-41.
- [21] **Eames, I.W. and Adref, K.T.**, 2002. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems, *Applied Thermal Engineering*, **22**, 733-745.
- [22] **Ismail, K.A.R. and Henriguez, J.R.**, 2000. Solidification of pcm inside a spherical capsule, *Energy Conversion&Management*, **41**, 173-187.
- [23] **Hill, J.M. and Kucera, A.**, 1983. Freezing a saturated liquid inside a sphere", *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **26(11)**, 1631-1637.
- [24] **Wu, T., Liaw, H.C. and Chen, Y.Z.**, 2002. Thermal effect of surface tension on the inward solidification of spheres, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **45**, 2055-2065.
- [25] **Milo, J.J. and Brago, S.L.**, 2003. Supercooling water in cylindrical capsules, *15 th symposium on thermophysical properties*, Boulder Colorado, USA, June 22-27.
- [26] **Giangi, M., Stella, F. and Kowalewski, T.A.**, 1999. Phase change problems with free convection: fixed grid numerical simulation, *Computing and Visualization in Science*, **2(2)**, 123-130.
- [27] **Buddhi, D.**, Numerical heat transfer studies of latent heat storage system, TES Lab Laboratory, School of energy environmental studies.
- [28] **Mehling, H., Hiebler, S. and Ziegler, F.**, 2002. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material advantages and potential applications, *Applied Thermal Engineering*, **22(10)**, 1141-1151.

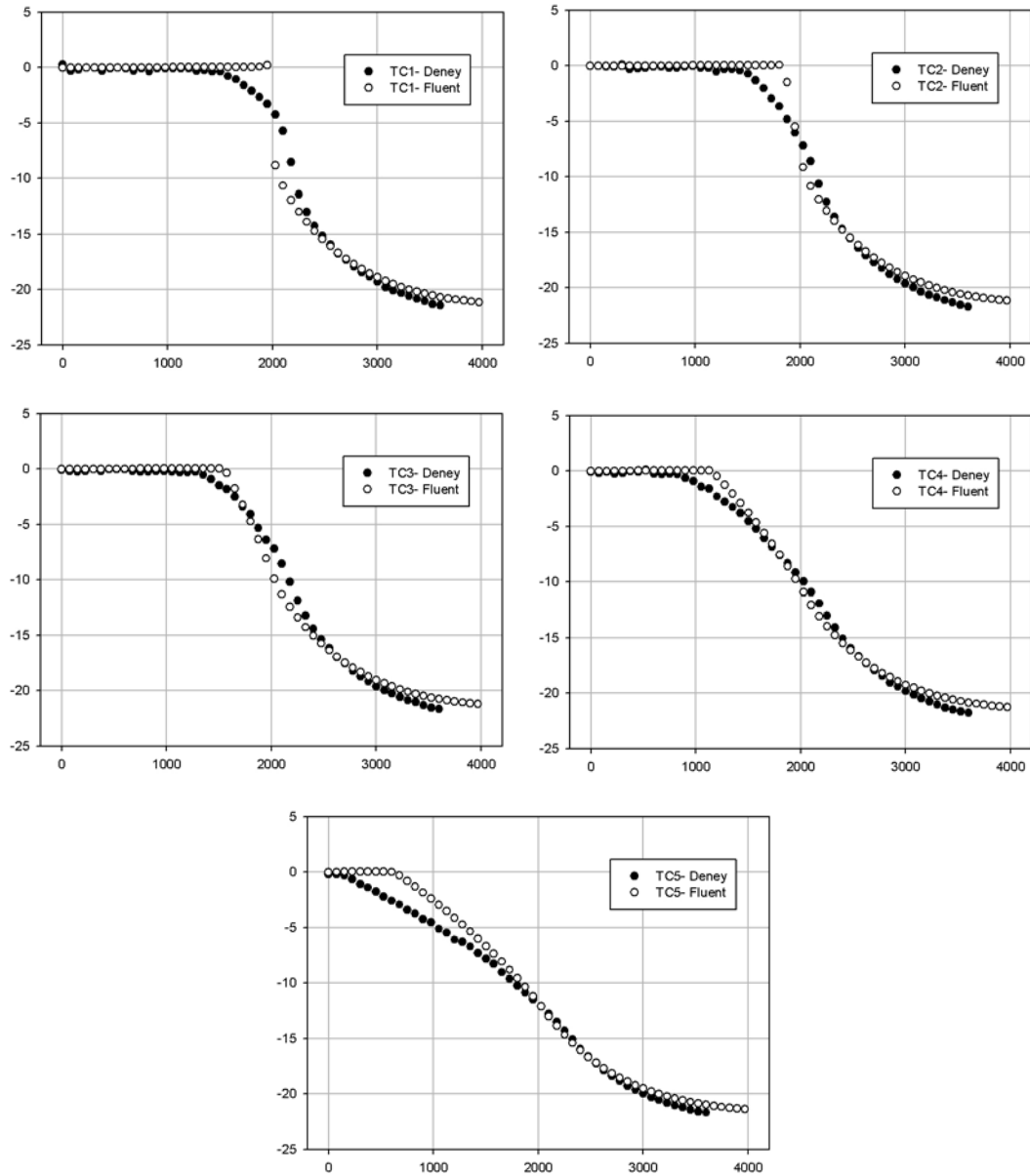
- [29] **Tong, X., Khan, J.A. and Amin, M.R.**, 1996. Enhancement of heat transfer by inserting a metal matrix into a phase change material, *Numerical Heat Transfer*, **30(A)**, 125-141.
- [30] **Cabeza, L.F., Mehling, H., Hiebler, S. and Ziegler, F.**, 2002. Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage, *Applied Thermal Engineering*, **22**, 1141-1151.
- [31] **Fukai, J., Kanou, M., Kodama, Y. and Miyatake, O.**, 2000. Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers, *Energy Conversion&Management*, **41**, 1543-1556.
- [32] **Lazaradis**, 1970. A numerical solution of the multidimensional solidification (or melting) problem, *Int. J. Heat mass transfer*, **13**, 1459-1477.
- [33] **Cho, S.H. and Sunderland, J.E.**, 1970. Phase change of spherical bodies, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **13**, 1231-1233.
- [34] **Riley, D.S., Smith, F.T. and Pottts, G.**, 1974. The inward solidification of spheres and circular cylinders, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **17**, 1507-1516.
- [35] **Shamsunder, N. and Sparrow, E.M.**, 1975. Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model, *ASME Journal of Heat Transfer*, 333-340.
- [36] **Goodling, J.S. and Khader, M.S.**, 1975. Results of the numerical solution for outward solidification with flux boundary conditions, *ASME J. Of Heat Transfer*, 307-309.
- [37] **Shamsundar, N. and Sparrow, E.M.**, 1976. Effect of density change on multidimensional conduction phase change, *ASME J. Heat Transfer*, 550-557.
- [38] **Kemink, R.G. and Sparrow, E.M.**, 1981. Heat transfer coefficients for melting about a vertical cylinder with or without subcooling and for open or closed containment, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **24(10)**, 1699-1710.
- [39] **Costa, M., Oliva, A. and Perez-Segarra, C.**, 1997. Three-dimensional numerical study of melting inside an isothermal horizontal cylinder, *Numerical Heat Transfer*, **32(A)**, 531-553.
- [40] **Roy, S.K. and Sengupta, S.**, 1987. The melting process within spherical enclosures, *Transaction of ASME*, **109**, 460-462.
- [41] **Khan, M.A. and Rohatgi, P.K.**, 1994. Numerical solution to a moving boundary problem in a composite medium, *Numerical Heat Transfer*, **25(A)**, 209-221.
- [42] **Farid, M.M., Hamad, F.A. and Arabi, M.A.**, 1998. Melting and solidification in multi-dimensional geometry and presence of more than one interface, *Energy Convers. Mgmt*, **39(8)**, 809-818.

- [43] **Adref, K.T. and Eames, I.W.**, 2002. Experiments on charging and discharging of spherical thermal (ice) storage elements, *International Journal of Energy Research*, **26**, 949-964.
- [44] **Chen, S.L., Wang, P.P. and Lee, T.S.**, 1999. An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **18**, 299-306.
- [45] London South Bank University, Water Structure and Science <http://www.lsbu.ac.uk/water/phase.html>, 2006.
- [46] **Akyurt, M., Zaki, G. and Habeebullah, B.**, 2003. Freezing phenomena in ice-water systems, *Energy Conversion and Management*, **43**, 1773-1789.
- [47] **Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F. and Mehling, H.**, 2003. Review on thermal energy storage with phase changes materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, **23**, 251-283.
- [48] **Hafner, B.K. and Schwarzer, K.**, 1999. Improvement of the heat transfer in a PCM storage, Solar-Institute Julich, Ginsterweg 1, 52428 Jülich.
- [49] **Costa, M., Buddhi, D. and Oliva, A.**, 1998. Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction, *Energy Convers. Mgmt*, **39**(3/4), 319-330.
- [50] **Chen, S.L.**, 1991. An experimental investigation of cold storage in packed capsules with solidification, *Experimental Heat Transfer*, **4**, 263-280.
- [51] **Ulusarslan, D.**, 2003. Dairesel kesitli plastik borular içinde buz yoğunluğunda küre-su karışım akışının incelenmesi, *Doktora Tezi*, Y. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [52] **Yosida, Z.**, 1963. Physical properties of snow. Ice and Snow, pp. 485–527, Massachusetts: MIT Press., Cambridge.
- [53] **Incropera, F.P. and DeWitt, D.P.**, 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley&Sons.
- [54] Fluent User Guide, 2001
- [55] **Patankar, S.V.**, 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company,
- [56] **Pedroso, R.I. and Domoto, G.A.**, 1973. Perturbation solutions for spherical solidification of saturated liquids, *Journal of Heat Transfer*, **95**(1), 42-46.
- [57] **Shih, Y.P. and Chou, T.C.**, 1971. Analytical solution for freezing a saturated liquid inside or outside spheres, *Chemical Engineering Science*, **26**, 1787-1793.

- [58] **Hill, J.M. and Kucera, A.**, 1983. Freezing a saturated liquid inside a sphere, *International Journal Heat and Mass Transfer*, **26(11)**, 1631-1637.
- [59] **London, A.L. and Seban, R.A.**, 1943. Rate of ice formation, *Transaction of ASME*, **65**, 771-778.
- [60] **Lunardini, V.J.**, 1991. Heat transfer with freezing and thawing, Elsevier.
- [61] Engineering Toolbox, Thermal and thermodynamic properties of ice (density, thermal conductivity and specific heat at temperatures from zero to -100°C), http://www.engineeringtoolbox.com/ice-thermal-properties-d_576.html, 2006

EKLER

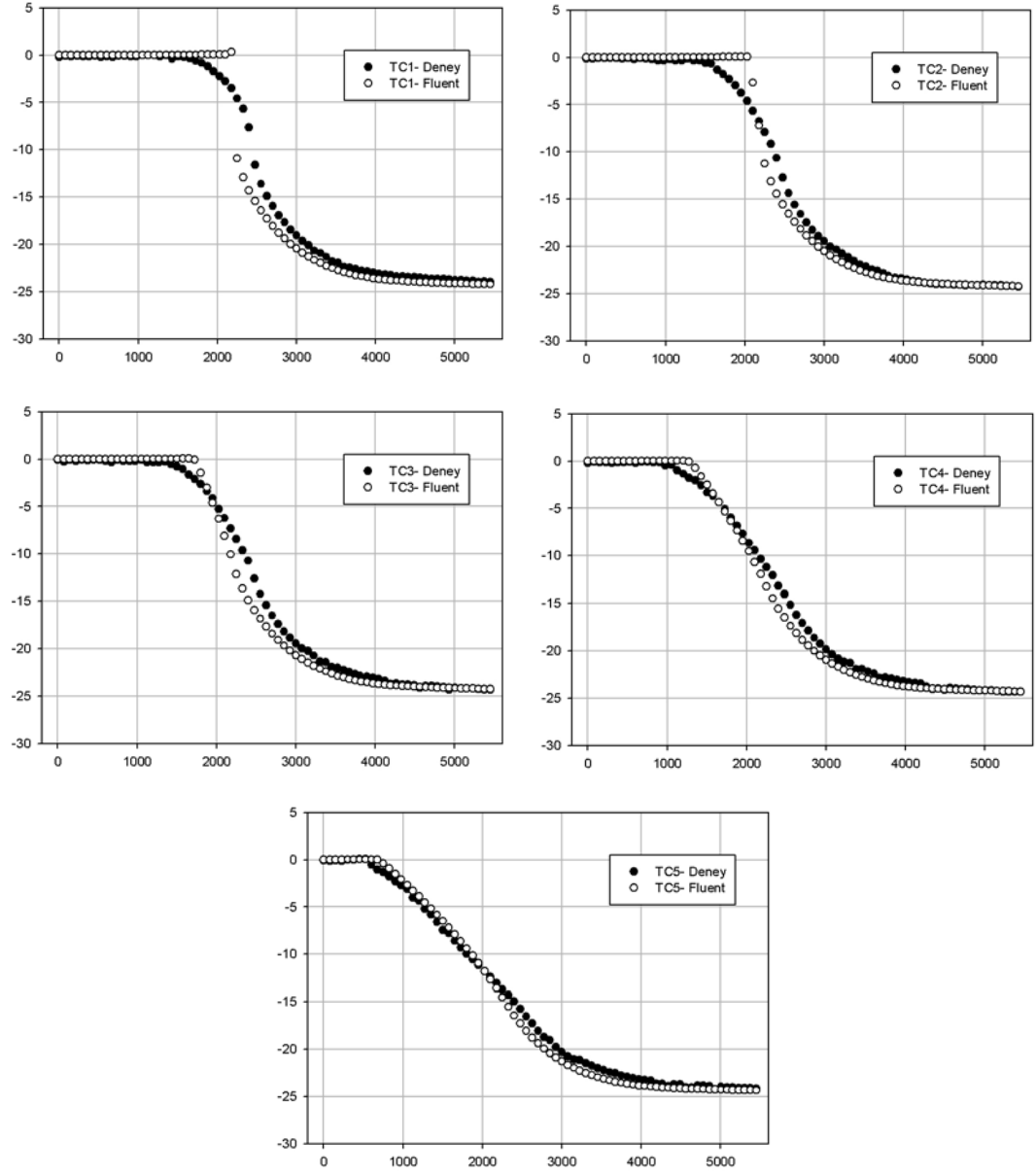
Ek A. Deney sonuçları ile sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırmaları



Şekil A.1: 7 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

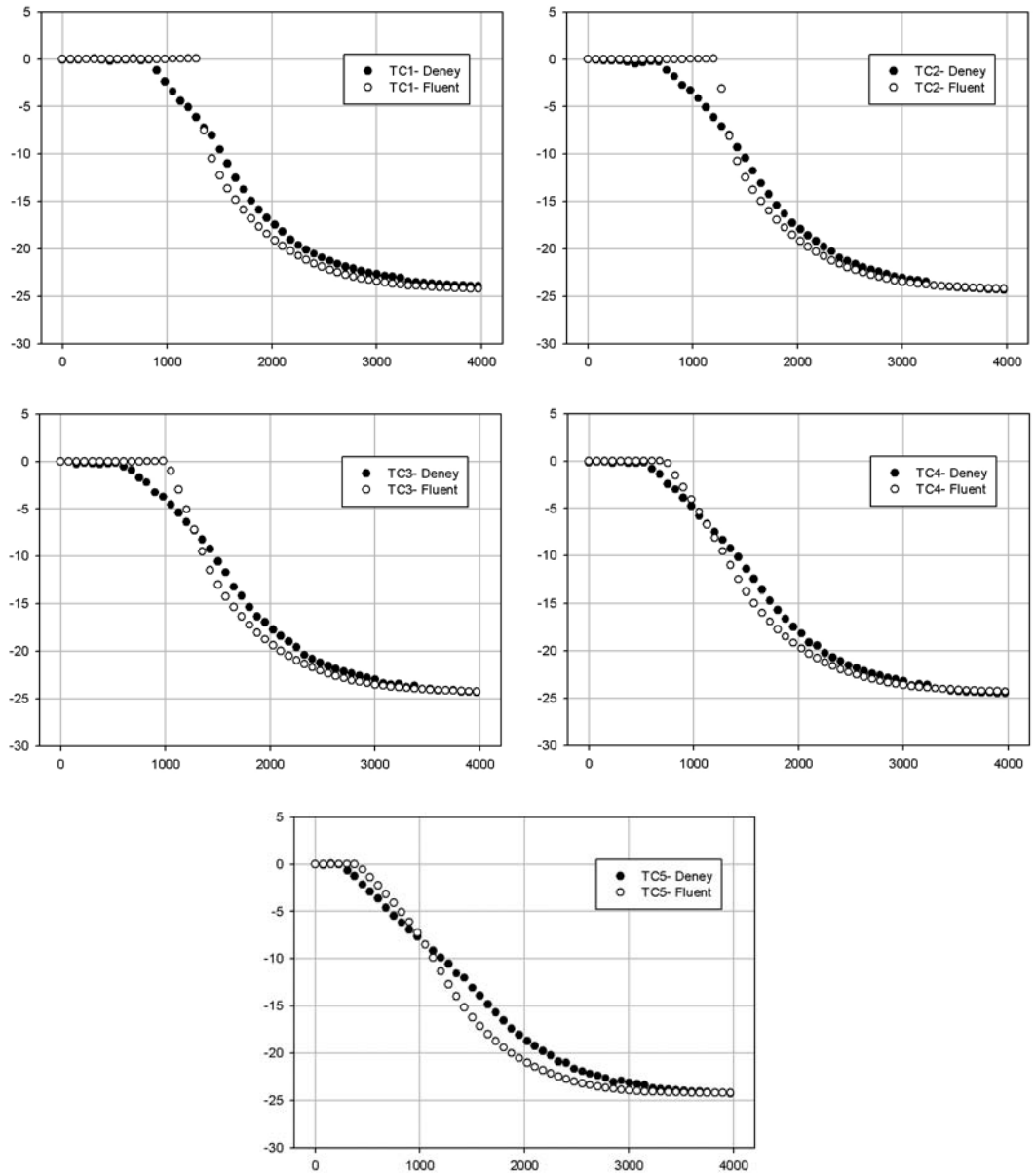
Numunenin ilk kütlesi 87,10 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 119,49 g ve buna göre emilen su miktarı 32 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,2633 olarak bulunur. Yani kürenin tamamının buz olabilmesi için yaklaşık %26'lık

kısmı su içerecektir. Fluent'te girilen suyun faz değişim ısısı 0,2633 ile çarpılır. Bu durumda faz değişim ısısı $L = 87784 \text{ J/kg}$ olur.



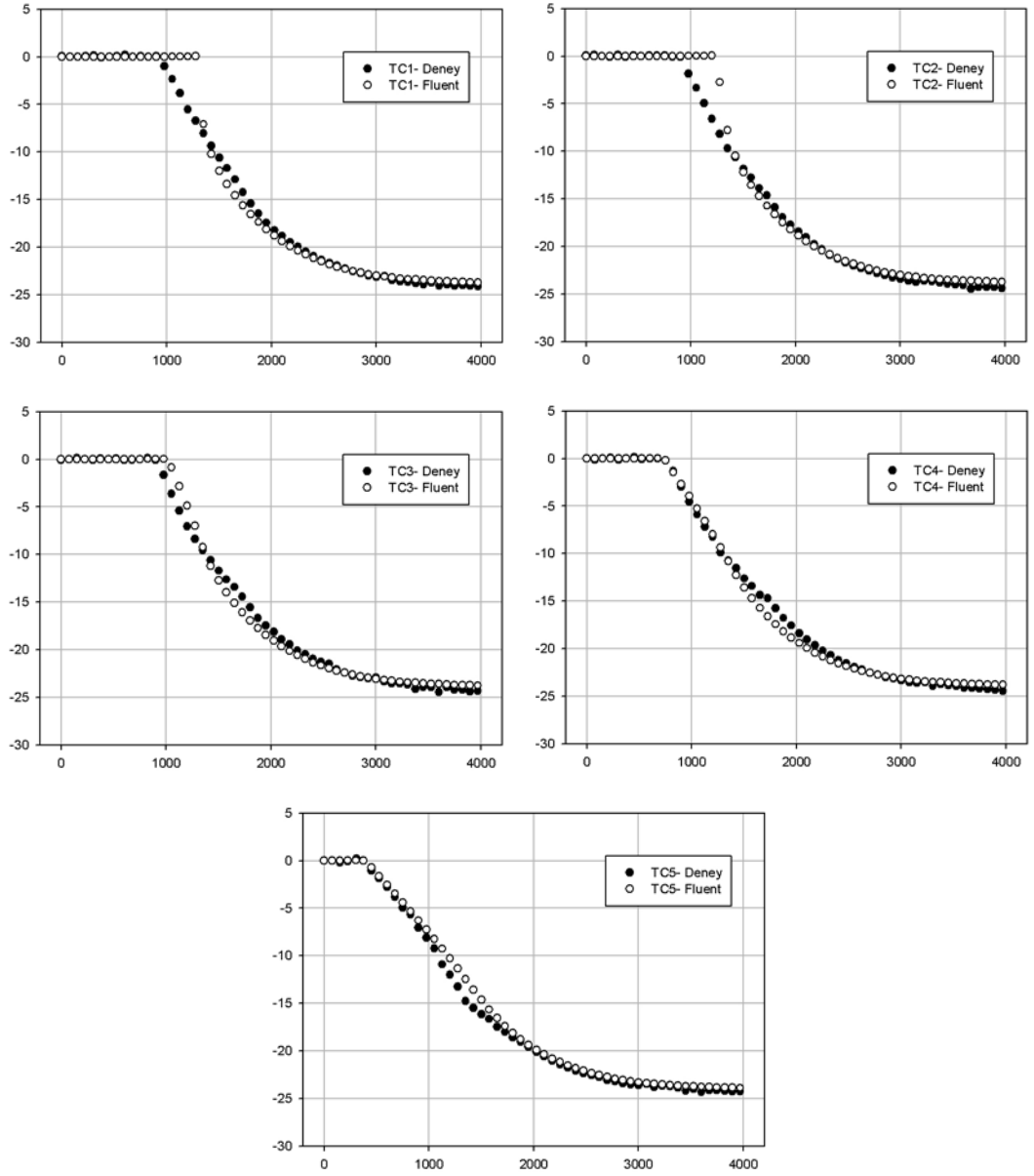
Şekil A.2: 8 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 68,56 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 110,52 g ve buna göre emilen su miktarı 42 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,3413 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 113790 \text{ J/kg}$ olur.



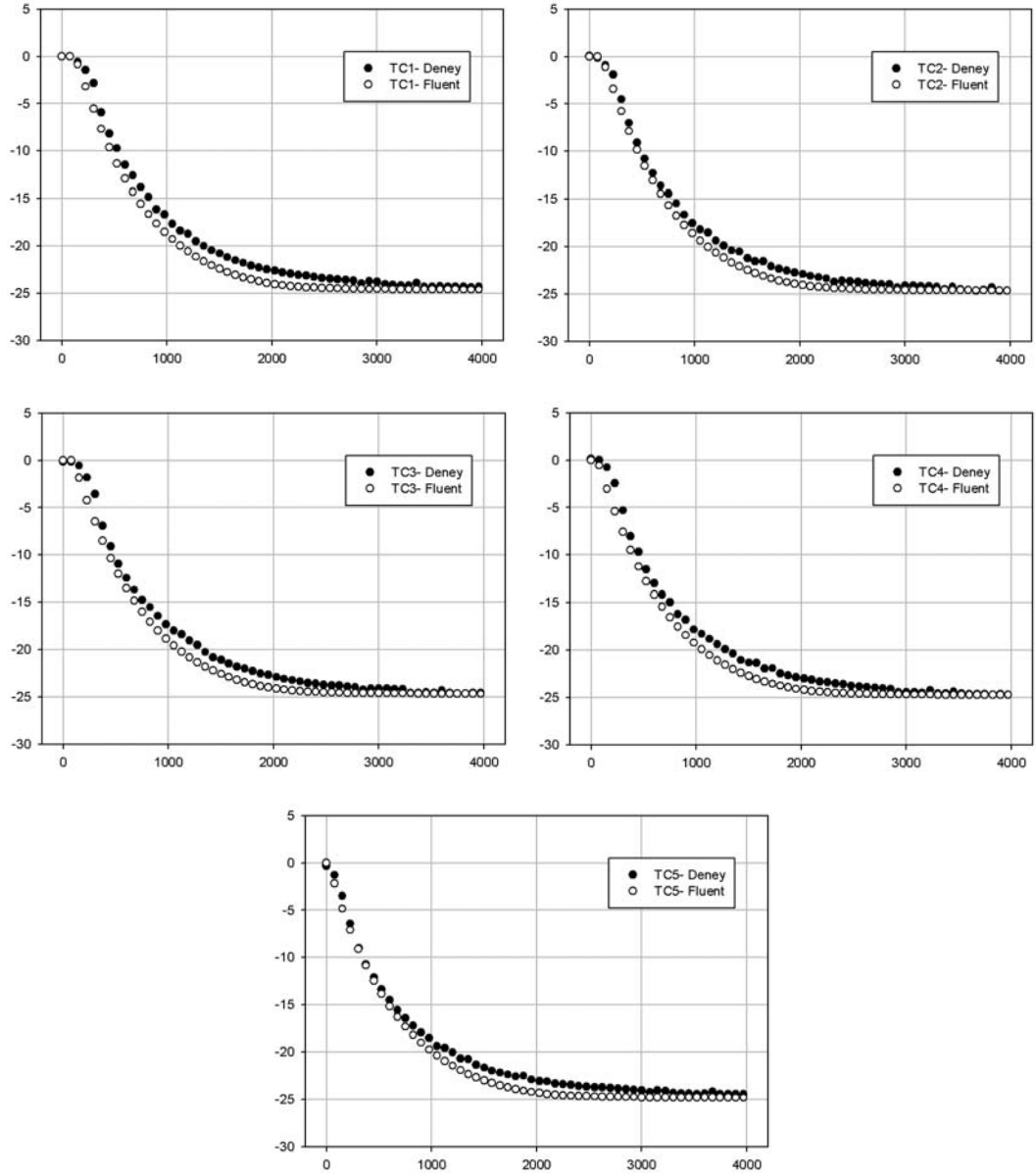
Şekil A.3: 9 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 87,91 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 110,93 g ve buna göre emilen su miktarı 23 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,1860 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 62012 \text{ J/kg}$ olur.



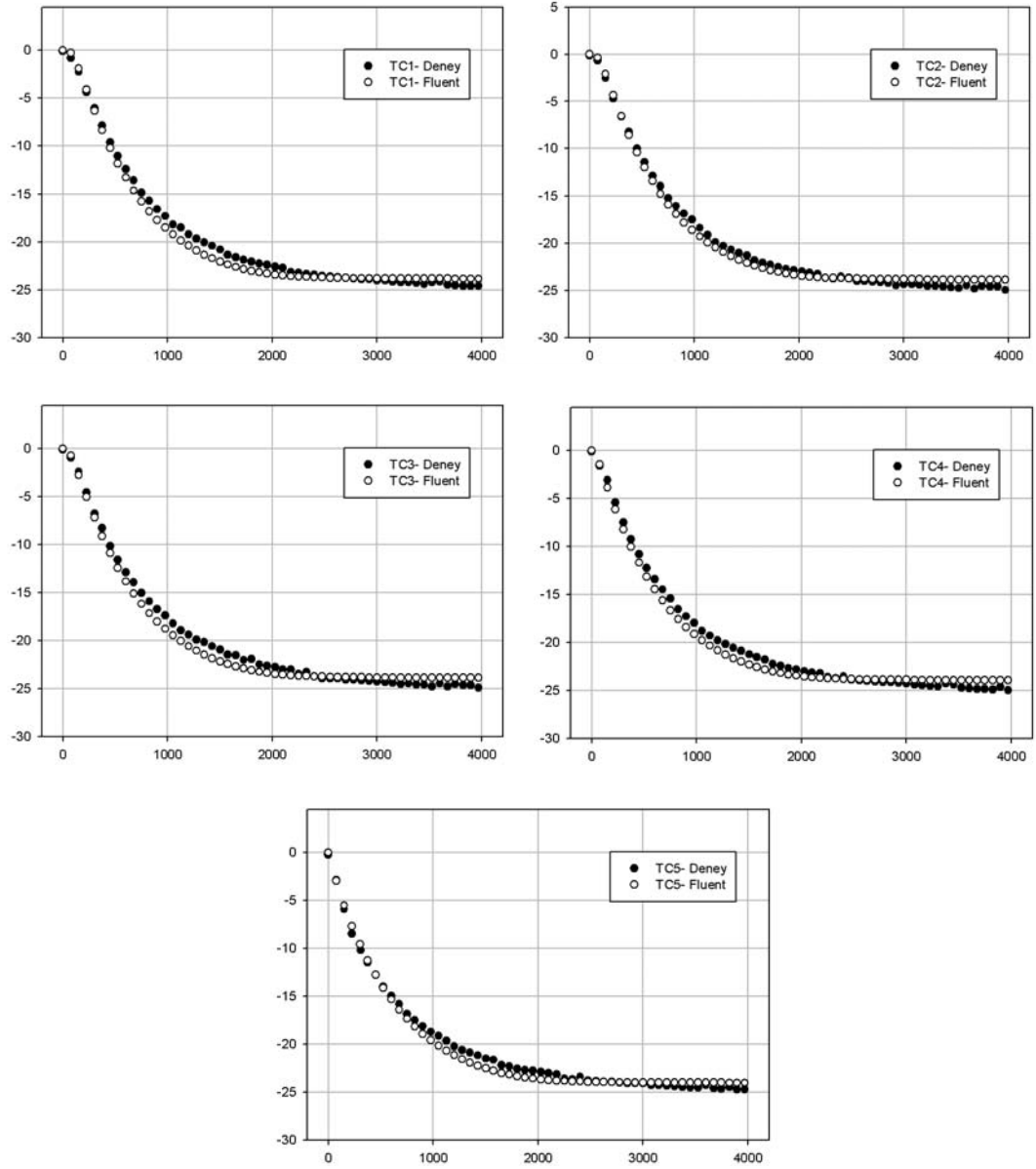
Şekil A.4: 10 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 86,35 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 109,15 g ve buna göre emilen su miktarı 23 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,1850 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 61680 \text{ J/kg}$ olur.



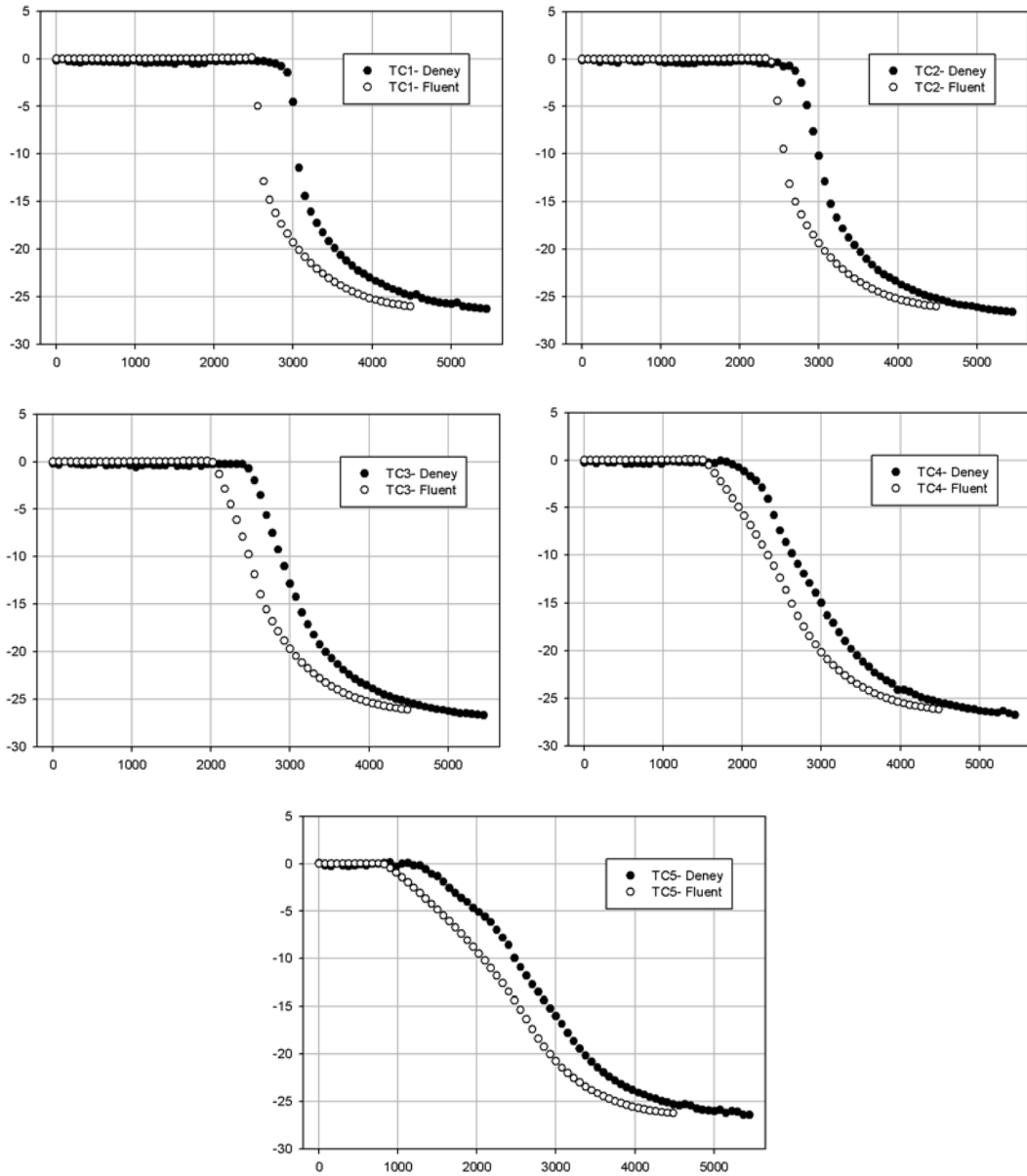
Şekil A.5: 11 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 105,39 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 106,47 g ve buna göre emilen su miktarı 1 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,008 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 2660 \text{ J/kg}$ olur.



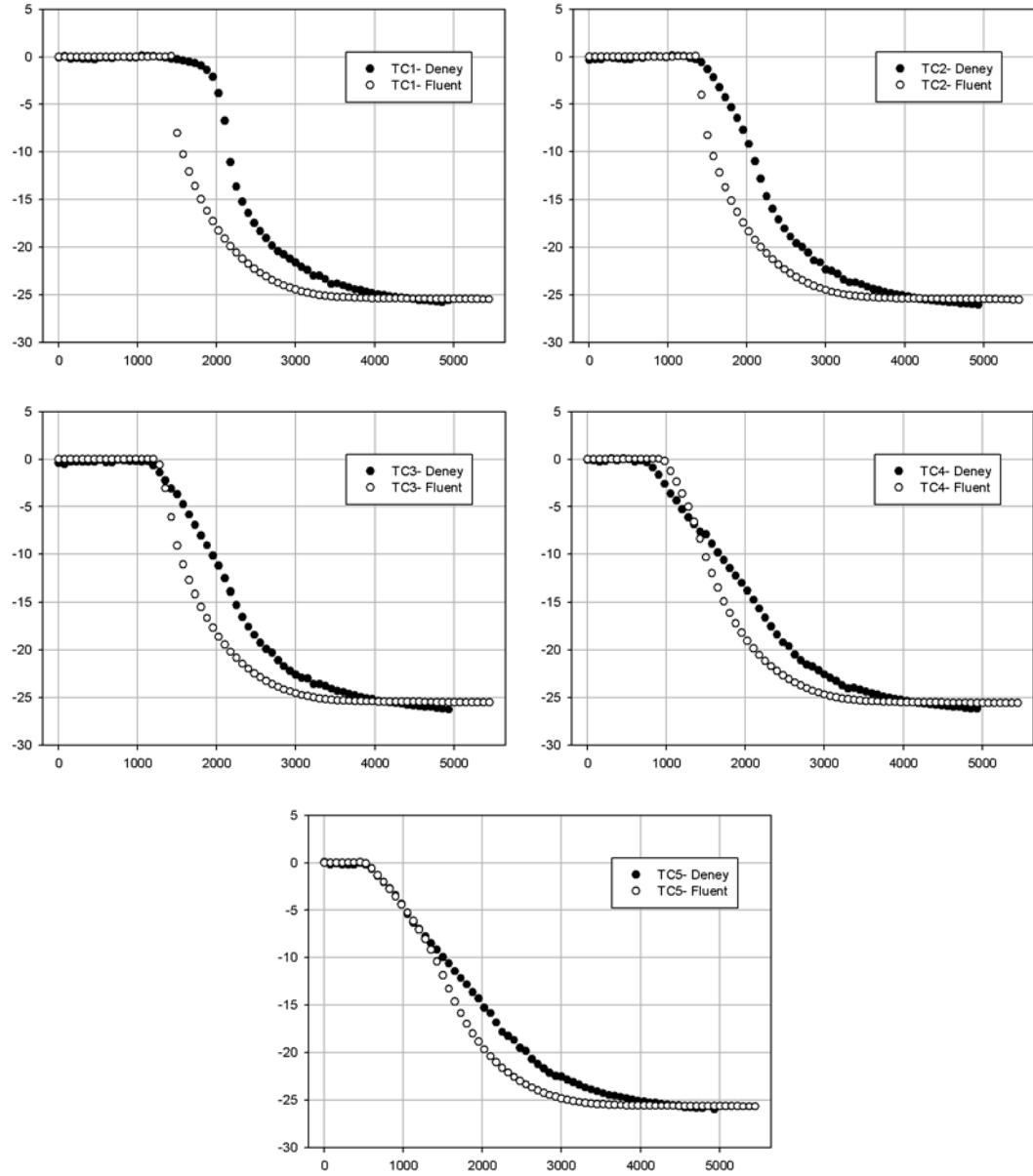
Şekil A.6: 12 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 102,69 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 102,70 g ve buna göre emilen su miktarı 0 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,0 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 0 \text{ J/kg}$ olur.



Şekil A.7: 13 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 58,82 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 113,02 g ve buna göre emilen su miktarı 54 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,44 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 146696 \text{ J/kg}$ olur.



Şekil A.8: 14 nolu deney sonucu ile sayısal sonucun karşılaştırılması
(x- zaman (s), y- sıcaklık (°C))

Numunenin ilk kütlesi 78,20 g, su emdirildikten sonraki kütlesi 111,45 g ve buna göre emilen su miktarı 33 g'dır. Buz küreye göre gözeneklilik 0,27 olarak bulunur. Bu durumda Fluent'e tanımlanan faz değişim ısısı $L = 90018 \text{ J/kg}$ olur.

Ek B. Kar küreler için yapılan sayısal analizlerde bulunan donma süreleri ve çekilen ısı miktarları tablosu

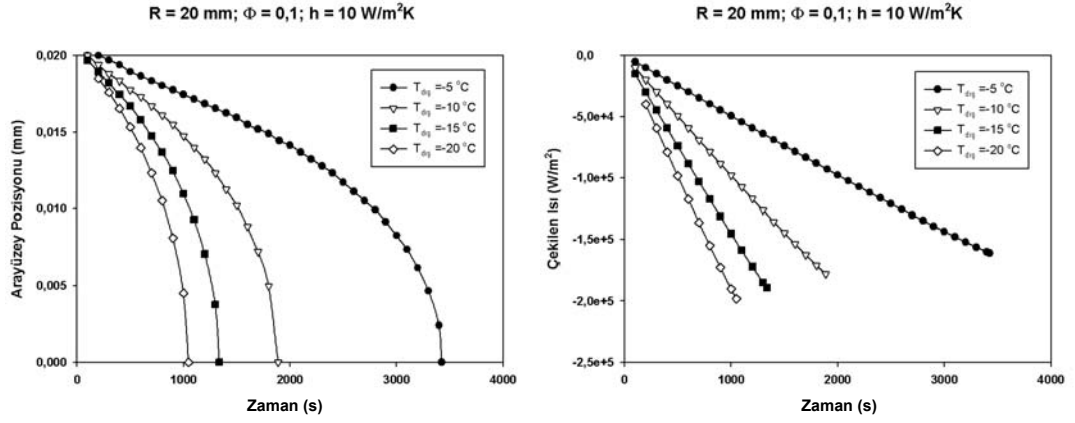
Tablo B.1: Donma süreleri (s) ve çekilen ısı miktarları (J/m^2)

No	Φ	h ($\text{W/m}^2\text{K}$)	$T_{\text{dış}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	R (mm)	t_{donma} (s)	Çekilen Isı (J/m^2)
1	0,1	10	-5	20	3424	-160954,2126
2	0,1	10	-5	40	5500	-245617,4442
3	0,1	10	-5	60	8345	-361413,1436
4	0,1	10	-10	20	1888	-177982,0124
5	0,1	10	-10	40	3434	-307902,2053
6	0,1	10	-10	60	4882	-423650,4643
7	0,1	10	-15	20	1337	-189323,1452
8	0,1	10	-15	40	2583	-348258,4001
9	0,1	10	-15	60	3848	-499814,2800
10	0,1	10	-20	20	1048	-198032,9734
11	0,1	10	-20	40	2119	-381691,9585
12	0,1	10	-20	60	3135	-544769,7189
13	0,1	20	-5	20	1963	-175534,0231
14	0,1	20	-5	40	3635	-296336,7406
15	0,1	20	-5	60	5235	-404530,1855
16	0,1	20	-10	20	1085	-194882,9796
17	0,1	20	-10	40	2230	-366267,4470
18	0,1	20	-10	60	3353	-515155,6244
19	0,1	20	-15	20	772	-208412,0093
20	0,1	20	-15	40	1670	-413053,8523
21	0,1	20	-15	60	2563	-596108,3670
22	0,1	20	-20	20	609	-219522,4202
23	0,1	20	-20	40	1361	-450039,2726
24	0,1	20	-20	60	2137	-664103,7194
25	0,1	40	-5	20	1161	-189621,1535
26	0,1	40	-5	40	2465	-344014,3872
27	0,1	40	-5	60	3832	-484162,9983
28	0,1	40	-10	20	647	-212551,2412
29	0,1	40	-10	40	1487	-419211,2203
30	0,1	40	-10	60	2373	-601771,6980
31	0,1	40	-15	20	465	-229933,9654
32	0,1	40	-15	40	1117	-476020,0243
33	0,1	40	-15	60	1818	-695240,6527
34	0,1	40	-20	20	371	-245389,2364
35	0,1	40	-20	40	910	-520000,5031
36	0,1	40	-20	60	1518	-781001,0963
37	0,2	10	-5	20	6637	-311876,0812
38	0,2	10	-5	40	10360	-460571,2344
39	0,2	10	-5	60	14850	-642333,8303
40	0,2	10	-10	20	3610	-340152,9515
41	0,2	10	-10	40	6415	-573264,2404
42	0,2	10	-10	60	8922	-770103,2599
43	0,2	10	-15	20	2525	-357344,8988
44	0,2	10	-15	40	4788	-643370,6023
45	0,2	10	-15	60	6890	-889890,3227
46	0,2	10	-20	20	1960	-370143,9106
47	0,2	10	-20	40	3872	-695056,4189
48	0,2	10	-20	60	5660	-977488,3846
49	0,2	20	-5	20	3765	-336429,5208

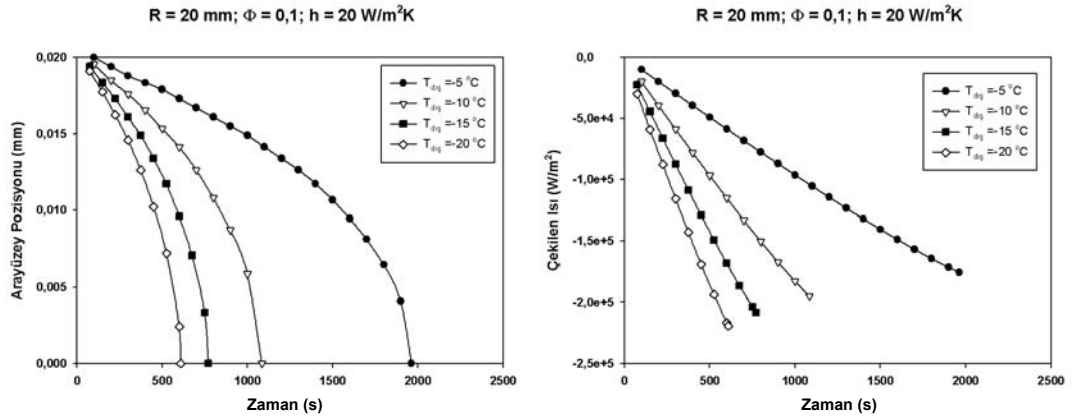
No	Φ	h (W/m ² K)	T_{dis} (°C)	R (mm)	t_{donma} (s)	Çekilen Isı (J/m ²)
50	0,2	20	-5	40	6857	-555674,1737
51	0,2	20	-5	60	9581	-732345,2489
52	0,2	20	-10	20	2037	-365455,6292
53	0,2	20	-10	40	4110	-671085,2446
54	0,2	20	-10	60	6070	-925879,3575
55	0,2	20	-15	20	1426	-384426,9345
56	0,2	20	-15	40	3011	-739856,0716
57	0,2	20	-15	60	4565	-1046783,0690
58	0,2	20	-20	20	1111	-399734,1808
59	0,2	20	-20	40	2417	-794211,9246
60	0,2	20	-20	60	3770	-1156066,9210
61	0,2	40	-5	20	2195	-357920,0385
62	0,2	40	-5	40	4587	-634793,1663
63	0,2	40	-5	60	7061	-884872,0596
64	0,2	40	-10	20	1188	-389309,7030
65	0,2	40	-10	40	2684	-748975,9199
66	0,2	40	-10	60	4256	-1063377,5460
67	0,2	40	-15	20	835	-411348,7779
68	0,2	40	-15	40	1961	-825636,3341
69	0,2	40	-15	60	3150	-1182463,4970
70	0,2	40	-20	20	655	-431200,7851
71	0,2	40	-20	40	1569	-884917,8396
72	0,2	40	-20	60	2601	-1308294,0530
73	0,3	10	-5	20	9838	-462250,7243
74	0,3	10	-5	40	15144	-671473,4346
75	0,3	10	-5	60	21260	-918626,9693
76	0,3	10	-10	20	5315	-500747,2694
77	0,3	10	-10	40	9381	-836803,8603
78	0,3	10	-10	60	12892	-1109862,3560
79	0,3	10	-15	20	3699	-523414,6483
80	0,3	10	-15	40	6954	-933132,6398
81	0,3	10	-15	60	9877	-1272565,9210
82	0,3	10	-20	20	2860	-539947,3018
83	0,3	10	-20	40	5592	-1002287,8590
84	0,3	10	-20	60	8160	-1405396,8090
85	0,3	20	-5	20	5554	-496094,6518
86	0,3	20	-5	40	10031	-811121,9219
87	0,3	20	-5	60	13885	-1056423,8190
88	0,3	20	-10	20	2978	-534080,3892
89	0,3	20	-10	40	5955	-970181,2624
90	0,3	20	-10	60	8729	-1326482,8860
91	0,3	20	-15	20	2070	-557699,2854
92	0,3	20	-15	40	4317	-1057974,6180
93	0,3	20	-15	60	6528	-1489102,1570
94	0,3	20	-20	20	1602	-576037,1086
95	0,3	20	-20	40	3437	-1126287,7040
96	0,3	20	-20	60	5269	-1607670,3500
97	0,3	40	-5	20	3220	-524688,8919
98	0,3	40	-5	40	6704	-924273,4251
99	0,3	40	-5	60	10094	-1261345,9170
100	0,3	40	-10	20	1721	-563420,8858
101	0,3	40	-10	40	3856	-1072018,4290
102	0,3	40	-10	60	6171	-1528928,8660
103	0,3	40	-15	20	1197	-588898,4187

No	Φ	h (W/m ² K)	T_{dis} (°C)	R (mm)	t_{donma} (s)	Çekilen Isı (J/m ²)
104	0,3	40	-15	40	2776	-1163977,9240
105	0,3	40	-15	60	4450	-1654204,6030
106	0,3	40	-20	20	931	-612043,1911
107	0,3	40	-20	40	2199	-1233175,8710
108	0,3	40	-20	60	3616	-1803324,3510

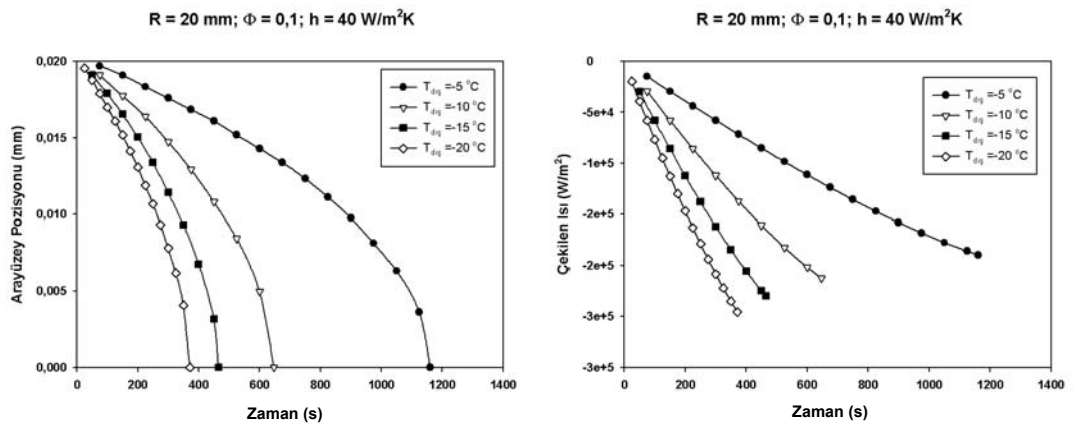
Ek C. Arayüzey Pozisyonunun Zamanla Değişimi ve Çekilen Isı



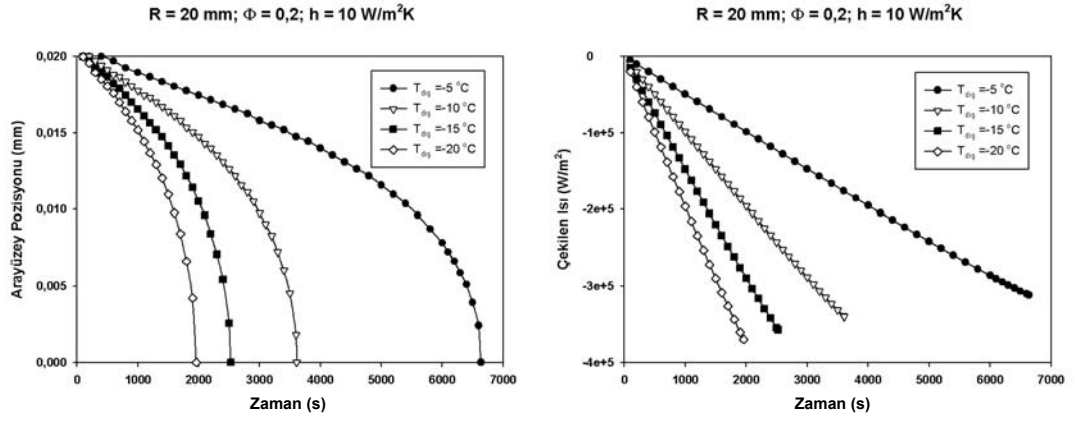
Şekil C.1: R=20 mm, $\Phi=0,1$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



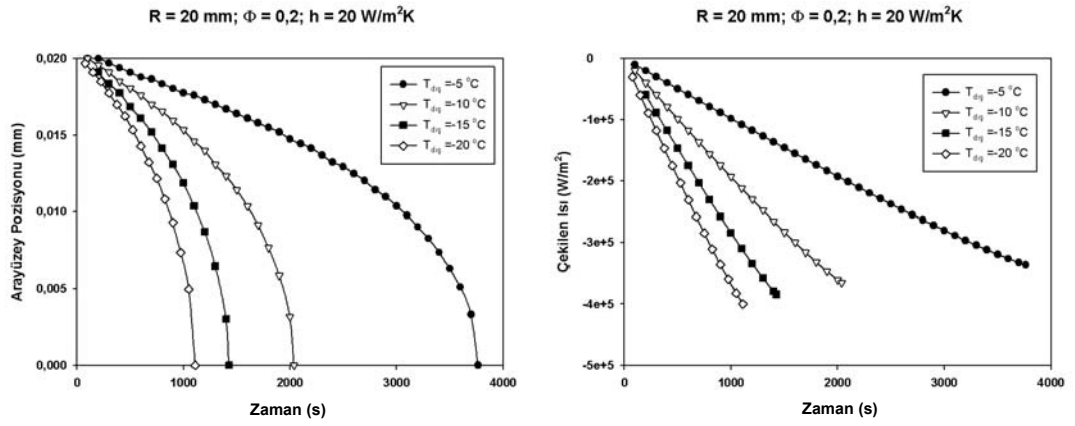
Şekil C.2: R=20 mm, $\Phi=0,1$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



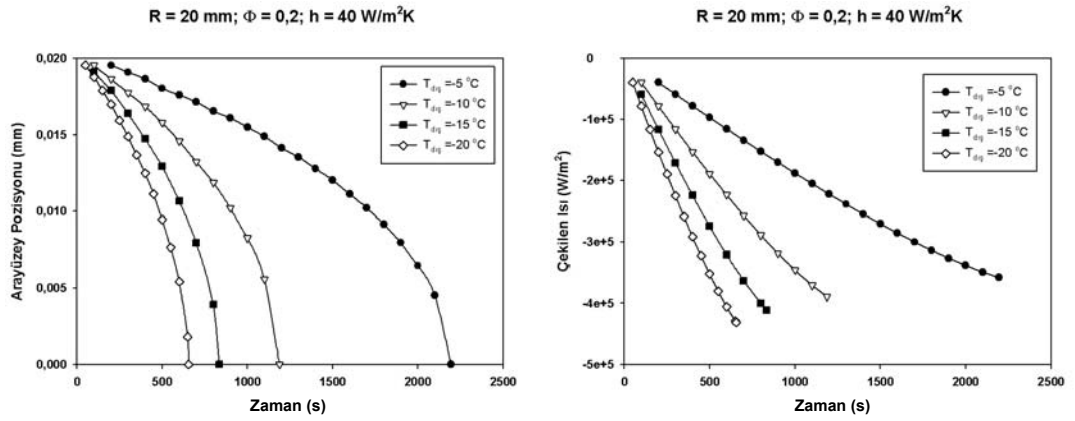
Şekil C.3: R=20 mm, $\Phi=0,1$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



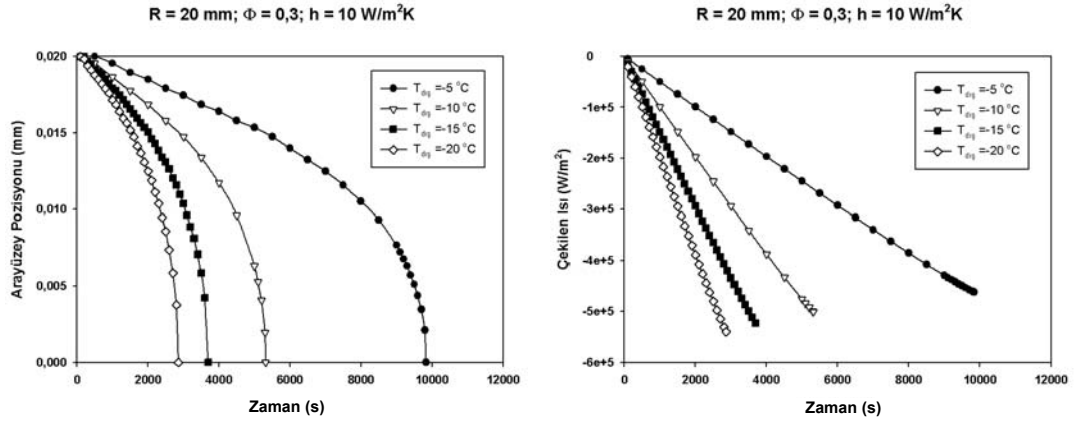
Şekil C.4: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,2$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



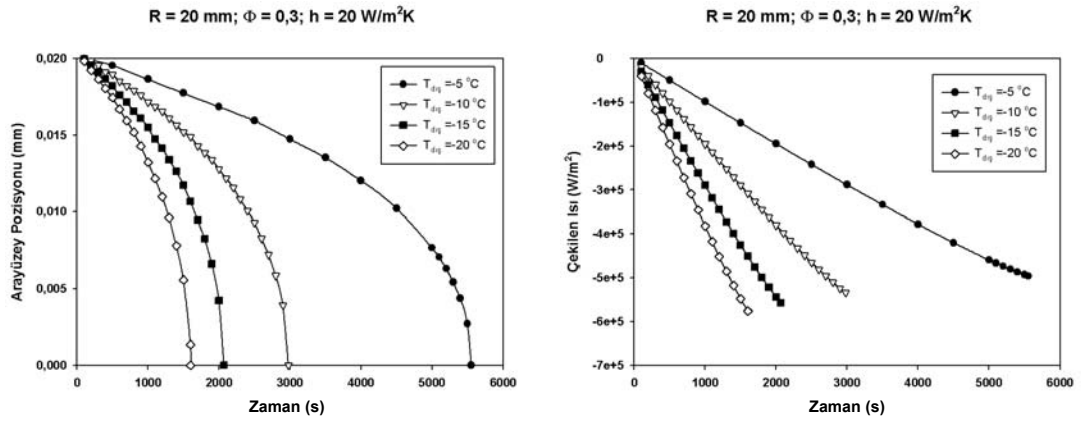
Şekil C.5: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,2$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



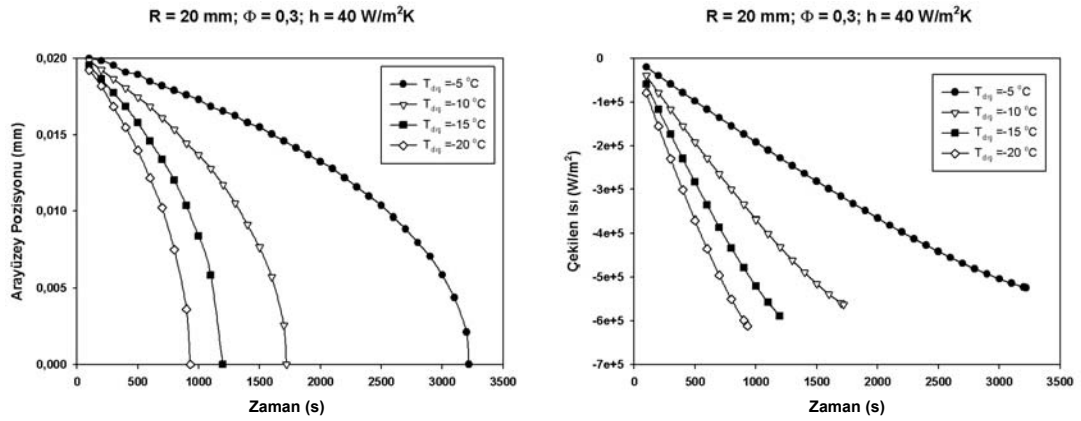
Şekil C.6: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,2$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



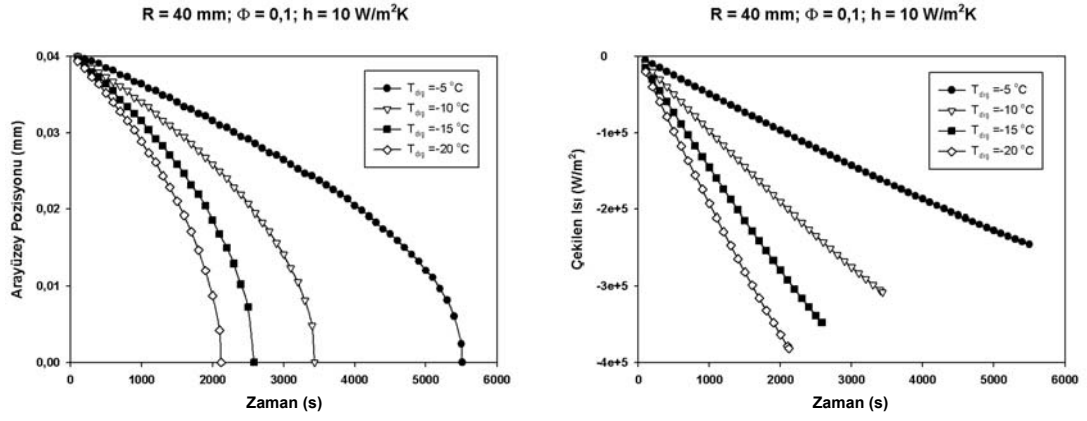
Şekil C.7: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



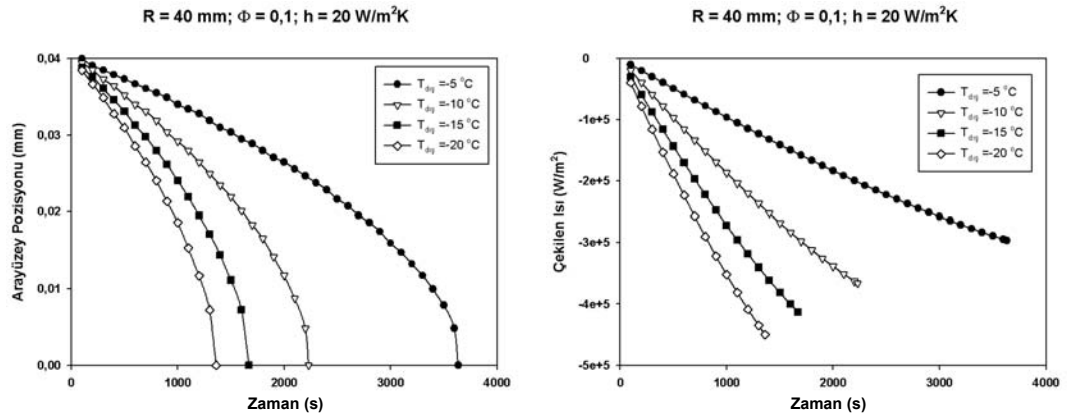
Şekil C.8: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



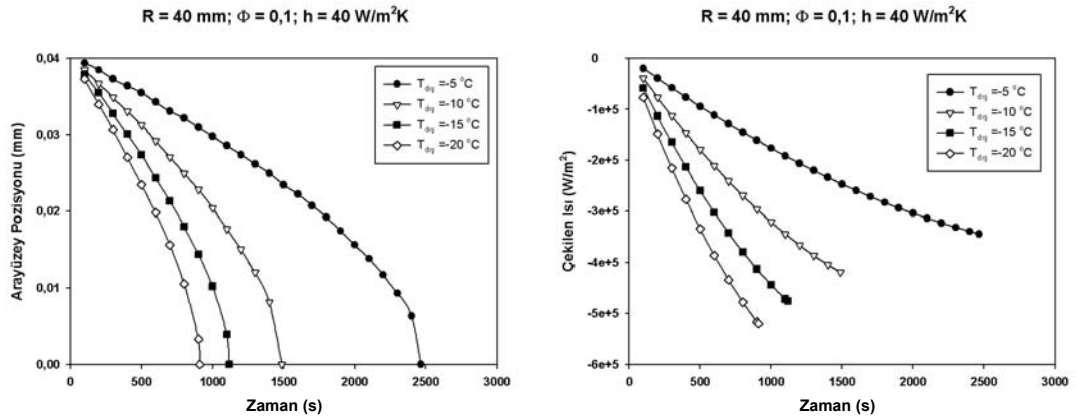
Şekil C.9: $R=20 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



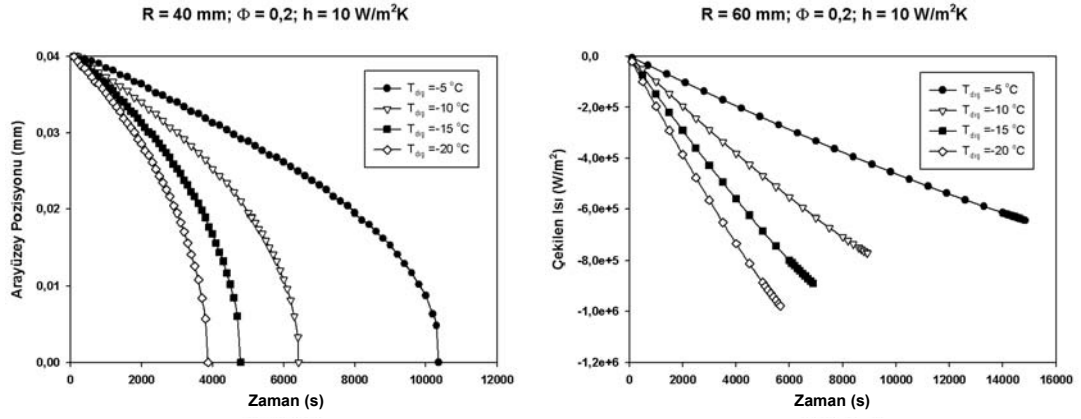
Şekil C.10: $R=40 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



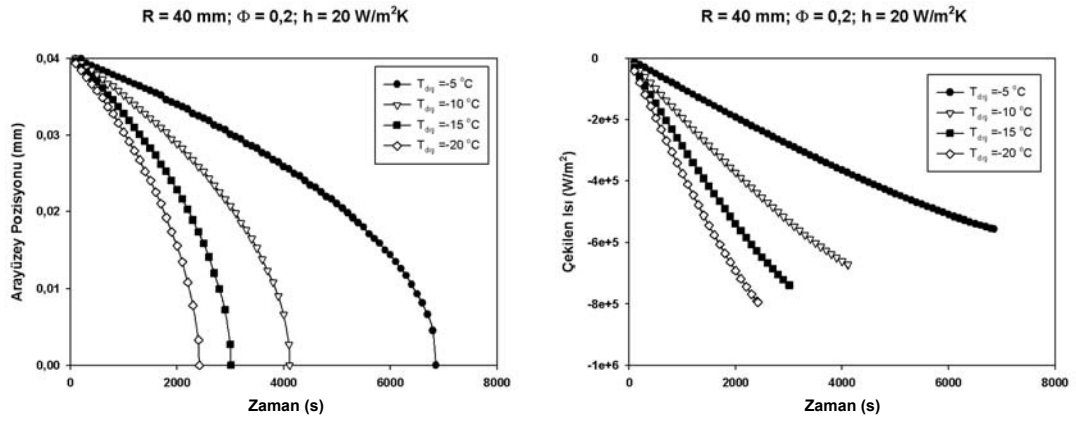
Şekil C.11: $R=40 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



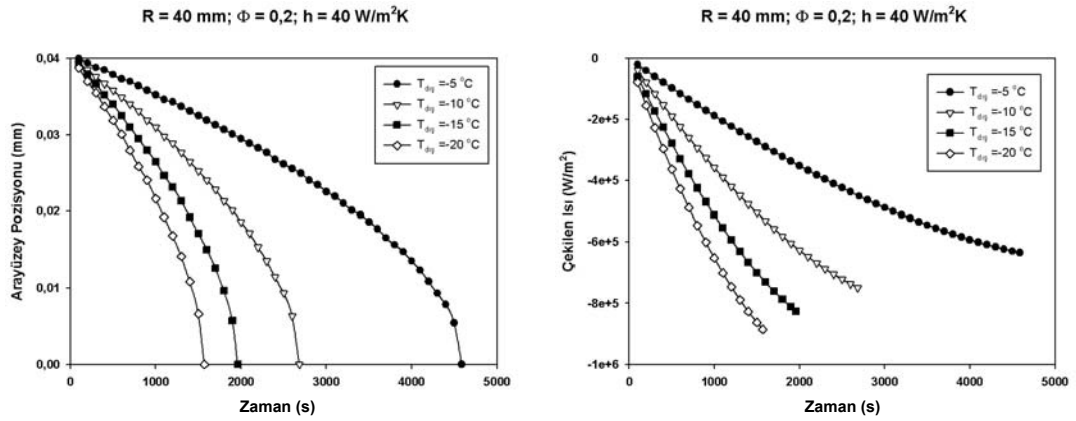
Şekil C.12: $R=40 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



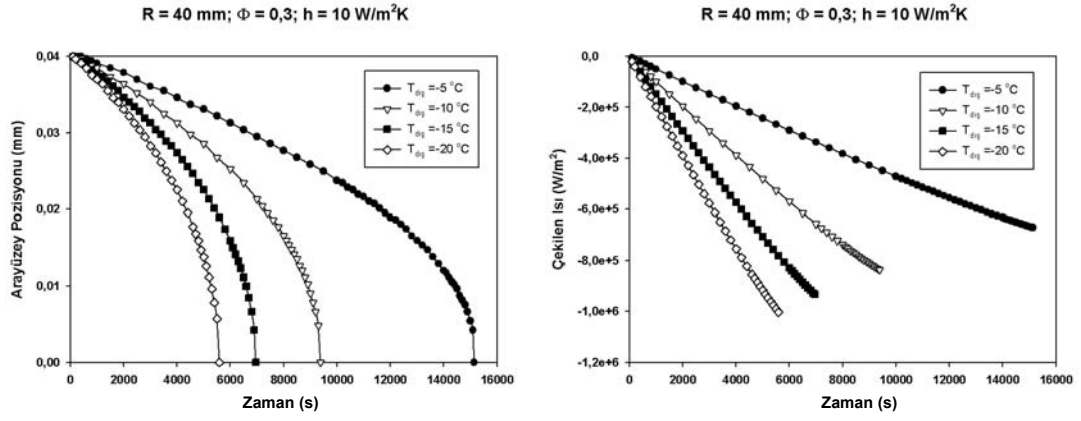
Şekil C.13: $R=40 \text{ mm}$, $\phi=0,2$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



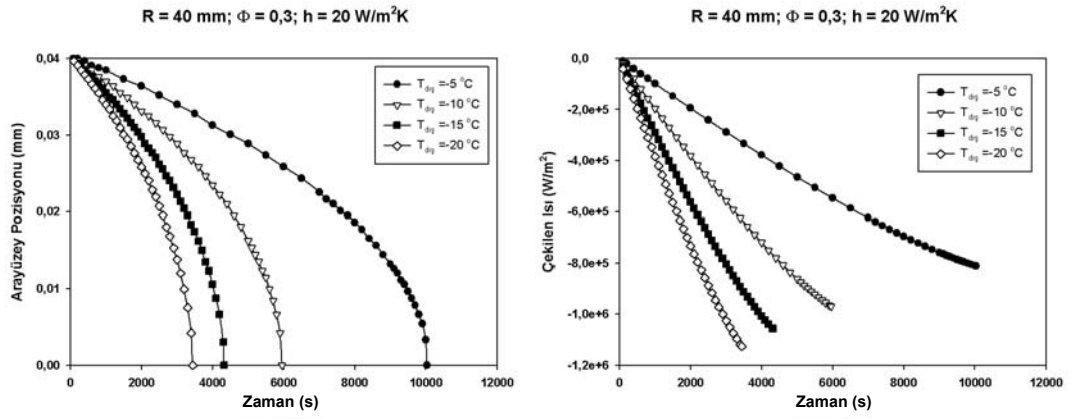
Şekil C.14: $R=40 \text{ mm}$, $\phi=0,2$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



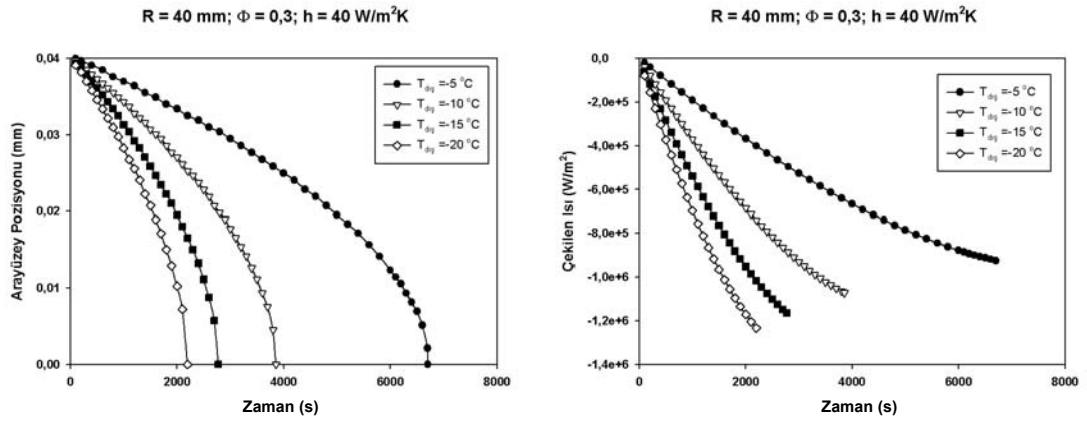
Şekil C.15: $R=40 \text{ mm}$, $\phi=0,2$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



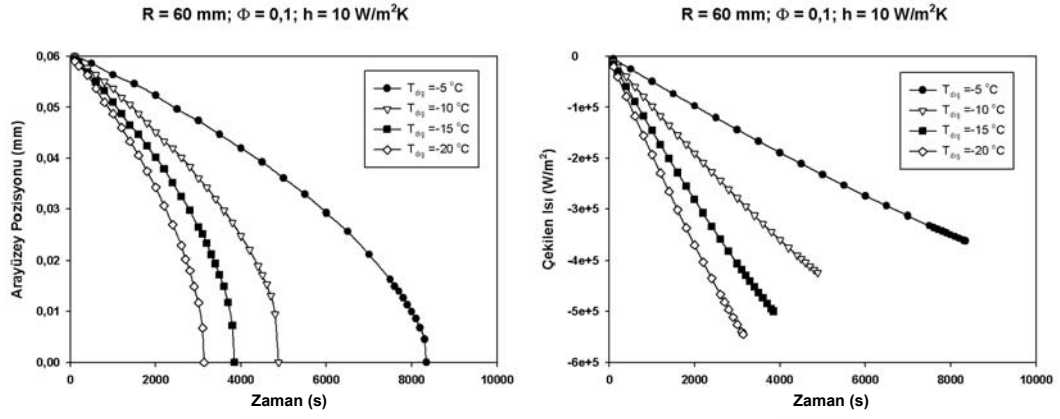
Şekil C.16: R=40 mm, $\Phi=0,3$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



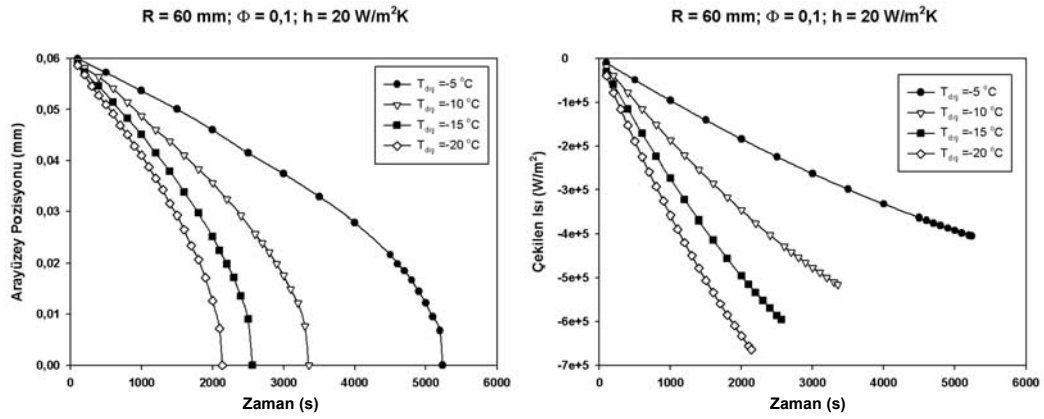
Şekil C.17: R=40 mm, $\Phi=0,3$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



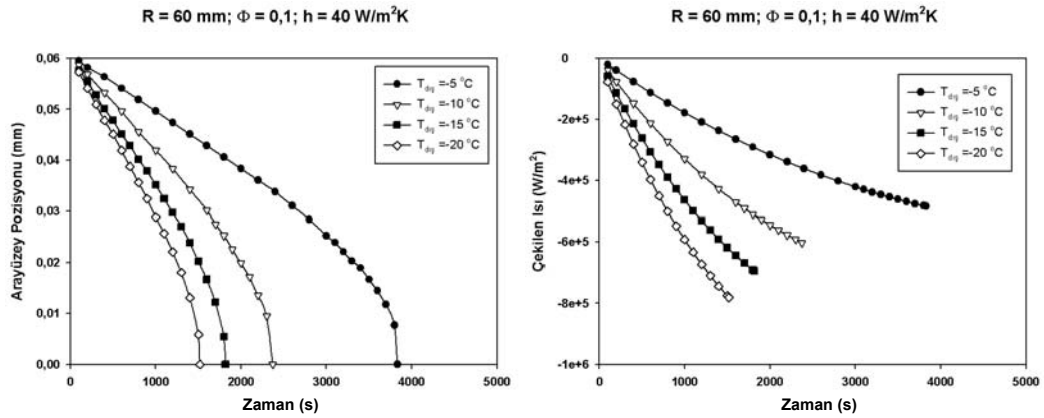
Şekil C.18: R=40 mm, $\Phi=0,3$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



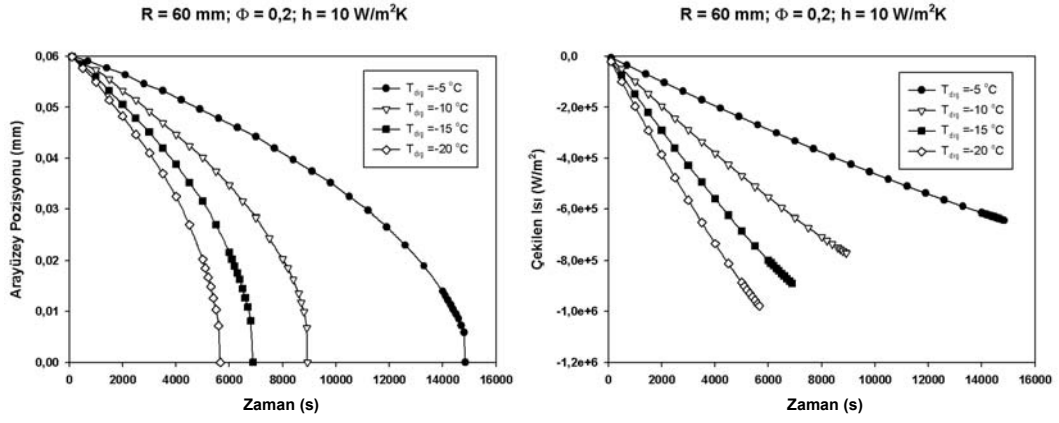
Şekil C.19: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



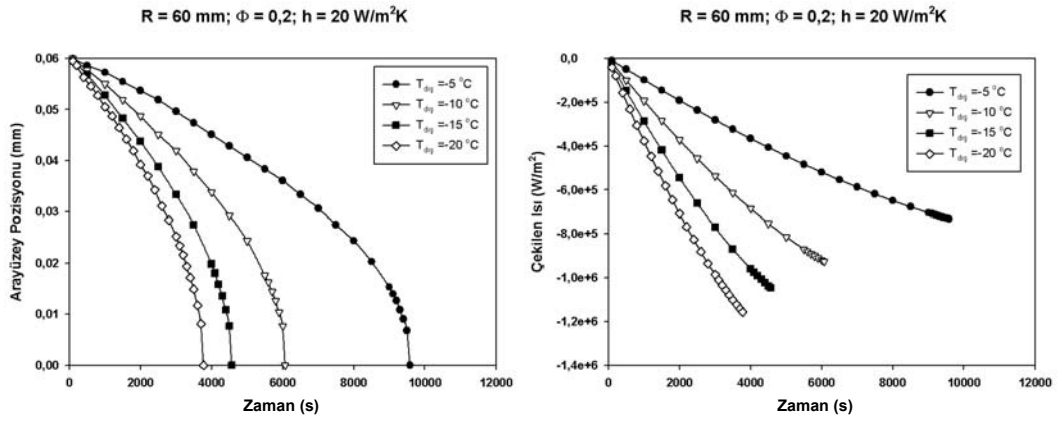
Şekil C.20: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



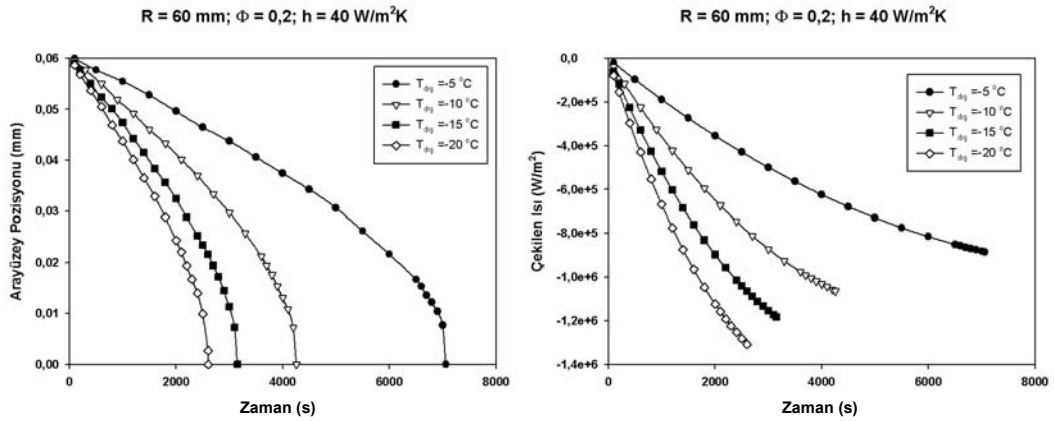
Şekil C.21: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,1$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



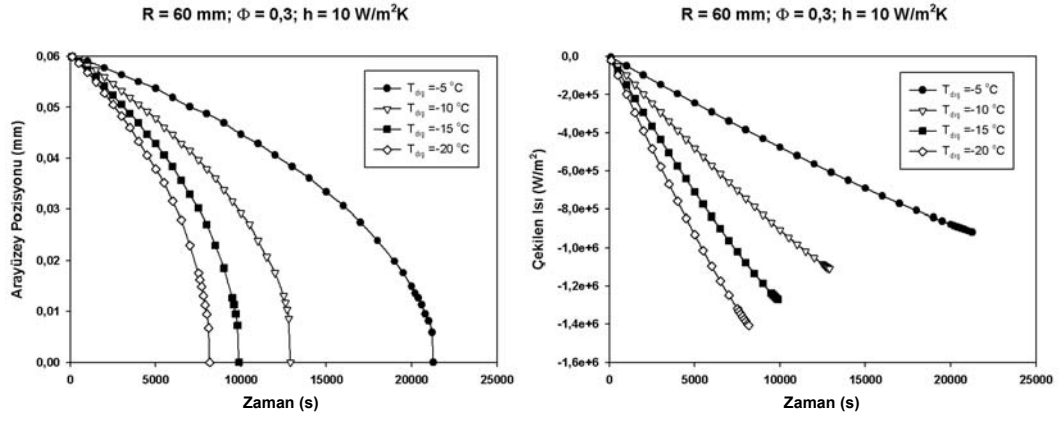
Şekil C.22: R=60 mm, $\Phi=0,2$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



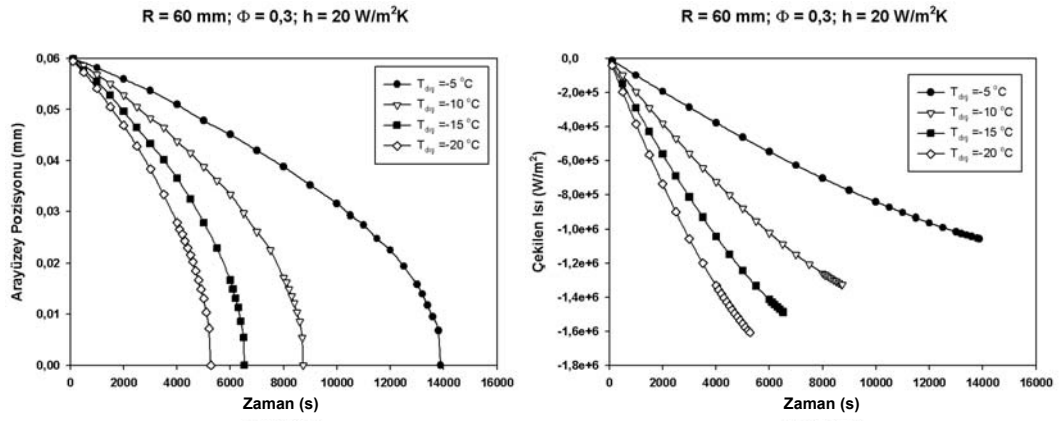
Şekil C.23: R=60 mm, $\Phi=0,2$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



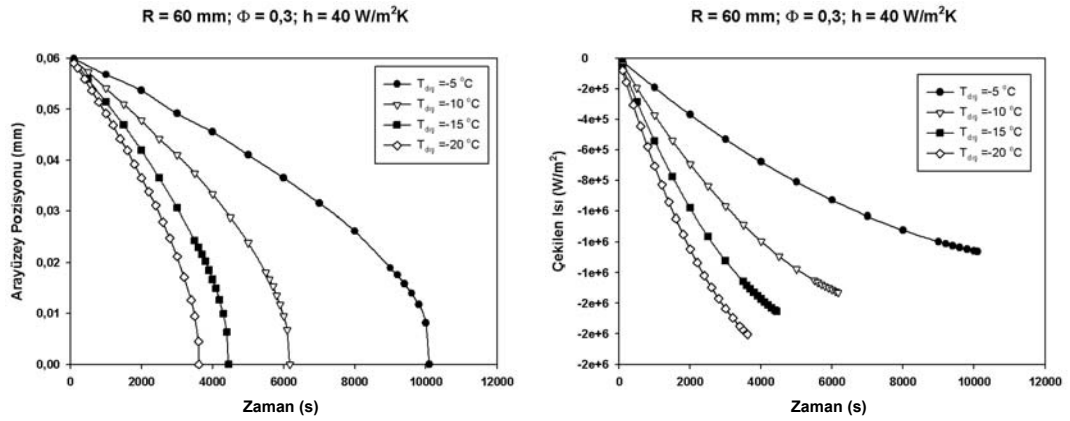
Şekil C.24: R=60 mm, $\Phi=0,2$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi



Şekil C.25: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi

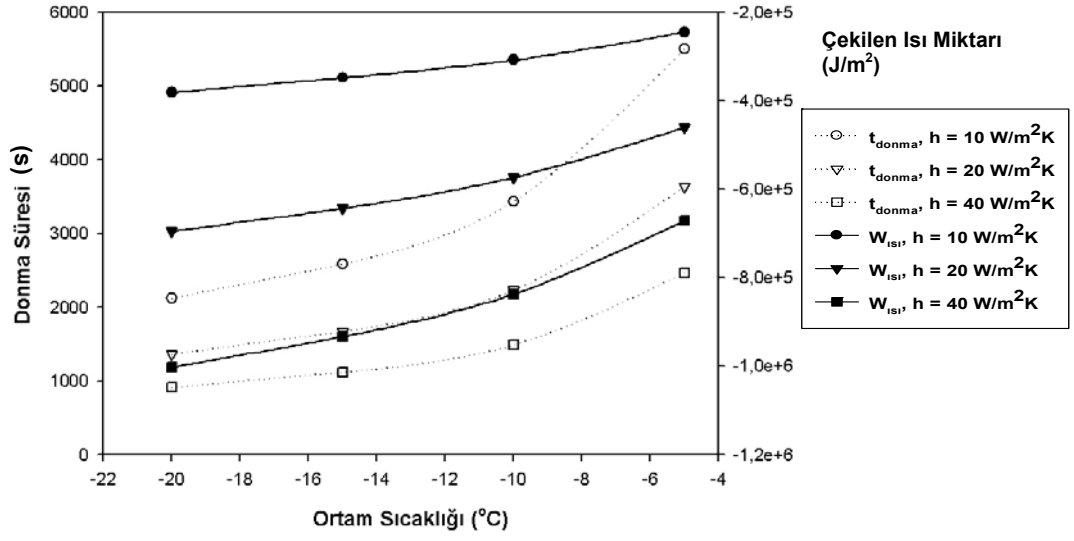


Şekil C.26: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi

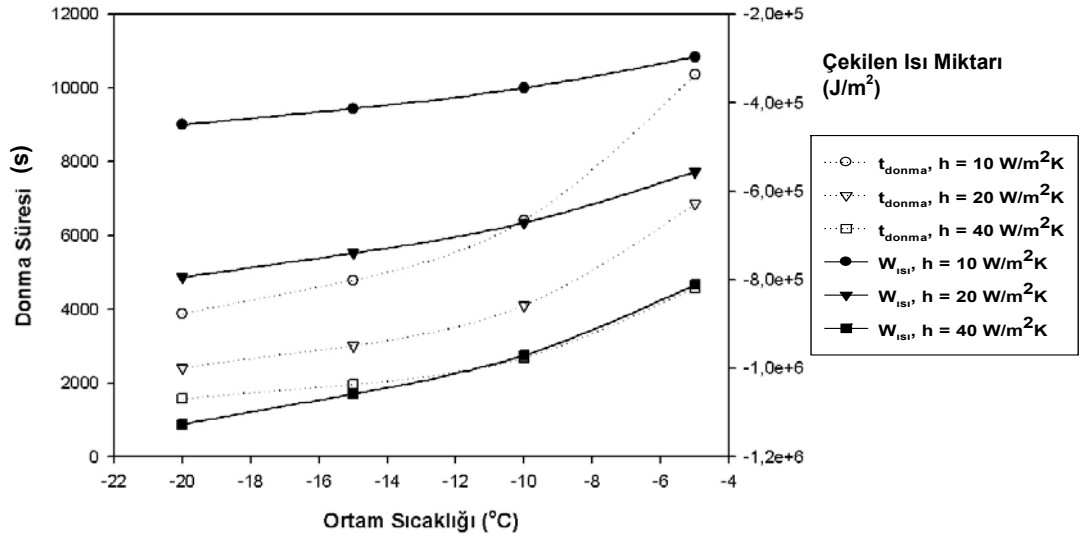


Şekil C.27: $R=60 \text{ mm}$, $\Phi=0,3$ ve $h=40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için Ara yüzey pozisyonunun ve Çekilen ısı miktarının zamanla değişimi

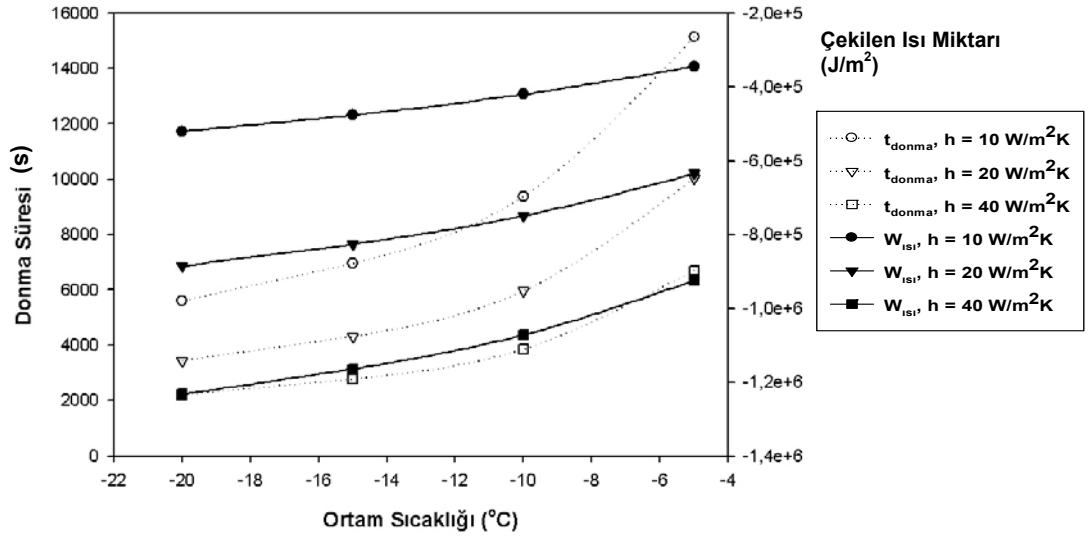
Ek D. Farklı Gözenekliliğe Sahip Numunelerde, Farklı Taşınım Katsayıları İçin Donma Süreleri Ve Çekilen Isı Miktarlarının Sıcaklıkla Değişimi



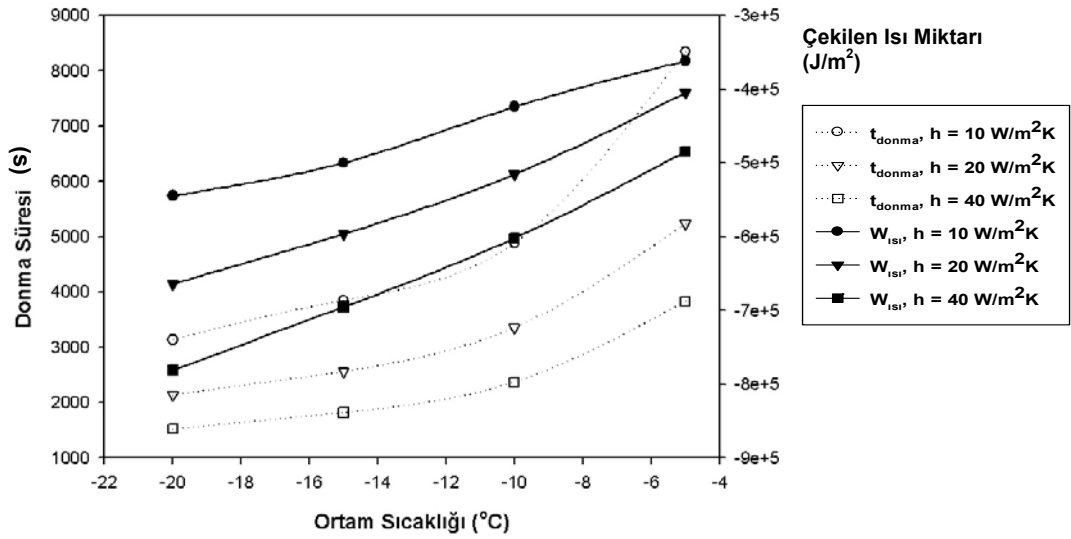
Şekil D.1: R = 40 mm, $\phi = 0,1$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)



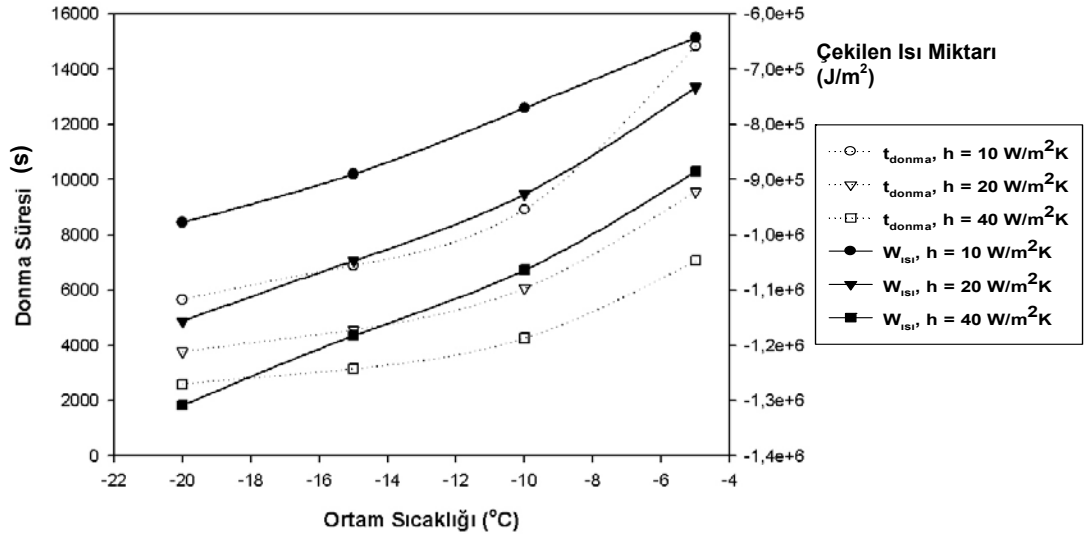
Şekil D.2: R = 40 mm, $\phi = 0,2$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)



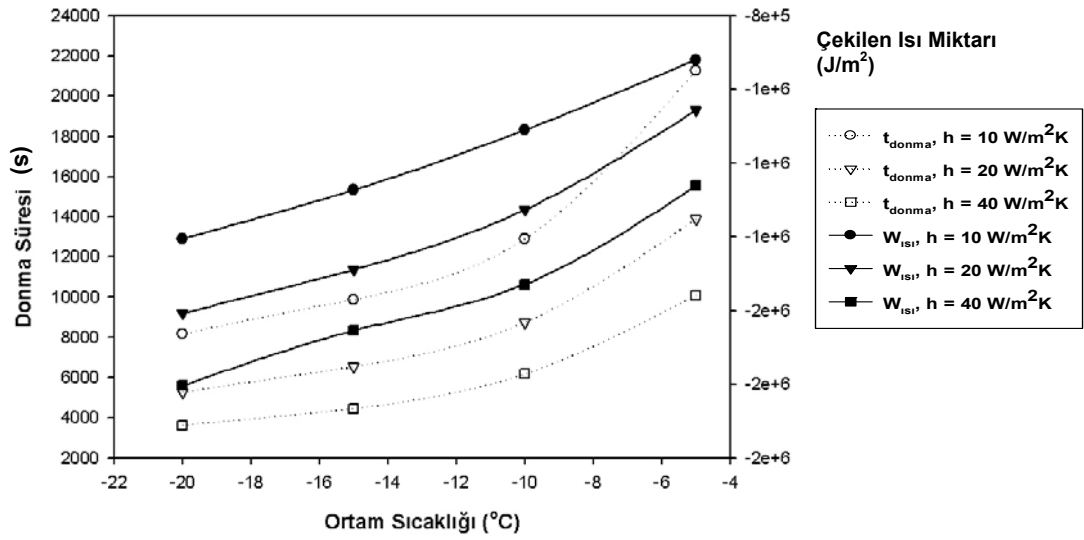
Şekil D.3: $R = 40 \text{ mm}$, $\phi = 0,3$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)



Şekil D.4: $R = 60 \text{ mm}$, $\phi = 0,1$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)

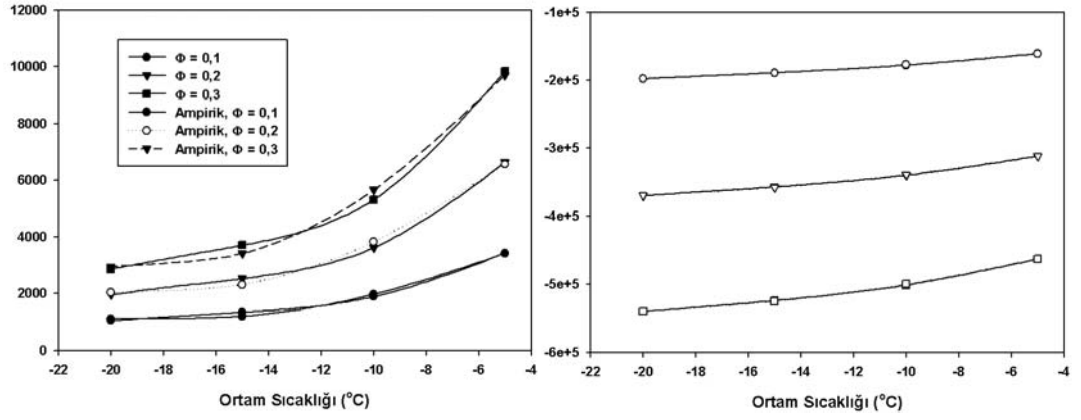


Şekil D.5: $R = 60 \text{ mm}$, $\phi = 0,2$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)

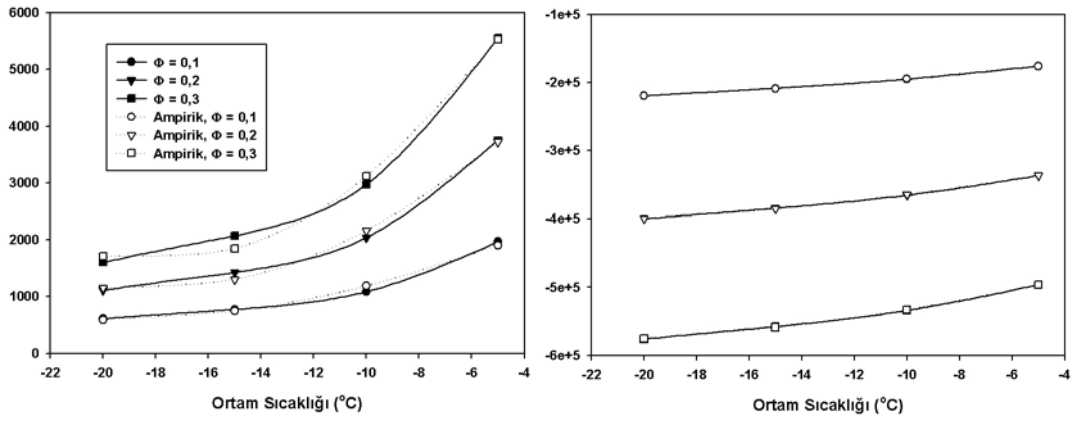


Şekil D.6: $R = 60 \text{ mm}$, $\phi = 0,3$ için donma süresi (s) ve çekilen ısı miktarı (J/m²)

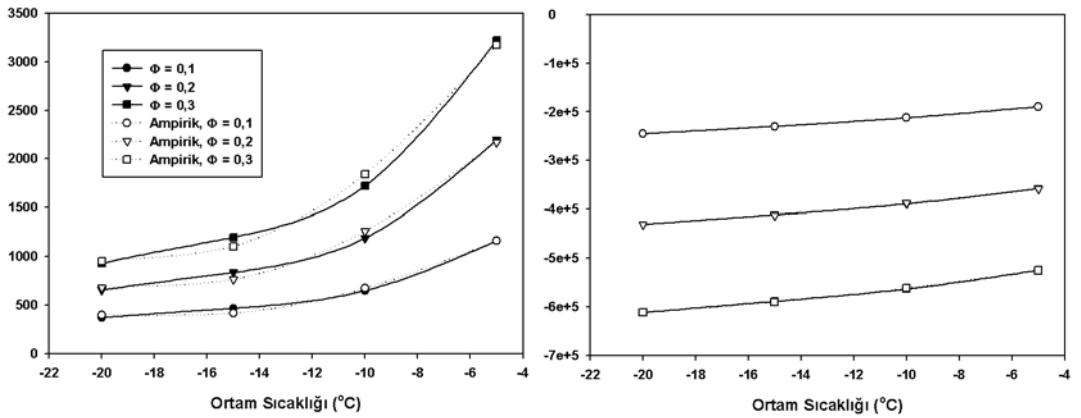
Ek E. Sayısal Analiz Sonuçları İle Ampirik Fonksiyon Sonuçlarının Karşılaştırılması



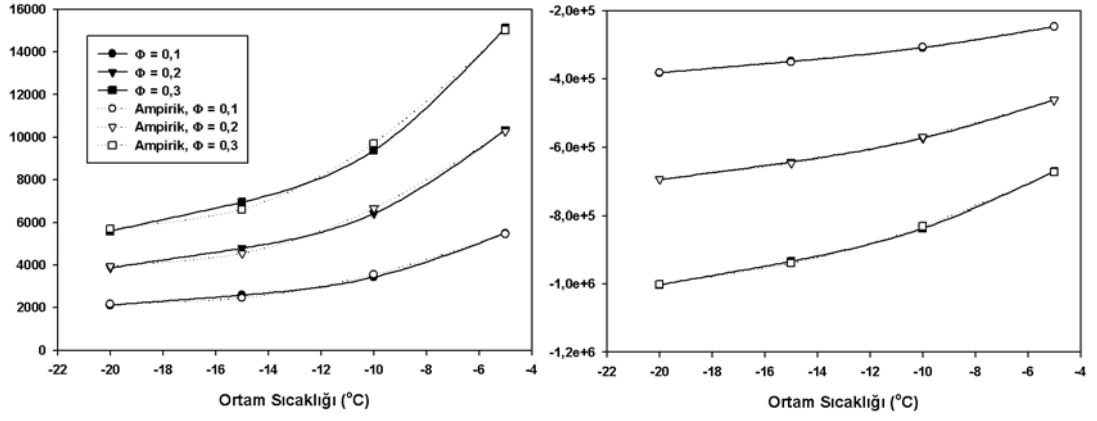
Şekil E.1: R = 20 mm, h = 10 W/m²K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m²)



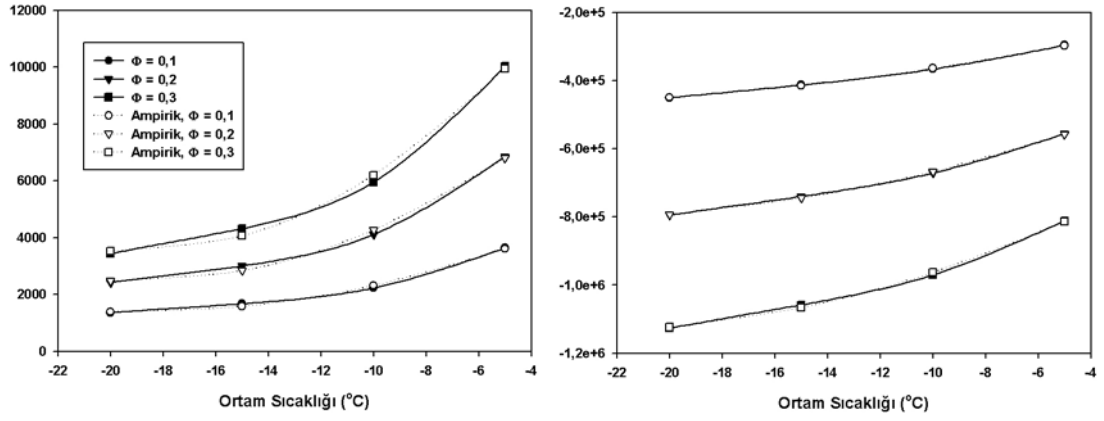
Şekil E.2: R = 20 mm, h = 20 W/m²K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m²)



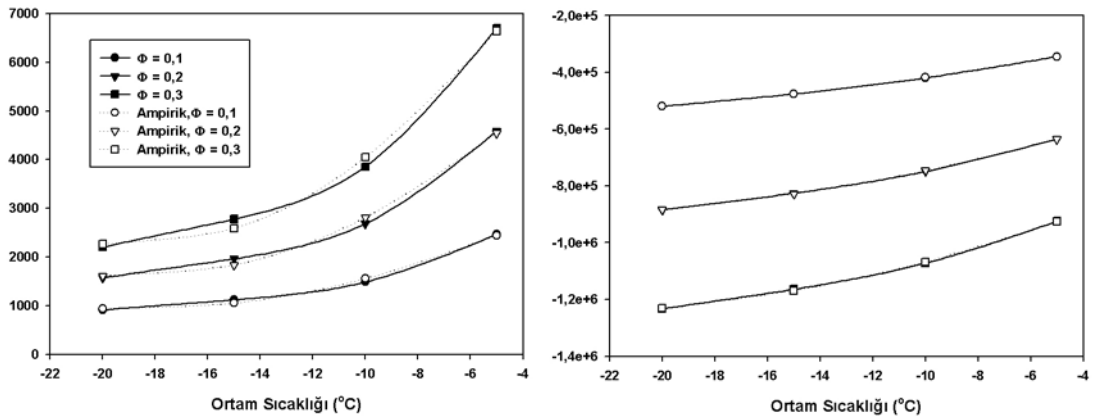
Şekil E.3: R = 20 mm, h = 40 W/m²K için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m²)



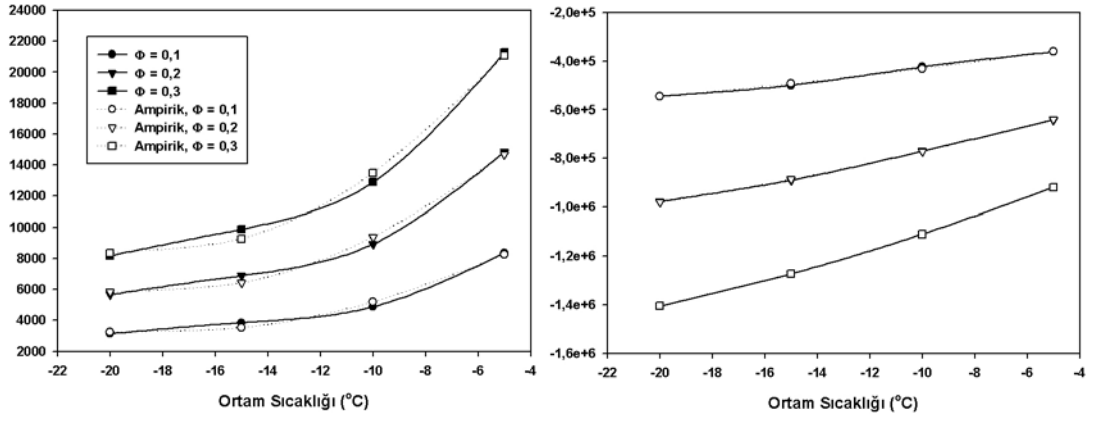
Şekil E.4: $R = 40 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)



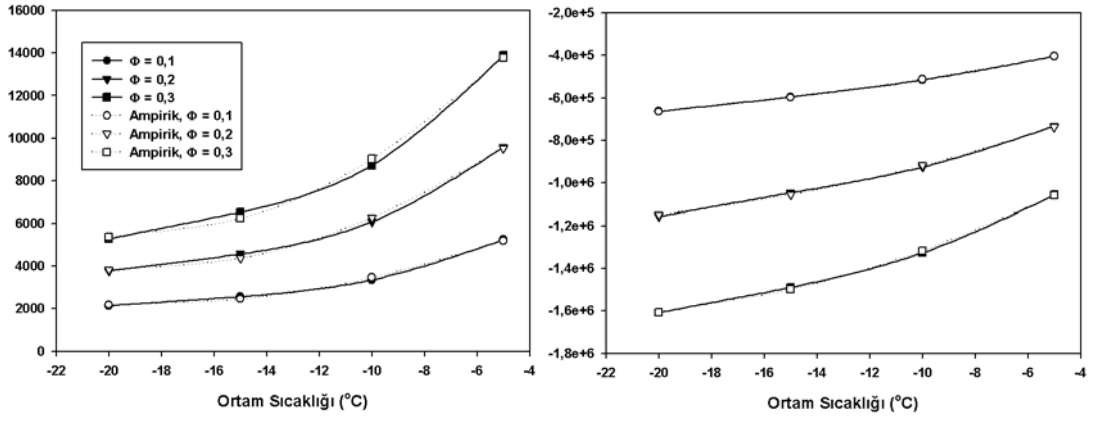
Şekil E.5: $R = 40 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)



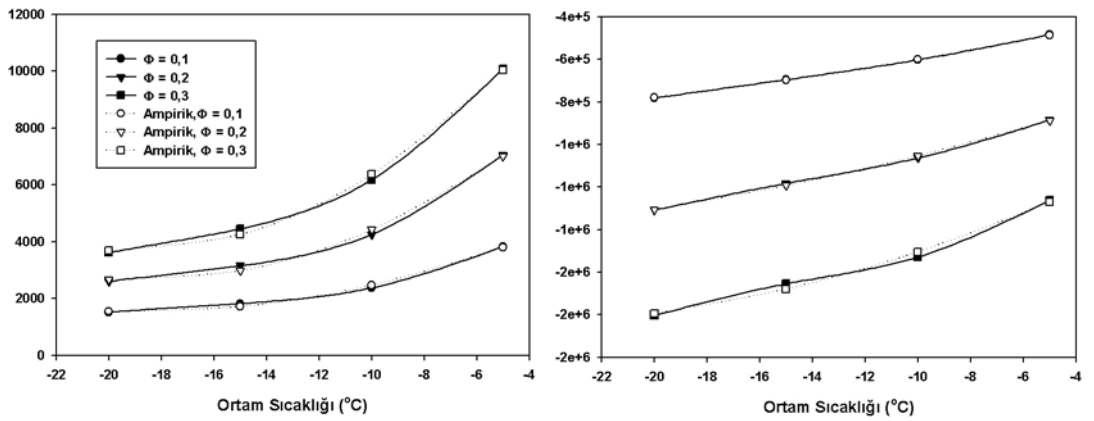
Şekil E.6: $R = 40 \text{ mm}$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)



Şekil E.7: $R = 60 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)

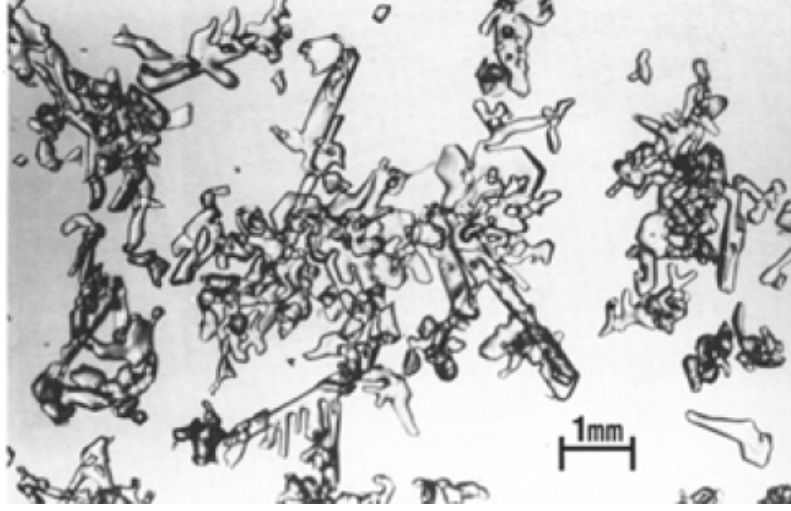


Şekil E.8: $R = 60 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)

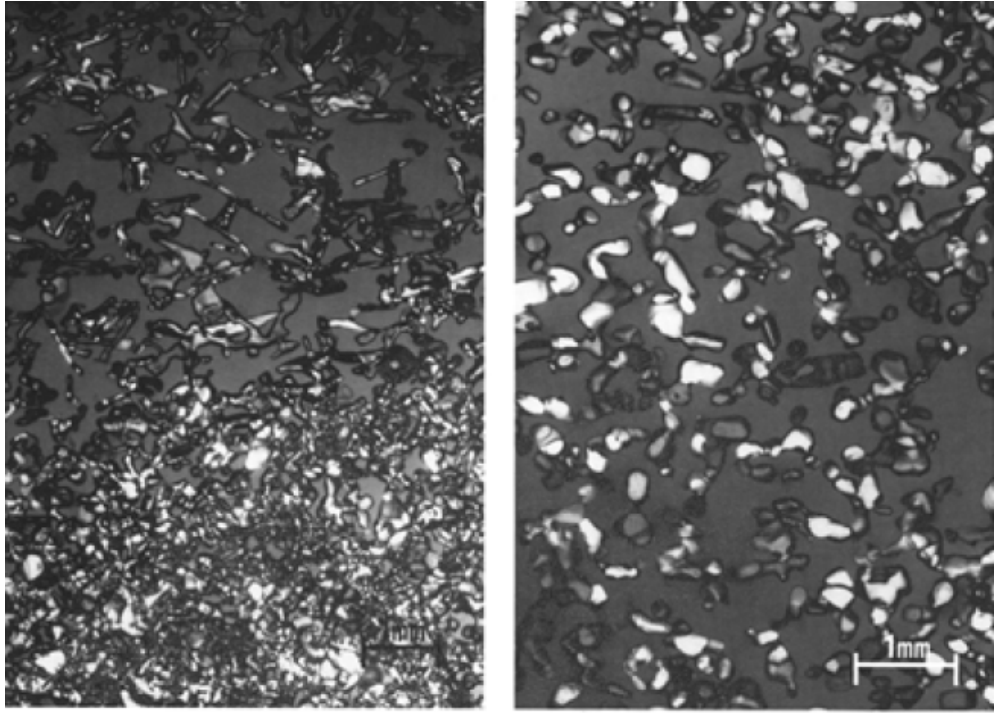


Şekil E.9: $R = 60 \text{ mm}$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ için a) donma süresi (s) ve b) çekilen ısı (J/m^2)

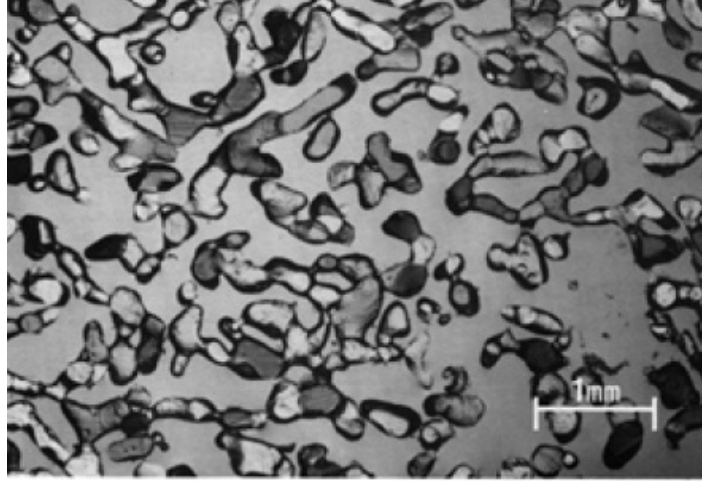
Ek F. S. Colbeck ve Diğerleri Tarafından Yapılan Sınıflandırma



Şekil F.1: Sınıf 2dc, Kısmi ayrışık yağan partiküller (partly decomposed precipitation particles)



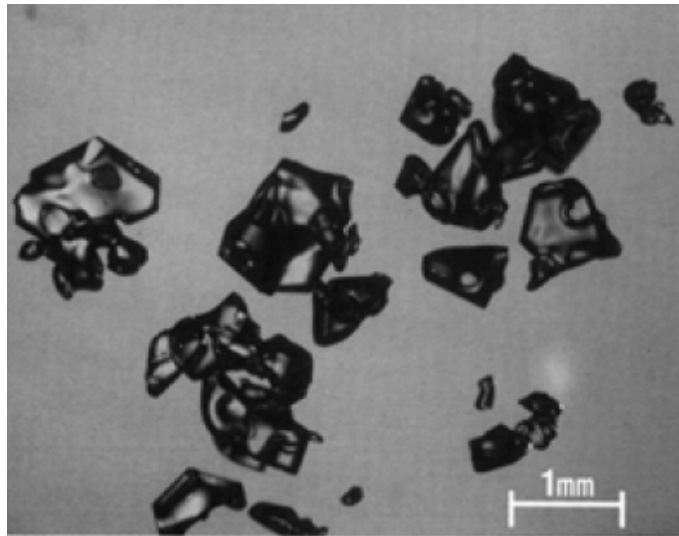
Şekil F.2: Sınıf 2bk ve 9wc, Fazla parçalanmış partiküller (üst kısım) ve rüzgar buzu (alt kısım) (highly broken particles (on top) and wind crust (on bottom)) ve Sınıf 3sr, Küçük küresel partiküller (small rounded particles)



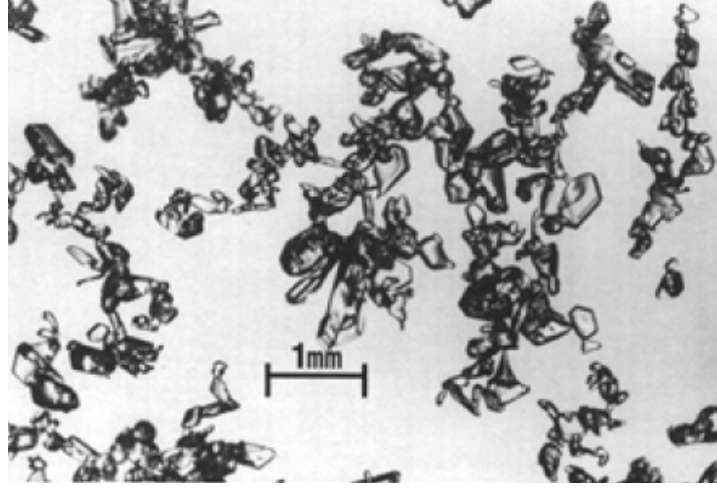
Şekil F.3: Sınıf 3lr, Büyük küresel partiküller (large rounded particles)



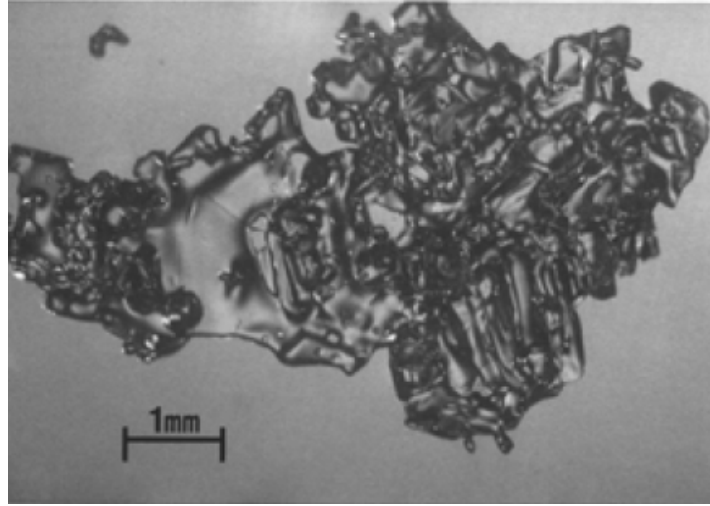
Şekil F.4: Sınıf 3mx, Düzlemsel yüzeyleri gelişen küresel partiküller (rounded particles with developing facets)



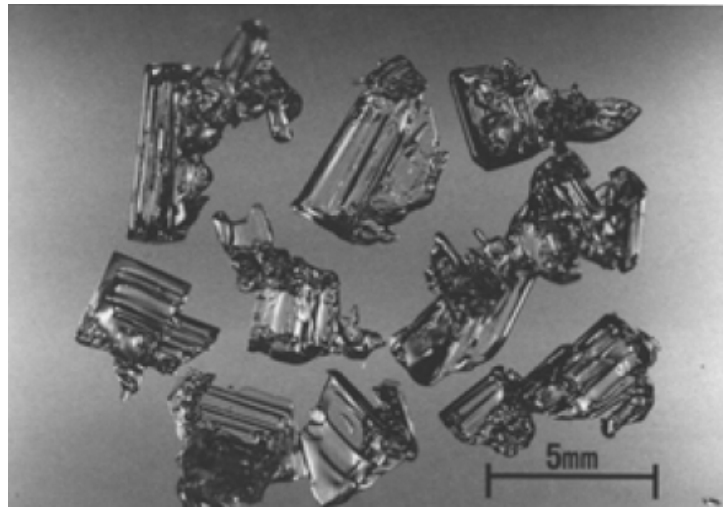
Şekil F.5: Sınıf 4fa, Katı düzlemsel yüzeyli partiküller (solid faceted particles)



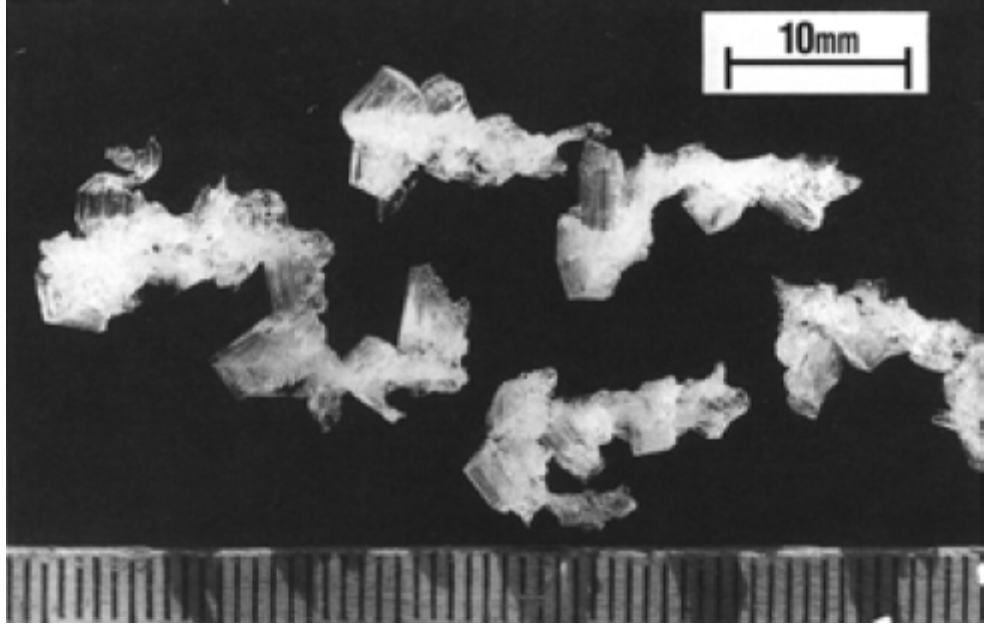
Şekil F.6: Sınıf 4sf, Yüzey katmanında küçük düzlemsel yüzeyle partiküller (small faceted particles in surface layer)



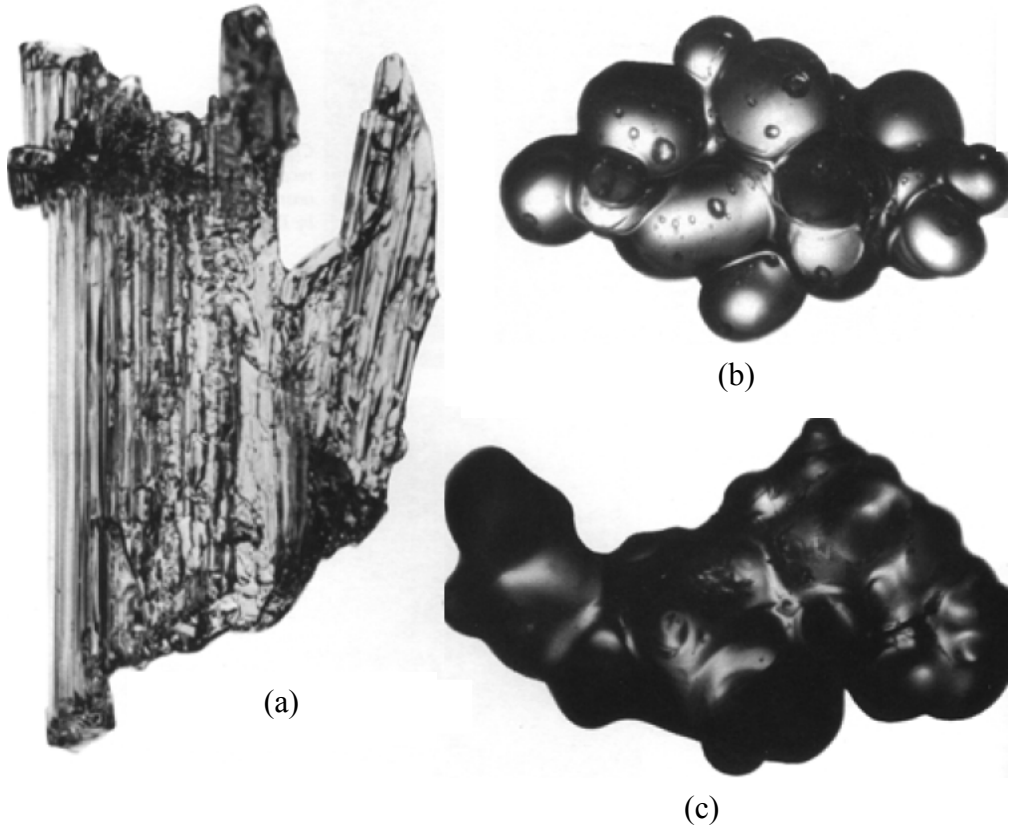
Şekil F.7: Sınıf 4mx, Henüz yuvarlaklaşmış düzlemsel yüzeyle partiküller (faceted particles with recent rounding)



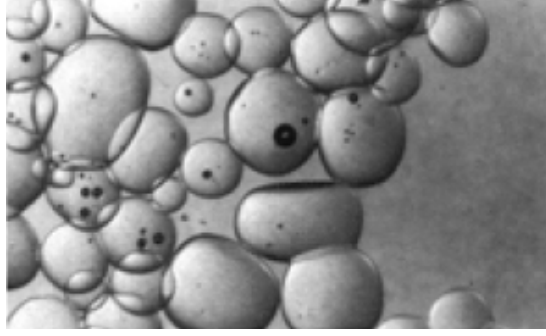
Şekil F.8: Sınıf 5cp, Kupa şeklinde çizgili kristaller (cup-shaped, striated crystals)



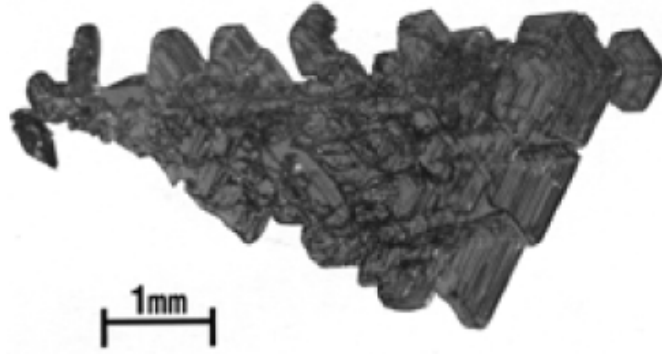
Şekil F.9: Sınıf 5dh, Kolon şeklinde dizilmiş kupa şekilli kristaller (cup-shaped crystals arranged in columns)



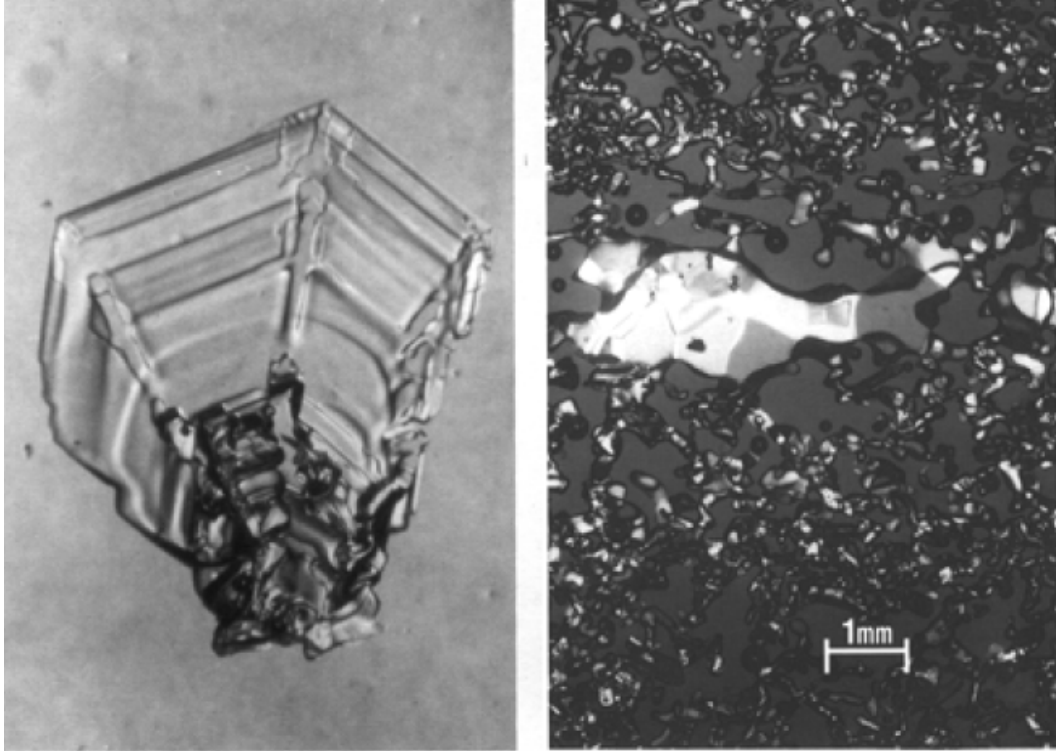
Şekil F.10: a) Sınıf 5cl, Büyük kolonsu kristaller (large columnar crystals), b) Sınıf 6cl, Düşük sıvı içeren kümelenmiş tek bir yapı (clustered single at low liquid content), c) Sınıf 6mf, Donma erime çevrimleri sonucu oluşmuş polikristal partikül (polycrystalline particle from melt-freeze cycles)



Şekil F.11: Sınıf 6sl, Çok sulu kar (slush)



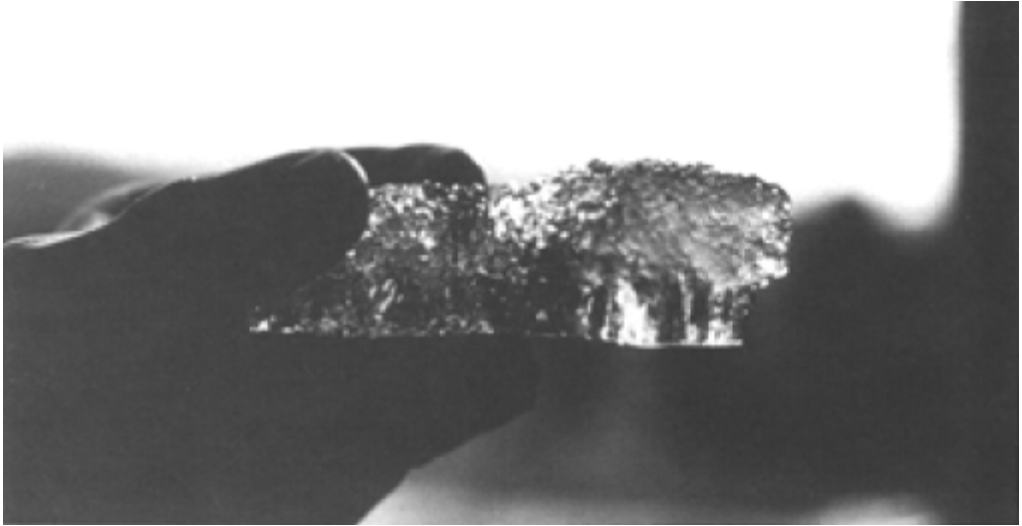
Şekil F.12: Sınıf 7sh, Yüzeyde beyaz buz (kırağı) (surface hoar)



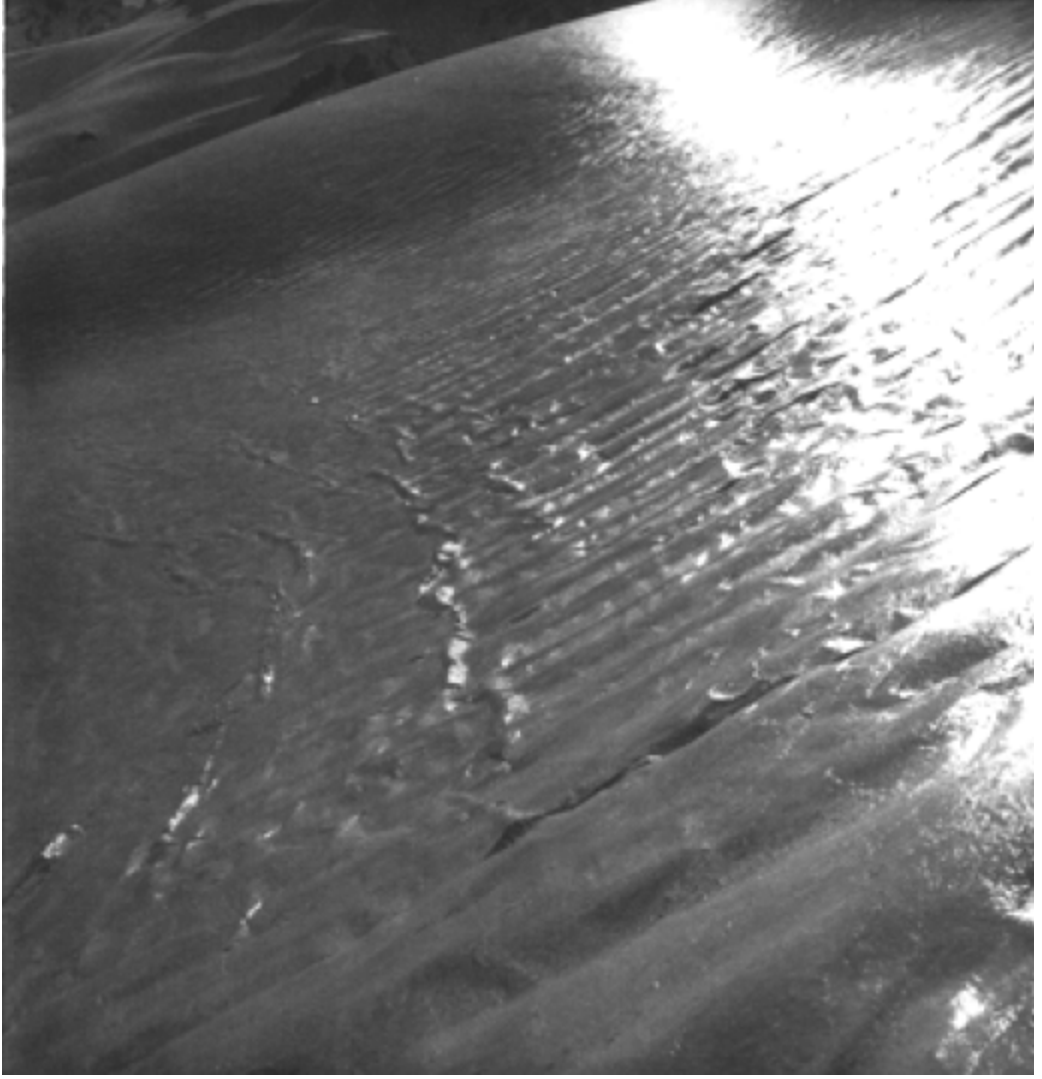
Şekil F.13: Sınıf 7ch, Oyuk beyaz buz (cavity hoar) and Sınıf 8il, Yatay buz katmanı (horizontal ice layer)



Şekil F.14: Sınıf 8ic and 8il, Dikey ve yatay yapılar (vertical and horizontal bodies)



Şekil F.15: Sınıf 8bi, temel buz katmanı (basel ice layer)



Şekil F.16: Sınıf 9sc, Güneşli buzkar yüzeyi (sun crust-firn spiegel)

Ek G. Magono ve Lee Tarafından Yapılan Sınıflandırma

	N1a Elementary needle		C1f Hollow column		P2b Stellar crystal with sectorlike ends
	N1b Bundle of elementary needles		C1g Solid thick plate		P2c Dendritic crystal with plates of ends
	N1c Elementary sheath		C1h Thick plate of skeleton form		P2d Dendritic crystal with sectorlike ends
	N1d Bundle of elementary sheaths		C1i Scroll		P2e Plate with simple extensions
	N1e Long solid needle		C2a Combination of bullets		P2f Plate with sectorlike extensions
	N2a Combination of needles		C2b Combination of columns		P2g Plate with dendritic extensions
	N2b Combination of sheaths		P1a Hexagon plate		P3a Two branched crystal
	N2c Combination of long solid columns		P1b Crystal with sectorlike branches		P3b Three-branched crystal
	C1a Pyramid		P1c Crystal with broad branches		P3c Four-branched crystal
	C1b Cup		P1d Stellar crystal		P4a Broad branch crystal with 12 branches
	C1c Solid bullet		P1e Ordinary dendritic crystal		P4b Dendritic crystal with 12 branches
	C1d Hollow bullet		P1f Fernlike crystal		P5 Malformed crystal
	C1e Solid column		P2a Stellar crystal with plates at ends		P6a Plate with spatial plates

Şekil G.1: Magono ve Lee tarafından yapılan sınıflandırma sistemi [4]

	P6b Plate with spatial dendrites		CP3d Plate with scrolls at ends		R3c Groupel-like snow with nonrimed extensions
	P6c Stellar crystal with spatial dendrites		S1 Side planes		R4a Hexagonal groupel
	P6d Stellar crystal with spatial dendrites		S2 Scalelike side planes		R4b Lump groupel
	P7a Radiating assemblage of plates		S3 Combination of side planes, bullets, and columns		R4c Conelike groupel
	P7b Radiating assemblage of dendrites		R1a Rimed needle crystal		I1 Ice particle
	CP1a Column with plates		R1b Rimed columnar crystal		I2 Rimed particle
	CP1b Column with dendrites		R1c Rimed plate or sector		I3a Broken branch
	CP1c Multiple capped column		R1d Rimed stellar crystal		I3b Rimed broken branch
	CP2a Bullet with plates		R2a Densely rimed plate or sector		I4 Miscellaneous
	CP2b Bullet with dendrites		R2b Densely rimed stellar crystal		G1 Minute column
	CP3a Stellar crystal with needles		R2c Stellar crystal with rimed spatial branches		G2 Germ of skeletal form
	CP3b Stellar crystal with columns		R3a Groupel-like snow of hexagonal types		G3 Minute hexagonal plate
	CP3c Stellar crystal with scrolls at ends		R3b Groupel-like snow of lump type		G4 Minute stellar crystal
					G5 Minute assemblage of plates
					G6 Irregular germ

Şekil G.2: Magono ve Lee tarafından yapılan sınıflandırma sistemi (devam) [4]

Ek H. Uluslararası Sınıflandırma

Type of particle (F)	CODE	GRAPHIC SYMBOL	TYPICAL FORMS				TERM
	1						Plates
	2						Stellar crystals
	3						Columns
	4						Needles
	5						Spatial dendrites
	6						Capped columns
	7						Irregular particles
	8						Graupel (soft hail)
	9						Ice pellets (Am. sleet)
Size of particle (D)	0						Hail
	<i>m</i>	*					Broken
	<i>r</i>	*					Rimed
	<i>f</i>	(*)					Flake
	<i>w</i>	*					Wet
Additional characteristics	<i>a</i>	0-0.49 mm					Very small
	<i>b</i>	0.5-0.99 mm					Small
	<i>c</i>	1.0-1.99 mm					Medium
	<i>d</i>	2.0-3.99 mm					Large
	<i>e</i>	4.0 mm or larger					Very large

Şekil H.1: Uluslararası sınıflandırma

Ek I. Kalibrasyonlar

Ek I.1 Referans Termometre Kalibrasyonu



NETES MÜHENDİSLİK VE DİŞ TİC. LTD. ŞTİ.
KALİBRASYON LABORATUVARI

KALİBRASYON SERTİFİKASI

CALIBRATION CERTIFICATE

KALİBRASYON ETİKETİ
Calibration Mark

E5030407

NETES
KALİBRASYON
LABORATUVARI

03-05

Cihaz
Equipment : TERMOMETRE

İmalatçı
Manufacturer : Omega Eng

Model Numarası
Model Number : HH506R

Seri Numarası
Serial Number : 03000871

Demirbaş Numarası
Code No :

Müşteri Kodu / İstek No : K1130 / 050228
Cust. Code / Order No.

Cihaz Sahibi
Customer : DİZAYN TEKNİK PLASTİK
BORU VE ELEMANLARI
SANAYİ VE TİCARET A.Ş.
Hadımköy Yolu San.Bir 1.
Bölge 4.Cad.No:23
Büyüçekmece/İSTANBUL

Kalibrasyon Tarihi
Date of Calibration : 11.03.2005

Sertifika Sayfa Sayısı : 4
Total Page

Bu kalibrasyon sertifikası,
TS EN 17025 (Kalibrasyon Laboratuvarlarının
Yeterliliği için Genel Şartlar) standardında
belirtilen yükümlülükler çerçevesinde tanzim
edilmiştir.

Bu kalibrasyon sertifikası Uluslararası Birimler
Sistemine (SI) uygun olarak gerçekleştirilmiş
olan Ulusal Ölçü Standardlarına izlenebilirliği
belgeler.

Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm
belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları müteakip
sayfalarda verilmiştir ve bu sayfalar sertifikanın
tamamlayıcı kısmıdır.

This calibration certificate is prepared according to
the TS EN 17025 standard (General Requirements
for the Competence of Testing and Calibration
Laboratories).

This Calibration certificate document the
traceability to national standards, which realize the
unit of measurement according to the International
System of Units (SI).

The measurement, the uncertainties with confidence
probability and calibration methods are given on the
following pages and are part of the certificate.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz.

This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.

İmzasız ve mühürlü kalibrasyon sertifikaları geçersizdir.

Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Mühür
Seal



Tarih

Date

11.03.2005

Onay

Approved By

Hüseyin DENİZ

Kalibrasyonu Yapan

Person in charge

T.SIVKA

NETES Müh. Ve Dış Tic. Ltd. Şti

Koşuyolu Caddesi No:124

Koşuyolu - Kadıköy 34718 İSTANBUL

Telefon : (216) 340 50 50 pbx

Fax : (216) 340 51 51

Internet: http://www.netes.com.tr

e.mail : kalibrasyon@netes.com.tr

NKLF-002

Sayfa No / Page Nr. 1 / 4

NETES MÜHENDİSLİK VE DİŞ TİC. LTD. ŞTİ.
KALİBRASYON LABORATUVARI
KALİBRASYON SERTİFİKASI
Calibration Certificate

E5030407

NETES
KALİBRASYON
LABORATUVARI

03-05

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihaz ve Ekipman Bilgileri:

Reference Instrument and Equipment Details used in calibration

Cihaz Equipment	Üretici Manufacturer	Model Model	Seri No Serial Nr.	Kayıt No Asset Nr.	Kalibrasyon Tarihi Date Cal.
Multi Function Kalibratör	Datron	9100	35148	NEC001	20.10.2004

İzlenebilirlik/ Traceability : Ulusal Metroloji Enstitüsü - UME

Kalibrasyon Ortam Şartları: <i>Calibration Environment Details</i>	Sıcaklık: 23,0 °C ± 1,0 °C <i>Temperature</i>	Nem: 45,0 % ± 15,0 % <i>Humidity</i>
--	---	--

Kalibrasyon Yapılan Cihaz Bilgileri:

Instrument Details in making calibration

Cihaz Equipment	: TERMOMETRE	Model Model	: HH506R
Üretici Manufacturer	: Omega Eng	Seri No Serial Nr.	: 03000871

Ölçüm Belirsizliği/ Measurement Uncertainty:

Belirsizlik değerleri, kalibre edilen cihazın uzun dönem kararlılığını ve hatasını içermemektedir. Kalibrasyondaki belirsizlik "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM.ISO 1993)" dökümanına uygun olarak hesaplanmıştır. Belirsizlik değerleri genişletilmiş belirsizlikler olup, bileşik belirsizlikten kapsam faktörü k=2 kullanılarak elde edilmiştir. Güvenilirlik düzeyi %95'tir. They content no figures for long term drift and error of the unit under test. The uncertainties have been determined in accordance with "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM.ISO 1993)". The reported uncertainties are expanded uncertainties which are stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2. The confidence level is 95%.

Kalibrasyon Prosedürü/ Calibration Procedure:

Ölçümler EA-10/15 kodlu referans yayınına ve üreticinin kullanım kılavuzu verilerine uygun olarak Portocal II kalibrasyon yönetim yazılımı kullanılarak otomatik olarak yapılmıştır. Prosedür Version: 1.90 Form No: 010
Measurements are performed automatically with Portocal II calibration management software in accordance with manufacturer's instruction manual and EA Publication No:EA-10/15

Ölçüm Şartları/ Conditions of measurement:

Cihaz, kalibrasyon öncesi laboratuvarında bekletilerek ortam şartlarına uyum sağladıktan sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. Calibration of the instrument is carried out after the instrument adapted environmental conditions.

Ölçüm Sonuçları: Sonuçlar ek sayfalarda verilmiştir.
Measurement Results Results are given at next pages.

Açıklamalar/ Remarks:

Kalibrasyon sonuçları sadece 03000871 seri nolu ve E5030407 sertifika nolu cihaza ait olup, kalibrasyon tarihinden itibaren ve sertifikada belirtilmiş olan şartlar altında geçerlidir. Gelecek kalibrasyon tarihinin belirlenmesinden kullanıcı sorumludur. The calibration results are related to the device with the serial number 03000871 with certificate number of E5030407 The results are valid for under environmental conditions stated in the certificate beginning from the calibration date. The user is obligated to determine next calibration date of the instrument.

NETES Müh. Ve Dış Tic. Ltd. Şti. Koşuyolu Cad. No:124 Koşuyolu - Kadıköy 34718 İSTANBUL
Telefon : (216) 340 50 50 pbx. Fax : (216) 340 51 51 İnternet: http://www.netes.com.tr e.mail : kalibrasyon@netes.com.tr

Sayfa No / Page Nr. 2 / 4

KALİBRASYON SERTİFİKASI
Calibration Certificate

E5030407

NETES
KALİBRASYON
LABORATUVARI

03-05

Fonksiyon Test Noktası Function/Test points Name	Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Lo Limit	Üst Sınır Hi Limit	Hata Error	Ölçüm Belirsizliği Measurement Uncertainty	
Temperature							
T1 - K Type - Reading in °C							
-200.0 °C	-200.30 °C	-200.0 °C	-200.8 °C	-199.2 °C	0.3 °C	0.27 °C	✓
-100.0 °C	-100.10 °C	-100.0 °C	-100.7 °C	-99.3 °C	0.1 °C	0.19 °C	✓
0.0 °C	-0.10 °C	0.0 °C	-0.3 °C	0.3 °C	0.1 °C	0.19 °C	✓
25.0 °C	24.90 °C	25.0 °C	24.7 °C	25.3 °C	0.1 °C	0.19 °C	✓
50.0 °C	49.90 °C	50.0 °C	49.7 °C	50.3 °C	0.1 °C	0.19 °C	✓
75.0 °C	74.90 °C	75.0 °C	74.7 °C	75.3 °C	0.1 °C	0.19 °C	✓
100.0 °C	99.80 °C	100.0 °C	99.6 °C	100.4 °C	0.2 °C	0.19 °C	✓
125.0 °C	124.80 °C	125.0 °C	124.6 °C	125.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
150.0 °C	149.80 °C	150.0 °C	149.6 °C	150.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
175.0 °C	174.80 °C	175.0 °C	174.6 °C	175.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
200.0 °C	199.80 °C	200.0 °C	199.6 °C	200.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
225.0 °C	224.80 °C	225.0 °C	224.6 °C	225.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
250.0 °C	249.80 °C	250.0 °C	249.6 °C	250.4 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
275.0 °C	274.70 °C	275.0 °C	274.6 °C	275.4 °C	0.3 °C	0.23 °C	✓
300.0 °C	299.80 °C	300.0 °C	299.5 °C	300.5 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
325.0 °C	324.70 °C	325.0 °C	324.5 °C	325.5 °C	0.3 °C	0.23 °C	✓
350.0 °C	349.70 °C	350.0 °C	349.5 °C	350.5 °C	0.3 °C	0.23 °C	✓
375.0 °C	374.70 °C	375.0 °C	374.5 °C	375.5 °C	0.3 °C	0.23 °C	✓
400.0 °C	399.80 °C	400.0 °C	399.5 °C	400.5 °C	0.2 °C	0.23 °C	✓
500.0 °C	500.00 °C	500.0 °C	499.4 °C	500.6 °C	0.0 °C	0.23 °C	✓
1000.0 °C	999.90 °C	1000.0 °C	999.2 °C	1000.8 °C	0.1 °C	0.27 °C	✓
1370.0 °C	1370.00 °C	1370.0 °C	1369.0 °C	1371.0 °C	0.0 °C	0.27 °C	✓
K Type - Reading in °F							
-328.0 °F	-328.50 °F	-328.0 °F	-329.6 °F	-326.4 °F	0.5 °F	0.49 °F	✓
0.0 °F	-0.30 °F	0.0 °F	-0.6 °F	0.6 °F	0.3 °F	0.34 °F	✓
32.0 °F	31.70 °F	32.0 °F	31.4 °F	32.6 °F	0.3 °F	0.34 °F	✓
77.0 °F	76.80 °F	77.0 °F	76.4 °F	77.6 °F	0.2 °F	0.34 °F	✓
212.0 °F	211.90 °F	212.0 °F	211.3 °F	212.7 °F	0.1 °F	0.34 °F	✓
2498.0 °F	2498.00 °F	2498.0 °F	2496.2 °F	2499.8 °F	0.0 °F	0.49 °F	✓
T2 - K Type - Reading in °C							
-200.0 °C	-200.60 °C	-200.0 °C	-200.8 °C	-199.2 °C	0.6 °C	0.27 °C	✓
-100.0 °C	-100.40 °C	-100.0 °C	-100.7 °C	-99.3 °C	0.4 °C	0.19 °C	✓
0.0 °C	-0.30 °C	0.0 °C	-0.3 °C	0.3 °C	0.3 °C	0.19 °C	✓
25.0 °C	24.70 °C	25.0 °C	24.7 °C	25.3 °C	0.3 °C	0.19 °C	✓
50.0 °C	49.70 °C	50.0 °C	49.7 °C	50.3 °C	0.3 °C	0.19 °C	✓
75.0 °C	74.70 °C	75.0 °C	74.7 °C	75.3 °C	0.3 °C	0.19 °C	✓
100.0 °C	99.70 °C	100.0 °C	99.6 °C	100.4 °C	0.3 °C	0.19 °C	✓
125.0 °C	124.60 °C	125.0 °C	124.6 °C	125.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
150.0 °C	149.60 °C	150.0 °C	149.6 °C	150.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
175.0 °C	174.70 °C	175.0 °C	174.6 °C	175.4 °C	0.3 °C	0.23 °C	✓
200.0 °C	199.60 °C	200.0 °C	199.6 °C	200.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
225.0 °C	224.60 °C	225.0 °C	224.6 °C	225.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
250.0 °C	249.60 °C	250.0 °C	249.6 °C	250.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
275.0 °C	274.60 °C	275.0 °C	274.6 °C	275.4 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
300.0 °C	299.60 °C	300.0 °C	299.5 °C	300.5 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
325.0 °C	324.60 °C	325.0 °C	324.5 °C	325.5 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
350.0 °C	349.50 °C	350.0 °C	349.5 °C	350.5 °C	0.5 °C	0.23 °C	✓
375.0 °C	374.60 °C	375.0 °C	374.5 °C	375.5 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
400.0 °C	399.60 °C	400.0 °C	399.5 °C	400.5 °C	0.4 °C	0.23 °C	✓
500.0 °C	499.90 °C	500.0 °C	499.4 °C	500.6 °C	0.1 °C	0.23 °C	✓
1000.0 °C	999.70 °C	1000.0 °C	999.2 °C	1000.8 °C	0.3 °C	0.27 °C	✓
1370.0 °C	1369.80 °C	1370.0 °C	1369.0 °C	1371.0 °C	0.2 °C	0.27 °C	✓
K Type - Reading in °F							
-328.0 °F	-329.30 °F	-328.0 °F	-329.6 °F	-326.4 °F	1.3 °F	0.49 °F	✓

NETES Müh. Ve Dış Tic. Ltd. Şti.

Koşuyolu Cad.No:124

Koşuyolu - Kadıköy 34718 İSTANBUL

Telefon : (216) 340 50 50 pbx.

Fax : (216) 340 51 51

Internet: <http://www.netes.com.tr>

e.mail : kalibrasyon@netes.com.tr

KALİBRASYON SERTİFİKASI
Calibration Certificate

E5030407

NETES
KALİBRASYON
LABORATUVARI

03-05

Fonksiyon Test Noktası Function/Test points Name	Uygulanan Değer Applied Value	Okunan Değer Indicated Value	Alt Sınır Lo Limit	Üst Sınır Hi Limit	Hata Error	Ölçüm Belirsizliği Measurement Uncertainty
Temperature						
0.0 °F	-0.70 °F	0.0 °F	-0.6 °F	0.6 °F	0.7 °F	0.34 °F x
32.0 °F	31.30 °F	32.0 °F	31.4 °F	32.6 °F	0.7 °F	0.34 °F x
77.0 °F	76.50 °F	77.0 °F	76.4 °F	77.6 °F	0.5 °F	0.34 °F ✓
212.0 °F	211.50 °F	212.0 °F	211.3 °F	212.7 °F	0.5 °F	0.34 °F ✓
2498.0 °F	2497.60 °F	2498.0 °F	2496.2 °F	2499.8 °F	0.4 °F	0.49 °F ✓

1 nolu ısı probu kullanılarak T1 girişinden yapılan ölçümler

-30.0 °C	-30,0 °C	-29,5 °C	0,5 °C	0,1 °C
-20.0 °C	-20,0 °C	-19,6 °C	0,4 °C	0,1 °C
-10.0 °C	-10,0 °C	-9,7 °C	0,3 °C	0,1 °C
0.0 °C	0,0 °C	0,2 °C	0,2 °C	0,1 °C
25.0 °C	25,0 °C	24,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
50.0 °C	50,0 °C	49,6 °C	-0,4 °C	0,1 °C
75.0 °C	75,0 °C	74,7 °C	-0,3 °C	0,1 °C
100.0 °C	100,0 °C	99,7 °C	-0,3 °C	0,1 °C
125.0 °C	125,0 °C	124,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
150.0 °C	150,0 °C	149,5 °C	-0,5 °C	0,1 °C

2 nolu ısı probu kullanılarak T2 girişinden yapılan ölçümler

-30.0 °C	-30,0 °C	-29,3 °C	0,7 °C	0,1 °C
-20.0 °C	-20,0 °C	-19,4 °C	0,6 °C	0,1 °C
-10.0 °C	-10,0 °C	-9,6 °C	0,4 °C	0,1 °C
0.0 °C	0,0 °C	0,3 °C	0,3 °C	0,1 °C
25.0 °C	25,0 °C	24,9 °C	-0,1 °C	0,1 °C
50.0 °C	50,0 °C	49,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
75.0 °C	75,0 °C	74,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
100.0 °C	100,0 °C	99,8 °C	-0,2 °C	0,1 °C
125.0 °C	125,0 °C	125,0 °C	0,0 °C	0,1 °C
150.0 °C	150,0 °C	149,7 °C	-0,3 °C	0,1 °C

Ek I.2 Hassas Terazi Kalibrasyonu

METKAL ölçü ve test sistemleri	METKAL KALİBRASYON MERKEZİ Çavuşoğlu Mah. Barbaros Hayrettin Paşa Cad. No:16 Kartal 81430 İSTANBUL	METKAL 05- 02742 03-05	
Kalibrasyon Sertifikası <i>Calibration Certificate</i>			
FORM NO : F-1.01 REVİZYON : 1			
Cihazın Sahibi <i>Customer</i>	: DİZAYN TEKNİK PLASTİK BORU VE ELEMANLARI SAN. VE TİC.A.Ş. ÇORLU ŞB. VELİ MEŞE BELDESİ,KAZAN VE SAN.TOPLU İŞ KOOP.5 ADA,4 PARSEL 59850 ÇORLU / TEKİRDAĞ		
İstek Numarası <i>Order No.</i>	: 7541		
Makine/Cihaz <i>Instrument/Device</i>	: TERAZİ		
İmalatçı <i>Manufacturer</i>	: METTLER TOLEDO		
Tip <i>Type</i>	: AG285		
Seri Numarası <i>Serial Number</i>	: 1119370806		
Kalibrasyon Tarihi <i>Date of Calibration</i>	: 01.03.2005		
Sertifikanın Sayfa Sayısı <i>Number of pages of the Certificate</i>	: 3		
Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. <i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International Systems of Units (SI).</i> Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metotları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. <i>The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.</i>			
Mühür <i>Seal</i>	Tarih <i>Date of Issue</i>	Kalibrasyonu Yapan <i>Calibrated by</i>	Laboratuvar Yöneticisi <i>Head of the Calibration Laboratory</i>
	02.03.2005	Özkan SÜRÜCÜ Kalibrasyon Teknisyeni	Ertan ÖZ/

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz kalibrasyon sertifikaları geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

METKAL Ölçü ve Test Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti.
Çavuşoğlu Mahallesi Barbaros Hayrettin Paşa Cad. No.16 Kartal 81430 İSTANBUL

Tel.:0216. 374 99 20/24/30 Fax.:0216. 374 99 28
www. metkal.com.tr metkal@metkal.com.tr

Sayfa 2 / 3
Page 2 of 3**Makine/Cihaz** : TERAZİ
*Instrument/Device***Bulunduğu Yer** :
*Place***Çevre Şartları** : Sıcaklık : (20±1) °C , Nem : (50±10) %Rh
*Environmental Conditions***Ölçüm Belirsizliği** : Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak
Measurement Uncertainty alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.
Belirsizlikler "Ölçüm Sonuçları" sayfasında verilmiştir.

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.
Uncertainties are expressed at Measurement Results page.

Kalibrasyon Yöntemi : Referans kütleler yardımıyla teraziye uygulanan yüklerin ölçülmesi yöntemiyle yapılır.
*Calibration Method***Uygunluk Beyanı** : Cihaz, Norm / Standard toleransları içerisindedir.
Statement of Compliance Uygunluk beyanında ölçme belirsizliği dikkate alınmıştır.
Measurement uncertainty is taken into consideration for the statement of compliance.**Notlar** :
*Notes***Tavsiye Edilen Gelecek Kalibrasyon Tarihi** : 01.03.2006*Recommended Next Calibration Date*

Cihazın uygun periyotlarda kalibrasyonundan kullanıcı sorumludur.
User is obliged to have the device recalibrated at appropriate intervals.

Prosedür :
Procedures

NO	ADI
ÇT-2.7	Terazi Kalibrasyon Talimatı
8.1.15.1	Terazi Kalibrasyonu

Kalibrasyonda Kullanılan Referanslar :*References used in calibration*

CIHAZ	İMALATÇI	TİP	SERİ NO	SERTİFİKA NO	KAL.TARİHİ	İZLENEBİLİRLİK
KÜTLE SETİ	KERN	1 mg-200 g	G033898	G1-269	21.05.2004	DKD
KÜTLE SETİ	HÄFNER	500 g-10 kg	085870/01	2003.MKU.184	11.06.2003	UME

Sayfa 3 / 3
Page 3 of 3**Ölçüm Sonuçları**
Measurement Results**Metkal No** : 04310206001
Metkal Number
Ölçme Sahası/Çözünürlük : 0,01-200 g
Range/Resolution : 0,0001 g**Envanter No** : CHZ 205
Inventory Number
Sertifika Tipi :
Certificate Type

4310206001

d = 0,0001 g
e = 0,00001 g

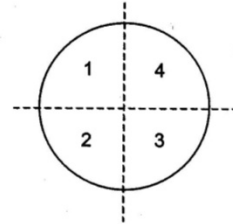
Terazi, firmanın Kalite Kontrol Laboratuvarı'nda kullanıldığı ortamda kalibre edilmiştir.

TS EN 45501 Klas 1'e göre tolerans :
0,01 g ≤ m ≤ 5 g : ± 0,0001 g
5 g < m ≤ 20 g : ± 0,0002 g
20 g < m ≤ 200 g : ± 0,0003 g

Referans Kütle g	ARTAN YÜK YÖNÜ		AZALAN YÜK YÖNÜ	
	Terazi Göstergesi g	Sapma g	Terazi Göstergesi g	Sapma g
0,01	0,01000	0,00000 ✓	0,01000	0,00000 ✓
0,1	0,10000	0,00000 ✓	0,10000	0,00000 ✓
1	1,00000	0,00000 ✓	1,00000	0,00000 ✓
10	10,00001	0,00001 ✓	10,00001	0,00001 ✓
20	20,00005	0,00005 ✓	20,00005	0,00005 ✓
50	50,00005	0,00005 ✓	50,00005	0,00005 ✓
70	70,00003	0,00003 ✓	70,00003	0,00003 ✓
100	99,9999	-0,0001 ✓	99,9999	-0,0001 ✓
130	129,9999	-0,0001 ✓	129,9999	-0,0001 ✓
150	149,9998	-0,0002 ✓	149,9998	-0,0002 ✓
200	199,9998	-0,0002 ✓	199,9998	-0,0002 ✓

Tekrarlanabilirlik Hatasıg
0,00000 ✓**Eksantriklik Hatası**

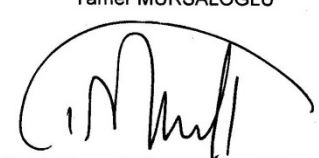
1. Bölge -0,00001 ✓
2. Bölge -0,00016 ✓
3. Bölge 0,00001 ✓
4. Bölge 0,00009 ✓

**Ölçme Belirsizliği** :
< 200 g : ± 0,1 mg
> 200 g : ± 0,15 mg

Bu ölçüm sonuçları '04310206001' Metkal numaralı cihaza aittir.

Tolerans / Tolerance✓ : İçinde / In * : Anzalı / Out Of Order
X : Dışında / Out - : Test Edilmedi / Not Tested

Ek I.3 Soğutucu Dolap Kalibrasyonu

METKAL ölçü ve test sistemleri	METKAL KALİBRASYON MERKEZİ Çavuşoğlu Mah. Barbaros Hayrettin Paşa Cad. No:16 Kartal 81430 İSTANBUL	METKAL 06-09401 06-06	
Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate			
FORM NO : F-1.01 REVIZYON : 1			
Cihazın Sahibi Customer	: DİZAYN TEKNİK PLASTİK BORU VE ELEMANLARI SAN.VE TİC.A.Ş. ÇORLU ŞB. VELİ MEŞE BELDESİ,KAZAN VE SAN.TOPLU İŞ KOOP.5 ADA,4 PARSEL 59850 ÇORLU / TEKİRDAĞ		
İstek Numarası Order No.	: 12618		
Makine/Cihaz Instrument/Device	: SOĞUTUCU DOLAP		
İmalatçı Manufacturer	: BOSCH		
Tip Type	: ---		
Seri Numarası Serial Number	: ---		
Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration	: 01.03.2005		
Sertifikanın Sayfa Sayısı Number of pages of the Certificate	: 4		
Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International Systems of Units (SI). Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metotları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. The measurements, the uncertainties with confidence probability and calibration methods are given on the following pages which are part of this certificate.			
Mühür Seal	Tarih Date of Issue	Kalibrasyonu Yapan Calibrated by	Laboratuvar Yöneticisi Head of the Calibration Laboratory
	02.03.2005	Yalçın DEMİR	Tamer MURSAOĞLU
 			

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz kalibrasyon sertifikalar geçersizdir.
This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory.
Calibration certificates without signature and seal are not valid.

METKAL Ölçü ve Test Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti.
Çavuşoğlu Mahallesi Barbaros Hayrettin Paşa Cad. No.16 Kartal 81430 İSTANBUL

Tel.:0216. 374 99 20/24/30
www. metkal.com.tr

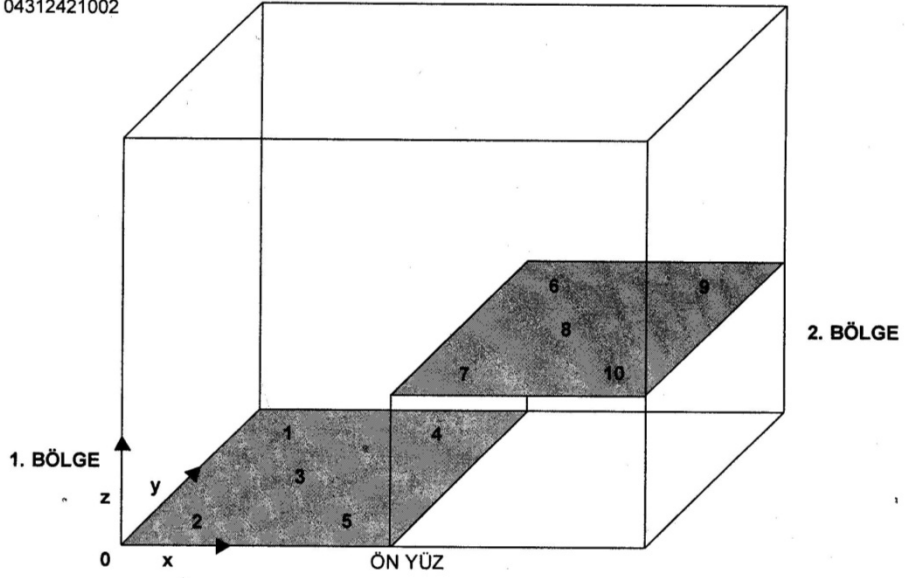
Fax.:0216. 374 99 28
metkal@metkal.com.tr

Sayfa 2 / 4
Page 2 of 4**Makine/Cihaz** : SOĞUTUCU DOLAP
*Instrument/Device***Bulunduğu Yer** : LABORATUVAR
*Place***Çevre Şartları** : Sıcaklık : (23±3) °C , Nem : (50±20) %Rh
*Environmental Conditions***Ölçüm Belirsizliği** : Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği, standart belirsizliğin, k=2 olarak
Measurement Uncertainty alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.
Belirsizlikler "Ölçüm Sonuçları" sayfasında verilmiştir.
*The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. Uncertainties are expressed at Measurement Results page.***Kalibrasyon Yöntemi** : Sıcaklık tarayıcısının kanallarına bağlanan problar, soğutucu dolap içerisinde
Calibration Method koordinatları belirlenen noktalara uygun bir şekilde yerleştirilir. Soğutucu dolap istenen sıcaklık değerine set edilir ve dengeye gelmesi beklenir. Herbir probtan ölçülen sıcaklık değerleri kaydedilir. Soğutucu dolabın gösterge değeri ile karşılaştırılarak kalibrasyonu yapılır.**Uygunluk Beyanı** : Değerlendirme kullanıcıya bırakılmıştır.
Statement of Compliance Uygunluk beyanında ölçme belirsizliği dikkate alınmıştır.
*Measurement uncertainty is taken into consideration for the statement of compliance.***Notlar** :
*Notes***Tavsiye Edilen Gelecek Kalibrasyon Tarihi** : 01.03.2006*Recommended Next Calibration Date*Cihazın uygun periyotlarda kalibrasyonundan kullanıcısı sorumludur.
*User is obliged to have the device recalibrated at appropriate intervals.***Prosedür** :
*Procedures***NO** **ADI**
T-2.3.01 Sıcaklık Kaynakları-1 Kalibrasyon Talimatı**Kalibrasyonda Kullanılan Referanslar** :
References used in calibration

CİHAZ	İMALATÇI	TİP	SERİ NO	SERTİFİKA NO	KAL.TARİHİ	İZLENEBİLİRLİK
DATA AQUISITION	HEWLETT PA	34970A..	MY41033649	06-02201	14.02.2006	UME

Sayfa 3 / 4
Page 3 of 4**Ölçüm Sonuçları**
Measurement ResultsMetkal No : 04312421002
Metkal Number
Ölçme Sahası/Çözünürlük :
Range/ResolutionEnvanter No : CHZ 42
Inventory Number
Sertifika Tipi :
Certificate Type

04312421002



Set Değeri	Tekrarlama Zamanı	Gösterge Değeri	Bölge	Ölçülen Değer	Sapma	Hacimsel Sıcaklık Değişimi	Belirsizlik
KADEME	dk.	°C		°C	°C	°C	°C
5	30	—	1. BÖLGE	-26,6	—	3,6	± 0,5
			2. BÖLGE	-27,6	—	2,4	± 0,5

Bu ölçüm sonuçları '04312421002' Metkal numaralı cihaza aittir.

Tolerans / Tolerance

✓ : İçinde / In * : Arızalı / Out Of Order
X : Dışında / Out — : Test Edilemedi / Not Tested

Sayfa 4 / 4
Page 4 of 4**Ölçüm Sonuçları**
Measurement ResultsMetkal No : 04312421002
Metkal NumberEnvanter No : CHZ 42
Inventory NumberÖlçme Sahası/Çözünürlük :
Range/ResolutionSertifika Tipi :
Certificate Type

04312421002

Koordinat (cm.)			
Prob No.	x	y	z
1	5	44	15
2	5	10	1
3	34	26	15
4	55	43	1
5	56	5	1
6	64	43	35
7	63	6	26
8	72	23	26
9	79	44	35
10	79	5	26

Set Değeri	Gösterge Değeri	Ölçülen Değer (Prob No.)											
Kademe	°C	°C (1)	°C (2)	°C (3)	°C (4)	°C (5)	°C (6)	°C (7)	°C (8)	°C (9)	°C (10)		
5	Min.	—	-28,6	-26,4	-27,6	-25,0	-25,3	-27,7	-27,9	-26,0	-28,4	-28,0	
	Max.	—	-28,6	-26,4	-27,6	-25,0	-25,2	-27,7	-27,9	-25,9	-28,4	-27,9	
	Ort.	—	-28,6	-26,4	-27,6	-25,0	-25,2	-27,7	-27,9	-26,0	-28,4	-28,0	

Bu ölçüm sonuçları '04312421002' Metkal numaralı cihaza aittir.

Tolerans / Tolerance

✓ : İçinde / In * : Arızalı / Out Of Order

X : Dışında / Out - : Test Edilemedi / Not Tested

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Rize'de doğan Zafer GEMİCİ, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği'nden mezun olduktan sonra yine aynı bölümde Yüksek Lisansını tamamladı. Lisans eğitimi devam ederken Arçelik Araştırma ve Geliştirme Departmanı'nda staj ile başlayan ARGE mühendisliği deneyimini daha sonra burada iş hayatına başlayarak profesyonelleştirmiştir. Yaklaşık 5 yıl Arçelik ARGE Departmanı'nda ısı ve akışkan sistemleri, soğutma tekniği, dinamik sistemlerin modellenmesi gibi konularda proje yöneticiliği yapmıştır. Askerlik görevi nedeniyle Arçelik ARGE'den ayrıldıktan sonra Dizayn Grup ARGE Departmanı'nda ısı transferi, akışkanlar mekaniği, termodinamik, enerji sistemleri, patent ve proje yönetimi konularında ARGE uzmanı olarak işe başlamış ve bir yıl sonra da ARGE yöneticisi olmuştur. Zafer GEMİCİ yaklaşık 4 yıldır bu görevi yürütmektedir. Dizayn Grup Teknoloji Yönetim Kurulu'nun üyesi olan Zafer GEMİCİ aynı zamanda firmanın geleneksel "Beyin Göçüne Karşı Beyin Gücünü Teşvik Ediyoruz" kampanyasının da yönetimini gerçekleştirmektedir.

Halihazırda Uluslararası Teknoloji Birliği (UTB)'nin kurucu üyeliği ve Başkan yardımcılığı, Society of Plastic Engineering (SPE) üyeliği, Uluslararası Patent Birliği (UPB) İstanbul Şubesi kurucu üyeliği ve başkan yardımcılığı ve AKUT üyeliği gibi yürüttüğü sosyal sorumlulukların yanısıra İstanbul Üniversitesi'nde de Öğretim Görevlisi olarak ders vermektedir.

Dağcılık gibi doğa sporları ile ilgilenen Zafer GEMİCİ evli ve bir kız çocuğu babasıdır.