

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KİLLİ ZEMİNLERİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK
EĞRİSİ İLE BOŞLUK BOYUTU İLİŞKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK
Ortak Danışman : Doç. Dr. Pelin ÖZENER

Temmuz 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ZEMİNLERİN ZEMİN-SU KARAKTERİSTİK
EĞRİSİ İLE BOŞLUK BOYUTU İLİŞKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir KOCAMAN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 03.07.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

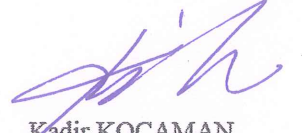
Doç. Dr.
Aşkın ÖZOCAK
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Ertan BOL
Üye

Doç. Dr.
Nazile URAL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Kadir KOCAMAN

03.07.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocalarım Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK ve Doç. Dr. Pelin ÖZENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma görevliliğime başladığım günden itibaren yönelttiğim sorulara hiç usanmadan cevap veren, tez çalışmam boyunca da desteklerini hep bildiğim Doç. Dr. Ertan BOL ve Doç. Dr. Sedat SERT hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarım boyunca hem fiziksel hem de zihinsel olarak desteklerini hep gösteren değerli dostlarım Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR ve Öğr. Gör. Kurban ÖNTÜRK hocalarıma en içten şükranlarımı sunarım. Deneyler süresince kıymetli bilgilerini benimle paylaşan, laboratuvar çalışmalarımda anlayış ve yardım gösteren Sn. Recep EYÜPLER ve Sn. Sabahattin İŞ'e ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımdaki değeri günden güne büyüyen, desteğini ve varlığını hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim Nermin BAYINDIR KOCAMAN'a teşekkürlerin en büyüğünü sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLOLAR LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ	4
2.1. Vadoz Bölge	6
2.2. Kapilarite ve Yüzey Gerilimi	8
2.3. Zemin Emmesi	10
2.4. Zemin-Su Karakteristik (SWC) Eğrisi	13
2.5. Zemin Emmesi Ölçüm Yöntemleri	19
2.5.1. Filtre kağıdı yöntemi	21
2.5.2. Basınç plakası	24
2.5.3. Isıl iletkenlik sensörü	25
2.5.4. Psikrometreler	27
2.5.5. Tansiyometreler	28
2.5.6. Emme sondası	29
2.6. Boşluk Boyutu-Emme İlişkisi	29

2.7. Literatürde Yer Alan Çalışmalar	31
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	46
3.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi	46
3.1.1. Özgül ağırlık, elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri.....	47
3.1.2. Zeminlerin XRD ve XRF analiz sonuçları	49
3.1.3. Kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesi.....	50
3.2. Emme Ölçümü Deneyleri	53
3.2.1. Numunelerin hazırlanması	53
3.2.2. Seramik plakanın doyurulması	55
3.2.3. Numunelerin doygun hale getirilmesi	57
3.3. Zemin-Su Karakteristik (SWC) Eğrisinin Oluşturulması	59
3.3.1. Filtre kağıdı yöntemi	59
3.3.2. Basınç plakası ile SWC eğrisinin elde edilmesi	67
3.4. Eğri Oluşturma Modellerinin Uygulanması	69
3.5. SWC Eğrisi-Boşluk Boyutu İlişkisinin Saptanması	70
BÖLÜM 4.	
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	72
4.1. Zemin-Su Karakteristik Eğrileri	73
4.1.1. Filtre kağıdı yöntemi	73
4.1.2. Basınç plakası yöntemi	80
4.1.3. Filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümlerinin karşılaştırılması...	89
4.2. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi Modellerinin Uygulanması	93
4.3. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi-Boşluk Boyutu İlişkisi	96
4.4. Kılcal Gerilme-Boşluk Oranı İlişkisi	109
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR	113

KAYNAKLAR	116
EKLER	122
ÖZGEÇMİŞ	144

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Å	: Angström (10^{-10} m)
ASTM	: Amerikan deney standardı
BP	: Basınç plakası ölçümü
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CI	: Orta plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
e	: Boşluk oranı
E	: Kompaksiyon enerjisi
FK	: Filtre kağıdı ölçümü
g	: Yer çekimi ivmesi
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
G_s	: Dane özgül ağırlığı
h_c	: Kapiler yükseklik
I_p	: Plastisite indisi
M	: Toplam kütle
M_a	: Boşluk hava kütlesi
M_c	: Su zarı kütlesi
M_f	: Filtre kağıdındaki su ağırlığı
ML	: Düşük plastisiteli silt
MP	: Modifiye proktor
M_s	: Dane kütlesi
M_w	: Boşluk suyu kütlesi
r_1, r_2	: Hava-su ara yüzeyi yarıçapı
RH	: Bağıl nem
r_k	: Kelvin boşluk yarıçapı
r_p	: Boşluk yarıçapı

S	: Özgül yüzey alanı
S_r	: Doygunluk derecesi
SWCC	: Zemin-su karakteristik eğrisi (Soil-water characteristic curve)
t	: Su filmi kalınlığı
T_s	: Yüzey gerilimi
u_a	: Boşluk hava basıncı
u_w	: Boşluk suyu basıncı
V	: Toplam hacim
V_a	: Boşluk hava hacmi
V_c	: Su zarı hacmi
V_p	: Su veya hava dolu boşluk hacmi
V_s	: Dane hacmi
V_w	: Boşluk suyu hacmi
w	: Su muhtevası
w_{ae}	: Hava giriş su muhtevası
w_f	: Filtre kağıdı su muhtevası
w_i	: Başlangıç su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_n	: Doğal su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
w_p	: Plastik limit
w_r	: Kalıcı su muhtevası
w_s	: Büzülme limiti
w_s	: Doygun su muhtevası
XRD	: X ışını kırınımı
XRF	: X ışını floresans
α	: Islatma açısı
Θ	: Hacimsel su muhtevası
ρ_w	: Suyun özgül kütlesi
τ	: Adsorbe su molekülü çapı
Ψ	: Emme değeri
Ψ_{ae}	: Hava giriş değeri

Ψ_r : Kalıcı değer
 Ψ_t : Toplam emme değeri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Doymun olmayan bir zemin elemanı	5
Şekil 2.2. Doymun olmayan zemin için dört fazlı blok diyagram	5
Şekil 2.3. Kompaksiyon eğrisi ve suya doymunluk eğrisinin gösterimi.....	6
Şekil 2.4. Zemin akıntılarına bağlı olarak boşluk suyu profilinin değişimi.....	7
Şekil 2.5. Kapalı hava kabarcıkları	8
Şekil 2.6. Zemin daneleri arasında oluşan menisk bölgesi	9
Şekil 2.7. Şekil faktörünün kapiler yükselmeye etkisi.....	9
Şekil 2.8. Kapilarite fiziksel model.....	10
Şekil 2.9. Tipik zemin-su karakteristik eğrisi	15
Şekil 2.10. Tipik kuruma eğrisinin bölgeleri	16
Şekil 2.11. Zemin su karakteristik eğrisinin farklı bölgelerinde zemin fazları.....	16
Şekil 2.12. Farklı zemin türleri için zemin su karakteristik eğrisi	17
Şekil 2.13. Zemin-su karakteristik eğrisi üzerinde ıslanma-kuruma etkisi.....	18
Şekil 2.14. Farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış kilin SWC eğrisi.....	18
Şekil 2.15. Zemin başlangıç koşullarının SWC eğrisi üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 2.16. Toplam ve kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdının yerleşimi	23
Şekil 2.17. Basınç plakasının şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.18. AGWA-II ısı iletkenlik sensörünün kesit görünümü	26
Şekil 2.19. CSI 229 ısı iletkenlik sensörünün şematik gösterimi	27
Şekil 2.20. Seramik kaplamalı ısıya duyarlı psikrometre	28
Şekil 2.21. Soilmoisture tarafından üretilmiş tansiyometre	29
Şekil 2.22. Farklı zeminler için kılcal gerilme-boşluk boyutu ilişkisi	30
Şekil 2.23. Sıkıştırma enerjisinin SWC eğrisi üzerindeki etkisi	35
Şekil 2.24. Kompaksiyon derecesinin SWC eğrisi üzerindeki etkisi.....	37
Şekil 2.25. Laboratuvar ve arazi SWC eğrilerinin karşılaştırılması.....	42
Şekil 2.26. Doğal ve sıkıştırılmış numunelerin SWC eğrileri.....	45

Şekil 3.1. Deneysel olarak kullanılan killi zemin örnekleri	47
Şekil 3.2. Zeminlerin dane dağılım eğrileri	48
Şekil 3.3. Likit limit ve plastik limit deneyi yapılmış numuneler.....	48
Şekil 3.4. Hacimsel büzülme limiti deneyi	49
Şekil 3.5. No.1 ve No.2 zeminlerin kompaksiyon ve suya doygunluk eğrileri.....	51
Şekil 3.6. No.3 ve No.4 zeminlerin kompaksiyon ve suya doygunluk eğrileri.....	52
Şekil 3.7. Kompaksiyon deneyi	54
Şekil 3.8. 100 kPa gerilme altında konsolidasyona bırakılan numuneler	55
Şekil 3.9. Kullanılan numune alıcı halkalar	55
Şekil 3.10. Seramik plakanın vakumlu desikatör içinde doyurulması.....	56
Şekil 3.11. Seramik plakanın basınç haznesi içerisinde doyurulması.....	56
Şekil 3.12. Numunelerin seramik plaka üzerine yerleştirilmesi	57
Şekil 3.13. Saf su eklenerek doyurma işlemine geçilmesi	58
Şekil 3.14. Doyurulma işleminde (düşük hava basıncı altında) şiştiği gözlenen numuneler.....	58
Şekil 3.15. 600 kPa hava basıncında şişme gösteren No.3 zemini	59
Şekil 3.16. Whatman No.42 filtre kağıdı	60
Şekil 3.17. Filtre kağıdı kalibrasyon eğrisi	60
Şekil 3.18. Filtre kağıdının formaldehit çözeltisine batırılması.....	61
Şekil 3.19. Yüksek su muhtevasında uzun süreli ölçümlerde görülen organik bozulmalar.....	61
Şekil 3.20. Filtre kağıtlarının numuneye temasta yerleştirilmesi.....	62
Şekil 3.21. Numunelerin nem ve sıcaklıktan korunarak deney aşamasına bırakılması.....	63
Şekil 3.22. Filtre kağıtlarının metal kapla birlikte 105 °C etüve konulması.....	64
Şekil 3.23. 15 bar basınca dayanıklı basınç plakası hücresi ve seramik plaka	67
Şekil 3.24. Seramik plaka ve numunelerin basınç plakası hücresine yerleştirilmesi.....	68
Şekil 3.25. Uygulanan kılcal gerilme aşamasının su çıkışına bağlı olarak takip edilmesi	69
Şekil 4.1. Filtre kağıdı yöntemi: No.1 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	74

Şekil 4.2. Filtre kağıdı yöntemi: No.2 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	75
Şekil 4.3. Filtre kağıdı yöntemi: No.3 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	75
Şekil 4.4. Filtre kağıdı yöntemi: No.4 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	76
Şekil 4.5. Filtre kağıdı yöntemi: Konsolide dört farklı zeminin zemin-su karakteristik eğrisi	77
Şekil 4.6. Filtre kağıdı yöntemi: Optimum+%5'te sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi	78
Şekil 4.7. Filtre kağıdı yöntemi: Optimumda sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi	79
Şekil 4.8. Basınç plakası yöntemi: No.1 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	81
Şekil 4.9. Basınç plakası yöntemi: No.2 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	82
Şekil 4.10. Basınç plakası yöntemi: No.3 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	83
Şekil 4.11. Basınç plakası yöntemi: No.4 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi	84
Şekil 4.12. Basınç plakası yöntemi: Konsolide zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi	85
Şekil 4.13. Basınç plakası yöntemi: Optimum+%5'te sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi	85
Şekil 4.14. Basınç plakası yöntemi: Optimumda sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi	86
Şekil 4.15. No.1 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri	88
Şekil 4.16. No.2 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri	89
Şekil 4.17. No.3 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri	92
Şekil 4.18. No.4 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri	93
Şekil 4.19. No.1 (konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.....	94
Şekil 4.20. No.2 (opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması	95

Şekil 4.21. No.3 (opt) zemine eğri modellerinin uygulanması	96
Şekil 4.22. No.1 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.....	95
Şekil 4.23. No.1 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.	95
Şekil 4.24. No.2 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.....	97
Şekil 4.25. No.2 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.	97
Şekil 4.26. No.3 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.....	98
Şekil 4.27. No.3 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.	99
Şekil 4.28. No.4 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.....	103
Şekil 4.29. No.3 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.	104
Şekil 4.30. Konsolide zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.....	105
Şekil 4.31. Konsolide zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları	105
Şekil 4.32. Optimum+%5 zeminlerin boşluk boyutu dağılımları	106
Şekil 4.33. Optimum+%5 zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.....	107
Şekil 4.34. Optimum zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.....	108
Şekil 4.35. Optimum zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları	108
Şekil 4.36. No.1 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.....	109
Şekil 4.37. No.2 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.....	110
Şekil 4.38. No.3 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.....	111
Şekil 4.39. No.4 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.....	112

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Laboratuvar ve arazi emme ölçüm teknikleri	21
Tablo 2.2. Whatman No.42 ve Schleicher & Schuell No.589 filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri.....	24
Tablo 3.1. Zeminlerin fiziksel özellikleri.....	47
Tablo 3.2. XRD analizi sonuçları.....	50
Tablo 3.3. XRF analizi sonuçları	50
Tablo 3.4. Zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri.....	50
Tablo 3.5. Filtre kağıdı deneyi için deney takip föyü	66
Tablo 3.6. Zemin-su karakteristik eğrisi oluşturma modelleri.....	70
Tablo 3.7. SWC eğrisi-boşluk boyutu ilişkisinin kurulması	71
Tablo 4.1. Sıkıştırma su muhtevsındaki zeminlerin emme ölçüm sonuçları.....	72
Tablo 4.2. SWC eğrilerinin özellikleri.....	87

ÖZET

Anahtar kelimeler: Doygun olmayan zemin, kılcal gerilme, zemin-su karakteristik eğrisi, boşluk boyutu

Bu çalışmada, doymun olmayan zeminlerin emme-su içeriği ilişkisini ifade eden zemin-su karakteristik eğrisi incelenmiştir. Bir dolgu sahasından gelen farklı fiziksel özelliklere sahip dört farklı killi zemin üzerinde çalışılmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında öncelikle zeminlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca doğal halleri üzerinde XRD ve XRF analizleri gerçekleştirilerek mineral ve kimyasal bileşenleri elde edilmiştir. Daha sonra zeminler üzerinde emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı başlangıç koşullarına sahip numuneler hazırlamak için konsolide etme ve sıkıştırma olmak üzere iki yöntem tercih edilmiştir. Konsolide numuneler 100 kPa düşey gerilme altında bulamaçtan konsolide edilerek hazırlanmıştır. Sıkıştırma yöntemi için ise Modifiye Proktor kullanılmıştır. Başlangıç su muhtevaları optimum ve optimum-ıslak olan numuneler elde edilmiştir. Elde edilen 12 farklı numune üzerinde filtre kağıdı yöntemi ve basınç plakası yöntemi kullanılarak zemin-su karakteristik eğrisi ölçümleri yapılmıştır. Literatürde yer alan zemin-su karakteristik eğrisi oluşturma yöntemleri kullanılarak üç farklı eğri modeli oluşturulmuştur. Eğri modelleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve zeminlere ait deneysel sonuçlarla olan uyumları incelenmiştir. Ayrıca zemin-su karakteristik eğrisi-boşluk boyutu ilişkisini ortaya koyan bir model uygulanmıştır.

Deneysel çalışma sonucunda, killi zeminlerin sahip oldukları fiziksel özelliklerin zemin-su karakteristik eğrisine olan etkisi ortaya konmuştur. Uygulanan iki farklı emme ölçüm/kontrol yönteminden elde edilen sonuçlar birbiriyle uyumlu bulunmuştur. Ayrıca farklı başlangıç koşullarında oluşturulan karakteristik eğriler killi zeminlere ait literatürle paralellik göstermiştir. Fredlund-Pham (2006) eğri oluşturma modelinin deney sonuçlarına en yakın eğriyi oluşturduğu belirlenmiştir. Lu-Likos (2004) boşluk boyutu-zemin su karakteristik eğrisi ilişkisi kullanılarak zeminlerin hâkim boşluk boyutu aralığı belirlenmiştir. Ayrıca boşluk boyutu ilişkisi üzerinden ani kılcal gerilme değişimi saptanmıştır.

RELATIONSHIP BETWEEN SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE AND PORE SIZE DISTRIBUTION OF CLAYEY SOILS

SUMMARY

Keywords: Unsaturated soil, matric suction, soil-water characteristic curve, pore size

In this study, the soil-water characteristic curve defining the relation of suction-water content of unsaturated soil was investigated. It was studied on four different clayey soils with different physical properties obtaining from an embankment area. Firstly, physical properties of soils were determined. XRD and XRF analyzes were also performed on their natural state to determine their mineral and chemical constituents. Suction tests were then carried out on the soils. In order to prepare samples with different initial conditions, two methods are preferred, consolidating and compacting. The consolidated samples were prepared from the slurry was consolidated under vertical stress of 100 kPa. Modified Proctor is used for the compaction method. Initial water contents of compacted samples were optimum and optimum-wet. Suction measurements and soil-water characteristic curve measurements were made on twelve different samples using filter paper method and pressure plate method. Three different curve models were created by using the soil-water characteristic curve-fitting methods in the literature. Fitting-curve models were compared with each other and their compatibility with the experimental results were investigated. In addition, a model which shows the relationship between the soil-water characteristic curve-pore size was shown.

As a result of the study, the effect of the physical properties of the clayey soils on the soil-water characteristic curve was revealed. The results obtained from two different methods of suction measurement were found to be compatible with each other. In addition, the soil-water characteristic curves generated under different initial conditions were in parallel with the literature of clayey soils. It was determined that the Fredlund-Pham (2006) curve-fitting model produces the closest curve to the experimental results. The dominant pore size range of the soils was determined using the Lu-Likos (2004) pore size-soil water characteristic curve relationship. In addition, rapid capillary stress change was determined by using pore size relation.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Zemin mekaniği genel olarak doymuş zeminler ve doymuş olmayan zeminler olarak ayrılmaktadır. İkisi arasındaki farkı zemin yapısı ve mühendislik davranışları belirlemektedir (Fredlund ve ark., 2012). Klasik zemin mekaniğinde, zemin tam olarak doymuş kabul edilmektedir. Zeminin doymuş durumda olması, zemin boşluklarının %98'den fazlasının su ile dolu olduğunu ifade etmektedir. Bu durumda boşlukların en fazla %2'si ayrık durumdaki hava ile doludur (Önalp, 2002). Doymuş olmayan zeminlerde ise, zemindeki hava boşlukları birleşerek sürekli hale gelmektedir. Bu durumda zeminin mühendislik davranışının analizi için doymuş olmayan zemin mekaniği karakteristiklerinin bilinmesi çok önemlidir.

Doymuş zeminler, zemin ve sudan oluşan iki fazlı bir sistem olduğundan, çok fazlı bir zemin sistemine nazaran üzerinde daha kolay çalışılabilmektedir. Bu durum, zemin mekaniği üzerinde yapılan araştırmaların çoğunlukla doymuş zeminler üzerinde yapılmasını açıklayan sebeplerden biridir (Barbour, 1998). Bilindiği gibi zeminin kayma direnci parametrelerini, hidrolik iletkenliğini ve zamana bağlı oturma davranışını bulmaya yönelik laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerin tamamı doymuş zemin kabulüne dayanmaktadır.

Doymuş olmayan zeminler, doymuş zeminlerin aksine 2'den daha fazla faza sahiptir. (Fredlund ve ark., 2012). Doymuş olmayan zeminler dane, su, hava ve hava-su temas yüzeyi (su zarı) olmak üzere 4 fazdan oluşmaktadır (Zhan ve ark., 2007). Doymuş olmayan zeminlerin mühendislik davranışı doymuş zeminlere göre çok karmaşıktır ve anlaşılması çok daha zordur (Fredlund, 2000). Zeminlere uygulanan kazı, örseleme ve sıkıştırma gibi işlemler zeminlerin suya doymuş olmamalarına neden olmaktadır (Zhan ve ark., 2007; Şenol ve Kutlu, 2013). Sıkıştırılmış zeminler, yüksek plastisiteli şişen zeminler, su muhtevastaki artışa bağlı olarak yüklemeler altında çöken gevşek siltli

zeminler ve negatif boşluk suyu basıncı etkisi altındaki zeminlerin tümü suya doymun olmayan zemin davranışına en temel örnekleri teşkil etmektedirler (Şenol ve Kutlu, 2013). Bu zeminler problemlili zeminler olarak bilinmektedir. Bu zeminlerin mekanik davranışında sahip oldukları negatif boşluk suyu basınçları büyük bir rol oynamaktadır. Bu tür zeminler üzerinde deneyler gerçekleştirmek oldukça zordur (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Yeryüzüne yakın zemin tabakalarının mühendislik özelliklerini iyi anlamak gerekmektedir. Vadoz zon olarak adlandırılan doymun olmayan bu alanda, zemin birçok sınır koşuluna maruz kalmaktadır. Bu problemlilerin çözümünde doymun olmayan zemin mekaniğini bilmek çok önemlidir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Yeraltı sularının derinlerde olduğu durumlarda, su seviyesinin üstünde kalan tabakalarda negatif boşluk basıncı etkisi bulunmaktadır (Fredlund ve ark., 2012; Zhan ve ark., 2007). Geleneksel zemin mekaniğinde ise yer altı su tablası üzerindeki doymun olmayan bölgedeki kapiler gerilmeler yok sayılmaktadır (Zhan ve ark., 2007).

Zemini doymun kabul ederek tasarım ve çözüm sunan yaklaşımların aşırı güvenli tarafta kaldığı bilinmektedir. Bazı araştırmacılar doymun zemin kabulünün aşırı güvenli olması sebebiyle doymun olmayan zemin yaklaşımına gerek olmadığını değerlendirmektedir. Oysa doymun olmayan zemin çözümlerinin doymun durum kabulünden çok farklı olduğu ortaya çıkmaktadır (Önalp, 2002). Doymun olmayan zeminlerin kayma dirençleri doymun durumdakinden daha yüksektir ve daha kısıtlı sıkışma özelliğine sahiptir. Doymun durumda olmayan zeminler için doymun zemin varsayımı yapmak taşıma gücü ve oturma açısından hatalı ve ekonomik olmayan analizler ortaya koymaktadır (Özocak, 2003).

Son dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde sıkıştırılmış zeminler, kalıntı ve göçen zeminler ve şişen zeminlerin doymun olmayan zeminler mekaniğinin özel konuları arasında yer aldıkları görülmektedir (Barbour, 1998; Fredlund ve Rahardjo, 1993). Sıkıştırılmış zeminler zemin yapıları içinde geniş bir yer tutarlar. Yollar, havaalanları, toprak barajlar ve altyapılara ait zemin yapıları bunlara örnektir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Dünya genelinde ve özellikle Türkiye’de gerçekleştirilen altyapı inşaatları son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Karayolu, havaalanı ve barajlar gibi yapıların tamamı sıkıştırılmış zeminler üzerine inşa edilmektedir. Bunun yanında ülkemizin genel olarak yarı kurak bir iklime sahip olduğunu göz önünde bulundurduğumuzda, geoteknik tasarımlara ve zemin problemlerine bulunacak çözümlerin doygun olmayan zeminlerin mekaniğinin konusu olduğu görülmektedir. Bu durumda doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerini kullanmak yerinde olacaktır.

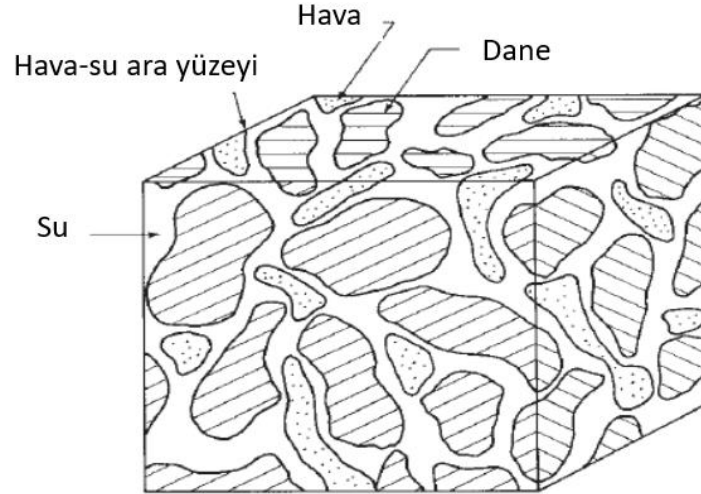
Doygun durumdaki zeminlerin davranışını anlayabilmek için gerekli parametre efektif gerilme iken doygun olmayan zeminlerde ise emme değeri-su muhtevası ilişkisi zemin davranışını anlamak için önemli bir göstergedir. Doygun olmayan zeminin sahip olduğu su muhtevası (ya da doygunluk derecesi) ve emme değeri ilişkisi "Zemin Su Karakteristik Eğrisi" (SWCC-Soil water characteristic curve) olarak bilinmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Bu çalışmada, doygun olmayan zeminler kategorisine giren yüksek enerji kullanılarak sıkıştırılmış numunelerin, ayrıca aynı zeminlerin bulamaçtan konsolide edilmiş numunelerinin davranışı emme değeri-su muhtevası ilişkisi üzerinden analiz edilmiştir. Bu kapsamda filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemleri kullanılarak farklı başlangıç su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanan dört farklı kil zemin üzerinde emme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrileri elde edilerek, farklı su muhtevalarına sahip sıkıştırılmış killerin zemin özellikleri ve mühendislik davranışlarının tahmini yapılmıştır. Farklı eğri oluşturma modellerinin deney sonuçlarına uyumu incelenmiştir. Boşluk boyutu analizi yapılarak, zemin-su karakteristik eğrisi ile olan ilişkisi araştırılmıştır.

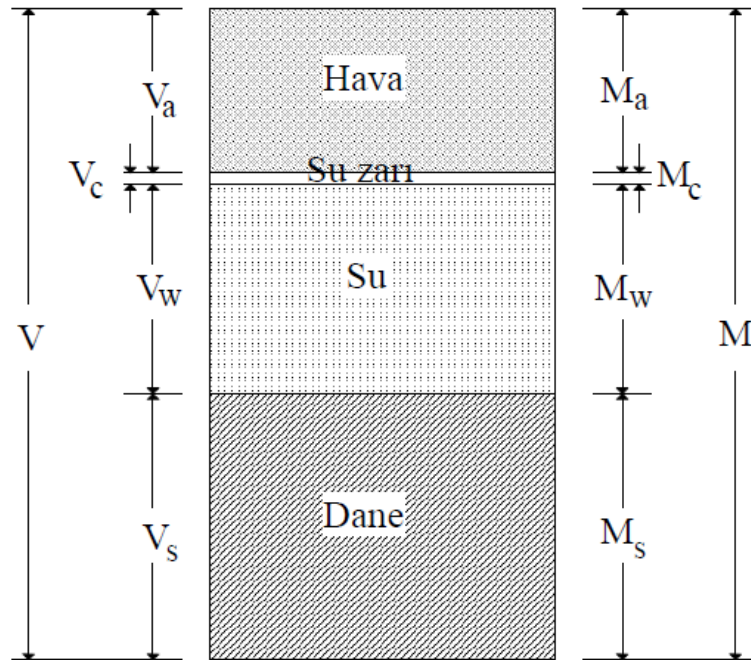
BÖLÜM 2. DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN ÖZELLİKLERİ

Doygun olmayan zeminler mekaniğinin gelişimi doygun zeminlere göre daha geç olmuştur. Bunun yanında doygun olmayan zeminlerin davranışını konu alan önemli sayıda makalenin 1936 yılında Harvard'da ilki gerçekleştirilen Uluslararası Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansında yayınlanmış olması dikkat çekicidir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Bu durum, o zamanlarda doygun olmayan zemin davranışı ile alakalı problemlerin dikkate alındığını göstermektedir. Sonraki zamanlarda doygun zeminler üzerinde çalışmanın daha kolay ve problemsiz olması sebebiyle doygun olmayan zeminlerin araştırılmasına yönelik ilgi azalmıştır. Zamanla geoteknik problemlere daha iyi analiz ve çözüm önerileri getirebilmek için doygun olmayan zemin mekaniğini anlamak daha fazla önemsenmiştir. Bunun bir sonucu olarak "sorunlu zeminler" üzerine konferanslar düzenlenmeye başlamıştır (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Son 10 yılda doygun olmayan zemin davranışı üzerinde önemli sayıda çalışma yapılmıştır.

Zemin içinde en az miktarda hava boşluğu olması teorik olarak zeminin doygun olmadığına göstergesidir (Şekil 2.1.). Bu durumda doygunluk derecesi yüksek olacaktır ve hava kabarcıkları kapalı formda bulunacaktır. Doygun olmayan zeminler dane, su, hava ve su zarı olmak üzere 4 fazdan oluşmaktadır (Şekil 2.2.) (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Doygun olmayan zeminlerin mühendislik özellikleri zemin emmesi ile zeminin sahip olduğu su muhtevası arasındaki ilişkiyi yansıtan zemin su karakteristik eğrisi ile yakın ilişkilidir (Zhou ve ark., 2013). Zeminlerin davranışı zemin üst tabakalarındaki mevsimsel ıslanma ve kurumadan etkilenen zemin-su etkileşimine bağlıdır. Kuru dönemlerde buharlaşma sebebiyle yüzeylerde çatlaklar gelişir. Yağışlı dönemlerde ise su muhtevasının artmasıyla zemin emmesi azalır. Bu durum kayma direncinin ve zemin şişmesinin azalmasına sebep olur (Zhan ve ark., 2007).

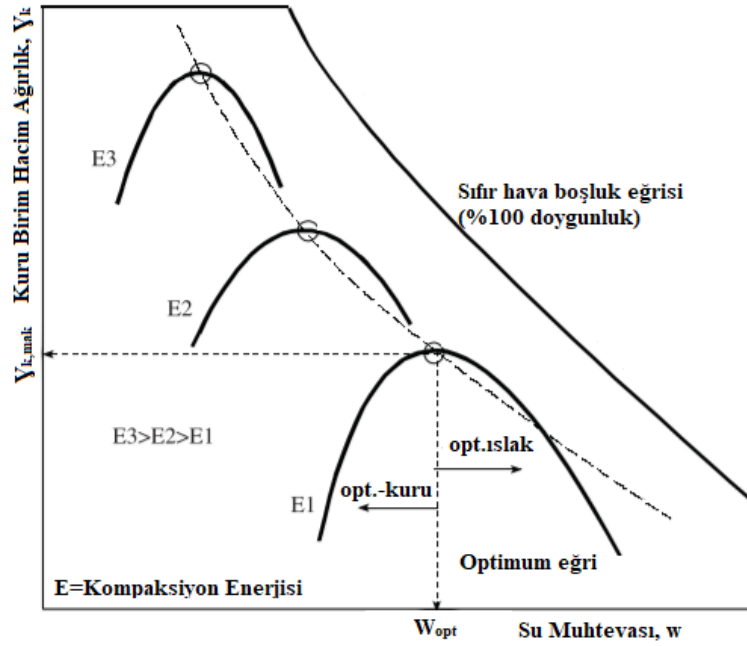


Şekil 2.1. Doygun olmayan bir zemin elemanı (Fredlund ve ark., 2012).



Şekil 2.2. Doygun olmayan zemin için dört fazlı blok diyagram (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Özocak, 2003).

Sıkıştırılmış zeminlerin mekanik davranışını anlamak için doygun olmayan zeminlerin davranışını bilmek gerekmektedir (Estabragh ve ark., 2004). Herhangi bir zeminin kompaksiyon eğrisi suya doyguluk eğrisinin altında kalmışsa o zemin doygun olmayan zemin olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.3.) (Kim ve ark., 2015).



Şekil 2.3. Kompaksiyon eğrisi ve suya doygunluk eğrisinin gösterimi (Basheer, 2001).

Zemin yapısı, gerilme durumu, mineroloji, özgül yüzeyi, kimyasal bileşim, başlangıç sıkıştırma su muhtevası, boşluk oranı veya porozite, yüzey aktifliği, zemin kimyası, boşluk suyu ve boşluk boyutu dağılımı sıkıştırılmış doymun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerini ve zemin su karakteristik eğrisini etkilemektedir (Fleureau ve ark., 2002).

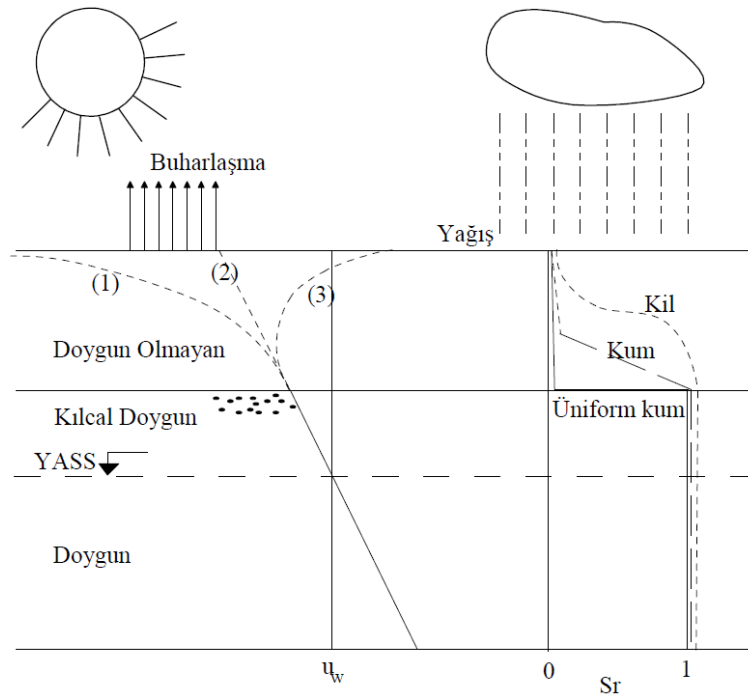
2.1. Vadoz Bölge

Yeryüzeyine yakın zemin tabakalarının mühendislik özelliklerini iyi anlamak gerekmektedir. Yeraltı suyu üzerinde kalan bu bölümde zemin doymun olabilir, buna rağmen boşluk suyu basınçları negatiftir. Zeminin geçirimsizlik katsayısı negatif boşluk suyu basınçlarının bir fonksiyonudur ve doğrusal olmayan davranış görülmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Geoteknik mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan problemlerin önemli bir kısmı bu alandaki doymun olmayan zeminleri kapsamaktadır (Bicalho ve ark., 2007).

Geleneksel zemin mekaniğinde yer altı su seviyesi üzerindeki doymun olmayan kısımdaki kapiler gerilmeler yok sayılmaktadır. Fakat yeraltı sularının derinlerde olduğu durumlarda, su seviyesinin üstünde kalan bu tabakalarda negatif boşluk basıncı

etkisi bulunmaktadır (Şenol ve Kutlu, 2013). Zemin profilinin yeraltı suyunun üzerinde kalan bu kısma vadoz bölge denilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Vadoz bölgede fisürlü ve çatlaklı bir yapı olmasından dolayı zeminin davranışının anlaşılmasında birçok zorluk bulunur. Bu sebeple zeminin bu bölümüyle çalışılmaktan çoğunlukla kaçınılır. Vadoz bölgenin üst kısmındaki çatlaklı ve fisürlü yapıya bağlı olarak kuruma meydana gelmektedir. Yüzeiden herhangi bir akış olmaması durumunda zeminin doygunluk derecesine bakılmaksızın, boşluk suyu basınç profili hidrostatik duruma ulaşacaktır. Yüzeiden buharlaşma olması durumunda boşluk suyu basıncı profili soldaki, yüzeiden su akışı olması durumunda ise sağdaki basınç profili geçerli olmaktadır (Şekil 2.4.) (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

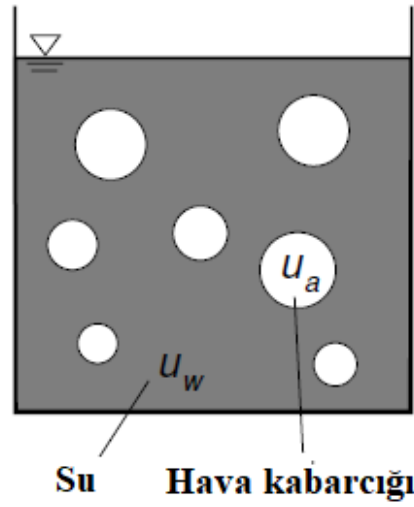


Şekil 2.4. Zemin akıntılarına bağlı olarak boşluk suyu profilinin değişimi (Fredlund, 2000; Özocak, 2003).

Vadoz bölgenin özelliklerinden biri de doygun bölgelerin hidrolik geçirirliliğe bağlı olarak üst kısmından suyu yavaş bir şekilde buharlaştırmasıdır. Aynı zamanda, su girişi fisürlere doğru oluşmaktadır. Zemin şişene ve doygun duruma gelene kadar yani fisürler ve çatlaklar tamamen suyla dolana kadar su girişinde bir direnç gözlenmez. Yanlış bilinen noktalardan biri zemin yüzeyinden sürekli bir su girişinin olabileceğidir. Eğer zemin doygun durumdaysa yüzeydeki su akışı doygun geçirirliliğe bağlı

olacaktır. Bu durumdaki geçirimsizlik katsayısı ise çok düşüktür (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

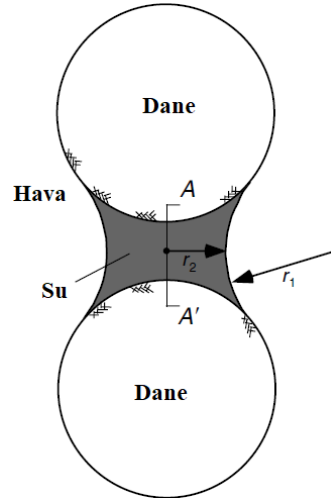
Zemin yüzeyine veya su tablasına yakın zeminler kapalı hava kabarcıkları içerirler. Optimum su içeriğinin üstünde sıkıştırılmış zeminler bu kategoriye girerler (Şekil 2.5.). Kuru ve doymuş zeminler karşılaştırıldığında; doymuş zeminlerin boşluklarındaki sıkışmaz suyun yerini hava kabarcıkları içeren boşluk sıvısının aldığı görülmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).



Şekil 2.5. Kapalı hava kabarcıkları (Lu ve Likos, 2004).

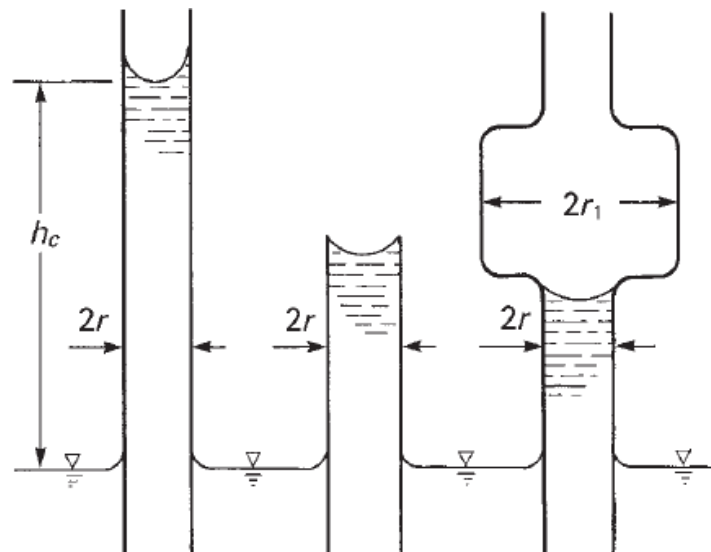
2.2. Kapilarite ve Yüzey Gerilimi

Doygun olmayan zeminlerde kapilarite veya negatif boşluk suyu basınçları etkisiyle emme oluşmaktadır (Barbour, 1998). Doymun olmayan bir zeminde hava ve suyla dolu birçok boşluk vardır. Boşluk yapısındaki hava su ara yüzeylerinde kapiler tüpe benzer meniskler oluşurlar (Şekil 2.6.) (Lu ve Likos, 2004).

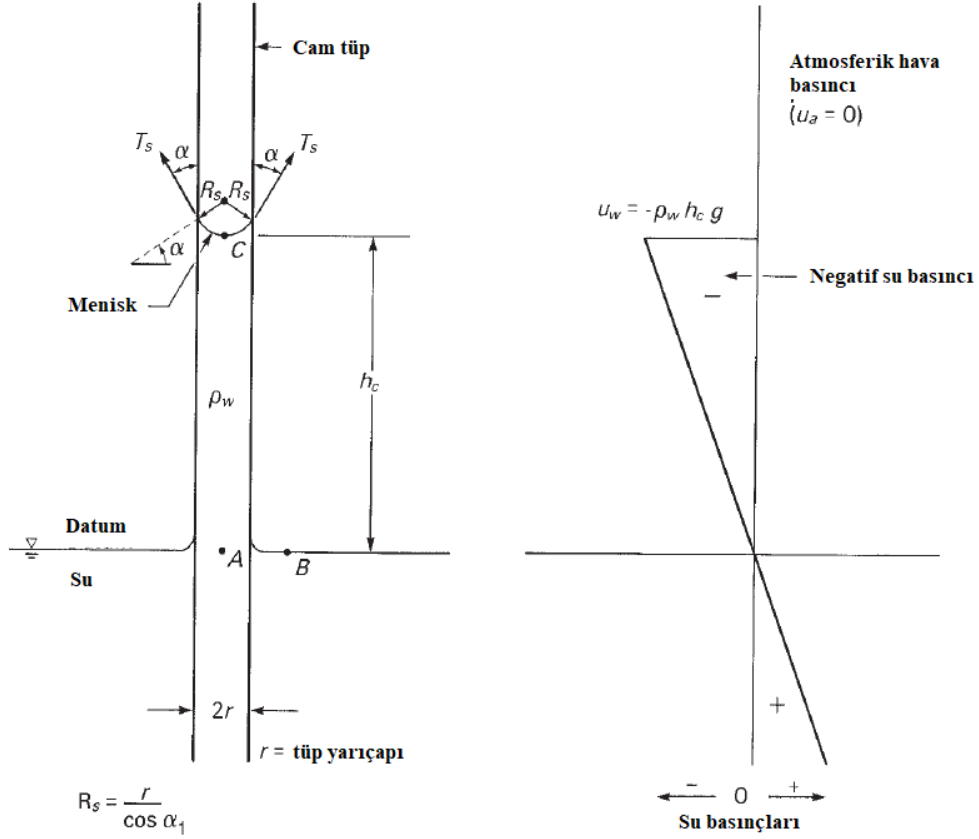


Şekil 2.6. Zemin daneleri arasında oluşan menisk bölgesi (Lu ve Likos, 2004).

Kapilarite doğrudan zemin emmesinin kılcal bileşeniyle ilgilidir. (Fredlund ve ark., 2012). Atmosfer şartlarındaki küçük bir cam tüpte yüzeysel çekme gerilmelerinin etkisiyle su yükselişe geçmektedir (Vanapalli ve ark., 2004). Kapiler tüpteki su yüksekliğini ve hava-su ara yüzeylerinde oluşan menisklerin yarıçaplarını cam tüpün yüksekliği, yarıçapı ve şekli etkilemektedir. Buradan hareketle zemin boşluklarında meydana gelen kapiler yükselmenin zemin boşluklarının boyutlarına bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.7.'de kapiler yükselmeye etkiyen şekil faktörleri gösterilmiştir. Şekil 2.8.'de ise kapileritenin fiziksel modeli ortaya konulmuştur (Fredlund ve ark., 2012).



Şekil 2.7. Şekil faktörünün kapiler yükselmeye etkisi (Fredlund ve ark., 2012).



Şekil 2.8. Kapilarite fiziksel model (Fredlund ve ark., 2012).

2.3. Zemin Emmesi

Doygun olmayan zeminlerde emmeyi göz önünde bulundurmak geoteknik mühendisliğinde daha gerçekçi bir tasarım ortaya çıkarır (Leong ve ark., 2001). Zemin emmesi doymun olmayan zemin davranışını kontrol eden en önemli parametrelerden biridir (Houston ve ark., 1994; Guan ve Fredlund, 1997). Doymun zeminlerde pozitif boşluk suyu basıncı ne kadar önemliyse doymun olmayan zeminlerde de zemin emmesi o kadar önemlidir (Houston ve ark., 1994). Geoteknik uygulamalarda doymun olmayan durumdaki zeminlerin mukavemet ve hacim değişimlerinin hesabında negatif boşluk suyu basıncı sıklıkla kullanılır. Doymun olmayan zeminlerdeki negatif boşluk suyu basıncına zemin emmesi denir. Zemin emmesi basitçe zeminin su çekmeye ve tutmaya olan yeteneği olarak tanımlanabilir (Bulut ve Wray, 2005). Doymun olmayan zeminlerin nem koşullarını tarif eden parametrelerin en önemlisidir (Bulut ve ark., 2001). Zeminin su muhtevasına bağlıdır ve zemin suyunun zemine ne kadar sıkı sıkıya tutunduğunun bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle zeminden birim hacimdeki suyu

uzaklaştırmak için, kapiler ve ağırlıksal kuvvetleri yenebilecek enerji miktarının ölçüsüdür (Sreedeeep ve Singh, 2005).

Zeminin toplam emmesi, su tutma mekanizmalarının toplu katkısını yansıtmaktadır. Toplam emme bileşenlerinin katkısı eşitlik 2.1’de verilmiştir (Edil ve Motan, 1984; Campbell, 1988).

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p + \Psi_g \quad (2.1)$$

Burada; ψ : birim kütle, hacim veya ağırlıktaki suyun potansiyel enerjisi, m: kılcal potansiyel, o: eriyik potansiyel, p: basınç potansiyeli, g: yerçekimsel potansiyel.

Zeminde, birim zemin kütlelerinin sahip olduğu yerçekimsel potansiyel; referans alınan bir noktaya olan mesafe ile yerçekimi sabitinin çarpımıdır. Basınç potansiyeli ise bir noktanın, üzerindeki serbest su yüzeyine olan uzaklığının yerçekimi sabiti ile çarpımıdır. Kılcal gerilme, daneler ile su arasındaki ve su moleküllerinin kendi aralarındaki çekiminden kaynaklanmaktadır. Zeminin kılcal potansiyelinin değişmesi su, elektrik ve ısı geçirgenliğini etkiler. Bu sebeple kılcal potansiyel elektriksel, ısı ve hidrolik iletkenlik ile ilişkilendirilebilir. Eriyik emme ise bir çözelti halinde bulunan boşluk suyundaki enerjiden kaynaklanmaktadır (Campbell, 1988).

Zemin emmesi, kılcal gerilme ve eriyik emme bileşenlerinden oluşmaktadır (Krahn ve Fredlund, 1972; Houston ve ark., 1994; Guan ve Fredlund, 1997; Agus ve ark., 2010). Toplam emme değerleri ağırlıksal su içeriği ile ilgilidir, doygunluk derecesi ve hacimsel su içeriği ile ise ilgisi yoktur. Zemin yapısı tarafından kontrol edilen kılcal gerilme değerlerinin değişimiyle belirlenmektedir, bu sebeple zemin davranışını göstermesi açısından kılcal gerilme değeri eriyik emme değerinden daha önemlidir. (Wan ve ark., 1995).

Kılcal gerilme, zemin boşluk suyundaki relatif negatif basınçtır (Krahn ve Fredlund, 1972). Yüzeysel gerilmeyle yani kılcallık olayı ile ilgilidir ve zemin boşluklarındaki hava ve su basınçları arasındaki fark olarak tanımlanır (Edil ve Motan, 1984; Houston

ve ark., 1994; Wan ve ark., 1995; Bicalho ve ark., 2007; Agus ve ark., 2010; Kim ve ark., 2015). Bunun yanında kılcal gerilmenin boşluk yapısı gibi geometrik faktörlerle ilgili olduğu da söylenmiştir (Houston ve ark., 1994). Kılcal gerilme, suyun tutulması için zeminin katı yapısından çıkan kuvvetleri yansıtır. Danelerin yüzeysel kuvvetlerini ve kapiler çekme gerilmelerini içerir (Edil ve Motan, 1984). Kapiler kuvvetlerin yanında hidrasyon kuvvetleri de zeminlerin emme karakteristiklerini özellikle kılcal gerilmeyi kontrol ederler. Kuru bir zeminde kil yüzeyindeki su ile buluşmamış katyonlar sebebiyle hidrasyon kuvvetleri etkilidir. Hidrasyon kuvvetleri kapiler kuvvetlere benzer şekilde bir kuvvet meydana getirirler. Hidrasyon kuvvetlerinin yanında katkı yapan diğer bir kuvvet van der Waals kuvvetleridir. Bu kuvvetler kil partiküllerinin çevresinde emici kuvvetler oluştururlar. Bu kuvvetler kılcal gerilme bileşenini yönetirler (Yong, 1999).

Kılcal gerilme, doymun olmayan zeminlerin hidromekanik özelliklerini anlamak için anahtar önemdedir (Bicalho ve ark., 2007). Kılcal gerilmenin, doymun olmayan bir zeminin maruz kaldığı yükleme altında göstereceği mekanik davranışı belirleyen bir parametre olduğu belirtilmiştir (Kim ve ark., 2015). Kılcal gerilme ya da negatif boşluk suyu basıncı şevlerin stabilitesinde önemli bir rol oynar. Zemin suyunda artış meydana gelmesiyle kılcal gerilme kısmen veya tamamen ortadan kalkar ve şev göçer (Li ve ark., 2005).

Eriyik emme ise bir çözelti içeren zemin suyunun sahip olduğu emmedir (Krahn ve Fredlund, 1972). Boşluk sıvısındaki tuz içerikten kaynaklanır (Houston ve ark., 1994). Zemin suyunda farklı noktalardaki çözünen madde yoğunluklarının farkından oluşmaktadır (Edil ve Motan, 1984). Eriyik emme kil mineralleri ile boşluk suyu arasındaki fiziko-kimyasal etkileşimlere bağlıdır (Wan ve ark., 1995).

Doymun olmayan zeminlerde, su hareketi doymunluk derecesine bağlı olarak toplam ve kılcal gerilmeyle kontrol edilmektedir, deformasyon ve mukavemet davranışı ise öncelikle kılcal gerilmeye bağlıdır. Bu sebeple emme bileşenlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Edil ve Motan, 1984).

Sıkıştırılmış zemin karışımlarının arazi emme değerlerinde çevresel ıslanma ve kuruma çevrimlerine bağlı olarak değişimler gözlenmektedir. Başlangıç emme değeri, sıkıştırılmış zeminlerin davranışını oldukça etkilemektedir (McKeen ve Hamberg, 1981; Dineen ve ark., 1999; Likos ve Lu, 2002). Sıkıştırmadan hemen sonra, zemin daha tam olarak hidrate olamadığından emme potansiyelinde dağınık bir dağılım gözükmektedir. Bu durumda dane içlerindeki boşluk suyu kapilariteden dolayı tutuk durumdadır ve gözeneklerdeki boşluk suyuna göre farklı bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple bu durumda ölçülen emme değeri genellikle daneler arası boşluklardaki boşluk suyu potansiyelini yansıtır. Zamanla boşluk suyunun yeniden dağılmasıyla bu potansiyel farkı kaybolacaktır ve kararlı duruma ulaşılacaktır. Emme potansiyeli bir kararlı durumu yansıtacak ve ilk duruma göre daha yüksek bir değer alacaktır. Kararlı duruma ulaşma süresi boşluk yapısı, permeabilite katsayısı, boşluk sıvısının kimyası ve zemin türü parametrelerine bağlıdır (Agus ve ark., 2010).

2.4. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi (SWCC)

Doymun olmayan zeminlerin permeabilite, kayma direnci ve hacim değişimi özellikleri büyük oranda zeminin su tutma karakteristiklerine bağlıdır. Zemin su tutma kapasitesi şev stabilitesi, yol ve havaalanlarının taşıma kapasitesi, dolguların performansları, atık sızıntıları, kalıntı zemin davranışları, yeraltı suyu akışı gibi doymun olmayan zemin koşullarında gerçekleşen zemin problemleri hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Zemin su karakteristik eğrisini zeminin su tutma kapasitesinin ölçüsü olarak tanımlamak mümkündür (Vanapalli ve ark., 2004). Doymun zeminlerin davranışının analizinde gerilme durumu ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi tanımlayan konsolidasyon eğrisinin çok önemli olduğu bilinmektedir. Doymun olmayan zeminlerde ise zemin davranışının analizinde zemin su karakteristik eğrisi benzer bir rol oynamaktadır (Barbour, 1998).

Doymun olmayan zeminin sahip olduğu su muhtevası (ya da doymunluk derecesi) ve emme değeri ilişkisi "Zemin Su Karakteristik Eğrisi" olarak bilinmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Barbour, 1998; Vanapalli ve ark., 2004; Wang ve Benson, 2004; Li ve ark., 2005; Sivakumar Babu ve ark., 2005; Qian ve Lu, 2011). Doymun olmayan

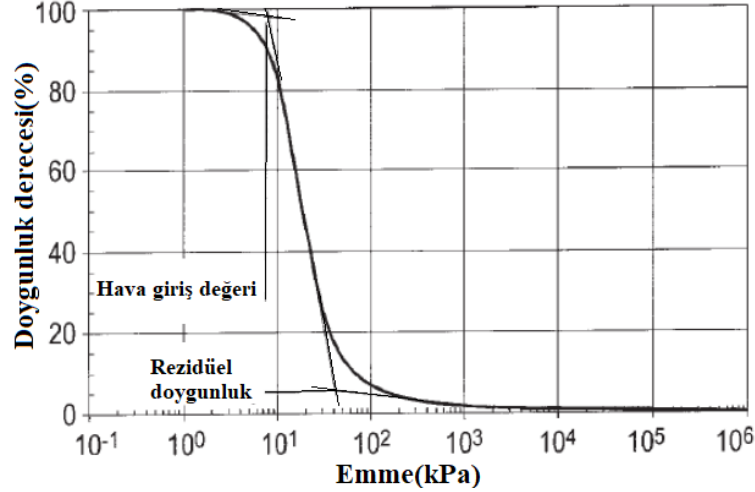
zeminlerde emme değeri-su muhtevası ilişkisi zemin davranışını ölçmek için önemli bir parametredir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Barbour, 1998; Aung ve ark., 2001).

Diğer bir tanımda, zemin boşluklarından su çıkarmak için uygulanan enerji ile çıkan su miktarı arasındaki ilişki zemin karakteristik eğrisi olarak adlandırılmıştır. Büyük boşluklar, su boşaltmak için daha küçük enerji isterler. Zemin su karakteristik eğrileri zemin emmesiyle poroz malzemenin boşluklarına alınan su miktarı ile ilgilidir. Bu su miktarını ağırlıksal veya hacimsel yolla hesaplamak mümkündür. Zemin su karakteristik eğrisi sadece su muhtevası ile emme ilişkisini kapsamaz, boşluk oranı ile emme ilişkisini de içine almaktadır (Marinho ve Stuermer, 2000). Boşluk yapısının boyut ve dağılım özelliklerine bağlı olarak geçirimsizlik ve hacim değişimi hakkında bilgiler sunar (Aung ve ark., 2001).

Zemin su karakterisrik eğrileri, doygun olmayan zeminlerin permeabilite, su tutma, kayma mukavemeti ve termal özelliklerini tahmin etmek için kullanılır (Marinho ve Stuermer, 2000; Wang ve Benson, 2004; Sivakumar Babu ve ark., 2005; Fredlund ve ark., 2011; Zheng ve ark., 2013). Son zamanlardaki çalışmalar birçok doygun olmayan zemin parametresinin zemin su karakteristik eğrisi üzerinden elde edilebileceğini göstermiştir. Zemin su karakteristik eğrisini elde etmek diğer doygun olmayan zemin parametrelerini elde etmekten daha kısa bir deney süresi gerektirmektedir (Leong ve ark., 2001).

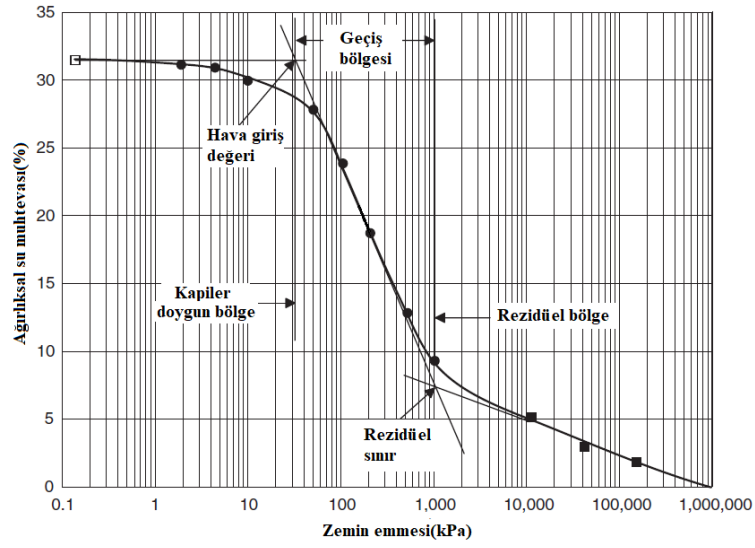
Zemin-su karakteristik eğrisinin iki önemli özelliği vardır; hava giriş değeri (kabarcıklaşma basıncı) ve kalıcı doygunluk derecesi (Şekil 2.9.) (Barbour, 1998; Li ve ark., 2005; Fredlund ve ark., 2011). Hava giriş değeri zemin boşluklarının drenajının başladığı emme değeri olarak bilinir (Barbour, 1998). Diğer bir tanımda da, zemindeki büyük boşluklardan başlayarak zemine havanın girmeye başladığı kılcal gerilme değeri olduğu söylenmektedir. Hava giriş değeri, zemin-su karakteristik eğrisindeki ilk kırılmadır (Elkady ve ark., 2015). Bu emme değerinde büyük boşluklardan başlayarak su çıkışı başlamaktadır. Kalıcı doygunluk derecesinden itibaren ise zeminden su çıkışı çok daha zor olmaktadır (Fredlund ve ark., 2011). Zemin boşluklarından sıvı fazdaki drenajın azalmaya başladığı ve suyun buharlaşarak

uzaklaşmaya başladığı doygunluk derecesidir (Barbour, 1998). Kalıcı su muhtevası değeri olarak da bilinen sınır su muhtevası değerinden sonra zeminin su muhtevası değerinde önemli bir değişiklik olmasa bile emme değerinde artış gözlenmektedir (Elkady ve ark., 2015).

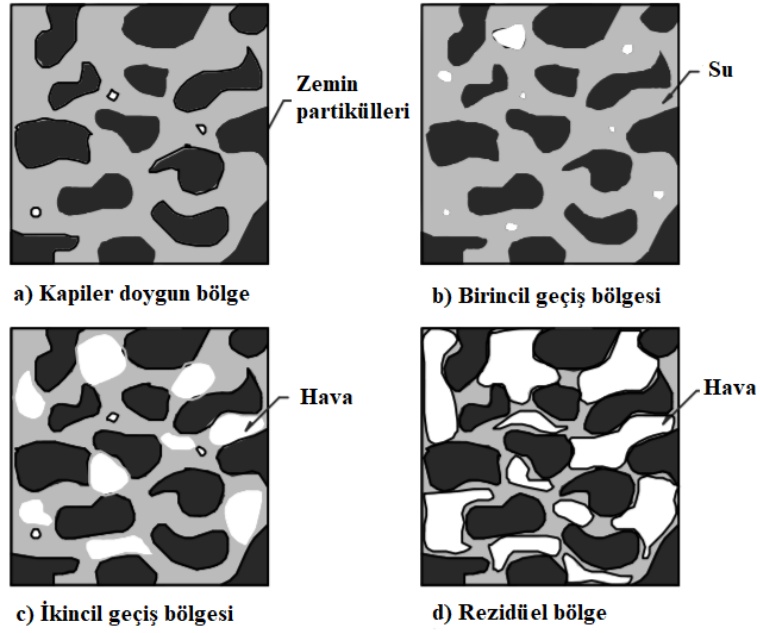


Şekil 2.9. Tipik zemin-su karakteristik eğrisi (Barbour, 1988).

Zemin su karakteristik eğrisini oluşturmak ve hava giriş değeri ve eğrinin farklı alanlarının gösterilmesi için su muhtevası-emme ilişkisini gösteren 6-8 nokta elde etmek gereklidir (Vanapalli ve ark., 2004). Eğrinin eğimindeki değişimler üç farklı bölge oluşturur. Bunlar; düşük emme değerinde "sınır etki alanı", hava giriş değeri ile kalıcı değer arası "geçiş bölgesi", kalıcı değerden sonraki yüksek emme değerlerini içine alan "kalıcı alan"dır (Şekil 2.10.) (Fredlund ve ark., 2011). Zemin su karakteristik eğrisinin farklı bölgelerine ait zemin fazları Şekil 2.11.'de gösterilmiştir (Vanapalli ve ark., 2004). Kalıcı alan, 1.000.000 kPa emme değerine kadar uzanmaktadır (Fredlund ve ark., 2011). Yüksek kılcal gerilme değerlerinde su kaybı ihmal edilebilir durumdadır ve su muhtevası kalıcı bir değere ulaşmaktadır (Aung ve ark., 2001).



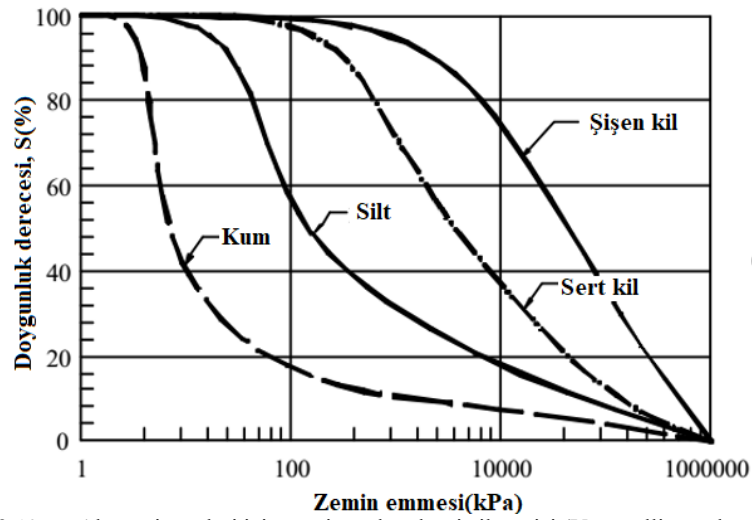
Şekil 2.10. Tipik kuruma eğrisinin bölgeleri (Fredlund ve Rahardjo, 2012).



Şekil 2.11. Zemin su karakteristik eğrisinin farklı bölgelerinde zemin fazları (Vanapalli ve ark., 2004).

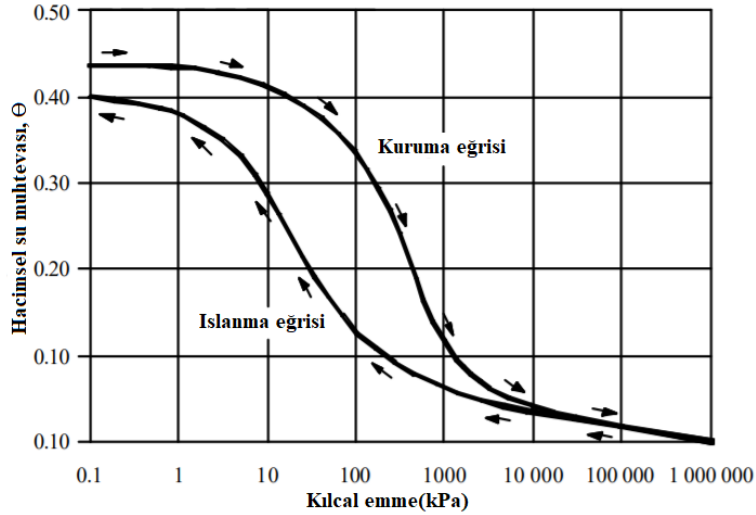
Aynı emme değerine sahip ince dane oranı yüksek zeminler daha büyük su tutma kapasitesine sahiptir. İri daneli zeminlerin kuruması ince daneli zeminlere nazaran daha hızlı gerçekleşmektedir. Tüm zeminler için su muhtevası sıfıra yaklaşırken emme değeri maksimum 1.000.000 kPa değerine eşitlenir (Şekil 2.12.). Bu yaklaşımla 1.000.000 kPa emme değerinde zeminin tamamen kuru olduğu sonucuna ulaşılır (Vanapalli ve ark., 2004).

Bir zemin için zemin su karakteristik eğrisi kuruma ve ıslanma formlarında oluşmaktadır (Şekil 2.13.). Kuruma ve ıslanma eğrileri birbirinden çok farklıdır. Bir zeminde düzgün olmayan boşluk dağılımının sonucu olarak ıslanma ve kuruma eğrilerinde histeresis oluşabilir (Vanapalli ve ark., 2004). Islanma ve kuruma karakteristik eğrileri arasında fark olması sebebiyle iki durum arasındaki meydana gelen histeresisi dikkate almak gerekir. Aynı emme değeri için kuruma durumunda ıslanma durumuna göre zemin tarafından daha fazla su adsorbe edilir (Lu ve Likos, 2004).



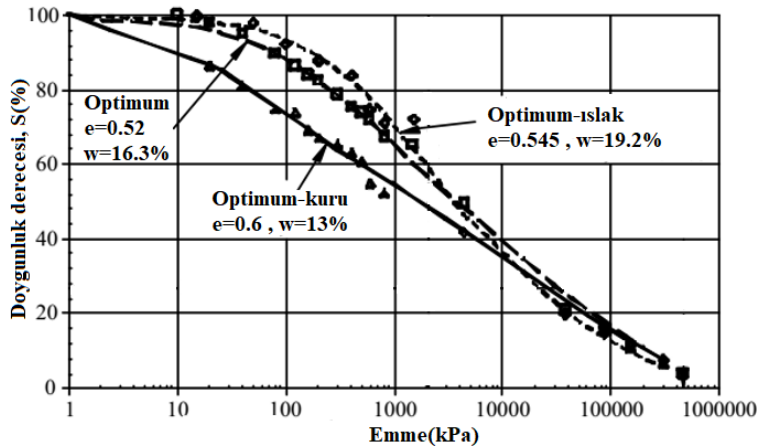
Şekil 2.12. Farklı zemin türleri için zemin su karakteristik eğrisi (Vanapalli ve ark., 1999).

Basınç plakası kullanılarak kılcal gerilme düşükten yükseğe uygulandığında kuruma eğrisi çizilebilir (Aung ve ark., 2001). Kuruma eğrisini elde edebilmek için zeminin doymuş su muhtevasının bilinmesi gereklidir (Fredlund ve ark., 2011). Kılcal gerilme yüksek değerden düşük değere azaltılarak uygulandığında zemin numunesi su emecektir ve hacimsel su içeriği artış gösterecektir. Bu durumda da ıslanma eğrisi çizilebilecektir. Histeresis etkisinden dolayı bu eğriler birbirini kesmezler (Aung ve ark., 2001).



Şekil 2.13. Zemin-su karakteristik eğrisi üzerinde ıslanma-kuruma etkisi (Vanapalli ve ark., 2004).

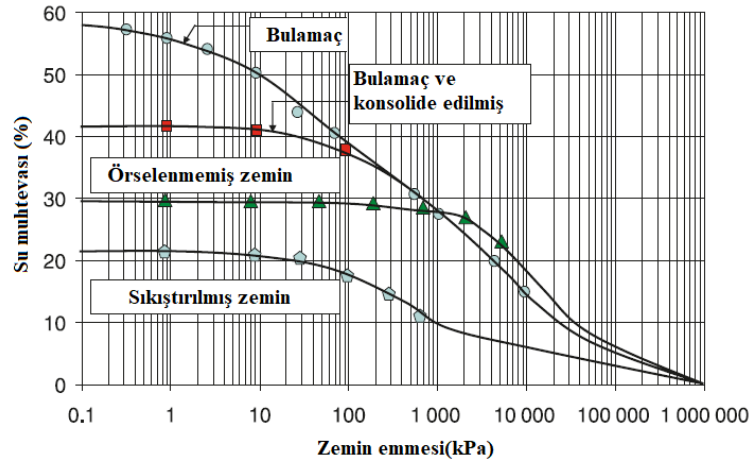
Doygun olmayan zeminlerin davranışını etkileyen bütün parametreler o zemine ait zemin su karakteristik eğrisini de etkilemektedir. Hava giriş değeri, karakteristik eğrinin bölümleri eğri için ayırt edici özelliklerdir (Vanapalli ve ark., 1999). Bu özellikler birçok faktöre bağlı olmaktadır. Bu faktörler sıkıştırma su muhtevası, zemin yapısı, boşluk oranı, zemin türü, yapısı, gerilme tarihçesi, mineroloji ve sıkıştırma yöntemidir (Vanapalli ve ark., 1999; Qian ve Lu, 2011). Zheng ve arkadaşları (2013) farklı başlangıç su muhtevalarında ve farklı türlerde zeminlerde, zemin-su karakteristik eğrisinin mühendislik uygulamaları için önemli olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.14. Farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış kilin SWC eğrisi (Vanapalli ve ark., 1999).

Zemin su karakteristik eğrisi şeklini etkileyen faktörler içinde zemin türü, dane yarıçapı, mineral bileşimi, boşluk yapısı, gerilme durumu ve çevre koşulları vardır

(Sivakumar Babu ve ark., 2005; Xu ve ark., 2013; Zhou ve ark., 2013). Bu faktörler eğrinin hava giriş değeri ve kalıcı su muhtevası değerlerini etkileyerek eğrinin değişimini belirler (Xu ve ark., 2013). Sıkıştırılmış zeminlerde kompaksiyon enerjisi ve başlangıç su muhtevası zemin su karakteristik eğrisi biçimini kontrol edebilir (Marinho ve Stuermer, 2000). Kompaksiyon durumu boşluk yapısını değiştirdiği için zemin su karakteristik eğrisini etkiler (Elkady ve ark., 2015). Farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış zeminlerin zemin su karakteristik eğrileri önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Şekil 2.14.) (Vanapalli ve ark., 1999). Kompaksiyon derecesi arttıkça hava giriş değeri artmaktadır (Qian ve Lu, 2011). Zemin-su karakteristik eğrisi uygulanan gerilmelerden etkilenmektedir (Şekil 2.15.) (Pham ve Fredlund, 2008).



Şekil 2.15. Zemin başlangıç koşullarının SWC eğrisi üzerindeki etkisi (Pham ve Fredlund, 2008).

2.5. Zemin Emmesi Ölçüm Yöntemleri

Doygun olmayan zeminlerin davranışı ile alakalı olarak son 20 yıldır teorik ve deneysel çalışmalar yapılmakta ve sayısal teknikler geliştirilmektedir. Bu gelişmeler aşırı maliyetler sebebiyle laboratuvarında veya arazide henüz çok az uygulanmaktadır. Son zamanlarda yaşanan gelişmelere bağlı olarak zemin emmesi, daha ucuz ve daha kolay bir şekilde ölçülebilir ve kontrol edilebilir hale gelmiştir (Catana ve ark., 2006).

Zemin emmesinin ölçülmesi doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışı teorilerini uygulamak için gerekli şartlardan biridir. Emme ölçümü yapan aletlerin çoğu ölçüm aralığı, dengeye ulaşma süresi ve maliyet açısından belirli sınırlamalara

sahiptir (Bulut ve ark., 2001). Emme ölçümü yapan yöntemlerin çoğu çok yavaş işlemektedir ve birçoğu tam bir doğrulukla sonuç vermez (Ridley ve Burland, 1993). Kılcal gerilme ölçümü için kullanılan yöntemler genellikle 100 ile 1000 kPa değerleri arasında ölçüm yapmaya olanak tanır (Ridley ve Burland, 1993; Catana ve ark., 2006).

Emme ölçümü yapan aletler doğrudan veya dolaylı ölçüm yapanlar olmak üzere iki türdür (Vanapalli ve ark., 2004). Tablo 2.1.'de doğrudan ve dolaylı ölçüm yöntemleri, ölçüm aralığı, ölçüm yeri ve algılanan değişken parametrelerine göre sıralanmıştır (Özocak, 2003). Zemin emmesini doğrudan ölçen aletler cihazla zemin arasındaki su değişimini kullanırlar. Bunu sağlayan kuvvet negatif boşluk suyu basıncıdır. Doğrudan ölçüm cihazlarıyla boşluk suyu enerjisi tespit edilmektedir (Ridley ve Burland, 1993; Vanapalli ve ark., 2004). Fakat tansiyometre gibi ya çok düşük emme değerlerini ölçerler ya da basınç plakasında olduğu gibi hava basıncı yükselmesini kullanarak yüksek emme değeri ölçerler. Bu gruptaki cihazlar için gerekli parçalar poroz disk ve bir manometredir (Ridley ve Burland, 1993). Dolaylı ölçüm yapan cihazlar korelasyon teknikleri ile emme ölçümü yaparlar (Vanapalli ve ark., 2004). Atmosfer basıncında yüksek emme değeri ölçmek için kullanılan aletler dolaylı ölçen aletlerdir, çünkü bunlar bazı fiziksel özelliklere karşı kalibre edilmiş aletlerdir (Ridley ve Burland, 1993). Basınç plakası aleti, filtre kağıdı tekniği ve psikrometre yöntemi kullanılarak toplam, kılcal ve eriyik emme bileşenlerini ölçmek mümkündür (Sivakumar Babu ve ark., 2005).

Tablo 2.1. Laboratuvar ve arazi emme ölçüm teknikleri (Özocak, 2003).

Alet	Emme	Ölçülen değişken	Ölçüm aralığı (kPa)	Dengeye ulaşma süresi	Uygulama 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
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 tansiyometresi	Kılcal Toplam?	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-1500	Saat	Lab Arazi	Bocking ve Fredlund, 1979
IC tansiyometresi	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
Isıl iletkenlik	Kılcal	İletkenlik	0-300	Hafta	Lab Arazi	Sattler ve Fredlund, 1989
Sızma	Eriyik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Mannheim, 1966
Süzme	Eriyik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Mannheim, 1966

2.5.1. Filtre kağıdı yöntemi

Filtre kâğıdı yöntemi, bir zemin emme ölçüm tekniğidir (Bulut ve ark., 2001; Qian ve Lu, 2011). Filtre kâğıdı ile emme dolaylı olarak ölçülmektedir (Bulut ve Wray, 2005). Araştırmacılar tarafından emme ölçümünde çok fazla tercih edilmektedir. Filtre kâğıdı

ile ölçüm yapmanın basit, ucuz ve çok sayıda ölçüme aynı anda izin veriyor olması bu durumun sebepleri arasında gösterilebilir. (Houston ve ark., 1994; Bulut ve ark., 2001; Vanapalli ve ark., 2004). Hem arazide hem de laboratuvarında makul sonuçlar vermektedir (Vanapalli ve ark., 2004). Filtre kâğıdı yöntemi en geniş ölçüde emme ölçümü yapan deney yöntemidir (Bulut ve Wray, 2005). 0-100 MPa emme değerleri arasında ölçüm yapabilen tek yöntemdir (Houston ve ark., 1994). Geniş aralıkta emme değerini ekonomik ve diğer yöntemlerden daha basit bir şekilde ölçer (Qian ve Lu, 2011).

Filtre kağıdı ile emme ölçümünün deney prosedürü basit ve kolay anlaşılırdır. Bu yöntemde herhangi bir özel araca ihtiyaç duyulmaz (Leong ve ark., 2002). Yöntemin prensibi filtre kağıdı ile zeminin arasındaki su akışının dengeye ulaşmasına dayanır. Denge anında zemin ve filtre kağıdı aynı emme değerine sahip olur (Bulut ve Wray, 2005; Bicalho ve ark., 2007). 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 7 gün beklenmektedir (ASTM D5298-94, 2000). Başka bir çalışmada ise 7 günlük kararlı duruma ulaşma süresinin yeterli olmadığı, bekleme süresinin 14 gün olması gerektiği belirtilmiştir (Leong ve ark., 2002).

Filtre kağıdı yöntemiyle toplam ve kılcal gerilme ölçümü yapmak mümkündür (Bulut ve ark., 2001; Bulut ve Wray, 2005). Zemin ile filtre kağıdı temas halinde yerleştirilirse kılcal gerilme, temas halinde olmadan yerleştirilirse toplam emme ölçümü yapılır (Şekil 2.16.). Kılcal gerilmede su akışının, toplam emmede su buharı akışının denge durumuna gelmesi beklenir (Bulut ve Wray, 2005). Düşük emme değerlerinde filtre kağıdıyla kılcal gerilme toplam emmeye göre daha kolay ölçülmektedir. Bunun ilk sebebi ise düşük emme değerinde, emmedeki değişime karşılık filtre kağıdı su içeriğinin bu hassasiyeti gösterememesidir (Houston ve ark., 1994).

Filtre kağıdı yönteminin doğruluğu su içeriği-emme ilişkisine bağlı olduğundan, filtre kağıdının kalibrasyonunun çok önemli olduğu belirtilmiştir (Leong ve ark., 2002;

Tablo 2.2. Whatman No.42 ve Schleicher & Schuell No.589 filtre kağıtları için kalibrasyon eğrileri (Leong ve ark., 2002).

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	$\log \psi = 5,238 - 0,0723 \log w_f$	$w_f < 54$
	$\log \psi = 1,8966 - 0,01025 \log w_f$	$w_f \geq 54$
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	$\log \psi = 4,9 - 0,0624 \log w_f$	$w_f < 66$
	$\log \psi = 1,25 - 0,0069 \log w_f$	$w_f \geq 66$
Greacen ve ark, 1987	$\log \psi = 5,056 - 0,0688 \log w_f$	$w_f < 54$
ASTM, 1997	$\log \psi = 1,882 - 0,0102 \log w_f$	$w_f \geq 54$

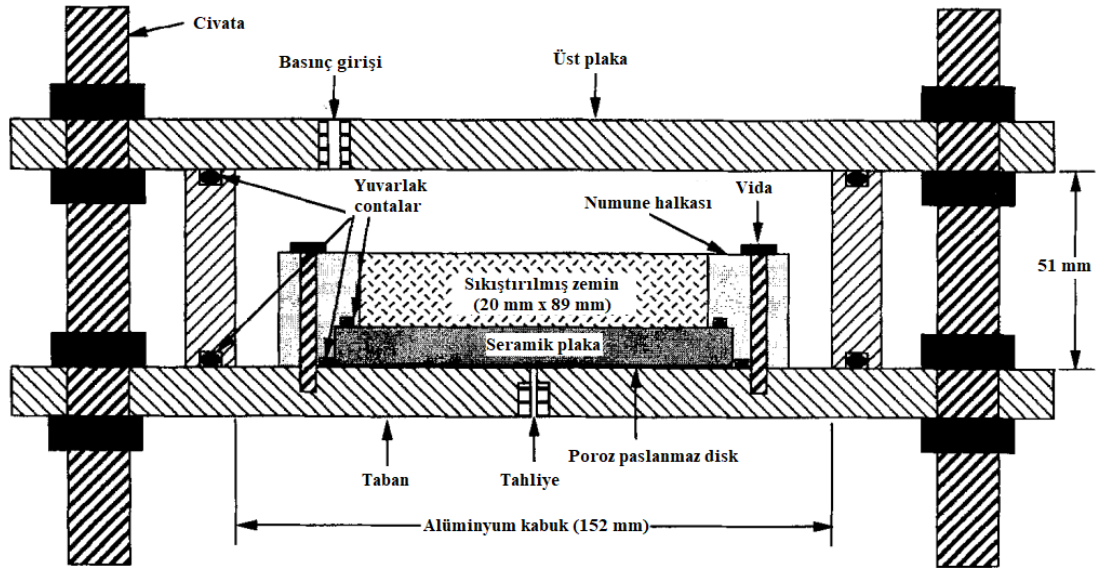
Not: ψ = emme (kPa); w_f = filtre kağıdı su muhtevası (%)

2.5.2. Basınç plakası

Basınç plakaları zemin su karakteristik eğrisini oluşturmak için kullanılır (Bittelli ve Flury, 2009). Zeminin yapısına ve emme büyüklüğüne bağlı olarak zemin-su karakteristik eğrisi ölçülmektedir. İnce dane yapısına sahip zeminlerde basınç plakası ile 1500 kPa değerine kadar emme değerleri ölçümü yapılmaktadır (Vanapalli ve ark., 2004; Wang ve Benson, 2004). İri daneli zeminler için ise 0-500 kPa aralığında zemin-su karakteristik eğrisi oluşturulmasını sağlarlar (Vanapalli ve ark., 2004).

Başlangıçta doygun durumda olan numuneler emme uygulanarak kuruma eğrisi elde edilir (Vanapalli ve ark., 2004). Doygun bir zemin numunesi basınç hücresi içindeki poroz seramik plaka üzerine yerleştirilir (Şekil 2.17.) (Cresswell ve ark., 2008). Zemin numuneleri yaygın olarak 50-75 mm çapa, 20 mm yüksekliğe sahiptir (Vanapalli ve ark., 2004). Seramik plakanın içindeki basınç atmosfer basıncına eşittir. Numunelere

basınç uygulanması bir hidrolik eğim yaratarak numunelerden seramik plakaya su geçmesini sağlar. Teorik olarak denge durumuna gelindiğinde bu akış sona erer (Cresswell ve ark., 2008). Denge durumuna ulaşıldığında, uygulanan kılcal gerilme altındaki su muhtevasına ulaşılmış demektir. Denge durumuna ulaşılma süresi iri daneli zeminler için 1-2 gün, ince daneli zeminler için ise 3-7 gündür (Vanapalli ve ark., 2004).



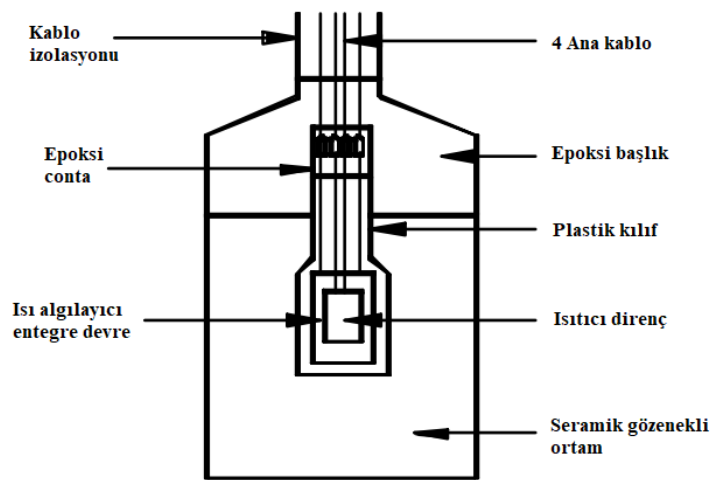
Şekil 2.17. Basınç plakasının şematik gösterimi (Tinjum ve ark., 1997).

Düşük plaka, zemin geçirgenliği, plakanın zemine temas etmemesi, zeminin dağılması düşük su muhtevalarında sağlıksız sonuçlar alınmasına sebep olur. -20 m su basıncından daha az değerlerde elde edilen eğrilerin hatalı olabileceği görülmüştür (Bittelli ve Flury, 2009).

2.5.3. Isıl iletkenlik sensörü

Isıl iletkenlik sensörleri arazide emme ölçümü yapmak için çok kullanışlıdır. Laboratuvar ve arazide 400 kPa'a kadar emme ölçümü yapabilirler. Sensör, içinde sıcaklığa duyarlı bir parça ve mini ısıtıcı bulunan geçirimli bir poroz bloktan oluşur (Şekil 2.18.) (Vanapalli ve ark., 2004). Sensörün ölçüm prensibi, seramik blokta meydana gelen sıcaklık değişiminin zeminin kılcal gerilmesiyle ilişkilendirilmesine dayanır (Phene ve ark., 1971; Vanapalli ve ark., 2004). Sensör, zeminin kılcal

gerilmesini dolaylı olarak ölçer. Zeminde açılan deliğe sensör yerleştirilir ve zeminin ve sensörün su muhtevaları kararlı duruma ulaştığında okuma yapılır. Sensördeki poroz blok ile zemin arasındaki su akışı durduğunda kararlı duruma ulaşılmış olur. Poroz bloktaki su miktarı bloğun ısı yaymasını etkiler ve kılcal gerilme değeri yayılan ısıya bağlı olarak dolaylı şekilde ölçülür. Kararlı duruma ulaşıldığında kılcal gerilme ile kalibre edilen voltaj değeri okunur (Sattler ve Fredlund, 1989). Sensörün ölçüm yapabilmesi için veri aktarma sistemine bağlı olması gerekmektedir (Vanapalli ve ark., 2004).

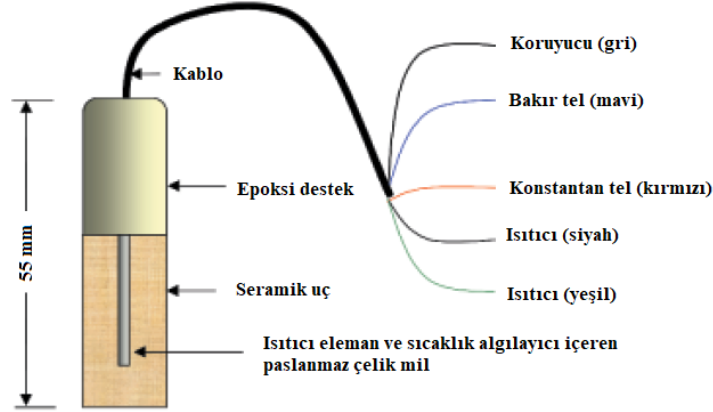


Şekil 2.18. AGWA-II ısı iletkenlik sensörünün kesit görünümü (Vanapalli ve ark., 2004).

Poroz bloktan çevresine yayılan ısı miktarı bloktaki su miktarına bağlıdır. Bu sebeple ısı iletkenlik sensöründe meydana gelen bir değişiklik doğrudan su muhtevalarındaki değişime bağlıdır (Vanapalli ve ark., 2004). Poroz bloktaki su muhtevalarının artması ısı iletkenliği arttıracaktır (Sattler ve Fredlund, 1989; Pan ve ark., 2010). Zeminin kılcal gerilmesini ölçmek için sıcaklık artışının kalibre edilmesi gerekmektedir (Sattler ve Fredlund, 1989). Sensörlerin her ölçümden önce mutlaka kalibre edilmesi gereklidir (Vanapalli ve ark., 2004).

Yapılan bir çalışmada, ısı iletkenlik sensörünü kalibre etmek için modifiye edilmiş bir basınç plakası kullanılmıştır. Basınç haznesinden dışarıya çıkış verebilmek için haznenin yüksekliği arttırılmış ve bu çıkışlar kullanılarak sensörün kablosu bilgisayara bağlanmıştır. Sensörler öncelikle bulamaç haline getirilmiş zemin içinde basınç plakasına yerleştirilmiştir. Daha sonra hazneye hava basıncı verilerek ve seramik diske

sıfır su basıncı verilerek kılcal gerilme uygulanmıştır. Zeminden seramik diske su akışı durduğunda yani kararlı duruma ulaşıldığında sensörden okuma alınmıştır. Bu işlem başka kılcal gerilme değerleri uygulanarak devam ettirilmiş ve kalibrasyon eğrisi tamamlanmıştır (Fredlund ve Wong, 1989).



Şekil 2.19. CSI 229 ısıl iletkenlik sensörünün şematik gösterimi (Leong ve ark., 2012).

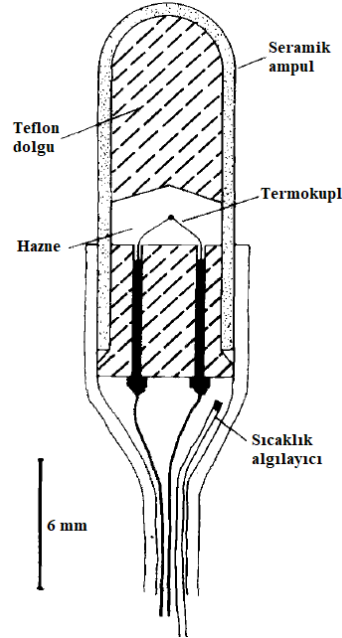
Şekil 2.19.'da gösterilen Campbell Scientific, Inc. tarafından üretilmiş CSI 229 ısıl iletkenlik sensörünün kalibrasyonu da genel olarak basınç plakası kullanılarak yapılmaktadır. Çalışmalarında ısıl iletkenlik sensörlerinin kalibrasyonlarıyla ilgili olarak farklı bir yöntem önermişlerdir (Leong ve ark., 2012).

Isıl iletkenlik sensörü kullanılarak emme ölçümü yapılırken bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Bu durumlar; seramik başlığın dayanıklılığı, yüksek emme değerlerinde hassasiyet eksikliği ve elektrik sinyallerinin kararsız olması olarak gösterilmiştir. Isıl iletkenlik sensörü kullanmanın oluşturacağı esas sorun poroz bloğun üniformluğunun sensörden sensöre farklılık göstermesidir. Bu durum her bir sensör için ayrı bir kalibrasyon eğrisi elde etmeyi zorunlu kılmaktadır (Pan ve ark., 2010).

2.5.4. Psikrometreler

Psikrometreler zemindeki hava boşluklarının bağıl nemini ölçerek toplam emme değerini elde ederler. Buharlaşan ve buharlaşmayan yüzey arasındaki sıcaklık farkını temel alarak çalışırlar. İki tip psikrometre vardır; ısı ölçen psikrometre ve iletken psikrometre. Isıya duyarlı psikrometreler 100-7500 kPa arasında ölçüm yaparken,

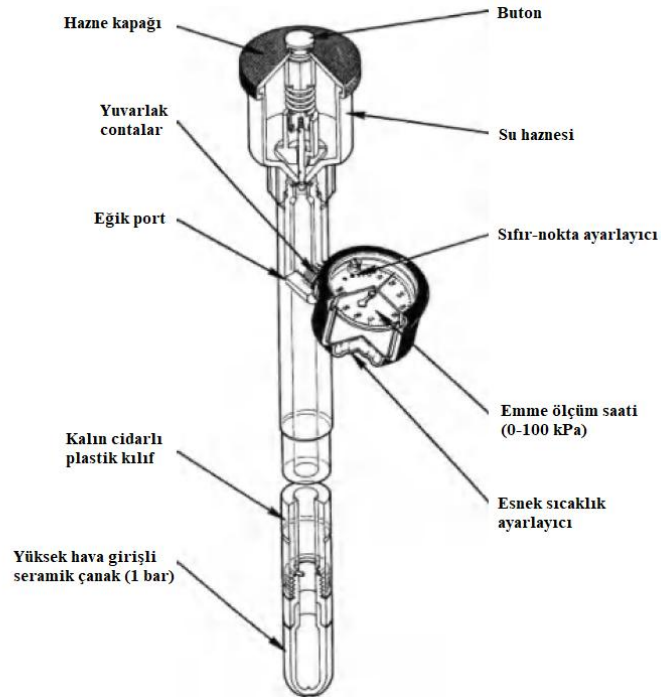
iletken psikrometreler 100-71500 kPa'a kadar ölçüm yapabilirler (Ridley ve Wray, 1996). Şekil 2.20.'de ısıya duyarlı tip bir psikrometre şematik olarak gösterilmiştir (Edil ve Motan, 1984).



Şekil 2.20. Seramik kaplamalı ısıya duyarlı psikrometre (Edil ve Motan, 1984).

2.5.5. Tansiyometreler

Standart tansiyometreler arazide emme ölçümü yapmak için kullanılan en yaygın yöntemdir (Şekil 2.21.). 90 kPa' a kadar zeminde emme ölçümü yapabilir (Vanapalli ve ark., 2004). Temel prensibi; yüksek hava giriş elemanın su basıncının zemindeki su basıncıyla eşitlenmesiyle negatif boşluk suyu basınçlarını ölçmeye dayanır. Tansiyometre ile yalnızca zemin emmesinin kılcal bileşeni ölçülebilmektedir (Pan ve ark., 2010). Uygulanan emme altında zemindeki su potansiyeli azalır ve uygulanan emmeye eşit olur. Tansiyometre zemindeki negatif boşluk suyu basıncını veya kılcal gerilmeyi doğrudan ölçer (Campbell, 1988; Pan ve ark., 2010).



Şekil 2.21. Soilmoisture tarafından üretilmiş tensiyometre (Fredlund ve ark., 2012).

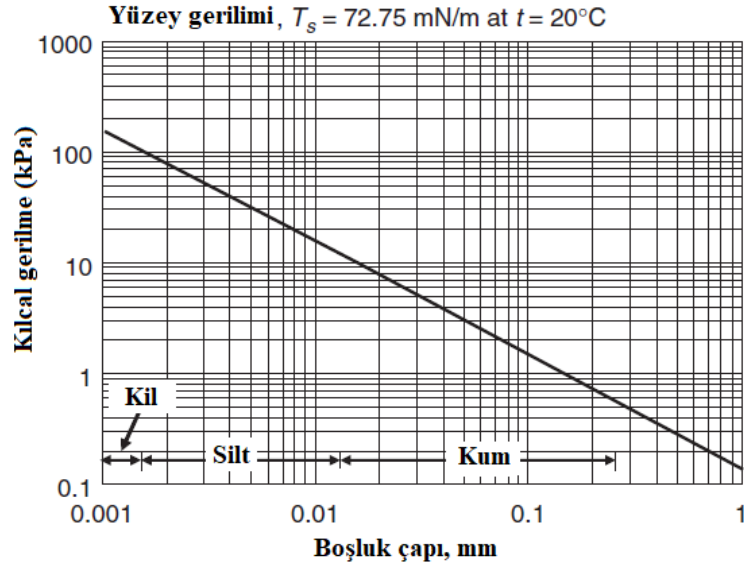
2.5.6. Emme sondası

Temel olarak bir emme sondası, ucuna yüksek hava girişli bir seramik disk monte edilmiş bir basınç transdüserinden oluşur. Emme sondası zeminin kılcal emmesini direkt olarak elde eder. Emme ölçümü çalışma prensibi zemindeki boşluk suyu basıncı ile sondanın su hücresindeki boşluk suyu basıncının dengeye ulaşmasına dayanır. Dengeye ulaşılmadan önce su hücresinden zemin içine ya da tersi şekilde su akışı oluşur. Emme sondası denge durumundaki boşluk suyu basıncını ölçer. Emme sondası ölçümleri 5 m'ye kadar olan derinliklerdeki sondajlarda veya zeminden elde edilen numuneler üzerinde yapılabilir (Pan ve ark., 2010).

2.6. Boşluk Boyutu-Emme İlişkisi

Zeminin boşluk yapısı kayma direnci, sıkışabilirlik, hidrolik iletkenlik ve zemin-su karakteristiği açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Boşlukların şekli ve boyutu gerilme durumuna, su alıp-verme özelliğine, uzun süreli yerçekimsel hareketlere bağlı olarak değişmektedir (Li ve Zhang, 2009). Zemin boşluklarının boyutu, şekli ve dağılımı zemin yapısına ait kritik bir özelliktir ve genel olarak zeminin mühendislik

davranışını belirleyen önemli bir parametredir. Zemin boşluklarına ait fiziksel özellikleri ölçmek ya da tahmin etmek zemin mukavemetinin, sıkışabilirliğinin ve geçirimsizliğinin tahmin etmeye önemli bir katkı sağlar (Lu ve Likos, 2004). Bir zeminin boşluk yarıçapının küçük olması daha yüksek kılcal gerilmeye sahip olduğunu gösterir (Şekil 2.22.) (Fredlund ve ark., 2012).



Şekil 2.22. Farklı zeminler için kılcal gerilme-boşluk boyutu ilişkisi (Fredlund ve ark., 2012).

Zeminde gerçekleşen kapilaritenin eğimi ve şekli birincil olarak zeminin boşluk boyutu dağılımı tarafından kontrol edilmektedir. Görece daha dar boşluk boyutu dağılımına sahip zeminlerde boşlukların çoğu dar bir emme aralığında yer aldığından daha düz karakteristik eğrilerle karşılaşmaktadır. Siltli zeminler kumlara göre daha büyük özgül yüzey alanına sahip olduklarından kısa emme aralığında daha fazla su absorbe edebilir. Killere ise yüklenmiş yüzeylere ve çok yüksek özgül yüzey alanına sahip oldukları için kısa aralıklı yüzey gerilimi altında en yüksek su emme kapasitesine sahiptirler. Zemindeki kılcal gerilmeleri baz alarak doygun olmayan zemin analizi yapabilmek için zemin boşluk geometrisi kavramını çözmek gereklidir. Boşluk geometrisi kavramı; boşluk hacmi, ortalama boşluk yarıçapı, dane yüzeyindeki absorbe su filmi kalınlığı ve boşluk hacminin yüzey alanına oranı ilişkilerini içermektedir (Lu ve Likos, 2004).

2.7. Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Tinjum ve arkadaşları (1997) sıkıştırma su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin killerin zemin-su karakteristik eğrisine olan etkisini araştırmışlardır. Dört farklı kili optimum-kuru, optimum, optimum-ıslak su muhtevalarında ve iki farklı sıkıştırma enerjisinde sıkıştırdıktan sonra basınç plakasında zemin-su karakteristik eğrilerini oluşturmuşlardır. Yüksek plastisiteli zeminlerde, yüksek su muhtevalarında veya yüksek enerjiyle sıkıştırılan zeminlerin hava giriş değerlerinin daha büyük olduğunu söylemişlerdir. Zemin-su karakteristik eğrisini tanımlayan parametrelerin elde edilmesi için eşitlik önermişlerdir.

Houston ve arkadaşları (1994), filtre kağıdı yöntemi kullanarak kil, silt ve kum zeminlere ait zemin-su karakteristik eğrilerini oluşturmuş, kil zeminlerin kılcal gerilme değerini silt ve kuma göre çok daha yüksek bulmuşlardır. Toplam emme değerlerinin 3,1 MPa değerine kadar filtre kağıdı ile isabetli ölçülebildiğini belirtmişlerdir. Kum ve silt zeminlerde düşük doygunluk derecelerinde eriyik emmenin etkisi görünürken, kil zeminlerde eriyik emme etkisinin ortadan kalktığını belirlemişlerdir. Kil zeminler için %25 doygunluk derecesinden sonra eriyik emme etkisiyle toplam ve kılcal gerilme eğrilerinin birbirinden uzaklaşmaya başladığı gözlenmiştir. Yazarlar deneysel verileri kullanarak kılcal ve toplam emme eğrileri ($\psi_t \geq 3,1$ MPa) için eşitlik önermişlerdir.

Wan ve arkadaşları (1995) yaptıkları çalışmada sıkıştırılmış kil zeminlerin emme-su muhtevası ilişkisini araştırmışlardır. 1:1 oranında karıştırarak hazırladıkları kum-bentonit (CH) ve kum-illit (CL) zeminleri statik kompaksiyon ile sıkıştırdıktan sonra emme ölçümü yapmışlardır. Aynı su muhtevasına sahip kum-bentonit karışımı %5 su muhtevasında 100 MPa toplam emmeye sahipken, kum-illit karışımı 1,5 MPa emme değerine ulaşmıştır. Bentonit aynı emme değerine çok daha yüksek su muhtevasında ulaşmıştır. Aynı su muhtevasında, farklı doygunluk derecesinde hazırladığı bentonit karışımı incelediklerinde, literatürün aksine toplam ve kılcal gerilmenin doygunluk derecesinden etkilenmediğini yalnızca ağırlıksal su muhtevasıyla bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Zemin boşluk boyutu dağılımına dayanılarak yapılan emme

hesaplamalarında, küçük boşluk boyutlarının çok yüksek emme değerlerine ulaştırdığı görülmüştür.

Ng ve Pang (2000), volkanik yüksek plastisiteli siltli kil zeminden oluşan doğal haldeki numunelerin ve sıkıştırılarak hazırlanan numunelerin zemin-su karakteristik eğrisini basınç plakasıyla elde etmişlerdir. Eğri üzerindeki kuru birim hacim ağırlık, su içeriği ve zemin yapısı etkilerini incelemişlerdir. Farklı kuru birim hacim ağırlıkta (%4 artış oranı) hazırlanan numunelerin hava giriş değerleri arasında bir fark görülmemiştir. Tinjum ve arkadaşlarının (1997) yapmış olduğu çalışmada birbirinden daha uzak kuru birim hacim ağırlıklara (%15 artış oranı) sahip numunelerin hava giriş değerleri yaklaşık 3 katına çıkmıştır. Kuru birim hacim ağırlık büyüdükçe histeresis halkasının küçüldüğü görülmüştür. Farklı su muhtevasında ve aynı kuru birim hacim ağırlıkta hazırlanan numuneler incelendiğinde düşük su muhtevasında hazırlanan numunenin hava giriş değerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Yüksek su muhtevasında sıkıştırılan numunenin ıslanma ve kuruma eğrileri arasındaki fark en büyük olmuştur. Su muhtevası artması histeresis halkalarını büyütülmüştür. Doğal numune ile aynı su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkta sıkıştırılarak hazırlanan zeminlerin SWC eğrileri incelendiğinde, kuruma eğrileri birbirine yakın çıkmıştır fakat ıslanma eğrilerinin çok farklı olduğu görülmüştür. Doğal numunenin boşluk yapısının üniform olmaması, buna karşın sıkıştırılmış numunenin boşluklarının üniform ve küçük olması bu farkı ortaya çıkarmıştır.

Marinho (2005), literatürden aldığı 18 plastik zemine ($24 < w_L < 95$, $6 < I_p < 60$) ait SWC eğrisini inceleyerek, zemin türü ve gerilme geçmişinin eğriye olan etkisini araştırmıştır. Bu kapsamda toplam 49 SWC eğrisi incelenmiştir. Plastisitenin artmasının SWC eğrisinin eğimini arttırdığı belirtilmiştir. Gerilme geçmişine veya numune hazırlanma biçimine bağlı olarak sertliğin artması belirli bir emme değerine daha düşük su muhtevasında ulaşılmasını sağlamaktadır. Likit limit ve normalize su muhtevası (su içeriği/emme kapasitesi) ilişkisini kullanarak SWC eğrisini çıkarmak için basit bir yöntem önermiştir.

Edil ve Motan (1984), yaptıkları deneysel çalışmada, kalsiyum ve sodyum doyurulmuş toz halindeki Grundite kilini optimum ± 2 su muhtevalarında Harvard ve statik kompaksiyon yöntemlerinin her ikisiyle de sıkıştırarak bir dizi numune hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneleri basınç plakasına yerleştirerek farklı basınçlarda yaklaşık 2 ay kılcal gerilme uygulamışlardır. Numune dengeye ulaştığında toplam emme bir Peltier tip psikrometre kullanılarak ölçülmüştür. Plastik limitin üzerindeki su muhtevalarında psikrometrik yöntemle ölçülen toplam emme sonuçları daha tutarlı bulunmuştur. Plastik limitin altında ise ozmotik emme, toplam ve kılcal emme değerlerinin farkı olarak bulunmaktadır ve kılcal emmenin artmasıyla azalmaktadır. Ozmotik emmenin psikrometreyle boşluk suyu üzerinden daha uygun ölçülebildiği görülmüştür.

Kai ve Qing (2010), Kuzey Fransa'dan elde ettikleri sıkıştırılmış zeminin (%17,3 kil, %77,7 silt, %5 kum, $w_L = 29$ ve $I_p = 6$) sıkışabilirliğini ve su tutma özelliklerini araştırmıştır. Standart ödometre ozmotik teknikle birleştirilerek emme kontrollü sıkışma deneyleri uygulanmıştır. Emme ölçümü ise nemlendirme safhasında yüksek kapasiteli tansiyometre ile yapılmıştır. Ödometrenin tabanına tansiyometre yerleştirilerek, zemin numunesinin emmesi ölçülmüştür. Uygulanan bu yöntemlerle başlangıç emme değerinin ve zemin yapısının (birim hacim ağırlık) sıkışma indeksine etkisi olmamıştır. Çalışılan zeminin düşük emme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Yüksek emme değerlerinde sıkışma indeksinde bir değişim gözlenmemiştir.

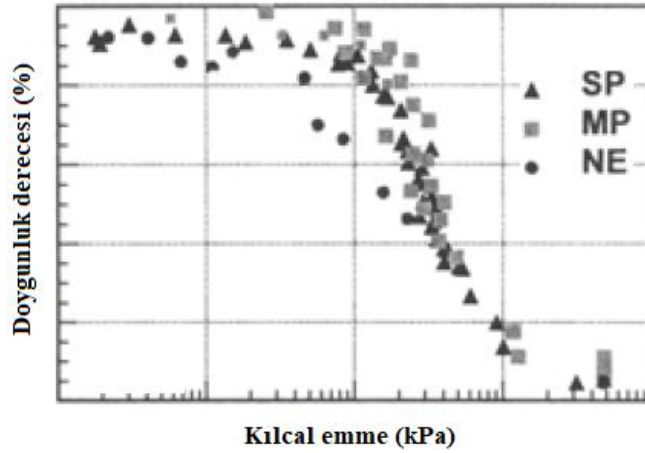
Krahn ve Fredlund (1972), kuru birim hacim ağırlık ve su içeriği parametrelerinin zemin emme bileşenleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada Kanada'da elde edilen düşük plastisiteli bir buzul kili ($I_p = 16,9$) ve yüksek plastisiteli Regina kili ($I_p = 47,8$) standart kompaksiyonla sıkıştırılarak deney numunesi oluşturulmuştur. Kılcal gerilmeyi ölçmek için Saskatchewan Üniversitesi'nde geliştirilmiş modifiye Anteus Konsolidasyon Ölçer deney aleti kullanılmıştır. Toplam emme değerleri, numunenin bağıl nemi üzerinden ölçüm yapan psikrometre kullanılarak bulunmuştur. Ozmotik emme için ise bulamaç halinde hazırlanan numunenin elektrik iletkenliği ölçümleri, doğrusal seyreltme varsayımı ve sıkma tekniği sonuçları "toplam emme-

kılcal emme farkı" ile karşılaştırılmıştır. Düşük plastisiteli buzul kilinde elde edilen sonuçlar fark emme değeriyle uyumlu olurken, yüksek plastisiteli Regina kili için sıkma yöntemi ile yüksek su muhtevası değerlerinde bir uyum sağlanmıştır. Her iki zeminde de su muhtevası arttıkça toplam ve kılcal emmeler arasındaki fark (ozmotik emme) azalmıştır. Farklı kuru birim hacim ağırlıktaki numunelerden elde edilen SWC eğrilerinden, kuru birim hacim ağırlık değişiminin emme değeri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Örselenmiş, sıkıştırılmış zeminler için, kılcal gerilme ve toplam emme değerleri su muhtevasına bağlı bulunmuştur fakat kuru birim hacim ağırlıktan bağımsız gerçekleşmiştir.

Leong ve arkadaşları (2002) çalışmalarında filtre kağıdı yöntemiyle elde ettikleri toplam ve kılcal gerilme eğrilerini literatürde elde edilen birbirinden farklı emme eğrileri ile karşılaştırmışlardır. Singapur formasyonundaki kalıntı bir zeminden (CL) 7 cm çapında ve 4 cm yüksekliğinde numuneler oluşturulmuştur. Elde edilen numuneler basınç plakasında 200, 500 ve 1400 kPa kılcal gerilme değerlerine maruz bırakılmış sonra da Whatman No.42 ve Schleicher and Schuell No.589 filtre kağıdı ile emme ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada numunelerin kararlı durumu ulaşması için 14 gün beklenmiştir. 7 günlük kararlı duruma ulaşma süresinin yeterli olmadığını belirtmiş ve filtre kağıtlarının ölçümleri arasında kayda değer bir fark oluşmamıştır. ASTM D 5298'de verilmiş olan eşitliğin kalıntı bir zeminde, 1000 kPa'ın üzerindeki toplam emme sonuçlarıyla örtüşmediğini belirtmiştir. 1000 kPa üzerindeki emme değerlerinde toplam ve kılcal gerilme değerleri arasındaki fark ortadan kalkmıştır.

Marinho ve Stuermer (2000), uygulanan kompaksiyon enerjisinin kalıntı bir zeminin SWC eğrisine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmış gnays kalıntı zemini incelenmiştir. Zeminin fiziksel özellikleri; %C=%45, w_L =%48, I_p =19. Sıkıştırma enerjisi olarak Standart Proktor, Modifiye Proktor ve standart dışı düşük enerjili sıkıştırma kullanılmıştır. Numuneler yalnızca optimum-ıslak, optimum-ıslak ve farklı boşluk oranı, aynı boşluk oranı-farklı su muhtevası olmak üzere 3 farklı şekilde toplam 21 adet hazırlanmıştır. Hazırlanan 21 adet numunenin zemin emmesi Whatman No.42 filtre kağıdı zemine direkt temas ettirilerek ölçülmüştür. Yüksek enerjile sıkıştırılan numunelerin başlangıç doygunluk

dereceleri daha yüksektir. Başlangıçtaki yüksek doyumluk sebebiyle optimum-ıslak su muhtevsındaki numuneler aynı boşluk oranında daha düşük su muhtevasına sahip numunelere göre daha fazla hacim değişimi göstermiştir. Hava giriş değerinden sonraki herhangi bir noktada 3 eğri de birbirine yaklaşmıştır (Şekil 2.23.). Bu durumda doyum boşluk boyutu dağılımlarının birbirine eş olduğu söylenmiştir. Hava giriş değerinden düşük emme değerlerinde sıkıştırma etkisinin daha büyük olduğu gözlenmiştir. Hava giriş değerleri Standart Proktor, Modifiye Proktor ve düşük enerji için sırasıyla 1000 kPa, 2000 kPa ve 500 kPa olarak bulunmuştur. Üç eğri için de kalıcı doyumluk derecesi 15000 kPa emme değerinde %2 olarak belirlenmiştir. Hava giriş değerinden sonra bütün numuneler benzer davranış göstermiştir. Belirli bir sıkıştırma enerjisi için başlangıç su muhtevası değeri SWC eğrisi biçimini etkilemektedir. Optimuma yakın veya altında sıkıştırılmış numuneler optimum-ıslak numunelerden düşük emme göstermiştir. Sıkıştırma enerjisinin boşluk oranını etkileyerek, zeminin emme davranışını etkilediği belirtilmiştir.



Şekil 2.23. Sıkıştırma enerjisinin SWC eğrisi üzerindeki etkisi (Marinho ve Stuermer, 2000).

Sreedeeep ve Singh (2005) doyum olmayan zeminlerde zemin türü, dane dağılımı, kompaksiyon durumu (su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık ve doyumluk) gibi çeşitli fiziksel zemin özelliklerinin zemin emmesine olan doğrudan veya dolaylı etkisini anlayabilmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada farklı su muhtevalarında ve kuru birim ağırlıklarda Standart Proktor ile sıkıştırılmış siltli zeminin ve beyaz kilin emme değerleri tansiyometre kullanılarak ölçülmüştür. Yazarlar, zemin türünün emmeye etkisini araştırmak için silt ve kil numunelerden aynı

su muhtevası ve kuru birim ağırlığa sahip olanları karşılaştırmışlardır. Aynı başlangıç kuru birim hacim ağırlığa sahip kil ve silt numuneler karşılaştırıldığında, aynı süre zarfında silt numune 40 kPa emmeye ulaşırken, kil ise yaklaşık 70 kPa değerine ulaşmıştır. Killerin daha yüksek emme değerlerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Emme üzerinde su muhtevasının ve doyumluk derecesinin etkisini araştırmak için aynı kuru birim ağırlıkta ve farklı su muhtevsındaki silt numuneleri karşılaştırılmış ve düşük doyumluğa sahip numunenin daha kısa sürede belli bir emmeye ulaştığı görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlığın etkisini belirlemek için aynı su muhtevasına sahip kil ve silt numuneleri karşılaştırmıştır. Kuru birim hacim ağırlık değişiminin emme değerini çok fazla etkilemediği görülmüştür.

Qian ve Lu (2011), kompaksiyon derecesinin düşük plastisiteli Chogming kili ($w_L=34,3$, $I_p=15,4$) zemin-su karakteristik eğrisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı su muhtevalarında numuneler hazırlanmış, numunelerin SWC eğrilerini oluşturmak için filtre kağıdı yöntemi uygulanmıştır. SWCC eğrilerini elde edebilmek için yarı logaritmik model ve Fredlund-Xing (1994) modeli olmak üzere iki farklı model kullanılmıştır. Oluşturulan grafiklerden su muhtevasının artmasıyla numunenin sıkışma oranının azalacağı, SWC eğrisinden ise kompaksiyon derecesinin artmasıyla hava-giriş değeri ve su tutma kapasitesinin artacağı görülmüştür. %96 relatif kompaksiyon ile sıkıştırılan numunenin hava giriş değeri 4 kPa iken, %87 relatif kompaksiyon ile sıkıştırılan numunenin hava giriş değeri 2 kPa olarak bulunmuştur (Şekil 2.24.). Kalıcı bölgeye ulaştıkları su muhtevaları ise sırasıyla; %18 ve %12' dir. Başlangıç su muhtevası düşük olan kompaksiyon derecesi yüksek numune en az su kaybetmiştir.

Zhou ve arkadaşları (2013), doyum olmayan kompozit zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi üzerine bir araştırma sunmuşlardır. Batı Sichuan'da yer alan farklı kuru yoğunluklara sahip üç doyum olmayan zeminde, fiziksel karışım, fiziksel şekil ve zemin-su karakteristik eğrisini elde etmek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

alması durumunda, zeminin daha yüksek su tutma kapasitesi gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumda emme değeri ve kalıcı su muhtevası daha büyük olmakta ve eğri daha düz görünmektedir. Çevresel etkiler sebebiyle, ıslak-kuru çevrimlerdeki hacim değişimlerinin zeminin boşluk yapısını değiştirdiği ifade edilmiştir. Elde edilen eğrilerden; farklı kuru yoğunluklardaki numunelerin SWC eğrilerinin benzer eğilimde olduğu ve genel olarak doygunluğun azalmasıyla kılcal gerilmenin artış gösterdiği anlaşılmıştır. Üç numunenin eğrisi de başlangıçta düzdür ve hava giriş değerlerinin neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir, fakat kuru yoğunluğun artmasıyla hava giriş değerinin de artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Chen ve arkadaşları (2013), kalıntı bir zeminin SWC eğrisini filtre kağıdı kullanarak elde etmiştir. Kalıntı zeminin fiziksel özellikleri; $w_L=39.1$, $I_p=21.3$, $w_{opt}=22.3$, $\gamma_{k,maks}=1.79 \text{ g/cm}^3$, $\%C=32.4$ olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada, yaygın olarak kullanılan Whatman No.42 ve S&S No.59 filtre kağıtları yerine yerel olarak üretilmiş No.203 filtre kağıdı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan killi kalıntı zemin standart proktorla sıkıştırılarak deney numunesi oluşturulmuştur. Oluşturulan 102 mm çapında ve 116 mm yüksekliğindeki numuneler ikiye ayrılarak arasına filtre kağıtları yerleştirilmiş ve kapalı bir cam kavanozda 25-27 derece sıcaklıktaki kür havuzunda 1 hafta bekletilerek denge durumuna gelmesi sağlanmıştır. Denge durumuna ulaştıktan sonra, filtre kağıdı su muhtevasına bağlı kalibrasyon eğrisi kullanılarak SWC eğrisi elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda başlangıç su muhtevası, zemin yapısı ve gerilme durumu gibi bazı faktörlerin zemin-su karakteristiğini etkilediği gözlenmiştir. Yazarlar deneyde kullandıkları zeminin kalıcı su muhtevası değerinin çok düşük olduğunu ve kalıcı kılcal emmesinin 10000 kPa değerine ulaşarak diğer birçok zeminden çok fazla olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen SWC eğrileri incelendiğinde optimum-ıslak muhtevada hazırlanmış numunelerde kılcal gerilmeye karşılık su muhtevasında büyük değişim gözlenirken, optimum-kuru muhtevada hazırlananlarda daha küçük değişimler meydana gelmiştir. Numuneye uygulanan yük miktarı arttıkça, meydana gelen değişim daha küçük olmuştur. Islanma veya kuruma sırasında, zemin aynı su muhtevasında olmasına rağmen kılcal emmesinde önemli bir farklılık gözlenmiştir. Bu sebeple; ıslanma veya kuruma durumundaki zeminlerin

kayma mukavemetlerinde kılcal emme farklılığından kaynaklanan bir değişimin gözlenebileceğini belirtmişlerdir.

Catana ve arkadaşları (2006), sıkıştırılmış killerde zemin özelliklerinin SWC eğrisi ile arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde Ottawa bölgesinden elde ettikleri plastik özellikli siltli kili ($G_s=2.75$, $\%C=\%58$, $w_p=\%27$, $w_L=\%63$) farklı başlangıç su muhtevalarında ve farklı enerjilerde statik kompaksiyonla sıkıştırmışlar ve basınç plakası kullanarak 6 adet SWC eğrisi elde etmişlerdir. Deney sonuçlarından hava giriş değerinin başlangıç sıkıştırma su muhtevası arttıkça arttığı, doygunluğa yaklaşan değerlerde hava giriş değerinin daha sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Hava giriş değerinden sonraki emme değerlerinde hacim değişimlerinin emme ile olan ilişkisinin ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Farklı başlangıç sıkıştırma su muhtevalarına bakılmaksızın, sıkıştırma enerjisindeki farklılıkların zeminin su kaybetme oranına etkisi marjinal düzeydedir. Likit limit ve kil yüzdesi, sıkıştırılmış zeminlerin su kaybetme oranıyla bağlantılıdır. Kıvam limitleri ve kil yüzdeleri ile emme kapasiteleri arasında doğrusal bir ilişki tanımlayarak literatürdeki sonuçlarla karşılaştırmış ve uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Görece rijit boşluk yapısına sahip sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin zemin su tutma eğrisini tahmin etmek için bu ilişkinin faydalı olabileceğini söylemişlerdir.

Kim ve arkadaşları (2015), doymun olmayan sıkıştırılmış zeminlerin kılcal emme değerlerini belirlemek amacıyla bir deneysel çalışma yapmışlardır. Indiana'daki bir yol sahasından aldıkları düşük plastisiteli iki killi zemini optimum-kuru, optimum ve optimum-ıslak su muhtevalarında standart Proktor yöntemiyle laboratuvarında sıkıştırmış, filtre kağıdı tekniği kullanarak kılcal emme ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Filtre kağıtlarını numuneye kompaksiyon kalıbından çıkarmadan yerleştirmişler; kalıptan çıkarma işleminin zeminin boşluk yapısını etkileyebileceğini belirterek bu yöntemi seçmişlerdir. Deney sonuçlarından sıkıştırma su muhtevası değiştikçe kılcal emme değerinin değiştiğini, optimum+2 su muhtevalarından daha yüksek muhtevada sıkıştırılan zeminlerin kılcal emmesinin sifıra yaklaştığını bulmuşlardır. Optimum su muhtevalarında sıkıştırılan yüksek kil içerikli

zeminlerden düşük plastisite indeksine sahip olanda daha büyük kılcal emme oluştuğunu belirlemişlerdir.

Thakur ve arkadaşları (2005), ince daneli zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisini etkileyen parametreleri saptamak için siltli (ML) ve killi (CL) zeminler üzerinde potansiyometre ile emme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Zeminin emmesi üzerinde zemin türü ve kuru birim hacim ağırlığın etkisini incelemişlerdir. Zeminler mini kompaktör ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler vakumlu desikatörde %99 doyumluğa ulaştıktan sonra potansiyometre ile emme ölçümü yapılmıştır. Optimum ıslak ve kuru tarafta sıkıştırılan zeminlerde kuru birim hacim ağırlığın emme ve SWC eğrisi üzerine önemli bir etkisi görülmemiştir. Killi zemin için hava giriş değeri siltli zeminden daha büyük çıkmıştır.

Sivakumar Babu ve arkadaşları (2005), yapmış oldukları deneysel çalışmada, Standart Proktor ile optimumda ve optimum kuru tarafta sıkıştırılmış iki farklı killi zeminin toplam emme ve kılcal emme değerlerini Whatman No.42 filtre kağıdı kullanarak ölçmüşlerdir. Deney sonuçları literatürde yer alan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve geliştirilmiş modellerle uyumlu bulunmuştur. Modellere ait parametreler toplam ve kılcal emmeler bakımından farklı olarak elde edilmiştir. Çalışmayla kılcal emmenin toplam emmenin %25-60'ı arasında bir değerde olduğu belirlenmiş ve sadece kılcal emmeyi göz önüne almanın çok tutucu bir yaklaşım olduğu ifade edilmiştir.

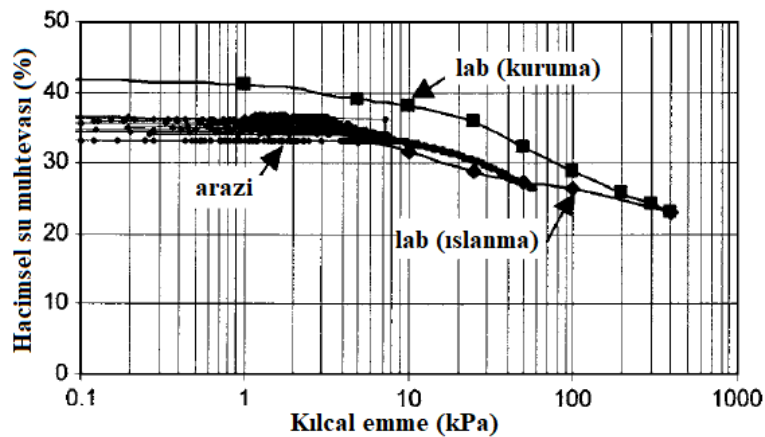
Elkady ve arkadaşları (2015), bir dolgu projesinde kullanılması düşünülen kum-kil karışımı bir zeminde kil içeriği ve kompaksiyon biçiminin SWC eğrisi üzerindeki etkisini araştıran deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada kil içeriği ve başlangıç su muhtevası farklı 12 kum-kil karışımı zemin incelenmiştir. Hazırlanan numunelerin 6 tanesi kil içeriğinin etkisini belirlemek için optimum kompaksiyon koşullarında hazırlanmıştır. Kalan numuneler ise kompaksiyon koşullarının etkisini araştırmak için optimum-ıslak ve optimum-kuru (%±3) tarafta ve farklı kil oranlarında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler suya doyum hale getirildikten sonra sarkık kolon aleti ile 10 kPa'a kadar ve basınç plakası ile 1500 kPa'a kadar kılcal emme uygulanmıştır. Sunulan sonuçlar SWC eğrisinin kil içeriğine ve kompaksiyon biçimine

bağlı olduğunu göstermiştir. %0-%60 arası kil içeriğinde, kil oranının artmasıyla zeminin su tutma kapasitesinde artış gözlenmiştir. Deney sonuçlarından, %60'a kadar kil içeriğine sahip ve optimum su içeriğinde sıkıştırılmış numunelerde kil içeriği artışının zeminin su tutma kapasitesini artırdığı ve SWC eğrisinin şeklini (hava giriş değeri ve kalıcı su muhtevası değerlerinde artış) oldukça etkilediği görülmüştür. Yazarlar, zeminin boşluk yapısına bağlı olarak zemin su karakteristik eğrisinin tek tepeli veya çift tepeli şeklinde oluşacağını ifade etmişler ve gerçekleştirilen deneylerde %10-%30 kil içeriğine sahip numunelerin SWC eğrisinin çift tepeli oluştuğunu söylemişlerdir. Ayrıca optimum, optimum-kuru ve optimum-ıslak şartlarda hazırlanmış numunelerin SWC eğrileri karşılaştırılmıştır. Optimum-kuru ve optimum şartlarda sıkıştırılan numunelerin su tutma eğrileri çift tepeli oluşmuştur. Optimum-ıslak numunelerin hava giriş değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Pei-yong ve Qing (2009), bentonit-kum karışımlarının SWC eğrileri üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Basınç plakası kullanarak emme uygulamışlar ve SWC eğrilerini oluşturmuşlardır. Numunelerin SWC eğrilerindeki hava giriş değerlerini ve eğrilerin eğimlerini başlangıç kuru birim hacim ağırlık, ıslanma-kuruma çevrimi sayısı ve bentonit-kum karışım oranı olmak üzere 3 farklı durum açısından incelemişlerdir. Bentonit-kum karışımları için statik kompaksiyon kullanılarak 61,8 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde numuneler elde edilmiştir. Başlangıç kuru birim hacim ağırlığın SWC eğrisi üzerindeki etkisini incelemek için eşit oranda kum ve bentonit karıştırılmış ve $1,17 \text{ g/cm}^3$, $1,34 \text{ g/cm}^3$, $1,51 \text{ g/cm}^3$ ve $1,63 \text{ g/cm}^3$ kuru birim hacim ağırlığa sahip numuneler karşılaştırılmıştır. Islak-kuru çevrim sayısının SWC eğrisi üzerindeki etkisini belirlemek için eşit oranda bentonit ve kum miktarını içeren, $1,51 \text{ g/cm}^3$ başlangıç kuru birim hacim ağırlık ve %19,5 başlangıç su muhtevasına sahip numune incelenmiştir. Karışım oranındaki farklılığın etkisi yine $1,51 \text{ g/cm}^3$ kuru birim hacim ağırlık ve %19,5 başlangıç su muhtevasına sahip numune üzerinde gözlenmiştir. Deney sonuçları, bentonit-kum karışımları için başlangıç kuru birim hacim ağırlıktaki artışın logaritmik ekseninde hava giriş değerini doğrusal olarak arttırdığını göstermiştir. Islak-kuru çevrim sayısındaki değişim eğrinin şeklini değiştirmemiştir. Buna karşın hava giriş değerinde doğru orantılı olarak bir artış gözlenmiştir. Karışımdaki bentonit

yüzdesinin fazla olması boşlukların doluluk oranının artmasına sebep olmaktadır. Bu durumda daha yüksek emme değerlerinde hava girişi gerçekleşmektedir.

Li ve arkadaşları (2005), Hong Kong'da tamamen ayrıışmış granitten oluşmuş büyük bir şevin zirvesindeki ve palye kısmındaki saha ölçüleriyle oluşturulmuş SWC eğrileri ile laboratuvarda küçük numuneler üzerinde oluşturulan SWC eğrilerini karşılaştırmışlardır. Şevin farklı bölgelerindeki su muhtevasını ölçmek için 8 adet sonda kullanılmıştır. Sondaların 4 tanesi şevin tepesine yakın açılmış sondaj çukuruna, diğer 4 tanesi de palye kısmına yakın açılmış sondaj çukuruna yerleştirilmiştir. Kılcal emmeleri ölçmek için ise açılmış sondaj çukurlarına titreşimli tansiyometreler yerleştirilmiştir. Ölçümler yaklaşık 1 yıl alınmış ve zemin-su karakteristik eğrisi oluşturulmuştur. Laboratuvar kılcal emme ölçümleri ise geleneksel basınç plakası kullanılarak yapılmıştır. Arazi zemin-su karakteristik eğrisi laboratuvar su alma eğrisiyle uyumludur (Şekil 2.25.). Bu durum şev stabilitesinin değerlendirilmesinde laboratuvar su alma eğrisinin seçilmesinin uygun olduğunu göstermiştir. Laboratuvar zemin-su karakteristik eğrisinin aksine arazi eğrisinin ıslak-kuru kısımları birbirine yakın bulunmuştur. Kil içeriğinin daha yüksek olduğu şev tepesindeki SWC eğrisi daha az eğimli olmuştur.



Şekil 2.25. Laboratuvar ve arazi SWC eğrilerinin karşılaştırılması (Li ve ark., 2005).

Bicalho ve arkadaşları (2007), Whatman No.42 filtre kağıdı kullanarak ayrıışmış granitten oluşmuş doymun olmayan siltli kumun kılcal gerilmesini ölçmüşlerdir. Numuneler Modifiye Proktor ile optimum su içeriğinde sıkıştırılmış ve filtre kağıdı

numuneye tam temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Whatman No.42 filtre kağıdı için literatürde önerilmiş farklı kalibrasyon eğrilerini kullanarak SWC eğrileri oluşturulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kılcal gerilme ölçümü için kullanılan farklı filtre kağıdı kalibrasyon eğrilerinin deney sonuçlarındaki farklılıkta etkili olduğu belirtilmiştir. Filtre kağıdı bulgularını, sıkıştırılmış zeminlerin negatif boşluk suyu basıncını ölçmek için kullanan Fleureau ve ark. (2002) tansiyometre sonuçları ile karşılaştırmış ve uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Almeida ve arkadaşları (2015), örselenmemiş 5 farklı zeminin su tutma eğrisini filtre kağıdı yöntemiyle elde etmişlerdir. Nem ve sıcaklık değişimini engellemek için; filtre kağıdını numuneye yerleştirdikten sonra, plastik filmle ve ardından alüminyum folyo ile sarmışlar ve köpükten yapılmış bir kutuya yerleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları Richards haznesi ve Haines hunisi gibi yüksek maliyet ve uzun zaman gerektiren geleneksel yöntemlerle karşılaştırmışlar ve mükemmel bir uyum yakalamışlardır. Yazarlar, filtre kağıdı yönteminin zemin-su karakteristik eğrisinin elde edilmesinde çabuk ve basit bir yöntem olduğunu söylemişlerdir.

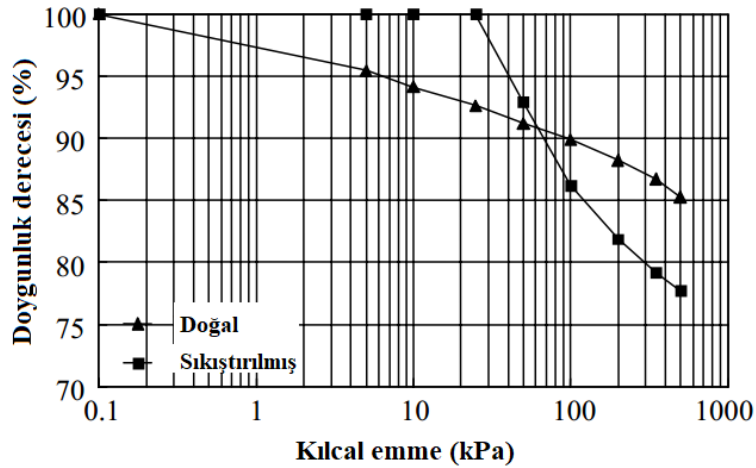
Wang ve Benson (2004), yeni tasarlanmış bir sızdırmaz basınç plakası deney aletiyle emme ölçümünü ve SWC eğrisini elde edilmesini açıklayan bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada üç farklı zemin türü kullanılmıştır. Zemin türleri USCS' ye göre CL, SM ve SC olarak belirtilmiştir. Numune halkası içinde sıkıştırılan numuneler, önce doymuş hale getirilmiş sonra da emme ölçümü yapılmıştır. CL ve SC zeminlerin emme kapasitesi SM'ye göre daha büyük bulunmuştur. Basınç plakasından elde edilen SWC eğrisi, ayrıca uygulanan sarkık kolon ve soğutuk aynalı nem ölçer deneylerinden elde edilen SWC eğrileriyle karşılaştırılmış ve uyumlu bulunmuştur. SWC eğrileri van Genuchten (1980) eşitliği kullanılarak oluşturulmuştur.

Muñoz-Castelblanco ve arkadaşları (2010), filtre kağıdı yöntemi uygulayarak doymuş olmayan zemin üzerinde emme ölçümü yapmışlardır. Filtre kağıdının doğruluğunu analiz etmek için zemin üzerinde yüksek kapasiteli tansiyometre kullanarak emme değerlerini elde etmişlerdir. Gerçekleştirilen deneylerde, Kuzey Fransa'dan elde edilmiş örselenmemiş, doymuş olmayan, silt ağırlıklı ve düşük plastisiteli (CL) lös

zemin ($w_L=37\%$, $I_p=9$, $M=82\%$, $C=16\%$) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde filtre kağıdı olarak Whatman No.42 ve CERMES laboratuvarında geliştirilmiş yüksek kapasiteli tansiyometre kullanılmıştır. Alternatif bir yaklaşım olarak daha önceden ıslatılmış filtre kağıdının kullanılması önerilmiştir. Islak filtre kağıdı kullanılarak elde edilen sonuçlar standart filtre kağıdı yöntemi ölçümleri ile örtüşmüştür. Islak filtre kağıdı kullanılması durumunda daha kısa sürelerde kararlı durum elde edilmiştir. Karşılıklı olarak elde edilen filtre kağıdı ve tansiyometre ölçümleri uyumlu bulunmuştur. Doğal durumdan daha ıslak ve daha kuru hidrolik izler birbirine paralel olmamasına rağmen, zeminin doğal su muhtevası ($w_n=14\%$) değerinde çakışmıştır.

Agus ve arkadaşları (2005), dört farklı yöntem kullanarak bentonit-kum karışımlarının emme karakteristiklerini araştırmışlardır. Numuneler için 30:70, 50:50 ve 70:30 oranlarında bentonit-kum karışımları hazırlanmıştır. Deney numuneleri dinamik ve statik olarak standart ve ağırlaştırılmış Proktor yöntemiyle sıkıştırılmıştır. Emme ölçümünde filtre kağıdı, psikrometre, yoğunlaşma noktası sensörü ve soğutuk aynalı nem ölçer kullanılmıştır. Filtre kağıdı ile emme ölçümünde numuneleri 50 mm çapındaki metal halkalar içinde statik olarak 2 tabakada sıkıştırmışlardır. Kılcal emme ölçümü için iki tabaka arasına filtre kağıtlarını yerleştirmişler, toplam emme ölçümü için sıkıştırma işleminin ardından numune üzerine bir çelik hasır koyup onun üzerine de filtre kağıtlarını bırakmışlardır. Beş hafta boyunca emme-su muhtevası ilişkisini ölçmüşlerdir. Laboratuvar analizleri sonucunda emmenin öncelikle su içeriğine ve karışımdaki bentonit miktarına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bentonit yüzdesi arttıkça optimum sıkıştırma su muhtevası artış göstermiştir. %30 bentonit içeriğine sahip karışımın optimum su muhtevası %16 iken, saf bentonitin optimum su muhtevası %40'a ulaşmıştır. Bentonit miktarı arttıkça toplam ve kılcal gerilme değerleri yükselmiştir. Saf bentonit %20 su muhtevası değerinde 10000 kPa kılcal gerilme değerine ulaşarak kalıcı bölgeye geçiş yaparken, minimum bentonit içeriğe sahip karışım %20 su muhtevasında doygun bölgededir ve kılcal gerilme değeri yaklaşık 300 kPa'dır.

Zhan ve arkadaşları (2007), laboratuvarında yaptıkları çalışmayla doğal haldeki ve sıkıştırılmış haldeki doymun olmayan killerin zemin-su etkileşimini incelemişlerdir. Zeminin kılcal gerilme, su muhtevası ve boşluk oranları arasındaki ilişkiler gösterilmiş ve doğal numune ile sıkıştırılmış numunelerin SWC eğrileri arasındaki fark ortaya konulmuştur. Deneyler için kil zeminden alınan numuneler doğal ve sıkıştırılmış olarak hazırlanmıştır. Doğal numuneler ve statik olarak sıkıştırılmış numuneler 70 mm çapında ve 19 mm yüksekliğindeki metal halkalara alınmıştır. Numuneler ilk olarak hacim sabit tutularak doymun hale getirilmiş, sonrasında 2 ve 5 bar'lık basınç plakasına yerleştirilerek zemin-su karakteristik eğrisi ölçümü yapılmıştır. Deney sonuçlarından doğal numunelere ait hava giriş değerinin doğal zeminin çatlaklı ve fisürlü yapısından ötürü daha küçük olduğu görülmüştür. Sıkıştırılmış numuneye kıyasla doğal numunede önemli bir histeresis gözlenmemiştir. Şişme basıncı değerinin hem doğal hem de sıkıştırılmış numunelerde başlangıç emme değerine bağlı olduğu görülmüştür. Bir başlangıç emme değeri için, doğal zeminlerin şişme potansiyeli sıkıştırılmış zeminlere göre her zaman daha azdır. Sıkıştırılmış numuneler aynı emme değeri için daha fazla su tutmaktadır (Şekil 2.26.). Doğal numuneler sıkıştırılmış numunelere oranla daha düşük boşluk oranına sahiptir ve uygulanan kılcal gerilmeler altında boşluk yapısında daha az değişim meydana gelmektedir.



Şekil 2.26. Doğal ve sıkıştırılmış numunelerin SWC eğrileri (Zhan ve ark., 2007).

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, doymun olmayan killi zeminler üzerinde uygulanan laboratuvar deney programı detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Uygulanan deney programı ile dört farklı killi zeminin kılcal gerilme değerlerinin ölçümü ve zemin-su karakteristik eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar deney programı iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, zeminlerin fiziksel özellikleri ile kompaksiyon karakteristikleri belirlenerek deneylerde kullanılacak zemin numuneleri hazırlanmıştır. İkinci aşamada ise sıkıştırılarak hazırlanan numuneler ile konsolide edilerek hazırlanan numunelerin kılcal gerilme değerleri ve zemin-su karakteristik eğrileri iki farklı yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Zemin emme ölçümünü yapabilmek için filtre kâğıdı ve basınç plakası yöntemleri kullanılmıştır.

3.1. Zemin Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada bir dolgu sahasındaki farklı bölgelerden alınan dört farklı killi zemin kullanılmıştır (Şekil 3.1.). Numuneler üzerinde özgül ağırlık tayini, elek analizi, hidrometre, kıvam limitleri deneyleri yapılarak zeminlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Yapılan zemin sınıflandırma deneylerinin sonucunda TS1500/2000 zemin sınıflandırma standardına göre No.3 numunesi yüksek plastisiteli kil (CH), No.1, No.2 ve No.4 numuneleri ise orta plastisiteli kil (CI) olarak bulunmuştur. Zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri, arazideki ağırlaştırılmış sıkıştırma durumunu temsil etmesi için Modifiye Proktor kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 3.2. XRD analizi sonuçları.

Zemin	Mineral (%)				
	Kuars	Kalsit	Kireç	Hematit	Korendon
No.1	3,5	96,5			
No.2	7,5	92,5			
No.3	59		4,6	3,4	25,6
No.4	80,4		3,9	4,9	6,8

Tablo 3.3. XRF analizi sonuçları.

Zemin	Kimyasal bileşen (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	PbO
No.1	6		90,8		
No.2	8,6		85,5		
No.3	53,4	7	4,71	26,2	
No.4	62	17,6	4,48	10,4	5,52

3.1.3. Kompaksiyon karakteristiklerinin belirlenmesi

Araziden gelen zemin örnekleri öğütüldükten sonra No.4 elek altına geçen kısım farklı su muhtevalarında hazırlanmış, suyun homojen olarak dağılılabilmesi için 24 saat hava almayacak bir kap içinde bekletilmiştir. Daha sonra Modifiye Proktor ile sıkıştırılarak zeminlerin kompaksiyon eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen kompaksiyon eğrileri ve belirlenen kompaksiyon karakteristikleri (w_{opt} , $\gamma_{k,maks}$) Tablo 3.4., Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Zeminlerin kompaksiyon karakteristikleri.

Numune Adı	w_{opt} (%)	$\gamma_{k(maks)}$ (g/cm ³)
	Modifiye Proktor	
No.1	11,5	1,96
No.2	11	2,11
No.3	15	1,86
No.4	15	1,86

3.2. Emme Ölçümü Deneyleri

Uygulanan deney programı ile bir dolgu sahasından alınmış dört farklı killi zeminin doygun olmayan durumdaki davranışı hakkında tahmin yapabilmek için gerekli olan kılcal gerilme değerlerinin ölçümü ve zemin-su karakteristik eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Emme deneylerinde kullanılacak numuneler için iki farklı numune hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Birinci yöntem olarak; ağır kompaksiyon karakteristikleri daha önceden belirlenen numuneler optimum ve optimum-ıslak su muhtevalarında sıkıştırılarak deneye hazır hale getirilmiştir. İkinci yöntemde; bulamaç haline getirilen numuneler konsolide edildikten sonra deneye tabi tutulmuşlardır.

Zeminlerin emme değerlerini ölçmek için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Filtre kâğıdı yöntemi ve basınç plakası yöntemi tercih edilmiştir.

3.2.1. Numunelerin hazırlanması

Zemin emme ölçümü ve zemin-su karakteristik eğrisi için yapılan filtre kağıdı ve basınç plakası deneylerinde örselenmiş zemin numuneleri kullanılmıştır. Örselenmiş numuneler hazırlanırken iki yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde numuneler modifiye kompaksiyon ile hazırlanmıştır. İkinci yöntemde ise bulamaç haline getirilen numuneler konsolidasyon hücresinde hazır duruma getirilmiştir.

Sıkıştırılmış numuneleri oluşturmak için ilk önce zemin örnekleri öğütülmüş ve 4,75 mm (No.4) çaplı elek altına geçen kısım etüvde bekletilerek tamamen kurutulmuştur. Numuneler, daha önceden deneysel olarak belirlenmiş ağırlaştırılmış kompaksiyon karakteristiklerine göre optimum ve optimum-ıslak (+%5) su muhtevalarında hazırlanmıştır. Numuneler, suyun homojen olarak zemine nüfuz edebilmesi için hava almaz bir kap içinde 24 saat bekletilmiştir. Modifiye Proktor kullanılarak her tabakada 25 vuruş olacak şekilde 5 tabakada sıkıştırılmıştır. Yapılacak deneye uygun olarak

Belirlenen filtre kağıdı su muhtevası filtre kağıdı kalibrasyon eğrisi kullanılarak emme değerine dönüştürülmüştür (ASTM D5298-10).

Deney aşamaları sona erdiğinde zemin numunesi etüve bırakılarak kuru ağırlığı belirlenmiş ve her bir aşamadaki zemin su muhtevası değeri elde edilmiştir. Zeminin ağırlıksal su muhtevası ve filtre kağıdı kalibrasyon eğrisinden elde edilen kılcal emme değerleri kullanılarak zemin-su karakteristik eğrisi çizilmiştir. Deney süresince elde edilen ölçümlerin not edilmesi için bir deney tablosu oluşturulmuştur (Tablo 3.5.).

Tablo 3.5. Filtre kağıdı deneyi için deney takip föyü.

Numune adı	No.1							
Numune hazırlama şekli	Opt+5 Modifiye Kompaksiyon							
Aşama no	1	2	3	4	5	6	7	8
Aşama başlangıç tarihi	08.05.2017	22.05.2017	05.06.2017	19.06.2017	03.07.2017	17.07.2017	31.07.2017	14.08.2017
Bekleme süresi (gün)	14	14	14	14	14	14	14	14
Halka + numune (deney başı) (gr)	153,959	152,639	151,866	150,878	150,152	149,227	148,218	147,44
Okuma tarihi	22.05.2017	05.06.2017	19.06.2017	03.07.2017	17.07.2017	31.07.2017	14.08.2017	28.08.2017
Halka + numune (deney sonu) (gr)	152,805	151,988	151,253	150,352	149,453	148,441	147,821	147,086
Kaptaki nem kaybı (gr)	1,154	0,651	0,613	0,526	0,699	0,786	0,397	0,354
Aşama su muhtevası (%)	17,4	16,5	15,6	14,6	13,6	12,4	11,7	10,9
Kap (soğuk) (gr) - T _c	675,385	675,409	675,388	675,407	675,397	672,899	672,881	672,900
Filtre kağıdı (ıslak) + kap (soğuk) (gr) - M ₁	675,813	675,751	675,690	675,697	675,665	673,170	673,148	673,185
Filtre kağıdı (kuru) + kap (sıcak) (gr) - M ₂	675,595	675,607	675,585	675,592	675,598	673,075	673,046	673,073
Kap (sıcak) (gr) - T _h	675,376	675,395	675,379	675,376	675,384	672,856	672,828	672,834
Filt.kağıdındaki su miktarı (gr) - M _w	0,209	0,130	0,096	0,074	0,054	0,052	0,049	0,046
Filtre kağıdı (kuru) (gr) - M _f	0,219	0,212	0,206	0,216	0,214	0,219	0,218	0,239
Filtre kağıdı su muhtevası, w _f (%)	95,43	61,32	46,60	34,26	25,23	23,74	22,48	19,25
Emme log (kPa)	1,12	1,58	1,78	2,66	3,36	3,48	3,58	3,83
Emme (kPa)	13,29	38,39	60,66	455,20	2297,73	3001,37	3767,36	6724,65

Tablo 3.6. Zemin-su karakteristik eğrisi oluşturma modelleri.

Kaynak	Eşitlikler	Parametreler
van Genuchten (1980)	$\theta = \frac{1}{[1 + (a\psi)^n]^m}$ $m = 1 - \frac{2}{n}$	m ve n: eğri oluşturma parametreleri
Fredlund-Xing (1994)	$\theta(\psi, a, n, m) = C(\psi) \frac{\theta_s}{[\ln(e + (\frac{\psi}{a})^n)]^m}$	a, m ve n: eğri şekline bağlı parametreler C(ψ): yüksek emme değerleri için düzeltme faktörü
Fredlund-Pham (2006)	$w_1(\psi) = w_u - S_1 \log(\psi)$ $1 \leq \psi \leq \psi_{ae}$ $w_2(\psi) = w_{ae} - S_2 \log(\frac{\psi}{\psi_{ae}})$ $\psi_{ae} < \psi < \psi_r$ $w_3(\psi) = S_3 \log(\frac{10^6}{\psi})$ $\psi_r \leq \psi < 10^6$	S ₁ , S ₂ ve S ₃ : eğri üzerindeki eğimler w _u : 1 kPa'daki su muhtevası w _{ae} : kabarcıklanma su muhtevası

3.5. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi-Boşluk Boyutu İlişkisinin Saptanması

Boşluk boyutu-SWC eğrisi arasındaki ilişkinin belirlenmesi için Lu ve Likos (2004)'da yer alan eşitlikler ve hesap adımları uygulanmıştır. Uygulanan hesap adımları ve eşitlikler Tablo 3.7.'de yer almaktadır.

Tablo 3.7. SWC eğrisi-boşluk boyutu ilişkisinin kurulması (Lu ve Likos, 2004).

Aşama no	İşlem	Kullanılan eşitlik
1	Zemin-su karakteristik eğrisinin oluşturulması	
2	Hacimsel su muhtevası değerlerinin ağırlıksal su muhtevası değerine dönüştürülmesi	
3	Kılcal gerilme değerlerinin bağıl nem değerlerine çevrilmesi	
4	Ağırlıksal su muhtevası değerlerinin su dolu boşluk hacmi/birim kütle değerlerine dönüştürülmesi	$V_p^i = \frac{w^i}{\rho_w}$
5	Kelvin yarıçapının hesaplanması	$r_k^i = \frac{2T_s}{u_a - u_w}$
6	Yüzeydeki su filmi kalınlığının hesaplanması	$t^i = \tau \left[-\frac{5}{\ln RH^i} \right]^{\frac{1}{3}}$
7	Boşluk hacminin hesaplanması	$r_p^i = r_k^i + t^i$
8	Bağıl nemde meydana gelen değişime bağlı olarak birim kütledeki boşluk hacmi azalımının hesaplanması	
9	Azalma boyunca ortalama Kelvin yarıçapının hesaplanması	
10	Azalma boyunca ortalama boşluk yarıçapının hesaplanması	
11	Varsayılan boşluk geometrisi için yüzey alanında meydana gelen artışın hesaplanması	$\Delta S^i = \frac{2\Delta V_p^i}{r_p^i}$ veya $\Delta S^i = \frac{3\Delta V_p^i}{r_p^i}$
12	Boşluk hacmi artışına bağlı olarak kümülatif boşluk hacimlerinin hesaplanması	
13	Boşluk hacmi-ortalama boşluk yarıçapı ilişkisinin belirlenmesi	
14	Kümülatif boşluk hacmi-boşluk yarıçapı ilişkisinin belirlenmesi	

BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, killi numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları gösterilmiştir. Bu kapsamda, filtre kağıdı kullanılarak her bir zeminin emme ölçüm sonuçlarının yanısıra, hem filtre kağıdı hem de basınç plakası kullanılarak elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri sunulmuştur. Elde edilen eğriler, numunelerin hazırlanma yöntemine ve zemin türüne göre detaylı bir şekilde birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Van Genuchten (1980), Fredlund-Xing (1994) ve Fredlund-Pham (2006) eğri modelleri uygulanarak oluşturulan SWC eğrileri hem birbirleriyle karşılaştırılmış hem de zemin türüne göre uygun olan model ortaya konulmuştur. Lu ve Likos (2004)'da yer alan boşluk boyutu analizi eşitlikleri kullanılarak elde edilen boşluk hacmi, kümülatif boşluk hacmi ilişkileri irdelenerek, boşluk geometrisinin zemin-su karakteristik eğrisi ile olan ilişkisi gösterilmiştir.

Konsolide edilerek hazırlanan, optimum-ıslak ve optimum su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanan zeminlerin emme ölçümleri filtre kağıdı kullanılarak yapılmış ve elde edilen kılcal gerilme ölçümleri Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Sıkıştırma su muhtevsındaki zeminlerin emme ölçüm sonuçları.

	No.1			No.2			No.3			No.4		
	kons.	opt.+5	opt.	kons.	opt.+5	opt.	kons.	opt.+5	opt.	kons.	opt.+5	opt.
w (%)	28,8	16,2	11,1	26,9	15,8	11,9	38,6	20,7	16,3	28,9	21,2	15,7
ψ (kPa)	87,1	51,5	3080,1	85,4	81	1945,9	84,7	1095,8	8651,3	95,1	510,4	4944,9

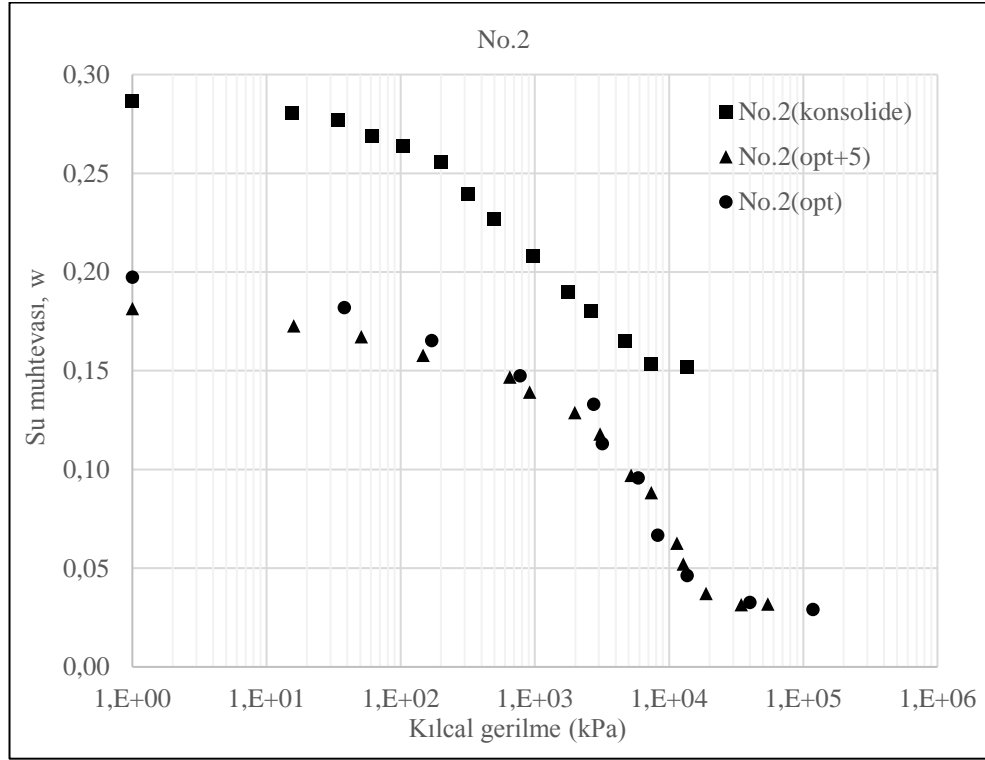
4.1. Zemin-Su Karakteristik Eğrileri

4.1.1. Filtre kağıdı yöntemi

Şekil 4.1. ve Şekil 4.4. arasında yer alan grafiklerde farklı hazırlama yöntemleri ile oluşturulan numunelerden elde edilmiş SWC eğrilerinin karşılaştırılmaları yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, konsolide edilerek hazırlanan numunelerin bütün zeminler için en yüksek başlangıç su muhtevasına sahip olduğu görülmektedir. Optimum ve optimum+%5 su muhtevalarında sıkıştırılarak hazırlanan numunelerin birbirlerine yakın eğriler takip ettiği fakat konsolide numunelerden tamamen ayrıştığı görülmüştür. Ayrıca konsolide numunelere ait SWC eğrilerinin doygunluktan ayrılma aşamasının daha yüksek eğime sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı hazırlama koşullarına bakıldığında No.3 zeminin her üç yöntem için de daha yüksek başlangıç su muhtevasına sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun literatürde yer alan yüksek plastisiteye sahip zeminlerin daha yüksek su tutma kapasitesine sahip olacağı tezine uygun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.1.'de No.1 zeminin zemin-su karakteristik eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi gösterilmiştir. Konsolide numunelerin hava giriş değerine ve kalıcı değere daha yüksek su muhtevalarında ulaştığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık sıkıştırılmış zeminlerin başlangıç su muhtevaları daha düşük olduğu için karakteristik eğri daha düşük su muhtevalarında yer almaktadır. Eğri eğimlerine bakıldığında, eğimler birbirine yakın olmakla birlikte konsolide numune daha hızlı su kaybettiği için eğimi sıkıştırılmış zeminlerin eğrilerin eğiminden daha yüksek olmuştur. SWC eğrisi karakteristikleri karşılaştırıldığında; optimum+%5 numunenin hava giriş değeri yaklaşık 600 kPa olmuştur ve bu değer konsolide numunenin hava giriş değerinin yaklaşık iki katıdır. Optimum numuneye ve konsolide edilmiş numuneye ait hava giriş değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Optimum numunenin hava giriş değeri 290 kPa, konsolide numunenin hava giriş değeri ise 310 kPa'dır. Kalıcı değerlere bakıldığında, konsolide numunenin kalıcı değerine %20 su muhtevası civarında ulaştığı görülmektedir. Sıkıştırılmış numuneler ise kalıcı değere %3-4 su muhtevası aralığında

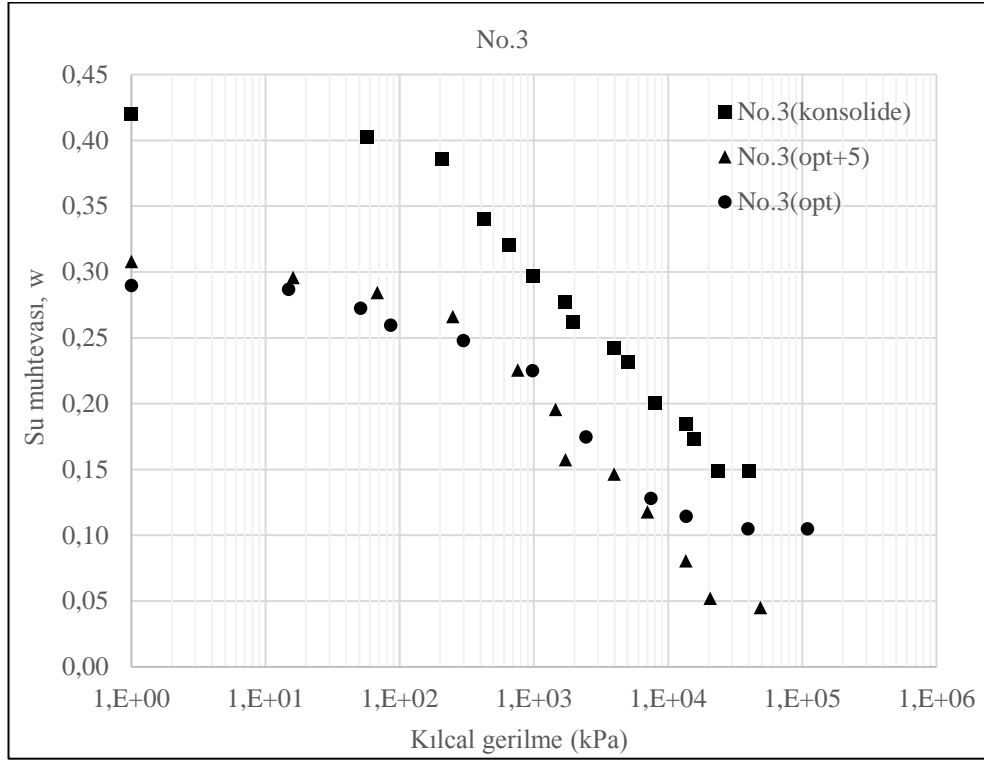
muhtevasının SWC eğrisi üzerindeki etkisini gösteren grafiklerle uyumlu gerçekleşmiştir.



Şekil 4.2. Filtre kağıdı yöntemi: No.2 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi.

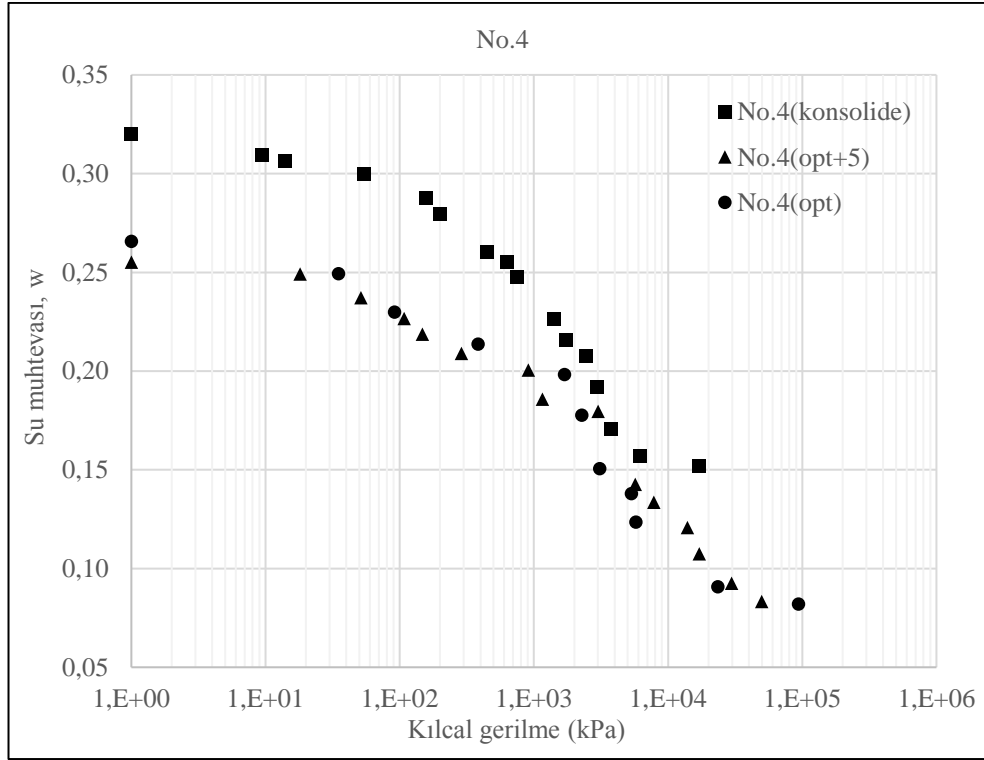
No.3 zeminin zemin-su karakteristik eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. No.3 zeminin SWC eğrisi No.1 ve No.2 zeminlerin eğrilerine benzer bir eğilim göstermiştir. Likit limit ve plastisite özelliği diğer zeminlerden fazla olduğu için beklenildiği gibi daha yüksek başlangıç su muhtevası değerlerine sahiptir. Konsolide zemin için doymuş su muhtevası değeri yaklaşık %45 mertebesindedir. Sıkıştırılmış zeminler için ise %30 değerinden başlamaktadır. Konsolide zemin eğrisinin hava giriş değeri 120 kPa iken, sıkıştırılmış numuneler 220 kPa hava giriş değerine sahiptir. Konsolide numunenin sıkıştırılmış numunelerden yaklaşık 2 kat yüksek su muhtevasında hava giriş değerine ulaştığı görülmektedir. Konsolide zemin eğrisinin kalıcı değeri %14,5 su muhtevasında 22000 kPa olarak belirlenmiştir. Optimum ve optimum+%5 eğrilerinin doymuş bölge ve geçiş bölgesinde çakışık biçimde oluştuğu, fakat kalıcı bölgede optimum eğrisinin daha yüksek su muhtevası değerinde kalıcı bölgeye geçiş yaptığı görülmektedir. Optimum eğrisi %10 kalıcı su

muhtevasında 12000 kPa kalıcı değerine ulaşırken, optimum+% eğrisi %5,5 su muhtevasında 18000 kPa kalıcı değere ulaşmıştır.



Şekil 4.3. Filtre kağıdı yöntemi: No.3 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi.

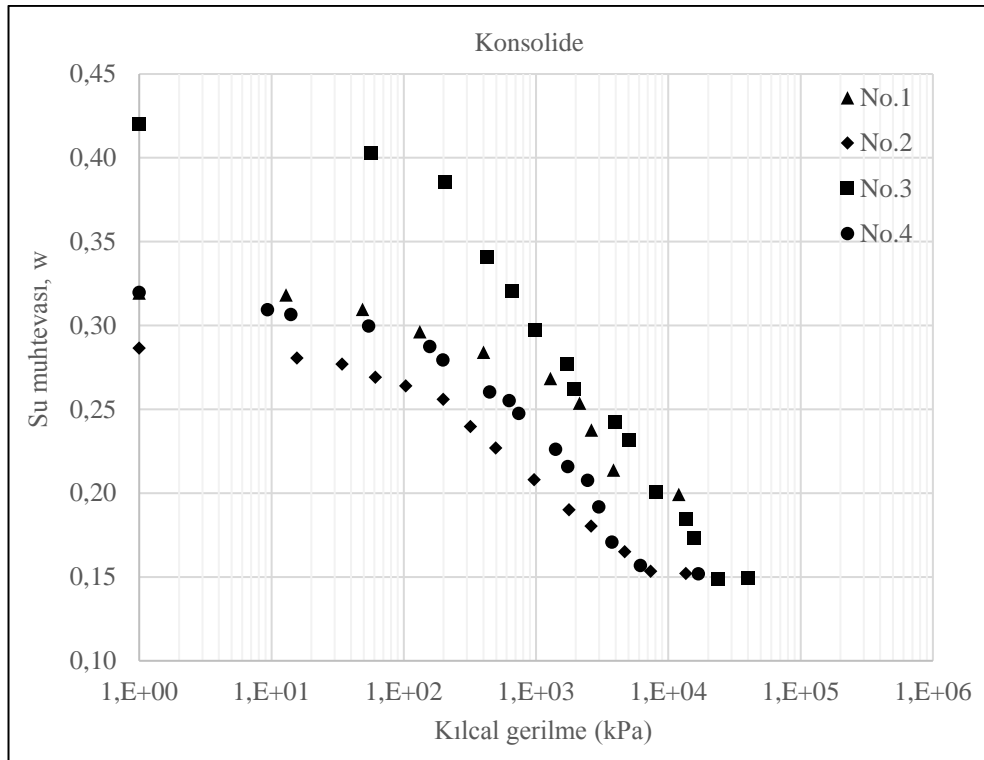
Şekil 4.4.'de No.4 zeminin SWC eğrisi gösterilmektedir. Diğer zeminlere paralel olarak zemin-su karakteristik eğrileri birbirlerine göre benzer konumlarda bulunmaktadır. Konsolide eğrisinin daha yukarıda yer aldığı, sıkıştırma eğrilerinin ise birbirine çok yakın olduğu gözükmemektedir. Doygun bölgede konsolide zemin ile sıkıştırılmış zeminler arasındaki su muhtevası farkı yüksek iken geçiş bölgesinden kalıcı bölgeye doğru geçişte eğriler birbirine yaklaşmıştır. Konsolide eğrisi doymun bölgeden daha yüksek eğimle ayrılmaktadır. Eğrilerin hava giriş değerleri sırasıyla 180 kPa, 230 kPa ve 280 kPa olarak belirlenmiştir. Konsolide zemin bu değere %30,5 su muhtevasında ulaşırken, optimum zemin %25,2 su muhtevasında ulaşmıştır.



Şekil 4.4. Filtre kağıdı yöntemi: No.4 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi.

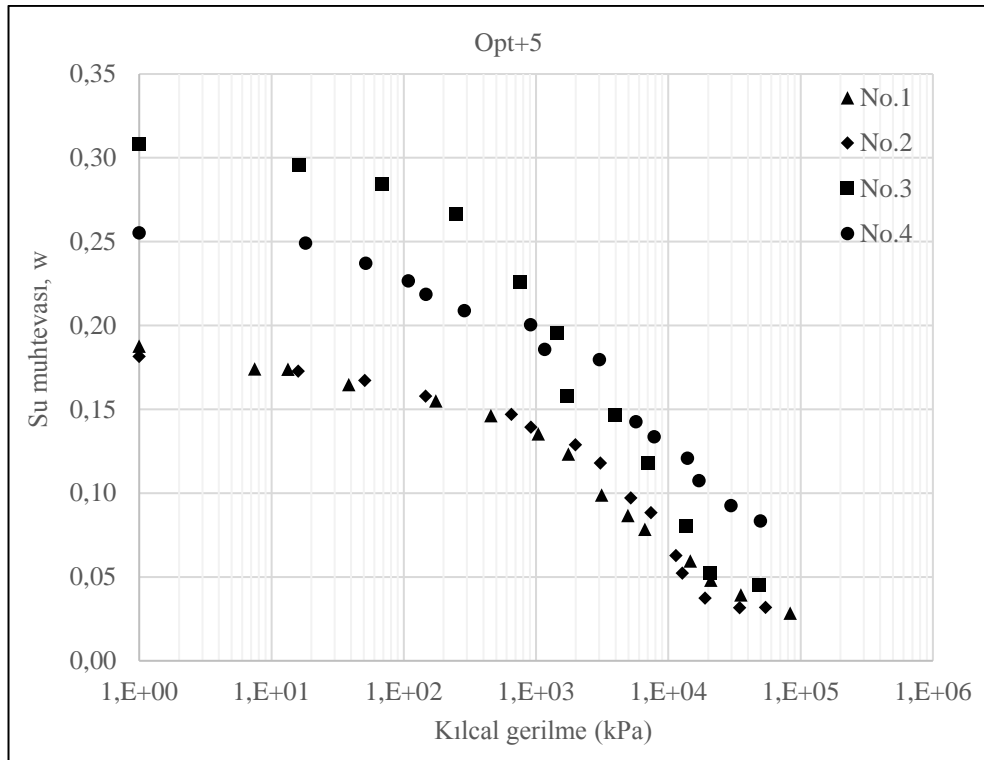
Aynı yöntemlerle hazırlanan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmış ve Şekil 4.5., Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de sunulmuştur.

Konsolide numunelere bakıldığında benzer kil oranına sahip fakat yüksek likit limit ve plastisiteye sahip No.3 numunesinin diğer zeminlere göre aynı kılcal gerilme değerlerine daha yüksek su muhtevası değerinde ulaştığı görülmektedir. Kıvam limit değerlerinin ve kil yüzdelerinin birbirine yakın olduğu bilinen No.1 ve No.4 zeminlerinin eğrilerinin doygun bölgede birbirine çok yakın değerler üzerinde yer aldığı, hava giriş değerinin aşılmasından sonra No.1 eğrisinin yukarı doğru ayrıştığı gözlenmektedir. Kıvam limit değerleri en düşük olan No.2 zemini ise aynı kılcal gerilme değerlerine daha düşük su muhtevası seviyelerinde ulaşmıştır. Yine beklenildiği gibi No.3 zeminin SWC eğrisi diğerlerine göre daha yüksek eğime sahip olmuştur. No.1, No.2 ve No.4 eğrileri neredeyse birbirine paralel eğimler üzerinde ilerlemiştir. Şekil 4.5.'de görülen bir başka durum ise, tüm zeminlerin kalıcı su muhtevası değerlerinin birbirine çok yakın çıkmasıdır. En yüksek kalıcı değere likit limiti en yüksek olan No.3 zemini ulaşmıştır.



Şekil 4.5. Filtre kağıdı yöntemi: Konsolide dört farklı zeminin zemin-su karakteristik eğrisi.

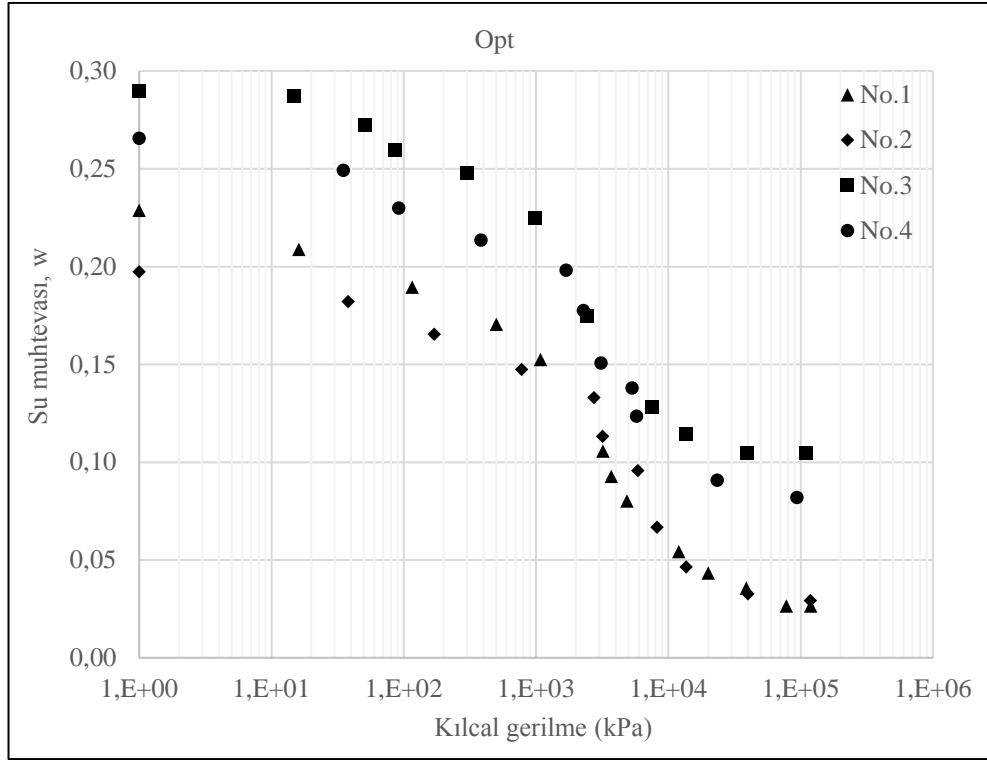
Şekil 4.6.' da optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılmış zeminlerin SWC eğrileri karşılaştırılmıştır. Optimum-ıslak su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan numunelerin zemin-su karakteristik eğrileri incelendiğinde konsolide zeminlerin eğrilerinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılık sıkıştırma durumuna göre değişen doygun su muhtevalarından kaynaklanmaktadır. Eğrilerin takip ettiği su muhtevası değerleri incelendiğinde, konsolide zeminlerde ikinci yüksek su muhtevasına sahip zemin No.1 zemini iken, optimum+%5 zeminlerde ise No.4 zemini olmuştur. Bunun en önemli sebebi No.4 zeminin sıkıştırma su muhtevası değerinin daha yüksek olmasıdır. No.3-No.4 zeminlerinin sıkıştırma su muhtevaları birbirine oldukça yakındır. Başlangıç su muhtevalarına bakıldığında, doyurma aşamasında No.3 zemininin doygun hale gelebilmek için daha fazla su aldığı görülmektedir. Hava giriş değerleri açısından değerlendirildiğinde, aynı hava giriş değerine No.3 zemininin No.4 zeminine göre %4 daha fazla su muhtevasında ulaştığı görülmektedir. Kalıcı değerler karşılaştırıldığında No.3'ün 18000 kPa, No.4'ün 25000 kPa kalıcı değere sırasıyla %5,5 ve %8 su muhtevası değerlerinde ulaştığı belirlenmiştir. Fiziksel özellikleri birbirine yakın olan No.1 ve No.2 zeminlerin SWC eğrileri de benzer olmuştur.



Şekil 4.6. Filtre kağıdı yöntemi: Optimum+%5'te sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan zeminlere bakıldığında birbirine benzer eğri eğilimleri olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 4.7.). Kompaksiyon karakteristikleri birbirine yakın olan No.1 ve No.2 ile No.3 ve No.4 kendi aralarında birbirlerine yakın eğrilere sahiptir. No.1 ile No.2 eğrileri karşılaştırıldığında eğrilerin optimum+%5 eğrisine benzer olarak birbiriyle çakıştığı görülmektedir. Hava giriş ve kalıcı değerleri en yüksek olan No.2 zemini olmuştur. En düşük değerlere sahip zemin ise No.3'tür. No.2 ve No.3 zeminin hava giriş değerleri sırasıyla 580 kPa ve 220 kPa, kalıcı değerleri ise 24000 kPa ve 12000 kPa olmuştur. Başlangıç su muhtevaları arasındaki fark %10 mertebesindeyken, kalıcı bölgede %5'e kadar düşmüştür.

Optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin kalıcı değerleri başlangıç koşullarına bağlı olarak büyük farklar göstermişken, daha yüksek su muhtevasına sahip optimum+%5 ve konsolide numunelerin eğrilerinin kalıcı kısımları birbirine oldukça benzerdir.

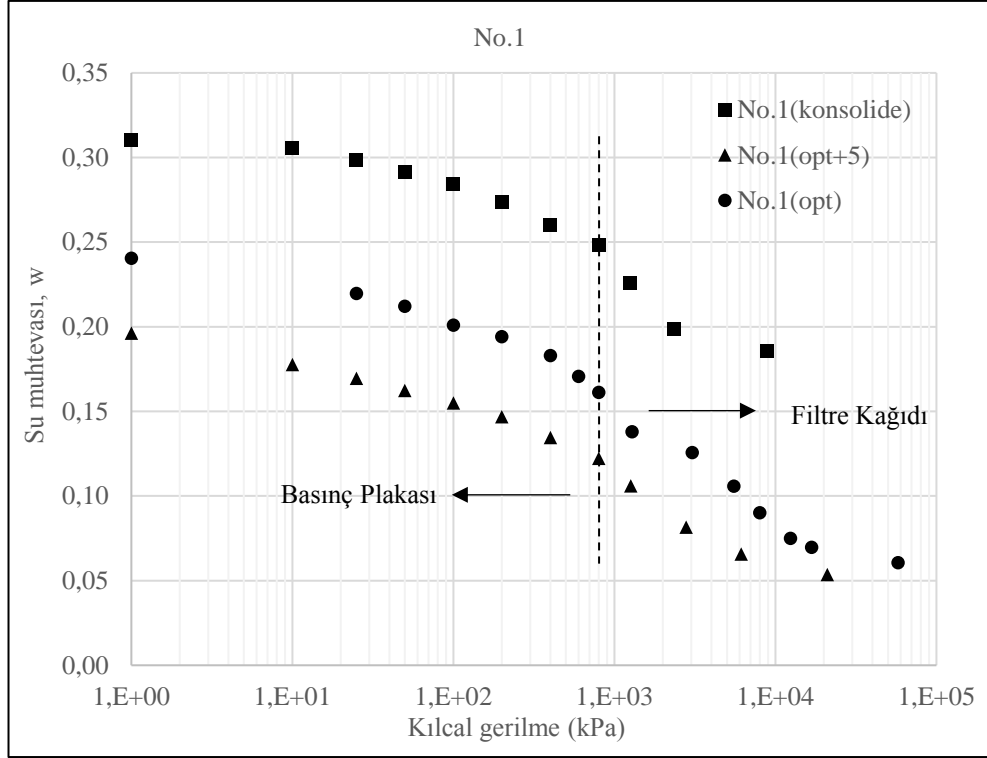


Şekil 4.7. Filtre kağıdı yöntemi: Optimumda sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi.

4.1.2. Basınç plakası yöntemi

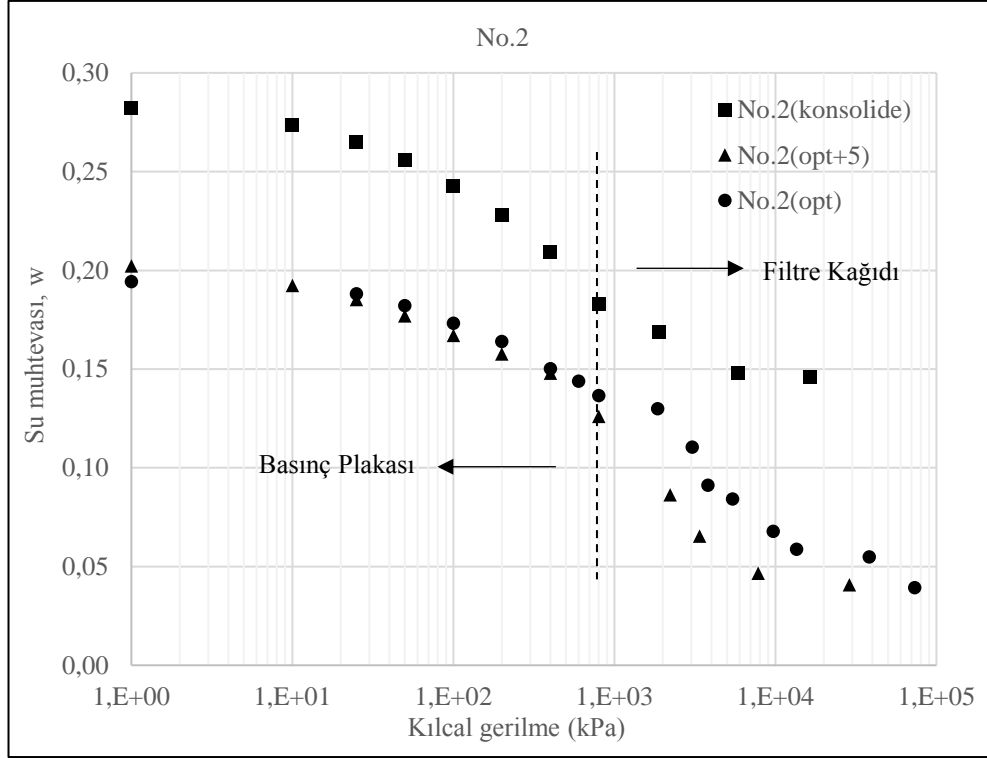
Basınç plakası yöntemi ile oluşturulan zemin-su karakteristik eğrileri üzerindeki sıkışma etkisi ve aynı yöntemle sıkıştırılmış zeminlerin birbiriyle karşılaştırılması Şekil 4.8. ve Şekil 4.14. arasındaki grafiklerde detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Şekil 4.8.'de No.1'e ait zemin-su karakteristik eğrisinin sıkıştırma ve başlangıç su muhtevasına bağlı olarak gösterdiği değişim sunulmuştur. Beklenildiği gibi konsolide numune en yüksek başlangıç su muhtevasına sahiptir. Eğrilerin eğimlerine bakıldığında birbirine paralel oldukları görülmektedir. Literatüre uygun olarak konsolide numunenin hava giriş değeri sıkıştırılmış numunelere kıyasla daha düşüktür. En yüksek hava giriş değeri optimum-ıslak eğrisine aittir. Kalıcı değerler incelendiğinde optimum eğrinin 17000 kPa'da olduğu görülmektedir. Konsolide numunenin kalıcı değeri ise 4000 kPa civarındadır. Konsolide eğrinin kalıcı su muhtevası %18,7 iken optimum eğri için bu değer %6,5'tir.



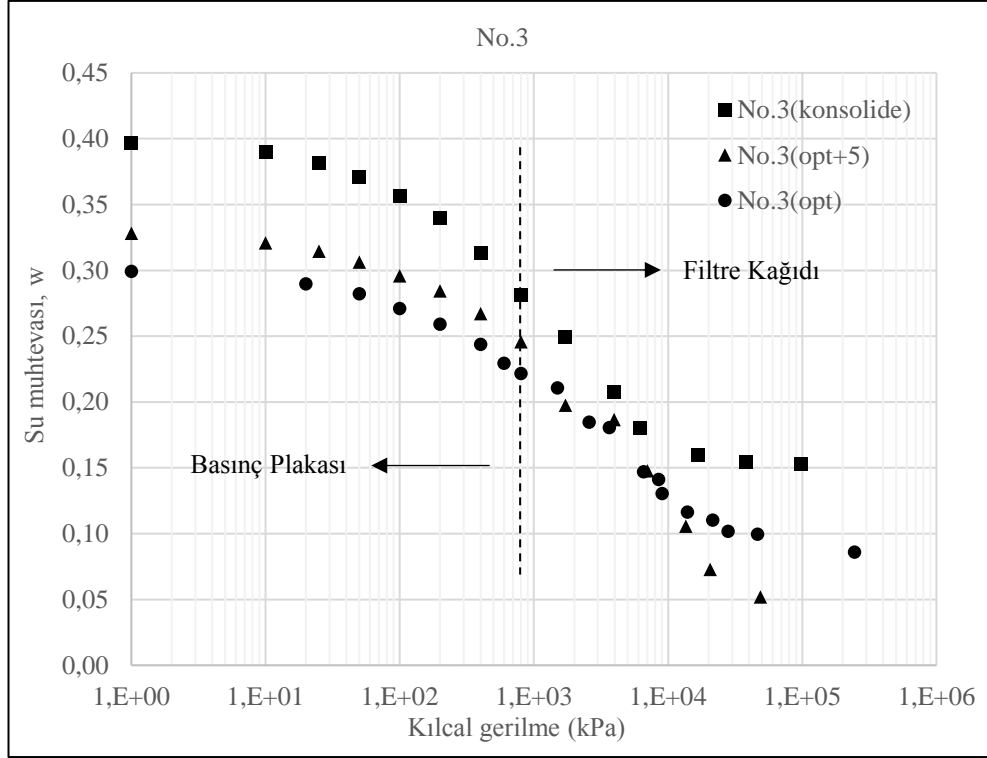
Şekil 4.8. Basınç plakası yöntemi: No.1 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi.

Şekil 4.9.'daki No.2 zeminine ait SWC eğrileri incelendiğinde doygun bölgede optimum ve optimum+%5 eğrilerin çakıştığı, geçiş bölgesinden başlayarak optimum+%5 eğrisinin aşağıya ötelendiği görülmüştür. Konsolide eğrisinin daha düşük hava giriş değeri ve kalıcı değere sahip olduğu görülmüştür. Başlangıç su muhtevaları nerdeyse eşit olan optimum ve optimum+%5 zeminlerinin doyurulma sırasında farklı miktarlarda su aldıkları görülmektedir. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune %10 civarında su almışken, optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılan numunenin yaklaşık %5 kadar su aldığı gözükmemektedir. Eğri biçimleri incelendiğinde konsolide eğrisinin eğiminin daha fazla olduğu, geçiş bölgesinin ise daha kısa kılcal gerilme aralığında yer aldığı görülmüştür. Kalıcı değerine ise daha yüksek su muhtevasında ulaştığı görülmektedir. Sıkıştırılmış zeminlerin hava giriş değerleri birbirine çok yakinken, aynı su muhtevasında kalıcı değerlere ulaştıkları, buna karşın optimum eğrisinin kalıcı değerinin 22000 kPa, optimum+%5 eğrisinin 7700 kPa olduğu belirlenmiştir.



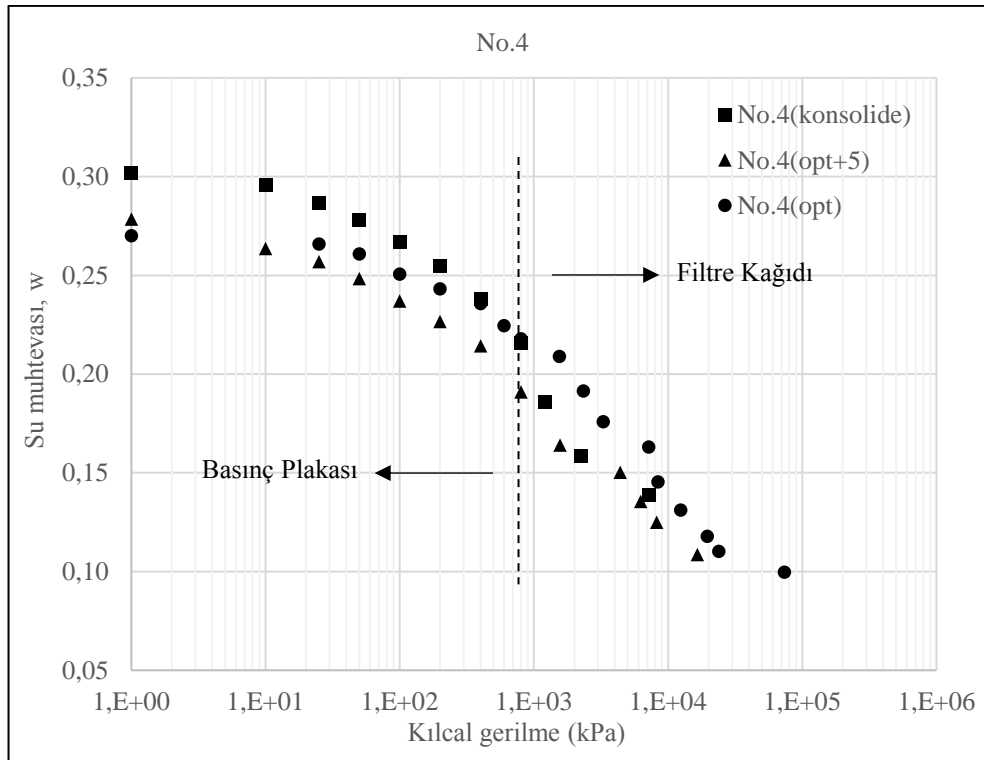
Şekil 4.9. Basınç plakası yöntemi: No.2 zemini SWC eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi.

Zemin türü CH olan No.3 zeminine ait SWC eğrisinin sıkıştırma biçiminden nasıl etkilendiği Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Doyurma sırasında sıkıştırma su muhtevasının yaklaşık 2 katı su almıştır. Sıkıştırılmış numunelerin eğrilerine bakıldığında hava giriş değerlerine %28-29 su muhtevasında ulaştıkları belirlenmiştir. Optimum+%5 eğrisi 600 kPa hava giriş değerine, optimum eğrisi ise 180 kPa hava giriş değerine sahiptir. Kalıcı değerlere ise 32000 kPa değerinde ulaşmışlardır. Killi zeminlere ait literature uygun olarak optimum eğrisi, optimum+%5 eğrisinden daha yüksek su muhtevasında bu değere ulaşmıştır. Optimum+%5 eğrisinin geçiş bölgesinden kalıcı bölgeye geçişte eğri eğiminde önemli bir değişim yoktur fakat optimum eğrisinin geçiş bölgesinde keskin bir düzleşme mevcuttur. Aynı düzleşme konsolide zemin eğrisinde de görülmektedir. Konsolide zemin eğrisi ise 10000 kPa kalıcı, 120 kPa hava giriş değerine sahiptir.



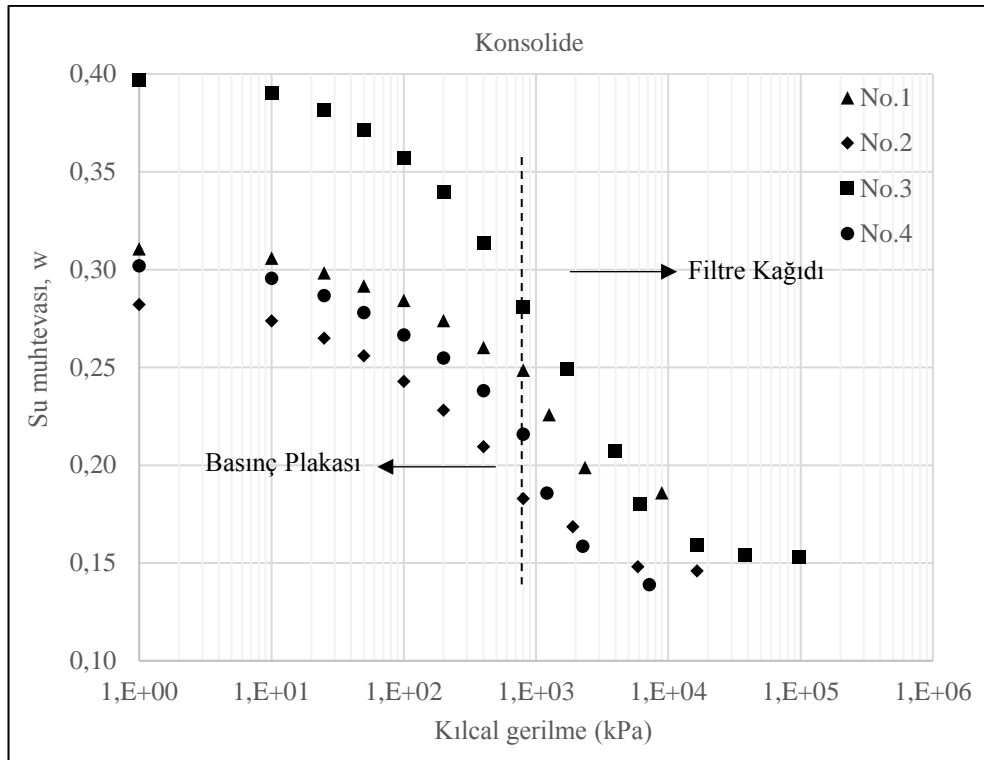
Şekil 4.10. Basınç plakası yöntemi: No.3 zemin SWC eğrisi üzerindeki sıkıştırma etkisi.

Şekil 4.11.'de No.4 zeminin farklı sıkıştırma koşullarında hazırlanmış numunelerine ait SWC eğrileri sunulmuştur. Diğer zeminlerden farklı olarak eğrilerin üç farklı sıkıştırma yöntemi için de birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Eğrilerin eğimlerinin de birbirine yakın oldukları gözükmemektedir. Hava giriş değerleri 100 kPa civarındadır. Bu hava giriş değerine en düşük su muhtevasında ulaşan eğri optimum+%5 olmuştur. En yüksek kalıcı değere ise optimum eğrisinin ulaştığı belirlenmiştir. Optimum eğrisinin kalıcı su muhtevası değeri %10 iken, konsolide numune için bu değer %14,2 olmuştur.



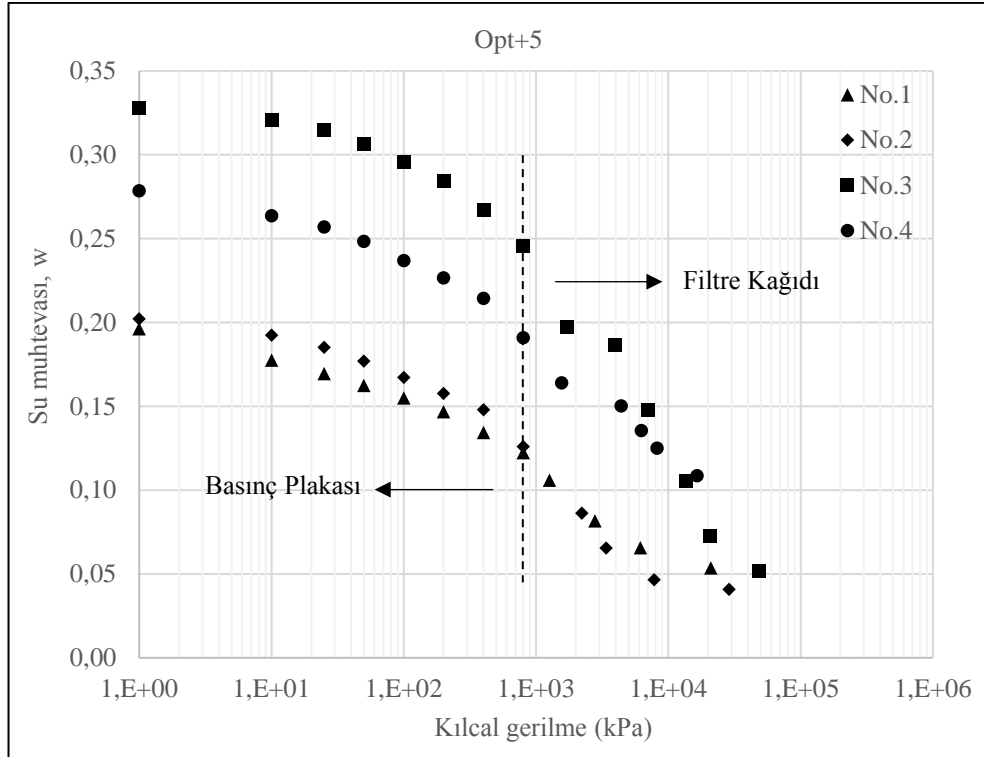
Şekil 4.11. Basınç plakası yöntemi: No.4 zemin SWC eğrisi üzerindeki sıkışma etkisi.

Şekil 4.12.'de konsolide edilerek hazırlanan dört farklı zeminin SWC eğrileri karşılaştırılmıştır. No.3 zemininin konsolidasyon sonunda diğer zeminlerden çok daha yüksek su muhtevasına sahip olduğu görülmektedir. Eğrilerin eğimi incelendiğinde No.3 zemininin doygunluktan ayrılmayı daha hızlı gerçekleştirdiği anlaşılmaktadır. En düşük başlangıç su muhtevasında No.2 zemin bulunmaktadır. Bütün zeminlerin 100 - 140 kPa civarında hava giriş değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Başlangıç su muhtevalarına bağlı olarak hava giriş değerlerine ulaştıkları su muhtevası değerleri farklılık göstermiştir. SWC eğrileri kıyaslandığında No.3 zemin eğrisinin eğiminin çok yüksek olduğu görülmüştür. Kalıcı su muhtevası değerlerinin birbirine yakın olduğu düşünüldüğünde No.3 zemininin çok daha geniş kılcal gerilme aralığında su kaybettiği görülmektedir. Yaklaşık olarak boşluk suyunun %60'ını kaybetmiştir. Kalıcı değerlere bakıldığında No.3 zemininin en yüksek değere sahip olduğu, bu değer 10000 kPa olduğu saptanmıştır. Diğer zeminlerin ise %50 su kaybederek kalıcı değere ulaştığı görülmektedir. No.1, No.2 ve No.4 zeminlerinin %15 su muhtevasında 3000-4000 kPa kalıcı değere ulaştıkları belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Basınç plakası yöntemi: Konsolide zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi.

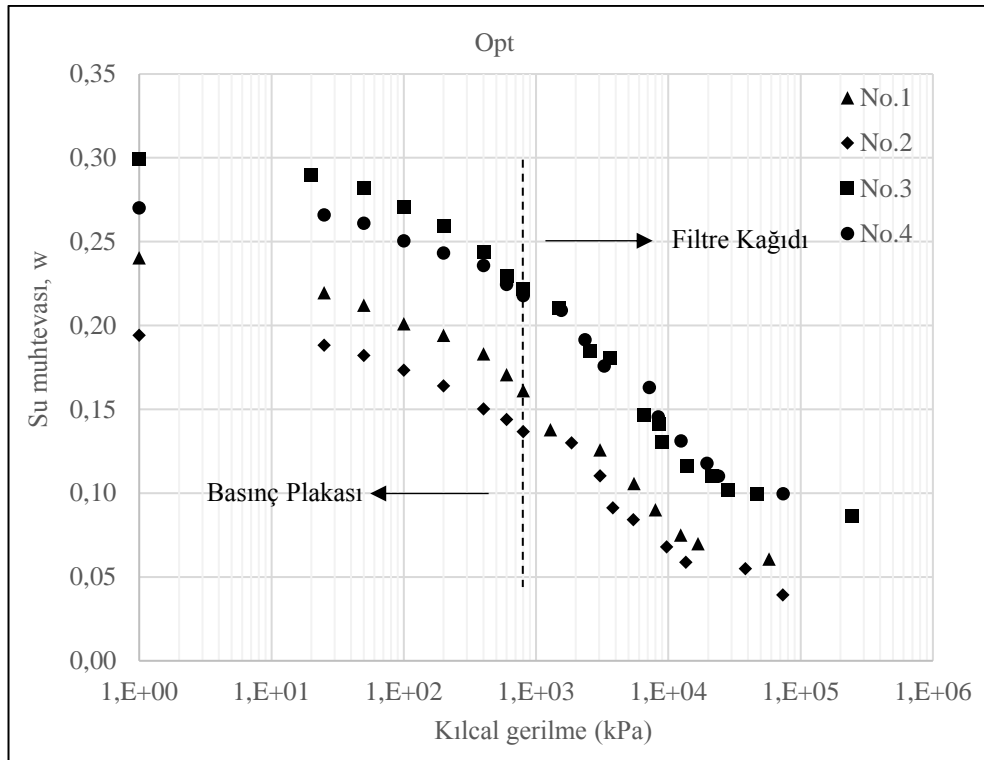
Şekil 4.13.'deki optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılan zeminlerin SWC eğrisi incelendiğinde konsolide zeminlerden farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Konsolide numunelerle kıyaslandığında bütün numunelerin ortalama %7-8 daha düşük başlangıç su muhtevasına sahip olduğu görülmektedir. No.3 ve No.4 zemininin sıkıştırma su muhtevalarının diğer iki zeminden yüksek olması bu zeminlerin SWC eğrilerini yukarı taşımıştır. No.4 zemininin No.1 zemininin üstünde yer almasının sebebi budur. No.3 ve No.4 aynı sıkıştırma su muhtevalarında hazırlanmasına rağmen, doyurma aşamasında No.3'ün daha fazla su absorbe ettiği görülmektedir.



Şekil 4.13. Basınç plakası yöntemi: Optimum+%5'te sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi.

Hava giriş değerleri incelendiğinde No.3 zemininin 500 kPa ile en yüksek, No.4 zemininin 95 kPa ile en düşük olduğu görülmektedir. Kalıcı değerler incelendiğinde No.3 zemininin kalıcı değerinin 32000 kPa olduğu grafikten anlaşılmaktadır. No.4 eğrisinin kalıcı bölgede No.3'e göre yukarıda kaldığı, No.3'ün su kaybetmeye devam ederek yüksek kalıcı değerlere ulaştığı görülmektedir. Sıkıştırma su muhtevaları aynı olan No.1 ve No.2 zemininin eğrileri birbirine paralel gerçekleşmiştir. Kil yüzdesi ve plastisitesi yüksek olan No.1 zemin daha yüksek hava giriş değerine sahiptir. No.1'in hava giriş değeri 290 kPa iken No.2'nin hava giriş değeri 120 kPa'dır. No.1 zeminin SWC eğrisi kalıcı değere yaklaştıkça daha yüksek su muhtevalarında kalmaktadır.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan zeminlerin eğrilerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir (Şekil 4.14.). No.3 ve No.4 zeminlerin aynı su muhtevalarında hazırlandığı düşünülürse doyurma işleminde No.3'ün kısmen daha fazla su emdiği sonucuna varılabilir. Optimum+%5 eğrileriyle kıyaslandığında aynı su muhtevalarında hazırlanan zeminlerden No.1'in yüzde olarak daha fazla su absorbe ettiği görülmektedir. Aynı kılcal gerilme değerlerine bakıldığında doymuş bölgede en yüksek su muhtevasına No.3 zemini, en düşük su muhtevasına ise No.2 zemini sahiptir.



Şekil 4.14. Basınç plakası yöntemi: Optimumda sıkıştırılan zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi.

Yukarıdaki grafiklerin geneli incelendiğinde eğilimin değişmediği görülmektedir. No.4 zemininin kalıcı bölgeye yaklaştıkça No.3 zeminle, No.2'nin ise No.1 ile çakıştığı gözlenmiştir. No.3 ve No.4'ün kalıcı değerleri sırasıyla 32000 kPa ve 34000 kPa'dır. No.3 zemininin kalıcı su muhtevası %9, No.4 zeminininki %10 olarak saptanmıştır.

Grafiklerde yer alan SWC eğrilerine ait özellikler Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. SWC eğrilerinin özellikleri.

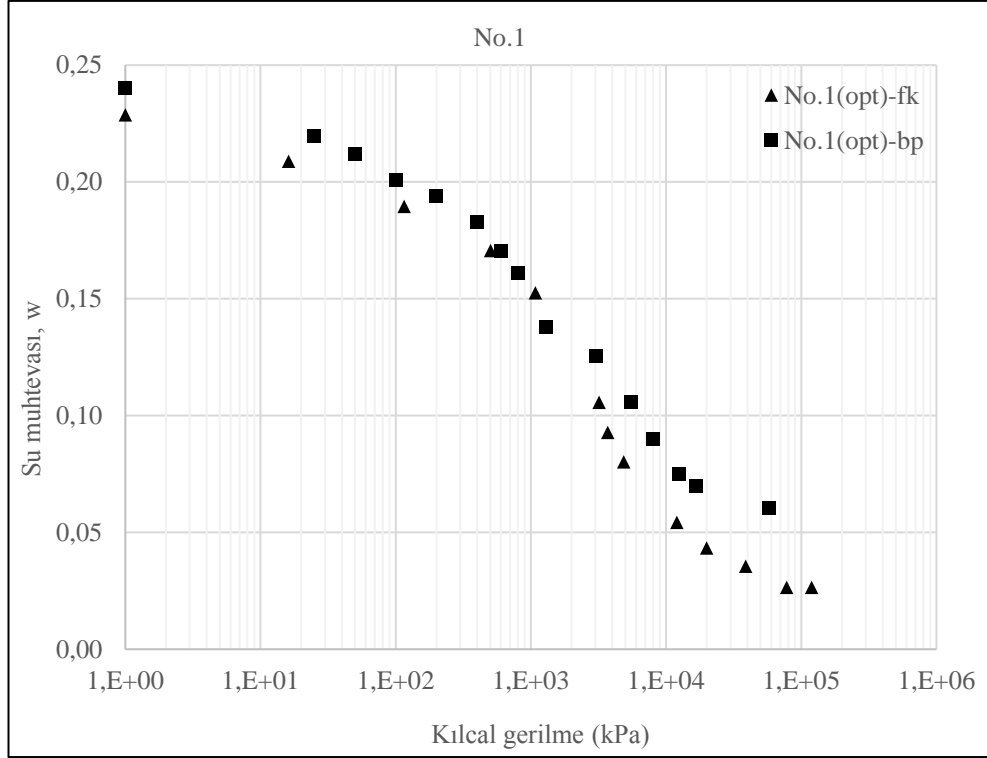
Zemin	Sıkıştırma yöntemi	w_i (%)	w_s (%)		w_{ae} (%)		ψ_{ae} (kPa)		w_r (%)		ψ_r (kPa)	
			FK	BP+FK	FK	BP+FK	FK	BP+FK	FK	BP+FK	FK	BP+FK
No.1	Kons.	29	31,9	31,1	31	29,7	310	150	20,5	18,7	8000	4000
	Opt. + %5	16,5	18,8	19,6	14,8	15,8	600	290	3,5	5,7	31000	7000
	Opt.	11,5	22,9	24	19,5	19,3	290	200	2,8	6,5	21000	17000
No.2	Kons.	27	28,7	28,2	27,8	26,5	110	60	15,5	15	5000	3000
	Opt. + %5	16	18,2	20,2	16,8	18,5	720	120	3,5	4	23000	7700
	Opt.	11	19,7	19,4	18,3	18,5	580	150	2,8	4,2	24000	22000
No.3	Kons.	39	42	39,7	40,5	37	120	140	14,5	15,5	22000	10000
	Opt. + %5	20	30,8	32,8	28,8	29	220	500	5,5	6	18000	32000
	Opt.	15	29	29,9	27,8	28,5	220	180	10,5	9	12000	32000
No.4	Kons.	29	32	30,2	30,5	28,2	180	140	15	14,2	8500	3800
	Opt. + %5	20	25,5	27,9	24,7	25,2	230	95	8	12	25000	10000
	Opt.	15	26,6	27	25,2	26,5	280	130	8	10	22000	34000

Not: w_i =Sıkıştırma su muhtevası, w_s =Doygun su muhtevası, w_{ae} =Hava girişi su muhtevası, w_r =Kalıcı su muhtevası, ψ_{ae} =Hava giriş değeri, ψ_r =Kalıcı değer.

4.1.3. Filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümlerinin karşılaştırılması

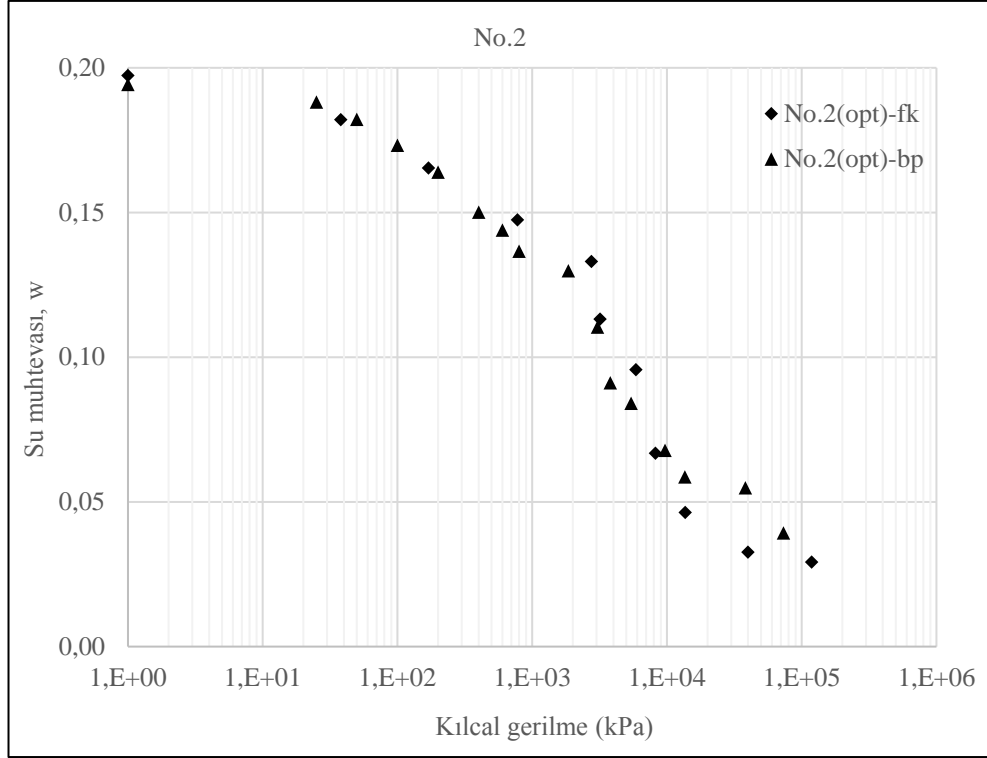
Aşağıdaki grafiklerde filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemleri kullanılarak elde edilen zemin-su karakteristik eğrilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda sadece optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan numunelere ait zemin-su karakteristik eğrileri gösterilmiştir. Konsolide ve optimum+%5 zeminlerin karşılaştırıldığı grafikler Ek 1’de yer almaktadır. Filtre kağıdı yöntemiyle doygun durumdan başlatılan numuneler kuruya yakın su muhtevasına gelene kadar ölçüm yapılırken, basınç plakası yönteminde 800 kPa kılcal gerilmeye kadar ölçüm yapıldıktan sonra kalıcı değere kadar filtre kağıdı ile ölçüme devam edilmiştir. Bu sebeple 800 kPa kılcal gerilme değerine kadar basınç plakası ve filtre kağıdı karşılaştırması yapılmıştır.

No.1 (opt) karakteristik eğrilerinin her iki yöntemle ölçümünde yakın sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.15.). Birbirine yakın doygun su muhtevası, hava girişi su muhtevası ve hava giriş değeri elde edildiği görülmektedir. Basınç plakası+filtre kağıdı ölçümü kalıcı bölgede daha yüksek su muhtevasında kalmıştır. Eğrilere ait karakteristik değerler Tablo 4.2.’de yer almaktadır.



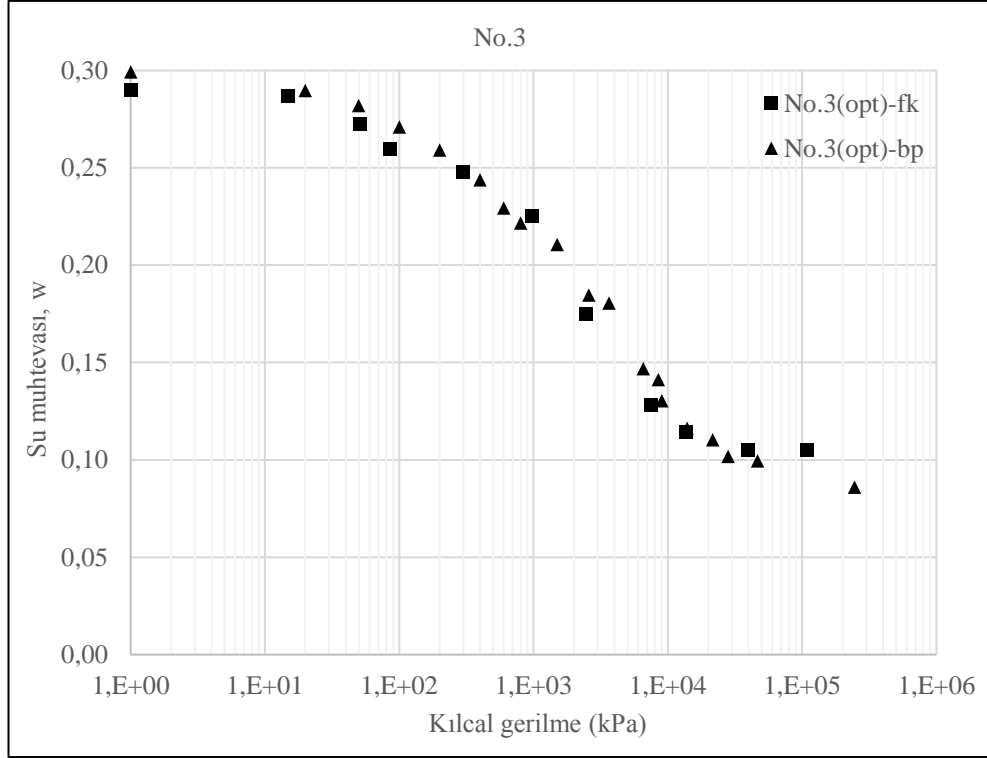
Şekil 4.15. No.1 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

Şekil 4.16.'da No.2 (opt) için her iki yöntemle elde edilen SWC eğrisinin karşılaştırılması yapılmıştır. Aynı su muhtevasında filtre kağıdı yöntemiyle 580 kPa, basınç plakasıyla 150 kPa hava giriş değeri elde edilmiştir. Kalıcı değerlerin çok yakın olduğu, fakat basınç plakası+filtre kağıdı eğrisinde bu değere daha yüksek su muhtevasında ulaşıldığı görülmektedir. İki yöntemin vermiş olduğu SWC eğrileri birbirini doğrular nitelikte bulunmuştur.



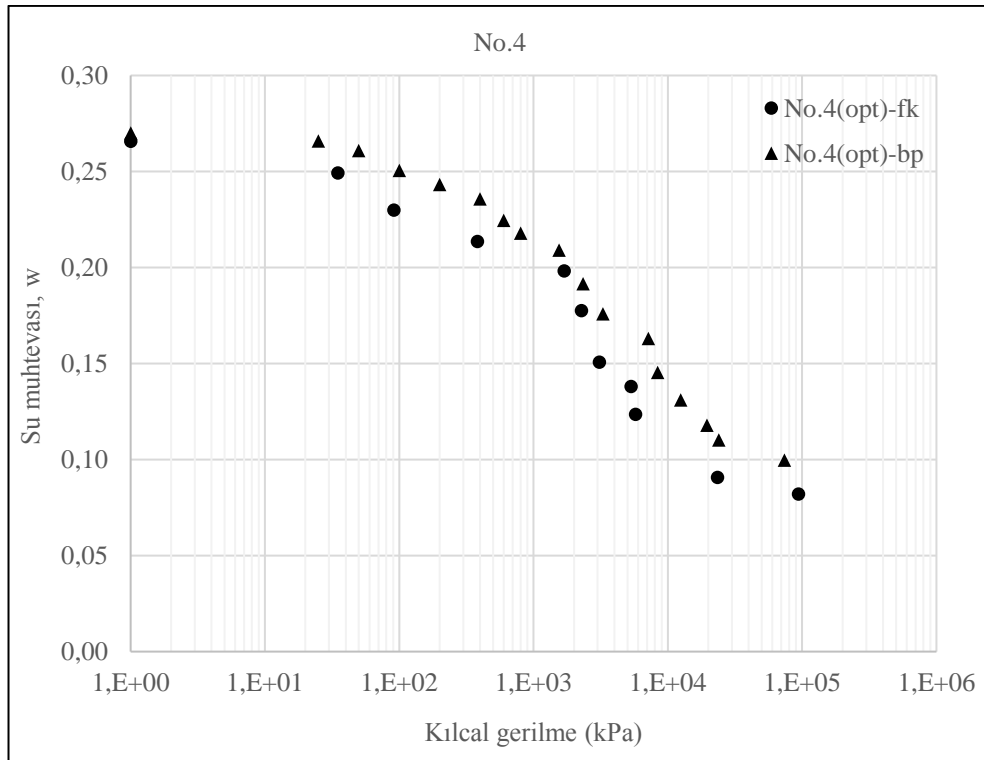
Şekil 4.16. No.2 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

No.3 zemininin filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri Şekil 4.17.'de sunulmuştur. Eğri biçimleri karşılaştırıldığında eğimlerinin aynı olduğu hava giriş su muhtevası ve kılcal değerinin birbiriyle çakıştığı görülmektedir. Kalıcı değerlere bakıldığında bakıldığında basınç plakası+filtre kağıdı eğrisinin çok daha yüksek kalıcı değere ulaştığı görülmektedir. Deneyin çok daha düşük su muhtevalarına kadar devam ettirilmesi sonucu etkileyen sebeplerden birisidir.



Şekil 4.17. No.3 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

No.4 (opt) numunenin eğrileri incelendiğinde iki yöntemin sonuçları arasında fark görülmektedir (Şekil 4.18.). Doymun su muhtevaları aynı olmasına rağmen, basınç plakasında uygulanan kılcal gerilmelerde elde edilen su muhtevaları filtre kağıdından daha yüksek çıkmıştır. Bunun sonucunda, basınç plakası yöntemiyle %2 daha yüksek su muhtevasında filtre kağıdı ölçümünün yarısı kadar bir hava giriş değerine ulaşılmıştır. Filtre kağıdı ile yapılan ikinci kısım ölçümlerde her iki eğri yaklaşırsa da, basınç plakası+filtre kağıdı %2 daha yüksek su muhtevasında yaklaşık 1,5 kat yüksek kalıcı değere ulaşmıştır.



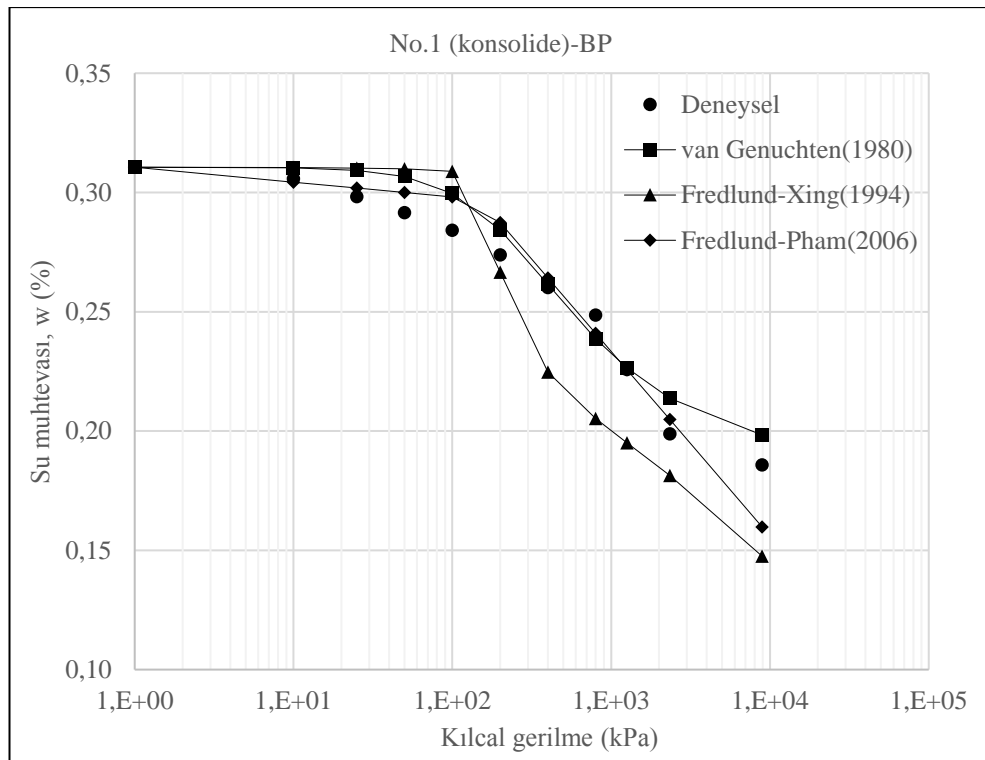
Şekil 4.18. No.4 (opt) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

Filtre kağıdı ile yapılan ölçümlerde numunelerin hızlı su kaybı yaşadığı doymun bölge ve geçiş bölgesinin üst bölümünde eğriyi oluşturacak birbirine yakın noktalar elde etmekte zorlanılmıştır. Ölçüm aşamaları arasındaki havada kurutma işlemi bu sebeple kısa tutularak, yeterince su muhtevası-kılcal gerilme değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Buna rağmen basınç plakası yönteminde elde edilen kadar çok sayıda değeri elde edilememiştir. 800 kPa değerinden sonra filtre kağıdı ile devam ettirilen numuneler, doymun tamamen filtre kağıdı ile yapılan ölçüm sonuçlarıyla oldukça uyumlu bulunmuştur.

4.2. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi Modellerinin Uygulanması

Filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleriyle elde edilen su muhtevası-kılcal gerilme bilgileri kullanılarak eğri modelleri oluşturulmuştur. Eğri oluşturma modelleri kullanılırken Tablo.3.6.'da yer alan eşitlikler kullanılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde ham deneysel verilerle eğri modellerinin uyumluluğu incelenmiştir. Modellerin birbirleriyle olan karşılaştırması ortaya konulmuştur. Aşağıda gösterilmeyen diğer numunelere ait grafikler Ek 2'de yer almaktadır.

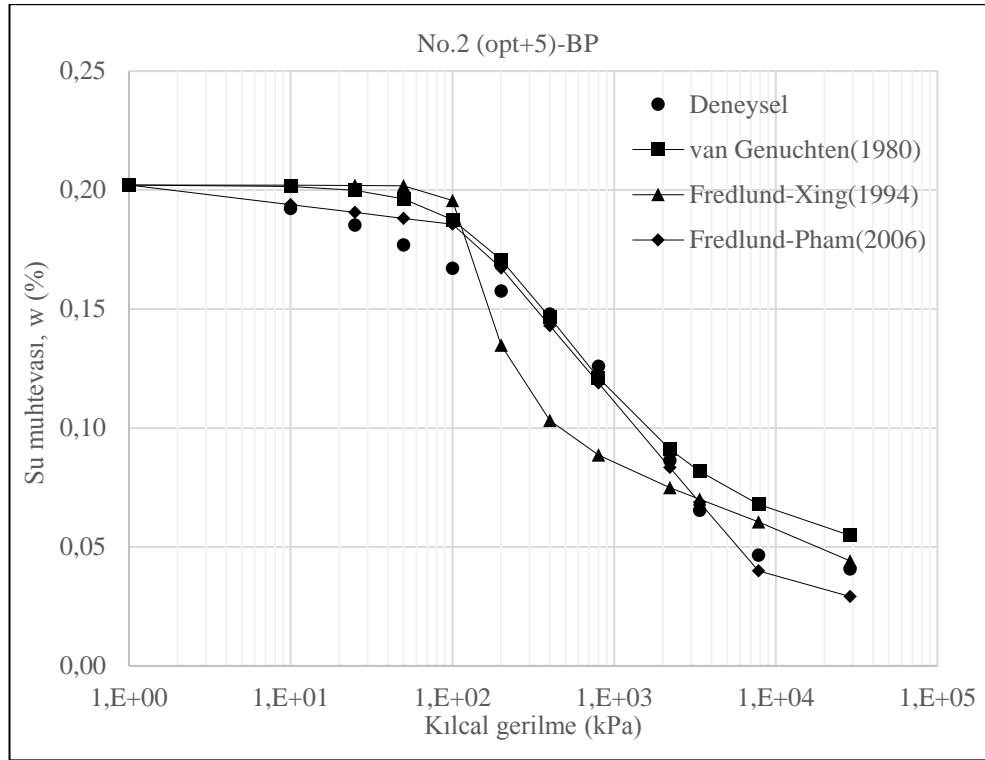
No.1 konsolide numune için üç farklı eğri modeli uygulanmıştır (Şekil 4.19.). Fredlund-Xing (1994) modelinin bu zemin için elde edilen karakteristik noktalara uygun olmadığı görülmüştür. Doygun bölgede çok yüksek su muhtevasında kalırken, kalıcı değer, deneysel su muhtevasının çok altında olmuştur. Fredlund-Xing (1994) modelinin hassasiyetinin az olduğu görülmektedir. 10^6 kPa kılcal gerilme değerlerinin üstündeki değerler için önerilen düzeltme katsayısının yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Bu model tipik bir eğri oluşturmaktadır. Van Genuchten (1980) daha eski bir model olmasına karşın No.1 zeminin deney sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu görülmüştür. Doygun bölgede ve geçiş bölgesinde deney sonuçlarına yakın bir model ortaya koymuştur. Buna karşın, kalıcı bölgede nispeten yüksek su muhtevasında kalmıştır. Fredlund-Pham (2006) modeli verilen parametreleri en hassas uygulayan yöntem olmuştur. Buna karşın kalıcı bölgeyi 10^6 kPa kılcal gerilmeye doğrusal olarak birleştirdiği için, bu kısımda genellikle deneysel veriden düşük su muhtevasında kalmaktadır.



Şekil 4.19. No.1 (konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.

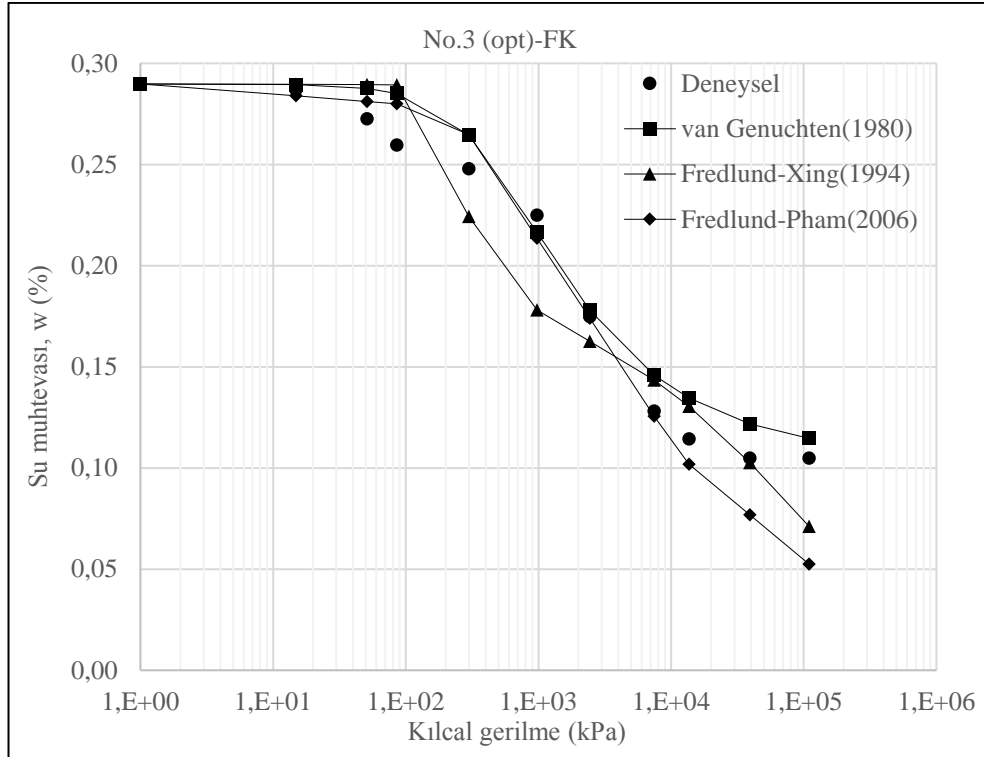
Şekil 4.20.'de No.2 (opt+5) zemine uygulanan eğri modelleri gösterilmektedir. Fredlund-Xing (1994) modeli tipik bir eğri oluşturmuştur. Doygun bölgede doğrusal

bir eğri oluşturduğundan hesaplanan su muhtevası deneysel verinin üzerinde çıkmıştır. Geçiş bölgesini yüksek bir eğimle geçmiştir. Buna karşın rezüel bölgede deneysel verilere yakın bir eğri oluşmuştur. Van Genuchten (1980) modeli deneysel verilere uygun bir eğri oluşturmuştur. Fredlund-Pham (2006) modeli ise bu zemin için en uygun eğriyi oluşturmuştur.



Şekil 4.20. No.2 (opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.

Şekil 4.21.'de No.3 (opt) zemine ait zemin-su karakteristik eğrileri sunulmuştur. Fredlund-Xing (1994) modeli CH zemin olan No.3 zemininde nispeten daha uygun bir eğri oluşturmuştur. Doygun bölge ve kalıcı bölgede deney sonuçları uyumluyken, geçiş bölgesinde daha eğimli bir eğri meydana getirmiştir. Van Genuchten (1980) ve Fredlund-Pham (2006) benzer eğriler oluşturmuştur. Her iki model de kalıcı bölgede uyumlu olmamıştır.

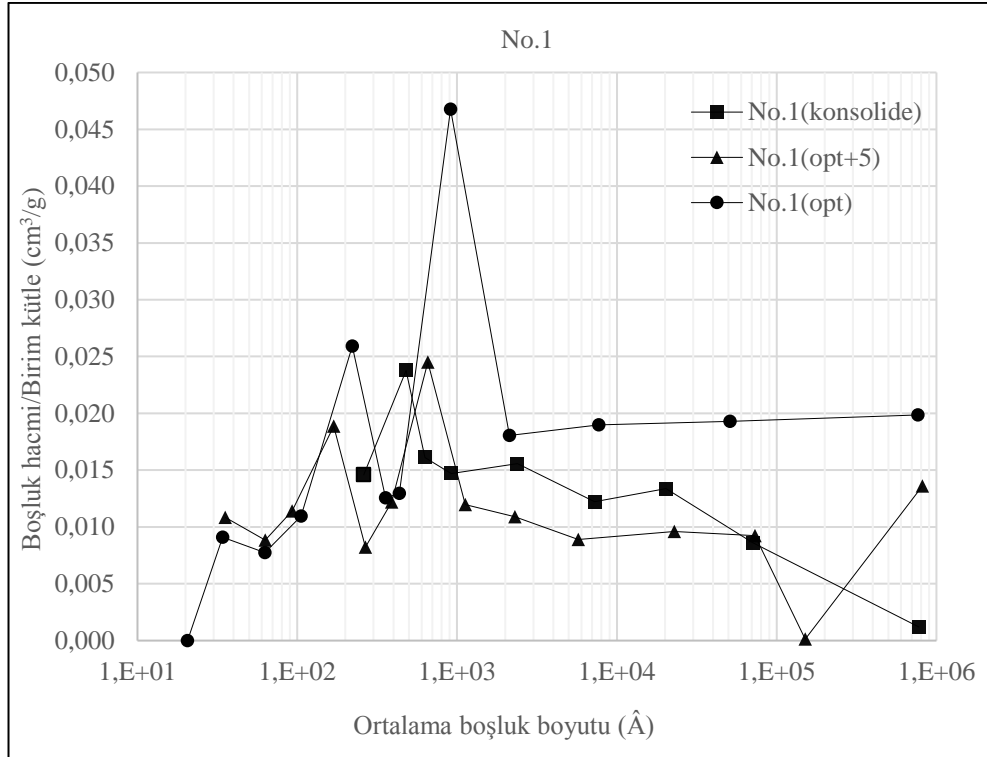


Şekil 4.21. No.3 (opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.

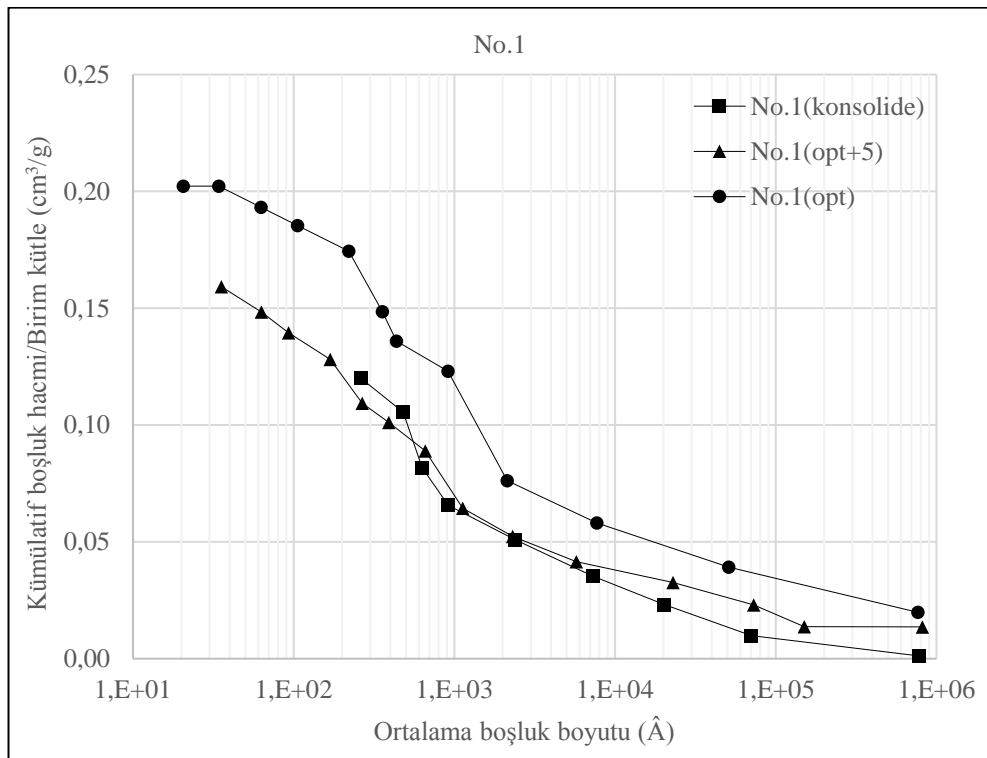
4.3. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi-Boşluk Boyutu İlişkisi

Zemin-su karakteristik eğrisi-boşluk boyutu ilişkisi Tablo 3.7.'de verilen Lu ve Likos (2004) yaklaşımı uygulanarak kurulmuştur. Boşluk hacmi ve kümülatif boşluk hacmi hesaplanarak oluşturulan grafikler üzerinden SWC eğrilerine geçiş yapılmıştır. Zemin davranışı açısından kritik su muhtevası aralığı belirlenmiştir. Aşağıdaki grafiklerde sadece filtre kağıdı deney verileri üzerinden kurulan boşluk boyutu ilişkisi gösterilmiştir. Basınç plakası sonuçları Ek 3'de sunulmuştur.

Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.'de No.1 zeminin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi ve sıkıştırmanın boşluk boyutu üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Konsolide numunenin özgül yüzey alanı $3,12 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak hesaplanmıştır. Toplam boşluk hacmini 250 \AA ile 20000 \AA arasındaki boşluk boyutları oluşturmaktadır. Hakim boşluk boyutu 1000 \AA ($0,1 \text{ \mu m}$) ile 300 \AA arasına düşmektedir. Yaklaşık 900 \AA değerinde kılcal gerilmenin maksimum değişim gösterdiği görülmektedir. Maksimum değişim gösterdiği su muhtevası aralığı %21-%27 olmuştur.



Şekil 4.22. No.1 zeminin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

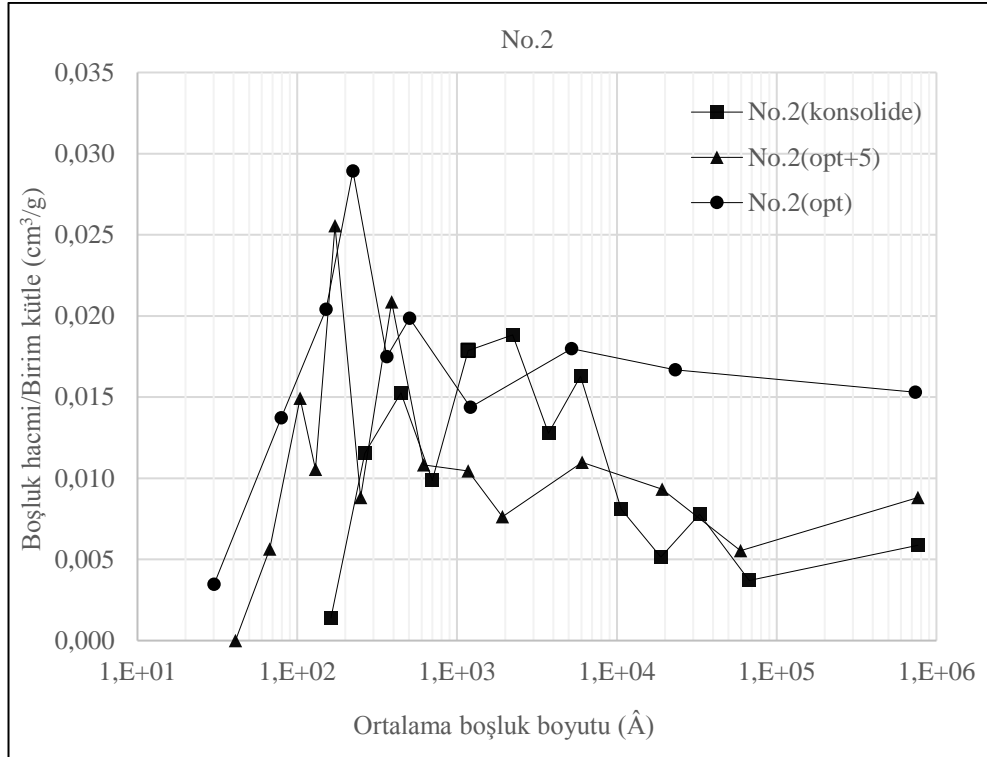


Şekil 4.23. No.1 zeminin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

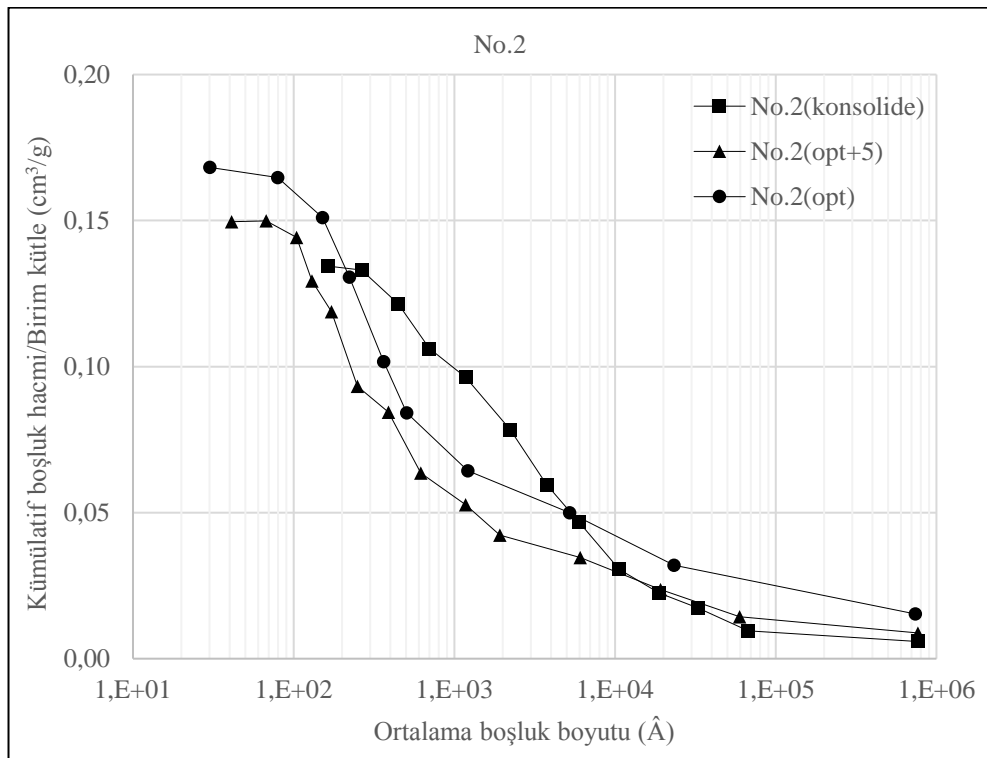
No.1 optimum+%5 numune için özgül yüzey alanı 15,94 m²/g olarak hesaplanmıştır. Boşluk boyutlarının 100 Å ile 10000 Å arasında dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Hâkim boşluk boyutunun yaklaşık 100 Å ile 1000 Å arasında olduğu görülmektedir. 270 Å değerinde kılcal gerilme en büyük değişime sahiptir ve kılcal gerilmenin hızlı değişim gösterdiği su muhtevası aralığı yaklaşık %5-%11'dir.

No.1 optimum numunenin özgül yüzey alanı 14,78 m²/g belirlenmiştir. 100 Å ile 10000 Å arasındaki ortalama boşluk boyutları toplam boşluk hacminin genelini oluşturmaktadır. Hâkim boşluk boyutunun 100 Å ile 2000 Å arasında yer aldığı görülmektedir. 400 Å değerinde bir vadi oluştuğu görülmektedir. Bu değer kılcal gerilme değerindeki hızlı değişimi göstermektedir. SWC eğrisi incelendiğinde kılcal gerilmedeki hızlı değişim %5 ile %11 su muhtevası aralığında gerçekleşmektedir.

No.2 zemininin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi ve sıkıştırma etkisinin boşluk boyutu üzerindeki etkisi Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'de sunulmuştur. Konsolide numunenin özgül yüzey alanı 2,63 m²/g olarak hesaplanmıştır. 200 Å ile 50000 Å arasındaki boşluk boyutları toplam boşluk hacmini yönetmektedir. Hakim boşluk boyutunun 8000 Å (0,8 µm) ile 200 Å arasında olduğu görülmektedir. Kılcal gerilmenin maksimum değişim gösterdiği ortalama boşluk boyutu değeri 700 Å olmuştur. Hızlı kılcal gerilme değişimi gösterdiği su muhtevası aralığı %16-%21 olmuştur.



Şekil 4.24. No.2 zeminin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

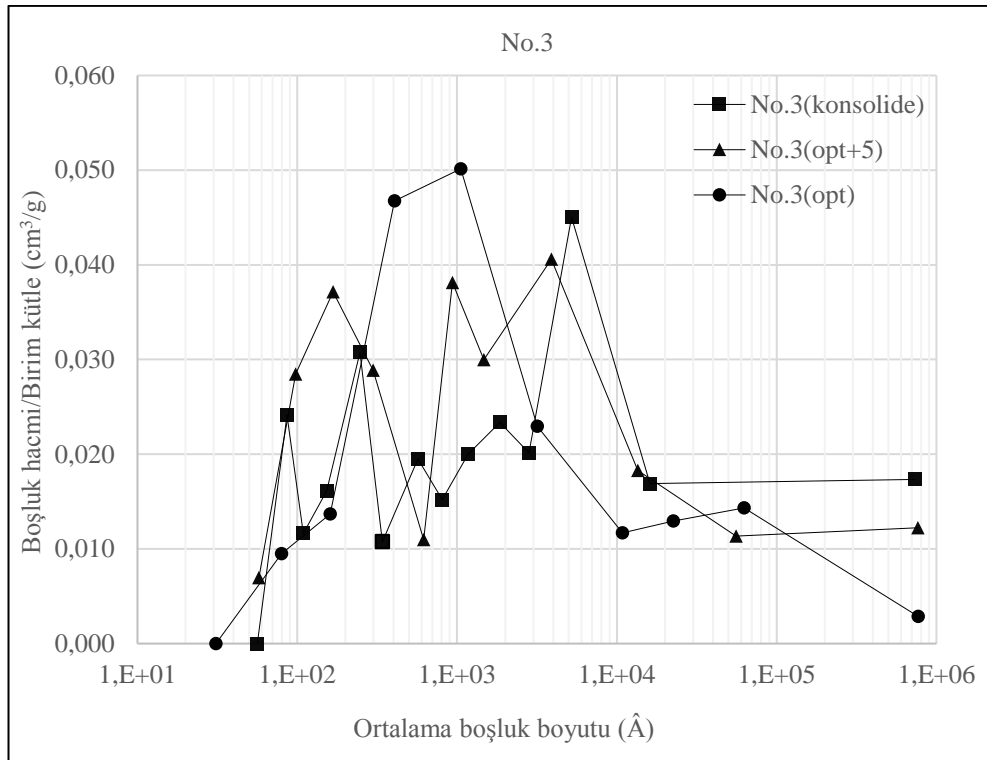


Şekil 4.25. No.2 zeminin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

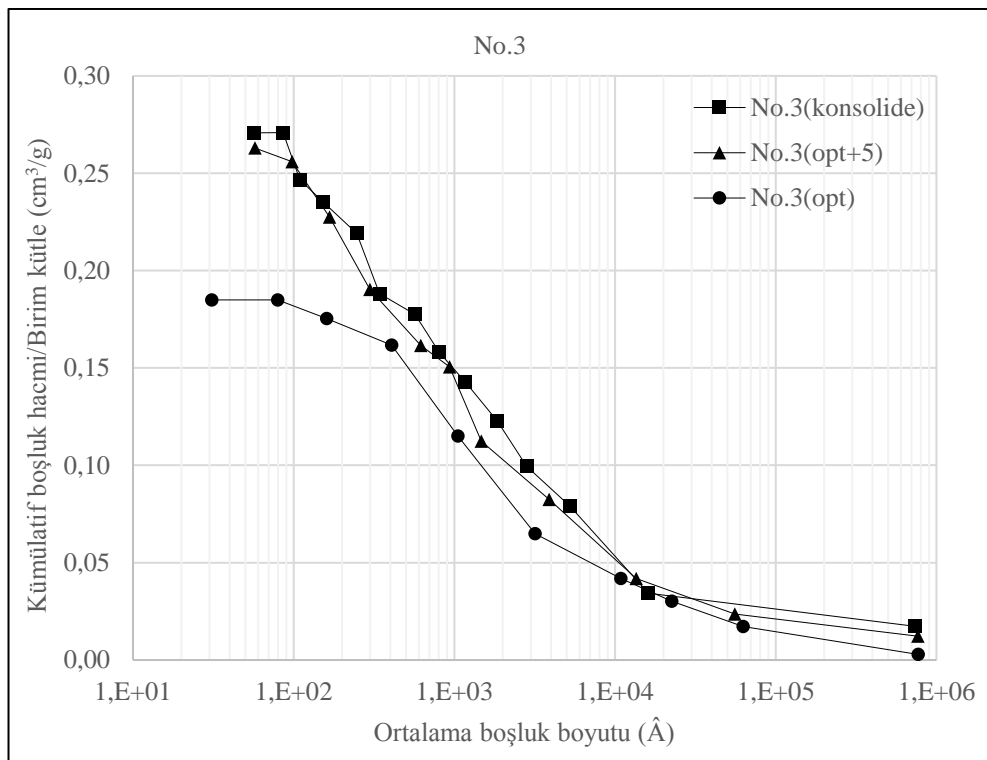
No.2 optimum+%5 numune için özgül yüzey alanı 11,44 m²/g olarak hesaplanmıştır. 100 Å ile 10000 Å arasındaki boşluk boyutlarının toplam boşluk hacmini oluşturduğu görülmektedir. Hâkim boşluk boyutunun yaklaşık 100 Å ile 1000 Å arasında olduğu anlaşılmaktadır. 250 Å ortalama boşluk boyutu değeri kılcal gerilme ani değişim göstermiştir. Kılcal gerilmenin hızlı değişim gösterdiği su muhtavas aralığı yaklaşık %5-%11'dir.

No.2 optimum numunenin özgül yüzey alanı 13,12 m²/g belirlenmiştir. 100 Å ile 10000 Å arasındaki ortalama boşluk boyutları toplam boşluk hacminin genelini oluşturmaktadır. Hâkim boşluk boyutunun 100 Å ile 1000 Å arasında yer aldığı görülmektedir. Yaklaşık 350 Å değerinde kılcal gerilme hızlı değişim göstermiştir. SWC eğrisi ve boşluk boyutu dağılımı birlikte incelendiğinde kılcal gerilmedeki hızlı değişimin %6 ile %12 su muhtavas aralığında gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de No.3 zeminin boşluk boyutu dağılımı gösterilmiştir. Konsolide numunenin özgül yüzey alanı 14,94 m²/g hesaplanmıştır. Toplam boşluk hacmini 50 Å ile 20000 Å arasındaki boşluk boyutları kontrol etmektedir. Hakim boşluk boyutu aralığı 5000 Å (0,5 µm) ile 80 Å arasındadır. 2820 Å değerinde kılcal gerilmenin hızlı değişim gösterdiği görülmektedir. Maksimum değişim gösterdiği su muhtavas aralığı %28-%34 olmuştur.



Şekil 4.26. No.3 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

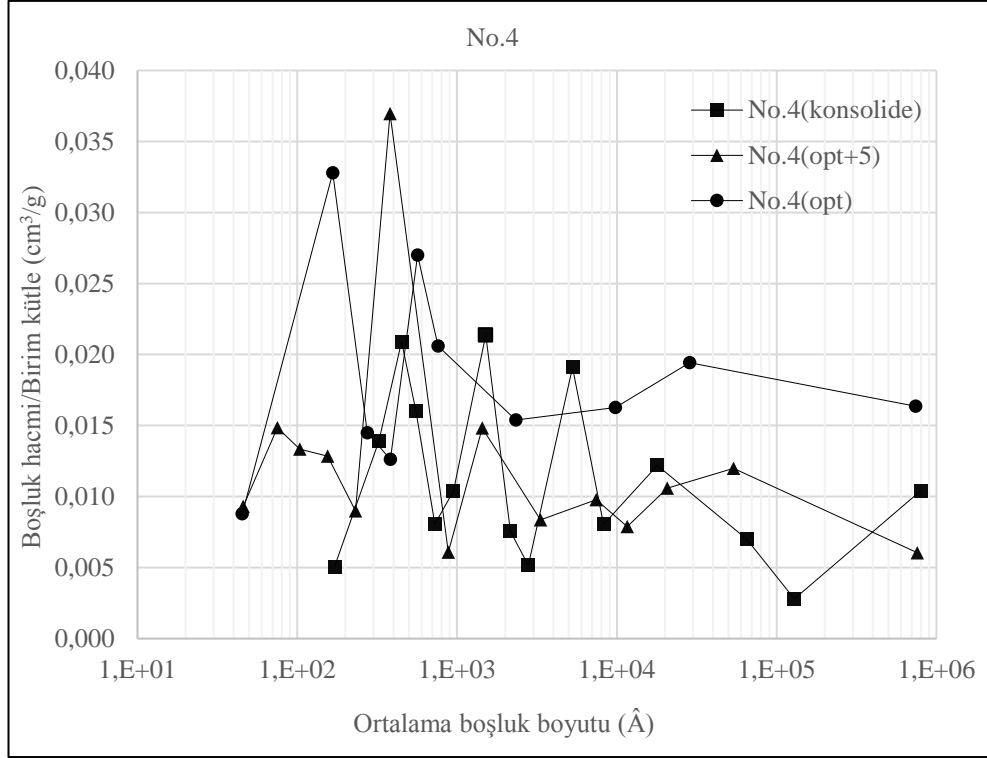


Şekil 4.27. No.3 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

No.3 optimum+%5 numunenin özgül yüzey alanı 16,44 m²/g bulunmuştur. Toplam boşluk hacminin oluşturan boşluk boyutlarının 100 Å ile 60000 Å arasında dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Hâkim boşluk boyutunun yaklaşık 100 Å ile 10000 Å arasında olduğu görülmektedir. Yaklaşık 1500 Å değerinde kılcal gerilme ani değişime göstermiştir ve kılcal gerilmenin büyük değişim gösterdiği su muhtevası aralığı yaklaşık %15-%23 olarak belirlenmiştir.

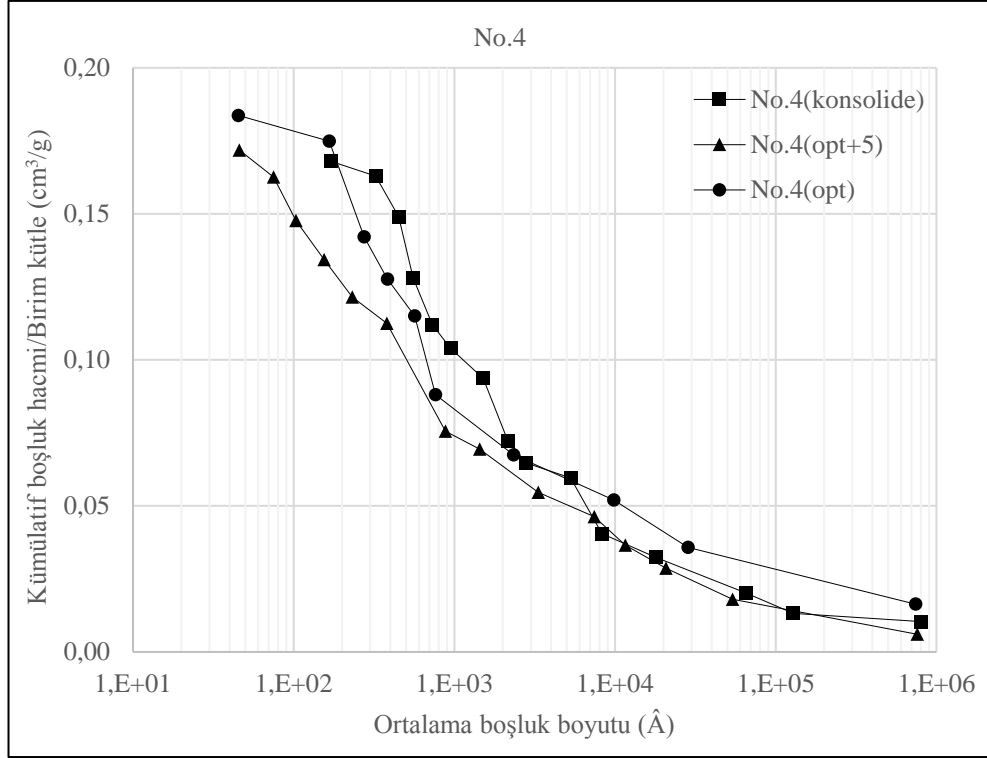
No.3 optimum numunenin özgül yüzey alanı 7,53 m²/g belirlenmiştir. 100 Å ile 80000 Å arasındaki ortalama boşluk boyutları toplam boşluk hacminin genelini oluşturmaktadır. Hâkim boşluk boyutunun 100 Å ile 10000 Å arasında yer aldığı görülmektedir. 10800 Å değerinde kılcal gerilme ani değişim göstermiştir. Bu değer kılcal gerilme değerindeki hızlı değişimi göstermektedir. SWC eğrisi incelendiğinde kılcal gerilmedeki hızlı değişim %17 ile %27 su muhtevası aralığında gerçekleşmektedir.

Şekil 4.28. ve Şekil 4.29.'da farklı şekilde sıkıştırılmış No.4 zeminine ait boşluk boyutu eğrileri gösterilmiştir. Konsolide numunenin özgül yüzey alanı 3,90 m²/g olarak hesaplanmıştır. 500 Å ile 50000 Å arasındaki boşluk boyutları toplam boşluk hacmi yapısını kontrol etmektedir. Hakim boşluk boyutu aralığı 8000 Å (0,8 µm) ile 200 Å arasındadır. 2800 Å değerinde kılcal gerilmenin hızlı değişim gösterdiği görülmektedir. Maksimum değişim gösterdiği su muhtevası aralığı %23-%27 olmuştur.



Şekil 4.28. No.4 zemini boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

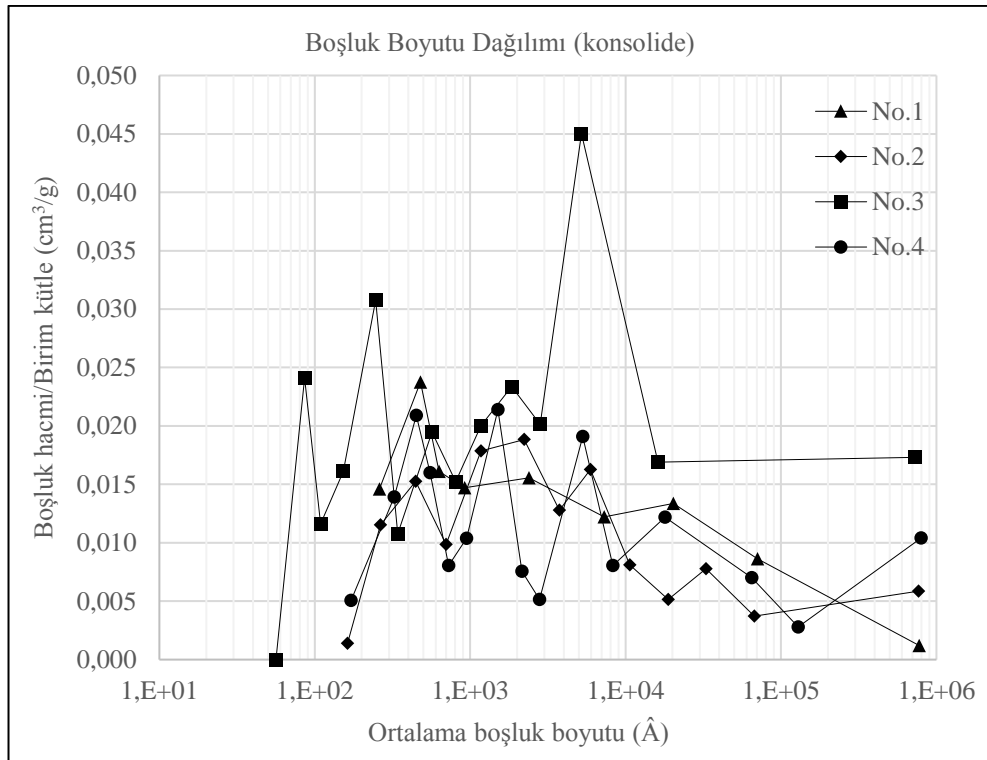
No.4 optimum+%5 numunenin özgül yüzey alanı $15,42 \text{ m}^2/\text{g}$ bulunmuştur. Toplam boşluk hacimi oluşturan boşluk boyutlarının 100 \AA ile 10000 \AA arasında dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Hâkim boşluk boyutunun yaklaşık 100 \AA ile 1000 \AA arasında olduğu görülmektedir. 850 \AA değerinde kılcal gerilme ani değişime göstermiştir ve kılcal gerilmenin büyük değişim gösterdiği su muhtevası aralığı yaklaşık %19-%14 olarak belirlenmiştir.



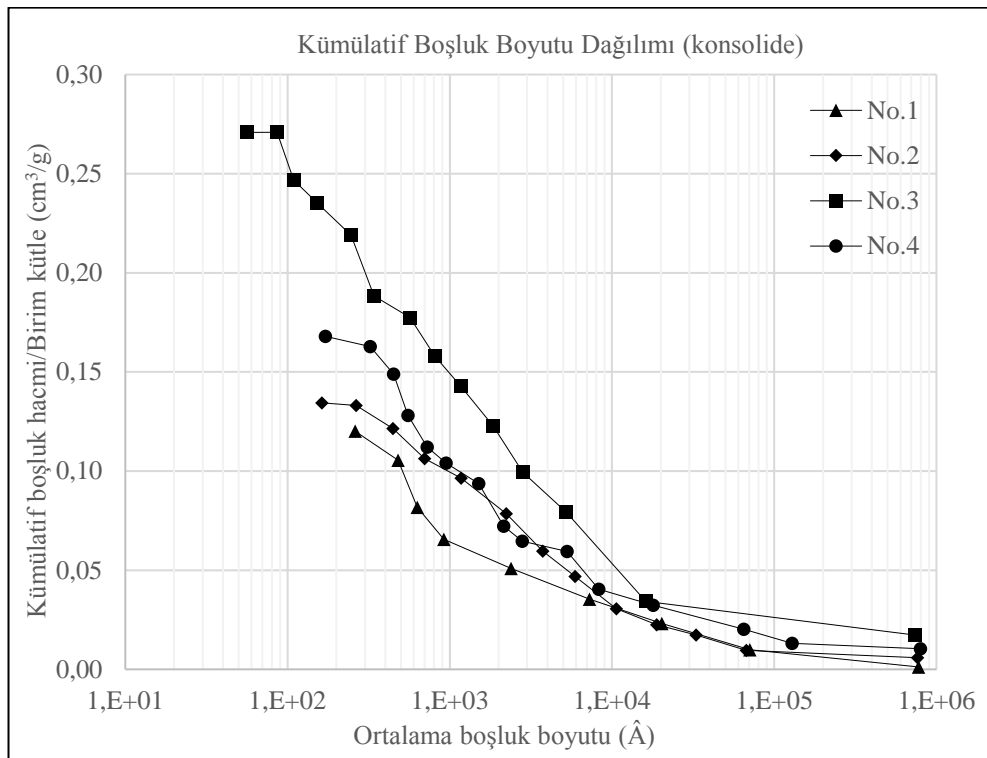
Şekil 4.29. No.4 zemini kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.

No.4 optimum numunenin özgül yüzey alanı $11,20 \text{ m}^2/\text{g}$ belirlenmiştir. 100 \AA ile 80000 \AA arasındaki ortalama boşluk boyutları toplam boşluk hacminin genelini oluşturmaktadır. Hâkim boşluk boyutunun 100 \AA ile 20000 \AA arasında yer aldığı görülmektedir. 2300 \AA değerinde kılcal gerilme ani değişim göstermiştir. SWC eğrisi incelendiğinde kılcal gerilmedeki hızlı değişimi %15 ile %21 su muhtevası aralığında gerçekleşmektedir.

Konsolide zeminlerin boşluk boyutu dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.'de gösterilmiştir. En büyük özgül yüzey alanı No.3 zemini için $14,94 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak hesaplanmıştır.



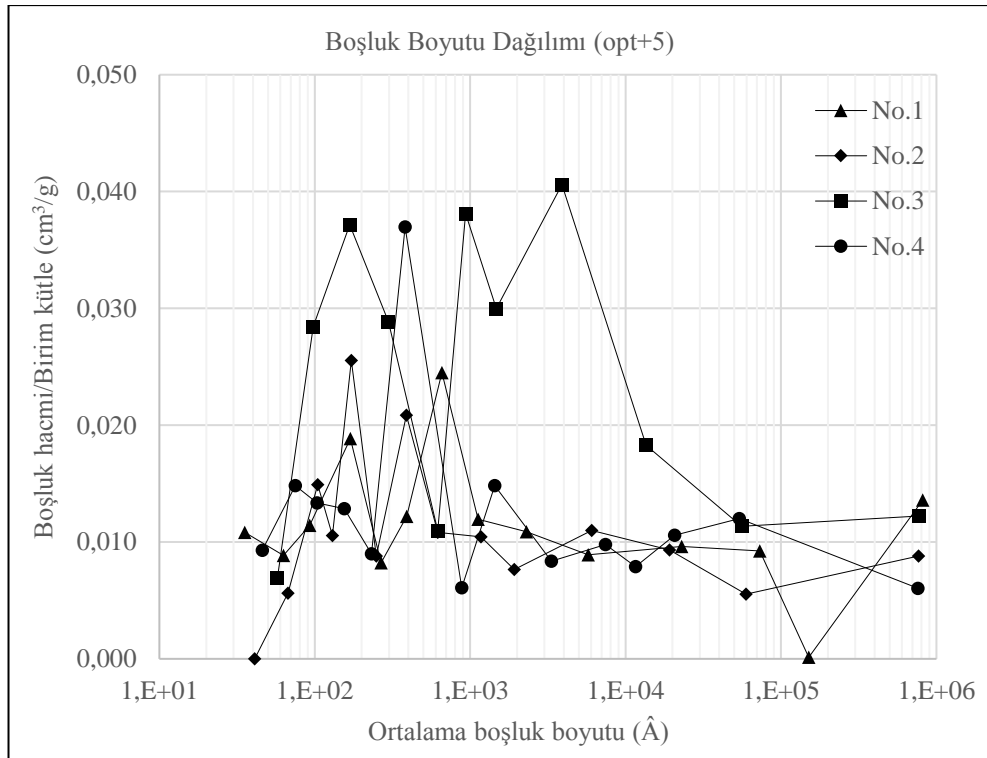
Şekil 4.30. Konsolide zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.



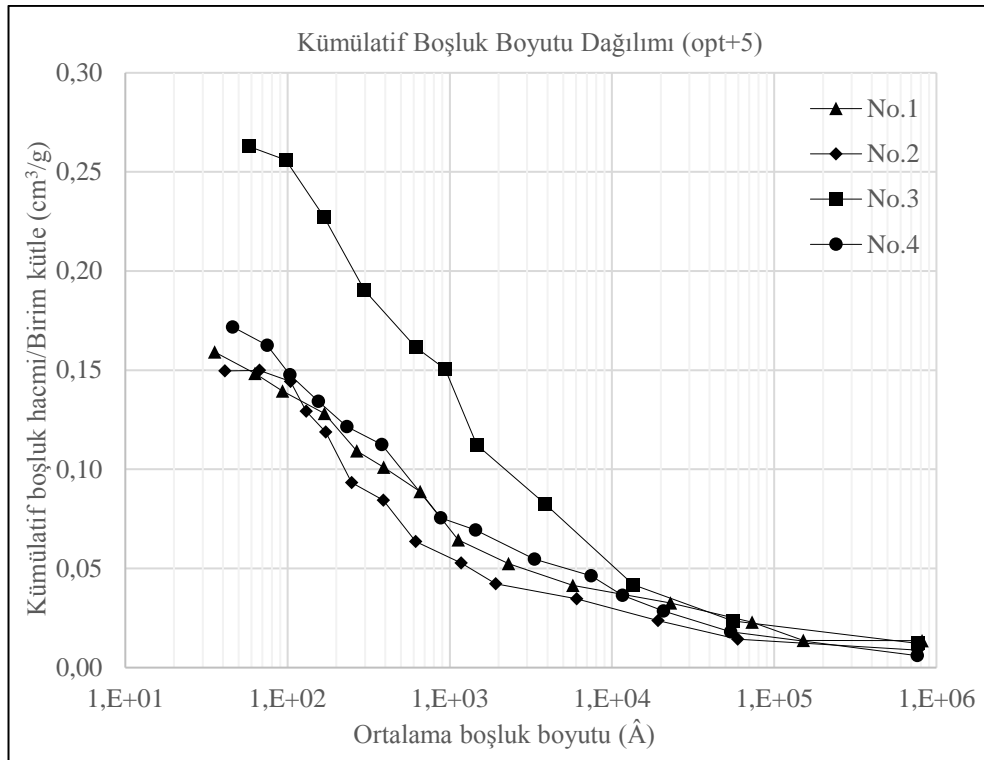
Şekil 4.31. Konsolide zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.

No.3 zeminin %97 ince dane oranına sahip olması diğer zeminlere göre daha büyük yüzey alanına sahip olmasına sebep olmuştur. Bu sebeple kılcal gerilme aralığı diğer zeminlerden çok daha yüksektir. Nispeten daha fazla iri daneye sahip olan diğer zeminlerin özgül yüzey alanı 3 m²/g civarındadır. Ayrıca No.3 zemindeki kılcal gerilme değerlerinde oluşan hızlı değişim çok daha yüksek su muhtevası aralığında gerçekleşmiştir. Kılcal gerilmedeki ani değişim No.1, No.2 ve No.4 zeminlere göre daha büyük boşluk boyutunda görülmektedir.

Optimum+%5 zeminlerin boşluk boyutu dağılımları incelendiğinde en geniş ortalama boşluk boyutu aralığına sahip zeminin No.3 olduğu görülmektedir (Şekil 4.32. ve Şekil 4.33.). No.3 zemini, 100 Å ile 60000 Å aralığında boşluk boyutu dağılımına sahiptir. En yüksek özgül yüzey alanına No.3 zeminin, en düşük yüzey alanına ise No.4 zeminin sahip olduğu bulunmuştur. Kılcal gerilmelerde meydana gelen hızlı değişim No.3 zeminde %19-%24, No.1 zemininde %5-%11 su muhtevası aralığında olmuştur.

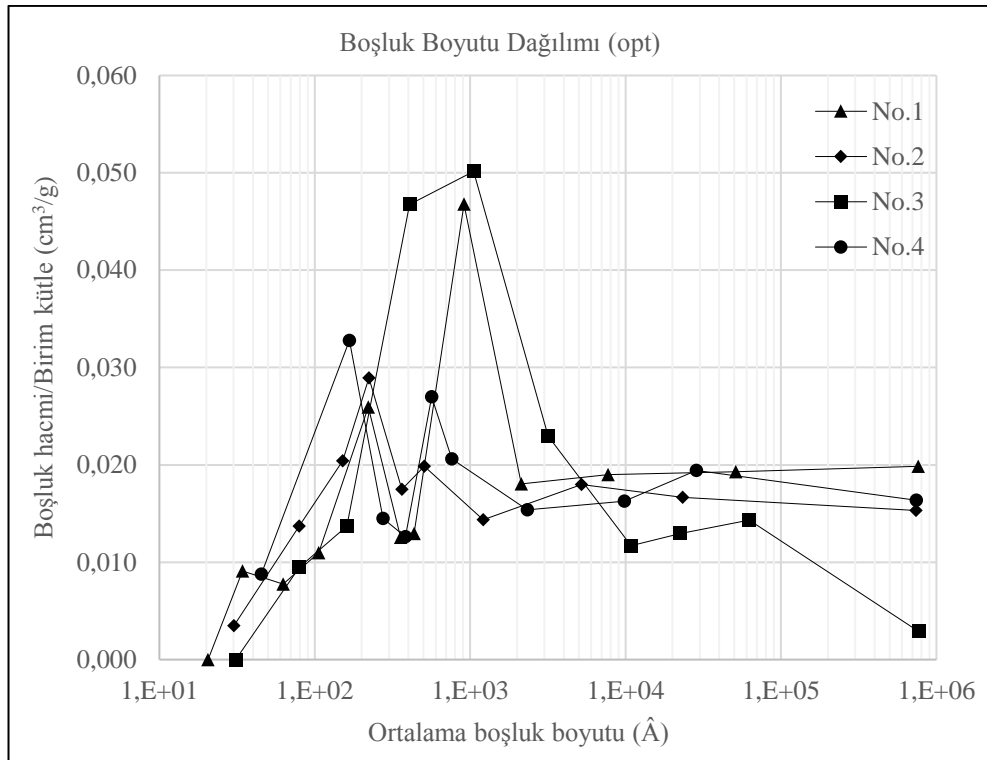


Şekil 4.32. Optimum+%5 zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.

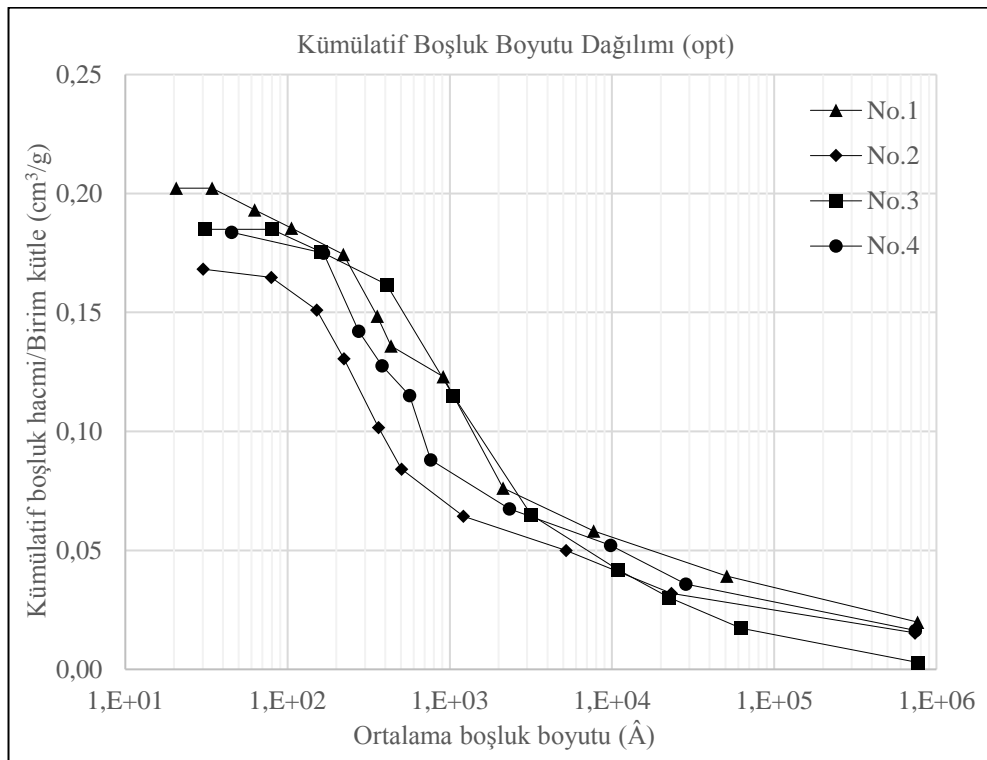


Şekil 4.33. Optimum+%5 zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.

Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.'de optimum zeminlerin boşluk boyutu dağılımları karşılaştırılmıştır. Özgül yüzey alanı en büyük No.1 zemin olmuştur. No.3 ve No.4 zeminleri diğer zeminlerden daha geniş boşluk boyutu dağılımına sahiptir. Kılcal gerilmelerde meydana gelen hızlı değişimin gerçekleştiği su muhtevası aralığı, No.1 ve No.2 zeminlerde %5-6 ile %11-12 olurken, No.3 zeminde %17-27, No.4 zeminde %15-21 olmuştur. Ani değişimi yansıtan boşluk boyutu dağılımındaki vadi bölgesi No.1 ve No.2 zeminlerinde 350-400 Å, No.3 zeminde 10800 Å, No.4 zeminde ise 2300 Å olarak grafikten belirlenmiştir.



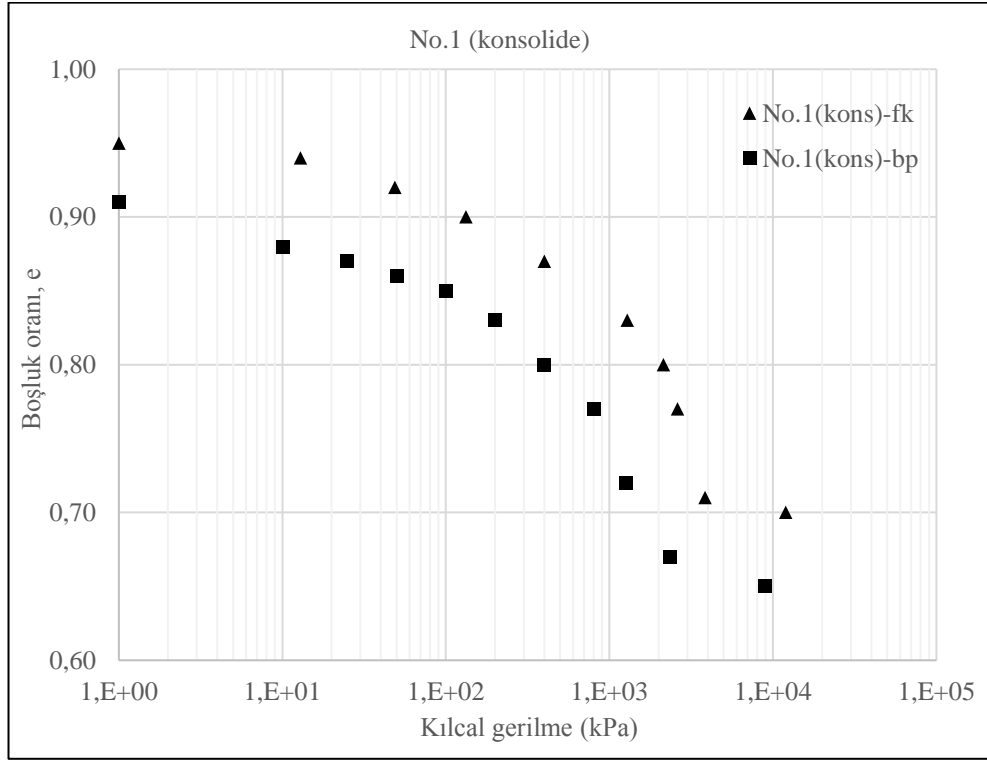
Şekil 4.34. Optimum zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.



Şekil 4.35. Optimum zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.

4.4. Kılcal Gerilme-Boşluk Oranı İlişkisi

Filtre kağıdı kullanılarak emme ölçümü yapılan konsolide numunelerin her bir aşamada civa batırma yöntemiyle hacimleri belirlenmiştir. Belirlenen hacimler kullanılarak ölçülen her bir kılcal gerilme altında sahip oldukları boşluk oranları belirlenmiştir. Zeminlerin boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkileri Şekil 4.36. ve Şekil 4.39. arasındaki grafiklerde sunulmuştur.

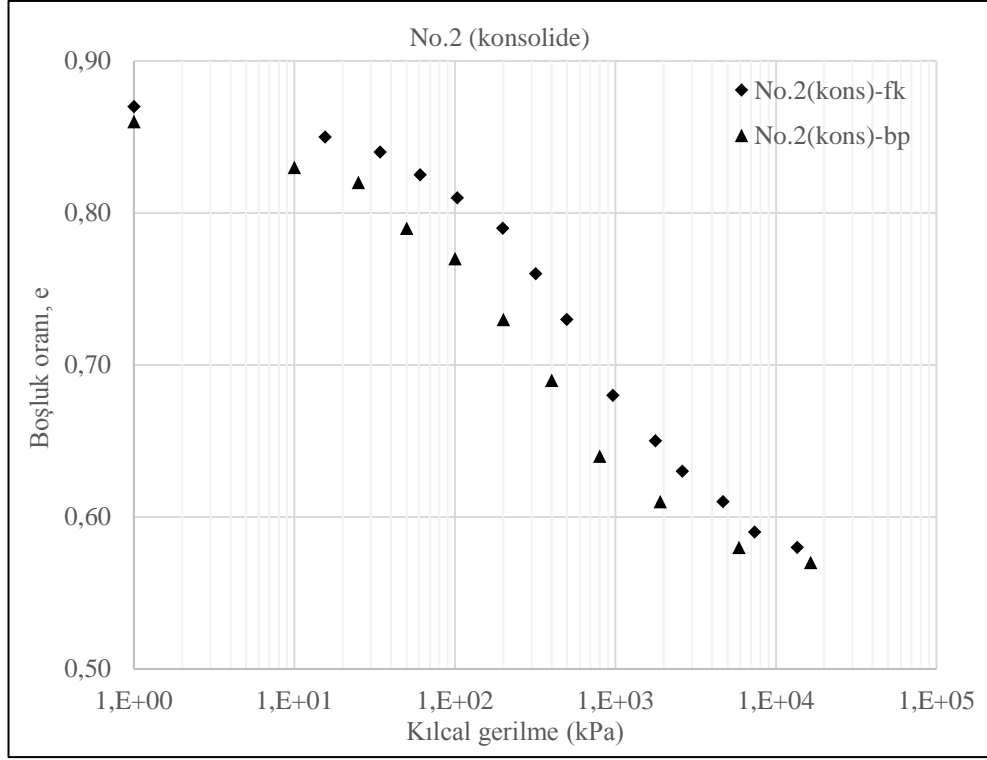


Şekil 4.36. No.1 zeminini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.

No.1 zemininin boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisi incelendiğinde, iki numunenin boşluk yapıları farklı olduğundan başlangıç boşluk oranları da farklılık göstermiştir (Şekil 4.36.). Hava giriş değerindeki boşluk oranı 0,85-0,90 aralığında bulunmuştur. Kalıcı değerde ise 0,65-0,70 boşluk oranı aralığındadır.

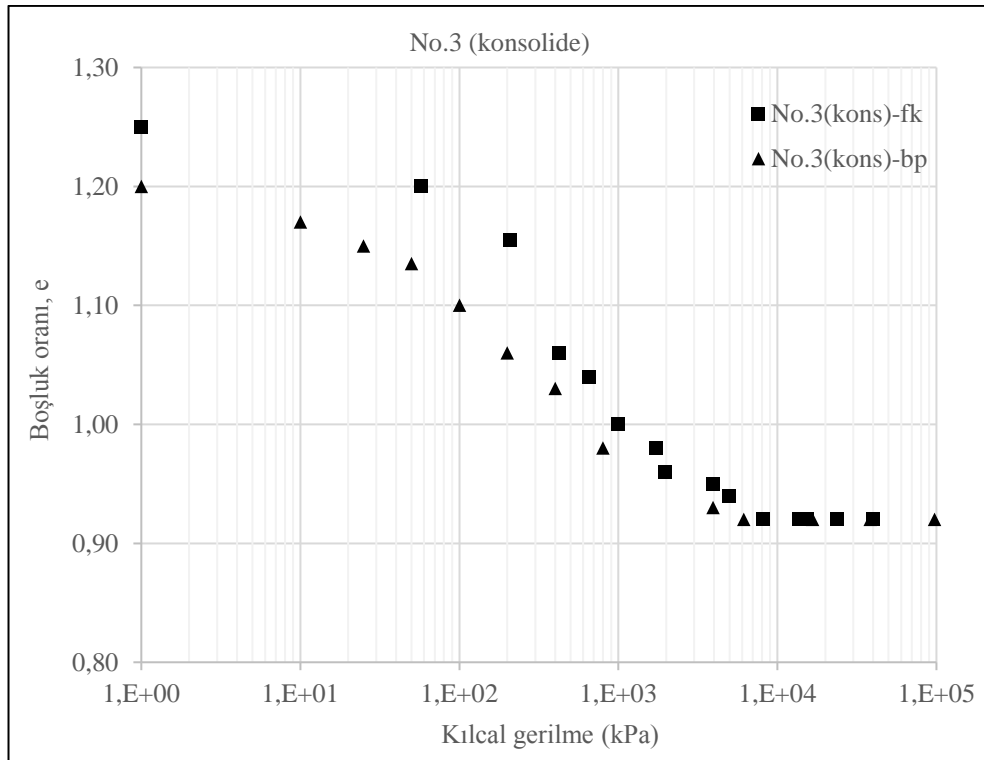
Şekil 4.37.'de No.2 zemininin boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisi gösterilmiştir. Numunenin yavaş su kaybı yaşadığı doygun bölgede boşluk oranı değişimi geçiş bölgesine göre daha kısıtlıdır. Kalıcı değer aşıldığında boşluk oranının değişmediği gözlenmiştir. Ayrıca kalıcı bölgede eğrilerin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Hava

giriş değerindeki boşluk oranı 0,85-0,90, kalıcı değerdeki boşluk oranı 0,55-0,60 aralığındadır. Her iki yöntem de birbirine yakın sonuçlar vermiştir.



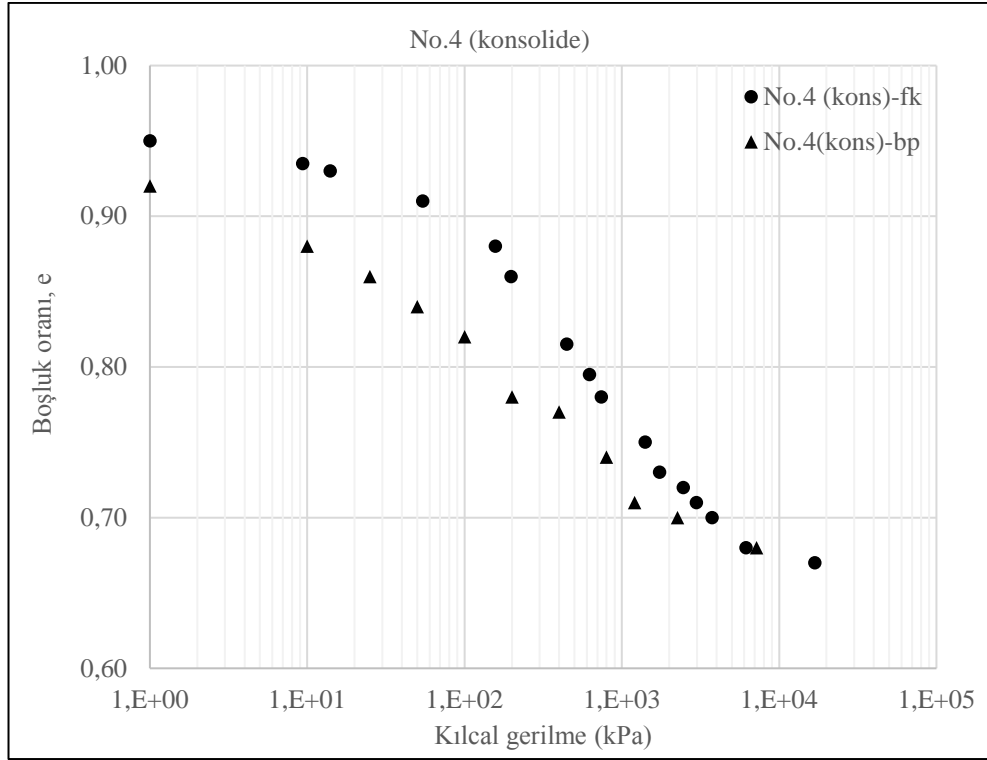
Şekil 4.37. No.2 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.

No.3 zemininde, boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisi Şekil 4.38.'de sunulmuştur. Doygun bölgede her iki ölçüm yöntemi oldukça farklıdır. Boşluk yapısındaki farklılık boşluk oranlarını etkilemiştir. Kalıcı bölgede eğrilerin birbiriyle çakıştığı gözlenmektedir. Kalıcı değere iki ölçümde de 0,92 boşluk oranında ulaşılmıştır.



Şekil 4.38. No.3 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.

No.4 zemin boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisi Şekil 4.39.'da gösterilmiştir. Diğer zeminlerin sonuçlarına benzer olarak sadece kalıcı bölgede iki ölçüm yöntemi çakışmıştır. Su muhtevası-kılcal gerilme ilişkisinde eğrilerin birbirine yakın olması durumu, boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisinde gözlenmemiştir. No.4 zemin için kalıcı değerdeki boşluk oranı 0,7 olmuştur.



Şekil 4.39. No.4 zemini kılcal gerilme-boşluk oranı ilişkisi.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, killi zeminlerin su muhtevası-kılcal gerilme ilişkisi ve boşluk boyutu-SWC eğrisi ilişkisi araştırılmıştır. Bir dolgu sahasından alınan dört farklı zeminin öncelikle fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra konsolide edilerek ve sıkıştırılarak hazırlanmış deney numuneleri oluşturulmuştur. Numuneler üzerinde filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleri gerçekleştirilerek emme büyüklüğü ile su içeriği arasındaki ilişkiler belirlenerek SWC eğrileri elde edilmiştir. Farklı zeminlere ve farklı başlangıç koşullarına bağlı olarak elde edilen SWC eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak van Genuchten (1980), Fredlund-Xing (1994) ve Fredlund-Pham (2006) SWC eğrisi oluşturma modelleri uygulanmıştır. Oluşturulan eğri modellerinin deney sonuçlarına uygunluğu incelenmiştir. Emme deneyi sonuçlarına Lu-Likos (2004) eşitlikleri uygulanarak boşluk boyutu-SWC eğrisi ilişkisi belirlenmiştir. Ayrıca hacimsel su muhtevası belirlenen konsolide numunelerin boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisi gösterilmiştir.

Sıkıştırma su muhtevasında hazırlanan numunelerin filtre kağıdı emme ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında; aynı kil içeriğe sahip zeminlerden plastisitesi yüksek olan zeminin aynı su muhtevasında daha yüksek kılcal gerilme değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Buna karşılık kil yüzdesi yüksek olan zeminin kılcal emme kapasitesi daha düşüktür. Bu durum kil minerali yapısının kil yüzdesine oranla kılcal gerilmeyi daha fazla etkilediğini göstermiştir.

Konsolide edilen numuneler sıkıştırılmış numunelerden daha yüksek başlangıç su muhtevasına sahip olmaktadır. Bunun yanında filtre kağıdı deneylerinde çok yüksek su muhtevası değerlerinde, numune ile filtre kağıdı arasındaki su akışının zemin özelliklerinden etkilenmediği ve bu sebeple filtre kağıdı ölçümlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

SWC eğrisi deneyleri için hazırlanan optimum ve optimum-ıslak numunelerin doygun su muhtevalarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numuneler daha düşük sıkıştırma su muhtevalarına sahip olmalarına rağmen oran olarak daha fazla su alarak doygun duruma ulaşmıştır. Konsolide numuneler ise hemen hemen doygun duruma ulaşmışlardır. SWC eğrileri karşılaştırıldığında, optimum+%5 su muhtevasında sıkıştırılan numunelerin kabarcıklanma basıncı değeri optimum numunenin değerinden daha yüksek seviyede kalmaktadır. Sıkıştırılmış numunelerin kalıcı su muhtevası değerleri birbirine yakındır. Optimum-ıslakta hazırlanan numunenin SWC eğrisi optimumda hazırlanan numunenin eğrisine göre daha düşük su muhtevasında kalıcı değere ulaşmıştır. Bu durum literatür ile uygunluk göstermiştir. Doygunluktan ayrılma eğimi konsolide numunelerde daha yüksektir. Sıkıştırılmış numunelerle kıyaslandığında kabarcıklanma basıncı değeri ve kalıcı değeri daha yüksek su muhtevalarında ölçülmüştür.

Filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. SWC eğrilerinin eğilimleri benzerdir. Başlangıç koşulları deney koşullarına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu sebeple yüksek su muhtevalarında hava giriş değerlerinin farklı olduğu gözlenmiştir. Kalıcı bölgede ise eğrilerin birbirine yaklaştığı gözlenmiştir. Basınç plakası ölçümlerinde kılcal gerilmenin kontrol edilebilme avantajı ile düşük kılcal gerilme değerlerinde daha belirgin sonuçlar elde etmek mümkündür. Filtre kağıdı yönteminde ise yüksek emme değerlerinde ölçüm yapmak mümkündür. Bununla birlikte düşük su muhtevası değerlerinde filtre kağıdı yönteminin hassasiyetinin azaldığı, ölçümlerin sağlıklı olduğu görülmüştür.

Fredlund-Xing (1994) eğri oluşturma modeli kullanılarak elde edilen eğrilerin deney sonuçlarıyla örtüşmediği görülmüştür. Deney sonuçlarından elde edilen ağırlıksal su muhtevası-kılcal gerilme ilişkisinin bu modele uygun olmadığı belirlenmiştir. Literatürde yer alan sonuçlar incelendiğinde, hacimsel su muhtevası-kılcal gerilme ilişkisinin Fredlund-Xing (1994) modeli için daha düzgün sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Van Genuchten (1980) modelinin ise doygun bölgede uyumlu, kalıcı bölgede ise yüksek su muhtevasında kalan eğriler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Fredlund-Pham (2006) eğri oluşturma modelinin çalışma kapsamında elde edilen deney sonuçlarına en uygun model olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 10^6 kPa değerinden yüksek emme değerine sahip zeminler için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bu sınır değer zaten literatürde termodinamik yasaları uyarınca sıfır su içeriğine karşılık gelen emme değeri olarak bildirilmektedir.

İnce dane oranı en yüksek olan numunede özgül yüzey alanı en yüksek değer almaktadır. Özgül yüzey alanının büyümesi kılcal gerilme kapasitesini arttırmaktadır. Kılcal gerilme değeri daha geniş boşluk boyutu aralığında değişim göstermektedir. Bu sebeple zemin emme davranışını kontrol eden boşluk boyutu aralığı büyüktür. Plastisitesi ve ince dane oranı yüksek zeminde hızlı kılcal gerilme değişimi daha yüksek su muhtevası aralığında gerçekleşmektedir. İnce dane yüzdesinin düşmesi boşluk oranının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte yüksek boşluk oranına sahip zemin daha yüksek kılcal gerilme değerlerine ulaşmıştır. Boşluk oranı-kılcal gerilme ilişkisinin zeminin emme davranışını açıklamada tek başına yetersiz olacağı anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Agus, S. S., Schanz, T. 2005. Comparison of four methods for measuring total suction. *Vadose Zone Journal*, 4(4): 1087-1095.
- Agus, S. S., Schanz, T., Fredlund, D. G. 2010. Reply to discussion by Haghghi et al. on measurements of suction versus water content for bentonite–sand mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2): 336–337.
- Aitchison, G. D. ve Richards, B. G. 1965. A broad-scale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia. In *Moisture in Soils Beneath Covered Areas*, 198-204, Australia.
- Al-Khafaf, S. ve Hanks, R. J. 1974. Evaluation of the filter paper method for estimating soil-water potential. *Soil Science*, Vol.117: 194-199.
- Almeida, E. L. D., Teixeira, A. D. S., Silva Filho, F. C. D., Júnior, A., Leão, R. A. D. O. 2015. Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(5): 1344-1352.
- Aung, K. K., Rahardjo, H., Leong, E. C., Toll, D. G. 2001. Relationship between porosimetry measurement and soil-water characteristic curve for an unsaturated residual soil. In *Unsaturated Soil Concepts and Their Application in Geotechnical Practice*, 401-416.
- Barbour, S. L. 1998. Nineteenth canadian geotechnical colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5): 873-894.
- Basheer, I. A. 2001. Empirical modeling of the compaction curve of cohesive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1): 29-45.
- Bicalho, K. V., Correia, A. G., Ferreira, S. R., Fleureau, J. M., & Marinho, F. A. 2007. Filter paper method of soil suction measurement. In *XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Bittelli, M., Flury, M. 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5): 1453-1460.
- Bocking, K. A. ve Fredlund, D. G. 1979. Use of the osmotic tensiometer to measure negative pore water pressure. *Geotechnical Testing Journal*, 2(1): 3-10.
- Brown, R. W. ve Collins, J. M. 1980. A screen-caged thermocouple psychrometer and calibration chamber for measurements of plant and soil water potential. *Agronomy Journal*, 72(5): 851-854.

- Bulut, R., Lytton, R. L., Wray, W. K. 2001. Soil suction measurements by filter paper. In *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, 243-261.
- Bulut, R., Wray, W. 2005. Free energy of water-suction in filter papers. *Geotechnical Testing Journal*, 28(4): 355-264.
- Campbell, G. S. 1988. Soil water potential measurement: an overview. *Irrigation Science*, 9(4): 265-273.
- Catana, M. C., Vanapalli, S. K., Garga, V. K. 2006. The water retention characteristics of compacted clays. In *Unsaturated Soils*, 1348-1359.
- Chandler, R. J., Crilly, M. S., Montgomery-Smith, G. 1992. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, Vol. 92(2), 82-89.
- Chandler, R. J., Gutierrez, C. I. 1986. The filter-paper method of suction measurement. *Géotechnique*, 36(2): 265-268.
- Chen, D. X., Zhang, M. X., Lin, Y. Q., Ni, J. 2013. Measurement of swcc of xiamen residual soil by filter paper. In *Applied Mechanics and Materials*, 256: 1046-1051.
- Cook, D. L. ve Fredlund, D. G. 1998. TDR matric suction measurements. In *Unsaturated Soils: Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, 27-30, Beijing.
- Cresswell, H. P., Green, T. W., McKenzie, N. J. 2008. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1): 41-49.
- Dineen, K., Colmenares, J. E., Ridley, A. M., Burland, J. B. 1999. Suction and volume changes of a bentonite-enriched sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 137(4): 197-201.
- Edil, T., Motan, S. 1984. Laboratory evaluation of soil suction components. *Geotechnical Testing Journal*, 7(4): 173-181.
- Elkady, T. Y., Al-Mahbashi, A., Dafalla, M., Al-Shamrani, M. 2015. Effect of compaction state on the soil water characteristic curves of sand–natural expansive clay mixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(3): 289-302.
- Estabragh, A. R., Javadi, A. A., Boot, J. C. 2004. Effect of compaction pressure on consolidation behaviour of unsaturated silty soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3): 540-550.
- Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Correia, A. G., Kheirbek-Saoud, S. 2002. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, 39(6): 1341-1357.
- Fredlund, D. G. 2002. Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil*, Vol. 3, 887-902.

- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. 1993. The role of unsaturated soil behaviour in geotechnical engineering practice. In Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, 37-49.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D. 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Sheng, D., Zhao, J. 2011. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(2): 186-198.
- Fredlund, D. G., Wong, D. K. H. 1989. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction. *Geotechnical Testing Journal*, 12(3): 188-194.
- Fredlund, D. G., Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4): 521-532.
- Fredlund, D.G. 2000. The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 963–986.
- Gardner, R. 1937. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. *Soil Science*, 43(4): 277-283.
- Greacen, E. L., Walker, G. R., Cook, P. G. 1987. Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction. *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, 137-143.
- 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.
- Hamblin, A. P. 1981. Filter-paper method for routine measurement of field water potential. *Journal of hydrology*, 53(3-4), 355-360.
- Houston, S., Houston, W., Wagner, A. 1994. Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 17(2): 185-194.
- Kai, C., Qing, Z. 2010. Retention Properties and Compressibility of a Compacted Soil. In *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils*, 1-9.
- 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.
- Krahn, J., Fredlund, D. G. 1972. On total, matric and osmotic suction. *Journal of Soil Science Journal*, 114(5): 339–348.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., Fredlund, D. G. 2001. Application of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. In *Proc. of the 8th East Asian Pacific Conf. on Structural Eng. And Construction*, Singapore.
- Leong, E. C., Zhang, X. H., Rahardjo, H. 2012. Calibration of a thermal conductivity sensor for field measurement of matric suction. *Geotechnique*, 62(1): 81–85.
- Leong, E., He, L., Rahardjo, H. 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3): 322-333.

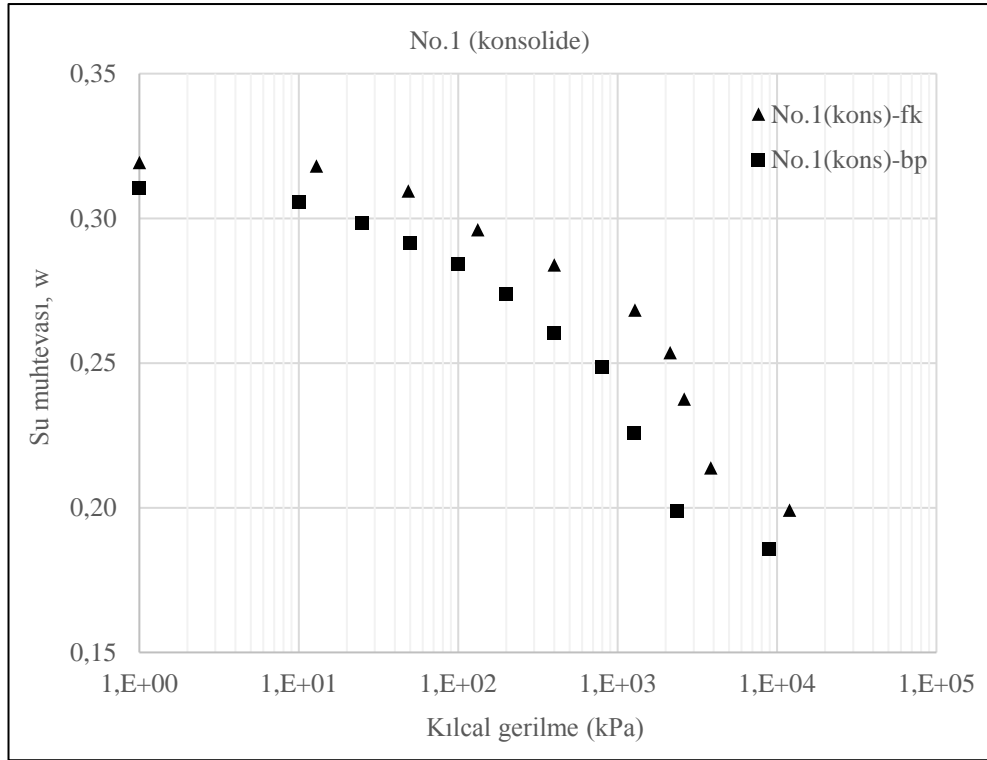
- Li, A. G., Tham, L. G., Yue, Z. Q., Lee, C. F., Law, K. T. 2005. Comparison of field and laboratory soil–water characteristic curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9): 1176-1180.
- Li, X., Zhang, L. M. 2009. Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil. *Canadian geotechnical journal*, 46(2): 129-141.
- Likos, W. J., Lu, N. 2002. Filter paper technique for measuring total soil suction. *Transportation Research Record*, 1786: 120-128.
- Lu, N., Likos, W. J. 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley.
- Manheim, F. T. 1966. A hydraulic squeezer for obtaining interstitial water from consolidated and unconsolidated sediments. *US Geological Survey Professional Paper*, 550: 256-261.
- Marinho, F. A. 2005. Nature of soil–water characteristic curve for plastic soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(5): 654-661.
- Marinho, F. A., Stuermer, M. M. 2000. The influence of the compaction energy on the swcc of a residual soil. In *Advances in Unsaturated Geotechnics*, 125-141.
- McKeen, R. G. 1980. Field studies of airport pavements on expansive clay. *American Society of Civil Engineering*, 242-261.
- McKeen, R. G., Hamberg, D. J. 1981. Characterization of expansive soils. *Transportation Research Record*, 790.
- McQueen, I. S., Miller, R. F. 1968. Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress. *Soil Science*, 106(3): 225-231.
- Muñoz-Castelblanco, J. A., Pereira, J. M., Delage, P., Cui, Y. J. 2010. Suction measurements on a natural unsaturated soil: a reappraisal of the filter paper method. In *Unsaturated Soils-Proc. Fifth Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 1, 707-712.
- Ng, C. W., Pang, Y. W. 2000. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6): 1252-1264.
- Önalp, A. 2002. *Zeminler ve Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 408.
- Özocak, A. 2003. *Doygun olmayan siltli zeminlerin sıkışabilirliği*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Pan, H., Qing, Y., Pei-yong, L. 2010. Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3): 1-14.
- Pei-yong, L., Qing, Y. 2009. Test study on soil water characteristic curve of bentonite-sand mixtures. *Electron Journal of Geotechnical Engineering*, 14: 1-8.
- Pham, H. Q., Fredlund, D.G. 2006. A volume-mass constitutive model for unsaturated soils. *Proceedings of the Fifty-Eight Canadian Geotechnical Conference*, Vol. 2, 173-181, Saskatoon.
- Pham, H. Q., Fredlund, D. G. 2008. Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4): 443-453.

- Phene, C. J., Hoffman, G. J., Rawlins, S. L. 1971. Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction 1. *Soil Science Society of America Journal*, 35(1): 27-33.
- Qian, J. S., Lu, H. 2011. Effect of compaction degree on soil-water characteristic curve of chongming clay. In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 90: 701-706.
- Ridley, A. M., Burland, J. B. 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2): 321-324.
- Ridley, A. M., Wray, W. K. 1996. Suction measurement: a review of current theory and practices. In *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*, Vol. 3, Paris.
- Sattler, P., Fredlund, D. G. 1989. Use of thermal conductivity sensors to measure matric suction in the laboratory. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(3): 491-498.
- Sivakumar Babu, G., Peter, J., Mukesh, M., Gartung, E. 2005. Significance of soil suction and soil water characteristic curve parameters. *Geotechnical Testing Journal*, 28(1): 102-107.
- Sreedeeep, S., Singh, D. N. 2005. A study to investigate the influence of soil properties on suction. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(1): 61-66.
- Standard, A. S. T. M. 1997. D5298-94 Standard Test Method for the Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *Annual Book of ASTM Standards*, 4: 157-162.
- Standard, A. S. T. M. 2010. D5298 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *ASTM International*, West Conshohocken.
- Şenol, A., Kutlu, N. 2013. Suyu doygun olmayan zeminlerde tekil kazık pd davranışının tahmini ve yorumlanmasına dayalı deneysel çalışma ve sayısal modelleme. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.
- Thakur, V. K., Sreedeeep, S., Singh, D. N. 2005. Parameters affecting soil-water characteristic curves of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4): 521-524.
- Tinjum, J. M., Benson, C. H., Blotz, L. R. 1997. Soil-water characteristic curves for compacted clays. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(11): 1060-1069.
- Truong, H. V. P. ve Holden, J. C. 1995. Suction measurement with the transistor psychrometer. *Proc. of 1st Int. Conf. Unsaturated Soils*, Vol.2, 659-666.
- TSE, 2000. TS1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara.
- TSE, 2006. TS1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri. Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Ankara.
- Vanapalli, S. K., Salinas, L. M., Avila, D., Karube, D. 2004. Suction and storage characteristics of unsaturated soils. In *Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils*, Vol. 3.

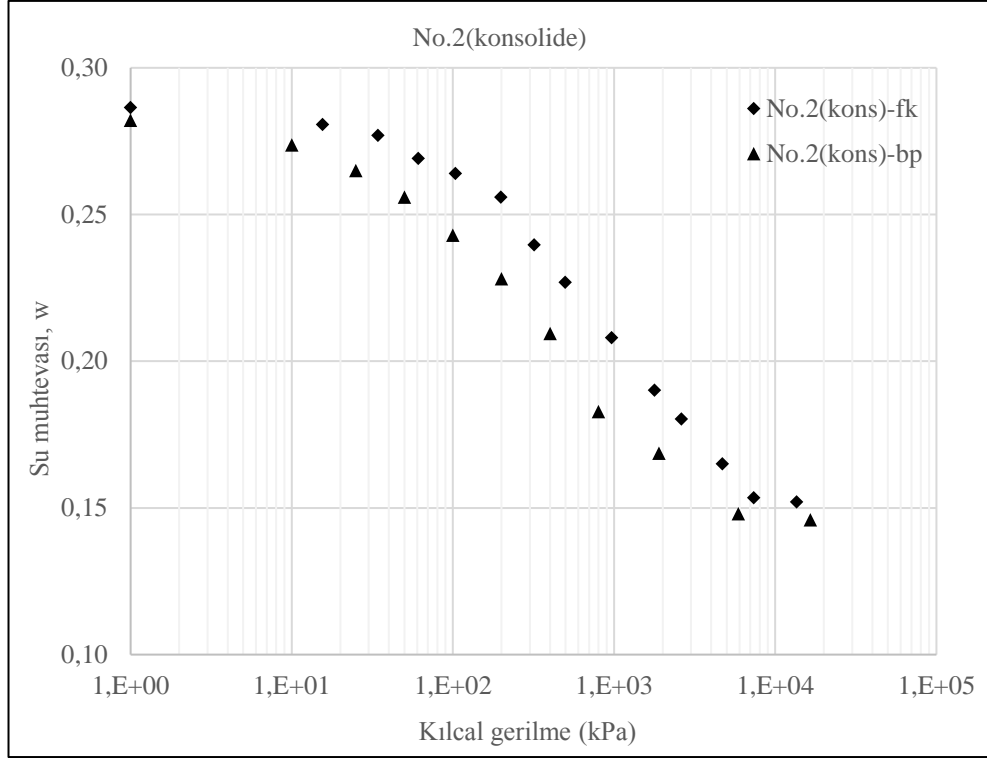
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. Pufahl, D.E., 1999. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. *Geotechnique*, 49(2): 143-159.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.
- Wan, A. W. L., Gray, M. N., Graham, J. 1995. On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays. In *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 1, 215-222, Paris.
- Wang, X., Benson, C. 2004. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve. *Geotechnical Testing Journal*, 27(2): 163-172.
- Xu, X., Zhang, F. Y., Gu, M. 2013. Experimental research on soil-water characteristic curve of unsaturated soils. In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 353: 554-557.
- Yong, R. N. 1999. Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. *Engineering geology*, 54(1): 3-13.
- Zhan, L. T., Chen, P., Ng, C. W. W. 2007. Effect of suction change on water content and total volume of an expansive clay. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 8(5): 699-706.
- Zheng, X. C., Zhao, F., Sun, S. Z. 2013. Study on the tests of soil-water characteristic curves of unsaturated soil. In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 353: 16-19.
- Zhou, W. G., Bao, Y. L., Zhou, H. B. 2013. Research on soil-water characteristic curve of unsaturated mixed-soil in west sichuan. In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 353: 996-1000.

EKLER

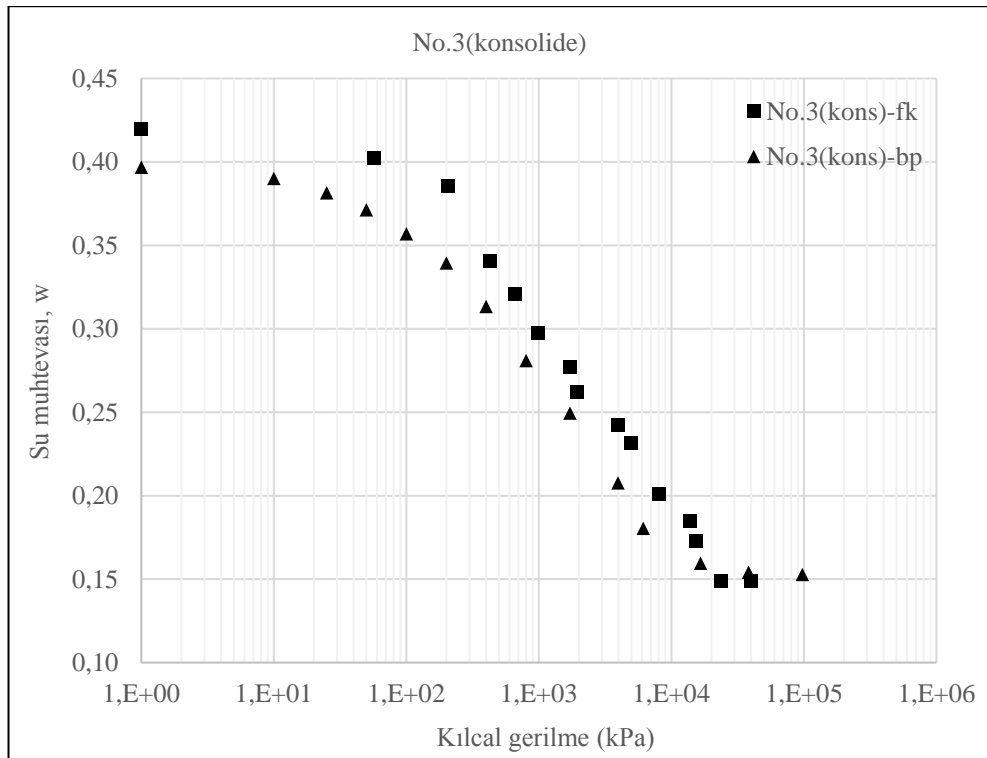
EK 1: Filtre Kağıdı ve Basınç Plakası SWC Eğrilerinin Karşılaştırılması



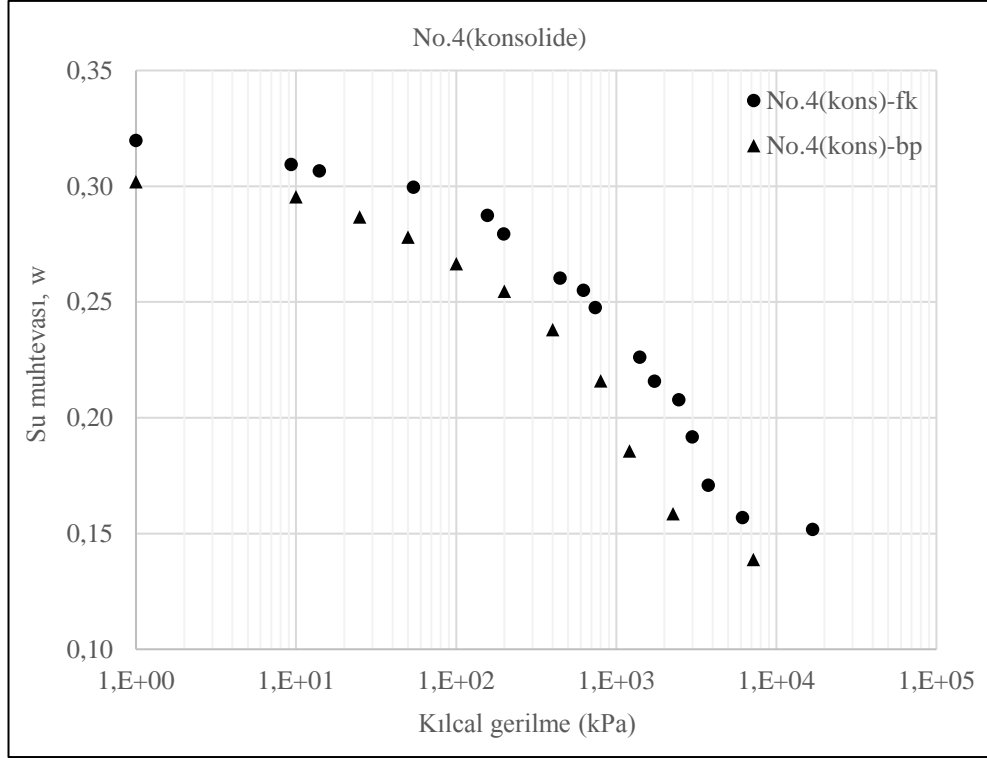
Şekil Ek 1.1. No.1 (konsolide) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.



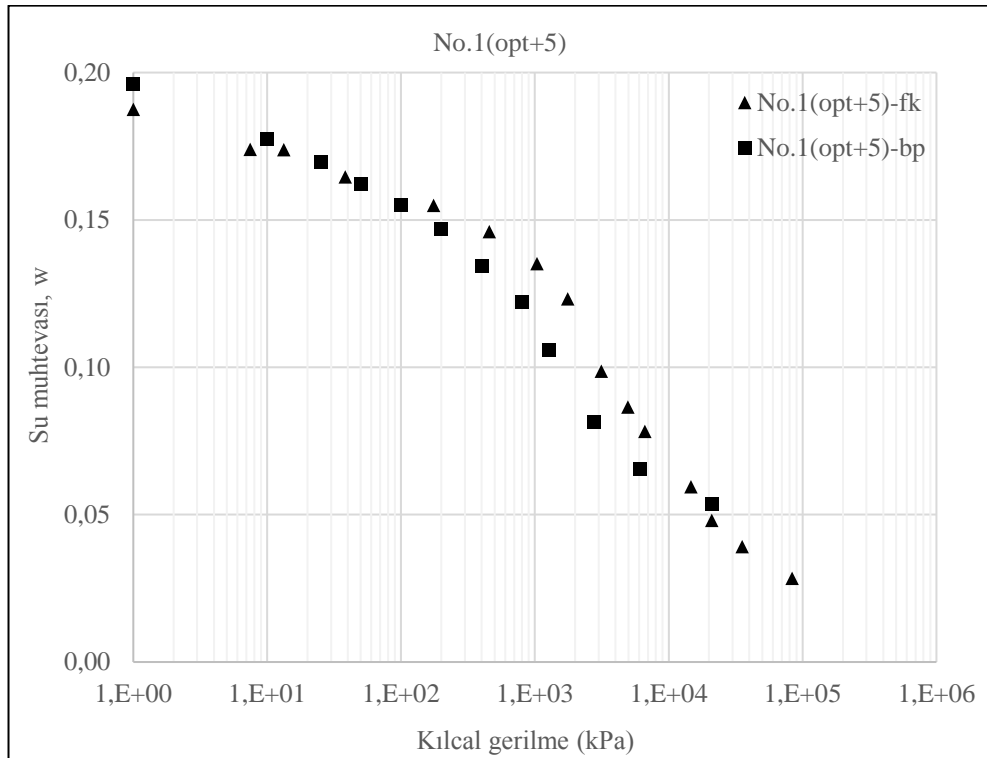
Şekil Ek 1.2. No.2 (konsolide) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.



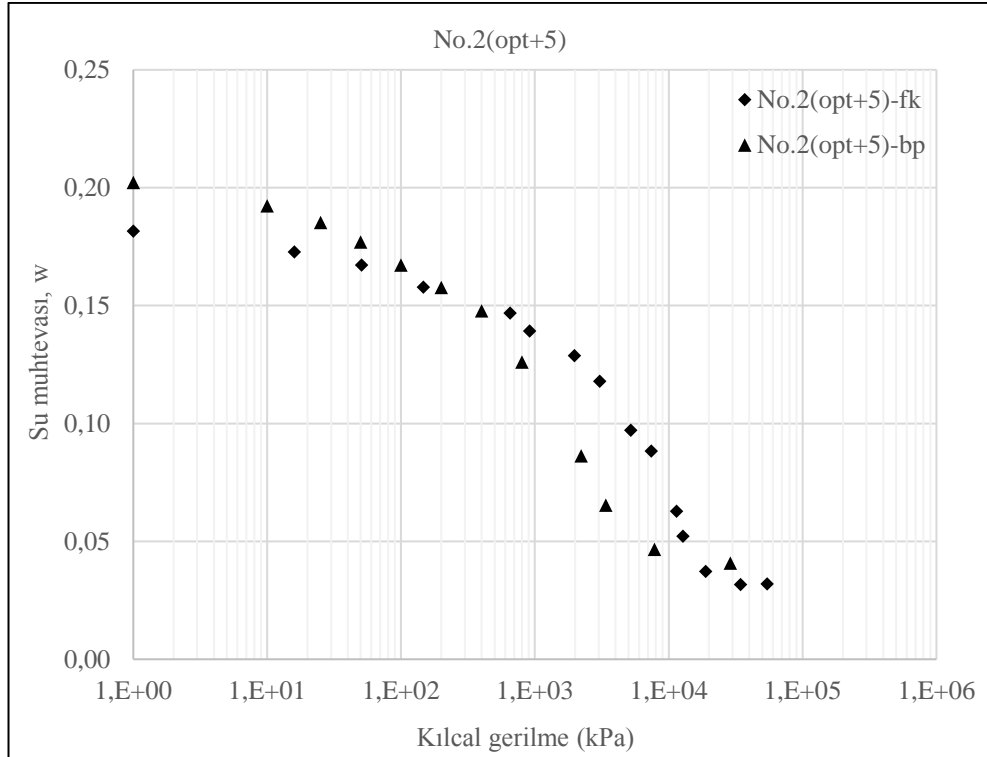
Şekil Ek 1.3. No.3 (konsolide) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.



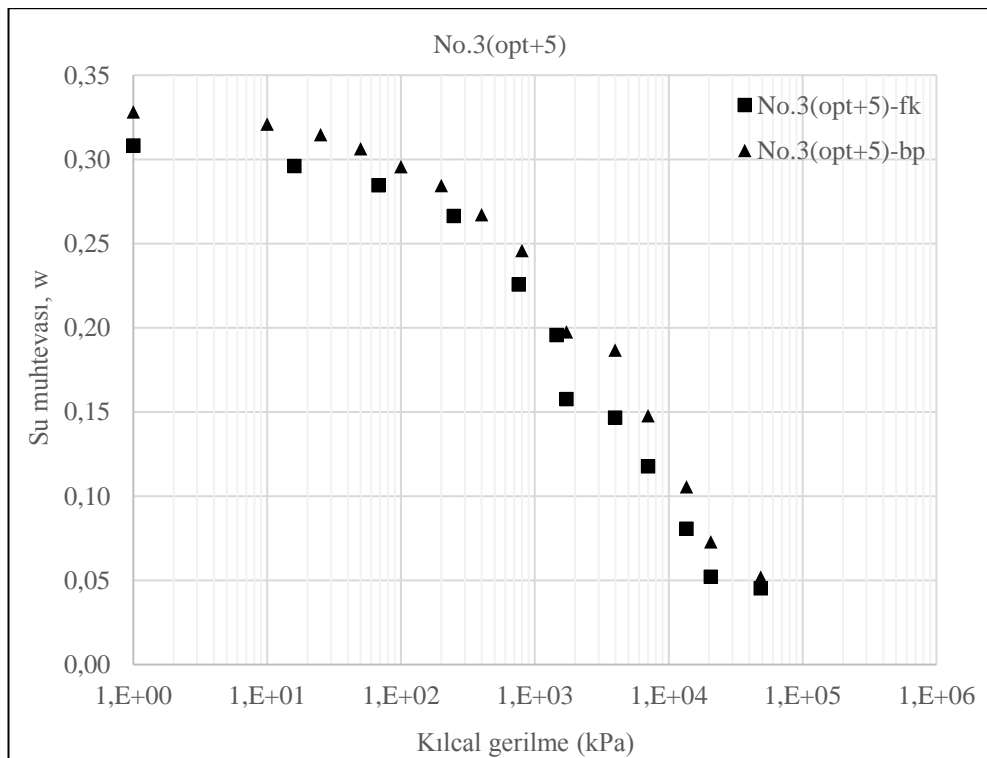
Şekil Ek 1.4. No.4 (konsolide) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.



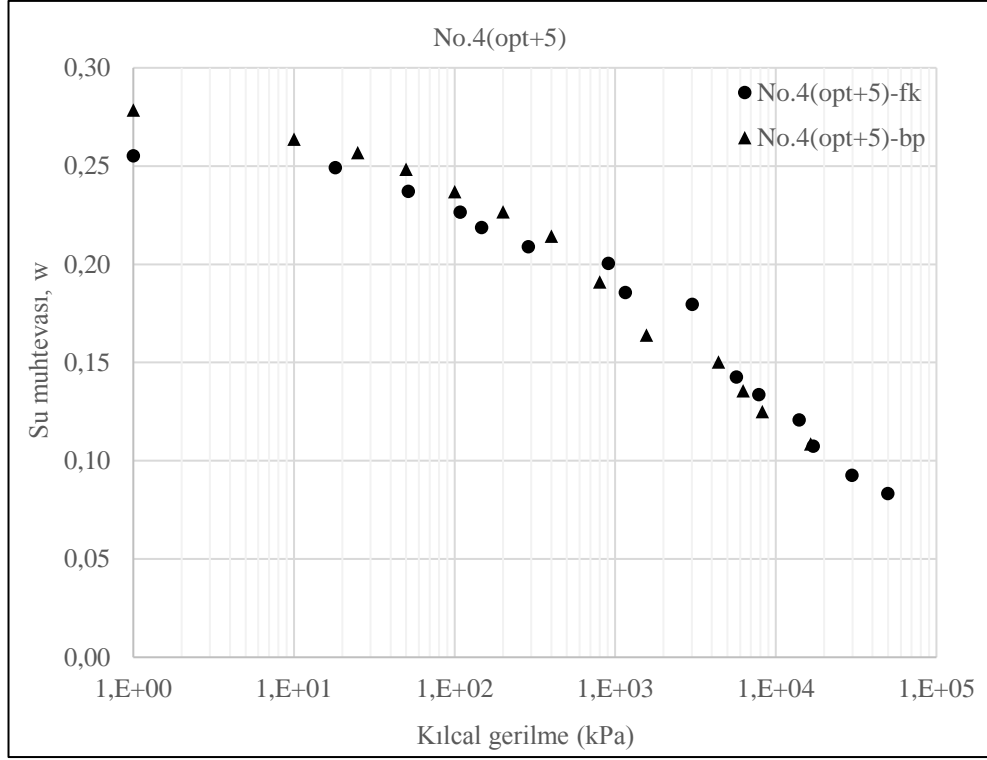
Şekil Ek 1.5. No.1 (opt+5) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.



Şekil Ek 1.6. No.2 (opt+5) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

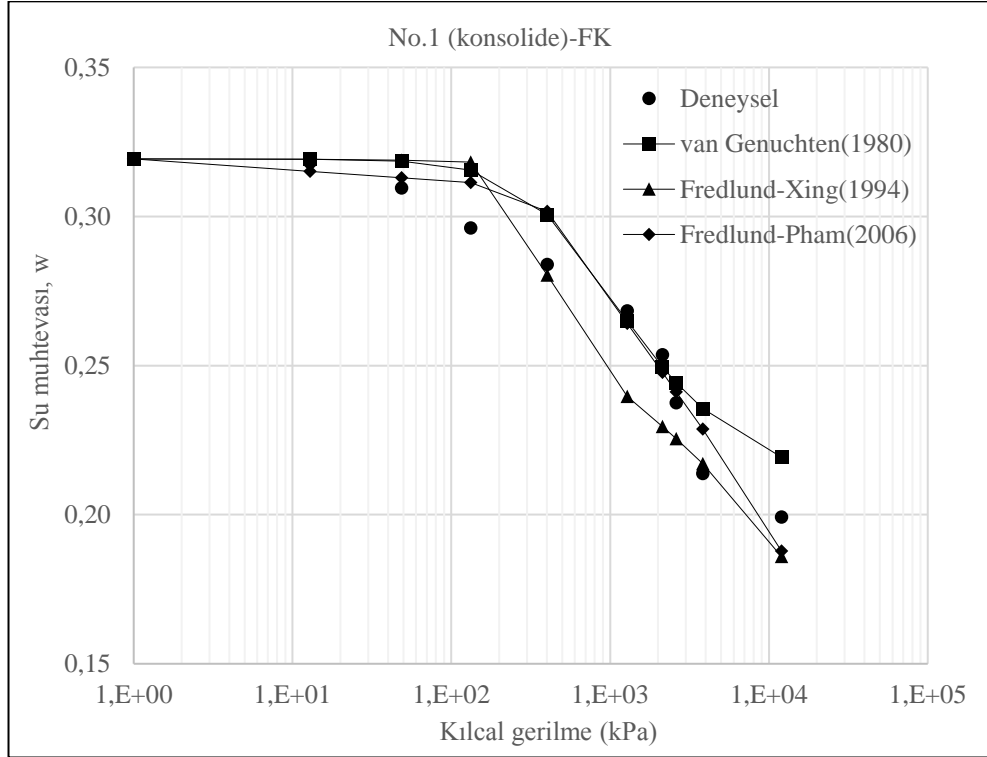


Şekil Ek 1.7. No.3 (opt+5) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

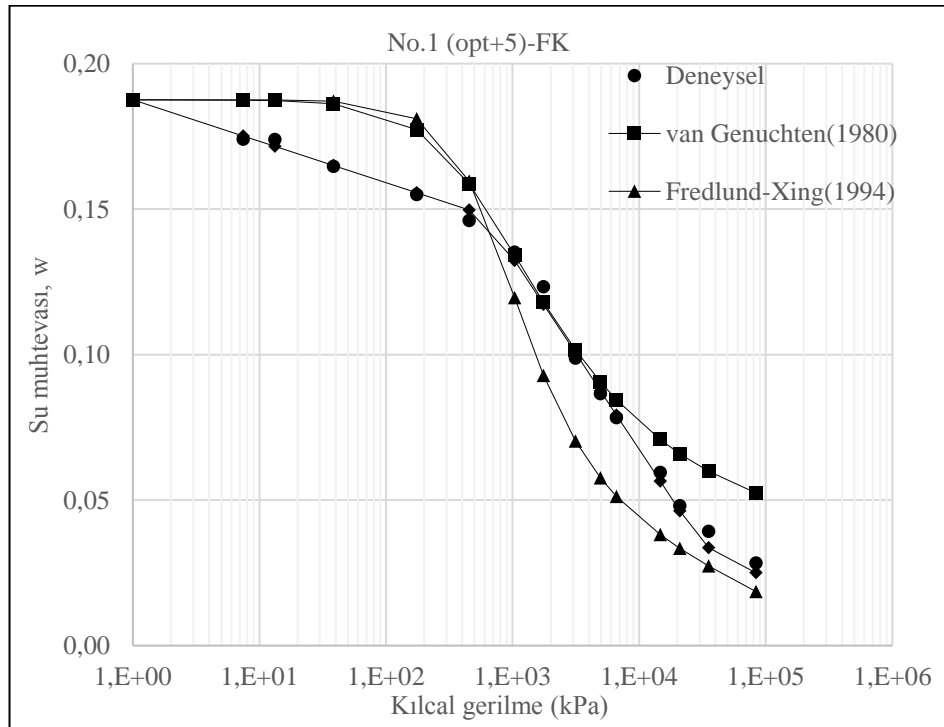


Şekil Ek 1.8. No.4 (opt+5) filtre kağıdı ve basınç plakası ölçümleri.

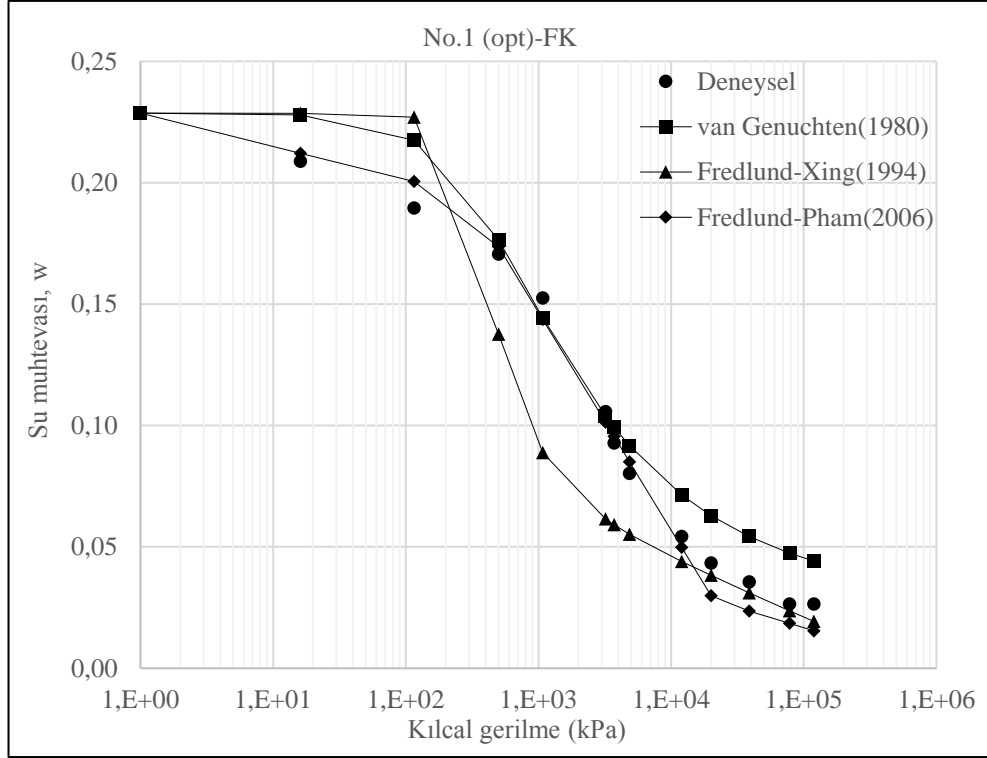
EK 2: SWC Eğrisi Modellerinin Uygulanması



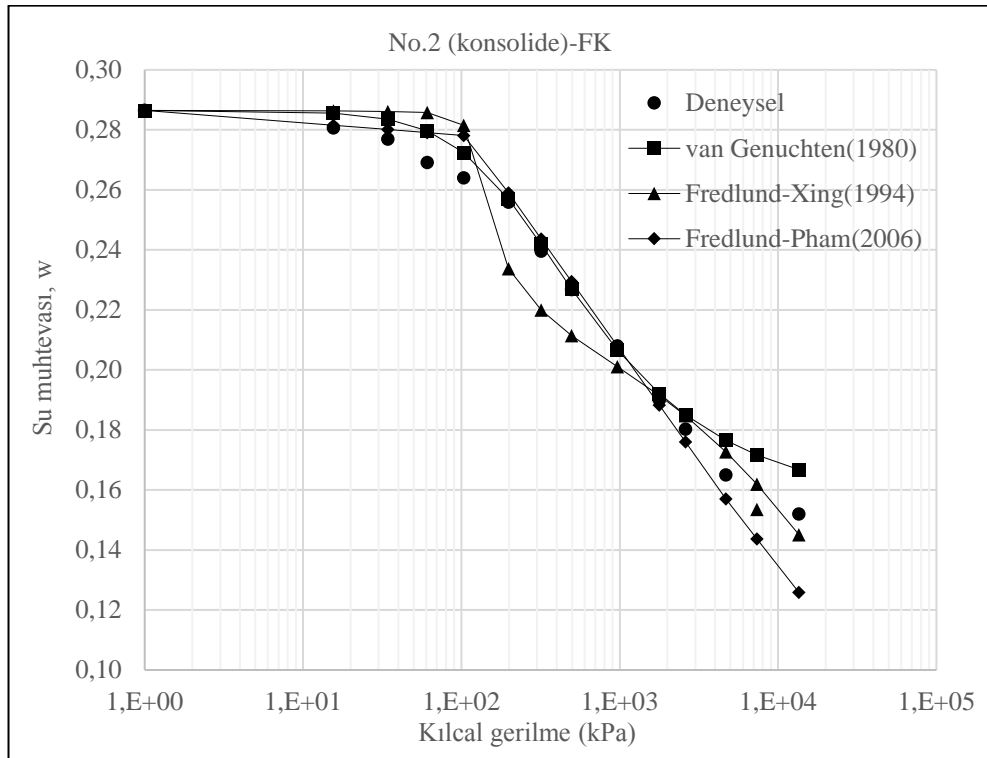
Şekil Ek 2.1. No.1(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



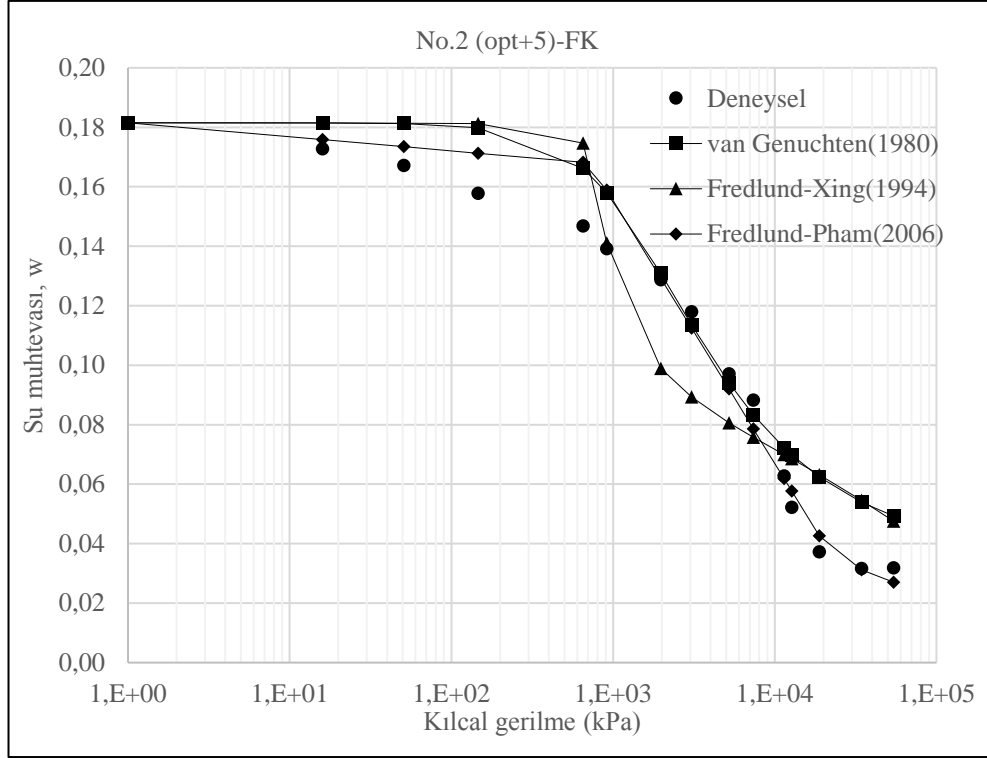
Şekil Ek 2.2. No.1(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



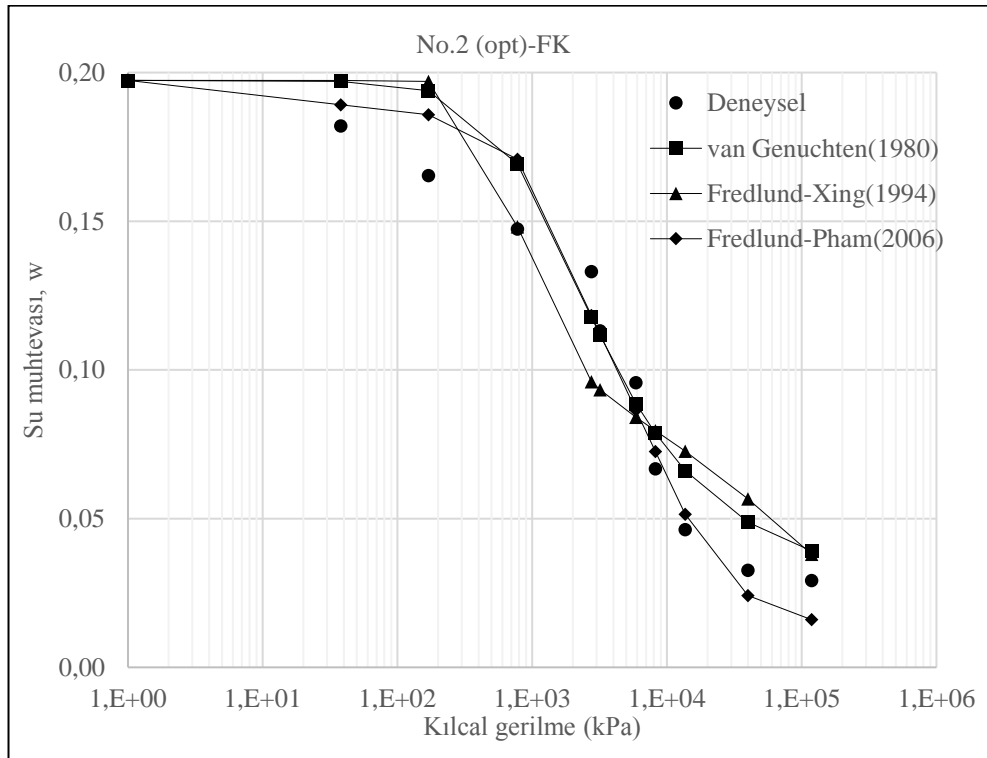
Şekil Ek 2.3. No.1(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.



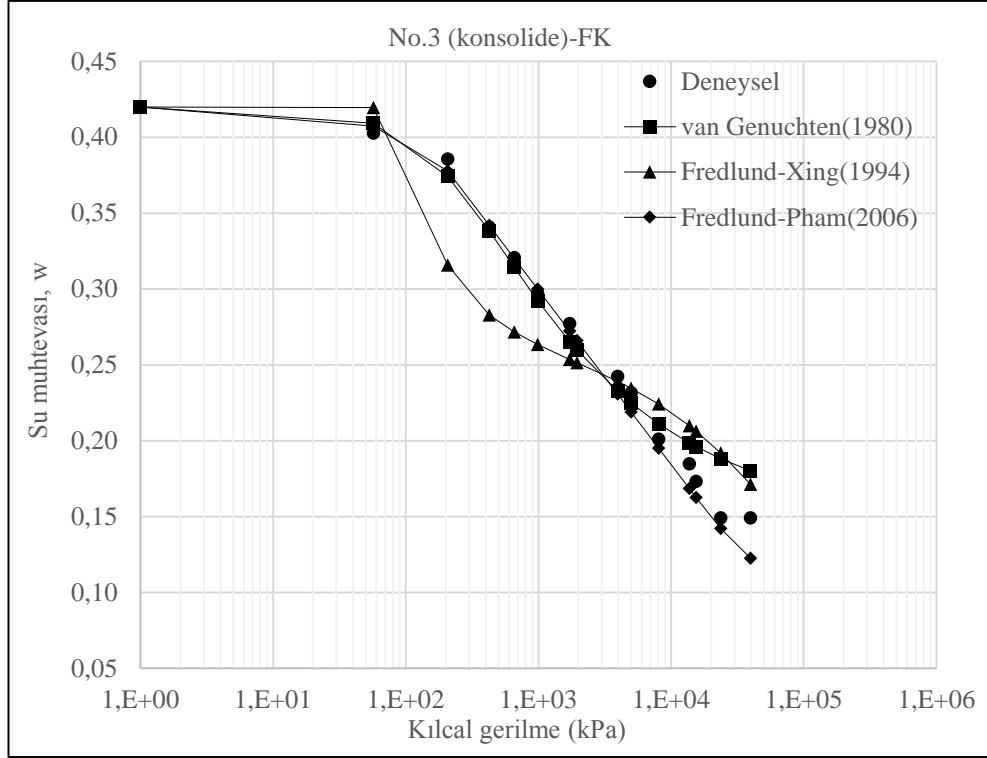
Şekil Ek 2.4. No.2(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



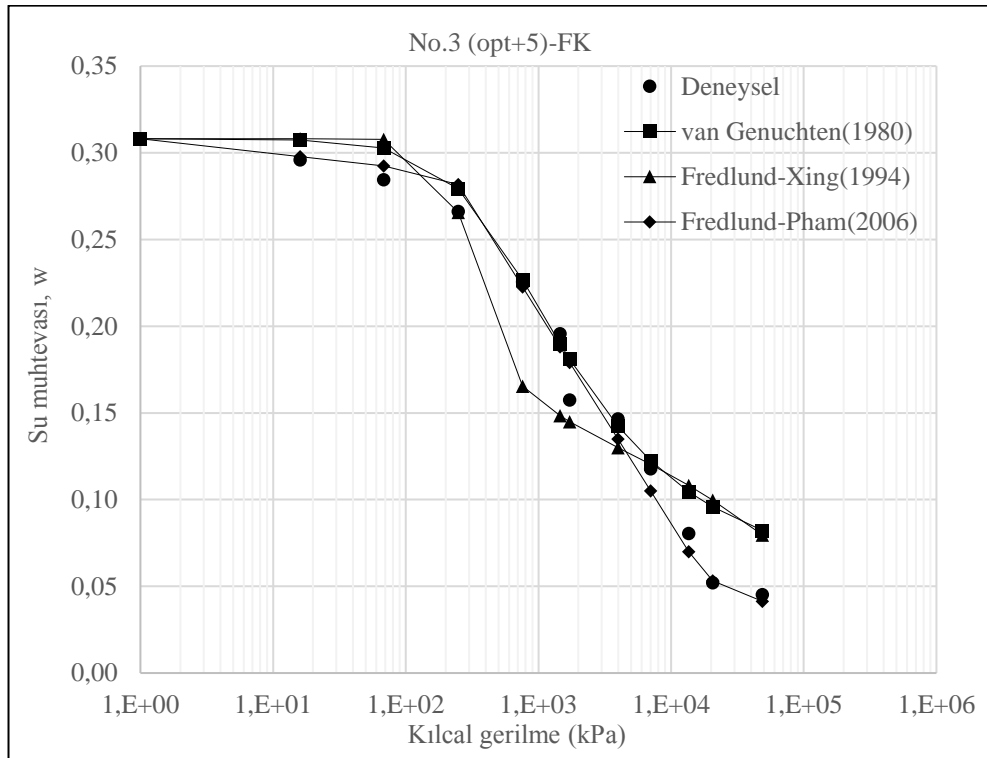
Şekil Ek 2.5. No.2(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



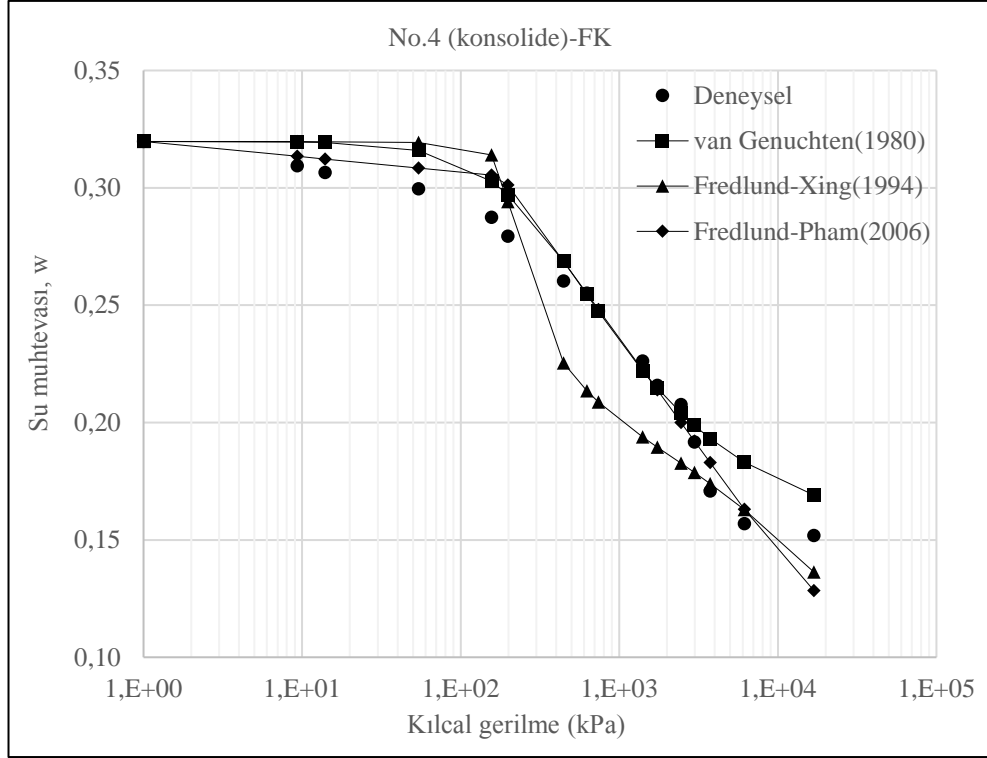
Şekil Ek 2.6. No.2(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.



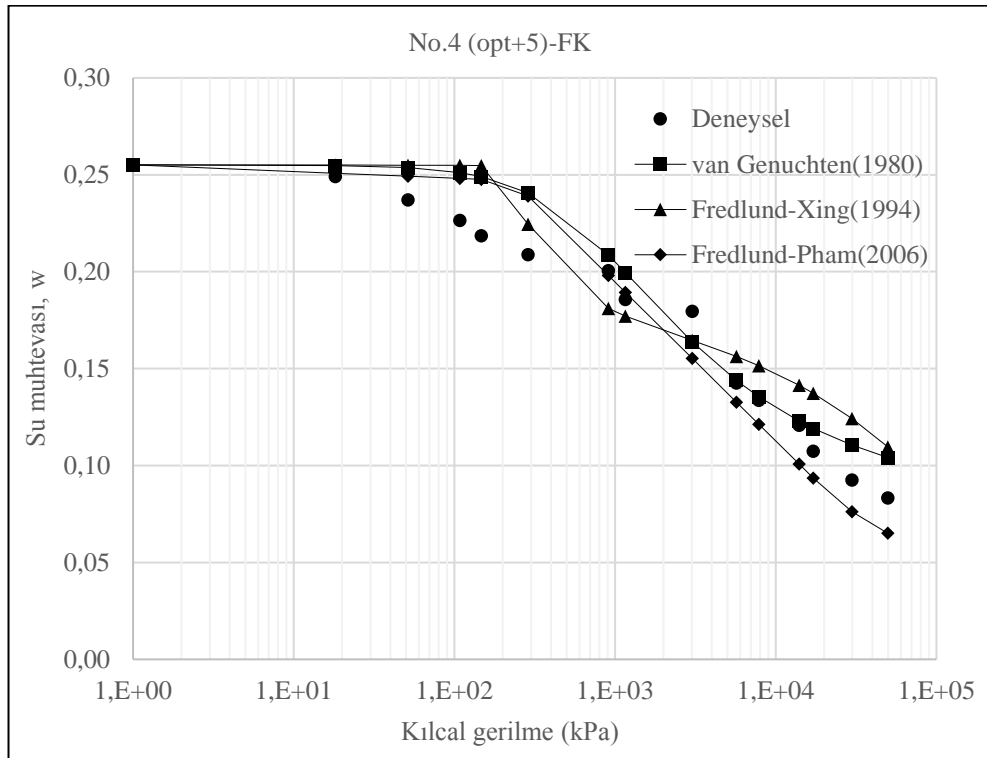
Şekil Ek 2.7. No.3(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



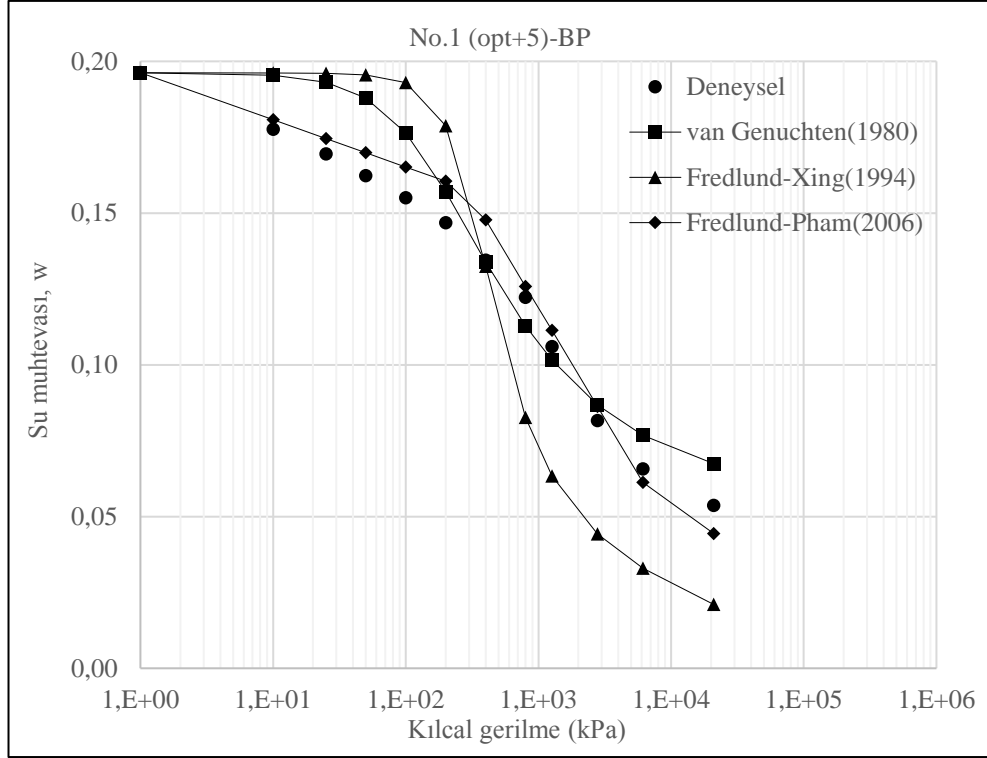
Şekil Ek 2.8. No.3(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



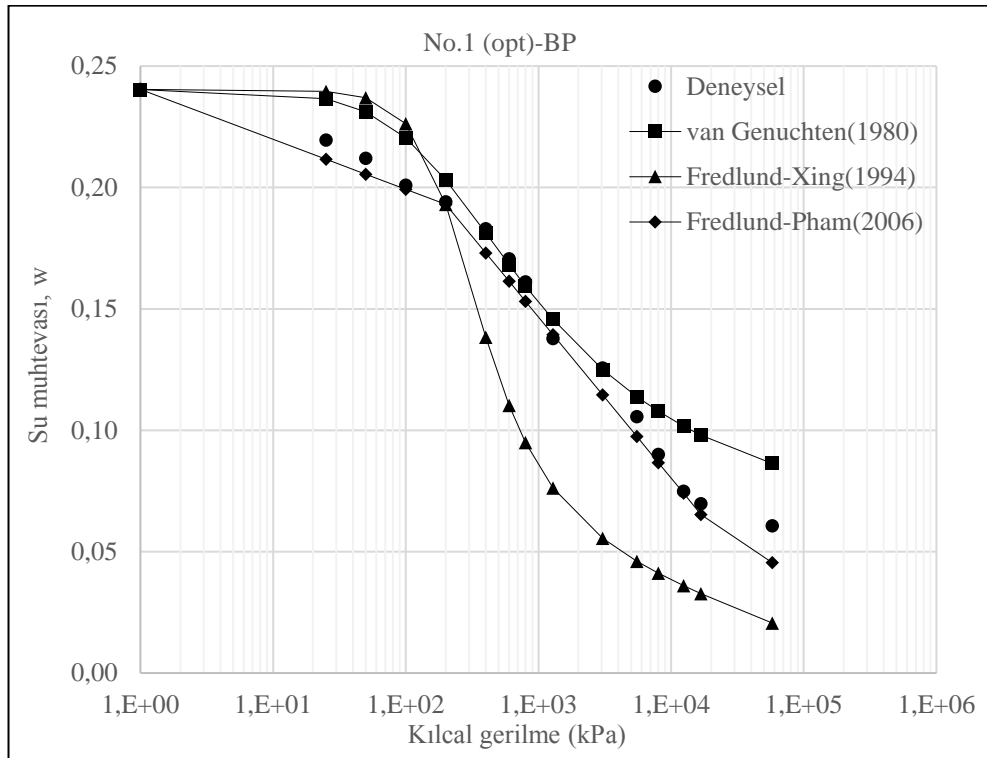
Şekil Ek 2.9. No.4(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



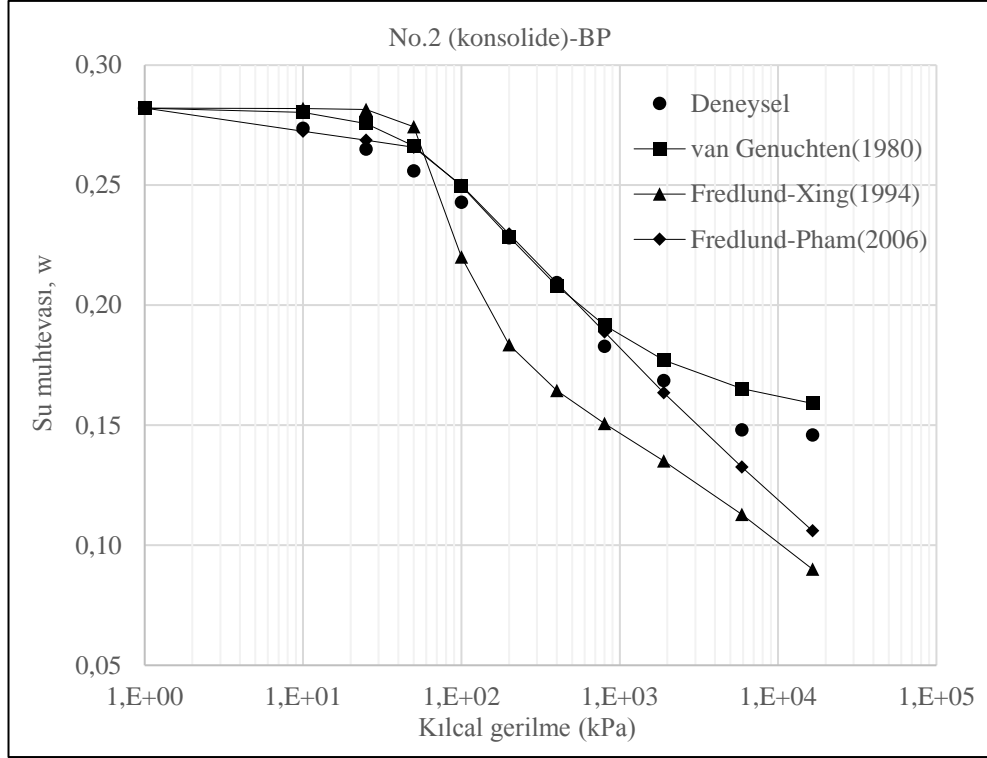
Şekil Ek 2.10. No.4(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



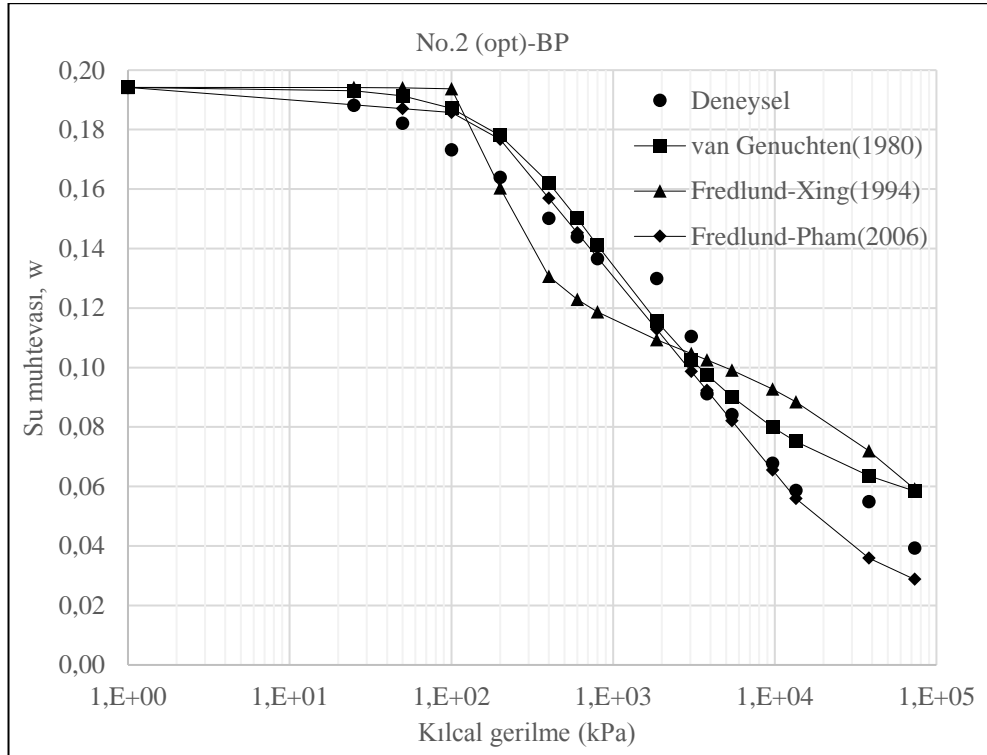
Şekil Ek 2.11. No.1(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



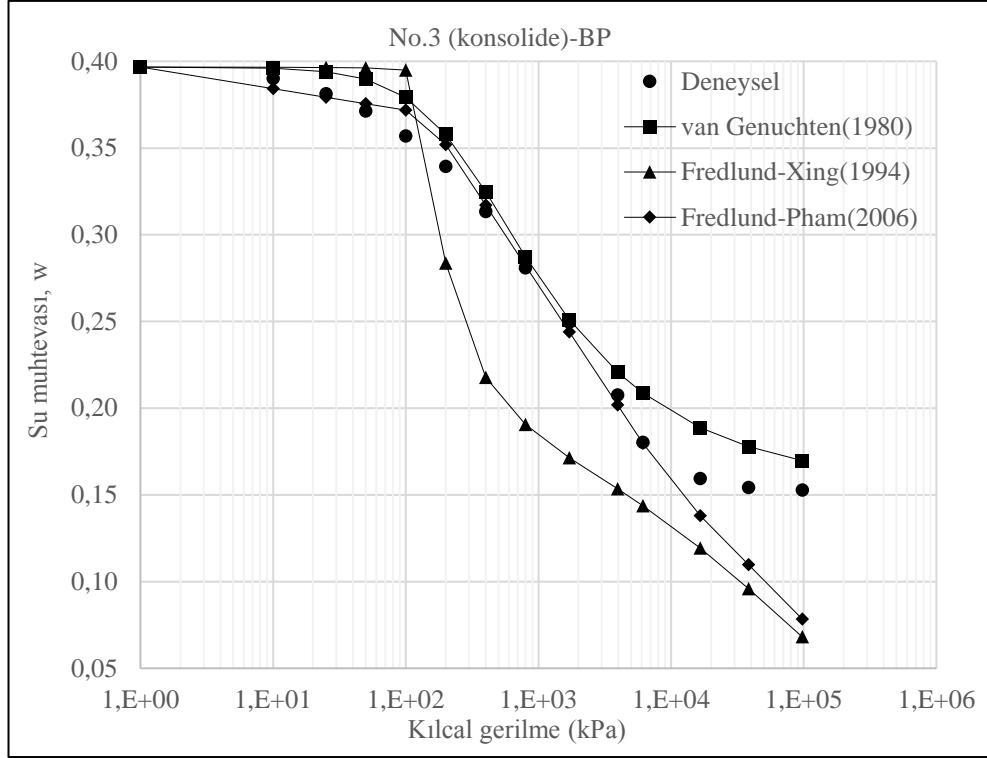
Şekil Ek 2.12. No.1(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.



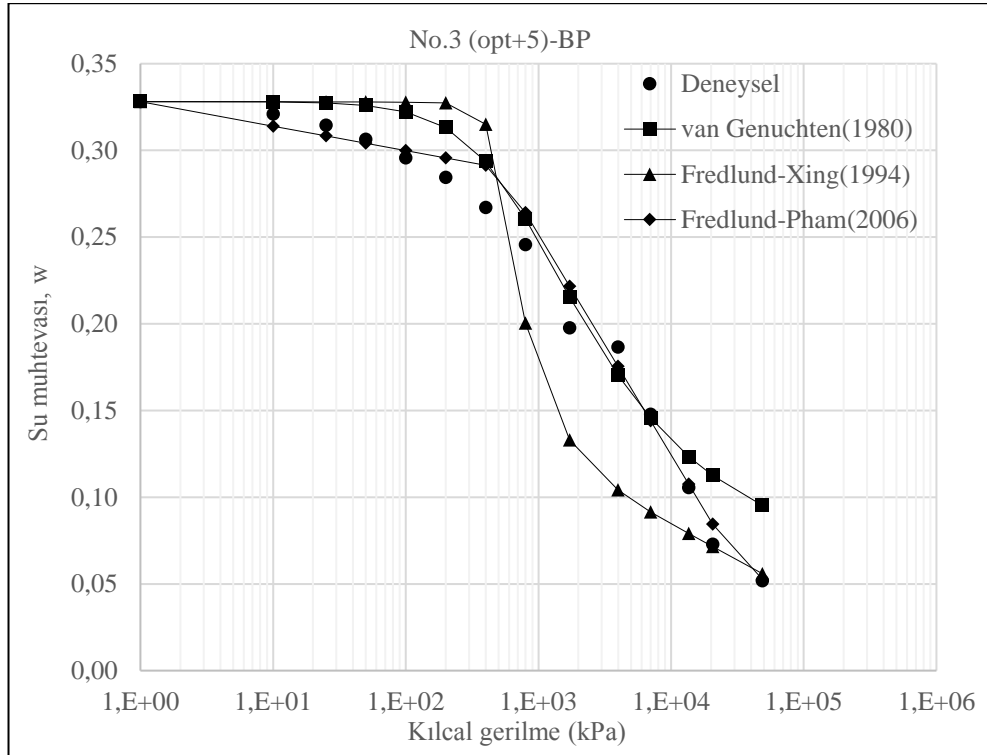
Şekil Ek 2.13. No.2(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



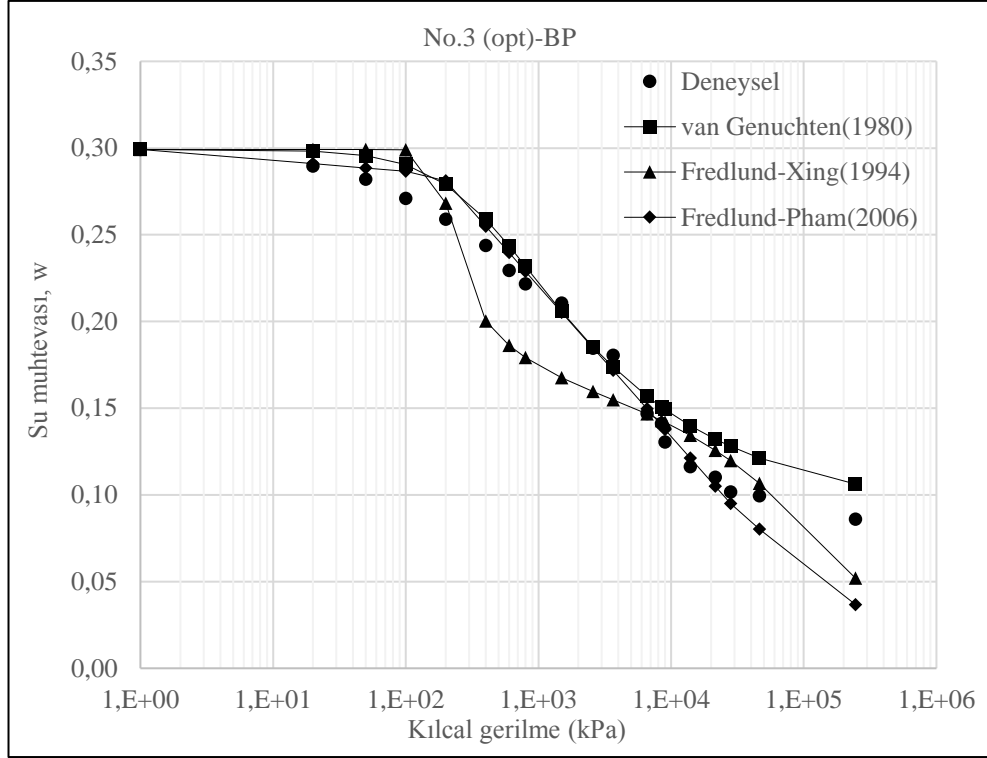
Şekil Ek 2.14. No.2(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.



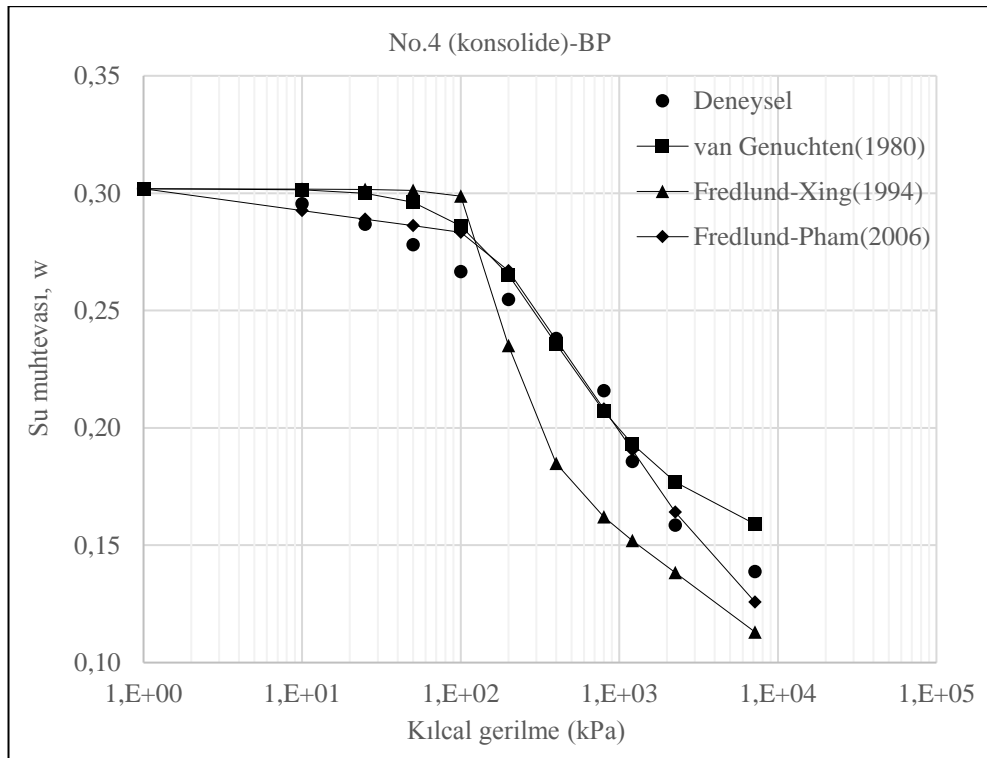
Şekil Ek 2.15. No.3(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.



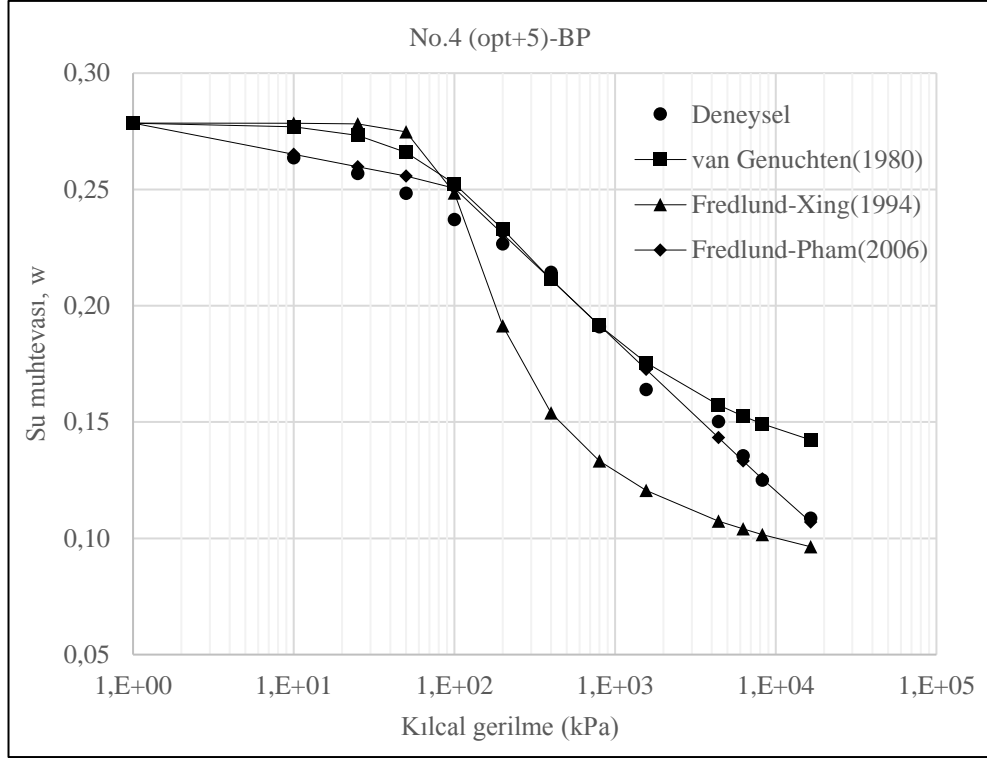
Şekil Ek 2.16. No.3(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.



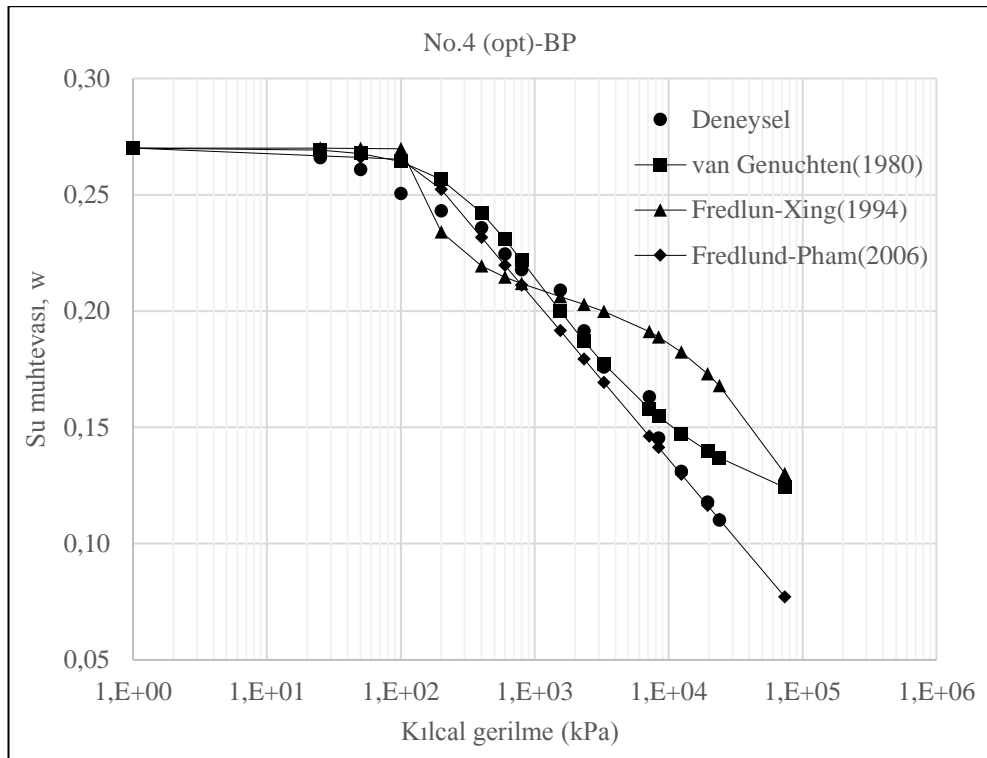
Şekil Ek 2.17. No.3(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.



Şekil Ek 2.18. No.4(konsolide) zemine eğri modellerinin uygulanması.

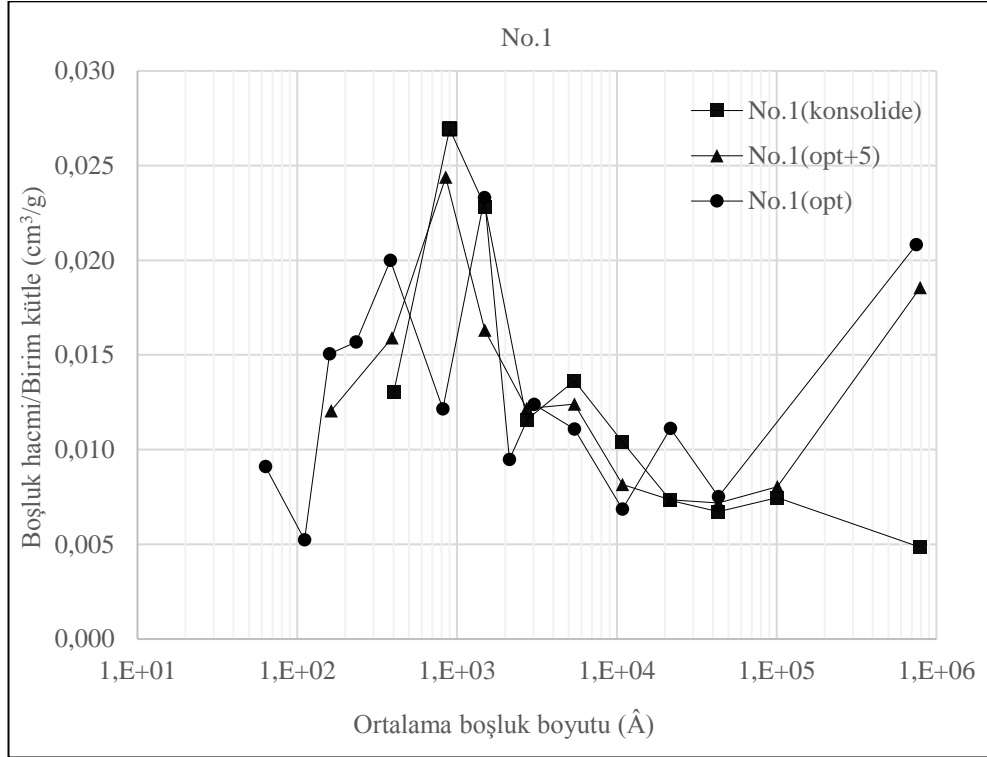


Şekil Ek 2.19. No.4(opt+5) zemine eğri modellerinin uygulanması.

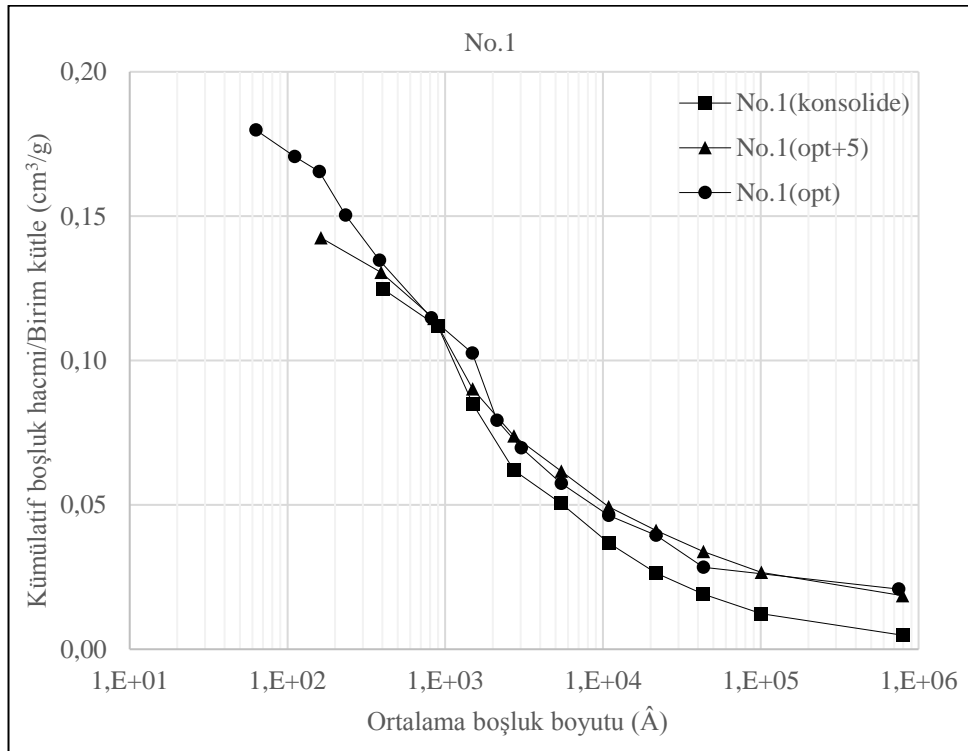


Şekil Ek 2.20. No.4(opt) zemine eğri modellerinin uygulanması.

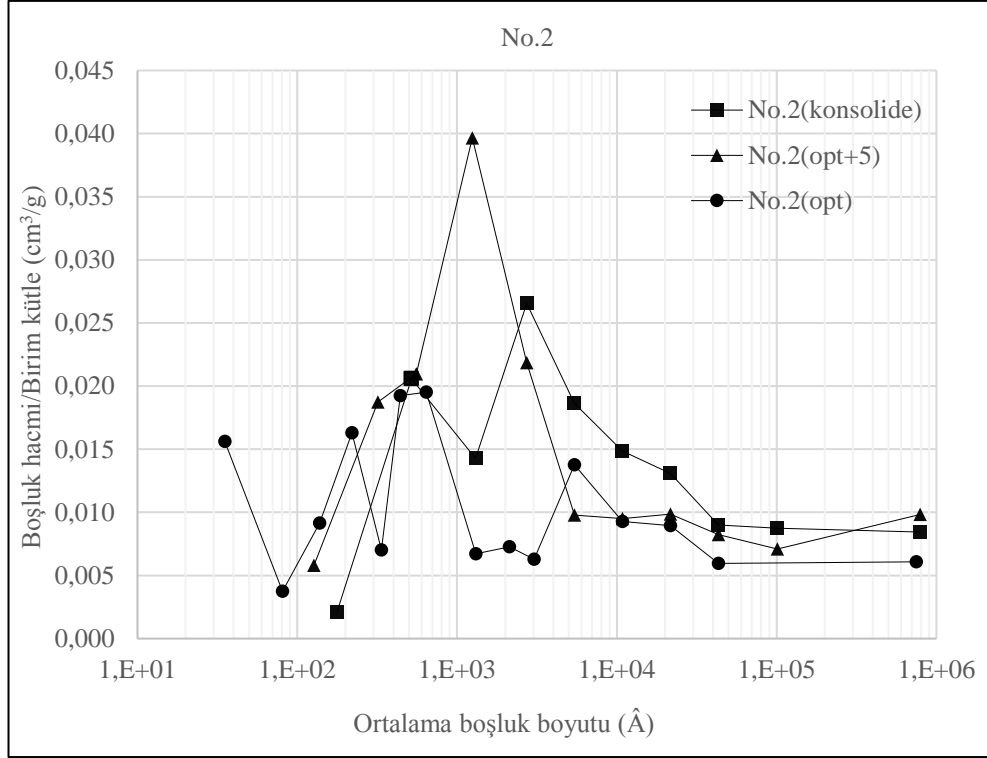
EK 3: SWC Eğrisi-Boşluk Boyutu İlişkisi (Basınç Plakası Sonuçları)



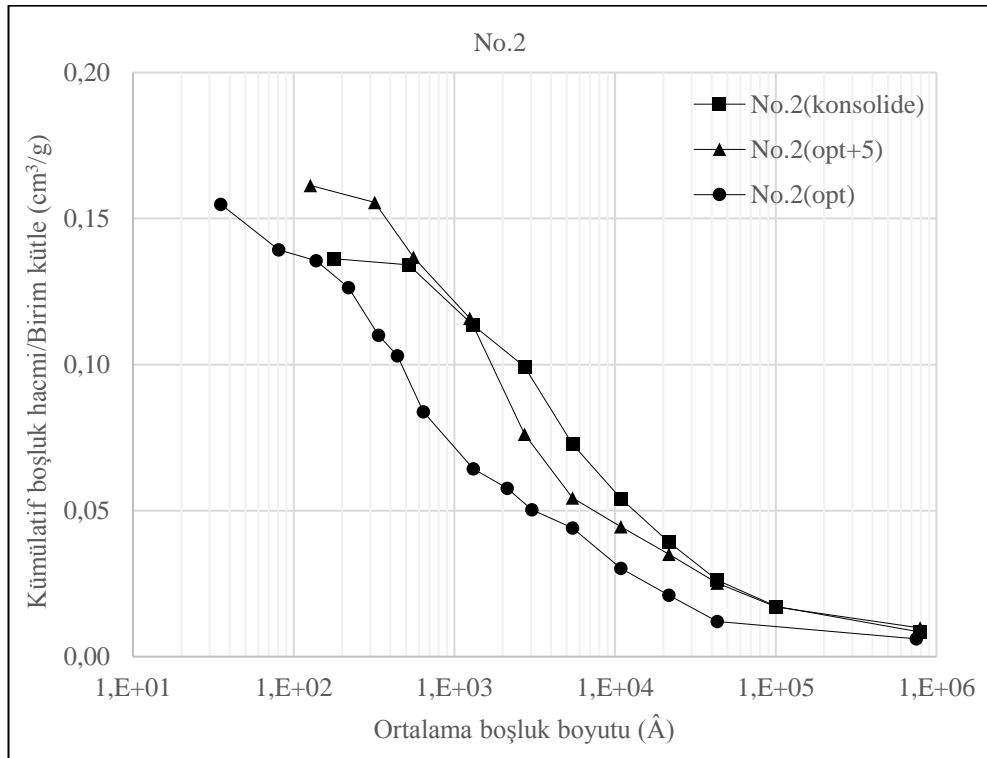
Şekil Ek 3.1. No.1 zemin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



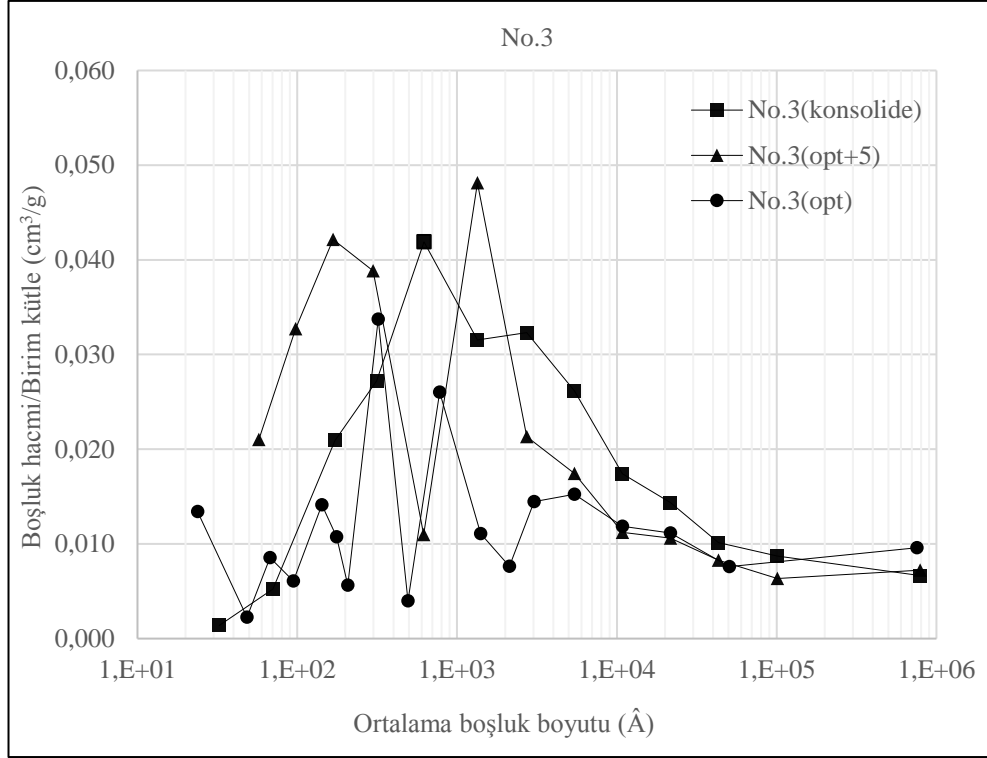
Şekil Ek 3.2. No.1 zemin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



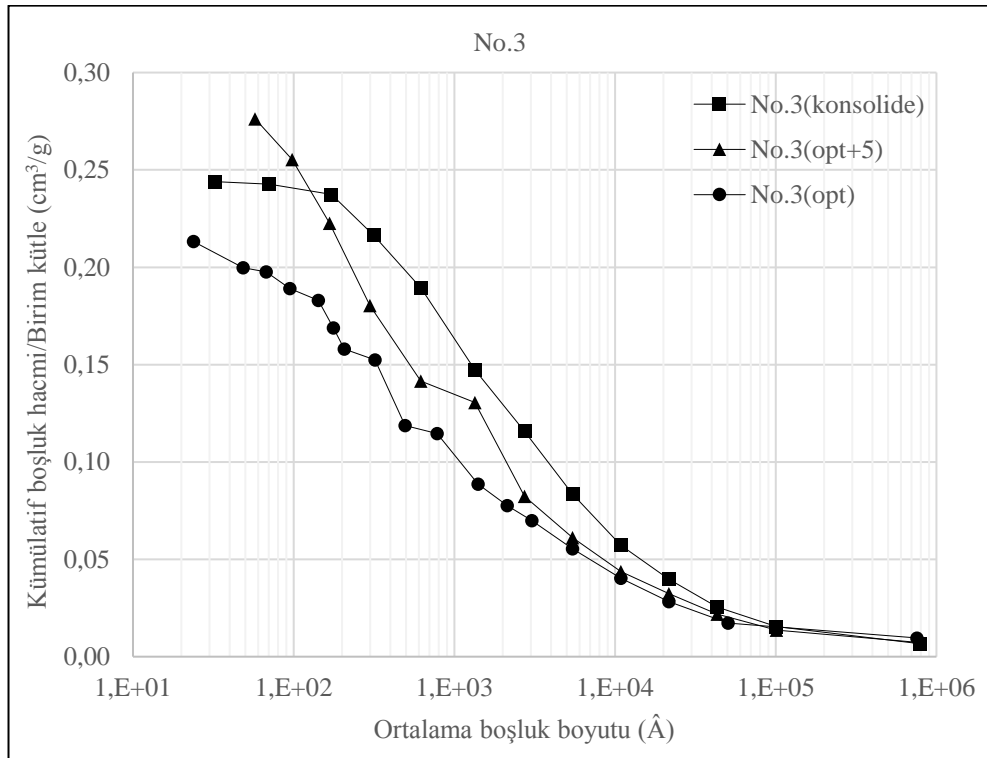
Şekil Ek 3.3. No.2 zemin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



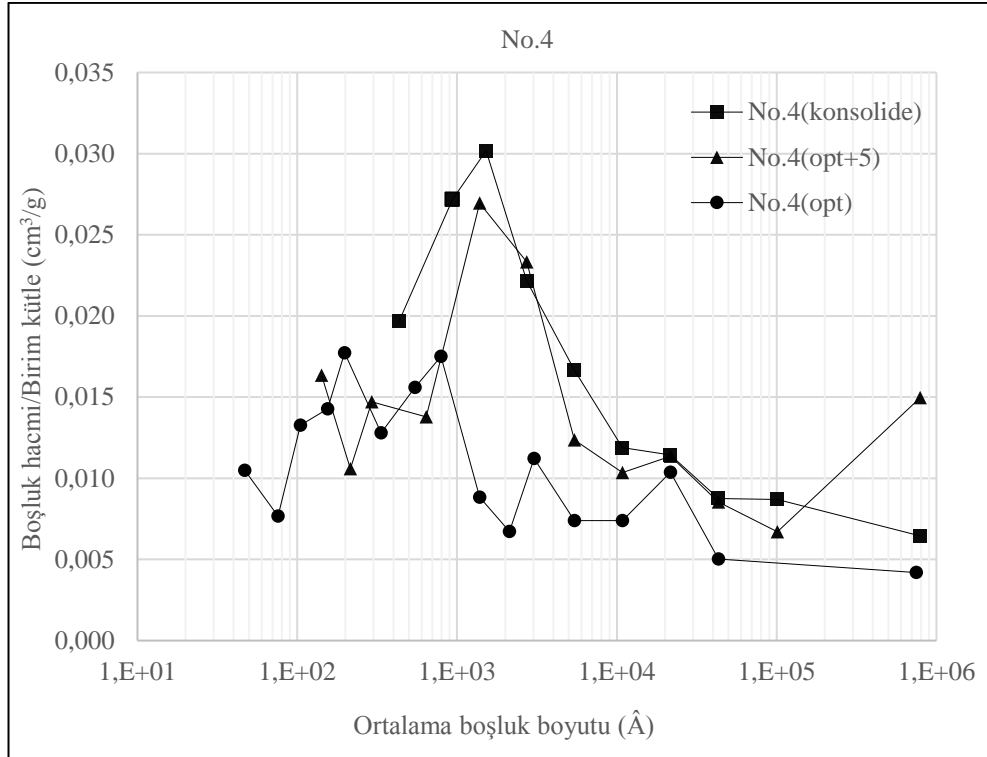
Şekil Ek 3. 4. No.2 zemin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



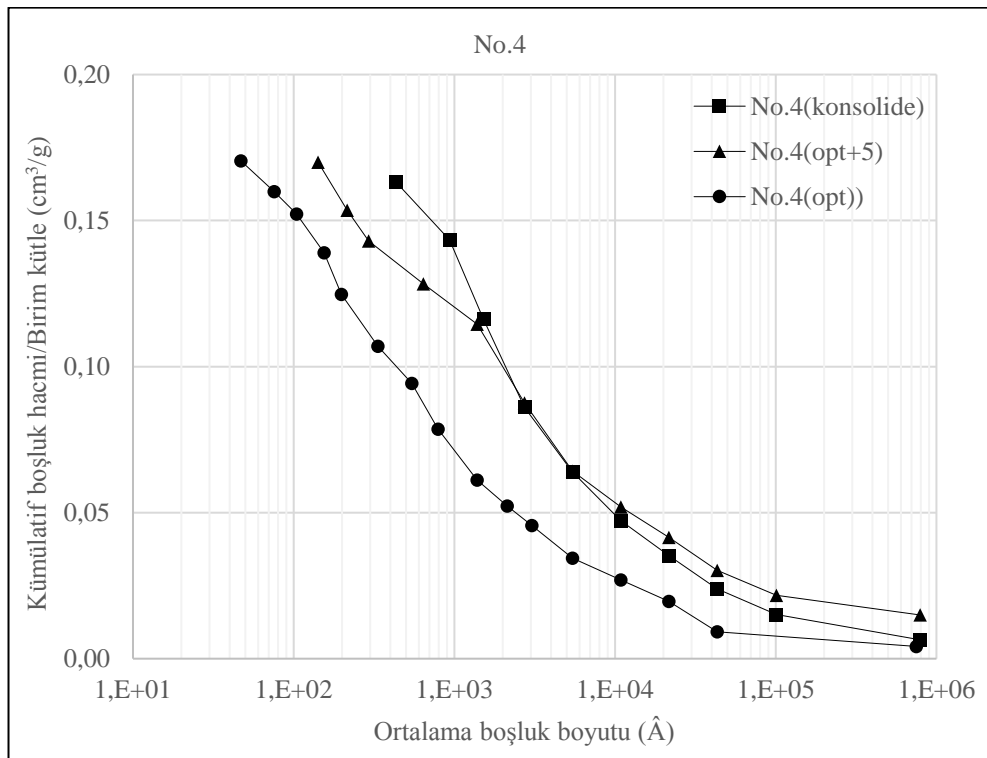
Şekil Ek 3.5. No.3 zemin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



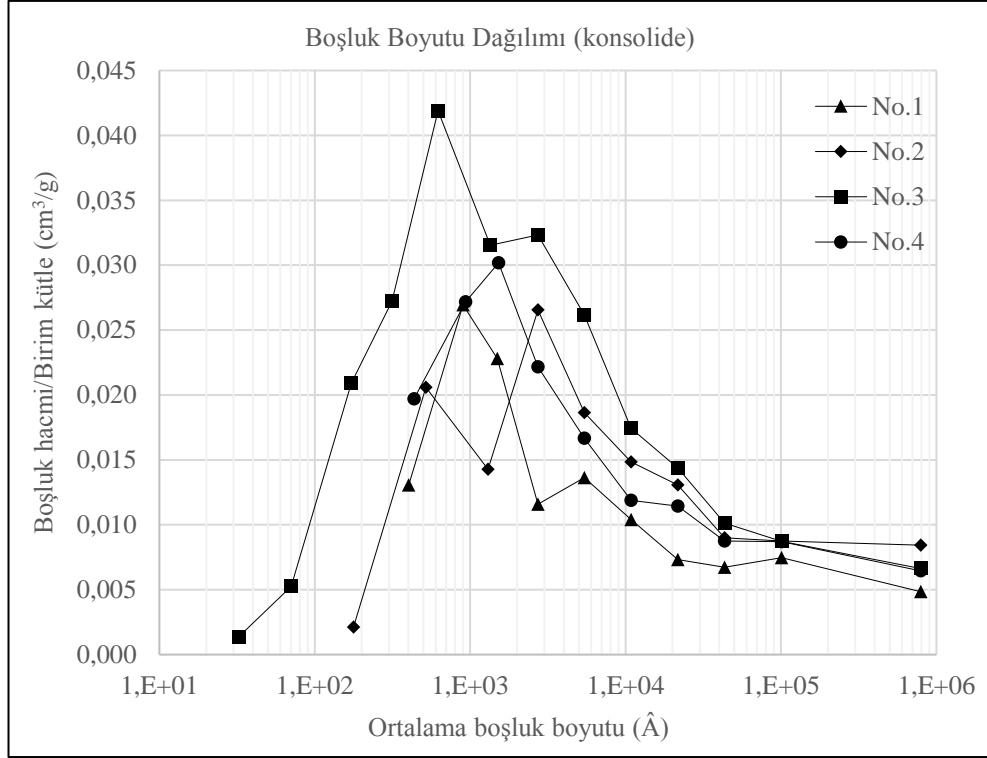
Şekil Ek 3.6. No.3 zemin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



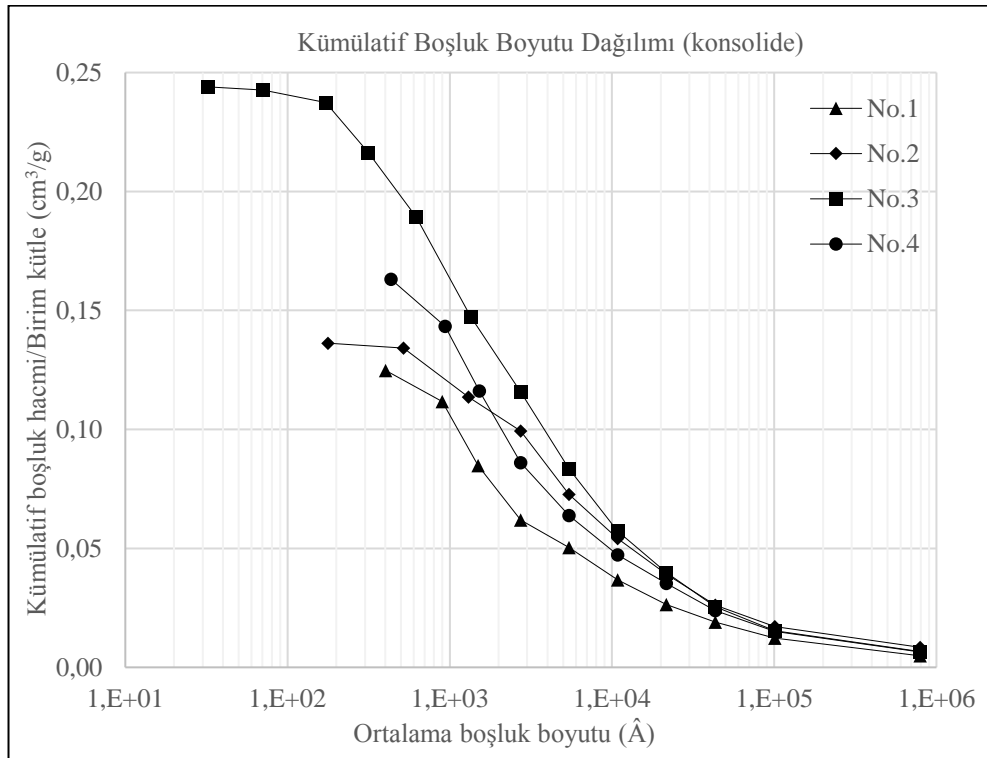
Şekil Ek 3.7. No.4 zemin boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



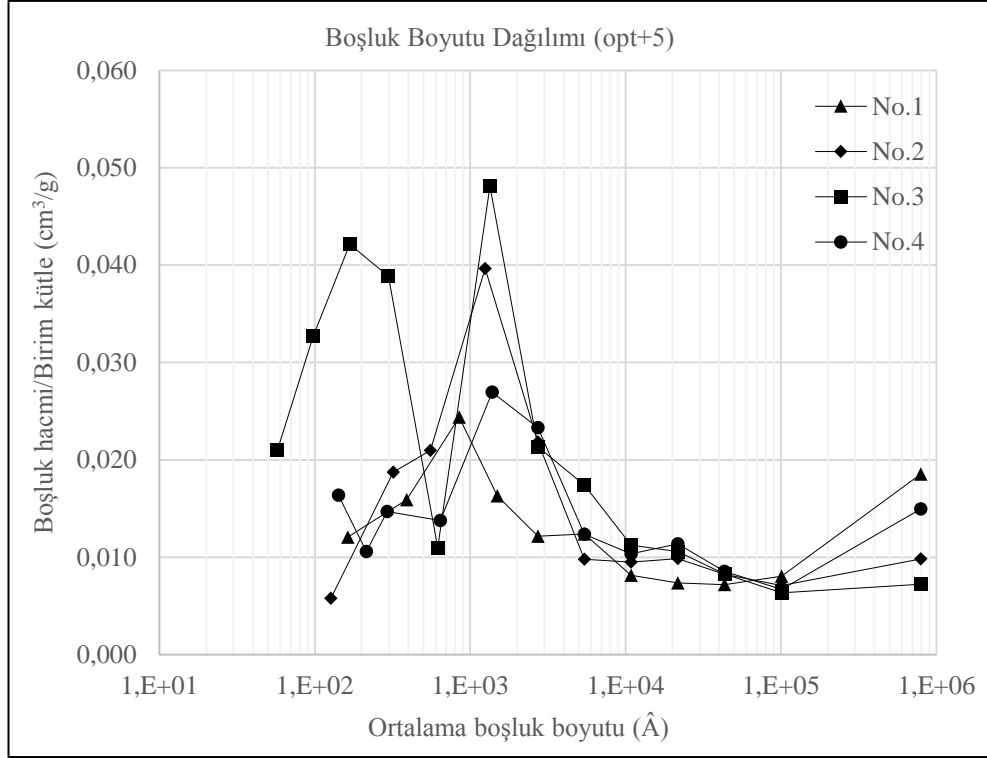
Şekil Ek 3.8. No.4 zemin kümülatif boşluk hacmi-ortalama boşluk boyutu ilişkisi.



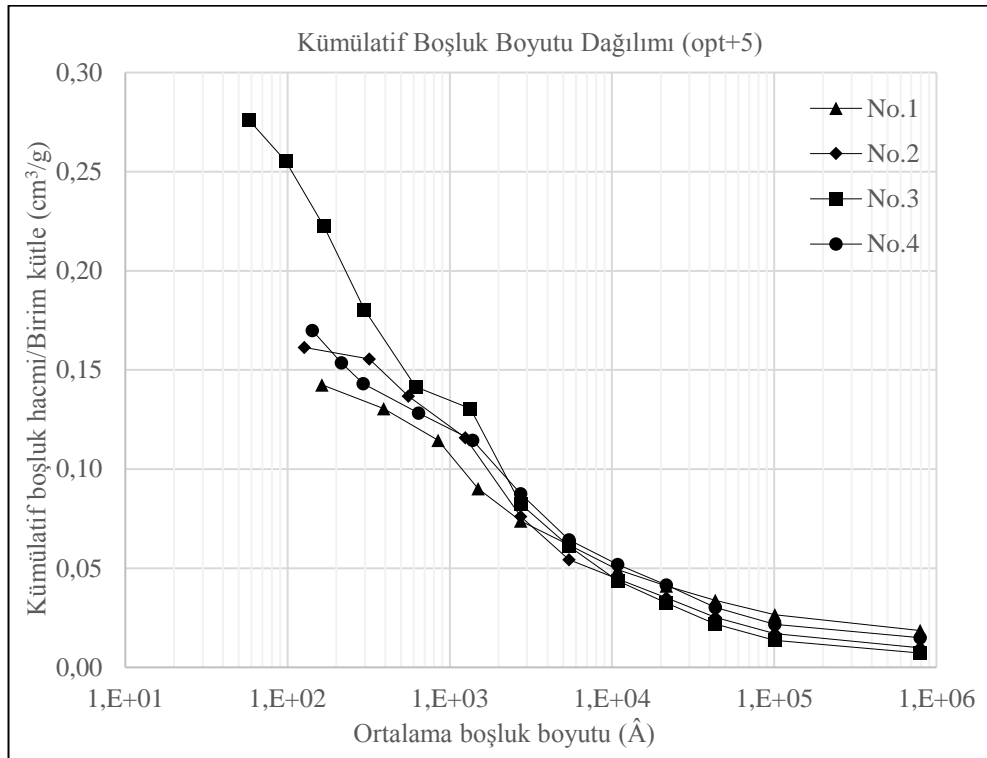
Şekil Ek 3.9. Konsolide zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.



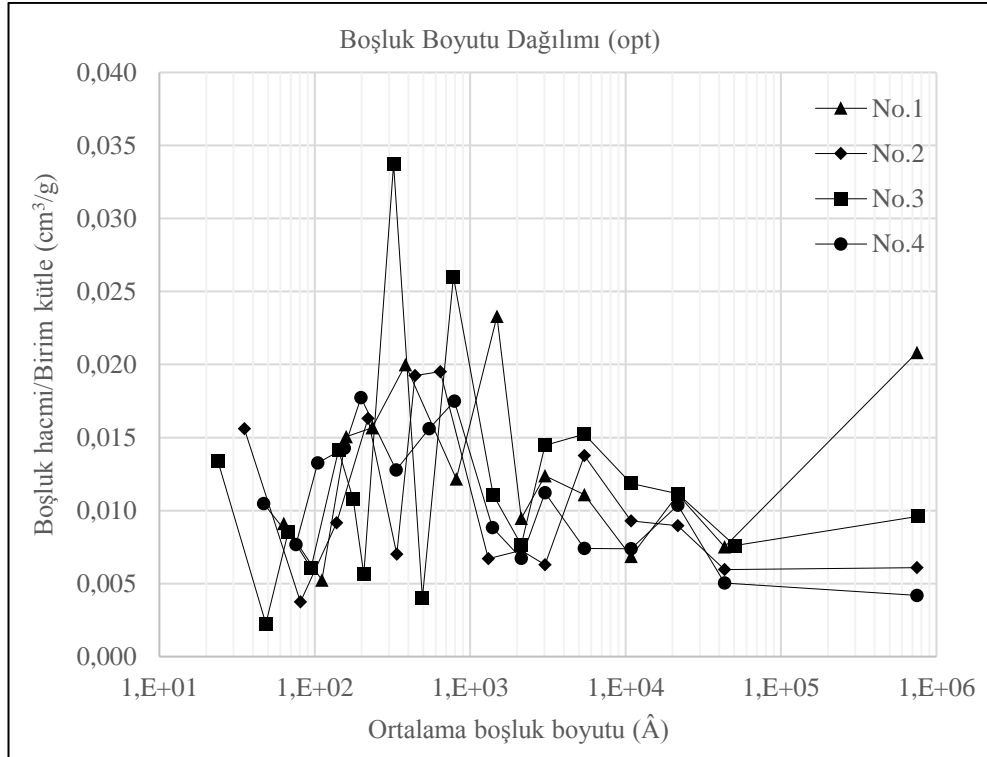
Şekil Ek 3.10. Konsolide zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.



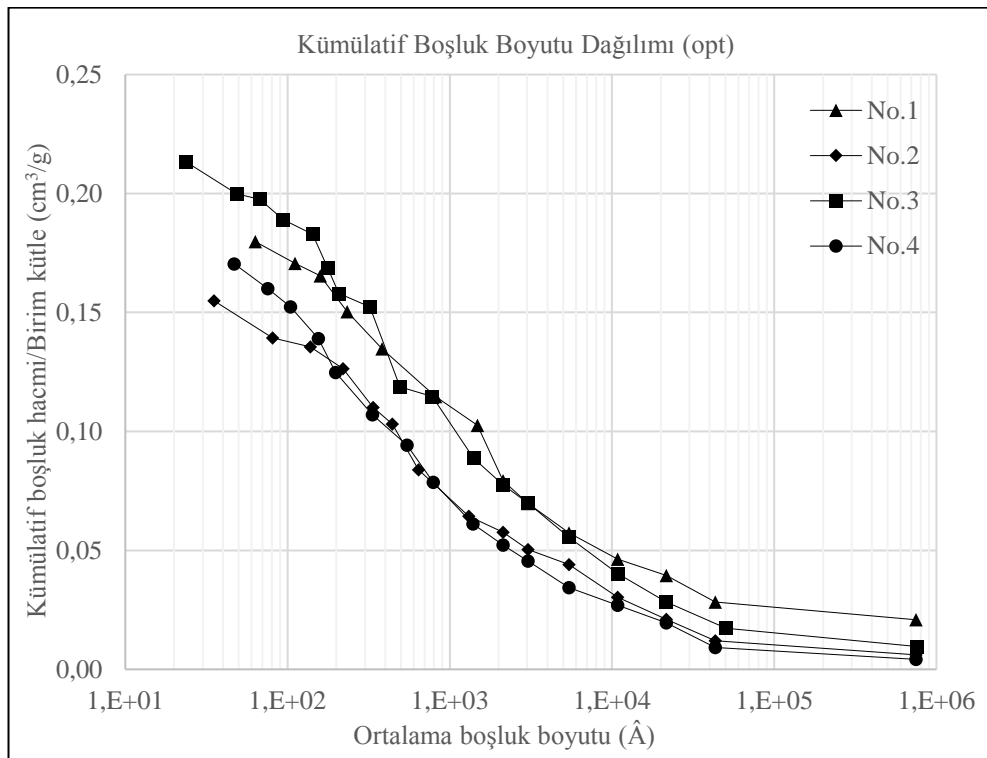
Şekil Ek 3.11. Optimum+%5 zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.



Şekil Ek 3.12. Optimum+%5 zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.



Şekil Ek 3.13. Optimum zeminlerin boşluk boyutu dağılımları.



Şekil Ek 3.14. Optimum zeminlerin kümülatif boşluk boyutu dağılımları.

ÖZGEÇMİŞ

Kadir Kocaman, 04.06.1986'da Düzce'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Düzce'de tamamladı. 2015 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik programında yüksek lisansa başladı. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi'nde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.