

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERDE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özgün GÖKOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERDE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özgün GÖKOĞLU
(501121318)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Aykut ŞENOL

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121318 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Özgün GÖKOĞLU** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERDE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Aykut ŞENOL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Z. Nil TAYLAN KUTLU
Maltepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

Sevgili Aileme,

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen, yaptığım çalışma kapsamında yol gösterici olan, ders dışındaki zamanlarında da öğrencilerinin her sıkıntısıyla ilgilenen, saygıdeğer hocam Doç. Dr. Aykut ŞENOL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli görüşlerinden yararlandığım, çalışmam boyunca yardımını bir an olsun esirgemeyen, çalışmamın ilerlemesinde büyük emekleri olan hocam Yrd. Doç. Dr. Nil TAYLAN KUTLU'ya, deneysel çalışmalarında ve yaptığım analizlerde büyük yardımlarını gördüğüm Araştırma Görevlisi Sayın Feyzullah GÜLŞEN'e, zemin mekaniği laboratuvarı çalışanlarına ve arkadaşım M. Nuri AKTEPE'ye şükranlarımı sunarım. Yatakhane hayatımdan bu yana her zaman sıkıntılarımı paylaşan, lise yıllarımızdan beri dostluğumuzun her geçen yıl daha da sarsılmaz bağlarla güçlendiği arkadaşlarıma ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, aile kavramının ne kadar önemli olduğunu bana her an hissettiren aileme bu süreçte yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Aralık 2014

Özgün GÖKOĞLU
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMI VE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ	5
2.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri	5
2.1.1 Emme gerilmesi kavramı ve ölçülmesi	8
2.1.2 Doygun olmayan zeminlerde gerilme durumu değişkenleri	12
2.1.3 Zemin su karakteristik eğrisi	14
2.2 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti Teorisi	16
2.3 Şevlerin Stabilitesi (Duraylılığı).....	18
2.3.1 Şev hareketlerinin sınıflandırılması	19
2.3.1.1 Düşme	20
2.3.1.2 Devrilme.....	20
2.3.1.3 Kayma	21
2.3.1.4 Yayılmalar.....	21
2.3.1.5 Akmalar.....	22
2.3.2 Şev stabilitesi analizleri	22
2.3.2.1 Ordinary ya da Fellenious analizi yöntemi	24
2.3.2.2 Basitleştirilmiş Bishop yöntemi	25
2.3.2.3 Basitleştirilmiş Janbu yöntemi	26
2.3.2.4 Spencer yöntemi.....	27
2.3.2.5 Morgenstern-Price yöntemi.....	28
2.3.3 Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizleri.....	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
3.1 Laboratuvar Deneyleri.....	31
3.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyleri	32
3.1.2 Kıvam limitleri deneyi	33
3.1.3 Standart kompaksiyon deneyi (standart proktor deneyi)	34
3.1.4 Dane birim hacim ağırlığı belirlenmesi (piknometre deneyi).....	35
3.1.5 Kesme kutusu deneyi	35
3.1.6 Basınç plakası	36
3.1.7 Tempe basınç hücresi.....	38
3.2 Numunelerin Mühendislik Özellikleri	39
3.2.1 Numune I (CL).....	39
3.2.2 Numune II (SP)	43

3.2.3 Numune III (CL)	44
4. LİMİT DENGİ ANALİZİ YÖNTEMİ İLE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ	49
4.1 Limit Denge Analizi Yöntemi	49
4.2 GeoStudio Paket Programı	50
4.3 SLOPE/W Programı ile Şev Stabilite Analizi Yapılacak Kesitin Modellenmesi	51
4.3.1 Kesit geometrisinin oluşturulması.....	51
4.3.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması	53
4.3.3 Yeraltı suyunun tanımlanması.....	54
4.3.4 Kayma yüzeyinin belirlenmesi.....	55
4.3.5 Modelin çözümü.....	57
5. ŞEV STABİLİTE ANALİZİ SONUÇLARI	59
5.1 Numune I (CL) Şev Stabilite Analiz Sonuçları	61
5.1.1 Başlangıç durumundaki numunenin şev stabilite analizi sonuçları	62
5.1.2 Yeraltı su seviyesinin değişimiyle gözlenen şev stabilite analizi sonuçları	63
5.1.3 Zeminin suya doymun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları	70
5.2 Numune II (SP) Şev Stabilite Analiz Sonuçları	72
5.2.1 Başlangıç durumundaki şev stabilite analizi sonuçları	73
5.2.2 Yeraltı su seviyesinin değişimiyle gözlenen şev stabilite analizi sonuçları	74
5.2.3 Zeminin suya doymun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları	81
5.3 Numune III (CL) Şev Stabilite Analiz Sonuçları	82
5.3.1 Başlangıç durumundaki şev stabilite analizi sonuçları	83
5.3.2 Yeraltı su seviyesinin değişimiyle gözlenen şev stabilite analizi sonuçları	84
5.3.3 Zeminin suya doymun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları	91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
6.1 Sonuçlar.....	96
6.2 Öneriler	97
KAYNAKLAR.....	99
EKLER.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	109

KISALTMALAR

c'	: Efektif kohezyon
c_{ult}	: Toplam kohezyon
d	: Düzeltme katsayısı
e	: Boşluk oranı
GS	: Güvenlik sayısı
f	: Emme gerilmesi ve matrik emme arasındaki ilişki katsayısı
I_p	: Plastisite indisi
K	: Düzeltme katsayısı
θ	: Normalize su muhtevası
P_{at}	: Atmosferik basınç
ρ_w	: Suyun özgül hacmi
θ_r	: Kalıcı hacimsel su muhtevası
θ_s	: Doygun hacimsel su muhtevası
θ_w	: Hacimsel su muhtevası
R	: Genel gaz sabiti
S	: Doygunluk derecesi
$SWCC$	: Zemin su karakteristik eğrisi
t^0	: Sıcaklık
T	: Mutlak sıcaklık
τ	: Kayma mukavemeti
τ_{Sr}	: Kalıcı matrik emmenin kayma mukavemetine katkısı
u_a	: Boşluk hava basıncı
$\bar{u}_v$	: Kısmi boşluk suyu buhar basıncı
$\bar{u}_{v0}$	: Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı
u_w	: Boşluk suyu basıncı
w_n	: Doğal su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
ω_v	: Su buharının moleküler kütlesi
x	: Efektif gerilme katsayısı
α	: Matrik emmeye bağlı başlangıçtaki kayma mukavemeti açısı
β_1	: Matrik emmeye bağlı maksimum kayma mukavemeti
γ_k	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmak}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	: Dane birim hacim ağırlığı
λ	: Düzeltme katsayısı
v_{w0}	: 1/Suyun özgül hacmi
π	: Osmatik emme
σ	: Toplam gerilme
σ'	: Efektif gerilme
σ^s	: Emme gerilmesi karakteristik eğrisi fonksiyonu
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
ϕ'	: Efektif kayma mukavemeti açısı

ϕ^b	: Matrik emmeye bağlı kayma mukavemeti açısı
ψ	: Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme
ψ_e	: Hava giriş matrik emme değeri
ψ_r	: Kalıcı matrik emme

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 : Emme ölçümü için geliştirilmiş yöntemler [1].....	11
Çizelge 2.2 : Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti eşitlikleri [14].....	18
Çizelge 2.3 : Şev göçmeleri için Varnes (1978) mühendislik sınıflandırması [2].....	20
Çizelge 2.4 : Limit denge analizine göre geliştirilmiş bazı yöntemler.....	23
Çizelge 2.5 : Doygun olmayan zeminlerde şev stabilitesi üzerine yapılmış bazı çalışmalar.....	30
Çizelge 3.1 : Çalışma kapsamında kullanılan numuneler.....	31
Çizelge 3.2 : Numune I'e ait endeks özellikleri.....	40
Çizelge 3.3 : Şev stabilite analizinde kullanılacak parametreler.....	43
Çizelge 3.4 : Numune II'ye ait özellikler.....	44
Çizelge 3.5 : Numune III'e ait özellikler.....	45
Çizelge 3.6 : Analizde kullanılan parametreler.....	47
Çizelge 5.1 : Numune I için programda kullanılan zemin parametreleri.....	61
Çizelge 5.2 : Numune II için programda kullanılan zemin parametreleri.....	72
Çizelge 5.3 : Numune III için programda kullanılan zemin parametreleri.....	83
Çizelge 5.4 : Şev stabilite analizleri sonucu elde edilmiş güvenlik sayıları.....	93

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Suya doymun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi [8]. ..	6
Şekil 2.2	: Doymun zemin ve doymamış zemini ayıran bölgeler [5].	7
Şekil 2.3	: x ile doymunluk derecesi arasındaki ilişki [5].	13
Şekil 2.4	: Doymun ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri [8]....	14
Şekil 2.5	: Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) özellikleri [1].	15
Şekil 2.6	: Zemin su karakteristik eğrisinin zemine göre değişimi [9].	15
Şekil 2.7	: Mohr- Coulomb kırılma hipotezine göre kırılma durumu [1].	16
Şekil 2.8	: Doymun olmayan zeminde kırılma yüzeyi [1].	17
Şekil 2.9	: Başlıca kayma türleri: a. dairesel (dönel) ve ötelenmeli b. düzlemsel, c. kama, d. çok yüzeyli kaymalar [18].	21
Şekil 2.10	: Dilimlerin ayrılması ve bir dilim kütleinde oluşan kuvvetler [22].	24
Şekil 2.11	: Şev kesitini oluşturan dilimler [17].	24
Şekil 2.12	: Dilime etkiyen kuvvetler ve kuvvet poligonu [2].	25
Şekil 2.13	: Sorun çıkaran bir kesit [2].	26
Şekil 2.14	: Yamaçta uzunluk-derinlik kavramı [2].	27
Şekil 3.1	: Elek analizi deneyi.	32
Şekil 3.2	: Hidrometre analizi deneyi.	33
Şekil 3.3	: Casagrande deney aleti.	33
Şekil 3.4	: Standart proktor deneyi.	34
Şekil 3.5	: Kesme kutusu deney aleti.	36
Şekil 3.6	: Eksen kaydırma tekniğinin prensipleri [5].	37
Şekil 3.7	: Basınç plakası deneyi.	38
Şekil 3.8	: Numune I'e ait dane çapı dağılımı eğrisi.	40
Şekil 3.9	: Numune I'e ait kompaksiyon eğrisi.	41
Şekil 3.10	: Numune I'e ait kesme kutusu deneyi sonuçları.	42
Şekil 3.11	: Numune I'e ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).	42
Şekil 3.12	: Numune II'ye ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).	44
Şekil 3.13	: Numune III'e ait kompaksiyon eğrisi.	45
Şekil 3.14	: Numune III'e ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).	46
Şekil 4.1	: Geometri oluşturulmadan yapılması gereken ayarlar.	52
Şekil 4.2	: <KeyIn Analyses> komutuyla yapılan işlemler.	52
Şekil 4.3	: SLOPE/W programıyla oluşturulmuş örnek bir kesit.	53
Şekil 4.4	: Malzemenin temel mühendislik parametrelerinin belirlenmesi.	54
Şekil 4.5	: Malzemenin model üzerinde atanması için gereken işlem.	54
Şekil 4.6	: Malzemenin model üzerinde atanması için gereken komut.	55
Şekil 4.7	: Model üzerinde çizdirilmiş olası kayma dairesi merkez ve teğet noktaları.	56
Şekil 5.1	: Analizlerde kullanılan kesitin geometrisi.	59
Şekil 5.2	: Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.	62
Şekil 5.3	: Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.	63

Şekil 5.4 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	64
Şekil 5.5 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	64
Şekil 5.6 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	65
Şekil 5.7 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	65
Şekil 5.8 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	66
Şekil 5.9 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	66
Şekil 5.10 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	67
Şekil 5.11 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	67
Şekil 5.12 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	68
Şekil 5.13 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	68
Şekil 5.14 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	69
Şekil 5.15 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	69
Şekil 5.16 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	70
Şekil 5.17 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	71
Şekil 5.18 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	71
Şekil 5.19 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	73
Şekil 5.20 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	74
Şekil 5.21 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	75
Şekil 5.22 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	75
Şekil 5.23 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	76
Şekil 5.24 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	76
Şekil 5.25 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	77
Şekil 5.26 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	77
Şekil 5.27 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	78
Şekil 5.28 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	78
Şekil 5.29 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	79
Şekil 5.30 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	79
Şekil 5.31 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	80
Şekil 5.32 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	80

Şekil 5.33 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	81
Şekil 5.34 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	81
Şekil 5.35 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	82
Şekil 5.36 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	83
Şekil 5.37 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	84
Şekil 5.38 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	85
Şekil 5.39 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	85
Şekil 5.40 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	86
Şekil 5.41 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	86
Şekil 5.42 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	87
Şekil 5.43 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	87
Şekil 5.44 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	88
Şekil 5.45 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	88
Şekil 5.46 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	89
Şekil 5.47 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	89
Şekil 5.48 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	90
Şekil 5.49 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	90
Şekil 5.50 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.....	91
Şekil 5.51 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	91
Şekil 5.52 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.....	92
Şekil A.1 : Plastisite kartı.....	104
Şekil B.1 : Numune I'e ait kesme kutusu deney sonuçları (1).....	105
Şekil B.2 : Numune I'e ait kesme kutusu deney sonuçları (2).	105
Şekil C.1 : Numune I için SWCC.....	106
Şekil C.2 : Numune II için SWCC.	106
Şekil C.3 : Numune III için SWCC.....	107

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERDE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, kumlu kil, düşük plastisiteli kil ve kum zeminlerin klasik zemin mekaniği ve doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yeraltı su seviyesi değişimleriyle beraber şev stabilite analizleri sonucu elde edilen güvenlik sayıları incelenmiştir. Kumlu kil numunesi İstanbul Güneşli bölgesinden elde edilmiş olup, diğer numuneler daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmaları Şubat 2014 – Temmuz 2014 tarihleri arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Ord. Prof Dr. Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki aşamalı olarak yapılmıştır. İlk aşama zeminin mühendislik ve fiziksel özelliklerinin belirlendiği; elek analizi, hidrometre, Atterberg limitleri analizi, piknometre, standart kompaksiyon ve kesme kutusu deneyleridir. İkinci aşamada ise zeminin doygun olmayan zemin mekaniği parametrelerini belirleyebilmek için basınç plakası deneyi uygulanmıştır. Kesme kutusu ve basınç plakasında kullanılan numuneler standart proktor deneyi sonrasında belirlenmiş olan optimum koşullara yakın koşullarda hazırlanmıştır. Şev stabilite analizlerinde kullanılan diğer numuneler için de farklı araştırmacılar tarafından benzer deneyler yapılmış olup, numunelerin doygun ve doygun olmayan parametreleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan parametrelerle doygun ve doygun olmayan koşullarda şev stabilite analizleri yapılmış ve doygun olmayan parametrelerin elde edilen güvenlik sayısına etkisi incelenmiştir. Analizler, sıkıştırılarak hazırlanmış numunelerin zemin su karakteristik eğrisinden elde edilen uniform matrik emme basıncına göre, yeraltı su seviyesinin değişken olduğu ve zeminin tamamen suya doygun olduğu durumlar için yapılmış ve yeraltı su seviyesinin değişimiyle güvenlik sayısının değişimi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre; doygun olmayan zemin parametrelerinin şevlerin güvenlik sayısına etkisinin en çok gözlemlendiği numune kil oranının en yüksek olduğu numunedir. Numunelerde kum oranı arttıkça; doygun ve doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan analizlerin sonuçları arasındaki fark azalmaktadır. Yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle her üç numunede de doygun ve doygun olmayan kabuller için elde edilen güvenlik sayıları birbirlerine yaklaşmakta; zeminin suya tamamen doygun olduğu durumda elde edilen güvenlik sayıları ise aynı olmaktadır. Şevler doygun duruma gelmeden de göçmeler meydana gelebildiğinden, doygun olmayan zemin mekaniğinin önemi artmaktadır.

SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR UNSATURATED SOILS

SUMMARY

Analysis of slope stability is one of the main issues of geotechnical engineering. Natural or human made slopes' problems are focus area, which geotechnical engineers have to bring a solution. There are main acceptances, which base on saturated soil mechanic principles to analyze slope stability. However, this approach sometimes causes the uneconomical solutions. According to researches that were made in the last years, unsaturated soil mechanics approach has been started to use in the slope stability analyses and this approach creates the economical and reliable results for slope stability analyses.

Depending of the developments in the technology, the laboratory devices has been used widely and the quality of devices has increased. Thanks to this development, soil mechanic acceptances has been started to change. The unsaturated soil mechanics principles are one result of this change. In the scope of this thesis, the effects of properties of unsaturated soil mechanic's parameters to factor of safety of slopes were searched. Effects of changing of ground water table level on the factor of safety of slopes and the different impacts of unsaturated soil mechanic principles on the various soil types were the main topics in the thesis.

Although the unsaturated soil mechanic approach has been appeared since early of 1900's, the development of acceptances has begun for last twenty years because of reasons, which was mentioned above paragraph. Especially for the dry conditions and the conditions where the ground water table level is far from the surface, the unsaturated soil mechanic parameters affect the stability of slopes, bearing capacity of foundations, consolidation and infiltration of soils. Unsaturated soil mechanic researches remark that the unsaturated soil parameters should not be ignored especially for clay soils.

In this thesis, factor of safety that obtained from the results of slope stability analysis of sandy clay, low plasticity clay and poor graded sand soil are examined with the change of ground water table level for saturated and unsaturated soil mechanics principles. The sandy clay sample is from Günesli vicinity of Istanbul and the other samples are got from the other researches. The thesis has two parts. In the first part, laboratory tests are available. The laboratory tests were performed in the Ord. Prof. Dr. Hamdi Peynircioğlu Soil Mechanics Laboratory, Istanbul Technical University between the dates February of 2014 and July of 2014. The tests were performed by two stages. In the first stage, sieve analyses, hydrometer, Atterberg limits, pycnometer, standard compaction and direct shear tests are available. The second stage consists of pressure plate test, which gives the unsaturated soil properties. In the light of sieve analysis and Atterberg limits, the soil sample that was obtained from the field was described as low plasticity clay according to Unified Soil Classification System. The samples, which were used for direct shear test and pressure plate test, were prepared as near the optimum conditions these are defined

from standart proctor test. The other samples, which were used for slope stability analyses have experienced to same tests from other researchers with sample obtained from field.

The Sample I is the sample which the experimentals applied in the labarotory by author of this thesis. The Sample II was taken from Gülsen's research and the classification of the soil is poor graded sand. The Sample II consists of 100 percent sand. The sample III is named as Indian Head Till is from Kutlu's research. According to Unified Soil Classification System, the soil is low plasticity clay. For each soil samples, the parameters that were used in slope stability analyses were defined. These parameters were effective cohesion (c') and effective internal friction angle (ϕ') for saturated and unsaturated soil acceptances and soil water characteristic curve (SWCC) and matric suction for unsaturated soil acceptance. SWCC and matric suction was determined with pressure plate test for Sample I and Sample III and with tempe-pressure cell for Sample II. Both of the test devices use the axis translation technique. The axes translation technique was mentioned in the thesis with details.

Soil water characteristic curve is one of the main parameter, which specifies the behavior of unsaturated soils. Soil water characteristic curve is relationship of matric suction and degree or saturation or water content or volumetric water content. Soil water characteristic curve can be obtained from experimental, estimation or fitting methods. In the light of researches for the unsaturated soil mechanics, properties of soils as the clay or sand content, plasticity or coefficient of compressibility has signficiant effects on the soil water characteristic curve. Suction pressure of soils is the other main parameter for unsaturated soil mechanic approaches. It includes both osmotic suction and matric suction parameters. Osmotic suction is related with chemical contents, which takes part in pores of soil. Because of difficulties to gauge the osmotic suction, it is usually neglected. Therefore, the matric suction becomes the main parameter for the suction pressure. The matric suction is difference between pore air pressure and pore water pressure. It can be described as negative pore water pressure. Pore water pressure inceares under the ground water table level with depth and matric suction increases above the ground water table level. Researchs about unsaturated soil mechanics proove the positive effect of matric suction to the shear strength of soils. Because of its positive effects to the shear strength of soils, the calculations become more economical if we compare with saturated solution.

In the second part of the thesis, slope stability for saturated and unsaturated conditions was analyzed using parameters, which were obtained from experimental studies and the effect of unsaturated soil parameters on the factor of safety was defined. The change of factor of safety was examined with change of ground water table level. For each soil samples, same geometry of cross section was used for the models. Each stability of slopes was analyzed with the SLOPE/W, which takes part in GeoStudio packet programme. SLOPE/W programme benefits from Limit Equilibrium Methods. In the thesis, principles of Limit Equilibrium Methods and the usage of SLOPE/W are shared with details. The results were obtained with Bishop Limit Equilibrium Method for each soil type. Mohr-Coulomb failure hpyothesis was accepted for the soil behavior.

Three ground water conditions were examined for the solutions. For three soil samples, soil parameters for saturated and unsaturated acceptances were determined.

The first condition was the initial condition of the soils. There was no ground water level for initial conditions. For saturated soil acceptances, the parameters that were

defined for the analysis were effective cohesion and effective internal friction, which were obtained from direct shear tests and unit weight of the soils. For unsaturated soil acceptances, the matric suction value was acted to effective cohesion. Defined cohesion for dry condition according to unsaturated acceptances was greater value than defined effective cohesion according to saturated acceptances. For unsaturated soil acceptances, soil water characteristic curve was necessary to account the cohesion value. Beside the soil water characteristic curve, to describe the cohesion of unsaturated soil acceptances for dry conditions, effective cohesion that was obtained from direct shear test and matric suction of the soil must be contributed to calculation of cohesion. The calculation of cohesion according to unsaturated soil principles for dry condition was told with details in the next chapters.

In the second condition for the soils, the ground water table level was defined and systematically it was assessed nearer positions to surface of ground. For saturated soil acceptances, the parameters which has determined for the stability analysis were effective cohesion, effective internal friction angle and unit weight of the soils. To get the factor of safety according to unsaturated soil acceptances, effective cohesion, effective internal friction angle, unit weight of soil and soil water characteristic curve were necessary. Soil water characteristic curve that was determined from experimental ways was defined in the programme related with volumetric water content and matric suction values.

For the third condition of the soil, soil pores was completely full of pore water. The ground water table level was fifty centimeter above of surface. The parameters were same with the conditions that ground water table level was defined. After the geometry of cross section, soil parameters and ground water conditions were defined, the factor of safety for the slope stability analyses was obtained. SLOPE/W gave the critical slip surfaces of circle and factor of safety for critical slip circle's surface was the factor of safety value for the slope stability analyses.

The greatest factor of safety was obtained for the initial conditions according to unsaturated soil acceptance. The difference between saturated soil and unsaturated soil analyses was the most apparent value for Sample III. However, the difference was so little for the Sample II. That demonstrates, while the clay content was raising, unsaturated soil parameters had more significant role in the shear strength theory.

While the ground water table level was increasing, factor of safety difference between saturated and unsaturated slope stability analyses decreased. This remarks that, while the soil was becoming more saturated, the effect of unsaturated soil parameters declined. With the increasing of ground water table level, factor of safety for unsaturated soil acceptances has significantly declined for especially Sample III.

When the ground water table level was above of ground surface, there was no factor of safety difference between analyses with unsaturated soil principles and saturated soil principles. This is because there was no pore air pressure in the soil when the ground water table level above of ground surface. Because of this reason, unsaturated soil parameters had no effect on the shear strength of soils, when the soil pores were full of pore water.

For the thesis, both of experimental and analytical studies were done. The results were presented with details. In the scope of the research, three soil samples were used. For a detailed study, the number of soil samples may increase. To define the ground water level, the rain infiltration case can be considered.

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliği; hızla artan dünya nüfusuyla birlikte ihtiyaçların daha hızlı, ekonomik ve güvenli karşılanabilmesi adına sürekli gelişim içindedir. Son yıllarda deneysel çalışmaların yaygınlaşması ve deney aletlerinin teknolojinin gelişmesiyle birlikte modernleşmesiyle, araştırmalar yaygınlaşmış ve klasik zemin mekaniği teorilerine alternatifler üretilmiştir. Doygun olmayan zemin mekaniği üzerine yapılan çalışmaların sayısı da bu gelişmelere paralel olarak son yıllarda artmıştır.

Klasik zemin mekaniği zeminin doymun durumda olduğunu kabul ederek taşıma gücü, sızma, şev stabilitesi, oturma vb. analizler yapmaktadır. Analiz yapılırken seçilen parametreler, zemin boşluklarının tamamının suyla dolu olduğu kritik durumdur. Bu da yeraltı suyunun olmadığı ya da zemin yüzeyinden çok aşağıda gözlemlendiği zeminlerde yapılan hesapların çok güvenli olmasına yol açmaktadır. Doygun olmayan zemin mekaniği üzerine yapılan çalışmalar, zeminin kayma mukavemetini klasik zemin mekaniği kabullerine göre arttıran parametrelerin elde edilmesini ortaya koymuştur.

Doğal ya da insan eliyle oluşturulan şevlerin stabilitesi elde edilen güvenlik sayısıyla belirlenir. Klasik zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan uzun dönem şev stabilite analizleri için kullanılan parametreler efektif kohezyon ve efektif kayma mukavemeti ağısıdır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayısı, gerçekte olan duruma göre çok fazla güvenli tarafta kalınmasına yol açmaktadır. Birçok insan aşırı güvenli tarafta kalmayı kabul edip, doymun olmayan zemin mekaniğinin gereksiz olduğunu düşünmektedir. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar doymun zemin ile doymun olmayan zemin mekaniği arasında ciddi farklar olduğunu ortaya koymuştur [1].

Doygun olmayan zemin mekaniği ile ilgili çalışmalar, son yıllarda yoğunlaşmıştır. Bunun en önemli nedeni ilk paragrafta da belirtildiği üzere laboratuvar şartlarında meydana gelen gelişmelerdir. Bu gelişmeler, doymun olmayan zemin mekaniği parametrelerinin daha kolay ve yaygın belirlenmesini sağlamıştır. Doygun olmayan

zemin mekaniği kabullerine göre yapılan şev stabilite analizlerinde elde edilen güvenlik sayısının; klasik zemin mekaniği kabullerine göre yapılan analizlere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiş ve bunun nedeninin hesaplara katılan matrik emme basıncı olduğu ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında zeminlerin kayma mukavemetine etkisi detaylı bir şekilde anlatılacak matrik emme basıncı; zeminin su tutma potansiyeli olarak tanımlanabilir. Doygun olmayan zeminlerin davranışını belirleyen diğer bir kavram da zemin su karakteristik eğrisidir (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Zemin su karakteristik eğrisi, matrik emme basıncının, zeminin doygunluk derecesi, su muhtevası veya hacimsel su muhtevası ile ilişkisiyle elde edilen eğridir. Çalışma kapsamında zemin su karakteristik eğrisi de matrik emme basıncı gibi detaylı bir şekilde ileriki bölümlerde anlatılacaktır.

Araştırma kapsamında; doymun olmayan zemin mekaniği ve klasik zemin mekaniği prensiplerine göre şev stabilite analizi sonuçları incelenecektir. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda analizde kullanılacak zeminlerin mühendislik özellikleri belirlenecektir. Mühendislik özellikleri belirlenecek numuneler için laboratuarda gerekli deneyler yapılacaktır. Laboratuvar deneyleri de iki başlık altında toplanabilir. İlk bölümde klasik zemin mekaniğinde uygulanan deneyler yer almaktadır. Bu deneyler ile numunelerin fiziksel özellikleri ve klasik zemin mekaniğinde kayma mukavemetini belirleyebilmek için kullanılan mühendislik parametreleri belirlenecektir. İkinci bölümde yapılacak deneyler ise zeminin doymun olmayan zemin mekaniği parametrelerini belirleyecek deneylerdir. Basınç plakası isimli deney aletinde eksen kaydırma tekniği kullanılarak yapılan deneyler sonucunda numunelerin matrik emme basıncı ve zemin su karakteristik eğrisi belirlenecektir. Doygun olmayan zemin mekaniği parametrelerinin belirlenmesiyle deneysel çalışmalar son bulmaktadır. A

raştırmanın ikinci kısmını doymun ve doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerini kullanarak şev stabilite analizi yapılması oluşturmaktadır. Yapılan analizler sonucunda kesitler için güvenlik sayıları elde edilecektir. Yeraltı su seviyesi değişiminin; hem doymun hem de doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan analizlerde güvenlik sayısına etkisi incelenecektir. Analizlerde kullanılacak program GeoStudio paket programında yer alan SLOPE/W isimli programdır. Analizler, kesitlerde meydana gelen kuvvetlerin dengesini esas alan limit denge analizi yöntemine göre yapılacaktır.

Araştırma altı bölümde sunulmaktadır. Birinci bölümde çalışmanın amacı ve konusu özetlenmektedir.

İkinci bölüm konuyla ilgili diğr araştırmacıların bugüne kadar ortaya koyduğu çalışmaları özetlemektedir. Bu bölümde doygun olmayan zemin mekaniği ve şev stabilite problemlerinin ve yapılan analizlerin geoteknikteki yeri ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

nc bölümde ise laboratuvar ortamında yapılan deneylerin yapım metotları anlatılacak ve elde edilen mühendislik parametreleri sunulacaktır. Ayrıca farklı araştırmacıların yaptığı deneysel çalışmaların sonuçları da bu bölümde yer alacaktır.

Dördüncü bölümde analizlerde kullanılan GeoStudio isimli programdan bahsedilecektir. Programın kullanılış şekli ve programın kullandığı yöntemler anlatılacaktır.

Beşinci bölümde laboratuvar koşullarında ve farklı araştırmacıların yaptığı çalışmalar sonucunda mühendislik özellikleri elde edilen zeminler modellenecek ve şev stabilite analizleri yapılacaktır. Modelleme için GeoStudio programından yararlanılacak ve farklı zemin çeşitlerine göre güvenlik sayıları elde edilecektir.

Altıncı bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapılacaktır. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalar için öneriler de bulunulacaktır.

2. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMI VE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

Doygun olmayan zemin mekaniği genellikle doygun zeminin özel bir durumu olarak düşünülüp, yapılan hesaplar da doygun zemin parametreleri kullanılarak bir miktar aşırı güvenli tarafta kalmak tercih edilmektedir. Doygun olmayan zemin mekaniğinde 1960'lı yıllarda başlayan ve son on yılda yoğunlaşan çalışmalar sonucunda, doygun zemin ile doygun olmayan zemin arasında ciddi farklar olduğu görülmektedir. Hem yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan ve tam kuru olmayan doğal zeminde, hem de insan eliyle sıkıştırma yolu ile imal edilmiş zeminlerde karşımızda doygun olmayan zemin mekaniği belirlemektedir. Doygun olmayan zeminlerde belirleyici kavramlar olan emme basıncı, geçirimsizlik, zemin su karakteristik eğrisi bu bölüm içerisinde incelenecektir [1].

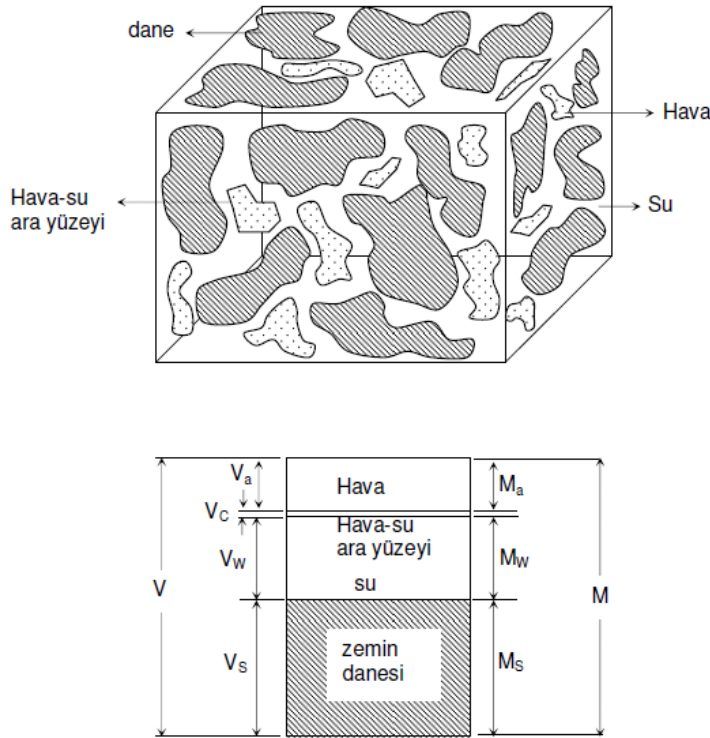
Şev stabilite problemleri genellikle klasik zemin mekaniği teorileri ile yani zemin doygun kabul edilerek çözülmüştür. Ancak 1960'lı yıllardan itibaren yapılan çalışmalar ışığında negatif boşluk suyu basıncının ya da emme basıncının şev stabilitesinde önemli bir rolü olduğu ortaya çıkmıştır [2]. Son yıllarda gelişen teknolojiyle beraber negatif boşluk suyu basıncının ölçülmesi kolaylaşmış olup, özellikle yer altı suyu seviyesinin çok derinde olduğu durumlarda negatif boşluk suyu basıncının kayma mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı ortaya çıkmıştır [3]. Bölümün ikinci kısmında kayma mukavemeti teorisi incelenecektir. Bölümün üçüncü kısmında şevlerin stabilitesi ile ilgili geliştirilmiş çalışmalar ve farklı araştırmacıların ortaya koydukları teoriler irdelenecektir.

2.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri

Klasik zemin mekaniğinde zeminlerin katı (dane), gaz (hava) ve sıvı (su) olmak üzere üç fazdan oluştuğu kabul edilmektedir [4]. Eğer zemin boşluklarının %98'i ve daha fazlası su ile doluyorsa zemin boşluklarında yer alan hava kabarcıkları ayrık konumdadır. Hava kabarcıklarının birbirleriyle doğrudan bağlantılarının olmadığı durumdaki zeminler doygun zeminler olarak adlandırılırlar. Eğer su boşluk hacminin

%95 ya da daha altında bir hacme sahipse, zemin boşluklarında yer alan hava ayrık konumdan çıkar ve sürekli konuma geçerek doygun olma özelliklerini yitirir. Bu tür durumdaki zeminler doygun olmayan zemin olarak adlandırılırlar [1].

Doygun olmayan zeminlerin de genel olarak üç fazlı oldukları kabul edilmiştir. Ancak son dönemde yapılan çalışmalar bu üç faza ek olarak su ile hava arasında oluşan ve su hava ara yüzeyi (contractile skin) olarak adlandırılan çok ince bir tabakanın da gözlemlendiğini ortaya çıkarmıştır. Doymun olmayan zeminlerin kütle hacim ilişkilerini incelerken, su hava ara yüzeyi (contractile skin) çok küçük bir hacme sahip olduğu için ihmal edilerek su fazının bir parçası olduğu varsayılır. Ancak gerilme durumunda su hava yüzeyi bir çekme gerilmesi meydana getirdiğinden ve elastik bir membran davranışı gösterdiğinden dolayı su fazından ayrı olarak bağımsız bir faz olarak davranır [3]. Şekil 2.1 zeminin dört fazlı olduğu durumdaki idealleştirilmiş zemin diyagramını doymun olmayan bir zemin elemanını temsili olarak göstermektedir.



Şekil 2.1 : Suyu doymun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi [8].

Yeraltı su seviyesi doymun zeminle doymun olmayan zemini birbirinden ayıran en önemli göstergedir. Yeraltı su seviyesinin altında boşluk suyu basıncı pozitifdir ve zemin genellikle doymundur. Yeraltı su seviyesinin üzerinde ise boşluk suyu basıncı genellikle negatiftir ve yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan tüm bölge vadoz bölge

(vadoz zone) olarak adlandırılır. Yeraltı su seviyesinin hemen üzerinde yer alan ve kalınlığı zemin türüne göre 1m'den daha az olabilen ya da 10m'ye kadar çıkabilen bölge kapiler sınır (capillary fringe) olarak isimlendirilir. Bu bölgenin doygunluk derecesi %100'e yakın değerdedir. Bu bölgede hava fazı ayrıık durumda bulunmasına rağmen, su fazı sürekli konumdadır. Kapiler bölgenin üzerinde yer alan bölge de doygunluk zemin türüne bağılı olarak %20 ile %90 arasında değişmekte ve hem hava fazı hem de su fazı sürekli konumda bulunmaktadır. Bu iki akışkanlı faza sahip olan bölgenin üzerinde de suyun süreksiz konuma geçtiğı ancak havanın sürekli konumda bulunduğı kuru bölge yer almaktadır [5]. Şekil 2.2 de yukarıda bahsi geçen bölgeler gösterilmektedir.

Doygun Olmayan Zemin



Şekil 2.2 : Doymun zemin ve doymamış zemini ayıran bölgeler [5].

Doymun olmayan zeminler geotekniğin üç temel başlığı altında incelenirler. Sızma, kayma mukavemeti ve hacimsel değişim. Doymun olmayan zeminlerin inceleme alanları;

- Şişen zeminler
- Vadoz bölgede; kirlenme, atıkların hareketi, katı atık depolama sahaları inşası
- Yoğun yağışlardan sonra meydana gelen şev stabilite problemleri
- Gevşek sıkıştırılmış dolguların stabilite problemleri
- İstinat yapıları arkasında yer alan kohezyonlu dolgular
- Vadoz bölgede yer alan temellerin taşıma kapasitesi [6]

Doymun olmayan zeminin bugüne kadar detaylı incelenememesinin ana nedeni doymun olmayan zemin mekaniğinin temel parametresi olan matrik emme gerilmesi

ölçümü için gerekli olan teknolojinin geç gelişmiş olmasıdır. Günümüzde geliştirilmiş olan teknoloji sayesinde doygun olmayan zemin mekaniği üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

2.1.1 Emme gerilmesi kavramı ve ölçülmesi

Emme gerilmesi, doygun olmayan durumdaki zemindeki gerilme durumu değişkenleri arasında önemli bir konuma sahip olup, doygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerini etkileyen temel parametrelerden bir tanesidir [3,7]. 1900’lü yılların başından itibaren emme basıncı teorik olarak incelenmiş ve doygun olmayan zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine ait çalışmalara İngiltere’de 1948 yılında Croney ve Coleman tarafından başlanmıştır. 1965 yılında zemin mekaniği üzerine gerçekleştirilen sempozyumda Aitchison emme gerilmesini sayısal olarak tanımlamış ve termodinamik denklemlerden elde edildiğini ortaya koymuştur. Zemin emme gerilmesi, genellikle zemin suyunun serbest enerji durumu olarak ifade edilir [3]. Söz konusu bu enerjinin, zemin suyunun kısmi buhar basıncına göre ölçülebileceği Richards tarafından 1965 yılında ortaya konmuştur [3,8]. Ridley 1993 yılında yaptığı çalışmada zemin emme gerilmesini buharlaşma yoluyla zemin matrisinden bir su molekülünü çıkarmak için gerekli enerjinin ölçümü olarak tarif etmiştir [9]. Termodinamik yasalardan yararlanarak zemin emme gerilmesi ve kısmi boşluk suyu buhar basıncı arasındaki ilişki denklem 2.1 ile hesaplanır [8].

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_{w0}\omega_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad (2.1)$$

Denklemde,

ψ = Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme (kPa)

R = Genel gaz sabiti [8,31432 J/(mol K)]

T = Mutlak sıcaklık [273,16 + t^0 (K)]

t^0 = Sıcaklık (^0C)

ν_{w0} = 1/Suyun özgül hacmi [(m^3/kg), ($1/\rho_w$)]

ρ_w = Suyun özgül hacmi ($t^0 = 20\text{ }^0\text{C}$ de $\rho_w = 998\text{ kg/m}^3$)

ω_v = Su buharının moleküler kütlesi (18,016 kg/mol)

$\bar{u}_v$ = Kısmi boşluk suyu buhar basıncı (kPa)

$\bar{u}_{v0}$ = Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı (kPa)

Denklem 4.1’de yer alan $\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}$ oranı rölatif nem olarak adlandırılır. Referans sıcaklık olarak $t^0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ alınırsa sabit değer olarak 135022 kPa elde edilir. Denklem aşağıdaki ifadeyi alır.

$$\psi = -135022 \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad (2.2)$$

Doygun olmayan zeminin toplam emme gerilmesi (ψ), matrik emme (kılcal emme) ve ozmatik emme (eriyik emme) olarak adlandırılan parametrelerin toplamı olarak elde edilir.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.3)$$

Denklemde,

$(u_a - u_w)$ = Matrik emme

u_a = Boşluk hava basıncı (kPa)

u_w = Boşluk suyu basıncı (kPa)

π = Osmatik emme (kPa)

Boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emme doygunluk derecesi, dane dağılımı ve onun yansıttığı boşluk çapı dağılımının bir başka deyişle boşluklarda oluşan menisklerin etkinliğinin bir göstergesidir [1]. Matrik emme, buharlaşma gerçekleşmeden zemin boşluk suyunu ortamdan uzaklaştırmak için gerekli enerji olarak da tanımlanır [8]. Matrik emme, çevresel etkilerle yakından ilgilidir ve çevresel değişimlerden etkilenir.

Daha sonraki bölümlerde de gösterileceği üzere, bir şev mevcut olan stabilitesini yeraltı su seviyesinde meydana gelen artış nedeniyle matrik emme basıncında gerçekleşen azalma sonucu kaybedebilir. Yeraltı suyu seviyesindeki artışa neden olabilecek sebeplerden bir tanesi çevresel bir etki olan yoğun yağış olabilir.

Ozmatik emme, boşluk suyu içerisindeki eriyik tuzların saf su ile olan basınç farkı olarak tanımlanır [7]. Ozmatik emme boşluk suyu içerisinde yer alan tuz içeriği ile

direk olarak ilgilidir ve zeminin doygunluk derecesi azaldıkça ozmatik emmenin önemi artar. Ozmatik emmede meydana gelen değişim, zeminin mekanik özelliklerini etkiler [1].

Ozmatik emme, her ne kadar zeminlerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olsa da, ozmatik emmede meydana gelecek değişimler, matrik emme değişimleri kadar önemli değildir. Aynı zamanda zeminin toplam emme basıncını ozmatik emme olmadan tanımlamak daha kolay olduğundan ve zemin içerisinde yer alan çözünmüş tuz miktarı genel olarak az olduğu için ozmatik emme ihmal edilir ve zemin toplam emme basıncı matrik emmeye eşit olur.

Zeminlerde çeşitli nedenlerle meydana gelen kimyasal kirlenme sonucunda boşluk suyunda yer alan tuz oranında önemli bir artış meydana geliyorsa ya da tuz oranı yüksek zeminlerde yapılan inşaatlarda ozmatik emme hem klasik zemin mekaniği analizlerinde hem de doygun olmayan zemin mekaniği analizlerinde dikkate alınmalıdır [6].

Doygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerinin bilinebilmesi için zemin emme gerilmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Ozmatik emmenin ölçümü hem zor, hem de zeminlerde genel olarak tuz oranı önemli bir etki yaratmayacak kadar az olduğu için, toplam emme gerilmesi matrik emmeye eşit kabul edilir.

Doygun olmayan zeminlerde efektif gerilmeleri bulabilmek için boşluk suyu basıncı ve boşluk hava basıncının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için de en etkili yol doğrudan ölçüm yapmaktır [1].

Doygun olmayan zemin parametrelerinin belirlenmesi üniversite ve araştırma laboratuvarlarında gerçekleşmekte ancak ekonomik olarak yüksek bulunduğu için birçok mühendislik projesinde ihtiyaç duyulmamaktadır [10].

Matrik emme basıncının belirlenmesi, doygun olmayan zeminlerin gerilme durumu değişkenlerinin belirlenebilmesi için çok önemlidir. Ancak pratik olarak negatif su basıncının kontrolü ve ölçülmesi büyük kısıtlamalar içermektedir. Bu kısıtlamaları engellemek için Hilf 1956 yılında eksen kaydırma tekniğini geliştirmiş ve bu yöntemden matrik emme basıncının ölçülmesinde yararlanılmaya başlanmıştır [5].

Eksen kaydırma tekniği, doygun olmayan zeminlerde matrik emme basıncını, yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanılarak ölçme ve kontrol altında tutma

işlemdir [7]. Laboratuarda kullanılan ve toplam emme, matrik emme ve ozmatik emme değerlerini kontrol eden ve ölçen yöntemler Çizelge 2.1 de özetlenmiştir [1].

Çizelge 2.1 : Emme ölçümü için geliştirilmiş yöntemler [1].

ÖLÇ. SİSTEMİ	EMME	ÖLÇÜLEN DEĞİŞKEN	ARA. (kPa)	DENGE SÜR.	ÖLÇ. YERİ	KAYNAK
Transistörlü psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-70000	Dak.	Lab/Arazi?	Truong& Holden, 1995
Termokupl psikrometre	Toplam	Bağıl nem	100-8000	Dak.	Lab/Arazi?	Brown& Collins, 1980
Çiğlenme noktası psikrometresi	Toplam	Bağıl nem	30000-300000	Dak.	Lab	ASTM
Süzgeç kağıdı (temas yok)	Toplam	Su içeriği	400-30000	7-14 gün	Lab/Arazi	Al-Khafaf& Hanks, 1974
Süzgeç kağıdı	Matrik	Su içeriği	30-30000	7 gün	Lab/Arazi	Gardner, 1930
Emme plakası	Matrik	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Saat	Lab	Dineen, 2000b
Basınç plakası/memb	Matrik	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-10000	Saat	Lab	Hilf, 1951
Tansiyometre	Matrik	Boşluk suyu gerilmesi	0-90	Dak.	Lab/Arazi	Soil Mois.Equ.
TDR Sonda	Matrik	Su içeriği	0-1500	Saat	Lab/Arazi	Cook & Fredlund, 1998
Eriyik tansiyometresi	Matrik/T oplam	Boşluk suyu gerilme etkisi	0-1500	Saat	Lab/Arazi	Bocking& Fredlund, 1979
Emme sondası	Matrik/T oplam	Boşluk suyu gerilmesi	0-1500	Dak.	Lab/A razi?	Ridley& Burland, 1993
Alçı blok	Matrik	Elektiriksel direnç	30-30000	Hafta	Lab/A razi	Aitchison &Richard, 1965
Isıl iletkenlik	Matrik	İletkenlik	0-300	Hafta	Lab/Arazi	Sattler& Fredlund, 1989
Sızma	Ozmatik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Manheim, 1966
Süzme	Ozmatik	İletkenlik	30-3000	Saat	Lab	Manheim, 1966

Bu tez kapsamında, matrik emme basıncını kontrol altında tutmak ve ölçmek için basınç plakası isimli deney uygulanmış olup, deneyin detayları üçüncü bölümde verilecektir.

2.1.2 Doygun olmayan zeminlerde gerilme durumu değişkenleri

Terzaghi'nin efektif gerilmeler üzerinde yaptığı çalışmalardan sonra, zeminlerin mühendislik özelliklerini belirleyen temel yaklaşım efektif gerilmelerin yorumlanması olmuştur [11]. Birçok mühendislik problemin çözümünde efektif gerilmelerin hesaplanması büyük bir öneme sahiptir. Doygun durumdaki zeminlerde Terzaghi, efektif gerilmeyi toplam gerilme ile boşluk basıncı arasındaki fark olarak tanımlamış ve zemin iskeletinde aktif olan gerilme olarak adlandırmıştır [26].

Daha sonraki yıllarda, doymun olmayan zemin mekaniğinde de efektif gerilme yaklaşımının uygulanabileceği ortaya çıkmıştır. Ancak, doymun zeminlerden farklı olarak, doymun olmayan zemin mekaniğinde düşünülmesi gereken iki temel parametre vardır. Birincisi, boşluk hava basıncı, ikincisi de boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emmedir. Bishop bu iki önemli farklılığı dikkate alarak 1959 yılında efektif gerilmeyi denklem 2.4 ile tanımlar.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w) \quad (2.4)$$

Denklemde,

σ' = Efektif gerilme

σ = Toplam gerilme

u_a = Boşluk hava basıncı

u_w = Boşluk suyu basıncı

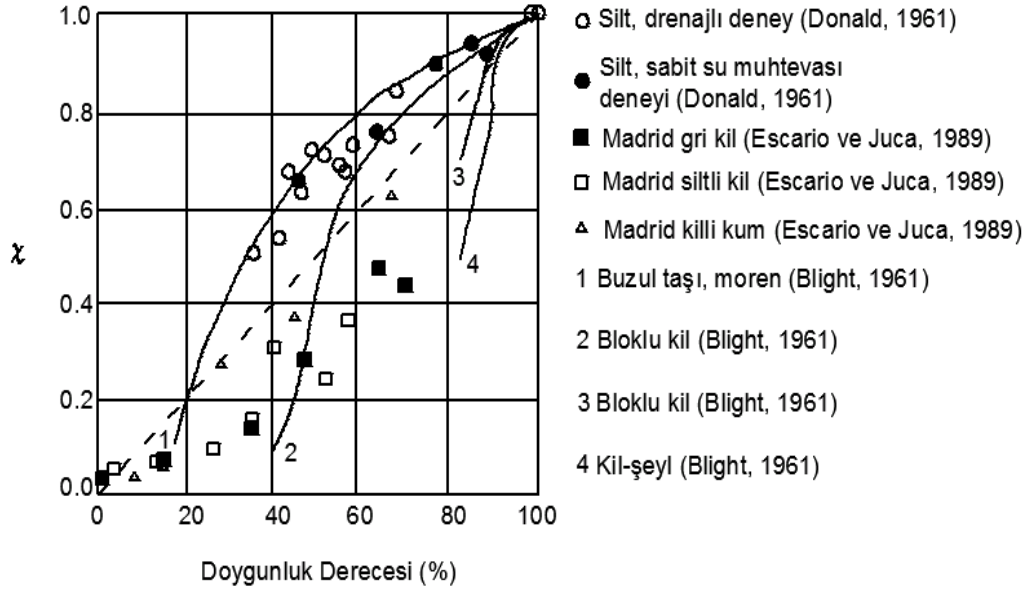
$u_a - u_w$ = Matrik emme

x = Efektif gerilme katsayısı

Efektif gerilme katsayısı x zeminin doymunluk derecesiyle değişmektedir. Doygun zeminlerde, $x = 1$ olmakta, boşluk hava basıncı ortadan kalkmakta ve pozitif boşluk suyu basıncı görülmektedir [12]. Eşitlik Terzaghi'nin tanımladığı efektif gerilme formülüne dönüşmektedir.

Şekil 2.3 x ile doymunluk derecesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir [5]. Kesme kutusu ya da üç eksenli deneylerin matrik emme basıncı kontrol edilen veya ölçülen numuneler üzerinde uygulanmasıyla elde edilen Şekil 2.3 zeminin doymun durumda

x değerinin 1'e eşit olduğunu göstermektedir. Zemin kuru durumdayken x değeri 0'a eşit olur. Boşluk suyu basıncı ortadan kalkar.



Şekil 2.3 : x ile doygunluk derecesi arasındaki ilişki [5].

Daha sonraki yapılan çalışmalar sonucunda doymun olmayan zemin mekaniğinde kullanılan gerilmeler tensörleri aşağıdaki gibi tanımlanır. Denklem 2.5'de efektif gerilme tensörü gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Matrik emme tensörü de denklem 2.6 ile gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Doygun olmayan zeminlerde gerilme durumu ile ilgili çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmalardan bir tanesi de doymun olmayan zeminlerde gerilme durumu değişkenlerini emme gerilmesi karakteristik eğrisiyle tanımlamaktadır. Lu ve Likos efektif gerilmeyi denklem 2.7 ile tanımlar [13].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2.7)$$

Denkleimde,

u_a = Boşluk hava basıncı

σ = Toplam gerilme

σ' = Efektif gerilme

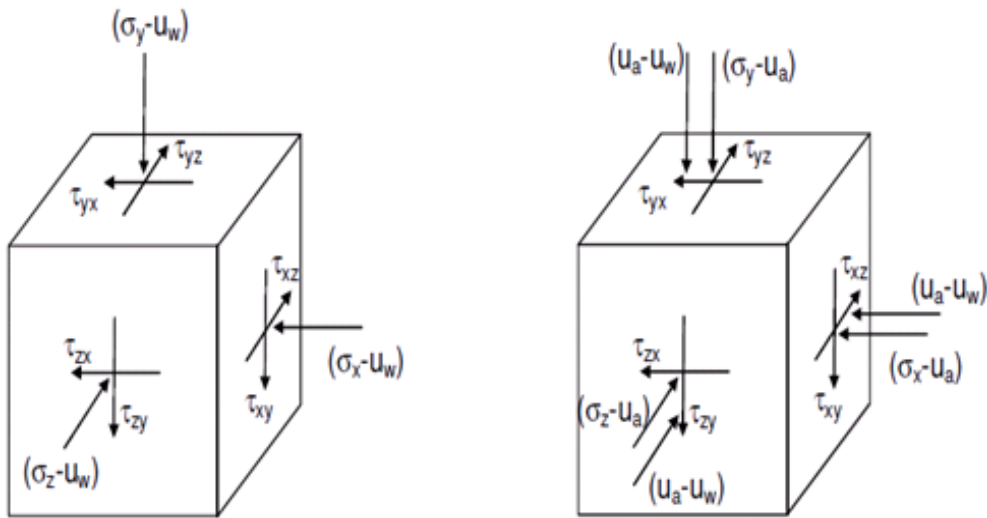
σ^s = Emme gerilmesi karakteristik eğrisi fonksiyonu

σ^s için tanımlanan fonksiyonlar aşağıda verilmektedir.

$$\sigma^s = (u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (2.8)$$

$$\sigma^s = f(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (2.9)$$

Şekil 2.4'de doymun ve doymamış durumlarda kübik elemana etkiyen gerilmeler gösterilmektedir [8].

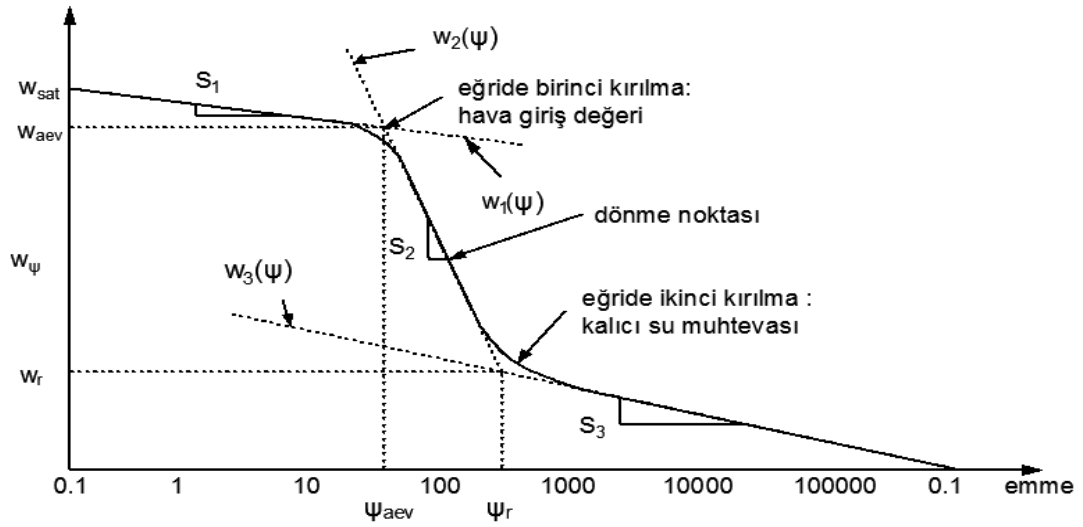


Şekil 2.4 : Doymun ve doymamış zeminler için gerilme durum değişkenleri [8].

2.1.3 Zemin su karakteristik eğrisi

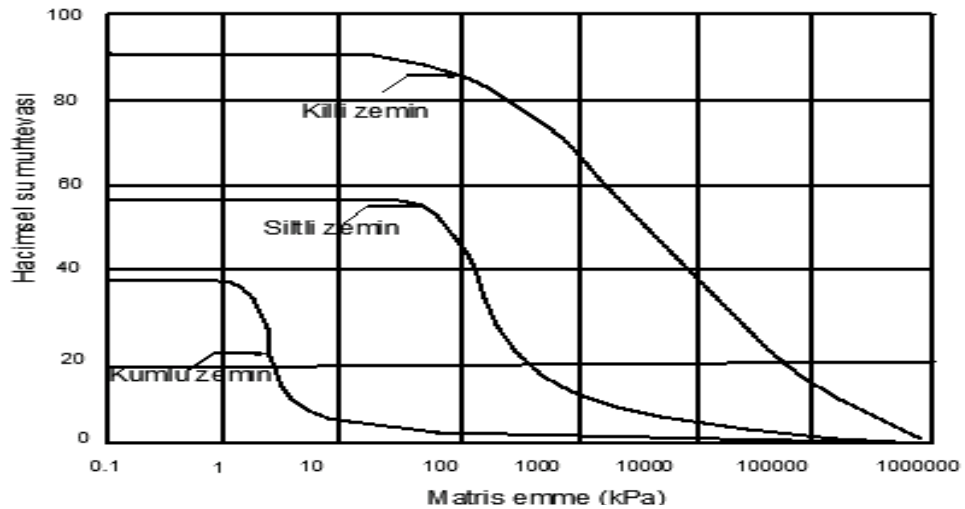
Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC, Soil-Water Characteristic Curve), zemin su muhtevası ve emme arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Doymun olmayan zeminlerin en önemli kavramlarından biri olan zemin su karakteristik eğrisi, zeminlerin kayma mukavemeti, permeabilite, hacimsel değişim, boşluk ve dane dağılımı, su muhtevası ve gerilme durumu değerlerinin belirlenmesinde doğrudan ya da dolaylı olarak rol oynamaktadır.

Şekil 2.5 tipik bir zemin su karakteristik eğrisini göstermektedir. Eğrinin yatay eksenini matris emme değerlerini gösteriyorken, düşey eksenine gravimetrik su muhtevası, hacimsel su muhtevası veya doygunluk derecesi yazılabilir. Doymunluk derecesinin kullanımı hava giriş değeri keskin göstermesi ve doymun olmayan zeminin özelliklerini yakından kontrol eden değışken olması sebebiyle mantıklı olmaktadır [1].



Şekil 2.5 : Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) özellikleri [1].

Şekil 2.5'in de gösterdiği üzere zemin su karakteristik eğrisinden elde edilen iki önemli değeri; hava girişı basıncı değeri ve rezidüel doymunluktur. Emme değeri arttıkça zeminin bir süre doymunluğunu koruduğu daha sonra boşluklardaki havanın sürekli hale gelmesiyle hızla doymunluğun azaldığı, daha sonra da rezidüel yani kalıcı doymunluğa ulaştığı görülmektedir. Şekil 2.6 zemin su karakteristik eğrisinin farklı zemin türlerine göre değışimini göstermektedir [9].



Şekil 2.6 : Zemin su karakteristik eğrisinin zemine göre değışimi [9].

2.2 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti Teorisi

Zemin mekaniğinin en önemli konusu olan kayma mukavemeti, zemin mekaniğinde karşılaşılan birçok problem incelenirken karşımıza çıkmaktadır. Zemin mekaniğinde yapılan araştırmaların önemli kısmı bu alanda yapılmış olmasına rağmen bugün de tümüyle anlaşılamayan yanları vardır [1].

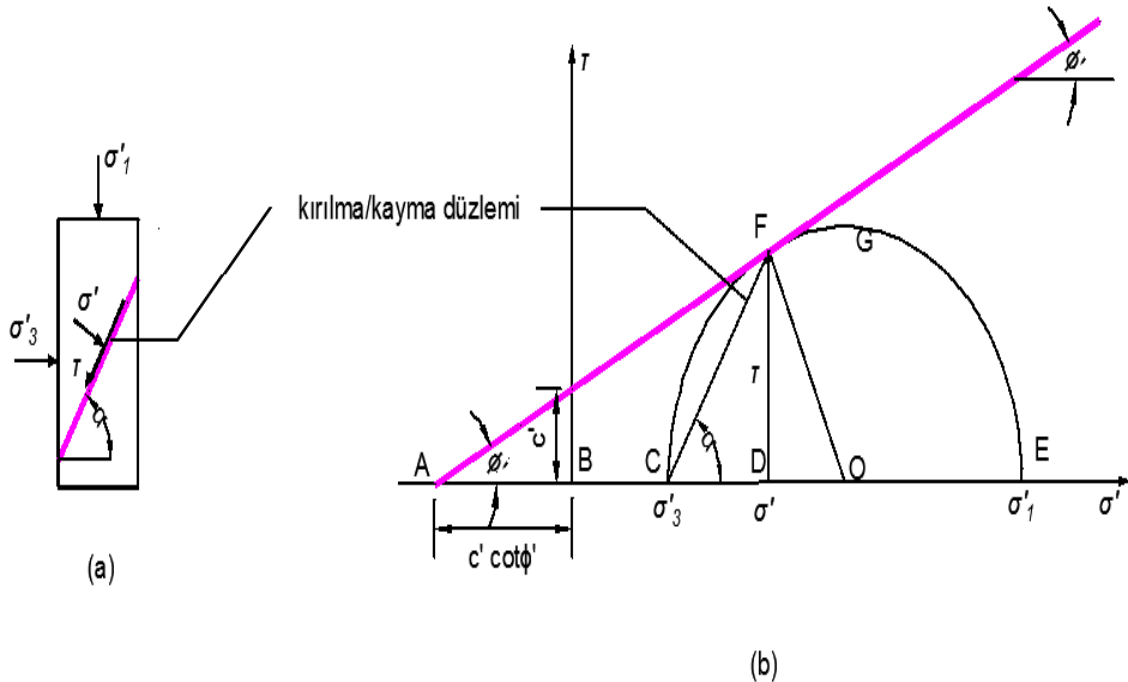
Doygun zeminlerin kayma mukavemeti Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre denklem 2.10 ile tanımlanır.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi' \quad (2.10)$$

Denklemde, τ = kayma mukavemeti, c' = efektif kohezyon, ϕ' = efektif kayma mukavemeti açısı, σ_n = toplam normal gerilme, $(\sigma_n - u_w)$ = efektif gerilme, u_w = boşluk suyu basıncı olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 2.7'de klasik zemin mekaniğinde kullanılan Mohr-Coulomb hipotezine göre kırılma durumu gösterilmektedir.

Doygun zeminlerin kayma mukavemeti tek değişkeni olan efektif gerilmeyle tanımlanırken, doygun olmayan zeminlerde efektif gerilmenin yanında matris emme de değişken olarak zeminlerin kayma mukavemetinde önem kazanmaktadır.

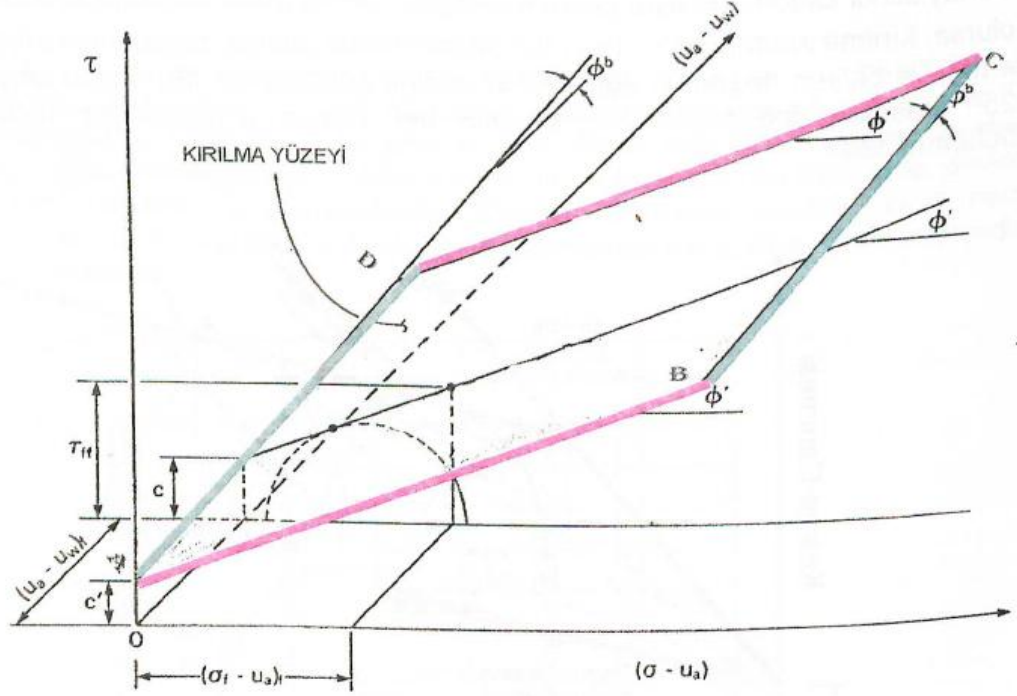


Şekil 2.7 : Mohr- Coulomb kırılma hipotezine göre kırılma durumu [1].

Fredlund tarafından 1978 yılında önerilen eşitlik aşağıda verilmektedir.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2.11)$$

Şekil 2.8 doygun olmayan zeminde kırılma yüzeyini göstermektedir.



Şekil 2.8 : Doygun olmayan zeminde kırılma yüzeyi [1].

Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemetini elde edebilmek için ampirik formüllerden ya da deneysel çalışmalardan yararlanılır. Deneysel çalışmalar, emme gerilmesinin kontrolü yada ölçülmesi tekniğine dayanarak modifiye edilmiş üç eksenli hücrede ya da kesme kutusu ile yapılabilir. Bunun yanında deneysel veya ampirik yöntemlerle elde edilmiş olan zemin suyu karakteristik eğrisi ve doygun olmayan zemin mekaniği parametreleri ile doygun olmayan zeminin kayma mukavemeti belirlenebilir.

Doygun olmayan zemin mekaniğinde yapılmış çalışmalar ikiye ayrılır. Birincisi, deneysel sonuçlara göre düzeltilmiş kayma mukavemeti eşitliklerini ikincisi de zeminin indeks özellikleri ile ya da doygun olmayan zemin davranışıyla ilgili kayma mukavemeti eşitliklerini verir.

Eğer deneysel çalışma imkanı yoksa ampirik eşitlikler zeminin kayma mukavemetini elde edebilmek için etkili bir yöntemdir.

Çizelge 2.2 her iki yöntemle yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiş eşitlikleri göstermektedir [14].

Çizelge 2.2 : Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti eşitlikleri [14].

<i>Geliştiren</i>	<i>Durum</i>	<i>Kayma Mukavemeti Eşitlikleri</i>
Fredlund (1978)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$
Shen ve Yu (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\left(\frac{1}{1 + (u_a - u_w)d}\right)\tan\phi'$
Shen ve Yu (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\left(\frac{1}{\cot\alpha + \frac{(u_a - u_w)}{\beta_1}}\right)\tan\phi'$
Vanapalli (1996)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + [(u_a - u_w)\theta^K]\tan\phi'$
Vanapalli (1996)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\left[\tan\phi' \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\right]$
Oberg ve Sallfors (1997)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(\tan\phi')(S)]$
Bao (1998)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\zeta(\tan\phi')$ $\zeta = \frac{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$
Khalili ve Khabbaz (1998)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi'(u_a - u_w)[(\lambda'(\tan\phi'))] \lambda' = \left\{\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b}\right\}^{-0,55}$
Rassam ve Cook (2002)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \psi\tan\phi' - \varphi(\psi - \psi_e)^\beta$ $\varphi = \frac{\psi_r\tan\phi' - \tau_{sr}}{(\psi_r - \psi_e)^\beta}$ $\beta = \frac{\tan\phi'(\psi_r - \psi_e)}{\psi_r\tan\phi' - \tau_{sr}}$
Tekinsoy (2004)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \tan\phi'(\psi_e + P_{at})\ln\left[\frac{\psi + P_{at}}{P_{at}}\right]$
Lee (2005)	Düzeltilme	$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan\phi'$ eğer $(u_a - u_w) \leq AEV$ $\tau = c' + [(\sigma - u_a) + AEV]\tan\phi' + [(u_a - u_w) - AEV]\theta^K[1 + \lambda[(\sigma - u_a)]\tan\phi'$ eğer $(u_a - u_w) \geq AEV$
Garven ve Vanapalli (2006)	Tahmin	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + [(u_a - u_w)\theta^K]\tan\phi'$ $K = -0,0016I_p^2 + 0,0975I_p + 1$
Vilar (2006)	Düzeltilme	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \frac{(u_a - u_w)}{[a + b(u_a - u_w)]}$ $\frac{1}{a} = \tan\phi' \quad b = 1/(c_{ult} - c')$

2.3 Şevlerin Stabilitesi (Duraylılığı)

Şev genel anlamda “yatay ya da mevcut arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan kitle” olarak tanımlanabilir [3]. Geotekniğin temel ilgi alanlarından olan şev stabilitesi problemleri, bütün dünya üzerinde gerek maddi gerekse ölümle sonuçlanan zararlara yol açabilmektedir. Deprem ve selle beraber en çok maddi ve can kaybına neden olan doğal felaketlerden şev hareketleri, deprem ve sel gibi felaketlerden daha sık aralıklarla karşılaşıldığı için toplumları daha fazla etkilemektedir. Ancak son dönemde meydana gelen iklimsel değişiklikler şev hareketlerinin etkinliğinin artmasına neden olmuştur [2]. Bu nedenle şev hareketleri ile ilgili çalışmalar

geoteknik alanında yaygınlaşmaktadır. Afet İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre, Türkiye topraklarının yüzde 25'i heyelan tehlikesiyle karşıya karşıyadır ve bu topraklarda yaşayan yaklaşık 8 milyon insan risk altındadır [16]. Tüm araştırmalar şev hareketlerinin dünya ve ülkemizde önemli maddi ve ölümlü zararlara yol açtığını göstermektedir. Şev hareketlerinin neden ve sonuçlarını sayısal verilerle açıklamak geoteknik alanında çalışan mühendislerin temel görevlerindendir.

Şev hareketine ortamdaki mevcut dayanımın ortaya çıkan kuvvetleri karşılayamaması neden olmaktadır. Şevin kayma mukavemetindeki azalma ya da zemin ortamında ki gerilmelerde meydana gelen artış sonucunda şevde stabilite problemi meydana gelmektedir. Şev stabilitesi problemlerine neden olan bazı etkenler aşağıda sunulmaktadır.

- İklimsel değişiklikler
- Depremler ve volkanik hareketler
- Zeminin aşınması ve yıpranması
- Yeraltı su seviyesinde meydana gelen değişiklikler
- Bitki örtüsünün kaldırılması veya doğal yollarla kaybı
- Şev üzerindeki sürşarj yüklerinin artması
- Doygun olmayan zeminin su ile dolması
- Kazık çakma, trafik gibi yapay titreşimler
- Zeminde meydana gelen şişme ve büzülme sonucu oluşan yıpranma

Görüldüğü üzere şev hareketleri doğal etkenler sonucu oluşabildiği gibi, insanların etkileriyle de meydana gelebilmektedir. Yeraltı suyunda meydana gelen değişimler şevlerin hareketini etkileyen en önemli faktördür. Ülkemizde meydana gelen şev göçmelerinin önemli bölümünün bahar aylarında görülmesi, bahar aylarında yoğun yağışların gerçekleşmesinin sonucudur [17]. Bu nedenle şev göçmelerinde yoğun yağış miktarları ve dönemleri belirleyici olmaktadır. Yeraltı su seviyesindeki değişimler dikkatle takip edilmelidir.

2.3.1 Şev hareketlerinin sınıflandırılması

Mühendislik amaçlı şevlerde meydana gelen hareketler şev duyarsızlığı olarak adlandırılırlar [18]. Zeminde, kayada ve geçiş malzemesinde beliren kitle hareketleri günümüzde beş ana gruba ayrılmıştır. Çizelge 2.3 Varnes (1978) tarafından yapılmış kitle hareketleri sınıflandırmasını göstermektedir [2]. Daha sonra çeşitli

araştırmacılar tarafından farklı sınıflandırmalar yapılmış olsa da Varnes'in sınıflandırması hala geçerliliğini sürdürmektedir.

Çizelge 2.3 : Şev göçmeleri için Varnes (1978) mühendislik sınıflandırması [2].

<i>HAREKET TİPİ</i>	<i>İNCE DANELİ</i>	<i>İRİ DANELİ</i>
DÜŞME	Zemin düşmesi	Moloz düşmesi
DEVİRİLME	Zemin devrilmesi	Moloz devrilmesi
DÖNEL	Zemin göçmesi	Moloz göçmesi
KAYMA		
DÜZLEMSEL	az birimli	Moloz blok kayması
KAYMA	çok birimli	Moloz kayması
YANAL		
YAYILMA	Toprak yayılması	Moloz yayılması
AKMA	Zemin akması (sünme)	Moloz akması
KARMAŞIK	İki veya fazla tip hareketin karışımı	

Düşme, devrilme, kayma, yayılma ve akmanın dışında bu hareketlerin iki veya daha fazlasının karışımından meydana gelen şev hareketleri karmaşık hareketler olarak adlandırılırlar.

2.3.1.1 Düşme

Düşmeler, bir yamaçtan aşağıya hızla düşen, yol boyunca hızla yuvarlanan ve hatta havada savrulan zemin veya kaya parçalarından oluşan yamaç yenilmeleridir [19].

Düşmede beliren ivme yer çekimi ivmesine eşit olmaktadır [2].

Harekete neden olan faktörler ise erozyon, süreksizliklere uygulanan su ve buz basınçları, insan eliyle yapılmış olan kazılar ve patlatmalar olarak sıralanabilir.

2.3.1.2 Devrilme

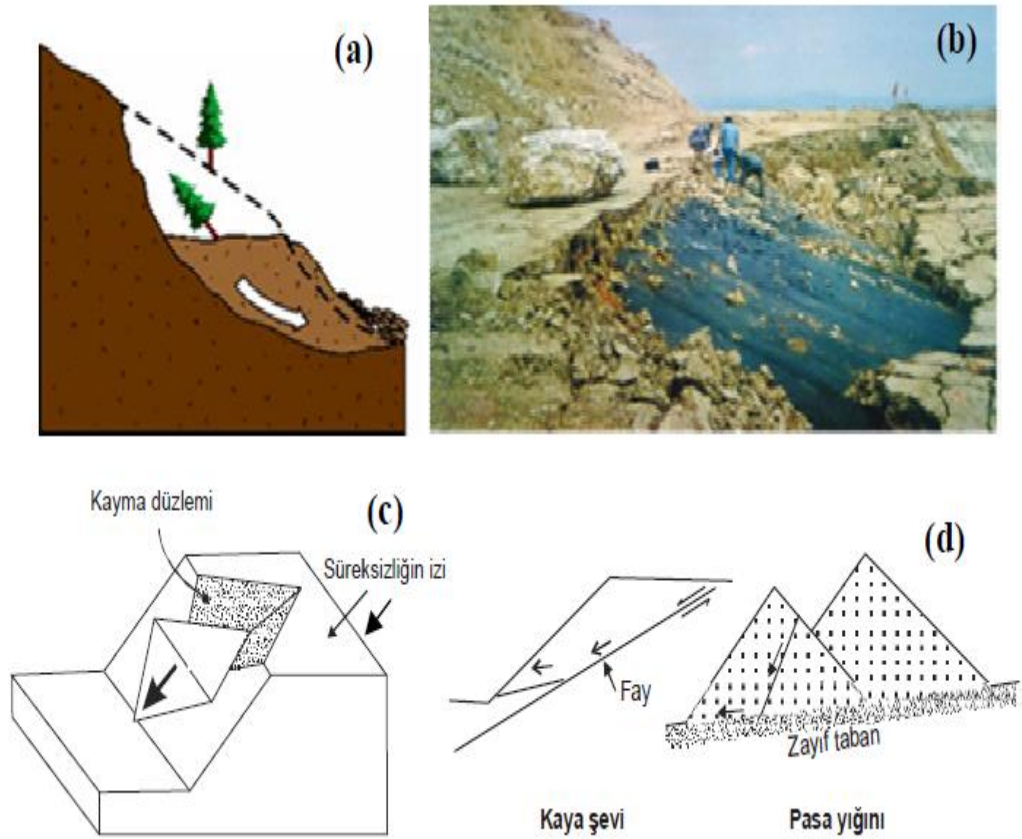
Şevin tersi yönde eğimli ve devamlılığı yüksek süreksizlerin neden olduğu kolonsal elemanların belirli bir dönme noktası üzerinde domino etkisiyle kazı boşluğuna devrilmesi şeklinde gelişen bir duraysızlık mekanizmasıdır [18].

Bir zemin veya kaya kitlesinin yamaç dışına, kendi ağırlık merkezinin altında bir nokta veya eksen boyunca öne doğru dönmesidir [2].

Bükülme devrilmesi, blok devrilmesi ve her ikisinin birlikte gerçekleştiği bükülme-blok devrilmesi olmak üzere üç çeşit devrilme türü vardır.

2.3.1.3 Kayma

Bir kitlenin belirgin kayma yüzeyi, yüzeyleri veya ince ve yoğun bir makaslama bölgesi boyunca yamaç aşağı hareketidir [2]. Kaymalar dönel (daireysel) ve ötelenmeli olmak üzere iki şekilde gerçekleşirler. Dönel kayma türü hem yamaçlarda hem de insan eliyle yapılmış şevlerde en çok karşılaşılan kayma türüdür. İleri derece de ayrılmış kayalarda, zeminlerde açılmış şevlerde, akarsu yataklarında mevcut olan şevlerde, atık alanlarında ve dolgularda karşılaşılr. Ötelenmeli kaymalar ise dayanımı düşük süreksizlerin oluşturduğu tek veya birden fazla zayıflık düzlemi üzerinde gelişen duraysızlıklardır. Ötelenmeli kayma da düzlemsel, kama tipi ve çok yüzeyli kayma tipleri olarak kendi arasında ayrılır. Şekil 2.9'da kayma tipleri gösterilmektedir [18].



Şekil 2.9 : Başlıca kayma türleri: a. daireysel (dönel) ve ötelenmeli b. düzlemsel, c. kama, d. çok yüzeyli kaymalar [18].

2.3.1.4 Yayılmalar

Kohezyonlu zemin ya da kayalarda gerçekleşen yayılma hareketi, üstteki sağlam tabakanın alttaki yumuşak tabaka da batması sonucunda oluşan uzanmadır. Yanal kaya yayılması ve yanal zemin yayılması olmak üzere iki çeşidi vardır [20].

2.3.1.5 Akmalar

Makaslama yüzeylerinin çok sık ancak kalıcı ve belirgin olmadığı, üç boyutlu ve sürekli bir harekettir. Hareket eden kitle içinde hız dağılımı akışmaz bir sıvıdaki gibi andırır [2]. Kayma birim deformasyonlarını sadece kayma düzlemi boyunca değil, her yönde göstermiş olması kaymalardan farkı olarak belirir [19]. Akma hareketlerini tetikleyen en önemli nedenler yamaç eğimi ve su içeriğidir [18].

2.3.2 Şev stabilitesi analizleri

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, şev stabilite analizleri geoteknik mühendisliğinin temel konularındandır. Gerek insan eliyle oluşturulmuş şevlerde gerekse doğal yollarla oluşmuş şevlerde ortaya çıkan hareketler direk olarak insan yaşamını etkilemektedir. Maddi zararlara ya da can kayıplara yol açan şev hareketlerinin nedenlerini ve sonuçlarını ortaya çıkarmak, şev hareketlerine karşı gerekli önlemleri almak ve şev güvenliğini sayısal olarak ortaya koymak bu konuyla ilgilenen bütün disiplinler arasında öncelikli olarak geoteknik mühendislerinin görevidir. Gündelik insan yaşamını bu kadar ilgilendiren şev stabilite analizleri, 1773 tarihinde Coulomb tarafından tanımlanan kohezyon ve kayma mukavemeti açısı üzerinde durulmasıyla ve yine Coulomb tarafından ortaya çıkarılmış olan zemin kütleindeki kayma kaması içerisindeki kuvvetlerin denge durumunun geliştirilmesiyle ilk defa incelenmeye başlanmıştır [20].

Çeşitli araştırmacılar tarafından şev stabilite analizleri için birkaç yöntem geliştirilmiş olsa da en yaygın kullanılan iki yöntem limit denge analizleri ve sonlu elamanlar yöntemidir. Bu yöntemlerden birincisi olan limit denge analizleri, geleneksel olarak kullanılan yöntemdir. Limit denge analizi, olası sayısız göçme yüzeylerinin güvenlik faktörlerinin hesaplanması sonucunda elde edilen en küçük güvenlik faktörlü göçme yüzeyinin bulunması sonucuna dayanır [21]. Basit şekilli kayma yüzeyi kabulüne dayanır ve bu yüzeyin üzerinde kalan zeminin hareket edeceği düşünülür [17].

Dördüncü bölümde analiz sonuçları verilecek olan modeller, limit denge analiz yöntemlerine göre hesap yapan SLOPE/W isimli programla analiz edilmiştir. Bu bölümde Limit Denge Analizine dayanarak geliştirilmiş olan yöntemler anlatılacaktır. Analizlerde bu yöntemlerden yararlanılarak şevlerin güvenlik sayısı klasik ve doygun olmayan zemin mekaniği kabullerine göre elde edilecektir.

Yaygın olarak kullanılan ikinci analiz yöntemi ise sonlu elemanlar metoduna dayanır. Bu yöntemde göçme yüzeyi deformasyon analizi sonucunda elde edilir [21]. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde “gravite arttırma” ve “mukavemet azaltma” teknikleri kullanılır.

İlk çözüm yöntemi olan gravite arttırma yönteminde yer çekim ivmesi şevin göçme durumuna kadar arttırılır. İkinci yöntem olan mukavemet azaltma yönteminde ise, kohezyon ve kayma mukavemeti açısı şev göçünceye kadar azaltılır. Bu yöntemin limit denge analizine göre en büyük avantajı deplasman ve gerilme konturlarının da elde edilebilir olmasıdır [15].

Limit denge analizine dayanarak geliştirilmiş olan bazı yöntemler Çizelge 2.4’de özetlenmiştir.

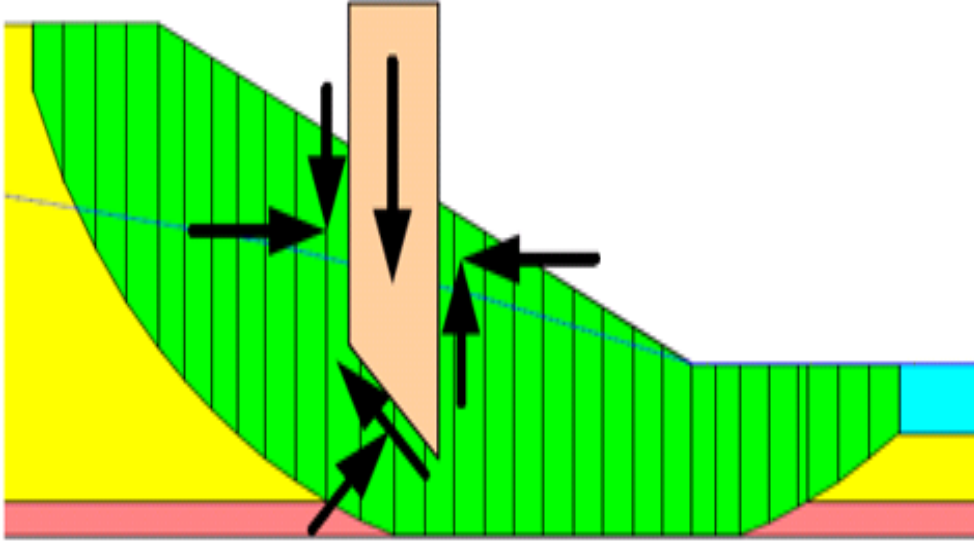
Çizelge 2.4 : Limit denge analizine göre geliştirilmiş bazı yöntemler.

<i>Yöntem</i>	<i>Moment Dengesi</i>	<i>Kuvvet Dengesi</i>	<i>Dilimler Arası Normal Kuvvet (E)</i>	<i>Dilimler Arası Kesme Kuvveti (X)</i>	<i>İçsel Kuvvetlerle İlgili Kabuller</i>
Ordinary ya da Fellenious	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Dilimler arası kuvvet yok
Basitleştirilmiş Bishop	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Yatay
Basitleştirilmiş Janbu	Hayır	Evet	Evet	Hayır	Yatay
Spencer	Evet	Evet	Evet	Evet	Sabit eğim
Morgenstern-Price	Evet	Evet	Evet	Evet	Değişken, kullanıcıya bağlı
Janbu	Evet	Evet	Evet	Evet	Yatay düzeltme faktörü
Sarma	Evet	Evet	Evet	Evet	$X = C + E \tan \phi$

Her biri kayma mekanizmasının dilimlere ayrılması esasına dayanan bu yöntemler arasındaki fark içerdikleri statik eşitliklerin farklı olması ve dilimler arasında hangi kuvvetlerin meydana geldiğidir.

Şekil 2.10’da dilimdeki içsel kuvvetler ve komşu dilimlerle arasında meydana gelen kuvvetler gösterilmektedir.

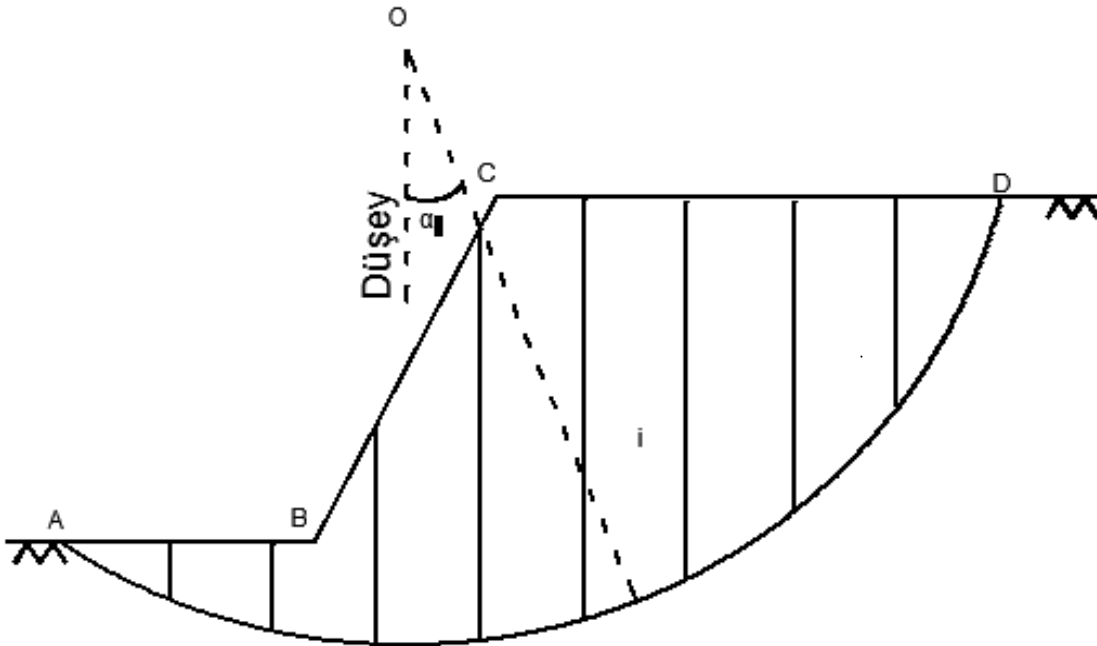
Oluşan bu kuvvetlerin dengesi esasına dayanarak şevlerin güvenlik sayısı hesaplanır. Elde edilen güvenlik sayısına göre şevin stabil olup olmadığı belirlenir.



Şekil 2.10 : Dilimlerin ayrılması ve bir dilim kütlesinde oluşan kuvvetler [22].

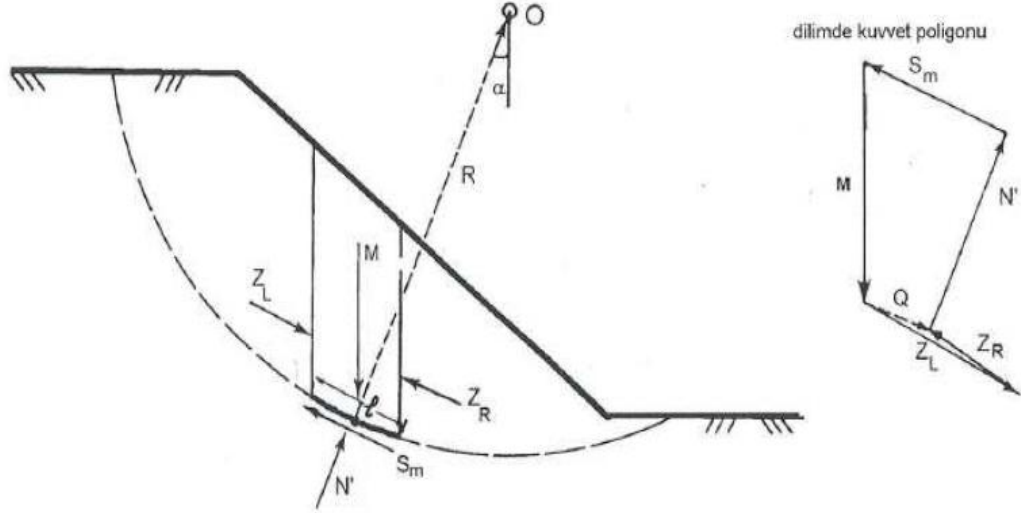
2.3.2.1 Ordinary ya da Fellenious analizi yöntemi

Dilim metotları arasında kullanılan en eski yöntemdir. Bir diğer adı da “İsveç Dilim Yöntemi”dir. Yöntem basit olduğu için de elle hesaplamalarda kolaylık sağlamaktadır. Dilimlerin birbirlerine uyguladıkları kesme kuvveti ve normal kuvvetler ihmal edilmiş olup, mevcut olan kuvvetler; dilim ağırlığı, dilimin tabanında tabana dik olan normal kuvvet ve tabana paralel olan kesme kuvvetleridir [22]. Merkez bir O noktası belirlenir ve O noktasına göre yazılan moment eşitliğinden güvenlik katsayısı bulunur. Kaymanın merkezi O noktası olan silindirik bir bloğun dönmesi şeklinde olduğu kabul edilir [17].



Şekil 2.11 : Şev kesitini oluşturan dilimler [17].

Şekil 2.12’ de bir dilime etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Bu yöntemde dilimler arasında oluşan kuvvetlerin birbirlerini dengelediği kabul edilmiş ve dilimlerin birbirlerine etki etmedikleri ortaya konulmuştur.



Şekil 2.12 : Dilime etkiyen kuvvetler ve kuvvet poligonu [2].

Boşluk suyu basıncının da etkisinin hesaba katılmasıyla Güvenlik Sayısı (GS) hesaplanabilmektedir.

$$GS = \frac{\sum [c'l + (M \cos \alpha - uwl) \tan \phi]}{\sum M \sin \alpha} \quad (2.12)$$

Bu yöntemde, eğer ortamda bulunan boşluk suyu basıncı çok yüksekse ya da yamaç eğimi çok düşükse hatalar aşırı derece de artmaktadır. Ancak diğer yöntemlere göre avantajı olan nokta değişken tabakalı şevlerde mevcut farklı kayma mukavemeti açılarıyla uygulanabilmesidir [2].

2.3.2.2 Basitleştirilmiş Bishop yöntemi

Bu yöntem Profesör Bishop tarafından 1950’li yıllarda Londra Imperial College’ da geliştirilmiştir. Dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alan bu yöntem dilimler arası kesme kuvvetlerini ise ihmal etmişlerdir [22]. Daha sonra yapılan sadeleştirmelerle yöntem Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Güvenlik Sayısı (GS) 2.13’deki gibi hesaplanır.

$$GS = \frac{\sum [c'b + ((M \cdot ub) + \Delta X) \cdot \tan \phi'] / (m_a)}{\sum M \sin \alpha} \quad (2.13)$$

Denklem içinde yer alan m_a değeri ise 2.14 deki gibi elde edilir.

$$m_a = \cos\alpha \left(1 + \tan\alpha \frac{\tan\phi'}{GS} \right) \quad (2.14)$$

b : dilim genişliği,

M : dilim toplam ağırlığı,

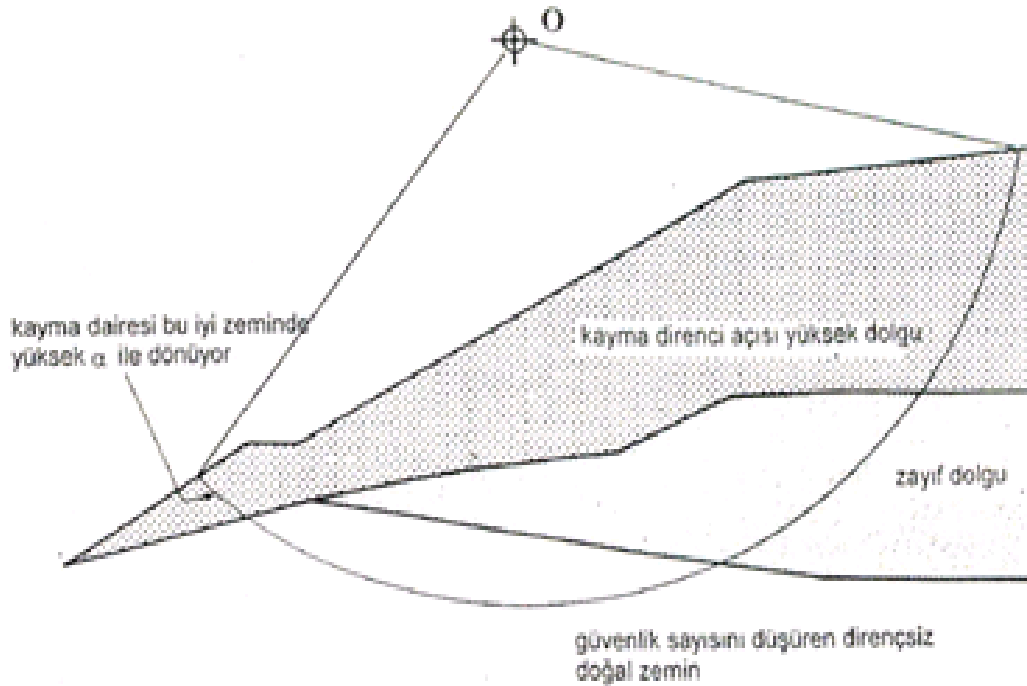
c' : kohezyon,

ϕ' : efektif kayma mukavemeti açısı,

u : dilim tabanına etkiyen boşluk suyu basıncı,

α : dilimin tabanıyla yatay arasındaki açı.

Bu yöntemin en önemli sıkıntısı zayıf bir zeminin üzerine oturan kayma mukavemeti açısı yüksek olan zeminde ortaya çıkması gereken düşük Güvenlik Sayısının maskelenmesidir. Bunun nedeni ise topuktaki yüksek kayma mukavemeti açısı ve negatif α değeridir. Şekil 2.13 sorun çıkaran bir kesiti göstermektedir [2].



Şekil 2.13 : Sorun çıkaran bir kesit [2].

2.3.2.3 Basitleştirilmiş Janbu yöntemi

1956 yılında Janbu tarafından geliştirilen bu yöntem, her biçimde kayma yüzeyine uygulanabilen ve kuvvet dengesi koşullarını sağlayan bir çözüm sunmaktadır [2]. Yöntem daha sonra gözden geçirilerek belirli ayrıntılardan kurtarılmış ve Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi adını almıştır. Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi,

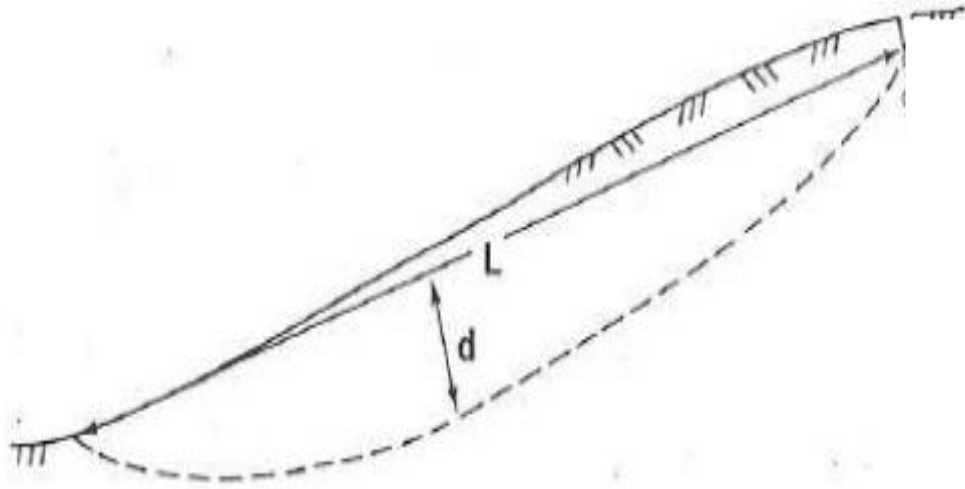
moment dengesini değil yatay kuvvetlerin dengesini hesaba katarak bir Güvenlik Sayısı (GS) elde etmektedir. Dilimler arasındaki kesme kuvvetini ihmal eden bu yöntem dilimlerin birbirine yaptığı etkiyi dikkate alır ve yatay kuvvet dengesinde hesaba katar.

$$F_0 = \frac{\Sigma\{[c'b + (M.ub). \tan\phi']\}. \sec\alpha. k_\alpha}{M \tan\alpha} \quad (2.15)$$

$$GS = f_0 \times F_0 \quad (2.16)$$

f_0 kayma bölgesinin derinliği ve uzunluğuna bağlı bir katsayıdır ve 2.17'deki eşitlikten hesaplanır. Şekil 2.14 kayma bölgesinin derinlik ve uzunluğunu göstermektedir [2].

$$f_0 = 1 + b \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right) \right] \quad (2.17)$$



Şekil 2.14 : Yamaçta uzunluk-derinlik kavramı [2].

2.3.2.4 Spencer yöntemi

1967 yılında Spencer moment ve yatay kuvvetlerin dengesine dayalı iki denklemlilik bir sistem önermiştir. Dilimler arasındaki normal ve kesme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi sabit kabul eden bu sistem moment ve yatay kuvvet dengelerini aynı anda sağlayan oranı bulan iteratif bir yaklaşımdır [20]. Dilimler arasındaki normal ve kesme kuvvetlerinin oranını sabit kabul eden Spencer Yöntemi, bu oranı elde ettiği anda moment ve yatay kuvvet dengelerini sağlayan denklemlerin eşitlendiğini yani ikisinden de aynı Güvenlik Sayısının elde edildiğini savunur. Denklem 2.18 dilimler

arasındaki kesme kuvveti (X) ile normal kuvvet (E) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$X = E\lambda f(x) \quad (2.18)$$

λ Kesme Kuvveti (X) ve Normal Kuvvet (E) arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Spencer (1967) tarafından önerilen yöntemde λ her dilim için sabit olduğundan $f(x) = 1$ olarak alınmaktadır [20].

2.3.2.5 Morgenstern-Price yöntemi

Morgenstern ve Price tarafından 1965 yılında Spencer yöntemine benzer olarak geliştirilmiş bu yöntemde, dilimler arasındaki kesme ve normal kuvvetler farklı fonksiyonlarla tanımlanmıştır (eng book). Spencer yönteminde sabit kabul edilen $f(x)$ bu yöntemde sabit, yarım sinüs, kesilmiş sinüs, trapezoid ve tamamı kullanıcı tarafından üretilmiş fonksiyonlara göre tanımlanması mümkündür [20]. Sabit seçilen fonksiyon bu yöntemi Spencer yöntemi ile eşdeğer yapmaktadır ve aynı güvenlik sayıları elde edilmektedir. Özet olarak Morgenstern-Price Yöntemi:

- Bu yöntem dilimler arası kesme ve normal kuvvetleri dikkate alır.
- Hem moment eşitliğine hem de kuvvet eşitliğine dayalı denklemler elde eder.
- Dilimler arası kuvvetler arasında özellikle bilgisayar programlarında kullanıcıların tercihinə bağlı fonksiyonlar kullanır.

2.3.3 Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizleri

Gelenekselleşmiş şev stabilite analizlerinde emmenin şev stabilitesine etkisi genellikle ihmal edilmektedir. Yer altı su seviyesi çok derinlerde olmasına rağmen negatif boşluk suyu basıncının veya diğer adıyla matrik emmenin şev stabilitesi üzerindeki olumlu etkisi dikkate alınmaz. Bunun nedeni, matrik emmeyi ölçecek teknolojinin çok yaygın olmaması ve geç gelişmiş olmasıdır. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar matrik emmenin zeminlerin kayma mukavemetini arttırdığını göstermiştir. Bu yüzden şev stabilite analizlerinde negatif boşluk suyu basıncının etkilerini düşünmek daha doğru bir çözümün gelişmesini sağlayacaktır.

Doygun olmayan zemin mekaniği için geliştirilmiş Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre emmeye bağlı kayma mukavemeti açısı, ϕ_b , zeminlerin kayma mukavemetinde önemli bir etkiye sahiptir [23]. Zeminlerin şev stabilitesini arttıran

en önemli faktör de kayma mukavemetleridir. Bu yüzden şev stabilite hesaplarında emme güvenlik sayısını arttırıcı yönde bir rol oynamaktadır. Fredlund ve Rahardjo 1993 yılında yaptıkları çalışmayla moment denge denklemlerine ve kuvvet denge denklemlerine göre güvenlik sayısı tanımlamışlardır [24].

$$F_m = \frac{\Sigma \left[c' \beta R + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right\} R \tan \phi' \right]}{\Sigma W x - \Sigma N f} \quad (2.19)$$

$$F_f = \frac{\Sigma \left[c' \beta \cos \alpha + \left\{ N - u_w \beta \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \right\} \tan \phi' \cos \alpha \right]}{\Sigma N \sin \alpha} \quad (2.20)$$

Denklemde, c' = efektif kohezyon, β = dilim taban uzunluğu, R = dairesel kırılma yüzeyinin yarıçapı, N = dilim tabanına etkiyen toplam normal kuvvet, W = dilimin toplam ağırlığı, x = dilimin merkezinden dönme merkezine olan yatay uzaklık, f = normal kuvvetlerin dönme merkezine olan düşey uzaklığı, α = dilim tabanının merkezine teğet geçen doğrunun yatayla yaptığı açı, F_m = Moment dengesine göre elde edilen güvenlik sayısı ve F_f = Kuvvet dengesine göre elde edilen güvenlik sayısı olmaktadır.

Her iki denklemden de anlaşılaçağı üzere, boşluk suyu basıncında meydana gelecek artış güvenlik sayılarında düşüşe neden olacaktır. Boşluk suyu basıncında meydana gelebilecek değişikliklere iklimsel ve çevre şartlarında meydana gelen değişimler neden olmaktadır. Özellikle yağmurların yoğun yağdığı dönemlerde şev stabilite problemleri yoğun olarak gözlemlenmektedir. Zeminin permeabilitesinin, yağmurların şiddetinin, süresinin, yağmur türünün ve anizotropik permeabilitenin sızma oluşumu ve doymun olmayan zeminlerin şev stabilitesi üzerinde önemli etkileri vardır [25].

Doymun olmayan zeminlerde şev stabilitesi analizi üzerine yapılmış bazı çalışmalar Çizelge 2.5’de çalışmaların yıllarıyla beraber gösterilmektedir. Yapılan çalışmaların temeli doymun olmayan zemin mekaniğı kabullerine göre geliştirilmiş olan kayma mukavemeti teorilerine dayanmaktadır.

Dördüncü bölümde yeraltı su seviyesindeki değişimle beraber şevlerin güvenlik sayısında meydana gelecek değişimlerin analiz sonuçları gösterilecektir. Doymun

olmayan zemin mekaniği parametrelerinin zeminlerin kayma mukavemetine etkileri gösterilen analiz sonuçlarıyla beraber anlatılacaktır.

Çizelge 2.5 : Doygun olmayan zeminlerde şev stabilitesi üzerine yapılmış bazı çalışmalar.

<i>Çalışmanın Adı</i>	<i>Araştırmacıların Adı</i>	<i>Çalışmanın Yılı</i>
Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes	Oh & Vanapalli	2010
Methods of slope stability analysis in unsaturated soils	Fredlund & Rahardjo	1993
Studies of rainfall-induced slope failures	Rahardjo, Leong & Rezaur	2002
The research of slope stability based on unsaturated soil theory	Shao, Zhang & Lv	2014
Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability	Ray, Jacobs & Alba	2010
Effect of initial suction on stability of unsaturated soil slopes	Mossaad, Gomaa & Hussien	2013
Slope stability analysis for Champlain sea clay deposits using the mechanics of unsaturated soils	Oh, Vanapalli & Sheikhtaheri	2014
Effects of soil suction on slope stability at Notch Hill	Krahn, Fredlund & Klassen	1989

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Şev stabilite analizi sonuçları değerlendirilecek olan zeminlerin mühendislik özelliklerini elde edebilmek için yapılan deneyler ve deney sonuçları bu bölüm içerisinde gösterilmektedir. Bu araştırma kapsamında üç farklı zemin numunesinin sonuçları değerlendirilmiştir. İlk numunenin parametreleri zemin mekaniği laboratuvarında yapılmış deneylerden elde edilmiş olup, geri kalan numunelerin mühendislik özellikleri Kutlu (2013) ve Gülşen (2013) tarafından yapılan çalışmalardan belirlenmiştir.

Zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemek için yapılan çalışmalar iki aşamalıdır. İlk aşamada yapılan deneyler zeminlerin sınıflandırılması ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, ikinci aşamada yapılan deneyler ise doymun olmayan zemin mekaniğinde kullanılan parametrelerin elde edilebilmesi amacıyla yapılmıştır. Çizelge 3.1’de analizde kullanılan numuneler özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Çalışma kapsamında kullanılan numuneler.

<i>Numune No</i>	<i>Numune Adı</i>	<i>Zemin Türü</i>	<i>Açıklama</i>
I	Güneşli kili	CL	Doğal numune
II	Silivri kumu	SP	Doğal numune
III	Indian Head Till	CL	Doğal numune

3.1 Laboratuvar Deneyleri

Yapılacak analiz kapsamında kullanılan numunelerin endeks özelliklerini, kayma mukavemeti ve doymun olmayan zemin mekaniği parametrelerini belirleyebilmek için gerekli deneyler bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler; elek analizi, kıvam limitleri, piknometre, kompaksiyon, kesme kutusu ve basınç plakası deneyleridir. Deneylerde ASTM (American Society of Testing Material) standartları göz önünde bulundurulmuştur. Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olup, deneylerin yapıları bu kısımda açıklanmaktadır.

3.1.1 Elek analizi ve hidrometre deneyleri

Elek analizi ve hidrometre deneyleri zeminlerin dane ϕ dağılımının bulunması için uygulanan deneylerdir. Dane ϕ dağılımı eğrisi, 200 numaralı eleğin üzerinde kalan numunelere elek analizi; altında kalan numunelere hidrometre deneylerinin uygulanmasıyla elde edilir. Elek analizi ve hidrometre deneyleri ASTM D422 standardına uygun olarak yapılmıştır [27].

Zeminlerin sınıflandırılması için ilk olarak uygulanan deney olan elek analizi, dane ϕ 75 μ m'den büyük zeminin dane ϕ dağılımını belirler. 110 $^{\circ}$ C sıcaklıktaki fırında 24 saat süre ile bekletilen kuru numune üzerinde yıkamalı elek analizi uygulanmıştır. Numuneler standart eleklerden geçirilir ve eleklerin üzerinde kalan zemin tartılarak eleme işlemi tamamlanır. Elektan geçen zemin ağırlığının toplam zemin ağırlığına oranlanmasıyla da eleklerden geçen yüzdelere hesaplanır ve dane ϕ dağılımı eğrisine işlenir [28]. Şekil 3.1'de elek analizi deneyi gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Elek analizi deneyi.

İnce daneli zeminlerin dane ϕ dağılımı eğrisini belirlemede kullanılan hidrometre deneyi için 200 numaralı elektan geçen numune kullanılır. Yaklaşık 50 gr kuru numune ile hazırlanan 1000 ml'lik süspansiyon içerisinde yer alan danelerin çökelme hızlarının onların dane ϕ ları ile değiştiğini gösteren Stoke kanunundan yararlanılarak hidrometre analizleri yapılır [29]. Hidrometre isimli alet ile süspansiyonun özgül ağırlığı ölçülür [30]. Daha sonra da Stoke kanunu kullanılarak dane ϕ dağılımı eğrisi tamamlanır. Şekil 3.2'de hidrometre deney aleti gösterilmektedir.



Şekil 3.2 : Hidrometre analizi deneyi.

3.1.2 Kıvam limitleri deneyi

Kıvam (Atterberg) limitleri deneyi ince daneli zeminlerin sınıflandırılması için ASTM D4318 standardına uygun olarak yapılır [31]. İnce daneli malzemenin tanımlanması adına en uygun deneydir [32]. Kıvam limitlerinin belirlenmesi kapsamında likit limit deneyi ve plastik limit deneyi yapılmıştır. Likit limit belirlenirken Casagrande yöntemi kullanılmıştır.

Likit limit değeri, zeminin sıvı gibi akışkan duruma geçtiği su muhtevasını gösterir [33]. Likit limitin belirlenmesi için etüvde kurutulmuş ve 40 numaralı elekten geçirilmiş numune kullanılır. Farklı su muhtevaları için numunenin Casagrande deney aletinde vuruş sayıları belirlenir ve yarı logaritmik eksen üzerinde su muhtevası – vuruş sayısı grafiği çizilir. Grafikte 25 vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevası değeri likit limiti verir [28]. Şekil 3.3’de Casagrande deney aleti gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Casagrande deney aleti.

Plastik limit değeri, zeminin yarı katı durumdan plastik duruma geçtiği su muhtevası değerini göstermektedir [34]. Plastik limit analizi, likit limit analizi için hazırlanan

numunenin birinci veya ikinci noktasından alınan numuyla yapılır. Hazırlanan numune el ayası ile düz bir plaka üzerinde 3mm çaplı silindirler oluşturulana kadar yuvarlanır. Eğer silindirler üzerinde çatlaklar oluştuysa deney bitirilir ve numunelerin su muhtevaları belirlenir. Silindirler üzerinde çatlaklar gözlemlenmiyorsa önceki aşamalar tekrarlanır [28].

3.1.3 Standart kompaksiyon deneyi (standart proktor deneyi)

Numunelerin mühendislik özelliklerini belirleyebilmek için yapılan kesme kutusu ve basınç plakası deneylerinde numuneler optimum su muhtevası değerine yakın optimum su muhtevası sıklığında hazırlanmıştır. Öncelikli olarak belirlenmesi gereken optimum su muhtevası için standart proktor deneyi yapılır ve oluşan su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık eğrisinden optimum su muhtevası belirlenir.

Deney ASTM D698 şartnamesi A yöntemine göre yapılmıştır [35]. Hacmi ve ağırlığı bilinen kalıp 3 tabaka halinde yaklaşık olarak %5 su muhtevasında hazırlanmış numuneyle deneye başlanır. Her tabaka eşit hacimde hazırlanmaya çalışılır ve tokmak standart yükseklikten 25 kere bırakılarak sıkıştırılır. Daha sonra sıkıştırılan numune tartılır ve su muhtevasının belirlenmesi için alt ve üst noktalardan belirli miktarda numune alınır. Bu işlemler bir önceki numuneye göre su muhtevası yaklaşık olarak %5 arttırılarak 5 yada 6 nokta için tekrarlanır ve su muhtevası – kuru birim hacim ağırlığı eğrisinden maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası belirlenir [36]. Şekil 3.4 standart proktor deney aletinde 3 tabaka halinde sıkıştırılmış numuneyi ve sıkıştırılmış numunenin su muhtevasını belirleyebilmek için numunenin üst ve alt noktalarından alınmış numuneleri göstermektedir.



Şekil 3.4 : Standart proktor deneyi.

3.1.4 Dane birim hacim ağırlığı belirlenmesi (piknometre deneyi)

Deney ASTM D854 şartnamesine uygun olarak yapılmıştır [37]. Deney için kullanılan numune 4 numaralı elekten elenmiş ve fırında kurutulmuştur. 50gr kuru numune damıtık su ile dolu ve ağırlığı bilinen piknometre içine konulur ve piknometre içinde hava kalmaması için vakumla havası çekilir. Süspansiyonda zemin tamamen piknometrenin dibine çökene kadar beklenir. Daha sonra piknometre ağırlığı tartılır. Deney sonunda aşağıdaki eşitlik kullanılarak dane birim hacim ağırlığı hesaplanır ve deney sonlandırılır.

$$\gamma_s = \frac{W_k}{(W_k - (W_2 - W_1))} \quad (3.21)$$

Denklemden,

γ_s	= dane birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)
W_k	= kuru zemin numunesi (gr)
W_1	= kuru zemin numunesi (gr)
W_2	= piknometre + saf su + kuru zemin numunesi (gr)

3.1.5 Kesme kutusu deneyi

Geoteknik alanında karşılaşılan problemlerin çözümünü elde edebilmek için zeminlerin mühendislik davranışlarını bilmek gerekir. Zeminlerin kayma mukavemetini elde edebilmek için klasik zemin mekaniğinde kullanılan en önemli iki parametre efektif kohezyon (c') ve efektif kayma mukavemeti açısı (φ')'dir. Şev stabilite analizi de zemin mekaniğinin en temel konularından bir tanesidir ve şev stabilite analizi yapabilmek için hem doymuş zemin mekaniğinde hem de doymuş olmayan zemin mekaniğinde zeminin kohezyon ve kayma mukavemeti açısı değerlerinin bilinmesi gerekir. Kayma mukavemeti parametrelerini elde edebilmek, gerek ampirik formüllerle gerekse de arazide ya da laboratuvar ortamında yapılan deneylerle mümkündür. Bu çalışma kapsamında kayma mukavemeti parametrelerini elde edebilmek için laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kesme kutusu deneyinden yararlanılmıştır.

Kesme kutusu deneyi ASTM D3080 standartlarına uygun olarak yapılmıştır [38]. Deneyde kullanılan numune optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Daha sonra

Şekil 3.5’de gösterilen kesme kutusu deney aletine yerleştirilen numune sabit bir normal kuvvet etkisinde konsolide olur ve konsolidasyon için geçen süreden sonra numune üzerinde sabit normal kuvvet etkisiyle beraber belirli bir kesme kuvvetiyle kesilir. Bir motor sistemi sayesinde uygulanan kesme kuvveti belirli bir hızda uygulanır ve bu kesilme hızı deneyin drenajlı veya drenajsız koşullarda gerçekleştiğini belirler. Deney sırasında gözlemlenen yatay ve düşey yer değiştirmelerin kaydı tutulur [39].

Deneye kesme kutusu içerisindeki numunenin aynı özellikteki numuneyle değiştirilmesi ve numune üzerindeki normal kuvvetin artırılmasıyla devam edilir. Elde edilen sonuçlarla kayma gerilmesi – eksenel boy değişimi ve kayma gerilmesi – normal gerilme grafikleri çizilir ve kayma mukavemeti parametreleri elde edilir.

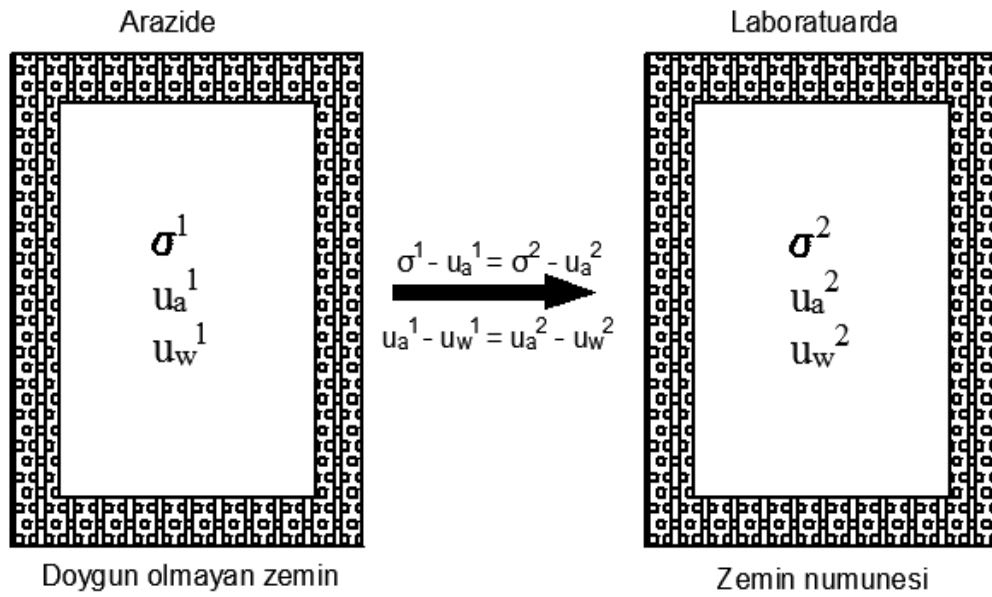


Şekil 3.5 : Kesme kutusu deney aleti.

3.1.6 Basınç plakası

Doygun olmayan zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde zemin su karakteristik eğrisinin (SWCC) önemi daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Zemin su karakteristik eğrisinin laboratuvar ortamında belirlenmesinde matrik emmenin ölçümü ya da kontrolü belirleyicidir. Yapılan çalışmalarda zemin su karakteristik eğrisinin belirlenmesi için basınç plakası kullanılmıştır. Basınç plakasında numuneye matrik emme basıncı uygulanır ve deneyde ilk kez Hilf tarafından 1956 yılında önerilen eksen kaydırma prensibi kullanılır [8]. Eksen kaydırma tekniği, negatif su basıncının laboratuvar şartlarında ölçülebilmesi için kullanılan yöntemdir. Doygun olmayan zemin numunesi kapalı basınç tenceresine yerleştirilir ve istenilen matrik

emme basıncı numuneye uygulanır. Eksen kaydırma tekniği, doymun olmayan zeminlerde matrik emme basıncını, yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanarak kontrol altında tutma veya ölçme işlemi olarak özetlenebilir [7]. Eksen kaydırma tekniği; ölçülmesi çok zor olan negatif boşluk suyu basıncının laboratuvar ortamında pozitif duruma ve boşluk hava basıncının daha büyük değere yükselmesi sonucu matrik emmenin ölçülmesini sağlamaktadır [5]. Boşluk suyu basıncı ve boşluk hava basıncı aynı arasındaki fark arazide ve laboratuvar ortamında değişmediği için ikisinin arasındaki fark olarak tanımlanan matrik emme değeri arazide ve deneyde aynı değere sahiptir. Şekil 3.6 eksen kaydırma tekniğini özetlemektedir.



Şekil 3.6 : Eksen kaydırma tekniğinin prensipleri [5].

Deney sırasında 1600 ürün numaralı “ 1600 Pressure Plate Extractor” modelinde basınç plakası kullanılmıştır. Deney aleti yaklaşık olarak 21kg ağırlığında, 30cm çapında, 22cm derinliğindedir. Şekil 3.7’de görülen basınç plakası deney aleti, üç ekipmandan oluşmaktadır. Bu ekipmanlar; yüksek dayanımlı çelik basınç tenceresi, yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk ve seramik diskin altında yer alan kauçuk membrandır. Laboratuvarda mevcut olan seramik disk en fazla 500 kPa hava giriş değerine dayanabildiği için deneyde güvenli tarafta kalınarak zemine en fazla 450 kPa matrik emme basıncı uygulanmıştır.

Deneyde kullanılan numuneler optimum koşullara yakın değerlerde hazırlanmış ve seramik diskin doyurulmasından sonra deney aletine yerleştirilmiştir. Daha sonra tencere içerisinde numuneler doyurulmuş ve deneye başlanmıştır. Hem deney aleti hem de numuneler doyurulurken saf su kullanılmalı ve seramik diskin

gözeneklerinde hava kabarcıklarının oluşmamasına dikkat edilmelidir. Gözeneklerin tamamen doygun duruma gelip, kabarcıkların oluşmasını engellemek için seramik disk doyurulurken küçük değerlerde basınç uygulanır.

Seramik diskin ve numunelerin doyduğundan emin olduktan sonra, deney aletinin kapağı sıkıca kapatılıp hava girişi olmamasını sağlayarak deneye başlanır. 1.5 kPa basınç değeriyle başlayan deney 450 kPa basınç değeriyle son bulur. Uygulanan basınç sonucunda zemin içerisinde yer alan boşluk suyu aletin dışına tahliye olur ve o basınç kademesindeki su çıkışı durduktan sonra bir sonraki basınç kademesine geçilir. Her basınç kademesinin sonunda ring numuneler tartılır ve kaybedilen su ağırlığı belirlenir. Ölçümlerde ince daneli numunelerde düzgün bir SWCC belirleyebilmek için daha sık basınç aralığı kullanılıyorken, kaba daneli numunelerde ise ölçümler ince daneli numunelerdeki ölçümlere göre daha aralıklıdır. Deney sonlandırıldıktan sonra her basınç kademesinde belirlenen doygunluk derecesi veya hacimsel su muhtevaları değerleriyle o basınç kademesinin eşdeğeri olan matrik emme değeri ile zemin su karakteristik eğrisi elde edilebilir [7].



Şekil 3.7 : Basınç plakası deneyi.

3.1.7 Tempe basınç hücresi

Zemin su karakteristik eğrisinin (SWCC) belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerden bir tanesi de tempe basınç hücresi deneyidir. Gülşen (2012)

tarafından Numune II'nin doymun olmayan zemin özelliklerinin belirlenebilmesi için tempe basınç hücresi deneyi tercih edilmiştir. Özellikle kaba daneli zeminlerin zemin su karakteristik eğrisinin (SWCC) belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan tempe basınç hücresi, eksen kaydırma tekniğini kullanarak emme basıncını ölçer yada kontrol altında tutar [7]. Tempe basınç hücresinin kullanımı basınç plakası ile aynıdır. Aralarındaki en büyük fark ise maksimum basınç değerleridir. Basınç plakası ile daha yüksek basınç değerlerinde çalışılıyorken, tempe basınç hücresi düşük kademelerde basınç değerlerini ölçebilmektedir. Bu yüzden tempe basınç hücresi kaba daneli zeminler için kullanılmaktadır.

3.2 Numunelerin Mühendislik Özellikleri

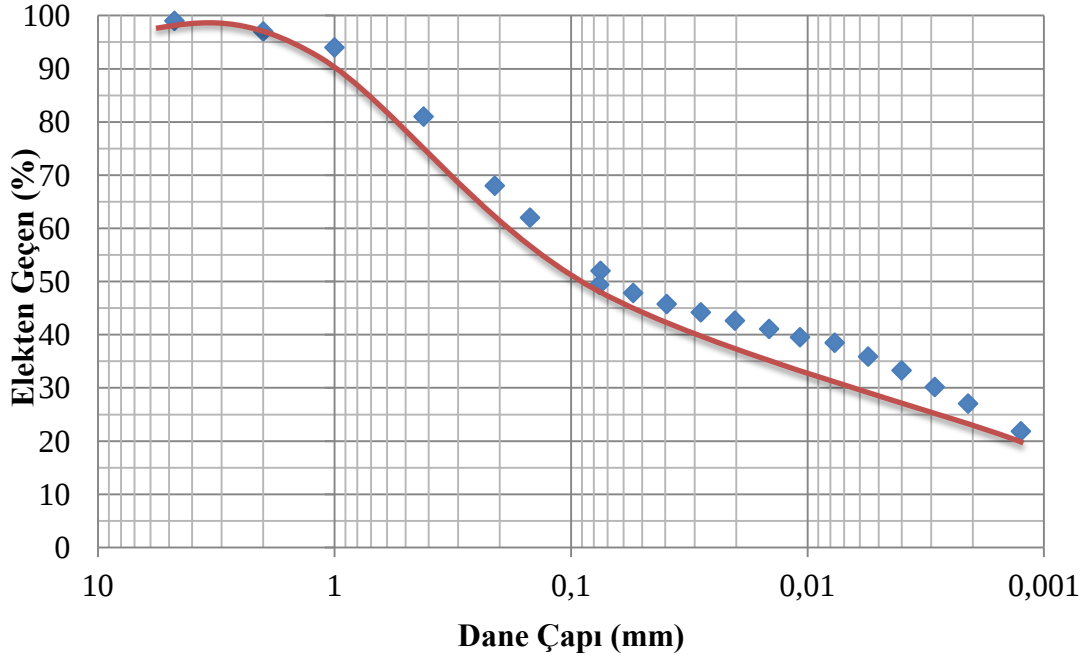
Bu bölümde şev stabilite analizi yapılacak olan numunelerin mühendislik özellikleri ve analizde kullanılacak zemin parametrelerinin elde edilişi gösterilecektir. İlk numunenin sonuçlarına İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılmış olan deneyler sonucunda ulaşılmış olup, diğer numune sonuçları için doymun olmayan zemin mekaniği üzerine yapılmış çalışmalardan yararlanılmıştır.

3.2.1 Numune I (CL)

Numune I, İstanbul ilinin Güneşli semti civarından elde edilmiş bir zemin numunesi olup, şev stabilite analizinde kullanılacak olan parametrelerin belirlenebilmesi için zemin mekaniği laboratuvarında üzerinde çalışma yapılan numunedir.

Öncelikli olarak yapılan sınıflandırma ve kıvam deneyi sonucunda numunenin düşük plastisiteli kil olduğu anlaşılmıştır. Numune üzerinde yapılan elek analizi ve hidrometre sonuçlarına göre elde edilen dane dağılım eğrisi Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Numunede ince dane oranı kaba dane oranından daha fazla olmasına rağmen ciddi oranda kum içerdiği elek analizi sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.2'de numune içerisinde yer alan kaba dane ve ince dane yüzdeleri, likit limit ve plastik limit değerleri, dane birim hacim ağırlığı değeri ve numuneye ait birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre yapılmış olan sınıflandırma sonucu gösterilmektedir. Daha önceki bölümlerde zeminin endeks özelliklerini elde edebilmek için yapılmış olan deneyler ve hesaplamalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

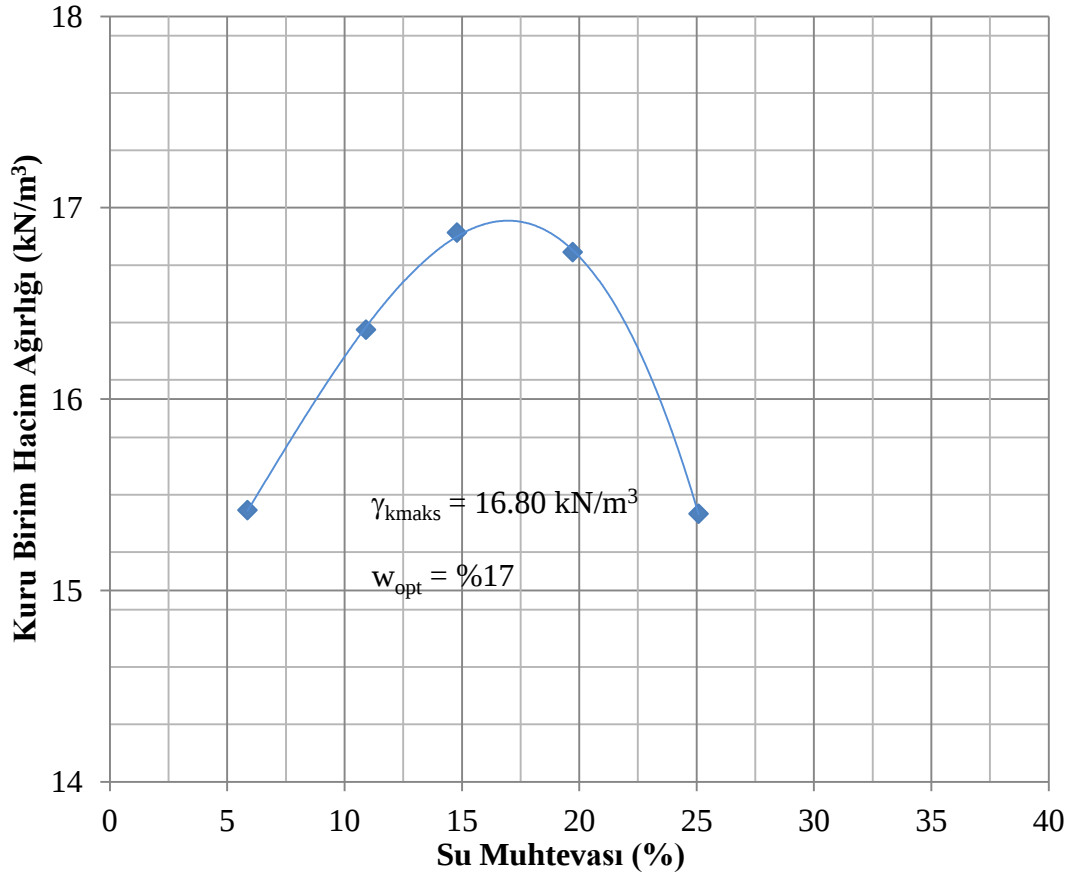


Şekil 3.8 : Numune I'e ait dane çapı dağılımı eğrisi.

Çizelge 3.2 : Numune I'e ait endeks özellikleri.

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune I</i>
Çakıl (%)	1
Kum (%)	47
Silt (%)	27
Kil (%)	25
Likit Limit (%)	55
Plastik Limit (%)	16
Plastisite İndisi (%)	39
USCS Göre Sınıflandırılması	CL
Dane Birim Hacim Ağırlığı, γ_s (kN/m ³)	26.54
Optimum Su Muhtevası, w_{opt} (%)	17
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_{kmak} (kN/m ³)	16.8

Şekil 3.9'da görülen kompaksiyon eğrisine göre zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı 16.8 kN/m³ ve optimum su muhtevası %17 olarak elde edilmektedir. Kompaksiyon eğrisinin elde edilişi daha önceki bölümlerde anlatılmış olup, kesme kutusu ve basınç plakası deneyleri için numuneler kompaksiyon eğrisinden elde edilen optimuma yakın su muhtevasına göre hazırlanmıştır.



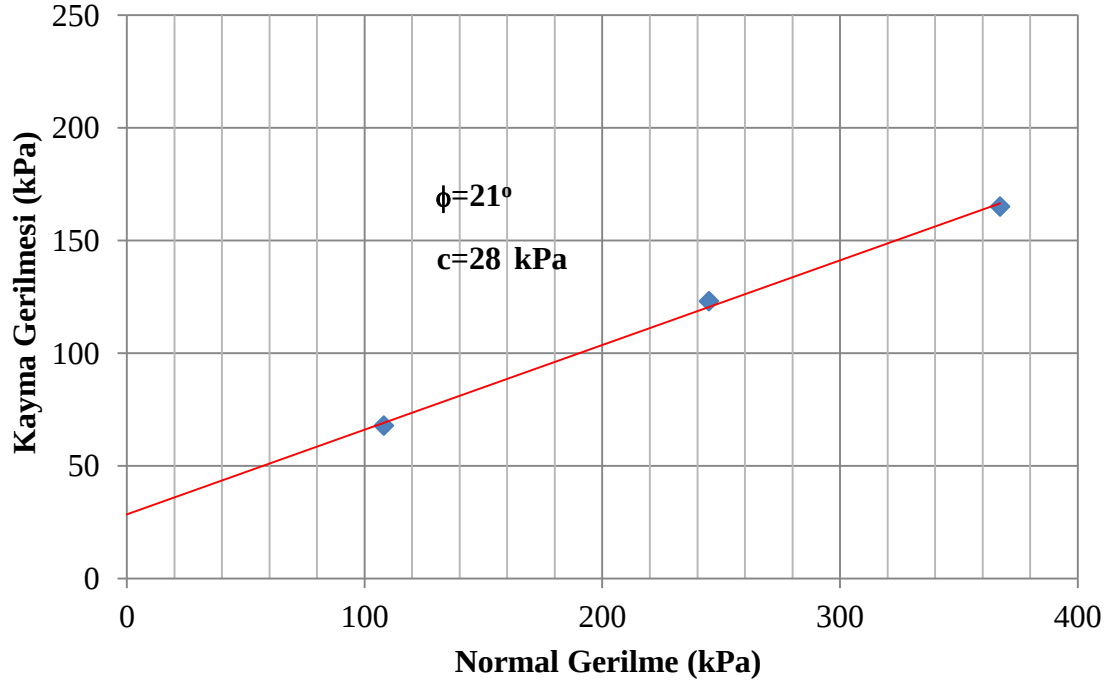
Şekil 3.9 : Numune I'e ait kompaksiyon eğrisi.

Standart proktor sıkılığında hazırlanan numunelere kesme kutusu deneyi uygulanır ve deneylerin ilk aşaması tamamlanır. Şekil 3.10'da normal gerilme – kayma mukavemeti grafiği görülmektedir. Kesme kutusuna ait diğer sonuçlar ekte sunulmaktadır.

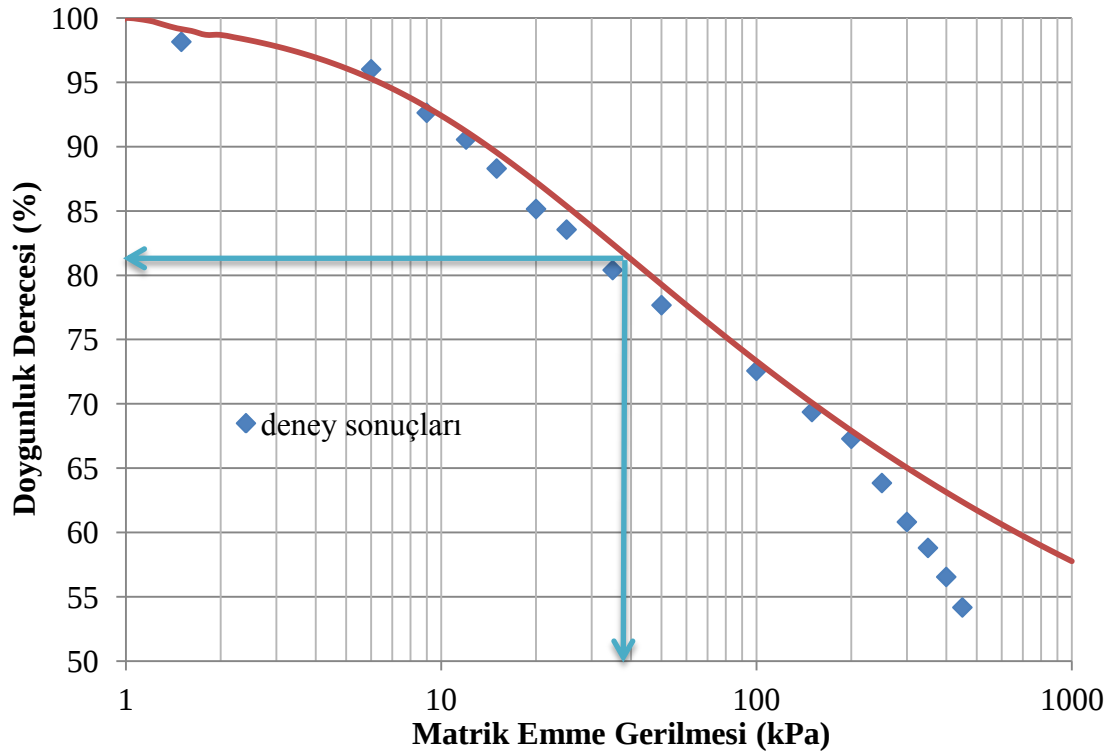
Numunenin doygun olmayan zemin parametrelerini belirleyebilmek için basınç plakası deneyi yapılarak zemin su karakteristik eğrisi (SWCC) çizilmiştir. Numunenin içerdiği kaba dane oranı daha fazla oranda ince dane içeren numunelere göre daha fazla olduğu için zeminin bünyesinde tuttuğu su daha küçük enerjiyle ortamdan uzaklaşabilmekte yani aynı doygunluk derecesine daha az bir matrik emme basıncıyla ulaşabilmektedir. Düzeltme için Ghanbarian, Liaghat, Huang ve Van Genuchten (2010) tarafından yapılmış çalışmadan yararlanılarak düzeltme parametreleri belirlenmiştir [40].

Şekil 3.11'de deney sonucunda elde edilmiş sonuçlar ve düzeltilmiş zemin su karakteristik eğrisi sunulmaktadır. Numunenin standart proktor sıkılığındaki doygunluk derecesi hesaplanarak başlangıçtaki matrik emme basıncı elde edilir.

Uniform matrik emme basıncına göre yapılacak analizlerde bu değerden yararlanılacaktır.



Şekil 3.10 : Numune I'e ait kesme kutusu deneyi sonuçları.



Şekil 3.11 : Numune I'e ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

Çizelge 3.3'de numunenin için şev stabilite analizlerinde kullanılacak olan parametreler gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 : Şev stabilite analizinde kullanılacak parametreler.

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune I</i>
Doygunluk Derecesi, S (%)	82
Boşluk Oranı, e	0.587
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	19.70
Efektif Kohezyon, c' (kPa)	29
Efektif Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ' (°)	21
Matrik Emme Basıncı (kPa)	40

3.2.2 Numune II (SP)

Tezde üzerinde çalışma yapılacak bir diğer numune de İstanbul ilinin Silivri ilçesinden alınmış olan ve Gülşen tarafından 2012 yılında özellikleri laboratuvar ortamında belirlenen Silivri kumudur [7]. Zemin birleşik sınıflandırma sistemine göre kötü derecelenmiş kumdur ve numunenin fiziksel ve mühendislik özelliklerini belirlemek adına elek analizi, hidrometre deneyi, izafi sıklık deneyi, piknometre deneyi ve kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

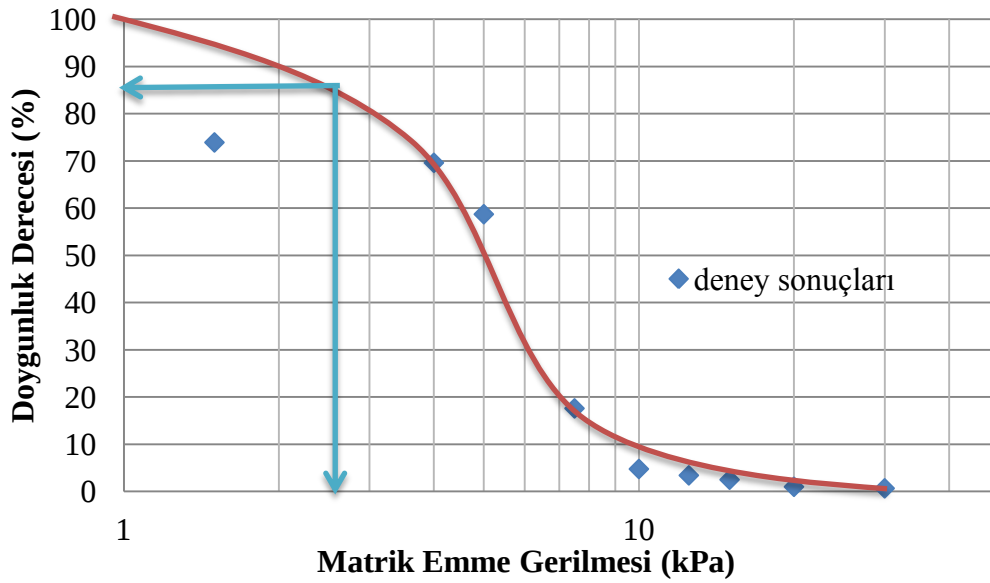
Numunenin doymuş olmayan zemin parametrelerini belirleyebilmek adına numune kaba daneli olduğu için tempe basınç hücresi deneyi tercih edilmiştir. Tempe basınç hücresinde SWCC'si belirlenecek olan numuneler %50 izafi sıklığa göre hazırlanmış ve deney aleti içerisinde doyurulmuştur. Numunedeki boşluk suyunun drene olması daha küçük matrik emme değerlerinde gerçekleşmiş ve elde edilmiş SWCC üzerinde düzeltme yapılmasına gerek kalmamıştır [7].

Zeminin mühendislik ve endeks özellikleri ve analizde kullanılacak olan parametreler Çizelge 3.4'de sunulmaktadır. Çizelge 3.4'de de matrik emme değerinin önceki numunelere göre çok küçük değerde elde edildiği görülmektedir. Numunenin doymuşluk derecesi %50 izafi sıklıkta hazırlandığı haldeki değerdir ve matrik emme değeri de bu doymuşluk derecesine SWCC üzerinde karşılık gelen matrik emmedir. Numunenin başlangıçtaki doymuşluk derecesi ve buna karşılık gelen matrik emme değeri zemin su karakteristik eğrisi üzerinde gösterilmektedir.

Numuneye ait SWCC Şekil 3.12'de görülmektedir. Numune II'ye ait olan matrik emme değerlerinin daha önce özellikleri verilen Numune I ve deney sonuçları gösterilecek olan Numune III'e ait olan matrik emme değerlerine göre daha az olduğu değerlerde olduğu SWCC üzerinde açık bir şekilde görülebilmektedir.

Çizelge 3.4 : Numune II'ye ait özellikler.

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune II</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	100
Kil+Silt (%)	0
İzafi Sıkılık Değeri (%)	50
Dane Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	26.10
USCS Göre Sınıflandırılması	SP
Doygunluk Derecesi, S (%)	85
Boşluk Oranı, e	0.673
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	19.00
Efektif Kohezyon, c' (kPa)	0
Efektif Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ' (°)	42
Matrik Emme Basıncı (kPa)	2.5



Şekil 3.12 : Numune II'ye ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

3.2.3 Numune III (CL)

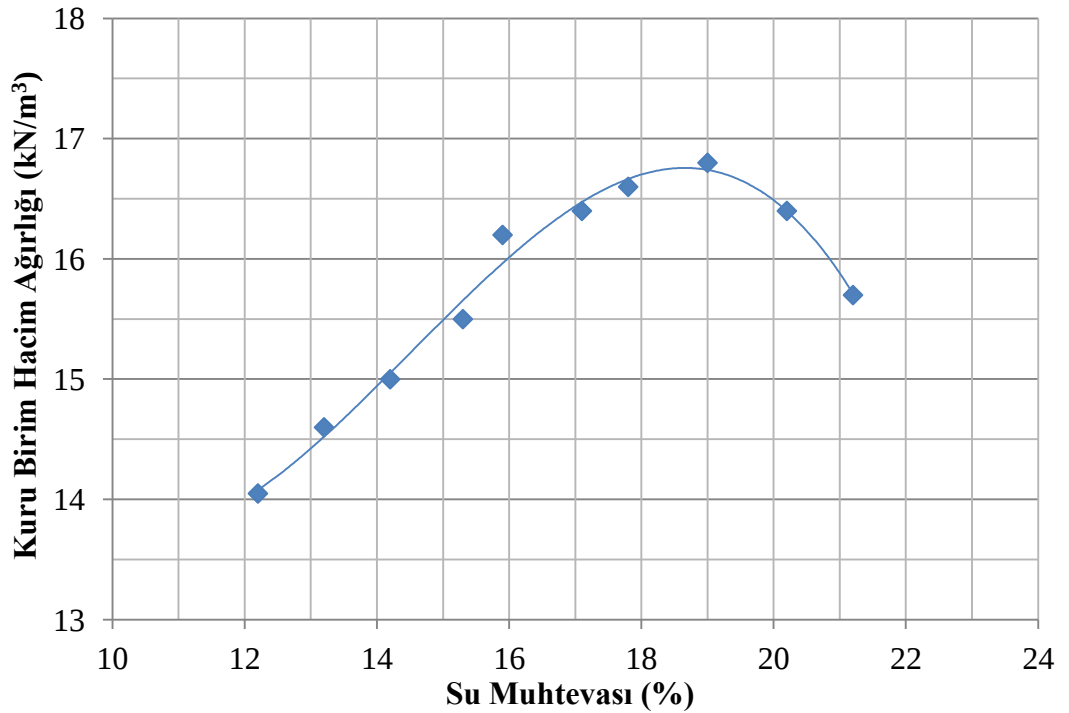
Bu çalışma kapsamında, doymuş ve doymuş olmayan zeminlerin şev stabilite analizlerinde kullanılan son numune Kutlu'nun 2013 yılında Saskatchewan,

Kanada'dan temin edilmiş buzul zemini (Indian Head Till)'dir. Numunenin özellikleri Çizelge 3.5'de özetlenmektedir. Numunenin optimum su muhtevası kompaksiyon deneyi sonucunda ve mühendislik parametreleri Kutlu (2013) tarafından belirlenmiştir [41].

Çizelge 3.5 : Numune III'e ait özellikler.

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune III</i>
Çakıl (%)	0
Kum (%)	28
Silt (%)	42
Kil (%)	30
Likit Limit (%)	36.2
Plastik Limit (%)	15
Plastisite İndisi, I_p	21.2
Doygunluk Derecesi, S (%)	45
Boşluk Oranı, e	0.85
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	16.0
Efektif Kohezyon, c' (kPa)	7
Efektif Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ' (°)	25
Matrik Emme Basıncı (kPa)	205

Numuneye ait kompaksiyon eğrisi Şekil 3.13'de gösterilmektedir.



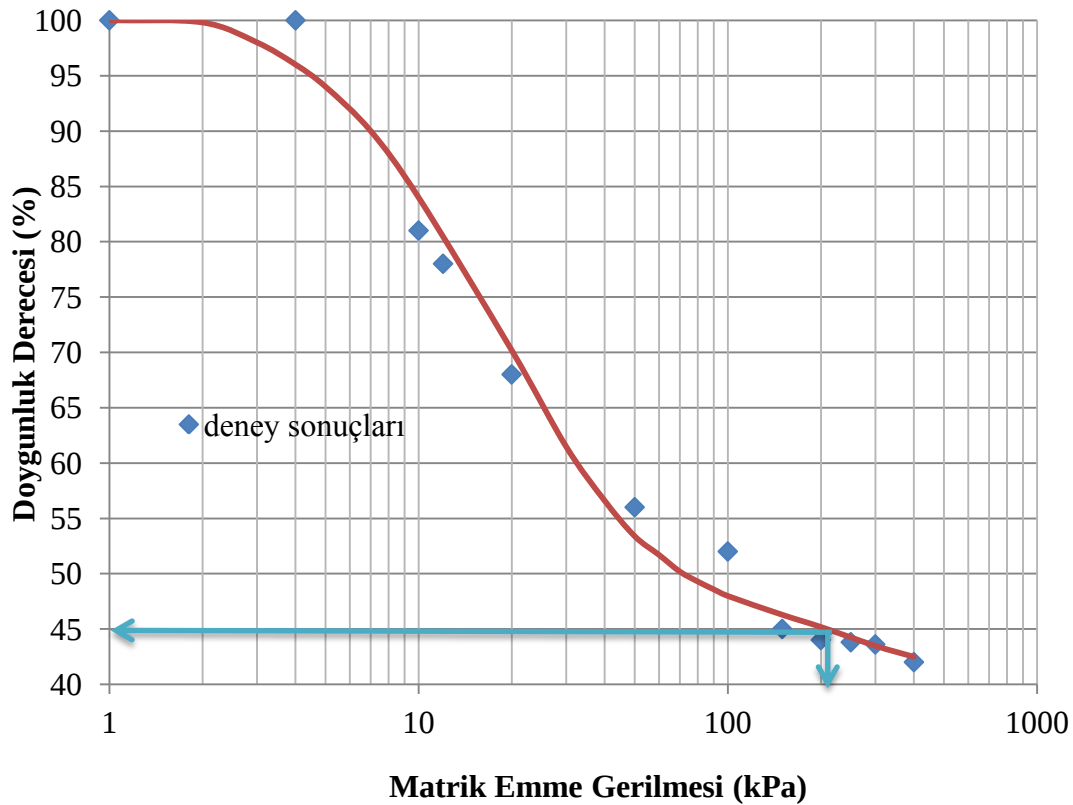
Şekil 3.13 : Numune III'e ait kompaksiyon eğrisi.

Bu çalışmada optimum su muhtevasına göre daha kuru durumda ($w=13\%$) hazırlanmış numunelerin mühendislik özelliklerinden yararlanılacaktır.

Çalışma kapsamında yararlanılacak olan SWCC, Şekil 3.14’de gösterilmektedir. Şekil 3.14’de gösterilen analizde yararlanılacak olan SWCC, optimum durumu gösteren $w=18\%$ ’den daha kuru durumda hazırlanmış olan numunenin eğrisidir. SWCC’yi elde edebilmek için basınç plakası deneyinden yararlanılmıştır [41].

Analizlerde EK C’ de sunulan hacimsel su muhtevası ve matrik emmeye bağlı olarak elde edilen SWCC kullanılacaktır.

Uniform matrik emme değeri, optimum koşullardan daha kuru durum olan 13% su muhtevasında hazırlanmış numunenin, doygunluk derecesinin ($S=45\%$) SWCC üzerinde karşılık gelen matrik emme değeridir. Bu değerler Numune III’e ait zemin su karakterisitik eğrisi üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 3.14 : Numune III’e ait zemin su karakteristik eğrisi (SWCC).

Beşinci bölümde Numune I, Numune II ve Numune III’e ait olan analiz sonuçlarında matrik emme değerlerinin güvenlik sayısına etkisi detaylı bir şekilde gösterilecektir.

Çizelge 3.6’da şev stabilite analizde kullanılan numunelerin başlangıç durumundaki özellikleri özetlenmektedir.

Çizelge 3.6 : Analizde kullanılan parametreler.

<i>Numunenin Adı</i>	<i>Numune I</i>	<i>Numune II</i>	<i>Numune III</i>
Doygunluk Derecesi, S (%)	82	85	45
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	19.70	19.00	16.00
Su muhtevası, w (%)	18	22	13
Matrik Emme Basıncı (kPa)	40	2.5	205

4. LİMİT DENGE ANALİZİ YÖNTEMİ İLE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

Daha önceki bölümlerde mühendislik özellikleri ve bu mühendislik özelliklerinin elde edilmesi anlatılan numunelerin şev stabilite analizleri sonucunda güvenlik sayısının elde edilebilmesi için GeoStudio 2007 paket programının içerisinde yer alan SLOPE-W programından yararlanılmıştır.

SLOPE-W programı şev stabilite analizlerinde limit denge analizini kullanan yöntemlerden yararlanmaktadır. Bu yöntemler daha önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılmış olup, bu bölümde limit denge analizinin geoteknik içerisinde gelişimi özetlenecektir. Daha sonra da programda tanımlanan modellerin çözüm aşamaları ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır. Çözüm aşamaları; kesitlerin geometrisinin oluşturulması, malzeme özelliklerinin tanımlanması, yeraltı suyunun tanımlanması, kayma yüzeyinin belirlenmesi ve problemin çözümü olarak özetlenebilir.

4.1 Limit Denge Analizi Yöntemi

Limit denge analizi, olası sayısız göçme yüzeylerinin güvenlik faktörlerinin hesaplanması sonucunda elde edilen en küçük güvenlik faktörlü göçme yüzeyinin bulunması sonucuna dayanır [21]. Şev stabilite analizlerinde sonlu elemanlar metoduyla beraber en çok kullanılan yöntemdir. Limit denge analizini esas alarak çözümler geliştiren yöntemler ikinci bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Limit denge analizi yöntemi, geoteknikte şev stabilite analizi için kullanılan en eski ve en iyi bilinen sayısal analiz yöntemidir. Kayma dairesini dilimlere ayırma fikri ilk olarak 1990'ların başında ortaya atılmıştır.

1916 yılında İsveç'te Petterson karşılaştığı problemi çözmek için dairesel kayma yüzeyi tanımlamış ve kayan kütleyi dilimlere ayırarak limit denge analizi yönteminin temellerini atmıştır.

Daha sonra Fellinious bugün de özellikle elle çözümlerde yaygın olarak kullanılan Ordinary ya da diğer adıyla İsveç Dilim Yöntemini tanımlamıştır. 1950'lere

gelindiğinde Janbu ve Bishop dilimler arasında ortaya çıkan kuvvetleri de hesaplayarak limit denge analizi yöntemini geliştirmiştir. 1960'lı yıllarda bilgisayarda programlamaların gelişimiyle yöntemin matematiksel olarak formüllemesi kolaylaşmış ve bu gelişme limit denge analizi yöntemlerinin daha yaygın kullanılmasını sağlamıştır. Spencer ve Morgenstern yöntemleri bu yıllarda geliştirilmiştir. 1980'lerde bilgisayarın sektörde iyice yaygınlaşmasıyla beraber limit denge analizi yöntemine dayalı bilgisayar yazılımları geliştirilmiş ve şev stabilite analizlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu araştırma kapsamında kullanılacak olan yazılım olan GeoStudio (Slope-W) isimli paket program da bu yıllarda geliştirilmiş olan limit denge analizine dayalı çözüm sunan programlardan bir tanesidir [22].

4.2 GeoStudio Paket Programı

GeoStudio, geoteknikte karşılaşılan problemlere çözüm üretebilmek adına bünyesinde farklı analiz programları bulunduran (SLOPE/W, SIGMA/W, SEEP/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W) bir paket programdır. Zeminlerin taşıma kapasitesinin hesaplanması, zeminde meydana gelen deformasyon, şevlerin stabilitesi, zemin suyunun akışı, deprem etkilerinin incelenmesi vb. problemlerin incelenmesi ve analizi için çözüm üretmektedir.

SLOPE/W 1977 yılından itibaren geoteknik alanında yer almıştır. Programın ilk kodlarını Profesör D. G. Fredlund Saskatchewan Üniversitesinde oluşturmuştur.

İlk olarak satışa çıkan sürümleri sadece belirli sayıda üretilmiş ana merkezlerde yer alan bilgisayarlarda kullanılabiliş, daha sonra kişisel bilgisayarların sayısının artması ile beraber programın kodları yeniden yazılarak bu bilgisayarlarla uyumlu çalışabilmesi sağlanmıştır.

1983 yılında program PC-SLOPE adıyla piyasada yerini almıştır. Seksenli yılların sonuna gelindiğinde ise bilgisayar teknolojisinde görselliği ileri boyuta taşıyan CAD sistemi gelişmiş, program da bu sistemi takip ederek Microsoft işletim sistemine uyumlu çalışacak sürümünü geliştirmiş ve SLOPE/W ismiyle satışına devam etmiştir [7, 22].

Şev stabilite analizlerinde çözüm üretmek için ilk geliştirilen yazılım olan SLOPE/W günümüzde binlerce profesyonel tarafından hem piyasada hem de akademik alanda kullanılmaktadır.

Program, geoteknik mühendisliği çalışmalarında araştırılan taşıma gücü, stabilite analizleri, gerilme-şekil değiştirme, akım ağı, sızma, konsolidasyon ve deprem etkileri gibi konuların çözümünde katkı sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında GeoStudio paket programının içerisinde yer alan şevlerin stabilitesini inceleyen SLOPE/W programı kullanılacaktır. SLOPE/W programının piyasada kullanılan diğer şev stabilite programlarına göre avantajlarından bir tanesi de klasik zemin mekaniğinde yer almayan matrik emme basıncı kavramının da incelenabiliyor ve tanımlanabiliyor olmasıdır. Ayrıca program içerisinde boşluk suyu basıncı değişimi, kayma mukavemetine etki eden parametrelerin derinlikle değişimi, dilimlerin her birinin güvenlik sayıları ve birbirlerine uyguladıkları kuvvetler vb. grafikleriyle beraber incelenebilmekte olup, bu da kullanıcıya kullandığı parametrelerin doğruluğunu kontrol edebilmesi için avantaj sağlamaktadır.

4.3 SLOPE/W Programı ile Şev Stabilite Analizi Yapılacak Kesitin Modellenmesi

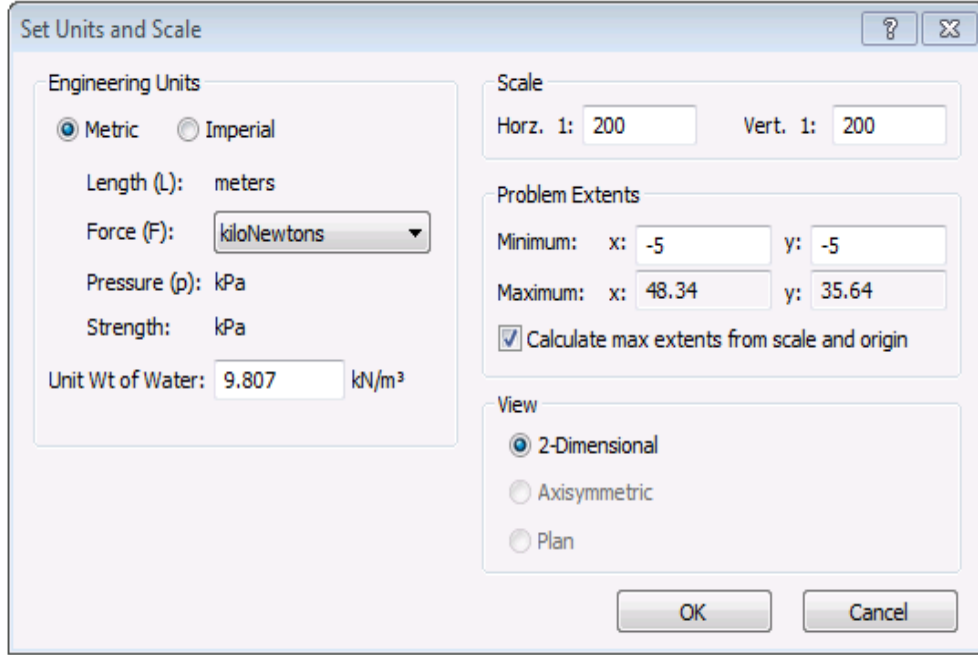
Mühendislik özellikleri laboratuarda yapılan deneysel çalışmalarla belirlenen numunelerin doymuş ve doymuş olmayan durumları için şev stabilite analizleri yapılacak ve kesitlerin güvenlik sayıları her iki durum için karşılaştırılacaktır. Bunun için kesitler SLOPE/W ile modellenecektir. Öncelikli olarak hangi analiz yöntemi ile çalışılacağına karar verilecektir. Modellerin oluşturulması ve bu modellerin çözümü için izlenecek yol sırasıyla anlatılacaktır.

4.3.1 Kesit geometrisinin oluşturulması

Şev stabilite analizi için kesitin geometrisinin belirlenmesi oldukça sezgisel bir konudur. SLOPE/W programı kesitin geometrisini çok yalın ve kullanışlı bir şekilde tanımlayabilmektedir.

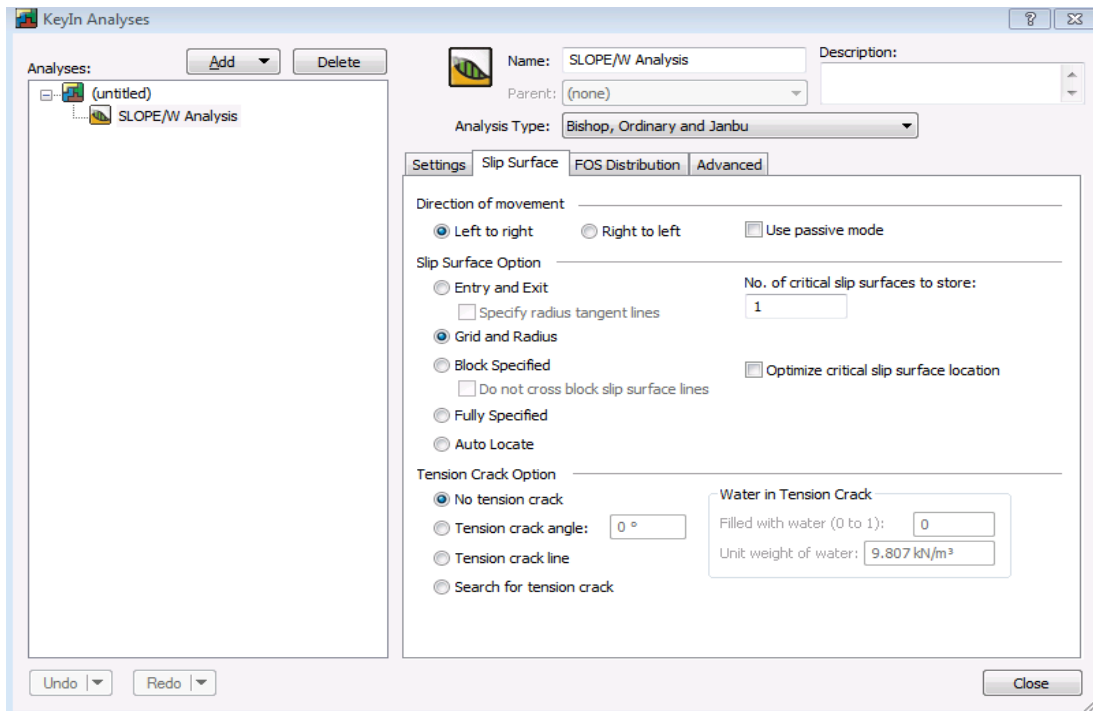
Öncelikli olarak şev açısı ve şev yüksekliği bilinen kesitin zemin profili de belirlenerek geometrisi oluşturulur. Geometri oluşturulmadan önce <Set> menüsünden <Set Unit and Scale> seçilerek modelde kullanılan ölçekler, birimler ve su birim hacim ağırlığı belirlenir. Program şev stabilite analizlerinde iki boyutlu çalıştığı için o sekme üzerinde değişiklik yapılamamaktadır. Ancak paket program içerisinde yer alan farklı programlarla analizi yapılan problemler için eksen simetrik analizde kullanılmaktadır.

Programın başında yapılması gereken ayarlardan sonra, ilk olarak hangi limit denge analizi yönteminin kullanılacağına karar verilir ve daha sonra kayma dairesinin nasıl belirleneceği ve hareketin hangi yönde olacağı belirlenir.



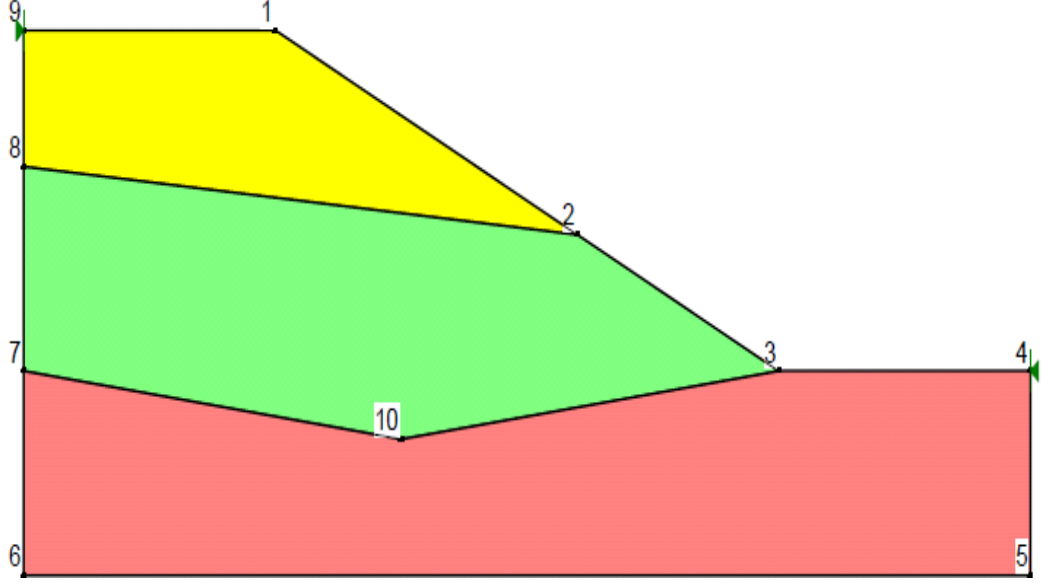
Şekil 4.1 : Geometri oluşturulmadan yapılması gereken ayarlar.

Şekil 4.2’de <KeyIn> menüsünden seçilen <Analyses> komutuyla ekrana gelen seçenekler ile şevin hareket yönü ve kayma dairesi seçeneklerinin belirlenmesi gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : <KeyIn Analyses> komutuyla yapılan işlemler.

İlk ayarlamalar yapıldıktan sonra <Draw> komutu ile sistemin geometrisi oluşturulmaya başlanır. Burada <Draw> komutundan <Point> seçeneği seçilerek sistemde zemin profiline ve kesitin geometrisine bağlı olarak belirlenen koordinatlar seçilir. Daha sonra ise yine <draw> komutundan <Regions> seçilerek noktalar birleştirilir ve geometri tamamlanır. Eğer geometride bir değişiklik yapılmak istenirse <Modify> komutundan <Objects> seçeneği seçilmelidir. Burada atanmış olan nokta silinebilir ya da başka bir koordinata kaydırılabilir.



Şekil 4.3 : SLOPE/W programıyla oluşturulmuş örnek bir kesit.

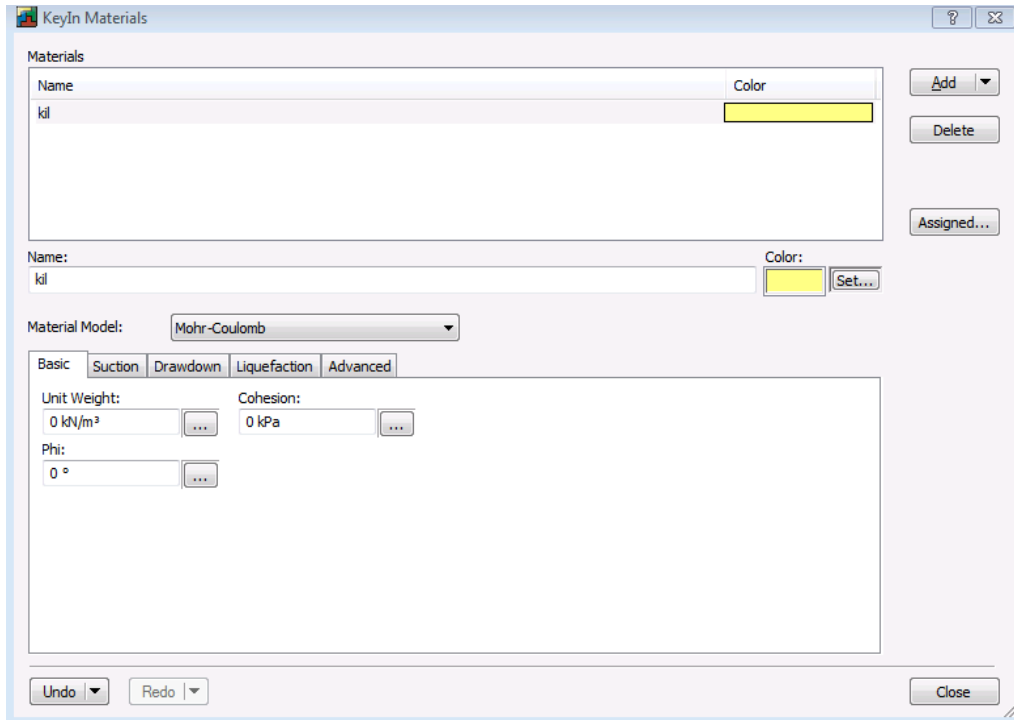
4.3.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Zemin modelinin geometrisinin belirlenmesinden sonra şev stabilite analizinde güvenlik sayısının elde edilebilmesi için malzeme özelliklerinin tanımlanabilmesi gerekmektedir. Programda atanacak parametreler laboratuvar ortamında yapılan deneylerle elde edilen verilerdir. Doğru sonuçlar elde edebilmek için atanacak parametreler büyük önem teşkil etmektedir.

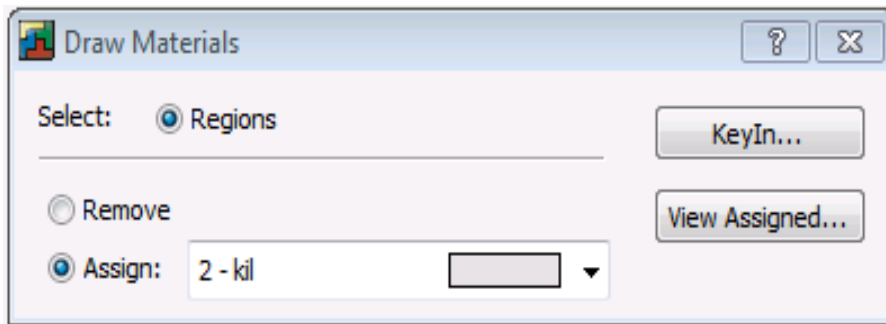
Programda malzeme tanımlanırken öncelikli olarak kullanılacak malzeme modeli belirlenecektir. <KeyIn> komutunda <Materials> seçeneği seçilerek malzeme ismi yazılır ve kullanılacak malzeme modeline karar verilir. Analizlerde zemin ortamında çalışılacağı için Mohr-Coulomb kayma mukavemeti teorisi kullanılacaktır. Malzeme için kullanılacak model belirlendikten sonra <Basic> bölümünden malzemenin birim hacim ağırlığı, kohezyonu ve kayma mukavemeti açısı tanımlanır. Geleneksel zemin mekaniğinin temel kavramları tanımlandıktan sonra doymun olmayan zemin parametreleri <Suction> bölümünden programa girilir. Doymun olmayan

parametreler, matrik emme basıncına bağlı kayma mukavemeti açısı $\langle \Phi B \rangle$ ya da zemin su karakteristik eğrisinin $\langle \text{Vol. WC Fn.} \rangle$ tanımlanmasıyla belirlenir.

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra bunların geometrisi oluşturulmuş modele atanması gerekmektedir. Malzeme özelliklerini model üzerinde tanımlayabilmek için $\langle \text{Draw} \rangle$ komutundan $\langle \text{Materials} \rangle$ seçilir ve $\langle \text{Assign} \rangle$ ile model geometri üzerinde malzeme seçimi yapılır. Eğer atanan malzeme değiştirilmek istenirse $\langle \text{Remove} \rangle$ komutu ile malzeme geometriden kaldırılır ve başka malzeme ataması gerçekleştirilir.



Şekil 4.4 : Malzemenin temel mühendislik parametrelerinin belirlenmesi.



Şekil 4.5 : Malzemenin model üzerinde atanması için gereken işlem.

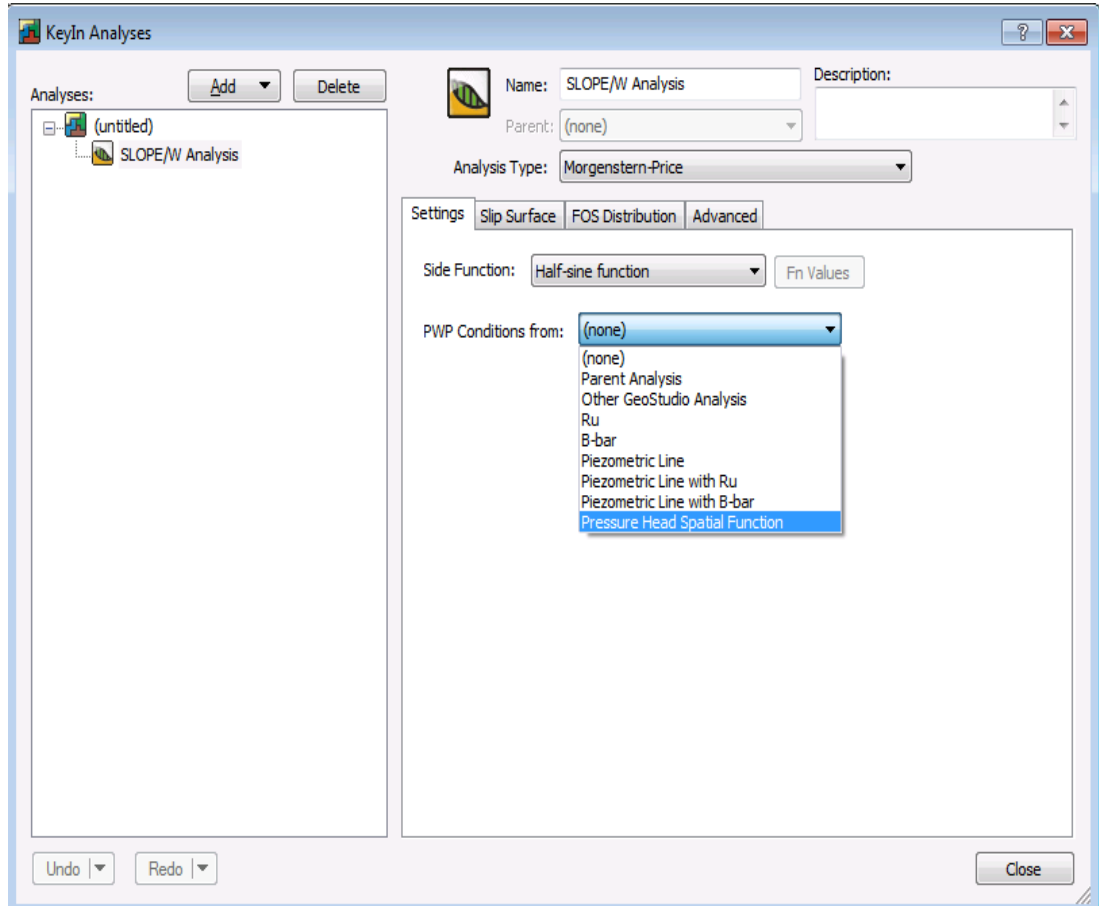
4.3.3 Yeraltı suyunun tanımlanması

Yapılacak olan analizlerde yeraltı suyu seviyesinin değişimiyle güvenlik sayısının değişimi incelenecektir. Şev stabilite analizlerinde; boşluk suyu basıncı, güvenlik

sayısını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle programda yeraltı su seviyesini tanımlamak önem kazanmaktadır.

Yeraltı su seviyesini model geometrisine yerleştirebilmek için öncelikle programda yeraltı suyunun nasıl tayin edileceği belirlenmelidir. Bu çalışma kapsamında yeraltı suyu <KeyIn> menüsünde yer alan <Analyses> komutundan <Piezometric Line> seçilerek belirlenmiştir. Şekil 4.6’da yeraltı suyunun nereden belirlendiği ve diğer seçenekler görülebilmektedir.

Yeraltı su seviyesinin nereden seçileceğine karar verildikten sonra <Draw> menüsünden <Pore-Water Pressure> komutuyla geometri üzerinde yeraltı suyu çizilir. Program yaptığı analizde boşluk suyu basıncını kendisi hesaplayabilmektedir.



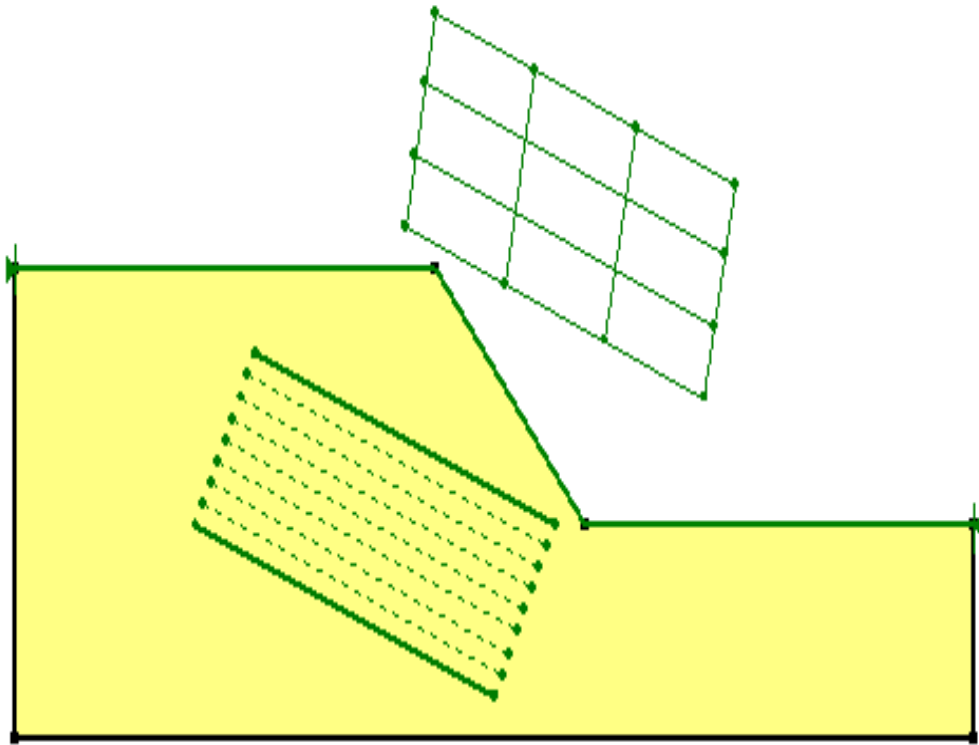
Şekil 4.6 : Malzemenin model üzerinde atanması için gereken komut.

4.3.4 Kayma yüzeyinin belirlenmesi

Dilimler arasında meydana gelen kuvvetlerin birbirlerine yaptıkları etki kayma yüzeyinin şekline bağlı olarak değişir. Kayma yüzeyi dairesel, düzlemsel, kompozit ya da blok şeklinde olabilir. Çalışma kapsamında kayma yüzeyinin dairesel olacağı kabul edilerek çalışılmıştır.

Dairesel kabul edilen kayma yüzeyini oluşturabilmek için ilk adımda tecrübe önem kazanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi kayma dairesinin oluşabileceği aralık <KeyIn Analyses> menüsünden seçilen <Slip Surface> seçeneğiyle belirlenir. Burada kayma dairesinin başlangıç ve bitiş noktalarının aralıklarını veren ve o aralıkta çizilen daireler içerisinde kritik kayma dairesinin güvenlik sayısını hesaplayan <Entry and Exit> komutu ya da oluşabilecek kayma dairelerinin merkez noktalarının ve çaplarının belirlenip yine en kritik kayma dairesinin belirleneceği <Grid and Radius> komutu seçilir. Yapılan çalışmada <Grid and Radius> seçilerek oluşacak en kritik kayma dairesi belirlenmiştir.

Kritik kayma dairesinin belirlenmesi için hangi yöntemin kullanılacağına karar verildikten sonra <Draw> menüsünden <Slip Surface> seçeneğiyle <Grid> ve <Radius> sırasıyla çizdirilir. Böylece oluşabilecek kayma daireleri belirlenir ve kritik olan kayma dairesinin güvenlik sayısı şev stabilite analizinin sonucunu verir. Oluşan kritik kayma dairesinin merkezi <Grid> ile belirlenen ızgaranın uç kısımlarında yer alıyorsa ızgaranın <Grid> ile daha geniş ölçekte yeniden çizilmesi tavsiye edilmektedir. Hem <Grid> de hem de <Radius> seçeneğinde komut çizilen sınırlar içerisinde yer alacak noktaların sayısını sormaktadır. Daha çok noktayla çalışmak daha hassas sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.7 : Model üzerinde çizdirilmiş olası kayma dairesi merkez ve teğet noktaları.

4.3.5 Modelin çözümü

Modelin çözümüne kadar uygulaması gereken adımlar olan modelin geometrisinin belirlenmesi, malzeme özelliklerin tanımlanması, yeraltı su seviyesinin belirlenmesi ve kayma yüzeyinin belirlenmesi tamamlandıktan sonra analizin sonuçlarını elde edebilmek için model çözümü işlemine başlanır.

Model tanımlanırken oluşan hataların görülebilmesi için analiz çözülmeden önce <Verify/Optimize Data> komutu kullanılır. Bu komut meydana gelen hataların adedini ve ne

olduğunu kullanıcıya gösterir. Eğer bir hatayla karşılaşılmışsa bu hata düzeltilir ve tekrar <Verify/Optimize Data> ile hatanın düzeltildiği onaylandıktan sonra modelin çözümü yapılır. Modelin çözümü içinde <Solve Analyses> komutu kullanılır. Modelin çözümü tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçları görebilmek için <Window> menüsünden <CONTOUR> seçeneği seçilmelidir. Burada şev stabilize analizi sonucunda elde edilmiş olan kritik kayma dairesinin güvenlik sayısı görülebilir. Ayrıca <Draw> menüsünde yer alan <Graph> komutu ile kayma mukavemeti parametrelerinin grafiklerine ulaşılabilir. Modelde herhangi bir değişiklik yapılmak istenirse <Window> menüsünden <DEFINE> seçeneği işaretlenmeli ve model geometrisi, malzeme özellikleri, yeraltı su seviyesi ya da kayma yüzeyinin belirlenmesi ile ilgili istenen değişiklikler yapılmalıdır.

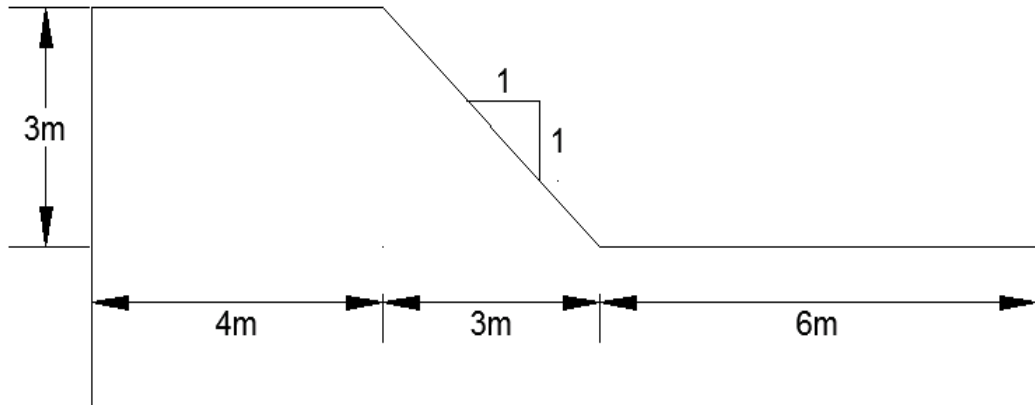
Sayısal modelleme ile elde edilen sonuçların gerçekte farklı değerler alabileceği unutulmamalıdır. Elde edilen sonuçlar mutlaka dikkatli bir şekilde değerlendirilmeli ve analizde kullanılan parametrelerin ve sonuçların doğruluğunun yapılmış çalışma veya analizlerle uyumluluğu kontrol edilmelidir. Bu yüzden yapılacak tasarımların mutlaka geoteknik alanında yetkin ve tecrübeli kişiler eliyle yapılması gerekmektedir.

5. ŞEV STABİLİTE ANALİZİ SONUÇLARI

Üçüncü bölümde özellikleri verilen ve bu özelliklerin nasıl elde edildiği anlatılan numunelerin analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. GeoStudio paket programı içerisinde yer alan SLOPE/W programıyla şev stabilite analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar klasik zemin mekaniği şev stabilite analizi çözüm yöntemiyle, doymun olmayan zemin mekaniğinde elde edilen şev stabilite çözümleri arasındaki farkı değerlendirmemize yardımcı olmaktadır.

Yapılan analizlerde, yeraltı suyu seviyesinin değişimiyle elde edilen güvenlik sayısı değişimi incelenmektedir. Öncelikli olarak zemin de bir yeraltı su seviyesi belirlenmemiş ve zeminin sıkıştırılarak elde edilen numunenin başlangıçtaki özelliklerinde olduğu kabul edilmiştir. Doymun olmayan zemin mekaniği analizi yapılırken matrik emme basıncının şevin her noktasında uniform olduğu kabul edilmiştir. Daha sonra şevlerde yeraltı suyu tanımlanarak seviyeleri belirlenmiş ve hem klasik zemin mekaniği analizlerinde, hem de doymun olmayan zemin mekaniği analizlerinde güvenlik sayısının yeraltı suyu seviyesinin değişimiyle nasıl etkilendiği karşılaştırılarak elde edilmiştir. En son belirlenen kesitlerde zemin tamamen suya doymun durumdadır.

İncelenen üç numune içinde aynı kesit geometrisi tanımlanmıştır. Şevin eğim açısı 45^0 ve şev yüksekliği 3 metredir. Şekil 5.1’de analizlerde kullanılan kesitin geometrisi gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Analizlerde kullanılan kesitin geometrisi.

Yapılan analizlerde; Bishop limit denge analizlerine göre güvenlik sayısı elde edilmiştir. Oluşacak kritik kayma dairesi yüzeyi belirlenirken <Grid and Radius> seçeneği kullanılmış ve oluşacak kayma dairelerinin merkezi ve yarıçapının aralıkları belirlenerek kayma daireleri çizdirilmiş ve kritik olan kayma dairesi program tarafından belirlenmiştir. Analiz sonuçları zeminin Mohr-Coulomb zemin davranışına göre modellenmesi sonucu elde edilmiştir.

Yeraltı su seviyesinin tanımlanmadığı, doymun olmayan zemin mekaniği yaklaşımıyla ve proktorla elde edilen numunenin başlangıçtaki özelliklerine göre yapılan şev stabilite analizlerinde; matrik emme basıncı uniform düşünülerek, bu değer kohezyona etki ettirilmiştir.

Denklem 5.1 ve denklem 5.2’de kohezyon değerinin nasıl belirlendiği gösterilmektedir [22,42].

$$\tau_f = c' + \sigma_n \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (5.1)$$

$$\tan \phi^b = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \times \tan \phi' \quad (5.2)$$

Denklem 5.1’de görüldüğü üzere doymun olmayan zemin mekaniğinde kayma mukavemeti (τ_f); klasik zemin mekaniğinde olduğu gibi efektif kohezyon (c') ve efektif kayma mukavemeti açısına (ϕ') bağlıdır. Bu parametrelerin dışında doymun olmayan zemin mekaniğinde kayma mukavemetini; matrik emme basıncı ($u_a - u_w$) ve matrik emme basıncına bağlı kayma mukavemeti açısı (ϕ^b) da etkilemektedir. Matrik emme basıncına bağlı kayma mukavemeti açısı hesaplanırken, zemin su karakteristik eğrisinden (SWCC) yararlanılır. Zemin su karakteristik eğrisi üzerinden belirlenen hacimsel su muhtevası (θ_w), kalıcı hacimsel su muhtevası (θ_r) ve doymun durumda ki hacimsel su muhtevası (θ_s) ile matrik emme basıncına bağlı kayma mukavemeti açısının elde edilişi denklem 5.2’de gösterilmektedir.

Yapılan araştırmalarda matrik emme basıncının zeminin kohezyon değerine etkideği ve kayma mukavemeti açısını değiştirmedeği ortaya çıkmıştır. Zeminde yeraltı su seviyesinin tanımlanmadığı durumda yapılan, doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerinin kullanılacağı ve matrik emme basıncının uniform olarak kesite etki ettirileceği analizde, kohezyon denklem 5.3’deki eşitlikten hesaplanır ve programda malzeme özelliğine bu kohezyon değeri girilir [43]. Doymun olmayan zemin

parametreleri doğrudan kohezyon değerinin içerisinde tanımlandığı için programda ayrıca bir SWCC girdisi kullanılmaz.

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (5.3)$$

Yeraltı su seviyesi girilerek yapılan analizlerde; klasik zemin mekaniği ve doymuş olmayan zemin mekaniği için aynı kohezyon ve kayma mukavemeti açısı parametreleri kullanılır. Ancak doymuş olmayan zemin mekaniğinde yapılan analizlerde, ekte sunulan hacimsel su muhtevası ve matris emme basınçlarının ölçülmesi ile elde edilen zemin su karakteristik eğrileri (SWCC) kullanılır.

Özellikleri üçüncü bölümde gösterilen 3 numune için yapılan analizlerin sonuçları sırasıyla sunulmaktadır.

5.1 Numune I (CL) Şev Stabilite Analiz Sonuçları

Numune I (CL) için elde edilen fiziksel ve mühendislik özellikler üçüncü bölümde özetlenmiştir. Numune; birleşik zemin sınıflandırmasına göre düşük plastisiteli kildir. Numunenin içeriğinde %47 oranında kum yer almaktadır.

Numunenin analizde kullanılan parametreleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 : Numune I için programda kullanılan zemin parametreleri.

YASS Durumu	Analiz Türü	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m³)	SWCC
Başlangıçtaki Durum (YASS Yok)	Klasik Zemin Mekaniği	29	21	19.7	Tanımlı Değil
	DOZ	37	21	19.7	Tanımlı Değil
YASS Tanımlı	Klasik Zemin Mekaniği	29	21	19.7	Tanımlı Değil
	DOZ	29	21	19.7	Tanımlı

Kompaksiyonla %18 au muhtevasında hazırlanan numunenin doymuşluk derecesi %82’dir. Başlangıç durumunda ki kohezyonu belirleyebilmek için kullanılan uniform matris emme basıncı 40 kPa’dır. Denklem 5.2 ve denklem 5.3’den yararlanarak, doymuş olmayan zemin mekaniği prensiplerine dayanarak belirlenen güvenlik sayısını elde edebilmek için kullanılan kohezyon hesaplanır.

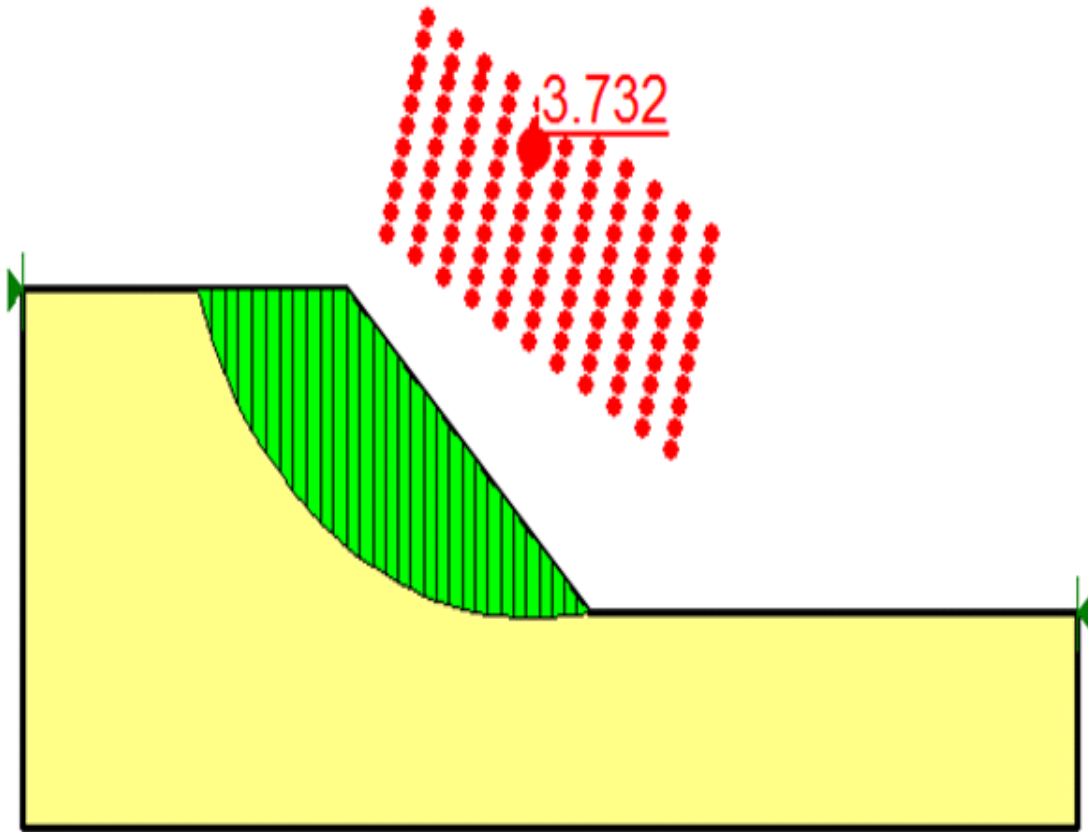
Denklem 5.2’de yer alan parametreler, hacimsel su muhtevası ve matrik emme basıncına bağılı olarak belirlenen ekte yer alan zemin su karakteristik eğrisinden okunur ve matrik emme basıncına bağılı kayma mukavemeti açısı hesaplanır.

Numune I’e ait şev stabilite analizi sonuçları; sırasıyla başlangıçtaki durumu, su seviyelerinin yükselerek zemin yüzeyine yaklaştığı durumları ve zeminin suya tamamen doygun olduğu durumu göstermektedir.

5.1.1 Başlangıç durumundaki numunenin şev stabilite analizi sonuçları

Yeraltı su seviyesinin tanımlanmadığı, proktorla hazırlanmış numunenin başlangıç durumundaki özelliklerine sahip olduğu durumda yapılan analizler için kullanılan zemin parametreleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

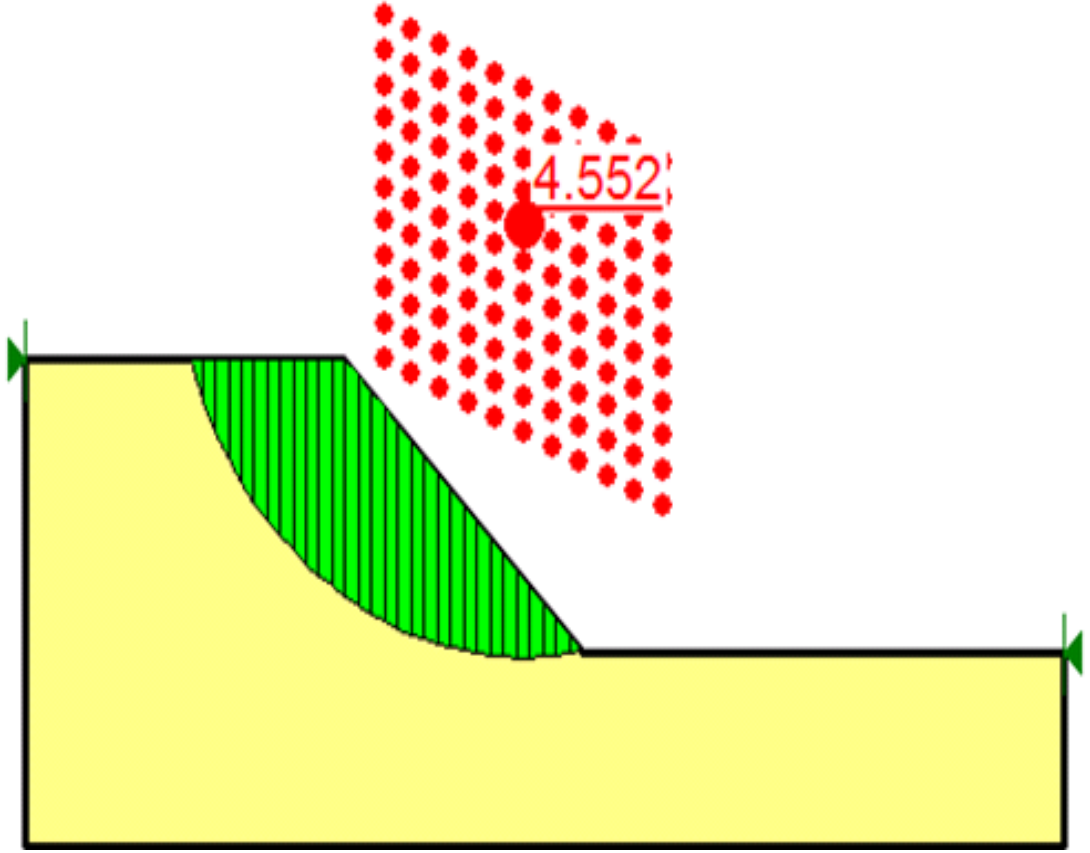
Şekil 5.2’de klasik zemin mekaniği parametreleri kullanılarak yapılan şev stabilite analizinin sonucu gösterilmektedir.



Şekil 5.2 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan ve matrik emmenin kayma mukavemetine etkisinin ihmal edildiği analizde Numune I için güvenlik sayısı 3.73 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.3, başlangıç durumunda doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucunu göstermektedir.



Şekil 5.3 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

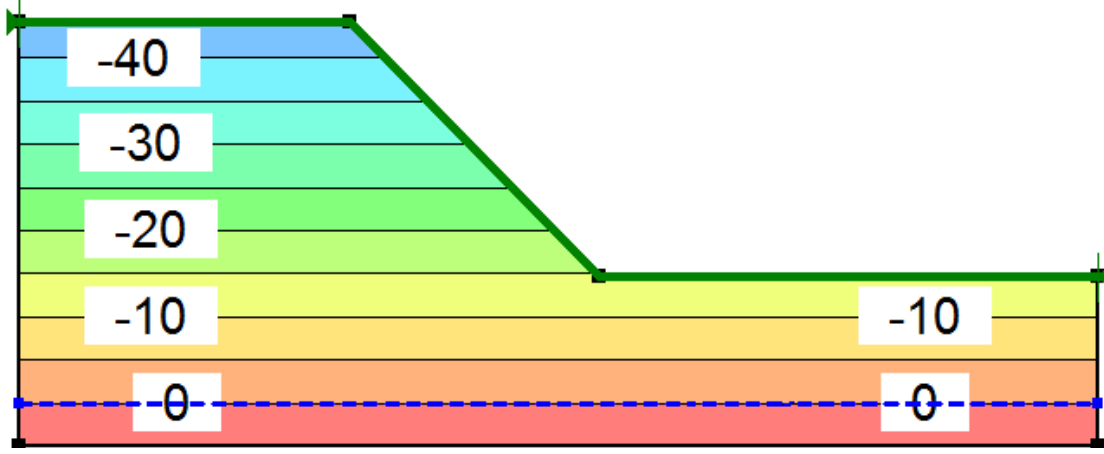
Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre ve matrik emmenin uniform olarak zemine etki ettiği düşünülerek yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 4.55 olarak elde edilmiştir.

5.1.2 Yeraltı su seviyesinin değişimiyle gözlenen şev stabilite analizi sonuçları

Yeraltı su seviyesinin değişimin, klasik zemin mekaniği ve doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan analizlerde elde edilen güvenlik sayısına etkisi incelenecektir. Yeraltı su seviyesi sırayla arttırılacak ve son olarak bölüm 5.1.3’de yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinde olduğu durum incelenecektir.

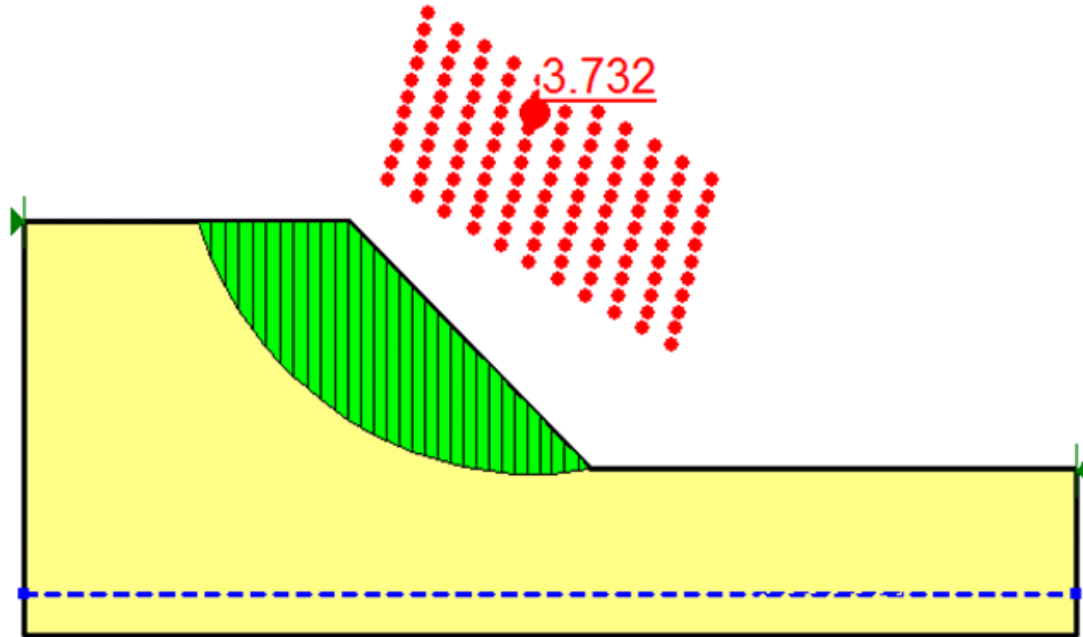
Çizelge 5.1’de yeraltı su seviyesi tanımlandığı durumlarda kullanılan parametreler gösterilmektedir. Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizlerde zemin su karakteristik eğrisi programa tanımlanmıştır. Kullanılan kohezyon ve kayma mukavemeti açıları her iki durumda da aynı değerlerde olup efektif parametrelerdir.

Şekil 5.4’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir. Negatif olan basınçlar matrik emme değerleridir ve zemin su karakteristik eğrisinin tanımlandığı doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizlerde güvenlik sayısını arttırıcı yönde etki etmektedir.



Şekil 5.4 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

Şekil 5.5’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.

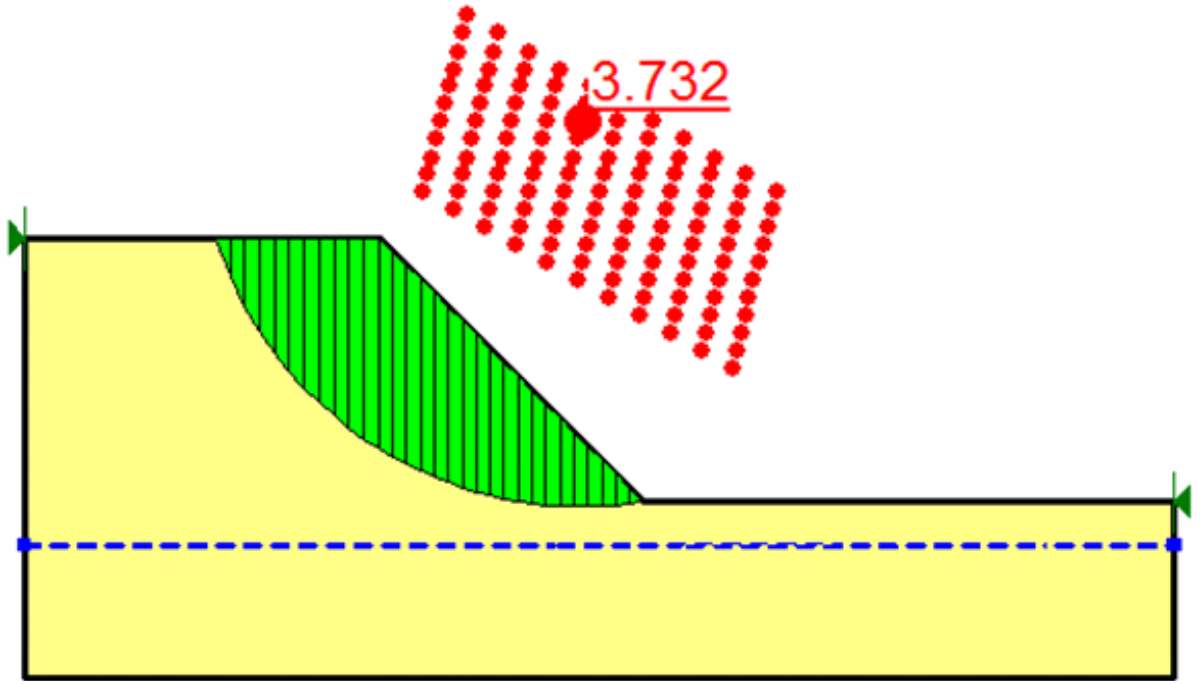


Şekil 5.5 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 3.73 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç başlangıç durumunda elde edilen sonuçla aynıdır. Bunun nedeni; yeraltı suyu seviyesinin kayma dairesinin aşağısında yer almasıdır.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 4.48 olarak elde edilmiştir.

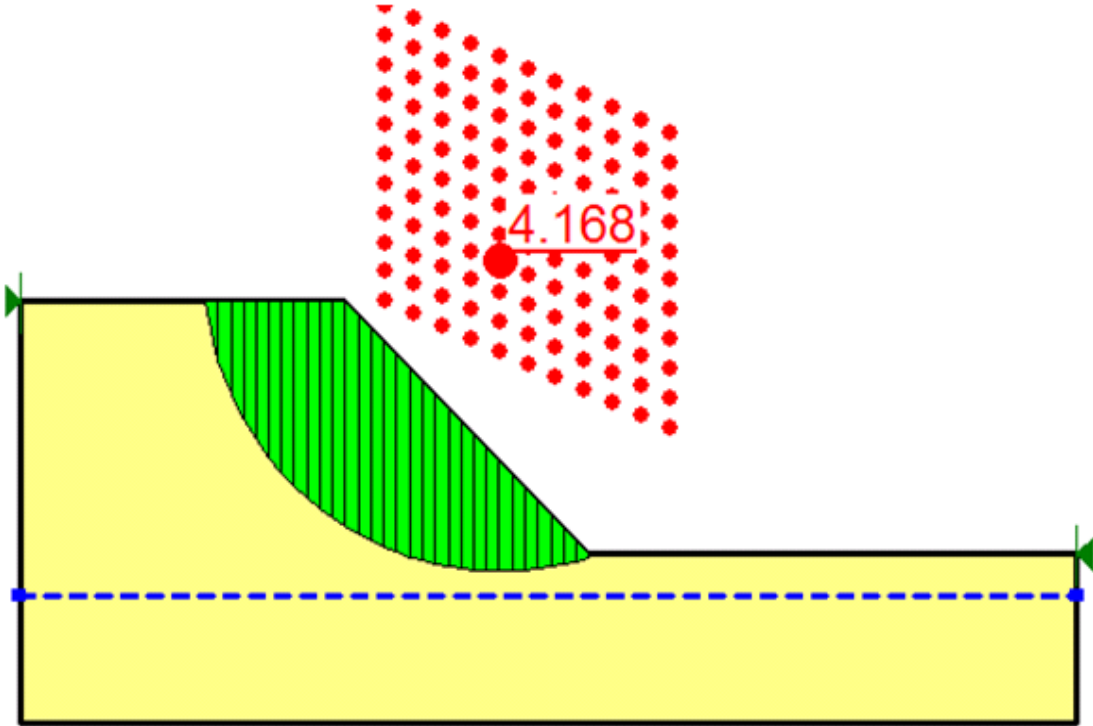
65



Şekil 5.8 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 3.73 olarak elde edilmiştir.

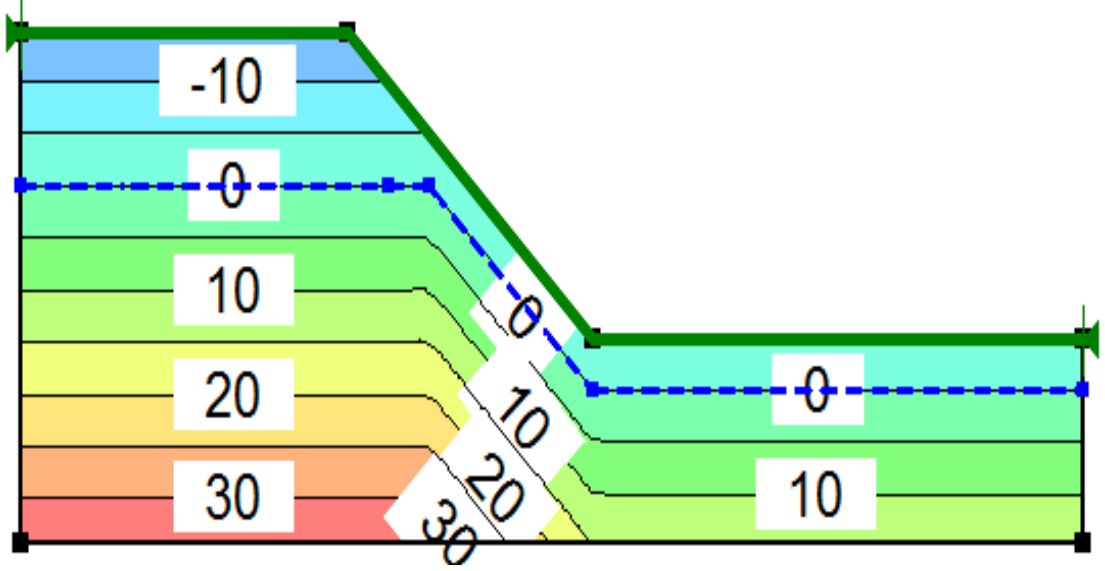
Şekil 5.9'da doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma daireesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.9 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

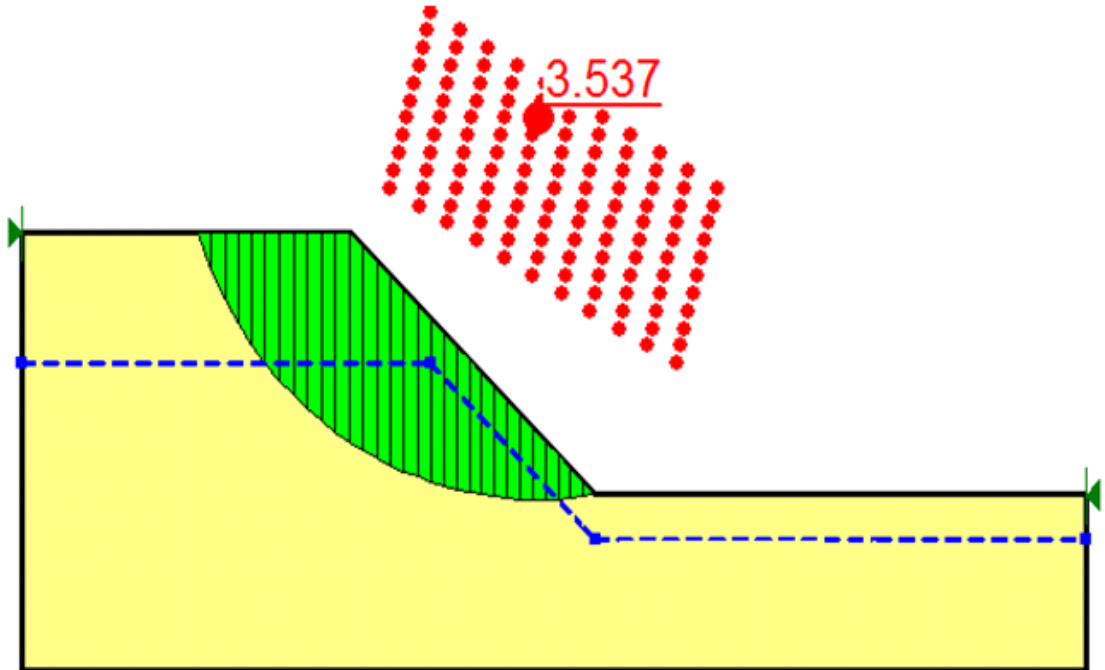
Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 4.17 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.10'da yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.10 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

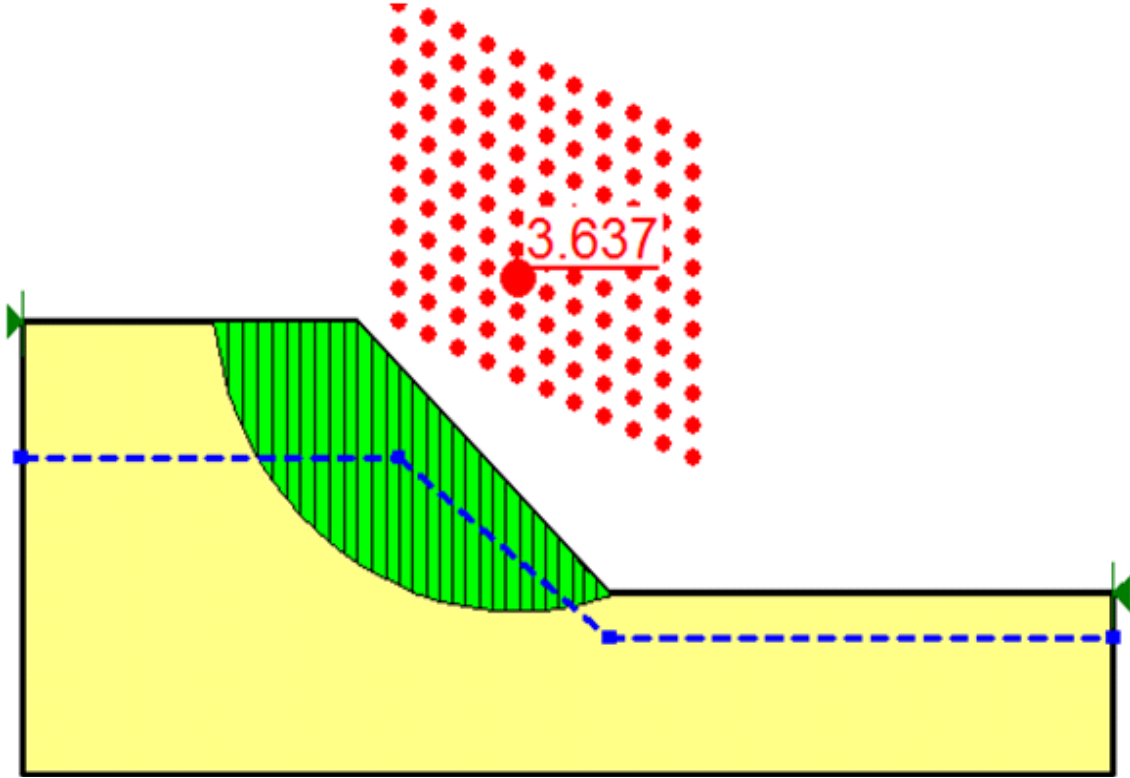
Şekil 5.11'de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.11 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 3.54 olarak elde edilmiştir.

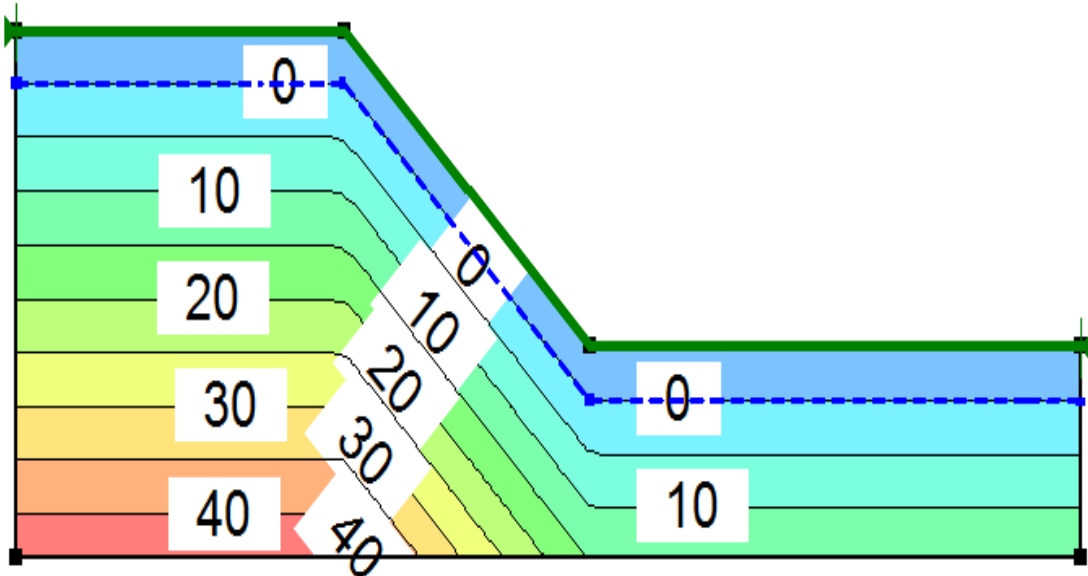
Şekil 5.12’de doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma daireesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.12 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

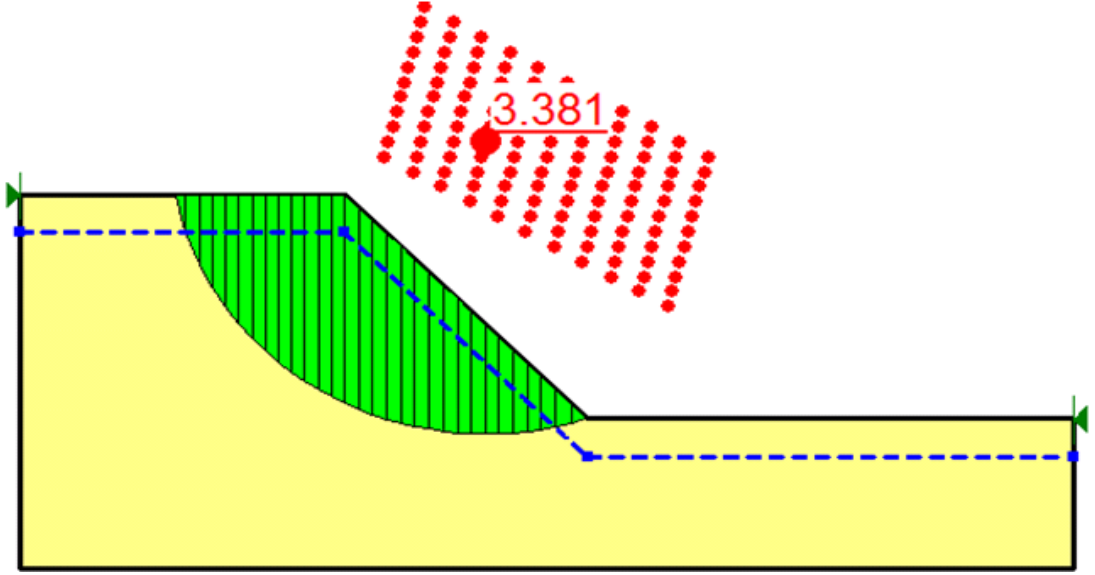
Doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 3.64 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.13’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değeri gösterilmektedir.



Şekil 5.13 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

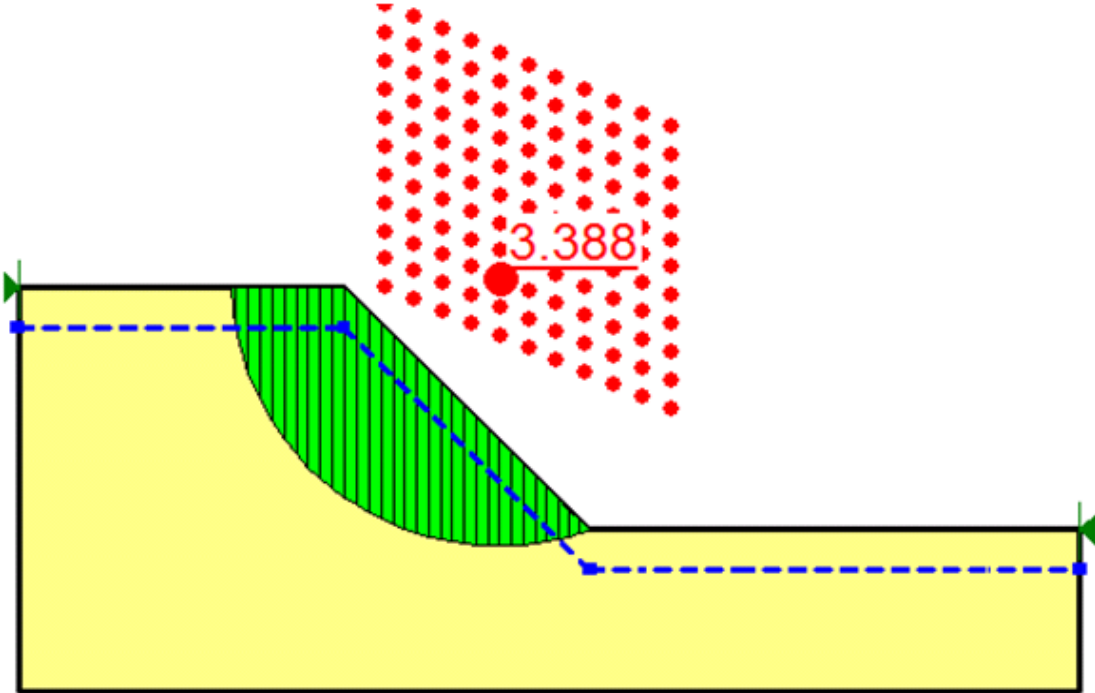
Şekil 5.14’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.14 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 3.38 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.15’de doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



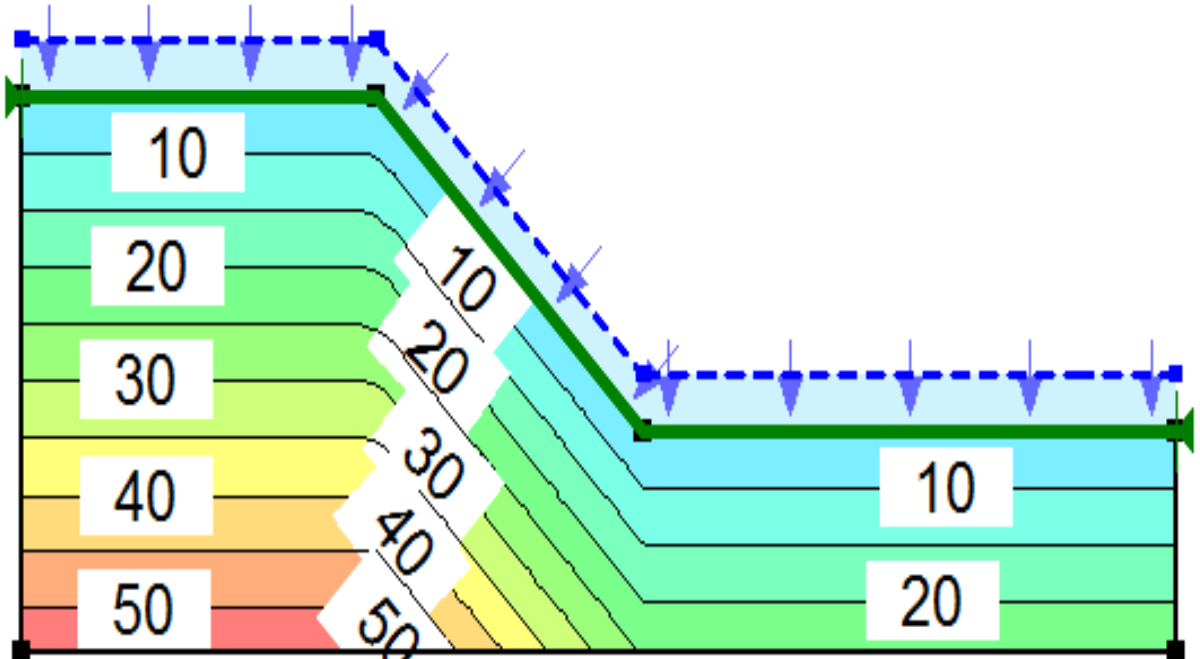
Şekil 5.15 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 3.39 olarak elde edilmiştir.

5.1.3 Zeminin suya doymun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları

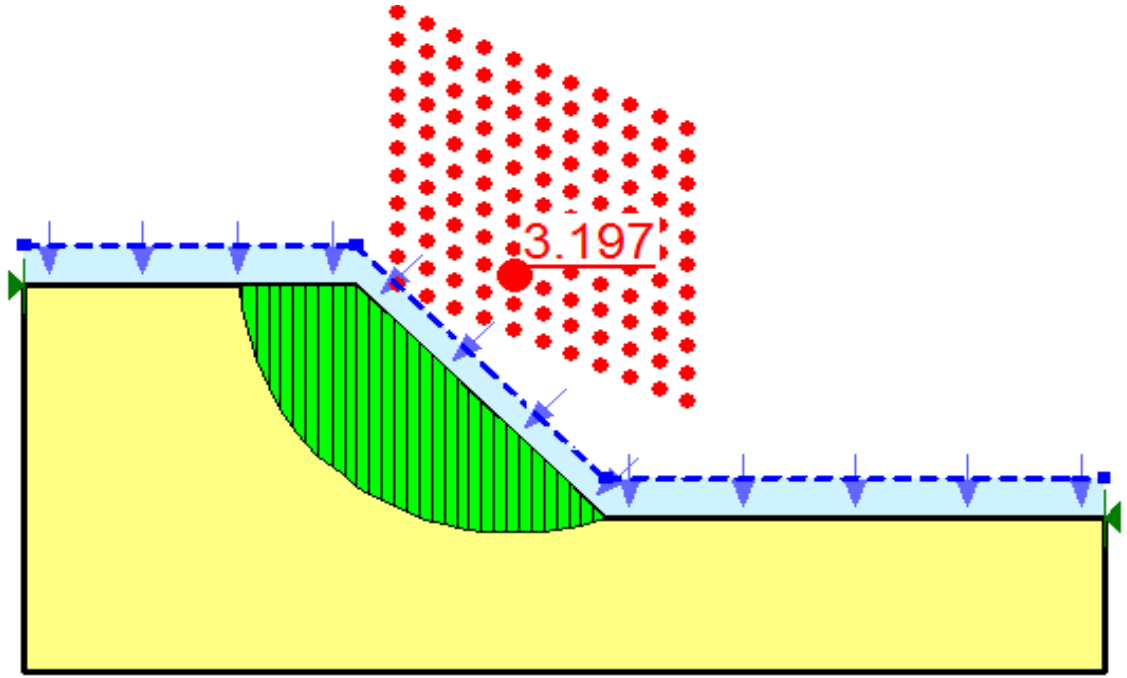
Önceki bölümlerde zeminin proktorla sıkıştırılarak elde edildiği başlangıçtaki özelliklerine sahip olduğu kabuller ve yeraltı suyunun zemin yüzeyinden aşağıda olduğu durumlar incelenmiştir. Bu bölümde yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden 50cm yukarıda olduğu durum incelenecektir. Zemin tamamen suya doymundur. Hem klasik zemin mekaniği analizlerinde hem de doymun olmayan zemin mekaniği analizlerinde efektif kohezyon ve efektif kayma mukavemeti açısı kullanılacaktır. Doymun olmayan zemin mekaniği analizlerinde programa SWCC tanımlanmıştır ancak SWCC'nin zemin tamamen yeraltı suyu altında olduğu için elde edilen güvenlik sayısına bir katkısının olmadığı görülmüştür.

Şekil 5.16'da yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değeri gösterilmektedir. Negatif bir boşluk suyu basıncı oluşmadığı için zemin matrik emmeye maruz kalmamıştır. Bu nedenle aşağıda da görüleceği üzere, klasik zemin mekaniği prensiplerine ve doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizlerde aynı güvenlik sayısı elde edilmiştir.



Şekil 5.16 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

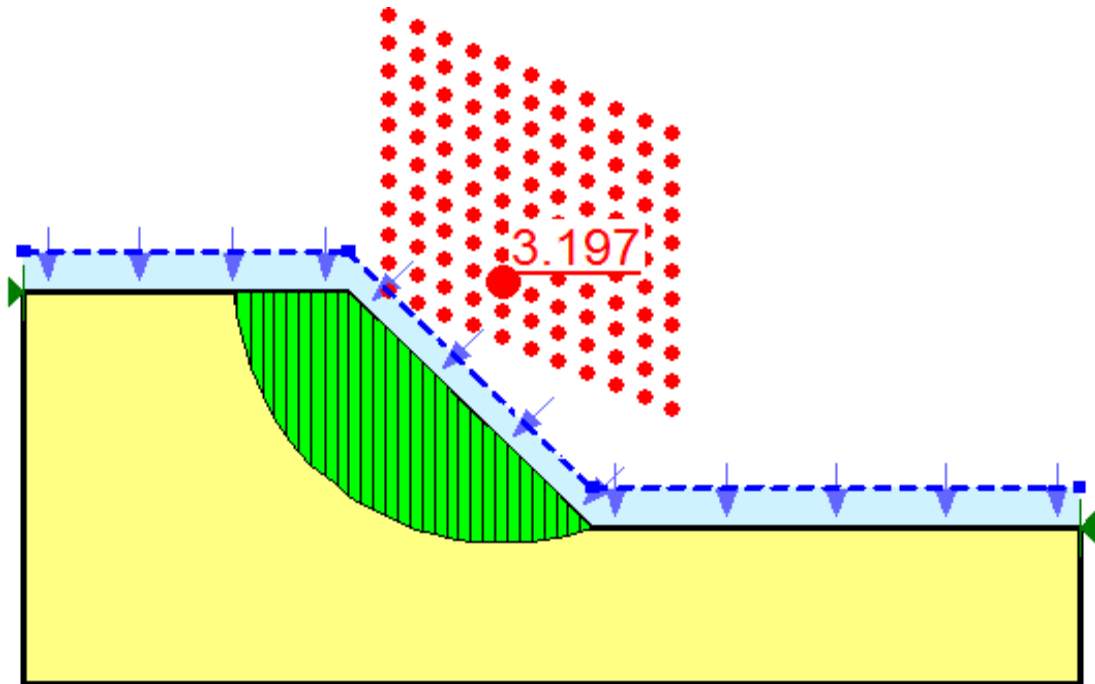
Şekil 5.17'de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.17 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 3.20 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.18’de doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.18 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune I için güvenlik sayısı 3.20 olarak elde edilmiştir.

5.2 Numune II (SP) Şev Stabilité Analiz Sonuçları

Numune II (SP) için elde edilen fiziksel ve mühendislik özellikler üçüncü bölümde özetlenmiştir. Numune; birleşik zemin sınıflandırmasına göre kötü derecelenmiş kumdur. Numunenin içeriğinde %100 oranında kum yer almaktadır.

Numunenin analizde kullanılan parametreleri Çizelge 5.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 : Numune II için programda kullanılan zemin parametreleri.

<i>YASS Durumu</i>	<i>Analiz Türü</i>	<i>c (kPa)</i>	<i>ϕ (°)</i>	<i>γ (kN/m³)</i>	<i>SWCC</i>
Başlangıçtaki (YASS Yok)	Klasik Zemin Mekaniği	1	42	19	Tanımlı Değil
	DOZ	1.91	42	19	Tanımlı Değil
YASS Tanımlı	Klasik Zemin Mekaniği	1	42	19	Tanımlı Değil
	DOZ	1	42	19	Tanımlı

Başlangıç durumunda ki kohezyonu belirleyebilmek için kullanılan matrik emme basıncı 2.5 kPa’dır.

Üçüncü bölümde gösterilen sonuçlarda Numune II için efektif kohezyon değeri 0 kPa olmasına rağmen yapılan analizlerde kayma daire yüzeyinin yüzeysel değil daha derinde oluşacağı düşünülerek kohezyon değeri 1 kPa olarak alınmıştır. Optimum koşullarda hazırlanmış numunenin başlangıç durumunda doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analiz için kohezyon değeri hesaplanırken, efektif kohezyon 0 kPa olarak alınmış ve denklem 5.2 ve denklem 5.3’den yararlanarak programa girilen kohezyon değeri hesaplanmıştır. Başlangıç durumunda hesaplanan kohezyon değeri 1.91 kPa’dır.

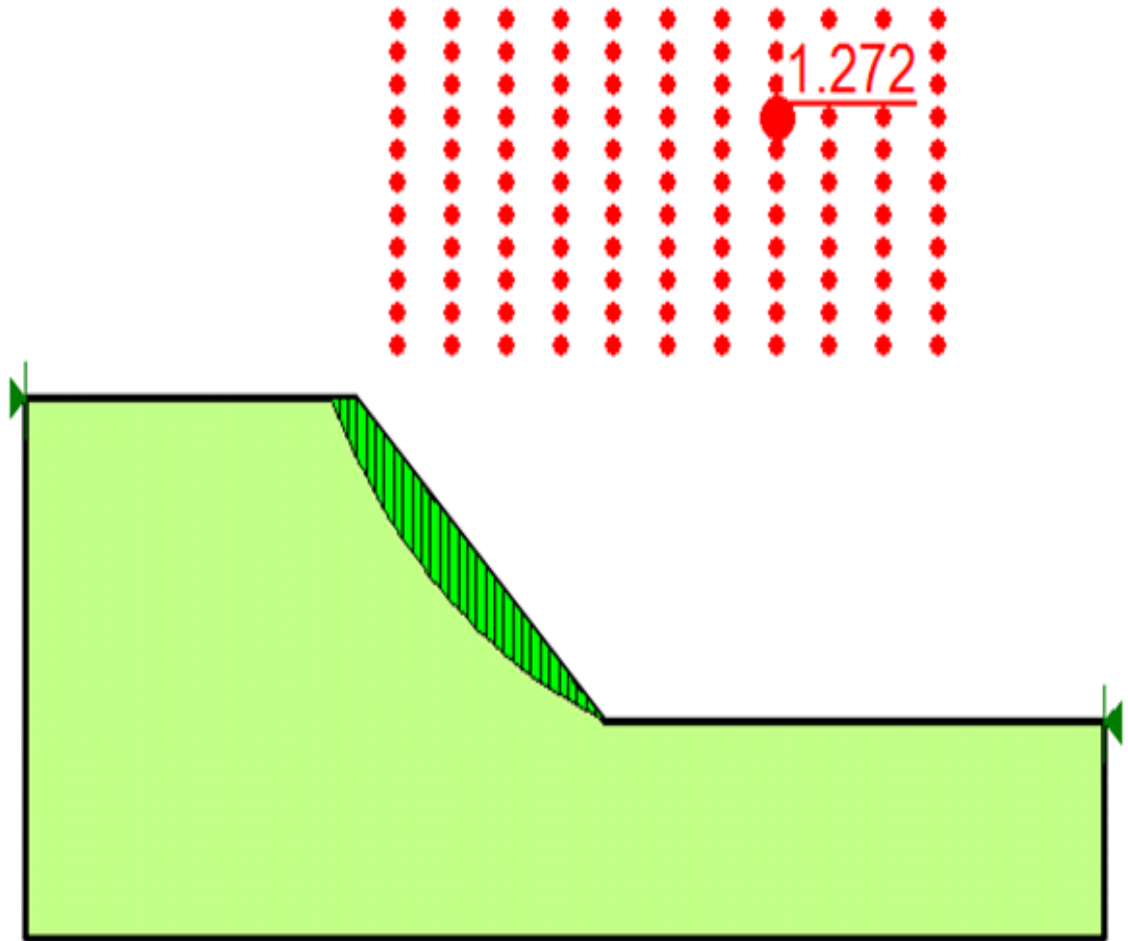
Denklem 5.2’de yer alan parametreler, hacimsel su muhtevası ve matrik emme basıncına bağlı olarak belirlenen ekte yer alan zemin su karakteristik eğrisinden okunur ve matrik emme basıncına bağlı kayma mukavemeti açısı hesaplanır. Numune II’ye ait şev stabilite analizi sonuçları; sırasıyla başlangıç durumunu, su

seviyelerinin yükselerek zemin yüzeyine yaklaştığı durumları ve zeminin suya tamamen doymuş olduğu durumu göstermektedir.

5.2.1 Başlangıç durumundaki şev stabilite analizi sonuçları

Yeraltı su seviyesinin tanımlanmadığı %85 doygunluk derecesine sahip %50 izafi sıklığa göre hazırlanmış numunenin başlangıçtaki özelliklerine göre yapılan analizler için kullanılan zemin parametreleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Numunenin başlangıçtaki matrik emme değeri %85 doygunluk derecesine karşılık gelen değerdir.

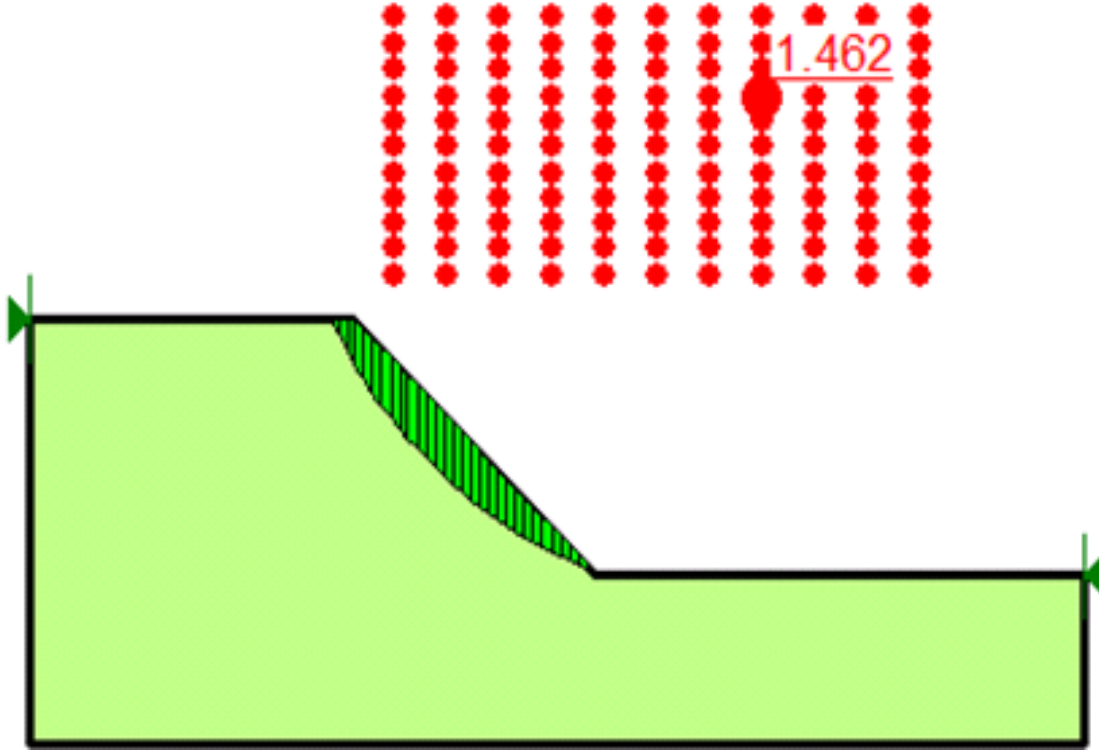
Şekil 5.19’da klasik zemin mekaniği parametreleri kullanılarak yapılan şev stabilite analizinin sonucu gösterilmektedir.



Şekil 5.19 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan ve matrik emmenin kayma mukavemetine etkisinin ihmal edildiği analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.27 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.20 başlangıç durumunda doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucunu göstermektedir.



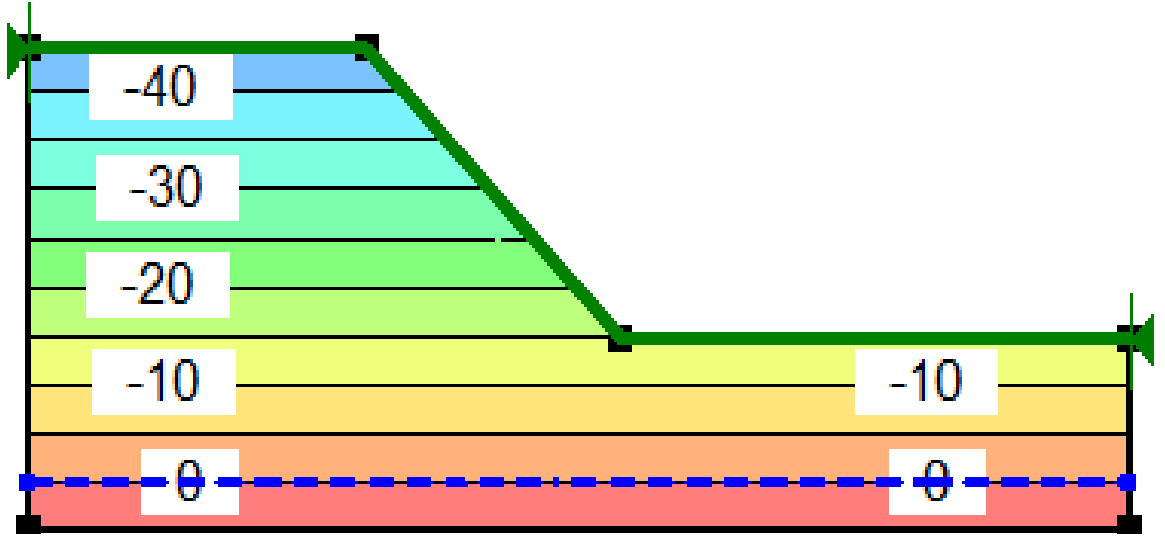
Şekil 5.20 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

Doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre ve matrik emmenin uniform olarak zemine etki ettiği düşünülerek yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.46 olarak elde edilmiştir.

5.2.2 Yeraltı su seviyesinin değişimiyle gözlenen şev stabilite analizi sonuçları

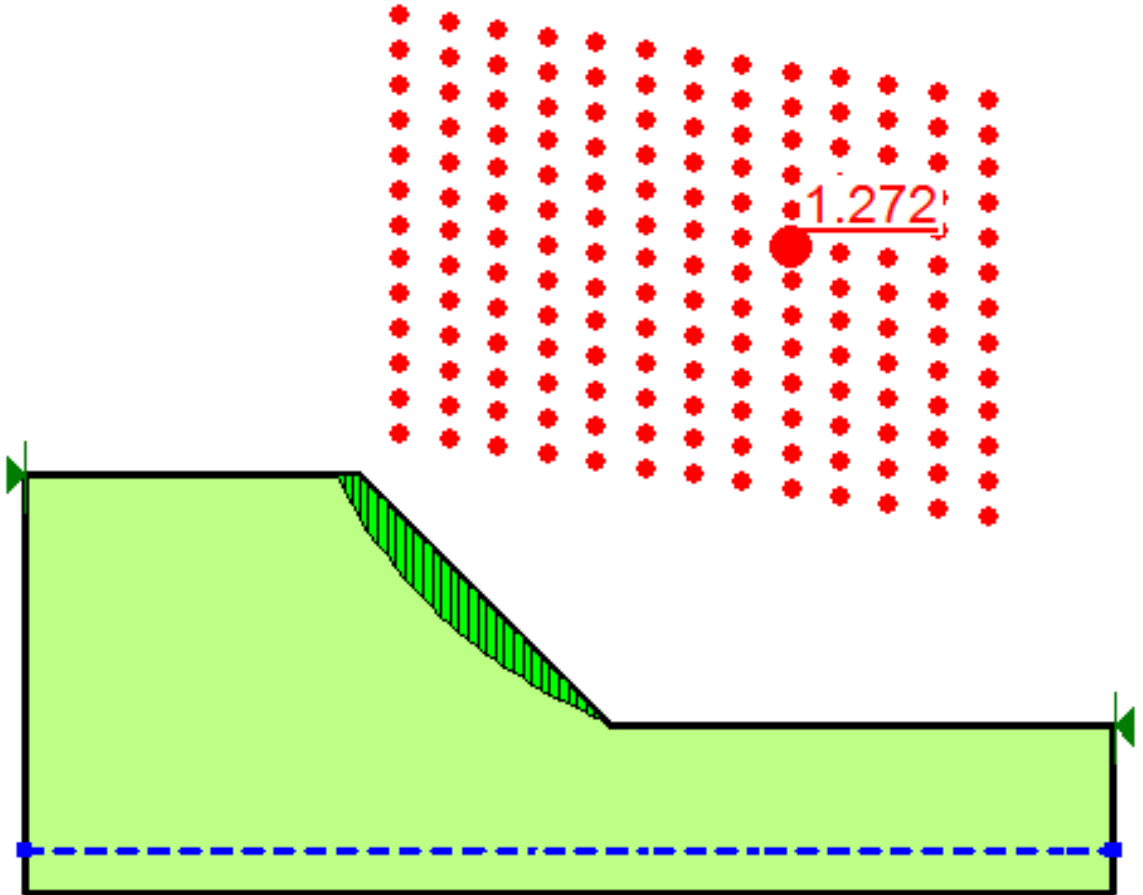
Numune II için yeraltı su seviyesinin değişimiyle klasik zemin mekaniği ve doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre elde edilen güvenlik sayısının değişimi incelenecektir. Çizelge 5.2’de yeraltı su seviyesi tanımlandığı durumlarda kullanılan parametreler gösterilmektedir. Doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizlerde zemin su karakteristik eğrisi programa tanımlanmıştır. Kullanılan kohezyon ve kayma mukavemeti açıları her iki durumda da aynı değerlerde olup efektif parametrelerdir.

Şekil 5.21’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir. Daha önceki bölümlerde de negatif su basıncının matrik emme değeri olduğundan bahsedilmiş ve güvenlik sayısını arttırıcı yönde etkisinin olduğu anlatılmıştır.



Şekil 5.21 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

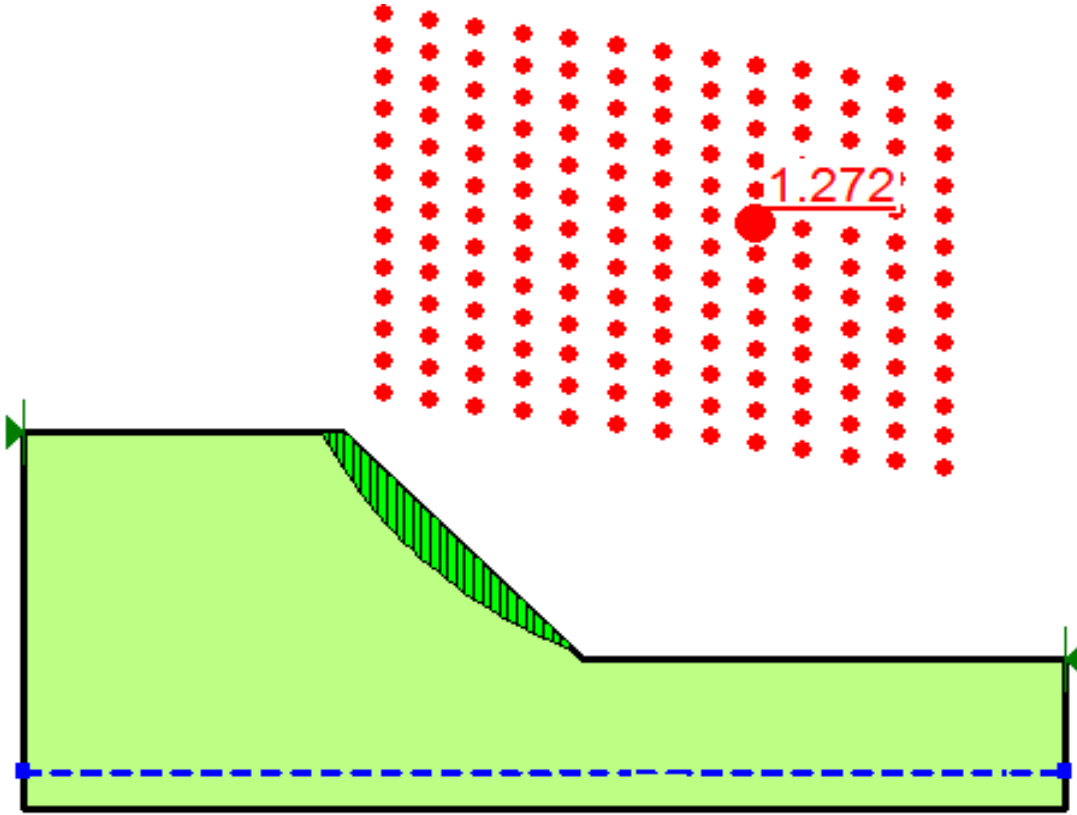
Şekil 5.22’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.22 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 1.27 olarak elde edilmiştir.

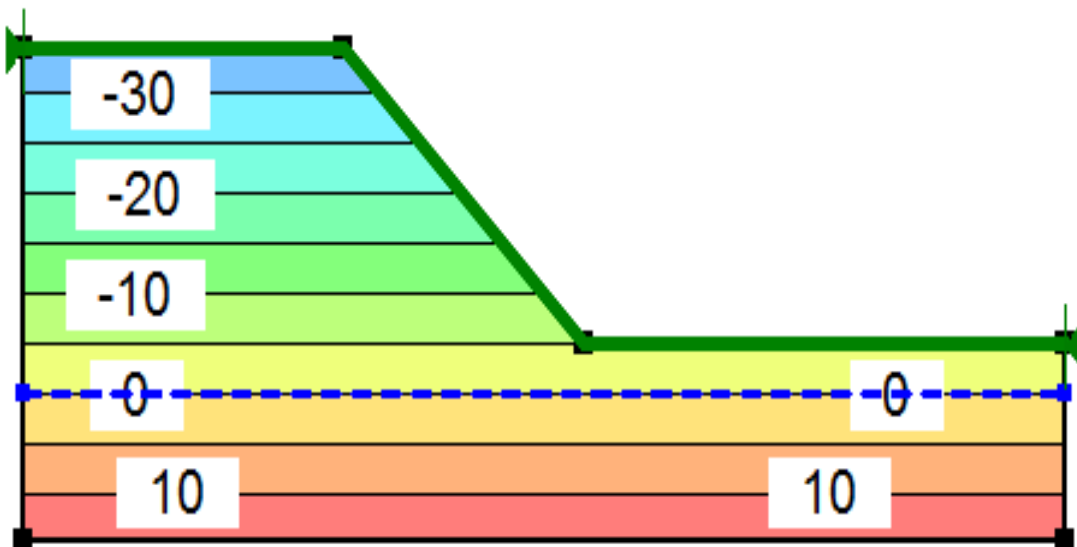
Şekil 5.23’de doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma daireesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.23 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilize analizi sonucu ve kritik kayma daireesi yüzeyi.

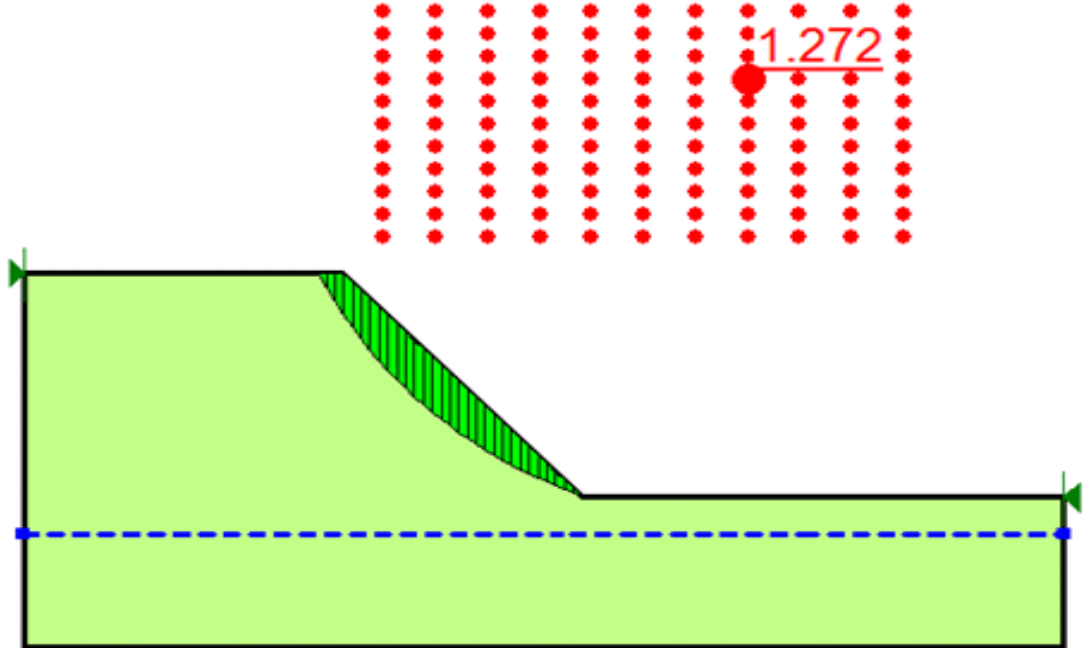
Doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.27 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.24’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değeri gösterilmektedir.



Şekil 5.24 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

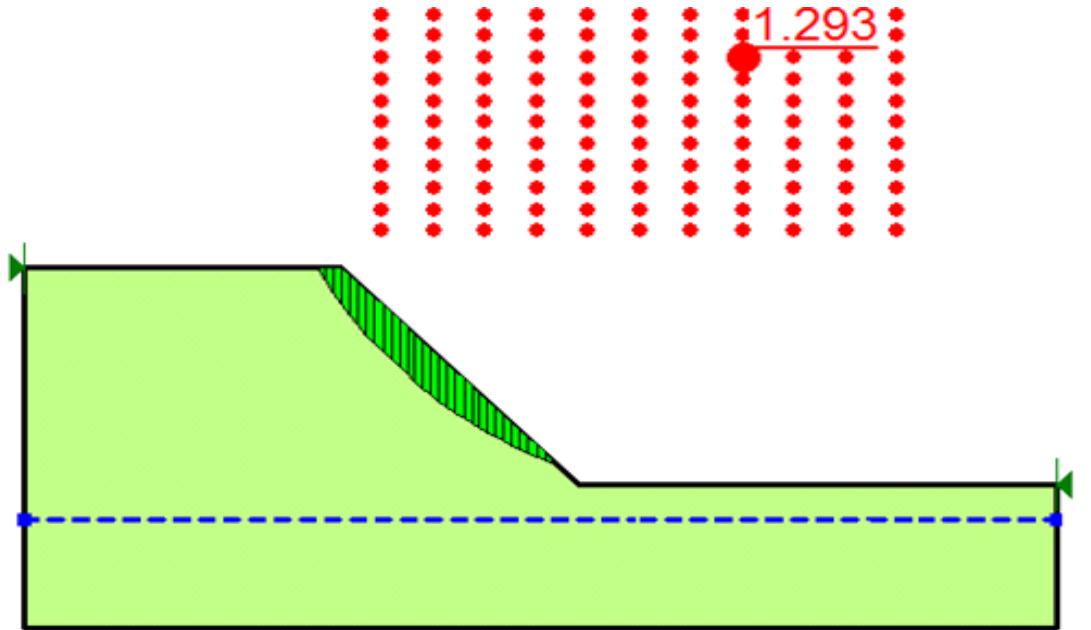
Şekil 5.25’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.25 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 1.27 olarak elde edilmiştir.

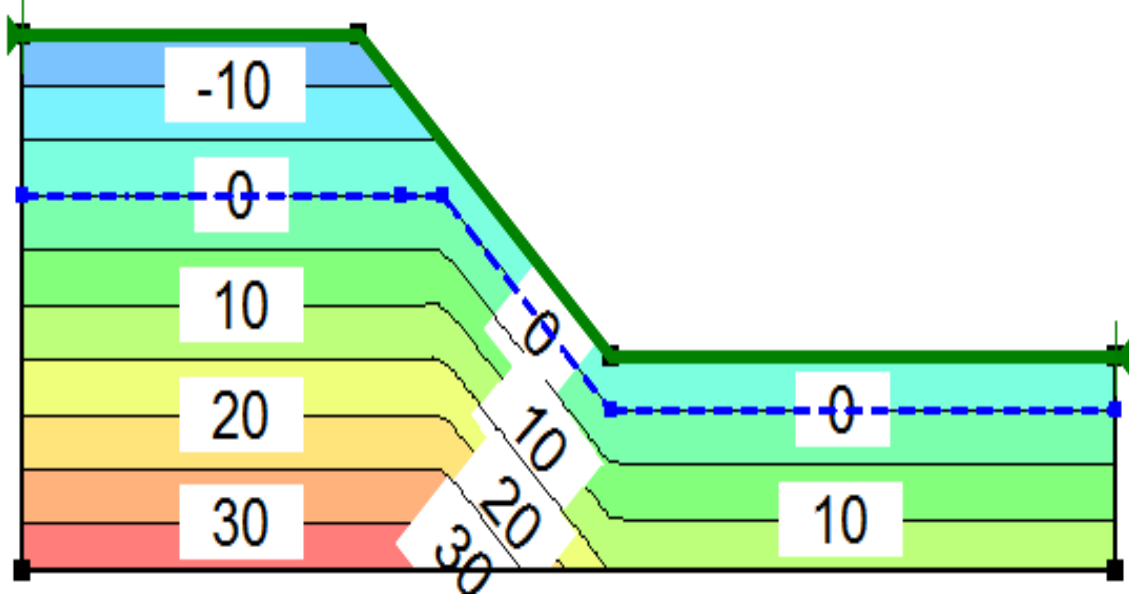
Şekil 5.26’da doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.26 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

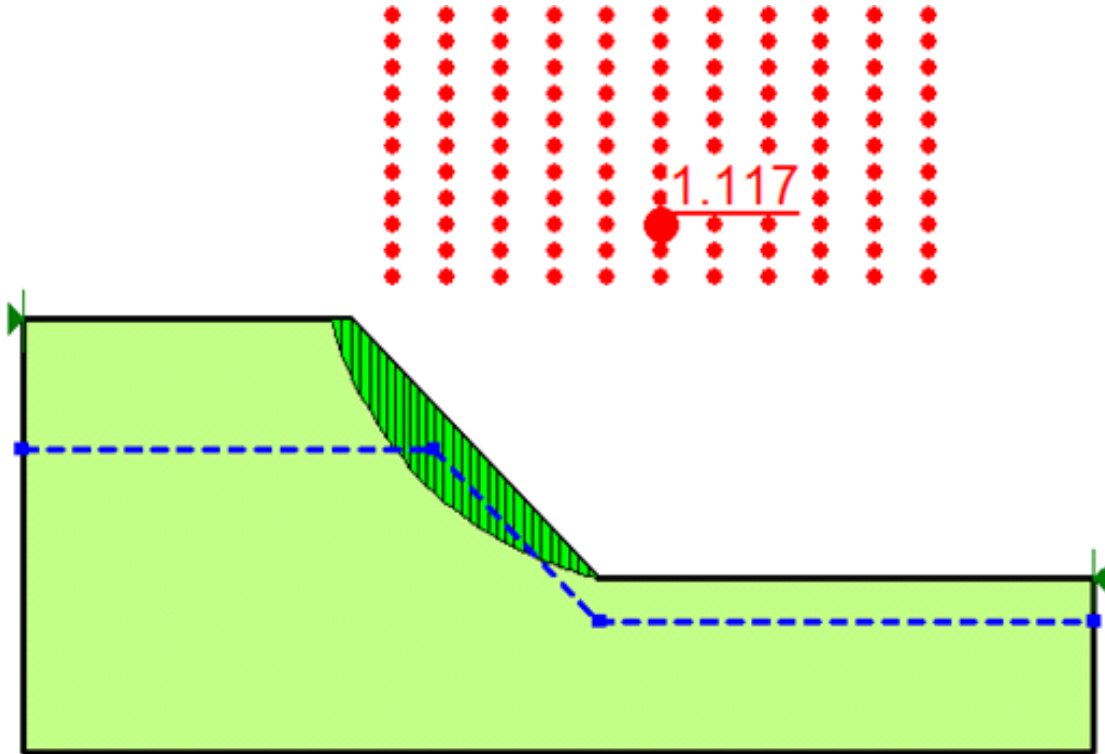
Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.29 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.27’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



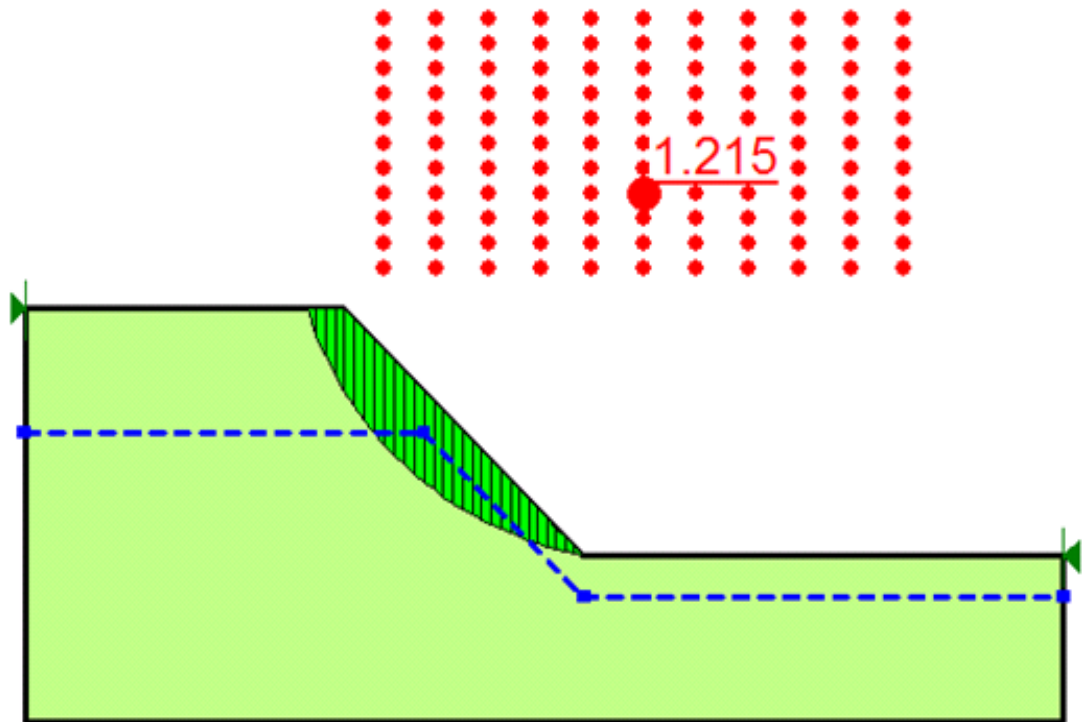
Şekil 5.27 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

Şekil 5.28’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.28 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Şekil 5.29’da doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.

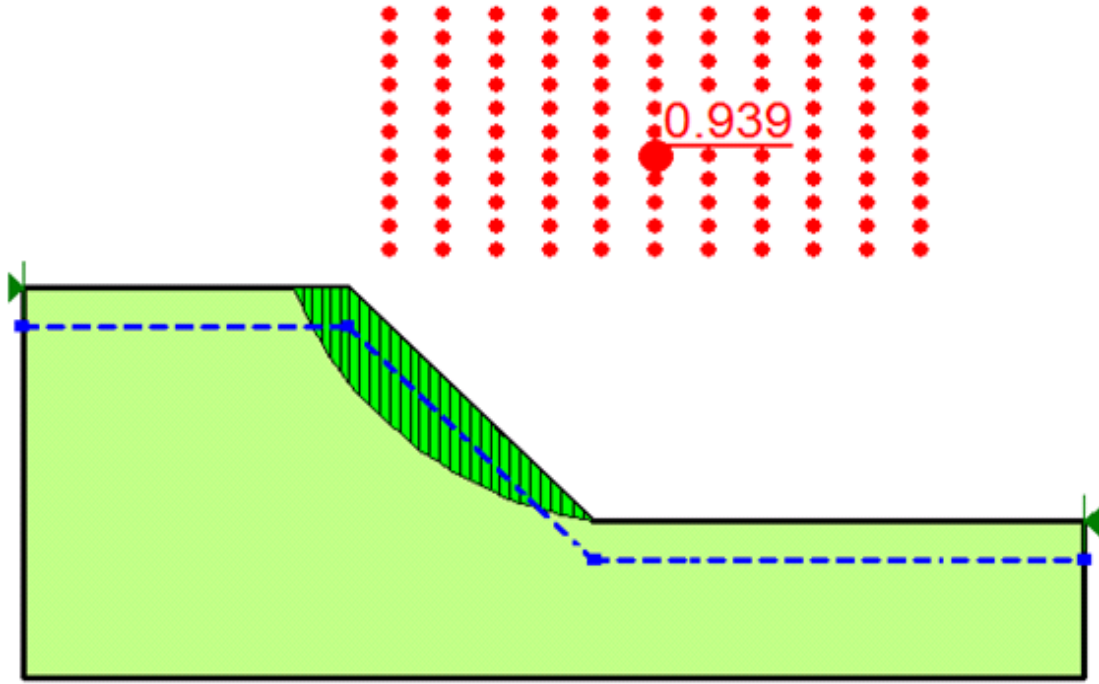


Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.22 olarak elde edilmiştir.

A diagram of a stepped profile, similar to a topographic cross-section. The profile is defined by a thick green line. The area is filled with horizontal layers of different colors. From top to bottom, the layers are: light blue (labeled 0), light cyan (labeled 10), light green (labeled 20), medium green (labeled 30), yellow (labeled 40), orange (labeled 40), and red (labeled 40). The profile has a vertical left side, a horizontal top, a diagonal slope, a horizontal bottom, and a vertical right side. A dashed blue line follows the top and bottom horizontal segments, with the number 0 written in a white box at each end. The diagonal slope is also labeled with 0, 10, 20, 30, and 40 in white boxes, corresponding to the layers it crosses.

79

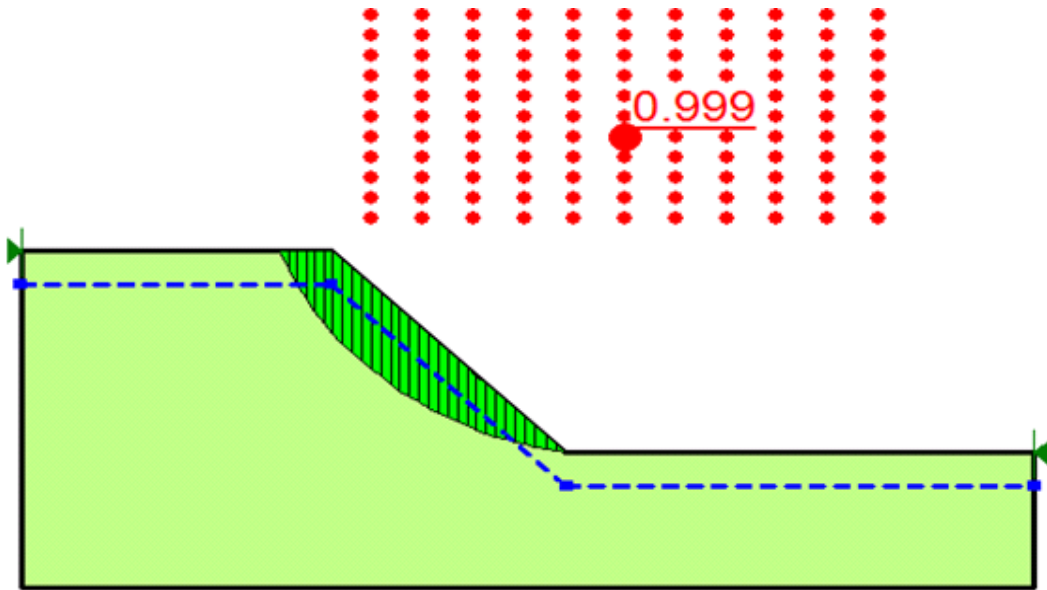
Şekil 5.31’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.31 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 0.94 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.32’de doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



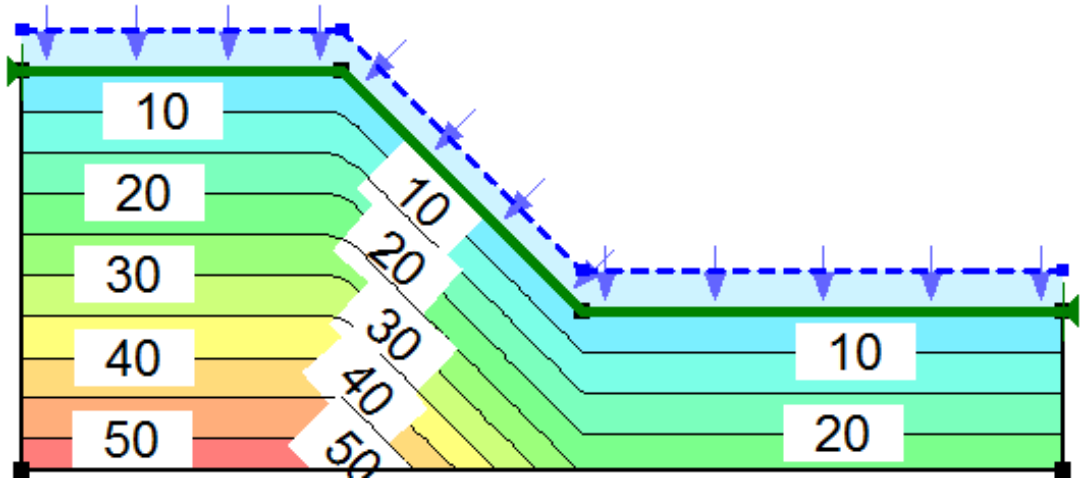
Şekil 5.32 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 1.00 olarak elde edilmiştir.

5.2.3 Zeminin suya doygun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları

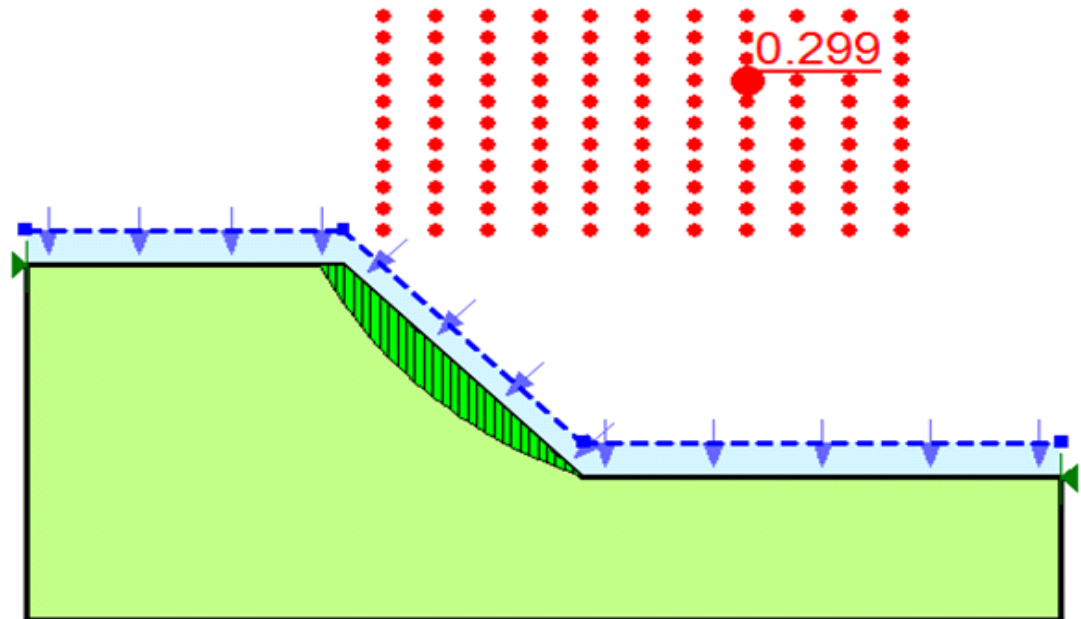
Zeminin tamamen suya doygun olduğu durumdaki analiz için detaylar Numune I için anlatılmış ve bölüm 5.1.3’de mevcuttur. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 50cm yukarıdadır.

Şekil 5.33’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.33 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

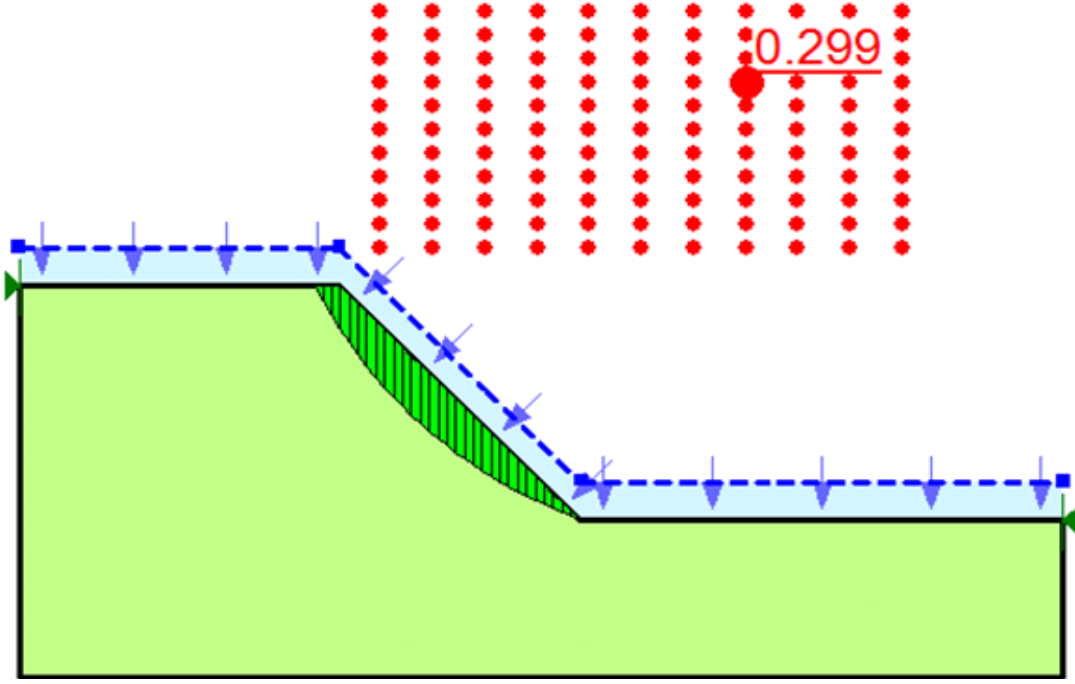
Şekil 5.34’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.34 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 0.30 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.35’de doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.35 : Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune II için güvenlik sayısı 0.30 olarak elde edilmiştir.

5.3 Numune III (CL) Şev Stabilite Analiz Sonuçları

Numune III (CL) için elde edilen fiziksel ve mühendislik özellikler üçüncü bölümde özetlenmiştir. Numune; birleşik zemin sınıflandırmasına göre düşük plastisiteli kildir. Numunenin içeriğinde %28 oranında kum yer almaktadır.

Numunenin analizde kullanılan parametreleri Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

Kompaksiyonla %13 su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan numunenin ilk durumdaki doygunluk derecesi %45’dir. Başlangıçtaki durumda ki kohezyonu belirleyebilmek için kullanılan matrik emme basıncı 205 kPa’dır. Bölüm 5.2 ve 5.3’de kuru durumda doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizleri için seçilen parametrelerin belirlenmesi anlatılmıştır. Numune III’e ait şev stabilite analizi sonuçları; sırasıyla kuru durumu, su seviyelerinin yükselerek

zemin yüzeyine yaklaştığı durumları ve zeminin suya tamamen doygun olduğu durumu göstermektedir.

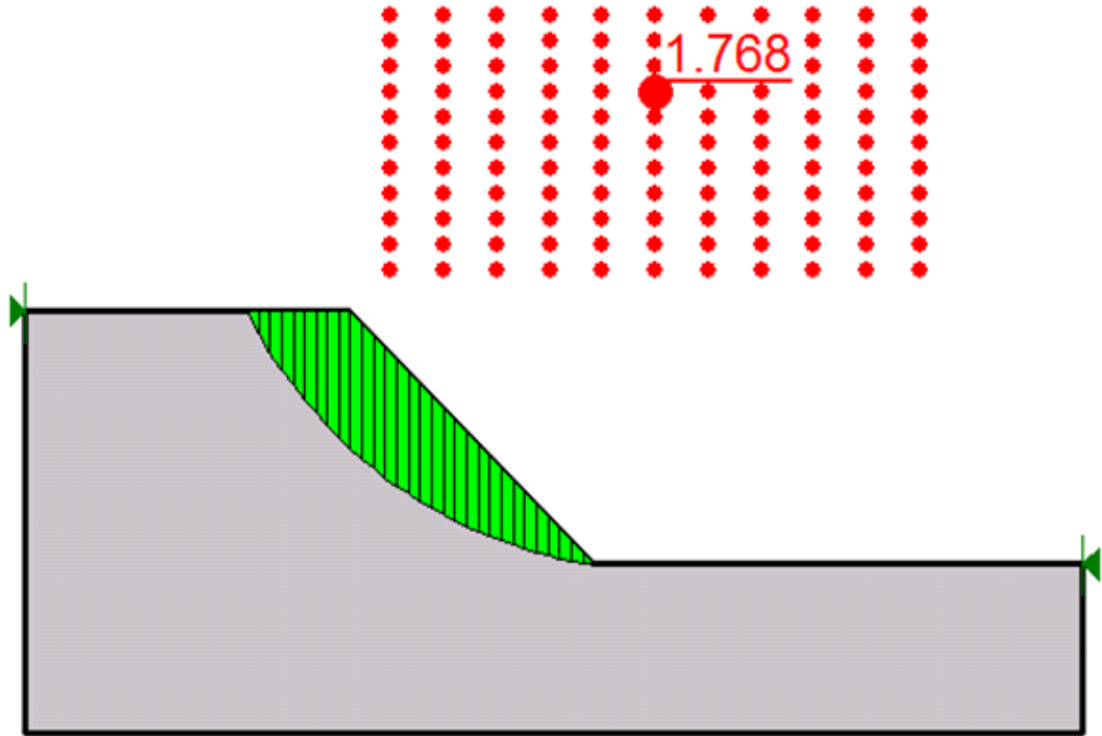
Çizelge 5.3 : Numune III için programda kullanılan zemin parametreleri.

YASS Durumu	Analiz Türü	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m³)	SWCC
Başlangıçtaki Durum (YASS Yok)	Klasik Zemin Mekanîği	7	25	16	Tanımlı Değil
	DOZ	76.7	25	16	Tanımlı Değil
YASS Tanımlı	Klasik Zemin Mekanîği	7	25	16	Tanımlı Değil
	DOZ	7	25	16	Tanımlı

5.3.1 Başlangıç durumundaki şev stabilite analizi sonuçları

Yeraltı su seviyesinin tanımlanmadığı başlangıç koşullarında yapılan analizler için kullanılan zemin parametreleri Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

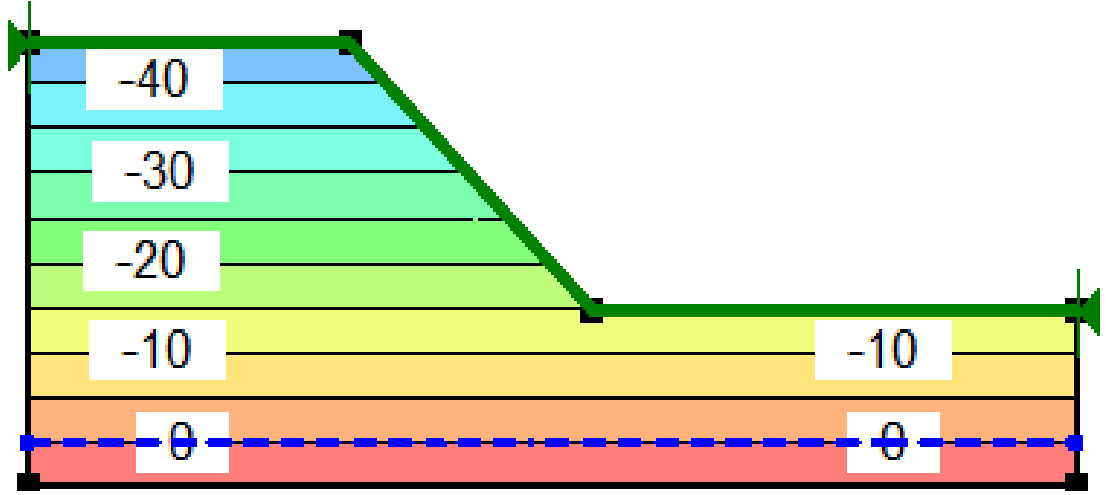
Şekil 5.36’da klasik zemin mekanîği parametreleri kullanılarak yapılan şev stabilite analizinin sonucu gösterilmektedir.



Şekil 5.36 : Klasik zemin mekanîği ilkelerine göre yapılan kuru durumdaki şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma daresi yüzeyi.

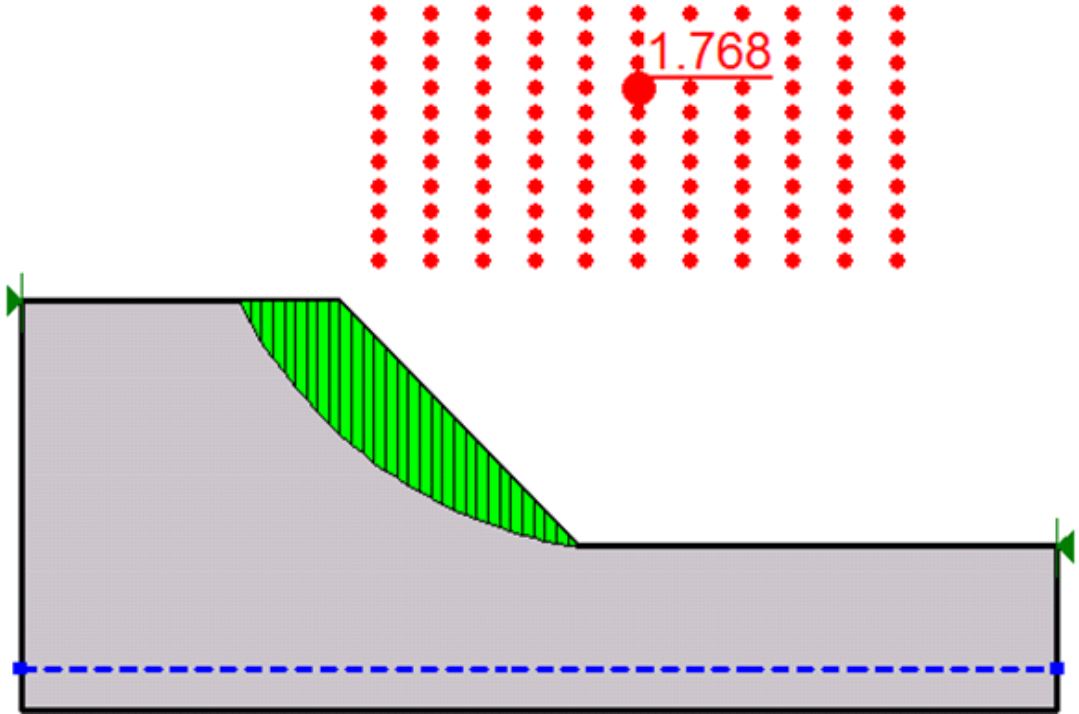
mukavemeti açıları her iki durumda da aynı değerlerde olup kesme kutusu deneyi sonucu belirlenen efektif parametrelerdir.

Şekil 5.38’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir. Daha önceki bölümlerde de negatif su basıncının matrik emme değeri olduğundan bahsedilmiş ve güvenlik sayısını artırıcı yönde etkisinin olduğu anlatılmıştır. Analiz sonuçlarında matrik emme değerinin etkisi daha net görülecektir.



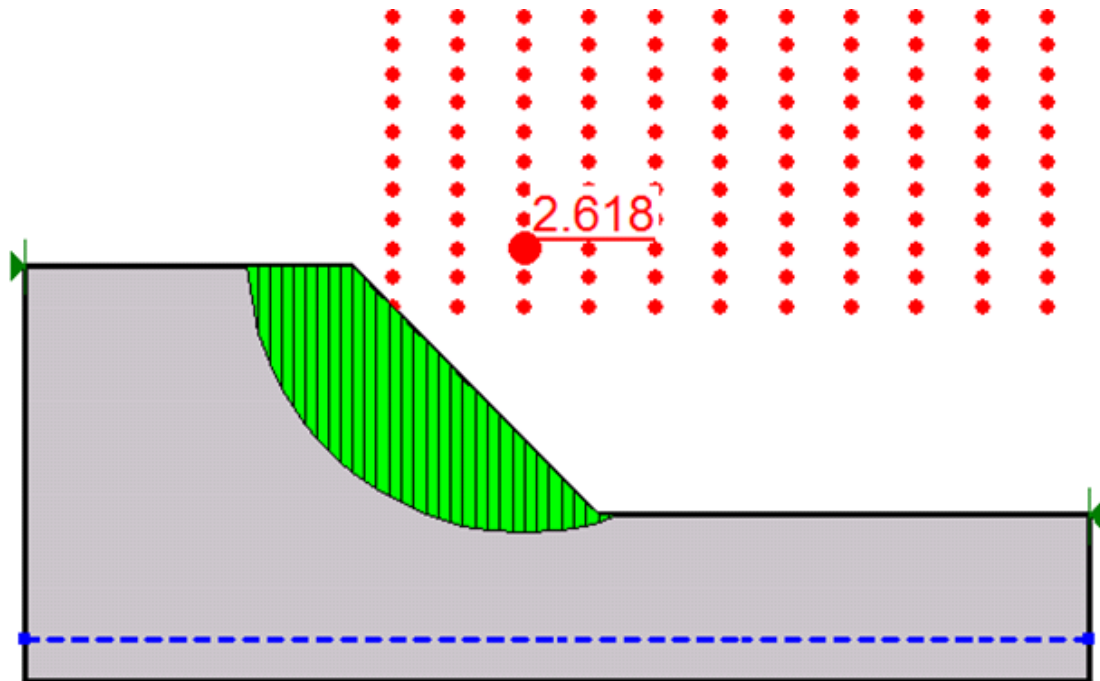
Şekil 5.38 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

Şekil 5.39’da klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.39 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Şekil 5.40'da doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.

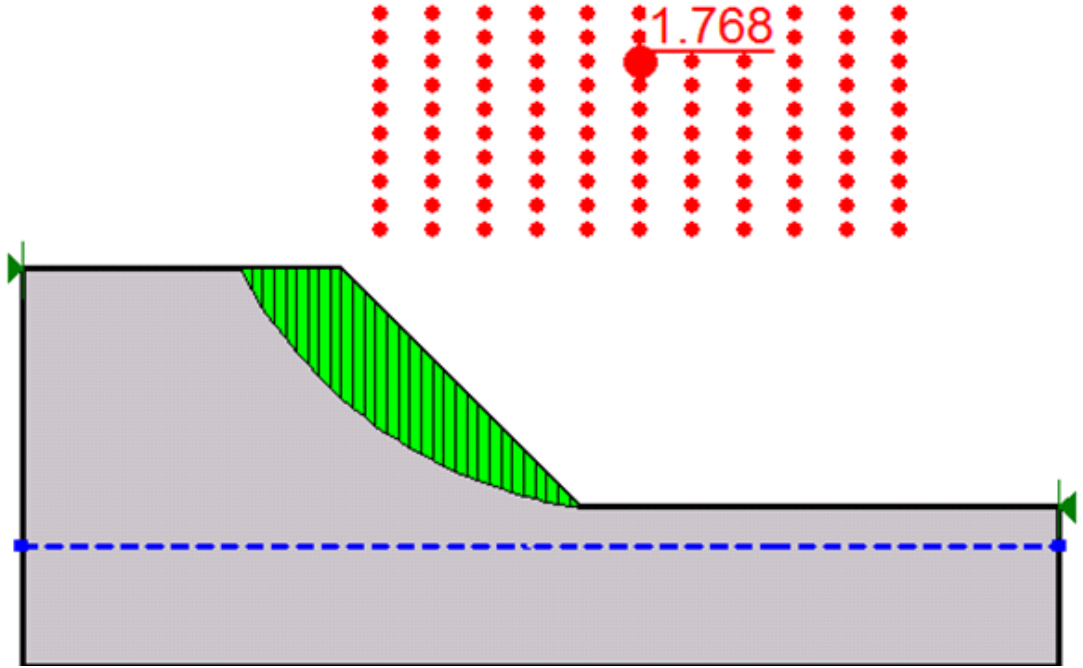


Doğru olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune III için güvenlik sayısı 2.62 olarak elde edilmiştir.

The diagram shows a cross-section of a dam. The dam's profile is defined by a thick green line. The interior of the dam is divided into horizontal layers of different colors, each labeled with a value in a white box: -30 (blue), -20 (cyan), -10 (green), 0 (yellow), 10 (orange), and 10 (red). A dashed blue line represents the water level, labeled with '0' at both ends. The dam is supported by a foundation, indicated by a thick black line at the bottom.

86

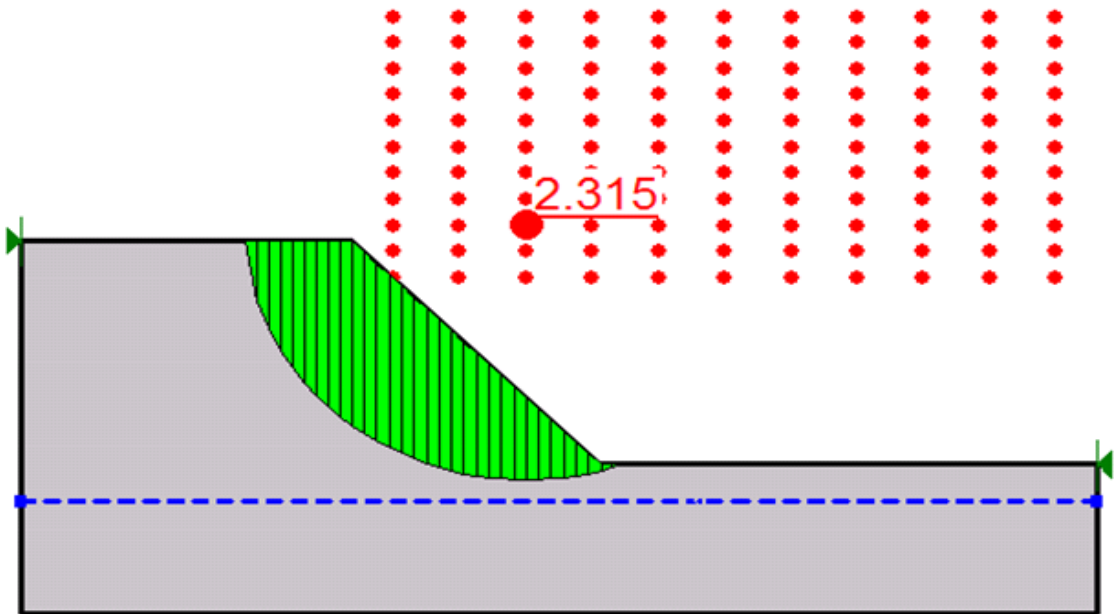
Şekil 5.42’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.42 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 1.77 olarak elde edilmiştir.

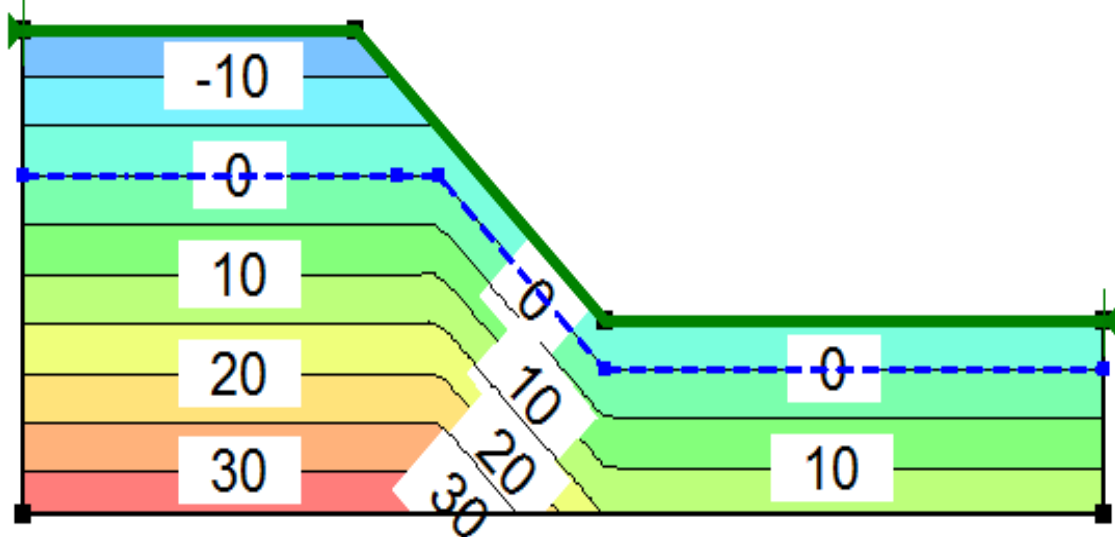
Şekil 5.43’de doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.43 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

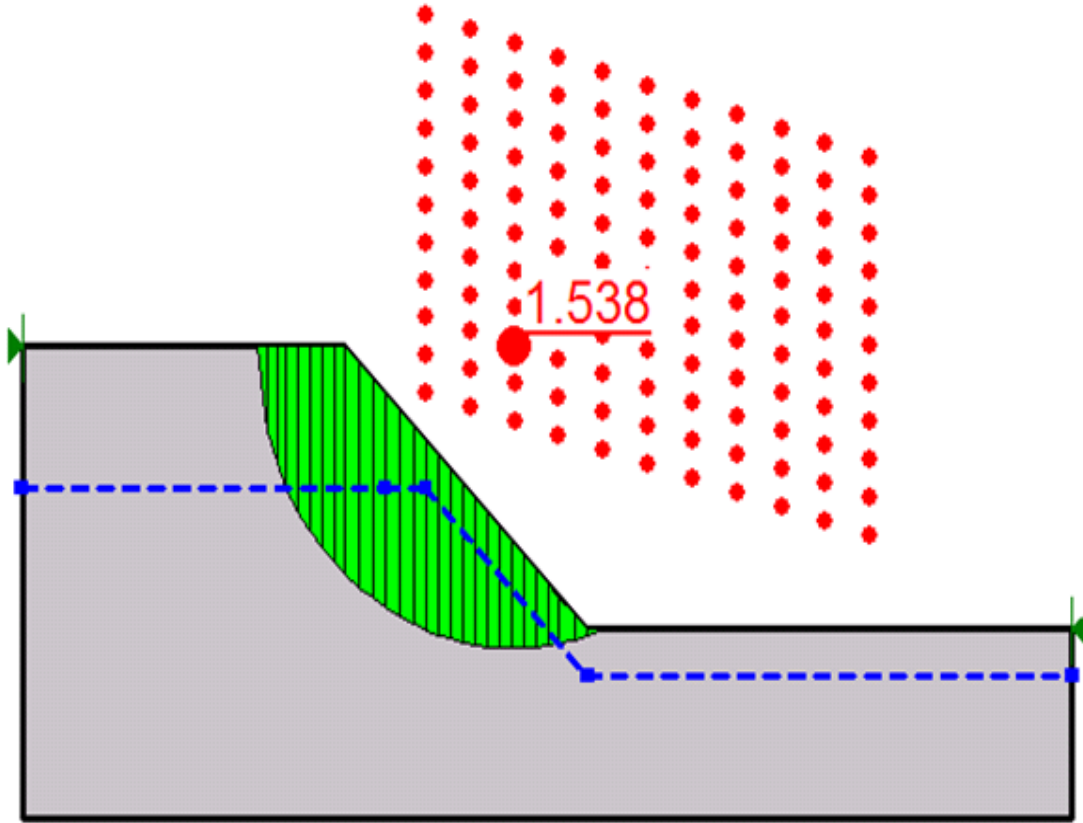
Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune III için güvenlik sayısı 2.32 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.44’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



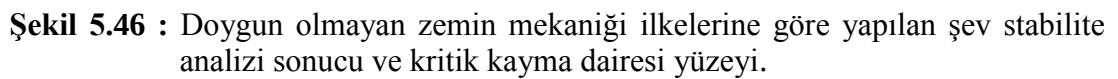
Şekil 5.44 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

Şekil 5.45’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.45 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

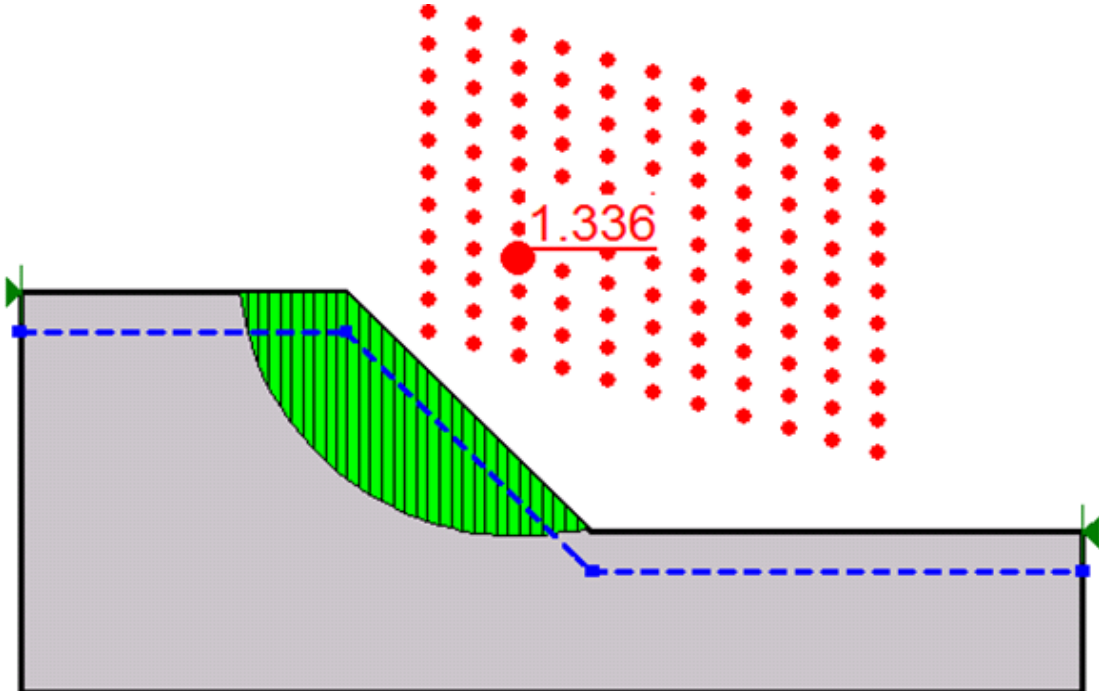
Şekil 5.46’da doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.47’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



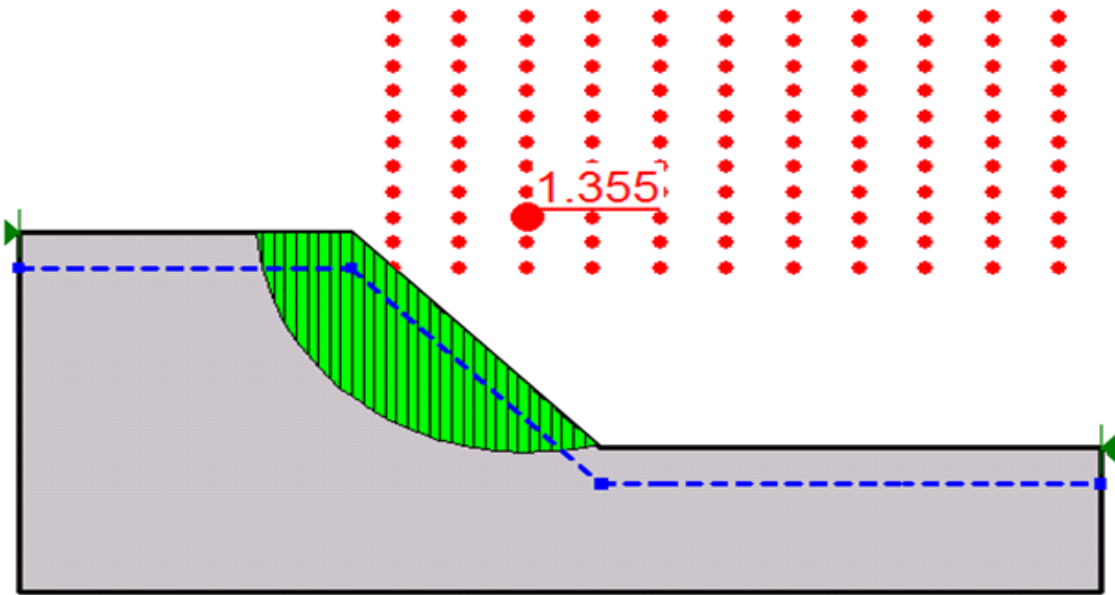
Şekil 5.48’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.48 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Klasik zemin mekaniği parametrelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucuna göre güvenlik sayısı 1.34 olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.49’da doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



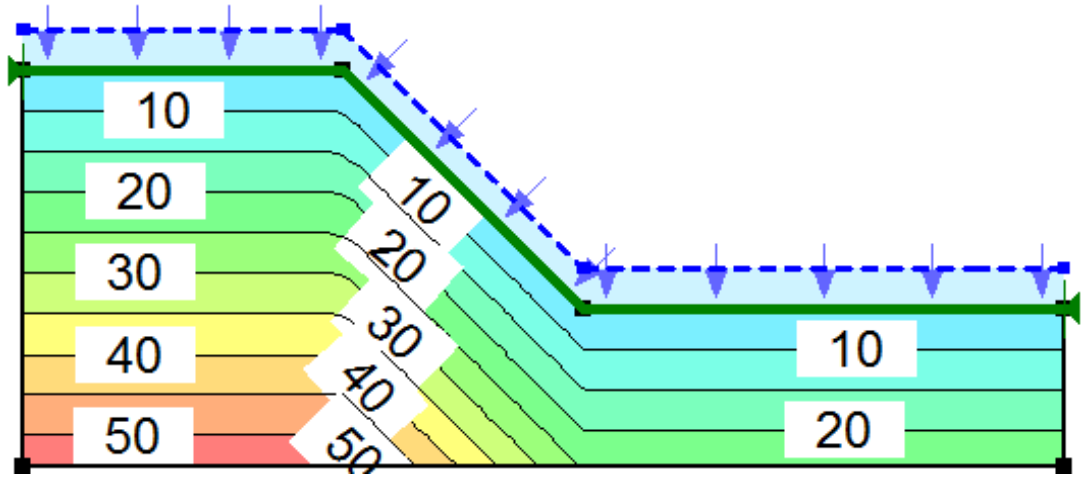
Şekil 5.49 : Doymun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan analizde Numune III için güvenlik sayısı 1.36 olarak elde edilmiştir.

5.3.3 Zeminin suya doygun olduğu durumda şev stabilite analizi sonuçları

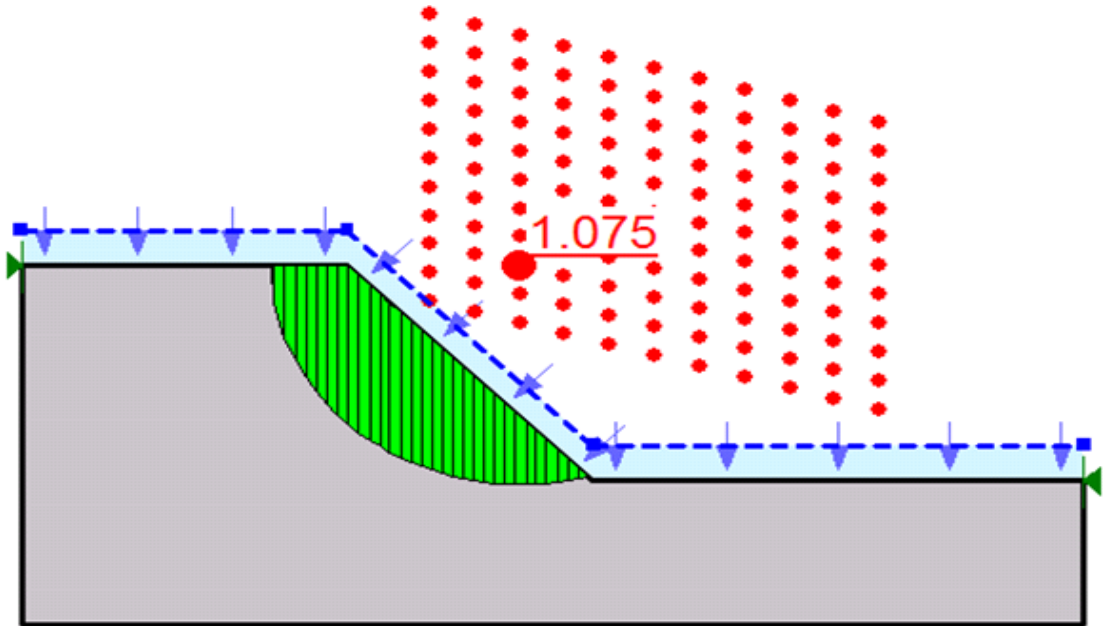
Zeminin tamamen suya doygun olduğu durumdaki analiz için detaylar Numune I için anlatılmış ve bölüm 5.1.3’de mevcuttur. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 50cm yukarıdadır.

Şekil 5.50’de yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.50 : Boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi.

Şekil 5.51’de klasik zemin mekaniği prensiplerine göre elde edilen güvenlik sayısı ve kritik kayma dairesi yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 5.51 : Klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizi sonucu ve kritik kayma dairesi yüzeyi.

Çizelgede gösterilen KZM klasik zemin mekaniğinin, DOZ'da doymun olmayan zemin mekaniğinin kısaltmalarıdır.

Çizelge 5.4 : Şev stabilite analizleri sonucu elde edilmiş güvenlik sayıları.

<i>Yeraltı Su Seviyesi Durumu</i>	<i>Analiz Kabulü</i>	<i>Numune I (CL)</i>	<i>Numune II (SP)</i>	<i>Numune III (CL)</i>
Başlangıç durumu	KZM	3.73	1.27	1.77
	DOZ	4.55	1.46	10.60
Durum I	KZM	3.73	1.27	1.77
	DOZ	4.48	1.27	2.62
Durum II	KZM	3.73	1.27	1.77
	DOZ	4.17	1.29	2.32
Durum III	KZM	3.54	1.12	1.54
	DOZ	3.64	1.22	1.61
Durum IV	KZM	3.38	0.94	1.34
	DOZ	3.39	1.00	1.36
Durum V	KZM	3.20	0.30	1.08
	DOZ	3.20	0.30	1.08

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doygun olmayan zeminlerde meydana gelen emme gerilmesi; zeminlerin gerilme durumunun değişmesine ve kayma mukavemetinin artmasına sebep olmaktadır. Klasik zemin mekaniğinde, zeminlerin doygun olduğu düşünülerek yapılan oturma, taşıma gücü, sızma ve şev stabilite analizlerinde, doygun olmayan zemin parametreleri ile çalışıldığında daha farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu sonuçlar klasik zemin mekaniğinde ki çözümlere göre daha ekonomiktir.

Bu tez kapsamında, doygun olmayan zemin mekaniğinin etkilediği şev stabilite analizleri üzerinde çalışılmıştır. Üç farklı zemin profili için, kuru, doygun ve farklı yeraltı su seviyelerinde güvenlik sayıları hem klasik zemin mekaniği hem de doygun olmayan zemin mekaniği kabullerine göre elde edilmiştir. Araştırma iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım deneysel analizleri vermektedir. İkinci kısım ise GeoStudio bilgisayar programıyla yapılan şev stabilite analizlerini içermektedir. Programda analizler, iki boyutta modellenmiş ve limit denge analizi yöntemine göre çözülmüştür.

Araştırmada kullanılan zemin kesitlerini oluşturabilmek için üç farklı numune seçilmiştir. İlk numunenin özellikleri İstanbul Teknik Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarında yapılmış olan deneyler sonucunda elde edilmiş olup, diğer iki numune farklı araştırmacıların çalışmalarından seçilmiştir. İlk numunenin sınıflandırma özelliklerini belirleyebilmek için elek analizi, hidrometre ve kıvam limitleri analizi; mukavemet özelliklerini belirleyebilmek için kesme kutusu ve doygun olmayan zemin mekaniği özellikleri için basınç plakası deneyi yapılmıştır. Ayrıca kesme kutusu ve basınç plakasında kullanılan numuneler optimum su muhtevası koşullarında oluşturulduğu için optimum su muhtevasını belirleyebilmek adına standart proktor deneyi yapılmıştır.

Analizlerde GeoStudio paket programından Slope/W programı kullanılmıştır. Analizler; Mohr-Coulomb zemin davranışına göre modellenen üç farklı zemin profili için yapılmıştır. Her numune için aynı geometri kullanılmış ve yeraltı su seviyesinin

tanımlanmadığı başlangıçtaki durum ile doymuş ve farklı yeraltı su seviyeleri durumlarında güvenlik sayıları hem klasik zemin mekaniği kabullerine hem de doymuş olmayan zemin mekaniği kabullerine göre elde edilmiştir. Güvenlik sayıları elde edilirken limit denge analiz yöntemlerinden biri olan Bishop yöntemi kullanılmıştır. Başlangıç durumunda yapılan doymuş olmayan zemin mekaniği analizlerinde uniform bir matrik emme basıncı düşünülmüş ve kohezyon parametresine etki ettirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin olduğu durumdaki analizlerde ise elde edilmiş olan SWCC programa girilmiş ve sonuçlar da SWCC etkili olmuştur.

6.1 Sonuçlar

Araştırma kapsamında elde edilen deneysel ve programda yapılan analize dayalı sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Numune I (CL) özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiş numunedir. Numune II (SP) ve Numune III (CL) özellikleri laboratuvar ortamında farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiş numunelerdir. Numune I birleşik zemin sınıflandırmasına göre CL olarak adlandırılmıştır. Ancak Numune I içerisinde %47 oranında kum içermektedir. Numune II %100 oranında kum içermektedir. Numune III ise %72 ince dane ve %28 kumdan oluşmaktadır. Üç numune için elde edilen zemin su karakteristik eğrisi (SWCC); Numune III için aynı doymuşluk derecelerinde daha yüksek matrik emme değerleri elde edildiğini göstermektedir. Numune II de Numune I'e göre aynı doymuşluk derecelerinde daha fazla matrik emme değerine sahiptir. Numune içinde kil oranı arttıkça, su tutma potansiyeli yükseleceği için matrik emme değerleri yükselmektedir.
- İnce dane oranı arttıkça, hava giriş değeri ve rezidüel doymuşluk derecesi yükselmekte ve düzgün bir SWCC elde etmek zorlaşmaktadır. Bu yüzden düzgün eğri elde edebilmek için düzeltme ya da tahmin yöntemlerinden yararlanılmaktadır.
- Numunelerde kum oranı arttıkça eğri elde edebilmek kolaylaşmaktadır.
- Şev stabilite analizleri sonucu doymuş ve doymuş olmayan zemin mekaniği kabullerine göre güvenlik sayıları elde edilmiştir.

Başlangıç durumunda elde edilen sonuçlar içinde doymuş ve doymuş olmayan kabul arasında en belirgin farkın olduğu numune Numune III ve

en az farkın gözlemlendiği numune ise Numune II'dir. Bu da doymun olmayan zemin parametrelerinin ince daneli zeminlerde güvenlik sayısını ciddi bir biçimde arttırdığını göstermektedir.

- Yeraltı su seviyesinin değişimi doymun olmayan zemin mekaniği kabullerine göre yapılan analizleri, klasik zemin mekaniği analizlerine göre daha fazla oranda etkilemiştir. Yeraltı su seviyesi arttıkça her iki durumda da güvenlik sayısı düşmekte ancak düşüş doymun olmayan zemin mekaniği kabulüne göre yapılan analizlerde daha belirgin olmaktadır. Numune III bu değişimden daha fazla etkilenmektedir. Yeraltı su seviyesi arttıkça matrik emme değerleri düşmektedir.
- Yeraltı su seviyesindeki artış, doymun durumdaki kabullere göre yapılan analizlerde yeraltı su seviyesi kayma dairesinin içerisinde yer aldığında güvenlik sayısını azaltıcı bir yönde etkili olmasına rağmen, yeraltı su seviyesi kayma dairesi içerisinde değilse arttırıcı ya da azaltıcı bir yönde etkisi yoktur.

Ancak doymun olmayan zemin mekaniğine göre yapılan analizlerde yeraltı su seviyesinin artışı matrik emme değerini sürekli düşüreceğinden güvenlik sayısında azalış gözlemlenmektedir.

- Zeminin suya tamamen doymun olduğu durumda, matrik emme basıncı gözlemlenemeyeceği için doymun ve doymun olmayan durumdaki kabullere göre yapılan analizlerde aynı güvenlik sayıları elde edilmiştir.

6.2 Öneriler

İleride yapılacak çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda sıralanmaktadır.

- SWCC elde etmek için yapılmış olan basınç plakası deneyi için daha yüksek basınçlarda çalışan deney aleti tercih edilebilir.
- Deneysel çalışma ortamı olmayan durumlarda SWCC elde etmek için tahmin yöntemleri kullanılabilir.
- Doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri belirlenirken modifiye edilmiş deney aletlerinden de yararlanılıp, kayma mukavemeti açısı ve kohezyon değerlerinin matrik emme basıncıyla aynı anda gözlenmesi sağlanabilir. Böylece doymun olmayan zeminin kohezyonu ve kayma mukavemeti açısı belirlenir.

- Yapılan analizler için kullanılan numune adedi fazlalaştırılabilir ve farklı zemin türleri tercih edilebilir.
- SWCC için kuruma eğrisi de elde edilebilir ve sonuçlar hem ıslanma hem de kuruma eğrisi kullanılarak karşılaştırılabilir.
- Şev stabilite analizlerinde depremli durum incelemesi de yapılabilir.
- Belirlenen yeraltı suyu için Seep/W isimli programdan da yararlanılabilir. Bölgenin yağış durumu göz önüne alınarak sızma analizleri de yapılabilir ve yeraltı su seviyesinin değişimi yağış durumuna göre belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Önalp, A. & Arel, E.** (2013). *Geoteknik Bilgisi I Zeminler Mekaniği*, Birsen Yayınevi
- [2] **Önalp, A. & Arel, E.** (2004). *Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği*, Birsen Yayınevi
- [3] **Fredlund, D.G. & Rahardjo, H.** (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] **Kumbasar, V. & Kip, F.** (1999). *Zemin Mekaniği Problemleri*, İstanbul: Çağlayan Kitabevi.
- [5] **Charles, W.W., Ng. & Menzies, B.** (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*, New York: Taylor & Francis
- [6] **Fredlund, D.G., Wilson, G.W. & Barbour, S.L.** (2001). *5. Unsaturated Soil Mechanics and Property Assessment*
- [7] **Gülşen, F.** (2013). *Doygun ve Doygun Olmayan Zemin Mekaniği Kavramları ile Sığ Temellerin Taşıma Gücü*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi
- [8] **Kayadelen, C.** (2005). *Doygun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin K_0 Koşullarındaki Yanal Basınçlarının İncelenmesi*, (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi
- [9] **Gökşan, T. Ş.** (2007). *Zeminlerin Emme Özelliklerinin Belirlenmesinde Bir Yaklaşım*, (Doktora Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi
- [10] **Fredlund, D.G.** (1998). *The Practice of Unsaturated Soils*, Geotechnical Hazards, Rotterdam
- [11] **Vanapalli, S.K. & Oh, T.** (2011). *Application of Total Stress Analysis for Unsaturated Soils in Engineering Practice*, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference
- [12] **Lu, N. & Griffiths, D. V.** (2004). *Profiles of Steady – State Suction Stress in Unsaturated Soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
- [13] **Lu, N., Godt, W. J. & Wu, D. T.** (2010). *A Closed-form Equation for Effective Stress in Unsaturated Soil*, Water Resources Research
- [14] **Guan, G.S., Rahardjo, H. & Choon, L.E.** (2010). *Shear Strength Equations for Unsaturated Soil Under Drying and Wetting*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
- [15] **Keskin, S.M. & Laman, M.** (2007). *Sonlu Elemanlar Yönteminin Şev Stabilitesi Problemlerinin Analizinde Kullanılması*, Ç.Ü. MÜH. MİM. FAK. Dergisi

- [16] Ersoy, Ş. (2013). *2013 Afet Raporu “Dünya ve Türkiye”*, Yıldız Teknik Üniversitesi Doğa Bilimleri Araştırma Merkezi
- [17] Çetin, T. (2010). *Şev Stabilite Analizleri İçin Bilgisayar Programının Geliştirilmesi ve Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Celal Bayar Üniversitesi, Manisa
- [18] Ulusay, R. (t.y.). *Heyelanlar ve Mühendislik Şevlerindeki Duraysızlıklar : Türleri, Etkileri ve Zararların Azaltılması*
- [19] Akçakal, Ö. (2009). *Şev Stabilite Analizinde Geri Hesap Yöntemi ve Bir Vaka Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi
- [20] Tekin, A. (2011). *Sonlu Elemanlar ve Limit Denge Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizi*, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi
- [21] Isakov, A. & Moryachkov, Y. (2014). *Estimation of Slope Stability Using Two-Parameter Criterion of Stability*, American Society of Civil Engineers
- [22] GeoStudio (2008). *Stability Modelling with Slope/W 2007 Version*, Geo-Slope International Ltd., Canada
- [23] Mossaad, M., Gomaa, Y. & Hussien, M. (2013). *Effect of Initial Suction on Stability of Unsaturated Soil Slopes*,
- [24] Rahardjo, H., Leong, E. C. & Rezaur, R. B. (2002). *Studies of Rainfall-Induced Slope Failures*, Proceedings of the National Seminar, Slope 2002.
- [25] Shao, C., Zhang, N. & Lv, F. (2014). *The Research of Slope Stability Based on Unsaturated Soil Theory*, Advanced Materials Research Vol. 937
- [26] Lu, N. & Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [27] ASTM - D422 (1994b). *Standart test method for particle size analysis of soils*, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA.
- [28] Davis, T. (2008). *Geotechnical Testing, Observation and Documentation*, Virginia: American Society of Civil Engineers
- [29] Özaydın, K. (2001). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [30] Özüdoğru, K., Tan, O., Aksoy, İ. H. (2001). *Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [31] ASTM - D4318 (2000). *Standart test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index*, American Society of Testing Material, Philadelphia, USA.
- [32] Germaine, J. T., Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical Laboratory Measurements*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [33] Atkinson, J. (2005). *The Mechanics of Soils and Foundations*, London: Taylor&Francis
- [34] Das, B. M. (1995). *Principles of Foundation Engineering*, Boston: PWS. Pub. Co.

- [35] **ASTM – D698** (2000). Standart test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [36] **Bardet, J. P.** (1997). *Experimental Soil Mechanics*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [37] **ASTM – D854** (2000). Standart test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [38] **ASTM – D3080** (1999). Standart test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *American Society of Testing Material*, Philadelphia, USA.
- [39] **McCarthy, D. F.** (2010). *Zemin Mekaniğinin Esasları ve Temeller: temel geoteknik* (E., Basmacı, Çev.). İstanbul: Oytev. (2010).
- [40] **Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G. H. & Van Genuchten, M. T.** (2010). *Estimation of the Van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data*, Soil Science Society of Chiana
- [41] **Kutlu, Z. N. T.** (2013). *Experimental and Numerical Modelling Studies For Interpreting and Estimating The p - δ Behavior of Single Piles in Unsaturated Soils*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi
- [42] **Oh, W. T., Vanapalli, S. K. & Sheikhtaheri, M.** (2014). *Slope Stability Analysis for Champlain Sea Clay Deposits Using the Mechanics of Unsaturated Soils*, Unsaturated Soils: Research & Applications
- [43] **Oh, W. T. & Vanapalli, S. K.** (2010). *Influence of Rain Infiltration on the Stability of Compacted Soil Slopes*, Computers and Geotechnics

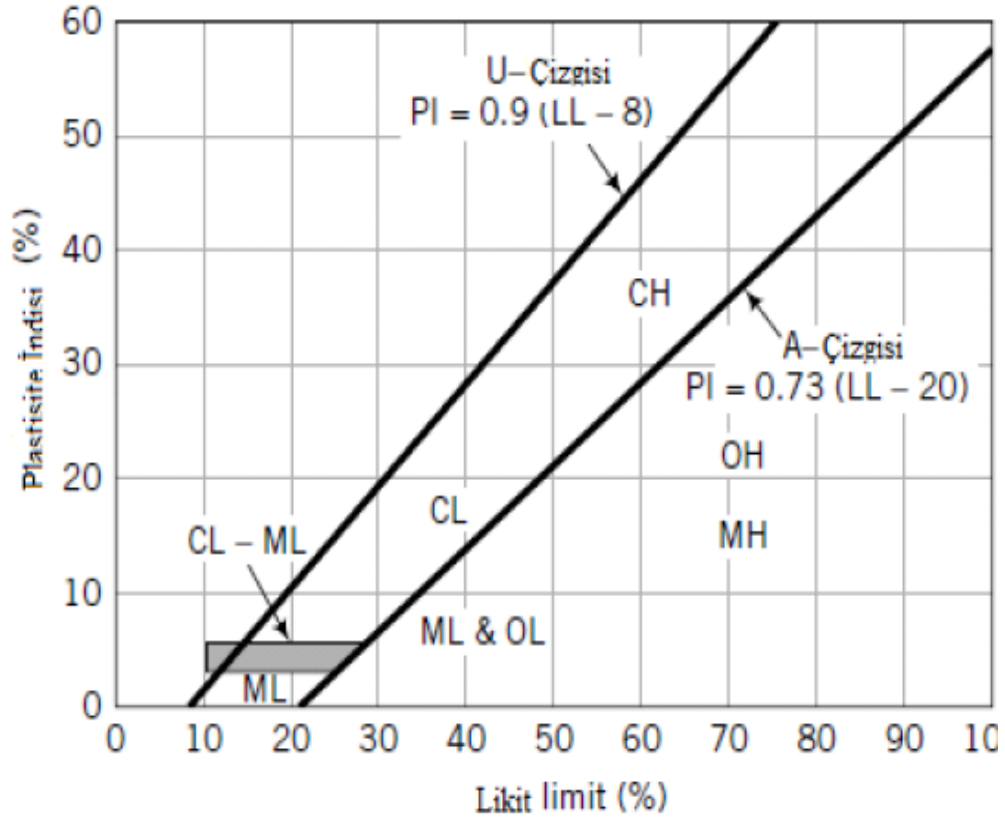
EKLER

EK A : Plastisite Kartı

EK B : Kesme Kutusu Deney Sonuçları

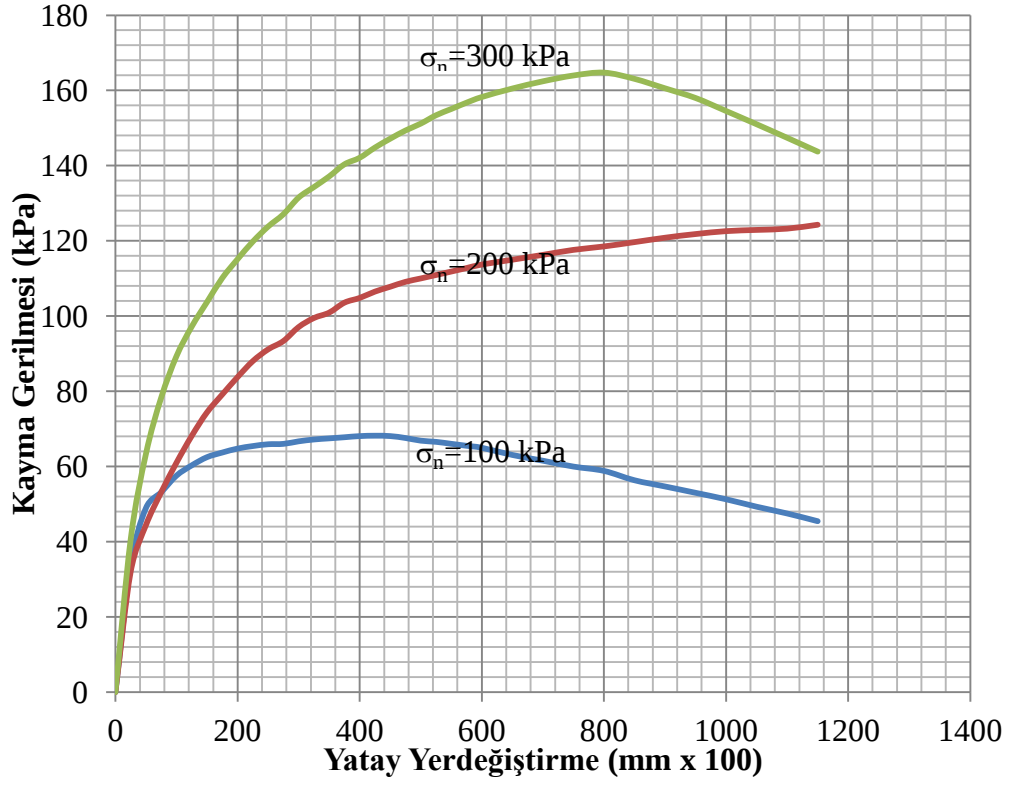
EK C : Analizde Kullanılan Zemin Su Karakteristik Eğrisi

EK A

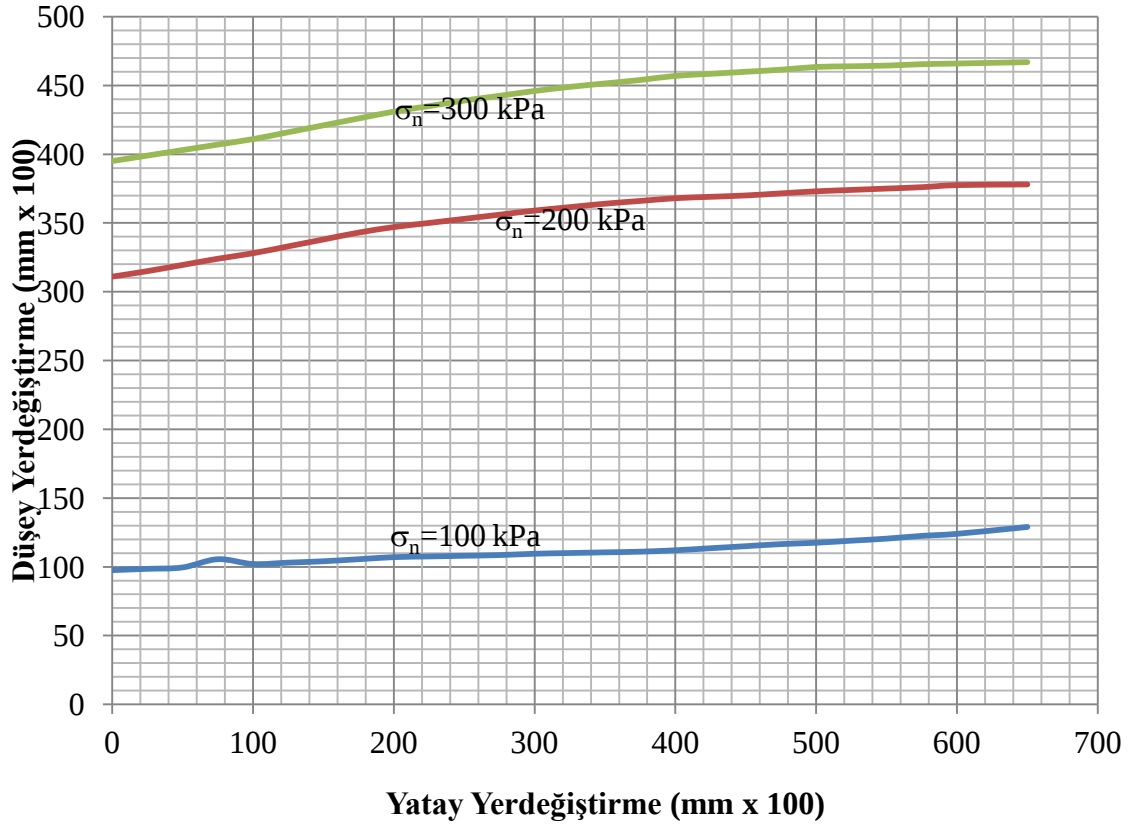


Şekil A.1 : Plastisite kartı.

EK B

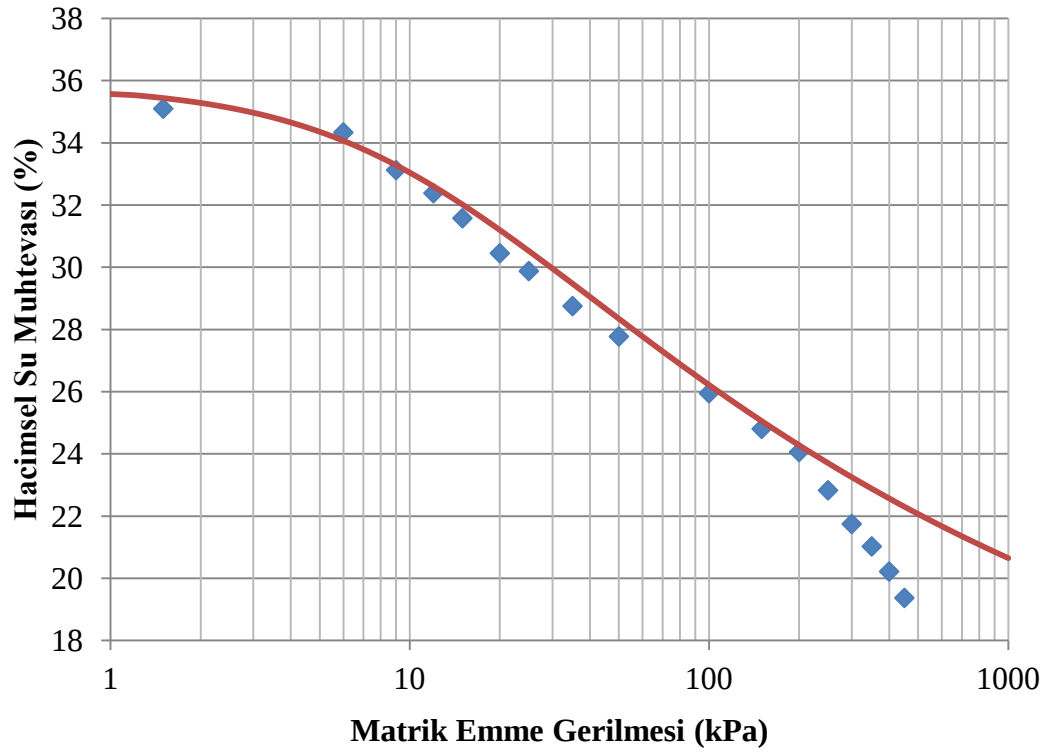


Şekil B.1 : Numune I'e ait kesme kutusu deney sonuçları (1).

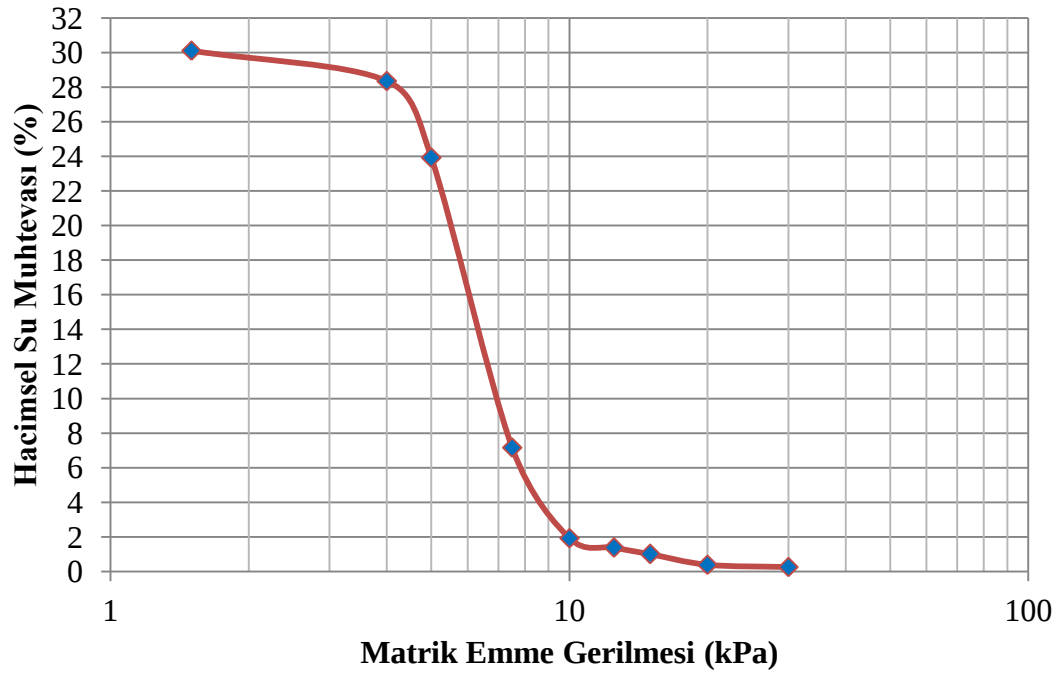


Şekil B.2 : Numune I'e ait kesme kutusu deney sonuçları (2).

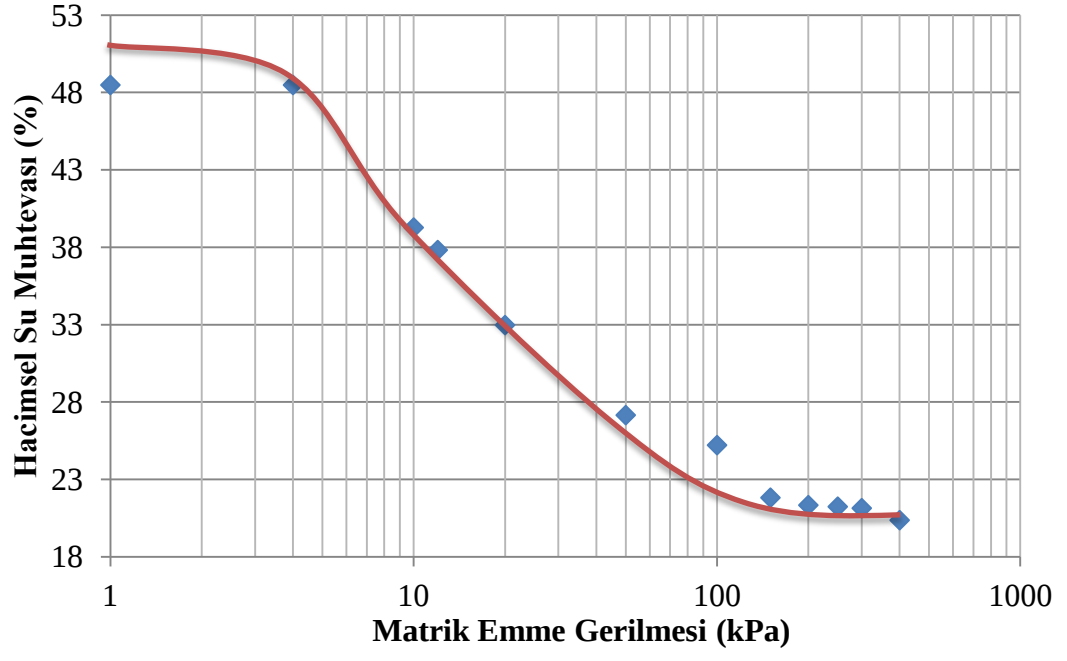
EK C



Şekil C.1 : Numune I için SWCC.



Şekil C.2 : Numune II için SWCC.



Şekil C.3 : Numune III için SWCC.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Özgün GÖKOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 11.02.1989, İstanbul

E-posta : ozgungokoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lise** : 2007, Kabataş Erkek Lisesi,
- **Lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnş. Müh.