

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DONMA SICAKLIĞI ALTINDA ZEMİNLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İRDELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Müh. S. ŞENOĞLU**

**Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Sami ARSOY**

**KOCAELİ,2009**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DONMA SICAKLIĞI ALTINDA ZEMİNLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İRDELENMESİ**

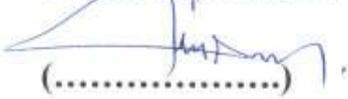
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İnşaat Müh. S. ŞENOĞLU**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 04.Aralık.2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 29.Aralık.2009**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Ş. ARSOY**

  
(.....)

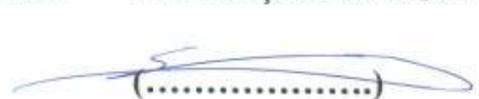
**Üye**

**Yrd. Doç. Dr. B. ALDANMAZ**

  
(.....)

**Üye**

**Yrd. Doç Dr. E. BOL**

  
(.....)

**KOCAELİ,2009**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Donma sıcaklığı altında zeminlerin mekanik özelliklerindeki değişimin irdelenmesi konusunda fikirleri ile beni yönlendiren ve teşvik eden Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı Başkanı Doç Dr. Sami ARSOY'a ve bana maddi anlamda destek olan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ.....	v
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ÖZET.....	viii
İNGİLİZCE ÖZET.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ZEMİNLERİN DONDURULMASI.....	2
2.1.Yapay Zemin Dondurulması.....	6
2.1.1. Tek aşamalı zemin dondurma sistemi.....	7
2.1.2. İki aşamalı zemin dondurma sistemi.....	8
2.2. Zemin Dondurma İşleminin Sayısal Açıklaması.....	9
3. DONMUŞ ZEMİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	13
3.1.Giriş.....	13
3.2. Donma Süreci.....	14
3.3. Donmuş Zemin Bileşenleri.....	16
3.4. Donmuş Zeminin Sınıflandırılması.....	17
3.5. Dönemsel ve Sürekli Donmuş Halde Bulunan Zeminler.....	17
3.5.1. Soğuk mevsimler.....	17
3.5.2. Yüzey sıcaklıkları.....	20
3.5.3. Aktif katman.....	21
3.5.4. Permafrost.....	22
3.6. Permafrost Bölgelerdeki Zemin Özellikleri.....	23
3.6.1. Zemin buz özellikleri.....	24
3.6.1.1. Buz kamaları.....	24
3.6.1.2. Pingo.....	25
3.6.1.3. Thermokarst.....	26
3.7. Zeminin Termal Özellikleri.....	26
3.7.1.Termal iletkenlik.....	26
3.7.2. Isı kapasitesi.....	26
3.7.3. Gizli ısı.....	27
4. DONMUŞ ZEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	28
4.1. Donmuş Zeminlerin Basınç Mukavemeti.....	28
4.2. Gerilme-Deformasyon-Zaman ve Mukavemet Davranışı.....	33
4.2.1.Hidrostatik basıncın donmuş zemin davranışındaki etkisi.....	33
4.2.2.Kesme kuvvetini donmuş zemin davranışındaki etkisi.....	35
4.3. Donmuş Zeminin Kayma Mukavemeti.....	35
4.4. Donmuş Zeminin Sünme Davranışı.....	40
5. UYGULAMADA KULLANIMI İÇİN PRATİK ÖNERİLER.....	43
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Sığ Kazılar .....	2
Şekil 2.2: Sığ Kazılar (Dar Alan) .....	3
Şekil 2.3: Sığ Kazılar (Geniş Alan) .....	3
Şekil 2.4: Derin Kazılar .....	4
Şekil 2.5: Tünel Uygulaması .....	4
Şekil 2.6: Destekleme Uygulamaları .....	5
Şekil 2.7: Donmuş Duvar .....	5
Şekil 2.8: Zemin Dondurma Örnekleri .....	6
Şekil 2.9: Zemin Dondurma İçin Tek Aşama Yöntemi .....	7
Şekil 2.10: Zemin Dondurma İçin İki Aşama Yöntemi .....	8
Şekil 2.11: Tren Yolu Altında Yapılan (I-90) Tüneli İçin YüzeYden Yapılan Zemin Dondurma Uygulaması .....	11
Şekil 2.12: I-90 Batı Birleşim Tüneli Üstünde Zemin Dondurma Uygulaması İle Zeminin Yükselme Konturları .....	12
Şekil 3.1: Donma Süreci .....	15
Şekil 3.2: Donmuş Zemin Kesimleri .....	15
Şekil 3.3: Kuzey Yarımküredeki Soğuk Bölgeler .....	18
Şekil 3.4: YüzeY ve Zemin Sıcaklıkları .....	19
Şekil 3.5: YüzeY Sıcaklığındaki Değişim .....	21
Şekil 3.6: Sürekli Donmuş Zemindeki Sıcaklık Profili .....	22
Şekil 3.7: Soğuk Bölgelerdeki Permafrost Kalınlığı .....	22
Şekil 3.8: Soğuk Bölgelerdeki Permafrost: Tipik Görüntü .....	23
Şekil 3.9: Termal Kısılma Teorisine Bağlı Olarak Buz Kamalarının Oluşumunun Şematik Temsili .....	24
Şekil 3.10: Tuktoyaktuk, Kanada Yakınlarındaki Pingo .....	25
Şekil 3.11: Tuktoyaktuk, Kanada Yakınlarındaki Pingo .....	25
Şekil 4.1: Killi Zemin İçin Gerilme- Şekil Değişirme Eğrileri .....	29
Şekil 4.2: Farklı Sıcaklıklarda, Deformasyon Hızlarında Ve Farklı Kuru Yoğunluklarda Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	30
Şekil 4.3: Farklı Sıcaklıklarda, Deformasyon Hızlarında Ve Farklı Kuru Yoğunluklarda Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	30
Şekil 4.4: Farklı Sıcaklıklarda, Deformasyon Hızlarında Ve Farklı Kuru Yoğunluklarda Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	31
Şekil 4.5: Farklı Kuru Yoğunluklarda ve Kırılma Zamanında Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	31
Şekil 4.6: Farklı Kuru Yoğunluklarda ve Kırılma Zamanında Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	32
Şekil 4.7: Farklı Kuru Yoğunluklarda ve Kırılma Zamanında Donmuş Kilin Basınç Mukavemeti .....	32
Şekil 4.8: $\Delta\sigma$ ve T Arasındaki Bağlantı .....	36
Şekil 4.9: $\Delta\sigma$ ve Deney Hızı Arasındaki Bağlantı .....	37
Şekil 4.10: Deformasyon Modülünün 0 °C Sıcaklıklar Altındaki Değişimi .....	38
Şekil 4.11: Deformasyon Modülünün Donma Sıcaklığı Altındaki Değişimi .....	38

Şekil 4.12: Deney Hızına Bağlı Olarak Buz Ve Zeminin Deformasyon Modülleri .	39
Şekil 4.13: Sıcaklık İçin Kohezyon Değeri .....	39
Şekil 4.14: Sünme Davranışı .....	40
Şekil 4.15: Donmuş Zeminin İdealleştirilmiş Zamana Bağlı Davranışı .....	41
Şekil 5.1: Değişik Kuru Yoğunluklarda Kırılma Zamanı Ve Deformasyon Oranı İlişkisi .....	44
Şekil 5.2: Zemin Tipine Göre Tatbik Edilebilir Zemin İyileştirme Yöntemleri .....	46

## **TABLolar DİZİNİ**

Tablo 2.1 :Dondurma Yönteminde Kullanılan Soğutucu Karakteristik Özellikleri ...	9
Tablo 2.2: Dondurulmuş Zeminlerin Basınç Dayanımları .....	11
Tablo 4.1: Donmuş Zeminin Sünme Parametreleri .....	42

## SİMGELER DİZİNİ

$\epsilon_0$	: Referans Deformasyon Oranı
$\epsilon_0$	: Deformasyon Oranı
$\Delta p$	: Toplam Ortalama Normal Gerilmedeki Artış
$\Delta u_m$	: Gözeneklerdeki Gerilmenin Artışı
A	: Alan
A	: Zemin Tarafından Çevrili Borunun Yüzey Alanı
$A_s$	: Yüzey Sıcaklık Değerini
B	: Artan Toplam Basınç Altında Gerilme Paylaşımı
$C_m$	: Gözeneklerin Sıkışabilirliği
$C_m$	: Isı Kapasitesi
$C_s$	: Zemin İskeletinin Sıkışabilirliği
$C_t$	: Kohezyon
$D_i$	: Buzun Yoğunluğu (900 kg/m <sup>3</sup> alınabilir),
$d_s$	: Zemin Taneciklerinin Yoğunluğu (yaklaşık 2500 kg/m <sup>3</sup> alınabilir),
$dT:T_0-T$	: Saf Suyun Normal Donma Sıcaklığı İle Sistemin Gerçek Sıcaklığı arasındaki Fark ( $T_0 = 273.15$ °K)
$d_w$	: Zemindeki Suyun Yoğunluğu (1000 kg/m <sup>3</sup> alınabilir),
h	: Kuyu İçindeki Zemin Dondurma Borusu Tarafından Alınan Isı (örneğin, 200 mm çapındaki boru zeminden ısıya bağlı olarak 300 – 500 kcal / h - m <sup>2</sup> ısı alabilir)
k	: Zemin Tipine Göre Tanımlanan Sabit
K	: Termal İletkenlik
L	: Hacimsel Gizli Isı
L	: Suyun Gizli Isısı (3.336x10 <sup>5</sup> J/kg)
$L_i$	: Buzun Gizil Isısı (80 kcal/kg)
M	: Isısı Alınan Zemin Kütlesi
m	: Zemin Tipine Göre Tanımlanan Sabit
n	: Zemin Porozitesi
$\theta_t$	: Sürtünme Açısı
p	: Periyot
$p_i$	: Buz Basıncı
$p_w$	: Suyun Basıncı ( $\rho_w = 1,000$ kg/m <sup>3</sup> su yoğunluğunu $\rho_i = 916,8$ kg/m <sup>3</sup> buzun yoğunluğu)
Q	: Zeminden alınan ısı (kcal),
S	: Isısı alınan zemin kütlesinin özgül ısısı,
$S_i$	: Buzun özgül ısısı (yaklaşık 0.5 kcal/kg - °C alınabilir),
$S_s$	: Zemindeki taneciklerin özgül ısısı (yaklaşık 0.2 kcal/kg - °C alınabilir),
$S_w$	: Zemindeki Suyun Özgül Isısı (1 kcal/kg - °C )
t	: Zaman
T	: Donma Altında Sıcaklık (°C)
$T_0$	: Referans Sıcaklık
$t_1$	: Dondurma İşleminin Başladığı Andaki Zeminin Isısı Ve Zemindeki Suyun Isısı (°C)

$t_2$	: Dondurma İşleminde Sonra Zeminin Ve Buzun Son Isısı (°C),
$t_f$	: Kırılma Zamanı
$t_{f0}$	: Referans Kırılma Zamanı
$T_m$	: Meteorolojik Yıllık Ortalama Sıcaklık
$T_{s, t}$	: Zemin Yüzey Sıcaklığı
$T_z$	: Herhangi Bir Derinlikteki Sıcaklık
$T_{z, t}$	: Herhangi Bir Derinlikteki Ve Zamandaki Sıcaklık
$V_1$	: Zemin İçindeki Katı Kısımın Hacmi (m <sup>3</sup> ),
$V_2$	: Zemin İçindeki Suyun Hacmi (m <sup>3</sup> ),
$w$	: Zemin Tipine Göre Tanımlanan Sabit
$\alpha_u$	: Zeminin Termal İletkenlik
$\varepsilon$	: Toplam Deformasyon
$\varepsilon_0$	: Başlangıçtaki Sünme Deformasyon
$\varepsilon_c$	: Düzeltilemez Sünme Deformasyon
$\varepsilon_d$	: Gecikmiş Sünme Deformasyon
$\theta$	: Sıcaklık
$\theta_0$	: Referans Sıcaklık
$\lambda$	: Zemin Tipine Göre Tanımlanan Sabit
$\rho_d$	: Kuru Yoğunluk (gr.cm <sup>-3</sup> )
$\sigma$	: Uygulanan Gerilime
$\sigma_m$	: Basınç Mukavemeti (MPa)
$\sigma_n$	: Kesme Düzlemindeki Normal Gerilme
$\tau$	: Kayma Mukavemeti

# DONMA SICAKLIĞI ALTINDA ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN İRDELENMESİ

**Sinem ŞENOĞLU**

**Anahtar Kelimeler:** Donmuş zemin, permafrost, donmuş zeminin mekanik özellikleri, zemin dondurma sistemi.

**Özet:** Sürekli donmuş halde bulunan zeminler karaların toplam alanının yaklaşık % 23'ünü oluştururlar. Donmuş zemin mühendisliği, dönemsel veya sürekli permafrost bölgeler ve zeminin suni şekilde dondurulduğu yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, donmuş zeminin genel özellikleri, donma süreci, donmuş zeminin bileşenleri, mekanik özellikleri, geçici stabilizasyonunu sağlamak için kullanılan yapay zemin dondurma yönteminin uygulamaları anlatılmıştır.

# EXAMINING THE CHANGE OF MECHANIC PROPERTIES OF SOILS BELOW FREEZING TEMPERATURE

**Sinem ŞENOĞLU**

**Keywords:** Frozen ground, permafrost, mechanic properties of frozen ground, ground freezing.

**Summary:** Continuously frozen ground is composed approximately 23% of the total area of the lands. Frozen ground engineering deals with natural problems of permafrost regions, where the temperature of the ground is below 0 °C seasonally and constructional applications, where the soil is artificially frozen. In this study, general features of the frozen ground, freezing process, frozen ground components, mechanical properties, are studied to describe temporary stabilization of the applications of artificial ground freezing method.

## 1. GİRİŞ

Donmuş zemini, sıcaklığın  $0^{\circ}$  C'nin altında olduğu zemin ve kayalar olarak tanımlayabiliriz. Bu tanım tamamen sıcaklığa dayanır, kaya veya zeminin su ve buz içeriğinden bağımsızdır.  $0^{\circ}$  C'nin altında su donarak buz haline geçer ve zemin danelerini birbirine bağlayarak geçirimsiz bir tabaka oluşturur. Bu geçirimsiz tabaka, kazı ve diğere çalışmalarında su geçirmez, güçlü bir bariyer olarak kullanılır.

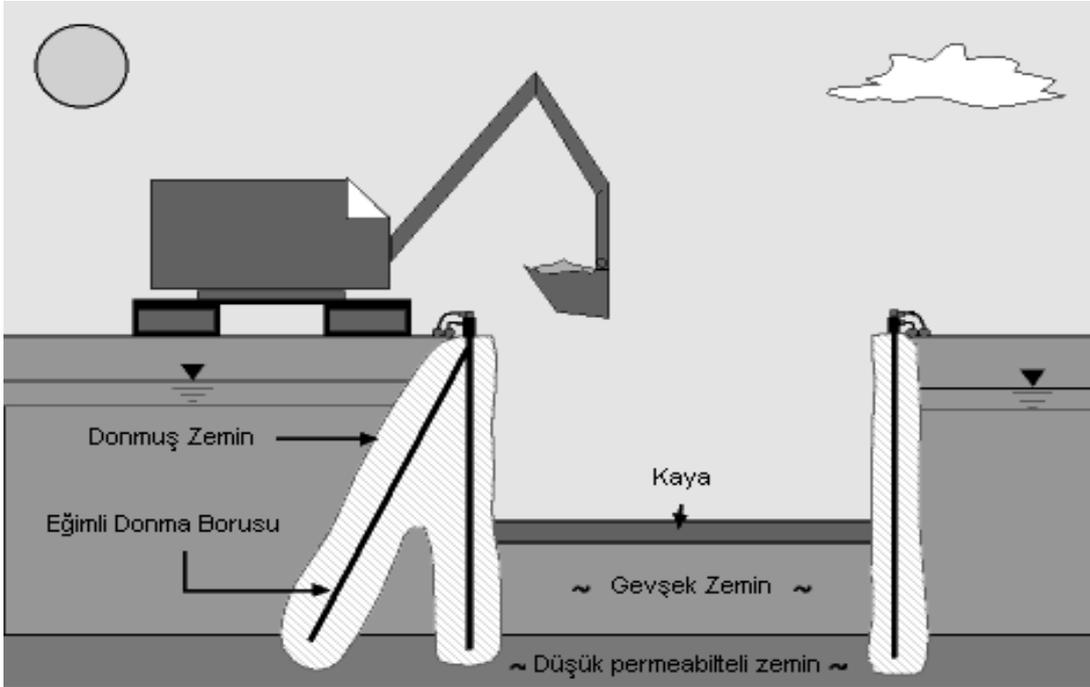
Sürekli olarak sıcaklığın  $0^{\circ}$  C'nin altında olduğu bölgelerde zemin donmuş halde bulunur. Bu zeminler permafrost yani sürekli olarak donmuş halde bulunan zeminler olarak adlandırılır ve yeryüzünde karaların toplam alanının %23'ünü oluştururlar. Aynı zamanda sadece kış aylarında sıcaklığının  $0^{\circ}$  C'nin altına inmesiyle zeminin don halini almasına mevsimlik donmuş zemin demek mümkündür.

Donma olayı, zemin özellikleri ve inşaatda kullanılan malzemelerle ilişkilidir ve genellikle üst yapıları, yolları ve inşaatda kullanılan malzemeleri etkiler. Donma olayının büyük bir problem olarak görülmesine rağmen, 1850'lerde Fransız Mühendislerinin yumuşak zemin koşullarında maden kazılarına yardımcı olduğu bulunmasıyla bu görüş değişmiştir. Böylelikle donma yöntemi Maden ve İnşaat Mühendisleri tarafından kullanılmaya başlanılmıştır ve ilk kez 1862 yılında Güney Galler'de Swansea yakınlarında maden kazısında kullanılmıştır. Yapay Zemin Dondurulması olarak adlandırılmıştır. Yapay zemin dondurulması çoğunlukla tünellerde, madencilikte açık kazılarda ve inşaat mühendisliği yapılarında kullanılır. Esas amaç ise güvenliği ve stabilizasyonu sağlamaktır.

Bu çalışmada zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılan yapay zemin dondurma yönteminin uygulamaları, donma sıcaklığı altındaki zeminlerinin genel ve mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

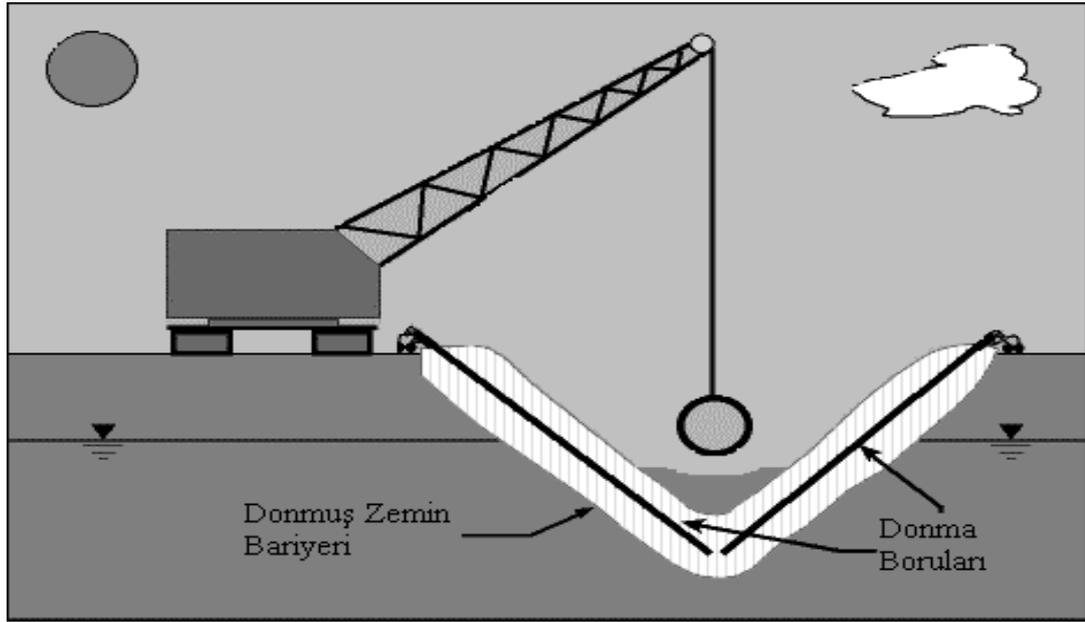
## 2. ZEMİNLERİN DONDURULMASI

Zeminin donmasının her zaman problem çıkartan bir olay olmadığı ve birçok durumda mühendislere yardımcı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda zemin özelliklerini olumlu yönde etkilediği, su geçirmez bir materyal elde edildiği ve yüksek kayma direnci kazandırdığı bilinmektedir. Günümüzde, bu özellikten faydalanarak stabilite sağlanması maliyetleri çok yüksek olmasına rağmen özel problemlerin çözülmesinde uygulanabilecek bir yöntemdir. Dondurma yöntemi ilk olarak madencilikte shaftların açılması ve maden galerilerinin yapımında kullanılmıştır. Son yıllarda ise zeminin kendini kısa sürede olsa tutamayıp akma ve göçme eğilimi gösterdiği derin kazılarda, kazıya bitişik temeli desteklenmek, iyileştirme işlemi sırasında toprak kaymasının geçici stabilizasyonu, shaftlar, derin hendekler ve stabilite problemleri olan tünellerde yeterli kalınlıkta bir bölgenin dondurulması ile geçici olarak güvenliğin sağlanabilmesi için kullanılmıştır.

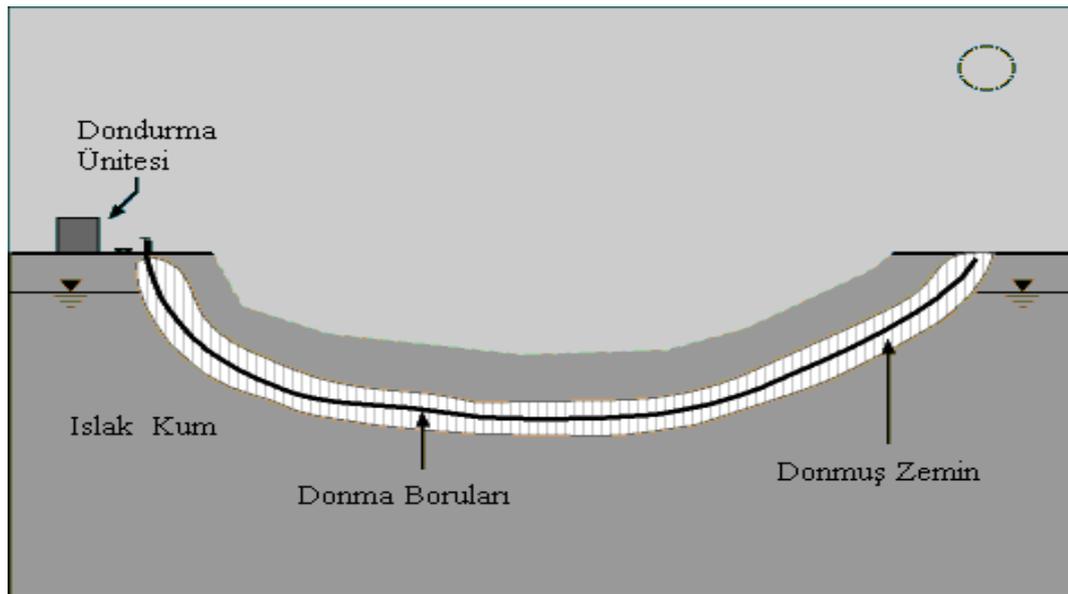


Şekil 2.1: Sığ Kazılar (www.cryocell.com)

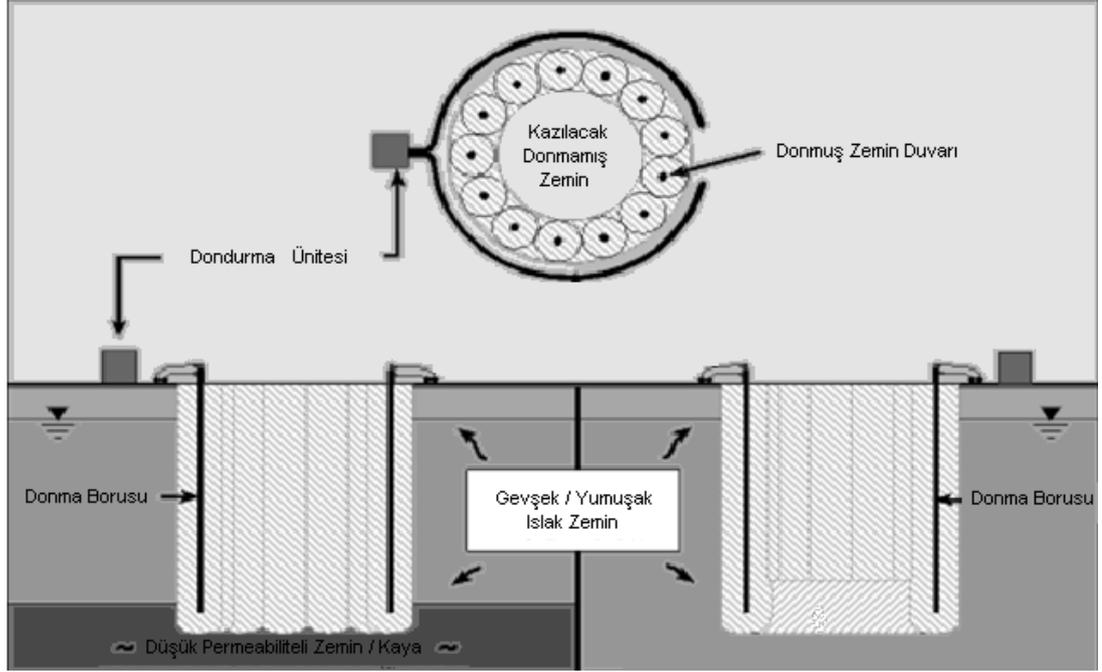
Sığ ve derin kazılarda kullanılan yöntem Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 de gösterilmiştir. Dondurma yöntemi bağlantı veya destek olmaksızın derin ve sığ kazıların yapılabilmesini sağlar. Donmuş zemin çok düşük permeabiliteye ( $10^{-10}$  cm/sn' den daha az) sahip olduğundan dolayı, dondurma yöntemi yer altı suyunu tamamen keser ve drenaj işlerini ortadan kaldırır. Ayrıca tünel uygulamalarında da ıslak, gevşek zeminlerde veya çatlaklı temel kayasında tünel yapımına izin veren sabit iksa sağladığı için kullanılır (Şekil 2.5).



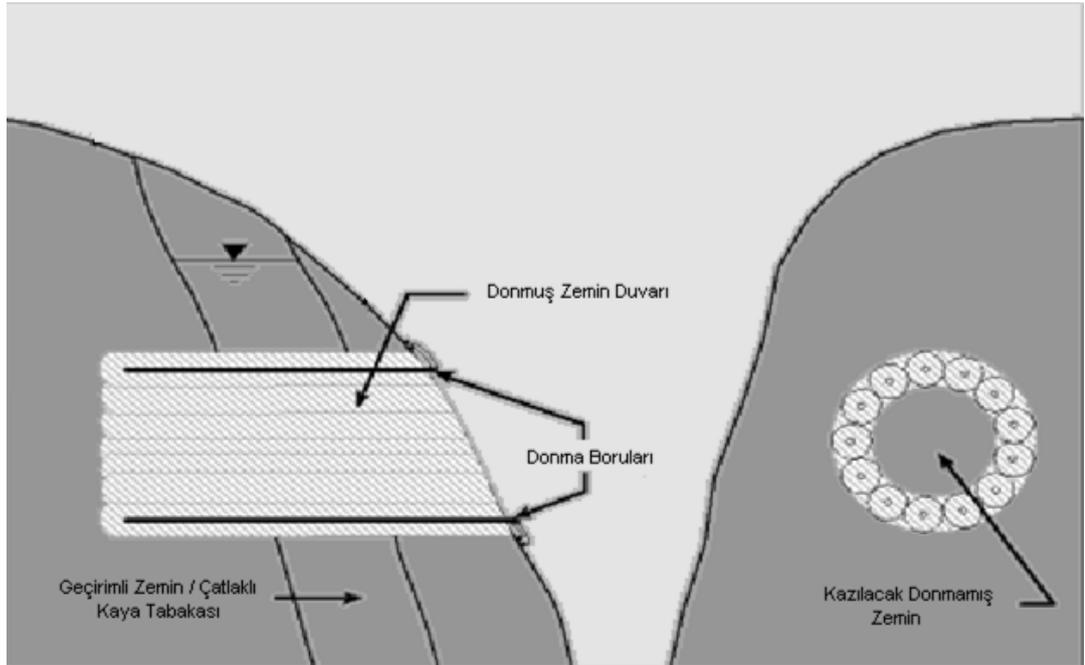
Şekil 2.2: Sığ Kazılar - Dar Alan (www.cryocell.com)



Şekil 2.3: Sığ Kazılar - Geniş Alan (www.cryocell.com)

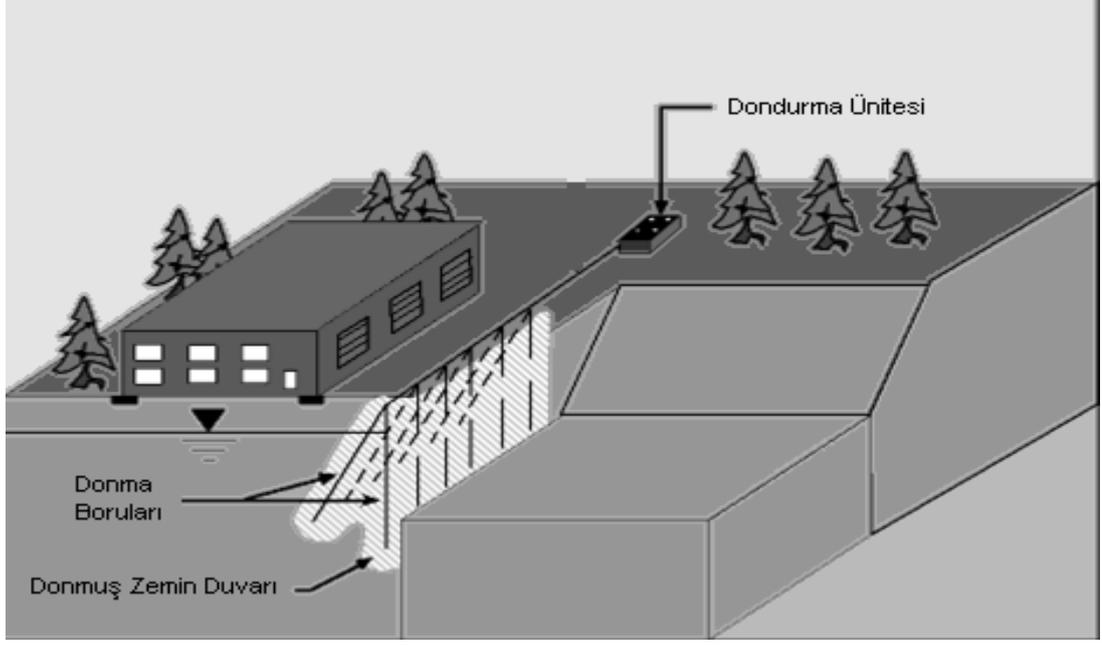


Şekil 2.4: Derin Kazılar (www.cryocell.com)

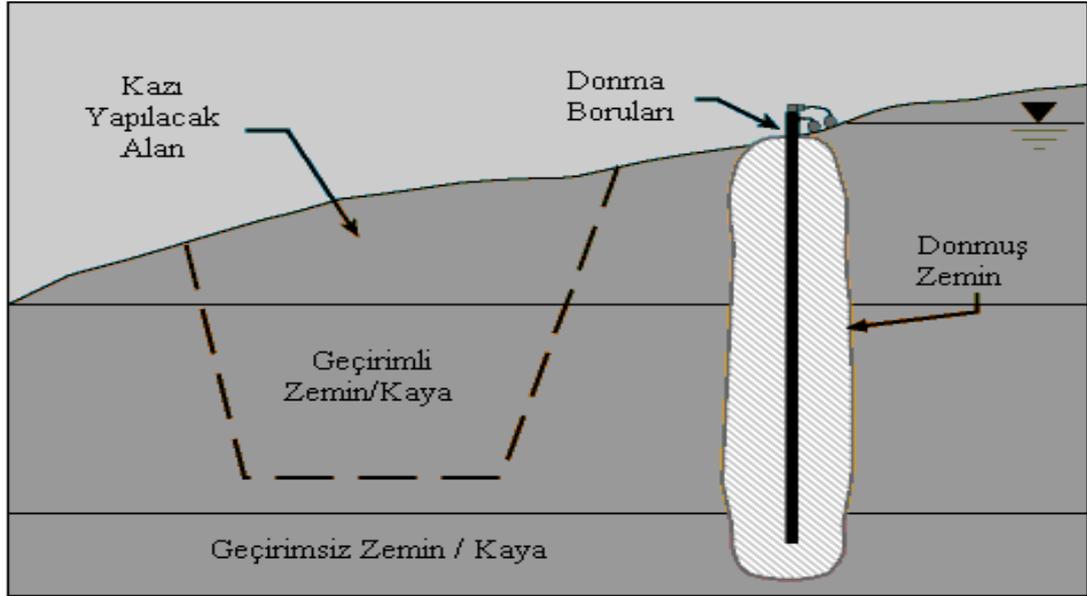


Şekil 2.5: Tünel Uygulaması (www.cryocell.com)

Yukarıdaki yöntemlerin dışında, zeminlerin dondurulması var olan binaları korumak amacıyla zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılabilir. Destekleme uygulamalarında yöntemin kullanımı ise Şekil 2.6 de gösterilmiştir. Bu yöntemle yakındaki yapıların düşey ve yatay hareketleri önlenir.



Şekil 2.6: Destekleme Uygulamaları (www.cryocell.com)



Şekil 2.7: Donmuş duvar (www.cryocell.com)

Genel kural olarak her ortamda dondurma uygulanabilir. Ancak bu işlemin ekonomik bedeli çoğu kez kabul edilemeyecek kadar yüksektir. İdeal uygulama yumuşak zemin koşullarında yer altı su seviyesinin altında ve 7-8 m. derinliklerde yapılır. Hareketli yer altı suyunda bu yöntem kesinlikle uygulanmaz. Yer altı suyu hareketi 2 m/gün'den fazla olduğu ortamlarda oluşturulan buz duvarı tutunamayacağından dondurma çalışmaları başarısız olur.

Dondurma yönteminin uygulanmasına etkiyen başlıca faktörler aşağıda sıralanmıştır.

A. Yeraltı koşulları:

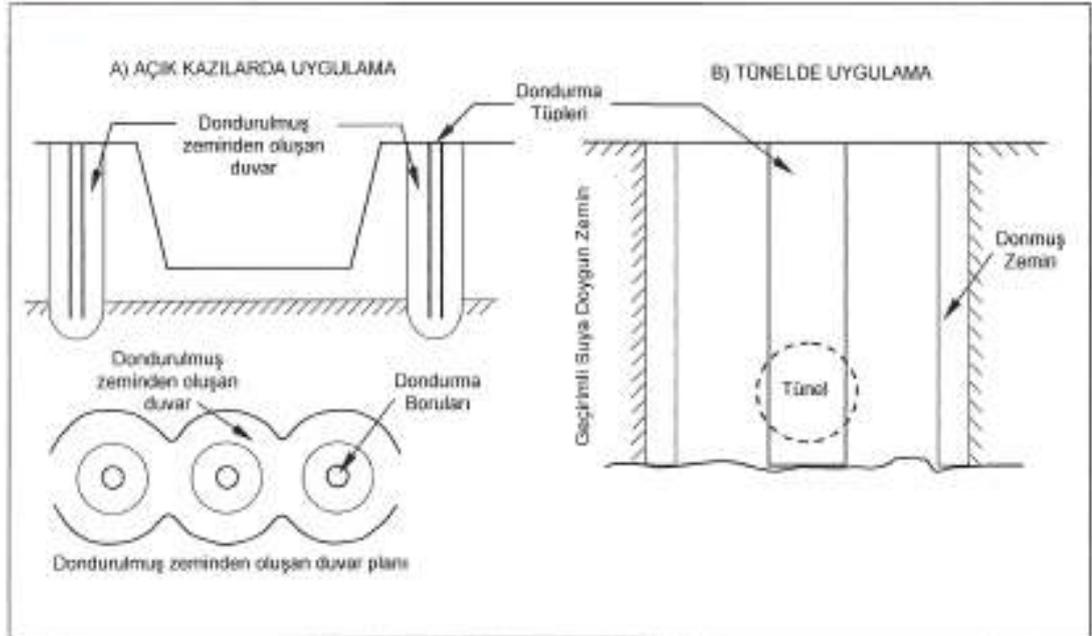
- Boşluk hacmi
- Su muhtevası
- Zeminin ısı iletme katsayısı
- Zeminin başlangıçtaki ısı derecesi
- Yeraltı suyunun hızı

B. Projeye bağlı faktörler

- Borularının aralığı
- Boru çapı
- Soğutucu maddenin ısı derecesi
- Suya tam doymun olmayan zeminlere su püskürtme ile su muhtevasının artırılması.

### 2.1. Yapay Zemin Dondurulması

Suya doymun zayıf zeminlerde, tünel ve diğer yeraltı kazılarında destekleme sistemi olarak zemin dondurma sisteminin kullanılması ile kazının yapılacağı zemin içindeki suyun dondurularak, kazılacak alana su akışı engellenmiş ve zeminin taşıma gücü artırılmış olur. Ancak bu sistemin uygulaması pahalı ve yavaştır.

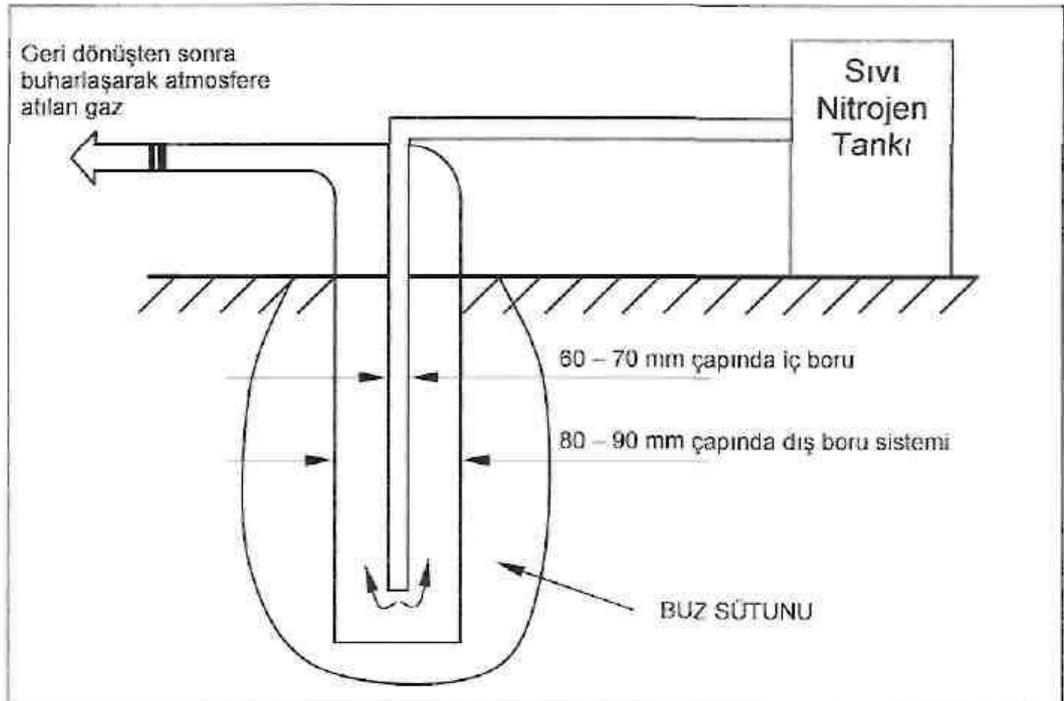


Şekil 2.8: Zemin dondurma örnekleri (Harris, 1983)

Yöntemin uygulanacağı zemin içinde açılmış olan sondaj kuyusuna indirilen boru sistemi (soğutucu sıvı dolaşımı) ile sondaj kuyusu boyunca zeminin ısısının alınarak, zemindeki suyun dondurulması sistemin temelidir. Böylelikle zeminde Şekil 2.8' de de gösterildiği gibi, donmuş zemin sütunları oluşturulmuş olur. Bu sütunlar zeminin taşıma gücünü artırır ve kazı alanına yer altı suyunun gelmesi önler. Zemin dondurma sisteminde tek aşamalı sistem (Şekil 2.9) ve iki aşamalı sistem (Şekil 2.10) olmak üzere iki yöntem uygulanır.

### 2.1.1. Tek aşamalı zemin dondurma sistemi

Bu sistemde kaynama noktası (-196) °C olan nitrojen gazı kullanılır. Dondurma borusundan nitrojen geçirilir. Dondurma borusu boyunca zemin dondurularak sonuç elde edilir ve dondurma borusundan geri dönen nitrojen buharlaşarak atmosfere katılır. Tuzlu su kullanılan iki aşamalı sisteme göre yaklaşık %50 daha pahalı olmasına rağmen çabuk sonuç alındığı için kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca bu sistem ile oluşturulan dondurulmuş zemin sütununun yaklaşık 1 hafta boyunca etkisini koruduğu gözlenmiştir (Harris, 1983).



Şekil 2.9: Zemin dondurma için tek aşama yöntemi (Harris, 1983)



Tablo 2.1: Dondurma yönteminde kullanılan soğutucuların karakteristik özellikleri  
(Stoss and Valk, 1979)

	LN <sub>2</sub>	Tuzlu Su
<b>Arazide Kullanım</b>		
Elektrik Gücü	Gerekli Değil	Gerekli
Soğutma için Su	Gerekli Değil	Gerekli
Soğutma Sistemi	Gerekli Değil	Gerekli
Depolama Tankı	Gerekli	Gerekli
Sirkülasyon Pompası	Gerekli Değil	Gerekli
Yüzey Boruları, Vanalar v.b İçin Düşük Sıcaklıklı Malzeme	Gerekli Değil	Gerekli
<b>Kazı İşlemi</b>		
Soğutucu Sıvının Fiziksel Durumu	Sıvı / Buhar	Sıvı
Ulaşılabilen Minimum Sıcaklık (Teorik Olarak)	-196° C	-55° C
Sistem Kontrolü	Zor	Kolay
Donma Duvarın Şekli	Sık Sık Düzenli	Düzenli
Donma Duvarındaki Sıcaklık Profili	Büyük Farklılıklar	Küçük Farklılıklar
Don Tesir Derinliği	Hızlı	Yavaş
Gürültü	Yok	Çok Az

## 2.2. Zemin Dondurma İşleminin Sayısal Açıklaması

Zemin dondurma işlemi için zemin sıcaklığının ( $t_1$ )'den ( $t_2$ )'ye düşürülmesi aşağıdaki eşitlikle açıklanır (Harris, 1983).

$$Q = [M \cdot S \cdot (t_2 - t_1)] + [M \cdot L \cdot (t_2 - 0)] \quad (2.1)$$

Burada;

$Q$  = ( $t_2$ ) Isı değerine ulaşmak için zeminden alınması gereken ısı

$M$  = Isısı alınan zemin kütlesi

$S$  = Isısı alınan zemin kütlesinin özgül ısı

L = Buzun gizli ısıdır.

Yukarıdaki eşitliğin zemin ve buz için açılımı;

$$Q = [V_1 \cdot d_s \cdot S_s(t_1 - t_2)] + [V_2 \cdot d_w \cdot S_w(t_1 - 0)] + [V_2 \cdot d_i \cdot S_i(t_2 - 0)] + [V_2 \cdot d_w \cdot L_i] \quad (2.2)$$

Burada;

Q = Zeminden alınan ısı (kcal)

$V_1$  = Zemin içindeki katı kısmın hacmi ( $m^3$ )

$d_s$  = Zemin taneciklerinin yoğunluğu (yaklaşık  $2500 \text{ kg/m}^3$  alınabilir)

$V_2$  = Zemin içindeki suyun hacmi ( $m^3$ )

$d_w$  = Zemindeki suyun yoğunluğu ( $1000 \text{ kg/m}^3$  alınabilir)

$S_s$  = Zemindeki taneciklerin özgül ısısı (yaklaşık  $0.2 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  alınabilir)

$S_w$  = Zemindeki suyun özgül ısısı ( $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  alınabilir)

$L_i$  = Buzun gizli ısısı ( $80 \text{ kcal/kg}$ )

$D_i$  = Buzun yoğunluğu ( $900 \text{ kg/m}^3$  alınabilir)

$S_i$  = Buzun özgül ısısı (yaklaşık  $0.5 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  alınabilir)

$t_2$  = Dondurma işleminden sonra zeminin ve buzun son ısısı ( $^\circ\text{C}$ )

$t_1$  = Dondurma işleminin başladığı andaki zeminin ısısı ve zemindeki suyun ısısı ( $^\circ\text{C}$ )'dir.

Ayrıca (V) = Dondurma işleminin yapılacağı zeminin toplam hacmi ve (n) = porozite ise, [ $V_1 = (1-n) \cdot V$ ] ve [ $V_2 = V_n$ ] olacaktır.

Zemin dondurma işleminde kullanılan bu yöntem, ısı kayıplarından dolayı %50-%70 oranlarında etkilidir. Bu nedenle ısı kayıplarını karşılayacak şekilde, soğutma işleminin yapıldığı santral kapasitesi, zeminden alınacak ısının (Q) 1.5–2 katı ısı alabilecek şekilde olmalıdır. Zemin dondurma işleminin sayısal açıklamasında verilen eşitlik dikkate alındığında,  $1m^3$  suya doymuş zeminin dondurulması için son ısı ve çevre (zemin) ısısı arasındaki farka göre, zeminden alınması gereken ısı (Q) yaklaşık  $40.000 - 60.000 \text{ kcal}$  arasındadır (Harris, 1983). Teorik olarak donma zamanı;

$$t = \frac{Q}{h.A} \quad (2.3)$$

olarak açıklanır. Burada;

Q = (2.2) nolu eşitlikten hesaplanan zeminden alınan ısı (kcal)

h = Kuyu içindeki zemin dondurma borusu tarafından alınan ısı

A = Zemin tarafından çevrili borunun yüzey alanı (m<sup>2</sup>)'dir.

Tablo 2.2'de dondurulmuş zeminlerin ısıya bağlı olarak yaklaşık basınç dayanımları verilmiştir.

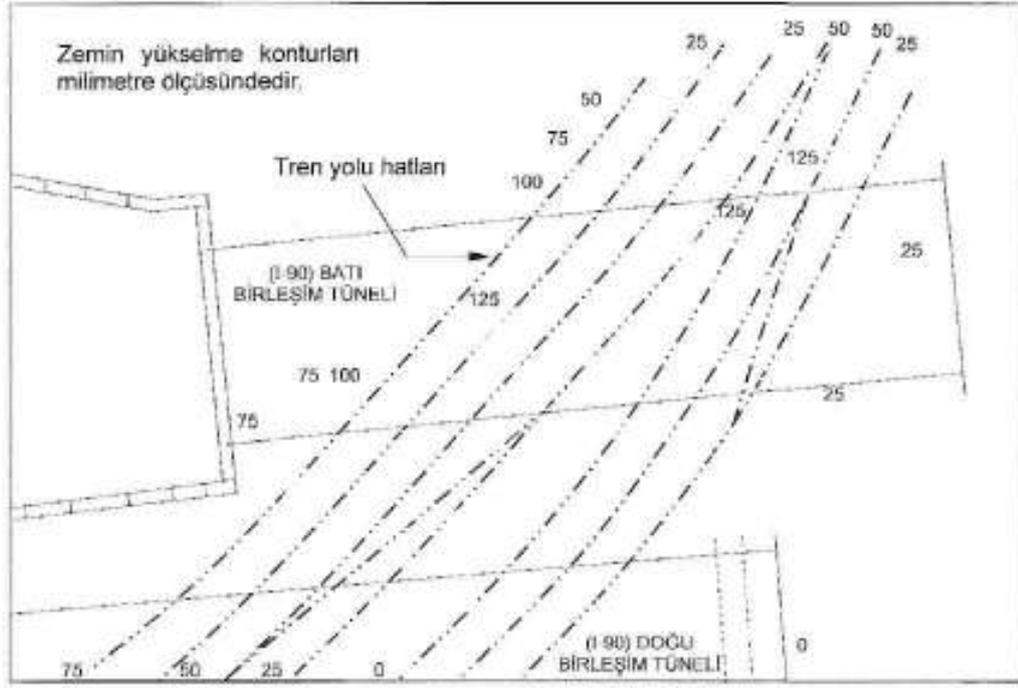
Tablo 2.2: Dondurulmuş zeminlerin basınç dayanımları (Harris, 1983)

Gereç Türü		Son Isı Değerleri		
		—10°C	—15°C	—20°C
Buz	Dondurulmuş Zemin basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> )	1	1.5	2
Suya doymuş kil		5	7	9
Suya doymuş ince kum		8	13	15
Suya doymuş orta kum		8	13	20

Zemin içindeki suyun donmasıyla, buz haline gelen su genişlediği için uygulama yapılan zeminin yüzeyinde kabarmalar, yükselmeler olmaktadır. Boston (A.B.D)'da tren yolu altında yapılan (I-90) tünelinin zemininde yapılan dondurma işlemi sonrasında Şekil 2.11 ve Şekil 12'de verildiği gibi zeminde yükselmeler olmuştur.



Şekil 2.11: Tren yolu altında yapılan (I-90) Tüneli için yüzeyden yapılan zemin dondurma uygulaması (Powderham ve diğerleri, 2001)



Şekil 2.12: I-90 Batı Birleşim tüneli üstünde zemin dondurma uygulaması ile zeminin yükselme konturları (Powderham ve diğ., 2001)

### 3. DONMUŞ ZEMİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Giriş

Donmuş zemin; zemin daneleri, buz, su, hava ve bazı durumlarında organik maddelerden meydana gelir. Laboratuvar numuneleri ise daha çok zemin daneleri, buz ve sudan oluşur (Black, 1967). Donmuş zemini donmamış zeminden ayıran en önemli özellik, zemin daneciklerinin suyun buz haline geçmesinden sonra birbirlerine sıkıca bağlanmasıdır. Böylelikle sadece 0°C nin altında bir sıcaklığa sahip olan bir zemin (meselâ kuru kum) donmuş zemin tarifine girmez. Tsytoich donmuş zemini, zemin suyunun hiç olmazsa bir kısmının donarak zemin daneciklerini birbirine bağladığı bir zemin olarak tanımlamıştır (1958).

Yapılan araştırmalar ile zemin içinde bulunan suyun donma noktasının 0°C den daha düşük olduğu, bundan dolayı ile 0°C nin altındaki sıcaklıklarda zemin içerisinde bir miktar donmamış su kalabileceği görülmüştür (Beskow, 1935; Nersesova ve Tsytoich, 1963). Burada söz konusu olan su, zemin içinde bulunan serbest sudur. Zemin içindeki suyun -186°C de dahi kristal buz haline geçmediği düşünülmektedir. (Tsytoich, 1958).

Dillon ve Andersland (1967) tarafından fiziksel özellikleri bilinen bir zeminde belli bir negatif sıcaklıkta bulunabilecek donmamış su miktarını belirlemek için bir metot geliştirilmiştir. Nersesova ve Tsytoich (1963) tarafından yapılan çalışmada donmuş zeminde bulunan donmamış su muhtevasının zemin cinsine ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini sıcaklık azaldıkça ve dane boyutu büyüdükçe donmamış su muhtevasının azaldığı görülmüştür. 1.0 ile 0,5 mm ve 0.05 ile 0.01 mm arasında değişen dane boyutlarında ve -0,6°C de donmamış su muhtevası %0,2 ilâ %1 arasında değişirken, 0.001 mm den küçük boyutlu kuartzda donmamış su muhtevası -1,0°C de %6,4 ü bulmuştur (Nersesova ve Tsytoich, 1963). Yong (1963) killi ve siltli numunelerin farklı su muhtevalarında (optimum su muhtevasının altında, optimum su muhtevasına eşit ve optimum su muhtevasının üstünde) hazırlanmasının zemin içindeki donmamış su miktarına etkilediği ve donmamış su miktarının artan su

muhtevası ile arttığı sonucuna varmıştır. Donmuş zeminler incelenirken donmamış zeminlerdeki inceleme güçlüklerine ek olarak:

- (1) Sıcaklığın önemli bir değişken oluşu,
- (2) Zeminin buz muhtevası,
- (3) Boşluk suyunun kısmen donması sonucu zemin içinde donmamış su bulunması,
- (4) Buz kristallerinin sayısı,
- (5) Buz kristallerinin büyüklüğünün

dikkate alınması gerekmektedir. Öte yandan Williams (1963) killi zeminler üzerinde yaptığı deneylerde donmuş zemindeki donmamış su muhtevasının toplam su muhtevasından ve soğuma hızından bağımsız olduğunu gözlemiştir.

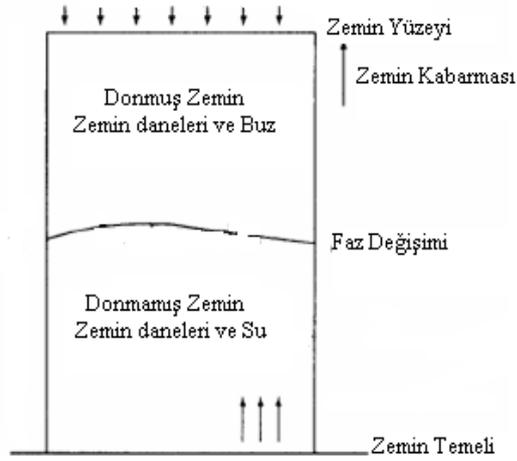
Donmuş zeminlerin içyapısı ile ilgili çalışmalar, zemin içinde iyi bir bağlayıcı niteliğindeki buz ile donmamış suyun birlikte bulunabildiğini, donmamış su miktarının zemin cinsine ve sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Zemin içindeki buz ise dane boyutu, donma hızı, basınç ve hidrolik şartlara bağlı olarak donmuş zemine donmamış zeminden çok farklı bir iç yapı kazandırmaktadır. Yine bu son şartlara bağlı olarak buz kristallerinin sayısı, yönlenmeleri, büyüklükleri değişmektedir.

### **3.2. Donma Süreci**

İnce daneli, doygun zeminde sıcaklığın azalmasıyla zemin gözeneklerindeki su ve absorbe edilmiş su buz kristallerine dönüşür. Bu kristaller genellikle ısı transferinin yönüne diktir ve birbirine paraleldir. Sık sık tekrarlanmış tabakalarda var olur (Everdingen, 2002).

Şekil 3.1’de, donmuş zeminlerin donma süreci gösterilmektedir. Su donduğu zaman, hacmi yaklaşık %9 genişler. Donmuş zemin altında faz değişimin görüldüğü ve donmuş ve donmamış zeminin geçiş zonu olan bir bölge oluşur. Bu bölgede hem su hem buz bir arada bulunur. Donma sırasında, zeminin donmamış kısmından donma cephesine doğru su göçü meydana gelir. Bu göç önce yeni buz mercceklerinin oluşumunu sonrada ayrılmış buz şekillerini besler. Bundan dolayı zemin hacmi

genişler ve dikey yer değiştirme gözlemlenir (Talamucci, 2003). Bu süreç don kabarması olarak bilinir. Donmuşken su hacminin artmasına rağmen, don kabarmasının sadece küçük bir etkisi olur. Büyük etki ise donmamış bölgeden suyun taşınmasıdır. Emme kuvveti suyun göçüne neden olur. Emme kuvveti donmamış su muhtevastındaki sıcaklığa bağlı değişimin bir sonucudur (Everdingen,2002).



şekil 3.1: Donma süreci (Talamucci,2003)

İnce daneli zemin dikkat çekici kabarmalara neden olurken, iri daneli zeminler hiçbir biçimde kabarmazlar. Bundan dolayı don kabarmasından etkilenen zeminler donahassas zeminler olarak adlandırılır. Donahassaslık derecesi zemin içindeki ince danelerinin yüzdesinin fonksiyonudur (Phukan,1985).



şekil 3.2: Donmuş zemin kesimleri

Şekil 3.1’de soğutma, silindirik kil danesinin üst yüzeyinden uygulanır. Koyu buz mercekleri serisi oluşur. Donma kabarması sürekli don bölgelerde genel bir sorundur. Bu bölgelerde, zemin sürekli olarak veya dairesel olarak donmuştur. Bundan dolayı zemin kabarıp ve yolların yüzeyinde çatlaklar oluşur.

### 3.3. Donmuş Zeminin Bileşenleri

Donmuş zemin çok fazlı, karmaşık bir materyaldir. Şekil 3.2’de donmuş zemin yapısının 4 fazı gösterilmiş olup, bu fazlar

1. Katı
2. Buz
3. Sıvı (Donmamış Su)
4. Gaz

Katı kısmı zemin danelerinden oluşur, bu parçacıklar mineral ve organik parçacıklardır. Buz yüksek plastikli malzemedir ve özellikleri sıcaklığa, yükün büyüklüğüne ve süresine bağlıdır. Sıvı kısım ise suyun zemin gözeneklerini doldurduğu zaman oluşur. Hatta  $-10^{\circ}\text{C}$  de zemin danelerinden buz ayıran donmamış su mevcuttur. Sıcaklık mineral daneciklerinin özgül (spesifik) yüzey alanı, mineral tipi, gözenek büyüklüğünün dağılımını kontrol ederken tuzluluk donmuş zeminde donmamış su miktarını kontrol eder. Genleşme ve ısı kapasitesi yöntemleri donmuş zeminlerdeki donmamış su miktarını tanımlamak amacıyla kullanılır. Gaz kısmı ise havanın sıvı tarafından işgal edilmemiş kısmını doldurmasıyla oluşur (Phukan, 1985).

Buz ve donmamış su içeriğinin kapsamı

- Zemin özelliklerine
- Sıcaklığa
- Suyun iyon yoğunluğuna
- Haricen uygulanan basınca

bağlıdır.

### **3.4. Donmuş Zeminin Sınıflandırılması**

Beskow (1935) donmuş zeminleri yapı bakımından iki gruba ayırmıştır. Bunlar masif ve tabakalı yapıdır. Beskow'a göre masif yapı, su muhtevası doygun olmayan zeminlerde her zaman, optimum su muhtevasından daha yüksek su muhtevalarındaki zeminlerde ise donma hızının yüksek olması halinde görülür. Zeminin donduktan sonra masif veya tabakalı bir yapıya sahip olması için

- a) Dane boyutu
- b) Donma hızı
- c) Basınç
- d) Hidrolik şartlar

önemlidir (Beskow 1935).

Tsytoovich'in bildirdiğine göre Shumsky tarafından yapılan sınıflandırmada, donmuş zemin masif, gözenekli ve tabakalı olmak üzere üç ana gruptan oluşur (Tsytoovich 1957). Bu üç yapı sırasıyla zeminin ani, orta ve yavaş donmaya maruz kalması ile meydana gelmektedir. Böyle bir sınıflama E.Jung'un  $-1^{\circ}\text{C}$  ilâ  $-190^{\circ}\text{C}$  arasında yaptığı deney sonuçlarına uyduğu görülmüştür (Ruckli, 1950).

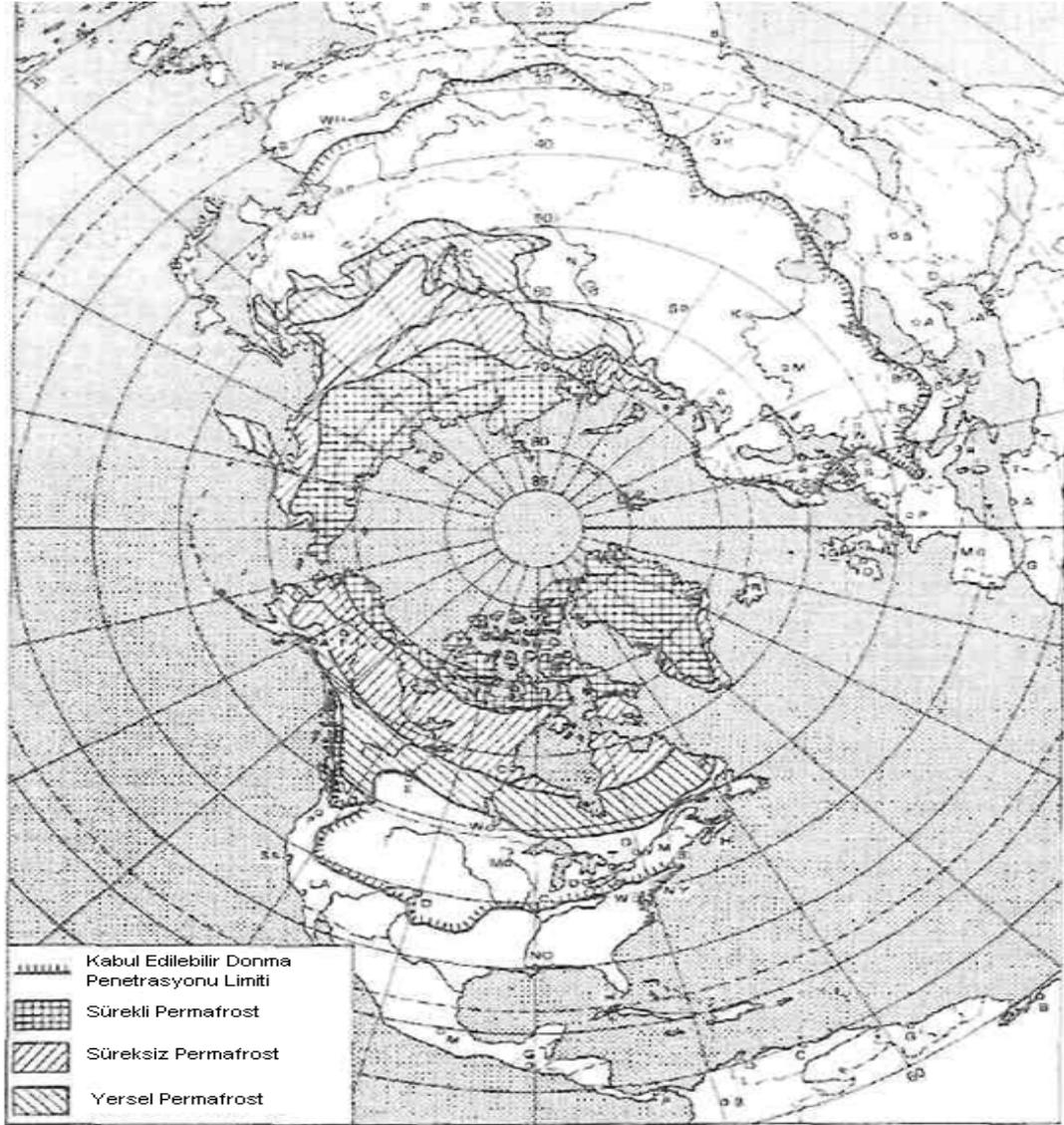
### **3.5. Dönemsel Ve Sürekli Donmuş Halde Bulunan Zeminler**

Zemin sıcaklığının gerektirdiği sürekli ve dönemsel donmuş zeminler Kuzey ve Güney yarımkürelerinin soğuk mevsimlerinde bulunmuştur. Mühendislik tasarımları yüzey sıcaklığının, aktif katmanın ve bu mevsimlerde permafrostun anlaşılmasını gerektirir.

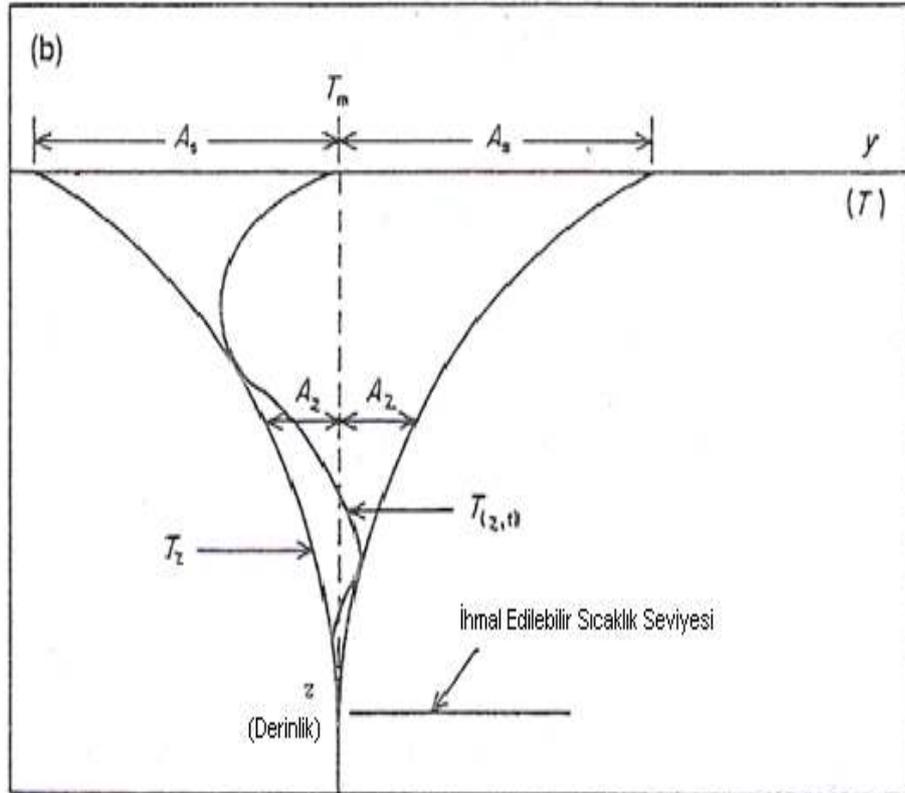
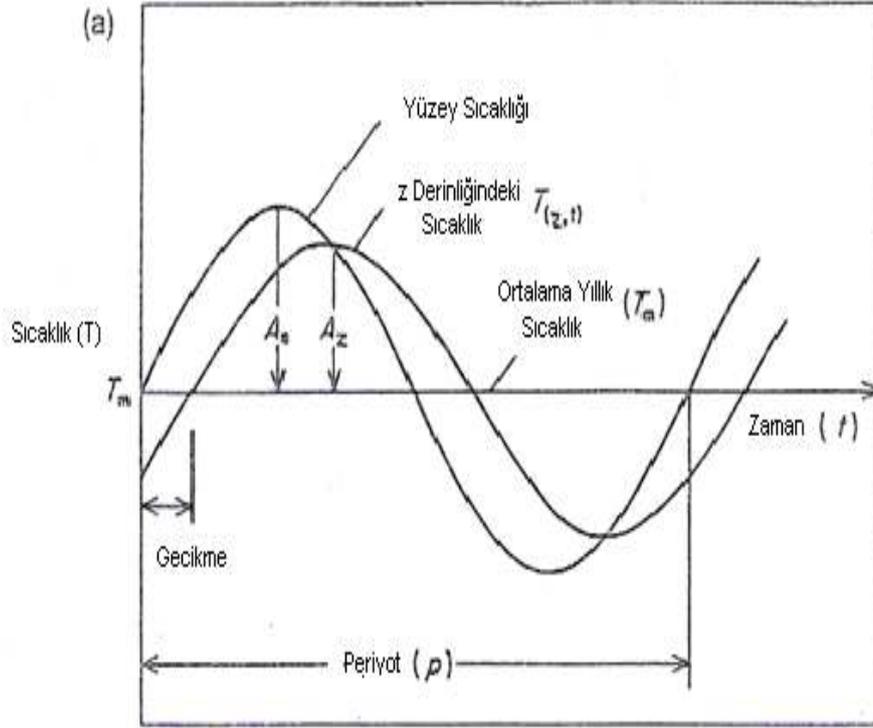
#### **3.5.1. Soğuk mevsimler**

Dünyada soğuk bölgeler hava sıcaklığı, kar derinliği, göl üzerindeki buz örtüsü veya zemin donma derinliği açısından tanımlanabilir. Donmuş Zemin Mühendisliğinde sıcaklık ve don tesir etkinliğinin çok büyük önemi vardır. Yılın en soğuk ayı boyunca ortalama sıcaklık  $0^{\circ}\text{C}$  için eş sıcaklı eğrisi, Kuzey Yarımkürede soğuk bölgelerin güneydeki limitini belirlemekte kullanılır (Bates ve Bilello, 1966).

Soğuk bölgeler tipik olarak ana hatlarıyla sadece dönemsel donmuş bölgeler, sürekli permafrost bölgeler ve süreksiz permafrost bölgeler olarak ayrılır. Bu ayrım da Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'nın büyük bir kısmını içeren dönemsel donmuş zeminin güney limitiyle birlikte Şekil 3.3 de gösterilmiştir. Dönemsel donmuş zemin ile süreksiz permafrost arasındaki ayrım, sıfır yıllık sıcaklık değerinin derinliğinde ölçülen  $-5^{\circ}\text{C}$  eş sıcaklık eğrisinin seçimine bağlıdır. (Şekil 3.4) Süreksiz bölgedeki donmuş zemin genellikle 10 cm. veya aşağısından, 100 m. veya yukarısına kadar kalınlaşır (Brown ve Kupsch, 1974). Kutup bölgelerinde permafrost 1 km. den fazla derinliklerde gözlemlenebilir. Genellikle permafrostun var olması için yıllık zemin yüzey sıcaklığının en az  $-3^{\circ}\text{C}$  olması gerektiği varsayılır.



Şekil 3.3: Kuzey Yarımküredeki Soğuk Bölgeler (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)



Şekil 3.4: Yüzey ve Zemin Sıcaklıkları: (a) sinüsoidal değişim; (b) derinlikle sıcaklıktaki azalma (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

### 3.5.2. Yüzev sıcaklıkları

Zemin sıcaklığı, hava (veya zemin yüzeyi) sıcaklığı, ısı akımı ve zeminin termal özellikleriyle belirlenir. Yüzev sıcaklığında yaklaşık olarak hem yıllık hem de günlük çevrimde basit periyodik dalgalanmalar gözlemlenir (Şekil 3.5). Verilmiş güzergâh için meteorolojik yıllık ortalama sıcaklık ( $T_m$ ) ve yüzev sıcaklık değerini ( $A_s$ ) elde etmek için kullanılır. Zemin yüzev sıcaklığı ( $T_{s,t}$ ) (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

$$T_{s,t} = T_m + A_s \sin \frac{2\pi t}{p} \quad (3.1)$$

ile hesaplanabilir. Burada  $t$  zamandır ve  $p$  periyottur. 24 saat veya 365 gün. Eğer zaman  $t$ , 1 Ocak itibariyle başlarsa ve yılın en soğuk zamanı Ocak ayında yaklaşık 2 hafta görünüyorsa, yüzev sıcaklık eğrisi (Şekil 3.4.a) sağa doğru kayacaktır. Bu da Denklem 3.1 de  $\sin$  terimi yerine  $-\cos (2\pi t/p - 2\pi \theta/p)$  ifadesi konularak tamamlanabilir. Durumunda herhangi bir değişiklik olmayan homojen zeminde, herhangi bir derinlikteki ve zamandaki sıcaklık ( $T_{z,t}$ ) (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

$$T_{z,t} = T_m + A_s \exp \left( -z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_u p}} \right) \sin \left( \frac{2\pi t}{p} - z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_u p}} \right) \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $\alpha_u$  zeminin termal iletkenliğidir.

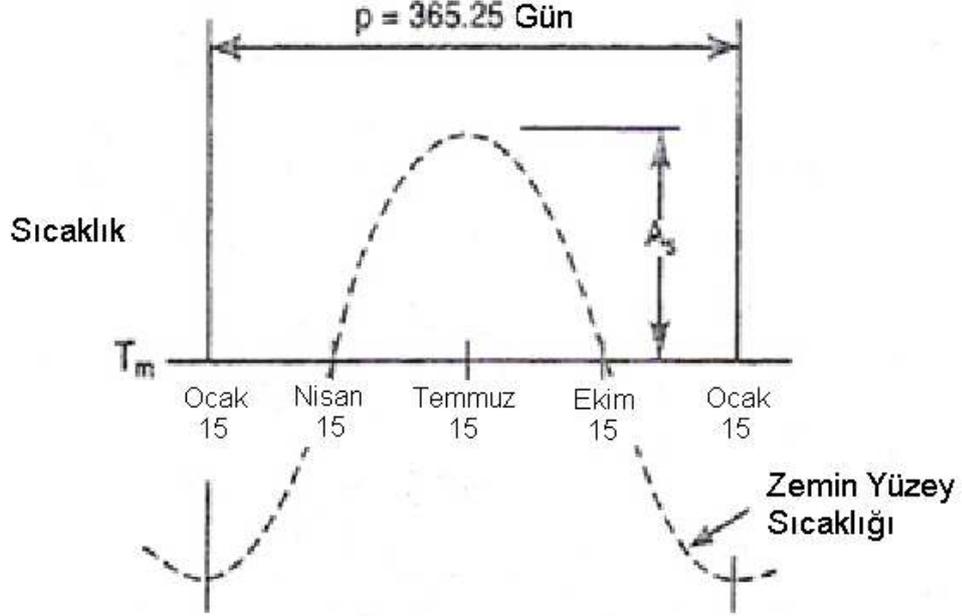
Zemin yüzeyi altındaki herhangi bir nokta için, sıcaklık aralığı veya sıcaklıktaki maksimum değişim Şekil 3.5 de eğrilerin arasında kalan alan tarafından ifade edilir. Bu eğriler

$$T_z = T_m \pm A_s \exp \left( -z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_u p}} \right) \quad (3.3)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

Denklem (3.3) herhangi bir derinlikte  $z$  maksimum ve minimum zemin sıcaklıklarını ifade eder. Denklem (3.2) ile ifade edilen bu basit çözüm gerçek zemin sıcaklıklarında bulunan eğilimleri gösterir. Fakat pratikte, zeminin gizli ısısının etkisi, donmuş ve erimiş zeminin termal özellikleri (iletkenlik ve yayılma gücü), homojen olmayan zeminler ve dönemsel kar tabakası nedeniyle simetrik olmayan

yüzey sıcaklığı, bitkileşme ve diğer yerel iklimsel etkiler tarafından önemli şekilde değişir (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

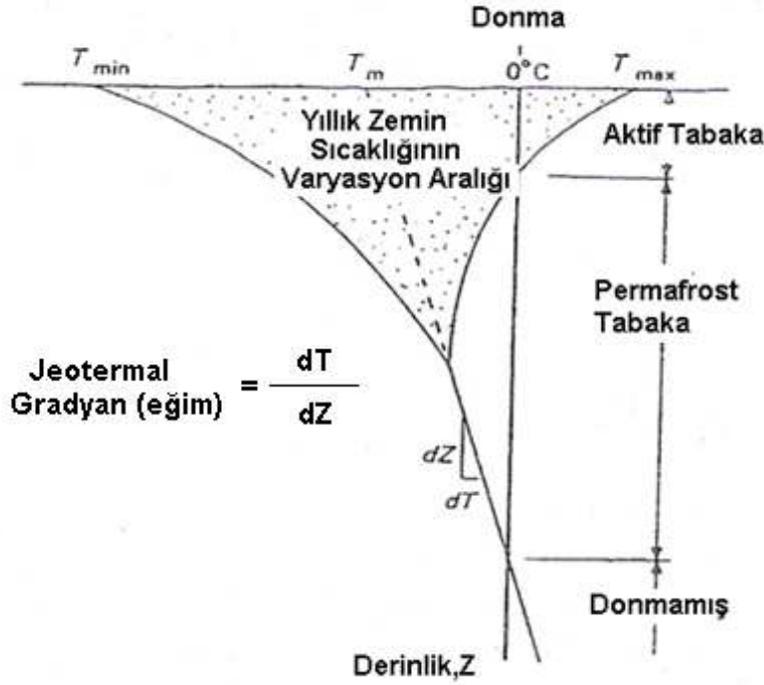


Şekil 3.5: Yüzey sıcaklığındaki değişim (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

### 3.5.3. Aktif katman

Yıl boyunca, sıcaklıktaki  $0^{\circ}\text{C}$ 'nin altında ve üstünde dalgalanmaların olduğu zeminin üst yüzeyi aktif tabaka olarak tanımlanır. Dönemsel donmuş zemin, mevsimsel don ve yıllık erime tabakası gibi terimler aktif katman için eş anlamlı olarak kullanılır. Bu tabakanın kalınlığı 15 cm. ile 1 m. arasında değişkenlik gösterir. Kalınlığı, kış sıcaklığının şiddetini (donma indeksi), zemin veya kaya tipini, zemin nem muhtevasını, kar örtüsünü, yüzey bitkileşmesini, drenajı ve şevlerin yönelmesi ve açısını içeren birçok faktöre bağlıdır (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

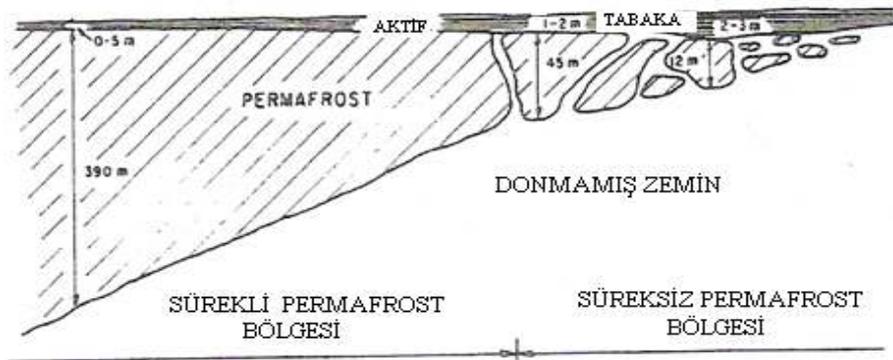
Donma derinliği yüzey donma indeksine bağlıdır ve Şekil 3.6'te gösterilen sıcaklık profilini oluşturur. Yıllık sıcaklık değerinin altında, zemin sıcaklığı derinlikle birlikte lokal jeotermal eğime ( $dT/dz$ ) bağlı olarak bir miktar artar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Sürekli donmuş zemindeki sıcaklık profili (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

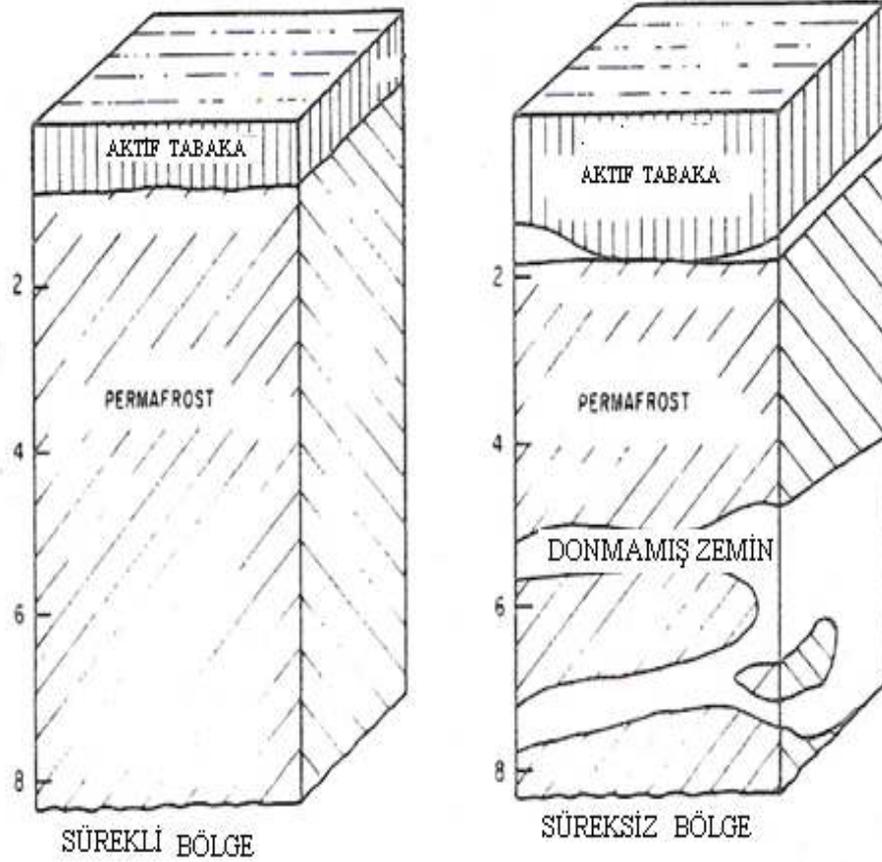
### 3.5.4. Permafrost

Permafrost veya sürekli donmuş halde bulunan zemin, zemin veya kayanın en az iki ardı ardına kış ve aradaki yaz boyunca 0°C'nin altındaki sıcaklıkta bulunması olarak tanımlanır (Brown ve Kupsch,1974). Yapılaşma ve zemin materyallerindeki donma şartlarının var olması, birinci derecede mevsim ve çeşitli zemin faktörleri tarafından kontrol edilir. Sıcaklık şartları Şekil 3.7'de yer alan zemin profili tarafından gösterilen permafrostun var olmasını gerektirir. Ölçülen eğim (Brown ve diğ. 1981) her 22 m. de 1°C den her 160 m. de 1°C'e kadar değişir.



Şekil 3.7: Soğuk bölgelerdeki permafrost kalınlığı (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

Coğrafi olarak, permafrost (Şekil 3.3’de gösterildiği gibi) sürekli ve süreksiz olarak 2 bölgeye ayrılır. Ortak sınırdaki permafrost kalınlığı Şekil 3.7.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Soğuk bölgelerdeki permafrost: tipik görüntü (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

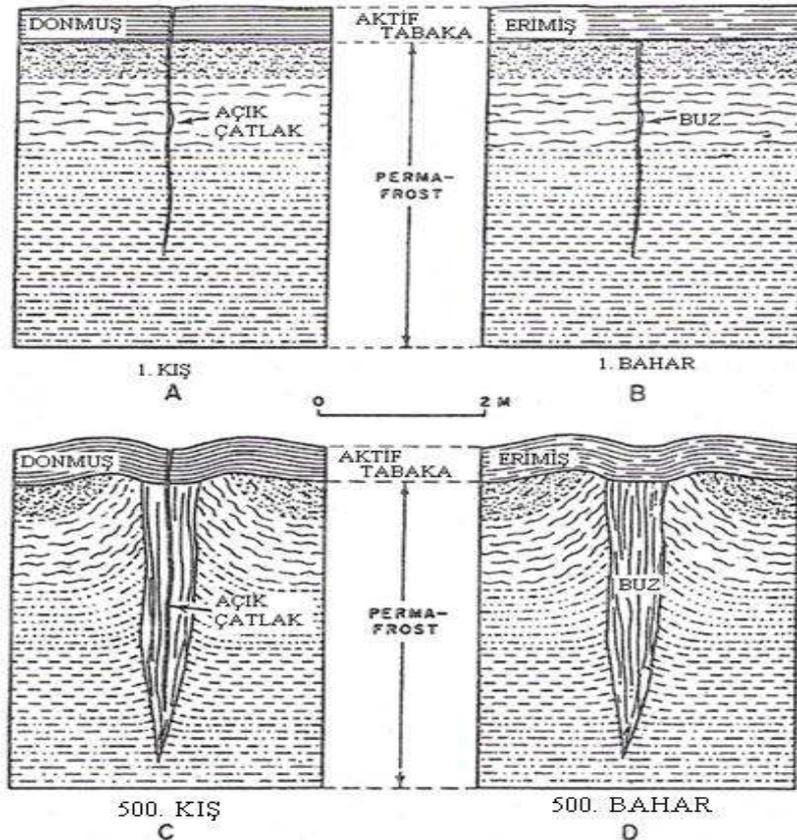
### 3.6. Permafrost Bölgelerdeki Zemin Özellikleri

Zemin yüzey özellikleri, belli başlı donmuş zemin şartlarını gösterir. Donmuş zemin üzerindeki yapılar erime oturmasına veya diğer elverişsiz zemin durumlarına neden olabilecek zemin termal rejimindeki değişimlere bağlı olarak yerleştirilmelidir. Çok önemli özellikler özellikle zemin buzuyla alakalı olarak, buz kamaları, pingo ve tiyal üstü karst şekilleri içerir (Prize,1972). Numune zeminler bu formları poligon, daire ve ince şeritler halinde içerirler.

### 3.6.1. Zemin buz özellikleri

#### 3.6.1.1. Buz kamaları

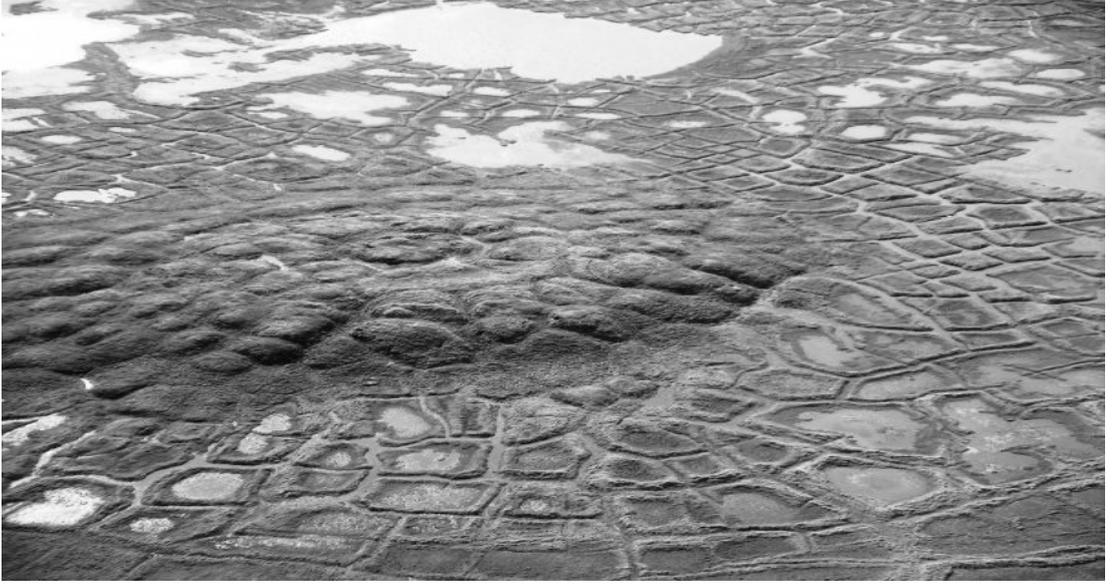
Göreceli olarak saf buzun bu düşey yönlü kütleleri Şekil 3.9' de gösterildiği gibi permafrost yüzeyine yakın ortaya çıkar. Üst kısımda (1-3m) alt kısma göre daha genişirler ve 1 cm.'den 10 m.'ye kadar yükseklikte değişim gösterirler. Başlangıçtaki açık çatlakın oluşumu düşen kış sıcaklıkları ile bağlantılıdır. Bu periyot boyunca, yüzeysel tabakalar temas kurmaya çalışırlar ama daha dengeli düşük tabakalar baskı kurarlar. Düşük sıcaklıklar ve hızlı soğuma değerleri daha büyük çekme gerilmesi tutar. Termal deformasyon, buz içeriğinin fazla olduğu yerlerde genellikle yüksektir. Çünkü buz için genleşebilirlik katsayısı zemin parçacıklarından yaklaşık 5 kat daha büyüktür. Kırılma ve çatlak oluşumu, çekme gerilmelerinin donmuş zemin çekme mukavemetini aştığı zaman meydana gelir. Çatlaklar genellikle birkaç milimetre genişliğindedir fakat aşağı doğru birkaç metre uzayabilirler.



Şekil 3.9: Termal kılma teorisine bağlı olarak buz kamalarının oluşumunun şematik temsili (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

### 3.6.1.2. Pingo

Sürekli ve süreksiz permafrost bölgelerde oluşan, dairesel veya oval tabanlı ve genellikle zirvesinde çatlaklı konik, fazla veya az asimetrik toprak yığını veya tepe pingo olarak adlandırılır (Brown ve Kupsch,1974). Çekirdek, büyük zemin buzunun zemin ve bitki örtüsü ile kaplanmasıyla oluşur. Pingo terimi, düşey ölçüsü 10 m. ve daha fazlası, yatay ölçüsü 1100 m. ve daha fazlası olan toprak yığınlarını da içerir.



Şekil 3.10: Tuktoyaktuk, Kanada yakınlarındaki pingo (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)



Şekil 3.11: Tuktoyaktuk, Kanada yakınlarındaki pingo (Andersland, O.B., Ladanyi, B.)

### 3.6.1.3. Thermokarst

Bu özellik toprak yığınlarını, mağaraları, görünmeyen akarsuları, huni biçimindeki kuyuları, uzun olukları ve dik kenarlı vadileri içerir. Thermokarst merkezi iki gruba ayrılabilir: Yanal permafrost parçalanma ve üstten permafrost parçalanma. (Czudek ve Demek, 1970) ve çoğunlukla nehirsal, gölsel veya denizel erozyondan dolayı oluşur.

## 3.7. Zeminin Termal Özellikleri

Zeminlerin basit termal özellikleri termal iletkenlik, ısı kapasitesi, yayılma gücü ve gizli ısıdır. Bu özellikler faz durumlarına göre değişken olabilirler. Sıcaklık, zemin tipi, su muhtevası, doygunluk derecesi, kuru yoğunluk, organik içerikler zeminin termal özelliklerini etkileyen faktörlerden bir kaçıdır.

### 3.7.1. Termal iletkenlik

Termal iletkenlik, birim zamanda birim alana transfer olan ısı miktarı olarak tanımlanır ve

$$K = \frac{q}{A(T_2 - T_1)/L} \left( \frac{\text{cal}}{\text{s cm } ^\circ\text{C}} \right) \quad (3.4)$$

ile hesaplanır (Jumikis,1977).

### 3.7.2. Isı kapasitesi

Suyun önemli termal özelliklerinden birisi birim kütle sıcaklığının değiştirilmesi için gerekli olan ısı enerjisi miktarı olarak tanımlanır ve spesifik ısı kapasitesi olarak da adlandırılır. Eğer birim hacim ağırlık ifade edilirse hacimsel ısı kapasitesi olarak adlandırılır.

$$c_m = \frac{Q}{\Delta T} \left( \frac{\text{cal}}{\text{cm}^3 ^\circ\text{C}} \right) \quad (3.5)$$

Toplam ısı kapasitesi, zemin, buz, donmamış su vb. bileşenlerin ısı kapasitelerinin toplamına eşittir.

### 3.7.3. Gizli ısı

Hacimsel gizli ısı  $L$ , birim hacimdeki zeminde sıcaklıkta değişme olmadan suyun donması veya buzun erimesi için gerekli olan ısı miktarıdır. Genellikle donma yönteminde önemli faktör olarak tanımlanır.

$$L = \rho_d w (1 - w_{uw}) L' \quad (3.6)$$

$$L = \rho_d w L' \quad w_{uw} = 0 \text{ için} \quad (3.7)$$

#### **4. DONMUŞ ZEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Malzeme bilimine göre, donmuş zemin dört farklı bileşenden oluşan doğal bir bileşiktir. Bu bileşenler; katı daneler (mineral veya organik), buz, donmamış su ve gazlardır. Donmuş zeminin diğer benzer malzemelerden en önemli özelliği ise doğal şartlar altında çoğunlukla buz ve suyun bileşiminin sürekli olarak, değişken sıcaklık ve tatbik edilen gerilme ile birlikte değişmesidir.

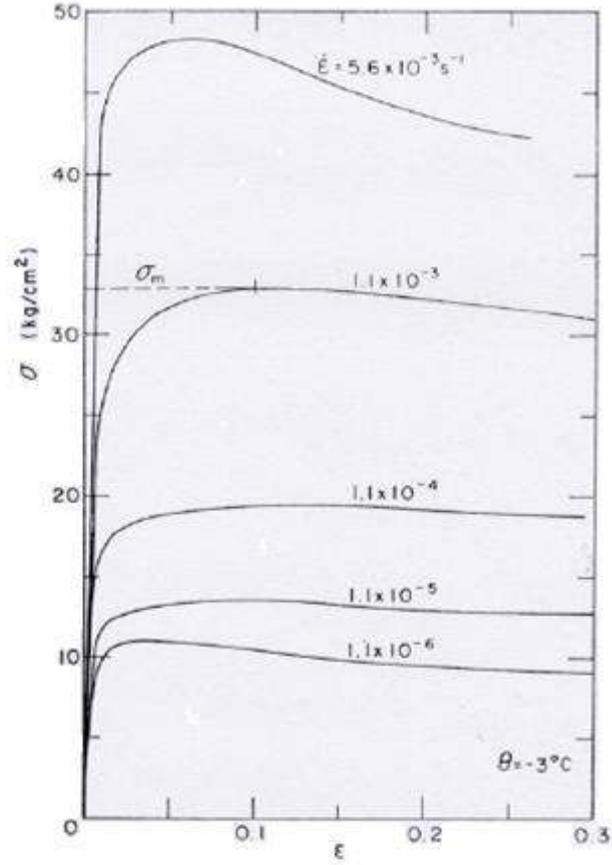
Zemin gözeneklerinde sadece tek çeşit buz görülmektedir (Normal altıgen buz yapısı). Fakat donmamış su, güçlü bağlı ve zayıf bağlı olarak iki farklı şekilde görülmektedir. Su, taneciklerin etrafını sarar ve çok düşük sıcaklıklarda bile yüksek molekül içi kuvvetlerle tanecikleri tutması donma olayını önler. Boşluk suyunun dayanımı zayıftır ve çok kolay bir şekilde donabilir (Anderson ve Margenstern 1973). Verilen bir sıcaklıkta donmuş zemindeki donmamış su miktarı taneciklerin spesifik yüzey alanı ile ilişkili olabilir (Anderson ve Tice 1972) ve elektrolit ile güçlü bir şekilde etkilenmiştir. Bourbonnais (1984) tarafından yapılan araştırmaya göre, donmuş kilde, donmamış su tabakaları -110°C sıcaklığa kadar var olabilir.

Donmamış suyun var olmasına rağmen, buz birçok boşluğu doldurduğunda, donmuş zeminin mekanik davranışı buzun davranışını yansıtır. Boşluktaki buz genellikle polikristal yapıdadır. Normal şartlar altında deviatorik gerilmeye tepkisi Norton-Bailey süne eşitliği ile tarif edilir.

##### **4.1. Donmuş Zeminlerin Basınç Mukavemeti**

Donmuş zeminin mukavemeti, deformasyon hızı, buz muhtevası ve sıcaklığa bağlıdır. Yapılan deneylerde artan deformasyon hızında ve azalan sıcaklıkta donmuş zemin mukavemetinin arttığı görülmüştür. Şekil 4.1'de donmuş kilde yapılan tek eksenli basınç deneyleri için gerilme-şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir.

Bu şekil deformasyon hızı artarken donmuş zeminin mukavemetinde arttığını gösterir. Bunun dışında, küçük deformasyon hızlarında kırılma sünektir. Oysa deformasyon hızı artarken kırılma da gevrek hale geçer.



Şekil 4.1: Killi zemin için gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Harris,1995)

Li ve diğerleri (2004), doymuş donmuş kilin basınç mukavemetinin sıcaklık, deformasyon hızı ve kuru yoğunlukla nasıl değiştiğini incelemiştir. Bu inceleme sonucunda, doymuş donmuş kilin tek eksenli basınç mukavemetinin, deformasyon oranının artmasıyla, sıcaklığın düşmesiyle ve kuru yoğunluğun artmasıyla arttığı görülmüştür. Sıcaklığa, deformasyon oranına ve kuru yoğunluğa bağlı olarak aşağıdaki eşitlik tarafından hesaplanabilir.

$$\sigma_m = (2.677 - 0.840\rho_d)(\theta/\theta_0)(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^{0.470-0.212\rho_d} \quad (4.1)$$

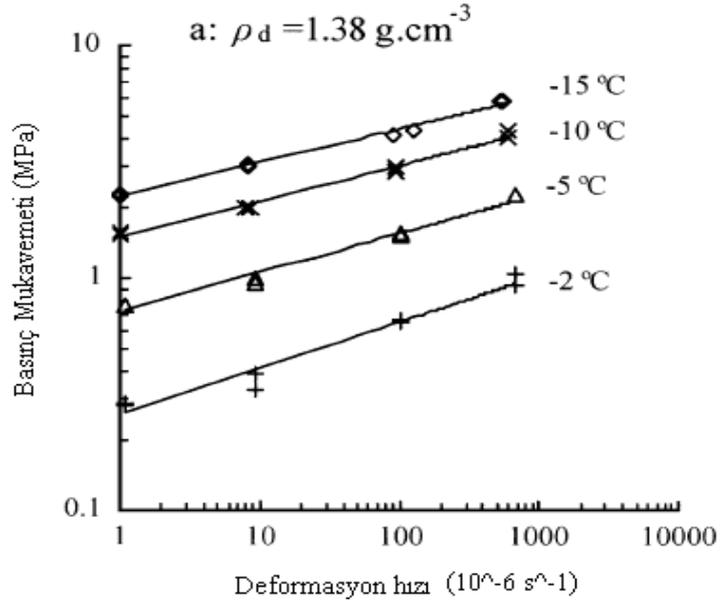
Burada, referans sıcaklık  $\theta_0 = -1^\circ\text{C}$ , deformasyon oranı  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ,  $\sigma_m$  basınç mukavemeti (MPa) ve  $\rho_d$  kuru yoğunluktur ( $\text{gr.cm}^{-3}$ ).

Aynı zamanda doymuş donmuş kilin tek eksenli basınç mukavemeti kırılma zamanının artmasıyla da azalır. Kırılma zamanına bağlı olan aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

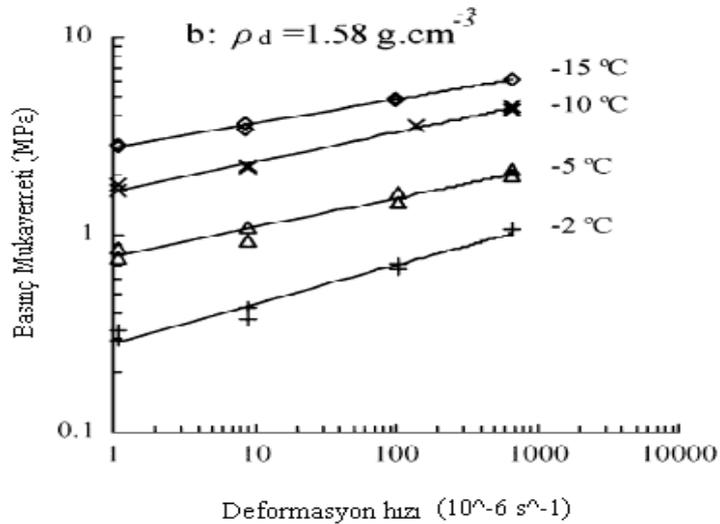
$$\sigma_m = (0.649\rho_d - 0.485)(\theta/\theta_0)(t_f/t_{f0})^{-(0.465-0.208\rho_d)} \quad (4.2)$$

Burada ise referans kırılma zamanı  $t_{f0}=1$  dakikadır.

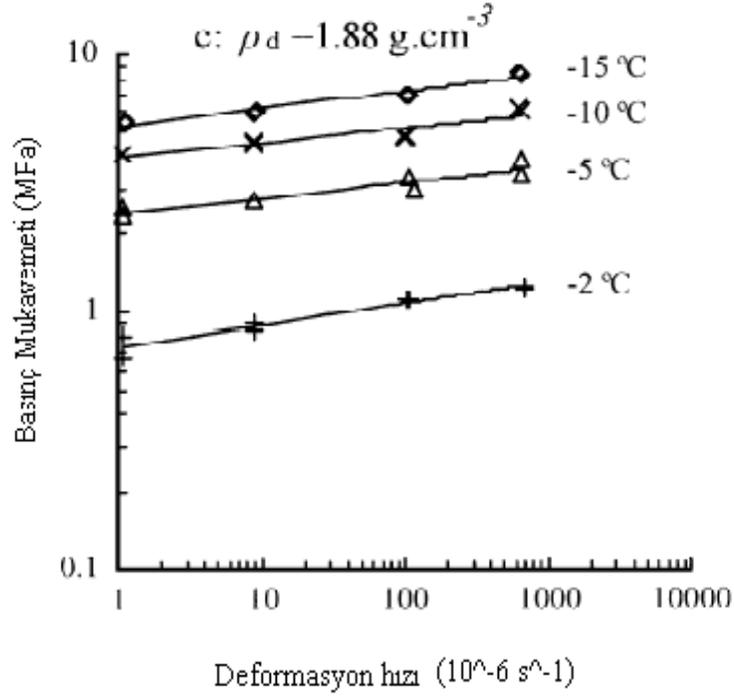
Sıcaklık, deformasyon hızı veya kırılma zamanı donmuş zeminin basınç mukavemetini etkileyen önemli faktörlerdir. Ama en önemli faktör sıcaklıktır.



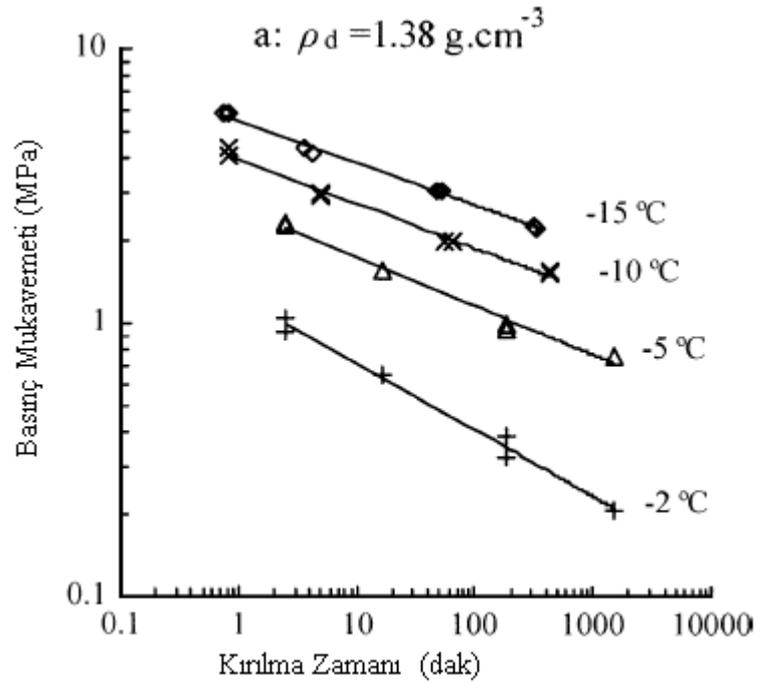
Şekil 4.2: Farklı sıcaklıklarda, deformasyon hızlarında ve farklı kuru yoğunluklarda donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)



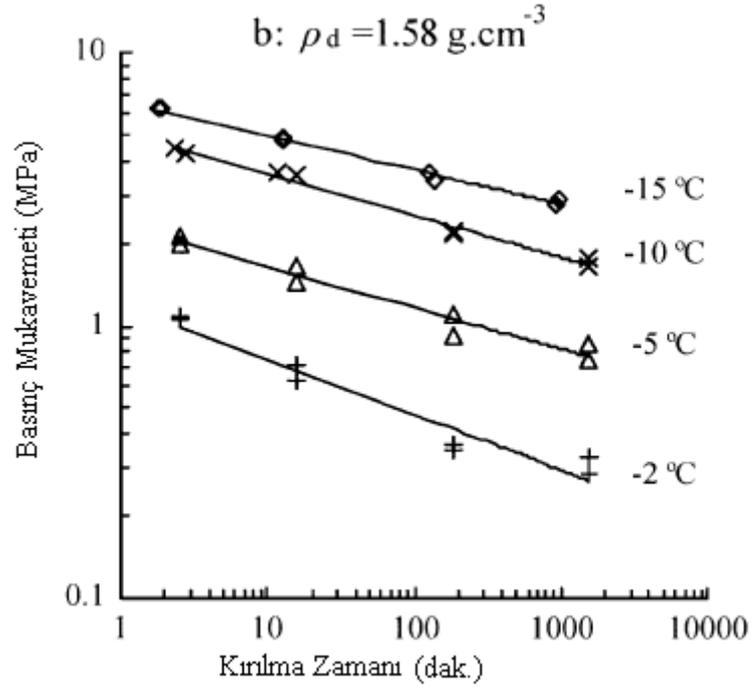
Şekil 4.3: Farklı sıcaklıklarda, deformasyon hızlarında ve farklı kuru yoğunluklarda donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)



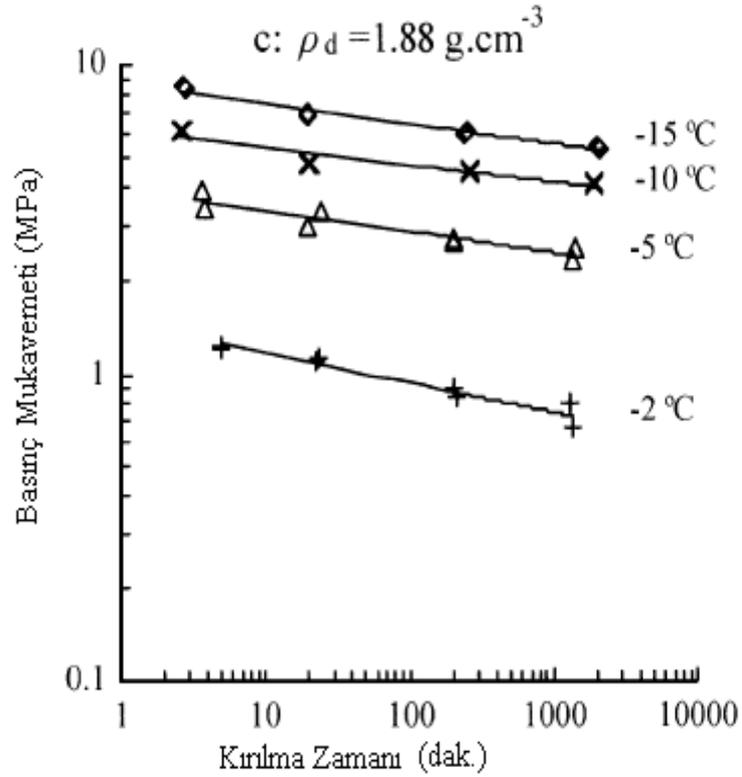
Şekil 4.4: Farklı sıcaklıklarda, deformasyon hızlarında ve farklı kuru yoğunluklarda donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)



Şekil 4.5: Farklı kuru yoğunluklarında ve kırılma zamanında donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)



Şekil 4.6: Farklı kuru yoğunluklarında ve kırılma zamanında donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)



Şekil 4.7: Farklı kuru yoğunluklarında ve kırılma zamanında donmuş kilin basınç mukavemeti (Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang ve Chuannian Lin 2004)

## 4.2. Gerilme – Deformasyon – Zaman ve Mukavemet Davranışı

### 4.2.1. Hidrostatik basıncın donmuş zemin davranışındaki etkisi

Artan hidrostatik basınç altındaki donmuş zeminin davranışı, mekanik ve termodinamik etkilerinin birleşiminin sonucunun, gerilme paylaşımı ve kontrolünün dikkate alınmasıdır. Eğer sadece mekanik etkiler dikkate alınır ve iki fazlı malzeme farz edilirse artan toplam basınç altında gerilme paylaşımı,

$$B = \frac{\Delta u_m}{\Delta p} = \left[ 1 + n \frac{\left(\frac{C_m}{C_s}\right)^{-1}}{\left(\frac{C}{C_s}\right)^{-1}} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

Denklemleri ile kontrol edilir (Bishop 1973). Burada  $\Delta p$  toplam ortalama normal gerilmedeki artış,  $\Delta u_m$  gözeneklerdeki gerilmenin artışı,  $n$  zemin porozitesi,  $C_m$  gözeneklerin sıkışabilirliği ve  $C$  zemin iskeletinin sıkışabilirliğidir. Bu parametrelerin uygun değerleri Denklem (4.3)'de yerine konulduğunda (Ladanyi, 1985), suya ya da buza doymuş sıkı kayada, hemen hemen tüm basınçlar gözeneklere transfer olduğu görülmüştür (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

Ancak donmamış su içeren donmuş zemin gibi üç fazlı malzemelerde mekanik etkiden kaynaklanan boşluk suyu basıncındaki artış oldukça farklı olabilir. Buzun zemin danelerini çimentolaştırması, zemin iskeletinin sıkışabilirliğinin,  $C$ , büyük oranda azalmasında etkilidir. Örneğin, Wissa (1969) çimento ile stabilize edilmiş kum için  $C$  değerini  $0.265 \text{ m}^2/\text{GN}$  olarak bulmuştur, bu durumda aynı şartlar altında  $B=0.575$  olmasına neden olur. Buradan anlaşılacağı üzere, hidrostatik basınçtaki ani artış altında, donmamış su buza göre daha az zorlanır ve önemli termodinamik durumlara yol açar (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

İzotermal olmayan durumda buz için basınç-sıcaklık ilişkisi ve zemin gözeneklerinin su ile dolması tam anlamıyla Clausius-Clapeyron eşitliği tarafından tanımlanır (Hillel, 1980).

$$\frac{dp_w}{\rho_w} - \frac{dP_i}{\rho_i} = \frac{LdT}{T} \quad (4.4)$$

Burada  $p_i$  ve  $p_w$  buz ve suyun basıncını,  $\rho_w = 1,000 \text{ kg/m}^3$  su yoğunluğunu  $\rho_i = 916,8 \text{ kg/m}^3$  buzun yoğunluğu,  $L = 3.336 \times 10^5 \text{ J/kg}$  suyun gizli ısısını ve  $dT = T_o - T$ , saf suyun normal donma sıcaklığı ( $T_o = 273.15 \text{ }^\circ\text{K}$ ) ve sistemin gerçek sıcaklığı  $T$  arasındaki farkı gösterir. Bu değerler Denklem (4.4)'de yerine koyulduğunda

$$dp_w = 1.091 dp_i + 1.221 dT \quad (4.5)$$

Burada  $P$ 'nin birimi MPa,  $T$ 'nin birim  $^\circ\text{K}$ 'dır. Çoğunlukla buz-su ara yüzeyinde  $dp_w = dp_i = dp$  olarak farz edilir, bu da buz için donma noktasında basınç azalması sağlar.

$$\frac{dT}{dp} = -0,0743 \text{ K/MPa} \quad (4.6)$$

İzotermal durumda,  $dT=0$  ve Denklem (4.5)'de yerine konulursa,

$$dp_w = 1.091 dp_i \quad (4.7)$$

olur. Bu da gözenek-su basıncındaki değişimi gösterir (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

Donmuş granüler zemine, hidrostatik hücre basıncı uygulandığında, daneler arasındaki temaslarda bölgesel basınç erimesi görülür ve az miktar düşük gerilme bölgesine doğru su göçü oluşur. Teorik olarak,  $1^\circ\text{C}$ 'e kadar buz donma noktasının düşürülmesi için gerekli olan basıncın büyüklüğünün yaklaşık  $13,5 \text{ MPa}$  olduğu Denklem (4.4)'den tahmin edilir (Andersland, O.B., Ladanyi, B.).

Sonuç olarak basınç altında çok az miktar erime görülür ve basınçta artışa neden olur (Arteau 1984). Charberlain, Groves ve Perham (1972), Simonsen, Jones ve Green (1974) ve Jones ve Parameswaran (1983) tarafından gözlemlendiği gibi, eğer hücre basıncı çok yüksekse, dane yapısı küçülür ve boşluk buzunda toplam bir basınç erimesi meydana gelir. Tahmin edilen toplam erime basıncı için bu çalışmalar Denklem (4.6)'ün geçerliliğini destekler.

Suyun hidrolik iletkenliğinin çok küçük olduğu ama sıfır olmadığı ve buz hidrolik eğiminin ihmal edildiği donmuş zeminde Darcy kanununun uygulanabildiği çeşitli araştırmacılar tarafından gösterilmiştir (Örneğin Burt ve Williams 1976, Lunardini

ve ark. 1982, Arteou 1984). Böylelikle donmuş zemin konsolidasyonunu tamamladığı anlaşılır. Konsolidasyon süresi çok uzundur. Örneğin, -5°C sıcaklıktaki donmuş kumun hidrolik iletkenliğinin yaklaşık  $10^{-11}$  cm/s ve konsolidasyon katsayısının  $10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s olduğunu varsayılırsa, Bishop ve Henkel (1962)'e göre, 10 cm. boyunda 5 cm. çapındaki numune için konsolidasyon süresi eğer drenaj sadece her iki uç noktada serbestse 7 aydan uzun sürer. Eğer drenaj bütün yüzeyde olursa bu süre 9 güne iner.

#### **4.2.2. Kesme Kuvvetinin Donmuş Zemin Davranışındaki Etkisi**

Donmuş kumun kesme davranışını sistematik bir şekilde inceleyen araştırmacıların çalışmalarının (Örneğin, Gourghnour ve Andersland 1968; Andersland ve Al-Nouri 1970; Andersland ve Alkire 1973, Chamberlain, Groves ve Perham 1972; Sayles 1973) ve kendi araştırmalarının temelinde donmuş zeminin kesme kesme davranışını dört fiziksel mekanizmanın kontrol ettiği yer almaktadır.

Bunlar;

- (1) Boşluk buzu mukavemeti
- (2) Zemin mukavemeti
- (3) Efektif gerilmedeki artış
- (4) Kuvvet etkileridir.

#### **4.3. Donmuş Zeminin Kayma Mukavemeti:**

Donmuş zeminin kayma mukavemeti, buzun direncine ve zemin parçacıkları arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Vyalov (1962) Mohr-Coulomb kırılma teorisini donmuş zeminin kayma mukavemetini hesaplamak için değiştirmiştir.

$$\tau = C_t + \sigma_n \tan \phi_t \quad (4.8)$$

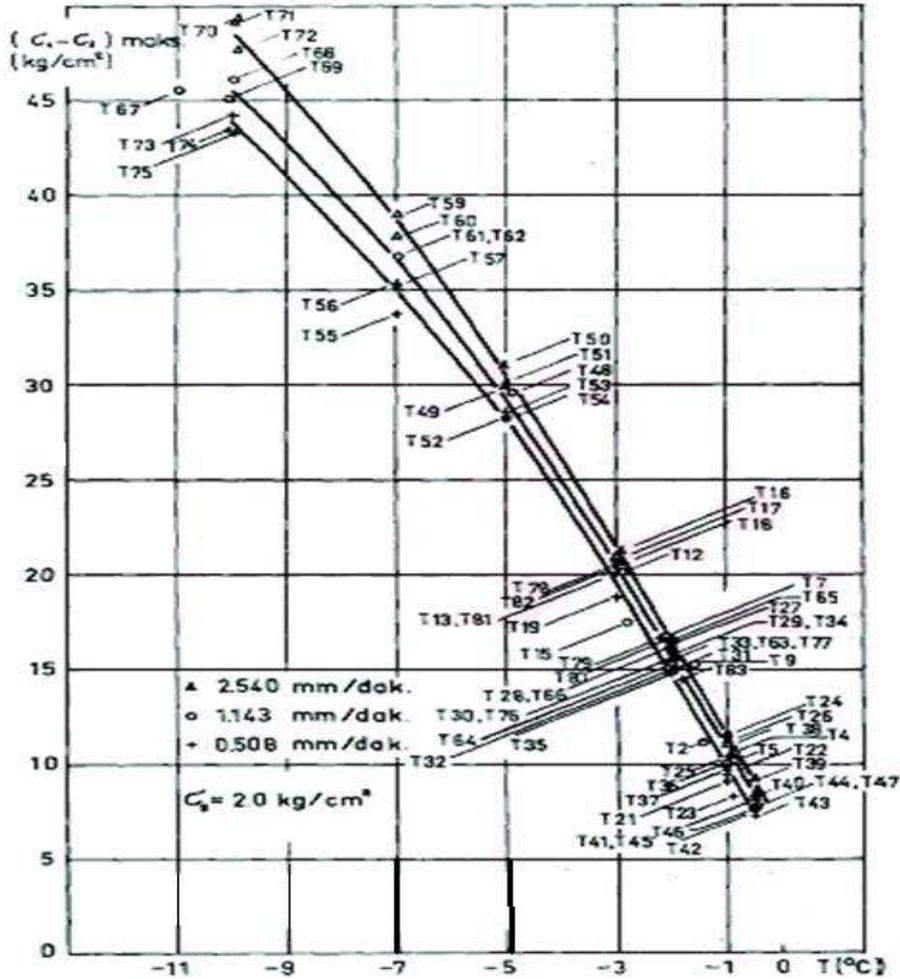
$\tau$  kayma mukavemeti  $\sigma_n$  kesme düzlemindeki normal gerilme ve  $C_t$  kohezyon ve  $\phi_t$  sürtünme açısıdır, sıcaklık ve zamanın fonksiyonlarıdır.

Buz ve sıcaklığın miktarı kohezyonu etkiler, Vyalov (1962). Kohezyon bileşenini tanımlamak için aşağıdaki eşitliği deney sonuçlarından önermiştir.

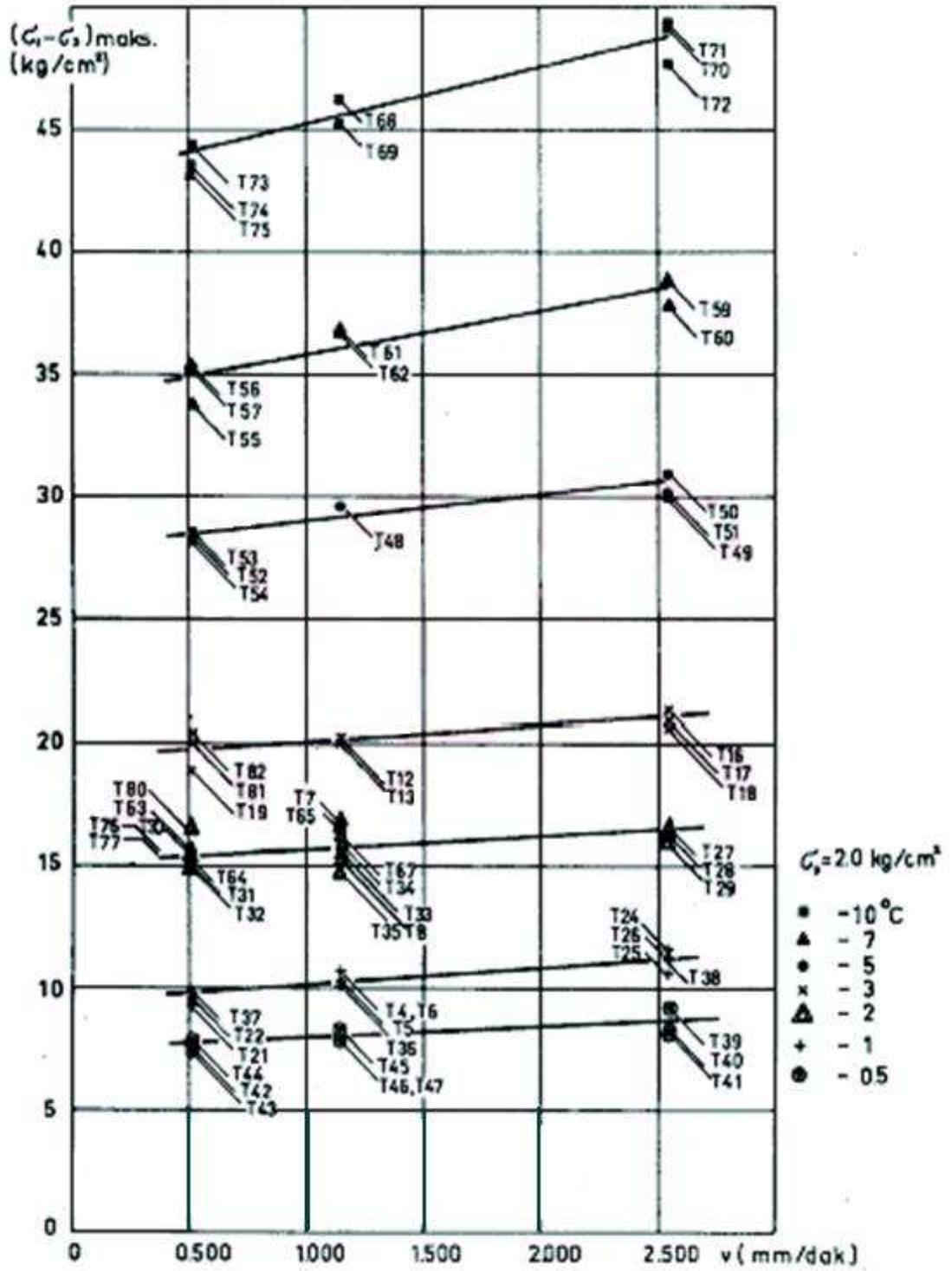
$$C_t = \frac{\beta}{\log(t/B)} \quad (4.9)$$

Burada  $\beta$  ve B sabittir ve  $c_t$ -logt grafiğinden bulunurlar ve t zaman periyotudur. İç sürtünme açısı dağılımı, şekli ve donmamış zemindeki danelerinin birbirlerine temas sayısına bağlıdır. Bundan dolayı buz muhtevası ve sıcaklık içsel sürtünme açısını etkiler.

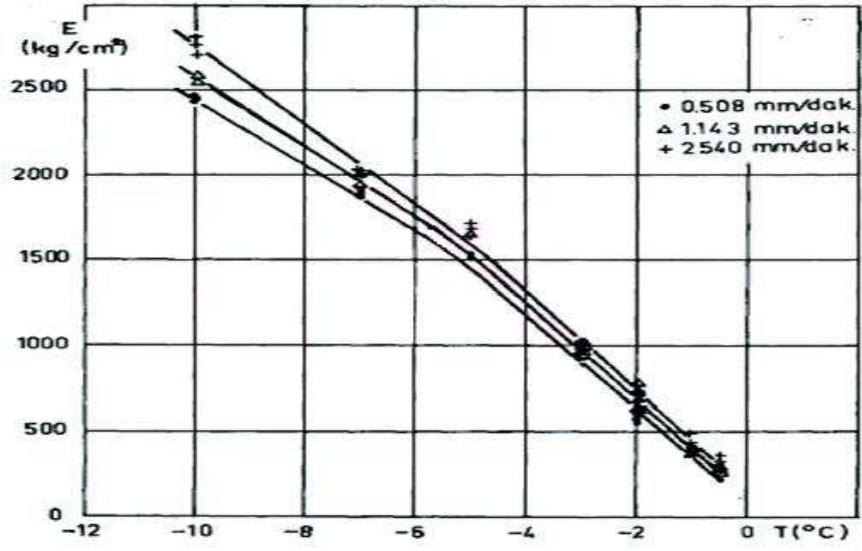
Donmuş zeminin kayma mukavemetinin sıcaklıkla değiştiği, sıcaklık azaldıkça arttığı gözlenmiştir. Şekil 4.8'te maksimum deviator gerilmenin  $-0.5^\circ\text{C}$  ile  $3^\circ\text{C}$  arasında sıcaklıkta çizgisel olarak değiştiği görülmektedir. Sıcaklığın  $-5^\circ\text{C}$  daha küçük bir değer alması halinde kayma mukavemetindeki artış oranının azaldığı ve böylelikle deney hızının kayma mukavemetinde etkili olduğu Şekil 4.8 ve 4.9 te görülmektedir. (Ersoy 1979).



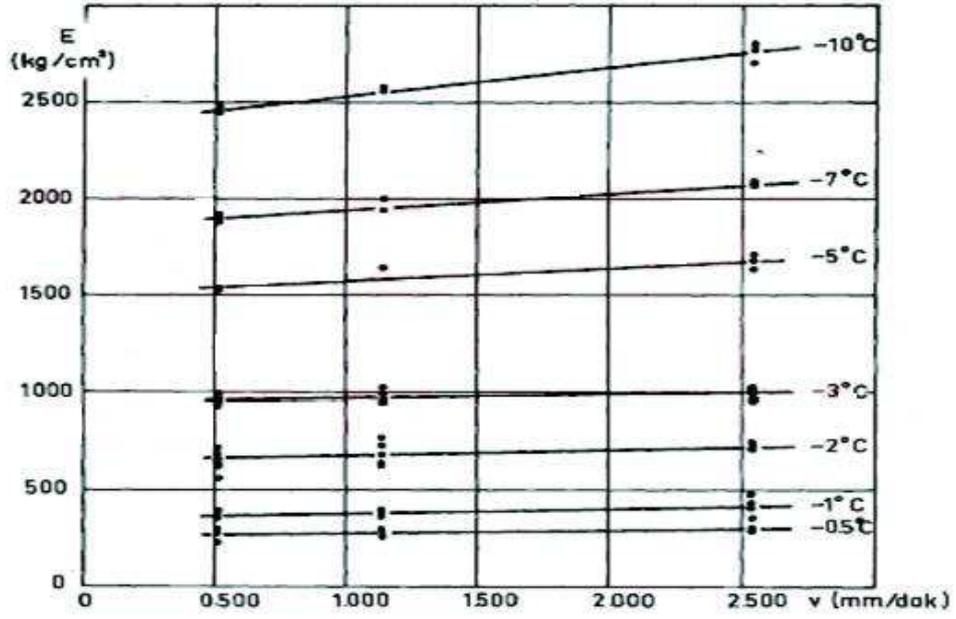
Şekil 4.8:  $\Delta\sigma$  ve T arasındaki bağıntı (Ersoy 1979)



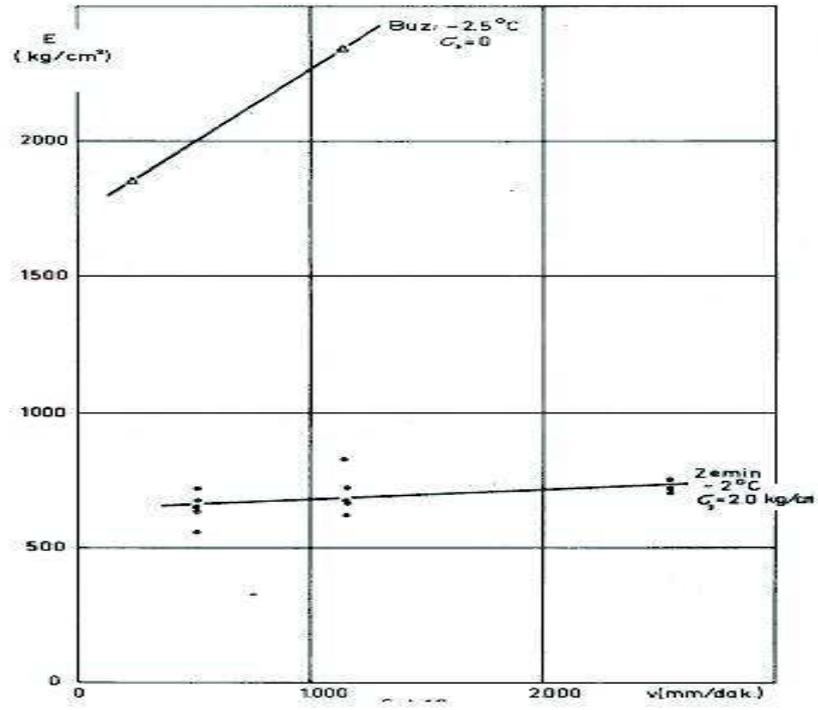
Şekil 4.9:  $\Delta\sigma$  ve deney hızı arasındaki bağıntı (Ersoy 1979)



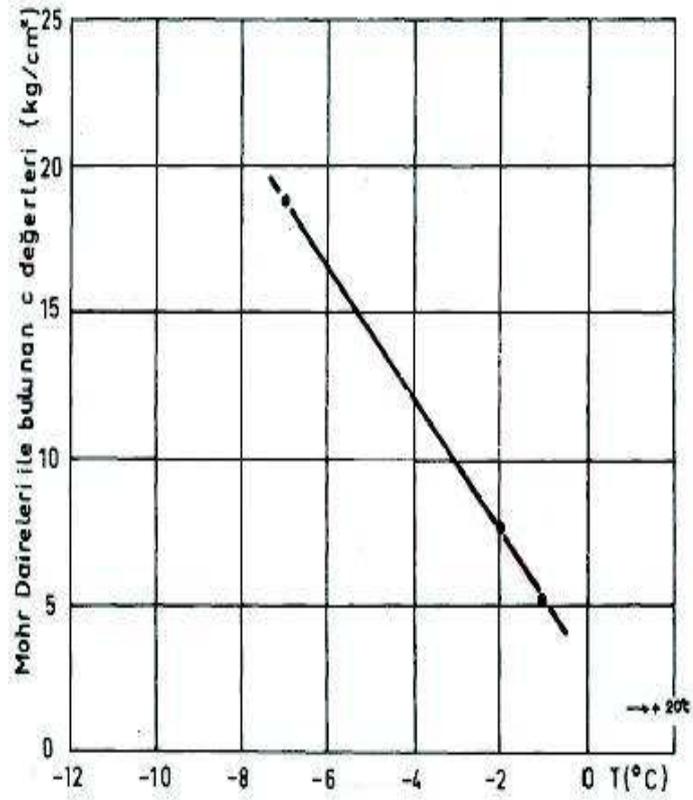
Şekil 4.10: Deformasyon modülünün 0 °C sıcaklıklar altındaki değişimi (Ersoy1979)



Şekil 4.11: Deformasyon modülünün 0 °C sıcaklıklar altındaki değişimi (Ersoy1979)



Şekil 4.12: Deney hızına bağlı olarak buz ve zeminin deformasyon modülleri (Ersoy1979)



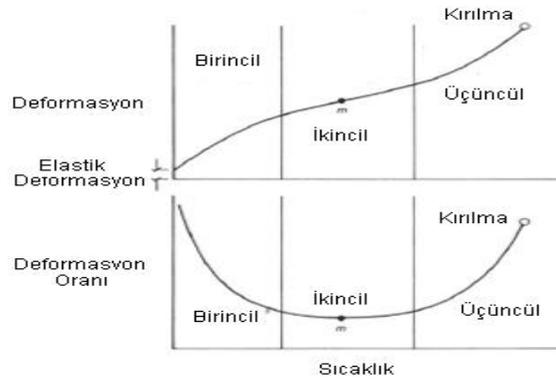
Şekil 4.13: Sıcaklık için kohezyon değerleri (Ersoy 1979)

#### 4.4. Donmuş Zeminin Sünme Davranışı:

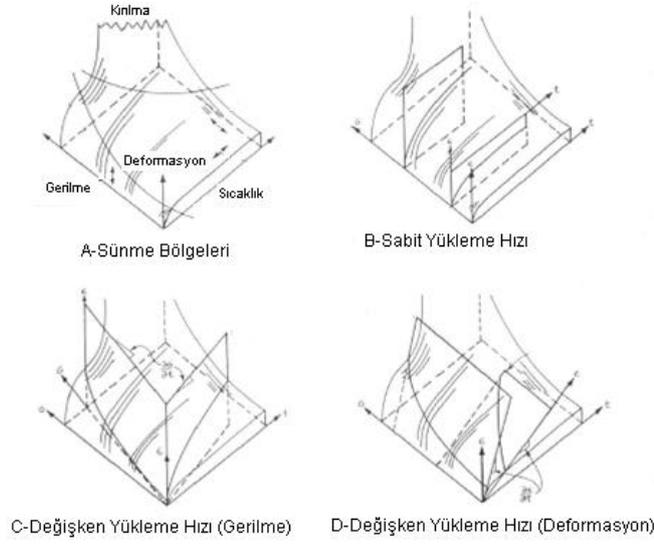
Donmuş zeminin sünme davranışı, sabit gerilme altında, zamana bağlı deformasyondur. Donmuş zemindeki sünme süreci ( işlemi ) aşağıdaki gibidir:

1. Basıncın etkisiyle, zemin-dane arasındaki temas noktasında buz erir.
2. Zemindeki donmamış su düşük gerilme altında bulunan alanlara doğru göç eder.
3. Buz-zemin yapısı göçer.
4. Zemin gözeneklerindeki buzun plastik deformasyonu ortaya çıkar.
5. Buz ve zemin parçacıklar arasındaki bağlantı yeniden değişir.

Donmuş zemin yapısının yeniden düzenlenmesi sıkışıktır ve zemin danelerini arasındaki içsel sürtünme katsayısı sünme olmadan önceki içsel sürtünme katsayısından daha büyüktür. Bu yüzden malzemenin mukavemeti, uygulanan yükün donmuş zemini uzun vadedeki mukavemetini geçmediği sürece artar. Aynı zamanda sünme mukavemeti olarak da adlandırılan uzun vadede ki mukavemet kırılma mukavemetidir. Deformasyon hızı 0'a inerken veya zaman sonsuza giderken, bu donmuş zeminin sünme davranışının birincil (deformasyon-sertleşme) bölümüdür. Eğer uygulanan yük sünme mukavemetinden üstün çıkarsa, kuvvetlenme işleri durur ve zemin zayıflamaya başlar. Ölçülere göre, ikincil ( doğrusal ) bölümü açık değildir. Bu yüzden, zeminin minimum deformasyon hızının olduğu, bükülme noktası olarak tanımlanır. Bükülme noktası mühendislik tasarımları için kırılma olarak tanımlanır. Sonuç olarak, deformasyon hızı artar ve kırılma oluşur. Donmuş zeminin sünme davranışı şekil (4.14)'de gösterilmiştir ve donmuş zeminin idealleştirilmiş zamana bağlı davranışı şekil (4.15)'de verilmiştir.



Şekil 4.14: Sünme davranışı (Harris,1995)



Şekil 4.15: Donmuş zeminin idealleştirilmiş zamana bağlı davranışı (Phukan, 1985)

Bundan başka, donmuş zemindeki buz miktarı deformasyon davranışını da etkiler. Sırasıyla sünme eğrileri, modellerinin tanımı önerilmiştir. Bu modellerin birçoğu 1962 Vyalov'un çalışmasına dayanır. Toplam deformasyon

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_d + \epsilon_c \quad (4.10)$$

İfadesi ile elde edilir.

Burada  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon_c$  sırasıyla başlangıçtaki, gecikmiş ve düzeltilemez sünme deformasyonlarıdır.

$\epsilon_c$ ,  $(\epsilon_0 + \epsilon_d)$ 'den çok daha büyüktür, bu nedenle hesaplamalarda  $(\epsilon_0 + \epsilon_d)$  ihmal edilirler. Assur (1963) tarafından eşitliği aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir.

$$\epsilon_c = \left[ \frac{\sigma t^\lambda}{w \left( \frac{T}{T_0} + 1 \right)^k} \right]^{1/m} \quad (4.11)$$

Bu eşitlikte,  $\sigma$  uygulanan gerilime,  $t$  zaman,  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) donma altında sıcaklık,  $T_0$  referans sıcaklığı ve  $w$ ,  $\lambda$ ,  $m$  ve  $k$  zemin tipine göre tanımlanan sabitlerdir. Bu eşitlik Klein(1979) tarafından

$$\varepsilon_c = A\sigma^B t^C \quad (4.12)$$

Olarak basitleştirilmiştir. Bu eşitlikteki A, B ve C sabitlerdir. Bu parametrelerin bazı değerleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Donmuş zeminin sünme parametreleri (Harris,1995)

Malzeme	T (°C)	A (MPa <sup>B</sup> x h <sup>-C</sup> )	B	C
Ottowa Kumu	—9.4	3.50 x 10 <sup>-4</sup>	1.28	0.44
Manchester İnce Kum	—9.4	1.90 x 10 <sup>-4</sup>	2.63	0.63
Killi İnce Kum	—10	8.20 x 10 <sup>-3</sup>	2.25	0.24
Kum	—10	1.67 x 10 <sup>-3</sup>	2.80	0.42
Bat-Baioss Kili	—10	1.60 x 10 <sup>-3</sup>	2.50	0.45
Calloviaian Kumlu Kil	—10	5.50 x 10 <sup>-4</sup>	3.70	0.37
Emscher Kireçli Kil	—10	7.60 x 10 <sup>-5</sup>	4.00	0.10
Silt	—10	7.90 x 10 <sup>-6</sup>	5.60	0.88
Siltli Kil	—10	5.99 x 10 <sup>-3</sup>	2.63	0.38

## 5. UYGULAMADA KULLANIMI İÇİN PRATİK ÖNERİLER

Bu bölümde, Haipeng Li, vd. (2004) tarafından yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen denklemlerin birbirine eşitlenmesiyle, kırılma hızının, kuru yoğunluk ve deformasyon oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Aynı zamanda zemin iyileştirme yöntemi olan yapay zemin dondurulması yönteminin avantajları, dezavantajları ve uygulamaya yönelik dikkat edilmesi gerek hususlar ele alınmıştır.

Haipeng Li, vd. (2004) tarafından donmuş kilin tek eksenli basınç mukavemetinin sıcaklık, deformasyon hızı ve kuru yoğunluğa bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek için yaptıkları deney sonuçlarında elde ettikleri Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 ile eşitlenirse,

$$(2.677 - 0.840\rho_d) \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{(0.470-0.212\rho_d)} = (0.649\rho_d - 0.485) \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) \left(\frac{t_f}{t_{f0}}\right)^{-(0.465-0.208\rho_d)} \quad (5.1)$$

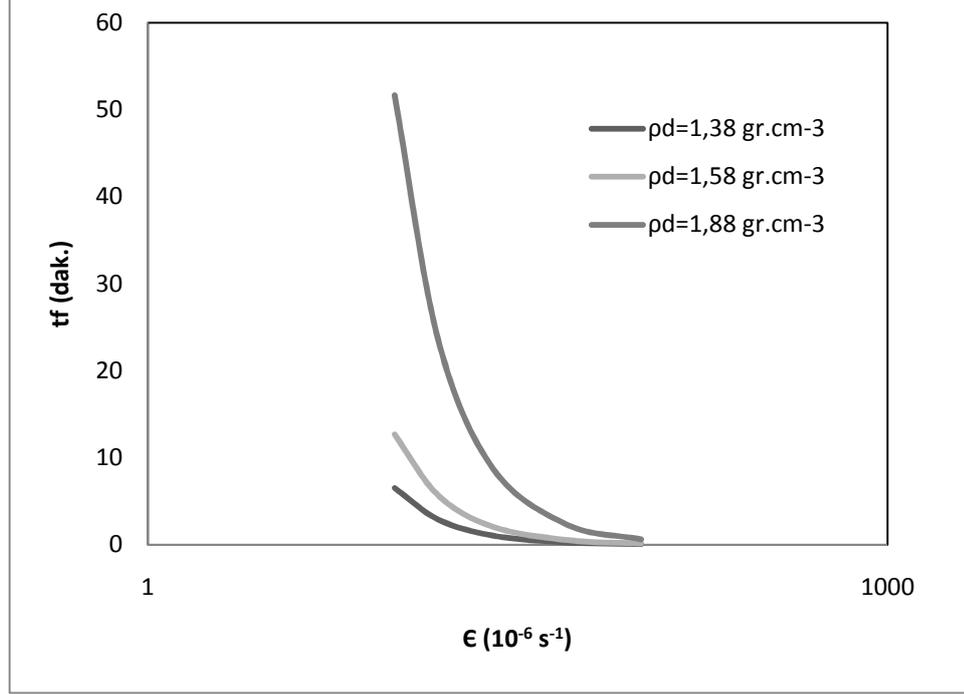
İfadesi elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra,

$$\left(\frac{t_f}{t_{f0}}\right)^{-(0.465-0.208\rho_d)} = \frac{(2.677-0.840\rho_d)}{(0.649\rho_d-0.485)} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)^{(0.470-0.212\rho_d)} \quad (5.2)$$

olur.

Denklem (5.2)'den de anlaşılacağı üzere deformasyon oranı ya da kırılma zamanı sıcaklıkla değişmemektedir. Kuru yoğunluğa bağlı olarak değişir. Değişik kuru yoğunluklarda, kırılma zamanı ve deformasyon oranının değişimi Şekil 5.1'de verilmiştir.

Yapay zemin dondurulması yönteminde uygulanırken, donmuş zeminin izlenmesi önemlidir. Yeni zemini dondurmak için kullanılan sıvının sıcaklığı, donmuş zeminin sıcaklığı, donmuş zonun kalınlığı ve zemin hareketleri kontrol altında tutulmalıdır. Aksi takdirde yöntemin uygulanmasında güçlükler meydana gelir.



Şekil 5.1: Değişik kuru yoğunluklarda kırılmaz zamanı ve deformasyon oranı ilişkisi

Donma olayı, zemindeki suyun uygun sıcaklıkta soğumasıyla katı hale geçmesi yani buz halini alması olarak tanımlanabilir. Donma olayı zeminde, soğuk bölgelerde sürekli olarak veya sadece kış aylarında sıcaklığın 0°C'nin altına düşmesiyle karşımıza çıkar. Aynı zamanda zeminlerin dondurulması zeminde zor zemin koşullarında zeminin çok çabuk stabilizasyonu sağlamak için kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Bu zemin iyileştirme yöntemi yapay zemin dondurulması yöntemi olarak isimlendirilir. Zemin dondurma sistemi yani bu yöntem iki farklı şekilde uygulanır. Tek aşamalı sistem ve iki aşamalı sistem olarak adlandırılan bu iki farklı yöntem bölüm 2'de anlatılmıştır.

Zeminin dondurulmasından sonra, zeminde gözlenecek ve dikkat edilmesi gereken hareketlerden biri kabarmadır. Bilindiği gibi su donduğu zaman sıfır derecedeki hacminin yaklaşık % 9' u kadar genişler. Topraklarda donan su, zemine paralel düz ve dışbükey biçimli buz tabakaları oluşturur. Zemin tabakalarında yükselme ve kaymalara neden olur. Kum, çakıl kum benzeri taneli donma sonucu taneler etrafında buz kristalleri oluşur. Donma etkisi daha azdır. Donma sonucu toprakta ortaya çıkan hareketlerden temeller donma bölgesinin altında yapılmalıdır. Donma bölgesinin derinliği, yapının negatif dış sıcaklıklara ve zemin katmanlarının ısı iletkenliğine bağlıdır.

Zeminin başlangıcı su içeriğinin donma sonucu genişlemesinden daha fazla genişleme ve bunun sonucu oluşan kabarma, en çok yol kaplamalarına zarar veren bir olaydır. Hafif araçlar için yapılmış yollar yükler arttıkça soğuk kışlarda hasara uğramaktadır. Araştırmalar donma ve buna bağlı su hareketinin teorik ve deneysel metotlarla araştırılması veya arazide CBR ve plaka yükleme deneyi gibi metotlarla araştırılması şeklinde olmalıdır. Bir diğer gözlemlenecek ve dikkat edilmesi gereken hareket ise çözülmeden sonra zemin hareketleridir. Bunlar yumuşama ve ilave oturmalarıdır. Çözülme sonucunda kaplama altındaki zeminde aşırı yumuşama ve kaplamanın patlaması meydana gelebilmektedir. Ayrıca donmuş zeminle temasta olan betonun bir kısmı da rötre olayının gecikmesine neden olarak betonun mukavemetini düşürdüğü ileri sürülür. Zemin suya doygun yer altı suyu akışı hızı donma olayını etkilemeyecek derece yavaş olduğu, ve arazi koşulları bu yöntemin kullanılması durumunda yandaki yapılara zarar vermeyecek durumda olduğu sürece bu yöntem kullanılabilir.

Kışın yer altı suyunun donması çatlaklarının genişlemesini ve drenaj yollarının kapanarak su basıncının artmasına neden olabilir. Su içeren tabakaların derinliği enjeksiyon yada basınçlı hava yöntemlerini pratik kılmadığı durumlarda, yüksek yer altı su seviyesinin pompa yardımıyla düşürülmesi halinde yakındaki yapıların zarar göreceği durumlarda, Tünel yada kuyu kazısı sırasında su patlamaları beklendiği durumlarda, zeminin tabakalı ve permabilitesinin enjeksiyon yöntemine olanak tanımadığı durumlarda, ve son olarak kara veya zeminin bu yöntemle olumsuz etkilenmeyeceği durumlarda, yapay zemin dondurması yönteminin seçmek doğru olacaktır.

Zeminlerde donma etkisinde;

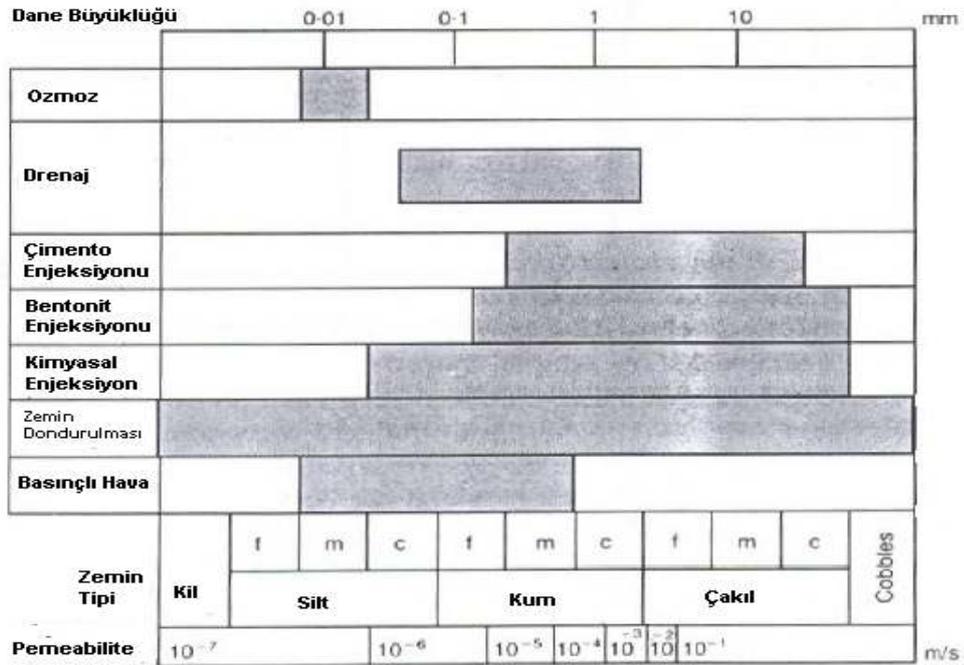
- Temiz kum ve çakıllarda çok az buz varken siltlerde fazla miktarda bulunmaktadır. Bunun nedeni ise kapilaritedir.
- Ayrıca düşük donma derecelerinde daha çok ve kalın buz mercekleri olduğu gözlemlenmiştir.
- Mümkün olduğu kadar araziye uymak
- Yarma ve toprak dolgu gereken yerlerde kot dengelemesini kar ve buz dolgu kullanarak yapmak.

- Geç donan veya yüksek akış hızı dolayısıyla hiç donmayan akarsu geçitlerini oluklu metal levhalardan yapılmış menfezlerle geçmek. Bu metal menfezler kış mevsimi sonunda yerinden çıkarılarak daha sonraki yol yapımları için muhafaza edilir.

Geçitlerinin işletme masrafının büyük bir kısmı, yolların karla kapanmasını engellemek için yapılan çalışmalara gittiğinden, güzergâh seçiminde mümkün olduğu kadar mevzii rüzgâr yönlerine paralel olmasına dikkat edilir.

Zemin dondurma yönteminin kullanılmasının pek çok avantajı vardır. Bunlardan birkaç tanesi;

- Zemine herhangi bir kimyasal madde katılmadığı için yüzey çevresine uzun süreli bir etkisi yoktur.
- Su izolasyonu ve statik dayanım kombinasyonudur.
- Yer altı suyunu geçirmez bir duvar oluşur.
- Her zemin tipi için kullanılabilir. (Şekil 5.2)



Şekil 5.2: Zemin tipine göre tatbik edilebilir zemin iyileştirme yöntemleri (Harris,1995)

- Yer altı suyunun kötü şartlarında çok etkili bir dayanma sistemidir.
- Donmuş duvarın kalınlığı sıcaklıkla kontrol edilebilir.

- Yılın her zamanı uygulanabilir.
- Donmuş zemin duvarı yüksek mukavemete sahiptir.

Belli bir su muhtevasına sahip donmuş zeminlerin ani dış yüklere karşı mukavemetleri donmamış haldeki mukavemetlerinden onlarca ve yüzlerce defa daha fazladır. Donmuş zeminin plastik akma özelliği göstermesinden dolayı uzun süreli yükler altında donmuş zeminin mukavemeti 5 ile 15 misli azalır fakat yinede donmamış hale oranla mukavemet çok daha yüksektir.

Donmuş zemin yüksek mukavemetinden dolayı yol için iyi bir temel teşkil eder. Yol yapımında bu avantajın kaybedilmemesi için de zeminin ısı dengesini korumak gerekir. Yarma ve toprak dolgu yapmaksızın, ulaşımaya elverişli bir geçit inşası için mümkün olduğu kadar araziye uymak, yarma ve toprak dolgu yapılması gerekli olduğu yerlerde kot dengelemesini kar ve buz dolgu kullanarak yapmak gerekir.

Donmuş zeminleri diğerlerinden ayıran en önemli fark, bünyedeki suyun aynı anda sıvı ve katı ( buz ) fazda bulunmasıdır. Su-buz oranı sıcaklık değişimlerine bağlı olmakla birlikte, çok düşük sıcaklık derecelerinde de bir miktar donmamış su zemin içinde bulunur. Kumlu zeminlerde 0 ile -0.5 °C, killi zeminlerde 0 ile -5 °C arasında suyun kolaylıkla faz değiştirmesi, zemin içindeki donmamış su ve buz oranına bağlıdır. Bu yüzden herhangi bir zeminde bu iki fazın sıcaklıkla değişimi, donmuş zeminin kayma mukavemetini etkiler. Sonuç olarak, kayma mukavemeti ve buna bağlı olarak deformasyon parametreleri zemin dondurma yöntemi ile iyileştirilebilir.

Wundram ve Hetzel'e göre su ile dolu olan akıcı kumun basınç mukavemeti;

- - 15°C de 140 kgf/cm<sup>2</sup>
- - 20 °C de 200 kgf/cm<sup>2</sup>

Zaeringer'e göre -15°C de dondurulmuş zeminlerin mukavemeti;

- Suya doymuş kumlarda 138 kgf/cm<sup>2</sup>
- Kumlu killerde 90 kgf/cm<sup>2</sup>
- Killerde 72 kgf/cm<sup>2</sup>

Değerlerine ulaşmaktadır.

- Donmuş zemin duvarı düşük permeabiliteye sahiptir.

Donmamış temiz kum ve çakıl karışımının permeabilitesi yaklaşık 1cm/sn (864m/gün) dir. Aynı zeminin permeabilitesi donma şartlarında sıfıra yaklaşır.

Zemin Dondurulması yönteminin dezavantajları ise;

- Karmaşık donma tesisatları gerektirir.
- Çok tabaklı zeminlerde duvarın hesabı ve tasarımı biraz zordur.
- Erime ve donma zeminlerin özellikle killi zeminlerin doğal yapısını bozar.
- Yer altı suyu akım hızı 2m/gün'ü geçtiği zaman uygulaması çok zordur.
- Ekonomik değildir. Sadece diğer yöntemlerin uygulanmasının uygun ve verimli olmadığı durumlarda ekonomiktir.
- Çok uzun zaman alır.
- Zeminin içinde tuzlu su olması donma işlemini zorlaştırır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Donmuş zemin mühendisliği yüzyıldan uzun zamandır kullanılmaktadır. Kullanıldığı alanlar dönemsel veya sürekli ardı ardına yıllar boyunca zemin sıcaklığının 0°C altında olduğu permafrost bölgeler ve zeminin suni şekilde donduğu yapısal uygulamalardır. Her iki alanda da ortak problem ise don kabarmasından meydana gelen deformasyonlardır.

2. bölümde geçici zemin stabilizasyonunu sağlamak için kullanılan yapay zemin dondurma yönteminin uygulamaları, uygulamayı etkileyen faktörlerden ve dondurma yönteminde karşılaşılan örneklerden bahsedilmiştir. 3. bölümde donmuş zeminin genel özellikleri, donma süreci, donmuş zeminin bileşenleri, permafrost zeminlerin özellikleri ve zeminin termal özelliklerinden bahsedilmiş olup, 4. bölümde ise donmuş zeminlerin mekanik özelliklerindeki değişim anlatılmaktadır. Son bölümde ise, 2004 yılında yapılan çalışma sonucunda elde edilen denklemlerin eşitlenmesiyle ortaya çıkan kırılma zamanı, kuru yoğunluk ve deformasyon ilişkisi ve aynı zamanda zemin dondurma yönteminin avantajları, dezavantajları ve uygulamaya yönelik karşılaşılabilecek durumlardan bahsedilmektedir.

Sonuç olarak,

- 1- Zemin dondurma yöntemi değişik zemin ve kaya ortamlarında kullanılabilen zemin iyileştirme yöntemi olduğu
- 2- Donmuş zeminin kayma mukavemetinin sıfırın altındaki sıcaklıklarda değiştiği ve kayma mukavemetinin sıcaklık azaldıkça arttığı
- 3- Deformasyon oranı artarken donmuş zeminin mukavemetinin de arttığı
- 4- Donmuş kilin basınç mukavemetinin deformasyon oranının artmasıyla, sıcaklığın düşmesiyle ve kuru yoğunluğun artmasıyla arttığı

5- Sıcaklık ve deformasyon oranının donmuş zeminin basınç mukavemetini etkileyen önemli faktörler olduğu, ama en önemli faktörün sıcaklık olduğu

6- Donmuş zeminlerin permeabilitesi düşük olduğu

7- Kilin kuru yoğunluğa bağlı olarak deformasyon oranı ve kırılma zamanı arasındaki ilişki kuru yoğunluk arttıkça, deformasyon oranı arttıkça kırılma zamanının da arttığı

görülmektedir.

## KAYNAKLAR

Akdeniz, N.F. “Artificial Ground Freezing and Effect of Frost Heave Deformations in vienna Subway” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006)

Andersland, O. B. , Alkire, B. D. (1973). “The Mechanical Behavior of Frozen Earth Materials Under High Pressure Triaxial Test Conditions.” (Geotechnique 22, No:3, sf.469-483 de çıkan makalenin tartışılması), *Geotechnique 23, No.1*, Sf.136-137.

Andersland, O. B. , Ladanyi, B. “Frozen Ground Engineering”, *John Wiley and Sons, New Jersey* (2004)

Andersland, O.B., and I.Al-Nouri. (1970). Time dependent strength behavior of frozen soils. *J.Soil Mec. Found. Div. ASCE 96* (SM4) Sf. 1249-65.

Anderson, D. M. , Tice, A. R. , Banin, A. (1973). “ The Water-Ice Phase Composition of Clay-Water Systems:1. The :Kaolinite-Water System” *Proceeding Soil Sci. Soc. Amer.* 37 No.6. Sf. 819-822

Anderson, D.M., and N.R. Morgenstern. (1973). Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: A review. In North Am. Contrib. 2nd Int. Conf. On Permafrost, Yakustsk, USSR. *Washington, D.C.:National Academy of Sciences*, Sf. 257-88

Arteau, J. (1984). Étude de la consolidation des sols gelés. *Ph.D. diss., École Polytechnique*, Montréal.

Aydan, Ö. , Ersen, A. (Haziran, 1993) “Yeraltı Suyunu Dondurma Yöntemi ve Bir Uygulaması”

Bates, R. E. , anda M. A. Bilello. (1966) “Defining the Cold Regions of The Northern Hemisphere.” *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Technical Report*.

Beskov, G. (1935) “ Soil Freezing And Frost Heaving With Special Application To Roads And Railroads.” Translated By J.O.Osterberg. Published By The Technological Institute, *Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A.*, November, 1947.

Bishop, A.W.(1973). The influence of an undrained change in stres on pore pressure in porous media of low compressibility. *Géotechnique 23(3)* Sf. 435-42

Bishop, A.W., and D.J. Henkel. (1962). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. London: **Edward Arnold**.

Black, T.J. (1967). A Test Apparatus For Frozen Soil İn Complex Stres. D. E. Thesis. Dissertation Abstracts. V.28:11(B), *Dartmouth College, University Microfilm Service No. 68-4375* Sf. 224

- Bourbonnais, J. (1984). Étude du comportement des sols gelés jusqu'aux températures cryogéniques. *Ph.D. diss., École Polytechnique*, Montréal.
- Brown, R.J.E., and W.O.Kupsch.(1974). Permafrost Terminology. *Natl. Res. Council. Can.,tech.* Memo.
- Brown, R.J.E., G.H. Johnston, J.R.Mackay, N.R.Morgenstern, and W.W. Shilts. (1981). Permafrost distribution and terrain characteristics. *Chap. 2 in Permafrost Engineering Design and Construction*, ed. G.H.Johnston. New York:Wiley, Sf.31-72
- Burt, T.P., and P.J. Williams. (1976). Hydraulic conductivity of frozen soils. *Earth Surf. Processes* 1(4) Sf. 349-60
- Chamberlain, E.,C. Groves, and R. Perham. (1972). The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions. *Géotechnique* 22(3) Sf. 469-83.
- Czudek, T.,and J.Demek. (1970). Thermokarst in Siberiaand its influence on the development of lowland relief. *Quat.Res.*1(1) Sf. 103-20
- Dillon, H. B. , Andersland, O. B. (1967). “Deformation Rates Of Poycrystalline Ice.” *Proceedings of the International Conference on Physics of Snow and Ice. Vol.1, Part.1. Sapporo, Japan: The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.* Sf. 313-327
- Ersoy, T. “Donmuş Zeminin Kayma Mukavemeti” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1976)
- Ersoy, T. “Kış Geçitleri ve Buz Köprülerinin Yapımını ve Ortaya Çıkan Mühendislik Problemleri.” *Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi.*
- Everdingen, Robert van, 2002, Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms, Boulder, CO: *National Snow and Ice Data Center, World Data Center for Glaciology*
- Goughnour, R. R. , Andersland, O. B. (1968). “ Mechanical Properties of a Sand-Ice System.” *Journal, Soil Mechanics and Foundation Division, vol.94, No:SM4, American Society of Civil Engineers.* Sf. 923-950
- Haipeng Li, Yuanlin Zhu, Junbing Zhang, Chuannian Lin, (2004) “Effects of Temperature, Strain Rate and Dry Density on Compressive Strenght of Saturated Frozen Clay.”
- Harris, F.C., (1983). Ground Engineering Equipment and Methods, Granada Technical Books, Granada Publishing Ltd. *London.*
- Harris, J. , (1995), Ground Freezing in Practice, Thomas Telford Ltd, *London*
- Hillel, D. (1980) Applications of soil Physics.*New York:* Academic Press.

- Jones, S. J., and V.R. Parameswaran (1983). Deformation behavior of frozen sand-ice materials under triaxial compression. In Proc. 4th Int. Conf. On Permafrost, Fairbanks, Alaska. Washington, D.C.: *National Academy Press*, vol.1, Sf. 560-65
- Jumikis, A.R.,(1977). Thermal Geotechnics, Rutgers University Press, *New Brunswick, New Jersey*.
- Kaya, Z. “Temel Zemini İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamaya Yönelik İki Proje Çalışması” Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2001)
- Klein, J. (1979). The application of finite elements to creep problems in ground freezing. *In Proc. 3rd Int. Conf. On Numerical Methods in Geomechanics, ed. W. Wittke*. Vol.1, Sf. 493-502
- Koç, M. “Artificial Ground Freezing and Effect of Freezing Speed Over Frost Heave” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006)
- Ladanyi, B. (1985). Stress transfer mechanism in frozen soils. Invited lecture. *In 10th Canadian Congress on Applied Mechanics*, London, Ontario, Canada, vol.1, Sf. 11-15
- Lenzini, P.A. And Bruss, B.,1975. Ground Stabilization: *Review Of Grouting and Freezing Techniques for Underground Openings, Department of Transportation Report, no: FRAORD and D 75-95*,
- Lunardini, V.J.,R. Berg, R. McGaw, T.F. Jenkins, Y. Nakano, J.L. Oliphant, K. O’Neill, and A.R.Tice. (1982). Mobility of water in frozen soils. In Proc. Army Science Conf. June 15-18, 1982. *U.S.Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Int. Rep.* (NTIS,AD A117321).
- Nersesova, Z. A. , Tsytoovich, N. A. (1963). “ Unfrozen Water in Frozen Soils.” Proceedings, *Permafrost International Conference. National Academy of Science*, Washington, D.C. Sf. 230-234
- Özkan, H. (2006) “Enjeksiyon Yöntemleri ve Uygulamaları”
- Phukan, A., (1985), Frozen Ground Engineering, *Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall*.
- Powderham.A.J. Ve Diğ., 2001. Ground Movement Control For Tunnel Jacking Under Railway, *Jacked Tunnel Sections of I-93/I-90 Interchange Central Artery/Tunnel Project*, Boston, MA, A. J. Powderham, Mott MacDonald Group, Croydon, UK ; S Taylor, Hatch-Mott MacDonald, Boston, MA;A Hitchcock, University of Southampton, Southampton,UK; P M Rice, Parsons Brinckerhoff, Boston, MA.
- Prize, L.W.(1972). The Periglacial Environment, Permafrost and Man. Resource Pap. 14 Washington, D.C. *Association of American Geographers, Committee on Cologe Geography*
- Ruckli, R. (1950). Der Frost im Baugrund. Wien, *Austria: Springer-Verlag*.

Sayles, F.H. (1973). Triaxial and creep tests on frozen Ottawa sand. In North Am. Contrib., *2nd Int. Conf. On Permafrost, Yakutsk, USSR. Washington, D.C.: National Academy of Sciences*, Sf. 384-91.

Simonsen, E.R., A. H. Jones, and S.J. Green. (1974). High pressure mechanical properties of three frozen materials. *In Proc. 4th Int. Conf. On High Pressure, Kyoto, Japan*, vol.1, Sf. 115-21

Stoss, K. And J. Valk, (1979) "Uses And Limitations Of Ground Freezing With Liquid Nitrogen. In Ground Freezing" *Developments in Geotechnical Engineering*. New York, Elsevier, vol.26, Sf.485-494. Eng. Geol.13 (1979)

Toğrol, E. "Zemin Mekaniği ve Zemin Yapıları" *Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi*.

Tsytovich, N.A.(1957). "The Fundamentals of Frozen Ground Mechanics (New Investigations)". *Proceeding of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London vol.1. Sf. 116-119

Tsytovich, N. A., (1958). Bases and Foundations on Frozen Soil, Special Report No.58 Washington, D.C.: *Highway Research Board, National Academy of Sciences, 1960. National Research Council Publication*

Vyalov, S.S., (1962), The Strength And Creep Of Frozen Soils And Calculations For Ice-Retaining Structures, *CRREL, Moscow*

Wenbing Yu, Yuanming Lai, Yuanlin Zhu, Haipeng Li, Jianming Zhang, Xuefu Zhang, Shujuan Zhang. (2003) "In Situ Determination of Mechanic Properties of Frozen Soils With The Pressuremeter."

Williams, P.J. (1963). "Specific Heats and Unfrozen Water Content of Frozen Soils." *Proceedings of the 1st Canadian Conference on Permafrost. National Research Council*, Canada, Technical Memorandum No.76.

Wissa, A.E.Z. (1969). Pore pressure measurement in saturated stiff soils. J. Soil Mech. Found. Div. *ASCE 95*(SM4)

Yong, R.N. (1963). "Research on Fundamental Properties and Characteristics of Frozen Soils." *Proceedings of the 1st Canadian Conference on Permafrost, Technical Memo No.76*, National Research Council of Canada,

Soilfreeze – Shoring, Groundwater Cutoff, Environmental, [online], <http://www.cryocell.com/CivilApp.html> (Ziyaret Tarihi: 10.07.2009)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 yılında İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimlerini İzmit'te tamamladı. 2002 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2008 yılından itibaren Kocaeli Büyükşehir Belediyesinde çalışmaktadır.