

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOYGUN OLMAYAN SİLTİ ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL
TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOYGUN OLMAYAN SİLTİ ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL
TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK

TEMMUZ 2023

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU tarafından hazırlanan “Doygun Olmayan Siltli Zeminlere Oturan Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü ” adlı tez çalışması 22.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Ertan BOL Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Yusuf Sümer Sakarya Uygulamalı BBilimler Üniv.	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Abdullah Tolga ÖZER Gebze Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Sedat SERT Sakarya Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “DOYGUN OLMAYAN SİLTİLİ ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(25/07/2023)

(imza)

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU





Anneme, babama, eşime ve oğluma



TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince kendisiyle çalışmaktan mutlu olduğum, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK ve doktora sürecimin belirli bir döneminde yine tez danışmanlığımı yapmış olan Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk ÇAPAR'a teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Ertan BOL, Doç. Dr. Sedat SERT ve Doç. Dr. Yusuf SÜMER hocalarıma en kalbi duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarında gerek maddi gerekse manevi desteklerinden ötürü Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR ve Arş. Gör. Kadir KOCAMAN'a teşekkür ederim. Doktora eğitimim boyunca laboratuvar çalışmalarımnda kıymetli teknik bilgilerini ve emeklerini benden esirgemeyen laboratuvar sorumlularımız Sn. Recep EYÜPLER ve Sn. Sebahattin İŞ'e teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca göstermiş oldukları büyük sabırları ve destekleri için, eşim Tuğba YILMAZOĞLU, oğlum Emin Alp YILMAZOĞLU ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mehmet Uğur YILMAZOĞLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxvii
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez İçeriği	7
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ	31
3.1. Giriş	31
3.2. Doygun Olmayan Zemin Mekaniği	33
3.2.1. Doygun olmayan zeminlerin gerilme durum değişkenleri	34
3.2.2. Doygun olmayan zeminlerin kayma direnci	39
3.2.2.1. Doygun olmayan zeminlerin doğrusal olmayan kırılma zarfı	43
3.2.2.2. Doygun olmayan zeminlerin elastisite modülü	47
3.3. Doygun Olmayan Zeminlerin Taşıma Kapasitesi	50
3.4. Doygun Olmayan Zeminlerin Hal Değişkenlerinin Ölçümü	53
3.4.1. Kılcal emme	53
3.4.2. Toplam emme	54
3.4.3. Eriyik (ozmatik) emme	54
3.5. Doygun Olmayan Zeminlerin Zemin-Su Karakteristik Eğrileri (SWCC)	55
3.5.1. DOZ emme ölçüm yöntemleri	57
3.5.1.1. Filtre kağıdı	59
3.5.1.2. Basınç plakası	61
3.5.1.3. Tansiyometreler	63
3.5.1.4. Psikrometreler	64
3.5.1.5. Isıl iletkenliksensörü	65
3.5.1.6. Emme sondası	66
3.6. SWC Eğrileri İçin Denklemler	67
3.7. Boşluk Boyutu Emme İlişkileri	71
4. MATERYAL VE YÖNTEM	73
4.1. Zemin Özellikleri	73
4.1.1. Kıvam özelliklerinin belirlenmesi	74
4.1.2. Numunelerin hazırlanması	76
4.1.2.1. SWCC numunelerinin hazırlanması	76

4.1.2.2. Kesme kutusu deney numunelerinin hazırlanması.....	77
4.1.2.3. Model deney numunelerinin hazırlanması	78
4.2. Kılcal Gerilme Ölçümü ve SWC Eğrilerinin Oluşturulması	79
4.2.1. Filtre kağıdı yöntemi	79
4.2.2. Basınç plakası yöntemi.....	83
4.2.3. SWC eğrilerinin elde edilmesi	84
4.2.4. SWC eğrileri - boşluk boyutu ilişkisinin elde edilmesi.....	84
4.3. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi.....	86
4.3.1. Doygun kayma direnci parametreleri	86
4.3.2. DOZ kayma direnci parametreleri.....	86
4.4. Model Deney Düzenegi ile Taşıma Kapasitesin Belirlenmesi	87
4.4.1. Model deney düzenegi	88
4.4.2. Model yüzeysel temeller	89
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	91
5.1. Kılcal Gerilme Deneyleri	91
5.2. Kayma Direnci Deneyleri.....	96
5.2.1. Boşluk oranı 0,65 numunelerin kayma direnci deneyleri	97
5.2.2. Boşluk oranı 0,70 numunelerin kayma direnci deneyleri	102
5.2.3. Boşluk oranı 0,75 numunelerin kayma direnci deneyleri	107
5.3. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi	113
5.4. Temel Taşıma Kapasitesi Deneyleri.....	123
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	147
6.1. Sonuçlar.....	147
6.2. Öneriler.....	149
KAYNAKLAR.....	151
ÖZGEÇMİŞ.....	159

KISALTMALAR

AEV	: Hava giriş değeri
ASTM	: Amerikan deney standardı
cm	: Santimetre
CU	: Konsolidasyonlu - drenajsız
DOZ	: Doygun olmayan zemin
gr	: Gram
kPa	: Kilopaskal
MI	: Orta plastisiteli silt
NO.200	: 0,074 mm çaplı elek
NO.40	: 0,420 mm çaplı elek
PVC	: Polivinil klorür
UC	: Serbest basınç dayanımı
SWCC	: Zemin su karakteristik eğrisi
TS	: Türk deney standardı



SİMGELER

$\hat{A}$	: Angström (10^{-10} m)
α, A	: Uydurma parametresi
B	: Temel genişliği
β	: Uydurma parametresi
C	: Uydurma parametresi
C°	: Santigrad derece
c'	: Efektif kohezyon
D_f	: Temel gömme derinliği
e	: Boşluk oranı
E_{sat}	: Doygun elastisite modülü
E_{unsat}	: DOZ elastisite modülü
f_1	: Boşluk su miktarını ifade eden kılcal gerilme fonksiyonu
$f(u_a - u_w)$	: Kılcal emme katkısıyla mukavemet artışı
I_p	: Plastisite indeksi
K	: Janbu boyutsuz modül sayısı
k_1	: Temel tabanı şekil faktörü
k_2	: Temel tabanı şekil faktörü
L	: Temel uzunluğu
n	: Uydurma parametresi
N_c	: Taşıma gücü katsayısı
N_q	: Taşıma gücü katsayısı
N_{γ}	: Taşıma gücü katsayısı
N_{unsat}	: DOZ taşıma gücü katsayısı
P_a	: Atmosfer basıncı
r_k^i	: Kelvin boşluk yarı çapı
r_p^i	: Boşluk yarıçapı
S_r/ S	: Doygunluk derecesi
S_{unsat}	: Serbest basınç dayanımına dayalı DOZ kayma dayanımı
S_{sat}	: Serbest basınç dayanımına dayalı doymuş kayma dayanımı

q	: Efektif örtü yükü
$q_{u(unsat)}$	: Zeminin serbest basınç dayanımı
u_a	: Boşluk hava basıncı
$u_a - u_w$	: Kılcal gerilme
$(u_a - u_w)_{AVE}$	: Ortalama kılcal gerilme değeri
$(u_a - u_w)_b$	: Zemin hava giriş değeri
u_w	: Boşluk suyu basıncı
u_{wf}	: Yenilme anındaki boşluk suyu basıncı
T_s	: Yüzey gerilimi
V_p^i	: Su veya hava dolu boşluk hacmi
δ	: Oturma
δh	: Yatay deformasyon
δv	: Düşey deformasyon
θ	: Hacimsel su içeriği
θ_s	: Doygun hacimsel su içeriği
w	: Su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
χ	: Kılcal gerilmeye bağlı doygunluk fonksiyonu
μ	: Poison oranı
γ	: Doğal birim hacim ağırlık
ϕ'	: Efektif kayma direnci açısı
ϕ_u	: Hocaya sor
ϕ^b	: Kılcal gerilmenin kayma direncine katkısı
σ	: Basınç gerilmesi
σ_c	: Ön konsolidasyon basıncı
$\sigma' - u_w$	: DOZ efektif gerilme
σ_n	: Normal gerilme
$\sigma_n - u_a$	: Net normal gerilme
$\sigma_x - u_w$	: X düzlemi efektif gerilme
$\sigma_x - u_a$	: X düzlemi net normal gerilme
$\sigma_y - u_w$	: Y düzlemi efektif gerilme
$\sigma_y - u_a$	: Y düzlemi net normal gerilme
$\sigma_z - u_w$	: Z düzlemi efektif gerilme

$\sigma_z - u_a$	: Z düzlemi net normal gerilme
σ_{ff}	: Yenilme anında yenilme düzlemindeki toplam normal gerilim
$(\sigma_f - u_w)_f$	: Yenilme anında yenilme düzlemindeki efektif normal gerilim
τ_{ff}	: Yenilme anında yenilme düzlemindeki kayma gerilimi
τ_{xy}	: X düzlemi y doğrultulu kayma gerilmesi
τ_{xz}	: X düzlemi z doğrultulu kayma gerilmesi
τ_{yx}	: Y düzlemi x doğrultulu kayma gerilmesi
τ_{yz}	: Y düzlemi z doğrultulu kayma gerilmesi
τ_{zx}	: Z düzlemi x doğrultulu kayma gerilmesi
τ_{zy}	: Z düzlemi y doğrultulu kayma gerilmesi
Ψ	: Uydurma parametresi
ξ_c	: Temel şekil faktörü
ξ_γ	: Temel şekil faktörü
ξ_{unsat}	: DOZ temel şekil faktörü



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Gerçekleştirilen model deney özellikleri.	7
Tablo 3.1. Emme ölçümünde kullanılan yöntemler (Özocak, 2003).	57
Tablo 3.2. Filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri.....	60
Tablo 3.3. SWC eğrileri oluşturmakta kullanılan denklemler.....	68
Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kıvam özellikleri	75
Tablo 4.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin mineralojik özellikleri	75
Tablo 4.3. Filtre kağıdı deney takip föyü	82
Tablo 4.4. Boşluk boyutu dağılımı ile SWC eğrisi ilişkisi hesaplama prosedürü.	84
Tablo 5.1. Farklı doygunluk derecesine sahip numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri.	115
Tablo 5.2. Kılcal gerilmenin kayma direncine katkısını gösteren açılar (ϕ_b).....	121
Tablo 5.3. Model deney taşıma kapasiteleri.....	132
Tablo 5.4. Farklı doygunluk derecesi ve boşluk oranına sahip numunelerin ortalama serbest basınç deney sonuçları.	135
Tablo 5.5. Model test sonuçları ve tahmini taşıma kapasitesi değerleri.....	137
Tablo 5.6. Doygun koşuldaki numunelerin model test sonuçları ve tahmini taşıma kapasitesi değerleri.....	145



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Küresel iklim bölge haritası (Achten ve ark., 2013).....	2
Şekil 1.2. Sürekli hava fazı içeren bir doymun olmayan zemin elemanı (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	2
Şekil 1.3. Zemin kesiti boyunca boşluk suyunun durumu (Fredlund, 2000).....	3
Şekil 1.4. Doymun ve doymun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri (Fredlund ve ark., 2012).....	4
Şekil 1.5. Tipik bir temel altında oluşan boşluk suyu basıncı değişimi (Gülşen, 2003).....	6
Şekil 2.1. Kılcal gerilme etkisi ile ϕ^b değerlerine bağlı kohezyon bileşeni (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	13
Şekil 2.2. Zeminin kılcal gerilme değeri ile temel taşıma gücü arasındaki ilişki (Fredlund ve Rahardjo, 1993).....	14
Şekil 2.3. Kılcal gerilme değerinin kayma direnci üzerindeki etkisi.....	16
Şekil 2.4. Deney tertibatının ve kullanılan cihazın genel şeması (Costa ve ark., 2003).....	19
Şekil 2.5. Taşıma gücü uydurma parametresi (ψ) ve plastisite indisi (I_p) arasındaki ilişki.....	21
Şekil 3.1. Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki doymun olmayan zemin profili (Rasool, 2014).....	32
Şekil 3.2. Doymun olmayan zeminde dört evreli blok diyagram (Fredlund ve Morgenstern, 1977; Özocak, 2003).....	37
Şekil 3.3. DOZ kübik elemanı üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri: net normal gerilme ve kılcal gerilme tensörleri (Likos ve Lu, 2004).....	38
Şekil 3.4. Doymun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri matris formu (Likos ve Lu, 2004).....	38
Şekil 3.5. Doymun zemin için Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Fredlund ve ark., 2012).....	40
Şekil 3.6. Bağımsız gerilme durumu değişkenleri cinsinden genişletilmiş Mohr-Coulomb kırılma yüzeyi (Fredlund ve ark., 1978).....	41
Şekil 3.7. Kırılma zarfının τ' ya karşı σ -ua düzleminde yatay izdüşümü (Fredlund ve ark., 2012).....	42
Şekil 3.8. Kayma direnci kılcal gerilme arasındaki ilişki (Fredlund ve ark., 1987).....	45
Şekil 3.9. SWC eğrisi ile kayma direnci arasındaki ilişki (Vanapalli ve ark., 1996).....	47
Şekil 3.10. İki farklı zeminde kılcal emmeye karşı su içeriğinin ilk ölçümleri (Richards (1928).....	55
Şekil 3.11. Zemin-su karakteristik eğrisi; (a) idealleştirilmiş zemin-su karakteristiği, (b) tipik zemin-su karakteristik eğrisi (Özocak, 2003).....	56
Şekil 3.12. Toplam ve kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdının yerleşimi (Öntürk, 2022).....	59

Şekil 3.13. Basınç plakası şematik gösterimi (Öntürk, 2022).....	62
Şekil 3.14. Soilmoisture tarafından üretilmiş tansiyometre	64
Şekil 3.15. Peltier termokupl psikrometre (Fredlund ve ark., 2012)	65
Şekil 3.16. AGWA-II ısı iletkenlik sensörünün kesit görünümü (Fredlund ve ark., 2012).....	66
Şekil 3.17. Emme sondası şematik gösterimi (Özocak, 2003).....	67
Şekil 3.18. Farklı zeminlerde kılcal gerilme gözenek boyutuyla ilişkisi (Fredlund ve ark., 2012)	71
Şekil 4.1. Zemin numunesi dane boyutu dağılım eğrisi.....	74
Şekil 4.2. Numune alma halkaları	77
Şekil 4.3. SWC numunelerini alma ve doyum prosedürü.....	77
Şekil 4.4. Kesme kutusu deney kurulumu.....	78
Şekil 4.5. Model deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar.	79
Şekil 4.6. Filtre kağıdı yöntemi deney aşamaları.....	80
Şekil 4.7. SWCC deneylerinde kullanılan terazi ve alüminyum kaplar.....	81
Şekil 4.8. Ölçümleri yapılan numunelerin bir sonraki aşama su muhtevası için bekletilmesi	81
Şekil 4.9. Basınç plakası yöntemi deney aşamaları	83
Şekil 4.10. Model deney sonu numune alımı.....	88
Şekil 4.11. Model deney düzeneği	89
Şekil 4.12. Model temeller	90
Şekil 5.1. $e = 0,65$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.	92
Şekil 5.2. $e = 0,70$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.	92
Şekil 5.3. $e = 0,75$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.	93
Şekil 5.4. Farklı boşluk oranına sahip SWC eğrilerinin karşılaştırması.	94
Şekil 5.5. Farklı zeminlere ait SWC eğrilerinin karşılaştırması	94
Şekil 5.6. Farklı boşluk oranına sahip zeminlerin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi	95
Şekil 5.7. Farklı boşluk oranına sahip zeminlerin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.	96
Şekil 5.8. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%65$	97
Şekil 5.9. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%70$	97
Şekil 5.10. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%75$	98
Şekil 5.11. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%85$	98
Şekil 5.12. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%100$	99
Şekil 5.13. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%65$	99
Şekil 5.14. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%70$	100
Şekil 5.15. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%75$	100
Şekil 5.16. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%85$	101
Şekil 5.17. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%100$	101
Şekil 5.18. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%65$	102
Şekil 5.19. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%70$	103
Şekil 5.20. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%75$	103
Şekil 5.21. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%85$	104

Şekil 5.22. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%100$	104
Şekil 5.23. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%65$	105
Şekil 5.24. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%70$	105
Şekil 5.25. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%75$	106
Şekil 5.26. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%85$	106
Şekil 5.27. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%100$	107
Şekil 5.28. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%65$	108
Şekil 5.29. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%70$	108
Şekil 5.30. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%75$	109
Şekil 5.31. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%85$	109
Şekil 5.32. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%100$	110
Şekil 5.33. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%65$	111
Şekil 5.34. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%70$	111
Şekil 5.35. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%75$	112
Şekil 5.36. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%85$	112
Şekil 5.37. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%100$	113
Şekil 5.38. 0,65 boşluk oranında zemin numunelerin kırılma zarfları.....	114
Şekil 5.39. 0,70 boşluk oranında zemin numunelerin kırılma zarfları.....	114
Şekil 5.40. 0,75 boşluk oranında zemin numunelerin kırılma zarfları.....	115
Şekil 5.41. Kayma direnci - doyumluk ilişkileri; $e = 0,65$	116
Şekil 5.42. Kayma direnci - doyumluk ilişkileri; $e = 0,70$	116
Şekil 5.43. Kayma direnci - doyumluk ilişkileri; $e = 0,75$	117
Şekil 5.44. Doyumluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,65$	117
Şekil 5.45. Doyumluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,70$	118
Şekil 5.46. Doyumluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,75$	118
Şekil 5.47. Doyumluk derecesi – kohezyon değeri ilişkileri.	119
Şekil 5.48. Doyumluk derecesi – kohezyon değeri artışı ilişkileri.	119
Şekil 5.49. Doyumluk derecesi – kayma direnci açısı ilişkileri.....	120
Şekil 5.50. Doyumluk – kayma direnci açısı artışı ilişkileri.....	120
Şekil 5.51. $e = 0,65$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.	122
Şekil 5.52. $e = 0,70$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.	122
Şekil 5.53. $e = 0,75$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.	123
Şekil 5.54. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 50 x 50 mm kare model temel.....	124
Şekil 5.55. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 50 mm daire model temel.....	124

Şekil 5.56. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 42,3 mm daire model temel	125
Şekil 5.57. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 37,5 x 37,5 mm kare model temel	125
Şekil 5.58. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 50 x 50 mm kare model temel	126
Şekil 5.59. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 50 mm daire model temel	127
Şekil 5.60. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 42,3 mm daire model temel	127
Şekil 5.61. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 37,5 x 37,5 mm kare model temel	128
Şekil 5.62. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 50 x 50 mm kare model temel	129
Şekil 5.63. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 50 mm daire model temel	129
Şekil 5.64. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 42,3 mm daire model temel	130
Şekil 5.65. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 37,5 x 37,5 mm kare model temel	130
Şekil 5.66. Model yükleme deney sonrası zemin oturması ve model temel etrafındaki çatlaklar: (a) 50 x 50 mm kare temel, (b) 50 mm daire temel	131
Şekil 5.67. Taşıma kapasitesi - doygunluk derecesi ilişkileri; $e = 0,65$	133
Şekil 5.68. Taşıma kapasitesi - doygunluk derecesleri ilişkileri; $e = 0,70$	133
Şekil 5.69. Taşıma kapasitesi - doygunluk derecesi ilişkileri; $e = 0,75$	134
Şekil 5.70. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 50 x 50 mm kare model temel	139
Şekil 5.71. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 50 mm daire model temel	140
Şekil 5.72. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 42,3 mm daire model temel	140
Şekil 5.73. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 37,5 x 37,5 mm kare model temel	141
Şekil 5.74. 50 x 50 mm kare temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerime, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %	141
Şekil 5.75. 50 mm daire temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerime, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %	142
Şekil 5.76. 42,3 mm daire temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerime, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %	142
Şekil 5.77. 37,5 x 37,5 mm kare temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerime, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %	142
Şekil 5.78. $e = 0,65$ boşluk boranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri	143
Şekil 5.79. $e = 0,70$ boşluk boranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri	143

Şekil 5.80. $e = 0,75$ boşluk boranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri. 144





DOYGUN OLMAYAN SİLTİ ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ

ÖZET

Genel olarak, doygun olmayan zeminler üzerinde yer alan yüzeysel temellerin nihai taşıma gücü, doygun zemin mekniği teorilerinin uygulandığı geleneksel kayma direnci parametreleri ile karakterize edilmektedir. Ancak bu durumda doygun durumda elde edilen zemin parameterleri kullanılarak tasarlanan temellerin ekonomik olmaktan uzak olacağı açıktır. Son yıllarda, drenajlı ve drenajsız yükleme koşullarını dikkate alarak doygun olmayan zeminler üzerinde yer alan temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için prosedürler geliştirilmiştir. Ancak bu çalışmalar genellikle kumlu zeminlerde yoğunlaşmaktadır. Literatürde önerilen sonuçların diğer zemin cinsleri için de geçerliliğinin test edilmesi gerekliliği açıktır.

Bu çalışma, doygun olmayan siltli zemin üzerine yerleştirilen sığ temellerin taşıma gücü değerinin incelenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda siltli zeminin, boşluk oranı, doygunluk derecesi ve kılcal gerilme büyüklüğünün etkisi incelenmiştir. Zemin-su karakteristik eğrileri, basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, baskın boşluk boyutunun doygun olmayan zeminlerin davranışı üzerindeki etkisi, kılcal gerilme ve boşluk boyutu arasındaki ilişkinin analizi yoluyla incelenmiştir.

Doygun olmayan siltli zeminlerin kayma direnci literatürde önerilen geleneksel kesme kutusu deneyi ve su muhtevası-kılcal gerilme eğrilerinden (zemin-su karakteristik eğrisi) tahmin edilen kılcal gerilme değerleri yardımıyla belirlenmiştir. Basit bir deneysel prosedürüne sahip ve hemen hemen her zemin laboratuvarında gerçekleştirilebilecek olan bu yöntemin güvenilir sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Deneyler sonucunda doygun olmayan koşullardaki silt zemin davranışının diğer zeminlere göre farklı olduğu ve doygun kabulüyle yapılan hesaplamaların gerçek zemin davranışına kısayla kabul edilemez düzeyde hatalı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Doygun olmayan silt zeminlere oturan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi ve davranışının belirlenmesine yönelik yapılan model deneylerinde doygun ve doygun olmayan koşullar oluşturulmuştur. Drenajsız yükleme koşulları altında 1.15 mm/dak'lık bir yükleme oranı kullanılarak model temel testleri gerçekleştirilmiştir. Model temel boyut ve şekillerinin etkisini araştırmak için 50 mm daire, 50 mm x 50 mm kare, 42.3 mm daire ve 37.5 mm x 37.5 mm kare model temellerin taşıma gücü değerleri ölçülmüştür. Model deneylerden elde edilen sonuçları, Skempton (1948) tarafından doygun zeminler için önerilen taşıma kapasitesi teorisi uyarlanarak yorumlanmıştır. Ayrıca çalışmada, doygun olmayan zemin numuneleri üzerinde ölçülen serbest basma testleri ile doygunluk derecesine bağlı uyurma parametresi (S^p) kullanılarak doygun olmayan silt zeminlere oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü değerinin tahmini için yeni bir eşitlik önerilmiştir.



BEARING CAPACITY OF SHALLOW FOUNDATIONS ON UNSATURATED SILTY SOILS

SUMMARY

The bearing capacity of shallow foundations on unsaturated soils is typically determined by conventional shear resistance parameters, which are based on saturated soil mechanics theories. However, designing such foundations using soil parameters obtained in the saturated state is often uneconomical. Recently, procedures have been developed to estimate the bearing capacity of foundations on unsaturated soils, taking into account both drained and undrained loading conditions. However, these studies have mainly focused on sandy soils, and the validity of the results suggested in the literature should be tested for other soil types as well.

This research is focused on examining the bearing capacity of shallow foundations that are situated on unsaturated silty soil. The study investigates the impact of void ratio, saturation degree, and matric suction value of silty soil. The creation of soil-water characteristic curves was achieved by utilizing both the pressure plate and filter paper methods. Moreover, the study examined the correlation between matric suction and void size to analyze the effect of dominant void size on the behavior of unsaturated soils.

Soil samples were collected from Adapazarı and were used in experimental studies to investigate the capacity of shallow foundations built on unsaturated soils. The material used in the experiments was silty soil with low clay content. The grain distribution curve of the soil sample was obtained through sieve analysis and hydrometer method according to TS 1900-1/2006 (TS: Turkish Standard). The soil sample was classified as MI (medium plasticity silt) according to TS 1500/2000. The natural void ratio values of the natural silts in Adapazarı were examined, and it was decided that the void ratio values of the samples to be used in the experiments would be 0.65, 0.70, and 0.75. In selecting the saturation degrees, the seasonal groundwater level changes in Adapazarı were taken into account, and saturation degrees of 65%, 70%, 75%, and 85% were chosen.

The soil sample was made homogeneous and air-dried using various equipment for the upcoming tests. The samples were divided into three groups for Soil-Water Characteristic Curves (SWCC) tests, shear box e tests, and model tests.

The sieved air-dry soil material was wetted by spraying deionized and de-aerated water to the desired saturation level in 2 kg groups and mixed with a sample preparation mixer. The mixtures were placed in airtight containers and left at room temperature for 24 hours to cure. After the 24-hour period, three different samples were taken from each container to check the water content. The drying oven and microwave methods controlled the water contents of the mixtures within a $\pm 0.5\%$ error.

For the pressure plate and filter paper method, the soil was statically compressed into a metal container with a certain volume at predetermined void ratios ($e_1=0.65$, $e_2=0.70$, and $e_3=0.75$) in three stages. Samples were taken from the compacted soil with metal molds with a diameter of 50 mm and a height of 20 mm. The samples were kept in deionized and deaerated water for seven days to reach saturation level. To prevent the samples from swelling, filter paper and porous stones were placed on them during the saturation stage.

The soils utilized for the shear box test were prepared in pairs of 2 kg the day before the test, utilizing the same procedure as the soil samples prepared for the SWCC test. The cured samples, prepared at the water content determined based on the research scenario, were statically compressed in a single step into the 60 mm x 60 mm x 25 mm shear box test cell.

To maintain the water content of the sample during the experiment, stainless steel plates were used instead of porous stones and perforated metals in the cutting cell. The plates were of the same thickness and placed in the upper and lower parts of the cell. Additionally, a thick layer of silicone grease was applied outside the test cell to prevent contact of the sample with air. The tests were conducted in a laboratory environment at a fixed room temperature of 24°C.

Soil samples required for the model test were prepared using the same procedure used for the SWCC and shear box test samples. Each scenario required a sample with 3 different void ratios, 5 different saturation degrees, and 4 different model foundations. The prepared samples were left to cure for 24 hours at room temperature in airtight containers to obtain a homogeneous soil-water mixture.

After the 24-hour curing time was completed, three different samples were taken from different regions to control the water content. It was verified that the water content of the mixtures in all the containers remained within $\pm 0.5\%$ evaporation/moisture change margin of error. Samples with controlled water content were placed in the model tank after rapid mixing to avoid the possibility of leaching due to the effect of gravity.

With weight/volume calculations, the samples with the desired void ratio and saturation degree were statically compressed into the model tank as two layers. Compaction was carried out by means of the compaction frame loaded with a 30 ton capacity hydraulic hand pump. Surface combing was done to prevent stratification that may occur between layers.

The study aimed to determine the shear resistance of unsaturated Adapazarı silt by utilizing a conventional direct shear box test device for practicality reasons. Matric suction values of unsaturated samples were measured through pressure plate and filter paper methods. The fully automated direct shearing device from Wykeham Farrance with a square shear box measuring 6x6 cm in diameter and 2.5 cm in height was used for the shear box experiments. Shear box tests were conducted following the ASTM standard D3080-98 at normal stress levels of 59, 98, and 147 kPa. The normal loads were determined by considering the cover load of the silt soil sample in natural conditions. To verify that there were no changes in the moisture content of the samples during the cutting box experiment, the wet and dry weights of the cut samples were determined after the test, and their water content was checked. The

values of ϕ^b of silt soil were calculated using shear box test results and matric suction values.

Model foundation loading tests were conducted as deformation-controlled tests. If soil samples are loaded at a velocity at a speed between 1.00 mm/min and 1.20 mm/min, undrained conditions will be achieved based on previous research on compacted samples. The capillary stretching effect can be measured under these conditions. However, the present investigation was simulated under undrained loading conditions with very fast loading speed of 1.15 mm/min. To confirm that the water content value of the samples did not change after the model loading tests, samples were taken from 1-3 cm and 5-7 cm below the sample surface using sampling rings of 25 mm height and 48 mm diameter. Filter paper was placed on the top and bottom of the samples without allowing the water content to change. After being wrapped with stretch film and aluminum foil, the samples were kept in a heat-insulated box for 9 days to equilibrate. The matric suction values of the samples were determined by using filter paper calibration curves and being controlled. Additionally, soil samples were taken from the model cell at 3 different depths (0-20 mm, 50-70 mm and 100-125 mm depth) for their water content was also checked and samples were taken for free compression tests (UC).

In this research, the shear strength of unsaturated silt soil was assessed using the conventional shear box test as recommended in the literature, along with the matric suction values determined from the soil-water characteristic curve. The results indicate that this method is a practical alternative to the costly and complicated DOZ soil testing devices, as it can be carried out in almost any soil laboratory and provides accurate outcomes.

The shear resistance and strength parameters of silt samples may vary depending on the matric suction and structure of the soil (void ratio), while the shear behavior has shown very little variation.

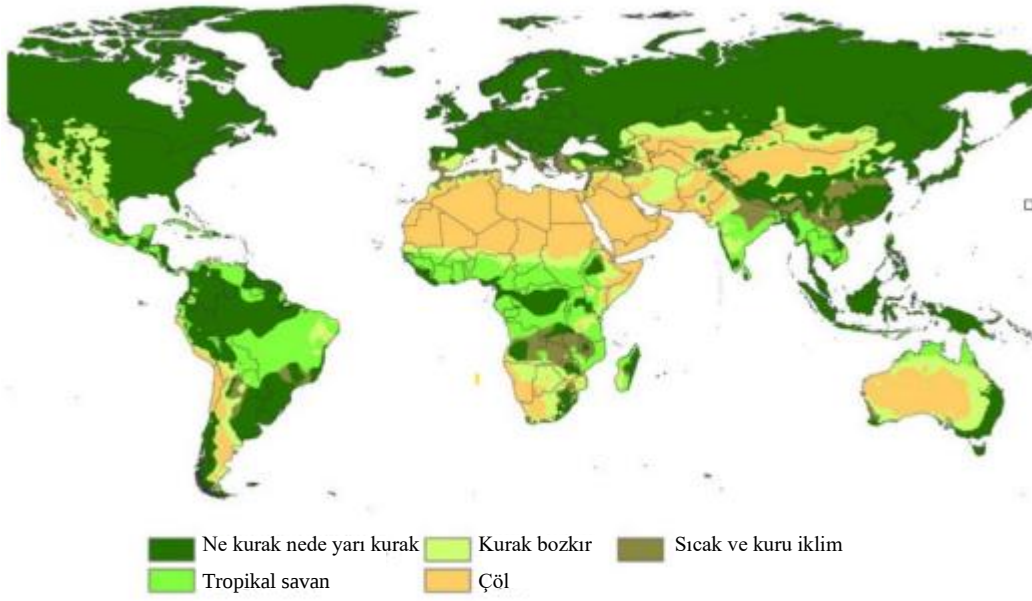
For all silt samples with three different void ratios, a cohesive value increase in accordance with matric suction rise value was observed, consistent with the literature. However, in terms of apparent shear resistance (ϕ), an increase was observed with an increase in matric suction rise value, contrary to the literature.

In the literature, a discrepancy has been observed between the values obtained through bearing capacity equations for shallow foundations in unsaturated soils and the outcomes of conducted model tests. Within the scope of this study, a novel equation is proposed based on the total stress approach, aiming to provide accurate results for shallow foundations in unsaturated silty soils. This equation that provides appropriate results for shallow foundations on unsaturated silty soils is proposed according to the total stress approach.



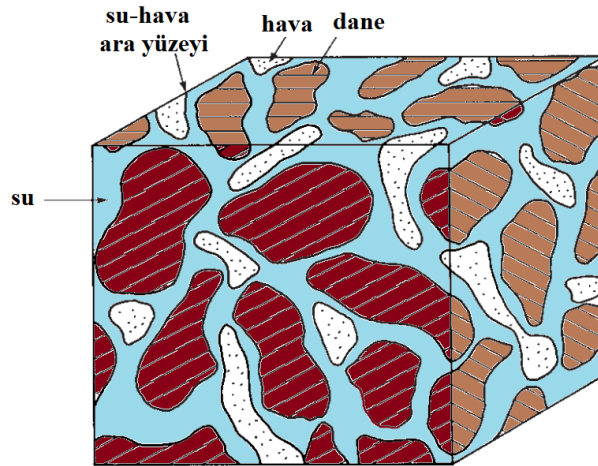
1. GİRİŞ

1920'lerde ülkemizde Zemin Mekaniği bilim dalının temellerinin atılmasından bu yana araştırmacıların zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde yaptıkları çalışmalar artmıştır. Deneysel çalışmalar genel olarak laboratuvar ortamında kontrollü olarak yeniden oluşturulmuş ya da araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde doymun hale getirilerek yürütölmüş araştırmaları içermektedir (Fredlund ve ark., 2012). Yakın zamana kadar doymun olmayan zeminler de doymun kabulü ile incelenmişlerdir. Zeminlerin doymun durumdaki davranışlarının araştırılmasının iki temel sebebi vardır: Birincisi sayısal analiz ve modellerde dikkate alınacak parametrelerin azaltılarak karmaşık hesap yöntemlerinden kurtulup analiz kolaylığı sağlaması, ikincisi ise doymun kabul ile yapılan analizlerde güvenli tarafta kalınmasıdır. Ancak gezegenimizdeki 135,2 milyon km² kara alanının 66.5 milyon km²'si kurak ve yarı kurak bölgelerden oluşmaktadır (Şekil 1.1)(Achten ve ark., 2013; Holmgren, 2006). Bu bölgelerde doğal yeraltı su seviyesi tipik olarak daha derindedir. Dolayısıyla bu bölgelerdeki tüm zeminlerin ne tamamen doymun olduğu ne de tamamen kuru olduklarından söz edilebilir. Doymun olmayan zeminler (DOZ), gözeneklerinde hem hava hem de sıvı faz içerirler. DOZ, kurak ve yarı kurak bölgelerde doğal olarak oluşabileceğı gibi yapay olarak sıkıştırılarak (insan yapımı) oluşturulmuş zeminler de olabilirler. Her iki koşuldaki zemin tipik olarak doymamış durumdadır ve bu nedenle mekanik özellikleri ve yapı-zemin etkileşim davranışları kılcal gerilme ($u_a - u_w$) ve net normal gerilmeden ($\sigma_n - u_a$) önemli ölçüde etkilenir. Kılcal gerilme, boşluk hava basıncı (u_a) ile boşluk suyu basıncı (u_w) arasındaki fark olarak tanımlanırken net normal gerilme maruz kalınan normal gerilme (σ_n) ile boşluk hava basıncı arasındaki fark olarak ifade edilir.



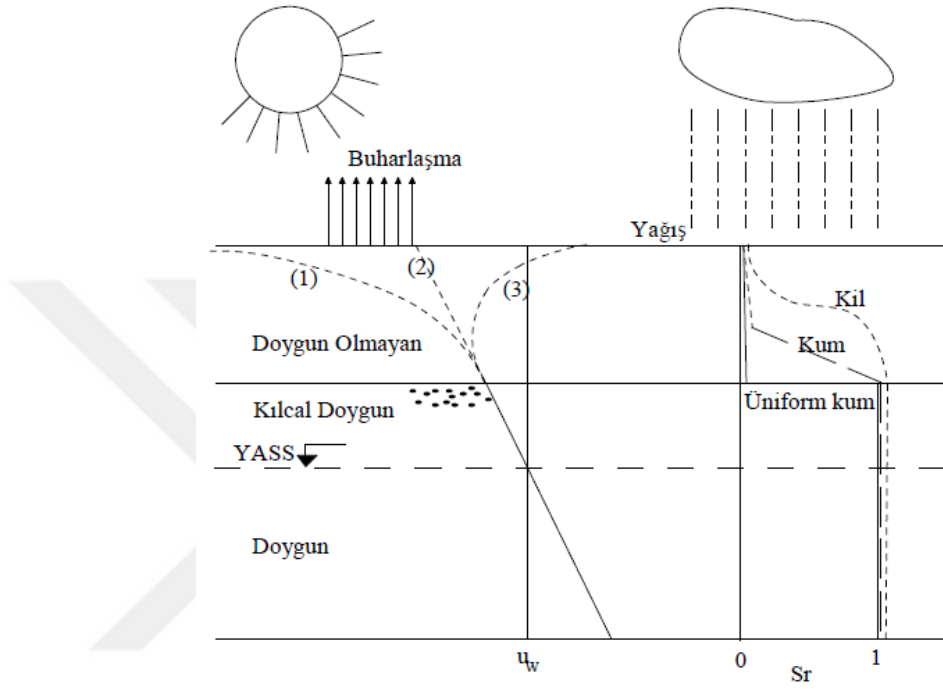
Şekil 1.1. Küresel iklim bölge haritası (Achten ve ark., 2013).

Bilindiği üzere zeminler, zemin daneleri ve bu daneler arasındaki boşluklarda yer alan hava ve sudan oluşmaktadır. Zeminin su hacminin boşluk hacmine oranı doygunluk derecesi (S veya S_r) olarak adlandırılmaktadır. Genel kabul olarak bu oran %98'in üzerinde ise zemin doygun kabul edilir. %98'in altına indiğinde ise doygun olmayan ortam belirlemekte ve %80'nin altında ise hava fazı da zemin elemanında sürekli hale gelmektedir (Şekil 1.2)(Fredlund ve Rahardjo, 1993)



Şekil 1.2. Sürekli hava fazı içeren bir doygun olmayan zemin elemanı (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

Bir zemin kesitinde yer alan tabakalar suya doygunluk bakımından üç kısımda incelenebilir. Yeraltı su seviyesi altında kalan tabakaların doygunluk derecesi %100'dür ve doygun olarak göz önüne alınmaktadır (Şekil 1.3). Bu bölgede boşluk suyu basıncı atmosfer basıncına eşitken su seviyesinden derine inildikçe suyun birim hacim ağırlığı katınca artı değerler alır (Fredlund, 2000).



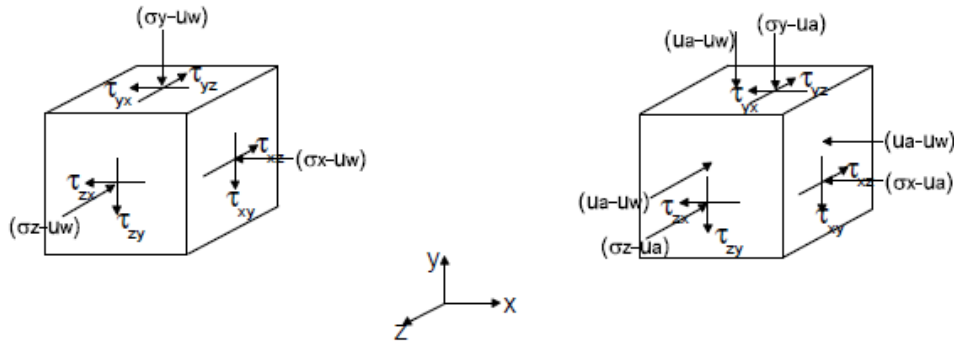
Şekil 1.3. Zemin kesiti boyunca boşluk suyunun durumu (Fredlund, 2000).

Su seviyesi üzerindeki bölge zemin danelerinin boyutuna bağlı olarak kuru, yarı doygun veya kılcal doygun olabilir. Su seviyesi üzerindeki çakıl ve iri kum zeminler kuru kalır. Bunun yanında, ince zeminlerde zemin daneleri ve su arasındaki sınırdaki etkiyen kuvvetler sonucu kılcallık olayı gelişmekte ve yukarı doğru yükselen su boşluk boyutuna bağlı olarak belli bir yüksekliğe kadar bölgenin doygunu yakın duruma gelmesine neden olmaktadır.

Yer altı su seviyesi üzerinde boşluklardan yukarı tırmanmasıyla suyun potansiyel enerjisi de artar. Boşlukların tamamen suyla dolması için potansiyel enerjisinden doğan su seviyesine doğru etkiyen kuvvetin yukarı doğru yükselen kılcal kuvveti geçmemesi gerekmektedir. Doygun kalan bu bölgede boşluk suyu, kendi ağırlığı ve su seviyesine uzaklığına bağlı olarak negatif büyüklüğe sahiptir.

Zemin içindeki sürekli boşluklar değişken boyuta sahiptirler. Kısmi doymun veya suyun süreksiz bulunduğu doymun olmayan bölgede sadece en küçük boşluklar suyla doludur ve kalan boşluklar boyutuna göre boş, ya da suyla kısmen doludur. Bu şekilde doymunluk derecesi düşmeğe başlar. Zemin yüzeyine doğru çıkıldığında doymunluk derecesinin zemin cinsine bağlı kalarak azalmasıyla boşluk suyu gerilimi negatif değerlere düşer (Şekil 1.3 (2)). Buharlaşıma durumunda bu negatif değer iyice artar (Şekil 1.3 (1)) ya da yağış durumunda üst kısımdan itibaren pozitif büyüklüğe dönüş başlar (Şekil 1.3 (3)).

Doymun olmayan zeminleri doymun zeminlerden ayıran en önemli fark, negatif boşluk suyu basıncına sahip olmalarıdır. Özellikle silt ve kilden oluşmuş zeminlerde kılcal gerilme (negatif boşluk suyu basıncı) oluşmaktadır. Doymun olmayan zeminlerde davranışı belirleyen kilit parametrelerin başında kılcal gerilme ($u_a - u_w$) gelmektedir (Özocak, 2003; Fredlund ve ark., 2012) Doymun ve doymun olmayan zeminler (DOZ) içingerilme durum değişkenleri Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Doymun ve doymun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri (Fredlund ve ark., 2012)

Bu ifadelerden anlaşılacağı gibi doymun olmayan zeminlerde gerilmeler belirli sınırlar arasında bulunmalıdır ($\sigma > u_a > u_w$). Bu durumun ortadan kalkması halinde sistemde süreklilik kaybolmakta, yani $u_w > \sigma$ durumunda zemin sıvılaşmakta, $u_a > \sigma$ olduğunda ise zemin dağılmakta, her iki durumda denge yitirilmiştir.

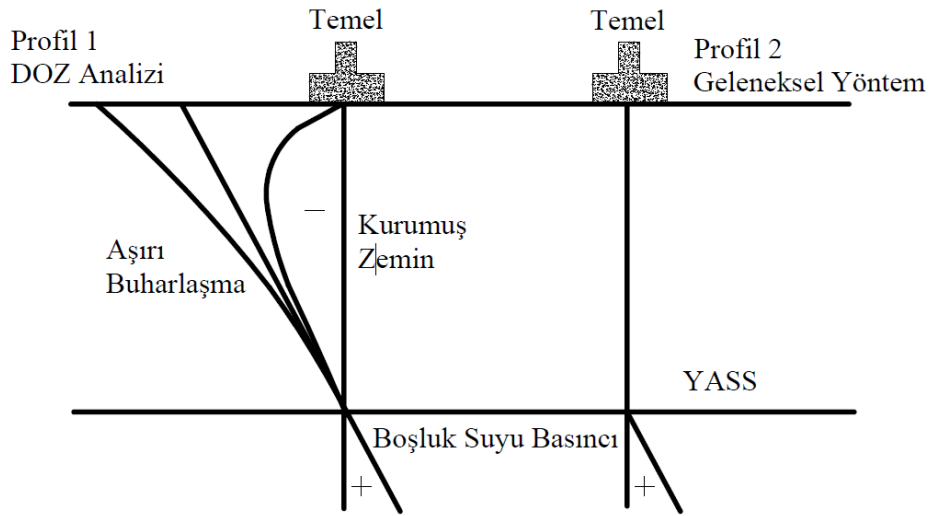
Arazide plaka yükleme deneyleri ile elde edilen taşıma gücü değerleri, genelde klasik zemin mekaniği kabulleriyle hesaplanan taşıma gücü değerlerinden daha yüksek sonuçlar vermektedir. Arazideki taşıma gücü değerinin yüksek ölçülmesinin nedeni,

zeminde doymun olmayan koşullarda var olan kılcal gerilme değeriinin ihmal edilmesidir (Fredlund ve ark., 2012). DOZ'lerde taşıma gücü ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda başlamıştır. Son yıllarda artan ilgiyle çeşitli araştırmacılar konuyla ilgili farklı bulgular ortaya çıkarmışlardır. Ancak günümüzde genellikle hesaplamalarda güvenli tarafta kalması ve hesap kolaylığı nedeniyle taşıma gücü analizlerinde geleneksel formüllerin kullanılmasına devam edilmekte, var olandan daha düşük değerler ile yetinilmektedir.

Taşıma gücü analizlerinde geleneksel yaklaşımla yapılan hesaplamalarda doymun veya doymun olmayan durumdaki zeminler üzerine oturan temellerin taşıma gücü ve oturma davranışının yorumlanması için çeşitli analiz yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemleri iki ana grup altında toplamak mümkündür. Birinci grup, ilk olarak Terzaghi (1943) tarafından önerilen taşıma gücü denkleminde kullanılan ve boşluk suyu açısından drenajlı durumu varsayan, c' ve ϕ' (Efektif Gerilme Yaklaşımı, ESA) efektif kayma direnci parametrelerini gerektirmektedir. İkinci grup ise Skempton (1948) tarafından önerilen, drenajsız koşullar altında (Toplam Gerilme Yaklaşımı, TSA) doymun zeminler üzerine oturan temel taşıma kapasitesinin hesaplanmasında $\phi_u=0$ analizine dayanan yöntemlerdir. Bu yöntemlerde temel taşıma kapasitesinin hesaplanmasında doymun zemin kayma direnci parametreleri kullanılarak gerekli temel boyutları belirlenmektedir (Meyerhof, 1951; Terzaghi, 1943). Bu yöntemleri kullanan geleneksel kabullerde doymun olmayan zemin tabakalarına oturan temellerin taşıma gücü değeri çoğunlukla doymun durum kabulü uyarınca yapılmaktadır. Bu varsayıma göre temel taşıma gücü değeri gerçek değerlerden uzak olmasına rağmen güvenli bir tasarım sağlaması, doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışının karmaşık olması ve pratik yöntemlerin bulunmaması gerekçeleri savunulmaktadır. Ancak sonuçların ekonomik çözümden uzak olduğu da önemli bir gerçektir. Doymun olmayan zemin ortamında gerçekçi bir tasarım yapılmak isteniyorsa kılcal gerilmeyi göz önünde bulundurarak hesaplara yansıtmak gerekmektedir.

Şekil 1.5' de tekil bir temelin hem geleneksel yaklaşımla hem de DOZ yaklaşımıyla boşluk suyu basıncı değişimleri gösterilmektedir. Profil 1'e bakıldığında DOZ yaklaşımıyla; yeraltı su seviyesi üzerinde kapiler bölgede oluşan kılcal emme

etkisiyle negatif boşluk suyu basıncı gösterilmiştir. Profil 2’de ise geleneksel zemin mekaniği yaklaşımında kabul edilen idealize boşluk suyu basıncı gösterilmiştir. Açıkça görülmektedir ki geleneksel taşıma gücü (Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi) hesap yönteminde yeraltı su seviyesi üzerindeki kılcal gerilme büyüklüğü ihmal edilmektedir. Bu nedenle DOZ etkisinin görüldüğü zemin kesitlerinde kurak ve yarı kurak iklim özelliği taşıyan bölgelerde geleneksel taşıma gücü formüllerinin kullanılması gerçekçi bir sonuç vermeyeceğinden önerilmemektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).



Şekil 1.5. Tipik bir temel altında oluşan boşluk suyu basıncı değişimi (Gülşen, 2003)

Ülkemizde de yarı kurak iklim özelliklerine sahip doymun olmayan zeminler ile hemen hemen her bölgede karşılaşmaktadır. Özellikle Adapazarı gibi Sakarya Nehri’nin taşıyıp biriktirdiği ve yer altı su seviyesinin görece sığ olduğu alüvyonal zemin ortamında dahi yapı temellerinin çoğu doymun olmayan tabakalara oturmaktadır. Bu çalışma kapsamında Adapazarı bölgesinden temin edilen zemin numunesi kullanılmıştır. Bu çerçevede bölgeyi temsil eden statik olarak sıkıştırılarak yeniden oluşturulan siltli zemin numunelerinde doymun olmayan durumdaki kayma direncini belirlemek için modifiye edilmiş doğrudan kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu koşullara maruz kalan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi için geliştirilmiş bir dizi model deneyler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan model deney düzeneğinde farklı doymunluk derecesi/kılcal gerilme ve farklı boşluk oranı değerlerine sahip siltli zemin

tabakalarına oturan farklı tip ve boyuttaki model temellerin taşıma gücü değerleri ölçülmüştür. Bunun yanı sıra doymun olmayan siltin zemin–su karakteristik eğrileri ve kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak doymun olmayan siltli zemin tabakalarına oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü değerinin belirlenmesine yönelik yeni bir denklem önerilmiştir.

1.1. Tez İçeriği

Bu çalışmada statik olarak sıkıştırılarak yeniden oluşturulan silt zemin numunesinin üzerine oturan model temellerin hem doymun hem de doymun olmayan koşullarda taşıma kapasitesini belirlemek için kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Mevcut araştırma programında kullanılan silt numunesi 0.65, 0.70 ve 0.75 boşluk oranlarında ve %60, %70, %75, %85 ve %100 doymunluk derecelerinde hazırlanarak deneysel program gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada dört tip model temel kullanılmıştır (37.5mm x 37.5mm kare, 42.3 mm daire, 50mm x 50mm kare ve 50 mm daire temel).

Farklı kılcal gerilme değerleri uygulanmış ve farklı boşluk oranlarına sahip zemin tabakaları üzerine oturan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi Tablo 1.1’de listelenmiş model yükleme deneyleri ile belirlenmiştir.

Tablo 1.1. Gerçekleştirilen model deney özellikleri.

Boşluk Oranı	Model Temel	Doymunluk Dereces, %				
		%65	%70	%75	%85	%100
0,65	50 mm Daire	X	X	X	X	X
	50mm x 50mm Kare	X	X	X	X	X
	42,3mm Daire	X	X	X	X	X
	37,5mm x 37,5 mm Kare	X	X	X	X	X
0,70	50 mm Daire	X	X	X	X	X
	50mm x 50mm Kare	X	X	X	X	X
	42,3mm Daire	X	X	X	X	X
	37,5mm x 37,5 mm Kare	X	X	X	X	X
0,75	50 mm Daire	X	X	X	X	X
	50mm x 50mm Kare	X	X	X	X	X
	42,3mm Daire	X	X	X	X	X
	37,5mm x 37,5 mm Kare	X	X	X	X	X

Deneysel çalışmada kullanılan zemin numunelerinin kayma direnci parametreleri; efektif kohezyonu, (c') ve efektif kayma direnci açısı ϕ' , doğrudan kesme test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Fiziksel özellikler ve sıkıştırma özellikleri de laboratuvarında belirlenmiştir.

Bu tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde tezin konusu, amacı, kapsamı ve yapılmış deneysel çalışmalar kısaca açıklanmış, doymun olmayan zeminler hakkında kısa bilgi verilmiştir. Bölüm sonunda ise çalışmanın literatürdeki yeri ve özgün değerleri açıklanmıştır.

İkinci bölüm olan "Literatür Taraması", doymun ve doymun olmayan zeminlerin mekaniği ile doymun ve doymun olmayan zeminlere oturan temellerin taşıma gücü değerinin hesaplanmasında kullanılan denklemlerin sınırlamaları da açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde doymun olmayan zemin mekaniği hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir. Doymun olmayan zeminlerin tanımlanmasında kullanılan parametrelerin ölçüm yöntemlerinden, yardımcı tekniklerden ve elde edilen sonuçların nasıl yorumlanması gerektiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca doymun olmayan zeminlerin davranışı üzerine yapılan çalışmaların karmaşıklığı ve literatürde bu alanda yaşanan çalışma eksikliğinden bahsedilmiştir.

Dördüncü bölüm olan "Materyal ve Yöntem", silt zemin numunesinin özelliklerini, zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ve kayma direnci parametreleri, hedeflenen değerlerin ve ilişkilerin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinin ayrıntılarını özetlemektedir. Ayrıca çalışmanın yürütülmesinde kullanılan model deney ekipmanları dahil olmak üzere, kullanılan tüm ekipmanların ayrıntıları sunulmuştur.

Beşinci bölüm "Deney Sonuçları ve Tartışma" bölümünde, gerçekleştirilen deney sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda araştırma programına göre yapılan model deney sonuçları sunulmuştur. Bu sayede farklı doymunluk derecesi/kılcal gerilme ve farklı boşluk oranı değerlerine sahip siltli zemin tabakalarına oturan farklı tip ve boyuttaki model temellerin taşıma gücü değerleri karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra doymun olmayan siltin SWC eğrileri ve kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak doymun olmayan siltli zemin tabakalarına oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü değerinin kılcal gerilme değeri ve SWCC göre değişimi

arasındaki karşılaştırmalar yapılarak temel taşıma gücünün kestirimine yönelik yeni bir denklem önerilmiştir.

Altıncı bölüm olan "Sonuç ve Öneriler" bölümünde bu çalışmanın özeti ve sonuçları sunulmuştur. Ayrıca gelecekteki araştırma çalışmaları için çeşitli tavsiyelerde bulunulmuştur.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde yüzeysel temellerin taşıma kapasitesine yönelik yapılmış çalışmalara bakıldığında büyük bir kısmının Terzaghi'nin doymuş zemin tabakalarına oturan temel taşıma gücü teorisine dayandığı görülebilir. Ancak, yüzeysel temeller genellikle doymuş olmayan zemin katmanlarına inşa edildiğinden geleneksel hesap yöntemleri ile tahmin edilen taşıma gücü değerleri gerçek değerlerden uzak kalmakta muhafazakâr ve maliyetli temel tasarımlarına yol açmaktadır. Dolayısıyla birçok araştırmacının ilgisi, doymuş olmayan zeminlere oturan temel taşıma gücü değerinin belirlenmesi ve tahminine yönelik çalışmalara yönelmiştir. Ancak yapılan bu araştırmaların çoğu üniform kum numuneler üzerinde ortalama 2 ila 6 kPa kılcal gerilme değerleri aralığında yürütülmüştür. Bunun yanı sıra kohezyonlu zemin tabakalarının doymuş olmayan durumlarına yönelik yeterince çalışma bulunmadığı görülmektedir. Literatürde kabul görmüş başlıca çalışmalar aşağıda paragraflar halinde özetlenmiştir.

Button (1953), yapmış olduğu araştırmasında iki katmanlı bir kohezyonlu zeminlerin üzerine inşa edilecek silindirik temellerin taşıma kapasitesini incelemiştir. Modellemelerde birinci katmanının zayıf, ikinci katmanının ise kuvvetli olacak şekilde tasarlayarak taşıma gücü değerinin belirlenmesinde etkili olan farklı faktörleri araştırmıştır. Doymuş zeminlerde temel taşıma gücü değerini belirlemek için kullanılan Terzaghi ve Peck yöntemi gibi çeşitli yöntemler ile hesaplanan taşıma gücü değerleri için önerdikleri formül ve karşılaştırmalarını sunmuşlardır. Sonuç olarak çalışmada doymuş olmayan her iki zemin katmanının ortalama değerlerini alan eş değer analiz yaparak silindirik temel taşıma gücü değerini hesaplamıştır.

Broms (1963), yapmış olduğu araştırmasında doymuşluk derecesinin esnek kaplamaların taşıma gücü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Doymuş olmayan zeminlerde esnek kaplamanın taşıma gücü değerini değerlendirmek için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde, göçmenin tamamen doymuş alt zemin tabakasında meydana geldiği varsayılmıştır. Taşıma gücü, doymuşluk derecesinin, görünen kohezyonun ve kayma direnci açısının bir fonksiyonudur. Bu çalışmada, doymuşluk

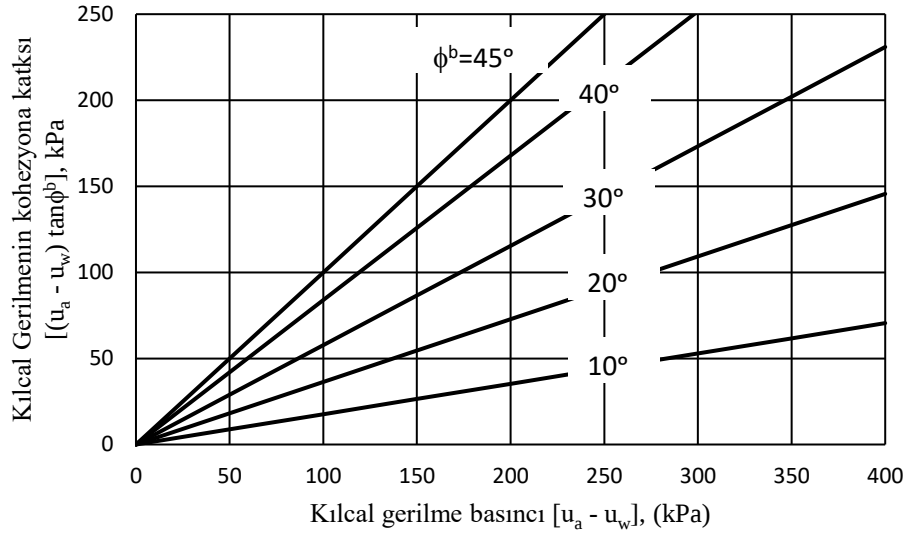
derecesinin kaplamanın taşıma gücü değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Doygunluk derecesinin %100'den %90'a düşmesi, iki kohezyonlu zemininde (yani silt ve kil) taşıma gücü değerini sırasıyla yaklaşık % 2 ve % 8 artırmıştır. Böyle bir davranış, ince daneli zeminlere oturan temel taşıma gücü değerinin doymunluk derecesindeki bir artıştan dolayı azaldığını göstermektedir. Çalışmada ayrıca, doymunluk derecesinin asfalt betonunun taşıma kapasitesi üzerine etkisinin kohezyonlu zeminlerde granüler zeminlere daha büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

Steensen-Bach ve ark. (1987), Steensen-Bach vd. (1987), doymun ve doymun olmayan koşullarda iki farklı kumun ,zerine oturan yüzeysel temelin taşıma gücü değerini incelenmiştir. Temellerin altında yer alan zemin tabakalarının kılcal gerilme değerleri, tansiyometreler kullanılarak yerinde ölçümleri ve laboratuvar ortamında SWC eğrilerinin oluşturulmasıyla belirlenmiştir. Doymun olmayan kuma oturan temelin ölçülen taşıma kapasitesinin, aynı zeminin doymun durumunda olması durumundaki taşıma kapasitesinden tipik olarak 4 ila 6 kat daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. İki farklı özelliğe sahip kum üzerinde yapılan model test sonuçlarına dayanarak, zemin içerisinde kılcal gerilme varlığı ve etkisinin çok belirgin olduğu ve etkisinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Gan ve ark. (1988), doymun olmayan durumdaki buzul kilinin modifiye edilmiş kesme kutusu deney cihazı kullanarak kayma direnci parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Öncelikle doymun olmayan zeminlerde kayma direnci parametrelerini belirlemek için kullanılan farklı yöntemler tartışılmış ve modifiye edilmiş kesme kutusu deney cihazının kullanılabilirliği uygun bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Diğer yöntemlere göre daha pratik ve güvenilir olduğu kanıtlanmış ve kılcal gerilme değerinin kontrolünün kritik önem taşıdığı vurgulanmıştır.

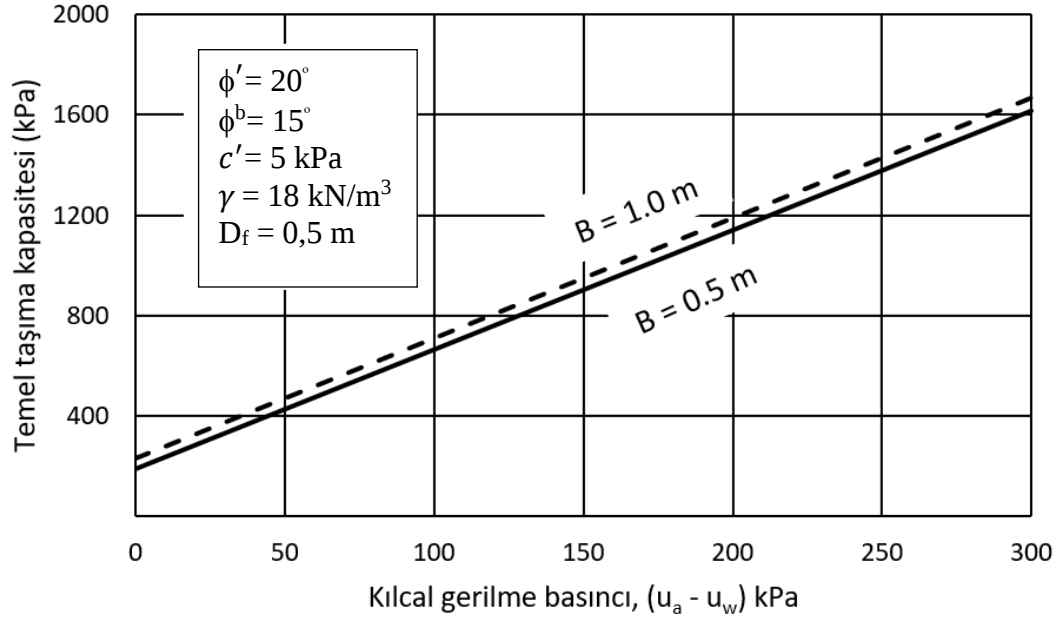
Fredlund ve Rahardjo (1993), Fredlund ve Rahardjo (1993), toplam gerilme yaklaşımını genişleten görünür kohezyon teriminde kılcal gerilme etkisini de içeren geleneksel kayma direnci denklemini genişleterek doymun olmayan zeminler için kayma direnci denklemi önermişlerdir. Görünür kohezyonun iki bileşenden oluştuğunu ve ilk bileşen efektif kohezyon (c'), diğer bileşen ise kılcal gerilme değerinin ($u_a - u_w$) katkısı olarak açıklanmıştır. Kılcal gerilme büyüklüğünün katkısı,

toplam gerilme yaklaşımında ek bir kohezyon bileşeni olarak düşünölebileceğini ve geleneksel kayma direnci teorisini, kılcal gerilme/emme bileşenini efektif kohezyona ekleyerek doygun olmayan zeminler için genişletmişlerdir. Kohezyondaki bu artış, kılcal gerilme basıncından kaynaklanmaktadır ve ϕ^b değeri ile gösterilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Kılcal gerilme etkisi ile ϕ^b değeri bağı kohezyon bileşeni (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Kılcal gerilmenin nihai temel taşıma gücü üzerindeki etkisini, kil bir zeminde gömölü bir kare taban kullanarak değeriendirmek için teorik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya dayanarak, ince daneli kohezyonlu zeminin drenajsız kayma direncine eşit miktarda kılcal gerilme uygulandığında temel taşıma kapasitesinde %27 artış olduğunu göstermişlerdir. Yapılan deneyler sonucu zeminin kılcal gerilme değeri ile temel taşıma gücü arasındaki ilişkinin Şekil 2.2'de gösterildiğı bir artış sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.2. Zeminin kılcal gerilme değeri ile temel taşıma gücü arasındaki ilişki (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Schnaid ve ark. (1995), doymun olmayan zemine oturan yüzeysel temellerin yük-düşey deformasyon ilişkisini incelenmişlerdir. Çalışmada, zeminin bağıl birim hacim ağırlığı ve su içeriği değişken olarak alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, zeminin su içeriğinin artmasıyla temel taşıma kapasitesinin ve yük-oturma davranışının değiştiği ve bu nedenle yüzeysel temellerin tasarımında dikkate alınması gerektiği açıkça vurgulanmıştır .

Vanapalli ve ark. (1996), çalışmalarında, zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ile doymun olmayan bir zeminin kayma direnci arasındaki ilişkiyi kılcal gerilme değerine göre açıklamışlar ve kılcal gerilme büyüklüğüne göre kayma direncini tahmin etmek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Model formülasyon, SWC eğrisini ve doymun kayma direnci parametrelerini kullanır. Kayma direncini tahmin etmek için geliştirilen modelin sonuçlarını karşılaştırmak için, statik olarak sıkıştırılmış 100 mm çapında ve 21 mm yüksekliğinde killi kum ve kırmızı kil zemin numuneleri, üç farklı su içeriği ve birim hacim ağırlıktasabit hacimli bir kalıpta statik olarak sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Doymun durumdaki numunelerin efektif kayma direnci parametreleri, hem tek aşamalı hem de çok aşamalı testler altında modifiye edilmiş kesme aparatı kullanılarak belirlenmiştir. Aynı aparat, doymun olmayan testler için de kullanılmıştır. Örneklere çeşitli net normal gerilmeler ve kılcal gerilme

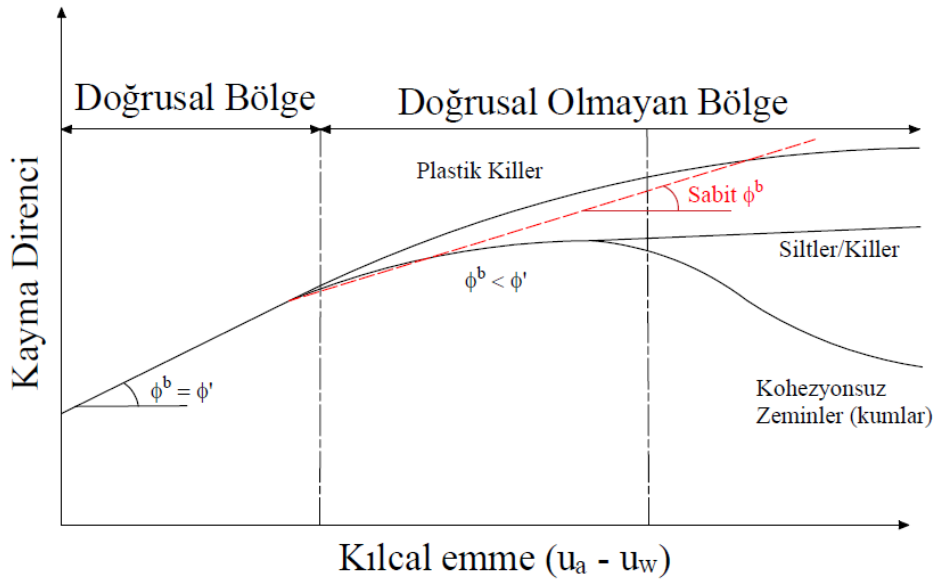
değeri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda önerilen modelle hesaplanan kayma direnci değerleri ile ölçülen kayma direnci değerler arasında iyi bir korelasyon yakalamışlardır.

Fredlund ve ark. (1978), doymun olmayan zeminlerin su tutma kapasitesinin önemli olduğunu gösterdiği çalışmasında, zeminin yer altı su seviyesi ve çevresel etkilere karşı hassasiyeti üzerinde etkilerini incelemiştir. Bu kapsamda doymun olmayan zeminlerin özelliklerini açıklamak için uygun kavramlar ve teknolojilerin önemine vurgu yapmıştır. Ayrıca, çalışmada doymun olmayan zemin davranışı üzerinde etkili olan faktörlerden bahsedilmiş ve başlıca zemin türü, zemin yapısı, sıcaklık, nem ve yeraltı suyu düzeyi gibi faktörlerden çok etkilendiği açıklanmıştır. Sonuç olarak çalışma, uygun kavramlar ve teknolojilerin kullanımının doymun olmayan zemin davranışının anlaşılmasına ve tasarımında kullanılmasına yardımcı olacağını vurgulamaktadır.

Oloo ve ark. (1997), düşük trafik yükü altındaki stabilize edilmemiş yolların taşıma kapasitesinin belirlenmesi için yapılan laboratuvar deneylerini ve bu yolların taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmada Ontario, Kanada'da düşük trafik yüklü yollarda kullanılan iki farklı çakıl türünün taşıma kapasitelerini incelemişlerdir. Yolların taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerden temel malzemesinin cinsi ve kalınlığı, çakıl türü ve boyutu, sıkıştırma ve su muhtevası gibi değişkenlerin etkilerini taşıma kapasitesinin hesaplanması için kullanılan farklı yöntemlerce tartışılmıştır. Terzaghi (1943)' ün etkin gerilme yaklaşımını değiştirmiş ve kılcal gerilme değerini hesaba katarak, doymun olmayan zeminler üzerindeki sık bir temelin temel taşıma gücü değerini tahmin etmek için kullanılabilecek bir model önermişlerdir (Denklemler 2.1). Model, yükleme aşamasında hem boşluk hava hem de boşluk suyu basıncının etkili olduğu durumu kapsamaktadır. Model, zeminin hava giriş değerinden (AEV) daha büyük emme değerleri için sabit bir ϕ^b kullanır.

$$q_{ult} = \{c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] \tan \phi^b\} N_c + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma \quad (2.1)$$

Burada c' = efektif kohezyon; ϕ' = efektif kayma direnci açısı; ϕ^b = kılcal gerilme değerine göre kayma direncindeki artış oranını gösteren açı; $(u_a - u_w)_b$ = hava giriş değeri (AEV / kabarcıklaşma basıncı); $(u_a - u_w)$ = kılcal gerilme ; B: temelin genişliği; N_c ve N_γ = Terzaghi (1943) ve Kumbhojkar (1993) temel taşıma gücü katsayıları. ϕ^b 'nin davranışı AEV'nin ötesinde doğrusal olmadığından, bu yöntem temel taşıma gücü değerini emme aralığına bağlı olarak kabul edilebilir bir aralık içinde doğru tahmin edebilmektedir. Şekil 2.4' de gösterildiği gibi, kayma direnci ve kılcal gerilme basıncı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi simüle etmek için bir çift doğrusal zarf kullanılabilir. Şekil 2.4 'den görülebileceği gibi, kılcal gerilmenin kayma direncine katkısı AEV'den daha düşük kılcal gerilme değerleri için lineer olarak arttığı ve $\phi^b = \phi'$ olduğu bu bölge lineer bölge olarak adlandırılır. AEV'nin ötesinde, kılcal gerilme değerindeki artışa rağmen ϕ^b 'nin katkısı kademeli olarak azalır; bu nedenle ϕ^b , ϕ' den küçüktür. Doğrusal olmayan bölge olarak adlandırılan bu bölgede, doygun olmayan zeminlerin kayma direnci kılcal gerilme değerlerine bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Şekil 2.3'deki kırmızı çizgi, AEV'den büyük kılcal gerilme değerlerinde ϕ^b 'nin kayma direncine olan katkısını göstermektedir.



Şekil 2.3. Kılcal gerilme değerinin kayma direnci üzerindeki etkisi

Miller ve Muraleetharan (1998), doygun olmayan zeminlerde yerinde deneyin önemini araştırmışlardır. Doygun olmayan zemin davranışının doygun zeminden

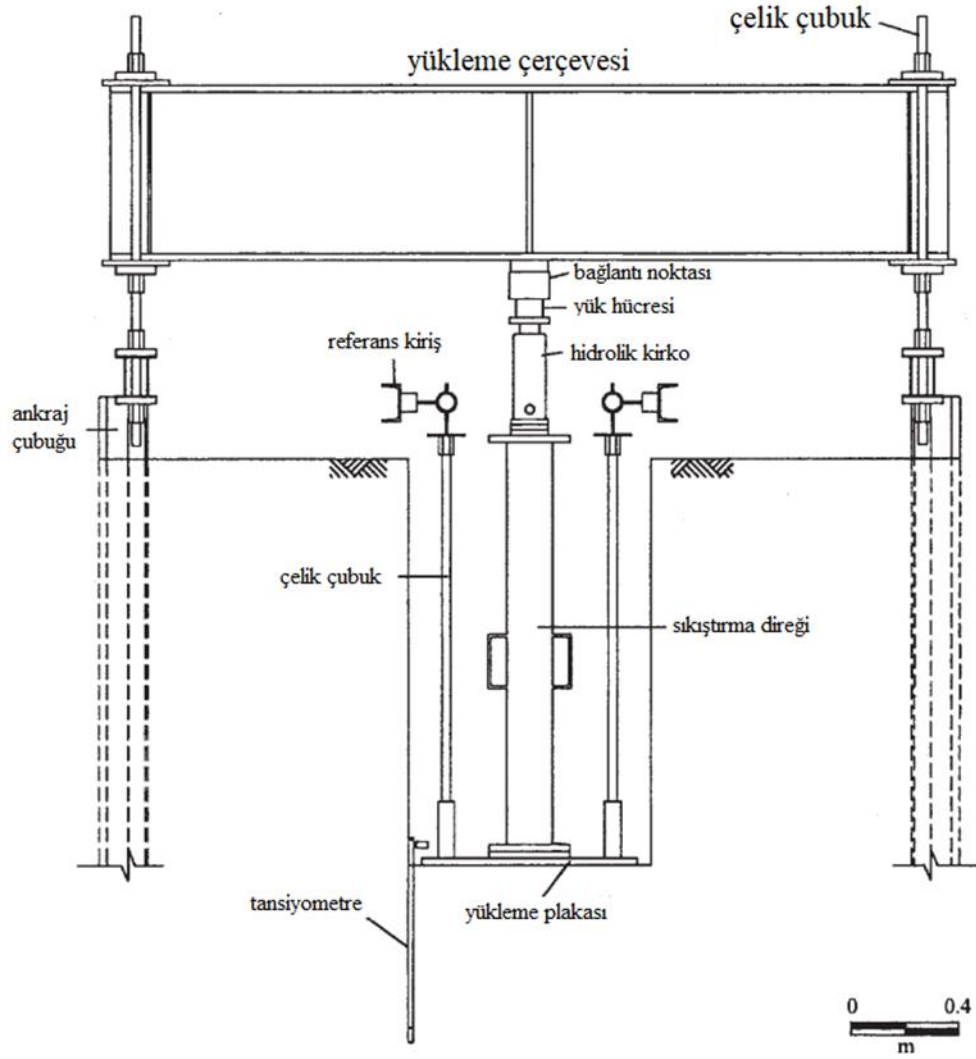
daha karmaşık olduğunu ve yerinde deneyin tek başına laboratuvar deneyi ile elde edilemeyecek değerli bilgiler sağladığını açıklamışlardır. Yazarlar, emme ölçümleri, basınç ölçümleri ve sondaj deliği deneyleri dahil olmak üzere farklı yerinde deney türlerini tartışmaktadır. Doygun olmayan zemin davranışını anlamak için çok önemli olan zemin-su karakteristik eğrisini belirlemek için bu deneylerin nasıl kullanılabileceğini açıklamaktadırlar. Miller ve Muraleetharan (1998) ayrıca yerinde deneyler için uygun ekipman ve tekniklerin önemini vurgulamaktadır. Cihazların uygun şekilde kalibre edilmesinin önemi üzerinde durmuşlardır.

Oloo (1999), doktora tez çalışmasında doygun olmayan koşullarda plastik davranış varsayımının, trafik gerilmelerinin kaplama malzemelerinin elastik aralığını aştığı kaplamasız yollar için daha gerçekçi olduğu ve kaplamanın taşıyabileceği nihai dingil yükünün belirlenmesinde, taşıma gücü teorisine dayalı bir tasarım sürecinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Üstyapı tasarım sürecine iklimsel faktörlerin dahil edilmesi, taşıma kapasitesi teorisine dayalı tasarımın temel kilit noktası olduğunu vurgulamıştır. Mevcut yöntemlerin, alt zeminin tamamen doygun olduğunu varsaydığını ancak dünyanın birçok bölgesinde tam doygunluğun nadiren meydana geldiğini ve tam doygunluk varsayımının ekonomik olmayan tasarımlara yol açtığını göstermiştir. Nihai dingil yüklerinin belirlenmesinde pozitif boşluk suyu basınçlarının yanı sıra kılcal gerilme değerinin dahil edilmesinin gerekliliğini göstermiştir. Çalışmasında iki katmanlı bir kaplama sisteminde taşıma kapasitesinin belirlenmesi için bir limit denge çözümü önermiştir. Kılcal gerilme değerinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi için geliştirilen çözüm, laboratuvarda sabit kılcal gerilme seviyeleri altında dengelenmiş homojen zeminlerde model temel testleri kullanılarak doğrulanmıştır. Ayrıca kılcal gerilme değerlerinin zemine olan katkısının belirlenmesi için kesme kutusu deney cihazında sıkıştırılmış zeminleri test etmek için basit ve güvenilir bir yöntem olduğu gösterilmiş ve test yöntemini doğruluğu modifiye edilmiş emme kontrollü kesme kutusu deney sonuçlarıyla tutarlılığı karşılaştırılmıştır. Son olarak, sadece temel tabakasından oluşan kaplamasız yollar için taşıma gücü teorisine dayalı bir yöntem önermiştir.

Vanapalli ve Fredlund (2000), yaptıkları çalışmalarında SWC eğrisi, efektif kayma direnci parametreleri ile kayma direncinin tahmininde bulunan bir model önermişlerdir. Önerilen modelde 4 farklı yaşalım benimsenmiş ve doğrudan veya

dolaylı olarak doymuş olmayan zeminlerin kayma direncinin tahmininde kullanılabilirliği hem küçük hem de büyük kılcal gerilme aralıkları için kanıtlanmaya çalışılmıştır. Escario ve Juca (1989) tarafından üç farklı zemin kullanarak ölçülen ve tahmin edilen doymuş olmayan kayma direnci değerlerini kullanarak model ile tahmin edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalar için kullanılan üç zemin numunesinin farklı dane dağılım özellikleri, kil yüzdeleri ve plastisite indeksi değerleri vardır. Sonuç olarak zemin-su karakteristik eğrisi ve efektif kayma direnci parametreleri kullanılarak doymuş olmayan zeminin kayma direncini tahmin eden yaklaşımların kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Doymuş olmayan zeminlerin kayma direnci davranışını daha iyi anlamak ve daha iyi tahmin prosedürleri geliştirmek için farklı zemin türleri üzerinde daha fazla deneysel çalışmalar gerekliliğini ortaya çıkarmışlardır.

Costa ve ark. (2003), arazide laterit zemin üzerinde bir dizi plaka yükleme testleri gerçekleştirmiş ve plaka yükleme sonuçları üzerinde kılcal gerilmenin etkisini araştırmıştır. Plaka yükleme deneyi sırasında kılcal gerilme, Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi yüzeyden 80 cm kadar farklı derinliklerde bulunan tansiyometreler ile ölçülmüştür. Kılcal gerilme değerinin plaka yükleme testlerinin sonuçlarını nasıl etkilediğini göstermek için farklı nem içerikleri altında testler gerçekleştirmiş ve kılcal gerilme değerinin artmasıyla birlikte, plaka yükleme testlerinin sonuçlarının da değiştiğini gözlemlemişlerdir. Laterit zeminlerin plaka yükleme testleri için uygun olduğunu ve kılcal gerilme değerinin plaka yükleme deney sonuçlarında dikkate değer bir artış olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, laterit zeminlerin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde değerlendirmek ve temel taşıma kapasitesini hesaplamak için kılcal gerilme değerlerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.4. Deney tertibatının ve kullanılan cihazın genel şeması (Costa ve ark., 2003)

Mohamed ve Vanapalli (2006), doymun olmayan iri daneli bir zeminin taşıma kapasitesini ölçmek için laboratuvar ortamında bir dizi model deney gerçekleştirmişlerdir. 900x900x750 mm boyutlarındaki tankta statik olarak sıkıştırılarak hazırlanan iri daneli kumun kılcal gerilme değerine göre bu zemine oturan temellerin taşıma gücü değerinin değişimi, 100 mm x 100 ve 150 mm x 150 mm boyutlarındaki iki farklı kare model temeli kullanılarak araştırılmıştır. Doymun olmayan kum zemine oturan temel taşıma gücünün, zeminin su muhtevası ve bağıl birim hacim ağırlıkdeğerlerinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, su muhtevası arttıkça temel taşıma gücü değerinin azaldığını göstermişlerdir.

Rojas ve ark. (2007), zayıf killi bir zemine sahip arazide gerçekleştirdikleri plaka yüklem testlerinden elde edilen taşıma gücü değerine kılcal gerilmenin etkisini

araştırmışlardır. Doygun olmayan düşük plastisiteli kil zeminde yedi farklı plaka yükleme testi yapılmıştır; bunlardan ikisi saha homojenliğini doğrulamak ve tekrarlanabilirliği test etmek için doygun durumda gerçekleştirilirken, beşi farklı kılcal gerilme değerlerinde gerçekleştirmiştir. Plaka yükleme testi gerilme etki bölgesi boyunca kılcal gerilmeler, her test çukurunun etrafına 0.1, 0.3, 0.6 ve 0.9 m'de yerleştirilmiş dört tansiyometre ile ölçülmüştür. Araştırma sonucunda plaka yükleme testlerinden elde edilen taşıma kapasitelerinin kılcal gerilme değerlerinden önemli derecede etkilendiği gösterilmiştir.

Vanapalli ve Mohamed (2007), drenajsız yükleme koşullarında doygun olmayan zeminlere oturan temellerin taşıma gücünü belirleme konusunda araştırma yapmışlardır. Çalışmada “Indian Head till” adlı likit limit değeri %32.5 plastik limit değeri %17 ve No:200'den geçen %48 olan killi kum zemin numunesi kullanılmıştır. 300 mm çapında ve 300 mm yükseliğindeki tankın içine statik olarak sıkıştırılan zeminin üzerine yerleştirilen 50 x 50 mm boyutlarındaki model kare temelin taşıma gücü değerilaboratuvar ortamında ölçülmüştür. Taşıma gücü değerinin tahmini için kullanılan farklı yöntemler tartışılmıştır. Araştırmacılar, Oloo ve ark. (1997)' nin nihai temel taşıma kapasitesi modeli ile Vanapalli ve ark. (1996) tarafından önerilen doğrusal olmayan kayma direnci modelini referans alarak Terzaghi (1943)' ün sürekli temeller için geliştirdiği taşıma gücü denklemini doygun olmayan zeminler için uyarlamışlardır (Denklem 2.2). Vanapalli ve Mohamed (2007) ayrıca ölçülen kayma direnci açısı değerinin %10 arttırılmış halini kullanarak $(1.1\phi')$ hem doygun hem de doygun olmayan koşullar için temel taşıma gücü değerinin daha doğru tahmininin sağlanabileceğini öne sürmüştür.

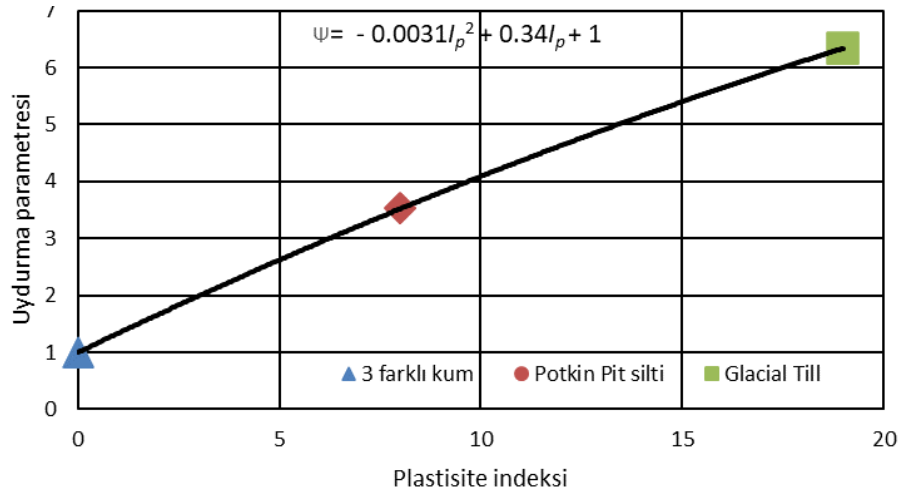
$$q_{ult} = \left\{ \begin{array}{l} [c' + (u_a - u_w)_b \tan\phi' - S^\Psi \tan\phi'] + \\ (u_a - u_w)_{AVE} S^\Psi \tan\phi' \end{array} \right\} N_c \xi_c + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma \xi_\gamma \quad (2.2)$$

Burada c' = efektif kohezyon; ϕ' = efektif kayma direnci açısı; S =doygunluk derecesi; Ψ = uydurma parametresi; $(u_a - u_w)_b$ = hava giriş değeri; $(u_a - u_w)_{AVE}$ = ortalama kılcal gerilme değeri; N_c ve N_γ = sırasıyla Terzaghi (1943) ve Kumbhokjar (1993) taşıma gücü katsayıları, ξ_c ve ξ_γ = Vesić (1973) şekil faktörleri.

Vanapalli ve Mohamed (2007), taşıma kapasitesi uydurma parametresi (Ψ değeri) için, beş zemin üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarına dayanarak, plastisite

indeksi ile bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 2.5). Yapılan çalışmada incelenen üç kumlu zeminin tümü için $\Psi = 1$ 'e eşitken diğer ince daneli zeminler için daha yüksek Ψ değerlerinin gerektiği bildirilmiştir. Beş zemin üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarına dayanarak, taşıma kapasitesi uydurma parametresi (Ψ) ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki Denklem 2.3 ile açıklanmıştır.

$$\Psi = -0,0031I_p^2 + 0,34I_p + 1 \quad (2.3)$$



Şekil 2.5. Taşıma gücü uydurma parametresi (Ψ) ve plastisite indisi (I_p) arasındaki ilişki

Oh ve ark. (2008), optimum su muhtevası, optimum su muhtevasından daha az ve daha yüksek su muhtevası değerlerinde statik olarak sıkıştırılmış doymun olmayan durumdaki kaolinin kayma direnci özelliklerini araştırmışlardır. 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde özel kalıp içinde sıkıştırılarak oluşturulan numunler doymun durumda konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyine (CU) tabi tutulmuştur. Doymun olmayan durumdaki numunler hızlı ve yavaş yükleme koşulunda hücre basıncı olmadan ve farklı hücre basınçları uygulanır uygulanmaz drenajsız koşulda teste tabi tutulmuştur. Böylelikle kaolinin kayma direnci özelliklerinin üç eksenli deney yükleme hızları, klasik Mohr-Coulomb teorisi ve Van Genuchten (1980) modeli gibi mevcut modellerle nasıl bir ilişkisi olduğu araştırılmıştır. Çalışmada, statik olarak sıkıştırılmış doymun olmayan kaolinin kayma direnci özellikleri, sıkıştırma oranı, su muhtevası ve hücre basıncına göre değiştiği

gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre, sıkıştırılmış doymun olmayan kaolinin kayma direnci özellikleri, sıkıştırma oranı arttıkça ve su muhtevası azaldıkça artmaktadır.

Lu ve ark. (2010), çalışmalarında zemin-su karakteristik eğrisinin, doymun olmayan zeminin kayma direnci davranışının efektif gerilme kavramlarıyla tahminine yönelik önerilerde bulunmuşlardır. Kılcal gerilme değerini mekanik olarak çekme geriliminin bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır. Çalışmada, serbest su durumundan zemin suyunun enerjisindeki değişimin çoğunlukla kılcal gerilmeden değerinden kaynaklandığı ve enerjinin termodinamik kavramlarının temelinde süreklilik mekaniği sınırları içerisinde olduğunu önermişlerdir. Önerilerini test etmek için mevcut deneysel veriler kullanılarak elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri ve görünür kayma direnci parametreleri, doymun olmayan zeminin efektif gerilme kavramı dayalı önerilen kapalı formlu denklem ile tahmin edilen değerlerin tutarlılığı araştırılmıştır. Önerilen kapalı form denklemini, hava giriş değeri ve boşluk oranı ile zemin-su karakteristik eğrisi kullanılarak türetilmiştir. Önerilen kapalı-form denklemin, kumdan kile kadar çeşitli zeminler için efektif gerilmeyi tutarlı bir şekilde temsil ettiğini göstermişlerdir.

Oh ve Vanapalli (2011), hem doymun hem de doymun olmayan koşuldaki kumlara uygulanan düşey gerilme ile sığ temellerin oturması arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için basit ve güvenilir bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, hem doymun hem de doymun olmayan kumlarda uygulanan farklı düşey gerilmeler altında sığ temellerin oturmasını ölçmek için bir dizi model laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, zemindeki kılcal gerilmenin oturma üzerindeki etkisini dikkate alan yeni bir ampirik model geliştirmek için kullanılmıştır. Önerilen model, zemin-su karakteristik eğrisi ile birlikte yalnızca doymun koşullar altında elde edilen zemin parametrelerini (yani, efektif kohezyon, efektif kayma direnci açısı ve model temel testinden elde edilen yatak katsayısı) gerektiren idealleştirilmiş bir oturma indeksi kavramına dayanmaktadır. Ampirik model sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılarak hem doymun hem de doymun olmayan kumlarda tutarlı tahminler sağladığı bulunmuştur. İlave olarak, doymun olmayan kumlar için uygulanan düşey gerilmeye karşı oturma ilişkisini simüle etmek için sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Sonlu eleman analizleri Geostudio paket programının Sigma/W modülünde, elastik – ideal plastik bir model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal

çözümlemelerde yatak katsayısı ve elastisite modl  farklı yaklaşımlarla belirlenmiş ve aralarındaki farklar gösterilmiştir. Önerilen yöntem ve sonlu eleman analizlerinden tahmin edilen taşıma gücü değerleri ile oturmalar, model temel testi sonuçları ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum gösterilmiştir.

Oh ve Vanapalli (2013), doymun olamayan ince daneli zeminin yüzeyine yerleştirilmiş temelin taşıma gücü drenajsız yükleme koşulu kabulüyle, Skempton (1948) tarafından önerilen $\phi' = 0$ yaklaşımına dayalı olarak Denklem (2.4) ile tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir;

$$q_{ult(unsat)} = s_{unsat} * \xi * N_{cs} \quad (2.4)$$

Burada $q_{ult(unsat)}$ = doymun olmayan ince daneli zemine oturan temelin nihai taşıma kapasitesi; s_{unsat} = serbest basınç dayanımına dayalı doymun olmayan zeminin kayma direnci; ξ = şekil faktörü; N_{cs} = drenajsız yükleme koşullarında taşıma kapasitesi faktörü (yani: 5.14). Aynı çalışmada Oh ve Vanapalli (2013) doymun olmayan zeminin kayma direncinin, s_{unsat} , doymun kayma direnci ve kılcal gerilmeden kaynaklı kayma dayanımı artışına eşit olacağını göstermiştir (Denklem 2.5). Diğ r bir ifadeyle doymun olmayan kohezyonlu zeminin görünür/toplam kayma direnci (kılcal gerilmenin kayma dayanımına katkısı da dahil) serbest basınç dayanımı (UC) ile elde edilebilir. Bu durumda kohezyonlu zeminin kılcal gerilme değ rinin  l  lmesine gerek kalmamaktadır.

$$s_{unsat} = [s_{sat} + f(u_a - u_w)] = \left[\frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] \quad (2.5)$$

Burada s_{unsat} = UC testine dayalı bir zeminin kayma direnci; $f(u_a - u_w)$ = kılcal gerilme katkısıyla dayanım artışı; ve $q_{u(unsat)}$ = zeminin serbest basınç dayanımını göstermektedir.

Oh ve Vanapalli (2013) ince daneli zeminler üzerindeki kare temellerin taşıma gücünün, zeminlerin serbest basınç dayanımı kullanılarak basitçe tahmin edilebileceğini göstermişlerdir (Denklem 2.6). Önerilen denklemde drenajsız koşullar için Meyerhof (1963) ve Vesic (1973) tarafından önerilen şekil faktörü, $\xi_{unsat} = 1 + 0.2 \frac{B}{L}$ (B:temel genişliği, L:temel uzunluğu) kullanılmıştır.

$$q_{ult(unsat)} = \left[\frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] * \left[1 + 0.2 \frac{B}{L} \right] * N_{unsat} \quad (2.6)$$

Vahedifard ve Robinson (2016), sabit akış koşulları altında değişken doygunluğa sahip kum zeminlere oturan yüzeysel temellerin nihai taşıma kapasitesini tahmin etmek için birleşik bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde yüzeysel temelin nihai taşıma kapasitesi, kılcal gerilme ve doygunluk derecesinin zeminin dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini hesaba katan kararlı durum sızıntı analizi ile taşıma kapasitesi analizinin birleştirilmesiyle tahmin edilmektedir. Önerilen yöntem, laboratuvar ve saha verilerine ile karşılaştırılarak aralarındaki tutarlılık gösterilmiştir. Önerilen birleştirilmiş yöntemin, sürekli akış koşulları altında değişken doygunluğa sahip kum zeminlerdeki yüzeysel temellerin nihai taşıma kapasitesinin doğru tahminlerini sağladığı ve mevcut diğer yöntemlerden daha pratik ve verimli olduğu sonucuna varmışlardır.

Vo ve Russell (2016), doymun olmayan zeminler üzerindeki şerit temellerin taşıma gücünü, kayma doğrusu teorisi kullanılarak incelenmiştir. Kayma doğrusu teorisinde kılcal gerilme profilleri sızma veya buharlaşma yoluyla suyun dikey akışına karşılık gelecek şekilde oluşturulmuş ve derinlikle üniform değildir Kayma doğrusu teorisi, efektif gerilme kavramı kullanılarak kılcal gerilme etkilesinin dahil edildiği bir Mohr-Coulomb plastik denge durumunu varsayar. Çalışmada üniform olmayan bir kılcal gerilme profilinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin önemli olduğunu gösterilmiştir. Kılcal gerilme değerinin efektif gerilmeye katkısı derinlikle doğrusal olarak değişen bir fonksiyon olarak tahmin edilebildiğinde, kılcal gerilmenin taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri düzgün ve pürüzlü tekil temeller için boyutsuz bir şekilde ayrı tablolarla gösterilmiştir. Çizelgeler kullanılarak, kayma direnci açısı, temel genişliği, sürşarj yükü, zemin birim hacim ağırlığı ve ϕ kohezyon profilleri ile kılcal gerilmenin efektif gerilmeye katkısının kombinasyonu için taşıma kapasitesi belirlenebileceğini göstermişlerdir.

Oh ve Vanapalli (2018), toplam gerilme yaklaşımını modifiye ederek doymun olmayan kohezyonlu zemin üzerindeki yüzeysel temellerin davranışını modellemeye çalışmışlardır. Modifiye edilmiş toplam gerilme yaklaşımında doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışı, zemin türüne ve boşluk suyu ile boşluk

havasının çeşitli drenaj koşullarına bağlı olarak ele alınmıştır. Kohezyonlu zemin üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar model test sonuçları ile modifiye edilmiş toplam gerilme yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen taşıma gücü değerlerinin modifiye edilmiş efektif gerilme yaklaşımına nazaran daha tutarlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca modifiye edilmiş toplam gerilme yaklaşımını kullanarak yüzeysel temellerin yük-oturma davranışlarını simüle ederek taşıma gücünü tahmin etmek için bir sonlu elemanlar model analizi önerilmiştir. Önerilen model analiz, doymun olmayan kohezyonlu zeminlerde model temel test sonuçları ile doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi için GeoStudio yazılımının SIGMA/W modülü kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için gerekli olan doymun olmayan zemin parametrelerinin (yani görünür kohezyon, elastisite modülü ve poisson oranı) kılcal gerilme dikkate alınarak tahmin edilmesinin prosedürü açıklanmıştır. Model deneyler ile ölçülen taşıma gücü değerleri ile sonlu eleman analizleri ile elde edilen değerler karşılaştırılarak aralarındaki uyum gösterilmiştir.

Ghasemzadeh ve Akbari (2019), doymun olmayan zemin üzerine yerleştirilen temellerin taşıma gücünü limit denge kavramını kullanarak tahmin etmek için basit bir yöntem önerilmişlerdir. Önerilen modelin ana çerçevesi Terzaghi (1943) temel taşıma denklemine benzemektedir ve hesaplamalar sırasında emme taşıma kapasitesi faktörü olarak yeni bir faktör geliştirilmiştir. Tam doymunluk durumunda, önerilen model Terzaghi (1943) temel taşıma denklemine sadeleşmektedir. Basitleştirilmiş yöntemle tahmin edilen taşıma gücü değerleri literatürde bulunan deneysel ve teorik verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin doymun olmayan zeminlere oturan temellerin taşıma gücü hakkında mevcut yöntemlere göre daha doğru tahminler sağlayabildiğini göstermektedir.

Maghvan ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada hem teorik hem de model temel testleri kullanarak, bağıl birim hacim ağırlığın doymun olmayan kuma oturan temellerin taşıma gücü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Teorik tahminler için, farklı bağıl birim hacim ağırlıklarda ve doymunluk derecelerinde hazırlanmış kum numuneleri üzerinde kesme kutusu deneyinden elde edilmiş efektif kayma direnci açısı ve efektif kohezyon değerleri ile kılcal gerilme değerleri kullanılarak Lu ve ark. (2010) tarafından modifiye edilmiş geleneksel taşıma gücü denklemleri kullanılmıştır. Kılcal gerilme değerlerinin, farklı bağıl birim hacim ağırlıklara sahip kumlar için zemin-su

karakteristik eğrilerinden tahmin edilen değerlerle de uyumlu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, farklı başlangıç doygunluk derecelerine sahip doymun olmayan siltli kum tabakaları üzerine oturan dairesel bir temelin yüklenmesini içeren fiziksel modelleme deneylerinde ölçülen taşıma gücü değerlerinin, efektif gerilmeye dayalı teorik modelden tahmin edilen taşıma gücü değerleri ile iyi bir şekilde eşleştiği gösterilmiştir. Kum zeminin artan bağıl birim hacim ağırlıkla beraber temel taşıma gücü değeri artarak artmıştır. Model deney sonuçları karşılaştırıldığında, genel göçme yenilmesinden yerel göçme yenilmesine geçişin belirli bir bağıl birim hacim ağırlık ve doymunluk derecesi kombinasyonunda meydana geldiğini göstermişlerdir. Test edilen siltli kum için bu geçiş, % 4 ila % 16 arasındaki doymunluk dereceleri için %0'lık bir bağıl birim hacim ağırlıkta ve % 30 ila % 90 arasındaki doymunluk dereceleri için ise % 40'lık bir bağıl birim hacim ağırlıkta meydana gelmiştir. Genel göçme yenilmesi tüm doymunluk derecelerinde %70 ve %90 bağıl birim hacim ağırlık değerlerinde gözlemlenmiştir.

Akbari Garakani ve ark. (2020), doymun olmayan zemin üzerindeki yüzeysel temellerin nihai taşıma gücünü, kılcal gerilmeye bağılı olarak efektif gerilme kavramı aracılığıyla araştırmışlardır. Araştırmada iki yaklaşım benimsenmiştir. İlk olarak, Vesić (1973)' ün doymun koşullardaki zeminler için önerdiği taşıma gücü denklemini genişleterek, kılcal gerilmenin nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini dikkate alan yeni bir analitik çözümdür. Buna göre, taşıma gücü denkleminde kohezyondaki artış, kılcal gerilme değerinin doğrusal olmayan bir fonksiyonu olacak şekilde modifikasyon faktörü eklenerek belirlenmiştir. İkinci yaklaşım, kılcal gerilmeye bağılı kohezyon ile birlikte doymun olmayan durumdaki efektif gerilme durumunun üç boyutlu bir sonlu elemanlar koduna dahil edilmesidir. Sonlu elemanlar model simülasyonları geliştirirken, zeminin derinliğine karşı kılcal gerilmedeki değişimin yanı sıra zeminin doymunluk derecesi kılcal gerilme değerine bağılı olarak dikkate alınmıştır. Analitik ve sayısal yaklaşımların geçerliliğini değerlendirmek için, farklı kılcal gerilme değerleri ve gömme derinlikleri altında gerçekleştirilen fiziksel plaka yükleme testlerinden dört dizi deneysel veri ile karşılaştırılmıştır. Analitik yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, sunulan düzeltme faktörünün zemin özelliklerine, temelin geometrik özelliklerine ve gömme derinliğine bağılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, üç boyutlu sayısal simülasyonda, doymun olmayan zemin üzerindeki sığ

temellerin yük-deplasman davranışını tahminde efektif gerilme yaklaşımının daha tutarlı sonuçlar verdiği ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak analitik, sayısal ve deneysel veriler arasındaki karşılaştırma, özellikle kumlu zeminler için, deneysel test sonuçları, analitik çözümler ve sayısal tahminler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir.

Chen ve Xiao (2020), yamaçlara yakın yer alan şerit temellerin doymun olmayan zemin üzerindeki taşıma gücünü tahmini için bir çözüm önermişlerdir. İkili bir yenilme mekanizması temeline dayanan çözümde, kritik kayma yüzeyi ile şev topuğu arasındaki konum ilişkisi dikkate alınarak şev yüzü yenilmesi ve temel altı göçme yenilmesi dahil olmak üzere iki yenilme/göçme modu dikkate alınmıştır. Doymun olmayan durumdaki taşıma gücü değeri, zeminin yük altında sıkıştırılması sırasında oluşabilecek yatay yer değiştirmelere izin vermeyen en büyük gerilme olarak ifade edilmiştir. Yamaca yakın şerit temellerin doymun olmayan zemin durumundaki taşıma gücü değerinin temel olarak, zeminin kayma direnci parametrelerine, yeraltı suyu seviyesi ve yamaç eğimine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Drenajsız taşıma gücünün iki göçme mekanizmasına dayalı üst sınır çözümü, özel olarak optimizasyon algoritması aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılmış benzer durumdaki örneklerin deneysel ve analitik analiz sonuçları ile önerilen yöntemle hesaplanan sonuçların oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

Zhang ve ark. (2020), doymun zeminlere oturan temellerin taşıma gücünün tahmini için Meyerhof (1951) tarafından önerilen temel taşıma gücü denklemini doymun olmayan zemin mekaniği parametrelerini dikkate alarak genişleten analitik bir çözüm önerilmiştir. Analitik çözümde, kılcal gerilmenin temelin nihai taşıma gücü üzerindeki etkisi için değiştirilmiş bir taşıma gücü katsayısı kullanılmıştır. Çalışma ayrıca, doymun olmayan zeminlerde şerit temellerin nihai taşıma gücünü hesaplamak için önerilen yöntemin uygulanabilirliğini gösteren bir vaka çalışmasını da içermektedir. Araştırmada, doymun olmayan zeminlere oturan temellerin nihai taşıma kapasitesi üzerindeki kılcal gerilme etkilerini dikkate almanın önemini vurgulamakta ve bu etkileri hesaplamalara dahil etmek için yararlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Liu ve Vanapalli (2021), servis yükü altındaki tek bir model kazığın doymun olmayan şişebilen ince daneli bir zeminde sızma suyu değişiklikleri ile ilişkili mekanik davranışının nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Doymun olmayan ince daneli

zeminler, su muhtevastaki değişiklikler nedeniyle şişme veya şokme eğilimi gosterirler ve bu ozellikleri kazıkların taşıma kapasitesini ve davranışını etkiler. Çalışmada, model laboratuvar deneyleri ve sayısal simülasyonlar yoluyla, sızıntı suyu etkisi altında şişebilen zeminlerdeki yüzen bir model kazığın davranışı incelenmiştir. Deneylerde, kazık üzerindeki kuvvetler, kazık deformasyonları ve kazık çevresindeki zemin su muhtevası değişimleri ölçülerek kazık-toprak sisteminin davranışı araştırılmıştır. Ayrıca, sayısal modeller, kazığın taşıma kapasitesini ve zemindeki su içeriğinin etkisini dikkate alabilecek şekilde oluşturulmuştur. Çalışmada, sızma suyu ile ilişkili doygun olmayan zeminlerdeki kazıkların davranışını anlamak için kazığın sızması suyuna bağlı olarak yukarıya mı yoksa aşağıya mı hareket edeceğini ayırt eden eşik kazık yükünü tahminde bulunan teorik bir model önerilmiştir. Sunulan teorik model ve sayısal modelleme yaklaşımı, şişebilen zeminlerdeki kazıkların rasyonel tasarımında mekanik davranışını dikkate alan tutarlı bir yöntem olarak kanıtlanmıştır.

Vanapalli ve Oh (2021), literatürde kabul görmüş olan, doygun olmayan zeminlerdeki sığ temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için kullanılan analitik ve sayısal yöntemleri özetlemişlerdir. Doygun olmayan zemin mekaniği hakkındaki teorik bilgiler açıklanmış ve kılcal gerilmenin yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Ayrıca, kılcal gerilme, doygunluk derecesi ve zemin özellikleri gibi doygun olmayan zeminlerdeki yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini etkileyen ana faktörlerin genel bir zeti sunulmuştur. Doygun olmayan zeminlerdeki yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için analitik ve sayısal yöntemlerin kullanımıyla ilgili sınırlamaları ve zorlukları tartışmışlardır. Doygun olmayan zeminlerdeki yüzeysel temellerin taşıma gücü hakkındaki mevcut araştırmaların durumu hakkında önemli bilgiler verilmiş ve bu koşullar altındaki temellerin taşıma gücünü daha kapsamlı ve doğru tahmin etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

Tan vd. (2021), doygun olmayan durumdaki zeminler için yüzeysel ve derin temeller tasarlamaya yönelik basit yaklaşımlar geliştirmek için farklı kılcal gerilmelere sahip zeminlerin farklı temel konfigürasyonları altındaki taşıma gücü büyüklüklerini araştırmışlardır. Teorik ve deneysel çalışmalarda, doygun olmayan zeminlere inşa edilen temellerin taşıma gücünün yorumlanması ve tahmin edilmesinde kayma

direncinin bir araç olarak nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir. Geleneksel Terzaghi (1943) taşıma kapasitesi denkleminin doymun olmayan zeminlerin taşıma güc değerini düşük tahmin ettiğini göstermiş, bu hatanın üstesinden gelmek için literatürde gerçekleştirilmiş çalışmaları kısaca özetlemişlerdir. Önerilen modifiye edilmiş yaklaşımlardan tahmin edilen sonuçlar ile hem laboratuvar da hem de arazide gerçekleştirilen deneyler arasında iyi bir uyum olduğu karşılaştırma yapılarak ortaya çıkarılmıştır. Ancak doymun olmayan zeminlerdeki temellerin tasarımında kullanılmak üzere önerilen değiştirilmiş yaklaşımların güçlü yanlarını ve sınırlamalarını daha iyi anlamak için, doymun olmayan farklı zeminler üzerinde geniş ölçekli saha deneylerini içeren çalışmaların yapılması tavsiye edilmiştir. İlave olarak temellerin doymun olmayan zeminlerdeki davranışına ilişkin mevcut anlayışı geliştirmek için farklı yükleme koşulları (örn. dinamik yükleme) altındaki davranışına odaklanan ek araştırmaların eksikliğinden bahsetmişlerdir.



3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ

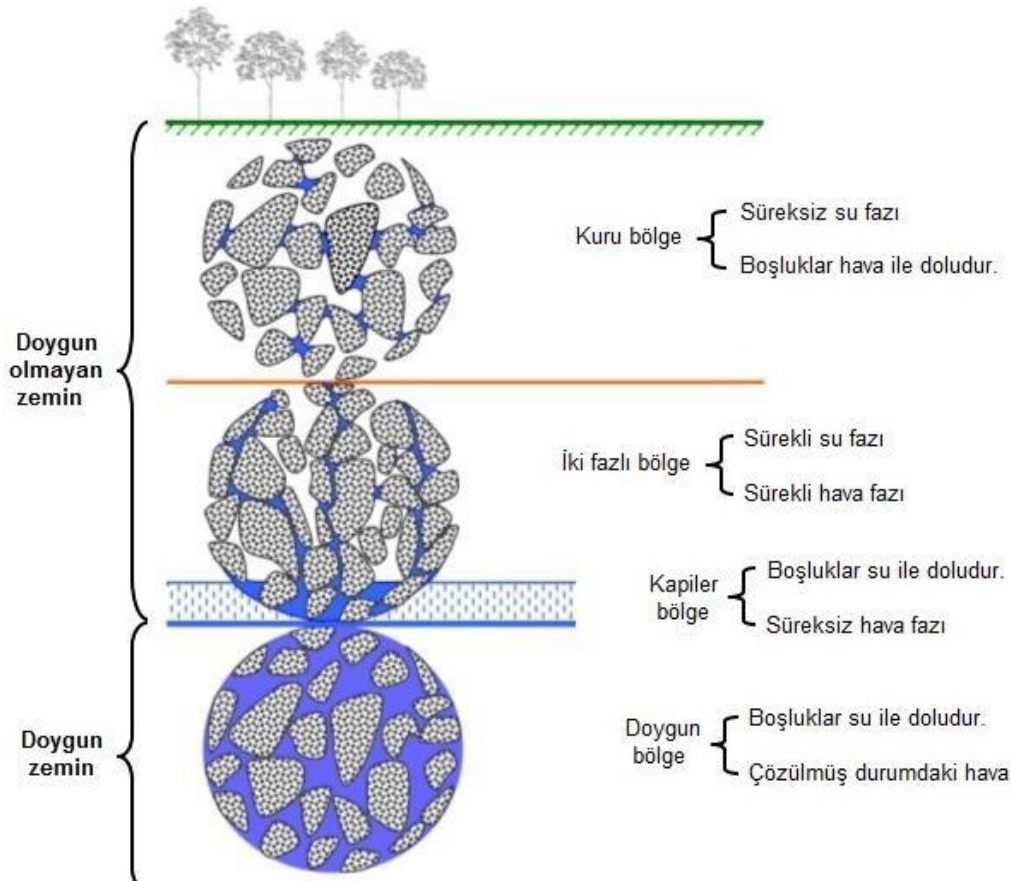
3.1. Giriş

Zemin mekaniği, zeminin özelliklerini ve davranışını kapsayan geniş bir araştırma alanı içerir. Bu alanda zemin boşlukları tamamen suya doymun olabileceği gibi, iki akışkan hava ve suyun birlikte bulunduğu boşluklara da sahip olabilirler. Klasik zemin mekaniği, kum, silt ve kil gibi zemin türlerinin mekanik davranışında tamamen doymun durumu ele almaktadır. Ancak gerçekte, klasik zemin mekaniği prensipleri ve kavramları, doymun olmayan koşullardaki birçok zeminle uyumlu değildir. Doymun olmayan zeminler, (boşluklarında su ve havanın birlikte bulunan zeminler) klasik zemin mekaniği davranışından farklılık gösterirler. Doymun olmayan zeminlerin (DOZ) ayrıca incelenmesi, hacim değişimi ve kayma direnci açısından doymun zeminlerden farklı ve karmaşık davranış özelliklerine sahip olmaları nedeniyle önemlidir. Doymun olmayan zeminlerin mekaniği, doğal olarak doymun zemin mekaniğine göre daha geç keşfedilmiştir. 1936 yılında ilk olarak Harvard'da gerçekleştirilen "Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansı"nda DOZ davranışını konu alan ilk değerlendirmeler yayınlanmıştır (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Başlangıçta, DOZ için tek bir değişken olan efektif gerilme anlayışı varken, 1960'ların sonlarına doğru, iki bağımsız gerilme durumu değişkeninin kullanımı, süreklilik mekaniği prensipleriyle daha uyumlu bir yaklaşımın benimsenmesine yol açmıştır (Fredlund ve Morgenstern, 1977).

Sonuç olarak, DOZ davranışı, doymun zemin davranışının doğal bir uzantısı olarak kabul edilebilir (Fredlund ve Morgenstern, 1977). 1970'lerde, doymun olmayan zeminlerin hacim değişikliği ve kayma direnci parametreleri, doymun durumdaki zeminler üzerine yapılan araştırmaların bir uzantısı olarak elastoplastik modellerle birleştirilmeye çalışılmıştır (Alonso ve ark., 1990; Blatz ve Graham, 2003; Rasool, 2014).

Zemin mekaniği, doymun ve doymun olmayan zeminler olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Doymun zeminler ile doymun olmayan zeminler arasındaki ayrım, aynı zeminin farklı mekanik özelliklerine sahip olması nedeniyle

gereklidir. DOZ, boşluklarında hem hava hem de sıvı fazlarını içeren zeminleri ifade eder. Doygun olmayan zeminler doğal olarak kurak ve tropik bölgelerde oluşabileceği gibi, mühendis eliyle de sıkıştırma yoluyla oluşturulabilir. Dünya üzerindeki zeminlerin üçte ikisinin kurak ve yarı kurak bölgelerde yer aldığı düşünüldüğünde, tamamen doymuş koşullara ulaşılması neredeyse imkansızdır (Hamid, 2005; Rasool, 2014). Kurak ve yarı kurak iklim koşullarına maruz kalan herhangi bir zemin oluşumunda (örneğin gölet yatakları veya taşkın ovaları gibi), DOZ özellikleri görülebilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Bu koşullarda, zeminlerin yer altı su seviyesi, doymuş olmayan zemin profili oluşumunda önemli bir rol oynar (Şekil 3.1) (Rasool, 2014).



Şekil 3.1. Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki doymuş olmayan zemin profili (Rasool, 2014).

DOZ, birden fazla fazı içerir ve boşluk suyu basıncı, boşluk hava basıncına göre negatiftir. Yer altı su seviyesinin zemin yüzeyinin altında yer aldığı durumlarda, zemin yüzeyine yakın herhangi bir zemin elemanı, negatif boşluk suyu basınçlarına ve doymuşluk derecesinde bir azalmaya maruz kalacaktır.

Zeminlerde sıkıştırma işlemleri, malzemenin doygun olmayan koşulunu gerektirir. Klasik zeminin mekaniği çerçevesinde sıkıştırılmış zeminlerin davranışını tahmin etmek zordur. Ayrıca, dünya genelinde doğal zemin birikintilerinin genellikle düşük su içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Yüksek plastisiteli kil zeminler, değişen bir ortama maruz kaldıklarında şişebilir veya büzülebilir. Bu tür zeminlerin şişmesi veya büzülmesi ciddi bir problem oluşturabilir. Özellikle gevşek silt zeminler genellikle ıslanma ve yükleme sırasında göçme yaşar. Her iki durumda da boşluk suyu basınçları başlangıçta negatif olup, boşluk suyu basıncındaki artışlar sonucunda hacim değişiklikleri meydana gelir. Kalıntı zeminlerin mühendislik davranışları klasik zemin mekaniği kavramlarıyla tam olarak açıklanamamaktadır. Bu özel durumda, kılcal gerilme/negatif boşluk suyu basınçları DOZ davranışını belirleyen temel faktördür.

Doygun olmayan zeminlerde, dane boşluk/temas noktalarında kısmi bir kılcal gerilme oluşur ve bu gerilme zeminin dayanımını, sıkışabilirliğini ve geçirgenliğini etkiler. Doygun olmayan zemin mekaniği, şev stabilitesi, temel tasarımı ve zemin-yapı etkileşimi gibi birçok mühendislik uygulaması için önemlidir. DOZ mekaniğinde, zemin-su karakteristik eğrisi, hava giriş değeri ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu gibi temel kavramlar belirleyici rol oynarlar. Bu kavramlar, matematiksel modeller geliştirmek için de kullanılır ve doygun olmayan zeminlerin hidrolik ve mekanik davranışını tanımlamaya ve zemin davranışını tahmin etmeye yardımcı olur.

3.2. Doygun Olmayan Zemin Mekaniği

Doygun olmayan zemin mekaniği geçmişi, araştırmacıların kısmen doygun koşullar altında zeminin davranışını araştırmaya başladıkları 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. İlk çalışmalar, suyun küçük çaplı tüplerde yükselme süreci olan kılcal yükselme olgusuna ve zemindeki kılcal gerilmenin zemin özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Ancak, 1960-70'lere kadar doygun olmayan zemin mekaniği alanında, büyük ölçüde laboratuvar test ekipmanlarındaki ve hesaplama yöntemlerindeki kısıtlamalar nedeniyle önemli ilerlemeler kaydedilememiştir.

Doygun olmayan zeminlerde efektif gerilme kavramı ilk olarak 1960'larda Bishop (1959) tarafından önerilmiştir. Bishop'ın çalışması, bu alanda yapılan sonraki araştırmaların ve bugün hala geniş çapta kullanılan teorilerin temelini oluşturmaktadır.

1970'lerde, Fredlund ve Rahardjo, doymun olmayan zeminlerin davranışını açıklamak için kapsamlı bir teori geliştirmiştir. Bu teori, zemin-su karakteristik eğrisi ve geçirgenlik fonksiyonunun gelişimini içermektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Çalışmaları, geoteknik bilim alanında geniş bir yankı uyandırmış ve doymun olmayan zemin mekaniği alanına önemli katkılarda bulunmuştur.

Son yıllarda, doymun olmayan zeminlerin davranışını simüle etmek için sayısal modellerin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmiştir. Bu konuda dikkate değer bir örnek, Van Genuchten tarafından geliştirilen modeldir. Bu model, doymun olmayan zeminlerde su akışını ve çözünen madde taşınımını simüle etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Van Genuchten, 1980).

Doymun olmayan zemin mekaniğindeki anahtar kavramlardan bazıları, boşluklarda hava bulunmasından dolayı zemin boşluk suyundaki negatif basınç/kılcal gerilme varlığıdır. Diğer önemli parametreler, doymunluk derecesi ile zemindeki kılcal gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlayan zemin-su karakteristik eğrisini ve doymunluk derecesi ile geçirimsizlik arasındaki ilişkiyi tanımlayan geçirgenlik fonksiyonunu içermektedir.

Doymun olmayan zemin mekaniği, birçok geoteknik problemde doymun olmayan zemin durumu ile karşılaşılması nedeniyle son yıllarda çok sayıda araştırmacı ve akademisyenin dikkatini çekmiştir. Özellikle sürdürülebilir altyapı ve çevre koruma alanındaki gelişmeler, doymun olmayan zemin mekaniği çalışmalarını daha da önemli hale getirmiştir. Bu alandaki araştırmalar, daha güvenli ve ekonomik yapılar tasarlamak, zemin erozyonunu kontrol etmek, yamaç duraylılığını analiz etmek ve çevresel etkileri minimize etmek gibi önemli uygulamalara katkı sağlamaktadır. (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

3.2.1. Doymun olmayan zeminlerin gerilme durum değişkenleri

Bir zeminin mekanik davranışı (örneğin, hacim değişimi ve kayma direnci davranışı), zemindeki gerilme durumu ile açıklanabilir. Bir zemindeki gerilme durumu, gerilme durumu değişkenleri olarak adlandırılabilen değişkenlerin belirli kombinasyonlarından oluşur. Bu değişkenler, zeminin fiziksel özelliklerinden bağımsız olmalıdır. Bir zeminin gerilme durumunun tanımı için gerekli olan gerilme

durumu değişkenlerinin sayısı, öncelikle ilgili fazların sayısına bağlıdır (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Doygun zeminler için efektif gerilme denklemi ($\sigma' - u_w$), bir fizik kanunu olarak kabul edilir. Daha doğru bir ifadeyle, efektif gerilme, doygun bir zeminin davranışını tanımlamak için kullanılabilen basit bir gerilme durumu değişkenidir. Efektif gerilme değişkeni, zemin özelliklerinden bağımsız olduğu için kumlara, siltlere veya killere uygulanabilir. Doygun bir zeminin hacim değişim süreci ve kayma direnci özelliklerinin her ikisi de efektif gerilme tarafından kontrol edilmektedir (Fredlund ve ark. 2012; Özocak, 2003).

DOZ için gerçekçi gerilme durumu değişkenlerinin oluşturulması çok daha zor ve karmaşıktır. Ancak son zamanlarda, pratikte kullanılacak kabul edilebilir gerilme durumu değişkenleri üzerine çalışmalar giderek artmaktadır. Doygun zemin durumundan DOZ durumuna geçerken gerilme durumu açıklamasında farklı yaklaşımlar yöntemler izlenmiştir. Genellikle DOZ için gerilme analizi, doygun zemin teorisinin bir uzantısı olarak sunulmaktadır (Özocak, 2003). Doygun bir zeminin gerilme analizinde kullanılan prensipler (örneğin, Mohr diyagramları), DOZ için de benzer şekilde geçerlidir.

Doygun olmayan zeminlerin gerilme durum değişkenleri hakkında birçok öneri bulunmaktadır ve uygun değişkenlerin seçiminde aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmalıdır:

1. Deneyssel olarak laboratuvarında test edilebilen değişkenler,
2. Denge prensipleri kullanılarak teorik olarak gerekçelendirilebilen değişkenler,
3. Mühendislik uygulamasında ölçülebilir gerilme bileşenleri,
4. Sürekli ortam mekaniği gereksinimlerini karşılayan durum değişkenlerinin tanımlanmasıyla belirlenen değişkenler.

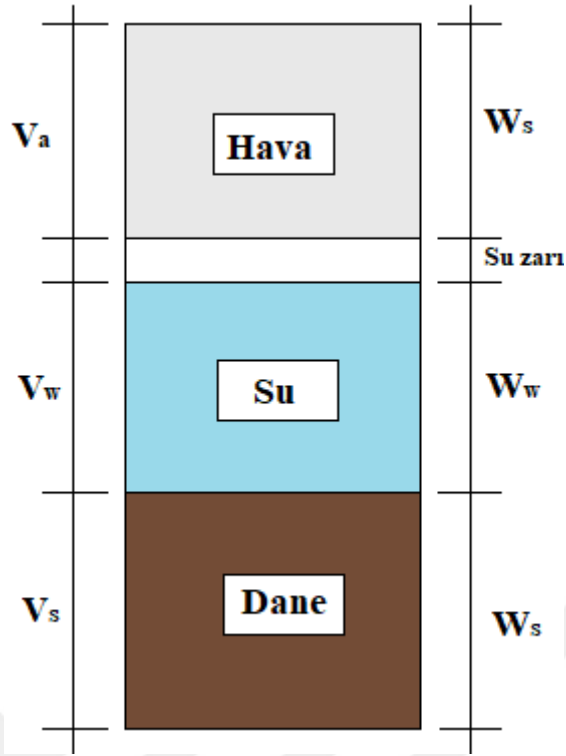
DOZ gerilme durumu değişkenleri, toplam gerilme, boşluk suyu basıncı ve boşluk havası basıncı gibi ölçülebilir germeler cinsinden ifade edilmelidir. Doygun olmayan bir zemin için, zemindeki bir noktadaki gerilme durumu dikkate alındıktan sonra bir denge gerilme analizi yapılabilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Likos ve Lu, 2004).

Bir zemin elemanına etki edebilecek iki tür kuvvet bulunmaktadır: iç kuvvetler ve yüzey kuvvetleri. İç kuvvetler, zemin elemanının merkezinden geçen birim hacim başına düşen kuvvet olarak ifade edilirler. Yerçekimi kuvveti ve fazlar arası etkileşim kuvvetleri, iç kuvvetlere örnek olarak verilebilir. Dış yükler gibi yüzey kuvvetleri ise, sadece zemin elemanının sınır yüzeyine etki ederler (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Likos ve Lu, 2004). Yüzey kuvvetinin birim alan başına ortalama değeri, yüzey alanı sifıra yaklaştıkça sınır değere yaklaşır ve bu değere gerilme vektörü denir. Gerilme vektörünün düzleme dik olan bileşeni normal gerilme olarak adlandırılırken, düzleme paralel olan bileşenler kayma gerilmesi olarak isimlendirilir.

Bir zemin elemanında bir noktadan geçebilecek sonsuz sayıda düzlem veya yüzey bulunmaktadır. Bir noktadaki gerilme durumu, küçük boyutlarda kübik bir eleman oluşturan düzlemlere etki eden tüm gerilmelerin analiziyle incelenebilir. Ayrıca, zemin elemanının merkezinden geçen cisim kuvvetleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu analiz için kullanılan geleneksel hayali cisme serbest cisim adı verilir. Bu serbest cisim, tamamen hayali ve bağımsız sınırlarla çevrilmiş kübik bir elemandır. Bu kavram, gerilme dağılımını anlamak ve zemin davranışını analiz etmek için kullanılan önemli bir araçtır (Hemp, 1966).

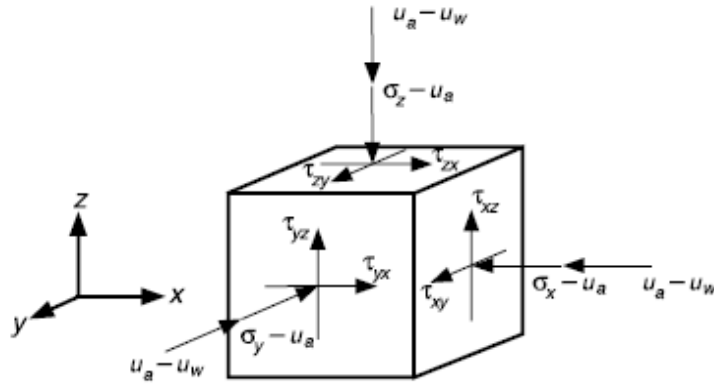
Fredlund ve Morgenstern (1977), doymun olmayan zeminlerin dört farklı fazını (Şekil 3.2) tanımlamışlardır. Bu fazlar, geleneksel zemin mekaniğinde kullanılan hava, su ve dane fazlarına ek olarak hava-su arayüzünü içerir. Ayrıca, DOZ gerilme durumu değişkenlerinin tanımlanması için üç kombinasyon önerilmiştir. Bu kombinasyonlar şunlardır:

- a. Normal gerilme referans alınarak, $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$
- b. Boşluk suyu basıncı referans alınarak, $(\sigma - u_w)$ ve $(u_a - u_w)$,
- c. Boşluk hava basıncı referans alınarak, $(\sigma - u_a)$ ve $(\sigma - u_w)$).



Şekil 3.2. Doygun olmayan zeminde dört evreli blok diyagram (Fredlund ve Morgenstern, 1977; Özocak, 2003)

Doygun olmayan zemin mekaniği problemlerinin formüle edilmesinde en yaygın kabul gören yaklaşım, net normal gerilme ($\sigma - u_a$) ve kılcal gerilme ($u_a - u_w$) kombinasyonudur. Doygun olmayan zeminler için hesaplamalar ve deneyler yürütülürken kullanılan gerilme durum değişkenleri dışında, sıcaklık ve zaman gibi diğer değişkenler de zemin davranışını etkiler (Fredlund ve ark., 2012). DOZ için gerilme denge koşulları kübik bir eleman üzerinde açılabilir (Şekil 3.3). Newton'un ikinci yasasına her bir düzlemdeki (yani, x-, y- ve z- düzlemleri) kuvvetler toplanarak zemin elemanına uygulanabilir. DOZ kübik elemanı için bir denge koşulu, zeminin dört fazının (hava, su, hava-su arayüzeyi ve zemin daneleri) dengede olduğu anlamına gelir. Her fazın, her yönde bağımsız, doğrusal, sürekli ve çakışık bir gerilme alanı olarak davrandığı varsayımıyla, denge denklemi yazılabilir ve süperpozisyon ilkesi kullanılarak üst üste bindirilebilir. Ancak bu, ölçülebilen gerilmelerle denge durumu sağlanamaz. Çünkü zemin daneleri arası gerilmeler doğrudan ölçülemez.



Şekil 3.3. DOZ kübik elemanı üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri: net normal gerilme ve kılcal gerilme tensörleri (Likos ve Lu, 2004).

DOZ kübik eleman denge denkleminden üç bağımsız normal gerilme seti çıkarılabilir. Bunlar $(\sigma_z - u_a)$, $(u_a - u_w)$, ve (u_a) doygun olmayan durumdaki zemin yapısının dengesini yönetir. Bu değişkenlerin bileşenleri fiziksel olarak ölçülebilir niceliklerdir. (u_a) gerilme değişkeni zemin danelerinin ve suyun sıkıştırılmaz olduğu varsayıldığında ortadan kaldırılabilir ve böylelikle $(\sigma - u_a)$ ve $(u_a - u_w)$ doygun olmayan bir zemin için gerilme durumu değişkenleri olarak adlandırılır. Doygun olmayan bir zemin için gerilme durumunun tam bu nedenle, bağımsız fazların denge denkleminde ölçülebilir gerilme tansörü olacak şekilde iki gerilme değişkeni halinde yazılabilir (Fredlund ve ark., 2012).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}$$

Şekil 3.4. Doygun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri matris formu (Likos ve Lu, 2004).

Yukarıdaki tansörler tek bir matriste birleştirilemez çünkü gerilme değişkenleri kısmi diferansiyel terimler dışında farklı zemin özelliklerine (yani boşluk yapısına) sahiptir. Boşluk yapısı, zemindeki gerilme durumuna dahil edilmediğinden doygun olmayan bir zeminde bir noktada etki eden iki bağımsız tansör gösterilmelidir (Şekil 3.3).

3.2.2. Doygun olmayan zeminlerin kayma direnci

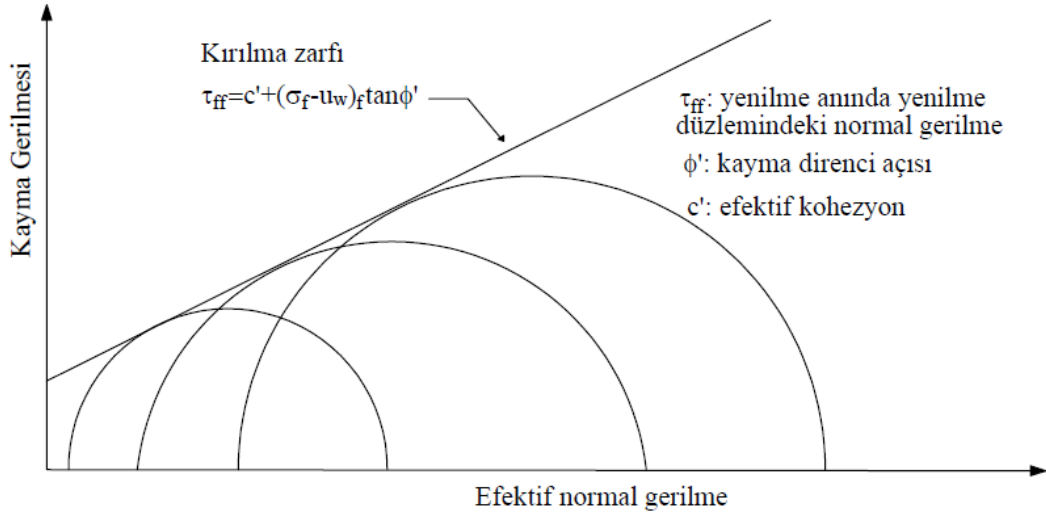
DOZ için kayma direnci teorileri, doymuş zeminler için kullanılan kayma direnci teorilerinde kullanılan kavramların ve matematiksel denklemlerin genişletilmesiyle önerilmiştir. DOZ kayma direnci, Tresca (1868), von Mises (1913) ve Mohr, (1914) kayma direnci teorileri genişletilerek açıklanabilir. Bu bölümde DOZ için kayma direnci Geoteknik Mühendisliğinde kullanılan en yaygın kırılma kriteri olan Mohr-Coulomb kriterinin genişletilmiş hali üzerinden açıklanacaktır (Fredlund ve ark., 2012; Likos ve Lu, 2004).

Doygun bir zeminin kayma direnci, Mohr-Coulomb kırılma kriteri ve efektif gerilme değişkeni kullanılarak açıklanabilir (Denklem 3.1).

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \quad (3.1)$$

Burada τ_{ff} = yenilme anında yenilme düzlemindeki kayma gerilmeyi; c' = efektif kohezyonu; $(\sigma_f - u_w)_f$ = yenilme anında yenilme düzlemindeki efektif normal gerilmeyi; σ_{ff} = yenilme anında yenilme düzlemindeki toplam normal gerilmeyi; u_{wf} = yenilme anındaki boşluk suyu basıncını ve ϕ' = efektif kayma direnci açısını göstermektedir.

Denklem 3.1, Şekil 3.5' de gösterildiği gibi kayma direnci ve efektif gerilmeler arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlar. Mohr dairelerine teğet olan doğru genellikle kırılma/yenilme zarfı olarak adlandırılır, çünkü kırılma/yenilme düzlemi üzerindeki olası kayma gerilmesi ve efektif normal gerilme kombinasyonlarını temsil eder. Boşluk suyu basıncı izotropiktir ve bu nedenle tüm düzlemlerde eşit olarak etki eder. Kırılma zarfı tarafından açıklanan kayma gerilmesi, herhangi bir normal gerilme değeri için zeminin kayma direncini gösterir (Fredlund ve ark., 2012; Gebre, 2010)



Şekil 3.5. Doygun zemin için Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Fredlund ve ark., 2012)

Doygun zeminler için kırılma zarfı, yenilmedeki gerilme durumunu temsil eden bir dizi Mohr dairesine teğet bir doğru çizilerek elde edilir. Kırılma zarfının eğimi, efektif kayma direnci açısını tanımlar ve ordinat üzerindeki kesişimi efektif kohezyonu işaret eder. Zeminde meydana gelecek kırılma düzleminin yönü, Mohr dairesindeki kutup noktası ile kırılma zarfı teğet noktası arasına doğru çizilerek elde edilir. Mohr dairesi üzerindeki teğet noktası, kırılma anında yenilme düzlemindeki gerilme durumunu temsil eder (Fredlund ve ark., 1978, 2012).

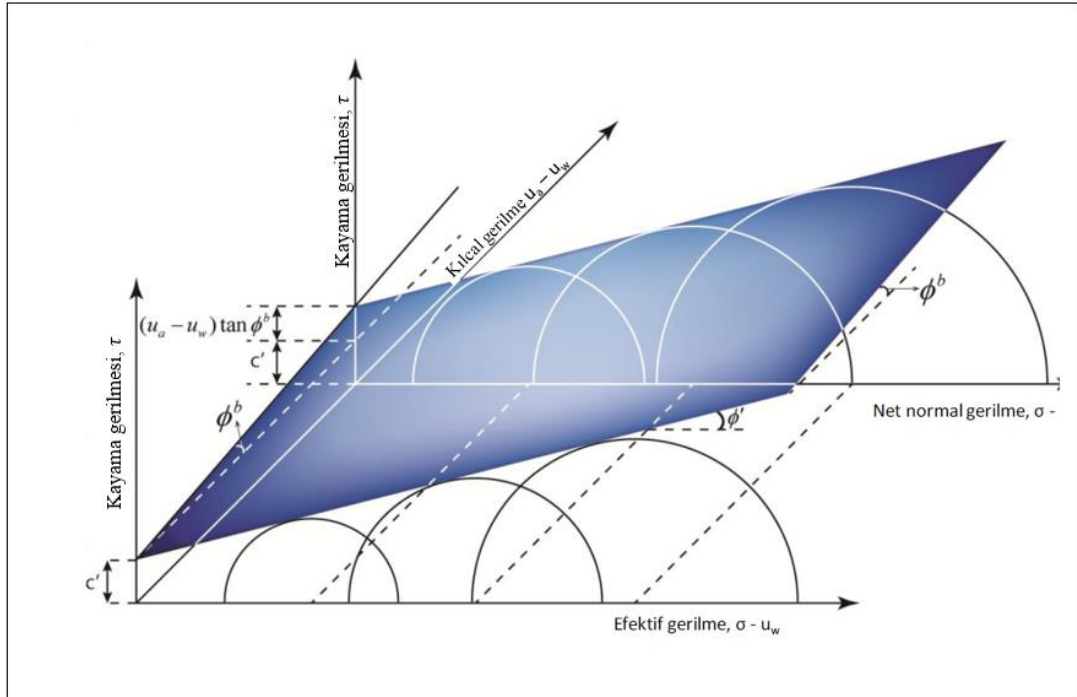
Mohr-Coulomb kırılma kriteri ve efektif gerilme kavramlarının kullanımı, doygun haldeki zeminlerin davranışının analizleri için yeterlidir. Ancak doygun olmayan bir zeminin gerilme durumunu ve dolayısıyla kayma direncini tanımlamak için iki bağımsız gerilme durum değişkeni kullanılması gereklidir (Bishop, 1959; Fredlund ve Morgenstern, 1977).

Kayma direncini oluşturan ilişki, gerilme tansörlerinin normal ve kayma bileşenlerini ilişkilendiren bir denklemdir. Doygun zeminin kayma direnci teorilerini DOZ koşullarına genişletmek için, birkaç kayma direnci kırılma kriteri uygulanabilir. Bu kriterlerden biri, Fredlund ve ark. (1978) tarafından doygun olmayan zeminleri kapsayacak şekilde genişletilen Mohr-Coulomb kırılma kriteridir. DOZ için genişletilmiş kayma direnci denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) f_1 \quad (3.2)$$

Burada τ = kayma direncini; c' = efektif kohezyonu; $(u_a - u_w) f_1$ = yenilme anında yenilme düzlemindeki efektif normal gerilmeyi; σ_n = yenilme anında yenilme düzlemindeki toplam normal gerilmeyi; u_a = boşluk hava basıncını; ϕ' = efektif kayma direnci açısını; f_1 = kayma direnci ve kılcal gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlayan zemin özelliği fonksiyonunu göstermekte olup bu fonksiyonun türevi [yani, $df_1/d(u_a - u_w)$] zemindeki kılcal gerilme değerine göre kayma direncindeki değişim oranı verir.

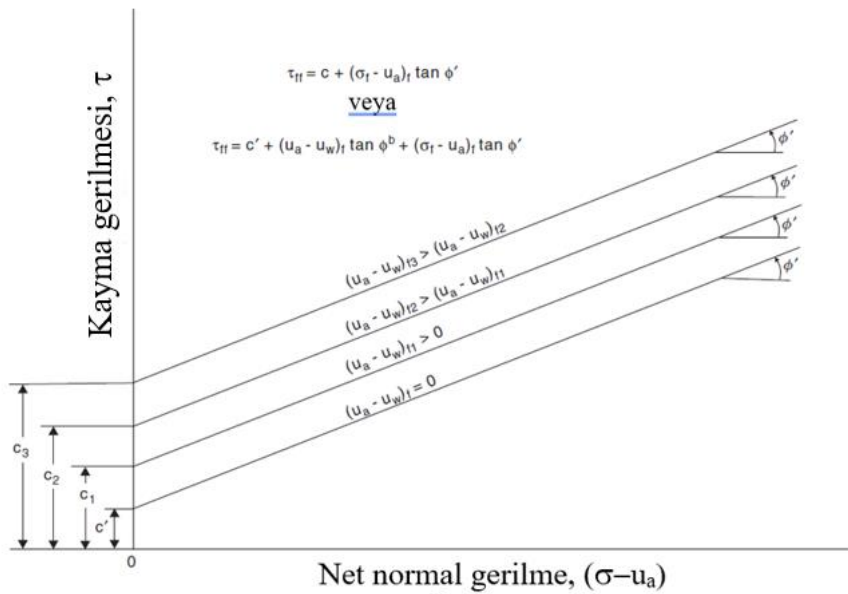
Şekil 3.6'da kayma direnci değişimi geleneksel iki boyutlu Mohr-Coulomb çizimine dik kılcal gerilme ile üç boyutlu bir yüzey olarak temsil edilir. Zemin özellikleri c' ve ϕ' , doymun zemin için sabit kabul edilirken, f_1 özelliği, zemin boşluklarındaki su miktarını ifade eden kılcal gerilmenin fonksiyonudur. Denklem 3.1, deneysel test sonuçlarına bağlı olarak ya doğrusal ya da eğri olan bir kayma direnci zarfı üretebilir. Geniş bir kılcal gerilme değerleri aralığında ölçüldüğünde, kayma direnci zarfları tipik olarak kavisli bir şekil sergiler (Fredlund, 2006; Fredlund ve ark., 2012; Vanapalli ve ark., 1996).



Şekil 3.6. Bağımsız gerilme durumu değişkenleri cinsinden genişletilmiş Mohr-Coulomb kırılma yüzeyi (Fredlund ve ark., 1978).

Düşük kılcal gerilme değerleri altında (yani, kılcal gerilmenin hava giriş değerinden daha düşük olduğu durum), f_1' in türevi, doymun zeminin efektif kayma direnci açısının tanjantına eşit bir değerdedir ($f_1 = \tan \phi'$). Zemin için hava giriş değeri aşıldığında, kırılma zarfı eğrileşmeye başlar. Genel olarak, kalıcı (rezidüel) kılcal gerilme değerlerine kadar kırılma zarfında kademeli bir eğrilik görülmektedir. Yüksek kılcal gerilme değerlerinde (yani rezidüel su içeriğindeki emme değerinden daha büyük emme değerleri), f_1' in türevi, silt ve kil zeminlerde sıfıra yaklaşmaktadır. (Nishimura ve Fredlund, 2001). Kumlu zeminlerde, rezidüel doymunluk derecesindeki emme değerlerinden daha büyük emmelerde kırılma zarfı eğimi negatif olabilir (Donald, 1956; J. K. Gan ve Fredlund, 1996; Ghasemzadeh ve Akbari, 2019).

DOZ koşulundan doymun koşullara yumuşak bir geçiş, Şekil 3.7' de gösterilen genişletilmiş Mohr-Coulomb kırılma zarfları kullanılarak açıklanabilir. Zemin doymunluğa doğru ilerledikçe, kılcal gerilme değeri sıfıra ve boşluk suyu basıncı boşluk hava basıncına yaklaşır. Sonuçta, üç boyutlu kırılma yüzeyi, toplam kayma direncine karşı net normal gerilme ($\sigma - u_w$), olacak şekilde iki boyutlu zarfa indirgenir. Kılcal gerilme değeri azaldıkça kırılma zarfları, kademeli olarak doymun zemin kırılma zarfına doğru alçalır ve görünür kohezyon en sonunda efektif kohezyona eşit olur (Fredlund ve ark., 2012; Likos ve Lu, 2004).



Şekil 3.7. Kırılma zarfının τ' ya karşı $\sigma - u_a$ düzleminde yatay izdüşümü (Fredlund ve ark., 2012).

Bu yaklaşım, kılcal gerilme aralığına bağlı olarak kayma direnci değerini kabul edilebilir bir aralıkta tahmin etme kabiliyetine sahiptir çünkü kılcal gerilmenin kayma direncine katkısı (ϕ^b), hava giriş değerinin ötesinde doğrusal değildir. Kayma direnci ve kılcal gerilme arasındaki doğrusal olmayan ilişki zemindeki boşluk hacmine dolayısıyla zemin türüne bağlıdır. Örneğin plastik kil ve silt zeminlerde kılcal gerilme değerinin artmasıyla ilk başta kohezyonda doğrusal olmayan bir artış gözlemlenirken rezidüel kılcal gerilme değerlerine yaklaştıkça bu artış değeri azalmakta iken kohezyonsuz zeminlerde hava giriş değeri ile rezidüel kılcal gerilme değeri arasında kohezyonda artış gözlemlenmekte, rezidüel kılcal gerilme değerinden daha büyük kılcal gerilmelerde ise kılcal gerilmenin kohezyona katkısı azalarak efektif kohezyon değerine yaklaşmaktadır.

Ayrıca unutulmamalıdır ki DOZ bağımsız gerilme durum değişkenlerinin büyüklüğüne göre bir hiyerarşi vardır.

$$\sigma > u_a > u_w \quad (3.3)$$

Kararlı denge koşullarını sağlamak için Deklem (3.3)'deki hiyerarşi korunmalıdır. Limit gerilim durumu koşulları, bağımsız gerilme durum değişkenlerinden biri sıfır olduğunda ortaya çıkar. Örneğin, boşluk havası basıncı, anlık olarak toplam gerilmeyi, aşacak şekilde artarsa, numunede bir "süreklilik kaybı" meydana gelecektir. Başka bir deyişle, $(\sigma - u_a)$ değişkeni sıfıra eşitlendiği anda limit gerilme durumu meydana gelir.

3.2.2.1. Doygun olmayan zeminlerin doğrusal olmayan kırılma zarfı

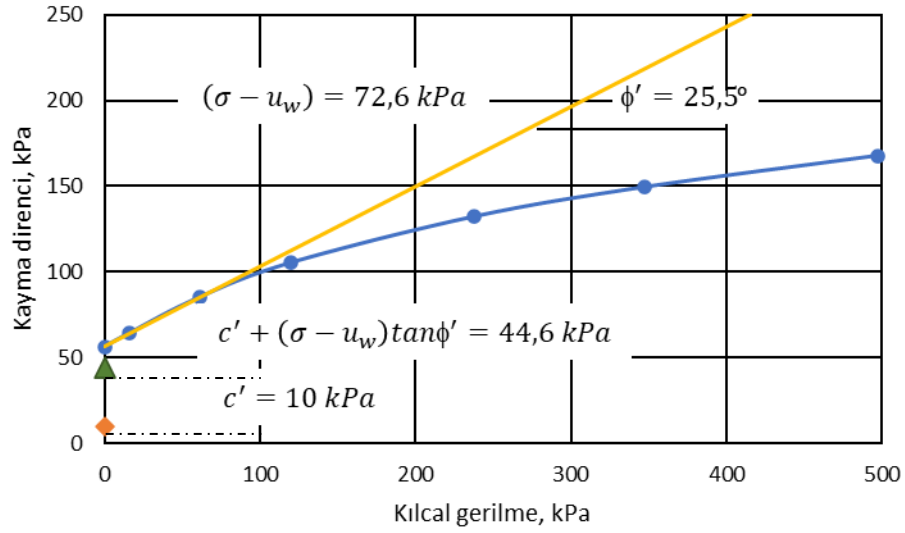
Doygun olmayan zeminlerin kırılma zarfı, zeminin su içeriği ve kılcal gerilme gibi doyumluk durumunu etkileyen faktörlere bağlı olarak şekil değiştirir. Bu nedenle, doğrusal bir kırılma zarfı modeli kullanımı gerçekçi olmayacaktır. Bunun yerine, birçok araştırmacı tarafından, DOZ davranışını daha iyi yansıtan kırılma zarfı modelleri önerilmiştir. Bu modeller arasında Bishop (1959), Fredlund ve Morgenstern (1977), Fredlund ve Xing (1994) gibi tanınmış modeller yer almaktadır. Bu modeller, doyum olmayan zeminlerin kırılma davranışını daha gerçekçi bir şekilde tahmin etmek için kullanılmaktadır.

Bishop (1959), kayma direnci ile gerilme durumunu ilişkilendirmek için bir matematiksel denklem geliştirmiştir. Kayma gerilmesinin sadece normal gerilmeye bağlı olmadığını, aynı zamanda konsolidasyon basıncı ve su içeriği gibi faktörlere de bağlı olduğunu söylemiştir. Bishop (1959) tarafından önerilen doğrusal olmayan kırılma zarfı şu şekildedir:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan\phi' + \chi (u_a - u_w) \tan\phi' \quad (3.4)$$

Burada, τ , görünür kayma direnci; $(\sigma - u_a)$, net normal gerilme; ϕ' , efektif kayma direnci açısı; c' , efektif kohezyon; χ , kılcal gerilme değerine bağlı bir doygunluk fonksiyonudur ve 0 ile 1 arasında bir değer alabilir. Bishop (1959)' un etkili gerilme önerisi deneysel veriler ile karşılaştırıldığında DOZ davranışını tahmin etmekte eksik kaldığı görülmüştür. Bu tek bağımsız gerilme durumu yaklaşımının doygun olmayan zeminlerin akma davranışını yakalayamaması, hacim değişimi davranışının gerçekçi olmayan tahminine yol açar. Dolayısıyla DOZ davranışında tek bağımsız gerilme fonksiyonu kullanarak, uygulanan gerilme ile hacim değişikliğini ilişkilendirilmesi mümkün değildir (Burland, 1965).

DOZ davranışının net gerilme, efektif gerilme ve kılcal gerilme değişkenlerinden bağımsız iki gerilme değişkeni ile açıklanabileceği anlaşılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle net gerilme ve kılcal gerilme değişkenleri tercih edilmektedir. Fredlund ve Morgenstern (1977), boşluk hava basıncını, boşluk su basıncını ve toplam basıncı değiştirirken net gerilme ve kılcal gerilmeyi sabit tutarak yaptıkları araştırmada, zeminde hacim değişikliği olmamıştır. Bu durum, net gerilme ve kılcal gerilme bağımsız gerilme değişkenleri kullanılarak DOZ davranışının açıklanabileceğini göstermiştir (Şekil 3.8.) (Fredlund ve Morgenstern, 1977).



Şekil 3.8. Kayma direnci kılcal gerilme arasındaki ilişki (Fredlund ve ark., 1987)

DOZ kayma direnci için Fredlund ve ark. (1978) tarafından önerilen denklem (Denklem 3.5), en yaygın olarak bilinen ifadelerden biridir.

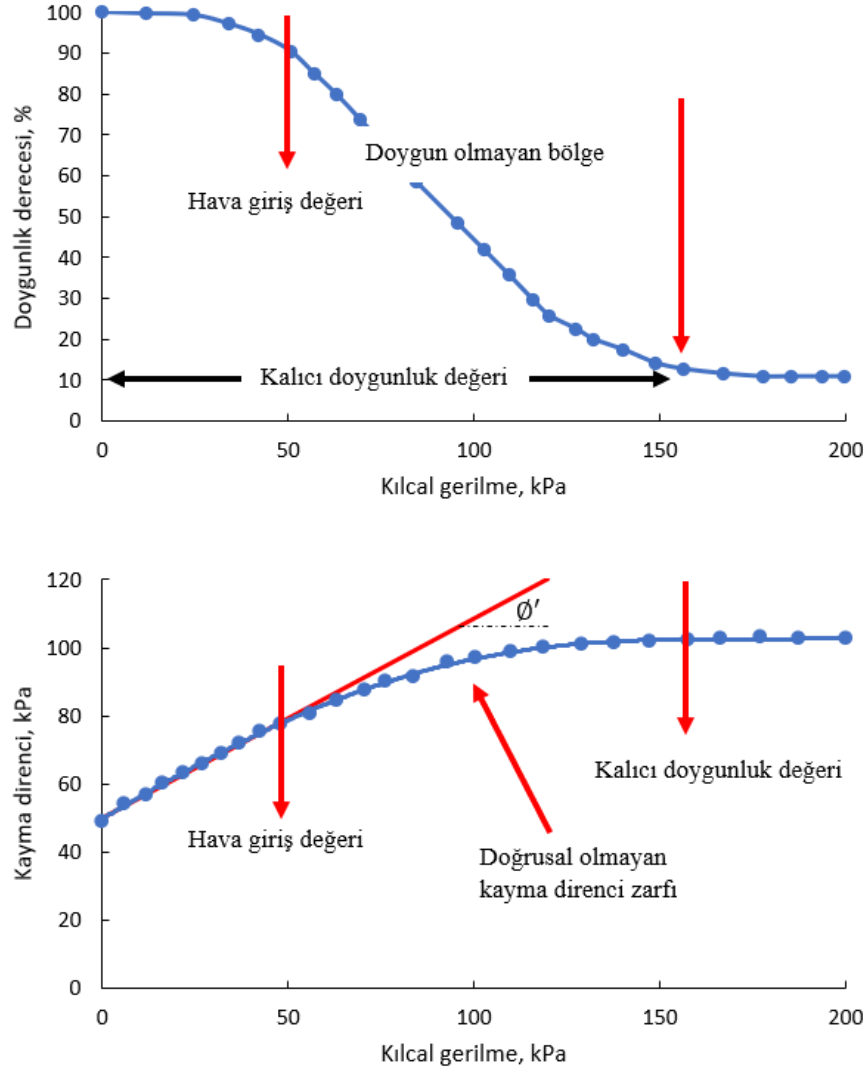
$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (3.5)$$

İki bağımsız gerilme değişkeni kullanan Denklem 3.5' te, τ , görünür kayma direnci; $(\sigma - u_a)$, net normal gerilme; $(u_a - u_w)$, kılcal gerilme; ϕ' , efektif kayma direnci açısı, c' , efektif kohezyon; ϕ^b , kılcal gerilmenin kayma direncine katkısını ifade etmektedir.

Fredlund ve ark. (1978) ilk olarak belirli bir zemin için ϕ^b değerini sabit olarak değerlendirmişlerdir. Ancak, daha sonra yapılan çalışmalar, ϕ^b değerinin sabit olmadığını göstermiştir (Oloo, 1999; Oloo ve ark., 1997). Çünkü kılcal gerilme yüksek değerlere (teorik olarak sonsuz) ulaştığında, zemin sonsuz bir kayma direncine sahip olmayacaktır, bu da ϕ^b değerinin artan kılcal gerilme değeri ile azalması gerektiği anlamına gelir (Escario ve Saez, 1986; Fredlund ve ark., 1987; J. K. M. Gan ve ark., 1988; Vanapalli ve ark., 1996). Fiziksel olarak, bu durum şöyle açıklanabilir: Kılcal gerilme değeri arttıkça, zemin içindeki suyla dolu boşluklar giderek daha fazla havayla dolu boşluklara dönüşür ve dane temas noktalarında gerilme artışına yol açar. Ancak, boşlukların çoğu havayla dolduğunda (yani sadece az miktarda büyük su dolu boşluk kaldığında), dane temas noktalarındaki ek gerilme,

temel olarak kılcal gerilmeye bağılıdır. Ancak, kılcal gerilme değeri belli bir sınır değere ulaştığında (kalıcı su muhtevası), bu sınır değerinden sonra kılcal gerilmenin kayma direncine katkısı ihmal edilebilir düzeyde düşük olacağı anlamına gelir.

Literatürde yer alan çalışmalar, DOZ koşullarında bir zeminin kayma direncinin, aynı net gerilmeye sahip doygun koşullardaki kayma direncinden daha yüksek olduğunu göstermektedir (Fredlund ve ark., 1978). Ayrıca, kayma direncinin kılcal gerilme değeri ile doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olduğu ve zeminin doygunluk derecesi ile kılcal gerilme arasında SWC eğrileriyle güçlü bir ilişki olduğu bulunmuştur (Fredlund ve ark., 2012; Vanapalli ve ark., 1996). Kılcal gerilme, bir gerilme durumu olarak, kayma direncine ϕ^b büyüklüğü ile katkıda bulunan bir ek kayma direnci bileşeni oluşturmaktadır. Doygun olmayan zeminlerde, ϕ^b değeri hava giriş değerine kadar ϕ' büyüklüğüne doğrusal olarak artar. Kılcal gerilme değeri zeminin hava giriş değerini aştığında, boşluk suyunda sürekli hava fazı oluşur ve zemin doygun olmayan duruma geçer. Zeminde boşluk suyu buharlaşmaya başladığında, kayma direncinde doğrusal olmayan bir artış meydana gelir ve ϕ^b , ϕ' değerinden daha küçük hale gelir (Vanapalli ve ark., 1996, 2010). ϕ^b değeri, yüksek kılcal gerilme değerlerine doğru doğrusal olmayan bir şekilde artış gösterir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. SWC eğrisi ile kayma direnci arasındaki ilişki (Vanapalli ve ark., 1996)

Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi SWC eğrisinin sunduğu parametreler DOZ koşullarında kayma direnci değişiminin hesaplanmasında kullanılabilir. Zeminin su tutma davranışı (SWC eğrileri) kayma direnci davranışından daha karmaşık olduğundan, kayma direnci ile SWC eğrilerinden benzersiz bir kayma direnci fonksiyonu beklemek gerçekçi değildir (Vanapalli ve ark., 1996).

3.2.2.2. Doygun olmayan zeminlerin elastisite modülü

Zeminin elastisite modülü, basınç gerilmesi altında ne kadar şekil değiştirmeye uğradığının bir ölçüsüdür. Zeminlerde, doygunluk derecesi azaldıkça efektif gerilmedeki artışa bağlı olarak Young modülü artar ve bu ilişki daha düşük doygunluk derecelerinde/daha yüksek kılcal gerilme değerlerinde daha belirgindir. Bununla birlikte, doymun olmayan zeminlerin elastisite modülü, kılcal gerilme ile

doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilidir ve davranışı, zemin tipi, yapısı, boşluk oranı ve test yöntemleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, DOZ elastisite modülünü doğru bir şekilde belirlemek için, bu faktörlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekir.

Elastisite modülü, zeminlerin oturma davranışı ile güçlü bir ilişkisi olan anahtar parametredir. Elastisite modülü, bir malzemenin geri kazanılabilir şekil değiştirmelere tepkisini temsil eder ve geleneksel bir üç eksenli testte kayma direncine karşılık gelen normal gerilme oranı olarak tanımlanabilir (Lu ve Kaya, 2014). Zemin-yapı etkileşimi, şev stabilitesindeki kütle hareketini tahminde ve zemin hacim değişim davranışıyla ilgili problemlerde uygun elastik çözümler veya sonlu elemanlar analizi için elastisite modül değerine gerekli duyulmaktadır. Problemlerin çözümü için ilk yapıcı modeller, zemin deformasyon değişkenlerini gerilme durum değişkenlerindeki değişikliklerle ilişkilendirmek için elastik modülü kullanmışlardır (Pereira ve Fredlund, 1997). Bazı araştırmacılar, yapısal modeller ve ayrıca zemin davranışını simüle etmek veya tahmin etmek için yarı ampirik ve ampirik modeller geliştirmek için elastik modülünü kullanmışlardır (F. M. Mohamed ve ark., 2013; Schanz ve ark., 2019).

DOZ koşullarda kohezyon ve kayma direnci kuvvetlerine ek olarak, kılcal gerilme kuvvetleri zeminin elastik özelliklerini etkilemektedir (Adem ve Vanapalli, 2014; Edil ve ark., 1981; Lu ve Kaya, 2014). Birçok araştırmacı, kılcal gerilmenin doygun olmayan zeminlerin elastisite modülü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmaların tümü, kılcal gerilme değerinin elastisite modülüne katkısı olduğunu göstermiştir. Janbu (1963), elastisite modülündeki değişimin Denklem (3.6) ile verilebileceğini öne sürmüştür.

$$E_{sat} = K P_a \left(\frac{\sigma_c}{P_a} \right)^n \quad (3.6)$$

Burada; E_{sat} , doygun elastisite modülü; K , Janbu'nun boyutsuz modül sayısı; P_a , atmosfer basıncı ($P_a = 101.3 \text{ kPa}$); σ_c , ön konsolidasyon basıncı ve n , uydurma parametresidir.

Doygun olmayan zeminin elastisite modülünün ölçülmesi zaman alıcı, maliyetli ve detaylı test ekipmanı ile yüksek eğitilmiş personel gerektiren bir süreçtir. Bu nedenle,

doygun olmayan zeminlerin elastisite modülünü tahmin etmek için çeşitli ampirik ve yarı ampirik modeller önerilmiştir (Adem ve Vanapalli, 2014; Lu ve Kaya, 2014; Oh ve ark., 2009). Bu modeller, elastisite modülünü hızlı ve pratik bir şekilde tahmin etmek için kullanılmaktadır.

(Oh ve ark., 2009), farklı kılcal gerilme değerleri için üç farklı özellikteki kum zeminde model temel testlerinin yük oturma verilerini analiz etmiştir. Çalışmaları, elastisite modülünün sınır etki bölgesinde (zeminin doygun durumda olduğu bölge) doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Geçiş bölgesinde (doygun olmayan bölge), elastisite modülü belirli bir kılcal gerilme değerine kadar doğrusal olmayan bir şekilde artmakta ve daha sonra azalmaya başlamaktadır. Son olarak, rezidüel bölgede (kalıcı doygunluk değeri), modül sabit bir değere yakınsamaktadır. Oh ve ark. (2009), kumlu zeminlerde doygun olmayan elastisite modülünü (E_{unsat}), kılcal gerilmeye göreye tahmin etmek için yarı ampirik bir model önermişlerdir (Denklem 3.7).

$$E_{unsat} = E_{sat} \left[1 + \alpha \frac{(u_a - u_w)}{(P_a/101.3)} \right] (S^\beta) \quad (3.7)$$

Burada; E_{unsat} doygun olmayan zemin elastisite modülü; E_{sat} , doygun zemin elastisite modülü; $(u_a - u_w)$, kılcal gerilme değeri; P_a , atmosfer basıncı; S , zemin doygunluk derecesi; α ve β , uydurma parametreleridir. α değerinin temel boyutunun bir fonksiyonu olduğu ve değerinin 0.5 ile 2.5 arasında değiştiği belirtilmiştir.

Lu ve Kaya (2014), doygun olmayan zeminlerde elastisite modülü ile hacimsel su içeriğinin ilişkisi olduğunu öne sürerek Denklem 3.8' de gösterildiği gibi bir model önermişlerdir.

$$E = \frac{2A}{1 + \mu} (\sigma - u_a) + \frac{2C}{1 + \mu} \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{n/n-1} - 1 \right]^{1/n} \quad (3.8)$$

Burada; E , elastisite modülü; θ , hacimsel su içeriği; θ_s , doygun hacimsel su içeriği; μ , poisson oranı; A, C, α ve n , uydurma parametreleridir.

3.3. Doygun Olmayan Zeminlerin Taşıma Kapasitesi

Doygun olmayan zeminler üzerindeki temellerin taşıma gücü değerini tahmin etmek için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlar, Terzaghi (1943) ve Skempton (1948) tarafından önerilen temel taşıma gücü denklemlerinin kılcal gerilme etkisini dikkate alacak şekilde modifiye edilmesine dayanmaktadır. Kohezyonlu zeminler üzerinde yapılan gerek model gerekse yerinde plaka yükleme deney sonuçları zeminin zımbalama yenilme moduyla göçtüğünü göstermektedir (Akbari Garakani ve ark., 2020; Consoli ve ark., 1998; Costa ve ark., 2003; Oh ve ark., 2009; Oh ve Vanapalli, 2018; Oloo ve ark., 1997; Rojas ve ark., 2007; Schnaid ve ark., 1995; Vahedifard ve Robinson, 2016; Vanapalli ve Mohamed, 2007; Yan ve ark., 2020). İyi tanımlanmış bir kırılmanın gözlemlenmediği, doğrudan temelin altındaki zeminin sıkışması ve temel çevresinde dikey kaymasıyla oluşan bu karakteristik kırılma davranışı temel taşıma kapasitesinin temel altındaki zeminin sıkışabilirliğine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu karakteristik yenilme modunun gözlemlendiği doymuş olmayan kohezyonlu zeminler için, boşluk suyunun drenajsız koşullar (yani sabit su içeriği) altında olduğu kabulü makul bir varsayımdır (Oh ve Vanapalli, 2013; Rahardjo ve ark., 2004). Tang ve ark. (2017) yerinde plaka yükleme testlerinin tipik olarak sabit su içeriği koşulu altında gerçekleştiğini ve $\chi(u_a - u_w)$ 'nin sabit olarak kabul edilmesinin sonuçlarda bir hata oluşturmayacağını göstermiştir (χ , efektif gerilme parametresi; u_a , boşluk hava basıncı; u_w , boşluk suyu basıncı).

Oh ve Vanapalli (2013) doymuş olmayan ince daneli zeminin yüzeyine yerleştirilmiş temelin taşıma kapasitesi drenajsız yükleme koşulu kabulüyle, Skempton (1948) tarafından önerilen $\phi' = 0$ yaklaşımına dayalı olarak Denklem (3.9) ile tahmin edilebileceğini belirtmiştir;

$$q_{ult(unsat)} = s_{unsat} * \xi * N_{cs} \quad (3.9)$$

Burada; $q_{ult(unsat)}$, ince daneli zemin üzerindeki temelin nihai taşıma kapasitesi; s_{unsat} , serbest basma dayanımına dayalı doymuş olmayan zeminin kayma direnci; ξ , şekil faktörü; N_{cs} , drenajsız yükleme koşullarında temel taşıma kapasitesi faktörü (yani: 5.14). Aynı çalışmada Oh ve Vanapalli (2013) doymuş olmayan zeminin kayma direncini (s_{unsat}); doymuş kayma dayanımı ve kılcal gerilmeden kaynaklı kayma dayanımı artışına eşit olacağını göstermiştir (Denklem 3.10). Diğer bir

ifadeyle doygun olmayan kohezyonlu zeminin toplam kayma direnci (kılcal gerilmesinin kayma dayanımına katkısı da dahil) serbest basma dayanımı (UC) ile elde edilebilir. Bu sayede kohezyonlu zeminin kılcal gerilme değerin ölçülmesine gerek kalmamaktadır (Oh ve Vanapalli, 2013).

$$s_{unsat} = [s_{sat} + f(u_a - u_w)] = \left[\frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] \quad (3.10)$$

Burada; s_{unsat} , UC testine dayalı bir zeminin kayma direnci; $f(u_a - u_w)$, kılcal gerilme katkısıyla dayanım bileşeni ve $q_{u(unsat)}$, zeminin serbest basma dayanımı.

Oh ve Vanapalli (2013) çalışması, ince daneli zeminler (CH) üzerinde yüzeysel kare temellerin taşıma kapasitesinin, zeminlerin serbest basma dayanımı kullanılarak basitçe tahmin edilebileceğini göstermiştir (Denklem 3.11). Önerilen denklemde drenajsız koşullar için Meyerhof (1963) ve Vesić (1973) tarafından önerilen şekil faktörü, $\xi_{unsat}=1+0.2B/L$ (B:genişlik ve L:uzunluk) kullanılmıştır.

$$q_{ult(unsat)} = \left[\frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] * \left[1 + 0.2 \frac{B}{L} \right] * N_{unsat} \quad (3.11)$$

Ayrıca drenajlı yükleme koşulları altında, iri daneli doygun olmayan zeminlere oturan temellerin nihai taşıma kapasitesinin tahmini için, Terzaghi'nin (1943) doygun zeminlere oturan şerit temeller için önerdiği temel taşıma gücü denkleminin (Denklem 3.12) genişletilerek ileri sürülmüş birçok model literatürde mevcuttur (Akbari Garakani ve ark., 2020; Ghasemzadeh ve Akbari, 2019; Oloo ve ark., 1997; Vahedifard ve Robinson, 2016; Vanapalli ve Mohamed, 2007; Vanapalli ve Oh, 2021; Vo ve Russell, 2016; Yan ve ark., 2020).

$$q_{ult} = k_1 c' N_c + q N_q + k_2 \gamma B N_\gamma \quad (3.12)$$

Burada c' , efektif kohezyon; q , efektif örtü yükü; B , temel genişliği; k_1 ve k_2 , şekil faktörleri; N_c , N_q ve N_γ , temel taşıma kapasitesi faktörleridir.

Oloo ve ark. (1997), Terzaghi (1943)'nin efektif gerilme yaklaşımını genişleterek doygun olmayan zeminlerdeki yüzeysel bir temelin taşıma kapasitesini kılcal gerilmenin etkisini göz önünde bulundurarak tahmin etmek için kullanılabilecek bir model önermiştir (Denklem 3.13). Model, yükleme aşamasında hem boşluk hava

hem de boşluk suyu basıncının etkin olduğu durumu kapsamaktadır. Zeminin hava giriş değerinden daha büyük kılcal gerilme değerleri için sabit bir ϕ^b kullanmaktadır.

$$q_{ult} = \{c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b] \tan \phi^b\} N_c + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma \quad (3.13)$$

Burada; c' , efektif kohezyon; ϕ' , efektif kayma direnci açısı; ϕ^b , kılcal gerilme ile ilişkili kayma direnci açısı; $(u_a - u_w)_b$, hava giriş değeri; $(u_a - u_w)$, kılcal gerilme değeri; B , temel genişliğini; N_c ve N_γ sırasıyla Terzaghi (1943) ve Kumbhokjar (1993) temel taşıma gücü katsayısını göstermektedir. Bu yaklaşım, kılcal gerilme değeri aralığına bağlı olarak taşıma gücü değerini kabul edilebilir bir aralıkta tahmin etme kabiliyetine sahiptir çünkü ϕ^b 'nin davranışı, zeminin hava giriş değerinin ötesinde doğrusal değildir. Kayma direnci ve kılcal gerilme arasındaki doğrusal olmayan ilişki, Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi çift doğrusal bir zarfla yaklaşık olarak tahmin edilebilir.

Vanapalli ve Mohamed (2007), Oloo ve ark. (1997)'nin nihai temel taşıma kapasitesi modeli ile Vanapalli ve ark. (1996) tarafından önerilen doğrusal olmayan kayma direnci modelini referans alarak Terzaghi (1943)'nin sürekli temeller için geliştirdiği orijinal taşıma gücü denklemini doymun olmayan zeminler için geliştirmiştir (Denklemler 3.14). Vanapalli ve Mohamed (2007) ayrıca ölçülen kayma direnci açısı değerinin %10 arttırılmış halini kullanarak $(1.1\phi')$ hem doymun hem de doymun olmayan koşullar için temel taşıma gücü değerinin daha doğru tahmininin sağlanabileceğini öne sürmüştür.

$$q_{ult} = \{[c' + (u_a - u_w)_b \tan \phi' - S^\Psi \tan \phi'] + (u_a - u_w)_{AVE} S^\Psi \tan \phi'\} N_c \xi_c + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma \xi_\gamma \quad (3.14)$$

Burada; c' , efektif kohezyon; ϕ' , efektif kayma direnci açısı; S , doymunluk derecesi; Ψ , uydurma parametresi; $(u_a - u_w)_b$, hava giriş değeri; $(u_a - u_w)_{AVE}$, ortalama kılcal gerilme değeri; N_c ve N_γ sırasıyla Terzaghi (1943) ve Kumbhokjar (1993) temel taşıma gücü katsayısını göstermektedir. ξ_c ve ξ_γ Vesic (1973) şekil faktörleridir.

Vanapalli ve Mohamed (2007), taşıma kapasitesi uydurma parametresi (Ψ) için, beş zemin üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarına dayanarak, plastisite indeksi I_p arasında bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 2.6). Yapılan çalışmada incelenen üç kumlu zeminin tümü için $\Psi = 1$ 'e eşitken diğer ince daneli zeminler için daha yüksek Ψ değerlerinin gerektiği bildirilmiştir. Beş zemin üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların sonuçlarına dayanarak, taşıma kapasitesi uydurma parametresi (Ψ) ile plastisite indeksi (I_p) arasındaki ilişki Denklem 3.15 ile açıklanmıştır.

$$\Psi = -0,0031I_p^2 + 0,34I_p + 1 \quad (3.15)$$

3.4. Doygun Olmayan Zeminlerin Hal Değişkenlerinin Ölçümü

Kılcal gerilme teorisi esasen zemin-su-bitki sistemleri ile ilişkili olarak geliştirilmiştir. 1965'li yıllara gelindiğinde doymuş olmayan zeminlerin mekanik davranışını anlamada ve açıklamada en temel bağımsız durum değişkeninin kılcal gerilme olduğu anlaşılmıştır. Laboratuvar ve sahada kılcal gerilmeyi ölçmek çok kıymetlidir. DOZ mekaniğinde kilit bağımsız durum değişkeni olan kılcal gerilmenin (veya toplam emme) ölçülmesi zor, karmaşık ve pahalıdır. Kılcal gerilme söz konusu olduğunda kullanılabilecek genel terimler kılcal gerilme, toplam emme ve eriyik emme terimleridir (Fredlund ve ark., 2012).

3.4.1. Kılcal emme

Zemin emmesi olarak da bilinen kılcal emme, doymuş olmayan zeminlerin boşluklarında var olan bağımsız gerilimin veya negatif basıncın bir ölçüsüdür. Diğer bir ifadeyle zeminin yerçekimi kuvvetlerine karşı su tutma potansiyelinin bir ölçüsüdür.

Kılcal gerilme, zemin boşlukları içindeki su molekülleri ve katı yüzeyler arasındaki kohezyon kuvvetlerinden kaynaklanır. Gözeneklerde su-hava birlikte bulunduğu zemin daneleri arasında negatif bir basınç veya gerilim oluşur. Bu gerilim, yerçekimi kuvvetlerine karşı zeminin suyu tutma kabiliyetini oluşturur.

Kılcal gerilme, boşluk hava ve boşluk suyu basınçları ($u_a - u_w$) arasındaki farktır ve doğrudan veya dolaylı olarak ölçülebilir (Edil ve ark., 1981; Houston ve ark., 1994; Kim ve ark., 2015). Doğrudan yöntemler negatif boşluk suyu basıncını ölçer. Kılcal gerilmenin boşluk hava basıncı bileşeni genellikle arazi yüzeyinde

atmosferiktir. Dolaylı yöntemler, özel olarak tasarlanmış bir seramik malzemenin kullanılmasıyla negatif boşluk suyu basıncı dışında (örneğin ısıl iletkenlik) bir değişkeni ölçer (Fredlund ve ark., 2012; Özocak, 2003). Dolaylı bir yöntem kullanılırken zemindeki kılcal gerilmenin belirlenmesi için ölçüm cihazının kalibrasyonu çok önemlidir.

Doğrudan ölçümler ile kılcal gerilme değeri zemininin negatif boşluk su basıncından belirlendiğinden, hava ve su basınçları arasında ayırıcı olarak yüksek hava girişli seramik diskler kullanılır. Dolaylı ölçümler ile zeminlerin kılcal gerime değerini belirlemek için çeşitli gözenekli malzeme/sensörler kullanılır. Kılcal gerilme değerini ölçmek için tüm dolaylı yöntemlerde ortak olan özellik, malzemelerin/sensörlerin kalibre edilmesidir, çünkü boşluk suyu basıncı dışında bir özellik ölçülür. Özel olarak tasarlanmış gözenekli bu malzemenin özellikleri, su içeriğinin bir fonksiyonudur (Fredlund ve ark., 2012; Kocaman, 2018; Özocak, 2003).

3.4.2. Toplam emme

Zemindeki kılcal gerilme, zemin yüzeyinde suyun infiltrasyonu ve buharlaşmanın bir sonucu olarak değişir. Zemindeki toplam emme, toprağın su içeriğindeki küçük değişikliklere karşı hassas değildir. Bu nedenle, toplam emme ölçümleri, sıcaklık dalgalanmalarının az olduğu yüksek emme aralığında kılcal gerilme değişimini tahmin etmek için kullanılabilir (Fredlund ve ark., 2012).

Zemin suyunun serbest enerjisi (yani toplam emme), zemin suyunun buhar basıncı veya zemindeki bağıl nem ölçülerek belirlenebilir. Bir zemindeki bağıl nemin doğrudan ölçümü, psikrometre adı verilen bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilir. Bir zemindeki bağıl nem ayrıca dolaylı ölçüm yöntemi olan filtre kağıdı kullanılarak ölçülebilir. Filtre kağıdının su içeriği toplam emmeye karşı kalibre edilir. Daha sonra bir veya daha fazla filtre kağıdı zemindeki buhar basıncı ile (yani toplam emme) dengelenir (Edil ve ark., 1981; Fredlund ve ark., 2012; Houston ve ark., 1994; Kocaman, 2018; Krahn ve Fredlund, 1972; Özocak, 2003; Wan ve ark., 1995).

3.4.3. Eriyik (ozmatik) emme

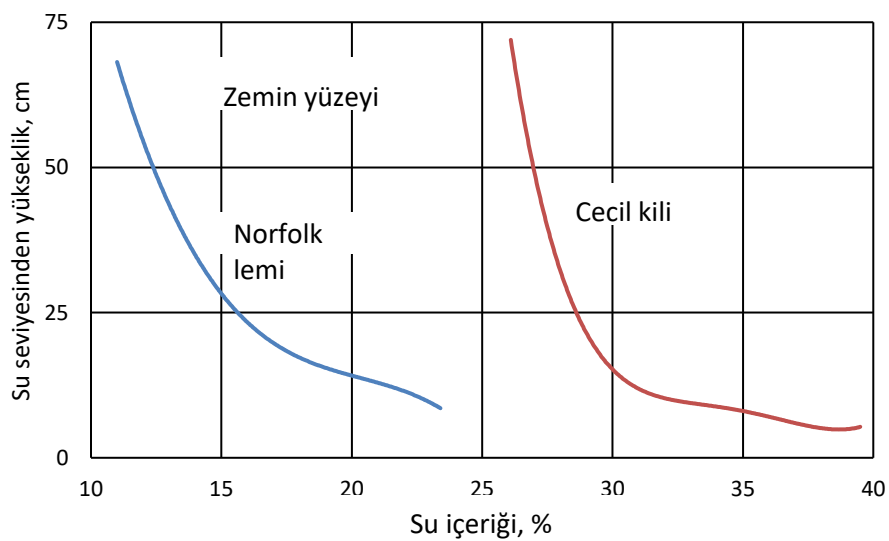
Eriyik emme adındanda anlaşılacağı üzere boşluk suyunda çözünmüş mineral (tuz minerali) miktarı ile ilgilidir. Bir zeminin ozmotik emilimini ölçmek için çeşitli prosedürler kullanılabilir. Ancak gerçekçi bir ölçüm için, zemini akışkan bir duruma gelene kadar damıtılmış saf su ile karıştırdıktan sonra zeminden süzülerek elde edilen

suyun elektriksel iletkenliğini ölçülmelidir. Daha sonra, elektriksel iletkenlik ölçümüne dayanarak ozmotik emilimi hesaplamak için suyun doğal içeriğine dönüşüm yapılmalıdır. Bu test prosedürü basit olmasına rağmen, ozmotik emmenin yerinde doğru bir ölçümüne izin vermemektedir (Krahn ve Fredlund, 1972).

3.5. Doygun Olmayan Zeminlerin Zemin-Su Karakteristik Eğrileri (SWCC)

Doygun olmayan zeminlerin zemin-su karakteristik ilişkileri ilk kez Buckingham (1907) tarafından yapılan çalışmada, serbest su seviyesi üzerinde delikli bir uzun silindirik şeklindeki numune tankına yerleştirilen numuneler üzerinde ölçülmüştür. Numunelerin içindeki yerçekimi potansiyel enerjisi, rezervuardaki serbest su yüzeyine olan mesafeye bağlı olarak dengeye gelene kadar beklenmiştir, bu da "kılcal potansiyel" olarak adlandırılmıştır. Şekil 3.10, potansiyel kılcallık ve su içeriği arasında sürekli fonksiyonel ilişkiler olarak çizilen iki SWCC'yi göstermektedir.

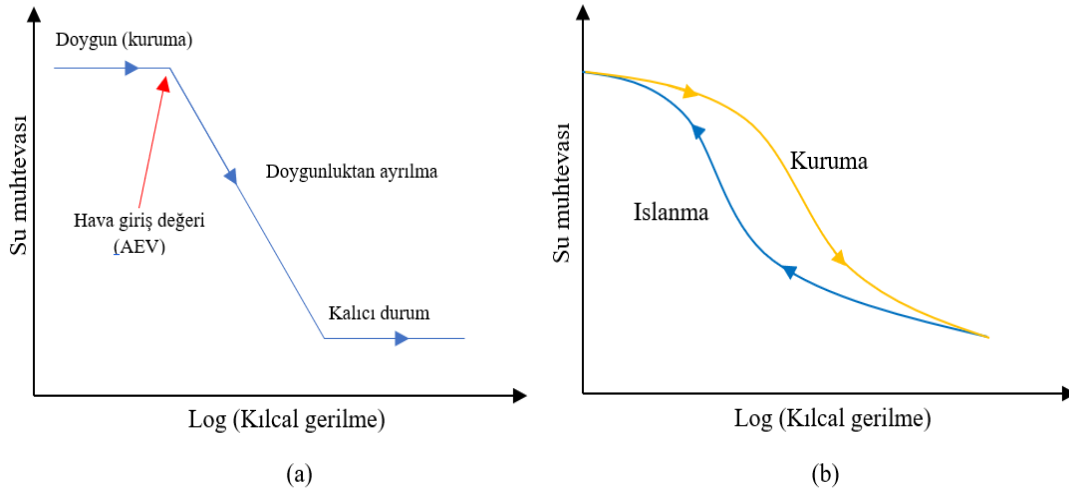
Richards (1928), kohezyonlu zemin örneklerini su haznesine bağlı yüksek hava giriş değerine sahip seramik bir disk üzerine yerleştirmiştir. Kılcal gerilmenin etkili olabilmesi için sistem vakum tankına bağlanmıştır. Zemin örnekleri su haznesindeki basınçla dengelenene kadar negatif bir su basıncına tabi tutulmuştur. Dengelenme sağlandıktan sonra zeminin su içeriği ölçülmüştür. Bu ekipmana Richards basınç plakası aparatı denmektedir.



Şekil 3.10. İki farklı zeminde kılcal emmeye karşı su içeriğinin ilk ölçümleri (Richards (1928)).

İlk çalışmalar, SWCC'nin zemindeki suyun kütlesi/hacmi ile su fazının enerji durumu arasındaki ilişkiyi kavramsal olarak anlamak ve suyun boşluklardaki dağılımını anlamak için kılcallık kavramıyla modellenmiştir (Fredlund ve ark., 2012; Hilf, 1956). SWCC'ler, doymun olmayan zeminlerin davranışının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Önerilen prosedürler, doymun olmayan zeminlerin özellikleri için yaklaşık değerler sunmasına rağmen, DOZ mekaniği problemlerini analiz etmek için yeterli kabul edilmektedir (Vanapalli ve ark., 1996).

Kohezyonsuz iri daneli bir malzeme için idealleştirilmiş su muhtevası-emme ilişkisi, kuruma boyunca üç aşamadan oluşmaktadır (Şekil 3.11). İlk aşama, doymun durumdan su kaybı ile başlar ve emme değeri arttıkça zeminin doymunluk derecesi azalmaz. Kuruma davranışı gerçek zeminler için idealize edilmiş durumdan oldukça farklıdır. Zeminin su emme ilişkisi, tipi (dizilme ve mineraloji), gerilme geçmişi ve ayrışma gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, aynı zeminin doğal, sıkıştırılmış ve yeniden yapılandırılmış numuneleri arasında emme tepkisi farklılık gösterebilir. Zeminin emme artışı, su içeriğinin sabit kalmasıyla birlikte, büzülme nedeniyle boşluk oranında da azalma oluşturabilir (Özocak, 2003).



Şekil 3.11. Zemin–su karakteristik eğrisi; (a) idealleştirilmiş zemin-su karakteristiği, (b) tipik zemin–su karakteristik eğrisi (Özocak, 2003)

Geçiş safhası olarak adlandırılan ikinci aşamada, havanın zemin içine girmesi ve kılcal gerilmenin AEV (hava giriş değeri) değerini aşmasıyla zemin doymunluktan ayrılır. Bu aşamada, zemindeki boşluk hacmine bağlı olarak büyük hacimlerde hava girişi gerçekleşir ve önemli miktarda su çıkışı meydana gelir.

Eşik kılcal gerilme değeri kalıcı su muhtevası olan üçüncü aşamada zemin içindeki su oranı değişmez. Bu safhada ortamdan çok düşük hacimli su çıkışı için büyük kılcal gerilme/emme artışına gerek vardır. (Fredlund, 1996)' ya göre, termodinamik yasalara uygun olarak bir zeminin sıfır su içeriği için toplam emme büyüklüğü yaklaşık 1000 MPa'dır. Bununla birlikte, birçok killi zemin, havada kurutma durumunda bile yüksek emme kapasitesine sahip olabilir ve %80 gibi yüksek doygunluk derecesine kadar su tutabilir. Bu zeminler hacim azalımı göstermeye devam ederken bu özelliklerini koruyabilirler (Özocak, 2003).

3.5.1. DOZ emme ölçüm yöntemleri

Laboratuvar ve saha çalışmalarında kılcal gerilme/emme ölçümleri oldukça önemlidir. DOZ mekaniğinin mühendislik problemlerine uygulanması, kılcal gerilme/emme ölçüm yeteneğiyle yakından ilişkilidir. Zeminin kılcal gerilme ve toplam emme değerleri ölçülmesi zor, bağımsız değişkenlerdir. Kılcal gerilme değerlerinin ölçümü konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, günümüzde hala üstesinden gelinmesi gereken zorluklar bulunmaktadır (Catana ve ark., 2006; Özocak, 2003).

Emme ölçümü yapan cihazlar doğrudan ve dolaylı ölçüm cihazları olmak üzere iki ana başlık altında gruplandırılabilir (Vanapalli ve ark., 2021). Dolaylı yöntemler zeminin nemi/su içeriği ile ilgili diğer parametrelere dayalı ölçümler sağlarken, doğrudan yöntemler emme değerlerini doğrudan ölçerler. Tablo 3.1., doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemlerini, bunların ölçüm aralıklarını, ölçüm yerlerini ve tespit ettikleri parametreleri listeler (Özocak, 2003).

Tablo 3.1. Emme ölçümünde kullanılan yöntemler (Özocak, 2003).

Alet	Emme	Ölçülen değişken	Ölçüm aralığı (kPa)	Dengeye ulaşma süresi	Ölçüm yeri	Kaynak
Transistörlü psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-70000	Dakika	Lab Arazi	Truong ve Holden, 1995
Termokupl psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-8000	Dakika	Lab Arazi	Brown ve Collins, 1980

Tablo 3.1. (Devamı) Emme ölçümünde kullanılan yöntemler (Özocak, 2003).

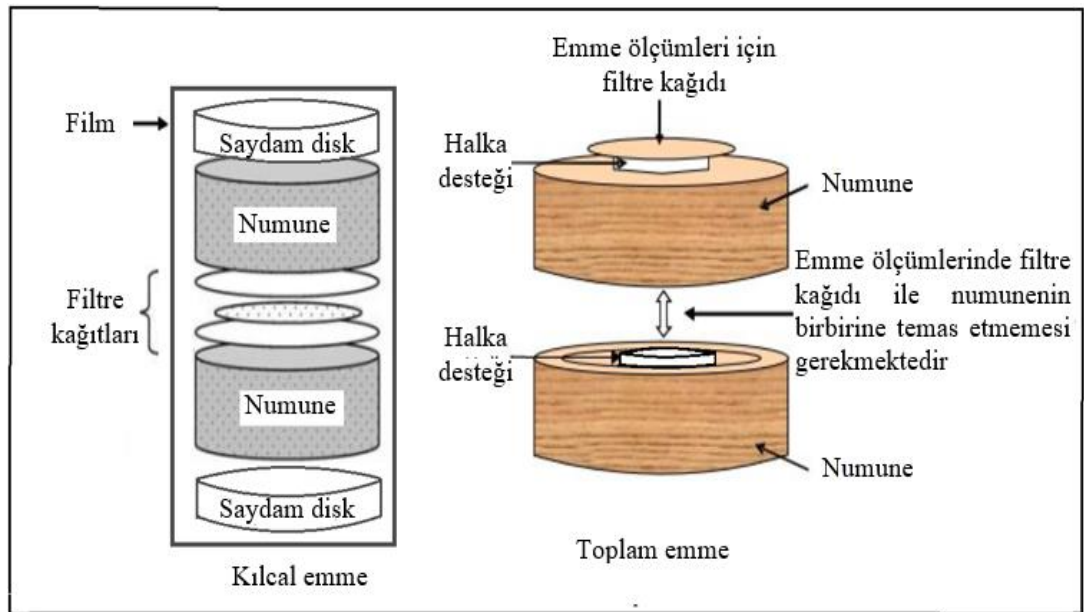
Alet	Emme	Ölçülen değişken	Ölçüm aralığı (kPa)	Dengeye ulaşma süresi	Ölçüm yeri	Kaynak
Süzgeç kağıdı (temassız)	Toplam	Su içeriği	400-30000	7-14 gün	Lab Arazi	Al Khafaf ve Hanks, 1974
Süzgeç kağıdı	Kılcal	Su içeriği	30-30000	7 gün	Lab Arazi	Gardner, 1930
Emme plakası	Kılcal	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Saat	Lab	Dineen, 2000
Basınç plakası/membranı	Kılcal	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-10000	Saat	Lab	Hilf, 1951
Tansiyometre	Kılcal	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Dakika	Lab Arazi	Soil Moisture Equipment
TDR sonda	Kılcal	Su içeriği	0-1500	Saat	Lab Arazi	Cook ve Fredlund, 1998
Eriyik Tansiyometre cihazı	Kılcal Toplam ?	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-1500	Saat	Lab Arazi	Bocking ve Fredlund, 1993
IC tansiyometre cihazı	Kılcal Toplam ?	Boşluk suyu gerilmesi	0-1500	Dakika	Lab Arazi	Ridley ve Burland, 1993
Alçı blok	Kılcal	Elektriksel direnç	30-30000	Hafta	Lab Arazi	Aitchison ve Richards, 1965

Tablo 3.1. (Devamı) Emme ölçümünde kullanılan yöntemler (Özocak, 2003)

Alet	Emme	Ölçülen değişken	Ölçüm aralığı (kPa)	Dengeye ulaşma süresi	Ölçüm yeri	Kaynak
Isıl iletkenlik	Kılcal	İletkenlik	0-300	Hafta	Lab Arazi	Sattler ve Fredlund, 1989
Sızma	Eriyik	İletkenlik	30-30000	Saat	Lab	Mannheim, 1966
Süzme	Eriyik	İletkenlik	30-30000	Saat	Lab	Mannheim, 1966

3.5.1.1. Filtre kağıdı

Filtre kağıdı yöntemi, zemin emmesini dolaylı olarak belirleyen ölçüm tekniğidir (Bulut ve Wray, 2005; Qian ve Lu, 2011) Yöntem doymun olmayan zeminlerin toplam emme ve kılcal gerilme değerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir laboratuvar tekniğidir. Yöntem, küçük bir filtre kağıdı parçasının örnek yüzeyiyle temaslı (kılcal gerilme) veya temasız (toplam emme) koşulda kağıt tarafından emilen su miktarının ölçülmesini içerir (Şekil 3.12.). Bu su miktarı zeminin emme değeri ile ilişkilidir.

**Şekil 3.12.** Toplam ve kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdının yerleşimi (Öntürk, 2022)

Çeşitli araştırmalar, filtre kağıdı yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini incelemiştir. Bu çalışmalarda, filtre kağıdı yöntemi kılcal gerilme ölçümleri diğer yöntemlerle karşılaştırılarak incelenmiş ve ince daneli zeminler için güvenilir ve doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur (Bulut ve Wray, 2005; Houston ve ark., 1994; Vanapalli ve ark., 2021). Filtre kağıdı yönteminin geniş bir emme aralığında kullanılabilmesi, düşük maliyetli ve basit bir yöntem olması, hem laboratuvar hem de saha ölçümlerinde makul sonuçlar vermesi nedeniyle araştırmacılar tarafından tercih edilen bir yöntemdir (Qian ve Lu, 2011).

Genellikle, filtre kağıdı yöntemi doygun olmayan zeminlerde kılcal gerilme ölçümü için yaygın olarak kullanılan pratik bir tekniktir. Ancak, yöntemin doğruluğu ve güvenilirliği kullanılan filtre kağıdının türü, zemin cinsi ve çevresel koşullar gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdı yöntemini kullanırken bu faktörleri dikkate almak önemlidir.

Filtre kağıdı yönteminde, zeminden alınan su miktarı emme değerini etkilemeyecek kadar küçük olmalıdır. Numune ile kağıt arasındaki su alışverişinin dengelenmesi sonrasında, filtre kağıdı zeminle aynı emme değerine sahip hale gelir. Filtre kağıdı ile kılcal gerilme ölçülürken numune ile temas halindeki kağıdın sıkıştırılmaması gerekmektedir. Aksi takdirde gerçek değerden 200-300 kPa daha yüksek emme değerleri ölçülebilir (Özocak, 2003). Filtre kağıdı yöneminde en yaygın kullanılan iki filtre kağıdı olan Whatman No.42 ve Schleicher ve Schuell No.589 filtre kağıtları için önerilen kalibrasyon eğrileri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri

Whatman No.42 Filtre Kağıdı		
Kaynaklar	Kalibrasyon eğrileri	
Hamblin, 1981	$\log \psi = 8,022 - 3,683 \log w_f$	
Chandler ve Gutierrez, 1986	$\log \psi = 4,84 - 0,0622 \log w_f$	$w_f < 47$
Chandler ve ark., 1992	$\log \psi = 6,05 - 2,48 \log w_f$	$w_f \geq 47$
Greacen ve ark, 1987	$\log \psi = 5,327 - 0,0779 \log w_f$	$w_f < 45.3$
ASTM, 1997	$\log \psi = 2,413 - 0,0135 \log w_f$	$w_f \geq 45.3$
Schleicher & Schuell No.589 Filtre Kağıdı		
McQueen ve Miller, 1968	$\log \psi = 5,238 - 0,0723 \log w_f$	$w_f < 54$
	$\log \psi = 1,8966 - 0,01025 \log w_f$	$w_f \geq 54$

Tablo 3.2. (Devamı) Filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri

Schleicher & Schuell No.589 Filtre Kağıdı		
Al-Khafaf ve Hanks, 1974	$\log \psi = 4,136 - 0,0337 \log w_f$	$w_f < 85$
	$\log \psi = 2,0021 - 0,009 \log w_f$	$w_f \geq 85$
McKeen, 1980	$\log \psi = 4,9 - 0,0624 \log w_f$	$w_f < 66$
McKeen, 1980	$\log \psi = 1,25 - 0,0069 \log w_f$	$w_f \geq 66$
Greacen ve ark, 1987	$\log \psi = 5,056 - 0,0688 \log w_f$	$w_f < 54$
ASTM, 1997	$\log \psi = 1,882 - 0,0102 \log w_f$	$w_f \geq 54$
Not: ψ , emme (kPa); w_f , filtre kağıdı su muhtevası (%)		

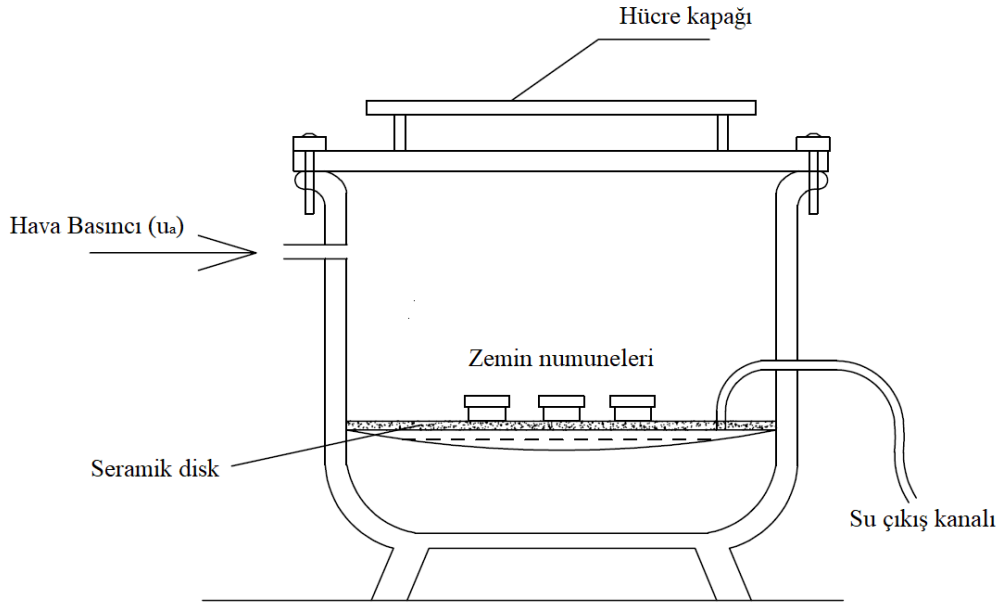
Bu yöntemde, numune yüzeyine disk şeklinde filtre kağıdı yerleştirilir ve üstten buharlaşmayı önlemek için gözeneksiz bir malzeme ile kaplanır (Şekil 3.12). Kağıt, numuneden su emer ve kılcal gerilme değeri, kağıt ile zemin arasındaki su potansiyeli farkına göre hesaplanır. Denge sonrası filtre kağıdı numuneden cımbız yardımıyla alınarak hızlıca hava geçirmez kap içerisine konur. Filtre kağıdının yaş ve kuru ağırlığı 0.0001g hassaslığındaki terazide tartılarak hesaplanan kağıt su içeriğiyle kalibrasyon eğrisinde karşılık gelen kılcal gerilme değeri bulunur. Deneyde kullanılan standarda uygun filtre kağıtları Whatman No.42 ve Schleicher & Schuell No.589 olarak belirtilmiştir. Hava almayan bir kaba konulan zemin numunesi ve filtre kağıtlarının arasındaki su akışı durana yani kararlı durum oluşana kadar en az 7 gün beklenmesinin gerekli olduğu belirtilmiştir (ASTM D5298-94, 2000). Bazı çalışmalarda ise ince daneli numuneler için 7 günlük bekleme süresinin kararlı duruma ulaşmada yeterli olmadığı, bekleme süresinin en az 14 gün olması gerektiği belirtilmiştir (Kocaman, 2018; Leong ve ark., 2002).

3.5.1.2. Basınç plakası

Basınç plakası, doymun olmayan zeminlerin için SWC eğrilerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. İlk olarak (Richards, 1928), tarafından tanıtılan yöntem araştırmacılar tarafından değiştirilerek geliştirilmiştir. Yöntemin temel prensibi, gözenekli bir seramik plaka üzerindeki numuneye farklı hava basınçları uygulayarak numunenin farklı kılcal gerilme değerlerindeki su içeriğini ölçmektir.

Basınç plakası aparatı, yüksek hava girişli seramik disk monte edilmiş dairesel bir metal plakadan oluşur. Kullanılan seramik plakanın hava giriş değerine bağlı olarak basınç plakası ile ince daneli zeminlerde 0-1500 kPa, iri daneli zeminler için ise 0-500 kPa aralığında kılcal emme değerleri ölçülebilir (Vanapalli ve ark., 2021).

İlk kez (Hilf, 1956)'in önerdiği eksen kaydırma tekniğine göre doymun durumda olan numunelerin kuruma eğrisi basınç plakası kullanılarak elde edilebilir (Şekil 3.13). Önceden doymun hale getirilmiş seramik plakanın üzerine 50-75 mm çapında ve 20 mm yüksekliğe sahip doymun durumdaki numuneler yerleştirilir ve hücreye kademeli artış oranlarında hava basıncı uygulanır (u_a). Herbir artış kademesinde meydana gelen hidrolik eğim ile numuneden seramiğe su geçisi başlar ve denge durumu oluşuncaya kadar beklenir. Denge durumundaki su muhtevası oluşturulmuş kılcal gerilmedeki su muhtevasını göstermektedir. İri daneli zeminler denge durumune 1-2 gün sürede ulaşırken ince daneli zeminler 3-7 gün aralığında ulaşırlar (Kocaman, 2018; Vanapalli ve ark., 2021).



Şekil 3.13. Basınç plakası şematik gösterimi (Öntürk, 2022)

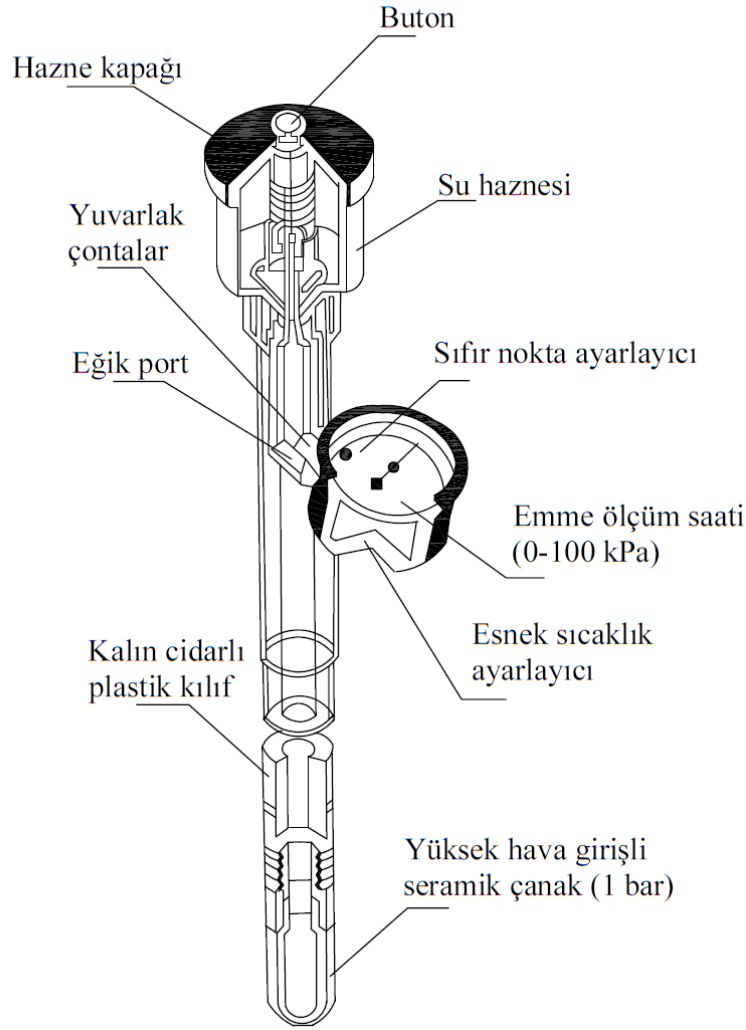
Basınç plakası aparatına konulan numunelerin seramik plakaya tam temas etmemesi veya hücreye uygulanan hava basıncı sonucu deney öncesinde veya esnasında numunelerin deforme olması durumlarında alınan sonuçların yanıltıcı olduğu belirtilmiştir (Bittelli ve Flury, 2009). Basınç plakasına benzeyen basınç membranı aparatı ile daha yüksek emme değerlerine ulaşmak mümkündür.

3.5.1.3. Tansiyometreler

Tansiyometre zeminin negatif boşluk suyu basıncını ölçer (Fredlund ve ark., 2012). Tansiyometre, bir tüp kanal vasıtasıyla bir basınç ölçüm cihazına bağlanan yüksek hava girişli, gözenekli bir seramik uçtan oluşur (Şekil 3.14). Seramik uç ile basınç ölçüm arasındaki kanal düşük ısı iletkenliği özelliğine sahip malzemeden imal edilir. Tüp ve ölçüm cihazının bağlandığı hazne, su ile doldurulur. Tansiyometre haznesindeki suyun zemin içerisindeki boşluk suyunun gerilmesine (kılcal gerilme) eşit oluncaya kadar seramik uçtan geçişine izin vererek çalışır. Bu sayede haznedeki negatif boşluk suyu başıncı zemin kılcal gerilmesine eşittir.

Hem laboratuvar hemde arazide zemin içerisinde önceden oluşturulmuş deliğe tansiyometrenin seramik ucu yerleştirilir. Ölçümlerin doğruluğu için yüksek hava girişli seramik ile zemin arasında iyi bir temas sağlanmalıdır. Ayrıca temas alanındaki zemin daneleri çok büyük boyutta olmalıdır. Aksi halde seramik ile zemin arasında yetersiz temas hatalı ölçümlere neden olabilir (Fredlund ve ark., 2012).

Tansiyometre ile ölçülen kılcal gerilme değeri, seramiğin hava giriş değerini aşmamalıdır. Zemin emmesinin ozmotik bileşeni, tansiyometre ile ölçülmez, çünkü çözünür tuzlar gözenekli kaptan serbestçe hareket edebilir. Tansiyometrede ölçülebilen gözenek-su basıncı, tansiyometrede suyun kaynama (kavitasyon) olasılığı nedeniyle yaklaşık negatif 90 kPa ile sınırlıdır. Bu nedenle tansiyometre verimini artırmak için kaynama oluşumunu sınırlamak önemlidir. Tansiyometre tasarımlarında, basınç ölçerin konumu ve yeri, su haznesinin hacimi, kullanılan malzeme ve seramik çanağın boşluk çapı (hava giriş değeri) gibi özellikler kavitasyon oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerdir (Fredlund ve ark., 2012; Özocak, 2003).



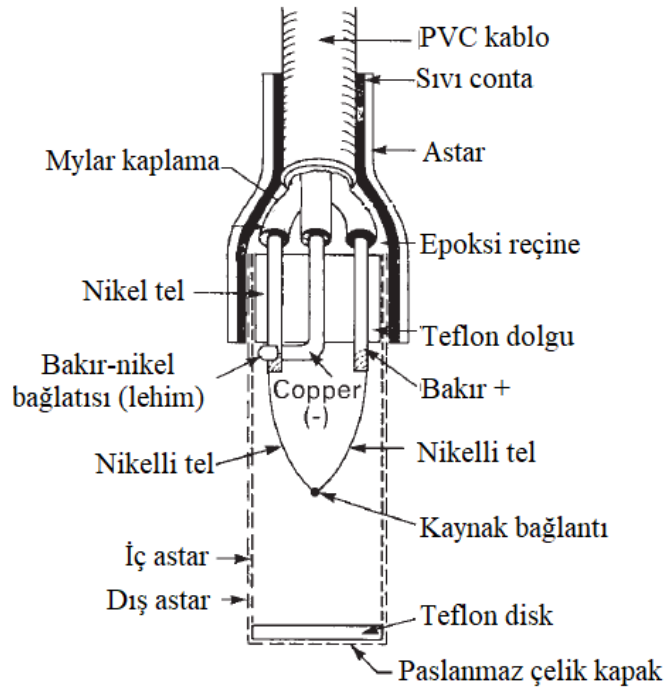
Şekil 3.14. Soilmoisture tarafından üretilmiş tansiyometre

3.5.1.4. Psikrometreler

Psikrometreler, bir malzeme ile temas halindeki havanın su buharı içeriğini veya nemini ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Doygun olmayan zemin mekaniğinde, psikrometreler, boşluk suyunun serbest enerjisi (yani toplam emme) ölçmek için kullanılır. Psikrometreler, toprakla temas halindeki havanın nemini ölçmek için buharlaşmanın soğutma ilkesine dayanır.

Termistör/transistör psikrometre ve termokupl psikrometreler yaygın olarak kullanılan iki farklı prensiple çalışan psikrometrelerdir. Termistör/transistör psikrometre, iki sensör arasındaki sıcaklık okumalarındaki farkı, havanın buhar basıncını ve dolayısıyla toplam emmeyi hesaplamak için kullanır. Termistör/transistör psikrometreler 100-7500 kPa aralığında ölçüm yapabilirler.

Termokupl psikrometrenin çalışma prensibi, iki farklı iletkenin birleşiminden bir elektrik akımı geçtiğinde ısı enerjisinin transferini dayanır. Termokupl psikrometrede termokuplun bir bağlantı noktası buharlaşma etkisiyle soğutulurken diğer bağlantı noktası ölçülecek havaya maruz bırakılır. Havadan gelen nem, soğutulmuş bağlantıda yoğunlaşarak sıcaklığını düşürür ve termokupl boyunca bir voltaj farkı oluşturur. Bu voltaj farkı, havanın bağıl nemini hesaplamak için kullanılabilen iki bağlantı noktası arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır. Termokupl psikrometresi, suyun buharlaşma hızının çevredeki havanın bağıl nemine bağlı olduğu gerçeğine dayanır. Hava kurduğunda, su fitilden daha hızlı buharlaşarak termokupl üzerinde daha büyük bir soğutma etkisine neden olur. Tersine, hava nemli olduğunda buharlaşma hızı yavaşlayarak termokuplun daha az soğumasına neden olur. İki termokupl arasındaki sıcaklık farkı ölçülerek havanın bağıl nemi belirlenebilir. Termokupl psikrometreler 100-71500 kPa aralığında ölçüm yapabilirler (Fredlund ve ark., 2012).



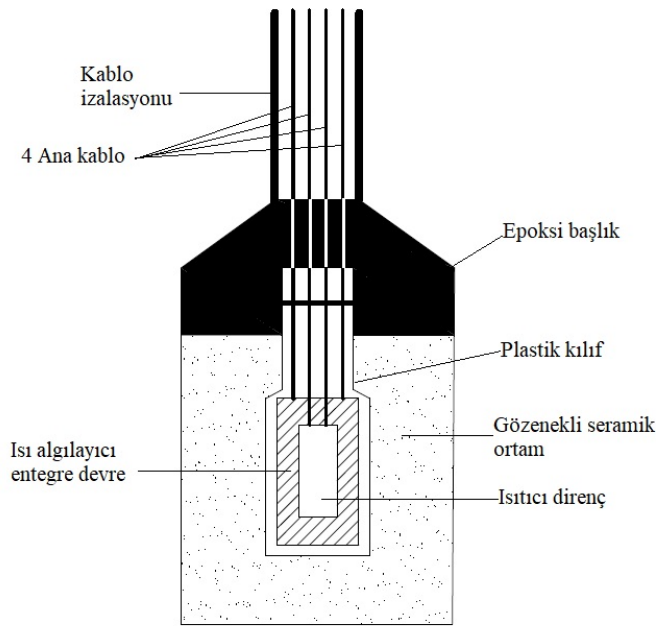
Şekil 3.15. Peltier termokupl psikrometre (Fredlund ve ark., 2012)

3.5.1.5. Isıl iletkenlik sensörü

Isıl iletkenlik sensörü, sıcaklık algılama elemanı ve minyatür ısıtıcı içeren gözenekli bir seramik bloktan oluşur (Şekil 3.16). Gözenekli seramik bloğun termal iletkenliği,

bloğun su içeriğine göre değişir. Gözenekli seramik bloğun su içeriği, seramik bloğu çevreleyen zeminden uygulanan kılcal gerilme değerlerine bağlıdır.

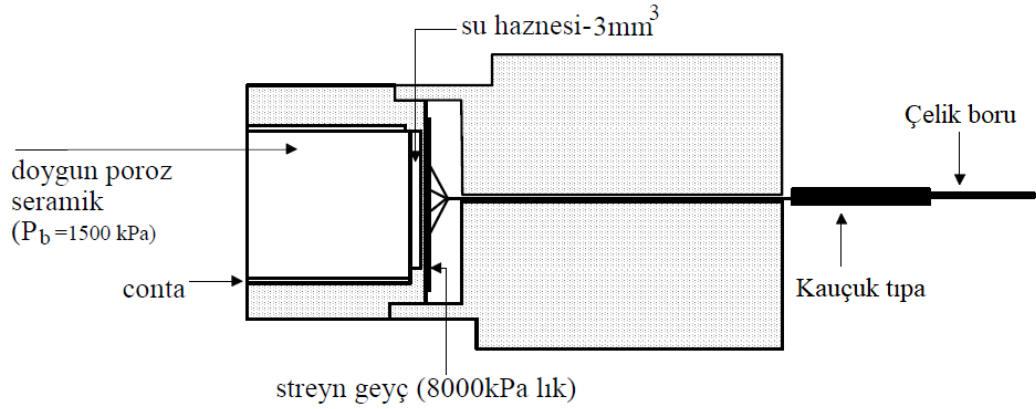
Gözenekli bloğun termal iletkenliği, laboratuvarında farklı kılcal gerilme değerlerine karşı kalibre edilmeden önce kullanılmamalıdır. Kalibre edilmiş bir sensör daha sonra zemine yerleştirilerek, kılcal gerilme değerinin denge hale gelmesi beklenir ve denge durumu zeminin kılcal gerilme değerini verir (Fredlund ve ark., 2012; Özocak, 2003).



Şekil 3.16. AGWA-II ısı iletkenlik sensörünün kesit görünümü (Fredlund ve ark., 2012)

3.5.1.6. Emme sondası

Emme sondası, 0 ila 1500 kPa'lık yüksek emiş aralığında kılcal gerilmeyi ölçmek için kullanılan bir tür tansiyometredir (Guan ve Fredlund, 1997; Ridley, 1993). Alt kısmı açık silindirik paslanmaz çelik bir hücreden ve alt kısmına yerleştirilmiş gözenekli bir seramik diskten oluşur. Seramik hücre damıtılmış su ile doldurulur ve ortasında küçük bir delik bulunan kauçuk bir tıpa ile tepeden kapatılır. Delikten geçen paslanmaz çelik bir boru sokulur. Paslanmaz çelik borudan emiş uygulamak için bir vakum pompası kullanılır ve basınç dönüştürücü, ortaya çıkan negatif basıncı ölçer (Şekil 3.17.).



Şekil 3.17. Emme sondası şematik gösterimi (Özocak, 2003)

3.6. SWC Eğrileri İçin Denklemler

SWC eğrilerinin laboratuvar verilerine en iyi şekilde uyması için, kapalı formda çok sayıda ampirik denklem önerilmiştir. Araştırma literatüründe görünen bazı denklemlerin bir listesi Tablo 3.3' de gösterilmektedir (Fredlund ve ark., 2012). Bu denklemler iki parametrelili SWC eğri denklemleri ve üç parametrelili SWC eğri denklemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu denklemlerin her biri, en küçük kareler regresyon analizi kullanılarak laboratuvar verilerine uydurulmuştur (Fredlund ve ark., 2012; Fredlund ve Xing, 1994) .

Her bir SWC eğri denklemleri, denklemlerin hacimsel su içeriği veya doygunluk derecesi açısından da yazılabileceği gerçeği gibi gravimetrik su içeriği cinsinden de yazılabilir. Literatürde bazı denklemler boyutsuz su içeriği θ_d cinsinden, diğerleri ise normalleştirilmiş su içeriği θ_n cinsinden yazılmıştır. Doygun gravimetrik su içeriği w_s olarak ve gravimetrik artık su içeriği w_r olarak belirtilir.

Tablo 3.3' de gösterilen SWC eğri denklemlerinin her biri, zeminin hava giriş değeri ile bir ilişkisi olan bir değişkene ve zeminin doygunluktan ayrılma hızıyla ilişkili ikinci bir değişkene sahiptir. Bazı denklemler için üçüncü bir değişken kullanılır ve hava giriş değerine yakın düşük emme aralığının, koşullara yakın yüksek emme aralığındaki SWC eğrilerinin şeklinden bağımsız bir şekle sahip olmasını sağlar. SWC eğrilerinde üç parametrenin kullanılması, uygun analiz için daha fazla esneklik sağlar. Üç parametrelili denklemlerin birbirinden tamamen bağımsız parametrelerdir.

SWC eğri denklemlerinin her biri ya kuruma ya da ıslanma davranışına uygun olabilir (Fredlund ve Xing, 1994; Van Genuchten, 1980; Vanapalli ve ark., 1996).

Laboratuvar çalışmaları, zeminlerin SWC eğrileri ile doymun olmayan zemin özellikleri arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Örneğin, doymun olmayan zeminin geçirimliliği, SWC eğrileri ile bir ilişki göstermektedir. Fredlund ve ark. (1994) DOZ geçirimlilik katsayısını SWC eğrileri kullanarak ampirik olarak tahmin etmek için Deklem 3.16'yı önermişlerdir.

$$k_{(u_a-u_w)} = k_s \left[\frac{\left\{ \int_{\ln(u_a-u_w)}^b \frac{\theta(e^{\ln(u_a-u_w)}) - \theta(u_a-u_w)}{e^{\ln(u_a-u_w)}} \frac{d\theta}{d \ln(u_a-u_w)} (e^{\ln(u_a-u_w)}) d(\ln(u_a-u_w)) \right\}}{\left\{ \int_{\ln(u_a-u_w)_{P_b}}^b \frac{\theta(e^{\ln(u_a-u_w)}) - \theta_s}{e^{\ln(u_a-u_w)}} \frac{d\theta}{d \ln(u_a-u_w)} (e^{\ln(u_a-u_w)}) d(\ln(u_a-u_w)) \right\}} \right] \quad (3.16)$$

Burada, k_s , doymun haldeki geçirimlilik katsayısı; $b = \ln(10^6)$; $\ln(u_a-u_w)_{P_b}$, AEV hava giriş değeridir.

Tablo 3.3. SWC eğrileri oluşturmakta kullanılan denklemler

Kaynak	Denklem	Tanım
Gardner (1950)	$\Theta_d = \frac{1}{1 + \alpha_g \psi^{n_g}}$ burada $\Theta_d = \frac{w(\psi)}{w_s}$	α_g = AEV uydurma parametresi n_g = AEV aşıldığında zeminde su çekme oranının bir fonksiyonu olan uydurma parametresi
Brooks ve Corey (1964)	$\psi \leq \psi_{aev}$ için $w(\psi) = w_s$ yada $\Theta_n = 1$ $\Theta_n = \left[\frac{\psi}{\psi_{aev}} \right]^{-\lambda_{bc}}$ $\psi > \psi_{aev}$ burada $\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$	ψ_{aev} = AEV λ_{bc} = Boşluk boyutu dağılım indeksi w_r = Kalıcı sü içeriği

Tablo 3.3. (Devamı) SWC eğrileri oluşturmakta kullanılan denklemler

Kaynak	Denklem	Tanım
Brutsaert (1967)	$\Theta_n = \frac{1}{1 + [\psi/a_b]^{n_b}}$	α_b = AEV uydurma parametresi
	burada	n_b = AEV aşıldığında zeminde su çekme oranının bir fonksiyonu olan uydurma parametresi
	$\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$	
Laliberte (1969)	$\Theta_n = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[a_l - \frac{b_l}{c_l + (\psi/\psi_{aev})} \right]$	a_l, b_l, c_l = Boşluk boyutu dağılım indeksi λ 'nın benzersiz fonksiyonları
	burada	olduğu varsayılan parametreler
	$\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$	
Campbell (1974)	$\psi < \psi_{aev} \text{ için } w = w_s \left[\frac{\psi}{\psi_{aev}} \right]^{-1/b_c}$	ψ_{aev} = AEV
	$w = w_s \left[\frac{\psi}{\psi_{aev}} \right]^{-1/b_c} \quad \psi \geq \psi_{aev}$	b_c = Uydurma parametresi
van Genuchten (1980)	$\Theta_n = \frac{1}{[1 + (a_{vg}\psi)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}}$	a_{vg}, a_{vm}, a_{vn} = AEV tersiyle ilgili uydurma parametreleri
	burada	n_{vg}, n_{vm}, n_{vn} = AEV aşıldığında su sızma hızıyla ilgili olan uydurma parametreleri
	$\Theta_n = \frac{1}{[1 + (a_{vm}\psi)^{n_{vm}}]^{m_{vm}}}$	
van Genuchten (1980) –	burada	m_{vg}, m_{vm}, m_{vn} = Kalıcı su içeriği koşullarıyla ilgili uydurma parametreleri
Muallem (1976)	$m_{vm} = 1 - \frac{1}{n_{vm}}$	
van Genuchten (1980) –	$\Theta_n = \frac{1}{[1 + (a_{vm}\psi)^{n_{vm}}]^{m_{vm}}}$	
	burada	
Burdine (1953)	$m_{vb} = 1 - \frac{2}{n_{vb}}$	

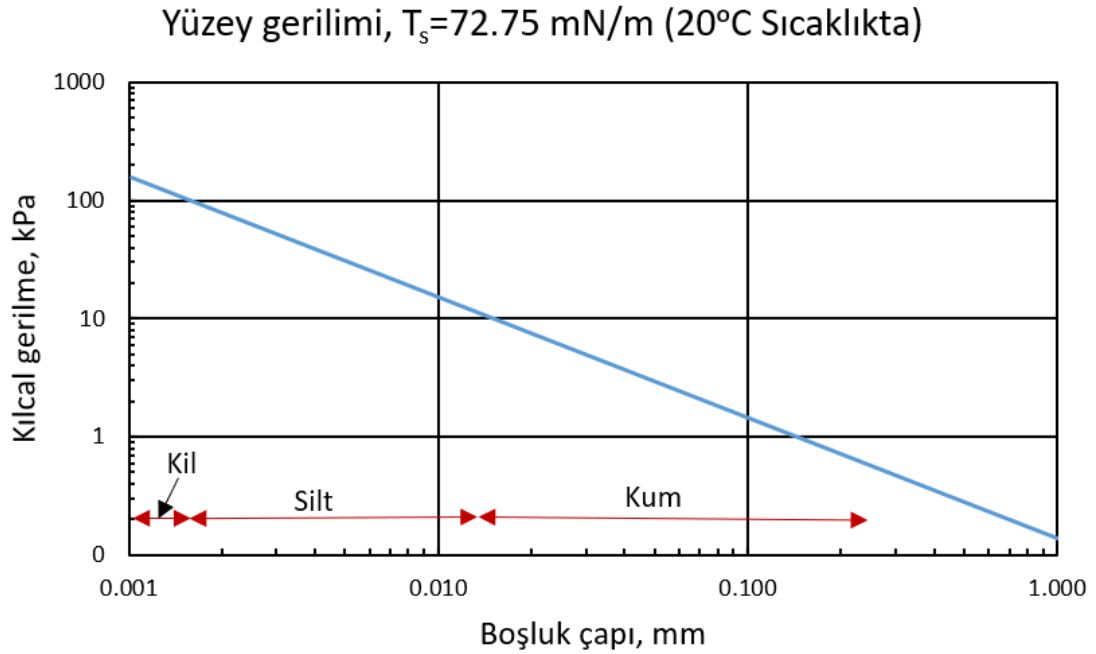
Tablo 3.3. (Devamı) SWC eğrileri oluşturmakta kullanılan denklemler

Kaynak	Denklem	Tanım
McKee and Bumb (1984)	$\Theta_n = \exp \left[\frac{a_{m1} - \psi}{n_{m1}} \right]$	a_{m1} = Eğri uydurma parametresi n_{m1} = Eğri uydurma parametresi
(Boltzmann dağılımı)	burada $\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$	
McKee and Bumb (1987)	$\Theta_n = \frac{1}{1 + \exp[(\psi - a_{m2})/n_{m2}]}$	a_{m2} = Eğri uydurma parametresi n_{m2} = Eğri uydurma parametresi
(Fermi dağılımı)	burada $\Theta_n = \frac{w(\psi) - w_r}{w_s - w_r}$	
Fredlund and Xing (1994)	$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln[e + (\psi/a_f)^{n_f}]\}^{m_f}}$ burada $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (10^6/\psi_r)]}$ $\Theta_d = \frac{w(\psi)}{w_s}$	a_f = AEV uydurma parametresi n_f = AEV aşıldığında zeminde su çekme oranının bir fonksiyonu olan uydurma parametresi m_f = Kalıcı su içeriğinin bir fonksiyonu olan uydurma parametresi $C(\psi)$ = Kalıcı su içeriğine karşılık gelen emmenin bir fonksiyonu olan düzeltme faktörü
Pereira ve Fredlund (2000)	$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + [\psi/a_p]^{n_p}]^{m_p}}$	a_p = AEV uydurma parametresi n_p = AEV aşıldığında zeminde su çekme oranının bir fonksiyonu olan uydurma parametresi m_p = Kalıcı su içeriğine karşılık gelen emmenin bir fonksiyonu olan düzeltme faktörü

3.7. Boşluk Boyutu Emme İlişkileri

SWC eğrisi, zemin örneğinin suyu tutma kapasitesini ve drenaj özelliklerini gösteren bir eğridir. SWC eğrileri, zeminin su tutma kapasitesi ve su boşaltılma hızı arasındaki ilişkiyi gösterir (Fredlund ve ark., 2012; Likos ve Lu, 2004).

Boşluk boyutu ise, zeminin porozitesi ve zeminde boşluklu hacim miktarı ile ilgilidir. Zeminde büyük boşluklar, hava depolama kapasitesini artırırken, su tutma kapasitesini azaltır. Küçük boşluklar ise su tutma kapasitesini artırırken, hava depolama kapasitesini azaltır (Kocaman, 2018). Zemin boşluk yarıçapının küçük olması daha yüksek kılcal gerilme değerine sahip olduğunu gösterir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Farklı zeminlerde kılcal gerilme gözenek boyutuyla ilişkisi (Fredlund ve ark., 2012)

SWC eğrisi, zemin profilinde belirli bir konumdaki suyun hacimsel su içeriği ile potansiyel enerjisi arasındaki ilişkiyi temsil eder. SWC eğrileri ve boşluk boyutu arasındaki ilişki, zemin suyu hareketini ve zemin nem içeriğini belirleyen önemli bir faktördür. Zeminde su tutma kapasitesi ve drenaj özellikleri, boşluk boyutu ile doğrudan ilişkilidir. Boşluk boyutu arttıkça, suyun infiltrasyonu veya drenajı hızlanır. SWC eğrileri, zemindeki boşluk boyutu dağılımının belirlenmesinde ve zeminde suyun hareketi ve tutulması üzerindeki etkisinin anlaşılmasında önemli bir araçtır.



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışma kapsamında kullanılan silt numunenin özellikleri ve doymun olmayan zeminler üzerine oturan temellerin taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla kullanılan laboratuvar deney programı detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Araştırma, farklı boşluk oranları ve doymunluk derecelerinin silt zemin üzerindeki temelin taşıma kapasitesine etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Laboratuvar deney programı dört aşamadan oluşmaktadır.

İlk aşamada, deneylerde kullanılacak zemin numuneleri hazırlanmış ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, belirlenen boşluk oranlarında numuneler oluşturulmuş ve basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak kılcal gerilme değerlerine karşı su muhtevası/doymunluk derecesi değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak zemin-su karakteristik eğrileri/su tutma eğrileri (SWCC) oluşturulmuştur. Üçüncü aşamada, farklı boşluk oranlarına sahip zeminlerin kayma direnci parametreleri, modifiye edilmiş kesme kutusu deney cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Son aşamada, farklı boyutlara ve alanlara sahip model temeller kullanılarak model temel yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, silt zemin üzerine oturan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini belirlemek için farklı temel tipleri, farklı boşluk oranı ve doymunluk derecesi/kılcal gerilme değerleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların, doymun olmayan ince daneli zemin tabakalarına oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü değerlerinin gerçeğe yakın bir şekilde belirlenmesine katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

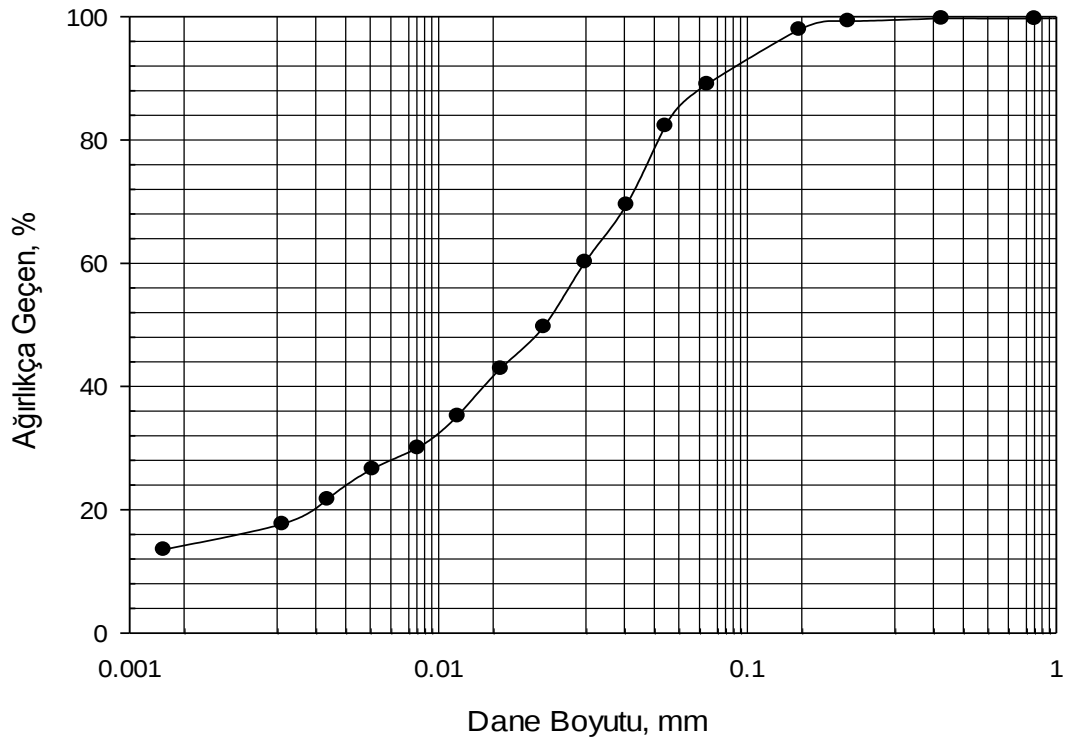
4.1. Zemin Özellikleri

Zemin numunesi, Sakarya ili, Adapazarı ilçesi Yenigün Mahallesi'nde yüzeyden 3-4 metre derinlikten alınmıştır. 500 kg üzeri zemin numunesi alındıktan sonra içerisindeki organik maddeler temizlenmiş ve ardından hava kurumaya bırakılmak üzere uygun bir yüzeye serilmiştir. Hava kurusu haline gelen numuneler homejenliğin sağlanması için karıştırılmış ve var olan topaklaşmalar ufalanmıştır.

Zemin numunesi en büyük dane ϕ apının geçebildiği no.40 elekten elenmiştir. Hava kurusu halinde elenmiş zemin numunesinin kalıcı su mutevasının %3,5 ile %3,75 arasında değiştiği grlmştir. Hava kurusu zemin numunesi laboratuvar ortamında muhafaza edilmiştir.

4.1.1. Kıvam zelliklerinin belirlenmesi

Doygun olmayan zeminlere inşa edilen yüzeysel temellerin taşıma kapasitesinin incelemesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda Adapazarı kentinden alınmiş zemin numunesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme düşük oranda kil içeren siltli zemindir. Zemin numunesinin dane dağılım eğrisi TS 1900-1/2006'ya göre elek analizi ve hidrometre yöntemi ile elde edilmiştir (şekil 4.1.). Zemin numunesi TS 1500/2000'e göre MI (orta plastisiteli silt) olarak sınıflandırılmıştır. Numunenin kıvam zellikleri Tablo 4.1' de sunulmuştur.



şekil 4.1. Zemin numunesi dane boyutu dağılım eğrisi

Tablo 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kıvam özellikleri

Özellik	Değer	Simge ve Birim
No 200#	89	FC (%)
Likit limit	35	LL (%)
Plastik limit	25	PL (%)
Plastisite indisi	11	IP (%)
Özgül ağırlık	2,692	G _s
Kil oranı	17	C (%)
Silt oranı	72	M (%)
Kum oranı	11	S (%)
Zemin Sınıfı: Orta Plastisiteli Silt (MI)		

Bu çalışmada kullanılan siltin mineralojik bileşimi, X-ışını kırınım analizi ile belirlenmiş ve Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Zemindeki birincil çimentolayıcı maddeler olan kalsiyum oksit ve magnezyum oksit gibi elementlerin, silt zeminlerde önemli miktarlarda bulunmaktadır (Kruse ve ark., 2007; Ltifi ve ark., 2014). Bununla birlikte, literatürdeki çalışmalar, yeniden oluşturulmuş numunelerde bozulan çimento bağlarının yeniden oluşmadığını göstermiştir (Kruse ve ark., 2007). Yerinde veya örselenmemiş malzemeler üzerinde yapılan deneylerle karşılaştırıldığında, yeniden oluşturulmuş numunelerin kohezyonu daha düşük olup araştırmalar, kayma direnci açısının kohezyon değerinden daha az etkilendiğini göstermektedir (Wen ve Yan, 2014).

Tablo 4.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin mineralojik özellikleri

Sembol	Element	Değer (%)
SiO_2	Slisyum Dioksit	40,94
Al_2O_3	Alüminyum Oksit	11,09
Fe_2O_3	Demir Oksit	5,36
MgO	Magnezyum Oksit	4,48
CaO	Kalsiyum Oksit	15,58
K_2O	Potasyum Oksit	1,72
Na_2O	Sodyum Oksit	2,09

Tablo 4.2. (Devamı) Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunenin mineralojik özellikleri

Sembol	Element	Değer (%)
TiO_2	Titanyum Dioksit	0,82
-	Diğer	17,92

4.1.2. Numunelerin hazırlanması

Doygun olmayan zeminlere oturan sığ temellerin taşıma kapasitesinin araştırıldığı bu çalışmada, Adapazarı'ndan alınan silt numunesinin temel geoteknik özellikleri belirlenmiş ve hazırlanacak numunelerin boşluk oranı değerleri seçilmiştir. Adapazarı kentinde yer alan doğal siltlerin doğal boşluk oranı değerleri incelenerek (Önalp ve ark., 2007) deneylerde kullanılacak numunelerin boşluk oranı değerlerinin 0.65, 0.70, 0.75 olması kararlaştırılmıştır. Doygunluk derecelerinin seçiminde ise Adapazarı kentinin mevsimsel yeraltı su seviye değişimi göz önünde bulundurularak %65, %70, %75 ve %85 olmasına karar verilmiştir

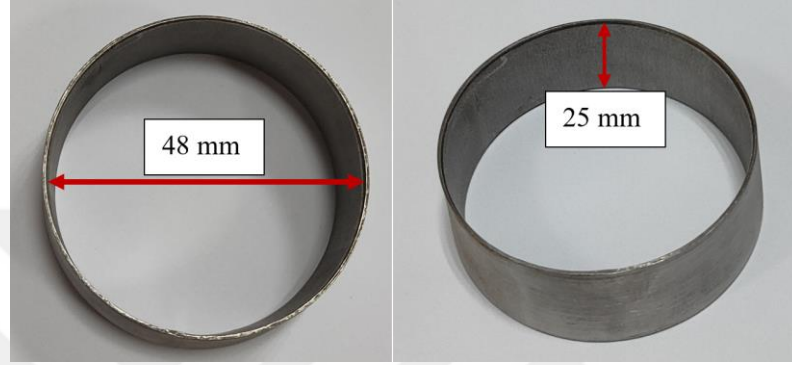
Homojen halde hava kurusu hale getirilmiş zemin numunesi tabi tutulacağı deneyler için farklı ekipmanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Oluşturulan numuneler SWCC deneyleri, kesme kutusu deneyleri ve model deneyleri için olmak üzere üç grupta açıklanmıştır.

4.1.2.1. SWCC numunelerinin hazırlanması

Elenmiş hava kurusu zemin gereci 2 kg lık gruplar halinde istenilen doymunluk derecesine kadar deiyonize ve havası alınmış su püskürtülerek ıslatılmış ve numune hazırlama mikseri yardımıyla karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar hava geçirmez kaplara konularak kürlenmesi için oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Standart 24 saatlik kür süresi tamamlandıktan sonra, su içeriğini kontrol etmek için her bir hava geçirmez kabın farklı yerlerinden üç farklı numune alınmıştır. Etüv ve mikrodalga yöntemiyle kontrol edilen karışımların su içeriklerinin $\pm$ %0,5 hata içinde kaldığı doğrulanmıştır.

Basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemi için hazırlanan zemin, önceden belirlenmiş boşluk oranlarında ($e_1=0,65$, $e_2 = 0,70$ ve $e_3 = 0,75$) hacmi belli metal kap içerisine 3 aşamada statik olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma su muhtevaları doğal doymunluk

seviyesi olan % 70 doygunluk seviyesine göre belirlenmiştir. Sıkıştırılan zeminden 50 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde metal kalıplarla numuneler alınmıştır (Şekil 4.2). Numuneler, deiyonize edilmiş ve havası alınmış su içinde doygunluk seviyesine ulaşması için 7 gün boyunca bekletilmiştir. Numunelerin şişmesini önlemek amacıyla, doygunluk aşamasında üzerlerine filtre kağıdı ve gözenekli taşlar yerleştirilerek sabitlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Numune alma halkaları

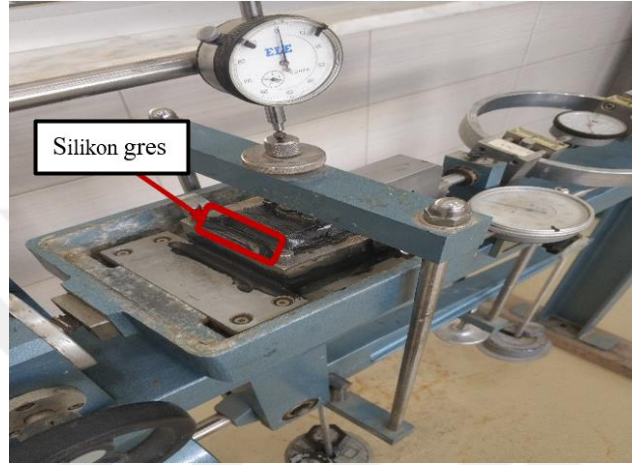


Şekil 4.3. SWC numunelerini alma ve doyurma prosedürü

4.1.2.2. Kesme kutusu deney numunelerinin hazırlanması

Kesme kutusu deneyinde kullanılan zeminler, SWCC deneyi için hazırlanan zemin numunelerine aynı prosedür uygulanarak bir gün öncesinden 2 kg'lık gruplar halinde hazırlanmıştır. Araştırma senaryosuna göre belirlenen su içeriklerinde hazırlanan ve kürlenmiş numuneler, 60 mm x 60 mm x 25 mm boyutlarındaki kesme kutusu deney hücresine tek aşamada statik olarak sıkıştırılmıştır.

Deney süresince numunenin su içeriğinin değişmemesi için kesme hücresinde alt ve üst kısımlarda bulunan poroz taş ve delikli paslanmaz metallerin yerine aynı kalınlıkta paslanmaz çelik plakalar yerleştirilmiştir. Ayrıca, deney hücresinin dışına kalın silikon gres tabakası sürülerek numunenin hava ile teması kesilmiştir. Tüm deneyler laboratuvar ortamı, 24 °C' de sabitlenen normal oda sıcaklığında tutulmuştur (Şekil 4.4).



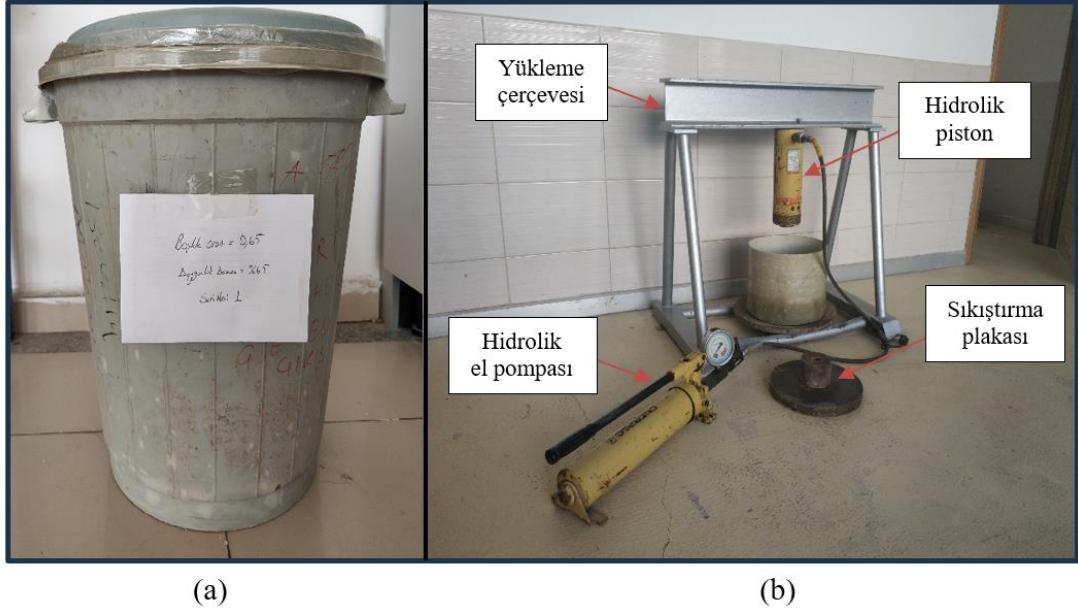
Şekil 4.4. Kesme kutusu deney kurulumu

4.1.2.3. Model deney numunelerinin hazırlanması

Model deney çalışması için gerekli zemin numuneleri de SWCC ve kesme kutusu deney numuneleri için kullanılan aynı prosedürle hazırlanmıştır. Her bir senaryo için yani 3 farklı boşluk oranı, 5 farklı doygunluk derecesi ve 4 farklı model temel için gerekli numune bu işlem ile oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler homojen bir zemin-su karışımı elde etmek için hava geçirmez kaplarda oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır (Şekil 4.5-a).

Standart 24 saatlik kürlenme süresi tamamlandıktan sonra, su içeriğini kontrol etmek amacıyla farklı bölgelerinden üç farklı numune alınmış ve tüm kaplardaki karışımların su içeriğinin $\pm 0.5\%$ buharlaşma/nem değişikliği hata payı içinde kaldığı doğrulanmıştır. Su içeriği kontrol edilen numuneler, yer çekimi etkisinden kaynaklanan süzülme olasılığını önlemek için hızlı bir şekilde karıştırıldıktan sonra model tankına yerleştirilmiştir.

Ağırlık/hacim hesaplamaları ile istenilen boşluk oranı ve doygunluk derecesine sahip numuneler, iki katmanlı olarak model tankına statik olarak sıkıştırılarak oluşturulmuştur. Sıkıştırma işlemi, 30 ton kapasiteli hidrolik el pompasıyla yüklenmiş sıkıştırma çerçevesi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5-b). Katmanlar arasında oluşabilecek tabakalaşmayı engellemek için yüzey taraklaması yapılmıştır.



Şekil 4.5. Model deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan ekipmanlar.

4.2. Kılcal Gerilme Ölçümü ve SWC Eğrilerinin Oluşturulması

Zemin su içeriği/doygunluk derecesi ile kılcal gerilme arasındaki ilişki (SWCC), doymun olmayan zeminlerin davranışının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, hazırlanan numunelerin SWC eğrileri oluşturulurken emme ölçümü için filtre kağıdı yöntemi ve basınç plakası yöntemleri kullanılmıştır.

4.2.1. Filtre kağıdı yöntemi

1930'larda önerilen filtre kağıdı yöntemi, ekonomik olmasına rağmen emme ölçümü için oldukça yavaş bir yöntemdir (Fredlund ve ark., 2012; Gardner, 1937). Bu yöntemle, toplam ve kılcal gerilme ölçümleri 30 MPa'ya kadar yapılabilir. Kılcal gerilme-su içeriği ilişkisini belirlemek için kalibrasyon eğrisi bilinen Whatman No.42 filtre kağıtları kullanılmıştır. Bu yöntemde kullanılacak filtre

kağıtları, 24 saat boyunca 105 °C'deki bir etüvde kurutulmuştur. Kurutulmuş kağıtlar normal oda koşullarında soğutulmuş ve zemin numunesinin alt ve üst yüzeylerine, ortadaki diğerlerinden biraz daha küçük çapa sahip 3 filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Kağıtların numune yüzeyiyle tam temasını sağlamak için alt ve üst kısımlara saydam diskler yerleştirilmiş ve ardından streç film kullanılarak hava ile teması kesilmiştir. Numunenin ısı dengesi etkilememek için birkaç kat alüminyum folyoya sarılmıştır. Deney aşaması boyunca numunelerin ısı yalıtımlı bir kutu içinde dengeye gelmesi beklenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Filtre kağıdı yöntemi deney aşamaları

Numunelerin, 9 günlük beklemenin ardından denge durumundaki su içeriğini belirlemek için ağırlıkları ölçülmüştür. Numuneden ayrılan ortadaki filtre kağıtları, el teması olmadan metal maşa kullanılarak alüminyum hava geçirmez bir kap içine alınmış ve hızlıca 0.0001 gr hassasiyetindeki teraziyle tara+ıslak kağıt ağırlığı ölçülmüştür (Şekil 4.7). 105 °C' deki etüvde kurutulmuş filtre kağıdı+tara ağırlığı 0.0001 gr hassasiyetindeki teraziyle tekrar ölçülmüştür. Sıcak ve soğumuş durumdaki tara ağırlık değişimi de hesaba katılmıştır. Hesaplanan kağıt su içeriğinden, kalibrasyon eğrisindeki ilgili emme değerine ulaşarak numunenin zemin-su karakteristik eğrisi oluşturulmuştur. Filtre kağıdı deneyleri, ASTM D5298-92 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. SWCC deneylerinde kullanılan terazi ve alüminyum kaplar

Numune ve filtre kağıdı ölçümleri yapıldıktan sonra bir sonraki aşamada numuneye farklı emme değeri kazandırmak için numuneler laboratuvar ortamında belirli süre bekletilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Ölçümleri yapılan numunelerin bir sonraki aşama su muhtevası için bekletilmesi

Yukarıda anlatılan prosedür numunenin kalıcı su içeriğine ulaşınca kadar sürdürülmüştür. Deney aşamalarının sonunda numune etüvde 24 saat 105 °C kurutulmuş ve kuru ağırlığı belirlenmiştir.

Tablo 4.3. Filtre kağıdı deney takip föyü

Numune no	1						
Numune boşluk oranı	0,65						
Aşama no	1	2	3	4	5	6	7
Halka + numune (alt) (deney başı) (gr)	106,325	104,7301	103,2491	102,2739	101,0365	100,0549	98,6545
Okuma tarihi	30.04.2021	7.05.2021	13.05.2021	20.05.2021	28.05.2021	4.06.2021	15.06.2021
Halka + numune (alt) (deney sonu) (gr)	104,9818	103,645	102,6054	101,3733	100,5194	99,3898	98,2132
Kaptaki nem kaybı (gr)	1,3432	1,0851	0,6437	0,9006	0,5171	0,6651	0,4413
Numune aşama su muhtevası	0,2224	0,1996	0,1818	0,1608	0,1462	0,1269	0,1068
Kap(soğuk) (gr) - T _c	29,3545	29,3448	29,3536	29,354	29,3539	29,355	29,3543
Filtre Kağ.(ıslak) + kap (soğuk) (gr) - M _i	29,7154	29,6253	29,618	29,5839	29,5842	29,574	29,5663
Filtre Kağ.(kuru) + kap (sıcak) (gr) - M _s	29,5175	29,5098	29,5201	29,5115	29,5166	29,5146	29,5125
Kap(sıcak) (gr) - T _h	29,3451	29,3387	29,3454	29,3457	29,3454	29,3463	29,3461
Filt.kağ.daki su miktarı (gr)	0,1885	0,1094	0,0897	0,0641	0,0591	0,0507	0,0456
Filtre Kağ.(kuru) (gr)	0,1724	0,1711	0,1747	0,1658	0,1712	0,1683	0,1664
Filtre Kağ.,w (%)	109,339	63,939	51,345	38,661	34,521	30,125	27,404
Emme Log(kPa)	0,936	1,549	1,719	2,315	2,638	2,980	3,192
Emme (kPa)	8,628	35,385	52,341	206,683	434,322	955,608	1556,827

4.2.2. Basınç plakası yöntemi

Basınç plakası yöntemi, emme uygulamasını eksen kaydırma tekniğiyle gerçekleştirir (Hilf, 1956). Bu yöntemde, uygun kabarcıklanma basıncına sahip seramik üzerine yerleştirilen numuneler çelik bir hücre tabanına oturtulur. Hücresinin üst kısmındaki girişten hava basıncı (u_a), hücre tabanındaki seramik üzerinden ise boşluk suyu basıncı (u_w) uygulanır ve su çıkışının dengeye ulaşması beklenir. Uygulanan emme sonrasında su çıkışı dengeye ulaştığında numunenin ağırlığı veya hacmi ölçülür ve bir sonraki emme aşamasına geçilir.

Basınç plakası deneyine başlamadan önce, yüksek hava geçirgenliğine sahip seramik diskin doyurulması gerekmektedir. Doyurma süresini kısaltmak için, seramik disk önce saf su içinde 0,5 barlık bir vakum altında bekletilmiştir. Ardından, basınç plakası hücresi içine yerleştirilmiş ve disk tamamen su altında kalacak şekilde deiyonize edilmiş ve havası alınmış su eklenmiştir. Basınç plakası ekstratörüne 1 bar basınç uygulanarak seramik diskin doygunluğa ulaşması için 24 saat beklenmiştir. Doyurma işlemi sırasında, basınç plakasına bağlı olan su çıkış hortumu kullanılarak hava kabarcıklarının çıkışı izlenmiş ve hava çıkışının olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Basınç plakası yöntemi deney aşamaları

Yüksek hava geçirgenliğine sahip seramik diskin doyurma işlemi tamamlandıktan sonra, yeniden yapılandırılmış numuneler deiyonize edilmiş ve havası alınmış suda 7 gün boyunca doyurulmuş ve seramik diske yerleştirilmiştir (Şekil 4.9). Basınç plakası deneyleri, 1500F1 basınç plakası ekstratörü (Soil Moisture Equipment

Corp.) ve 15 bar kapasiteli seramik disk kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Basınç plakası ekstratörünün kapağı kapatıldıktan sonra, kılcal gerilme ($u_a - u_w$) değerini artan adımlarla 5 kPa'dan başlayarak 800 kPa'ya kadar kademeli olarak yükseltilmiştir. Kılcal gerilme adımları 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400 ve 800 kPa olarak belirlenmiştir. Her bir emme değerinde 1 hafta denge süresi sonunda ağırlık ölçümü alınmıştır. Basınç plakası deneylerinde seramik çıkışı atmosfer basıncına açık bırakılmış ve bu nedenle basınç plakası ekstratörüne uygulanan basınç değeri kılcal gerilme değerine eşit olmuştur. Basınç plakası deneyleri ASTM D6836-16 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerde laboratuvar ortamı 24 °C sıcaklıkta sabit tutulmuştur.

4.2.3. SWC eğrilerinin elde edilmesi

Üç farklı boşluk oranında oluşturulmuş numunelerin zemin-su karakteristik eğrileri basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Literatürde var olan zemin-su karakteristik eğrisi oluşturma modellerinden Van Genuchten (1980) modeli kullanılarak deneysel verilere en ideal eğriler 0 ila 1.000.000 kPa arasındaki kılcal gerilme aralıkları için oluşturmuştur. Yüksek kılcal emme aralığında zemin-su karakteristik eğrisi verileri basınç plakası ile belirlenemediğinden 800 kPa kılcal gerilme sonrası değerler filtre kağıdı yöntemi ile ölçülmüş ve Van Genuchten (1980) modeli ile elde edilen eğrilerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

4.2.4. SWC eğrileri - boşluk boyutu ilişkisinin elde edilmesi

SWC eğrileri için önerilen denklemler genellikle ampiriktir, yani deneysel verilere dayalı olarak belirlenir. Her denklem, belirli bir zemin için en uygun şekilde uyarlanarak oluşturulur. Bu çalışmada, SWCC ile boşluk boyutu arasındaki ilişki, hem filtre kağıdı yöntemiyle elde edilen eğriler hem de basınç plakası yöntemiyle elde edilen eğriler kullanılarak belirlenmiştir. Bu ilişkiyi belirlemek için Lu ve Likos (2004) tarafından belirlenen prosedür ve eşitlikler kullanılmıştır. Boşluk boyutu dağılımı ile SWCC arasındaki ilişkiyi hesaplamak için Tablo 4.4'teki hesaplama prosedürü ve eşitlikler göz önüne alınmıştır.

Tablo 4.4. Boşluk boyutu dağılımı ile SWC eğrisi ilişkisi hesaplama prosedürü.

Adım	İşlem prosedürü	Gerekli denklem
1	144.000 kPa kılcal gerilme değerleri altında SWC eğrisi oluşturulması	-

Tablo 4.4. (Devamı) Boşluk boyutu dağılımı ile SWC eğrisi ilişkisi hesaplama prosedürü.

Adım	İşlem prosedürü	Gerekli denklem
2	Hacimsel su içeriği oluşturulmuş SWCC verilerini gravimetrik su muhtevasına dönüştürülmesi	-
3	Kılcal emme değerlerinden elde edilmiş SWC verilerini bağıl nem değerlerine dönüştürülmesi	-
4	Su içeriğini su yoğunluğuna bölerek gravimetrik su içeriğini birim kütlesi başına suyla dolu gözenek hacmine dönüştürülmesi	$V_p^i = \frac{w^i}{\rho_w}$
5	Kelvin yarı çapının hesaplanması	$r_k^i = \frac{2T_s}{u_a - u_w}$
6	Geçiş fazındaki su yüzeyi kalınlığının hesaplanması	$r_p^i = r_k^i + t^i$ $t^i = \tau \left[-\frac{5}{\ln RH^i} \right]^{1/3}$
7	Boşluk yarı çapının hesaplanması	-
8	Bağıl nem değişikliğine bağlı olarak birim kütledeki boşluk hacmi değişikliğinin (azalmasının) hesaplanması.	-
9	Ortalama Kelvin yarıçapını hesaplanması.	-
10	Azalma sırasında ortalama boşluk yarıçapını hesaplayın.	-
11	Varsayılan boşluk geometrisi için kümelatif yüzey alanının hesaplanması.	$\Delta S^i = \frac{2\Delta V_i^p}{r_p^i}$ veya $\Delta S^i = \frac{3\Delta V_i^p}{r_p^i}$
12	Önceki kümelatif gözenek hacimlerini toplayarak birim kütle başına kümülatif gözenek hacmini hesaplayın.	-
13	Ortalama boşluk yarıçapına karşı birim kütle başına boşluk hacmindeki azalma veya boşluk yarıçapına karşı kümülatif boşluk hacminin çizilmesi.	-

4.3. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi

Silt numunesinin doymuş ve DOZ koşullarındaki kayma direnci parametreleri Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan Wykeham Farrance marka kesme kutusu cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

4.3.1. Doymuş kayma direnci parametreleri

İncelenen numunelerin doymuş durumdaki kayma direnci parametreleri ASTM D3080-98 göre belirlenmiştir. Silt numunesi 0,65, 0,670 ve 0,75 boşluk oranlarında %70 doymuşluk seviyesinde statik olarak sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan Wykeham Farrance marka kesme kutusu cihazında numuneler 59, 98 ve 147 kPa'lık normal gerilme altında 24 saat doyurulmuştur. Doyma işleminden sonra kesme aşaması 0,8 dk/mm kesme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu deney sonuçları kullanılarak efektif kohezyon (c') ve efektif kayma direnci açıları belirlenmiştir (ϕ').

4.3.2. DOZ kayma direnci parametreleri

Doymuş olmayan zeminlerin kayma direnci, modifiye edilmiş emme kontrollü üç eksenli bir ekipman veya kesme kutusu deney cihazı kullanılarak ölçülebilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; J. K. M. Gan ve ark., 1988; Maleki ve Bayat, 2012; Wen ve Yan, 2014; Zai-qiang ve ark., 2000) Ancak modifiye edilmiş emme kontrollü üç eksenli ekipmanı kullanılarak yapılan testler, özel ekipman gerektirdiğinden yüksek maliyetli olmakta, uzun test süreci gerektirmekte ve sonuçların elde edilmesi doymuş durumdaki kadar pratik olmamaktadır. Bunun yerine, doymuş olmayan koşullardaki kayma direncinin, hedeflenen emme büyüklüğünün uygulanması ve doğrudan kesme kutusu deney cihazı kullanılarak belirlenmesi, pratikte yaygın olarak kabul gören bir yöntemdir. Literatürdeki mevcut çalışmalar, geleneksel kesme kutusu deney cihazı kullanılarak belirlenen doymuş olmayan zeminlerin kayma direncinin basınç plakası ve benzer ekipmanlar kullanılarak ölçülen kılcal gerilme değerleri ile korelasyonunun, modifiye edilmiş/emme kontrollü kesme kutusu deney cihazı kullanılarak elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğunu göstermiştir (Oloo ve Fredlund, 1996; Vanapalli ve Fredlund, 2000; Vanapalli ve Lane, 2002; Wen ve Yan, 2014). Kesme kutusu deney cihazı kullanılarak DOZ kayma direncinin belirlenmesinde kılcal gerilmenin sönümlenmemesi için yüksek kesme hızı uygulanmalıdır. Bu çalışmada uygulanan kesme hızı literatürdeki diğer çalışmalar

dikkate alınarak 1,15 mm/dak olarak belirlenmiştir (Oloo ve ark., 1997; Vanapalli ve Lane, 2002; Vanapalli ve Mohamed, 2007; Wen ve Yan, 2014). Kesme kutusu deneyleri, 59, 98 ve 147 kPa'lık normal gerilme seviyelerinde ASTM standardı D3080-98 göre gerçekleştirilmiştir. Normal yüklerin belirlenmesi silt zemin numunesinin doğal koşullardaki örtü yükü dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesme kutusu deney sırasında numunelerin su içeriği değerinde değişiklik olmadığı varsayımını doğrulamak için kesilen numuneler test sonrası yaş ve kuru ağırlıkları belirlenerek su içerikleri kontrol edilmiştir.

Çalışmada, ekipman mevcudiyeti ve pratik olması nedeniyle, doymun olmayan Adapazarı siltinin kayma direnci geleneksel doğrudan kesme kutusu deney cihazı ile belirlenmiştir. Doymun olmayan numunelerin kılcal gerilme değerlerinin ölçümleri ise basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu deneyleri 6x6 cm çapında ve 2.5 cm yüksekliğinde kare bir kesme kutusuna sahip olan Wykeham Farrance marka tam otomatik bir doğrudan kesme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu deney sonuçları ve kılcal emme değerleri kullanılarak silt zeminin ϕ^b değerleri de hesaplanmıştır.

4.4. Model Deney Düzenegi ile Taşıma Kapasitesin Belirlenmesi

Model temel yükleme deneyleri deformasyon kontrollü testler olarak yürütülmüştür. Sıkıştırılmış numuneler üzerinde yapılan daha önceki araştırmalara göre, zemin numuneleri 0,0102 mm/dk ve 0,0132 mm/dk arasında bir hız ile yüklendiğinde drenajlı koşullara ulaşılacağını, 1,00 mm/dk ve 1,20 mm/dk arasında bir hızda yüklendiğinde ise kılcal gerilme etkisinin ölçülebildiğini göstermiştir (J. K. Gan ve Fredlund, 1996; Oloo ve ark., 1997, s. 2007; Vanapalli ve ark., 1996; Vanapalli ve Lane, 2002; Vanapalli ve Mohamed, 2007; Wen ve Yan, 2014). Mevcut araştırma, drenajsız yükleme koşullarında, 1,15 mm/dk'lık oldukça hızlı bir yükleme hızı kullanılarak simüle edilmiştir. Model yükleme testleri sonrasında numunelerin su içeriği değerinde değişiklik olmadığı varsayımını doğrulamak için numune yüzeyinin 1-3 cm ve 5-7 cm altında 25 mm yüksekliğinde 48 mm çapında numune alma halkalarıyla örnekler alınmıştır. Alınan örneklerin su içeriklerinin değişmesine izin verilmeden alt ve üstüne filtre kağıdı yerleştirilerek streç film ve alüminyum folye ile sarıldıktan sonra 9 gün dengeye gelmesi için ısı yalıtımlı kutu içerisinde bekletilmiştir. Numunelerin filtre kağıdı kalibrasyon eğrileri yardımıyla kılcal gerilme

değerleri belirlenerek kontrol edilmiştir. Ayrıca 50 mm çapında 120 mm yüksekliğinde silindirik numune alıcı kullanılarak serbest basma deneyleri (UC) için örnekler alınmıştır (Şekil 4.10). Model deney hücresinden 3 farklı derinlikte (0-20 mm, 50-70 mm ve 100-125 mm derinliklerinde) zemin örnekleri alınarak su içerikleri kontrol edilmiştir.

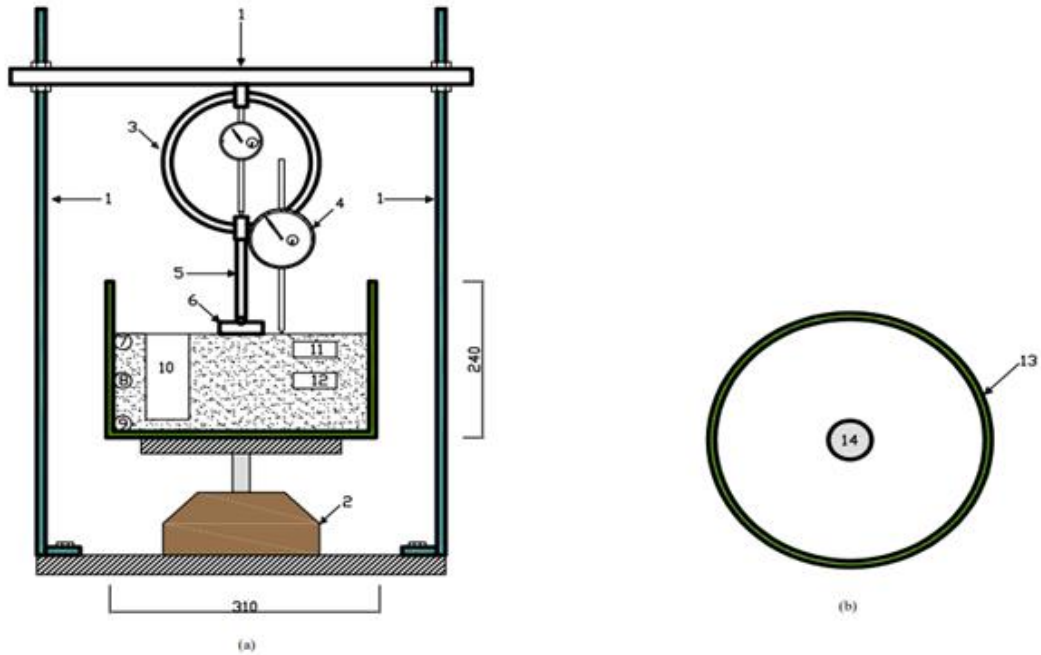


Şekil 4.10. Model deney sonu numune alımı

4.4.1. Model deney düzeneği

Model deneylerde Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan Wykeham Farrance marka yükleme çerçevesi olan tam otomatik yükleme sistemi kullanılmıştır. Yükleme hızı 0,01 mm/dk ila 5 mm/dk aralığında değişebilen 10 ton kapasiteli yükleme plakasına sahiptir. Yükleme çerçevesi çelikten yapılmış olup 930 mm yüksekliğe 450 mm genişliğe sahiptir. 1 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN ve 50 kN

kapasiteli yükleme halkaları mevcuttur. Model deney düzeneğinin detayları Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



1: Yükleme çerçevesi
2: Motor kontrollü yükleme sistemi
3: Yükleme Hüçresi
4: Transdüşer
5: Yükleme cubuğu

6, 14: Model temel
7, 8, 9: Su muhtevası kontrol noktası
10: UU Deney numunesi
11, 12: SWC numuneleri
13: Model kabı

Şekil 4.11. Model deney düzeneği

Adams ve Collin (1997), Carter (2006), Vanapalli ve Mohamed (2007) ve Oh ve ark. (2008) tarafından yapılan araştırmalar ve deneysel çalışmalar, zemin tankının boyutlarının model temel boyutundan en az 6 kat daha büyük olduğunda, uygulanan yükler nedeniyle zemin kabının sınırları üzerindeki gerilmelerin etkisinin olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan zemin tankının model temel boyutlarına oranı 6'dan daha büyük seçilmiştir. Model testinde, 240 mm yüksekliğinde, 310 mm çapında ve 8 mm kalınlığında cam elyaf taviyeli polyester silindirik numune tankı kullanılmıştır.

4.4.2. Model yüzeysel temeller

Araştırma programında dört adet çelik model temel kullanılmıştır., 37,5 mm x 37,5 mm, 50 mm x 50 mm boyutlarında iki kare temel ile 42,3 mm ve 50 mm çapında iki dairesel temel kullanılmıştır. 37,5 mm x 37,5 mm boyutlarında kare temel ile 42,3 mm çapındaki dairesel temellerin eşdeğer alanı 1406 mm²'dir. Farklı boyut ve

şekildeki temelleri kullanmanın amacı, temel boyutunun ve şeklinin doygun olmayan zeminlerin taşıma kapasitesi ve oturma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmektir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Model temeller

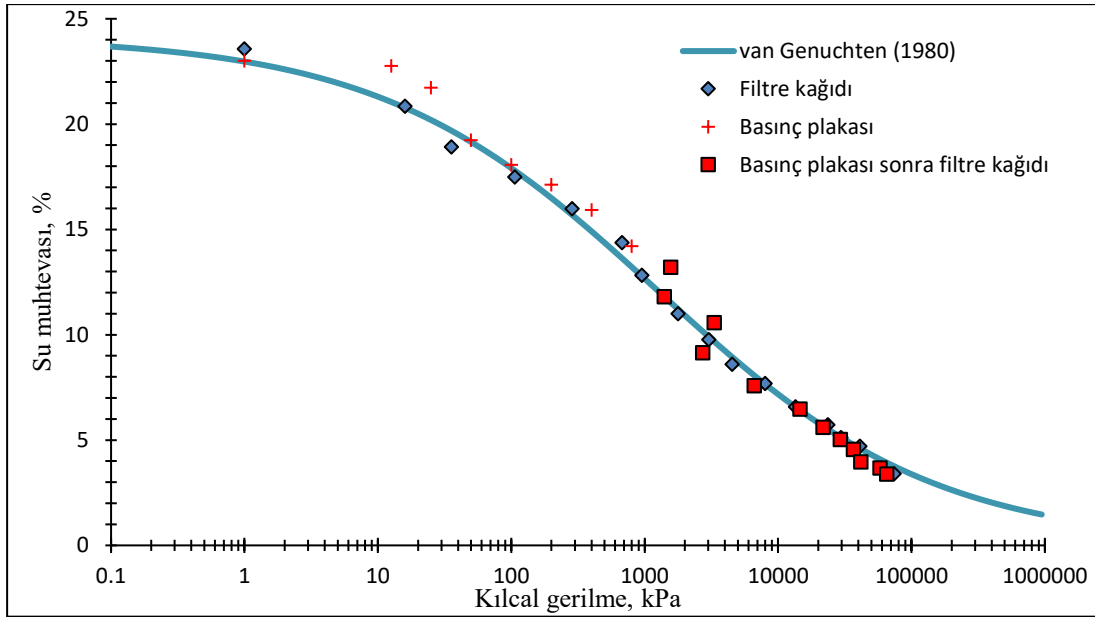
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bu tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmaların sonuçları ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

5.1. Kılcal Gerilme Deneyleri

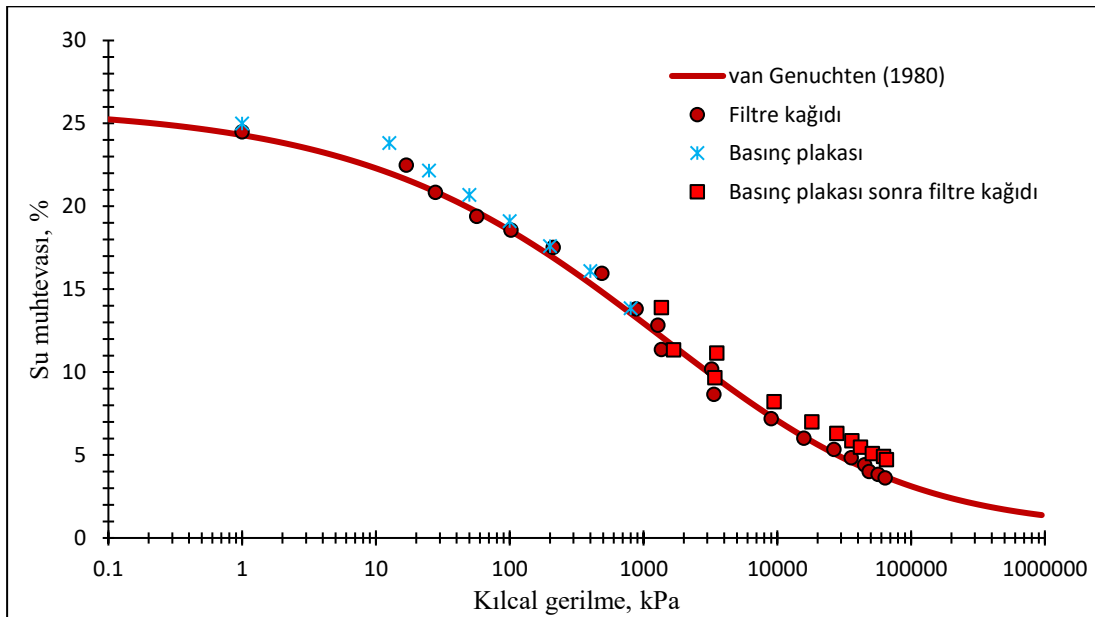
Bu bölümde numuneler üzerinde gerçekleştirilen SWCC deneylerinin sonuçlarını gösterilmektedir. Hem filtre kağıdı hem de basınç plakası kullanılarak elde edilen zemin-su karakteristik eğrilerini oluşturan ölçüm sonuçlarını içermektedir. Numune hazırlama yöntemi ve zemin tipi dikkate alınarak eğriler titizlikle analiz edilmiştir. Ayrıca van Genuchten (1980), eğri modeli tarafından elde edilen SWC eğrileri de oluşturulmuştur.

Şekil 5.1. ile Şekil 5.3. arasında yer alan grafiklerde sırasıyla 0,65, 0,70 ve 0,75 boşluk oranlarında oluşturulan numunelerin filtre kağıdı yöntemi ve basınç plakası deney verileri kullanılarak elde edilmiş SWC eğrileri gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, boşluk oranı büyük olan silt zeminin daha yüksek başlangıç su muhtevasına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca 0.75 boşluk oranına sahip numuneye ait SWC eğrisinin doygunluktan ayrılma aşamasının daha yüksek eğime sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı hazırlama koşullarında ancak farklı boşluk oranlarında hazırlanan numunelerin van Genuchten (1980) modeline tam uyum sağladığı görülmüştür.



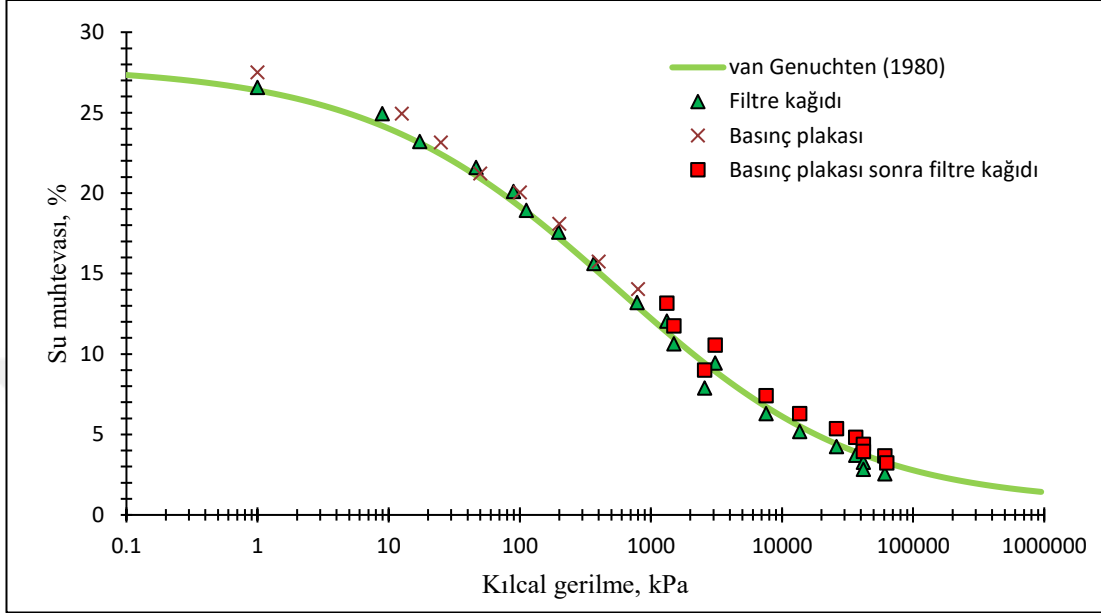
Şekil 5.1. $e = 0,65$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.

Şekil 5.1' de 0,65 boşluk oranında ve %70 doygunlukta hazırlandıktan sonra %100 dogunluk seviyesine ulaşması sağlanan numunenin kuruma eğrisi görülmektedir. SWC eğrisinin oluşturulmasında van Genuchten (1980) modeli kullanılmıştır. Numunenin hava giriş değeri 12,4 kPa ve kalıcı değeri ise 1423,4 kPa olarak hesaplanmıştır. Hava giriş değerindeki su muhtevası %24,46 ve kalıcı su muhtevası ise %12,04' tür.



Şekil 5.2. $e = 0,70$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.

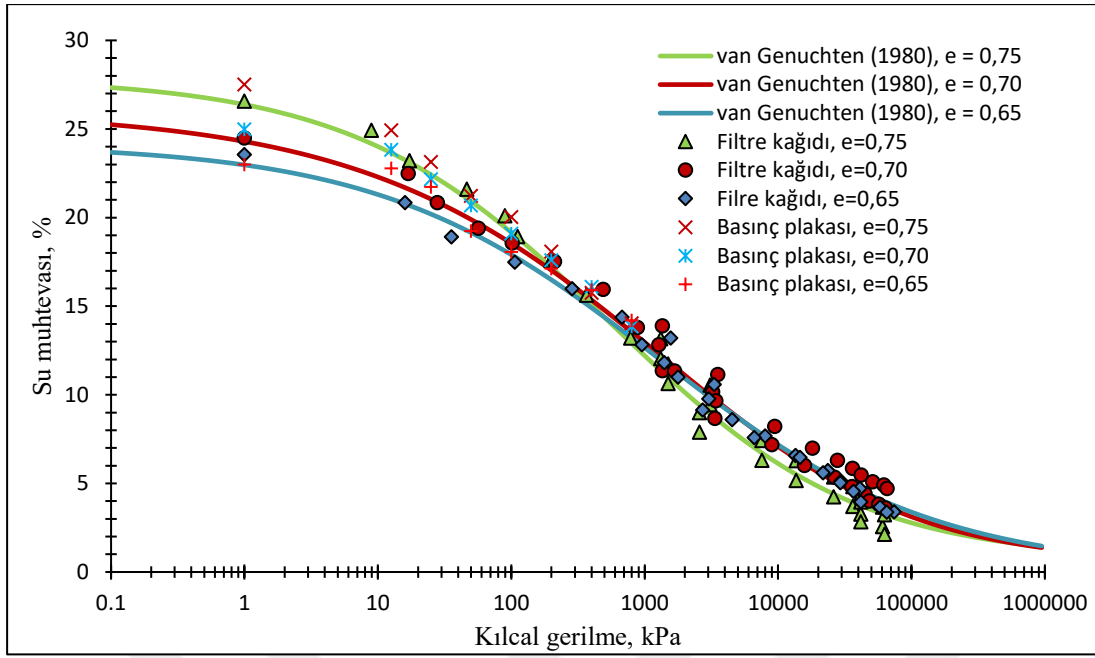
Şekil 5.2’ de 0,70 boşluk oranındaki numunenin kuruma eğrisi görülmektedir. Numunenin hava giriş değeri 10,2 kPa ve kalıcı değeri ise 1287,4 kPa olarak hesaplanmıştır. Hava giriş değerindeki su muhtevası %26,03 ve kalıcı su muhtevası ise %12,81’ dir.



Şekil 5.3. $e = 0,75$ zemin numunesinin zemin-su karakteristik eğrisi.

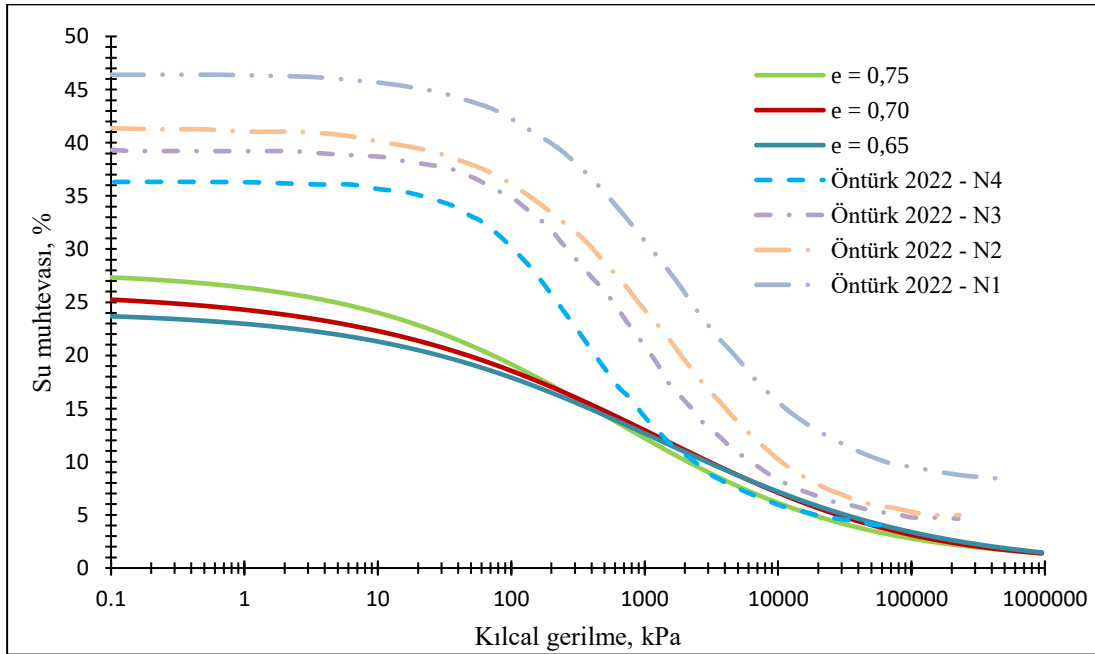
Şekil 5.3’ de 0,75 boşluk oranındaki numunenin kuruma eğrisi görülmektedir. Numunenin hava giriş değeri 8,0 kPa ve kalıcı değeri ise 571,4 kPa olarak hesaplanmıştır. Hava giriş değerindeki su muhtevası %27,84 ve kalıcı su muhtevası ise %13,95’ dir.

Şekil 5.4’ de filtre kağıdı yöntemi ve basınç plakası deney sonuçları kullanılarak elde edilmiş SWC eğrilerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Farklı boşluk oranına sahip SWC eğrilerinin karşılaştırması.

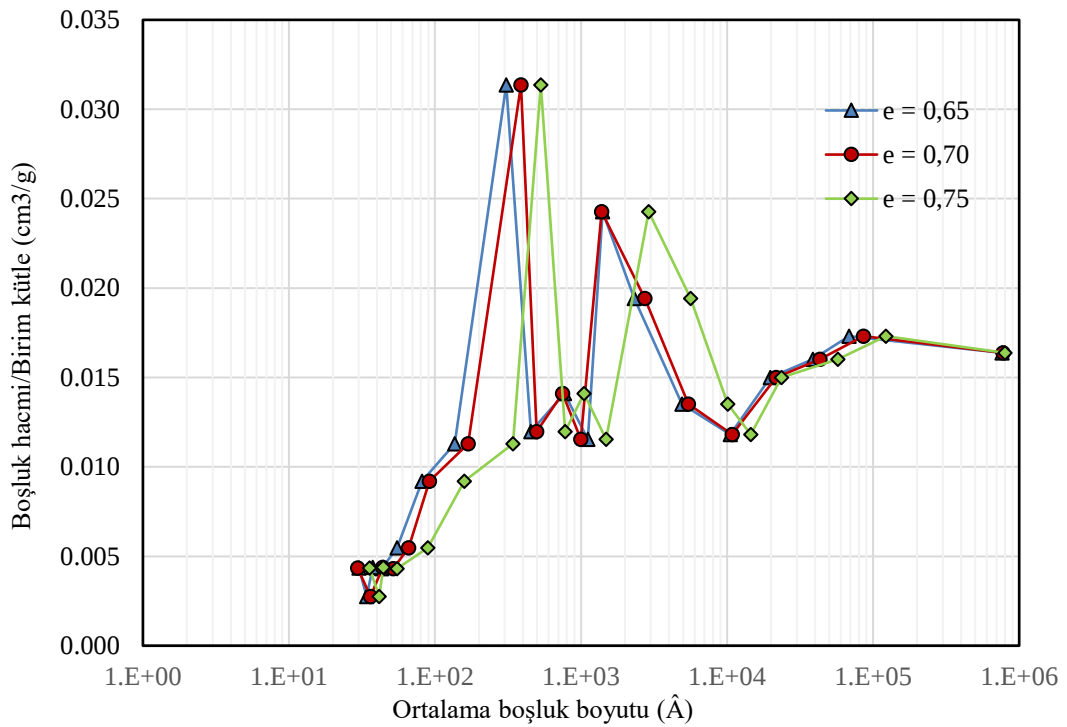
Öntürk (2022) dört farklı Adapazarı zemin numunesini kullanarak doygun olmayan ince daneli zeminlerin kayma direncini belirlemeye yönelik çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada N1, N2, N3 ve N4 notasyonlarıyla adlandırılan numunelerden N4 numunesi bu çalışmada kullanılan silt zemin numunesine benzer özelliklere ve dane dağılımına sahiptir. Öntürk (2022), çalışmasında elde ettiği SWCC grafikleri ile bu çalışmada elde edilen eğrilerin karşılaştırılması Şekil 5.5’ de verilmiştir.



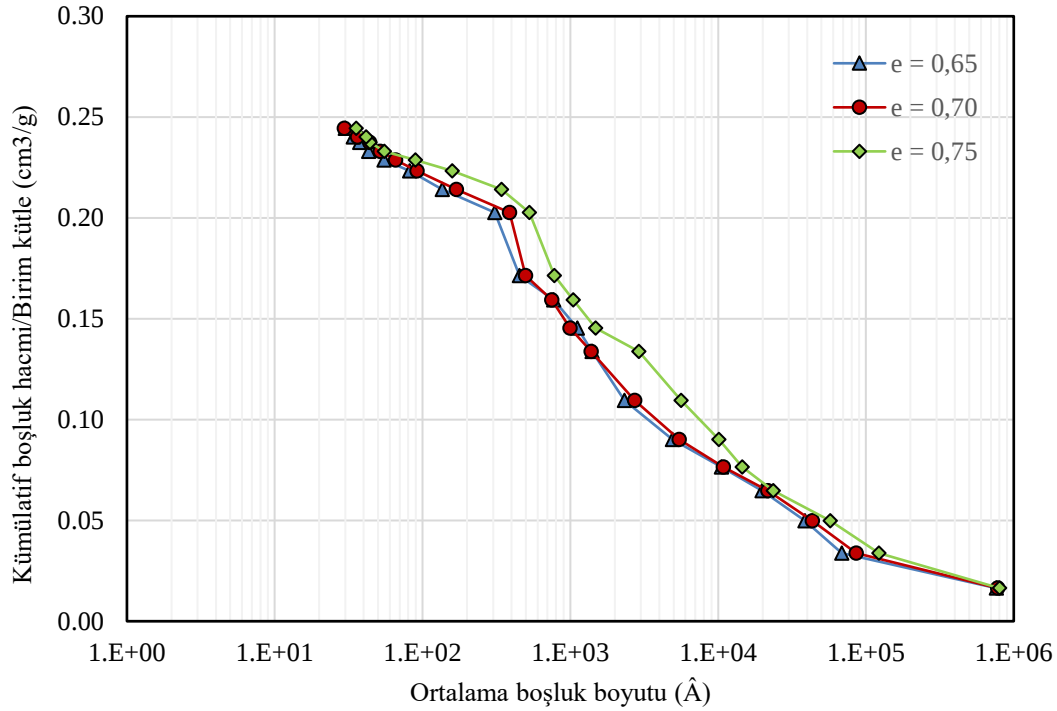
Şekil 5.5. Farklı zeminlere ait SWC eğrilerinin karşılaştırması

Şekil 5.5'e bakıldığında benzer dane dağılımına sahip N4 numunesinin boşluk oranının (boşluk oranı 1.15) farklı olması nedeniyle başlangıç su muhtevası değerleri bu açılışmadaki görece düşük boşluk oranına sahip numunelere göre yüksektir.

Zemin-su karakteristik eğrisi-boşluk boyutu ilişkisi Bölüm 4'de açıklanan Lu ve Likos (2004) yaklaşımı uygulanarak kurulmuştur. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7' deki grafiklerde filtre kağıdı ve basınç plakası deney verileri üzerinden elde edilen boşluk boyutu ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Farklı boşluk oranına sahip zeminlerin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi



Şekil 5.7. Farklı boşluk oranına sahip zeminlerin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

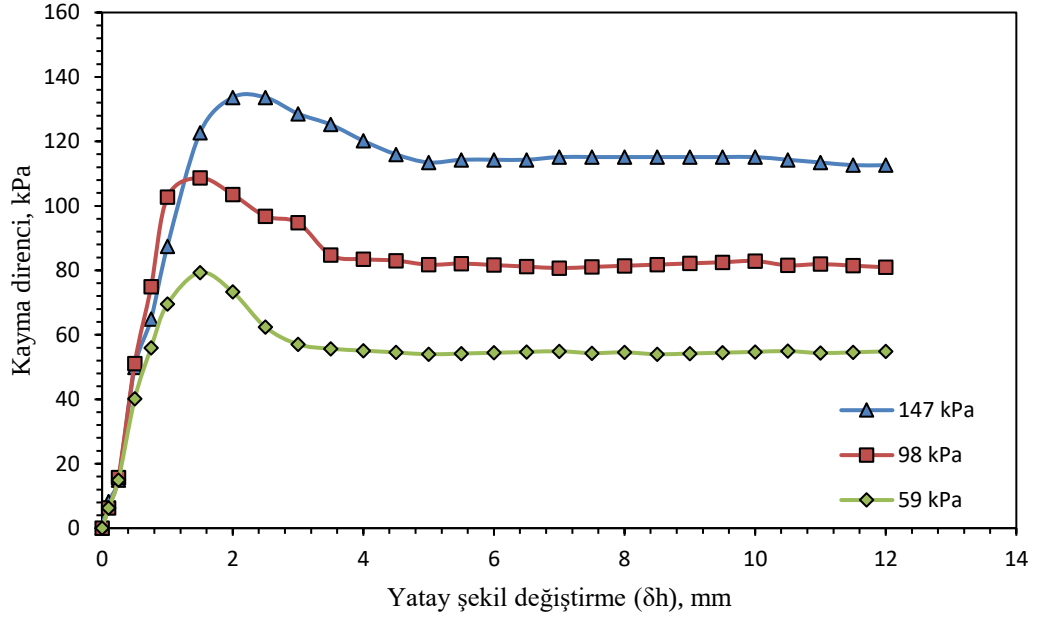
Tüm boşluk oranlarındaki numunelerin 100 Å ile 10000 Å arasındaki ortalama boşluk boyutları toplam boşluk hacminin genelini oluşturmaktadır. Hâkim boşluk boyutunun 100 Å ile 800 Å arasında yer aldığı görülmektedir. 300 Å ile 500 Å değerinde birer vadi olduğu görülmektedir. Bu değer kılcal gerilme değerindeki hızlı değişimi göstermektedir. SWC eğrileri incelendiğinde kılcal gerilmedeki hızlı değişim tüm boşluk oranlarındaki numunelerde ortalama %12 ile %20 su muhtevası aralığında gerçekleşmektedir.

5.2. Kayma Direnci Deneyleri

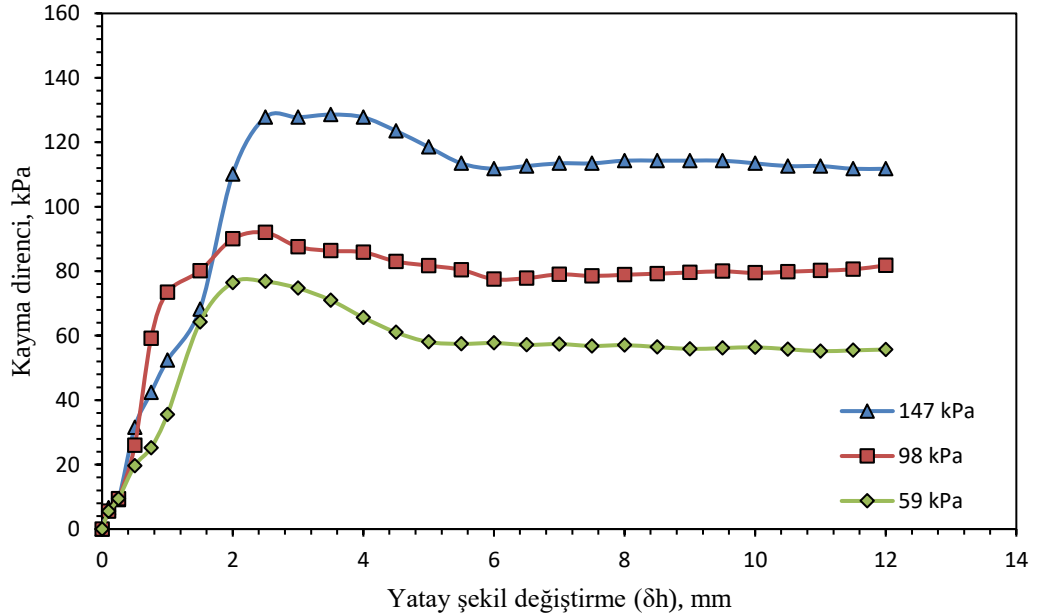
Bu çalışmada statik sıkıştırma kullanılarak, 0,65, 0,70 ve 0,75 boşluk oranlarında ve %65, %70, %75, %85 ve %100 doygunluk derecelerine sahip örnekler oluşturulmuştur. Doygun halde test edilecek numuneler 9 gün su altında doyurulmuştur. Kayma direnci, maksimum değere kadar yatay yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak kaydedilmiş, okuma aralıkları sık tutulmuştur.

5.2.1. Boşluk oranı 0,65 numunelerin kayma direnci deneyleri

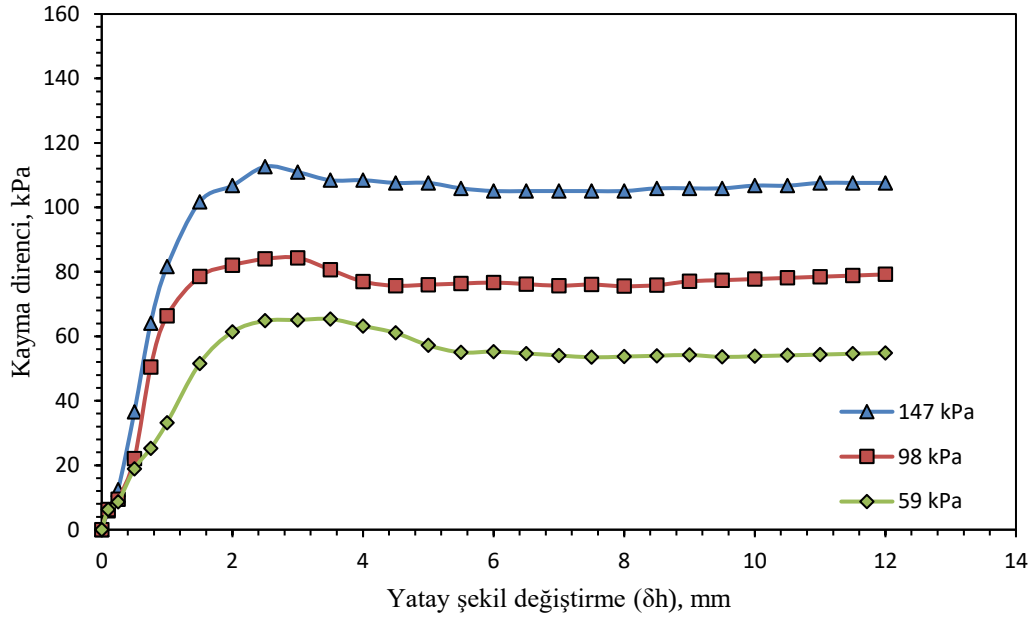
Şekil 5.8. ila Şekil 5.12. arasında yer alan grafiklerde 0,65 boşluk oranında sırasıyla doymun olmayan ve doymun durumdaki numunelerin kayma direnci-yatay şekil değıştirme eğrileri verilmiştir.



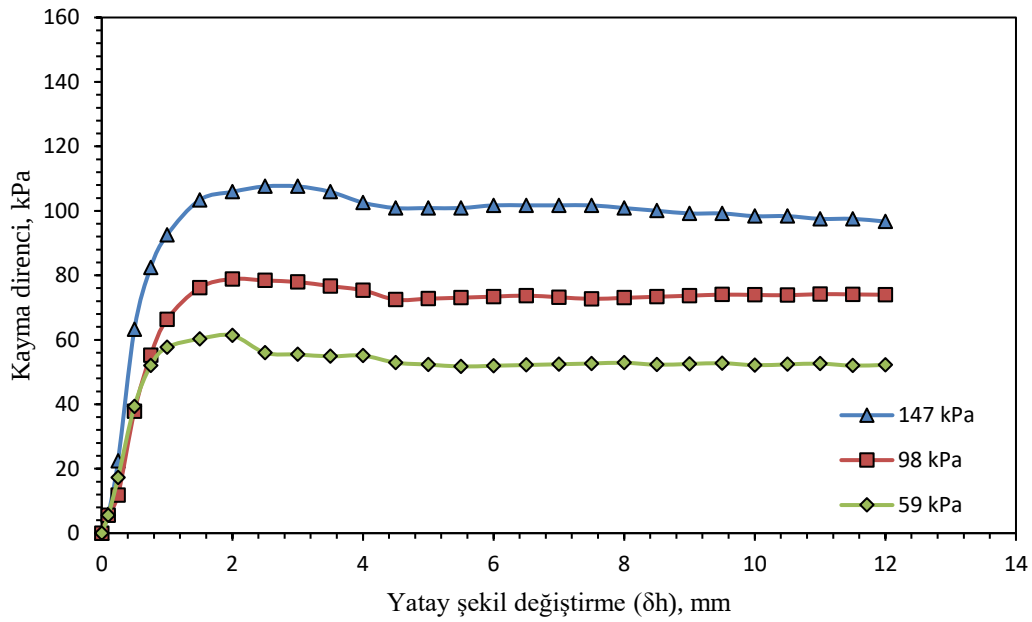
Şekil 5.8. Kayma direnci-yatay şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S=65\%$.



Şekil 5.9. Kayma direnci-yatay şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S=70\%$

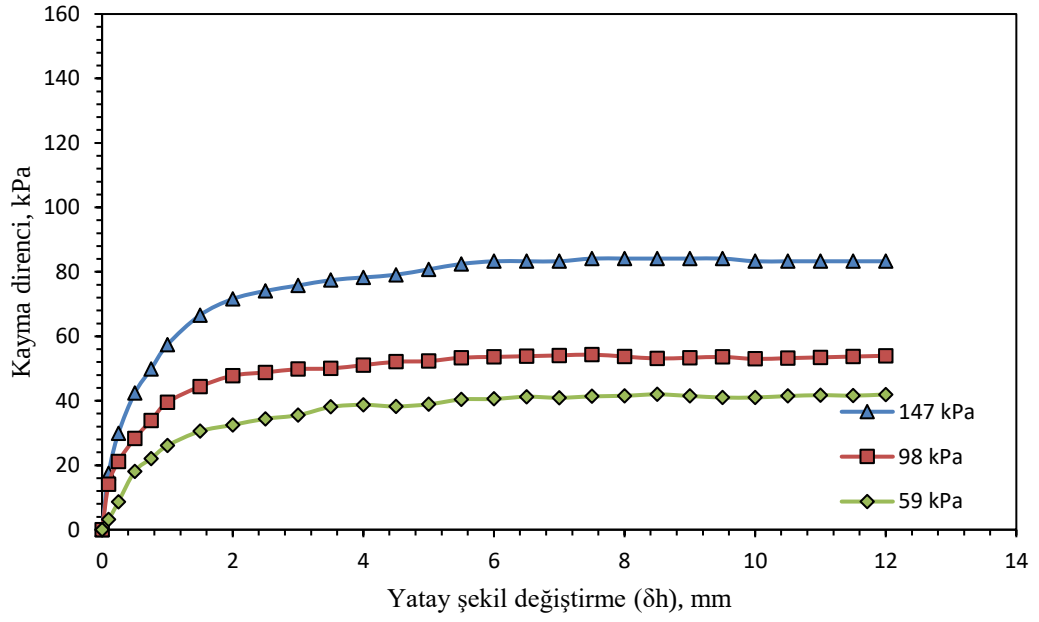


Şekil 5.10. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%75$.



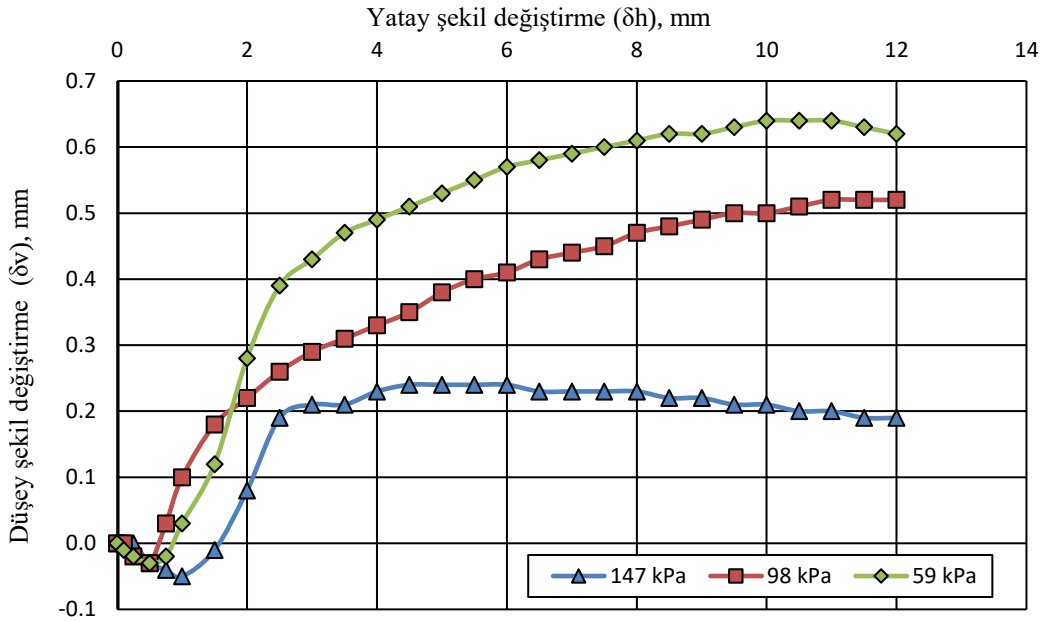
Şekil 5.11. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%85$.

Şekil 5.8 ile Şekil 5.11 grafikleri incelendiğinde, her net gerilme değerlerinde (59, 98 ve 147 kPa) kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrilerinde doruk noktası gözlenmiştir. Bununla birlikte, doymun numunede tepe noktası gözlemlenmemiştir (Şekil 5.12.).

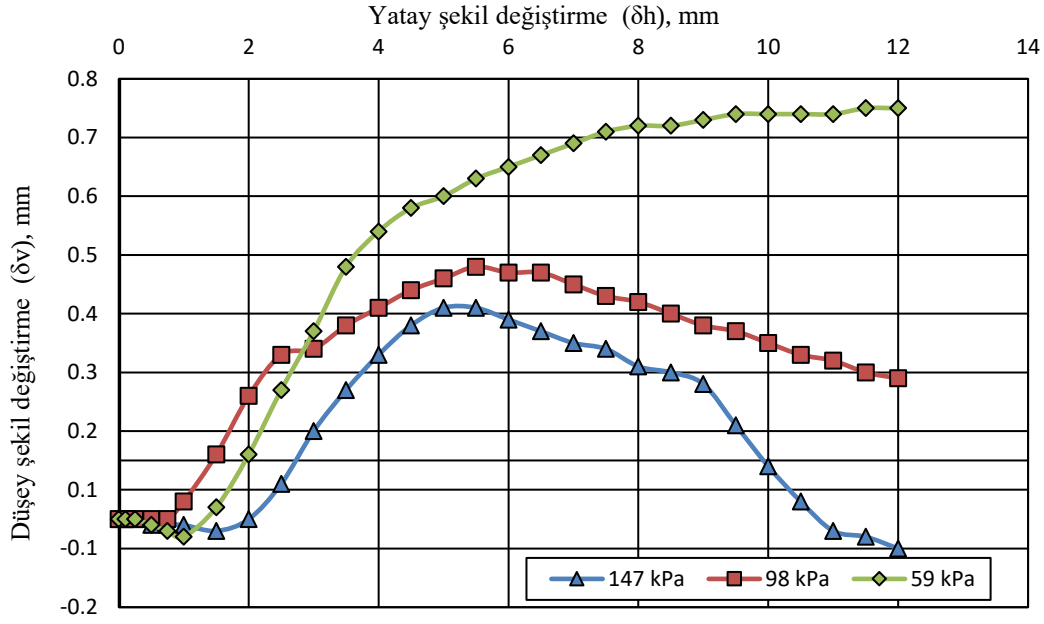


Şekil 5.12. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%100$.

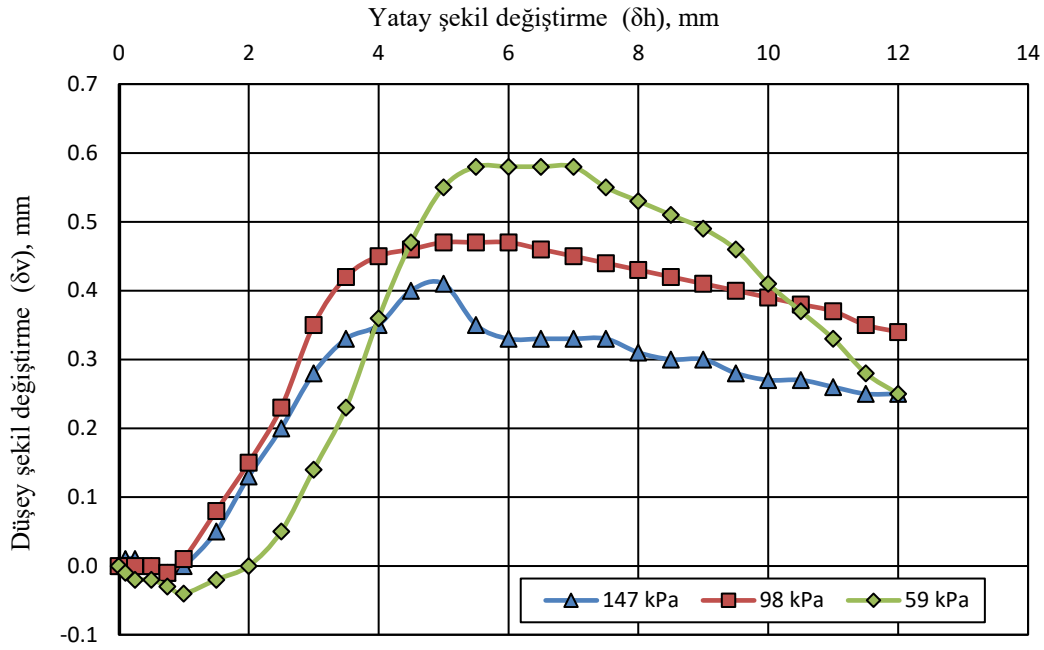
Şekil 5.13. ile Şekil 5.17. arasında yer alan eğrilerde sırasıyla doymun olmayan ve doymun koşullarda oluşturulan numunelerin düşey şekil değiştirmelerine karşı yatay şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



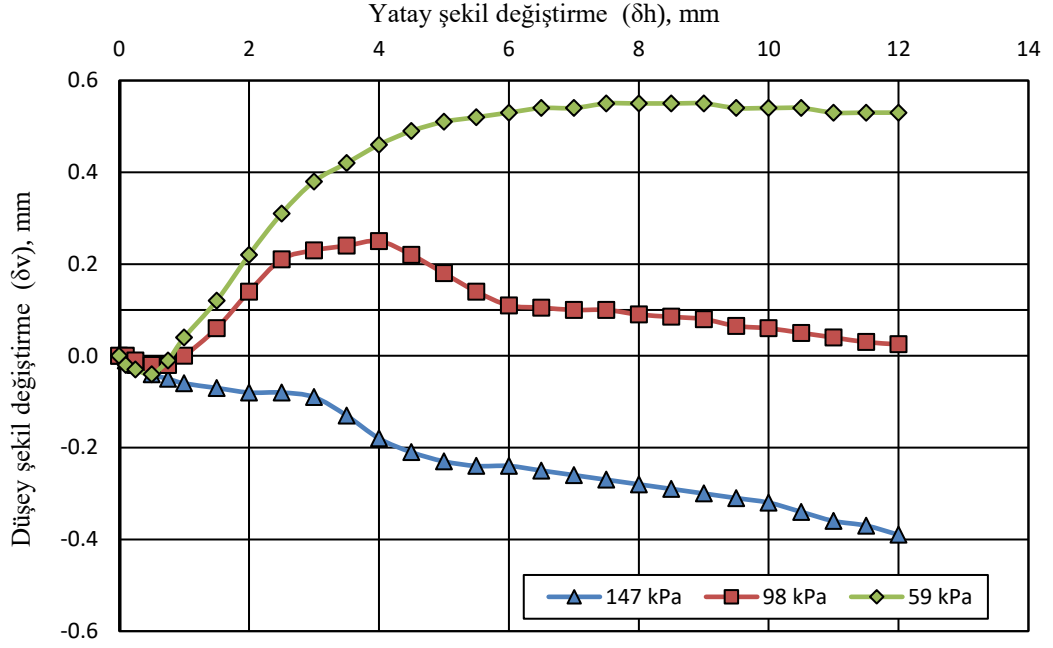
Şekil 5.13. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%65$.



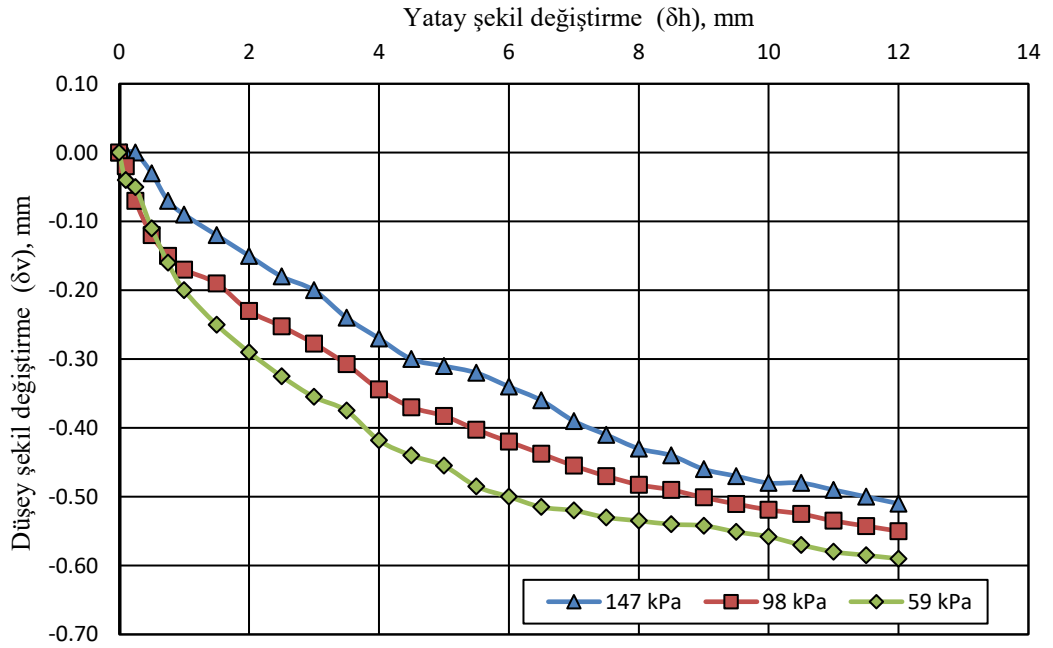
Şekil 5.14. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%70$.



Şekil 5.15. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%75$.



Şekil 5.16. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%85$.



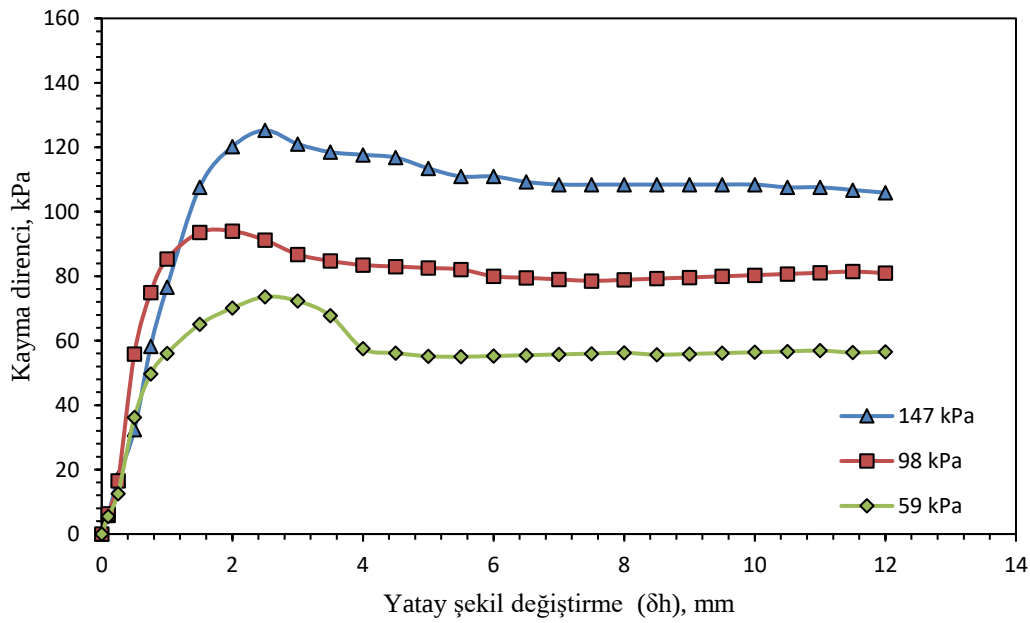
Şekil 5.17. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,65$ ve $S = \%100$.

Şekil 5.13. ile Şekil 5.15. grafiklerine bakıldığında tüm net gerilmeler değerlerinde hacim artışı görülmektedir. Kılcal gerilmenin azaldığı doygunluğa yakın olan $S = \%85$ doygunluğa sahip numuneye ait Şekil 5.16' daki eğrilere bakıldığında 147 kPa net

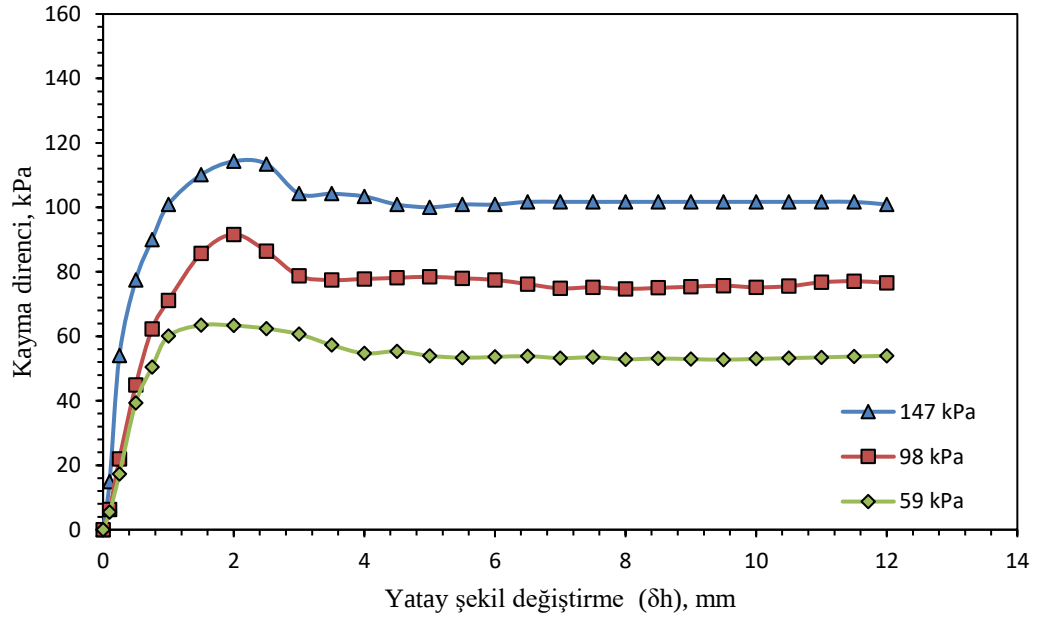
gerilme altında zeminde hacim azalması yaşandığı görülmüştür. %100 doygunluğa yakın koşullardaki zeminin yüksek net gerilmelerde doymun davranışa yaklaştığı görülmektedir. Şekil 5.17’de görülen ise doymun koşullarda tüm net gerilmelerde zemin davranışı hacim azalması yönündedir.

5.2.2. Boşluk oranı 0,70 numunelerin kayma direnci deneyleri

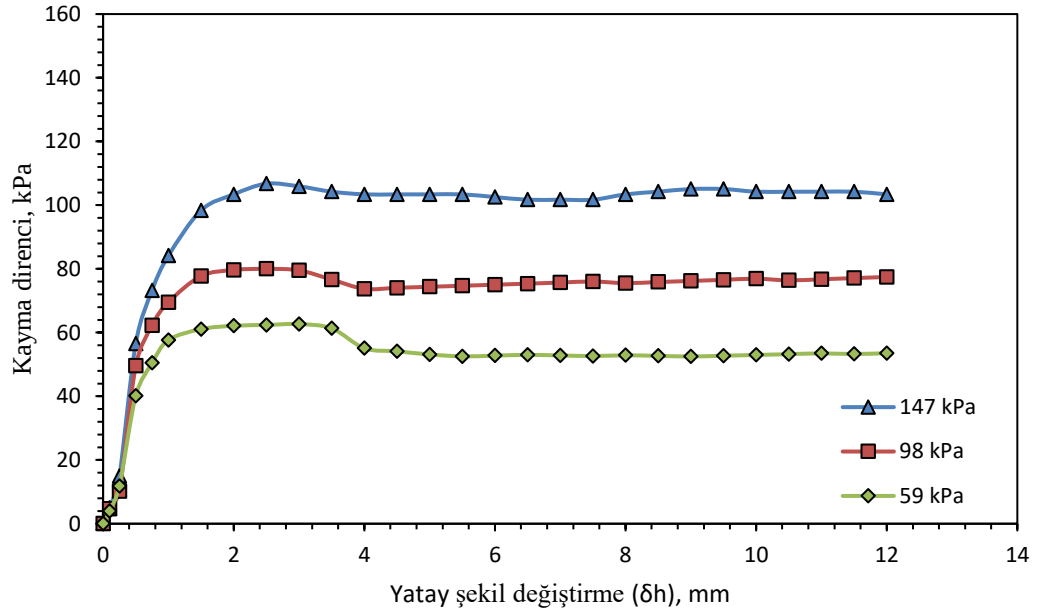
Şekil 5.18. ila Şekil 5.22. arasında yer alan grafiklerde 0,70 boşluk oranında sırasıyla doymun olmayan ve doymun koşullarda oluşturulan numunelerin kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



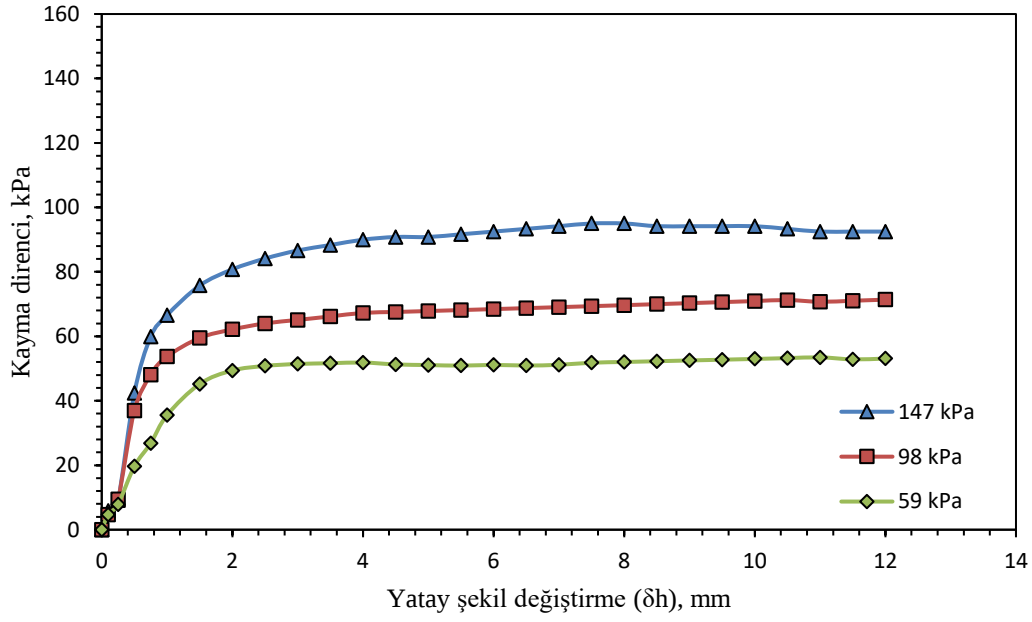
Şekil 5.18. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%65$.



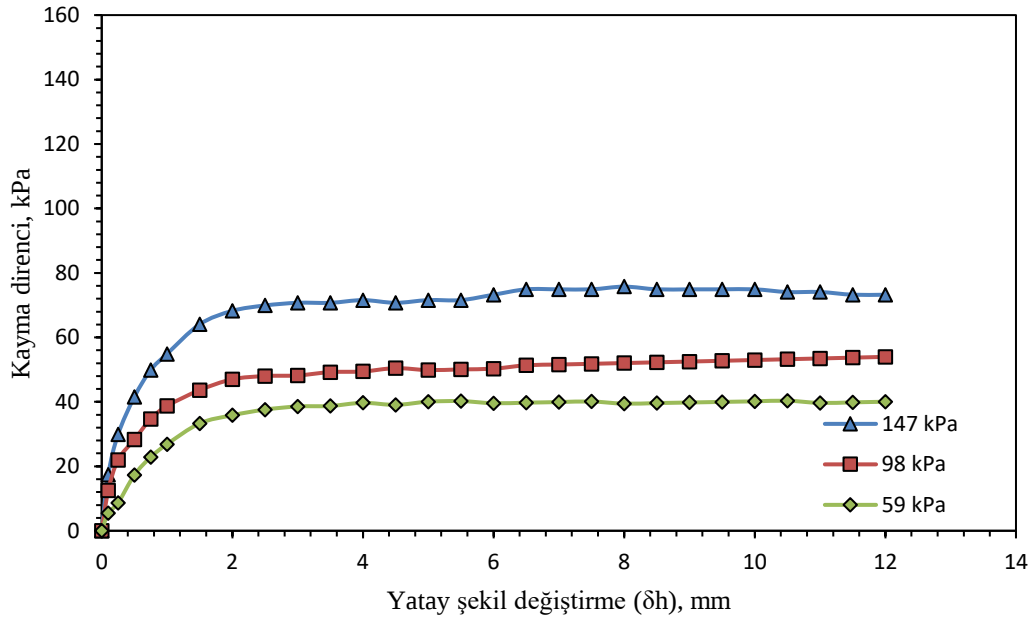
Şekil 5.19. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%70$.



Şekil 5.20. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%75$.



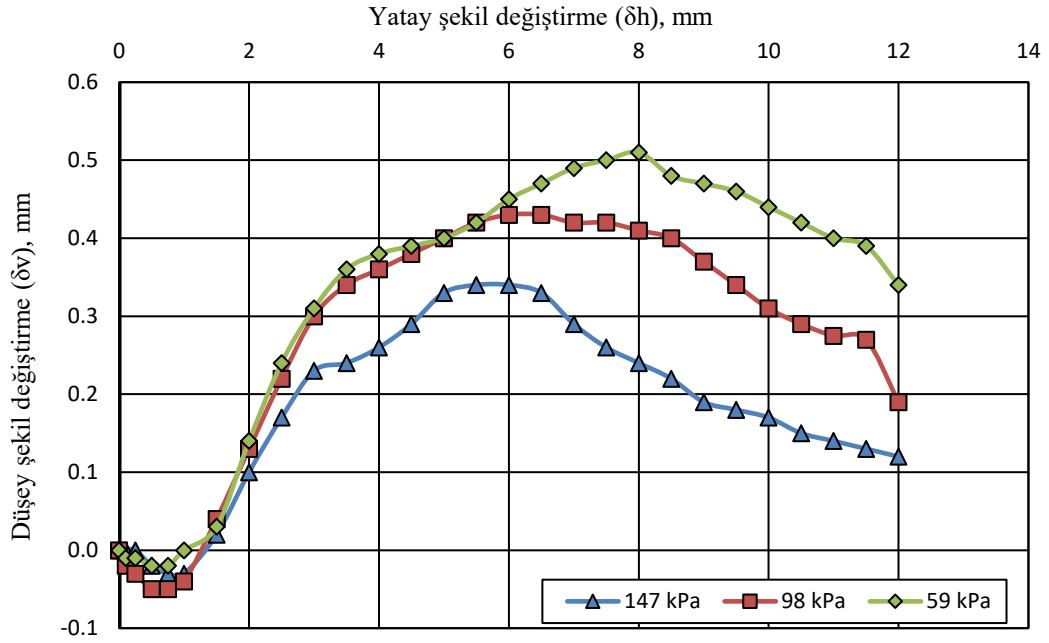
Şekil 5.21. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%85$.



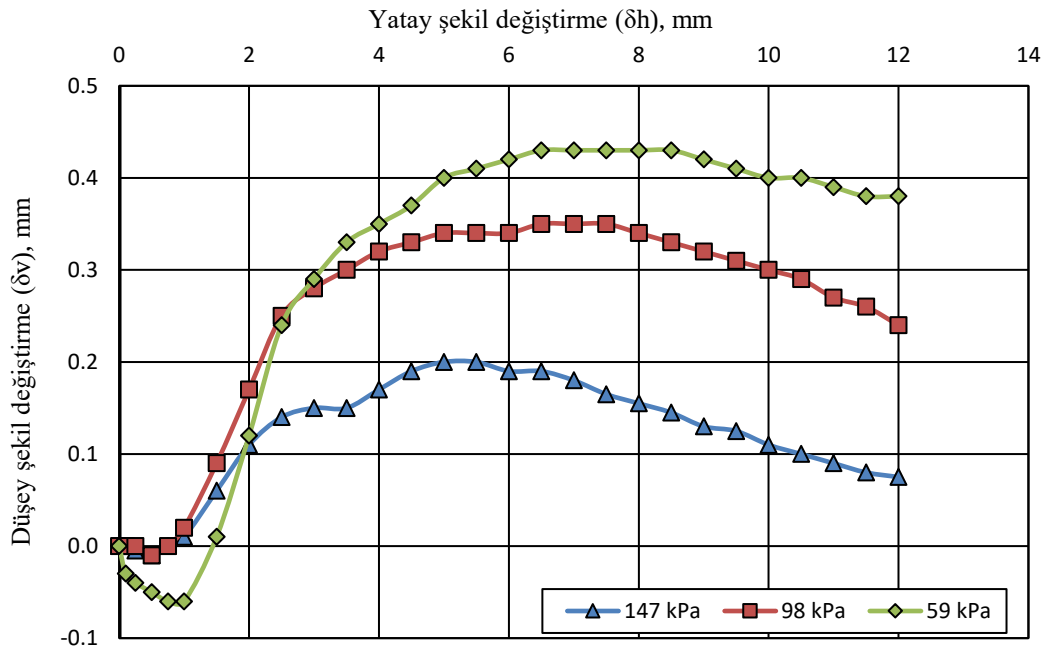
Şekil 5.22. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%100$.

Şekil 5.19 ile Şekil 5.20’de görüldüğü gibi, her net gerilmede (59, 98 ve 147 kPa) kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrilerinde doruk noktası gözlenmiştir. Bununla birlikte, $S = \%85$ ve $\%100$ doygun durum için tepe noktası gözlemlenmemiştir (Şekil 5.21-22). Şekil 5.19 ile Şekil 5.20 kayma direnci davranışlarının benzer olması boşluk oranının DOZ davranışına olan etkisi olarak yorumlanmıştır.

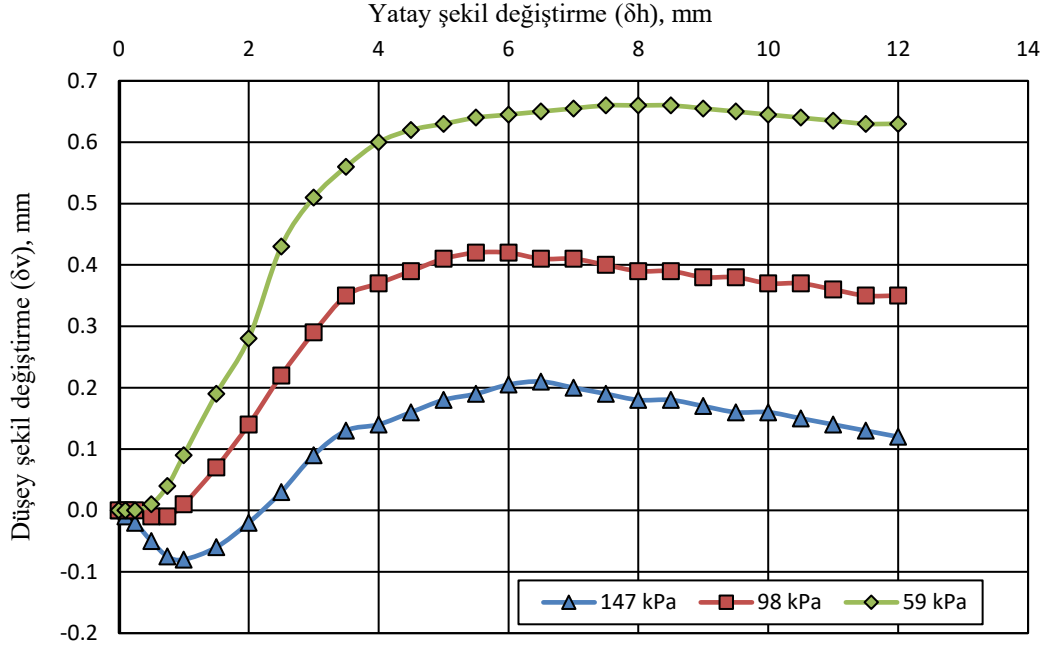
Şekil 5.23 ila Şekil 5.26 arasında yer alan şekillerde sırasıyla doymun olmayan ve doymun şartlarda oluşturulan numunelerin düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



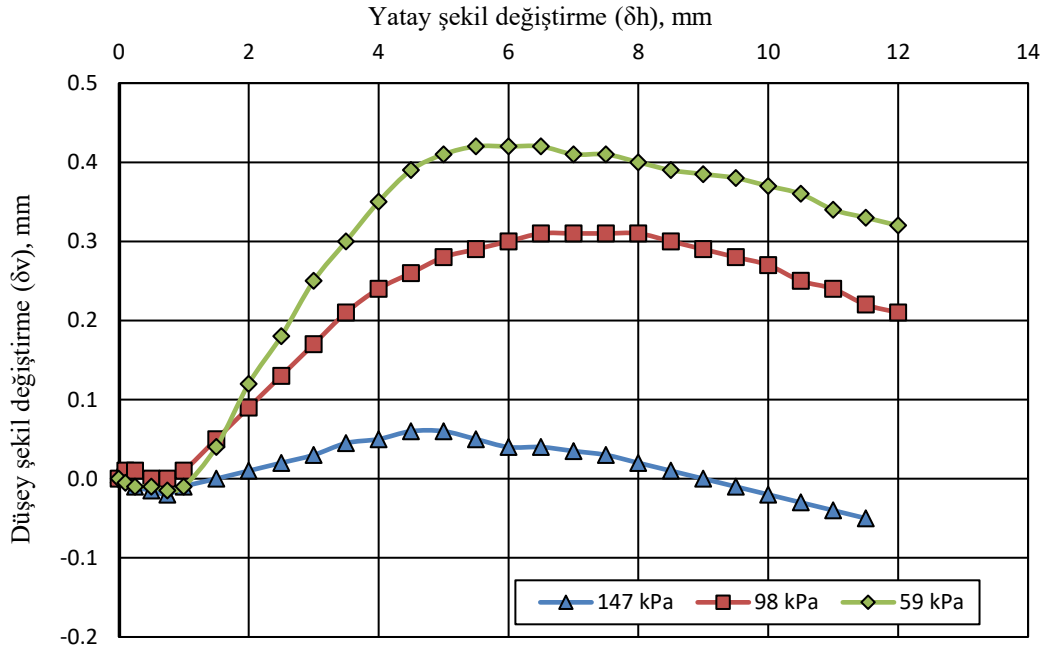
Şekil 5.23. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = 65\%$.



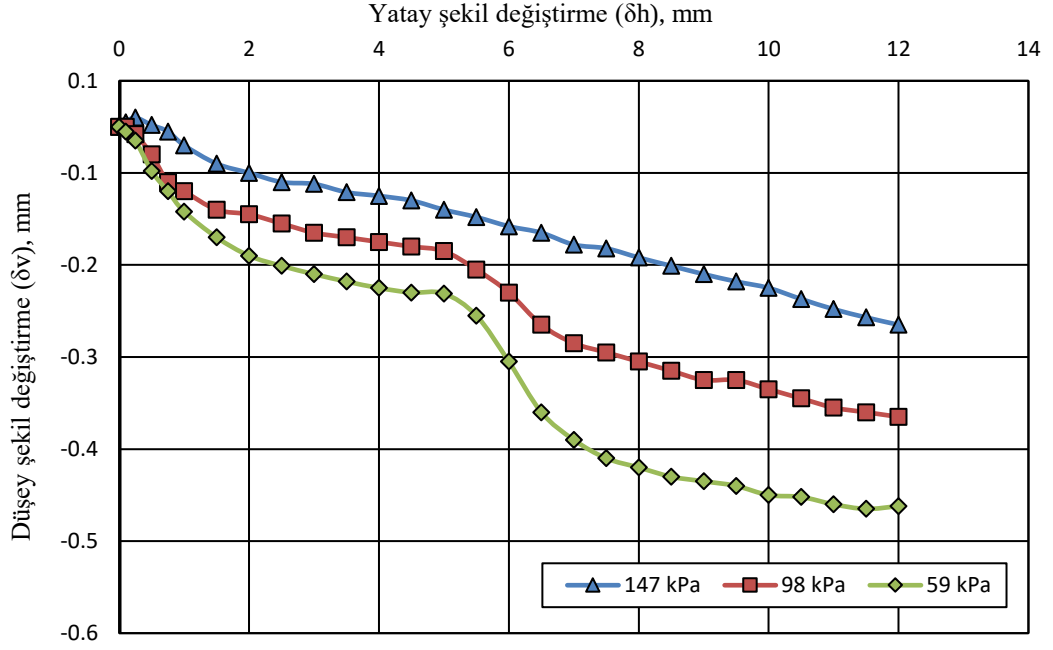
Şekil 5.24. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = 70\%$.



Şekil 5.25. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%75$.



Şekil 5.26. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%85$.

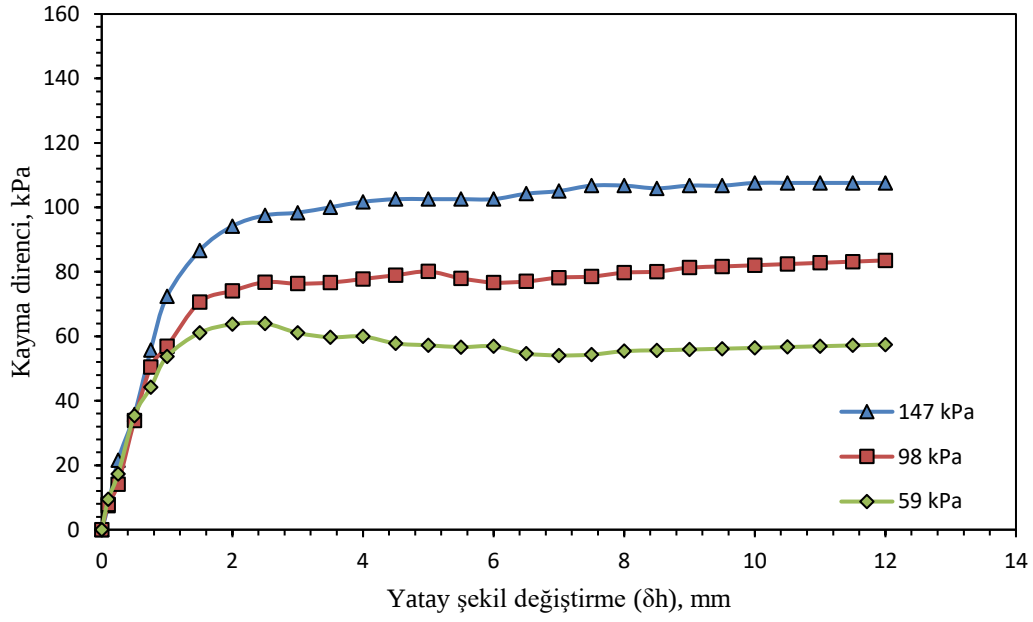


Şekil 5.27. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,70$ ve $S = \%100$.

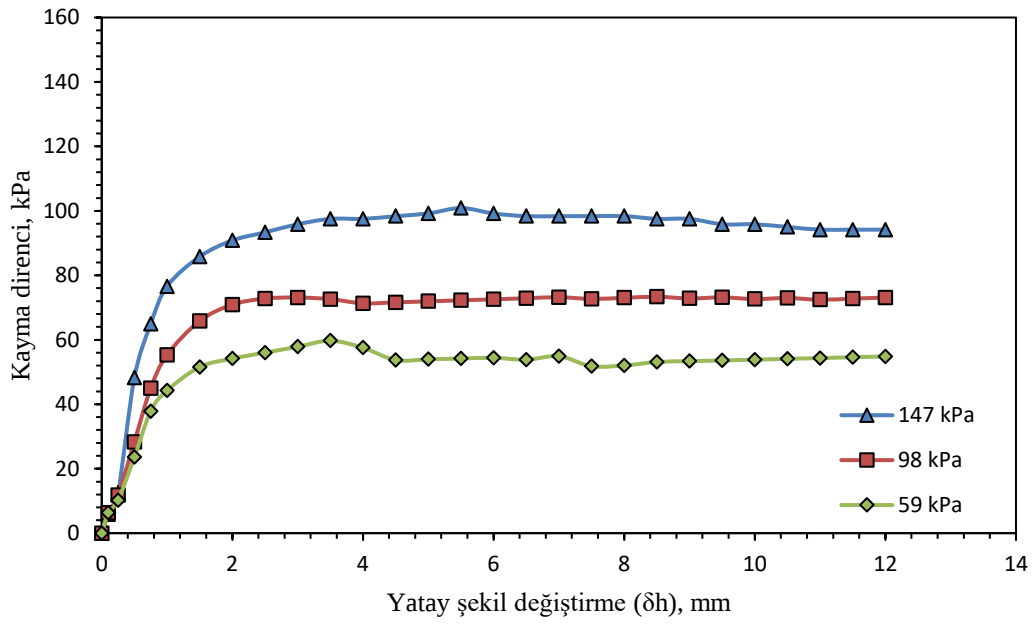
Şekil 5.23 ila Şekil 5.25 grafiklerine bakıldığında tüm net gerilmelerde hacim artışı görülmektedir. Kılcal gerilmenin azaldığı doygun koşullara daha yakın $S = \%85$ doygunluğa sahip zemin numunesinin Şekil 5.26' da yer alan eğrisine bakıldığında 147 kPa net gerilme altında zeminde hacim artması görülse dahi genel davranış hacim azalması yönündedir. Kılcal gerilme değerlerinin yüksek olduğu doygunluklar için 0,65 boşluk oranına banzer davranışlar 0,70 boşluk oranında hazırlanan numunelerde de gözlemlenmiştir. Şekil 5.27 izlendiğinde doygun koşullarda tüm net gerilmeler altında zemin davranışı sıkışma yönündedir.

5.2.3. Boşluk oranı 0,75 numunelerin kayma direnci deneyleri

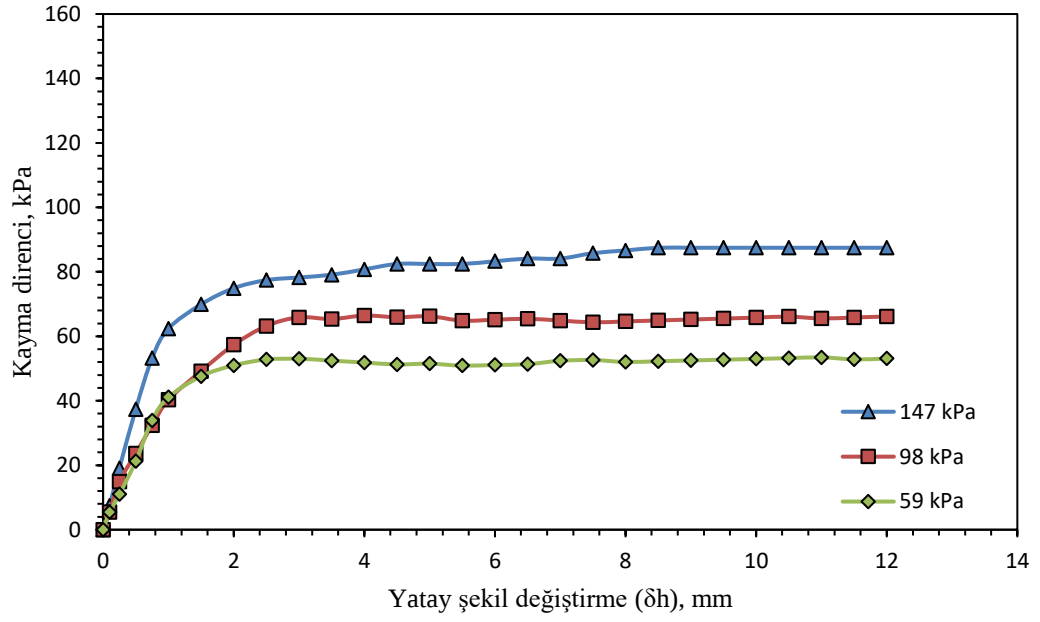
Şekil 5.28. ila Şekil 5.32. arasında yer alan grafiklerde 0,75 boşluk oranında sırasıyla doygun olmayan ve doygun koşullar altında oluşturulan numunelerin kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



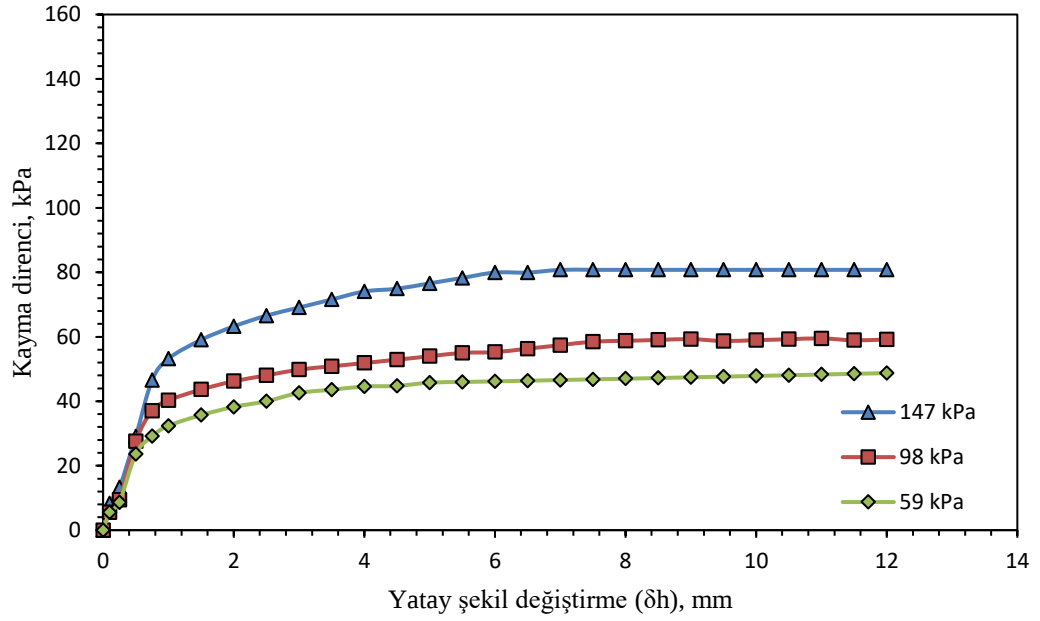
Şekil 5.28. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%65$.



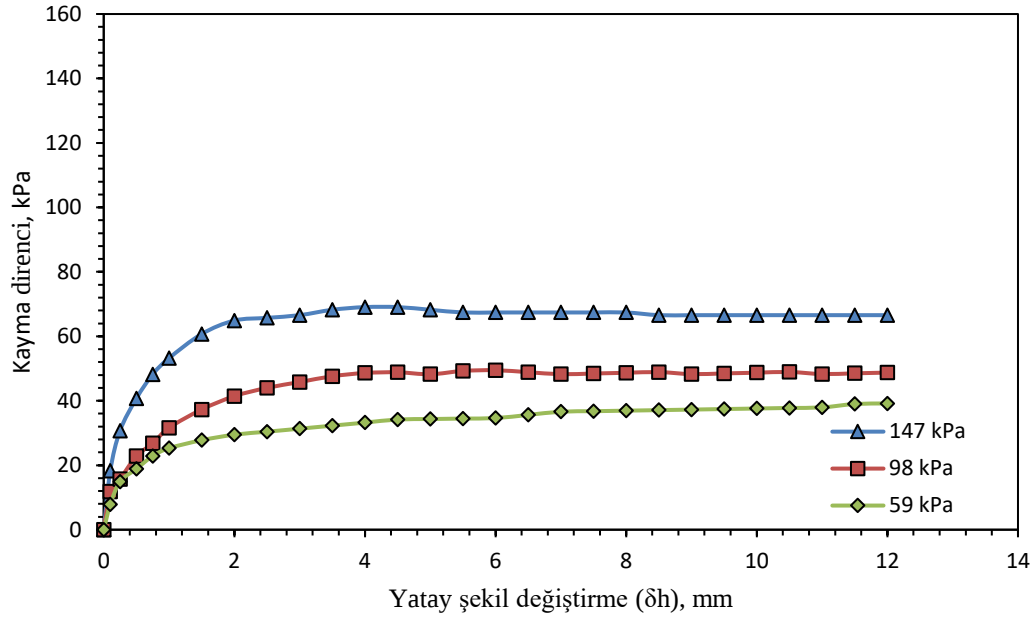
Şekil 5.29. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%70$.



Şekil 5.30. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%75$.



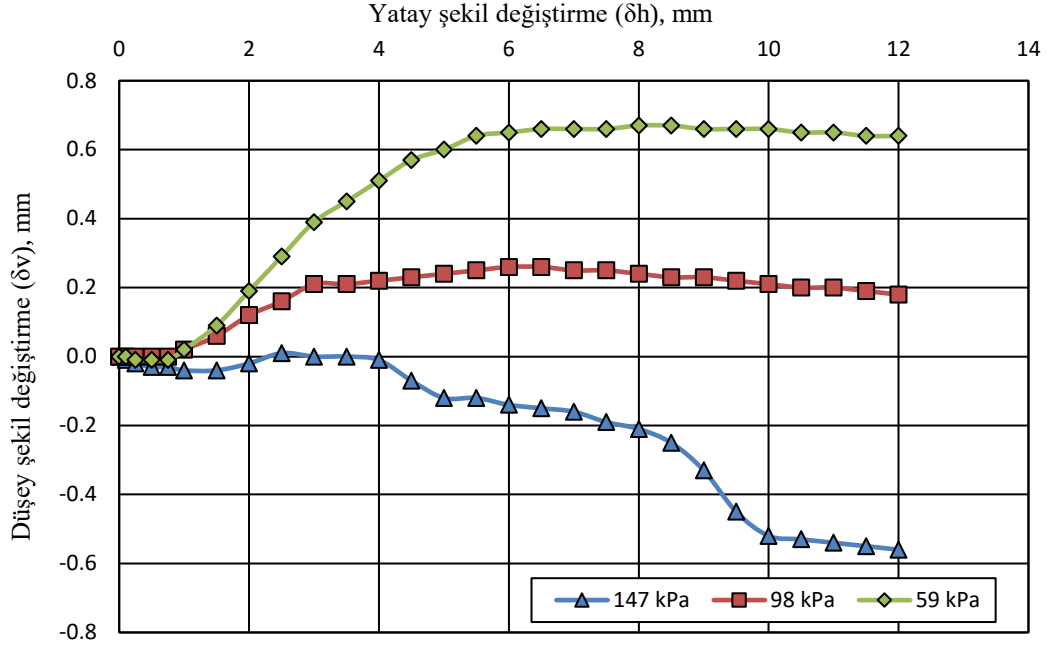
Şekil 5.31. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%85$.



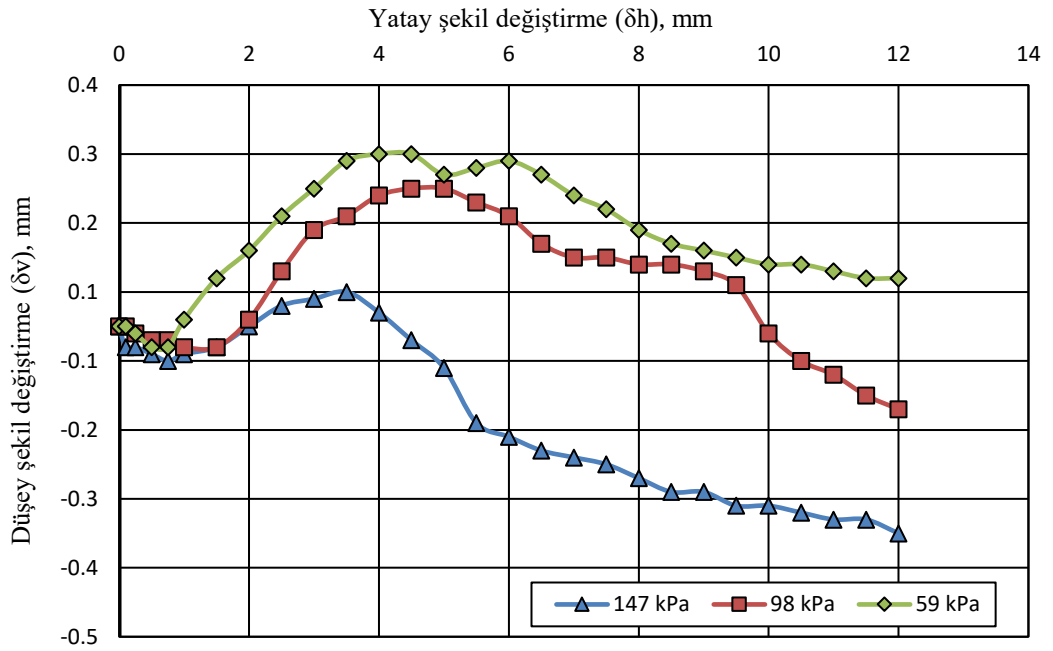
Şekil 5.32. Kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%100$.

Şekil 5.28 ila Şekil 5.32’de görüldüğü gibi, her net gerilmede (59, 98 ve 147 kPa) kayma direnci-yatay şekil değiştirme eğrilerinde doruk noktası gözlemlenmemiştir. DOZ ve doymuş koşullardaki zemin numunelerinin kayma direnci davranışlarının benzer olması boşluk oranının ($e=0,75$) görece yüksek olmasının etkisi olarak yorumlanmıştır.

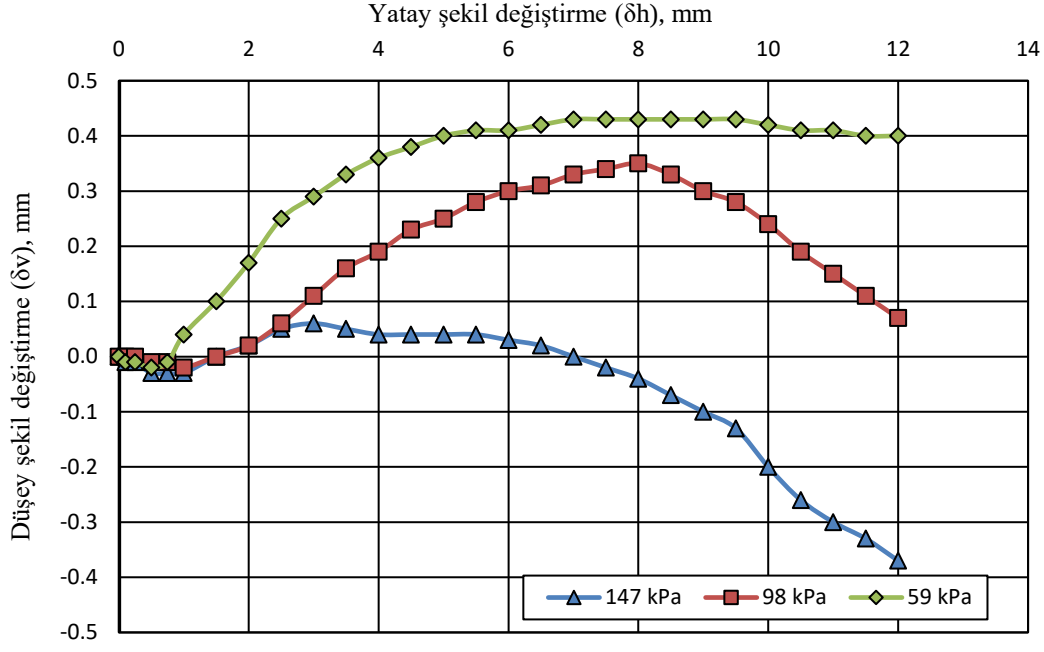
Şekil 5.33 ila Şekil 5.37 arasında yer alan grafiklerde sırasıyla doymuş olmayan ve doymuş numunelerin düşey şekil değiştirmesine karşı yatay şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.



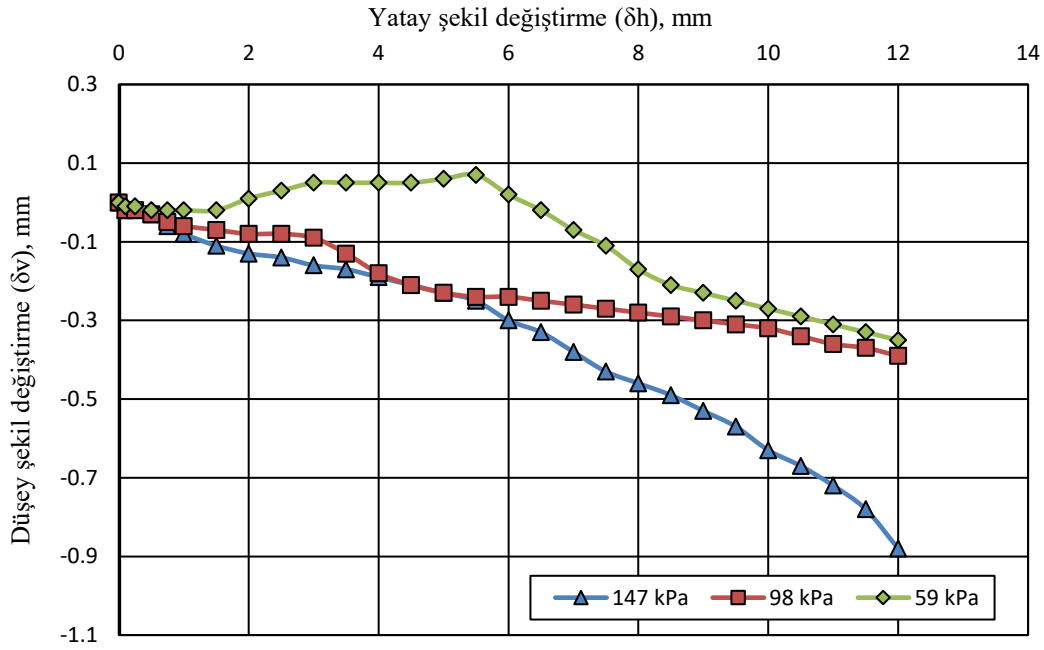
Şekil 5.33. Düşey şekil değıştirmeye karşı yatay şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%65$.



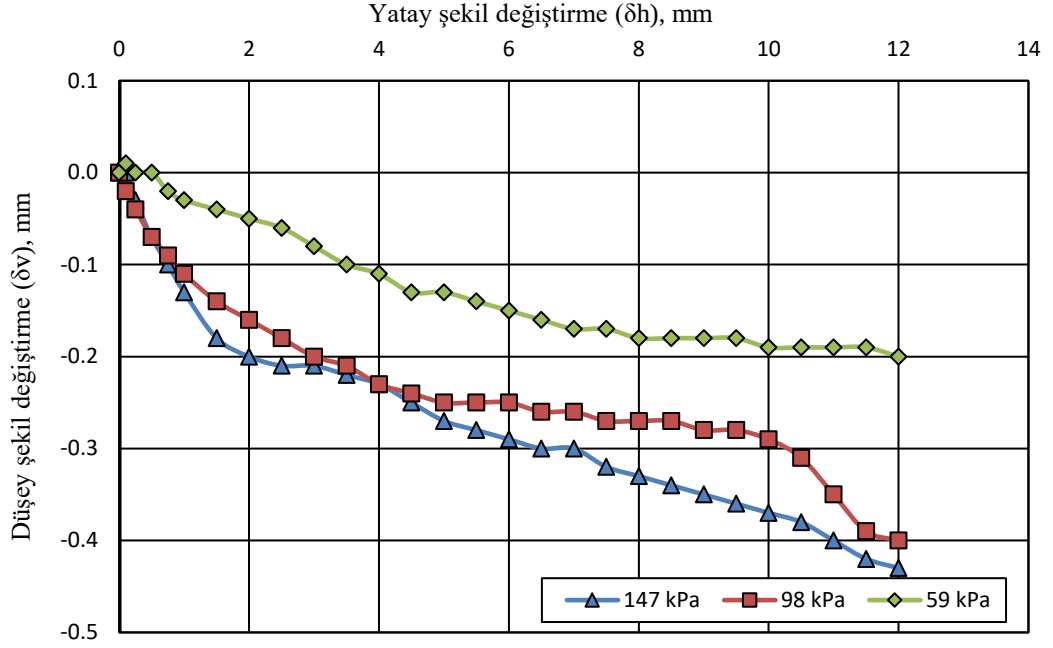
Şekil 5.34. Düşey şekil değıştirmeye karşı yatay şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%70$



Şekil 5.35. Düşey şekil değıştirmeye karşı yataş şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%75$.



Şekil 5.36. Düşey şekil değıştirmeye karşı yataş şekil değıştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%85$.

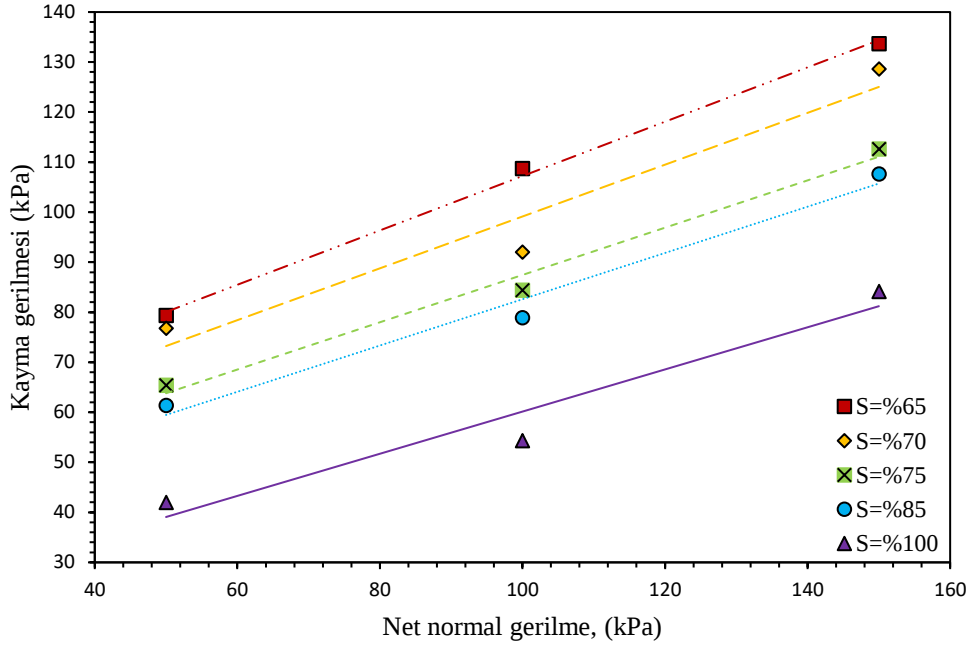


Şekil 5.37. Düşey şekil değiştirmeye karşı yatay şekil değiştirme eğrileri: $e = 0,75$ ve $S = \%100$.

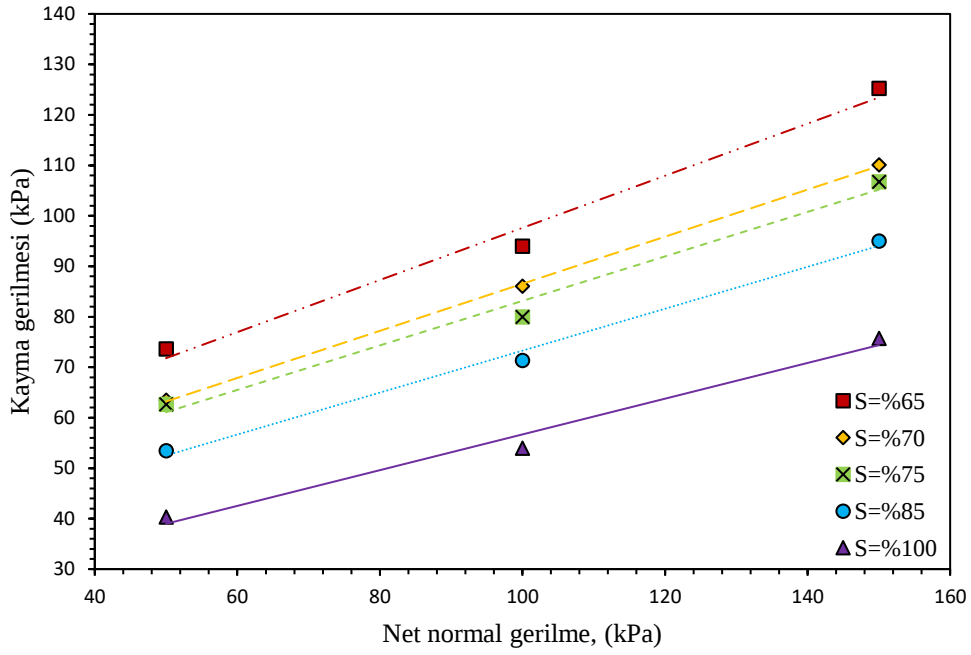
Şekil 5.33 ila Şekil 5.35 grafiklerine bakıldığında 59 kPa ve 98 kPa net gerilmelerde hacim artışı görülürken 147 kPa net gerilme altında ise numunelerin davranışı hacim azalması yönünde gerçekleşmiştir. Şekil 5.36 ve Şekil 5.37 grafiklerinde tüm net gerilmelerde zeminin davranışı sıkışma yönündedir. Doygun koşullarla aynı davranışı sergileyen DOZ koşullarındaki numunelerin bu davranışı sergilemesindeki temel neden boşluk oranı olarak düşünülmektedir.

5.3. Kayma Direnci Parametrelerinin Belirlenmesi

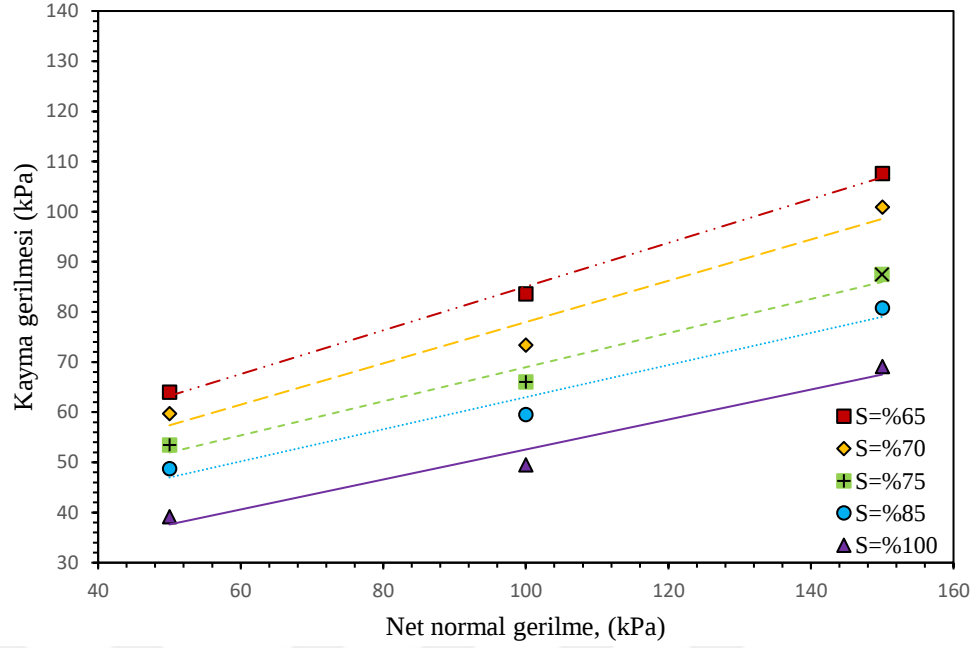
Bu bölümde, numunelerin maksimum kayma direnci değerleri göz önüne alınarak oluşturulmuş kırılma zarfları belirlenmiştir. Doygunluk derecesinin artmasıyla üç farklı boşluk oranına sahip numunelerin kohezyon değerlerinde ve az da olsa kayma direnci açıları azalma eğilimleri gözlemlenmektedir. Doygunluk derecesi azalımı/kılcal gerilme değeri artışının kohezyonda artış oluşturmasının gözlemlenmesi literatürde bilinen davranışa benzerdir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Bunun yanı sıra kılcal gerilme değerindeki artışın kayma direnci açısından da artışa sebep olduğu gözlemiştir. Bu durum literatürde Wen ve Yan (2014) çalışması ile uyumludur.



Şekil 5.38. 0,65 boşluk oranında zemin numunelerin kırılma zarfları.



Şekil 5.39. 0,70 boşluk oranında zemin numunelerin kırılma zarfları.



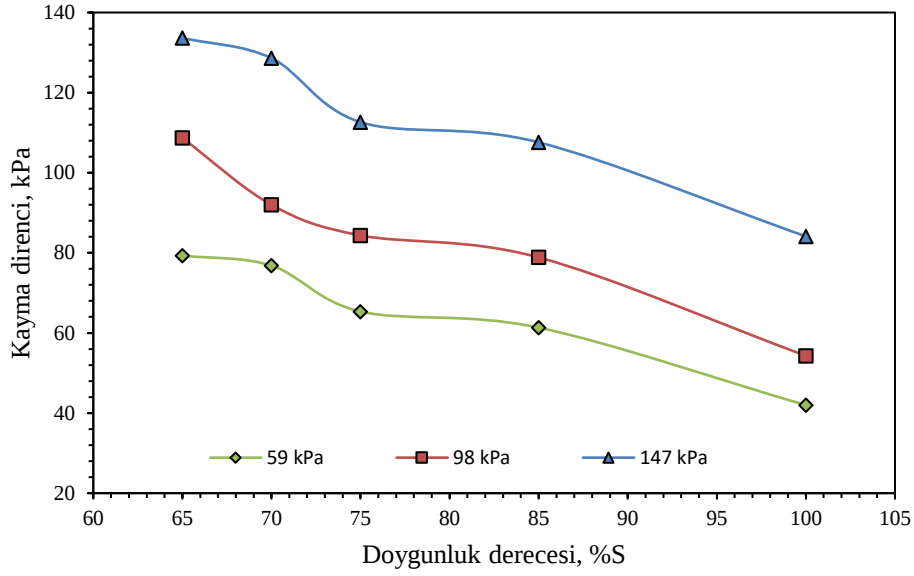
Şekil 5.40. 0,75 boşluk oranında zemin numunelerinin kırılma zarfları.

Şekil 5.38 ile Şekil 5.40' da üç farklı boşluk oranında kesme kutusu testine tabi tutulan silt zeminlerin kayma direncinin hem net normal gerilme hem de doygunluk derecesi ile değişimi gösterilmektedir. Sonuçlar boşluk oranı arttıkça kılcal gerilme değerinin kayma direnci üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir. Tablo 5.1' de kırılma zarflarından elde edilen kayma direnci parametreleri listelenmektedir.

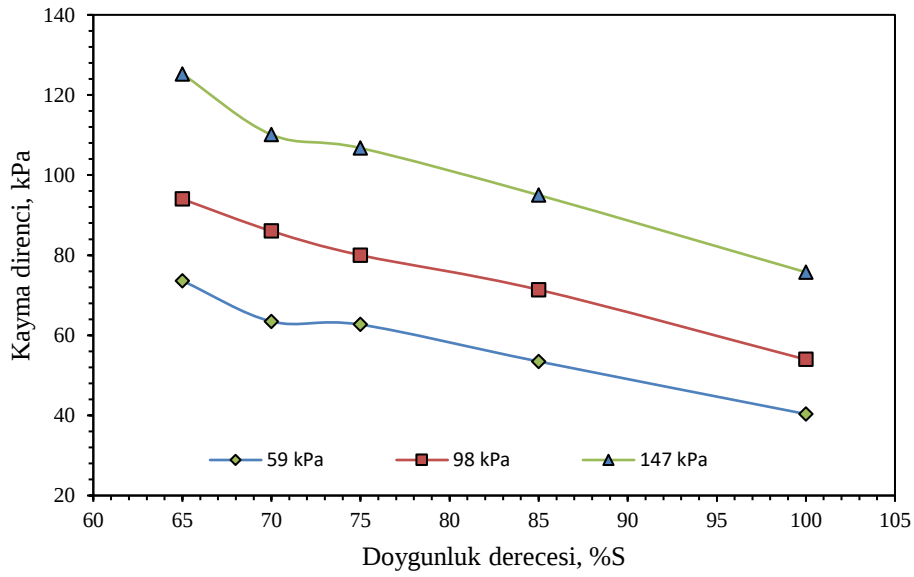
Tablo 5.1. Farklı doygunluk derecesine sahip numunelerinin kayma mukavemeti parametreleri.

Boşluk Oranı	Kayma Direnci Parametreleri	Doygunluk Derecesi, %				
		100	85	75	70	65
0,65	c	5,49	29,08	32,85	38,81	45,12
	ϕ	27,39	27,84	28,32	30,77	31,50
0,7	c	7,21	31,74	39,06	38,95	45,98
	ϕ	24,16	22,56	23,79	26,95	27,31
0,75	c	9,59	30,98	35,13	36,81	41,46
	ϕ	21,09	17,76	18,78	22,38	23,55

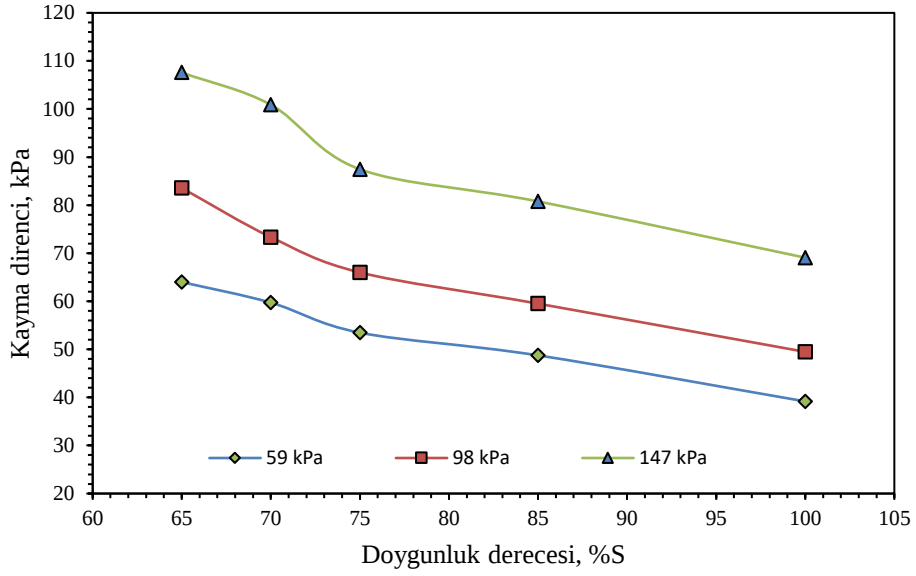
Şekil 5.41 ila Şekil 5.43’ de, üç farklı boşluk oranında kesme kutusu testine tabi tutulan silt zeminlerin kayma direncinin hem net normal gerilme hem de doygunluk derecesi ile değişimini göstermektedir.



Şekil 5.41. Kayma direnci - doygunluk ilişkileri; $e = 0,65$.

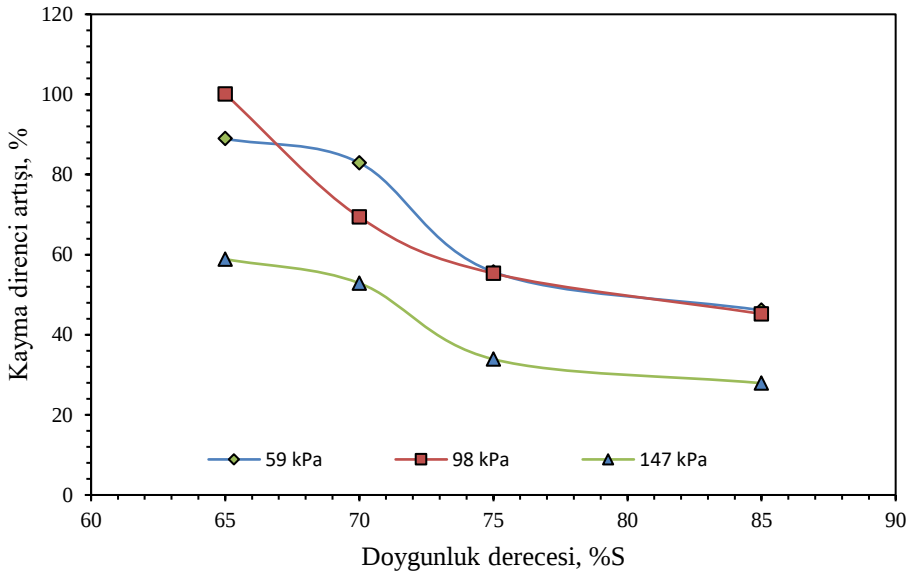


Şekil 5.42. Kayma direnci - doygunluk ilişkileri; $e = 0,70$.

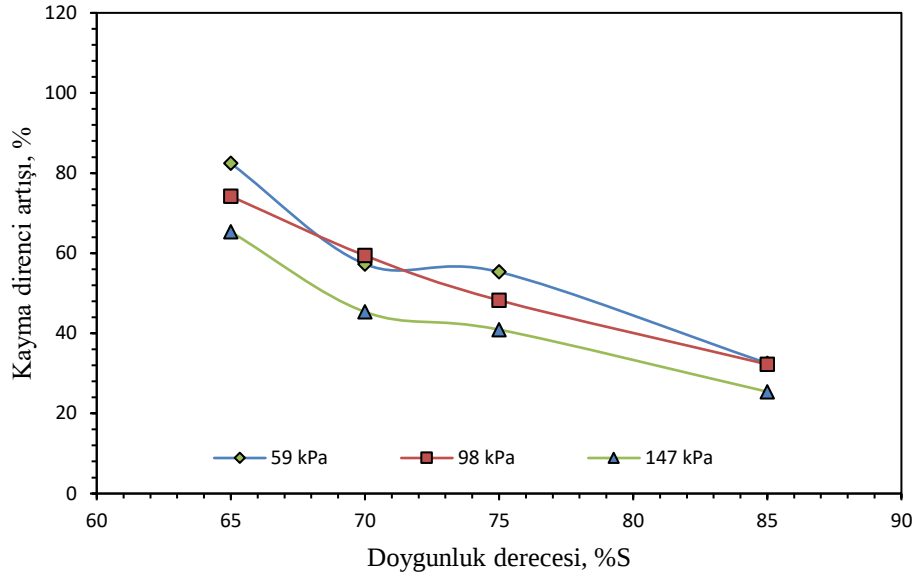


Şekil 5.43. Kayma direnci - doygunluk ilişkileri; $e = 0,75$.

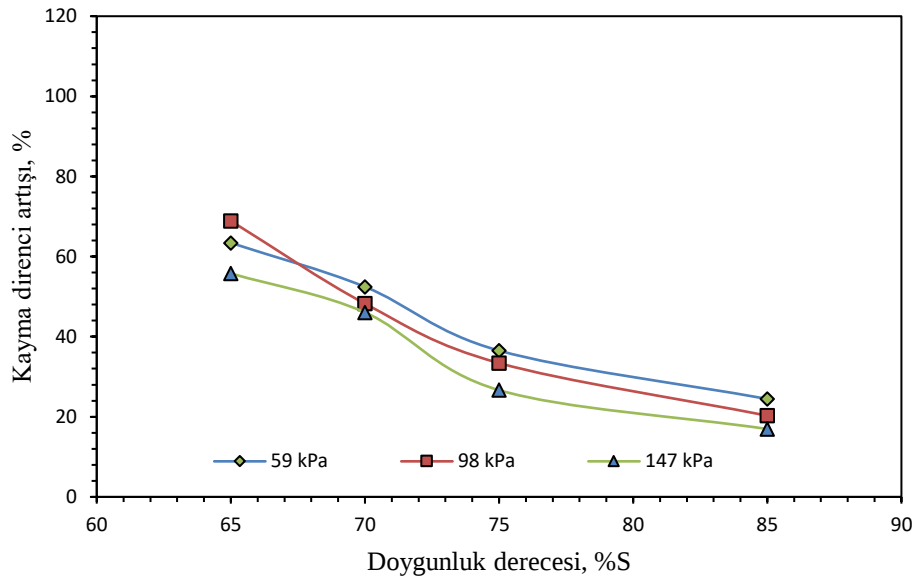
Şekil 5.41 ila Şekil 5.43 grafiklerine bakıldığında net normal gerilme değeri arttıkça doygunluk derecesinin kayma direnci üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir. Bu ilişkinin daha iyi anlaşılması için doymun durumdaki kayma direnci değerleri referans alınarak her bir net normal gerilme değeri için kayma direncindeki artış eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 4.44-46).



Şekil 5.44. Doygunluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,65$.



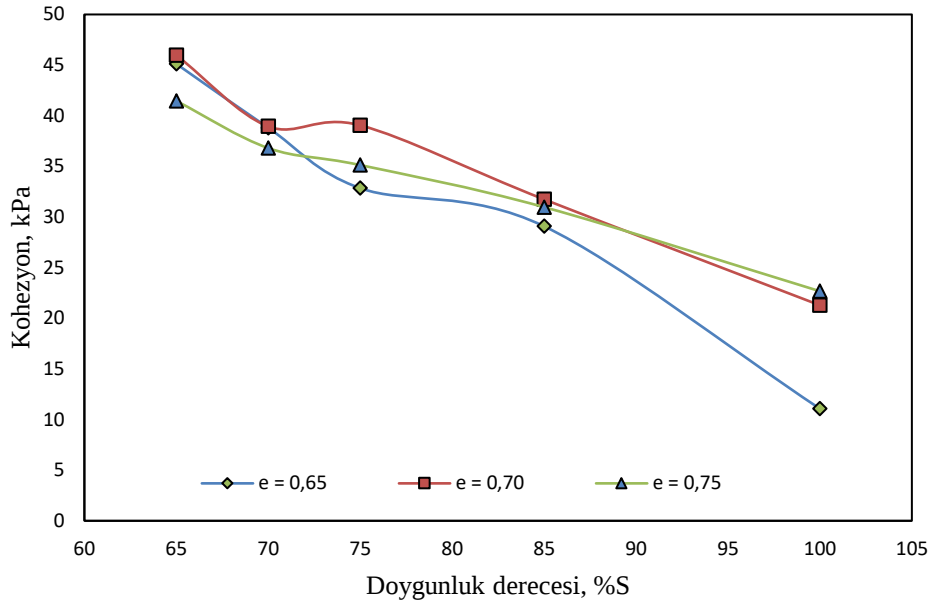
Şekil 5.45. Doygunluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,70$.



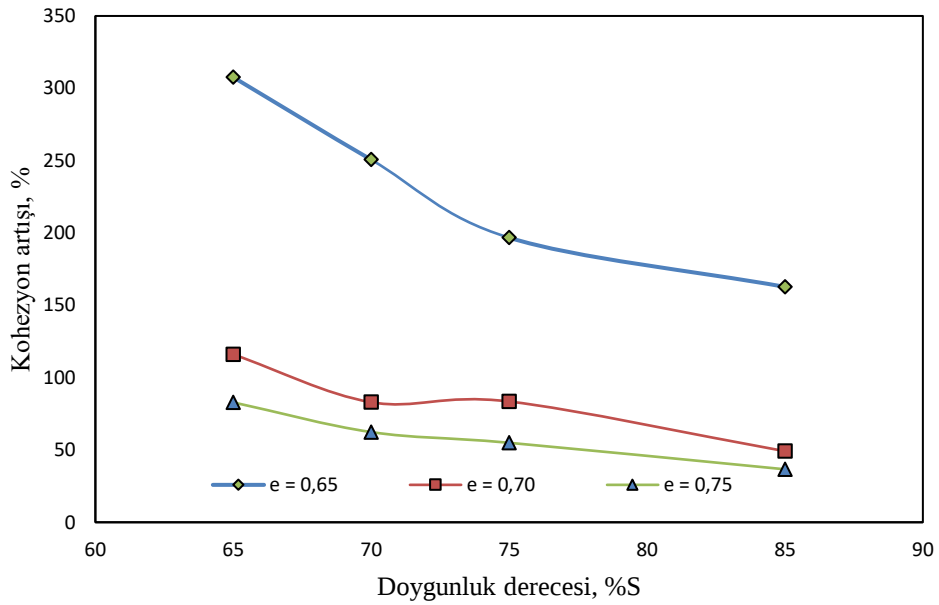
Şekil 5.46. Doygunluk derecesi – kayma direnci artışı ilişkileri; $e = 0,75$.

Şekil 5.44 ila Şekil 5.46.'ya bakıldığında 59 ve 98 kPa normal gerilme altında gerçekleştirilen deneylerde %70 ve %75 doygunluk dereceleri arasında tepe/çukur biçiminde dalgalanmıştır. Bu durum siltli zemin numunesinin kılcal gerilmenin yanı sıra farklı boşluk yapısının kayma direnci üzerinde belirli bir doygunluk derecesinde en güçlü veya en zayıf etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Vanapalli ve Lane, 2002; Wen ve Yan, 2014).

Şekil 5.47 ve Şekil 5.48’de üç farklı boşluk oranında teste tabi tutulan numunelerin kohezyon değerlerinin doygunluk derecesi değişimini göstermektedir.



Şekil 5.47. Doygunluk derecesi – kohezyon değeri ilişkileri.

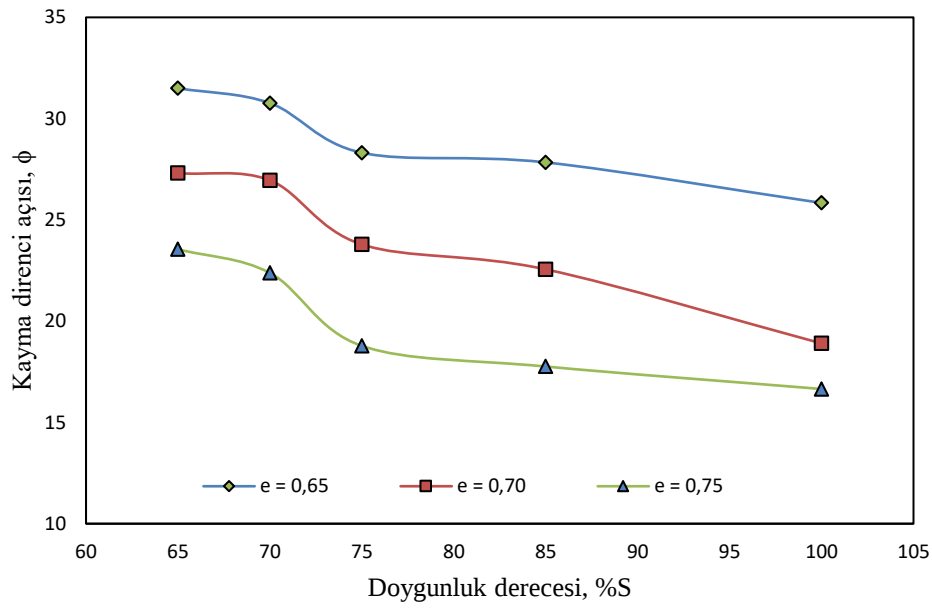


Şekil 5.48. Doygunluk derecesi – kohezyon değeri artışı ilişkileri.

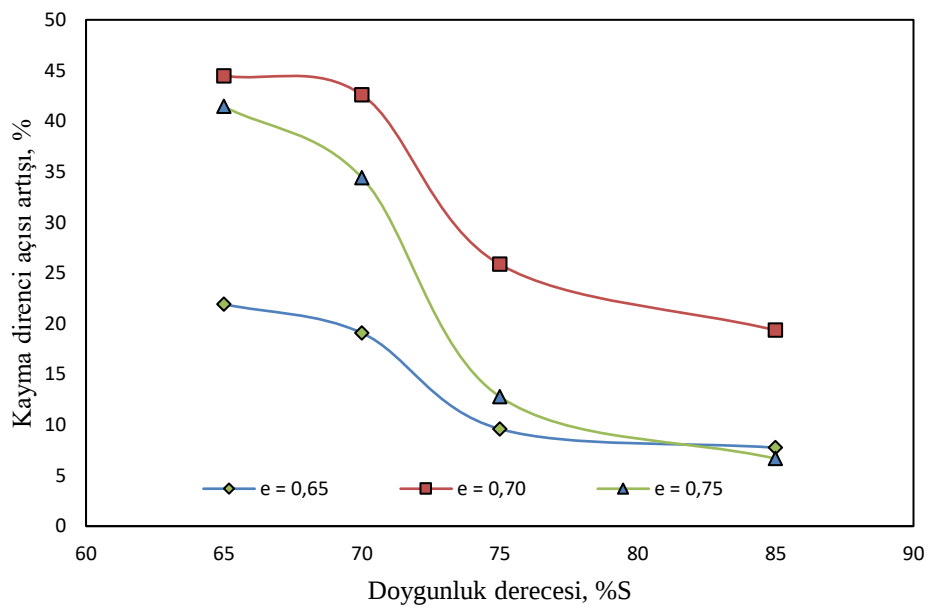
Şekil 5.47 ve Şekil 5.48 grafiklerine bakıldığında kılcal gerilmenin yanı sıra zemin boşluk yapısının DOZ davranışı üzerindeki etkisi görülmektedir. Aynı zeminde boşluk oranı büyüdükçe zeminin davranışının doymuş koşullara benzerliği artmaktadır. Ayrıca kayma direncindeki davranışa benzer olarak kohezyon

değerlerinde de tüm boşluk oranlarında %70 ve %75 doygunluk dereceleri arasında tepe/çukur olarak dalgalanmıştır. Bu durum siltli zemin numunesinin kılcal gerilmenin yanı sıra farklı boşluk yapısının kohezyon üzerinde de belirli bir doygunluk derecesinde en güçlü veya en zayıf etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’ de üç farklı boşluk oranında teste tabi tutulan silt zeminlerin kayma direnci açılarının doygunluk derecesi ile değişimini göstermektedir.



Şekil 5.49. Doygunluk derecesi – kayma direnci açısı ilişkileri.



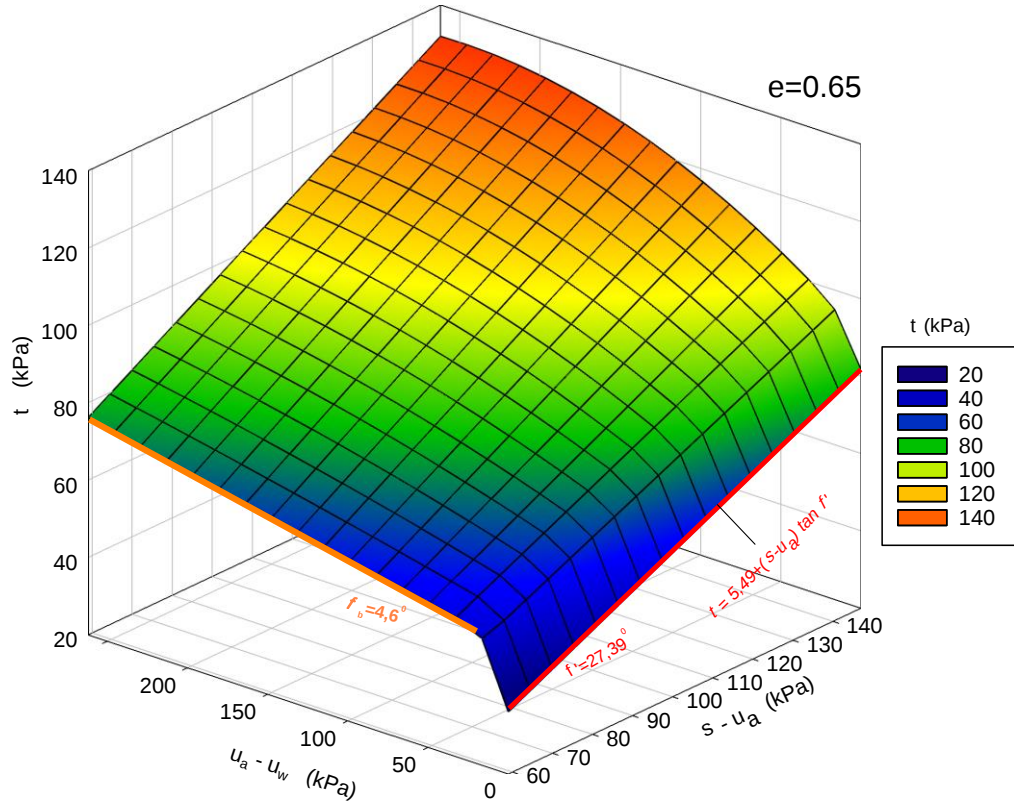
Şekil 5.50. Doygunluk – kayma direnci açısı artışı ilişkileri.

Şekil 5.49 ve Şekil 5.50 grafiklerine bakıldığında kayma direnci açısı açısından da kohezyon davranışına benzer bir davranış sergilendiği görülmektedir. Kılcal gerilme zeminin sadece kohezyonuna katkı sağlamamakta, aynı şekilde kayma direnci açısına da katkı sağlamaktadır. Bu etkinin maksimum olduğu bir boşluk yapısının olduğu anlaşılmaktadır. Bu davranış kırılma zarflarında görülen tepe/ çukur ilişkisi ile de uyum göstermekte, silt numunesinin kılcal gerilmenin yanı sıra belirli bir boşluk oranında kayma direnci açısı üzerinde en güçlü veya en zayıf etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

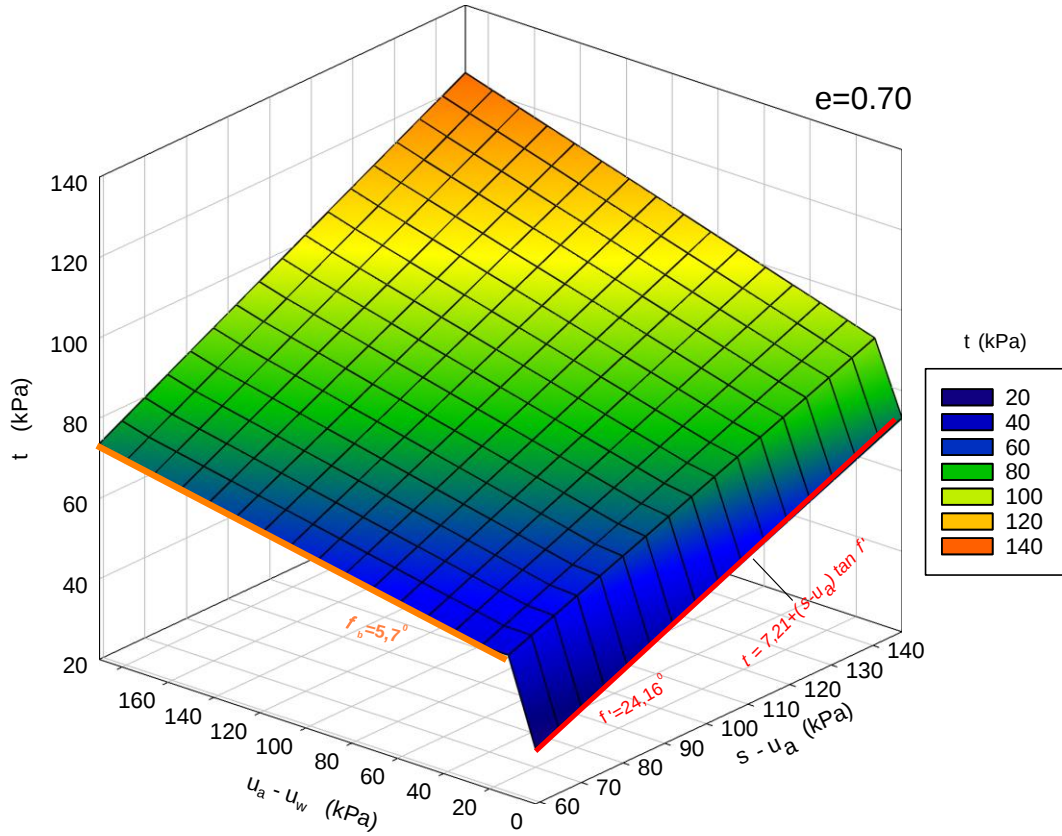
Her bir boşluk oranı için ilgili SWCC grafiklerinden alınan kılcal gerilme değerleri ile %65, %70, %75, %85 ve 100% doygunluk derecelerinde yapılmış olan kesme kutusu deneyi sonuçları birleştirilerek oluşturulan kılcal gerilme-normal gerilme (net gerilme)-kayma direnci grafikleri (Şekil 4.51-53) çizilmiştir. Bu grafikler üzerinden hesaplanan ϕ^b değerleri Tablo 5.2’ de sunulmuştur. Tablo 5.2 incelendiğinde üç farklı boşluk oranı için düşük net gerilmelerde daha düşük ϕ^b değerlerinin hesaplandığı görülmektedir.

Tablo 5.2. Kılcal gerilmenin kayma direncine katkısını gösteren açılar (ϕ^b)

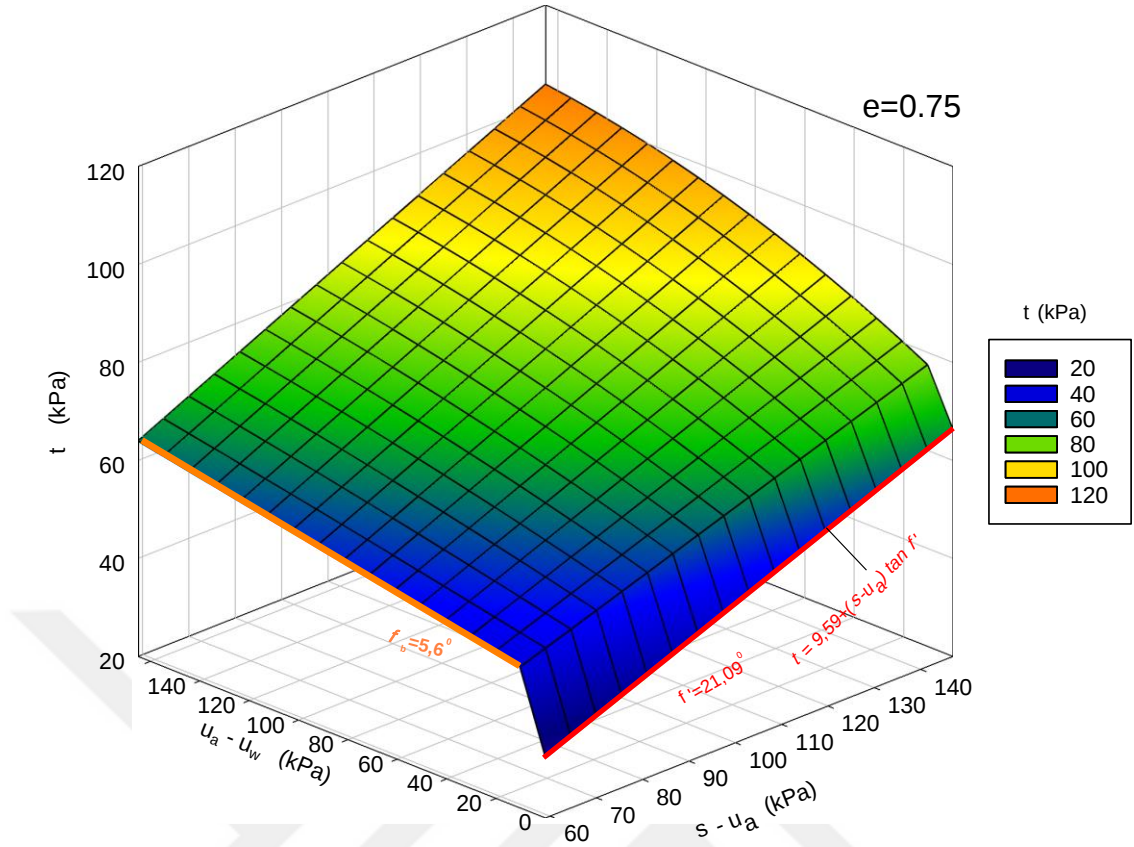
Boşluk Oranı	Net Gerilme ($\sigma_n - u_a$) kPa	ϕ^b	Ortalama ϕ^b
0,65	59	4,6	6,5
	98	7,6	
	147	7,2	
0,7	59	5,7	7,3
	98	7,1	
	147	9,0	
0,75	59	5,6	8,1
	98	8,8	
	147	10,0	



Şekil 5.51. $e = 0,65$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.



Şekil 5.52. $e = 0,70$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.

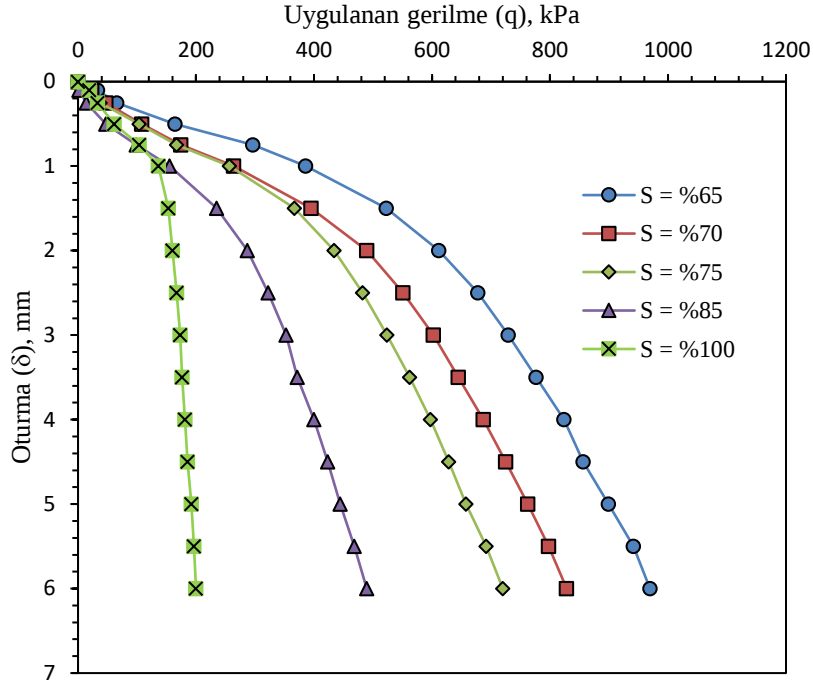


Şekil 5.53. $e = 0,75$ için kılcal gerilme-net normal gerilme-kayma gerilme ilişkisi.

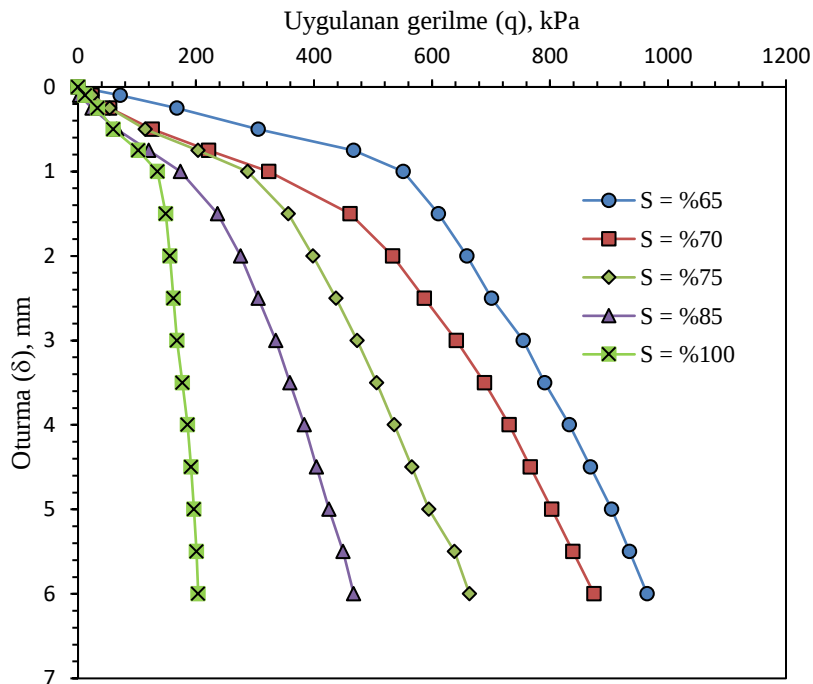
5.4. Temel Taşıma Kapasitesi Deneyleri

Drenajsız yükleme koşulları altında doymun olmayan zeminlere oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü, statik olarak sıkıştırılmış zeminlerle doldurulmuş silindirik tank içinde gerçekleştirilen model temel testleriyle incelenmiştir. Yükleme sürecinde numunenin emme değerinde değişiklik olmaması için model temeller nispeten daha hızlı bir şekilde (1.15 mm/dk) yüklenmiştir. Kare ve dairesel yüzeysel temel modelleri, taşıma kapasitesini belirlemek için yenilme koşullarına kadar yüklenmiştir. Kullanılan cam elyaf takviyeli polyester tankın boyutları 310 mm çapında, 250 mm yüksekliğinde ve 10,2 mm kalınlığındadır. Bu çalışmada en büyük temel genişliği 50 mm olan model temeller kullanılmıştır. Seçilen model kalıbın boyutları, uygulanan yükler nedeniyle plastik kalıbın sınırları üzerindeki gerilmelerin ihmal edilebilir bir etkisi olacak şekilde yeterince büyüktür (min 6 kat). Model temel yüklemeleri üç eksenli bir yükleme çerçevesinden yararlanarak gerçekleştirilmiştir. Model temellerin düşey yer değiştirmeleri, deformasyon saatleri kullanılarak, yükler ise bir yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Oturmalar temel genişliğinin yüzde 20'sine ulaştığında testler sonlandırılmıştır. Test sonuçları literature uygun şekilde

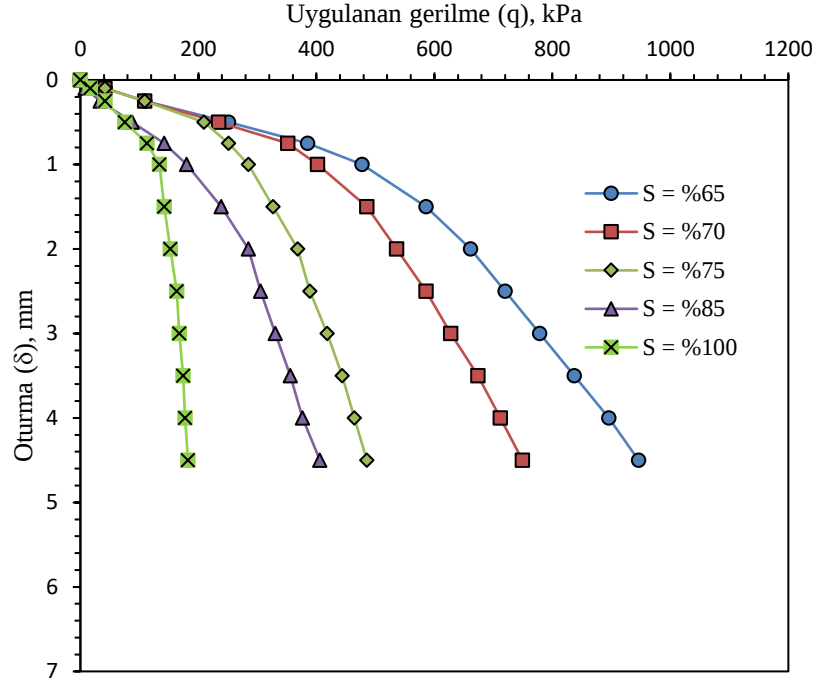
temel genişliğinin yüzde 10'nuna denk oturmaya karşılık gelen gerilmelere göre incelenmiştir. Şekil 5.54. ile Şekil 5.57. arasındaki grafiklerde 0,65 boşluk oranına sahip numunelerin gerilme – oturma ilişkileri gösterilmektedir.



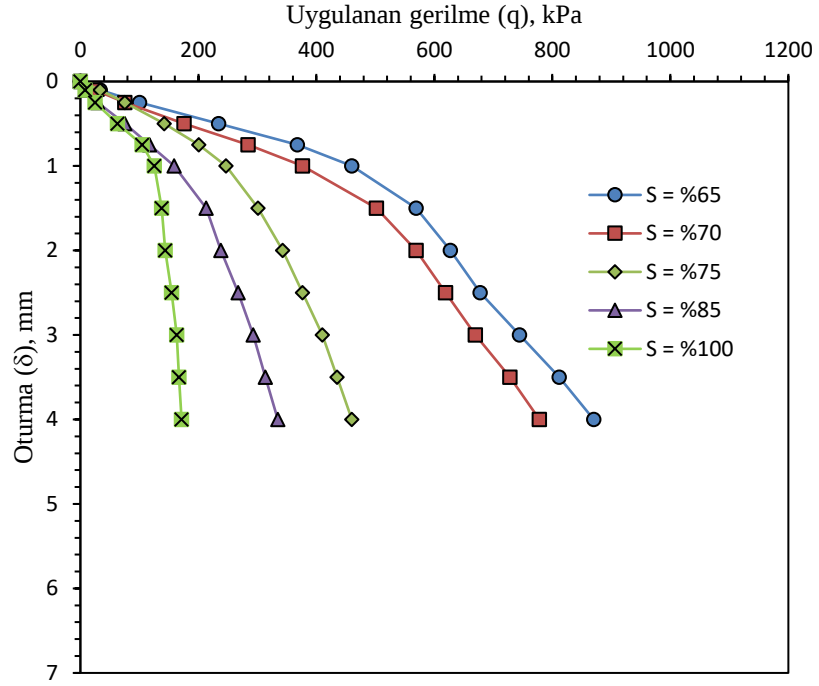
Şekil 5.54. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 50 x 50 mm kare model temel.



Şekil 5.55. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 50 mm daire model temel



Şekil 5.56. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 42,3 mm daire model temel

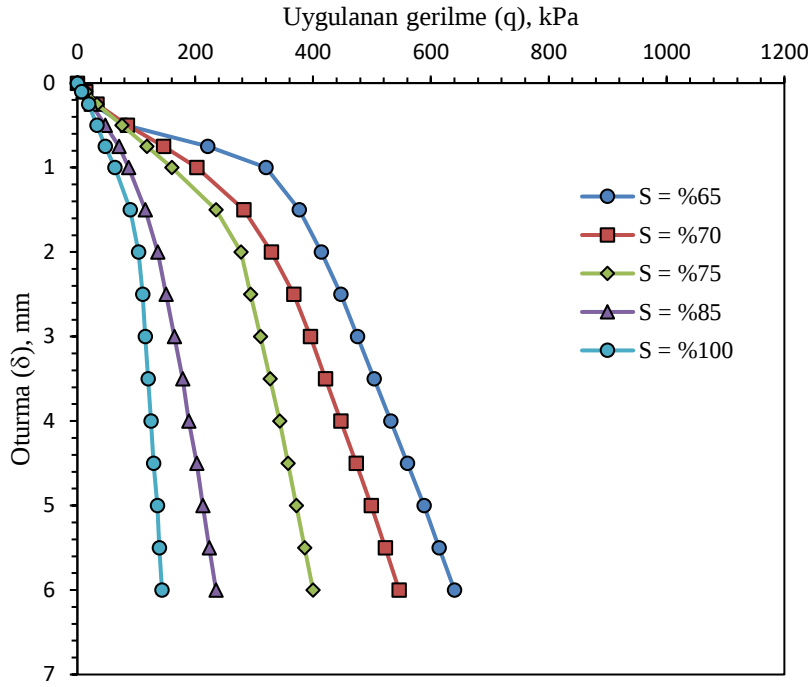


Şekil 5.57. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,65$ ve 37,5 x 37,5 mm kare model temel

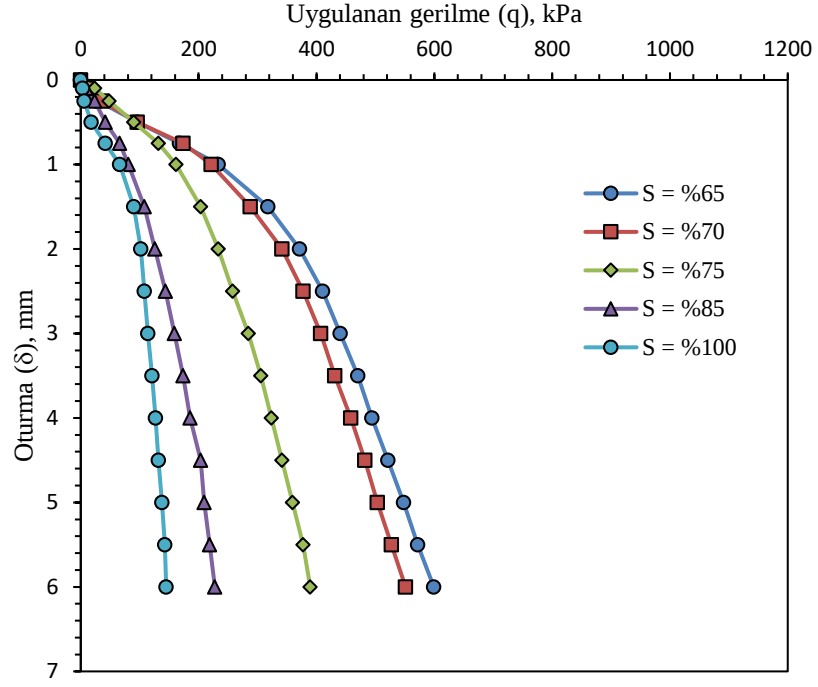
Şekil 5.56 ile Şekil 5.57’de aynı alana sahip iki farklı temelin gerilme–oturma grafikleri gösterilmektedir. Aynı taban alanına sahip olmalarına rağmen ulaşılan gerilme değerlerinin farklılığı şekil etkisine işaret etmektedir. Doygun koşullarda

gözlemlenen şekil etkisi DOZ koşullarda da belirmiştir. İstatiksel olarak incelendiğinde şekil faktörünün taşıma kapasitesine kare temel lehine %3 ila %4 arasında bir etkisi görülmektedir.

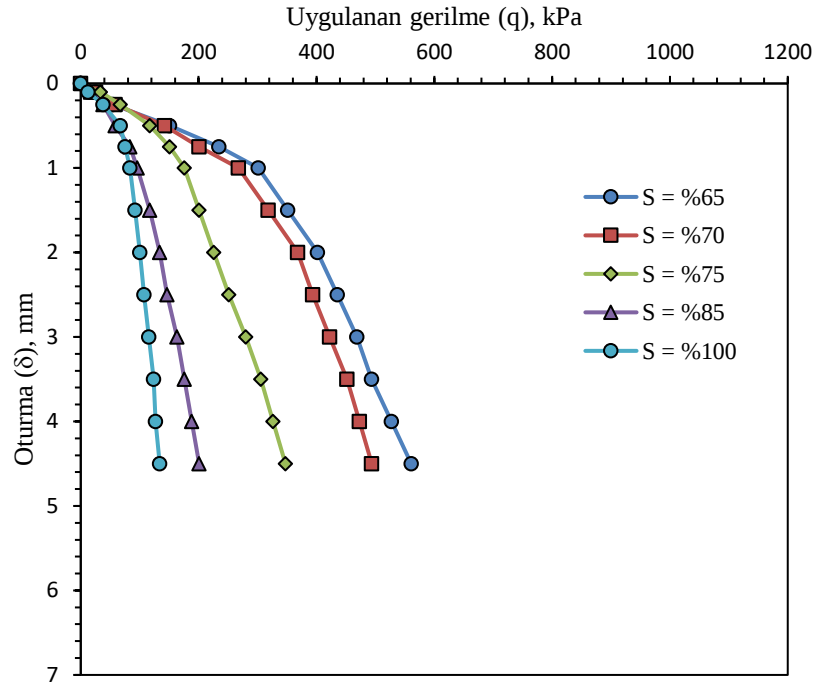
Şekil 5.58. ila Şekil 5.61. arasındaki grafiklerde 0,70 boşluk oranına sahip numunelerin gerilme–oturma ilişkileri gösterilmektedir.



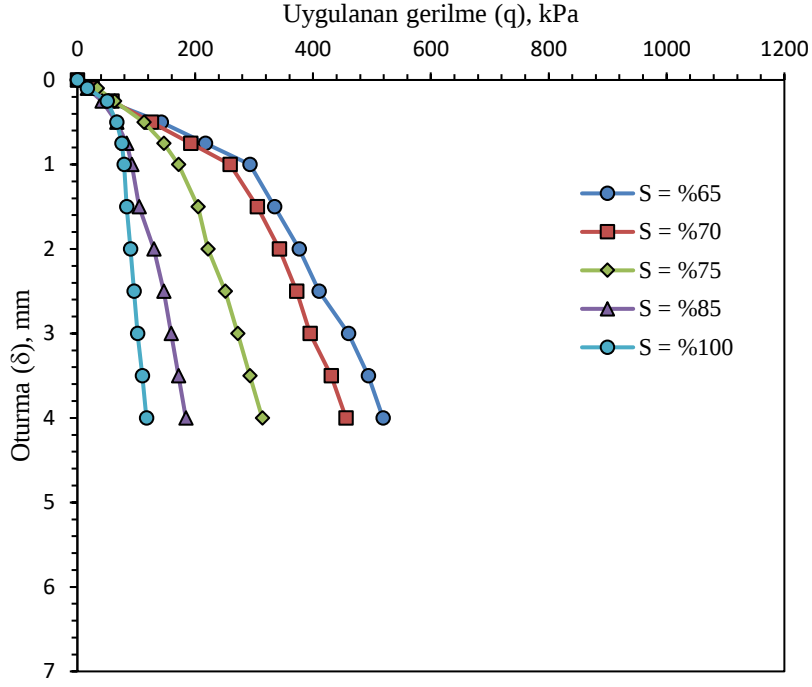
Şekil 5.58. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 50 x 50 mm kare model temel.



Şekil 5.59. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 50 mm daire model temel.



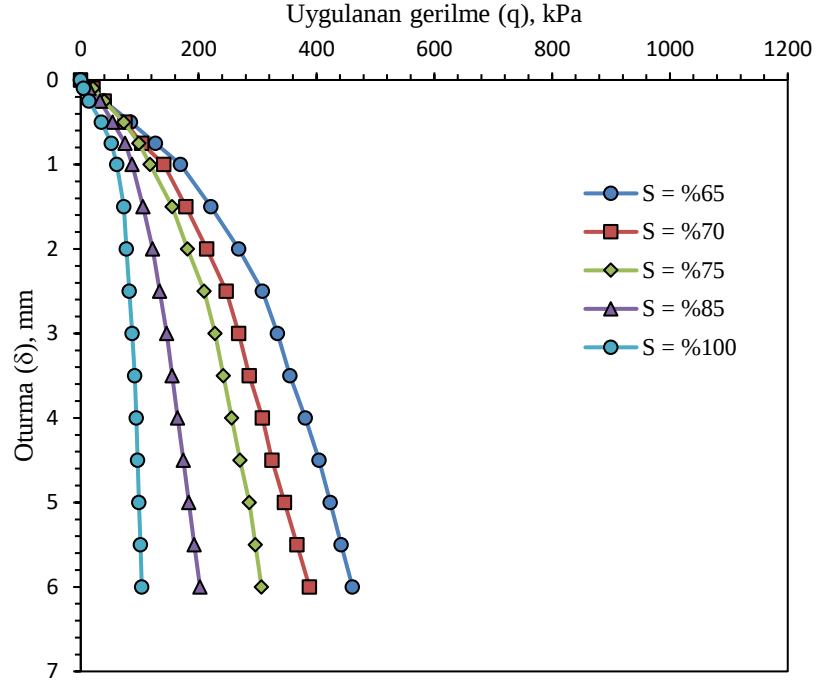
Şekil 5.60. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve 42,3 mm daire model temel.



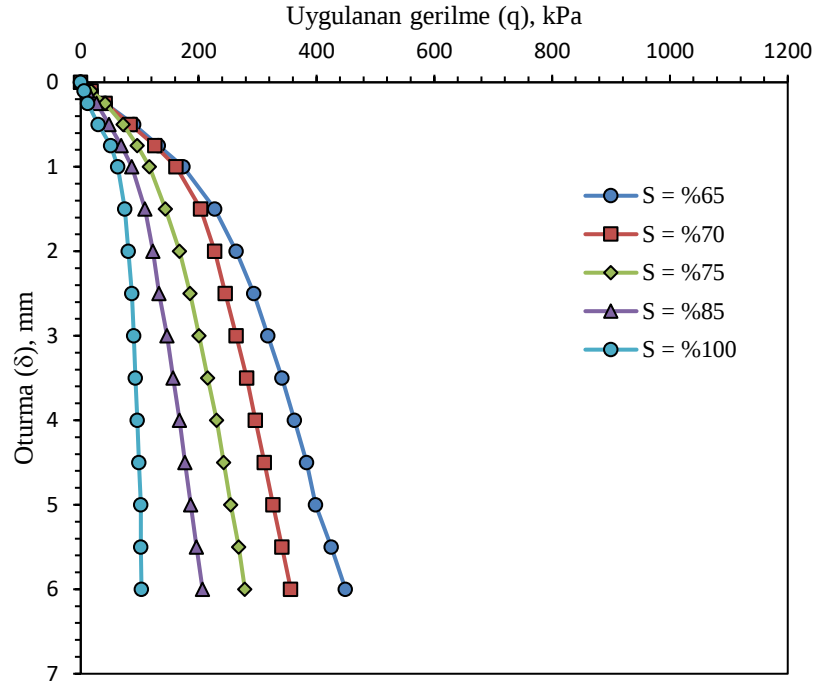
Şekil 5.61. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,70$ ve $37,5 \times 37,5$ mm kare model temel.

Şekil 5.58 ile Şekil 5.61 arasındaki grafiklere bakıldığında $0,70$ boşluk oranında ölçülen taşıma gücü değerleri $0,65$ boşluk oranında ölçülen taşıma gücü değerlerine göre göre tüm temel tipi ve zemin doygunluk derecesi seviyelerinde daha düşüktür. Taşıma gücü değerinde kılcal gerilme kadar boşluk oranının da etkili olduğu görülmektedir. $0,65$ boşluk oranındaki sonuçlara benzer olarak model temel boyut etkisi gözlemlenmiştir.

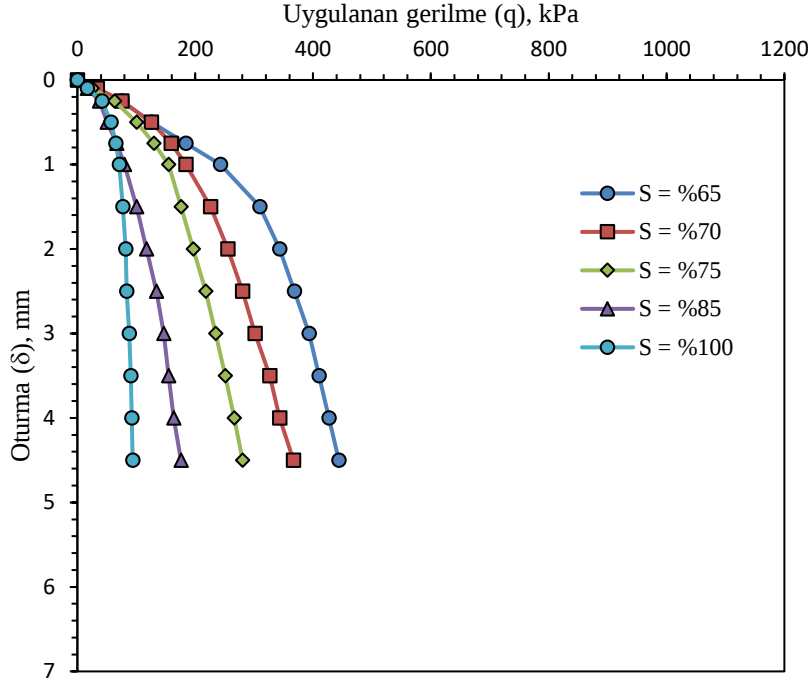
Şekil 5.62 ile Şekil 5.65 arasındaki grafiklerde $0,75$ boşluk oranına sahip numunelerin gerilme–oturma ilişkileri gösterilmektedir.



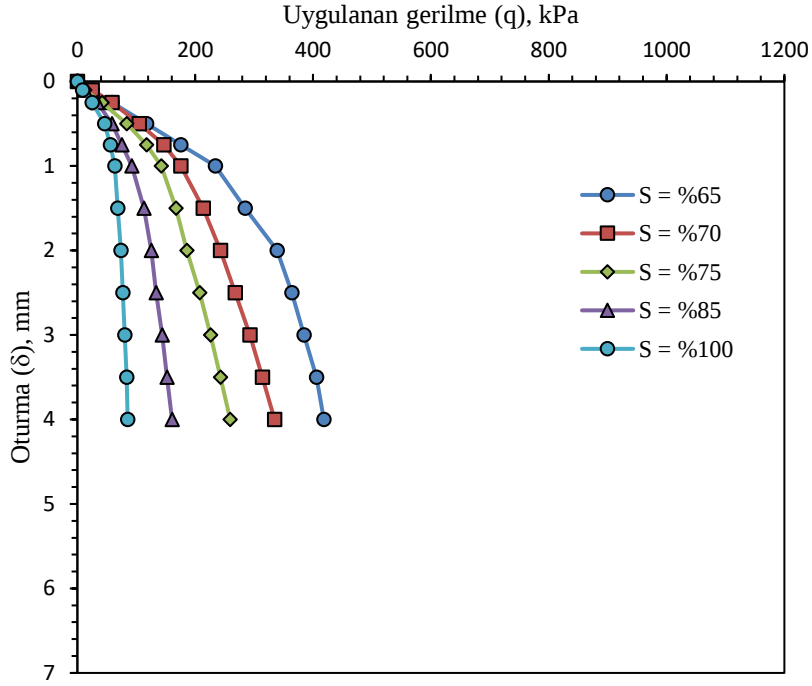
Şekil 5.62. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 50×50 mm kare model temel.



Şekil 5.63. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 50 mm daire model temel.



Şekil 5.64. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 42,3 mm daire model temel.



Şekil 5.65. Taşıma kapasitesi test sonuçları; $e = 0,75$ ve 37,5 x 37,5 mm kare model temel.

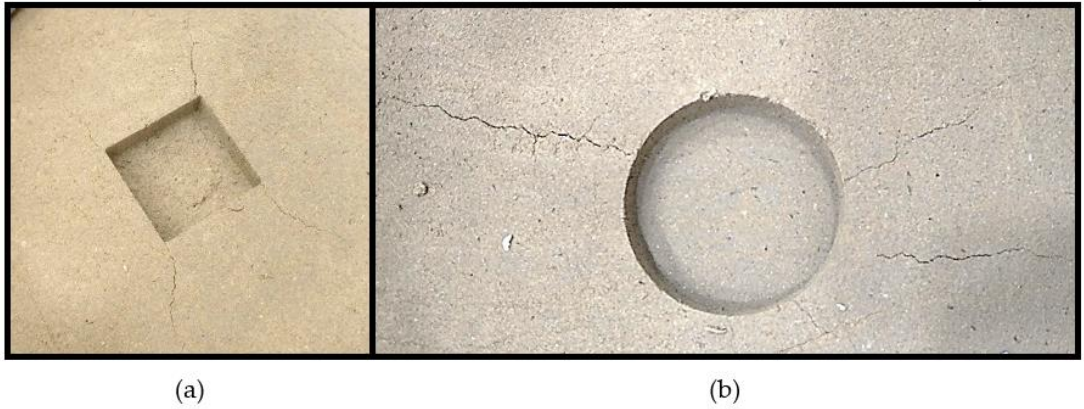
Şekil 5.62 ila Şekil 5.65 arasındaki grafiklere bakıldığında 0,75 boşluk oranında ölçülen taşıma kapasiteleri 0,65 boşluk oranında ölçülen taşıma kapasitelerine göre tüm temel tipi ve doygunluk seviyelerinde çok daha düşüktür. DOZ üzerine oturan

temellerin taşıma gücü değerinde kılcal gerilme kadar boşluk oranının da etkili olduğu anlaşılmaktadır. 0,65 ve 0,70 boşluk oranlarındaki sonuçlara benzer olarak model temel boyut etkisi gözlemlenmiştir.

0,65, 0,70 ve 0,75 boşluk oranlarında hazırlanan hem doygun koşullarda hem de doygun olmayan koşullarda silt numunesi için model temel test sonuçları Şekil 5.54 ila Şekil 5.65 arasında gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, eğrilerde net bir yenilme noktası gözlemlenmemektedir.

Ayrıca model temel testlerinden alınan sonuçlar ve deney sonrası zeminin aldığı durumu (Şekil 5.66) zımbalama göçmesi türü yenilmenin gerçekleştiğini göstermektedir. Vesic (1973) tarafından zımbalama yenilme durumu;

- I. İyi tanımlanmış bir kırılmanın gözlemlenmediği,
- II. Yükün uygulandığı alan dışında zeminde hiçbir kabarmanın gözlenmediği ve
- III. Doğrudan temelin altındaki zeminin sıkışması ve temel çevresinde dikey kaymasıyla oluştuğu tanımlanmaktadır.



Şekil 5.66. Model yükleme deney sonrası zemin oturması ve model temel etrafındaki çatlaklar: (a) 50 x 50 mm kare temel, (b) 50 mm daire temel

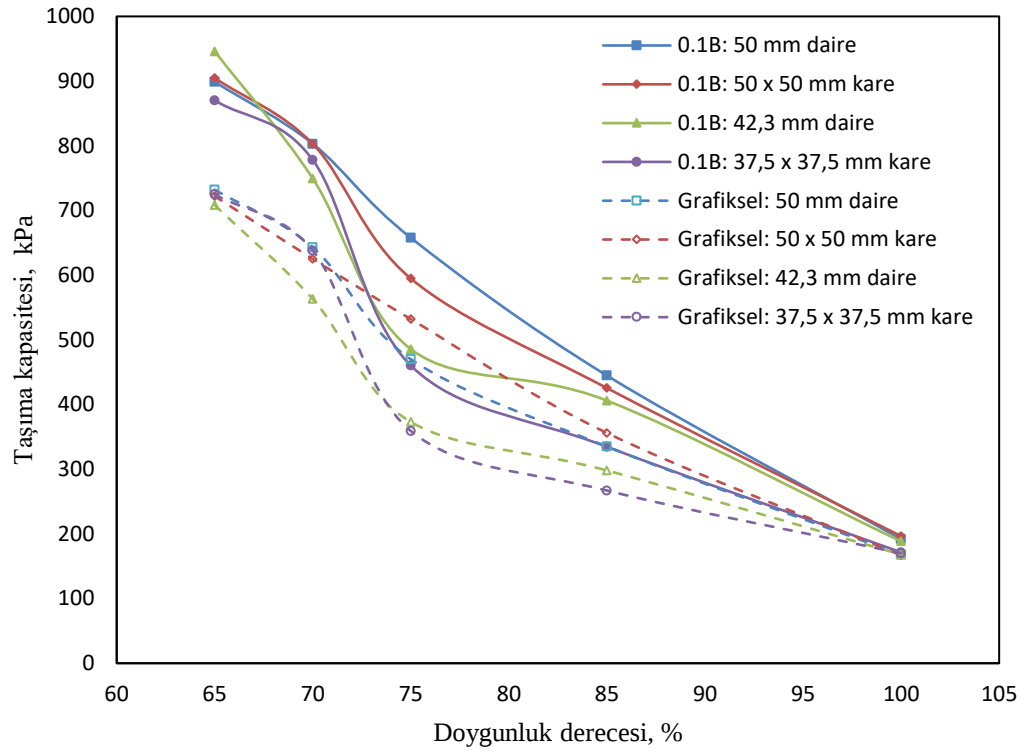
Doruk direncin gözlenmediği bu gibi durumlarda temelin taşıma kapasitesi ASTM D1194-03'e göre belirlenmektedir. Temel taşıma kapasitesi, ASTM D1194-03 tarafından temel genişliğinin onda birine (0.1B) eşit bir gerilme değeri olarak tanımlanır. Ayrıca, Steensen-Bach ve ark. (1987) ve Costa ve ark. (2003) yükleme eğrileri profilinin elastik ve plastik kısımlarını genişleterek taşıma kapasitesini grafiksel olarak belirlemişlerdir. Taşıma kapasite değerleri hem grafiksel yöntemle (iki doğrusal bölümün kesişme noktasıyla) hem de 0.1B oturma değerine karşılık

gelen gerilme değeriyle hesaplanabilir. Bu literatür bilgisi göz önüne alınarak bundan sonraki değerlendirmelerde 0.1B'ye karşılık gelen temel taşıma gücü büyüklükleri dikkate alınmıştır. Tablo 5.3 deneysel veriler yardımıyla belirlenen taşıma gücü değerlerini göstermektedir.

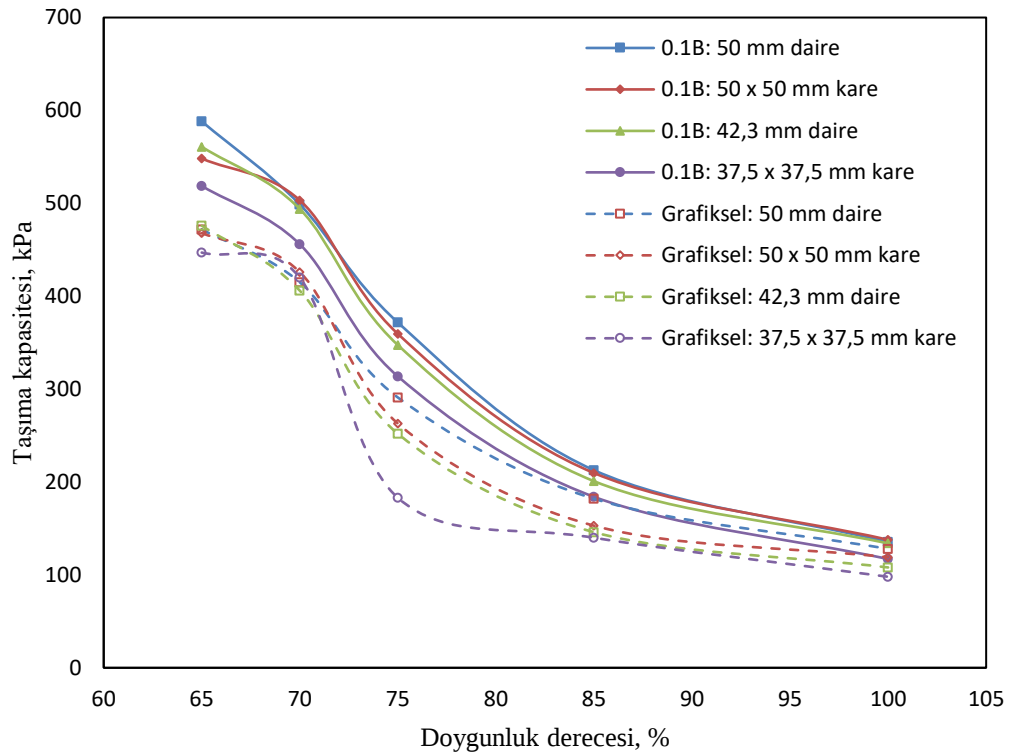
Tablo 5.3. Model deney taşıma kapasiteleri

Boşluk Oranı	Doygunluk Derecesi %	Taşıma Kapasitesi							
		0.1B Yöntemi				Grafiksel Yöntem			
		50 x 50 mm kare	50 mm daire	42,3 mm daire	37,5 x 37,5 mm kare	50 x 50 mm kare	50 mm daire	42,3 mm daire	37,5 x 37,5 mm kare
e = 0,65	65	904,8	898,8	946,0	886,8	620	648	630	570
	70	773,0	762,4	749,3	778,1	560	550	500	510
	75	594,7	657,7	485,6	460,1	410	470	345	330
	85	425,4	444,7	406,0	334,6	290	300	245	225
	100	196,5	192,0	188,4	171,5	155	150	150	150
e = 0,70	65	548,3	588,3	560,9	518,7	375	385	365	360
	70	503,3	498,8	493,9	460,1	355	345	345	320
	75	359,5	371,8	347,4	313,7	250	280	200	180
	85	209,7	212,7	200,9	184,1	160	140	120	100
	100	137,8	135,5	133,9	117,1	105	105	95	85
e = 0,75	65	398,5	423,5	443,7	476,9	305	320	335	345
	70	326,6	345,9	366,7	334,6	215	210	220	210
	75	254,7	286,1	280,5	259,4	165	180	160	155
	85	186,9	186,9	175,8	160,6	112	110	105	108
	100	98,9	98,8	938	85,3	78	80	80	75

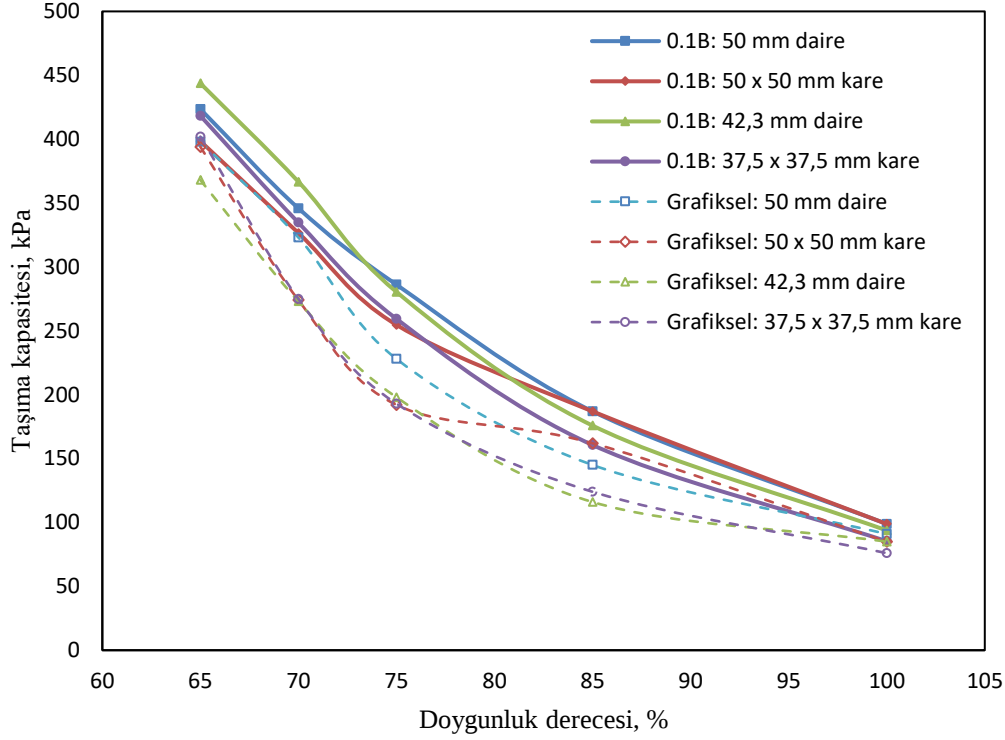
Şekil 5.67 ila Şekil 5.69 arasındaki grafiklerde hem 0.1B yöntemi hem de grafiksel yöntemle belirlenen taşıma kapasitesi değerlerinin doymunluk derecesiyle değışimi gösterilmektedir.



Şekil 5.67. Taşıma kapasitesi - doyunluk derecesi ilişkileri; $e = 0,65$.



Şekil 5.68. Taşıma kapasitesi - doyunluk derecesleri ilişkileri; $e = 0,70$.



Şekil 5.69. Taşıma kapasitesi - doymunluk derecesi ilişkileri; $e = 0,75$.

Taşıma kapasitesi – doymunluk derecesi eğrilerine bakıldığında %70 ile %75 doymunluklarda kılcal gerilmenin etkisi kayma direncine benzer şekilde tepe/çukur formunda belirlemektedir. Kayma direnci değişiminde olduğu gibi taşıma kapasitesi için de belirli bir doymunluk derecesinde en güçlü veya en zayıf etkinin var olduğu söylenilebilir.

Bu çalışmada, Bölüm 3’de açıklanan toplam gerilme analizi felsefesi benimsenerek siltli zeminler için temel taşıma kapasitesi, serbest baasma testlerinden (Tablo 5-4) elde edilen kayma direnci ve zeminin doymunluğuna bağlı bir taşıma kapasitesi uydurma parametresi (S^{Ψ}) ile tahmin edilebilecek bir ilişki önerilmiştir (Denklem 5.1).

$$q_{ult(unsat)} = \left[\frac{q_{u(unsat)}}{2} \right] * \left[1 + 0.2 \frac{B}{L} \right] * N_{cs} * S^{\Psi} \quad (5.1)$$

Yapılan deneysel çalışmalar sonunda silt zemin (%72 oranında siltten oluşan zemin) üzerine yapılan model testleri temel taşıma kapasitesinin literatürde yer alan kum veya kil zeminlerin üzerine oturan temellere göre farklı olduğunu göstermiştir. Bilindiği gibi siltlerin davranışı ne killere ne de kumlara tam olarak benzememekte

ne de iki komşu zemin cinsinin tepkilerinin ortalaması şeklinde olmaktadır. Silt zeminler yükleme durumunda ne kil zeminler gibi tam manasıyla drenajsız koşullara ne de kumlu zeminler gibi drenajlı koşullara sahip olmaktadır. Elde edilen sonuçlar ayrıca Oloo ve ark. (1997), Oh ve Vanapalli (2013) ve Vanapalli ve Muhammed (2007) tarafından doymun olmayan zeminlerin temel taşıma kapasitesinin tahmini için önerilen denklemler ile karşılaştırılmıştır.

Model taşıma kapasitesi testleri yapıldıktan sonra sıkıştırılmış zemin numunelerinden 50 mm çapında paslanmaz çelik ince cidarlı borular kullanılarak birer adet numune alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde toplam 96 adet UC testi yapılmıştır. Benzer boşluk oranı ve doymunluk derecesinde sınıflandırıldığında 12 farklı denemenin ortalama değerleri Tablo 5.4'de gösterilmektedir.

Tablo 5.4. Farklı doymunluk derecesi ve boşluk oranına sahip numunelerin ortalama serbest basınç deney sonuçları.

Doymunluk Derecesi %	e=0,65	e=0,70	e=0,75
	q_u (kPa)	q_u (kPa)	q_u (kPa)
65	116,05	71,88	54,31
70	94,68	65,19	37,99
75	75,58	58,89	31,23
85	68,2	36,57	29,31

Tablo 5.5, tüm model temeller için ölçülen taşıma kapasitesi değerleri ve modifiye toplam gerilme yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen değerleri (yani Denklem 3.13 ve Denklem 5.1) ile modifiye efektif gerilme yaklaşımını kullanılarak tahmin edilen değerleri (Yani Denklem 3.11 ve Denklem 3.14) özetlemektedir. Bu tez kapsamında önerilen denklem (Denklem 5.1) kullanılarak geri hesaplanan ortalama S^Ψ değerleri, taşıma kapasitesi değerleri 0.1B oturma ve grafik yöntemler kullanılarak belirlendiğinde sırasıyla -2,89 ve -1,33 olarak belirlenmiştir. Tablo 5.5' ten anlaşılacağı üzere geri hesaplanan S^Ψ değerleriyle hesaplanan taşıma gücü değerleri ile ölçülen taşıma gücü değerleri arasında fark küçükken Denklem 3.11 ile hesaplanan [yani, Oh ve Vanapalli (2013) tarafından Skempton (1948) modifiye edilerek önerilen $N_{(c(unsat))} = 5.14$ değeri kullanılarak tahmin edilen] taşıma gücü değeri arasındaki fark büyüktür.

Modifiye efektif gerilme yaklaşımı kullanarak temel taşıma kapasitesini tahmin eden modellerden olan Denklem 3.14 hem grafiksel yöntem hem de 0.1B oturmaya

karşılık gelen taşıma gücü değerlerine kıyasla çok yüksek taşıma gücü değerleri tahmin etmiştir. Buna rağmen c' , ϕ' ve ϕ^b değerleri ile kılcal emme değerlerini kullanarak hesaplama yapan Denklem 3.13 ile tahmin edilen taşıma gücü değerleri, 0.1B metoduna göre hesaplanan taşıma gücü değerlerine göre %85, %75 ve %70 doygunluğa eş değer kılcal emme değerleri için güvenilir sonuçlar verirken kılcal emme değerinin yüksek olduğu değerlerde model deney sonuçlarına göre çok yüksek değerler vermiştir. Bunun temel nedeni Oloo ve ark. (1997)' in önerdiği modelin doygunluktan kalıntı su muhtevası değerine yaklaştıkça ulaşılan yüksek kılcal emme değerlerinden sonra da kayma direnci artışını hesaba katmış olmasıdır. Denklem 3.13 ile tahmin edilen taşıma gücü değerleri ile model deneyleri verisinden grafiksel yöntem ile hesaplanan taşıma gücü değerleri arasında çok büyük farklar bulunduğu görülmektedir. Ayrıca Oloo ve ark. (1997)' nin önerilen denklem (Denklem 5.1) ile elde edilen sonuçlarla deney verisi arasında da önemli farklar bulunmaktadır.

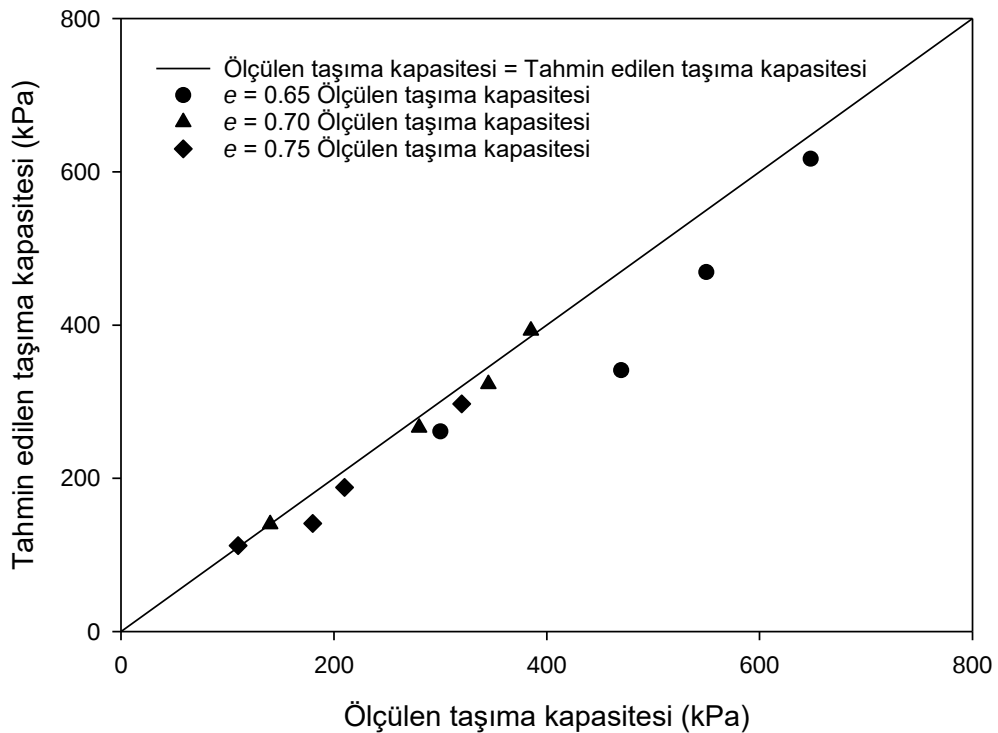
Tablo 5.5. Model test sonuçları ve tahmini taşıma kapasitesi değerleri.

Model temel	Boşluk oranı	Doygunluk dercesi %	Su içeriği %	Kılcal gerilme kPa	Oloo et al. 1997	Vanapalli ve Muhammed	Oh ve Vanapalli 2013	0.1B Metot (Deneyssel)	Grafiksel. Metot (Deneyssel.)	Taşıma Kapasitesi (Denklemler 5.1)	Ψ 0.1B Metot	Ψ Grafiksel. Metot
50 mm daire	0,651	64,2	15,69	284,1	1300	1501	348	899	648	826	-2,89	-1,33
	0,647	70,1	16,90	165,96	939	1318	292	762	550	597		
	0,648	74,4	18,00	91,90	712	1121	233	658	470	415		
	0,656	83,8	20,41	21,54	497	767	210	445	300	291		
	0,696	64,3	16,70	229,09	983	934	222	588	385	526	-2,89	-1,33
	0,699	68,6	17,80	141,25	752	857	201	499	345	411		
	0,701	74,5	19,40	63,10	547	679	182	372	280	323		
	0,702	83,2	21,70	15,61	423	521	113	213	140	156		
	0,749	64,7	17,99	157,28	645	587	167	424	320	397	-2,89	-1,33
	0,75	70,5	19,67	82,54	484	522	117	346	210	240		
	0,756	75,5	21,19	28,18	367	426	96	255	180	171		
	0,75	84,4	23,51	14,02	336	413	90	187	110	125		
50 mm x 50 mm kare	0,652	64,8	15,70	284,01	1294	1255	348	905	625	826	-2,89	-1,33
	0,65	69,4	16,80	174,16	958	1136	292	773	560	597		
	0,655	73,9	18,00	91,90	706	946	233	595	410	415		
	0,647	84,1	20,22	23,99	498	567	210	425	290	291		
	0,699	63,7	16,60	241,73	1016	890	222	548	375	526	-2,89	-1,33
	0,701	68,4	17,80	141,25	752	812	201	503	355	411		
	0,706	75,2	19,70	56,67	531	663	182	360	250	323		
	0,706	83,6	21,90	13,28	417	485	113	210	160	156		
	0,751	64,7	18,05	149,05	620	538	167	398	305	397	-2,89	-1,33
	0,749	70,4	19,63	82,54	477	502	117	327	215	240		
	0,748	74,4	21,19	28,18	360	440	96	250	165	171		
	0,751	82,6	23,04	18,38	338	410	90	187	112	125		

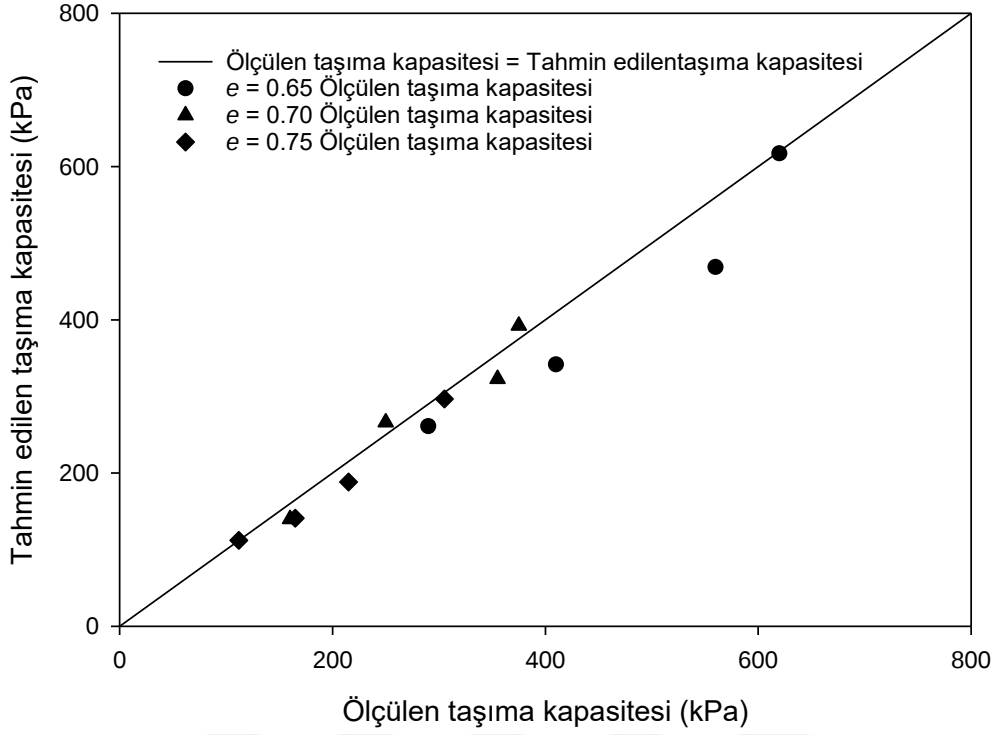
Tablo 5.5. (Devamı) Model test sonuçları ve tahmini taşıma kapasitesi değerleri

Model temel	Boşluk oranı	Doygunluk dercesi %	Su içeriği %	Kılcal gerilme kPa	Oloo et al. 1997	Vanapalli ve Muhammed	Oh ve Vanapalli 2013	0.1B Metot (Deneyssel)	Grafiksel Metot (Deneyssel.)	UBC (Denklem 5.1)	Ψ 0.1B Metot	Ψ Grafiksel. Metot
42,3 mm daire	0,651	64,9	15,70	284,01	1294	1255	348	946	630	826		
	0,651	69,3	16,70	157,28	906	1076	292	749	500	597	-2,89	-1,33
	0,644	74,9	18,10	87,10	692	922	233	486	345	415		
	0,652	83,1	20,09	28,18	511	699	210	406	245	291		
	0,698	64,0	16,70	229,09	983	870	222	561	365	526		
	0,693	69,4	17,90	133,86	733	795	201	494	345	411	-2,89	-1,33
	0,698	73,9	19,20	70,25	566	703	182	347	200	323		
	0,706	84,1	22,10	11,93	413	478	113	201	120	156		
	0,754	64,7	18,13	141,25	604	530	167	444	335	397		
	0,751	70,7	19,68	82,54	477	502	117	367	220	240	-2,89	-1,33
	0,748	73,8	20,84	50,89	409	480	96	252	160	171		
	0,749	84,7	23,60	12,59	326	392	90	176	105	125		
37,5 mm x 37,5 mm kare	0,644	64,9	15,72	279,46	1285	1244	348	887	570	826		
	0,657	68,2	16,50	194,98	1026	1211	292	778	510	597	-2,89	-1,33
	0,648	74,3	17,90	92,29	712	948	233	460	330	415		
	0,665	84,4	20,23	23,99	503	664	210	335	225	291		
	0,701	63,6	16,60	241,73	1014	890	222	519	360	526		
	0,699	68,5	17,90	133,86	731	796	201	460	320	411	-2,89	-1,33
	0,699	74,3	19,30	68,25	559	697	182	314	180	323		
	0,703	84,6	22,10	11,93	412	534	113	184	100	156		
	0,747	63,8	17,70	165,96	655	554	167	477	345	397		
	0,753	70,6	19,58	82,54	475	502	117	335	210	240	-2,89	-1,33
	0,747	74,0	20,53	56,67	419	491	96	253	155	171		
	0,769	84,7	24,48	9,12	317	408	90	161	108	125		

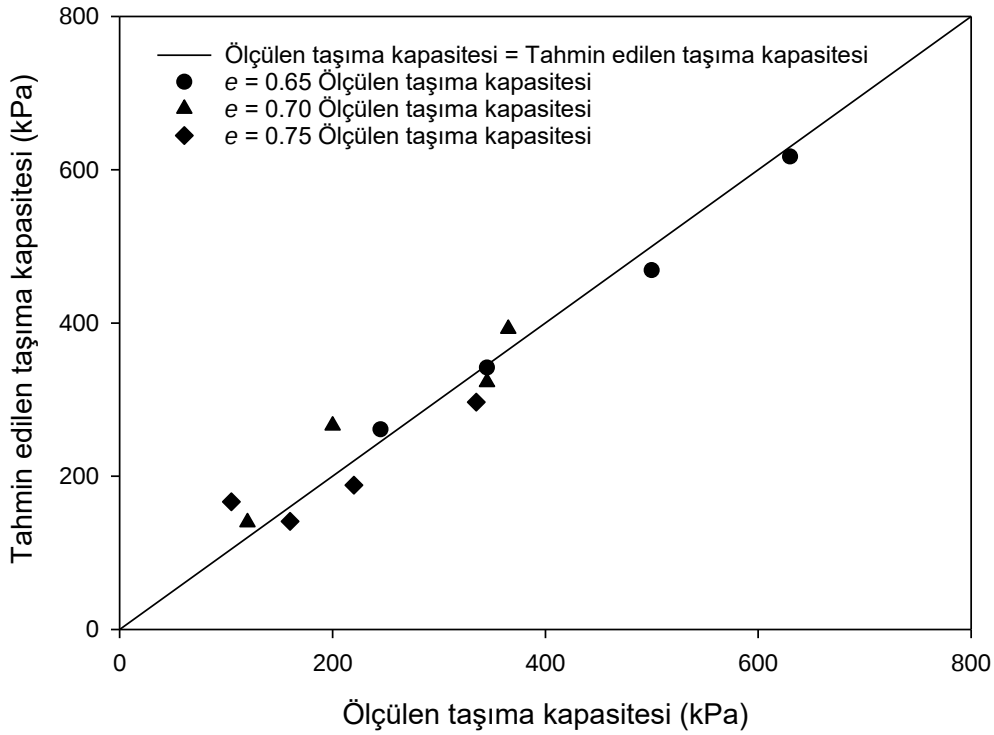
Şekil 5.70 ile Şekil 5.73 grafikleri Denklem 5.1 ile tahmin edilen taşıma kapasitesi ile model temel testleri ile ölçülen taşıma kapasitesi değerlerini karşılaştırmaktadır. Bu grafikler incelendiğinde bazen model testlerinde ölçülen bazen de önerilen denklem kullanılarak tahmin edilen taşıma kapasitesinin biraz daha yüksek olduğu görülse de bu farklılıkların küçük bir hata payı içinde kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca %70 ve %75 doygunluk seviyelerinde ölçülen taşıma kapasitesinin tahmin edilen değerden biraz daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bu durum hem yukarıda belirtilen hem de literatürde Wen ve Yan (2014)' de sunulan kayma direncinin dalgalı davranışına benzer. Kılcal gerilme değerlerinin kayma direncine olan katkısına bakıldığında, örneğin %70 doygunluk derecesindeki kılcal gerilme değeri, %60 doygunluk seviyesindeki kılcal gerilme değerinden düşük olmasına rağmen kayma direncine katkı oranı daha yüksektir. Ayrıca, temel şeklinden ziyade model temellerin boyutunun (yani 50 mm × 50 mm kare; 50 mm daire; 42,3 mm daire; 37,5 mm × 37,5 mm kare) kılcal gerilme altında taşıma kapasitesi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



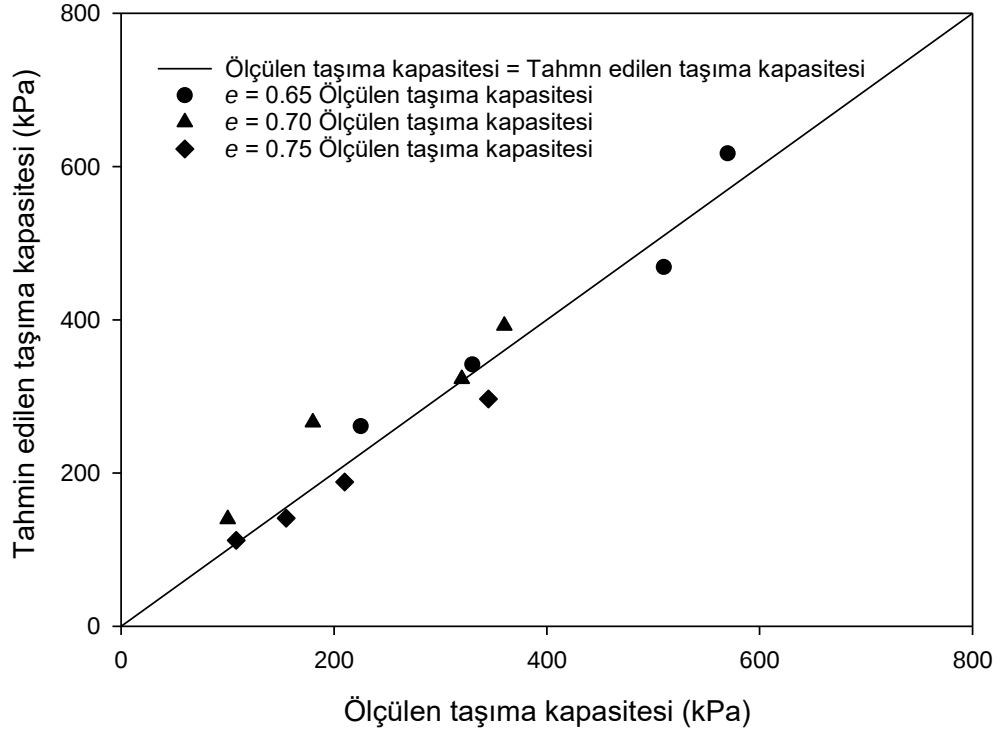
Şekil 5.70. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 50 x 50 mm kare model temel.



Şekil 5.71. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 50 mm daire model temel.

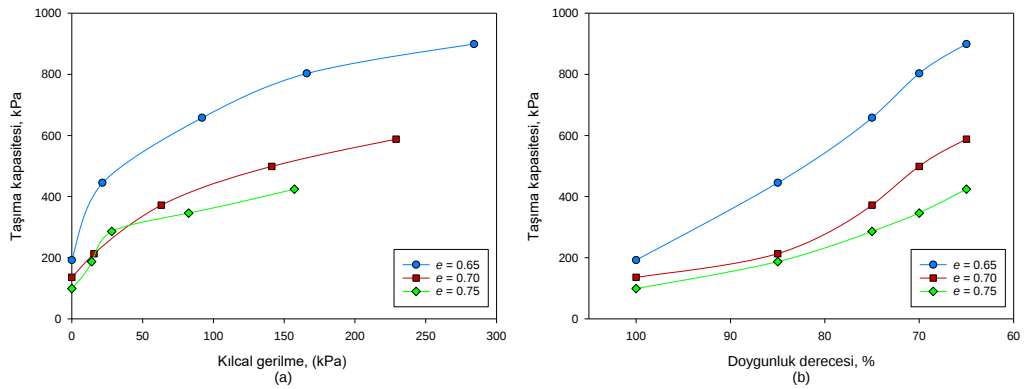


Şekil 5.72. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 42,3 mm daire model temel.

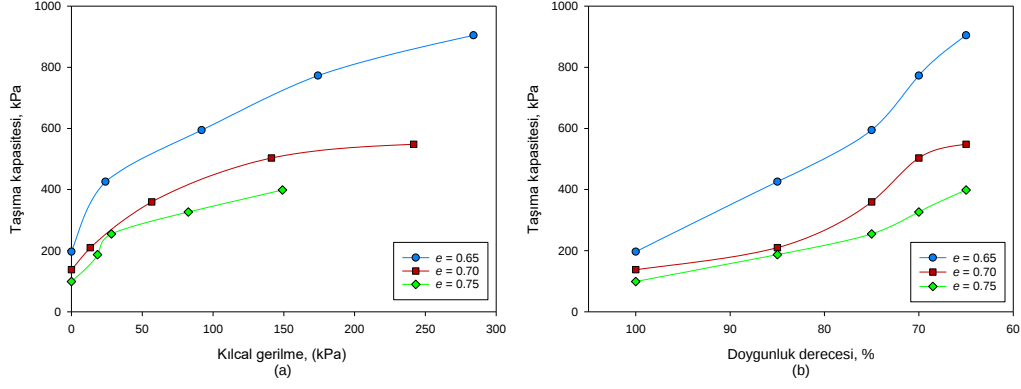


Şekil 5.73. Önerilen Denklem 5.1 kullanılarak bulunan taşıma kapasitesi değerleri ile 0.1B tekniği kullanılarak bulunanların karşılaştırılması: 37,5 x 37,5 mm kare model temel.

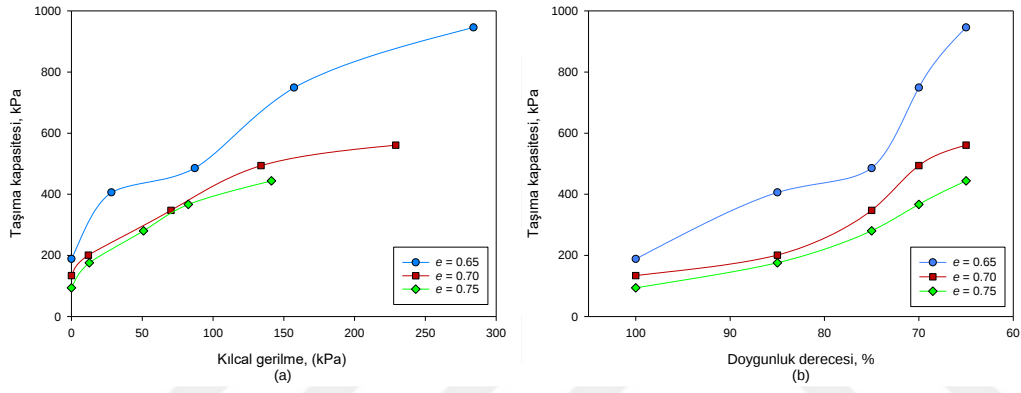
Dört farklı model temel için, üç farklı boşluk oranında, farklı doygunluk derecelerine (%65, %70, %75, %85 ve %100) karşılık gelen kılcal gerilme değerlerine göre ölçülen taşıma kapasitesinin değişimi (0.1B yaklaşımıyla belirlenen) Şekil 5.74 ile Şekil 5.77’de gösterilmektedir.



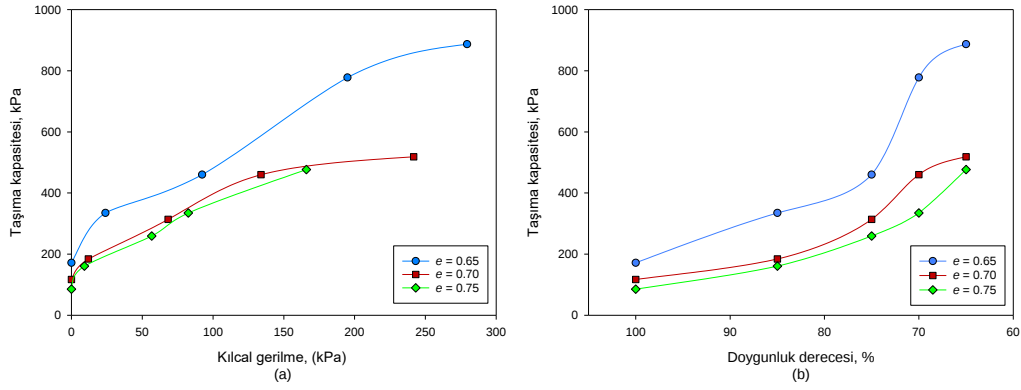
Şekil 5.74. 50 x 50 mm kare temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerilme, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %.



Şekil 5.75. 50 mm daire temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerilme, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %.



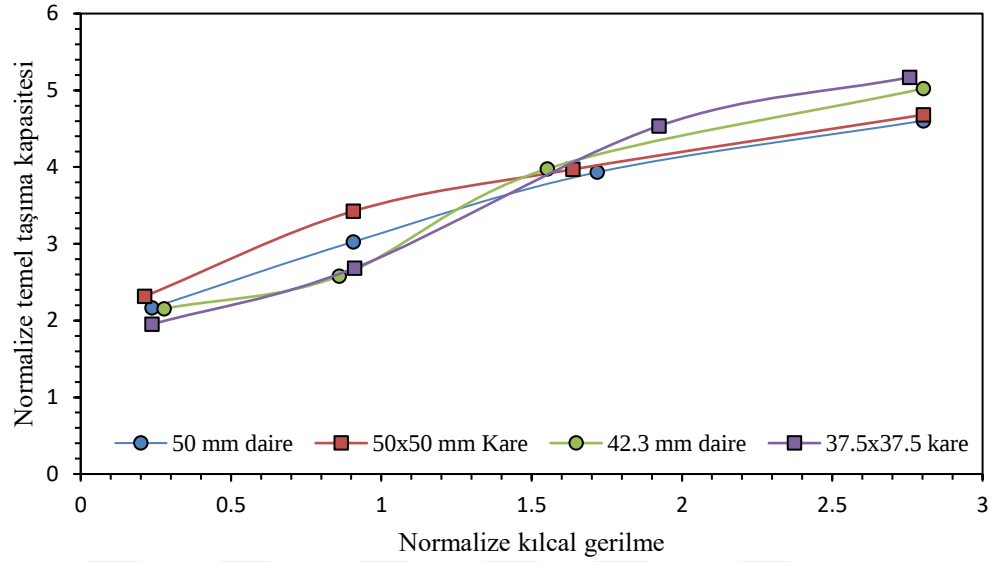
Şekil 5.76. 42,3 mm daire temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerilme, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %.



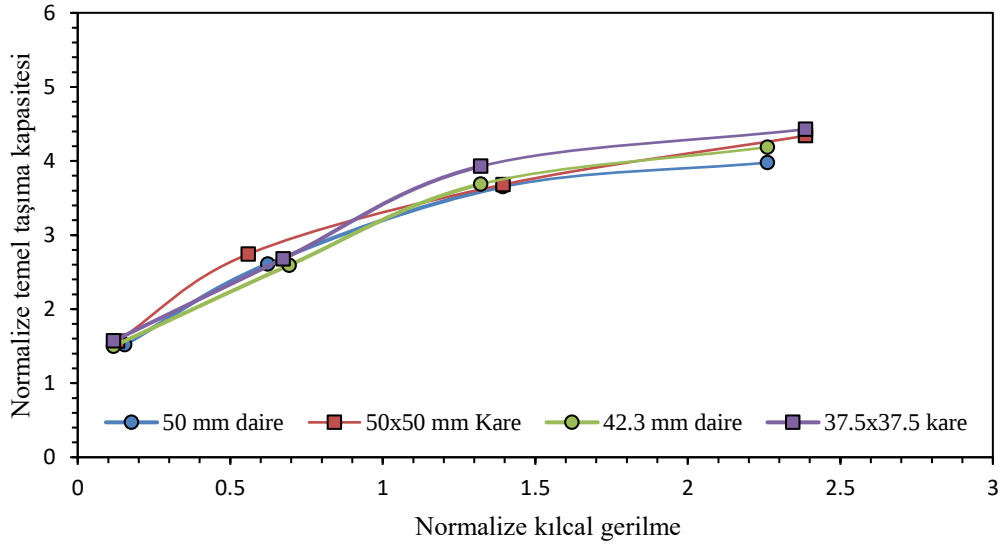
Şekil 5.77. 37,5 x 37,5 mm kare temel taşıma kapasitesi grafikleri: (a) Kılcal gerilme, kPa, (b) Doygunluk derecesi, %.

Şekil 5.74 ile Şekil 5.77 grafiklerine bakıldığında azalan doygunluk derecesine karşılık gelen kılcal gerilme değerleri aralığında kılcal gerilmenin katkısıyla taşıma kapasitesinde önemli bir artış gözlemlenmektedir. Ayrıca, boşluk oranı arttıkça, kılcal gerilmenin taşıma kapasitesine katkısı nispeten düşük olmaya başlamaktadır.

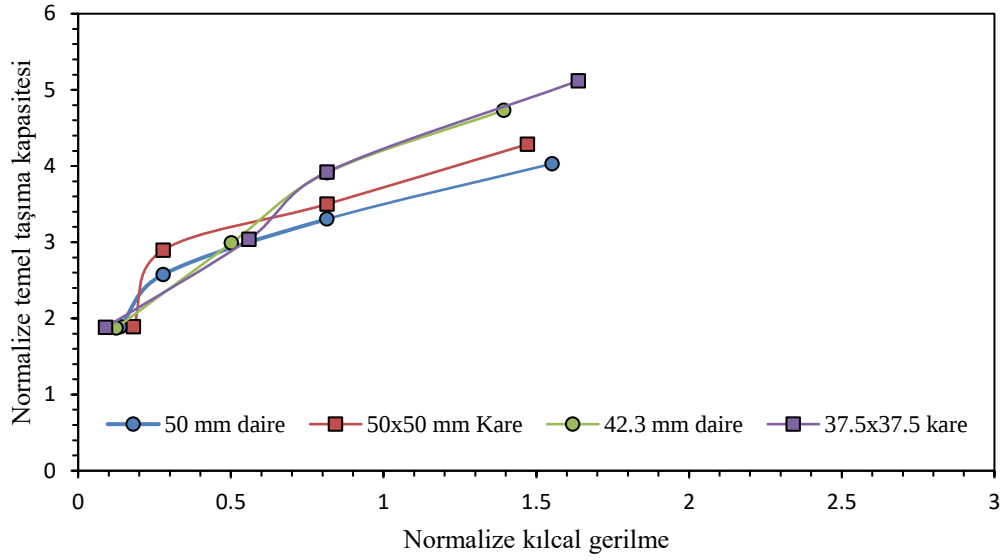
Şekil 5.78 ila Şekil 5.80 arasındaki grafiklerde DOZ durumunda temel taşıma kapasitelerinin doygun koşullardaki temel taşıma kapasitene oranlanarak elde edilen normalleştirilmiş temel taşıma kapasitelerine karşı, zemin içerisindeki kılcal gerilme değerlerinin atmosfer basıncına oranlanarak elde edilen normalleştirilmiş kılcal gerilme değerlerinin değişimi gösterilmiştir



Şekil 5.78. $e = 0,65$ boşluk oranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri.



Şekil 5.79. $e = 0,70$ boşluk oranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri.



Şekil 5.80. $e = 0,75$ boşluk oranına sahip numuneler için normalize temel taşıma kapasitesine karşı normalize kılcal gerilme değerleri.

Normalize temel taşıma kapasitesi – normalize kılcal gerilme grafiklerine (Şekil 5.78 ile Şekil 5.80) bakıldığında üç farklı boşluk oranında benzer olarak normalize temel taşıma kapasitesi 1,5 ile 5 değerleri arasında değişmiştir. Boşluk oranı büyüdükçe maksimum normalize kılcal gerilme değeri azalmıştır. Bu durum zemin içerisindeki boşluk oranı arttıkça kılcal gerilme değerlerinin azalmasına bağlanmıştır ve normalize kılcal gerilme değerleri boşluk oranı arttıkça maksimum 2.8 değerinden kademeli olarak 1.6 değerine kadar azalmıştır. Ayrıca benzer temel alanına sahip 42,3 mm daire ve 37,5 x 37,5 mm kare temellerin de benzer davranış sergilediği görülmektedir.

Doygun koşuldaki numunelerin kesme kutusu deney sonuçları sonrası elde edilen kayma direnci acısı ve kohezyon değerleri kullanılarak Terzaghi (1943) ve Meyerhof (1963) tarafından önerilen temel taşıma gücü denklemleri kullanılarak doygun taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır (Tablo 5.7). Tablo 5.7 incelendiğinde bağıl birim hacim ağırlığı yüksek numuneler için (0,65 boşluk oranına sahip numuneler) tutarlı sonuçlar verirken sıklığı düşük numuneler için gerçek temel taşıma kapasitesi değerlerinden uzak sonuçlar vermektedir.

Tablo 5.6. Doygun koşuldaki numunelerin model test sonuçları ve tahmini taşıma kapasitesi değerleri

Yöntem	Boşluk Oranı	50 x 50 mm kare		50 mm daire	
		Deneysel	Hesaplanan	Deneysel	Hesaplanan
Terzaghi (1943)	0,65	192	197	197	212
	0,7	136	205	138	221
	0,75	99	221	99	238
Meyerhof (1963)	0,65	192	208	197	208
	0,7	136	211	138	211
	0,75	99	221	99	221
Yöntem	Boşluk Oranı	42,3 mm daire		37,5 x 37,5 mm daire	
		Deneysel	Hesaplanan	Deneysel	Hesaplanan
Terzaghi (1943)	0,65	188	212	172	196
	0,7	134	221	117	204
	0,75	94	238	85	220
Meyerhof (1963)	0,65	188	208	172	207
	0,7	134	211	117	211
	0,75	94	221	85	221

Terzaghi (1943) ve Meyerhof (1951) tarafından önerilen denklemlerle elde edilen sonuçlar (Tablo 5.7) ile Tablo 5.6 karşılaştırıldığında geleneksel zemin mekaniği kavramları ile hesaplanan değerlerin DOZ üzerine oturan yüzeysel temellerin temel taşıma kapasitesini gerçekten uzak hesapladığı görülmektedir. DOZ koşullarında geleneksel zemin mekaniği yaklaşımı benimsenerek yapılan hesaplamalarda güvenli tarafta kalınsa da ekonomik açıdan önemli kayıplar yaşanmaktadır. DOZ üzerine inşa edilecek temellerin gerçekçi tasarımları için DOZ davranışına uygun parametrelerin ve denklemlerin kullanılması gereği açıktır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doymun olmayan silt zemin üzerine oturan yüzeysel temelelerin taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Bu amaçla ilk olarak silt zeminin boşluk oranı, doymunluk ve kılcal gerilme ilişkileri araştırılmıştır. Basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemleri kullanılarak SWC eğrileri oluşturulmuştur. Bu aşamada ayrıca kılcal gerilme-boşluk boyutu arasındaki ilişkiler araştırılarak hakim boşluk boyutunun DOZ davranışına olan etkileri incelenmiştir. Daha sonra doymun olmayan silt zeminin kayma mukavemet parametreleri gerçekleştirilen kesme kutusu deneyleri ile incelenmiştir. Deneyler sonucunda DOZ silt zeminlerin davranışlarının diğer zeminlere göre farklı olduğu ve doymunmuş gibi kabulüyle yapılan hesaplamaların gerçek zemin davranışına kıyasla kabul edilemez düzeyde hatalı olduğu ortaya çıkarılmıştır. DOZ silt zeminlere oturan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi ve davranışının belirlenmesine yönelik yapılan model deneylerinde doymun ve DOZ koşullar araştırılmış ve temel şekil ve boyutunun DOZ zeminler üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen çıktılar sonuçlar ve öneriler başlıkları altında sunulmuştur.

6.1. Sonuçlar

Farklı su muhtevalarına sahip zeminlerin kılcal emmesi doğrudan ölçüm cihazlarının yerine dolaylı olarak basınç plakası ve filtre kağıdı yöntemi yardımıyla güvenilir olarak belirlenebilir. Ayrıca zeminin SWC eğrisi oluşturularak farklı kılcal emme seviyeleri için su muhtevası ve doymunluk seviyesi ilişkileri belirlenebilir.

Zemin su karakteristik eğrileri (SWCC) aynı zemin için boşluk oranına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. DOZ üzerine yapılan çalışmalarda zemine özel SWCC grafiğinin oluşturulması gerekmektedir.

SWCC grafikleri ve boşluk boyutu ilişkilerinden hakim boşluk boyutu belirlenerek doymun olmayan zeminin mukavemet parametrelerinin hangi su muhtevası veya doymunluk derecesinde en güçlü veya en zayıf etkiye sahip olduğunu belirlenebilir.

Araştırmada doymun olmayan silt zeminin kayma mukavemetini literatürde önerilen geleneksel kesme kutusu deneyi ve su muhtevası-kılcal emme eğrilerinden (zemin-su karakteristik eğrisi) tahmin edilen kılcal emme değerleri yardımıyla belirlenmiştir. DOZ zeminlerin testleri için kullanılan karmaşık ve pahalı cihazların yerine basit bir deneysel prosedürüne sahip ve hemen hemen her zemin laboratuvarında gerçekleştirilebilecek olan bu yöntemin gerçekçi sonuçlar verdiğini gösterilmiştir.

Doygun olmayan silt zemin numunesinin kayma direnci ve mukavemet parametreleri; kılcal emme ve zeminin yapısına (boşluk oranı) bağlı olarak değişimler gösterirken kayma davranışının doğası çok az değişim göstermiştir.

Üç farklı boşluk oranına sahip silt numunelerinin tümü için kılcal emme artışına bağlı olarak kohezyon değerlerinde literatüre uygun bir artış gözlenmiştir. Ancak görünür kayma direnci açısından (ϕ) literatürden farklı olarak kılcal emme değerinin artışıyla artış gözlenmiştir.

Geleneksel kesme kutusu deneyi ve su muhtevası-kılcal emme eğrileri yardımıyla belirlenmiş siltli zeminin kayma direnci ve mukavemet parametreleri; kılcal emme, zeminin yapısı (boşluk oranı) ve doğal örtü yüküne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.

Doygun olmayan siltli zemin numunesinin kayma mukavemet parametreleri su muhtevası ve boşluk oranına bağlı olarak değişirken, göçme davranışı aynı kalmıştır.

Model temel boyutları kısmen dar bir bantta yer aldığından, temellerin ölçülen taşıma gücü birbirine yakındır. Tüm model testleri için ölçülen taşıma kapasitesi değerlerinde doğrusal olmayan artış gözlemlenmiştir.

Literatürde doymun olmayan zeminlerdeki sıg temellerin taşıma kapasitesi denklemleri ile hesaplanan değerlerinin gerçekleştirilen model deney sonuçları ile uyuşmadığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında toplam gerilme yaklaşımına göre doymun olmayan siltli zeminlerdeki sıg temeller için uygun sonuçlar veren yeni bir eşitlik önerilmiştir (Denklem. 5.1).

Doymamış siltli zeminlerde temel temel taşıma değerinin, serbest basınç testi sonucu ve doyguluk derecesine bağlı uydurma parametresi kullanılarak tahmin edilebileceği belirlenmiştir.

Doymamış siltli zeminlerdeki yüzeysel temeller için taşıma kapasitesi, önerilen denklem kullanılarak ve uydurma parametresi $\Psi = -2,89$ olarak alınarak 0,1 B yöntemine (ASSHTO yöntemi) göre tahmin edilebilir. Grafiksel yöntem dikkate alınırsa, oluşturulan ilişkide uydurma parametresi $\Psi = -1,33$ alınarak tahmin yapılabilir.

Model temel boyutu küçüldükçe, model testlerinde ölçülen ve önerilen denklemden hesaplanan temel UBC değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Ayrıca ölçülen taşıma kapasitesi değerinde temel şekil ve boyutlarının etkisi gözlenmiştir.

DOZ temel taşıma kapasitelerinin doygun koşullardaki temel taşıma kapasitene oranlanarak elde edilen normalleştirilmiş temel taşıma kapasitelerine karşın zemin içerisindeki kılcal gerilme değerlerinin atmosfer basıncına oranlanarak elde edilen normalleştirilmiş kılcal gerilme değerleri dar bir aralıkta değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca normalleştirilmiş değerler kullanılarak elde edilen grafiklerde temel şekil ve boyut etkisi gözlemlenmiştir.

6.2. Öneriler

DOZ koşullarında yapılacak projelerde doygun kabulü yerine önerilen geleneksel kesme kutusu deneyi ve su muhtevası-kılcal emme eğrilerinden (zemin-su karakteristik eğrisi) tahmin edilen kılcal emme değerleri yardımıyla belirlenen kayma mukavemeti parametrelerinin kullanılması daha gerçekçi ve ekonomik tasarımlar ortaya çıkaraçaktır.

Doygun olmayan zeminler için yürütülen deneyler süresince ortam koşullarının (hava sıcaklığı,nem) sabit tutulması gerekmektedir.

Statik olarak yeniden oluşturularak elde edilen numunelerde tüm deneylerde homojenliğin sağlanabilmesi için aynı senaryo takip edilerek numunelerin hazırlanması gerekmektedir.

İnce daneli zeminlerde numune hazırlanırken küçük hacimlerde tekrar edilerek hazırlanmalıdır. Aksi takdirde tek seferde büyük hacimlerde hazırlanan numunelerde farklı su muhtevasına sahip bölgeler oluşabilmektedir.

Filtre kağıdı yöntemi kullanılarak ölçülen kılcal emme değerlerinde ölçüm prosedürü aynı olacak şekilde tüm numunelerde yürütülmelidir. Olası hataların engellenebilmesi için fazla sayıda numune kullanılmalıdır.

Kısmen büyük ölçekli model deneyler gerçekleştirilirken ortam koşulları sıcaklık ve nem aynı olacak şekilde sabit tutulmalı ve model numune üzerinde farklı seviyelerden alınan numunler ile değişim olup olmadığı kesinlikle kontrol edilmelidir.

İleride yapılacak çalışmalarda farklı plastisite indeksine sahip silt zeminlerde taşıma kapasitesi deneyleri yapılarak plastisite indeksi ile uydurma parametresi (Ψ) arasında bir ilişki elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- Achten, W. M., Trabucco, A., Maes, Wh., Verchot, L. V., Aerts, R., Mathijs, E., Vantomme, P., Singh, V. P., & Muys, B. (2013). Global greenhouse gas implications of land conversion to biofuel crop cultivation in arid and semi-arid lands—Lessons learned from *Jatropha*. *Journal of Arid Environments*, 98, 135-145.
- Adams, M. T., & Collin, J. G. (1997). Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(1), 66-72.
- Adem, H. H., & Vanapalli, S. K. (2014). Elasticity moduli of expansive soils from dimensional analysis. *Geotechnical Research*, 1(2), 60-72.
- Akbari Garakani, A., Sadeghi, H., Saheb, S., & Lamei, A. (2020). Bearing capacity of shallow foundations on unsaturated soils: Analytical approach with 3D numerical simulations and experimental validations. *International Journal of Geomechanics*, 20(3), 04019181.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
- ASTM, D. (t.y.-a). 3080-98.(1999). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, ASTM. West Conshohocken, PA.
- ASTM, D. (t.y.-b). 5298-92, 1992. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, American Society of Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards, 1312-131.
- ASTM, D. (2003). 1194-94: Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D6836-16. (2016). Standard Test Methods For Determination Of The Soil Water Characteristic Curve For Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor. ASTM International.
- Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk ukeblad*, 39, 859-863.
- Bittelli, M., & Flury, M. (2009). Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1453-1460.
- Blatz, J. A., & Graham, J. (2003). Elastic-plastic modelling of unsaturated soil using results from a new triaxial test with controlled suction. *Géotechnique*, 53(1), 113-122.
- Broms, B. B. (1963). The effect of degree of saturation on the bearing capacity of flexible pavements. *Highway Research Record*, 71(1), 1-14.

- Bulut, R., & Wray, W. K. (2005). Free energy of water-suction-in filter papers. *Geotechnical Testing Journal*, 28(4), 355-264.
- Burland, J. B. (1965). Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soils. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, 270-278.
- Button, S. J. (1953). The bearing capacity of footing on a two-layer cohesive subsoil. *Proc. 3rd ICSMFE*, 1953, 1, 332-335.
- Carter, J. P. (2006). Application of structured soil models to shallow footing problems. *İçinde Soil and Rock Behavior and Modeling* (ss. 21-34).
- Catana, M. C., Vanapalli, S. K., & Garga, V. K. (2006). The water retention characteristics of compacted clays. *İçinde Unsaturated Soils 2006* (ss. 1348-1359).
- Chen, T., & Xiao, S. (2020). An upper bound solution to undrained bearing capacity of rigid strip footings near slopes. *International Journal of Civil Engineering*, 18(4), 475-485.
- Consoli, N. C., Schnaid, F., & Milititsky, J. (1998). Interpretation of plate load tests on residual soil site. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9), 857-867.
- Costa, Y. D., Cintra, J. C., & Zornberg, J. G. (2003). Influence of matric suction on the results of plate load tests performed on a lateritic soil deposit. *Geotechnical Testing Journal*, 26(2), 219-227.
- Donald, I. B. (1956). Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures. *Proc. 2nd Australian and New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 200-205.
- Edil, T. B., Motan, S. E., & Toha, F. X. (1981). Mechanical behavior and testing methods of unsaturated soils. *İçinde Laboratory shear strength of soil*. ASTM International.
- Escario, V., & Saez, J. (1986). The shear strength of partly saturated soils. *Geotechnique*, 36(3), 453-456.
- Fredlund, D. G. (2000). The 1999 RM Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963-986.
- Fredlund, D. G. (2006). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(3), 286-321.
- Fredlund, D. G. (1996). The scope of unsaturated soil mechanics: An overview. *PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95/PARIS/France/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 3*.
- Fredlund, D. G., H. Rahardjo, & M.D. Fredlund. (2012). *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc.
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the geotechnical engineering division*, 103(5), 447-466.

- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), 313-321.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993a). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993b). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Gan, J. K. M. (1987). Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. *Proceedings of the 6th international conference on expansive soils*, New Delhi, India, 1, 49-54.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 521-532.
- Gan, J. K., & Fredlund, D. G. (1996). Shear strength characteristics of two saprolitic soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 595-609.
- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), 500-510.
- Gebre, H. (2010). *Unsaturated Shear Strength Characteristics and Stress Strain Behavior Of Expansive Soils of Addis Ababa*. School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Ethiopia.
- Ghasemzadeh, H., & Akbari, F. (2019). Determining the bearing capacity factor due to nonlinear matric suction distribution in the soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 99(4), 434-446.
- Guan, Y., & Fredlund, D. G. (1997). Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 604-614.
- Gülşen, F. (2003). *Doygun ve Doygun Olmayan Zemin Mekaniği Kavramları ile Sığ Temellerin Taşıma Gücü*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Hamid, T. B. (2005). *Testing and modeling of unsaturated interfaces*. The University of Oklahoma.
- Hemp, W. S. (1966). *Foundations of Solid Mechanics*. YC Fung. Prentice-Hall, New Jersey. 1965. 525 pp. Diagrams. \pounds 5. The Aeronautical Journal, 70(663), 453-454.
- Hilf, J. W. (1956). *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. University of Colorado at Boulder.
- Holmgren, P. (2006). Global land use area change matrix. Input to the fourth global environmental outlook (GEO-4).
- Houston, S. L., Houston, W. N., & Wagner, A.-M. (1994). Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 17(2), 185-194.
- Janbu, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proc. European Conf. SMFE, Wiesbaden*, 1963, 1, 19-25.
- Kim, H., Ganju, E., Tang, D., Prezzi, M., & Salgado, R. (2015). Matric suction measurements of compacted subgrade soils. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 358-378.

- Kocaman, K. (2018). Killi zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi ile boşluk boyutu ilişkisi [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Krahn, J., & Fredlund, D. G. (1972). On total, matric and osmotic suction. *Soil Science*, 114(5), 339-348.
- Kruse, G. A., Dijkstra, T. A., & Schokking, F. (2007). Effects of soil structure on soil behaviour: Illustrated with loess, glacially loaded clay and simulated flaser bedding examples. *Engineering geology*, 91(1), 34-45.
- Kumbhojkar, A. S. (1993). Numerical Evaluation of Terzaghi's $N \gamma$. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(3), 598-607.
- Leong, E. C., He, L., & Rahardjo, H. (2002). Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3).
- Likos, W. J., & Lu, N. (2004). Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil. *Journal of Engineering mechanics*, 130(6), 646-655.
- Liu, Y., & Vanapalli, S. K. (2021). Mechanical behavior of a floating model pile in unsaturated expansive soil associated with water infiltration: Laboratory investigations and numerical simulations. *Soils and Foundations*, 61(4), 929-943.
- Ltifi, M., Abichou, T., & Tisot, J. P. (2014). Effects of soil aging on mechanical and hydraulic properties of a silty soil. *Geotechnical and geological engineering*, 32(4), 1101-1108.
- Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46(5).
- Lu, N., & Kaya, M. (2014). Power law for elastic moduli of unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 46-56.
- Maghvan, S. V., Imam, R., & McCartney, J. S. (2019). Relative density effects on the bearing capacity of unsaturated sand. *Soils and Foundations*, 59(5), 1280-1291.
- Maleki, M., & Bayat, M. (2012). Experimental evaluation of mechanical behavior of unsaturated silty sand under constant water content condition. *Engineering geology*, 141, 45-56.
- Meyerhof, G. G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301-332.
- Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian geotechnical journal*, 1(1), 16-26.
- Miller, G. A., & Muraleetharan, K. K. (1998). In situ testing in unsaturated soil. *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing, China, 1, 416-421.
- Mohamed, F. M. O., & Vanapalli, S. K. (2006). Laboratory investigations for the measurement of the bearing capacity of an unsaturated coarse-grained soil. *Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, BC, 1-4.

- Mohamed, F. M., Vanapalli, S. K., & Saatcioglu, M. (2013). Generalized Schmertmann Equation for settlement estimation of shallow footings in saturated and unsaturated sands. *Geomechanics & engineering*, 5(4), 343-362.
- Nishimura, T., & Fredlund, D. G. (2001). Failure envelope of a desiccated, unsaturated silty soil. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, 27-31 August 2001. Volumes 1-3, 615-618.
- Oh, W. T., Garga, V. K., & Vanapalli, S. K. (2008). Shear strength characteristics of statically compacted unsaturated kaolin. *Canadian geotechnical journal*, 45(7), 910-922.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2011). Modelling the applied vertical stress and settlement relationship of shallow foundations in saturated and unsaturated sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3), 425-438.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2013). Interpretation of the bearing capacity of unsaturated fine-grained soil using the modified effective and the modified total stress approaches. *International Journal of Geomechanics*, 13(6), 769-778.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2018). Modeling the stress versus settlement behavior of shallow foundations in unsaturated cohesive soils extending the modified total stress approach. *Soils and foundations*, 58(2), 382-397.
- Oh, W. T., Vanapalli, S. K., & Puppala, A. J. (2009). Semi-empirical model for the prediction of modulus of elasticity for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(8), 903-914.
- Oloo, S. Y. (1999). A bearing capacity approach to the design of low-volume traffic roads. University of Saskatchewan.
- Oloo, S. Y., & Fredlund, D. G. (1996). A method for determination of ϕ b for statically compacted soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2), 272-280.
- Oloo, S. Y., Fredlund, D. G., & Gan, J. K. (1997). Bearing capacity of unpaved roads. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(3), 398-407.
- Öntürk, K., Bol, E., & Ozsagir, M. (2015). Doygun Olmayan İnce Taneli Zeminlerin Kayma Direnci. 3rd International Symposium On Innovative Technologies In Engineering And Science. Polytechnic University of Valencia.
- Önalp, A., Arel, E., Bol, E., Özocak, A., & Sert, S. (2007). The assessment of liquefaction potential with dissipation method in piezocone penetration testing (CPTU) (TÜBİTAK 104M387). Scientific and Technological Research Council of Turkey.
- Öntürk, K. (2022). Doygun olmayan ince daneli zeminlerde kayma direncinin belirlenmesi [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Özocak, A. (2003). Doygun olmayan siltli zeminlerin sıkışabilirliği [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Pereira, J. H. F., & Fredlund, D. G. (1997). Constitutive modelling of a metastable-structured compacted soil. *Proceedings of the Symposium on recent developments in soil and pavement mechanics*, 317-326.

- Qian, J. S., & Lu, H. (2011). Effect of compaction degree on soil-water characteristic curve of chongming clay. *Applied Mechanics and Materials*, 90, 701-706.
- Rahardjo, H., Heng, O. B., & Choon, L. E. (2004). Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 421-436.
- Rasool, A. M. (2014). Mechanical behaviour of unsaturated soils in isotropic loading/unloading, monotonic and cyclic load sequence. Saitama University, Graduate School of Science and Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Degree of Master of Engineering.
- Richards, L. A. (1928). The usefulness of capillary potential to soil-moisture and plant investigations. *J. Agr. Research*, 37, 719-742.
- Ridley, A. M. (1993). The measurement of soil moisture suction [Doktora tezi]. Imperial College.
- Rojas, J. C., Salinas, L. M., & Sejas, C. (2007). Plate-load tests on an unsaturated lean clay. *İçinde Experimental unsaturated soil mechanics* (ss. 445-452). Springer.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (2019). The hardening soil model: Formulation and verification. *İçinde Beyond 2000 in computational geotechnics* (ss. 281-296). Routledge.
- Schnaid, F., Consoli, N. C., Cudmani, R. O., & Militisky, J. (1995). Load-settlement response of shallow foundations in structured unsaturated soils. 1st International Conference on unsaturated soils, Paris.
- Skempton, A. W. (1948). 'The ϕ 0 Analysis of Stability and Its Theoretical Basis. *Proceedings*, 72-77.
- Steensen-Bach, J. O., Foged, N., & Steenfelt, J. S. (1987a). Capillary induced stresses—fact or fiction? European conference on soil mechanics and foundation engineering. 9, 83-89.
- Steensen-Bach, J. O., Foged, N., & Steenfelt, J. S. (1987b). Capillary induced stresses—fact or fiction? European conference on soil mechanics and foundation engineering. 9, 83-89.
- Tan, M., Cheng, X., & Vanapalli, S. (2021). Simple approaches for the design of shallow and deep foundations for unsaturated soils I: Theoretical and Experimental Studies. *Indian Geotechnical Journal*, 51(1), 97-114.
- Tang, Y., Taiebat, H. A., & Russell, A. R. (2017). Bearing capacity of shallow foundations in unsaturated soil considering hydraulic hysteresis and three drainage conditions. *International Journal of Geomechanics*, 17(6), 04016142.
- Terzaghi, K., *Mechanics*, T. S., & Wiley, J. (1943). Sons. New York.
- Vahedifard, F., & Robinson, J. D. (2016). Unified method for estimating the ultimate bearing capacity of shallow foundations in variably saturated soils under steady flow. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(4), 04015095.

- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vanapalli, S. K., Eigenbrod, K. D., Taylan, Z. N., Catana, C., Oh, W. T., & Garven, E. (2010). A technique for estimating the shaft resistance of test piles in unsaturated soils. *Fifth International Conference Unsaturated Soils, UNSAT*, 1209-1216.
- Vanapalli, S. K., & Fredlund, D. G. (2000). Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. *Geotechnical special publication*, 195-209.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., & Pufahl, D. E. (1996). The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till. *Geotechnical Testing Journal*, 19, 259-268.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian geotechnical journal*, 33(3), 379-392.
- Vanapalli, S. K., & Lane, J. J. (2002). A simple technique for determining the shear strength of finegrained unsaturated soils using the conventional direct shear apparatus. *Proceedings of the Second Canadian Specialty Conference on Computer Applications in Geotechnique*, Winnipeg, 245-253.
- Vanapalli, S. K., & Mohamed, F. M. (2007). Bearing capacity of model footings in unsaturated soils. *İçinde Experimental unsaturated soil mechanics* (ss. 483-493). Springer.
- Vanapalli, S. K., & Oh, W.-T. (2021). Analytical and numerical methods for prediction of the bearing capacity of shallow foundations in unsaturated soils. *Soils and Rocks*, 44.
- Vanapalli, S. K., Salinas, L. M., Avila, D., & Karube, D. (2021). Suction and storage characteristics of unsaturated soils. *Unsaturated Soils-Volume 3: Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002*, 10-13 March 2002, Recife, Brazil, 1045.
- Vesić, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(1), 45-73.
- Vo, T., & Russell, A. R. (2016). Bearing capacity of strip footings on unsaturated soils by the slip line theory. *Computers and Geotechnics*, 74, 122-131.
- Wan, A. W. L., Gray, M. N., & Graham, J. (1995). On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays. *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Paris, France, 215-222.
- Wen, B.-P., & Yan, Y.-J. (2014). Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China. *Engineering Geology*, 168, 46-58.
- Yan, Q., Zhao, J., Zhang, C., & Wang, J. (2020). Ultimate bearing capacity of strip foundations in unsaturated soils considering the intermediate principal stress effect. *Advances in Civil Engineering*, 2020.

- Zai-qiang, H. U., Zhu-jiang, S., & Ding-Yi, X. (2000). Research on structural behavior of unsaturated loess. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 19(6), 775-779.
- Zhang, C., Yan, Q., Zhao, J., & Wang, J. (2020). Formulation of ultimate bearing capacity for strip foundations based on the Meyerhof theory and unsaturated soil mechanics. *Computers and Geotechnics*, 126, 103734.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mehmet Uğur YILMAZOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm
- **Yükseklisans** : Aksaray Üniversitesi Üniversite, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2014 yılından itibaren Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.
- 2013-2014 yılları arasında Arpacı İnşaat Nak.Tur.Taah.Paz.San.Tic.Ltd.Şti, 151. Karayolları Şube Müdürlüğü Yol Bakım Onarım Ve Karla Mücadele İş'i' nin yapımında şantiye şef yardımcısı olarak çalıştı.
- 2012-2013 yılları arasında Kastamonu İklim Yapı Dernetim, firmasında yapı uygulama denetçisi olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yilmazoglu, Mehmet Uğur ve Özocak, Aşkın (2023). Bearing Capacity of Shallow Foundations on Unsaturated Silty Soils. Applied Sciences, 13(3), 1308.

DİĞER ESERLER:

- Bayraktar Oğuzhan Yavuz, Yılmazoğlu Mehmet Uğur, Mütevelli Özkan İffet Gamze, Çetin Mehmet, Sağlam Çitoğlu Gülsüm, P. Dadula Cristina, P. Dadula Danilo (2022). Usability Of Organic Wastes İn Concrete Production; Palm Leaf Sample. Kastamonu University Journal Of Engineering And Sciences, 8(1), 69-77., Doi: 10.55385/Kastamonujes.1104531 (Yayın No: 7721799)

- İnce Gökçe Çiçek, Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2021). Probabilistic Seismic Hazard Assessment Of Muğla, Turkey. Natural Hazards, Doi: 10.1007/S11069-021-04633-9 (Yayın No: 7006388)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Müteveli Özkan İffet Gamze (2018). Some Durability Properties Of Alkali Activated Materials (Aam) Produced With Ceramic Powder And Micro Calcite. Ceramics - Silikaty, 62, 1-9., Doi: 10.13168/Cs.2018.0030 (Yayın No: 4997683)
- Yaprak Hasbi,Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Müteveli Özkan İffet Gamze (2018). Effects On Compressive Strenght Of Accelerated Curing Methods İn Alkali Activated Mortars. International Journal Of Scientific And Technological Research, 4(5), 70-78. (Yayın No: 4320734)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Müteveli Özkan İffet Gamze (2018). Some Durability Properties Of Alkali Activated Materials (Aam) Produced With Ceramic Powder And Micro Calcite. Ceramics - Silikaty, 62(4), 342-354., Doi: 10.13168/Cs.2018.0030 (Yayın No: 4342446)
- Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze,Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2016). Statistical Evaluation Of Plant Mixed Concrete Produced In Sinop Province. E-Journal Of New World Sciences Academy, 11(4), 83-92., Doi: 10.12739/Nwsa.2016.11.4.1a0365 (Yayın No: 3034059)
- Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze,Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2016). Statistical Evaluation Of Plant Mixed Concrete Produced In Sinop Province. E-Journal Of New World Sciences Academy, 11(4), 83-92., Doi: 10.12739/Nwsa.2016.11.4.1a0365 (Yayın No: 3034071)
- Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze,Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2016). Sinop İlinde Üretilen Hazır Betonların İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi. Engineering Sciences, 11(4), 83-92., Doi: 10.12739/Nwsa.2016.11.4.1a03 (Yayın No: 2881198)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze (2016). Kastamonu İlinde Kullanılan Betonların Nicel Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 756-764. (Yayın No: 2802951)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2016). Burdur İl Merkezinin Depremselliğinin Araştırılması. Erciyes University Journal Of Institute Of Science And Technology, 32(2), 1-10. (Kontrol No: 3063825)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze (2016). Kastamonu İlinde Kullanılan Betonların Nicel Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 756-764. (Kontrol No: 2799494)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Memiş Selçuk,Müteveli İffet Gamze (2016). Kastamonu İlinde Kullanılan Betonların Nicel Analizi. Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 756-764. (Kontrol No: 2799338)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur,İnce Gökçe Çiçek (2019). Muğla İli Mesudiye Bölgesi Zemin Davranışının Farklı Deprem Kayıtları Kullanılarak Eşdeğer Lineer Analiz Yöntemi İle İncelenmesi. 8.Uluslararası Geoteknik Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5526469)

- İnce Gökçe Çiçek,Yılmazoğlu Mehmet Uğur (2019). Muğla İli'nin Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi. 8.Uluslararası Geoteknik Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5516626)
- Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Bayraktar Oğuzhan Yavuz (2018). Topoğrafik Özelliklerinin Zeminin Dinamik Davranışına Etkisinin Bir Boyutlu Analiz Yöntemiyle İncelenmesi. 2nd International Symposium On Innovative Approaches İn Scientific Studies, 1311-1313. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5473514)
- Yaprak Hasbi,Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî Özkan İffet Gamze (2018). Determination Of The Some Mechanical Properties Of Alkali Activated Composites. Icelis 2018, 591-591. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4308029)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Yaprak Hasbi,Mütevellî İffet Gamze (2017). Farklı Sıcaklık Ve Sürelerde Kalsine Edilmiş Killerin Kireç Harcına Etkisi. 6. Tarihi Yapıların Korunması Ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, 133-142. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3642259)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze,Yaprak Hasbi (2017). Orman Endüstrisi Atık Külleri Ve Yüksek Oranda Su Azaltıcı Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Harçlar Üzerindeki Etkileri. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu Ve Sergisi,, 491-506. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3642228)
- Kaplan Gökhan,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Memiş Selçuk,Mütevellî İffet Gamze,Yaprak Hasbi (2017). Akışkanlaştırıcı Özellikleri Ve Çimento Sıcaklığının Harç Özelliklerine Etkileri. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu Ve Sergisi, 167-184. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3642247)
- Memiş Selçuk,Mütevellî İffet Gamze,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi (2017). Behaviors Of Mortar Samples With Waste Brick And Ceramic Under Freeze-Thaw Effect. 3rd International Sustainable Buildings Symposium (Isbs 2017), 15-17 March 2017, Dubai, 2, 189-205. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3536952)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze (2016). Investigation Of Thermo Mecanical Properties At Plaster Inculuded Waste Ceramics And Bricks. The 8th Multidisciplinary Academic Conference (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3336528)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze (2016). Presentation Title Investigation Of Thermo Mecanical Properties At Plaster Inculuded Waste Ceramics And Bricks. The 8th Mac İn Prague 2016, 12-12. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3036666)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze (2016). Presentation Title Investigation Of Thermo Mecanical Properties At Plaster Inculuded Waste Ceramics And Bricks. The 8th Mac Prague 2016, 12-12. (Özet Bildiri/)(Yayın No:3037096)

- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze (2016). Presentation Title Investigation Of Thermo Mechanical Properties At Plaster Inculuded Waste Ceramics And Bricks. The 8th Mac İn Prague 2016, 12-12. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2881205)
- Memiş Selçuk,Kaplan Gökhan,Yaprak Hasbi,Yılmazoğlu Mehmet Uğur,Mütevellî İffet Gamze (2016). Investigation Of Thermo Mechanical Properties At Plasters İnculuded Waste Ceramic And Bricks. Proceedings Of The 8th Mac 2016 (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:3318234)
- Tanrıöven Muğdeşem,Erduman Ali,Durusu Ali (2011). The Effect Of Lighting Design Parameters On The Efficiency Of Building Illumination System. New Perspective İn Eco-Technology And Eco-Economy (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:1761253)
- İNCE GÖKÇE ÇİÇEK,YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR (2016). Muğla İli nin Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi . Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, 1, 343-353. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:3038686)
- İNCE GÖKÇE ÇİÇEK,YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR (2016). Muğla İli nin Olasılıksal Deprem Tehlike Analizi. 16.Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Ulusal Kongresi, 1(1), 343-353. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:3133237)
- YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR,İNCE GÖKÇE ÇİÇEK (2016). Muğla İli Mesudiye Bölgesi Zemin Davranışının Bir Boyutlu Analiz Yöntemi İle İncelenmesi. 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendisleri Sempozyumu, 1(1), 69-78. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:3130049)
- YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR,İNCE GÖKÇE ÇİÇEK (2016). Muğla İli Mesudiye Bölgesi Zemin Davranışlarının Bir Boyutlu Analiz Yöntemi İle İncelenmesi. 1. Ulusal Genç Geoteknik Mühendsileri Sempozyumu, 69-78. (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:3038225)
- YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR,MEMİŞ SELÇUK,MÜTEVELLİ İFFET GAMZE (2015). KASTAMONU İLİNDE KULLANILAN BETONLARIN NİCEL ANALİZİ. Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/)(Yayın No:1967882)
- YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR,MEMİŞ SELÇUK,MÜTEVELLİ İFFET GAMZE (2015). KASTAMONU İLİNDE KULLANILAN BETONLARIN NİCEL ANALİZİ. UMAS-2015: Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu, 88-88. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:1884237)
- YILMAZOĞLU MEHMET UĞUR,MEMİŞ SELÇUK,MÜTEVELLİ İFFET GAMZE (2015). KASTAMONU İLİNDE KULLANILAN BETONLARIN NİCEL ANALİZİ. Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:2799534)