

Bünyesinde su bulunan sıkıştırılmış kar kürelerde ısı transferinin incelenmesi

Zafer GEMİCİ*, A. Nilüfer EĞRİCAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Enerji Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yaz aylarında dağlarda bulunabilecek karın soğutma amacıyla kullanılabilmesi için borular vasıtasıyla taşınması mümkündür. Ancak karın, bulunduğu formda veya su ile salamura şeklinde taşınması sıkıntılıdır. Dirsek gibi akışın yön değiştirdiği yerlerde karın boruları tıkaması ve dağda sahip olduğu soğu enerjisini daha kolay kaybetmesi gibi problemler vardır. Bu nedenle karın sıkıştırılıp su emdirildikten sonra soğutularak buzlaştırılması düşünülmüştür. Bu sayede kar küre, boru içerisinde hareket ederken dışarıdan içeriye doğru eriyeceği için kolaylıkla parçalanmayacak ve salamura oluşmayacaktır. Bu çalışma kapsamında sıkıştırılarak küresel hale getirilen karın, önce sıfır dereceye getirilmesi, sıfır derecede su emdirilmesi ve son olarak da soğutularak buzlaştırılması prosesi ele alınmıştır. Soğutma hem doğal taşınım ile hem de zorlanmış taşınım ile yapılmıştır. Oluşturulan deney sistemi ile sıkıştırılarak yarım küre haline getirilmiş karın su emdirildikten sonra soğutularak buzlaştırılması süresince gerçekleşen ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. Kar, geliştirilen sıkıştırma aparatı ile 80 mm çapında yarım kürelere dönüştürülmüştür. Farklı yoğunluklarda yarım küreler elde edilerek farklı gözeneklilikler elde edilmiştir. Bu yarım küreler daha sonra sıfır dereceye getirilmiş ve sonrasında da sıfır derecedeki suya daldırılarak su emmeleri sağlanmıştır. Deneyler yorumlanırken kar kürelerin homojen gözeneklilikte olduğu ve homojen su emdikleri kabulü yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda farklı gözenekliliklerdeki kar kürelerin soğuma süresince iç bölgelerindeki sıcaklık dağılımları, buzlaşmanın zamana göre değişimi oluşturulan eğrilerle verilmiştir. Deneysel çalışmalarda gözeneklilik azaldıkça su emmenin azaldığı, yoğunluğu 0.82 g/cm^3 'ten büyük olan numunelerin ise su emmediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kar, buz, faz değişimi, ısı transferi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Zafer GEMİCİ, zafer@dizayngrup.com; Tel: (212) 886 57 41.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Enerji Programı'nda tamamlanmış olan "Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan ve faz değişimi yapan kapsüllerde ısı transferinin incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 29.02.2008 tarihinde dergiye ulaşılmış, 30.06.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Heat transfer investigation of compressed-water absorbed snow spheres

Extended abstract

It is possible to use the natural snow accumulated on mountains for the aim of refrigeration when needed, especially in summer times. Making ice spheres from snow is suggested for transferring this accumulated snow from mountains to the places where refrigeration is needed. In this study, ice-sphere making process and heat and mass transfer mechanisms during this icing process are investigated experimentally. Today, transferring of ice for long distances is realized in the mixture form of snow and water. The most important disadvantage of transferring of snow mixture in pipe lines is the blockage of the flow because of accumulation of the snow in the elbows which is the place of flow direction changes. Another important disadvantage is large pressure losses. To overcome all these problems ice-spheres are being suggested. In this study, firstly making snow balls by compression, and then, saturating them with water and lastly, getting ice ball by cooling is aimed. To prevent the blockage of the balls in the pipeline's elbows, the diameter of the balls should be chosen bigger than the radius of the pipe. Otherwise, we will meet a flow characteristic called slush flow in the literature. In this study, the aimed flow is known as plug flow. In the literature, the plug flow of the plastic balls examined by Ulusarlan (2003) experimentally. In the mentioned study, the plug flow of the plastic balls was investigated and pressure losses of the flow determined experimentally. In addition, plug and slug flow are compared with each other. According to the study in the plug flow;

- Pressure losses are less.
- There is no blockage risk.
- It is possible to carry more mass.
- Less power is required to carry.

During the transfer of the balls in the pipelines, icing of the snow balls has to be done to prevent breaking into pieces. The icing process is done by compression of the snow into the form of sphere and saturating it with water. Water can be used as a binder. The most important think here is how much water should be used in the penetration process. The excess water causes the balls breaking into pieces. On the other hand, the less water amount causes insufficient binding of the snow granules.

By compression of the balls, the air gaps inside the snow balls are decreased. Thus the density of the snow increases depending on the compaction level. At the end, the bonds between snow granules will be stronger. Compaction level, compaction velocity and temperature are very important parameters affecting the process. It is very important to determine correctly which values of the parameters should be used to have enough strength of the snow ball during the transfer process. The experimental studies have been carried out to get correct values and to investigate the heat and mass transfer characteristics of the snow.

The following experimental results have been obtained;

- It is possible to produce strengthened ice balls by cooling the snow ball after compression of snow into the form of sphere and saturating it with water.
- After compression step, since close cellular structure is gained, the snow ball can't absorb any amount of water if the density of the snow ball is greater than 0.82 g/cm^3 .
- Experimental results in various conditions have been compared.
 - The same trend-lines have been obtained for the same conditions.
 - The differences between forced convection and natural convection cooling processes have been determined for the samples absorbing same amount of water. In natural convection cooling process, the total icing time is about 4 hour. However, in forced convection, it is about 1 hour.
 - Absorbed water amount increases with the cooling time.

During the cooling process, the temperature vs time profile of all the samples have been determined experimentally and all these results are given in the form of graphs in this study for various spheres having different porosities.

Keywords: Snow, ice, phase change, heat transfer.

Giriş

Doğal karın depolanarak yaz aylarında soğutma amacıyla kullanılması mümkündür. Bu çalışmada dağlarda biriken veya muhafaza altına alınan karın yaz aylarında soğu ihtiyacı olan bölgelere taşınabilmesi için buz küreler haline getirilmesi prosesi deneysel olarak ele alınmıştır. Günümüzde karın daha uzak mesafelere taşınması kar+su karışımının oluşturduğu salamuranın taşınması şeklinde olmaktadır. Salamura akışının en büyük riski akışın yön değiştirdiği dirseklerde karın birikerek tıkanmalara neden olmasıdır. Ayrıca basınç düşüşleri daha fazla olacaktır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için karın küresel buz topları haline getirilerek bir yerden başka bir yere transfer edilmesi düşünülmektedir. Bu çalışmada karın önce sıkıştırılarak kartopu haline getirilmesi, su vererek gözeneklerin su ile doldurulması ve soğutarak buz topu haline getirilmesi amaçlanmaktadır. Buz toplarının boru hattında tıkanmaya neden olmaması için boru yarı çapından büyük seçilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde 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 Ulusarslan (2003) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada kapsüllerin tren şeklindeki akışı incelenmiş ve basınç düşümleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada kapsül akışı ile salamura akışı kıyaslanmıştır. Buna göre; kapsül akışında basınç düşüşleri daha azdır, tıkanma sözkonusu değildir, birim zamanda daha fazla taşınabilir ve taşıma için daha az güç gerekir.

Vigneault ve Gameda (1994) çalışmalarında karın sıkıştırılmasında su ilavesinin etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada efektif sıkıştırma ile karın yoğunluğunu 920 kg/m^3 'e kadar arttırmışlar ve daha az 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/m^3 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 daha önce yapılan çalışmalarda 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.

Gameda ve diğerleri (1996) çalışmalarında sıkıştırma ile buz üretimi prosesinde karın davranışını incelemişlerdir. Deneysel 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 kullanılarak kar 102 mm/dak hızda sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonucu elde edilen maksimum basınç 1.2 MPa 'dır. Minimum enerji sarfıyatı ile en yüksek sıkıştırılabilirlik -18 ve -15 °C'lerde %12 su katıldığı durumda gözlemlenmiştir.

Yapılan literatür taramasında belirli miktarda ve özelliklerde kar kütlesinin sıkıştırılarak ve su emdirilerek küresel buz topları haline getirilmesi ve bu küresel buzlarda ısı transferinin incelenmesi konusunda bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Daha önce de söylenildiği gibi 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 sıkıştırılıp, su emdirilip ve soğutularak gerçekleştirilebilir. Su ise bağlayıcı olarak kullanılabilir. Buradaki en önemli husus ne kadar miktarda su emdirilmesi gerektiğinin tespitidir. Eğer fazla miktarda su verilirse küre donma sırasında parçalanabilir. Eksik su verilmesi durumunda ise yeterli bağlanma sağlanamayacaktır.

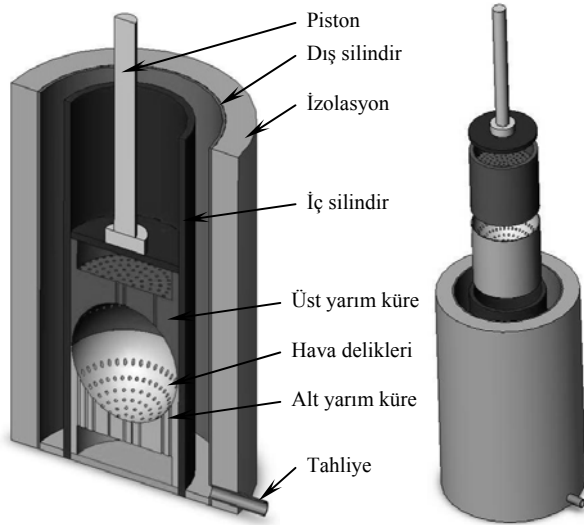
Sıkıştırma ile karın içerisindeki hava boşlukları azaltılır. Karın yoğunluğu giderek artar ve granüller daha homojen hale gelerek aradaki bağlar kuvvetlenir. Sıkıştırma miktarı, yani uygulanan basınç, sıkıştırma hızı ve kar sıcaklığı etkili parametrelerdir. Kar toplarının taşınması esnasında parçalanmayacak kadar mukavemete sahip olması için hangi şartlarda sıkıştırılması ge-

rektiği tespit edilmelidir. Bu şartların tespit edilme-si ve bu esnada oluşan ısı geçişinin belirlenebilmesi amacıyla aşağıda tariflenen deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Deney sistemi

Deneylerde kullanılacak olan buz kürelerinin çapı, daha önce Ulusarslan (2003) tarafından yapılan çalışmaların sonuçlarından ve kurulan deney sisteminden faydalanabilmek amacıyla bu çalışmada kullanılan küresel deney numunelerinin çapı ile aynı seçilerek 8 cm çapında kar küreleri oluşturulmuştur. Eksenel simetri olması nedeniyle yarım küre kullanılmış olup yarım küreler Şekil 1’de verilen numune hazırlama aparatı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan kar kürelerin alt kısmı yalıtılarak deneyler yapılmıştır.

Deney sistemi Dizayn Grup Araş. ve Tek. Geliş. Md. laboratuvarlarında kurulmuştur.



Şekil 1. Numune hazırlama aparatı

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. Silindir iç yüzeyinde 0 °C elde edilebilmesi için iki silindir arasına su-buz karışımı konulacak şekilde boş bırakılmıştır. Sistemin alt kısmında yer alan tahliye musluğu sayesinde gerektiğinde içerisindeki su boşaltıla-

bilmektedir. 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 ZWICK marka universal çekme cihazında kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. 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 malzemeden olup (prinç) CNC tezgahlarda işlenmiştir.

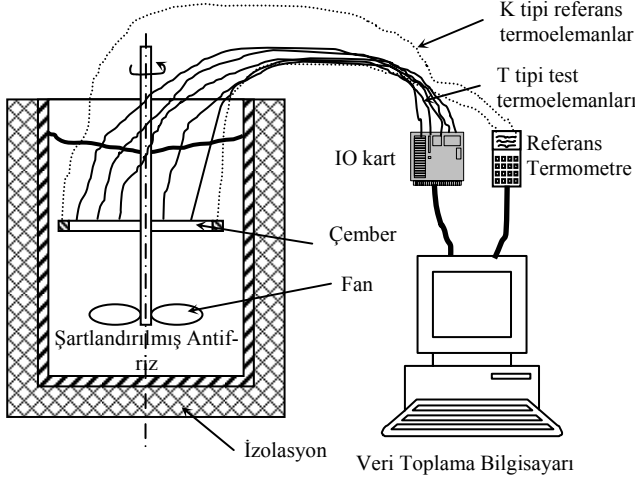
Veri toplama amacıyla Advantech firmasının PCL-818HD model IO kartı kullanılmıştır. Bu kart aracılığıyla toplam 15 kanaldan sıcaklık ölçümü yapılabilmektedir. Dataların bilgisayar vasıtasıyla okunabilmesi için Advantech firmasının GeniDAQ adlı programı ile bir arabirim yazılmıştır. Bu arabirim vasıtasıyla 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.

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 transformator kullanılarak 27 V uygulanan civa içerisinde ark kaynağı ile birleştirilmiştir.

Termoelemanlar Şekil 2’de gösterilen 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 °C’ye getirilen antifiriz kap içerisine boşaltılmıştır. Silindirik kap içerisine termoelemanlar ve referans termometrenin iki probu Şekil 2’de 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. Elde edilen datalara (1) nolu eşitlikte verildiği gibi 3. dereceden bir fonksiyon uydurulmuştur. Regresyon analizi yapılarak her bir termoeleman için yapılan regresyon analizinde elde edilen hata değerleri ve fonksiyonlar aşağıda verilmiştir.

$$y = y_0 + a.T + b.T^2 \quad (1)$$



Şekil 2. Termoeleman kalibrasyon sistemi

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.

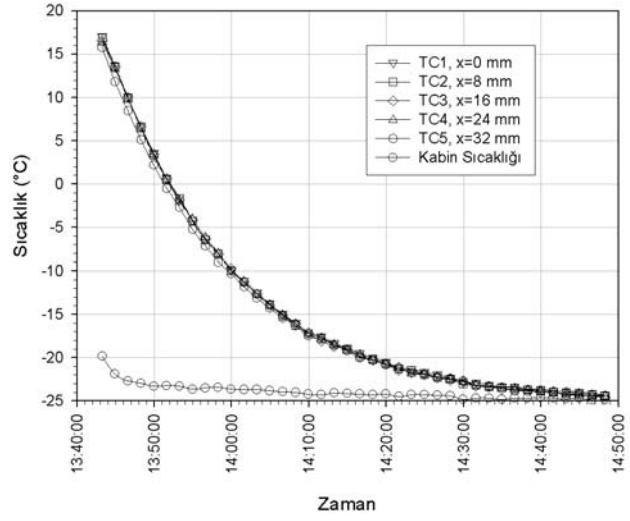
Şekil 3'te deney sonuçları görülmektedir. Deney sonuçlarına göre, herhangi bir zamanda tüm kütle aynı sıcaklıkta olduğu kabul edilebilir.

$$\delta Q = mc dT = hA(T - T_\infty) dt \quad (2)$$

$$\frac{mc}{hA} \int \frac{1}{(T - T_\infty)} dT = \int dt \quad (3)$$

$$h = \frac{mc}{A} \frac{\ln \left[\frac{T_2 - T_\infty}{T_1 - T_\infty} \right]}{\Delta t} \quad (4)$$

$$m = \rho.V = \rho \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (5)$$



Şekil 3. Alüminyum yarım küre sıcaklığının zamanla değişimi

(4) nolu eşitlik kullanılarak ortalama ısı taşınım katsayısı 37 W/m²K olarak belirlenmiştir. Ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplanırken 20. dakikadan sonraki deneysel değerler kullanılmıştır.

Kütlenin belli bir sıcaklıkta her bölgesindeki sıcaklığın aynı olduğunu kabul edebilmemiz için Biot sayısının 0.1'den küçük olması gerekir (Incropera ve DeWitt, 2002).

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (6)$$

L = Hacim/yüzey alanı olarak tarif edilmiştir.

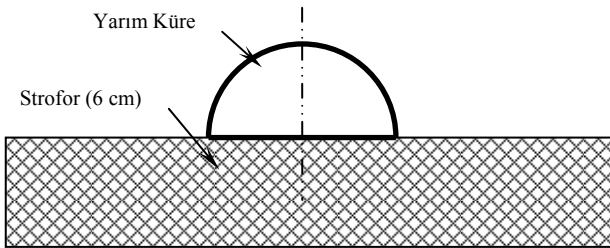
$$Bi = \frac{37 \frac{0.04}{3}}{237} = 0.0021 < 0.1 \quad (7)$$

Bu sonuç yapılan kabulün doğruluğunu göstermektedir.

Deney prosedürü

Numune hazırlama aparatı önce -20 °C'ye şartlandırılır. Daha sonra şartlandırılan aparatın iki silindir arasında kalan hacmine buz + su karıştı-

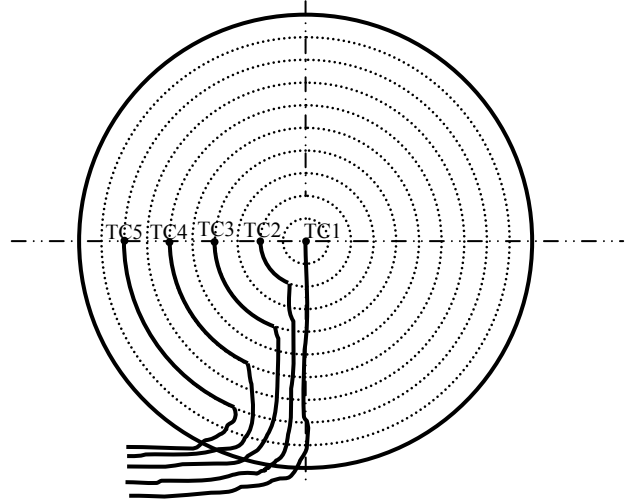
mı yerleştirilir. Bu şekilde deney süresince aparatın sıcaklığının sıfırın altına düşmesi engellenmiş olur. Aparat çekme cihazına yerleştirilir. Piston geriye hareket ettirilerek içerisine tespit edilen miktarda $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye şartlandırılmış kar konulur. Daha sonra kar 10 mm/dk hızla 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 4). Küre içerisindeki sıcaklık dağılımının tespit edilebilmesi için strofor ile numune arayüzüne termoelemanlar Şekil 5'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Deney hazırlama aparatından çıkarılan numuneler $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de şartlandırılan, üzerine termoeleman yerleştirilmiş stroforda belirtilen yere konulur. Daha sonra stroforla beraber deney numunesi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki ortama yerleştirilir. Numunenin tamamı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye gelene kadar beklendikten sonra tekrar hassas terazide tartılır. Bu aşamadan sonra numune $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki suya sadece dış küre yüzeyleri gelecek şekilde daldırılarak bünye içerisine su geçişine izin verilir. Numune belirli bir süre sıfır derecedeki su içerisinde beklentilir ve çıkarılarak tekrar tartılır. Bu şekilde ne kadar su emdiği tespit edilir. Daha sonra sıfır dereceye şartlandırılmış olan strofor üzerine konularak $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki derin dondurucuya konulur. Numunenin tamamının $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye gelene kadar sıcaklık değişimleri kaydedilir.



Şekil 4. Deney numunesi ve yalıtım

DeneySEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Kardan çeşitli yoğunluklarda elde edilen yarım küreler deney prosedürüne uygun olarak test edilmiştir. Deney numunelerinin ilk ve son kütleleri ve emilen su miktarları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 5. Termoelemanların (TC1-TC5) yerleşim detayı

Tablo 1. Deney numunelerine ait kütleler

Numune Kodu	Numunenin ilk kütlesi (g)	Numunenin son kütlesi (g)	Emilen su miktarı (g)
NDYK01	116.0020	116.7065	0
NDYK02	71.5214	113.7580	42
NDYK03	119.7100	129.4035	10
NDYK04	94.5777	118.5375	24
NDYK05A	113.7185	113.7185	0
NDYK05B	113.7185	113.7185	0
NDYK06	92.1263	107.4050	15
NDYK07	87.1012	119.4969	32
NDYK08	68.5590	110.5161	42
NDYK09	87.9126	110.9306	23
NDYK10	86.3550	109.1539	23
NDYK11	105.3910	106.4760	1
NDYK12	102.6930	102.7022	0
NDYK13	58.8255	113.0205	54
NDYK14	78.1992	111.4466	33

Çalışma kapsamında toplam 15 adet deney yapılmıştır. Buz küreler deneylerin ilk altısında doğal taşınım ile diğer deneylerde ise zorlanmış taşınım ile soğutulmuştur. Soğutma, deney numunesi üzerine bir fanla soğutulmuş hava gönderilerek yapılmıştır.

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ '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 2'de verilmiştir.

$$V = \frac{1}{2} \frac{4}{3} \pi R^3 = 0.5 \frac{4}{3} \pi 4^3 = 134.04 \text{ cm}^3 \quad (8)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

$$\phi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{buz}}} \quad (10)$$

m: kütle

V: hacim

ρ : yoğunluk

ϕ : gözeneklilik

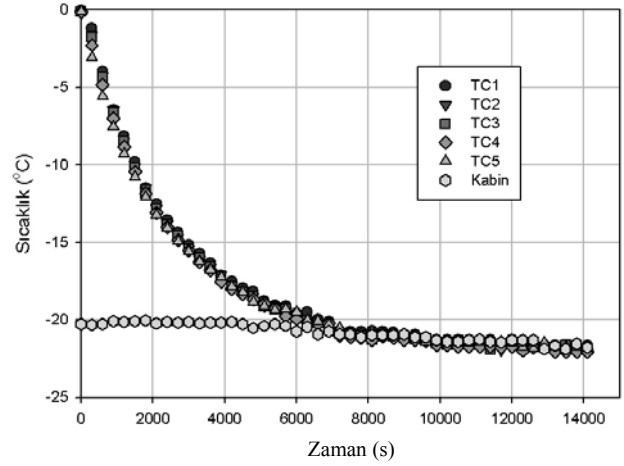
Tablo 2. Deney numunelerine ait yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Numune kodu	İlk yoğunluk (g/cm ³)	Son yoğunluk (g/cm ³)	İlk gözeneklik (%)	Son gözeneklik (%)
NDYK01	0.865	0.865	5.97	5.97
NDYK02	0.5336	0.849	42	7.7
NDYK03	0.893	0.965	2.93	~0
NDYK04	0.706	0.884	23.26	3.9
NDYK05A	0.848	buz küre ($\rho > 0.82 \text{ g/cm}^3$)		
NDYK05B	0.848	buz küre ($\rho > 0.82 \text{ g/cm}^3$)		
NDYK06	0.687	0.801	25.33	12.93
NDYK07	0.6498	0.892	29.37	3.04
NDYK08	0.511	0.825	44.45	10.32
NDYK09	0.656	0.827	28.7	10.1
NDYK10	0.644	0.814	30	11.5
NDYK11	0.786	0.794	14.5	13.7
NDYK12	0.766	0.766	16.7	16.7
NDYK13	0.439	0.843	52.3	8.3
NDYK14	0.583	0.831	36.6	9.6

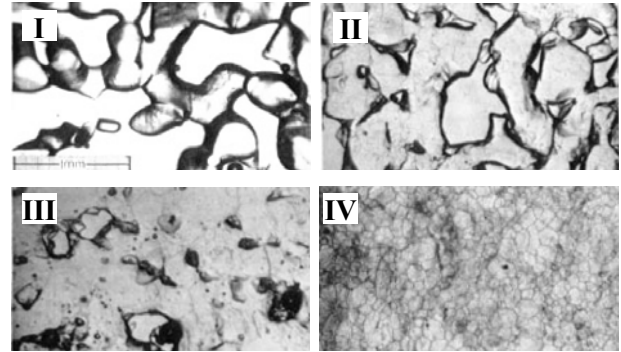
Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 6'da soğuma eğrisi verilen numunede fansız soğutma yapılmıştır. Numunenin ilk ve son kütlesi aynı kalmıştır (m = 116 g). Yarım küre hiç su emmemiştir. Diemand ve Klokov (2001)'un belirttiği gibi ilk yoğunluk 0.82 g/cm³'ten büyük olduğu (0.865 g/cm³) için su emme söz konusu olmamıştır. Gözenekler arasında bağlantı yoktur.

Şekil 7'de karın sıkıştırma ile gözenekliliğinin değişimi verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi sıkıştırma sonucunda boşlukların birbiri ile olan bağlantıları kesilmektedir. Bu nedenle de ara bölgelerde su ve nem transferi söz konusu olmamaktadır.



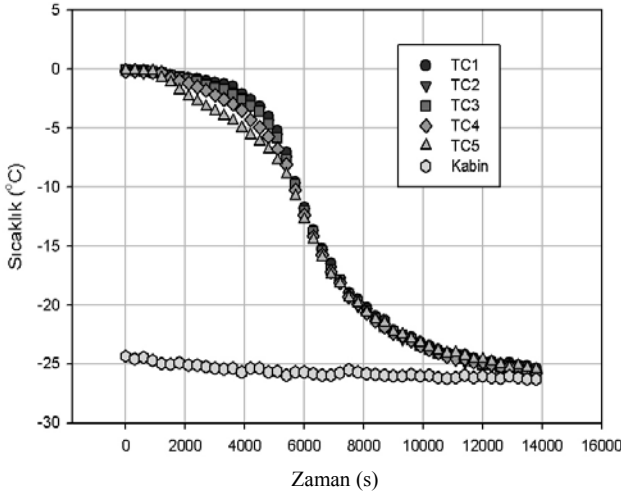
Şekil 6. NDYK01- yarım kürede sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 7. 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) (Diemand ve Klokov, 2001)

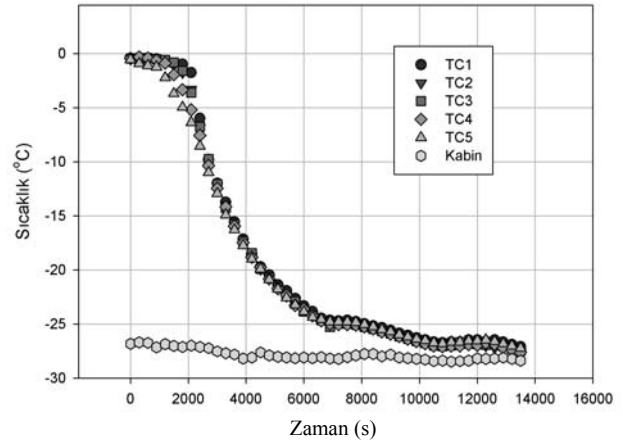
Şekil 8'de soğuma eğrisi verilen numunede kar küre $\Delta m = 42 \text{ g}$ su emmiştir. Fansız soğutma yapılmıştır. İlk yoğunluk $\rho_1 = 0.53 \text{ g/cm}^3$ değeri 0.82 g/cm³'ten küçüktür. Bünye içerisine su emildiği için soğuma eğrisinin karakteristiği Şekil 6'da görülen soğuma karakteristiğinden farklıdır. Denge daha uzun sürede sözkonusudur. Çünkü emilen suyun faz değişimi için daha fazla ısı çekilmesi gerekmektedir.

Şekil 9'da soğuma eğrisi verilen yarım kar küre fansız olarak soğutulmuştur. İlk yoğunluk 0.82 g/cm³'ten büyük olduğu için numune çok az (ihmal edilebilir) miktarda su emmiştir. Eğrinin genel karakteristiği Şekil 6'da verilen eğri karakteristiği ile benzerdir. Sistem yaklaşık 4 saatte dengeye gelmiştir.

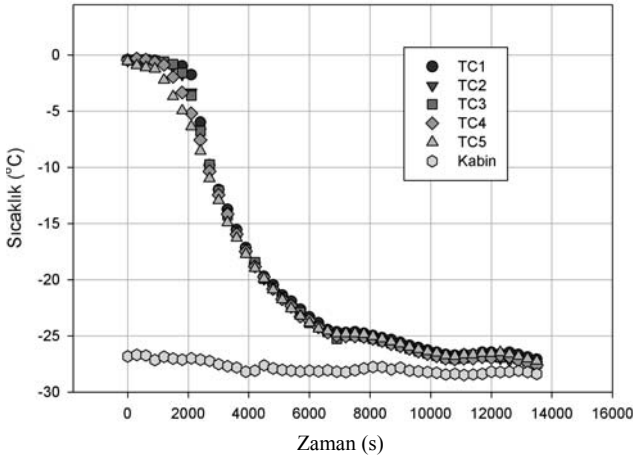


Şekil 8. NDYK02- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

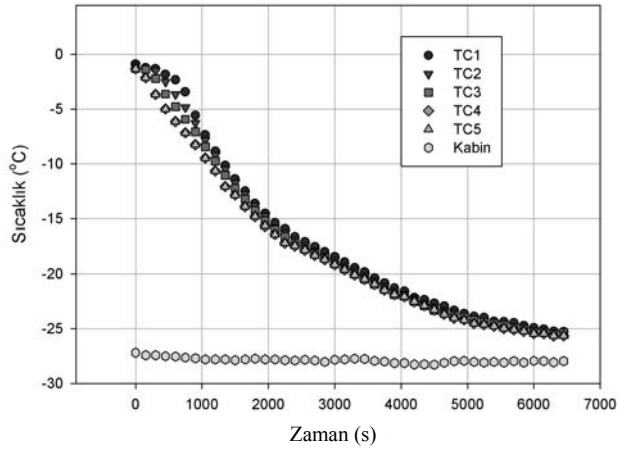
miştir. Eğrinin karakteristiği diğer su emen kar yarım kürelerin karakteristiği ile benzerdir.



Şekil 10. NDYK04- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi



Şekil 9. NDYK03- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

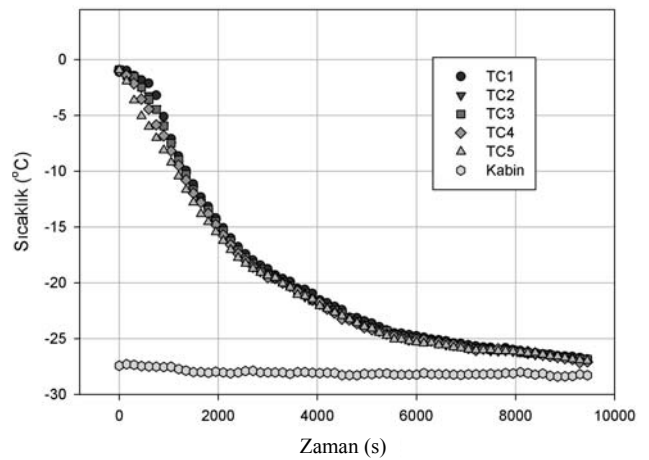


Şekil 11. NDYK05A- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

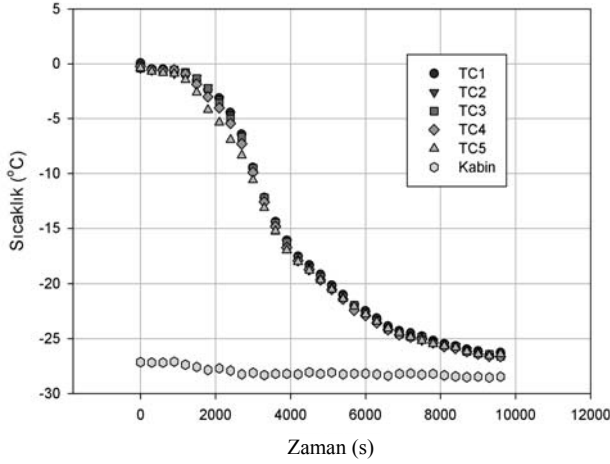
Şekil 10'da soğuma eğrisi verilen deney numunesine ait soğuma davranışı görülmektedir. Soğutma fansız olarak yapılmıştır. İlk yoğunluk 0.82 g/cm^3 'ten küçük olduğu için yarım küre bünyesine $\Delta m = 24 \text{ g}$ su almıştır. Sistem yaklaşık 4 saatte dengeye gelmiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12'de sıfır derecedeki buz yarım kürenin soğutulması süresince yarım küre içerisindeki sıcaklık dağılımları verilmiştir.

Şekil 13'te kar yarım kürenin fansız soğutma halindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. İlk yoğunluk 0.82 g/cm^3 'ten küçük olduğu için $\Delta m = 15 \text{ g}$ su kar yarım küre içerisine nüfuz et-

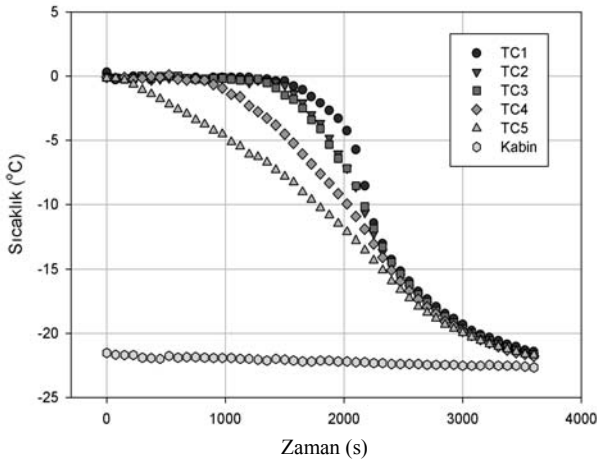


Şekil 12. NDYK05B- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi



Şekil 13. NDYK06- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi

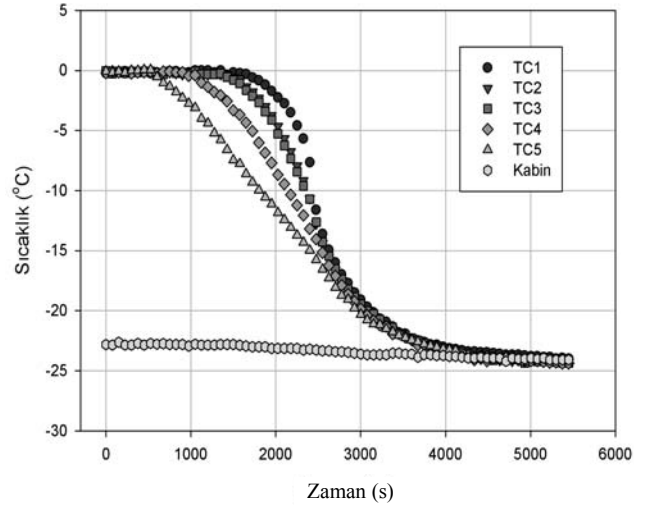
Şekil 14'te fanlı soğutma halindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. İlk yoğunluk 0.82 g/cm^3 'ten küçük olduğu için yarım küreye su girişi olmuştur. $\Delta m = 32 \text{ g}$ 'dır. Yarım küre yaklaşık 2 saatte dengeye gelmiştir. Eğrilerin arası daha açıktır.



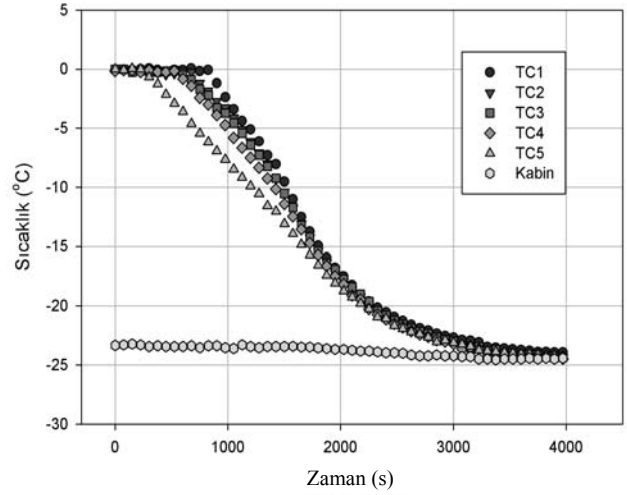
Şekil 14. NDYK07- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 15'de ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0.51 \text{ g/cm}^3$ olan yarım küreye ait sıcaklık dağılımı görülmektedir. İlk yoğunluk 0.82 g/cm^3 'ten küçük olduğu için bünye içerisine su girişi olmuştur. $\Delta m = 42 \text{ g}$ 'dır.

Şekil 16'da ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0.65 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin soğutma sürecindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Emilen su miktarı $\Delta m = 29 \text{ g}$ 'dir.



Şekil 15. NDYK08- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

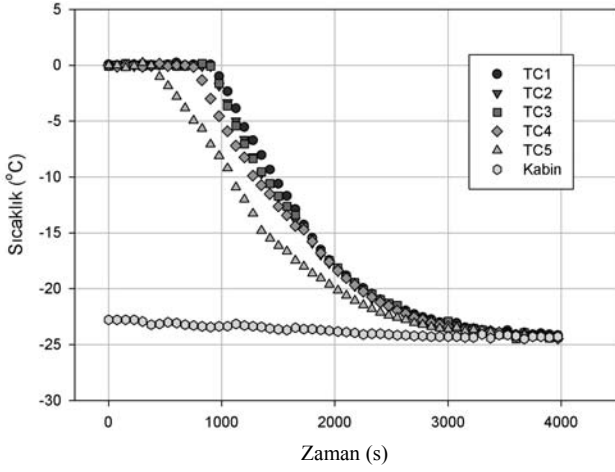


Şekil 16. NDYK09- yarım kürede sıcaklığın zamana göre değişimi (fanlı soğutma)

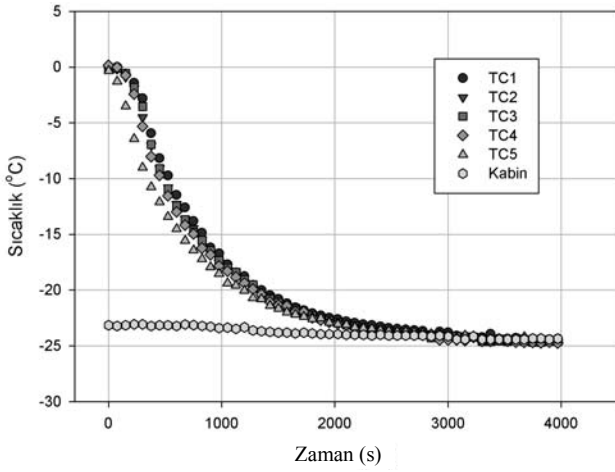
Şekil 17'de ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0.64 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin zamanla sıcaklık dağılımı varılmıştır. Emilen su miktarı $\Delta m = 23 \text{ g}$ 'dir.

Şekil 18'de ilk yoğunluk 0.82 g/cm^3 'ten yüksek olduğu için yarım küre su emmemiştir. Eğriler birbirine yakındır ve yaklaşık bir saatte hemen hemen dengeye ulaşılmıştır.

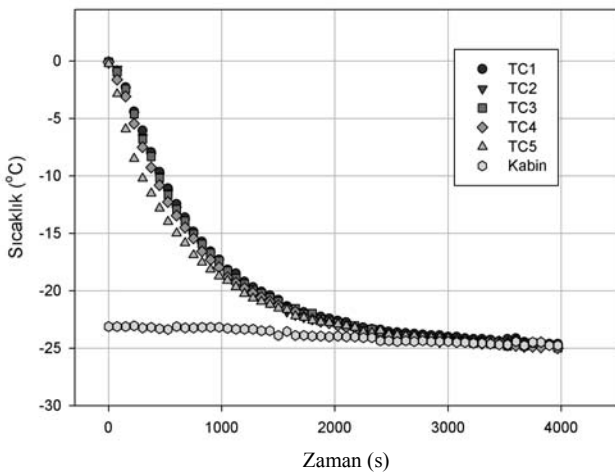
Şekil 19'da da Şekil 18'de olduğu gibi bünye içerisine, ilk yoğunluğun 0.82 g/cm^3 'ten büyük olması nedeniyle su girişi olmamıştır. Eğriler her iki şekilde de görüldüğü gibi birbirine yakındır.



Şekil 17. NDYK10- yarım kürede sıcaklığın zamanına göre değişimi (fanlı soğutma)



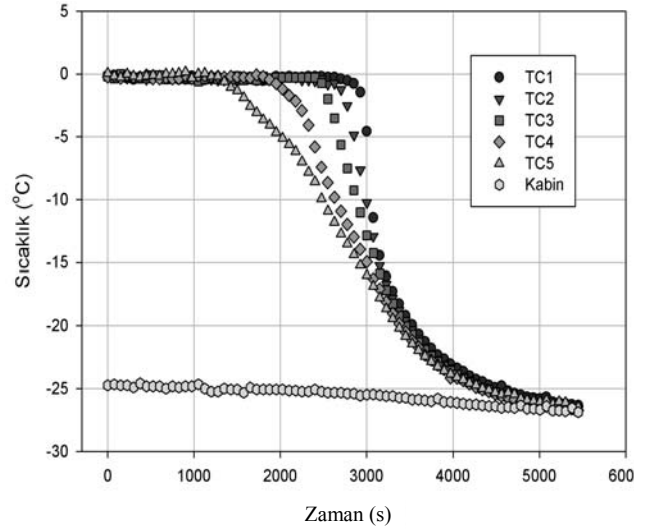
Şekil 18. NDYK11- yarım kürede sıcaklığın zamanına göre değişimi (fanlı soğutma)



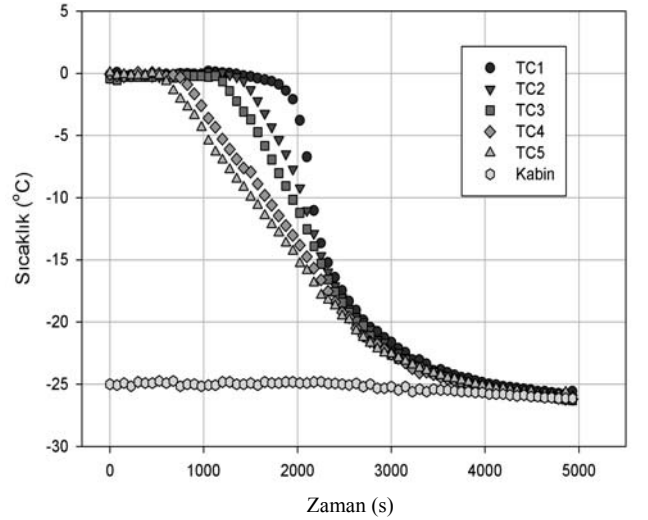
Şekil 19. NDYK12- yarım kürede sıcaklığın zamanına göre değişimi (fanlı soğutma)

Şekil 20'de 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 21'de ilk yoğunluğu $\rho_1 = 0.583 \text{ g/cm}^3$ olan yarım kürenin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Bir önceki numuneye benzer bir karakteristik göstermektedir.



Şekil 20. NDYK13- yarım kürede sıcaklığın zamanına göre değişimi (fanlı soğutma)



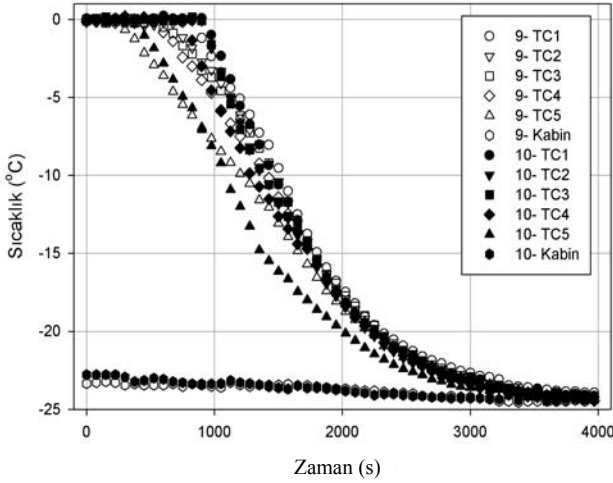
Şekil 21. NDYK14- yarım kürede sıcaklığın zamanına göre değişimi (fanlı soğutma)

Deney sonuçlarının karşılaştırılması

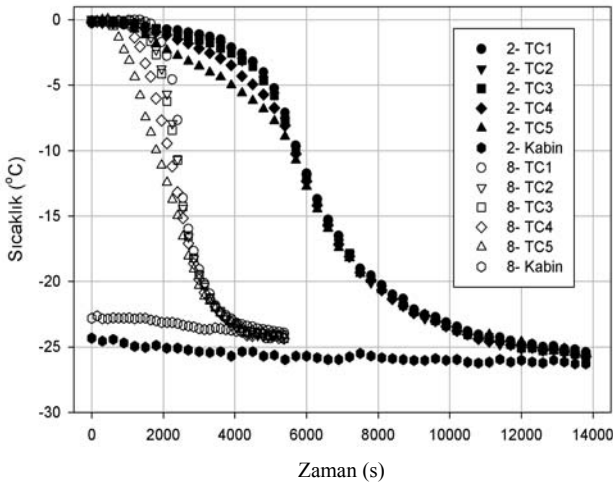
Bu kısımda farklı koşullar için elde edilen deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Eğrileri sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17’de verilen ve kütleleri hemen hemen aynı olan 9 ve 10 numaralı numunelerin zamanla sıcaklık değişimlerinin karşılaştırması Şekil 22’de verilmiştir. Her iki numunede de soğuma karakteristiği aynıdır.

Şekil 23’te 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 taşınım ile fazla ısı geçişi nedeniyle şekilden de görüldüğü gibi eğrilerin arası açıktır. Soğuma daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

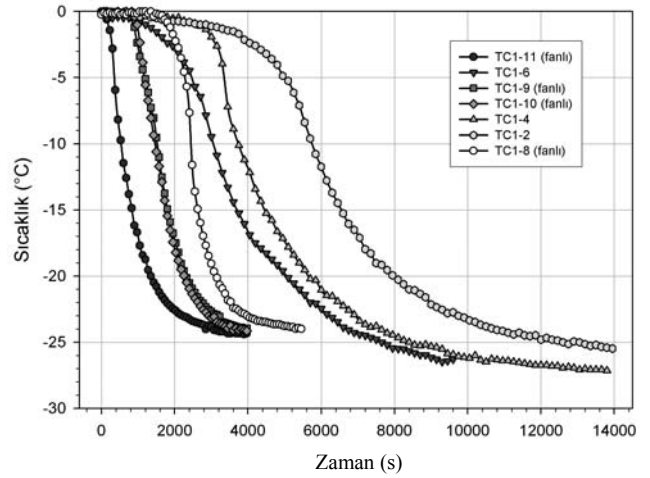


Şekil 22. 9 ve 10 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 23. 2 ve 8 nolu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 24’te 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. 9 ve 10 nolu numunelerin eğrileri emilen su miktarlarının aynı olması nedeniyle çakışmıştır. 6, 4 ve 2 nolu numunelerde de benzer bir davranış vardır. Bu numunelerde de emilen su artışlarına göre sıralama yapılmıştır. Su miktarı arttıkça soğuma süresi uzamaktadır.



Şekil 24. $x = 0$ ’da 11, 6, 9, 10, 4, 2 ve 8 no’lu numunelerin soğuma eğrilerinin karşılaştırılması

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çalışma karın sıkıştırılarak küresel hale getirilip sıfır derecede su emdirildikten sonra dondurulması suretiyle buzlaştırılabileceğini ortaya koymuştur.
- Kar sıkıştırılırken yoğunluğu 0.82 g/cm^3 ’ü geçtikten sonra su emmemektedir. Kar içerisindeki gözenekler arası ilişki (bağ) kesilmektedir.
- Karın su emdirilip buzlaştırılabilmesi için yoğunluğu 0.82 g/cm^3 ’ün altında olmalıdır.
- Farklı koşullardaki deney verileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda;
 - Aynı koşullardaki numunelerde aynı karakterde eğriler elde edilmiştir.
 - Zorlanmış taşınımlı soğutma ile doğal taşınımlı soğutma arasındaki fark aynı

miktarda su emen yarım küreler için tespit edilmiştir. Doğal taşınımında toplam donma süresi yaklaşık 4 saat sürerken zorlanmış taşınımında yaklaşık 1 saat olmuştur.

- Emilen su miktarı arttıkça soğuma süresinin arttığı gözlemlenmiştir.
- 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.

Kaynaklar

- Diemand, D. ve Klovov, V., (2001). A method for producing fine-grained ice snow by compaction, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) Report, TR-01-12.
- Gameda, S., Vigneault, C. ve Raghavan, G.S.V., (1996). Snow behaviour under compaction for the production of ice, *Energy (Oxford)*, **21**, 1, 15-20.
- Incropera, F.P. ve DeWitt, D.P., (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley&Sons, New York, United States.
- Ulusarlan, D., (2003). Dairesel kesitli plastik borular içinde buz yoğunluğunda küre-su karışım akışının incelenmesi, *Doktora tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Vigneault, C. ve Gameda S., (1994). Effect of addition of water on snow compaction, *Energy (Oxford)*, **19**, 2, 187-194.