<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİNLERDE DONMA-ÇÖZÜLME OLAYININ DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem IŞIK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Mayıs 2014

<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİNLERDE DONMA-ÇÖZÜLME OLAYININ DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem IŞIK 501111318

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep İYİSAN

Mayıs 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111318 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Adem IŞIK ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözülme Olayının Deneysel İncelenmesi" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	Doç. Dr. Recep İYİSAN İstanbul Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	Doç. Dr. Ahmet Oğuz TAN İstanbul Teknik Üniversitesi	
	Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi :18 Nisan 2014Savunma Tarihi :27 Mayıs 2014

iv

Oğlum Yusuf'a,

vi

ÖNSÖZ

Soğuk iklim şartlarının hâkim olduğu bölgelerde zeminler yılda en az birkaç kez donma-çözülme olayına maruz kalırlar. Donma-çözülme olayı zemin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Donma-çözülmenin zemin parametreleri üzerindeki etkisinin incelenmesi geoteknik mühendisliğinin çalışma konuları içerisinde yer almaktadır. Donma olayı özellikle yol, hava alanı ve boru hattı dolgularının tasarımında dikkate alınmaktadır.

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi ve donma-çözülme sonrası davranışının incelenmesi için laboratuvarda donma-çözülme deneyleri yapılmaktadır. Bu çalışmada donma-çözülme deneyinde edilen donma kabarma hızı ile donmaçözülme sonrası oluşacak mukavemet kayıplarının zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada farklı endeks özelliklere sahip zemin numuneleri üzerinde donmaçözülme deneyleri yapılmış ve donma kabarma hızları belirlenmiştir. Ayrıca donma olayının meydana getirdiği mukavemet kayıplarının incelenmesi için donma-çözülme öncesi ve sonrası California Bearing Ratio (CBR) deneyi yapılmıştır.

Yüksek lisans tezimin hazırlanma esnasında bana destek olan Sayın hocam Doç. Dr. Recep İYİSAN'a, araştırma görevlisi Sayın Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, laboratuvar şefi Sayın İsmail CANTEKİN'e ve donma-çözülme deney aletinin kullanımı için STFA Grubuna, ayrıca bana inanan ve güvenen sevgili eşim Büşra IŞIK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2014

Adem IŞIK İnş. Müh.

viii

İÇİNDEKİLER

<u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
CİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam	
2. ZEMİNLERDE DONMA OLAYI VE DON KABARMASI	5
2.1 Zeminlerin Donma Hassaslığının Belirlenmesi	7
2.1.1 Dane çapı dağılımına göre donma hassaslığı	7
2.1.2 Donma kabarma hızına göre hassaslık	9
2.2 Donma Kabarma Hızının Deneysel Olarak Belirlenmesi	11
2.2.1 Laboratuvar deneyleri	
2.2.2 Arazi deneyleri	
2.3 Donma Kabarmasını Etkileyen Faktörler	
2.3.1 İnce dane oranı	14
2.3.2 Sıcaklık	17
2.3.3 Sürşarj yükü	
2.4 Zeminlerin Donma-Çözülme Sonrası Davranışı	
2.4.1 Donma-çözülmenin zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisi	
2.4.1.1 Permeabiliteye etkisi	
2.4.1.2 Boşluk oranına etkisi	
2.4.1.3 Kıvam limitlerine etkisi	
2.4.2 Donma-çözülmenin zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi	
2.4.2.1 Mukavemetine etkisi	
2.4.2.2 Konsolidasyona etkisi	
3. MALZEME VE YÖNTEM	
3.1 Malzeme	
3.2 Numunelerin Hazırlama Yöntemi	
3.2.1 Standart Proktor deneyi	
3.3 Deney Yöntemi	
3.3.1 Donma-çözülme deneyi	
3.3.2 CBR deneyi	
3.4 Donma-Çözülme Sonrası İnceleme Yöntemi	
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY SONUÇLARIN	
DEGERLENDÍRÍLMESÍ	
4.1 Donma Çözülme Deney Sonuçları	
4.3 CBR Deney Sonuçları	

4.4 Donma Çözülme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	
4.4.1 Donma kabarma hızlarının kıvam limitleri ve	kompaksiyon
parametreleri arasındaki ilişki	
4.5 CBR Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	
4.6 Genel Değerlendirme	64
5. SONUCLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
EKLER	
EK A Numunelere Ait Tüm Deney Sonuçları	
EK B. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi ve Numunelerin	Dane Çapı
Dağılım Eğrileri	
EK C. Standart Proktor Deney Sonucları	
EK D. Donma-Cözülme ve CBR Deney Sonuçları	
ÖZGECMİŞ	

KISALTMALAR

: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
: California Taşıma Oranı
: Donma-Çözülme Öncesi CBR
: Donma-Çözülme Sonrası CBR
: Düşük Plastisiteli Kil
: Yüksek Plastisiteli Kil
: Donma Çözülme
: Donma Kabarma Hızı
: İnce Dane Oranı
: Kil Yüzdesi
: Düşük Plastisiteli Silt
: Yüksek Plastisiteli Silt
: Yüksek Plastisiteli Organik Zemin
: Düşük Plastisiteli Organik Zemin
: CBR Değişimi

xii

SEMBOL LÍSTESÍ

D	: Dane Çapı
e	: Boşluk Oranı
Ν	: Donma-çözülme çevrim sayısı
n	: Porozite
Ykmaks	: Maksimum birim hacim ağırlık
Wopt	: Optimum su muhtevası
WL	: Likit Limit
WP	: Plastik Limit
WS	: Deney sonu su muhtevası
I _P	: Plastisite Indisi
Gs	: Dane özgül ağırlık
c _v	: Konsolidasyon katsayısı
n	: Deney sayısı
r	: Korelasyon katsayıs
t	: Test istatistiği değeri
t _c	: Kritik cetvel değeri

xiv

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Cizelge 2.1 : Zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri	9
Cizelge 2.2 : Laboratuvar deneylerine göre donmaya karşı hassaslık	
sınıflandırılması	10
Cizelge 3.1 : Deney numunelerinin geoteknik özellikleri.	34
Cizelge 4.1 : Zemin numunelerinin donma kabarma hızları ile ilişkilerinin	
incelendiği zemin özellikleri	44
Cizelge 4.2 : Numunelerin kıvam limitleri ve donma kabarma hızları	46
Cizelge 4.3 : Numunelerin donmaya karşı hassaslığı (Freitag ve McFadden, 199	97) 48
Cizelge 4.4 : Doygun ve doygun olmayan numunelerin donma-cözülme öncesi	ve
sonrası CBR değerleri	51
Cizelge 4.5 : Donma kabarma hızları ile ilişkilendirilen zemin parametreleri	
arasındaki iliski düzevi	65
Cizelge 4.6 : Mukavemet kavıpları ile iliskilendirilen zemin parametreleri arası	ndaki
iliski düzevi	66
Çizelge A.1 : Numunelere ait tüm deney sonuçları	73

xvi

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sayfa</u>

Şekil 2.1 : Donma kabarmasının şematik olarak gösterimi	6
Şekil 2.2 : Dane çapı dağılımına göre donma hassaslığın belirlenmesi	8
Şekil 2.3 : Donma kabarma hızlarına göre hassaslık sınıflandırılması	11
Şekil 2.4 : Donma çözülme deney şematiği	13
Şekil 2.5 : STÖR96 deney aleti.	14
Şekil 2.6 : Donma kabarma hızları ile ince dane oranı değişimi	15
Şekil 2.7 : Donma kabarma hızları ile ince dane oranın değişimi	16
Şekil 2.8 : Donma kabarma miktari ile farklı kil minerolojilerine ait 0.02 mm dar	ne
çapından küçük danelerin yüzedesi arasındaki ilişki	16
Şekil 2.9 : Donma derinliği ile sıcaklık değişimi.	17
Şekil 2.10 : Sürşarj yükünün ve dane çapı 0.02 mm'den küçük danelerin ağırlıkçı	a
yüzdesinin donma kabarma miktarları ile değişimi	18
Şekil 2.11 : Farklı sürşarj yükü etkisindeki zeminin donma kabarmasının zamanla	a
değişimi	19
Şekil 2.12 : Donma-çözülme çevriminin permeabiliteye etkisi	21
Şekil 2.13 : Donma-çözülme öncesi ve sonrası efektif gerilme ile permeabilite	
arasındaki değişim	21
Şekil 2.14 : Donma-çözülme öncesi ve sonrası permeabilite katsayısının sürşarj y	<i>y</i> ükü
ile değişimi	22
Şekil 2.15 : Gevşek ve sıkı zeminlerin boşluk oranları ile donma-çözülme çevrim	1
sayısı arasındaki ilişki	23
Şekil 2.16 : Donma-çözülme çevrim sayısının likitlik indeksi ile değişimi	24
Şekil 2.17 : Farklı donma-çözülme çevrim sayılarında ve hücre basıncı altındaki	_
zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı.	26
Şekil 2.18 : Donma-çözülme çevrim sayısı ile kohezyon arasındakı ilişki	27
Şekil 2.19 : Farklı plastisitedeki numunelerin aynı hücre basıncı altında donma-	• •
çözülme çevrim sayıları ile kayma mukavemeti değişimi	28
Şekil 2.20 : Donma-çözülme çevrimlerine ait gerilme-eksenel deformasyon egril	eri
	29
Sekii 2.21 : Konsondasyon katsayisi ne donma-çozulme çevrim saynarı arasında	.KI 20
Sakil 3.1 • Numunalarin plastisite kartındaki varlari	30
Sakil 3.2 • Numunelerin suva dovgun hale getirilmesi	35
Sekil 3.3 • Numunelerin Standart Proktor Deney Sonuclari	35
Sekil 3.4 · Maksimum kuru hirim hacim ağırlık-ontimum su muhtevası ilişkişi	30
Sekil 3.5 : Kapalı sistem donma kabarma denevi	38
Sekil 3.6 : Donma cözülme denevi sınır sıcaklık kosulları	38
Sekil 3.7 : Donma kabarması-zaman ilişkişi	39
Sekil 3.8 : CBR denev aleti (İTÜ)	40
Sekil 3.9 : No.17 numunesine ait CBR denev sonucu	41
,	-

Şekil 4.1 : No 3 numunesine ait donma-çözülme deney sonucu	j
Şekil 4.2 : Bu çalışmada kullanılan numunelerin donma hassaslığı (Kaplar, 1974).47	1
Şekil 4.3 : Bu çalışmada kullanılan numunelerin donma hassaslığı (Freitag ve	
McFadden, 1997))
Şekil 4.4 : No.3 numunesine ait donma-çözülme öncesi ve sonrası kuvvet-	
penetrasyon eğrileri)
Şekil 4.5 : Donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerlerindeki değişim	
Şekil 4.6 : DKH ile w/w _L arasındaki ilişki	ŀ
Şekil 4.7 : Düşük plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile	
maksimum kuru birim hacim ağırlık (y _{kmaks}) arasındaki ilişki54	ŀ
Şekil 4.8 : Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile	
optimum su muhtevaları (w _{opt})arasındaki ilişki	j
Şekil 4.9 : Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile boşluk	
oranı (e) arasındaki ilişki55	j
Şekil 4.10 : Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile	
porozite (n) arasındaki ilişki)
Şekil 4.11: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile	
maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ _{kmaks)} arasındaki ilişki56)
Şekil 4.12: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile ile	_
optimum su muhtevaları (w _{opt})arasındaki ilişki	/
Şekil 4.13: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile boşluk	_
oranı (e) arasındakı ılışkı	/
Şekil 4.14: Yüksek plastisiteli zemin grubundakı donma kabarma hizları ile porozite	
(n) arasındakı ilişki	;
Şekil 4.15: Suya doygun numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değeri ile likit	
$\begin{array}{c} \text{Imit arasındaki ilişki} \\ \text{CDD} 1 \\ \text{CDD} $)
Sekii 4.16: Donma-çozulme sonrasi CBR degeri ile plastisite indisi arasındaki ilişki	,
Salvil 4 17. Davaun almayan numunalarin danma ağırılma ganraşı CDD dağışım	'
Şekii 4.17: Doygun olmayan numunelerin donma-çozunne sonrası CBR değişim	`
Solvil 4 18. Dovgun olmayan numunalarin donma cözülme sonrası CBR değişim	,
miktarı ile plastik limit araşındaki ilişki	
Sekil 4 19. Doygun olmayan numunelerin donma-cözülme sonrası CBR değişim	•
miktarı ile plastisite indisi araşındaki ilişki	
Sekil 4 20. Dovgun olmayan numunelerin donma-cözülme sonrası CBR değişim	•
miktarı ile optimum su muhtevası arasındaki iliski)
Sekil 4.21: Dovgun haldeki numunelerin CBR değisim miktarı ile likit limit	
arasındaki iliski)
Sekil 4.22: Dovgun haldeki numunelerin CBR değisim miktarı ile plastik limit	
arasındaki iliski	;
Şekil 4.23: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile plastisite indisi	
arasındaki ilişki	;
Şekil 4.24: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile optimum su	
muhtevası arasındaki ilişki	ŀ
Şekil B.1: 1 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	j
Şekil B.2 : 2 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	5
Şekil B.3 : 3 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	1
Şekil B.4 : 4 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	3
Şekil B.5 : 5 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi)
Şekil B.6 : 6 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi)

Şekil B.7 : 7 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	81
Şekil B.8: 8 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	82
Şekil B.9: 9 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	83
Şekil B.10: 10 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	84
Şekil B.11: 11 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	85
Şekil B.12: 12 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	86
Şekil B.13: 14 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	87
Şekil B.14 : 15 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	88
Şekil B.15: 16 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	89
Şekil B.16: 17 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	90
Şekil B.17: 18 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	91
Şekil B.18 : 20 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	92
Şekil B.19: 21 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	93
Şekil B.20 : 22 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi	94
Şekil C.1: 1 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	96
Şekil C.2: 2 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	96
Şekil C.3: 3 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	97
Şekil C.4: 4 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	97
Şekil C.5 : 5 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	98
Şekil C.6: 6 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	98
Şekil C.7: 7 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	99
Şekil C.8: 8 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	99
Şekil C.9: 9 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	100
Şekil C.10: 10 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	100
Şekil C.11: 11 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	101
Şekil C.12: 12 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	101
Şekil C.13 : 14 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	102
Şekil C.14 : 15 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	102
Şekil C.15 : 16 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	103
Şekil C.16: 17 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	103
Şekil C.17 : 18 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	104
Şekil C.18 : 20 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	104
Şekil C.19 : 21 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	105
Şekil C.20 : 22 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu	105
Şekil D.1 : 1 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	107
Şekil D.2 : 1 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları	107
Şekil D.3 : 2 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	108
Şekil D.4 : 2 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları	108
Şekil D.5 : 3 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	109
Şekil D.6 : 3 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları	109
Şekil D.7 : 4 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	110
Şekil D.8 : 4 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları	110
Sekil D.9 : 5 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	111
Şekil D.10 : 5 Nolu numuneye alt CBK deney sonuçları	111
Şekil D.11 : 6 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	112
Sekil D.12 : 0 Nolu numuneye alt UBK deney sonuçları.	112
Sekil D.13: / Nolu numuneye alt donma-çozulme deney sonucu	113
Sekil D.14 : / Nolu numuneye alt UBK deney sonuçları.	113
Sekii D.15 : 8 Nolu numuneye alt donma-çozulme deney sonucu	114
Şekii D.16 : 8 Nolu numuneye alt CBK deney sonuçları	114

Şekil D.17 : 9 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	115
Şekil D.18 : 9 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	115
Şekil D.19: 10 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	116
Şekil D.20 : 10 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	116
Şekil D.21 : 11 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	117
Şekil D.22 : 11 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	117
Şekil D.23 : 12 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	118
Şekil D.24 : 12 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	118
Şekil D.25 : 14 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	119
Şekil D.26 : 14 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	119
Şekil D.27 : 15 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	120
Şekil D.28 : 15 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	120
Şekil D.29 : 16 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	121
Şekil D.30 : 16 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	121
Şekil D.31 : 17 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	122
Şekil D.32 : 17 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	122
Şekil D.33 : 18 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	123
Şekil D.34 : 18 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	123
Şekil D.35 : 20 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	124
Şekil D.36 : 20 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	124
Şekil D.37 : 21 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	125
Şekil D.38 : 21 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	125
Şekil D.39 : 22 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu	126
Şekil D.40 : 22 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.	126

SIKIŞTIRILMIŞ ZEMİNLERDE DONMA-ÇÖZÜLME OLAYININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Soğuk iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerdeki zeminler, mevsimsel sıcaklık farklılıklarından dolayı yılda birkaç kez donma-çözülmeye maruz kalmaktadır. Zeminler donma-cözülme etkisi altında yapısal olarak değisime uğradıkları için fiziksel ve mekanik özelliklerinde de değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler iklim şartlarına, zemin türüne ve özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Yani zeminlerde donma-çözülme sonrası oluşacak fiziksel ve mekanik özelliklerin zemin mühendisliği ve yol muhendisliği açısından önemi büyüktür. Bu yüzden soğuk iklim bölgelerinde yapılan mühendislik tasarımlarında donma-çözülmenin zemin üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Donma olayının gerçekleşmesi ve donma-çözülmenin önemli değişimler meydana getirmesi için zeminin donmaya karşı hassas olması, zemin ortamında yeterli su bulunması ve ortamın donma sıcaklığında olması gerekmektedir. Ayrıca zeminlerde donma olayı esnasında hacimsel olarak artıştan dolayı donma kabarması meydana gelmektedir. Zeminlerde donma kabarması zemin cinsi, dane dağılımı, minerolojik yapısı, ince dane oranı, ortamdaki su miktarı, sürsari yükü ve sıcaklık gibi bircok faktörden etkilenmektedir. Donma kabarması hem laboratuvar hemde arazide yapılan deneyler ile belirlenebilmektedir. Donma kabarması laboratuvarda yapılan donma-çözülme deneyi ile incelenmekte ve bu deneylerle zeminlerin donmaya karşı hassas olup olmadığı belirlenmektedir. Zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi için birçok sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir.

Bu çalışmada sıkıştırılmış 20 adet zemin numunesinin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde donmaçözülme deneyleri ve donma-çözülme sonrası numuneler üzerinde CBR deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ile zeminin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda donma kabarma hızını, likit limit, plastik limit, plastisite indisi, deney sonu su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, boşluk oranı ve poroziteve bağlı olarak tahmin edebilmek icin korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir. Bu amaçla farklı numuneler üzerinde yapılan donma-çözülme deneyi sonucunda belirlenen donma kabarmasının artan deney sonu su muhtevasının likit limite oranı ile artığı gözlenmiştir. Ayrıca düşük ve yüksek plastisiteli diye iki ayrı gruba göre belirlenen donma kabarma hızları ile maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası ve boşluk oranı arasındaki ilişki incelenmiş ve sonuç olarak maksimum kuru birim hacim ağırlık artıkça donma kabarma hızlarının düştüğü ancak optimum su muhtevası ve boşluk oranı değerlerinin artması durumunda ise donma kabarma hızlarının arttığı belirlenmiştir.

Donma-çözülme deneyi sonucunda elde edilen donma kabarma hızı değeri ile artan likit limit, plastik limit ve plastisite indisi arasında bir ilişki belirlenememiş ve sonuç olarak donma kabarma hızının daha çok siltli numunelerde daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında zemin numunelerinin donma-çözülme sonrası davranışı belirlemek için numuneler üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca doygun halde hazırlanan numuneler üzerinde donma-çözülme sonrası CBR deneyi yapılarak doygun durumdaki sonuçlar ile doygun olmayan durumdaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. CBR deneyleri sonucunda sırasıyla donma-çözülme öncesi, donma-çözülme sonrası ve doygun halde donma-çözülme sonrası CBR değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Donma-çözülme öncesi ve sonrasına göre belirlenen CBR değerlerindeki değişim miktarları ile zemin numunelerinin likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası gibi özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Sonuç olarak CBR değerlerindeki değişim miktarları artan likit limit, plastik limit, plastik limit, plastisi indisi ve optimum su muhtevası gibi muhtevası ile artmıştır.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FREEZE AND THAW ON COMPACTED SOILS

SUMMARY

In cold regions, soils are exposed to freezing and thawing cycles which are important in geotechnical engineering. Most of the engineering properties of soil are affected by freezing and thawing period. Protection against frost action of a man-made fill deposits are essential for transportation road construction projects in cold regions. These soils are exposed to at least one freezing-thawing cycle every year in seasonally frozen area. The freezing and thawing process would change the structure and arrangement of soil particles and the mechanical properties of soil. For instance; strength, permeability and compressibility of soil could be changed considerably due to frost action. These changes depend on climate conditions, soil types and properties. Cold region engineers must take into account of effects of freezing and thawing process on soil properties. Damage due to frost action is essentially caused by the presence of ice lenses in soils. The formation of ice lenses requires a frost susceptible soil, a water supply, and subfreezing temperatures. In these conditions, for assessments of the frost susceptibility of soils are important to understand behaviour of soils during frost action.

There are two phenomena about frost heave how occurs in soils. The first one which is early consideration is based on volume extension of water. The other is based on ice lenses that result from water migration through the soil voids toward the freezing front. In geotechnical considerations, frost heave results from ground freezing that Frost heave is a very important issue in design and occurs in cold region. construction throughout cold regions. Frost heave causes costly damage to roads, building foundations, airfields and pipelines. Frost heave is effected by most factor which are soil type, particle size distribution, minerology, the ratio of fine grained, availability of water, overburden pressure and tempeature gradient. Frost heave can be determined either laboratory or in-situ test. Also frost susceptibility of soils is determined by these tests. The frost heave common geotechnical problem in cold regions is typically observed in fine-grained soils. When the soil is fully frozen the volume of water, which is the between soil particles, increases approximately by 9% and then cracks are occurred in the soil. The strength of the soil decreases as the size and number of cracks increase. After winter seasons shear strength and stability of the soil generally are affected negatively, which is defined as thaw weakening.

Frost susceptibility of soils which show us the effect of freezing and thawin process on soils is determined with classification method. There are three estimating levels for identification of frost susceptibility of soils. Level I is primarily based on the percentage of soil finer than a specified particle size commonly 0.075 mm or 0.02 mm. Level II classification method is based on grain size distribution, vater retention capacity, or minerology such as Atterberg limits and clay contents. Level III is based on dirct observations of frost heaving in the laboratory or in the field. The effect of freezing-thawing on engineering properties of soils varies by not only the soil type but also the local climate and site conditions . To see the effect of freeze and thaw weakening, a susceptible soil type, pore water in the porous soil media, and low and high temperature degrees for freezing and thawing cycle is required at the same time. While the grain size distribution, permeability and capillarity are important in the soil type, water content and ground water level verifies the presence of water in the pores of the soil. Furthermore, the density, degree of compaction, and overburden pressure may also illustrate the local site conditions. In geotechnical considerations, frost heave resulting from ground freezing is a very important issue in designing and construction in cold regions. It causes costly damage to roads, building foundations, airfields and pipelines. Many studies have been performed to predict and prevent frost heave in designing structures. Frost-susceptibility of the subgrade layer plays an important role on the selection of a soil material for a fill site.

In this study, frost susceptibility and freezing and thawing weakening of 20 compacted soils which have different geotechnical properties are determined in laboratory. The soil samples are compacted their optimum water content by using standart Proktor energy. Frost heave and CBR test are conducted on soil samples for determination of freeze and thaw behaviour of soils. After tests the frost heave rate and reduction of CBR value have been associated with geotechnical properties of soil samples such as liquid limits, plastic limitsi plasticity index, optimum water content, maximum dry unit weight, void ratio and porozite.

Frost susceptibility of soils was investigated by using frost heave test which conducted according to ASTM D5918. In this test, assuming that no source of water was available during the freezing process except originally kept in the voids of the soil, a closed system was used. In a cold chamber two freeze and thaw cycles were conducted on the samples lasting totally 120 hours at temperatures varying between -12° C and $+12^{\circ}$ C as suggested by ASTM D5918. To observe both the amounts of frost heaving during freezing and settlements at thawing processes, the vertical displacements were observed by 0.01 mm precision micrometers attached on the top of a 3.2 kN/m2 surcharge load placed on the soil. The frost heave versus time of sample was ploted after the test. Frost heave rates were determined at initial 8 hours intervals of the freezing periods. Comparing the rates heave rate potential of the soils were generally determined by second freeze-thaw cycle. After the test, an average value of the final moisture content of the soil sample was determined on specimens.

Thaw weakening susceptibility of the compacted soil samples prepared at maximum dry unit weight and optimum water content were also determined by comparing their California Bearing Ratio (CBR) results performed before the saturation process and after saturation and the freeze and thaw process. The dead load acting at the top of the soil sample in the CBR mold was same as the freeze and thaw test. During the test the vertical loads were collected while a piston with a 4.96 cm in diameter is penetrating into the specimen at a uniform rate of 1.27 mm/min (ASTM D1883).

To utilize for practice objectives frost heave and reduction of CBR value of soil samples which have different geotechnical properties have been associated with their index properties. For this purpose frost heave rate that determined after the tests increase with increasing the rate of final water content to liquid limit. Moreover, we know that frost susceptibility of soils differ from its plasticity in the literature. Therefore, frost heave rate has assessed as two group of soil samples which are low and high plasticity group. In this case the frost heave rate of soil samples has been associated with maximum dry unit weight, optimum water content, void ratio and porozite. The result of tests show us when maximum dry unit weight of soil samples is higher the frost heave rate has become lower value for either low plasticity or high plasticity soils samples, but frost heave rate increases with the increasing the optimum water content, void ratio and porozite. Also it could not be directly associated between the frost heave rate and liquid limit or plasticity index.

In the scope of this study, CBR tests were performed on soil samples before and after freezing and thawing process in order to determine freeze and thaw behaviour of soils. Also the soil samples were saturated and subjected to freeze and thaw process. CBR tests were conducted after freeze and thaw process of saturated soil samples for assessment of effect of water on soil in freezing and thawing conditions. The results of CBR tests it have seen that after freeze and thaw process the CBR values mostly effected by saturated conditions. In unsaturated conditions that prepared optimum water content by using standard Proktor energy effects of freeze and thaw on soil samples less than saturated conditions. After freeze and thaw process soil samples lost their bearing capacity that determined CBR test. Before and after freeze and thaw process the reduction of CBR value determined. The reduction of CBR value has been associated with geotechnical properties of soil which are liquid limit, plastic limit, plasticity index and optimum water content. The results of tests shown that the reduction of CBR value increase with increasing liquid limit, plastic limit, plasticity index and optimum water content in saturated and unsaturated conditions. CBR values for all the samples illustrated a reduction in the range of 21% and 86% after freeze and thaw processes. It was observed that the maximum reduction in the CBR value was belongs to the soil which has the highest liquid limit value because of its high water retention capacity.

1. GİRİŞ

Donan zeminlerde donma olayı nedeniyle oluşan kabarmalar ve oluşan taşıma gücü kayıpları geoteknik mühendisliğinin araştırma konularında kapsamlı olarak yer almaktadır. Yeryüzünün önemli bir kısmı soğuk bölgelerden oluştuğu için buralardaki zeminler donma olayından olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Bu yüzden donma olayının zeminler üzerindeki etkileri ve önlemleri değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Zeminler donma olayı sırasında donmuş, donmakta olan ve donmamış bölge olarak üç bölgeden oluşur. Donma olayı esnasında bünyesinde bulunan su kapileritenin de etkisi ile donmamış bölgeden donan bölgeye doğru hareket eder ve donarak buz mercekleri oluşturur. Donan bölgedeki zemin tabakasında oluşan buz mercekleri zeminlerde hacimsel artış meydana getirecek ve dolayısıyla zeminde kabarmalar meydana gelecektir. Bu kabarmalar zemin yapılarına büyük zararlar vermektedir. Geoteknik mühendisliği açısından bakıldığında dolgular ve temel zeminleri bu durumdan büyük ölçüde etkilenmekte ve donma olayı sonucunda zeminlerde meydana gelen kabarmalar büyük deformasyonlara yol açmaktadır. Oluşan bu deformasyonlar ortam şartlarına bağlı olarak yalnızca donmaya karşı hassas olan zeminlerde meydana gelmektedir. Zeminlerin donma olayından etkilenmesi ve bünyesinde yapısal olarak önemli değişikliklerin oluşması için donmaya karşı hassas bir zemin, donma sıcaklığı ve ortamda yeterli miktarda su bulunması gerekmektedir. Deformasyonlar sonucu oluşan yapısal değişiklikler zeminlerin mukavemet parametrelerini etkilemektedir. Oluşan bu deformasyonlar zeminin ortam şartlarına, fiziki durumuna ve üzerilerindeki yüke bağlı olup bu koşullar doğrultusunda sınıflandırılır. Sınıflandırmada ilk olarak Casagrande (1932) ve Beskow (1935) tarafından zeminlerin donma-çözülme sonrası davranışı ve zeminlerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için zeminin dane dağılımına ve minerolojisine bakılmıştır. Günümüzde ise zeminin donma-çözülme sonrası davranışını ve donma hassaslığını belirlemek için daha gerçekçi sonuçlar veren arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde zeminlerin donma-çözülme davranışı ve donma

1

hassaslığı zeminlerde meyadana gelen kabarmalar açısından irdelenmektedir (Konrad ve Morgenstern, 1983). Zeminlerin donma hassaslığının belirlenmesi özellikle dolguların donma-çözülme davranışı açısından büyük önem kazanmaktadır. Soğuk iklim koşullarındaki zemin yapıları donma-çözülme esnasında yapısal değişime uğramakta ve donma-çözülme sonrası mukavemet kaybınına uğramaktadır.

Bu çalışma kapsamında zeminlerin donmaya karşı hassaslığını ve donma-çözülme davranışını belirlemek için farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme sonrası belirlenen donma kabarma hızları ile zeminlerin geoteknik özellikleri karşılaştırlmıştır. Donma-çözülme deneyleri sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ile numunelerin kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası ve boşluk oranı gibi zemin özellikleri arasındaki ilişkinin net olarak belirlenebilmesi için numuneler düşük ve yüksek plastisiteli olmak üzere iki grupta incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan numuneler Standart Ptoktor sıkılığında hazırlanmıştır. Değişik sıcaklıklar altında toplamda iki kez olmak üzere numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca donma-çözülme sonrası CBR değerlerindeki değişim miktarları ile zemin numunelerinin geoteknik özellikleri de karşılaştırılmıştır. Pratik amaçlar doğrultusunda, zeminlerin donmaya karşı hassaslığını önceden tahmin edebilmek için zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olan kolerasyonlar geliştirilmiştir.

1.1 Amaç

Bu çalışmada zeminlerin donma olayı esnasında meydana gelecek olan kabarmalar ve donma-çözülme sonrası davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde donma çözülme deneyleri ve donma-çözülme sonrası mukavemet kayıplarını belirlemek için CBR deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen parametreler ile numunelerin geoteknik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda farklı likit ve plastik limit değerlerine sahip proktor enerjisi ile sıkıştırılan numuneler üzerinde donma çözülme deneyleri ve donmaçözülme sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. Donma çözülme deneylerine tabi tutulan suya doygun numuneler iki t donma-çözülme çevrimine maruz kalarak donma kabarma hızları belirlenmiştir. Belirlenen kabarma hızları ile mevcut sınıflandırma sistemine göre zeminler sınıflandırılmıştır. Donma-çözülme deneyi sonrasında hem donma kabarma hızlarına hem de deney sonunda yapılan CBR değerlerine göre zeminlerin donmaya karşı hassaslıkları belirlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre elde edilen donma kabarma hızları ve CBR değerleri ile likit limit, plastik limit, plastisite indisi olmak üzere zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda zeminlerin geoteknik özelliklerine bağlı olarak donmaya karşı hassaslığını belirlemek ve önceden tahmin edebilmek için çeşitli korelasyonlar geliştirilmeye çalışılmıştır.

1.2 Kapsam

Laboratuvarda deneysel olarak yapılan bu çalışmada zeminlerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için farklı endeks özelliklerine sahip numuneler üzerinde donma çözülme deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerler ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, zeminlerde donma olayının gerçekleşmesinden ve donma olayı sonucu donma kabarmasının oluşmasından, donma kabarmasının laboratuvarda ve arazide belirlenmesinden ve donma kabarmasını etkileyen faktörlerden bahsedilmiştir. Ayrıca donma-çözülme sonrası zeminlerin hangi geoteknik özelliklerinin etkilendiğinden ve donma-çözülme sonrası zeminlerde meydana gelen fiziksel mekanik değişimler ve konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümünde, bu çalışmada kullanılan numunelerin endeks özellikleri ve deneyde kullanılacak numuneleri hazırlama yöntemleri, donmaya karşı hassaslığı belirlemek için laboratuvarda yapılan deneylerden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, numuneler üzerinde yapılan donma çözülme deneyleri ve CBR deneylerinin sonuçları ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler verilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise deneysel olarak elde edilen verilerden yararlanarak çıkartılan genel sonuçlar yer almaktadır.

2. ZEMİNLERDE DONMA OLAYI

Donma olayı, soğuk iklim koşullarının hakim olduğu bölgelerdeki zeminlerde donma kabarması meydana getirmektedir. Donma kabarması, zemin bünyesinde bulunan suyun buza dönüşmesi ile oluşan hacimsel artış olarak adlandırılır. Ülkemizde ve dünyadaki bir çok bölgede soğuk iklim şartlarının hakim olduğu düşünülürse zeminlerde donma olayı mühendislik uygulamaları bakımından önem kazanmakta, özellikle altyapıdan üst yapıya kadar hemen hemen bütün yapıları olumsuz etkilemektedir. Tüm mühendislik yapıları zemin üzerine oturacağından donma olayı zemin mekaniği açısından büyük önem taşımaktadır. Zeminlerin donma olayı sırasında veya sonucunda davranışının belirlenmesi ve oluşacak olumsuzlukların önlenmesi geoteknik mühendisliğinin inceleme konuları arasında yer almaktadır.

Donma olayı sonucunda oluşan kabarma, zemin içerisinde bulunan suyun donma sıcaklığında sıvı durumdan katı duruma geçerken haciminin artması sonucunda meydana gelmektedir. Taber (1929), zeminlerde oluşan donma kabarmasının sadece zemin içerisinde bulunun sudan kaynaklanmadığını, zemin içerisine donunca hacmi azalan başka bir sıvı koyarak göstermiştir. Taber kendi gözlemleri sonucunda zemindeki donma kabarması sıvının zemin içerisinden donan bölgeye doğru taşınması ve donan sıvının zeminde oluşturduğu buz mercekleri ile meydana geldiğini göstermiştir.

Donma kabarması hava sıcaklığı donma sıcaklığına düştüğü zaman zemin yüzeyine yakın bölgedeki suyun buza dönüşmesiyle oluşur. Zemindeki donmamış olan serbest haldeki su kapileritenin de etkisi ile zemin yüzeyine doğru hareket etmekte ve donmuş bölge diye adlandırılan bu bölgede buz merceklerinin artmasına sebep olur (Mitchell, 1976). Ayrıca zemin ortamındaki yeraltı suyunun zemin yüzeyine olan uzaklığı, zemin boşluklarındaki donmamış suyun miktarı ve sızma suyunun ortamdaki varlığı zemin yüzeyinde oluşacak donma kabarmasını etkilemektedir. Donma kabarmasının şematik gösterimi Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi buz merceklerinin hacmi ısı akışı ve kapiler su yükselmesinin etkisi ile artarak kabarma

meydana gelmektedir. Donma olayına maruz bir zemin tabakası donmuş zemin, donma bölgesi ve donmamış zemin olarak üç bölgeden oluşmaktadır. Donma bölgesi donmuş ve donmamış zemin arasında bir geçiş bölgesi olup en son buz merceklerinin oluştuğu yere kadar uzanmaktadır.



Şekil 2.1: Donma kabarmasının şematik olarak gösterimi (Mitchell, 1976).

Zeminlerin donma olayı sonucunda bünyesinde buz merceklerinin oluşması ve donma kabarmasının meydana gelmesi için zemin donmaya karşı hassas, ortamda yeterli miktarda su ve ortam sıcaklığı donma sıcaklığında ya da donma sıcaklığı altında olması gerekmektedir.

Donmaya karşı hassas olan zeminde, donma olayının ardından hava sıcaklığının artması ile zemin içerisinde bulunan buz merceklerinin erimekte ve eriyen su, zeminin dane dizilimini etkilemekte ve zemini daha gevşek hale getirerek zeminin taşıma kapasitesini azaltabilmektedir. Dolayısıyla donma-çözülme sonrası zeminde oturmalar ve deformasyonlar meydana gelebilmektedir.

Donma ve çözülme olayı sonucunda zeminler fiziksel ve mekanik olarak değişime uğrayacağından sıkışabilirlik, permeabilite ve mukavemet gibi çeşitli mühendislik özellikleri önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Donma olayı sonrasında zemin mukavemetinin önemli ölçüde azalması, drenajın donmuş tabaka tarfından engellenmesi ve zeminde çatlakların ve bozulmaların oluşması geoteknik ve yol mühendisliği açısından problem teşkil etmektedir. Bu yüzden donma olayı, bu tür problemlere çözüm bulmak için geoteknik mühendisliğine konu olmaktadır. Zeminlerin donmaya karşı hassaslıkları ise çeşitli sınıflandırma kriterleri ile belirlenmektedir. Aşağıda zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi amacıyla araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.1 Zeminlerin Donma Hassaslığının Belirlenmesi

Donma olayı sonucunda meydana gelen buz mercekleri çözülme sonrası zeminin daneler arasındaki dizilimini ve dolayısıyla boşluk oranını değiştireceğinden zeminde deformasyonlar ve buna bağlı olarak mukavemet kaybı meydana gelebilmektedir. Buz mercekleri oluşumu için zeminin donmaya karşı hassas olması, yeterli miktarda su içermesi ve ortam donma sıcaklığında olması gerekmektedir. Bu koşulların herhangi birinin değişmesi ile donma olayı önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Bu yüzden zeminlerin donmaya karşı hassaslığını ve davranışının belirlenmesi için tüm bu koşulların dikkate alınması ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen iki farklı sınıflandırma bulunmaktadır (Konrad, 1999). İlki dane çapı boyutu, minerolojik yapısı, kıvamı, kil içeriği, su tutma kapasitesi, kapileritesi ve permeabilitesi gibi zemin özelliklerine bağlı olarak geliştirilmiş yöntemlerdir. Digeri ise doğrudan laboratuvarda veya arazide yapılan deneylerle belirlenen donma kabarma hızına göre geliştirilmiş sınıflandırmadır. Bu yöntem aşağıda özetlenmiştir.

2.1.1 Dane çapı dağılımına göre donma hassaslığı

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını dane çapı dağılımına göre sınıflandırma yöntemi ilk olarak Casagrande (1929) ve Beskow (1935) tarafından yapılmıştır. Casagrande arazide ve laboratuvarda yaptığı çalışmalar sonucunda zeminin donma hassaslığını aşağıdaki gibi üç aşamada değerlendirmiştir. Donma için uygun koşulların donma sıcaklığı ve yeterli miktarda su olması durumu için;

Üniform olmayan zeminlerde 0.02 mm'den küçük dane çapı oranın ağırlıkça
%3'ten büyük olması durumunda zeminde buz merceklerinin oluşacağını,

Üniform zeminlerde ise 0.02 mm'den küçük dane çapı oranın ağırlıkça
%10'dan büyük olması durumunda zeminde buz merceklerinin oluşacağını,

3. Zeminde 0.02 mm'den küçük dane çapı oranın ağırlıkça %1'den az olması halinde zemin tamamen suya doygun olsa bile buz merceklerinin oluşmayayacağını göstermiştir.

Dane çapı dağılımı açısından zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi amacıyla Beskow (1935) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise dane çapı dağılımı ile donma hassaslığı arasındaki ilişki grafik olarak verilmiştir. Şekil 2.2'de verilen grafikte donma hassaslığı çeşitli karışımlar kullanılarak hazırlanan zemin numuneleri ile belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi numunelerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için dane çapı dağılımına göre sınır koşulları görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere numunelerin donmaya karşı hasasslığı donma kabarmasının olup olmadığına bakılarak belirlenmektedir.



Şekil 2.2: Dane dağılımına göre donma hassaslığının belirlenmesi (Beskow, 1935).
Freitag ve McFadden (1997) zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri dane çapı dağılımına göre Çizelge 2.1'de göstermiştir. Dane çapı 0.02 mm den küçük olan danelerin ağırlıkça %3'ten fazla olması durumunda zeminlerin donmaya karşı hassas olduğu belirtilmiştir. Dane çapı 0.02 mm ve daha küçük dane çapı dağılımı ağırlıkça %3'ten az olduğu kaba daneli kumlar ve çakıllar donmaya karşı hassas zemin grubu içinde yer almazlar. Siltli zeminlerde ise daneler arası boşlukların daha çok olması ve yüksek permeabilitelerinden dolayı daha yüksek donma kabarması oluşur. Fakat killi zeminler tam tersine düşük permeabiliteye sahip olduklarından donma kabarması buz merceklerinin oluşumuna bağlı olarak yavaş ve düşük seviyelerde olur.

Donmaya karşı hassaslık grubu (artarak)	Zemin Cinsi	Dane Çapı 0.02 mm'den büyük danelerin ağırlıkça yüzdeleri (%)		
Donmaya karşı hassas değil	Çakıl, kırma taş	0-1.5		
F1 (Düşük)	Çakıllı zeminler	3-10		
F2 (Orta)	Çakıllı zeminler Kumlar	10-20 3-15		
F3 (Yüksek)	Çakıllı zeminler Kumlar (çok ince siltli kumlar dışında) Killer, I _P > % 12	> 20 > 15 		
F4 (Çok Yüksek)	Tüm siltler Çok ince siltli kumlar Killer, I _P < % 12 Diğer killer	 > 15 		

Çizelge 2.1: Zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri (Freitag ve McFadden, 1997).

2.1.2 Donma kabarma hızına göre hasaslık

Zeminlerin donma kabarma hızı birim zamanda meydana gelen kabarma miktarı olarak ifade edilir ve zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Zeminlerin donma kabarma miktarına veya hızına göre sınıflandırılması önceki sınıflandırma sistemlerine göre daha etkili ve doğru sonuçlar vermiştir.. Kaplar (1974) U. S. Army Corps of Engineering için geliştirdiği sınıflandırmada zeminlerin donma kabarma hızına göre donma hassaslığını belirlemiştir. Deney sonuçlarına ve sınıflandırma sistemine göre zeminlerin donma hassaslığı Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi zeminlerin donmaya karşı hassaslıkları F1, F2, F3 ve F4 olarak adlandırılmış ve donmaya karşı hassaslıkları ise F1'den F4'e doğru artacak şekilde sınıflandırılmıştır:

- F1 grubu çakıllı zeminler, düşük donma hassaslığı içerir ve genel olarak düşük donma kabarma davranışı gösterdiğinden dolguda kullanılması için uygundur.
- F2 grubu kumlu zeminler, ağırlıkça düşük yüzdelerde 0.02 mm dane çapından küçük daneler içerdiğinden bu grup zeminlerin de donma hassaslığı düşüktür.
- F3 ve F4 grubu kumlar, çok ince siltli kumlar ve killerin donma hassaslığı F1 ve F2 gruplarına göre daha hassas ve orta derecede hassas olarak adlandırılırlar. Plastisite indisi 12'den büyük ve küçük killer ve siltler ise diğer zemin gruplarına göre daha yüksek donma hassaslığına sahiptir.

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığı laboratuvarda yapılan donma çözülme deneyleri ile donma kabarma hızlarına göre de sınıflandırılabilir. Freitag ve McFadden (1997) laboratuvarda 152 mm yüksekliğinde hazırlanmış silindirik numuneler üzerinde yaptığı açık sistem donma çözülme deneyleri ile numunelerin donma kabarma hızlarını belirleyerek bir sınıflandırma kriterini Çizelge 2.2'de görüldüğü üzere geliştirmiştir. Numuneler boyuna olarak yukardan aşağıya doğru ve günde yaklaşık olarak 6.3 mm'lik donma derinliğine göre donmaya maruz bırakılmıştır.

Çizelge 2.2: Laboratuvar deneylerine göre donmaya karşı hassaslık sınıflandırılması (Freitag ve McFadden, 1997).

Donma Kabarma Hızı (mm/gün)	Donmaya Karşı Hassaslık
0.0-0.5	İhmal Edilebilir
0.5-1.0	Çok Düşük
1.0-2.0	Düşük
2.0-4.0	Orta
4.0-8.0	Yüksek
> 8.0	Çok Yüksek



Şekil 2.3: Donma kabarma hızlarına göre hassaslık sınıflandırılması (Kaplar, 1974).

2.2 Donma Kabarma Hızının Deneysel Olarak Belirlenmesi

Zeminlerde donma kabarma hızı, arazi ve araziden alınan zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılan deneylerle belirlenebilmektedir. Laboratuvarda yapılan deneylerde zeminde donma olayının gerçekleşmesi için deney ortamı aynen arazi ortami gibi donma sıcaklığında, donma için yeterli miktarda su ve donmaya karşı hassas bir zemin kullanılmaktadır. Arazide yapılan deneylerde ise genellikle sıcaklık ölçümlerine dayanan düzenekler ile donma sıcaklığı, donmuş tabaka kalınlığı ve kabarma miktarlarına göre belirlenmektedir.

2.2.1 Laboratuvar deneyleri

Araziden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler veya dolguda kullanılmak üzere alınan numuneler üzerinde laboratuvarda donma çözülme deneyleri yapılabilir. Laboratuvarda yapılan donma çözülme deneyleri ortamdaki suyun durumuna bağlı olarak açık ve kapalı sistem donma çözülme deneyleri olarak iki farklı şekilde yapılır.

- Açık sistem donma çözülme deneyinde, donmaya maruz kalacak zemin numunesine yeraltı suyunun veya sızma suyunun varlığından dolayı alttan su beslenerek suyun kapiler boşluklardan bir emme kuvveti ile zeminin donmuş olan bölgesine doğru hareket ederek buz mercekleri oluşturur ve kabarma meydana getirir.
- Kapalı sistem donma çözülme deneyinde ise, kabarma sadece zemin bünyesinde bulunan su ile meydana gelmektedir.

ASTM D5918'e göre uygulanan hem kapalı hemde açık sistem donma çözülme deneyleri yapılabilen deney sistemi Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu deney sistemine göre zeminlerin donma kabarma hızları ve donma-çözülme sonrası CBR (California Bearing Ratio) değerlerine bakılarak zeminlerin donmaya karşı hassaslığı belirlenmektedir. Deney sisteminde belli bir sıkılıkta ve su muhtevasında hazırlanan zemin numunesi 2.8 kPa sürşarj yükü altında donma-çözülme deneyine tabi tutulur.

Burada sıcaklık ve zaman koşullarına bağlı olarak zemin numunesi iki defa donma ve çözülmeye maruz kalır ve her donma-çözülme süresince deney numunesi üzerine yerleştirilen mikrometreler ile donma kabarma miktarları belirlenir. Belirlenen donma kabarma miktarlarının zamana göre grafiği çizilir ve donma kabarma hızları her donma-çözülme çevriminde ilk 8 saat sonunda belirlenen donma kabarma miktarlarına göre hesaplanmaktadır.

Ayrıca numuneyi çevreleyen ringlere yerleştirilen sıcaklık sensörleri nedeniyle zemin numunesinin derinlikçe sıcaklık değişimleride gözlenebilmektedir. Zemin numunesinde derinlikçe gözlenen sıcaklık değişimleri ile donma olayının zemin numunesinde ne kadar gerçekleştiği veya donma derinliğinin nerelere kadar uzandığı belirlenebilmektedir.



Şekil 2.4: Donma çözülme deney şematiği (ASTM D 5918).

2.2.2 Arazi deneyleri

Donma kabarmasının arazide belirlenebilmesi için İsveç Ulusal Yol ve Ulaşım Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen Şekil 2.5'te verilen STÖR96 adlı özel bir alet ile donma derinliği, donma kabarması ve yeraltı su seviyesi otomatik olarak belirlenebilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi alet zemine ankraj edilen kısım, orta kısım ve şapka kısmı olarak üç kısımdan oluşmaktadır (Hermansson, 2004).

Alet, ölçüm yapılacak olan herhangi bir derinliğe kadar önceden açılan kuyuya indirilir. Aletin ankraj kısmı kuyunun tabanına, orta kısım aletin ankraj kısmının üzerine ve son olarakta şapka kısmı orta kısımla bağlanır. Şapka kısmında bulunan bir plaka donma kabarması meydana geldiğinde yükselir ve kabarma miktarları belirlenir.

Bu deneyde ayrıca alet üzerinde bulunan sıcaklık sensörü ve yeraltı su sensörü yardımıyla her 50 mm de bir 4 m derinliğe kadar yeraltı su seviyesi ve sıcaklık durumunu belirlemek için okumalar alınabilir.



Şekil 2.5: STÖR96 deney aleti (Hermansson, 2004).

2.3 Donma Kabarmasını Etkileyen Faktörler

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığı önemli ölçüde dane çapı dağılımına dayandırılarak belirlenir. Ancak donma olayını etkileyen faktörlere bakıldığında birçok faktörün etkili olduğu görülmektedir. Zeminlerde donma olayı sonucu oluşan donma kabarması birçok faktörlerden etkilenir (Brandl, 2008). Bu faktörler zeminlerin dane çapı dağılımı ve ince dane oranı, ince daneli zeminlerin minerolojik özelliği, ortamdaki su varlığı veya su muhtevası, permeabilitesi, iklim şartları ve sıcaklık, üzerindeki sürşarj yükü ve sıkılığı gibi sıralanabilir. Genel olarak bu etkiler ince dane oranı, sıcaklık ve sürşarj yükü olarak aşağıda detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

2.3.1 İnce dane oranı

Tester ve Gaskin (1992) plastik olmayan kireç taşı tozunu (0.074 mm'den geçen) %2, %6, %8, %10 ve %14 oranlarında yine kireç taşı agregası ile karıştırarak oluşturduğu numuneler üzerinde donma kabarma deneyleri yapmış ve optimum su muhtevalarında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında sıkıştırılan numunelerin donma kabarma hızlarını belirlemiştir.

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere yapılan deneylerde birinci ve ikinci donma kabarma hızları birbirlerine yakın olduğu ve ince dane oranın artması ile donma kabarma hızlarının da artığını belirlemiştir



Şekil 2.6: Donma kabarma hızları ile ince dane oranı değişimi (Tester ve Gaskin, 1996).

Plastik olmayan ince dane içeriğine sahip numuneler üzerinde yapılan donma kabarma deneylerinde ince dane oranındaki %1'lik artış numunelerin donma kabarma hızlarında 0.5 mm/gün'lük bir artış meydana getirmiştir.

Tester ve Gaskin (1992) kireç taşı agregasına kaolin, illit ve bentonitten oluşan %2, %8 ve %14 oranlarında ayrı ayrı karışımlar hazırlayarak donma çözülme deneyleri (Cold Region Research and Engineering Laboratory Test II) yapmıştır. Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevalarında Standart Proktor enerjisi ile hazırlanan bu numuneler üzerinde yapılan donma çözülme deneyi sonucunda Şekil 2.7'de gösterildiği gibi ince dane oranı artıkça donma kabarma hızları sırasıyla kaolin, illit ve bentonit grubu karışımlarda arttığı gözlenmiştir.

Tester ve Gaskin (1992) yapmış olduğu çalışmalar daha sonra Brandl (2008) tarafından da gösterdi ki donma kabarma hızları sadece ince dane oranına bağlı olmayıp aynı zamanda ince daneli zeminin minerolojisi ile de ilişkili olduğu belirlenmiştir. Örneğin kaolin grubu ince daneli zeminlerde ince dane oranı artıkça donma kabarma hızları illit ve bentonit grubu ince daneli zeminlere göre daha fazla artmakta ve dolayısıyla kaolin grubu donma olayından daha fazla etkilenecektir.



Şekil 2.7: Donma kabarma hızları ile ince dane oranın değişimi (Tester ve Gaskin, 1992).

Brandl (2008) yaptığı uzun soluklu çalışmasında kaolin, illit, montmorillonit (Na⁺, Ca⁺⁺), kuvars, dolomit, kalsit, klorit ve mika gibi malzemelerin kullanımı ile oluşturduğu karışımlar üzerinde donma çözülme deneyleri sonucunda donma kabarma miktarı ile 0.02 mm dane çapından küçük danelerin yüzdesi arasındaki ilişkiyi Şekil 2.8'de vermiştir.



Şekil 2.8: Donma kabarma miktarı ile farklı kil minerolojilerine ait 0.02 mm dane çapından küçük danelerin yüzdesi arasındaki ilişki (Brandl, 2008).

Brandl (2008) yaptığı donma kabarma deneylerinde klorit ve montmorillonit içeren karışımların donma kabarma miktarları hassas olacak düzeyde olduğu belirlenmiş fakat donma-çözülme sonrası taşıma gücü kapasitelerinde ciddi bir düşüşün olmadığı görülmüştür. Kaolin grubu karışımlarda ise ciddi oranda donma kabarma miktarları elde edilmiştir. Ayrıca sodyum (Na⁺) ve kalsiyum (Ca⁺⁺) montmorillonitleri arasında da büyük oranda donma kabarma farklılıkları ve dolayısıyla donma-çözülme sonrası taşıma kapasiteleri de farklılık göstermiştir.

2.3.2 Sıcaklık

Donma olayının gerçekleşmesi için gerekli olan koşulların başında ortam donma sıcaklığında veya donma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta olmalıdır. Donma olayı zemin yüzeyinden aşağıya doğru gerçekleşeceğinden zemin yüzeyinden derinlik artıkça sıcaklıkta artar ve sıcaklığın donma sıcaklığının üstüne çıktığı veya buz merceklerinin oluşumunun bittiği yerden zemin yüzeyine olan mesafe donma derinliği olarak adlandırlır. Sıcaklık donma kabarmasını etkileyen önemli bir parametredir. Ortamdaki sıcaklığın düşme miktarı donma kabarmasını etkilemektedir (Hermansson, 2004).

Şekil 2.9'da verilen donma derinliğinin sıcaklıklara göre değişimi verilmiştir (Xia, 2006). En fazla donma derinliği 3 No'lu deneyde -14.5 °C'de olduğu görülmüş ve sıcaklığın artması ile 1 ve 2 No'lu deneyde ise daha düşük donma derinlikleri belirlenmiştir. Burada donma derinliklerinin düşük sıcaklıklarda daha yüksek olması zeminde daha çok buz merceklerinin oluştuğu anlamına gelir ve dolayısıyla düşük sıcaklık değerlerinde donma kabarma miktarları daha yüksek değerlerde olur.



Şekil 2.9: Donma derinliği ile sıcaklık değişimi (Xia, 2006).

2.3.3 Sürşarj yükü

Donma olayı sırasında zemin bünyesindeki su buza dönüşerek buz mercekleri oluşturur ve dolayısıyla zemin hacimsel olarak artar ve kabarma meydana gelir. Bu kabarma miktarı zemin yüzeyinde herhangi bir yapı yükü olmadığı zaman daha fazla olur ve yapıdan gelen yükün büyüklüğüne göre değişir. Dolayısıyla zeminlerde donma kabarma miktarları zemin üzerindeki yükü de bağlı olduğu bilinmektedir.

Brandl (2008) %98 kompaksiyon sıkılığında ve 0.002 mm dane çapından küçük danelerin dağılımı %1'i geçmeyecek şekilde hazırladığı karışımlar üzerinde farklı sürşarj yükleri altında donma çözülme deneyleri yaparak şürşarj yükü ile donma kabarma miktarları arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Deneylerde dane çapı 0.02 mm' den küçük dane çapının ağırlıkça %3, %8 ve %13 oranlarında karıştırılarak üç adet farklı zemin numunesi kullanmıştır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi sürşarj yükünün her üç karışımda da artması halinde donma kabarma miktarlarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca aynı şürşarj yükü altında dane çapı 0.02 mm'den küçük danelerin ağırlıkça yüzdesi artıkça donma kabarma miktarlarıda artmaktadır.



Şekil 2.10: Şürşarj yükünün ve dane çapı 0.02 mm'den küçük danelerin ağırlıkça yüzdesinin donma kabarma miktarları ile değişimi (Brandl, 2008).

Donma kabarma miktarlarının sürşarj yükü uygulanılarak azaltılabileceği O'Neil ve Miller (1985) tarafından belirtilmiş ve farklı sürşarj yükü altında donmaya maruz bırakılan silt numunesinin donma kabarması-zaman ilişkisi Şekil 2.11'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi sürşarj yükü artıkça donma kabarma miktarlarında düşüş meydana gelmektedir.



Şekil 2.11: Farklı sürşarj yükü etkisindeki zeminin don kabarmasının zamanla değişimi (O'Neil ve Miller, 1985).

2.4 Zeminlerin Donma-Çözülme Sonrası Davranışı

Soğuk iklim koşullarındaki zeminler tamamen donmuş, kısmen donmuş ve mevsimsel olarak donma görülen bölgelerde bulunurlar. Mevsimsel olarak donma görülen bölgelerdeki zeminler yılda en az birkaç kez donma-çözülme olayına maruz kalmaktadır (Andersland ve Ladanyi, 1994). Bu yüzden zeminler, donma-çözülme sonrası ve donma-çözülmenin birden fazla olduğu tekrarlı durumlarda fiziksel ve mekanik özellikleri açısından önemli ölçüde etkilenmektedir. Donma ve çözülme olayı özellikle soğuk bölgelerde alt yapı ve üst yapı çalışmalarında geoteknik mühendisliğine konu olmuş önemli bir çalışma alanıdır.

Zeminlerin donma-çözülme sonrasında mühendislik parametrelerindeki değişimler çoğu araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Donma sırasında zemin daneleri arasında boşluklarda bulunan su donarak hacminde artış meydana gelir. Suyun yaklaşık olarak donma sırasında hacminde %9'luk bir artış olacağı düşünülürse zemin daneleri arasındaki boşluklar donma olayı sonucu artacak ve daneler birbirinden uzaklaşarak zemin yapısal olarak donma-çözülme öncesi durumuna göre daha boşluklu ve sıkılığı daha az olacaktır. Zeminde donma-çözülme sonrası oluşan bu durum ve zemin daneleri arasındaki boşlukların artması ile zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelecektir. Bu değişimler araştırmacılar tarafından zeminin mukavemetinde ve permeabilitesinde meydana gelen değişimler olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda zeminlerde donma-çözülme öncesi ve sonrası oluşacak fiziksel ve mekanik değişimler fiziksel ve mekanik değişimler olarak iki başlık altında incelenmiştir.

2.4.1 Donma-çözülmenin zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisi

Zeminlerde donma-çözülme esnasında suyun buza dönüşmesi ile gerçekleşen hacimsel artış ve buzun erimesi ile değişen dane diziliminin zeminin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Bundan dolayı permeabilite, boşluk oranı ve kıvam limitleri gibi zemin özelliklerinde değişikler meydana gelmektedir. Özellikle donma-çözülmenin permeabiliteye olan etkisi daha çok inceleme alanlarına konu olmuştur. Aşağıda bu özelliklerin donma-çözülme etkisi altında oluşacak değişimler sırasıyla kısaca anlatılmıştır.

2.4.1.1 Permeabiliteye etkisi

Zeminler donma-çözülme sonrası fiziksel özelliklerindeki değişimlerden (boşluk oranı, porozite, sıkılık vb.) dolayı permeabilitelerinin de değişimlere uğraması beklenir. Donma olayı sırasında zeminde oluşan buz mercekleri çözülme sonrasında zeminde kılcal çatlaklıklar oluşturur ve suyun zemindeki geçişini donma-çözülme öncesine göre artırır. Su zemin bünyesinde bu çatlaklardan zeminin donma-çözülme öncesi durumuna göre kolaylıkla sızar. Bu nedenle zeminlerde donma-çözülme çevrim sayısı artıkça zeminin permeabilitesinde artış gözlemlenmesi beklenir.

Kim ve Daniel (1992) Şekil 2.12'de dört farklı bölgeden alınan optimum su muhtevasında sıkıştırılmış zemin numunelerini donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakarak permeabilitelerindeki değişimlerini incelemiştir. Deneyler sonucunda zemin numunelerinin permeabilite değerleri 2 ile 6 kat oranında artığı gözlenmiştir. Deney sonuçalarına bakıldığında ilk donma-çözülme çevrim sayılarında permeabilite değerleri önemli ölçüde artmakta daha sonraki çevrim sayılarında bu artış miktarı düşmektedir.



Şekil 2.12: Donma-çözülme çevriminin permeabiliteye etkisi (Kim ve Daniel, 1992).

Doğal ve sıkıştırılmış zeminler üzerinde donma-çözülme deneyleri yapıldığında permeabilite katsayıları 10⁻⁹-10⁻¹² m/sn mertebelerinden 10⁻⁸ m/sn mertebelerine düştüğü görülmüştür (Othman ve diğ., 1994). Şekil 2.13'de donma-çözülme öncesi ve sonrası efektif gerilme ile permeabilite katsayıları arasındaki ilişki verilmiş ve donma-çözülmenin permeabiliteye etkisi net olarak görülmektedir.



Şekil 2.13: Donma-çözülme ve öncesi efektif gerilme ile permeabilite arasındaki değişim (Othman ve Benson, 1994).

Othman ve Benson (1993) Şekil 2.14'te görüldüğü üzere killi bir zemin üzerinde farklı sürşarj yükleri altında donma-çözülme öncesi ve sonrası zemin numunelerinin permeabilitelerinin değişimini incelemiş ve sürşarj yükünün artması ile zemin numunelerinin permeabilite değerlerinde düşüşün azaldığını görmüştür. Donmaçözülme sonrası permeabilite değeri yaklaşık 80 kPa ve daha yüksek sürşarj yükleri altında donma-çözülme öncesine göre fazla değişmediği belirlenmiştir.



Şekil 2.14: Donma-çözülme öncesi ve sonrası permeabilite katsayısının sürşarj yükü ile değişimi (Othman ve Benson, 1993).

Hewitt ve Daniel (1997) bir hücre içerisine yerleştirilen geosentetik donatılı kil üzerinde 12.4 kPa gerilme altında konsolidasyon tamamladıktan sonra zemin numuneleri tamamen suya doyurularak donma-çözülme deneyleri yapmıştır. Hücre içerisine yerleştirilen geosentetik donatılı zemin numuneleri 24 saat boyunca -20°C de dondurulmuş ve donma işlemi sırasında hücre basıncı uygulanmamıştır. Donma olayı tamamlandıktan sonra zemin numuneleri 24 saat oda sıcaklığında çözülmeye bırakılmış ve çözülme sonucunda hücre su ile doldurularak permeabilite deneyi yapılmış ve permeabilite katsayısı belirlemiştir. Permeabilite deneylerinde zemin numuneleri donma-çözülme öncesi, bir donma-çözülme çevrimi ve 3 donmaçözülme çevrimine maruz bırakılduktan sonra yapılmıştır. Deneyler sonucunda geosentetik donatılı olmayan numunelerin permeabilite katsayısı 10⁻⁹ m/sn mertebelerinden 10⁻⁷ m/sn mertebelerine çıkmış ancak geosentetik donatılı numunelerde permeabilite katsayısında büyük bir değişim gözlenmemiştir.

Wiklander (1998) ince daneli bir zemin kullanılarak 15 adet farklı sıkılıkta ve farklı boşluk oranlara sahip olacak şekilde hazırlanan numuneler üzerinde toplamda 18 defa donma-çözülme çevrimine maruz bırakmıştır. Boşluk oranları 0.25 ile 0.56 arasında değişen numuneler -3°C sıcaklıkta minimum 4 gün kalarak dondurulmuş ve ardından +20°C sıcaklıkta çözülmeye tabi tutulmuştur. Permeabilite deneyleri sırası ile 1, 2, 4, 10 ve 18 çevrim olacak şekilde donma-çözülme sonrası yapılmıştır.

Deneyler sonucunda yüksek başlangıç boşluk oranına sahip numunelerin permeabilite katsayıları donma-çözülme öncesine göre 1.4 ile 30 kat arttığı gözlenmiştir.

Konrad ve Samson (2000) %25, %35 ve %50 oranlarda üç farklı karışım hazırlanarak oluşturulan kaolin-silt karışımı numuneler üzerinde sadece bir defa donma-çözülme çevrimine maruz bırakılacak şekilde yaptığı deneyler sonucunda karışımlardaki kil miktarının artması ile donma-çözülme sonrası permeabilite katsayısının da doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir.

2.4.1.2 Boşluk oranına etkisi

Viklander (1998) birden fazla donma-çözülme çevrimine maruz bir zemin numunesi üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası numunelerdeki hacim değişimlerine göre boşluk oranları belirlemiştir. Deneylerde farklı sıkılıklardaki ve dolayısıyla farklı boşluk oranlarına sahip zemin numunelerinin donma-çözülme öncesi ve sonrası boşluk oranları belirlenerek Şekil 2.15'te elde edilen grafikte görüldüğü gibi gevşek ve sıkı olarak hazırlanan zemin numuneleri donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır.



Şekil 2.15: Gevşek ve sıkı zeminlerin boşluk oranları ile donma-çözülme çevrim sayısı arasındaki ilişki (Viklander, 1998).

Donma-çözülme çevrim sayısı artıkça boşluk oranları bir önceki çevrim sayısına göre fazla değişmediği ve residüele ulaştığı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi donma-çözülme çevrim sayısı artıkça gevşek zemin numunesinin boşluk oranının düştüğü ve numune donma-çözülme sonrası daha sıkı hale geldiği sıkı zemin numunesinde ise donma-çözülme çevrim sayısı artıkça numunenin gevşediği görülmüştür.

2.4.1.3 Kıvam limitlerine etkisi

Eigenbrod (1996) likit limit değerleri 30 ile 50 arasında ve plastik limit değerleri ise 16 ile 25 arasında değişen ve bulamaç halinde 4 kPa'lık bir yük altında konsolide edilerek oldukça yumuşak olarak hazırlanan dört farklı kil minerali üzerinde yaptığı donma-çözülme deneyleri sonucunda Şekil 2.16'da görüldüğü gibi numunelerin likitlik indeksinin donma-çözülme çevrim sayısı artıkça düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 2.16: Donma-çözülme çevrim sayısının likitlik indeksi ile değişimi (Eigenbrod, 1996).

Deneylerde donma-çözülme çevrim sayısının likitlik indeksi üzerine etkisinin en fazla olduğu 1 No'lu numunede olduğu görülmüş ve genel olarak donma-çözülme çevrim sayısının tüm numunelerin likitlik indeksi üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

2.4.2 Donma-çözülmenin zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi

İklim şartlarına bağlı olarak tamamen donmuş, kısmen donmuş ve mevsimsel sıcaklık farklarının fazla olduğu bölgelerdeki zeminlerin mekanik ve fiziksel özellikleri bölgelerine göre değerlendirilir. Tamamen donmuş bölgelerdeki zeminler buz, dane ve çok az miktarda hava bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bölgelerdeki zeminlerin davranışını zemin bünyesinde bulunan buz oranı ve zemin sıcaklığı önemli ölçüde etkiler. Tamamen donmuş bölgelerdeki zeminlerde zeminler donmuş halde bulunduklarından zeminin bu durumdaki mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Donmuş haldeki bir zeminin mukavemeti buzun mukavemeti, danelerin mukavemeti ve buz ile daneler arası etkileşimden doğan mukavemet olmak üzere 3 bileşimden oluşur (Cruzda ve Hohman, 1997).

Mevsimsel sıcaklık değişimlerin çok fazla olduğu bölgelerde ise zeminler yılda birkaç kez donma-çözülmeye maruz kalırlar. Bu olay zeminlerin taşıma gücü ve geçirimlilik gibi bazı mühendislik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden zemin mühendisliği uygulamalarında özellikle yol dolguları, boru hatları ve yapı temellerindeki zeminler önemli ölçüde donma-çözülme olayından etkilenmektedir.

2.4.2.1 Mukavemetine etkisi

İnce daneli zeminler boşluklarında fazla su barındırdıklarından dolayı donmaçözülme olayından daha fazla etkilenirler. Boşluklardaki su düşük sıcaklıklarda donarak buza dönüşür ve hacminde %9'luk bir artış meydana gelir. Sıcaklıkların artması ile donan su tekrar eriyerek zemin yapısında çatlaklıklar oluşturur. Donmaçözülme sayısının artması ile zemin yapısında bulunan çatlakların sayısı artar ve dolayısıyla zeminde mukavemet kaybı meydana gelir (Yıldız ve diğ., 2004). Ayrıca donmuş zeminlerin hem statik hemde dinamik mukavemet davranışları sıcaklığın azalması sonucunda değişmekte ve içerdiği donmamış su muhtevasına bağlı olduğu belirtilmiştir (Tan, 1982). Karayolu, demiryolu, toprak dolguları ve su yapıları gibi birçok üstyapı elemanlarını taşıyan ve donma-çözülme olayına maruz kalan zeminler bir yük altında olduğunda donma-çözülme davranışları bu yüke bağlı olarak değişiklik gösterir.

Donma-çözülme olayına maruz kalan ve gerilme altında olan zeminlerin davranışı gerilme durumlarına ve donma-çözülme çevrim sayılarına göre değişiklik gösterir (Wang ve diğ., 2007). Wang (2007) Qinghai-Tibet demiryolu projesinde temel malzemesi olarak kullanılacak killi bir zemin üzerinde 200, 400, 600 ve 800 kPa gerilmeler altında ve donma-çözülme çevrim sayısı 1, 3, 5, 7, 10, 15 ve 21 olacak şekilde konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Deneylerde kullanılan malzemenin likit limiti %36.8 ve plastik limit değeri %20.7' dir. Laboaratuvarda sıkıştırılarak hazırlanan malzeme üzerinde farklı hücre basınçlarında ve donma-çözülme çevrim sayılarında üç eksenli basınç deneyi yapmılmış ve sonuçlar Şekil 2.17 de verilmiştir.



Şekil 2.17: Farklı donma-çözülme çevrim sayılarında ve hücre basıncı altındaki zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı (Wang ve diğ., 2007).

Üç eksenli basınç deney sonuçlarından elde edilen deviator gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde görüldüğü gibi farklı hücre basınçlarında deviatör gerilme değerleri genellikle 3-7 çevrim sayılarında elde edilmiştir. Donma-çözülme çevrim sayısının artması ile deviatör gerilme değerinin azalması beklenir ancak zeminlerin donmaçözülme sonrası davranışları veya mekanik özellikleri ilk birkaç donma-çözülme çevriminden sonra büyük ölçüde değişikliğe uğrar. Bu çalışmada da genel olarak 7 çevrimden sonra deviatör gerilmenin arttığı gözlenmiştir.

Li ve diğ. (2012) Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılan bir siltli kil zemin numunesi kullanılarak 100, 200 ve 300 kPa hücre basınçları altında toplamda 31 donmaçözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra konsolidasyonsuz direnajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapmıştır. Zemin numuneleri 16 saat -30°C'de dondurulmuş ve sonra 8 saat +30°C'de çözülmeye bırakılarak donma-çözülme çevrimi gerçekleştirilmiştir.

Donma-çözülme olayından sonra numuneler üzerinde üç eksenli basıç deneyleri yapılarak mohr gerilme daireleri çizilmiş ve kohezyon değerleri belirlenmiştir. Şekil 2.18'de donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça kohezyon değerlerinde de düşüşün görüldüğü belirlenmiştir.



Şekil 2.18: Donma-çözülme çevrim sayısı ile kohezyon arasındaki ilişki (Li ve diğ., 2012).

Jing ve diğ. (2013), farklı plastisitelerde ve optimum su muhtevalarında sıkıştırılmış 3 farklı zemin numunesi kullanarak numuneler toplamda 7 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Herbir donma-çözülme çevriminden sonra numuneler üzerinde 100, 200 ve 300 kPa hücre basınçları altında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyleri yapmış ve deney sonucunda mohr gerilme dairelerini çizerek kırılma anındaki kayma mukavemeti değerlerini belirlemiştir. Farklı plastisite indislerinde ve donma-çözülme çevrim sayılarında yapılan üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre, aynı donma-çözülme çevrim sayılarında ve hücre basınçlarında Şekil 2.19'da da görüldüğü gibi plastisite indisi artıkça kayma mukavemetininde arttığı belirlenmiştir.



Şekil 2.19: Farklı plastisitedeki numunelerin aynı hücre basıncı altında donmaçözülme çevrim sayıları ile kayma mukavemeti değişimi (Jing ve diğ., 2013).

Donma-çözülme çevriminin serbest basınç mukavemetine etkisi incelendiğinde ise zeminler herhangi bir gerilme altında olmadıklarından çevrim sayısı artıkça serbest basınç mukavemetinde düşüş görülmektedir (Ghazavi ve Roustaie, 2010). Burada killi bir zemin numunesi 1, 3, 5 ve 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmakta ve donma-çözülme öncesi serbest basınç mukavemeti ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.20: Donma-çözülme çevrimlerine ait gerilme-eksenel deformasyon eğrileri (Ghazavi ve Roustaie, 2010).

İnce daneli zeminlerin bina, yol ve çeşitli yapı temellerinde kötü mühendislik özelliklerinden dolayı malzeme olarak kullanımı pek uygun değildir. Ayrıca ince daneli zeminler donmaya karşı hassas olduklarıda düşünülürse temel malzemesi olarak taşıma gücü kaybı, geçirimlilik artışı ve defermasyon gibi problemler oluşturmaktadır. Bu yüzden ince daneli zeminler temel malzemesi olarak kullanımı için katkı maddeleri ile mühendislik parametreleri (mukavemet, permeabilite vb.) iyilestirilir. Hazırbaba ve Güllü (2010) donmaya karsı hassas olan ince daneli zeminlerin mühendislik parametrelerini iyileştirmek için silt malzemesine katkı maddesi olarak geofiber ve sentetik sıvı katarak hazırlamış olduğu karışımlar üzerinde kapalı sistem donma-çözülme deneyleri yapmışlardır. CBR kalıpları içerisinde hazırlanan karışımlar -20°C de 24 saat donmaya ve +21°C de çözülmeye maruz bırakılmıştır. Karışımların CBR değerleri sadece bir donma-çözülme çevrimi sonucunda belirlenerek donma-çözülme öncesi CBR değerleri ile karşılaştırılmıştır. Donma-çözülme etkisini azaltmak için hazırlanan karışımların donma-çözülme sonrası CBR değerleri %0.5 geofiber ve %4 sentetik sıvı karışımındaki zemin numunesinde daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

2.4.2.2 Konsolidasyona etkisi

Donma olayı sırasında zemin bünyesindeki suyun buza dönüşerek hacimsel olarak artması ve çözülme sonrası zemin bünyesinde oluşan çatlaklar zeminin permeabilitesini artırır. Permeabilitedeki bu değişim doğal olarak zeminin konsolidasyon paremetrelerini de etkileyecektir. Dolayısı ile donma-çözülme sayısı artıkça permeabilite artacağından zeminde oluşacak konsolidasyon oturmalarının da artması gerekmektedir. Paudel ve Wang (2010) ince daneli bir zemin numunesi üzerinde farklı donma-çözülme çevrim sayılarına maruz kalacak şekilde konsolidasyon deneyleri yapmıştır. Şekil 2.21'de farklı su muhtevalarında hazırlanan zemin numunelerinin konsolidasyon deneyleri ile belirlenen konsolidasyon katsayısı (c_v) ile donma-çözülme çevrim sayıları arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmış ve sonuç olarak konsolidasyon katsayısının artan donma-çözülme çevrim sayısı ile arttığı belirlenmiştir.



Şekil 2.21: Konsolidasyon katsayısı ile donma-çözülme çevrim sayıları arasındaki ilişki (Paudel ve Wang, 2010).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Zeminlerin donma kabarmasını ve donma-çözülme sonrası davranışlarını belirlemek için laboratuvarda donma-çözüme deneyi, donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri ve numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için elek analizi ve kıvam limileri gibi sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler donmaçözülme deneyleri için maksimum sıkılıklarında hazırlanmış ve bunun için Standart Proktor deneyleri yapılarak maksimum sıkılıkları belirlenmiştir. Toplam olarak 20 adet farklı zemin numunesi kullanılmış ve farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler seçmeye dikkat edilmiştir. Donma kabarmasını belirlemek için laboratuvarda numuneler üzerinde kapalı sistem donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Bu deneyde zemin numunesine su giriş çıkış olayı olmadığından numuneler kendi su muhtevalarında deneye tabi tutulmuştur. Ancak donma kabarmasını net olarak gözlenlenmesi için numuneler su altında yaklaşık olarak üç gün bekletilerek tamamen suya doygun hale getirilmiştir. Donma-çözülme deneyleri sonunda numuneler üzerinde CBR deneyi yapılarak numunelerin donmaya karşı hassaslıkları belirlenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen donma kabarma hızı ve CBR değerindeki değişim oranı ile zeminlerin kıvam limiti, sıkılık, su muhtevası ve boşluk oranı gibi endeks özellikleri arasındaki değişim incelenmiştir.

Bu çalışmada zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi için zeminlerde donma olayı sonucunda meydana gelecek olan donma kabarma hızı ve donmaçözülme sonrası CBR değerinin zeminlerin geoteknik özelliklerine bağlı olarak değişimin incelenmesi için zemin numunelerin likit limitleri geniş bir aralıkta değişen numuneler seçilmiştir. Ancak literatür çalışmasında da belirtildiği gibi donma kabarma hızları yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli zeminlerde farklılık göstermektedir. Yani plastisitesi yüksek olan zeminlerde donma kabarma hızları plastisitesi düşük olan zeminlere göre daha düşük olacaktır. Bu yüzden bu çalışmada düşük plastisiteli zeminler ile yüksek plastisiteli zeminler ayrı değerlendirmeye tabi tutularak donma kabarma hızları ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilşkiler incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için laboratuvarda standart deneyler yapılmıştır. Zemin numunelerinin endeks özelliklerini belirlemek ve numuneleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre sınıflandırmak için numuneler üzerinde kıvam limitleri deneyi, elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmıştır. Kıvam limitleri ve zemin cinsleri belirlenen numuneler donma-çözülme deneyi öncesi Proktor deneyine tabi tutularak maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ve su muhtevaları belirlenmiştir. Zeminlerin donmaçözülme davranışı belirlemek için Proktor sıkılığında hazırlanan numuneler donmaçözülme öncesi ve sonrası CBR deneyine tabi tutularak CBR değerleri belirlenmiştir. Numunelerin donma kabarma hızlarının belirlenmesi için doygun hale getirilen numuneler üzerinde donma çözülme-deneyi yapılmıştır. Ayrıca doygun olarak donma-çözülme sonrası CBR deneyi de yapılarak numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Numuneler 2.6 kPa sabit bir sürşarj yükü altında toplam 120 saat süren ve -12°C ile +12°C sıcaklık değerleri arasında değişebilen bir kabininde donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Donma kabarma hızları deney süresince iki defa olmak üzere birinci ve ikinci donma aşamalarının ilk 8 saat sonundaki kabarma miktarlarına göre belirlenmiştir.

Bu çalışma kapasmında toplam 20 adet kıvam limitleri deneyi, 20 adet elek analizi ve hidromete deneyi, 20 adet piknometre deneyi, 20 adet Standart Proktor deneyi, donma-çözülme öncesi ve sonrası olmak üzere toplam 60 adet CBR deneyi ve 20 adet donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Tüm numunelere ait deney sonuçları EK A'da çizelge halinde verilmiştir.

3.1 Malzeme

Deneysel çalışma kapsamında toplam 20 adet doğal zemin numunesi kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan numunelerin farklı geoteknik özelliklere sahip olmasına özen gösterilmiş ve bu amaçla numuneler ülkemizin değişik bölgelerinden getirilmiştir. Numuneler üzerinde dane çapı dağılımı, ince dane oranlarını ve kil yüzdelerini belirlemek için ıslak elek ve hidrometere analizleri, kıvam limitlerini belirlemek için likit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Ayrıca dane özgül ağırlıklarını belirlemek için piknometre deneyleri de yapılmıştır. Sınıflandırma için yapılan deneyler sonucunda EK B'de verilen dane çapı dağılımı ve plastisite değerlerine bakılarak zemin numuneleri Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre sınıflandırılmış, numunelerin düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) olduğu belirlenmiştir. Deneyler için kullanılacak zemin numunelerinin plastisitesine göre geniş aralıklarda seçilmesine dikkat edilmiş ve zemin numunelerinin plastisite kartındaki yerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Özet olarak Çizelge 3.1'de verildiği gibi numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen, likit limit (w_L), plastik limit (w_P), plastisite indisi (I_P), özgül birim hacim ağırlık (Gs), ince dane oranı (İDO) ve kil yüzdeleri (KY) değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kıvam limitleri deney sonuçlarına göre zemin numunelerinin likit limitlerinin %28 ile %76 arasında, plastik limitlerinin %16 ile %26 arasında, plastisite indislerinin ise %12 ile %50 arasında değiştiği belirlenmiştir. Zemin numunelerinin ince dane oranları %33 ile %100 arasında kil yüzdelerinin ise %9 ile %43 arasında değişmektedir. Ayrıca piknometre deneyleri sonucunda dane özgül ağırlıklarının 2.62 ile 2.80 arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 3.1: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri.

Numue No	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	İDO (%)	KY (%)	Gs	Zemin Cinsi
1	70	25	45	97	41	2.65	СН
2	42	23	19	97	43	2.62	CL
3	37	18	19	62	23	2.68	CL
4	43	23	20	91	19	2.64	CL
5	57	23	34	85	34	2.69	СН
6	54	23	31	93	35	2.72	СН
7	28	16	12	33	9	2.72	CL
8	52	22	30	100	40	2.71	СН
9	43	19	24	86	30	2.69	CL
10	42	24	18	67	35	2.67	CL
11	35	17	18	51	11	2.76	CL
12	44	19	25	51	19	2.71	CL
14	76	26	50	75	28	2.67	СН
15	51	22	29	80	35	2.70	СН
16	65	24	41	93	39	2.69	СН
17	62	23	39	88	37	2.68	СН
18	32	17	15	35	6	2.66	CL
20	37	19	18	96	9	2.69	CL
21	38	19	19	96	4	2.70	CL
22	42	20	22	83	6	2.70	CL

Çizelge 3.1: Deney numunelerinin geoteknik özellikleri.

w_L: Likit limit, w_P: Plastik limit, I_P: Plastisite indisi, İDO: İnce dane oranı, KY: Kil yüzdesi, G_s: Dane özgül ağırlığı

3.2 Numune Hazırlama Yöntemi

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için çalışmada gerekli olan numuneler İstanbul'un çeşitli bölgelerinden getirilmiş ve İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında hazırlanarak donma-çözülme deneyleri için kullanılmıştır. Numuneler üzerinde Standart Proktor deneyi yapılarak optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Numuneler belirlenen optimum su muhtevasında 15.2 cm çapı 12.7 cm yüksekliğine sahip olan CBR kalıbında Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler kalıptan çıkarılmadan doygun hale getirilmesi için Şekil 3.2'deki fotoğrafta da görüldüğü gibi su altında bekletilmiştir.



Şekil 3.2: Numunelerin suya doygun hale getirilmesi.

Numuneler suya %100 doygun olması için numune üzerine yerleştirilen mikrometre ile şişme okumaları takip edilmiştir. Numuneler şişme okumaları sabitleninceye kadar suda bekletilmiştir. Tüm zemin numuneleri yaklaşık olarak üç gün su altında bekletilmiş ve bu süre sonunda doygun olduğu kabul edilmiştir.

Donma-çözülmenin zeminlerin mekanik özelliklerine etkisinin imcelenmesi amacıyla numuneler yine kompaksiyon özelliklerine göre sıkıştırılmıştır. CBR kalıbında sıkıştırılan numuneler 3 gün süreyle küre tabi tutularak donma-çözülme deneyleri için hazırlanmıştır.

3.2.1 Standart Proktor deneyi

Toplam 20 adet numune üzerinde yapılan Standart Proktor deneyi sonuçları Şekil 3.3'te verilmiştir. Standart Proktor deneyi ile belirlenen numunelerin optimum su muhtevaları %11~%24 arasında, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ise 15.3~20.5 kN/m³ arasında değişmektedir. Şekilden de görüleceği gibi maksimum kuru birim hacim ağırlıkları en yüksek olan birkaç numune dışında genellikle numunelerin çoğunun maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 15.0~18.0 kN/m³ arasındadır. Tüm numunelere ait Standart Proktor deneyi sonucu belirlenen proktor ve S=%100 doygunluk eğrileri EK C'de verilmektedir.



Şekil 3.3: Numunelerin Standart Proktor deney sonuçları.

Tüm zemin numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ile optimum su muhtevaları arasındaki ilişki Şekil 3.4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi zemin numunelerinin optimum su muhtevaları artıkça kuru birim hacim ağırlık değerlerinin de beklendiği gibi azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 3.4: Maksimum kuru birim hacim ağırlık-optimum su muhtevası ilişkisi.

3.3 Deney Yöntemi

Bu çalışma kapsamında zeminlerin donma hassaslığını ve donma-çözülme davranışının belirlenmesi için donma-çözülme deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Donma hassaslığı ASTM D5918 standardına göre belirlenen deney koşulları altında donma kabarma hızının belirlenmesiyle bulunmuştur. Ayrıca zeminlerin donma-çözülme davranışının belirlenmesi için numuneler üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. Aşağıda donma-çözülme deneyi ile CBR deneyi hakkında bilgi verilmiştir.

3.3.1 Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme deneyi açık ve kapalı sistem olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Açık sistemde; deney düzeneğinde numune sürekli olarak alttan su ile beslenmektedir. Deney süresince numune tabanındaki plak donma sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta sabit iken numune üstündeki plak donma sıcaklığına maruz bırakılır. Böylelikle numune üstten donmaya başlarken alttan beslenen su ile numunenin donma bölgesine doğru bir su hareketi oluşur ve donma bölgesine ulaşan su donarak numunede kabarma meydana getirir. Bundan dolayı açık sistemde deney başlangıç su muhtevası ile deney sonu su muhtevası arasında önemli bir fark vardır. Kapalı sistemde ise; zemin numunesi sadece kendi su muhtevasında donmaçözülmeye tabi tutulmaktadır. Bu yüzden zemin numunesinde içerdiği su miktarı ile orantılı olarak kabarma meydana gelmektedir. Bu çalışmada kapalı sistem donmaçözülme deneyleri yapılmış ve deney düzeneğine ait genel görünüş Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5: Kapalı sistem donma-çözülme deneyi (İTÜ).

Bu çalışmada donma-çözülme kabini ASTM D5918'de verilen sıcaklık koşullarına göre belirlenmiş ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Donma çözülme deneyleri için zemin numuneleri iki defa donma çözülmeye maruz bırakılmış ve donma kabarma hızları her iki donma aşaması içinde belirlenmiştir.



Şekil 3.6: Donma çözülme deneyi sınır sıcaklık koşulları.

Donma kabarma hızlarınını belirlemek için numuneler 15.2 cm çapında ve 12.7 cm yüksekliğinde optimum su muhtevasında standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan zemin numuneleri donma çözülme deneyine tabi tutularak kabarma hızları belirlenmiştir. Donma kabarma hızlarınını belirlemek amacıyla deney süresince donma başlangıcından itibaren kabarma miktarları numune üzerinde bulunan mikrometre okumaları ile kaydedilmiştir. Deney süresince her iki donma aşaması sırasında okunan kabarma miktarları ile zaman ilişkisi grafiği çizilerek donma kabarma hızları belirlenmiştir. Donma kabarma miktarları belir örnek olması açısından Şekil 3.7'de gösterildiği gibi ASTM D5918'e göre donma başlangıcından itibaren ilk sekiz saat sonundaki kabarma miktarı ile belirlenmiştir. Ayrıca tüm numunelere ait donma kabarma-zaman ilişkisi eğrileri EK D'de verilmiştir.

Deneyde zemin numuneleri 24 saat süre ile donmaya hazırlık için +3°C'de bekletilmiş ve donmaya hazır hale geldikten sonra -3°C'de 8 saat bekletilerek zemin numunelerinin donması sağlanmış ve donma kabarma miktarları kaydedilmiştir. 8 saatlik donma başlangıcı sonunda zemin numuneleri -12°C sıcaklık altında 16 saat daha bekletilerek donma aşaması tamamlanmıştır. Donma aşamasından sonra zemin numuneleri +12°C'de 16 saat daha bekletilerek numunelerin çözülmesi sağlanmıştır. İkinci donma aşaması için ise aynı sıra tekrarlanmıştır.



Şekil 3.7: Donma kabarması-zaman ilişkisi.

3.3.2 CBR deneyi

CBR deneyi, belli bir kesit alanına sahip silindirsel pistonun sıkıştırılmış zemin numunesine itilerek elde edilen yük-penetrasyon bağıntısının bulunmasını kapsar. CBR değeri herhangi bir penetrasyon değeri için ölçülen yükün standart malzemeden alınan yüke oranı olarak tanımlanır. Genellikle 2.5 mm penetrasyon değeri için ölçülen yük değeri kullanılır ancak 5 mm penetrasyon değeri için ölçülen yük daha büyükse büyük olan kullanılır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.8'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi numune üzerine tek taraflı olarak uygulanan kuvvet okumaları için bir kuvvet halkası ve penetrasyon okumaları için ise 1/100 mm hassasiyete sahip mikrometre kullanılmıştır. Deney daha çok yol ve hava alanı dolgularında kullanılan malzemelerin mukavemetinin belirlenmesi amacıyla yapılır.



Şekil 3.8: CBR deney aleti (İTÜ).

Bu çalışma kapsamında 15.2 cm çapında ve 12.7 cm yüksekliğinde CBR kalıpları kullanılmıştır. Zemin numuneleri genellikle 18 mm penetrasyona kadar devam edilmiş daha sonra deney sonlandırılmış ve zemin numunelerinin deney sonu su muhtevaları belirlenmiştir. Bir örnek verecek olursak No 17 numunesine ait CBR deney sonuçları Şekil 3.9' da verilmiştir. Ayrıca tüm numunelere ait donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deney eğrileri EK D'de verilmiştir.



Şekil 3.9: No.17 numunesine ait CBR deney sonucu.

3.4 Donma-Çözülme Sonrası İnceleme Yöntemi

Donma-çözülme deneylerinden elde edilen donma kabarma hızları ile zeminlerin geoteknik özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Donma kabarma hızları doygun olarak hazırlanan numunelerden belirlenmiştir. Donma kabarma hızları ile numunelerin γ_{kmaks} ve w_{opt} gibi kompaksiyon parametreleri, boşluk oranı, porozite ve kıvam limitleri gibi zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Donma-çözülme davranışının belirlenmesi amacıyla donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Donma-çözülme sonrası CBR değerlerindeki düşüş miktarları belirlenmiş ve mukavemet kayıpları incelenmiştir. Mukavemet kayıpları, bağıntı 3.1'de verildiği gibi donma-çözülme öncesi CBR değeri (CBR₁) ile donma-çözülme sonrası CBR değeri (CBR₂) arasındaki farkın donma-çözülme öncesi CBR değerine bölünmesi ile elde edilen CBR değişim oranına (Δ CBR) göre belirlenmiştir.

$$\Delta CBR = \frac{CBR_1 - CBR_2}{CBR_1} \times 100 \tag{3.1}$$

Ayrıca %100 suya doygun numuneler üzerinde donma-çözülme sonrası CBR deneyleri yapılarak donma-çözülme öncesine göre değişim oranaları bağıntı 3.1'e göre belirlenmiştir. Belirlenen CBR değişim oranları ile zeminlerin likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DENEY SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada killi zeminlerin donmaya karşı hassaslığının ve donma-çözülme sonrası davranışının belirlenmesi için geoteknik özellikleri farklı numuneler üzerinde ASTM D5918 standardına uygun olarak donma-çözülme deneyleri yapılmıştır.

Bu deneysel çalışma kapsamında hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Çalışma amacına yönelik olarak, aynı numune üzerinde en az üç deneyin yapılacak olması hazırlanmış numuneler kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Deneysel çalışma programı ağırlıklı olarak donma-çözülme ve CBR deneylerini kapsamaktadır. Deneysel çalışma aşağıda verilen akış diyagramı çerçevesinde uygulanmıştır.

- Donma-çözülme ve CBR deneyleri için aynı numune kullanılarak optimum su muhtevasında Standart Proktor enerjisi ile CBR kalıplarına sıkıştırılan 4 adet numune hazırlanmıştır.
- Donma-çözülme öncesi zeminlerin mukavemet davranışlarının belirlenmesi amacıyla CBR deneyleri yapılmıştır.
- Aynı özelliklere sahip numune üzerinde ve optimum su muhtevasında hazırlanan numune iki çevrimlik donma-çözülme deneyi yapılmıştır.
- Donma-çözülme sonrası zeminlerin mukavemet davranışlarının belirlenmesi amacıyla CBR deneyleri yapılmıştır.
- Yine optimum su muhtevasında hazırlanmış numune en az üç gün suda bekletilerek doygun hale getirilmiştir.
- Suya doygun hale getirilen numuneler üzerinde donma-çözülme deneyi yapılarak donma kabarma hızları belirlenmiştir.

 Donma-çözülme deneyine tabi tutulan optimum su muhtevasındaki numune üzerinde tekrar CBR deneyi yapılarak, donma-çözülme sonrası davranışı belirlenmiştir.

Bu deneyler sonrasında her numunenin donma kabarma hızları ve CBR değerleri belirlenmiş pratik amaçlar doğrultusunda kullanılmak üzere zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olarak donma kabarma hızları ve CBR değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucu elde edilen parametrelerle zeminin geoteknik özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesinde kullanılan numunelere ait geoteknik özellikler özet halinde Çizelge 4.1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler arasında likit limit değeri %28 ile en düşük No.7 ve likit limit değeri %76 ile en yüksek No.13 sahiptir. Çizelgede deneylerde kullanılan numunelerin likit limitleri, plastik limitleri, plastisite indisleri, deney sonu su muhtevaları, deney sonu su muhtevaları ve likit limit oranları, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, optimum su muhtevaları ve porozite değerleri verilmiştir. Numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları 5.3 KN/m³ ile 20.5 KN/m³ arasında, optimum su muhtevaları %11 ile %24 arasında ve porozite değerleri ise 0.246 ile 0.422 arasında değiştiği görülmektedir. Deneyler sonucunda donma kabarma hızları ve donma-çözülme sonrası CBR değerleri ile zeminlerin bu özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çizelge 4.1: Zemin numunelerinin donma kabarma hızları ile ilişkilerinin incelendiği zemin özelliklerinin özeti.

WL (%)	WP (%)	I _P (%)	w_s/w_L	$\gamma_{kmaks} \ (KN/m^3)$	W _{opt} (%)	e	n
28~76	16~26	12~50	0.34~0.68	15.3~20.5	11~24	0.327~0.731	0.246~0.422

 w_L : Likit limit, w_P : Plastik limit, I_P : Plastisite indisi, w_s : Deney sonu su muhtevası, γ_{kmaks} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, e: boşluk oranı, n: porpzite

4.2 Donma Çözülme Deney Sonuçları

Donma çözülme deneyleri laboratuvarda Proktor sıkılığında hazırlanan numuneler suya doygun hale getirilerek hazırlanan 20 adet zemin numunesi üzerinde yapılmıştır. Herbir donma çözülme deneyinde zemin numunesi iki kez donmaçözülmeye maruz bırakılmıştır. Bir örnek olması açısından No 3 numunesine ait donma-çözülme deney sonuçları Şekil 4.1 verilmiştir.


Şekil 4.1: No 3 numunesine ait donma-çözülme deney sonucu.

Donma çözülme deneyi sonucunda elde edilen donma kabarması-zaman eğrisinden No.3 numunesinde birinci donma-çözülme aşamasında 1.74 mm kabarma meydana gelmiştir. Bu kabarma miktarı donma süresince 8 saat sonunda meydana gelen kabarma miktarı olduğundan donma kabarma hızı 5.21 mm/gün olarak belirlenmiştir. İkinci donma aşamasında ve deney başlangıcından 80 saat sonra ikinci kabarma miktarı 2.44 mm ölçülmüş ve donma kabarma hızı 7.31 mm/gün olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda herbir numune için birinci ve ikinci donma kabarması olmak üzere donma kabarma hızları belirlenmiştir.

Donma kabarma miktarları zeminin birçok özelliğinden etkilenmektedir. Bu çalışmada özellikle su muhtevası yüksek olan numunelerde kabarmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Suya doygun numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu birinci ve ikinci çevrimler için hesaplanan donma kabarma hızları ile numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri toplu olarak Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çizelgeden de görüldüğü gibi birinci çevrimdeki donma kabarma hızları numune özelliklerine bağlı olarak 1.62~12.98 mm/gün arasında değişirken, diğerinde ise 1.66~9.94 mm/gün arasında değiştiği görülmektedir. Her iki çevrimde elde edilen donma kabarma hızları bazı numunelerde artış bazılarında ise düşüş gözlenmiştir. Bu farklılığın bazı numuneler hariç çok büyük olmamakla birlikte bu farklılığın numune özelliklerinden ve deney sonuçlarının yorumlanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numune No	Likit Limit, w _L (%)	Plastik Limit, w _P (%)	Plastisite İndisi, I _P (%)	Birinci Çevrim DKH, (mm/gün)	İkinci Çevrim DKH, (mm/gün)
1	70	25	45	7.06	6.31
2	42	23	19	7.62	8.64
3	37	18	19	5.21	7.31
4	43	23	20	7.96	9.93
5	57	23	34	5.58	4.60
6	54	23	31	8.72	6.23
7	28	16	12	1.61	3.18
8	52	22	30	3.85	3.83
9	43	19	24	7.13	4.02
10	42	24	18	8.29	8.83
11	35	17	18	6.90	5.44
12	44	19	25	3.85	2.34
14	76	26	50	4.06	2.72
15	51	22	29	2.66	2.72
16	65	24	41	2.84	2.94
17	62	23	39	3.78	3.82
18	32	17	15	7.02	5.30
20	37	19	18	8.75	4.00
21	38	19	19	8.68	7.18
22	42	20	22	12.98	6.92

Çizelge 4.2: Numunelerin kıvam limitleri ve donma kabarma hızları.

DKH: Donma Kabarma Hızı

Bu çalışma kapsamında kullanılan zemin numunelerinin donmaya karşı hassaslığını belirlenmesi amacıyla donma kabarma hızları ile ağırlıkça dane çapı 0.02 mm'den küçük danelerin yüzdesi arasındaki ilişkiyi gösteren ve Kaplar (1974) tarafından yapılan hasaslık sınıflandırılmasına göre Şekil 4.2'de verilmiştir. Toplam 20 adet zemin numunesinin donmaya karşı hassaslığı gösterilmiştir. Numuneler genellikle düşük, orta ve yüksek düzeyde donmaya karşı hassas olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2: Bu çalışmada kullanılan numunelerin donma hassaslığı (Kaplar, 1974).

Ayrıca Freitag ve McFadden (1997) tarafından belirlenen sınıflandırma sistemine göre numunelerin donmaya karşı hassaslıkları aşağıda hem çizelge hem de şekil olarak verilmiştir. Çizelge 4.3'te numunelerin donmaya karşı hassaslıkları ikinci donma kabarma hızlarına göre belirlenmiştir.

Hem Kaplar (1974) hem de Freitag ve McFadden (1997) tarafından belirtilen donmaya karşı sınıflandırma sisteminde hassaslığı yüksek olan zeminler genellikle düşük plastisiteli zemin numunelerinde görülmüştür. Yüksek plastisiteli zeminlerde ise düşük hassaslık belirlenmiştir.

Numune No	Donma Kabarma Hızı (mm/gün)	Donmaya Karşı Hassaslığı
1	6.31	Yüksek
2	8.64	Çok Yüksek
3	7.31	Yüksek
4	9.93	Çok Yüksek
5	4.60	Yüksek
6	6.23	Yüksek
7	3.18	Orta
8	3.83	Orta
9	4.02	Yüksek
10	8.83	Çok Yüksek
11	5.44	Yüksek
12	2.34	Orta
14	2.72	Orta
15	2.72	Orta
16	2.94	Orta
17	3.82	Orta
18	5.30	Yüksek
20	4.00	Orta
21	7.18	Yüksek
22	6.92	Yüksek

Çizelge 4.3: Numunelerin donmaya karşı hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997).

Çizelge 4.3'te belirtildiği gibi numuneler genellikle orta, yüksek ve çok yüksek donma hassaslığında olup 2, 4 ve 10 nolu numuneler çok yüksek 1, 3, 5, 6, 9, 11, 18, 21 ve 22 nolu numuneler yüksek diğerleri ise orta derece donma hassaslığındadır. Aynı şekilde numunelerin donma hassaslığı Şekil 4.3'te de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi 3 adet numune çok yüksek, 9 adet numune yüksek ve 8 adet numune ise orta derece donma hassaslığına sahiptir.



Şekil 4.3: Bu çalışmada kullanılan numunelerin donma hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997).

4.3 CBR Deney Sonuçları

Zeminlerin donma-çözülme davranışlarının belirlenmesi için Proktor sıkılığında ve optimum su muhtevalarında hazırlanan zemin numuneleri üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca suya doygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde de donma kabarma hızının belirlenmesi amacıyla yapılan donma-çözülme deneyleri sonucunda, CBR deneyleri yapılmıştır. Böylelikle her bir numune için toplamda üç adet olacak şekilde CBR deneyi yapılmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bir örnek teşkil etmesi amacıyla No 3 numunesine ait donma-çözülme öncesi ve sonrası kuvvet-penetrasyon eğrisi Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi suya doygun olarak hazırlanan numunenin CBR değeri doygun olamayana göre düşük olduğu belirlenmiştir. Suya doygun olmayan No.3 numunesi için donmaçözülme öncesi CBR değeri %12.48 iken donma –çözülme sonrası CBR değeri %7.71'e düşmüştür. Ancak aynı numunenin suya doygun halde donma-çözülme sonrası CBR değeri %5.42 olduğu görülmüştür. Bu durum tüm zemin numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4.4: No.3 numunesine ait donma-çözülme öncesi ve sonrası kuvvetpenetrasyon eğrileri.

Doygun olamayan ve doygun olarak optimum su muhtevasında hazırlanan 20 adet zemin numunesi üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılmış ve Çizelge 4.4'te CBR değerleri verilmiştir. Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi bütün numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değerleri donma-çözülme öncesi CBR değerlerinden düşüktür. Numuneler arasında CBR değerlerinde en büyük düşüş donma-çözülme öncesi CBR değeri %6.7'den donma-çözülme sonrası CBR değeri %0.9'a düşerek No.1 numunesinde meydana gelmiştir.

Doygun haldeki donma-çözülme sonrası CBR değerindeki en yüksek düşüş ise No 14 numunesinde %95 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla suya doygun numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değerlerinde meydana gelen düşüş genellikle yüksek plastisiteli numunelerde olduğu söylenebilir.

Numune No	WL, %	WP, %	Ι _Ρ , %	DÇ Öncesi CBR,%	DÇ sonrası CBR, %	DÇ sonrası CBR (S=%100), %
1	70	25	45	6.7	0.9	0.9
2	42	23	19	10.6	6.7	1.4
3	37	18	19	12.5	7.8	5.4
4	43	23	20	13.7	10.4	3.1
5	57	23	34	10.9	6.8	1.6
6	54	23	31	8.5	4.4	2.2
7	28	16	12	24.6	15.1	8.2
8	52	22	30	13.6	11.4	1.0
9	43	19	24	11.3	5.3	3.6
10	42	24	18	12.2	11.4	2.6
11	35	17	18	19.0	15.8	4.2
12	44	19	25	7.0	5.4	2.3
14	76	26	50	13.7	9.0	0.7
15	51	22	29	14.9	9.9	0.9
16	65	24	41	9.9	7.4	1.7
17	62	23	39	12.8	8.8	1.5
18	32	17	15	17.4	12.4	3.9
20	37	19	18	12.5	8.7	2.1
21	38	19	19	16.4	9.8	3.2
22	42	20	22	19.1	13.0	2.6

Çizelge 4.4: Doygun ve doygun olmayan numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerleri.

 w_L : Likit limit, w_P : Plastik limit, I_P : Plastisite indisi, DÇ: Donma-Çözülme

Ayrıca zemin numunelerinin donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerleri ve suya doygun donma-çözülme sonrası CBR değerleri Şekil 4.5 gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde donma-çözülme sonrası CBR değerlerinde özellikle suya doygun numunelerde önemli kayıplar olduğu görülmüştür.



Şekil 4.5: Donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerlerindeki değişim.

Bu çalışma kapsamında donma-çözülme öncesi ve sonrası belirlenen CBR değerleri arasındaki değişimler ile numunelerin likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Numunelerin CBR değişimleri optimum su muhtevasında donma-çözülme öncesi ve sonrası arasındaki fark olarak yüzde biçiminde belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin donma-çözülme öncesi ile doygun haldeki donma-çözülme sonrası CBR değerleri arasındaki değişimleri de belirlenmiştir.

4.4 Donma Çözülme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zeminlerin donmaya karşı hassaslıklarını belirlemek için numuneler üzerinde ASTM D5918'e göre donma çözülme deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiş ve hassaslıkları belirlenmiştir. Donma çözülme deneylerinden elde edilen donma kabarma hızları zemin numunelerinin çeşitli parametreleri ile ilişkisi incelenmiştir. Zemin numunelerinin donma kabarma hızları ile deney sonu su muhtevasının likit limite oranları (w/w_L) arasındaki değişim incelenmiştir. Ayrıca donma kabarma hızları ile numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, boşluk oranı ve poroziteleri arasındaki değişimler de incelenmiştir.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi zeminlerin donmaya karşı hassaslık sınıflandırmasında, zeminlerin donma kabarma hızları killi zeminlerde düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmıştır. Burada yüksek plastisiteli killer daha çok su tutma kapasitesine sahip olmasına rağmen donma kabarma hızları düşük plastisiteli killere göre daha düşüktür. Böylece Kaplar(1974) tarafından belirtilen donmaya karşı hassaslık sınıflandırmasına göre yüksek plastisiteli killer düşük plastisiteli killere göre donmaya karşı daha az hassastır. Bu çalışmada da killi zeminler kullanıldığı için donma kabarma hızları, düşük ve yüksek plastisiteli zemin numunelerine göre ayrı değerlendirilmiştir. Böylece numunelerin donma kabarma hızları ile maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, boşluk oranı ve porozite gibi mühendislik parametreleri arasındaki ilişkinin net olarak görülebilmesi için numuneler yüksek ve düşük plastisiteli gruplar olmak üzere ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4.4.1 Donma kabarma hızlarının kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri arasındaki ilişki

Zeminlerin minerolojik yapısına bağlı olarak likit limit değerleri danelerin özgül yüzeyleri ile orantılıdır. Likit limit değerleri yüksek olan zeminlerin, su tutma kapasitelerininde yüksek olmasıyla donma kabarma hızlarının yüksek olması beklenmektedir. Ancak literatür bölümünde de bahsedildiği üzere zeminlerin donma kabarma hızları sadece zeminlerin likit limitlerine bağlı olmadığı ayrıca su muhtevası, permeabilite ve boşluk oranı gibi zemin özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında donma kabarma hızları sadece kıvam limitleri ile ilişkilendirilememiştir.

20 adet farklı likit limit değerlerine sahip zemin numuneleri kullanılmış ve Şekil 4.7'de numunlerin donma çözülme deneyleri sonucunda belirlenen donma kabarma hızları (DKH) ile deney sonu su muhtevasının likit limite oranının (w/w_L) değişimi görülmektedir. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi artan w/w_L değerlerinde donma kabarma hızlarının değişimi belirgin olarak gözlenmiştir.



Şekil 4.6: DKH ile w/w_L arasındaki ilişki.

Düşük plastisiteli killi zemin grubunda, düşük kuru birim hacim ağırlık değerlerinde yüksek donma kabarma hızları elde edilmiştir. Bu amaçla Şekil 4.7'de görüldüğü üzere seçilen numunelerin donma kabarma hızları artan maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) değerleri ile azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.7: Düşük plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) arasındaki ilişki.

Yine düşük plastisiteli killi zemin grubunda, optimum su muhtevası yüksek olan zemin numunelerinde yüksek donma kabarma hızları belirlenmniştir. Artan optimum su muhtevasına karşılık donma kabarma hızlarının da arttığı Şekil 4.8'da görülmektedir. Ayrıca donma kabarma hızları ile zemin numunelerinin boşluk oranı ve porozite değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4.9 ve 4.10'da görülmektedir. Şekil 4.9 ve 4.10'de görüldüğü gibi hem boşluk oranı hem de porozitenin artması ile donma kabarma hızları artmıştır.



Şekil 4.8: Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile optimum su muhtevaları (w_{opt})arasındaki ilişki.



Şekil 4.9: Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile boşluk oranı (e) arasındaki ilişki.



Şekil 4.10: Düşük plastisiteli killi zemin grubunda donma kabarma hızları ile porozite (n) arasındaki ilişki.

Yüksek plastisiteli zemin grubunda da, donma kabarma hızları Şekil 4.11'de görüleceği üzere artan maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmıştır. Optimum su muhtevasının artması durumunda ise donma kabarma hızlarının arttığı belirlenmiş ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.11: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}) arasındaki ilişki.



Şekil 4.12: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile ile optimum su muhtevaları (w_{opt})arasındaki ilişki.

Ayrıca donma kabarma hızları ile boşluk oranı ve porozite arasındaki ilşkide incelenmiş ve sonuç olarak artan boşluk oranı ve porozite değerlerinde donma kabarma hızları da artmış ve Şekil 4.13 ve 4.14'da verilmiştir.



Şekil 4.13: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile boşluk oranı (e) arasındaki ilişki.



Şekil 4.14: Yüksek plastisiteli zemin grubundaki donma kabarma hızları ile porozite (n) arasındaki ilişki.

4.5 CBR Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zeminlerin donma-çözülme davranışının belirlenmesi için optimum su muhtevasında standart proktor enerjisi ile sıkıştırılan zemin numuneleri üzerinde doygun olmayan ve doygunluk sonrasında donma çözülme davranışına maruz kalınması durumunda zeminde oluşacak mukavemet kayıplarının incelenmesi amacıyla doygun olarak CBR deneyleri yapılmıştır. Doygun olamayan numuneler üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılmış ancak doygun halde hazırlanan numuneler üzerinde ise donma-çözülme sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. CBR deneyleri sonucunda sırasıyla donma-çözülme öncesi, donma-çözülme sonrası ve doygun halde donma-çözülme sonrası CBR değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Doygun numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değerleri ile numunelerin likit limitleri arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 4.15'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere likit limit değeri arttıkça donma-çözülme sonrası CBR değerlerinde düşüş görülmektedir. Burada likit limit değeri yüksek olan zemin numuneleri daha yüksek su muhtevalarına sahip ve donma-çözülmeden daha çok etkilenmektedir. Bu yüzden donma-çözülme sonrası CBR değerleri diğerlerine göre daha düşük çıkmaktadır.



Şekil 4.15: Suya doygun numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değeri ile likit limit arasındaki ilişki.

Donma-çözülme sonrası CBR değerleri ile numunelerin plastisite indisleri arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere plastisite indisi değeri arttıkça donma-çözülme sonrası CBR değerlerinde düşüş görülmektedir.



Şekil 4.16: Donma-çözülme sonrası CBR değeri ile plastisite indisi arasındaki ilişki.

Bu çalışma kapsamında zeminlerin donma-çözülme sonrası meydana gelecek mukavemet kayıpları ile zemin özellikleri ilişkilendirilmiştir. Özellikle ince daneli zeminlerde donma-çözülme sonrası oluşacak mukavemet kayıpları ile zeminlerin kıvam limitleri arasında bir ilişki olacağı düşünülmüştür. Ayrıca ince daneli zeminlerin su içeriği davarnışını eykileyen en önemli unsur olduğu bilinmektedir. Bu amaçla donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR değerlerindeki değişimler belirlenmiş ve bu değişimler likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası gibi zemin özellikleri ile ilişkileri incelenmiştir.

Optimum su muhtevasında standart Proktor enerjisi ile hazırlanan doygun olmayan numunelerin donma-çözülme öncesine göre belirlenen CBR değişimleri ile likit limit değerleri arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 4.17'de verilmektedir. Likit limit değeri yüksek olan zemin numunelerinin su tutma kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle su içeriğininde yüksek olması beklenir dolayısıyla donma-çözülme olayından daha çok etkilenecektir. Bu bilgiler ışığında şekilden de görüldüğü gibi likit limit değeri arttıkça donma-çözülme sonrası CBR değişim değeri artmaktadır.



Şekil 4.17: Doygun olmayan numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değişim miktarı ile likit limit arasındaki ilişki.

Yine donma-çözülme sonrası CBR değişim değeri ile plastik limit arasındaki ilişki Şekil 4.18'de, CBR değişim değeri ile plastisite indisi arasındaki ilişki Şekil 4.19'de ve CBR değişim değeri ile optimum su muhtevası arasındaki ilişki ise Şekil 4.20'de verilmiştir. Burada da plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası yüksek olan zemin numuneleri daha çok donma-çözülme olayından etkilenmektedir.



Şekil 4.18: Doygun olmayan numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değişim miktarı ile plastik limit arasındaki ilişki.

Donma-çözülme sonrası CBR değerlerindeki değişim miktarı artan plastik limit, plastisite indisi ve optimum su muhtevası ile arttığı görülmüştür. Ancak doygun olmayan koşullarda hazırlanan numunelerin donma-çözülme sonrası mukavemet kayıpları ile kıvam limitleri arasındaki ilişki elde edilen grafiklerden ve korelasyon katsayılarından da görüldüğü gibi oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Dolayısıyla mukavemet kayıpları ile kıvam limitleri arasında doğrudan bir ilişkinin olduğu söylenemez.



Şekil 4.19 Doygun olmayan numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değişim miktarı ile plastisite indisi arasındaki ilişki.



Şekil 4.20: Doygun olmayan numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değişim miktarı ile optimum su muhtevası arasındaki ilişki.

Ayrıca doygun olarak optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin donmaçözülme sonrası CBR değerleri ile kuru olarak optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin donma-çözülme öncesi CBR değerleri arasındaki değişimler belirlenmiştir. CBR değerlerindeki bu değişimler, Şekil 4.21'da likit limit, Şekil 4.22'de plastik limit, Şekil 4.23'de plastisite indisi ve Şekil 4.24'de ise optimum su muhtevası ile arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Şekil 4.21'da görüldüğü gibi numunelerin doygun haldeki donma-çözülme sonrası CBR değerlerindeki değişim artan likit limit değerleri ile artmıştır.



Şekil 4.21: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile likit limit arasındaki ilişki.

Şekil 4.22'de görüldüğü gibi CBR değerlerindeki değişim miktarları ile plastik limit arasındaki ilişki incelendiğinde ise plastik limit arttıkça CBR değerlerinde değişim artmaktadır. Aynı şekilde plastisite indisi ve optimum su muhtevası değerleri arttıkça CBR değerlerindeki değişim miktarları da artmaktadır ve ilişkiler Şekil 4.23 ve 4.24'da görülmektedir.



Şekil 4.22: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile plastik limit arasındaki ilişki.



Şekil 4.23: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile plastisite indisi arasındaki ilişki.



Şekil 4.24: Doygun haldeki numunelerin CBR değişim miktarı ile optimum su muhtevası arasındaki ilişki.

4.6 Genel Değerlendirme

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını ve donma-çözülme sonrası mukavemet davranışını belirlemek amacıyla 20 adet farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde donma-çözülme deneyleri ve CBR deneyleri yapılmıştır. Kullanılan numuneler genellikle ince daneli zemin numuneleri olup plastisite kartına göre yarısı düşük plastisiteli diğer yarısı ise yüksek plastisiteli kil numuneleridir. Numuneler donma-çözülme deneyleri için optimum su muhtevasında standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır.

Donma-çözülme ve CBR deneyleri sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ve CBR değişim oranları ile numunelerin geoteknik özellikleri ilişkilendirilmiştir. Donma kabarma hızları ile ilişkilendirilen geoteknik özellikler sırasıyla deney sonu su muhtevasının likit limite oranı (w/w_L), maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmaks}), optimum su muhtevası (w_{opt}), boşluk oranı (e) ve porozite (n), donmaçözülme sonrası mukavemet kayıpları ile likit limit (w_L), plastik limit (w_P), plastisite indisi (I_P) ve optimum su muhtevasıdır (w_{opt}).

Donma-çözülme ve CBR deneyleri sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ve mukavemet kayıpları ile geoteknik parametreler arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığının kontrolü için istatiksel analiz olan t testi yapılarak anlamlılık düzeyleri belirlenmiştir. Test istatistiği "t" belirlenen korelasyon katsayısı yardımı ile aşağıda verilen bağıntı 4.1 ile belirlenmektedir.

$$\boldsymbol{t} = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \tag{4.1}$$

Burada, t test istatistiği değeri, r korelasyon katsayısı değeri, n ise deney saysını gösterir. İlişkilerin anlamlılık düzeyini belirlemek için öncelikle yukarıda verilen bağıntı yardımı ile t değeri belirlenmiştir. Daha sonra seçilen %95 güvenirlilik düzeyine ve deney sayısına göre kritik cetvel değeri (t_c) belirlenmiştir. Hesaplanan test istatistiği değerinin kritik cetvel değerinden büyük olması durumunda korelasyon katsayılarının istatiksel olarak uygun olduğu söylenebilir. Bu çalışmada kritik cetvel değeri deney sayısı ve %95 güvenirlik düzeyine göre sırasıyla deney sayısı 20 için 1.734, deney sayısı 12 için 1.812 ve deney sayısı 8 için 1.943 olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada donma kabarma hızları ile ilişkilendirilen geoteknik parametreler arasında Çizelge 4.5'de görüleceği üzere anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Dolayısıyla donmaya karşı hassaslık, ilişkilendirilen zemin parametrelerinin belirlenmesi ile pratik amaçlar doğrultsunda önceden tahmin edilebilir.

Geoteknik	Donma Kabarma Hızı							
Parametre	Deney Sayısı	R ²	t testi	Anlamlılık				
w/w_L	20	0.4884	4.145	Anlamlı				
$\gamma_{\rm kmaks}^{1}$	12	0.7716 5.812		Anlamlı				
$\gamma_{\rm kmaks}^2$	8	0.6389 3.258		Anlamlı				
\mathbf{w}_{opt}^{1}	12	0.6633	4.438	Anlamlı				
W _{opt} ²	8	0.7398	4.130	Anlamlı				
e ¹	12	0.7511	5.493	Anlamlı				
e ²	8	0.5329 2.616		Anlamlı				
n ¹	12	0.7511	5.493	Anlamlı				
n ²	8	0.5336 2.620		Anlamlı				

Çizelge 4.5: Donma kabarma hızları ile ilişkilendirilen zemin parametreleri arasındaki ilişki düzeyi.

¹ Düşük plastisiteli zemin grubu, ² Yüksek plastisiteli zemin grubu

Donma-çözülme sonrası oluşacak mukavemet kayıpları ile zemin parametreleri arasındaki ilişkinin anlamlı olup olmadığı Çizelge 4.6'da verilmiştir. Buna göre doygun olmayan koşullar altında hazırlanan numunelerin donma-çözülme sonrası mukavemet kayıpları ile ilişkilendirilen parametreler arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı belirlenmiştir. Ancak doygun olarak hazırlanan numunelerde bu durum değişmiş ve anlamlılık düzeyleri artmıştır.

Geoteknik	ΔCBR							
Parametre	Deney Saysı	R ²	t testi	Anlamlılık				
w_L^1	20	0.1435	1.737	Anlamlı				
w_P^1	20	0.0517	0.991	Anlamsız				
${ m I_P}^1$	20	0.1413	1.721	Anlamsız				
w _{opt} ¹	20	0.3268	2.956	Anlamlı				
w_L^2	20	0.3404	3.048	Anlamlı				
w_P^2	20	0.3838	3.348	Anlamlı				
I_P^2	20	0.2903	2.713	Anlamlı				
w _{opt} ²	20	0.1345	1.672	Anlamsız				

Çizelge 4.6: Mukavemet kayıpları ile ilişkilendirilen zemin parametreleri arasındaki ilişki düzeyi.

¹ Doygun olmayan, ² Doygun olan

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında kili zeminlerin donmaya karşı hassaslıklarının ve donmaçözülme sonrası davranışının belirlenmesi amacıyla numuneler üzerinde donmaçözülme deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme deneyinden elde edilen donma kabarma hızları ile zeminlerin endeks özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca donmaçözülmenin zeminin kayma mukavemetine etkisinin incelenmesi için numuneler üzerinde donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada aynı numune üzerinde tekrarlı olarak deneyler yapılacağından hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında likit limit değerleri %28~%76 arasında, plastisite indisi değerleri ise %12~%45 arasında değişen 20 adet zemin numunesi kullanılmıştır. Donma kabarma hızı, optimum su muhtevasında Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılmış ve suya doygun olarak hazırlanmış numuneler üzerinde belirlenmiştir. Zeminlerin donma-çözülme davranışının belirlenmesi için aynı numune tekrar optimum su muhtevasında Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılarak donma-çözülme öncesi ve sonrası CBR deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca doygun olarak hazırlanan numuneler üzerinde donma-çözülme sonrası CBR deneyleri de yapılarak diğer CBR değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda donma kabarma hızlarının doğrudan olarak sadece likit limit (w_L) ve plastisite indisi (I_P) ile değişimi belirlenememiş ancak deney sonu su muhtevası ve likit limit oranları (w/w_L) arasındaki değişim belirgin olarak görülmüştür. Yapılan çalışmada donma kabarma hızları, deney sonu su muhtevasının likit limite oranlarının artması ile arttığı gözlemlenmiştir. Doygun numunelerin donma-çözülme sonrası CBR değerleri ile likit limit ve plastisite indisi arasındaki ilişki incelendiğinde CBR değeri artan likit limit değeri ile azalmaktadır. Bu çalışmada donma kabarma hızları doğrudan likit limit ve plastisite indisi değerlerine bağlı olmadığı görülmüş fakat deney sonu su muhtevasının donma kabarma hızını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Bosluk hacminin tüm hacime oranı olarak tanımlanan porozitenin artmasıyla deney başında suya doygun olarak kabul edilen numunelerde birim zemin hacmine düşen su miktarının artacağı düşünülebilir. Donma durumda hacmini %9 oranında arttıracak olan zemin boşluklarındaki suyun artması zeminde de göreceli olarak donma kabarmasına neden olması beklenebilir. Nitekim suya doygun zeminlerde porozite ile donma kabarma miktarı arasında beklenen doğrusal ilişki porozite ile donma kabarma hızı arasında da benzer bir ilişki bu çalışmada da gözlenmiştir. Bu amaçla donma-çözülme deneylerinden belirlenen donma kabarma hızları ile γ_{kmaks} , w_{opt} , e ve n arasındaki ilişkiler de incelenmiştir. Killi zeminlerin donma kabarma hızları plastisitelerine göre farklı olduğu için bu çalışma kapsamında kullanılan zemin numuneleri düşük ve yüksek plastisiteli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Her iki grupta da donma kabarma hızları artan γ_{kmaks} ile azaldığı, artan w_{opt} , e ve n değerleri ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca CBR değerleri, donma-çözülme öncesine göre doygun ve doygun olmayan tüm zemin numunelerinde düşüş göstermiştir. Doygun zemin numunelerinde ise CBR değerlerindeki bu düşüş daha yüksek oranlarda ve belirgin olarak görülmüştür. Eldeki zemin numunelerinin sayısının azlığından dolayı donma-çözülme sonrası CBR değerlerindeki değişim numunelerin kıvamlarına göre farklılık gösterse de aralarında net bir ilişki belirlenememiştir. Ancak, CBR değerlerindeki düşüş miktarının genellikle yüksek kıvam limit değerine sahip numunelerde daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, zeminlerin donmaya karşı hassaslığı ve donma-çözülme sonrası davranışının pratik amaçlar doğrultusunda tahmin edebilmek için numunelerin kıvam limitleri ile donma kabarma hızları arasında bağıntılar elde edilmiştir. Ayrıca donmaçözülme sonrası mukavemet kaybının zemin endeks özellikleri ile arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bağıntılar geliştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (1994). An introduction to frozen ground engineering. Second Edition. *The American Society of Civil Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- ASTM D 5918. (2006) Standard test method for frost heave and thaw weakening susceptibility of soils. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Beskow, G. (1935) Soil Freezing and frost heaving with special application to roads and railroads. *The Swedish Geological Society*, translated by J. O. Osterberg, Evanston, Illinois, The Technological Institude, Northwestern University, 1947, pp. 145.
- Brandl, H. (2008). Freezing-Thawing behaviour of soils and unbound road layers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 3, Sf. 4-12.
- Casagrande, A. (1932) A new theory of frost heaving. *Highway Research Board, Proceedings of the Annual Meeting*, 11(1), 168-172.
- Cruzda, K.A. ve Hohmann, M. (1997). Freezing effect on strength of clayey soils. *Applied clay science*, Vol. 12, Sf. 165-187.
- Eigenbrod. K. D. (1996). Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33(4), Sf. 529-537.
- Freitag, F. D., McFadden, T. (1997). Introduction to Cold region Engineerings. *Puplished by ASCE Press*, Newyork, pp. 209-211.
- **Gullu, H. ve Hazirbaba, K.** (2010). California bearing ratio improvemet and freezethaw performance of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid. *Cold regions science and technology*, Vol. 63, 50-60,
- Hermansson, A. (2003). Laboratory and field testing on rate of frost heave versus heat extraction. *Cold Region and Science Technology*, Vol.38, Sf. 137-151.
- Hewitt, R.D. ve Daniel, D.E. (1997). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners after freze-thaw. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, Sf. 305-313.
- Jing, W., Xiaolong, Q., Chunli, W. ve Yiming, X. (2103). Experimental research on shear strength of subgrade soil and plasticity index under different freze-thaw cycles. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 256-259, Sf. 43-47.

- Kaplar, Chester W. (1974 Freezing Test for Evaluating Relative Frost Susceptibility of Various Soils. *Technical Report No. 250, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, Hanover, New Hampshire, June, p. 36.
- **Kim, W. H. ve Daniel D. E.** (1992). Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay. Journal of Geotechnical Engineering, Vol.118, Sf. 1083-1097.
- Konrad, J-M. ve Samson M. (2000). Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, Sf. 857-869.
- Li, G., Ma, W., Zhao, S., Mao, Y. and Mu, Y. (2012). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil. *ASCE Cold Regions Engineering*, pp. 72-81.
- **M. Ghazavi ve M. Roustaie.** (2010). The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, Cold Regions Science and Technology, Vol.61, 125-131.
- Mitchell, J.K. (1976). Foundamentals of soil behavior, New York, Sf. 379.
- Othman, M. A., and Benson, C. H. (1991). Influence of freeze-thaw on the hydraulic conductivity of a compacted clay. *Proceedings of Fourteenth Annual Madison Waste Conference*, University of Wisconsin, Madison, 296-312
- **Othman, M. A., and Benson, C. H.** (1993). Effects of freze-thaw on the hydraulic and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30(2), Sf. 236-246.
- **O'Neill, K. ve R.D. Miller** (1985). Exploration of a Rigid Ice Model of Frost Heave. *Water Resources Research*, Vol. 21, 281-296.
- Paudel, W. ve Wang, B. (2010). Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley. 63rd Canadian Geotechnical Conference, Sf. 992-996, Alberta, Canada
- Tan, A. O. (1982). Dinamik yüklere maruz donmuş zeminlerin davranışı. İstanbul Teknik Üniversitesi (doktora tezi), İstanbul, Türkiye.
- Tester, R.E., and Gaskin, P.N. (1996) Effect of fines content on frost heave. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, 678-680.
- Viklander. P. (1998). Permeability and volume changes in till due to cyclic frezethaw. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35(3), Sf. 471-477.
- Yildiz, M., Sogancı, A.S., Demiroz, A. Ve Albayrak, V. (2004). Tekrarlı donma ve çözülmenin kireçle stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, Sf. 227-236., İstanbul, Türkiye.
- Wang. D., Ma. W., Niu. Y. Chang. X. ve Wen. Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qighai-Tibet clay. *Cold Region and Science Technology*, Vol. 48, Sf. 34-43.
- Xia, D.(2006). Frost heave studies using digital photographic technique. University of Alberta (yüksek lisans tezi), Edmonton, Canada.

EKLER

EK A: Numunelere Ait Tüm Deney Sonuçları

EK B: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi ve Numunelerin Dane Çapı Dağılım Eğrileri

EK C: Proktor Deney Sonuçları

EK D: Donma-Çözülme ve CBR Deney Sonuçları

Numune No	Gs	Likit Limit, w _L (%)	Plastik Limit, w _P (%)	Plastisite İndisi, I _P (%)	γ _{kmaks} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	Boşluk Oranı (e)	Porozite (n)	Birinci DKH (mm/gün)	İkinci DKH (mm/gün)	DÇ Öncesi CBR (%)	DÇ Sonrası CBR (%)	DÇ Sonrası (S=%100) CBR (%)
1	2.65	70	25	45	1.54	24.5	0.721	0.419	7.06	6.31	6.7	0.9	0.9
2	2.62	42	23	19	1.61	21.0	0.627	0.385	7.62	8.64	10.6	6.7	1.4
3	2.68	37	18	19	1.80	14.0	0.528	0.345	5.21	7.31	12.5	7.8	5.4
4	2.64	43	23	20	1.53	21.0	0.725	0.420	7.96	9.93	13.7	10.4	3.1
5	2.69	57	23	34	1.60	22.0	0.731	0.422	5.58	4.60	10.9	6.8	1.6
6	2.72	54	23	31	1.63	21.0	0.669	0.401	8.72	6.23	8.5	4.4	2.2
7	2.72	28	16	12	2.05	10.6	0.327	0.246	1.61	3.18	24.6	15.1	8.2
8	2.71	52	22	30	1.66	20.0	0.687	0.407	3.85	3.83	13.6	11.4	1.0
9	2.69	43	19	24	1.76	18.0	0.528	0.346	7.13	4.02	11.3	5.3	3.6
10	2.67	42	24	18	1.71	20.0	0.561	0.360	8.29	8.83	12.2	11.4	2.6
11	2.76	35	17	18	1.89	12.0	0.460	0.315	6.90	5.44	19.0	15.8	4.2
12	2.71	44	19	25	1.81	16.0	0.497	0.332	3.85	2.34	7.0	5.4	2.3
14	2.67	76	26	50	1.72	17.5	0.552	0.356	4.06	2.72	13.7	9.0	0.7
15	2.70	51	22	29	1.84	13.4	0.522	0.343	2.66	2.72	14.9	9.9	0.9
16	2.69	65	24	41	1.59	21.6	0.692	0.409	2.84	2.94	9.9	7.4	1.7
17	2.68	62	23	39	1.68	20.0	0.595	0.373	3.78	3.82	12.8	8.8	1.5
18	2.66	32	17	15	1.94	12.5	0.371	0.271	7.02	5.30	17.4	12.4	3.9
20	2.69	37	19	18	1.73	17.5	0.555	0.357	8.75	4.00	12.5	8.7	2.1
21	2.70	38	19	19	1.74	17.5	0.552	0.356	8.68	7.18	16.4	9.8	3.2
22	2.70	42	20	22	1.72	17.5	0.570	0.363	12.98	6.92	19.1	13.0	2.6

Çizelge A.1: Numunelere ait tüm deney sonuçları.

Gs: Dane özgül ağırlığı, γ_{kmaks}: Maksimum kuru birim hacim ağırlık, w_{opt}: Optimum su muhtevası, DKH: Donma kabarma hızı, DÇ: Donma-çözülme



Şekil B.1: 1 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.2: 2 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.3: 3 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.4: 4 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.5: 5 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.6: 6 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.


Şekil B.7: 7 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.8: 8 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.9: 9 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.10: 10 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.11: 11 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.12: 12 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.14: 14 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.15: 15 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.16: 16 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.17: 17 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.18: 18 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.20: 20 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.21: 21 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.



Şekil B.22: 22 Nolu numuneye ait dane çapı dağılım eğrisi.

EK C



Şekil C.1: 1 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.2: 2 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.3: 3 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.4: 4 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.5: 5 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.6: 6 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.7: 7 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.8: 8 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.9: 9 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.10: 10 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.11: 11 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.12: 12 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.13: 14 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.14: 15 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.15: 16 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.16: 17 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.17: 18 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.18: 20 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.19: 21 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.



Şekil C.20: 22 No'lu numuneye ait Standart Proktor deney sonucu.





Şekil D.1: 1 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.2: 1 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.3: 2 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.4: 2 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.5: 3 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.6: 3 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.7: 4 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.8: 4 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.9: 5 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.10: 5 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.11: 6 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.12: 6 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.13: 7 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.14: 7 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.15: 8 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.16: 8 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.17: 9 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.18: 9 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.19: 10 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.20: 10 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.


Şekil D.21: 11 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.22: 11 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.23: 12 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.24: 12 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.25: 14 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.26: 14 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.27: 15 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.28: 15 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.29: 16 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.30: 16 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.31: 17 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.32: 17 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.33: 18 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.34: 18 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.35: 20 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.36: 20 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.37: 21 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.38: 21 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.



Şekil D.39: 22 Nolu numuneye ait donma-çözülme deney sonucu.



Şekil D.40: 22 Nolu numuneye ait CBR deney sonuçları.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:	Adem IŞIK
Doğum Yeri ve Tarihi:	Erciş/1985
E-Posta:	isikadem@itu.edu.tr
Lisans:	Niğde Üniversitesi, 2009

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR

- IŞIK A., İYİSAN R., ÇEVİKBİLEN G., BAYIN A. "Frost susceptibility of fine grained soils related to consistency limits". 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering. 23-25 May 2013, EPOKA University, Tirana, ALBANIA.
- IŞIK A., ÇEVİKBİLEN G., İYİSAN R. "Zeminlerde Don Kabarmasi ve Zeminlerin Donma-Çözünme Sonrası Davranışı". *5. Geoteknik Sempozyumu* 5-7 Aralık 2013, Çukurova Üniversitesi, Adana
- IŞIK A., ÇEVİKBİLEN G., HATİPOĞLU M., İYİSAN R. "Donma ve Çözünmenin Taşıma Gücüne Etkisi". Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi. 16-17 Ekim 2014, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara (Özet)
- IŞIK A, ÇEVİKBİLEN G., İYİSAN R. "Freezing and Thawing Behavior of Compacted Soils". *11th International Congress on Advances in Civil Engineering*. 21-25 October 2014, Istanbul Technical University, Istanbul, TURKEY(Full Paper)

DİĞER YAYINLAR

• BAYIN A., İYİSAN R., ÇEVİKBİLEN G., **IŞIK A**. "The effect of testing methods on residual shear strength of cohesive soils". 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering. 23-25 May 2013, EPOKA University, Tirana, ALBANIA.