

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAĞIŞ İLE SIZMANIN DOLGU ŞEVLERİNİN**  
**STABİLİTESİNE ETKİSİ**

**Begüm KARABULUT**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Geoteknik Programı**

**Danışman**  
**Doç. Dr. Havvanur KILIÇ**

**Aralık, 2019**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAĞIŞ İLE SIZMANIN DOLGU ŞEVLERİNİN STABİLİTESİNE ETKİSİ**

Begüm KARABULUT tarafından hazırlanan tez çalışması 24.12.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Havvanur KILIÇ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Aykut ŞENOL, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. Havvanur KILIÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yağış ile Sızmanın Dolgu Şevlerinin Stabilitesine Etkisi başlıklı çalışmada diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Begüm KARABULUT



*Aileme*  
*ve*  
*sevgili nişanlıma*

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyerek gerek eğitim gerekse özel yaşantımda her zaman destek olan saygıdeğer hocam sevgili Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a, tez çalışmamın sızma analizleri kısmında bana yardımcı olan sayın Arş. Gör. Ayşenur ASLAN FİDAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen annem Zühre KARABULUT'a, babam Hasan KARABULUT'a ve ablam Gülçin TAŞTAN'a ayrıca hayatımın her anında bana destek olan sevgili nişanlım Samed BAŞBUĞ'a teşekkür ederim.

Begüm KARABULUT

# İÇİNDEKİLER

---

|                                                                |             |
|----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SİMGE LİSTESİ</b>                                           | <b>vii</b>  |
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                        | <b>xiii</b> |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                           | <b>xiv</b>  |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                           | <b>xvi</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                    | <b>xvii</b> |
| <b>ABSTRACT</b>                                                | <b>xix</b>  |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                                 | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                      | 2           |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                          | 37          |
| 1.3 Hipotez .....                                              | 37          |
| <b>2 DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ</b>                         | <b>38</b>   |
| 2.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Özellikleri .....                | 39          |
| 2.1.1 Yüzey Gerilimi .....                                     | 41          |
| 2.1.2 Hacimsel Su Muhtevası .....                              | 44          |
| 2.1.3 Zemin Emme Gerilmesi ve Ölçülmesi .....                  | 45          |
| 2.1.4 Gerilme Durum Değişkenleri .....                         | 49          |
| 2.1.5 Zemin - Su Karakteristik Eğrisi .....                    | 51          |
| 2.2 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti Teorisi .....   | 55          |
| 2.3 Doygun Olmayan Zeminlerde Karşılaşılan Problemler .....    | 59          |
| 2.4 Çevresel Faktörlerin Doygun Olmayan Zeminlere Etkisi ..... | 59          |
| <b>3 LABORATUVAR ÇALIŞMALARI</b>                               | <b>62</b>   |
| 3.1 Elek Analizi .....                                         | 62          |
| 3.2 Hidrometre Deneyi .....                                    | 64          |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3 Piknometre Deneyi .....                                           | 66         |
| 3.4 Kıvam Limiti Deneyleri .....                                      | 67         |
| 3.5 Üç Eksenli Konsolidasyonlu-Drenajsız Deney .....                  | 72         |
| 3.6 Konsolidasyon Deneyi .....                                        | 76         |
| <b>4 LİMİT DENGİ YÖNTEMİ İLE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ</b>                | <b>82</b>  |
| 4.1 Limit Denge Yöntemi .....                                         | 82         |
| 4.2 GEOSTUDIO Programı .....                                          | 83         |
| 4.2.1 SEEP/W Modülü .....                                             | 83         |
| 4.2.2 SLOPE/W Modülü .....                                            | 84         |
| 4.3 Şev Stabilitate Analizleri .....                                  | 84         |
| 4.3.1 Model Geometrisinin Oluşturulması .....                         | 85         |
| 4.3.2 Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması .....                     | 85         |
| 4.3.3 Yağış Yoğunluğunun Tanımlanması .....                           | 89         |
| 4.3.4 Şev Stabilitate Analizleri .....                                | 90         |
| <b>5 ANALİZ VE DEĞERLENDİRME</b>                                      | <b>92</b>  |
| 5.1 Analizler Sonucunda Elde Edilen Güvenlik Sayısı Değişimleri ..... | 92         |
| 5.2 Yağış Yoğunluğunun Şev Stabilitatesine Etkisi .....               | 96         |
| 5.3 Yeraltı Su Seviyesinin Şev Stabilitatesine Etkisi .....           | 99         |
| 5.4 Zeminin Permeabilitesinin Şev Stabilitatesine Etkisi .....        | 104        |
| 5.5 Zeminin Matrik Emme Değişiminin Şev Stabilitatesine Etkisi .....  | 107        |
| 5.6 Değerlendirme .....                                               | 111        |
| <b>6 SONUÇLAR</b>                                                     | <b>123</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b>                                                       | <b>126</b> |
| <b>EKLER</b>                                                          | <b>129</b> |
| <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>                                      | <b>151</b> |

## SİMGE LİSTESİ

---

|                |                                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| $\bar{u}_{v0}$ | Aynı Sıcaklıktaki Saf Su Yüzeyi Üzerindeki Doymuş Su Buharı Basıncı |
| $\bar{u}_w$    | Boşluk Suyunun Kısmi Buhar Basıncı                                  |
| $a$            | Özgöl Ağırlık İçin Düzeltme Katsayısı                               |
| $A$            | Aktivite Katsayısı                                                  |
| $a$            | Hava Giriş Değeri ile İlgili Parametre                              |
| $a_v$          | Sıkışma Katsayısı                                                   |
| $c$            | Efektik Kohezyon                                                    |
| $c$            | Kohezyon                                                            |
| $C(\psi)$      | SWCC'ni 0 su muhtevasında 106 kPa'a Yönlendiren Düzeltme Faktörü    |
| $C_c$          | Sıkışma İndisi                                                      |
| $CD$           | Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi                   |
| $CH$           | Yüksek Plastisiteli Kil                                             |
| $CL$           | Düşük Plastisiteli Kil                                              |
| $C_s$          | Şişme İndisi                                                        |
| $C_T$          | Sıcaklık Düzeltmesi                                                 |
| $c_u$          | Drenajsız Kayma Mukavemeti                                          |
| $CU$           | Konsolidasyonlu-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi                  |
| $c_v$          | Konsolidasyon Katsayısı                                             |
| $D$            | Efektif Çap                                                         |
| $e$            | Boşluk Oranı                                                        |
| $e$            | Doğal Logaritma Sabiti                                              |
| $E$            | Elastisite Modülü                                                   |
| $E$            | Eriyik (Ozmotik) Emme                                               |

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| $e_0$     | Başlangıç Boşluk Oranı                    |
| $E_{oed}$ | Ödometrik Elastisite Modülü               |
| $e_{ort}$ | Ortalama Boşluk Oranı                     |
| $e_s$     | Son Boşluk Oranı                          |
| GC        | Killi Çakıl                               |
| $G_s$     | Özgöl Ağırlık                             |
| $H_d$     | Numune Yüksekliği                         |
| $I_p$     | Plastisite İndisi                         |
| IU        | İzotropik Drenajsız Üç Eksenli Deney      |
| K         | Kılcal (matrik) Emme                      |
| K         | Özgöl Ağırlığa ve Sıcaklığa Bağlı Katsayı |
| k         | Permeabilite                              |
| $k_1$     | $3,5 \times 10^{-11}$ Permeabilite Değeri |
| $k_2$     | $3,5 \times 10^{-9}$ Permeabilite Değeri  |
| $k_3$     | $3,5 \times 10^{-7}$ Permeabilite Değeri  |
| $k_s$     | Doygun Durumda Permeabilite               |
| L         | Efektif Derinlik                          |
| M         | Kütle                                     |
| m         | SWCC Simetrisi ile İlgili Parametre       |
| $m_1$     | SWCC-1'e ait Matrik Emme Değerleri        |
| $m_2$     | SWCC-2'ye ait Matrik Emme Değerleri       |
| $M_a$     | Hava Kütleli                              |
| MH        | Yüksek Plastisiteli Silt                  |
| $M_s$     | Dane Kütleli                              |
| $m_v$     | Hacımsal Sıkışma Katsayısı                |

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| $M_w$ | Su Kütlesi                                                      |
| $n$   | Boşluk Boyutu Dağılımı veya Gözenek Büyüklüğü dağılımı          |
| $n$   | Porozite                                                        |
| $N$   | Vuruş Sayısı                                                    |
| $p$   | Gerilme Sabiti                                                  |
| $p'$  | Ortalama Efektif Gerilme                                        |
| $P$   | Yük                                                             |
| $q$   | Deviatorik Gerilme                                              |
| $R$   | Genel Gaz Sabiti                                                |
| $r_1$ | 100 mm Yağış Miktarı                                            |
| $R_1$ | Eğri Bir Membranın Ortogonal İki Asal Düzlemde Eğrilik Yarıçapı |
| $r_2$ | 200 mm Yağış Miktarı                                            |
| $R_2$ | Eğri Bir Membranın Ortogonal İki Asal Düzlemde Eğrilik Yarıçapı |
| $r_3$ | 300 mm Yağış Miktarı                                            |
| $R_a$ | Gerçek Hidrometre okuması                                       |
| $R_c$ | Düzeltilmiş Hidrometre okuması                                  |
| $R_s$ | Eğrilik Yarıçapı                                                |
| $S$   | Doygunluk Derecesi                                              |
| $S_1$ | SWCC'nin Eğimi                                                  |
| $S_2$ | SWCC'nin Eğimi                                                  |
| $S_3$ | SWCC'nin Eğimi                                                  |
| $SP$  | Kötü Derecelenmiş Kum                                           |
| $T$   | Sıcaklık                                                        |
| $t$   | Süre                                                            |
| $T$   | Toplam Emme                                                     |

|             |                                            |
|-------------|--------------------------------------------|
| $t_{90}$    | Konsolidasyonun %90'ının Tamamlandığı Süre |
| $T_{90}$    | Zaman Faktörü                              |
| $T_K$       | Mutlak Sıcaklık                            |
| $T_s$       | Yüzey Gerilimi                             |
| $u_a$       | Boşluk Hava Basıncı                        |
| $u_a - u_w$ | Matrik Emme                                |
| $u_b$       | Hava Giriş Basıncı                         |
| $u_w$       | Boşluk Suyu Basıncı                        |
| $-u_w$      | Negatif Boşluk Suyu Basıncı                |
| $V$         | Toplam Hacim                               |
| $V_a$       | Hava Hacmi                                 |
| $V_c$       | Hava-Su Arayüzeyinin Hacmi                 |
| $V_s$       | Dane Hacmi                                 |
| $V_w$       | Su Hacmi                                   |
| $V_{w0}$    | 1/Suyun Özgöl Hacmi                        |
| $w$         | Ağırlıksal Su muhtevası                    |
| $w_1(\psi)$ | Herhangi Emmedeki Su Muhtevası             |
| $w_2(\psi)$ | Herhangi Emmedeki Su Muhtevası             |
| $w_3(\psi)$ | Herhangi Emmedeki Su Muhtevası             |
| $w_{aev}$   | Hava Giriş Değerindeki Su Muhtevası        |
| $w_L$       | Likit Limit                                |
| $w_p$       | Plastik Limit                              |
| $w_r$       | Rezidüel Su Muhtevası                      |
| $w_s$       | Son Durumda Su muhtevası                   |
| $w_u$       | 1 kPa Değerinde Su Muhtevası               |

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| $Y_1$            | YASS Zemin Yüzeyinde                 |
| $Y_2$            | YASS Zemin Yüzeyinden 2 m Aşağıda    |
| $Y_3$            | YASS Zemin Yüzeyinden 4 m Aşağıda    |
| $\beta$          | Yüzey Geriliminin Yatayla Yaptığı Aç |
| $\gamma$         | Birim Hacim Ağırlık                  |
| $\gamma_k$       | Kuru Birim Hacim Ağırlık             |
| $\gamma_{kmax}$  | Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık    |
| $\gamma_{ort}$   | Ortalama Birim Hacim Ağırlık         |
| $\Delta e$       | Boşluk Oranı Farkı                   |
| $\Delta P$       | Yük Farkı                            |
| $\Delta \sigma$  | Gerilme Aralığı                      |
| $\theta$         | Hacimsel Su Muhtevası                |
| $\theta_r$       | Rezidüel Hacimsel Su Muhtevası       |
| $\theta_s$       | Doygun Hacimsel Su Muhtevası         |
| $\theta_w$       | Hacimsel Su Muhtevası                |
| $\pi$            | Ozmotik Emme                         |
| $\rho_k$         | Zeminin Kuru Yoğunluğu               |
| $\rho_w$         | Suyun Özgül Hacmi                    |
| $\sigma'$        | Efektif Gerilme                      |
| $\sigma$         | Toplam Gerilme                       |
| $\sigma_1$       | Büyük Asal Gerilme                   |
| $\sigma_2$       | Orta Asal Gerilme                    |
| $\sigma_3$       | İzotropik Gerilme Değeri             |
| $\sigma_n$       | Toplam Normal Gerilme                |
| $\sigma_n - u_w$ | Efektif Normal Gerilme               |

|              |                                                   |
|--------------|---------------------------------------------------|
| $\sigma^s$   | Emme Gerilmesi                                    |
| $\sigma-u_a$ | Net Normal Gerilme                                |
| $\tau$       | Kayma Mukavemeti                                  |
| $\tau_f$     | Göçme Anında Kayma Mukavemeti                     |
| $\nu$        | Poisson Oranı                                     |
| $\phi'$      | Efektif Kayma Mukavemeti Açısı                    |
| $\phi$       | Kayma Mukavemeti Açısı                            |
| $\phi^b$     | Kayma Mukavemetindeki Artış Miktarını Gösteren Aç |
| $\phi_u$     | Drenajsız Kayma Mukavemeti Açısı                  |
| $\chi$       | Zeminin Doygunluk Derecesine Bağlı Bir Parametre  |
| $\psi$       | Zemin Emme Gerilmesi yada Toplam Emme             |
| $\psi_{aev}$ | Hava Giriş Değerindeki Emme Değeri                |
| $\psi_r$     | Rezidüel Emme Değeri                              |
| $\omega_v$   | Su Buharının Moleküler Kütlesi                    |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|                 |                                            |
|-----------------|--------------------------------------------|
| GS              | Güvenlik Sayısı                            |
| GS <sub>R</sub> | Güvenlik Sayısı Azaltma Katsayısı          |
| MTT             | Modifiye Üç Eksenli Deney                  |
| OMC             | Optimum Su Muhtevası                       |
| SWCC            | Zemin-Su Karakteristik Eğrisi              |
| SWCC-1          | 1. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi           |
| SWCC-2          | 2. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi           |
| USCS            | Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi |
| YASS            | Yeraltı Su Seviyesi                        |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.1</b> Zemin-su karakteristik eğrisi (Aslan Fidan, 2017).....                                                                                                                                                                    | 4  |
| <b>Şekil 1.2</b> Analizlerde kullanılan şev geometrisi (Aslan Fidan, 2017) .....                                                                                                                                                           | 5  |
| <b>Şekil 1.3</b> Yağış yoğunluğu ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki (Aslan Fidan, 2017).6                                                                                                                                               |    |
| <b>Şekil 1.4</b> Çalışmada kullanılan zemin-su karakteristik eğrileri ve permeabilite fonksiyonları (Gofar ve Rahardjo, 2017) .....                                                                                                        | 9  |
| <b>Şekil 1.5</b> Boşluk suyu basıncı ve gerilme ile değişen GS değerleri (Gofar ve Rahardjo, 2017).....                                                                                                                                    | 11 |
| <b>Şekil 1.6</b> 1. Numune'nin zemin-su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015) .....                                                                                                                                                         | 13 |
| <b>Şekil 1.7</b> 2. Numune'nin zemin su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015).....                                                                                                                                                          | 13 |
| <b>Şekil 1.8</b> 3. Numune'nin zemin-su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015) .....                                                                                                                                                         | 14 |
| <b>Şekil 1.9</b> Şev göçmesinin jeolojik tabakaları ve sonlu elemanlar ağı: (a) Hadong arazisi (b) Pohang arazisi (Oh ve Lu, 2015) .....                                                                                                   | 17 |
| <b>Şekil 1.10</b> Hidromekanik ve geoteknik özellikler: (a) zemin su tutma verisi, (b) benzetilmiş hidrolik iletkenlik katsayıları ve (c) şev göçme alanları için kayma mukavemeti verisi (doymun ve doymun olmayan) (Oh ve Lu, 2015)..... | 20 |
| <b>Şekil 1.11</b> Limit denge veya $GS=1.0$ koşullarında yağış yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak doymun hidrolik iletkenliğin alan ölçekli parametrik analizinin sonuçları (Oh ve Lu, 2015).....                                          | 21 |
| <b>Şekil 1.12</b> Hadong arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) 15 Nisan 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) ve (b) 16 Temmuz 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (Oh ve Lu, 2015) .....                                                     | 23 |
| <b>Şekil 1.13</b> Hadong arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) doymunluk derecesi ve zaman, (b) emme gerilmesi ve zaman, (c) güvenlik sayısı ve zaman (Oh ve Lu, 2015) .....                                                                | 24 |
| <b>Şekil 1.14</b> Pohang arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) 15 Nisan 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (b) 16 Temmuz 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (Oh ve Lu, 2015) .....                                                        | 25 |
| <b>Şekil 1.15</b> Pohang arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) doymunluk derecesi ve zaman, (b) emme gerilmesi ve zaman, (c) güvenlik sayısı ve zaman (Oh ve Lu, 2015) .....                                                                | 26 |
| <b>Şekil 1.16</b> Indian Head birikintisi için dane boyu dağılımı eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                                                                                                                      | 28 |
| <b>Şekil 1.17</b> Indian Head birikintisinin kompaksiyon eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                                                                                                                               | 29 |

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.18</b> Indian Head birikintisine ait zemin-su karakteristik eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                                         | 30 |
| <b>Şekil 1.19</b> CU deneyleri için $p'$ ve $q$ arasındaki ilişki (Oh ve Vanapalli, 2010) .....                                                                    | 31 |
| <b>Şekil 1.20</b> IU deneyleri için $p$ ve $q$ arasındaki ilişki (Oh ve Vanapalli, 2010) .....                                                                     | 32 |
| <b>Şekil 1.21</b> (a) Net normal gerilme ve kayma mukavemeti arasındaki ilişki ve (b) Matrik emmeye göre kayma mukavemetinin değişimi (Oh ve Vanapalli, 2010)..... | 33 |
| <b>Şekil 1.22</b> Çalışmada kullanılan dolgunun enkesiti (Oh ve Vanapalli, 2010) .....                                                                             | 34 |
| <b>Şekil 1.23</b> Izgara ve yarıçap metodunda kayma yüzeyleri denemesinin gösterimi (Oh ve Vanapalli, 2010) .....                                                  | 35 |
| <b>Şekil 1.24</b> Blok metodunda kayma yüzeyleri denemesinin gösterimi (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                                                | 35 |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1</b> Zemine ait indeks/fiziksel özellikler (Aslan Fidan, 2017).....                                                              | 2  |
| <b>Tablo 1.2</b> Filtre kağıdı deneyi matris emme ölçüm sonuçları (Aslan Fidan, 2017) .                                                      | 3  |
| <b>Tablo 1.3</b> Doygun olmayan zemine ait hacimsel su içerikleri ve kayma direnci parametreleri (Aslan Fidan, 2017).....                    | 4  |
| <b>Tablo 1.4</b> Farklı yağış yoğunlukları için yapılan analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları ve yağış süreleri (Aslan Fidan, 2017)..... | 5  |
| <b>Tablo 1.5</b> Farklı yoğunluktaki yağışlar için elde edilen güvenlik sayıları (Aslan Fidan, 2017) .....                                   | 6  |
| <b>Tablo 1.6</b> Yağış süresi etkisinin incelendiği analizlerde kullanılan yağış verileri (Aslan Fidan, 2017) .....                          | 7  |
| <b>Tablo 1.7</b> Zemin geçirimsizliğinin etkisinin incelendiği analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları (Aslan Fidan, 2017) .....           | 7  |
| <b>Tablo 1.8</b> Zemin geçirimsizliğine bağlı yağış öncesi ve sonrası güvenlik sayıları (Aslan Fidan, 2017) .....                            | 8  |
| <b>Tablo 1.9</b> Zemin Parametreleri (Gofar ve Rahardjo, 2017).....                                                                          | 9  |
| <b>Tablo 1.10</b> Zemin-su karakteristik eğrisi ve permeabilite fonksiyon parametreleri (Gofar ve Rahardjo, 2017) .....                      | 9  |
| <b>Tablo 1.11</b> Farklı metotlardan elde edilen güvenlik sayılarının özeti (Gofar ve Rahardjo, 2017) .....                                  | 11 |
| <b>Tablo 1.12</b> Çalışmadaki zemin numuneleri (Gökoğlu, 2015) .....                                                                         | 12 |
| <b>Tablo 1.13</b> Numunelere ait özellikler (Gökoğlu, 2015) .....                                                                            | 14 |
| <b>Tablo 1.14</b> Analizler sonucunda bulunan güvenlik sayıları (Gökoğlu, 2015).....                                                         | 15 |
| <b>Tablo 1.15</b> Şev kesitlerinin malzemelerine ait fiziksel özellikler (Oh ve Lu, 2015).....                                               | 18 |
| <b>Tablo 1.16</b> Şev kesitlerinin malzemelerine ait geoteknik ve hidromekanik özellikler (Oh ve Lu, 2015) .....                             | 18 |
| <b>Tablo 1.17</b> Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri (Oh ve Vanapalli, 2010) .....                                            | 29 |
| <b>Tablo 1.18</b> Analizlerin özeti (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                                                             | 33 |
| <b>Tablo 1.19</b> Farklı senaryolar için güvenlik sayılarının değişimi (Oh ve Vanapalli, 2010).....                                          | 36 |

## Yağış ile Sızmanın Dolgu Şevlerinin Stabilitesine Etkisi

Begüm KARABULUT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Havvanur KILIÇ

Zeminin inşa malzemesi olarak kullanıldığı dolgularda, dolgu zeminin doymun olmayan zemin özellikleri taşıdığı bilinmektedir. Bu nedenle dolgu şevlerin stabilite analizleri doymun olmayan zemin mekaniği çerçevesinde gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada, doymun olmayan zemin koşullarında inşa edilmiş yüksek bir dolgu şevinde yağışın dolgu şevin içine sızmasının şev stabilitesi üzerindeki etkisi sayısal analizlerle incelenmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri dolgu inşa edildikten sonra araziden alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden ve zemin-su karakteristik eğrisinden belirlenmiştir. Analizlerde yeraltı su seviyesi, permeabilite, yağış miktarı ve matrik emme değerlerinin değişiminin, şevin stabilitesine olan etkileri parametrik bir çalışma ile araştırılmıştır. Ayrıca analizler aynı kohezyon değerinde ancak daha düşük kayma mukavemeti açısı değerinde tekrarlanarak, kayma mukavemeti açısındaki değişimin şev stabilitesine etkisi incelenmiştir. Doymun olmayan şev stabilite analizlerinde yaygın olarak kullanılan GEOSTUDIO programının SEEP/W

modülünde yağışın şev içerisine sızması ile oluşan boşluk suyu basıncı değişimleri belirlenmiş ve bu durum dikkate alınarak SLOPE/W modülü ile şevin stabilitesi araştırılmıştır. Yapılan sayısal analizlerin sonuçlarına göre zemin parametrelerine bağlı olarak incelenen tüm değişkenlerin (zeminin permeabilitesi, yağış miktarı, yeraltı su seviyesi ve zeminin matrik emme değeri) şev stabilitesini etkilediği ve özellikle zeminin permeabilitesinin yağışın şev içerisine sızmasını önemli ölçüde etkileyerek şev stabilitesinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doygun olmayan zeminler, yağış sızması, şev stabilitesi, Geostudio



# Effects of Rainfall Infiltration on the Stability of Fill Slopes

Begüm KARABULUT

Department of Civil Engineering

Post Graduate Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Havvanur KILIÇ

In cases where the soil is used as filling material, it is known that the used soil has unsaturated soil properties. For this reason, slope stability analyses of fill slopes should be carried out considering unsaturated soil mechanics. In this study, the effects of rainfall infiltration on slope stability in high fills constructed under unsaturated soil conditions was investigated by numerical analysis. The material parameters that are used in analyses were determined from both soil-water characteristic curve and laboratory tests on the soil samples that taken from the field after fill was constructed. In the analyses, the effects of changes of ground water level, permeability, amount of rainfall and matric suction values were investigated with parametric studies. In addition, effect of internal friction angle on shear strength was investigated by the analyses by repeating the analyses at a lower internal friction angle while the cohesion value of the soil was constant. Using GEOSTUDIO modelling software, which is widely used in the unsaturated soil stability analyses, pore water pressure changes caused by rainfall were determined

with the SEEP/W module and slope stability was investigated with SLOPE/W module. According to the results of numerical analyses, it was determined that all variables (permeability of soil, amount of rainfall, ground water level and matric suction value of soil) affected the slope stability depending on the soil parameters. Especially the permeability of the soil had a significant role on the rainfall infiltration and directly affected the slope stability.

**Keywords:** Unsaturated soils, rainfall infiltration, slope stability, Geostudio



# 1 GİRİŞ

---

Zeminlerin özellikleri ve mekaniği ile ilgilenen geoteknik mühendisliği, zeminlerde ve zemin yapılarında karşılaşılan bir çok probleme çözüm getirmeye çalışmaktadır. Üzerinde uzun yıllardır çalışılan ve günümüzde de hala önemini koruyan şev duraylılığı da bu problemlerden birini oluşturmaktadır.

Şev duraylılığı, birbirinden önemli bir çok etkinin dikkate alınması gerektiğinden dolayı oldukça karmaşıktır. Doğal ve insan eliyle oluşturulan şevlerde malzeme, doğal koşullar, jeolojik geçmiş, etkiyen gerilmeler, sızıntı suyunun etkisi birbirinden farklı olacağı için bu şevlerin duraylılığı da birbirinden farklı olmaktadır. Şev göçmesindeki karmaşıklık nedeniyle de her bir durum için çözüm önerileri ayrı ayrı incelenmektedir (Yıldırım, 2009).

Şev stabilite analizlerinde göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden biri de zeminin doygunluk durumudur. Doygun ve doygun olmayan zeminlerin mekanik ve fiziksel davranışları birbirinden farklı olduğu için bu zeminlerin şev duraylılığı da birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle zeminin doygunluk durumunun belirlenip analizlerin bu duruma göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Doygun olmayan zeminlerin davranışının belirlenmesinde matrik emme ve zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) kavramları oldukça önemlidir. Yağışın zemin içerisindeki hareketi olarak nitelendirilen sızma süreci doygun olmayan zeminlerin şev duraylılığını etkilemektedir. Yağış sızmasının doygun olmayan zeminlerde şev stabilitesine etkisi, zemin-su karakteristik eğrisinden elde edilen matrik emme değeri ile birlikte değerlendirilmektedir.

Çalışma kapsamında, doygun olmayan zemin özelliklerine sahip bir şev kesitinde yağışlar nedeniyle sızmanın şev stabilitesine etkisi araştırılmıştır. Şev stabilite analizlerinde yeraltı su seviyesi, permeabilite, yağış yoğunluğu ve matrik emme değişiminin şevin stabilitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde kullanılan zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri laboratuvarda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiş, zemin-su

karakteristik eğrisi ise Kocaman (2018)'nin aynı zemin numunesi üzerinde yaptığı çalışmadan alınmıştır. Her bir parametredeki değişimin şev stabilitesi üzerindeki etkisi için ayrı ayrı analiz kombinasyonları oluşturulmuş ve GEOSTUDIO programının SEEP/W modülünde başlangıç koşulları ve yağış sızması modellenmiş, SLOPE/W modülünde ise şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda da doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizlerinin genellikle GEOSTUDIO programı kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir.

### 1.1 Literatür Özeti

Aslan Fidan'ın (2017) çalışmasında doygun olmayan zeminlerde yağışın ve yağış sızmasının şev stabilitesine olan etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Şev stabilitesinin analizi için gerekli verileri sağlamak amacıyla Bitlis-Zagros Kenetlenme Kuşağı üzerinde bulunan Siirt ili Kozluk ilçesi Veysel Karani beldesinden örselenmemiş numune alınmıştır. Bu numunelere ait parametreler, zeminin heterojen yapısından dolayı değişen aralıklar şeklinde Tablo 1.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.1** Zemine ait indeks/fiziksel özellikler (Aslan Fidan, 2017)

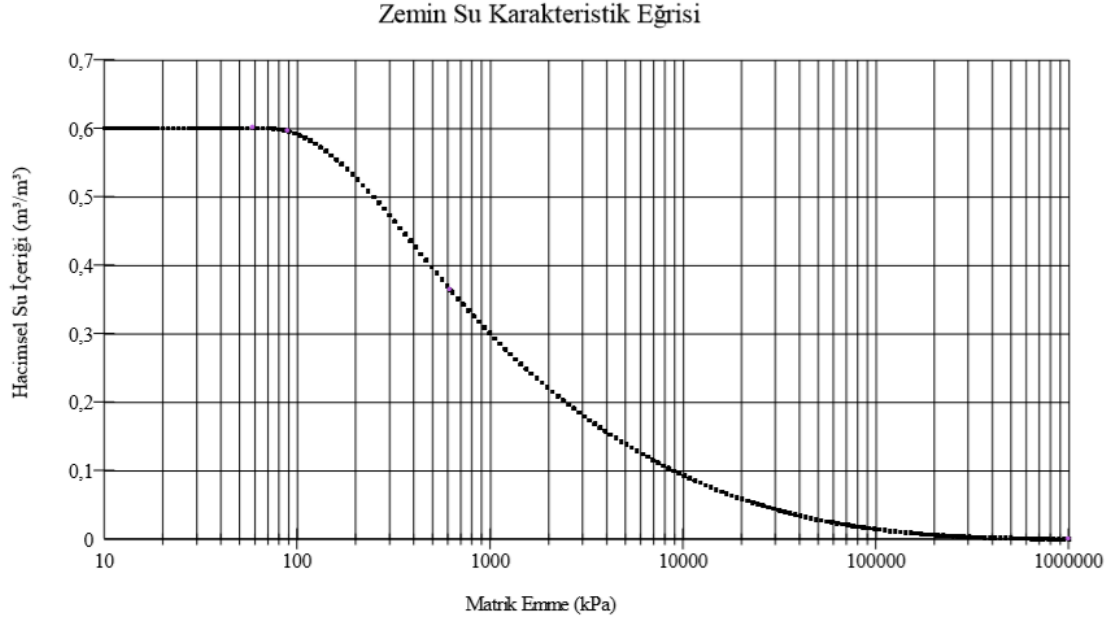
| Zemin İndeks/Fiziksel Özellikleri               | Değişim Aralığı                        |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Doğal Su İçeriği (%)                            | 21,37-25,83                            |
| Likit Limit (%)                                 | 22,62-62,15                            |
| Plastil Limit (%)                               | 15.74-26.51                            |
| Plastisite İndisi (%)                           | 6.88-35.64                             |
| #4 Elekte Kalan (%)                             | 0.16-48.74                             |
| #200 Elekten Geçen (%)                          | 31.25-90.05                            |
| Özgül Ağırlığı                                  | 2.72-2.75                              |
| Dane Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )  | 24.98-25.23                            |
| Doğal Birim Hacim Ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> ) | 18.35-20.11                            |
| Grup Sembolü                                    | CL, CL-ML, CH, GC                      |
| Permeabilite Katsayısı (m/sn)                   | 1x10 <sup>-7</sup> -6x10 <sup>-7</sup> |

Alınan numuneler üzerinde zemin sınıflandırması için yıkamalı elek analizleri, likit ve plastik limit analizleri ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Zeminin geçirimliliği sahada sondaj kuyularında yapılan basınçlı su deneyinin sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Zemin-su karakteristik eğrisini belirlemek için ise filtre kağıdı yöntemi ile dört adet deney yapılarak matrik emme gerilmeleri ölçülmüş ve deneyler sonucunda elde edilen matrik emme değerleri Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.2** Filtre kağıdı deneyi matrik emme ölçüm sonuçları (Aslan Fidan, 2017)

| Numune No                                                  | 1      | 2      | 3      | 4      |
|------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Soğuk Numune Kabı Ağırlığı (gr) Tc                         | 9.3967 | 9.2997 | 9.4233 | 9.3015 |
| Soğuk Numune Kabı+ Islak Filtre Kağıdı Ağırlığı (gr) M1    | 9.7276 | 9.6669 | 9.7741 | 9.6518 |
| Sıcak Numune Kabı+ Kuru Filtre Kağıdı Ağırlığı (gr) M2     | 9.6441 | 9.5499 | 9.6806 | 9.5434 |
| Sıcak Numune Kabı Ağırlığı (gr) Th                         | 9.3949 | 9.2978 | 9.4208 | 9.2981 |
| Kuru Filtre Kağıdı Ağırlığı (gr)<br>Mf= M <sub>2</sub> -Th | 0.2492 | 0.2521 | 0.2598 | 0.2453 |
| Su Ağırlığı (gr)<br>Mw= M1-M2- Tc+Th                       | 0.0817 | 0.1151 | 0.091  | 0.105  |
| Filtre Kağıdı Su İçeriği (%) Mw/Mf                         | 33     | 46     | 35     | 43     |
| Matrik Emme (kPa)                                          | 593.52 | 59.00  | 400.68 | 89.45  |
| Zemin Su Muhtevası (%)                                     | 21     | 34     | 23     | 33     |

GHOSTUDIO programında, matrik emme gerilme değerleri kullanılarak Şekil 1.1’de gösterildiği gibi zemin-su karakteristik eğrisi belirlenmiştir.



**Şekil 1.1** Zemin-su karakteristik eğrisi (Aslan Fidan, 2017)

Çalışmada konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli basınç deneyi (CU) yapılmıştır. Deney sonucunda şev stabilite analizi için gerekli olan efektif kayma mukavemeti parametresi belirlenmiştir. Suyu doymun olmayan durumda kayma mukavemeti açısındaki artışı gösteren  $\phi^b$  değeri ise zemin-su karakteristik eğrisinden elde edilen rezidüel, doymun ve doğal hacimsel su muhtevalarına bağlı olarak (1.1)'den elde edilmiş ve zemine ait parametreler Tablo 1.3'te gösterilmiştir.

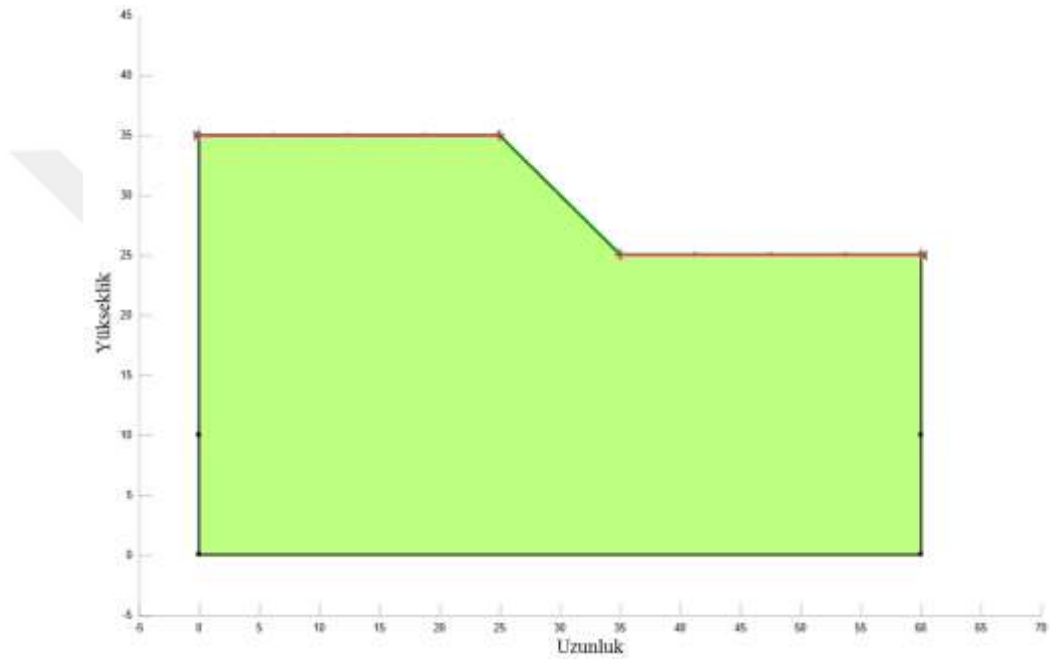
$$\tan \phi^b = \left[ \tan \phi' \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (1.1)$$

**Tablo 1.3** Doymun olmayan zemine ait hacimsel su içerikleri ve kayma direnci parametreleri (Aslan Fidan, 2017)

| Rezidüel<br>hacimsel<br>su içeriği, $\theta_r$<br>(%) | Doymun<br>hacimsel<br>su içeriği, $\theta_s$<br>(%) | Doğal<br>hacimsel<br>su içeriği, $\theta$<br>(%) | Matrik emmeye bağlı<br>kayma mukavemeti artış<br>miktarını gösteren açı, $\phi^b$<br>(°) | Efektif<br>kohezyon, $c'$<br>(kPa) | Efektif<br>sürtünme<br>açısı, $\phi'$<br>(°) |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0.07                                                  | 0.6                                                 | 0.39                                             | 8,82                                                                                     | 15                                 | 14                                           |

Şev stabilitesi analizlerinde, şev geometrisi Şekil 1.2'deki gibi şevin eğimi  $45^\circ$  ve yüksekliği 10 metre olacak şekilde belirlenmiştir ve yağış yoğunlukları için üzerinde çalışılan alana ait gerçek yağış verileri kullanılmıştır. Analizlerde başlangıç durumu için yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basıncı dağılımı dikkate alınarak kararlı

durum oluşturulmuş ve doymun olmayan zeminin yağış öncesindeki güvenlik sayısı 1.801 olarak bulunmuştur. Yağış yoğunluğunun bu zemin üzerindeki etkisini araştırmak için stabilite analizleri yağışın en yoğun olduğu aylar için yapılmıştır. Analizlerde günlük, aylık ve yıllık yağış miktarları yüzey akışı da göz önünde bulundurularak %30 oranında azaltılarak kullanılmıştır. Buna ek olarak, bu yağış miktarından daha fazla ve daha az yağış miktarları için de analizler yapılmıştır. Tablo 1.4'te farklı yağış yoğunlukları için gerçekleştirilmiş olan analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları ve yağış süreleri gösterilmiştir.



**Şekil 1.2** Analizlerde kullanılan şev geometrisi (Aslan Fidan, 2017)

**Tablo 1.4** Farklı yağış yoğunlukları için yapılan analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları ve yağış süreleri (Aslan Fidan, 2017)

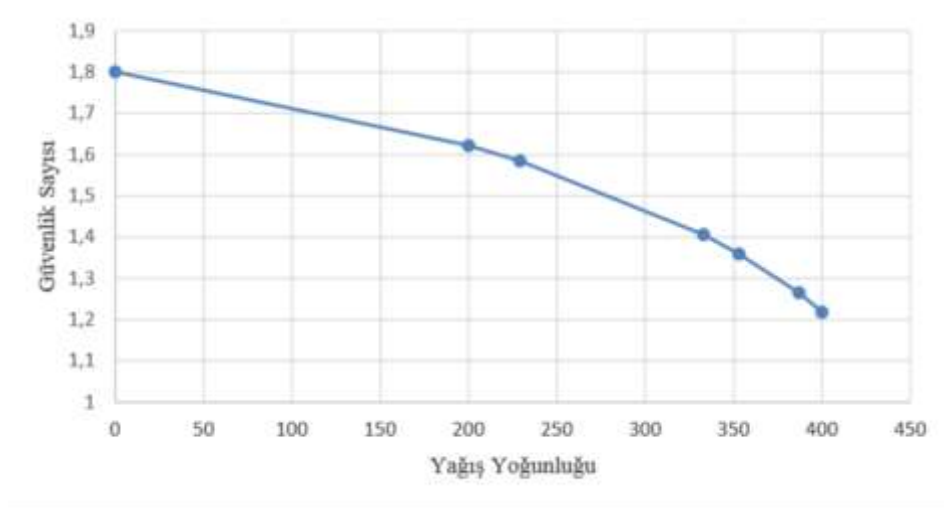
| Yıllar | Toplam yağış miktarı<br>(%30 azaltılmış) (mm) | Toplam süre<br>(ay) | Yağış yoğunluğu<br>(m/sn) |
|--------|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| -      | 200                                           | 3                   | $2.57 \times 10^{-8}$     |
| 2013   | 333                                           | 3                   | $4.28 \times 10^{-8}$     |
| 2014   | 229                                           | 3                   | $2.95 \times 10^{-8}$     |
| 2015   | 353                                           | 3                   | $4.54 \times 10^{-8}$     |
| 2016   | 387                                           | 3                   | $4.97 \times 10^{-8}$     |
| -      | 400                                           | 3                   | $5.14 \times 10^{-8}$     |

Yağış sonrası durum için yapılan analizlerde yeraltı su seviyesi ve boşluk suyu basınçları dikkate alınmıştır. Bu durum için doymun olmayan kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tablo 1.5'te verilen farklı yoğunluktaki yağışlar için elde edilen güvenlik sayıları verilmiştir.

**Tablo 1.5** Farklı yoğunluktaki yağışlar için elde edilen güvenlik sayıları (Aslan Fidan, 2017)

| Yıllar | Toplam yağış miktarı<br>(%30 azaltılmış)<br>(mm) | Yağış öncesi<br>güvenlik sayıları | Yağış sonrası<br>güvenlik sayıları |
|--------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| -      | 200                                              | 1.801                             | 1.622                              |
| 2013   | 333                                              | 1.801                             | 1.406                              |
| 2014   | 229                                              | 1.801                             | 1.585                              |
| 2015   | 353                                              | 1.801                             | 1.359                              |
| 2016   | 387                                              | 1.801                             | 1.265                              |
| -      | 400                                              | 1.801                             | 1.218                              |

Tablo 1.5 ve Şekil 1.3'te verilen yağış yoğunluğu ile güvenlik sayıları arasındaki ilişkiye bakıldığında, yağış sonrasında elde edilen şev güvenlik sayısının yağış yoğunluğuna bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 1.3** Yağış yoğunluğu ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki (Aslan Fidan, 2017)

Şekil 1.3 göz önüne alındığında, yağış yoğunluğu ve güvenlik sayısı arasında nonlinear bir ilişki olduğu ve bu durumun da zemine su girdisi düzeyinin büyüklüğü ile ilgili olduğu belirlenmiştir. Bu nonlinear ilişki, yağış yoğunluğunun artmasıyla birlikte zemine giren su miktarının arttığı, böylece zeminin geçirimsizliğinin de nonlinear olarak artarken matrik emmede azalma meydana geldiği ve buna bağlı olarak da zeminin kayma mukavemetinin düşmesiyle açıklanmıştır. Tablo 1.6’da ise yağış süresi etkisinin incelendiği analizlerde kullanılan yağış verileri sunulmuştur.

**Tablo 1.6** Yağış süresi etkisinin incelendiği analizlerde kullanılan yağış verileri (Aslan Fidan, 2017)

| Yağış türü                    | Toplam Yağış Miktarı<br>(%30 azaltılmış)<br>(mm) | Yağış Yoğunluğu<br>(mm/gün) | Analiz-Yağış Süresi<br>(gün) |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 3 aylık toplam maksimum yağış | 387                                              | 4.3                         | 90                           |
| Aylık toplam maksimum yağış   | 211                                              | 7.03                        | 30                           |
| Günlük toplam maksimum yağış  | 48                                               | 48                          | 3                            |

Yağış süresinin, şev stabilitesi üzerindeki etkisi Tablo 1.6’daki yağış verileri kullanılarak incelenmiş ve başlangıç durumunda 1.801 olarak belirlenen güvenlik sayısının üç günlük yoğun yağışın sonunda 1.674’e, aylık yağışın sonunda 1.665’e ve üç aylık yağışın sonrasında ise 1.265’e düştüğü belirlenmiştir.

Son olarak, zemin geçirimsizliğinin yağış sızmasına ve buna bağlı olarak şev stabilitesine olan etkilerini araştırmak için analizler yapılmıştır. Analizlerde, farklı permeabilite katsayıları kullanılmış ve son dört yıla ait maksimum üç aylık yağış verisi %30 azaltılarak göz önüne alınmıştır. Bu analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları, yağış süreleri ve permeabilite katsayıları Tablo 1.7’de, yapılan analizler sonucunda elde edilen güvenlik sayıları ise Tablo 1.8’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.7** Zemin geçirimsizliğinin etkisinin incelendiği analizlerde kullanılan yağış yoğunlukları (Aslan Fidan, 2017)

| Zemin Geçirimsizliği<br>(m/sn) | Toplam Yağış Miktarı<br>(mm) | Yağış Yoğunluğu<br>(m/sn) | Analiz-Yağış Süresi<br>(gün) |
|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| $5 \times 10^{-7}$             | 387                          | $4.97 \times 10^{-8}$     | 90                           |
| $10^{-6}$                      | 387                          | $4.97 \times 10^{-8}$     | 90                           |
| $5 \times 10^{-5}$             | 387                          | $4.97 \times 10^{-8}$     | 90                           |

**Tablo 1.8** Zemin geçirirmliliğine bağlı yağış öncesi ve sonrası güvenlik sayıları  
(Aslan Fidan, 2017)

| <b>Zemin Geçirirmliliği<br/>(m/sn)</b> | <b>Toplam Yağış Miktarı<br/>(mm)</b> | <b>Yağış Öncesi Güvenlik<br/>Sayısı</b> | <b>Yağış Sonrası<br/>Güvenlik Sayısı</b> |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 5x10 <sup>-7</sup>                     | 387                                  | 1.801                                   | 1.322                                    |
| 10 <sup>-6</sup>                       | 387                                  | 1.801                                   | 1.265                                    |
| 5x10 <sup>-5</sup>                     | 387                                  | 1.801                                   | 1.204                                    |

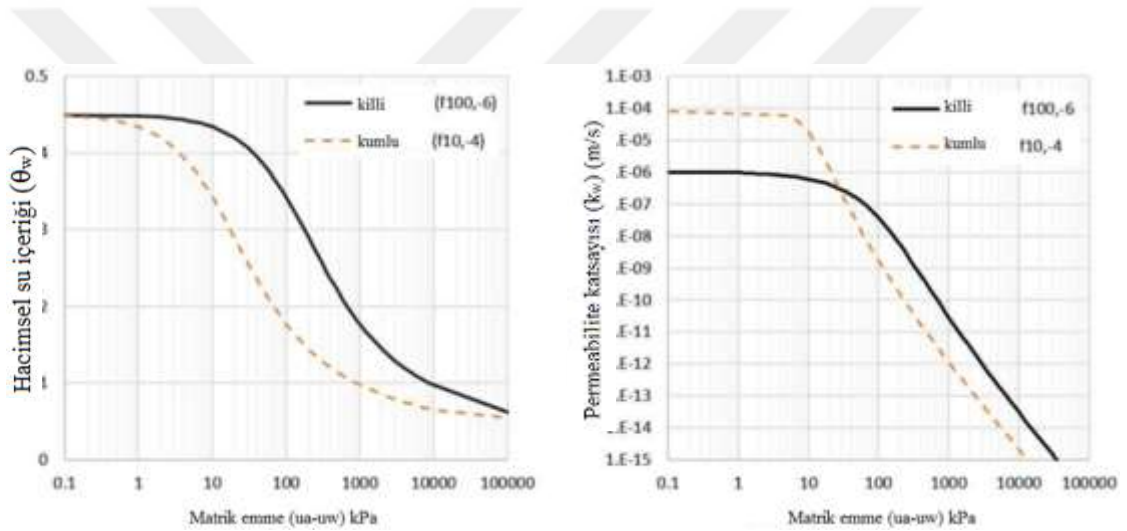
Bu çalışmanın sonunda yapılan analizlerde, doymun olmayan zeminlerde yağış yoğunluğu ile güvenlik sayıları arasında, matrik emme ve hidrolik iletkenlik arasındaki ilişkinin doğrusal olmamasından kaynaklanan nonlineer bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Kısa süreli ve yoğun yağışların, uzun süreli ve daha düşük yoğunluktaki yağışlardan daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir. Kısa süreli ve yoğun yağışlarda şev topuğuna yakın bölgede bulunan yeraltı su seviyesinin topuk bölgesine doğru kabardığı ve muhtemel kayma yüzeyinin içerisinde veya yakınlarında matrik emmeyi azalttığı belirtilmiştir. Buna bağlı olarak zemin mukavemetindeki azalmayla birlikte güvenlik sayısında bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Doymun olmayan yüksek geçirirmliliğe sahip zeminlerde güvenlik sayısının daha düşük olduğu belirlenmiş ve bu durum zeminin sızma-drenaj-boşluk basıncı arasındaki etkileşim mekanizması ile açıklanmıştır. Sızma miktarının, zeminin geçirgenlik katsayısı ile bölgenin yağış yoğunluğunun yüksek olmasından ve bu iki durum arasındaki orandan etkilendiği gözlemlenmiştir.

Gofar ve Rahardjo'nun (2017) yapmış oldukları çalışmalarında, Singapur'da killi ve kumlu zemin tiplerinde, yağış sızmasına mağruz kalan tipik rezidüel şevlerin, 50 yıllık yağış periyodunda zeminin doymun olduğu ve doymun olmadığı durumları için stabiliteeleri incelenmiştir. Analizlerde, stabilite etkisini araştırmak ve doymun olmayan şev analizi sonuçlarını klasik analizlerle karşılaştırmak için şev eğimleri 45° ve 70° olarak gözönünde bulundurulmuştur. Doymun durumda, orijinal ve kritik yeraltı su seviyesinde stabilite analizlerini gerçekleştirirken limit denge yaklaşımı kullanılmıştır. Doymun olmayan durumda, yağış sızmasının deformasyona etkisini ve boşluk suyu basıncının şev stabilitesine etkisini değerlendirmek için gerilme-boşluk suyu basıncı analizinden yararlanılmıştır. Şev stabilitesi analizleri, yağış sızması sırasında ve sonrasında SLOPE/W programı ile yapılırken, zemin içindeki

yağmur suyunun sızma süreci gerilme-deformasyon sonlu eleman yazılımı SIGMA/W ile analiz edilmiştir. SLOPE/W programı kullanılarak yapılan limit denge analizlerinde Singapur rezidüel zeminleri için tipik kayma mukavemeti parametreleri Tablo 1.9’da gösterildiği gibi belirlenmiştir. Şekil 1.4’te ise killi ve kumlu zemin tiplerine ait zemin-su karakteristik eğrisi ve permeabilite fonksiyonları gösterilmiştir.

**Tablo 1.9** Zemin Parametreleri (Gofar ve Rahardjo, 2017)

| Zemin | $\gamma_b$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$<br>(kPa) | $\Phi'$<br>(°) | $\Phi^b$<br>(°) | E<br>(kPa) | $\nu$ |
|-------|------------------------------------|---------------|----------------|-----------------|------------|-------|
| Killi | 20                                 | 10            | 26             | 17              | 10,000     | 0.40  |
| Kumlu | 20                                 | 5             | 33             | 23              | 15,000     | 0.33  |



**Şekil 1.4** Çalışmada kullanılan zemin-su karakteristik eğrileri ve permeabilite fonksiyonları (Gofar ve Rahardjo, 2017)

Çalışmada kabul edilen zemin-su karakteristik eğrisi ve permeabilite parametreleri Tablo 1.10’da gösterilmiştir.

**Tablo 1.10** Zemin-su karakteristik eğrisi ve permeabilite fonksiyon parametreleri (Gofar ve Rahardjo, 2017)

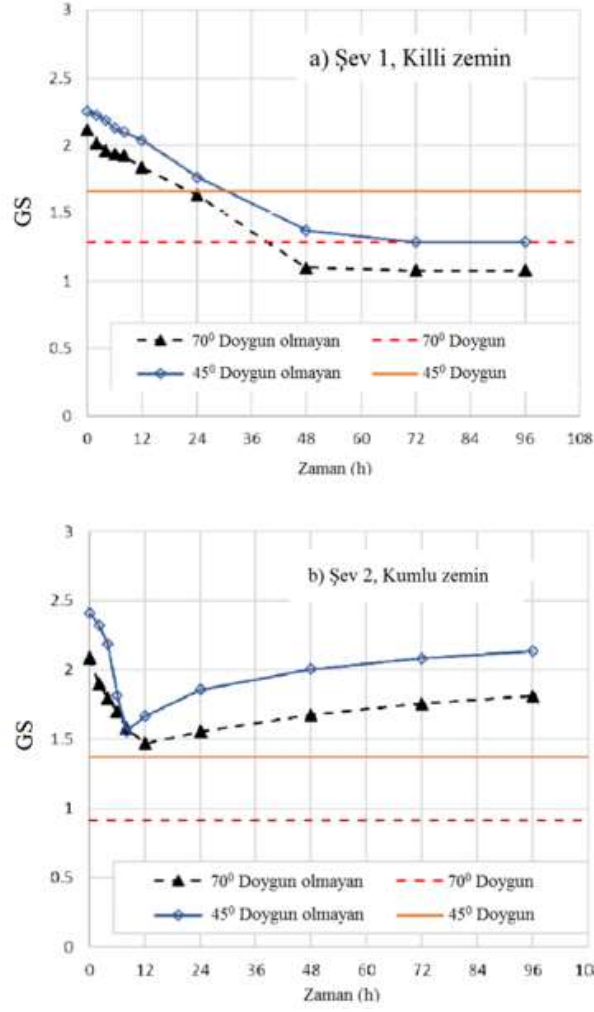
| Zemin | $\theta_s$ | a   | n | m | $k_s$ (m/sn) | p |
|-------|------------|-----|---|---|--------------|---|
| Killi | 0.45       | 100 | 1 | 1 | $10^{-6}$    | 4 |
| Kumlu | 0.45       | 10  | 1 | 1 | $10^{-4}$    | 4 |

Doygun olmayan şev stabilite analizleri  $45^\circ$  ve  $70^\circ$  eğim açısı için GEOSTUDIO programı kullanılarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, şevler için SIGMA/W programı ile doğal durumdaki gerilmeler tanımlanmıştır. İkinci aşamada, SIGMA/W programında gerilme-boşluk suyu basıncı kullanılarak 50 yıllık yağış periyodu uygulanmıştır. Son aşamada ise yağış sırasında ve sonrasında gerilme ve boşluk suyu basıncı kullanılarak SLOPE/W programında şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şev 1 (killi zemin) için gerçekleştirilen analizlerde kritik koşulların, yağıştan sonra sırasıyla 48. ve 72. saatte olduğu gözlemlenmiştir. Bu zamanlarda, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyine yükseldiği belirlenmiştir. Şev 2 (kumlu zemin) için yapılan analizlerde ise kritik koşulların yağış sonunda meydana geldiği ve yeraltı su seviyesinin orijinal konumundan az bir miktarda yükseldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 1.5'te boşluk suyu basıncı ve gerilme ile değişen GS değerleri verilmiştir. Şekil 1.5a ve 1.5b'de sırasıyla  $45^\circ$  ve  $70^\circ$  eğim açılarında killi ve kumlu zeminlerin güvenlik sayılarının değişimi verilmiştir. Şekil 1.5'e bakıldığında, killi zeminde yeraltı su seviyesinin artmasıyla birlikte güvenlik sayısının azaldığı, kumlu zeminde yağış sonrasında güvenlik sayısının minimum seviyeye ulaştığı ancak yüksek geçirgenlik katsayısı nedeniyle tekrar yükselmeye başladığı belirlenmiştir.

Doygun durumdaki klasik şev stabilite analizleri, killi ve kumlu şevler için orijinal yeraltı su seviyesinde ve yeraltı su seviyesinin 1m üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki durumun da kayma yüzeyi ile çakışmamasından dolayı killi şevlerde  $45^\circ$  ve  $70^\circ$ 'lik şev eğimi için güvenlik sayıları sırasıyla 1.661 ve 1.285 olarak bulunmuştur. Kumlu şevlerde ise  $45^\circ$  ve  $70^\circ$ 'lik şev sırasıyla 1.372 ve 0.917 olarak bulunmuştur. Zemin yüzeyinde, killi şevlerde güvenlik sayıları  $45^\circ$  ve  $70^\circ$ 'lik şev eğimleri için sırasıyla 1.083 ve 0.732 olarak bulunmuştur. Yapılan analizler sonucunda farklı metotlardan elde edilen güvenlik sayıları Tablo 1.11'de özet olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.5** Boşluk suyu basıncı ve gerilme ile değişen GS değerleri (Gofar ve Rahardjo, 2017)

**Tablo 1.11** Farklı metotlardan elde edilen güvenlik sayılarının özeti (Gofar ve Rahardjo, 2017)

| Eğim                           | Yeraltı su seviyesi için doygun/klasik analizler |                 |                 | Doygun olmayan analizler |              |
|--------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------|
|                                | Orjinal                                          | 1 m yükseklikte | Zemin yüzeyinde | Başlangıç                | Min. GS      |
| <b>Killi</b><br>Eğim 1,<br>45° | 1.661                                            | 1.661           | 1.083           | 2.54                     | 1.289 (72 h) |
| Eğim 1,<br>70°                 | 1.285                                            | 1.285           | 0.732           | 2.12                     | 1.075 (48 h) |
| <b>Kumlu</b><br>Eğim 2,<br>45° | 1.372                                            | 1.372           | NA              | 2.409                    | 1.668 (8 h)  |
| Eğim 2,<br>70°                 | 0.917                                            | 0.917           | NA              | 2.090                    | 1.458 (12 h) |

Çalışmanın sonucunda, iri daneli malzemeden oluşan şev için doymun olmayan durumda gerçekleştirilen stabilite analizlerinin klasik stabilite analizlerinden daha büyük GS değerleri verdiği görülmüştür. Bu tür şevler için en kritik şartların yağış bitiminden bir süre sonra meydana geldiği belirlenmiştir. Killi zeminden yapılan şevin gecikmeli göçme durumları için ise doymun olmayan stabilite analizleri, yeraltı su seviyesinin orijinal konumundan 1 m yükseldiği göz önünde bulundurulduğunda klasik stabilite analizinden daha kritik olabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca doymun olmayan analizlerde yağış sızmasının, klasik analizlerdeki gibi yeraltı su seviyesini yükseltmesine ek olarak boşluk suyu basıncı ve deformasyonu etkilemesiyle şevin mukavemetini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu analizin doymun olmayan şev stabilite analizlerinde gerçeğe daha uygun tahminler verdiği saptanmıştır.

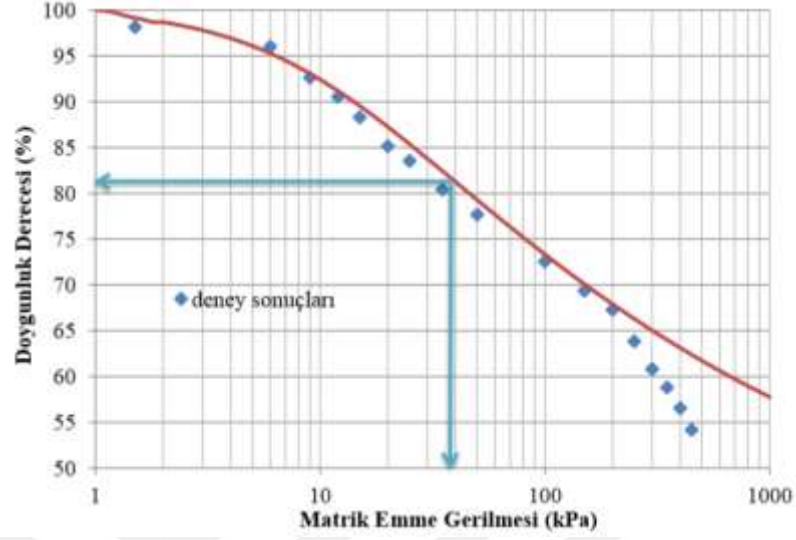
Gökoğlu'nun (2015) çalışmasında kum, kumlu kil ve silt olmak üzere üç farklı zemin tipinde, yeraltı su seviyesi değişimiyle birlikte doymun olmayan zeminlerde şev stabilitesini incelemiştir. Üzerinde çalışılan zemin numuneleri Tablo 1.12'de verilmiştir.

**Tablo 1.12** Çalışmadaki zemin numuneleri (Gökoğlu, 2015)

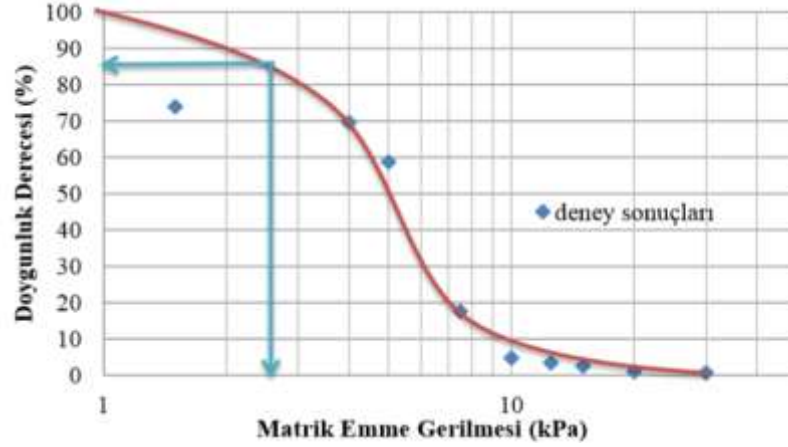
| Numune Numarası | Numunenin İsmi      | Zemin Türü | Açıklama     |
|-----------------|---------------------|------------|--------------|
| 1               | Güneşli kili        | CL         | Doğal numune |
| 2               | Silivri kumu        | SP         | Doğal numune |
| 3               | Indian Head<br>Till | CL         | Doğal numune |

Çalışmada zeminlerin sınıflandırılması ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için elek analizi, piknometre, kıvam limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Basınç plakası ile tempe basınç hücre deneyleri yapılarak doymun olmayan zemin parametreleri ile zemin-su karakteristik eğrisi elde edilmiştir. 1. Numune'ye ait özellikler, deneyler sonucunda elde edilmiş olup zemin-su karakteristik eğrisi Şekil 1.6'da, 2. ve 3. Numune'ye ait özellikler ise doymun olmayan zemin mekaniğine göre yapılmış olan çalışmalardan elde edilmiş olup

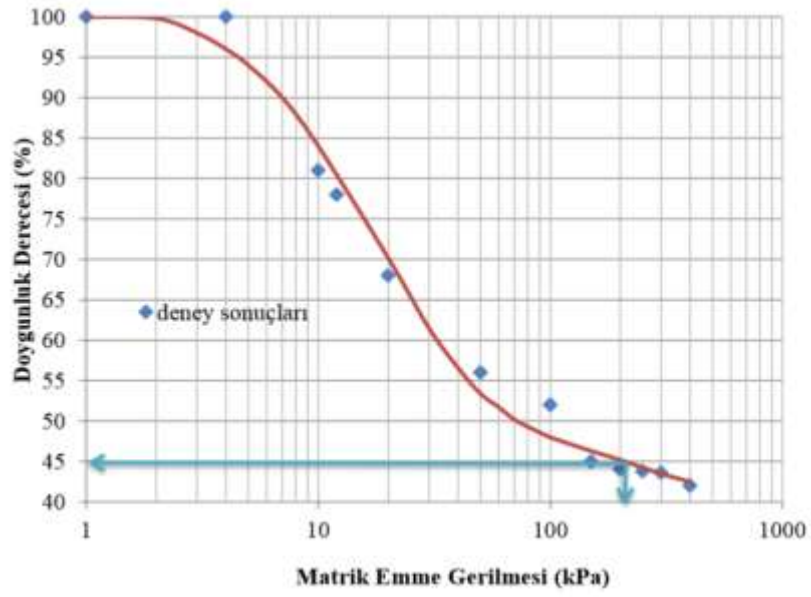
zemin-su karakteristik eğrileri sırasıyla Şekil 1.7 ve Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Numunelere ait özellikler ise Tablo 1.13’te gösterilmiştir.



**Şekil 1.6** 1. Numune'nin zemin-su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015)



**Şekil 1.7** 2. Numune'nin zemin su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015)



**Şekil 1.8 3.** Numune'nin zemin-su karakteristik eğrisi (Gökoğlu, 2015)

**Tablo 1.13** Numunelere ait özellikler (Gökoğlu, 2015)

| Numune İsmi                                         | 1. Numune | 2. Numune | 3. Numune |
|-----------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Doygunluk Derecesi, S (%)                           | 82        | 85        | 45        |
| Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19.70     | 19.00     | 16.00     |
| Su muhtevası, w (%)                                 | 18        | 22        | 13        |
| Matrik Emme (kPa)                                   | 40        | 2.5       | 205       |

Şev stabilite analizleri limit denge analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Analizlerde numunelere ait güvenlik sayılarını belirlemek için, GEOSTUDIO programında SLOPE/W modülü kullanılmıştır. Çalışmada üç farklı zemin tipi için şevler, 3 m şev yüksekliği ve 45°'lik şev eğimi ile modellenmiştir. Bu kesitlerde yapılan analizlerden elde edilen güvenlik sayılarının değişimi, yeraltı suyunun değişimiyle birlikte incelenmiştir. İlk olarak yeraltı suyunun olmadığı, zeminin sıkıştırma yolu ile elde edilen zemin numunesinin başlangıç özelliklerinde olduğu kabul görmüştür. Matrik emme basıncı, doymun olmayan durumda gerçekleştirilen analizlerde şevin bütün alanlarında üniform olarak değerlendirilmiştir. İkinci aşamada yeraltı su seviyesi tanımlanmış, hem klasik hem de doymun olmayan durum için yapılan analizlerde elde edilen güvenlik sayılarının değişimi yeraltı su

seviyesinin değişimiyle birlikte incelenmiştir. Son olarak, analizlerde zeminin tamamen suya doymun olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Klasik ve doymun olmayan şev stabilize analizleri sonucunda elde edilen güvenlik sayıları Tablo 1.14’de verilmiştir.

**Tablo 1.14** Analizler sonucunda bulunan güvenlik sayıları (Gökoğlu, 2015)

| Yeraltı Su Seviyesi | Analiz Kabulü | 1. Numune | 2. Numune | 3. Numune |
|---------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Başlangıç durumu    | KZM           | 3.73      | 1.27      | 1.77      |
|                     | DOZ           | 4.55      | 1.46      | 10.60     |
| 1. Durum            | KZM           | 3.73      | 1.27      | 1.77      |
|                     | DOZ           | 4.48      | 1.27      | 2.62      |
| 2. Durum            | KZM           | 3.73      | 1.27      | 1.77      |
|                     | DOZ           | 4.17      | 1.29      | 2.32      |
| 3. Durum            | KZM           | 3.54      | 1.12      | 1.54      |
|                     | DOZ           | 3.64      | 1.22      | 1.61      |
| 4. Durum            | KZM           | 3.38      | 0.94      | 1.34      |
|                     | DOZ           | 3.39      | 1.00      | 1.36      |
| 5. Durum            | KZM           | 3.20      | 0.30      | 1.08      |
|                     | DOZ           | 3.20      | 0.30      | 1.08      |

Tablo 1.14’te 1. Durumda yeraltı suyunun zemin yüzeyinden en alt konumda bulunduğu durumu, 1. Durum ’dan 4. Durum ’a kadar yeraltı su seviyesinin zeminin yüzeyine yaklaştığı durumu ifade etmektedir. 5. Durum ise yeraltı suyunun zemin yüzeyinden 50 cm yukarıda olduğu seviyedeki durumu ifade etmektedir.

Çalışmanın sonunda, numunelerde kil oranı arttıkça su tutma kapasitesinin de arttığı ve buna bağlı olarak matrik emme değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Bu nedenle, aynı doymunluk derecelerinde 3. Numune’nin matrik emme değerinin daha

fazla olduğu, 2. Numune'nin 1. Numune'ye oranla daha yüksek matrik emmeye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şev stabilite analizlerinin sonucunda, başlangıç durumu göz önüne alındığında, hem klasik hem de doygun olmayan analizlerden belirlenen güvenlik sayılarında 3. Numune için en fazla, 2. Numune için ise en az farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda, ince daneli zeminlerde doygun olmayan zemin parametrelerinin güvenlik sayısını artırdığı belirlenmiştir.

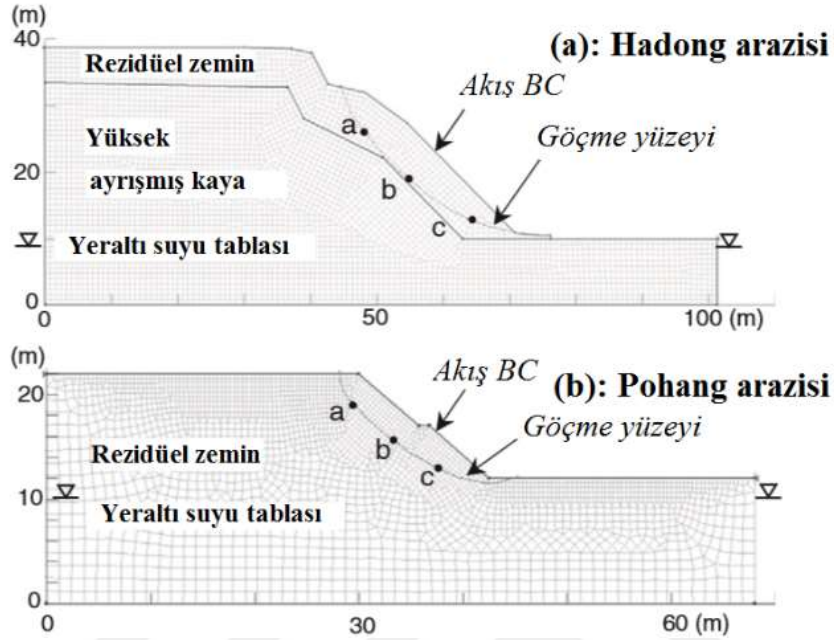
Yeraltı su seviyesinin değişiminin göz önüne alındığı analiz sonuçları incelendiğinde, doygun olmayan durum için gerçekleştirilen analizlerin, klasik duruma oranla daha çok etkilendiği belirlenmiştir. Yeraltı su seviyesi arttığında matrik emme değerlerinde azalmanın olduğu ve dolayısıyla güvenlik sayılarında da azalmaların olduğu gözlemlenmiştir.

Zeminin suya tamamen doygun olduğu durumda yapılan analizlerde ise hem klasik hem de doygun olmayan durumda gerçekleştirilen analizler sonucunda aynı güvenlik sayılarının bulunduğu görülmüş, bu durumun emme basıncının gözlemlenememesinden kaynaklanması sonucu olduğu belirtilmiştir.

Oh ve Lu'nun (2015) Kore'de Hadong ve Pohang şehirleri yakınlarında yapmış oldukları çalışmalarında, tasarlanmış şevlerde yağıştan dolayı meydana gelen göçmeler ile ilgili iki vaka analizi sunulmuştur. Tasarlanmış şev kesitlerinde meydana gelen göçme durumları doygun olmayan zemin mekaniğine göre analiz edilmiştir. Bu çalışmadaki amaç, hem yağış şartları altında incelenen arazilerdeki şevlerde göçmenin neden meydana geldiğini anlamak hem de kısa süreli yağış koşullarında, doygun olmayan tasarlanmış şev kesitlerindeki göçmelerin hidromekanik çerçevede uzlaştırılabileceğini göstermek için sonuçların kullanılması olarak belirtilmiştir.

Temel jeolojik ve geoteknik etütler sonucunda elde edilen şevlere ait kesitler Şekil 1.9'da sonlu elemanlar ağları ile gösterilmiştir. Kayma yüzeyleri, mevcut stabilite analizinden itibaren göçme tarihinde kritik yüzey olarak belirlenmiştir ve göçmeden sonra araziden alınan verilerle benzer oldukları gözlemlenmiştir. Kayaçların, Hadong'da (Şekil 1.9a) daha çok granitik gnays ve ayrıışmış granit, Pohang'da (Şekil 1.9b) ise çamurtaşı ve şeyl içerdiği belirtilmiştir. Kaya tabakası, rezidüel tabakaların altında çok ayrıışmış olduğu ve eklemlerle, tabakalaşma düzlemleriyle ve faylarla

çoklu kırıklar içerdiği belirtilmiştir. Şevlerin üst tabakasının tipik olarak, 5 metreden 20 metre derinliğe kadar rezidüel zeminlerden oluştuğu görülmüştür.



**Şekil 1.9** Şev göçmesinin jeolojik tabakaları ve sonlu elemanlar ağı: (a) Hadong arazisi (b) Pohang arazisi (Oh ve Lu, 2015)

Hadong şevinin, inşa edildikten sonraki birkaç yıl boyunca herhangi bir kararsızlık problemi gerçekleşmeden hizmet veren, tasarlanmış bir yol şev kesiti olmasıyla birlikte, 2009 yılında Temmuz ayının ortasında, üç aylık 1029 mm'lik şiddetli yağış sonrasında Şekil 1.9a'daki gibi göçme paternleri ile göçtüğü belirlenmiştir. Pohang şevinin, kazısı ve inşası 2010 yılında Ekim ayının sonlarında tamamlanmış ve 2011 yılında Haziran ayının sonunda 420 mm'lik üç aylık yağış sonrasında göçtüğü belirlenmiştir. Kore'nin bu kesiminde yıllık yağış ortalamasının 900-1300 mm civarında olduğu göz önüne alındığında, şev göçmelerine neden olan yağışın Hadong arazisinde ağır, Pohang arazisinde ise tipik bir durum olduğu göz önüne alınabileceği belirlenmiştir.

Şev kesit eğimlerinin, yatay düzleme göre  $40^{\circ}$  -  $45^{\circ}$  arasında değişen değerlerde olduğu belirtilmiştir. Önceki doymuş şev tasarımı uygulamasından dolayı şev kesiti, su tablası yüzeye yakın olacak şekilde neredeyse doymuş olarak tasarlanmıştır. Ancak, güvenilir olmayan doymuş kayma mukavemeti parametreleri

kullanıldığından, geleneksel şev stabilitesi açısından şevlerin açıkça kararlı olmadığı belirtilmiştir. Hidromekanik açıdan değerlendirildiğinde, şev stabilite analizi fiziksel, mukavemet, deformasyon ve hidromekanik olarak dört farklı gruba ayrılmıştır. Şev kesitlerine ait fiziksel özellikler Tablo 1.15'te, geoteknik ve hidromekanik özellikler ise Tablo 1.16'da gösterilmiştir.

**Tablo 1.15** Şev kesitlerinin malzemelerine ait fiziksel özellikler (Oh ve Lu, 2015)

| Numuneler | USCS | Özgül<br>ağırlık | Daneler<br><75µm<br>(%) | Boşluk<br>oranı | Kuru<br>birim<br>hacim<br>ağırlık<br>$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Yerinde<br>hacimsel<br>su<br>muhtevası<br>$\theta$ | Plastik<br>limit<br>$w_p$ | Plastisite<br>indeksi<br>$I_p$ | Aktivite<br>$A$ |
|-----------|------|------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------|
| Hadong    | SW   | 2.63             | 4.7                     | 0.977           | 13.05                                                                | 0.081                                              | -                         | -                              | -               |
| Pohang    | MH   | 2.65             | 62.6                    | 0.866           | 13.93                                                                | 0.42                                               | 36.8                      | 8.3                            | 0.9             |

**Tablo 1.16** Şev kesitlerinin malzemelerine ait geoteknik ve hidromekanik özellikler (Oh ve Lu, 2015)

| Tip                                                                                                                                                                     | Parametre                           | Hadong                 |                        | Pohang                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                                                         |                                     | Zemin                  | Kaya                   | Zemin                  |
| Mukavemet                                                                                                                                                               | c' (kPa)                            | 0                      | 50.0 <sup>a</sup>      | 0                      |
|                                                                                                                                                                         | $\phi'$ (°)                         | 34.1                   | 35.5 <sup>a</sup>      | 31.6                   |
|                                                                                                                                                                         | $\gamma_{ort}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 17.41                  | 21.0 <sup>a</sup>      | 18.03                  |
| Deformasyon <sup>b</sup>                                                                                                                                                | E (kPa)                             | 2x10 <sup>6</sup>      |                        | 2x10 <sup>6</sup>      |
|                                                                                                                                                                         | $\nu$                               | 0.333                  |                        | 0.333                  |
| Hidromekanik                                                                                                                                                            | $k_s$ (m/s)                         | 5.60x10 <sup>-6c</sup> | 1.87x10 <sup>-6c</sup> | 3.46x10 <sup>-6c</sup> |
|                                                                                                                                                                         | $\theta_s$                          | 0.282                  |                        | 0.398                  |
|                                                                                                                                                                         | $\theta_r$                          | 0                      |                        | 0.12                   |
|                                                                                                                                                                         | $u_b$ (kPa)                         | 22.48                  |                        | 27.93                  |
|                                                                                                                                                                         | n                                   | 1.37                   |                        | 1.10                   |
| <sup>a</sup> Arazi mühendisliği tasarım raporunda kullanılan değerler.<br><sup>b</sup> Varsayılan değerler.<br><sup>c</sup> Parametrik analizlerde kullanılan değerler. |                                     |                        |                        |                        |

Kısa süreli doymun sızma koşulları altındaki klasik şev stabilitesi analizlerinde, fiziksel, mukavemet ve deformasyon ile birlikte doymun hidrolik iletkenlik ve porozite de kullanılmıştır. Kısa süreli doymun olmayan sızma koşulları altındaki şev stabilite analizlerinde ise, hidromekanik olarak başlıca rezidüel su muhtevası, hava giriş basıncı ( $u_b$ ) ve gözenek büyüklüğü dağılımı ( $n$ ) parametreleri de kullanılmıştır.

Rezidüel zeminlerin heterojen yapısından dolayı araziden hidromekanik özellikleri belirlemek için örselenmemiş numune almanın zor olduğu ancak doğru sonuçlar elde edebilmek için hem mümkün olduğunca örselenmemiş hem de örselenmiş numuneler üzerinde deneylerin yapılması gerektiği belirtilmiştir. Zemin-su tutma verileri eksen kaydırma tekniği kullanılarak elde edilmiştir ve zemin su tutma eğrisi basınç plakası deneylerinden elde edilerek Van Genuchten modeline uyarlanmıştır.

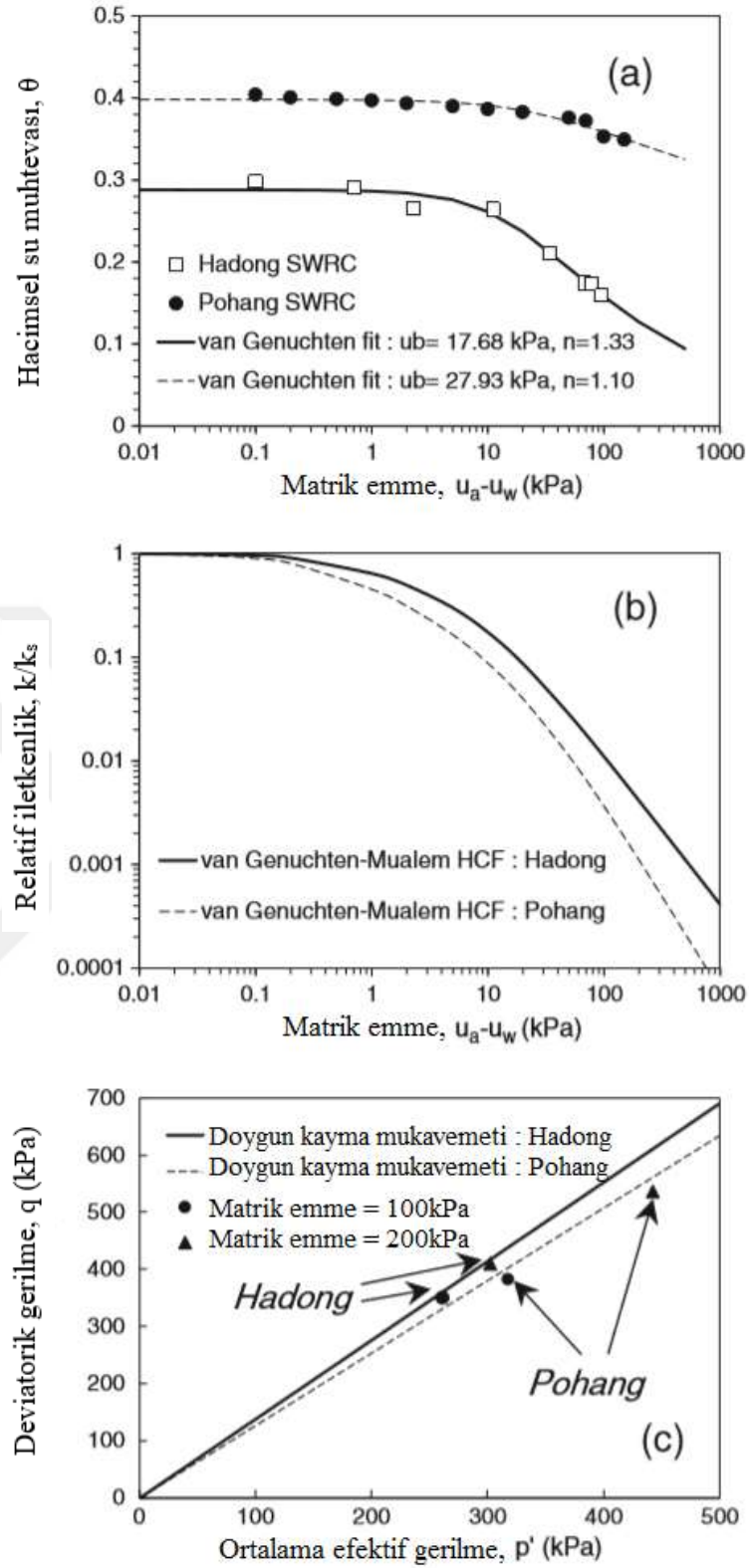
Zeminin kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için doymun koşullar altında basit kesme deneyleri yapılmıştır. (1.2)'de verilen efektif gerilme prensibini doğrulamak için ise doymun olmayan koşullar altında çok aşamalı üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiştir.

$$\sigma' = \sigma - u_a - \sigma^s \quad (1.2)$$

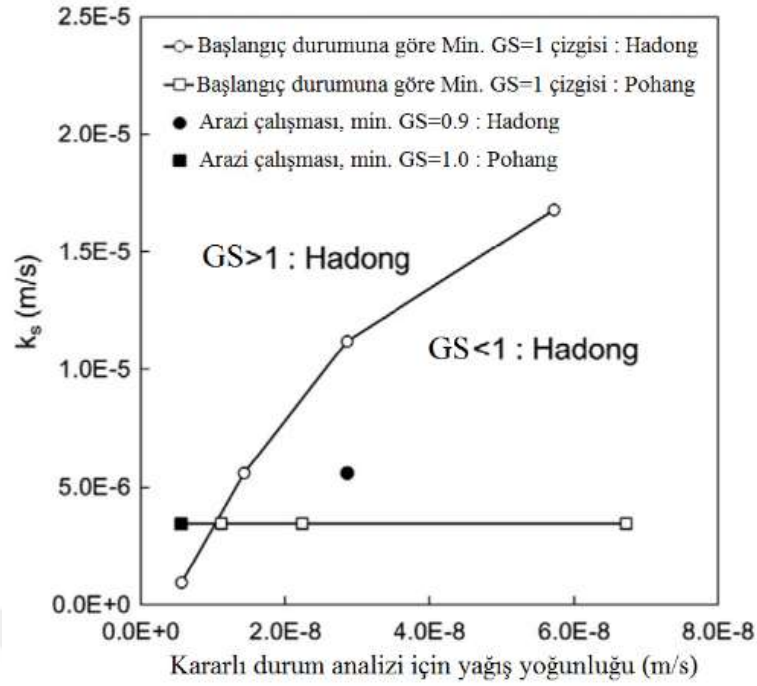
Burada,  $u_a$  boşluk hava basıncını, matrik emmenin bir fonksiyonu olarak ifade edilen  $\sigma^s$  ise emme gerilmesi olarak belirtilmiştir.

Zemin su tutma eğrisi, hidrolik iletkenlik fonksiyonu ve göçme zarfını tanımlayan bu hidromekanik özelliklerin değerleri Tablo 1.16'da sunulmuştur ve bunlara uygun zemin su tutma eğrisi, hidrolik iletkenlik ve göçme zarfları Şekil 1.10'da verilmiştir.

Uygulanan sabit yağış oranı ve göçme anındaki önceden belirlenen güvenlik sayısı değeri ile kesitin ters sayısal modellenmesine dayanan doymun hidrolik iletkenliğin daha iyi tahmin edilmesi sağlanmıştır. Şekil 1.11'de daha önceden belirlenmiş güvenlik sayıları altında değiştirilmiş hidrolik iletkenlik ve sızma oranı (yoğunluk) gösterilmiştir ve ölçekli alanda hidrolik iletkenlikler Tablo 1.16'daki gibi hesaplanmıştır.



**Şekil 1.10** Hidromekanik ve geoteknik özellikler: (a) zemin su tutma verisi, (b) benzetilmiş hidrolik iletkenlik katsayıları ve (c) şev göçme alanları için kayma mukavemeti verisi (doğru ve doğru olmayan) (Oh ve Lu, 2015)



**Şekil 1.11** Limit denge veya GS=1.0 koşullarında yağış yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak doygun hidrolik iletkenliğin alan ölçekli parametrik analizinin sonuçları (Oh ve Lu, 2015)

Bu çalışmada analizler GEOSTUDIO programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sızma nedeniyle hidrolojik davranışı analiz etmek için SEEP/W modülü, şev tabakalarında toplam gerilmenin dağılımını hesaplamak için SIGMA/W modülü ve güvenlik sayısını hesaplamak için ise SLOPE/W modülü kullanılmıştır. SLOPE/W modülünde kayma mukavemetinde, emme gerilmesi ve efektif gerilme (1.3)'teki gibi birleştirilmiştir.

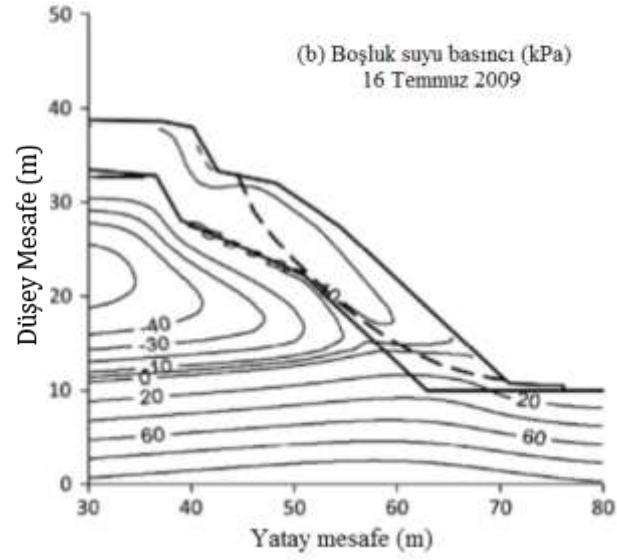
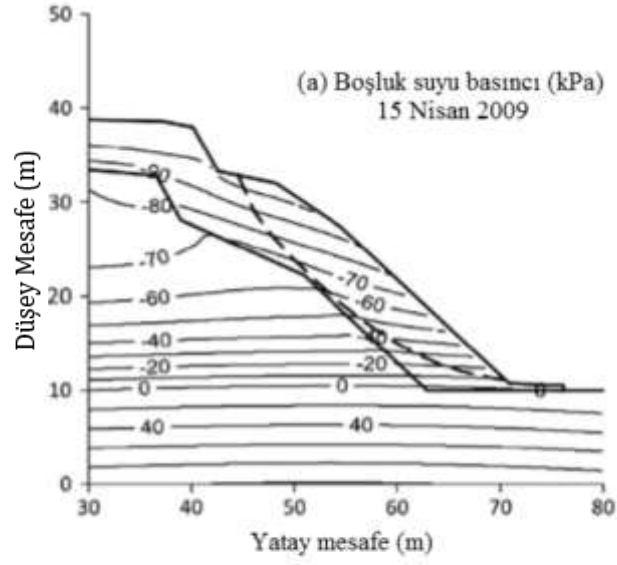
$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + \left\{ (\sigma - u_a) + \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) \right\} \tan \phi' \quad (1.3)$$

Burada;  $\tau_f$  kayma mukavemeti,  $c'$  ve  $\phi'$  drenajlı kohezyon ve içsel sürtünme açısı,  $\sigma'$  ve  $\sigma$  sırasıyla efektif ve toplam gerilme,  $u_a$  ve  $u_w$  sırasıyla boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı,  $\theta_r$  ve  $\theta_s$  ise sırasıyla rezidüel ve doygun hacimsel su muhtevaları olarak belirtilmiştir.

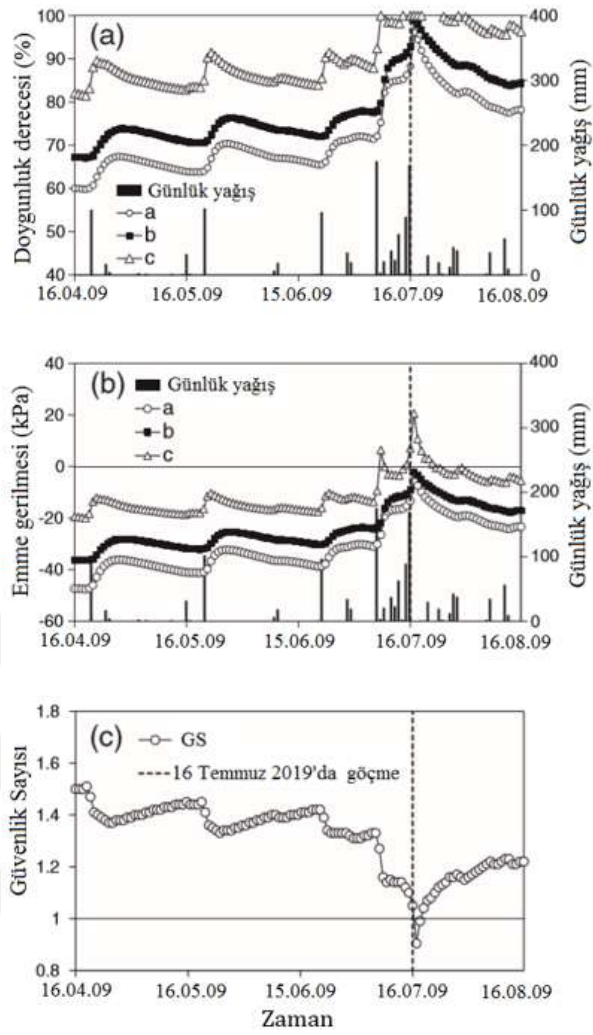
Analizlerin, kısa süreli doygun akış alanlarının hesaplanması (basınç yükü ve su muhtevası), arazilerin toplam ve emme gerilmelerinin hesaplanması (efektif gerilme) ve önceden belirlenmiş göçme yüzeyi boyunca güvenlik sayısının hesaplanmasıyla tekrarlamalı olarak üç aşamadan oluştuğu belirtilmiştir. Analiz, tek

bir kayma yüzeyi için göçme geri analizinin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri, genelleştirilmiş bir efektif gerilme çerçevesi kullanılarak doygun olmayan durumlar için genişletilmiştir. Efektif gerilme, emme gerilimi karakteristik eğrisi ile temsil edildiğinden, emme gerilimi karakteristik eğrisi ve zemin su tutma eğrisi aynı hidromekanik parametlerle birleştirilmiştir.

Hadong arazisinde, başlangıç koşulları oluşturmak için ilk olarak 2008 yılında doygun olmayan kararlı durum akışı yıllık 902 mm'lik yağış (ya da  $2.86 \times 10^{-8}$  m/s akış hızı) uygulanarak benzetilmiştir. Başlangıç koşulları, Şekil 1.12'de yağıştan dolayı oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı olarak verilmiştir. Şekil 1.12a'da yağış kayıtlarının başında, rezidüel zemin tabakasında boşluk suyu basıncının kademeli olarak 0 kPa'dan su tablasının üzerindeki -90 kPa'a kadar azaldığı ve böylece potansiyel göçme yüzeyinin tamamen su tablasının üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 1.13a'da 1029 mm'lik yoğun yağıştan sonra meydana gelen kısa süreli sızma gösterilmiştir. Sızma, 16 Temmuz 2009'dan önceki üç ay için benzetilmiş ve bu tarihte şev göçmesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu tarihteki boşluk suyu basıncı dağılımı ise Şekil 1.12b'de gösterilmiştir. Boşluk suyu basıncının sıfır olduğu noktadaki su tablasının, şev topuğunun yakınındaki bölgede önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Burada kesikli çizgi ile gösterilmiş olan göçme yüzeyinin bir kısmı doygundur ve bu durum pozitif boşluk suyu basıncı olarak gösterilmiştir. Göçme yüzeyinin büyük bir kısmı ise doygun olmamakla birlikte yaklaşık -10 kPa kadar düşük bir negatif boşluk suyu basıncı ile ifade edilmiştir. Şekil 1.13a ve 1.13b'deki sonuçların göçme yüzeyi boyunca zamanla zemin ıslaklığının ve efektif gerilmenin değişkenliğini de gösterdiği, Şekil 1.13c'de ise yoğun yağış boyunca hesaplanan güvenlik sayıları gösterilmiştir. Şekil 1.13c'ye bakıldığında güvenlik sayısının başlangıçta 1.5 olduğu ancak 6 Haziran'a kadar kademeli olarak 1.3'e düştüğü gözlemlenmiştir. 16 Temmuz'dan önceki 10 gün boyunca meydana gelen 586 mm'lik yağış sonucu, güvenlik sayısının aniden 1.05'e düştüğü ve bu tarihte şev göçmesinin meydana geldiği görülmüştür.



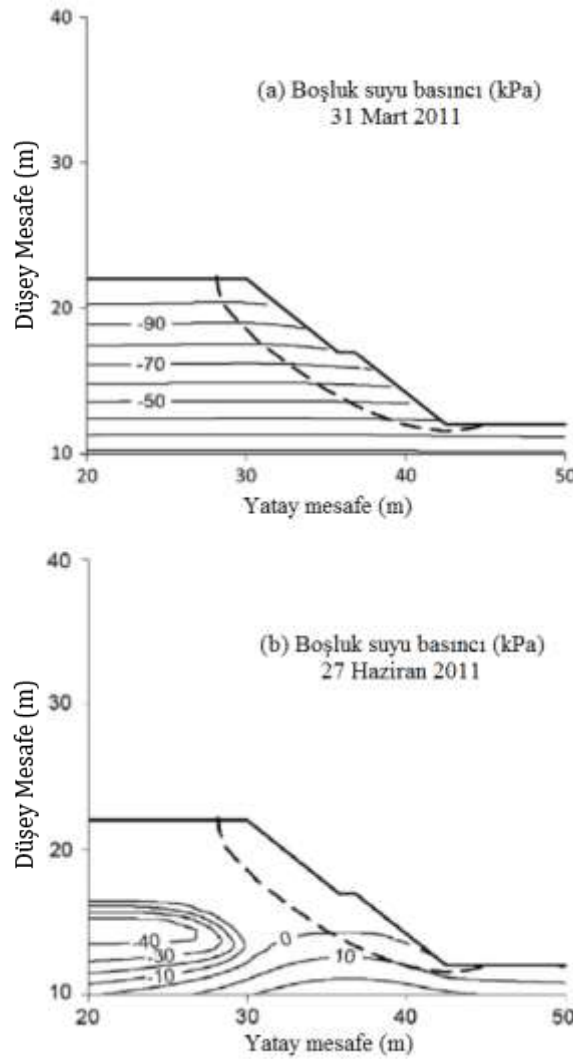
**Şekil 1.12** Hadong arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) 15 Nisan 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) ve (b) 16 Temmuz 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (Oh ve Lu, 2015)



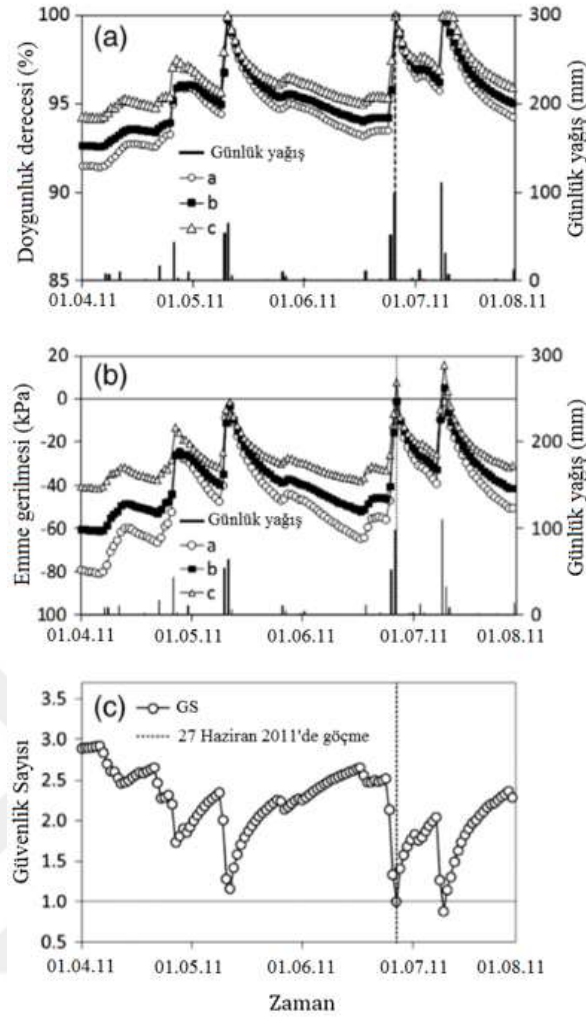
**Şekil 1.13** Hadong arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) doymunluk derecesi ve zaman, (b) emme gerilmesi ve zaman, (c) güvenlik sayısı ve zaman (Oh ve Lu, 2015)

Pohang arazisine ait benzetilmiş boşluk suyu basınçları dağılımları Şekil 1.14'de gösterilmiştir. Şekil 1.14a'da yağış sezonundan önce, kararlı durum için 45 mm'lik aylık yağış (sızma oranı  $5.6 \times 10^{-9}$  m/s) kullanılarak elde edilen başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı gösterilmiştir. Burada, rezidüel zemin içindeki boşluk suyu basınçlarının -90 kPa ile -30 kPa arasında değiştiği görülmüştür. Şekil 1.14b'de üç aylık 420 mm'lik yağıştan sonra, boşluk suyu basıncının kayma yüzeyi boyunca arttığı ve su tablasının şev yüzeyinin alt kısmına yükseldiği belirtilmiştir. Şekil 1.15'te ise 1 Nisan 2011'den başlayarak zaman bağlı olarak değişen yağışlar gösterilmiş ve boşluk suyu basıncının rezidüel zemin tabakasında -40 kPa'dan daha

büyük bir değere yükseldiği ve şev yüzeyi yakınlarında -5 kPa'dan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlara bakıldığında ise, Haziran ayının sonunda şev göçmesi meydana geldiği gözlemlenmiştir. Efektif gerilmenin değişkenliğine bağlı olarak değişen güvenlik sayıları Şekil 1.15c'de gösterilmiştir. Başlangıçta güvenlik sayısının 2.8 olduğu ve dalgalanma gösterdiği ancak azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. 25-27 Haziran tarihlerinde 151 mm'lik iki günlük yoğun yağış nedeniyle güvenlik sayısının 1'e düştüğü ve 27 Haziran'da şev göçmesinin meydana belirlenmiştir.



**Şekil 1.14** Pohang arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) 15 Nisan 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (b) 16 Temmuz 2009'daki boşluk suyu basıncı (kPa) (Oh ve Lu, 2015)



**Şekil 1.15** Pohang arazisinde benzetilmiş sonuçlar: (a) doygunluk derecesi ve zaman, (b) emme gerilmesi ve zaman, (c) güvenlik sayısı ve zaman (Oh ve Lu, 2015)

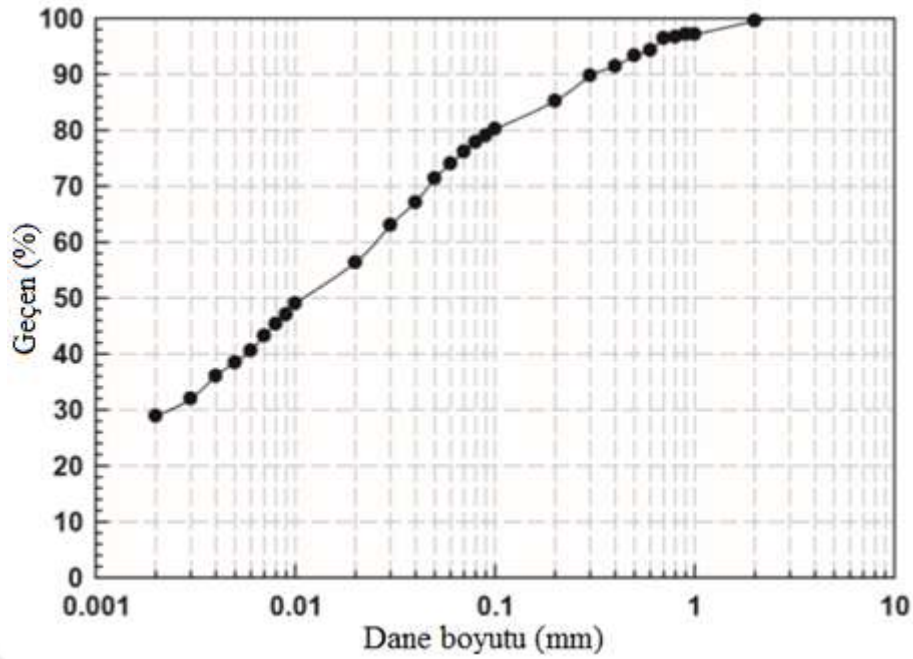
Çalışmanın sonucunda Hadong ve Pohang arazilerinde, tüm göçme yüzeyleri boyunca koşullar neredeyse doymun hale geldiğinde, birkaç günlük aşırı derecede yoğun yağış ve iki günlük yoğun yağış sonrasında şevlerde göçme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şev göçmelerinde, emme gerilmesindeki ve boşluk suyu basıncındaki değişimlerin önemli rol oynadığı görülmüştür. Şev geometrisi, hidromekanik özellikler, kayma mukavemeti ve yağış tarihçesindeki farklılıklara rağmen şev göçmelerinin güvenlik faktörünün minimum veya 1'e yaklaştığında değişken bir şekilde doymun koşullar altında meydana geldiği belirlenmiştir. İki vaka analizinin de sonuçlarına dayanarak, genişletilmiş hidromekanik çerçevenin kısa süreli yağış koşulları altında doymun olmayan şev göçmelerini analiz etmek ve

göçme durumlarını doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Oh ve Vanapalli'nin (2010) çalışmasında, Indian Head bölgesinden alınan sıkıştırılmış buzul zemini ile inşa edilen tipik bir dolgunun, farklı senaryolar göz önünde bulundurularak güvenlik sayısının değişimi incelenmiştir. Dolguda yağış sızmasının olduğu ve olmadığı durumlarda doymuş koşullar göz önünde bulundurularak uzun süreli stabilite, dolguda yağış sızmasının olduğu ve olmadığı durumlarda doymuş olmayan koşullar göz önünde bulundurularak uzun süreli stabilite ve son olarak drenajsız yükleme koşulları göz önünde bulundurularak doymuş olmayan dolguların kısa süreli stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sıkıştırılmış zemin numuneleri üzerinde, hem doymuş hem de doymuş olmayan şartlarda kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi, farklı yağış koşullarından dolayı sıkıştırılmış dolgunun içerisindeki suyun sızması göz önüne alınarak GEOSLOPE programı kullanılarak yapılmıştır. Analizler; doymuş şartlar, doymuş şartlar ile birlikte göllenme (ya da akış), doymuş olmayan şartlar için kısa süreli ve uzun süreli olarak farklı senaryolar için gerçekleştirilmiştir. Farklı senaryoların analizi için gerekli olan sıkıştırılmış zeminin uygun kayma mukavemeti parametreleri, geleneksel ve modifiye üç eksenli kayma mukavemeti deneylerinden belirlenmiştir.

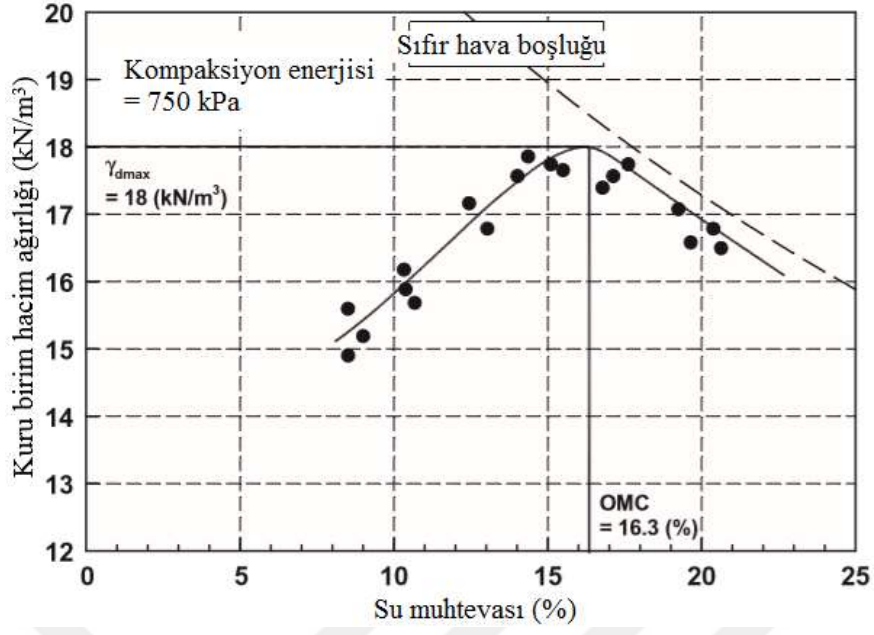
Doymuş olmayan sıkıştırılmış dolguların kararsızlığı, kar erimesi ve yağış aktiviteleri ile ilişkili olan sızmadan kaynaklanan matrik emme değerlerindeki azalmaya bağlı olarak tetiklenmesinin muhtemel olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, stabilite analizleri için ıslanma izini takip eden zemin-su karakteristik eğrisinden yararlanılmıştır. Çalışma kapsamında kayma mukavemeti parametrelerini ve zemin-su karakteristik eğrisini elde etmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Araziden alınan doğal buzul kütlesi ilk olarak hava ile kurutulup zemin danelerini ayırmak için toz haline getirilmiştir. Daha sonra zemin numunesi 2 mm'lik bir elekten geçirilmiş ve Şekil 1.16'daki dane boyu dağılımı eğrisi çizilmiştir.



**Şekil 1.16** Indian Head birikintisi için dane boyu dağılımı eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010)

Hazırlanan numune farklı su muhtevalarında özenle karıştırılmış ve suyun numunenin her bölgesine yayılmasını sağlamak için en az 5 gün boyunca polietilen torbalarda kapalı olarak bekletilmiştir. Numune denge durumuna ulaştığında, 750 kPa'lık standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığının değişimi hesaplanmıştır ve kompaksiyon sonucunda elde edilen grafik Şekil 1.17'de verilmiştir. Stabilite analizlerini gerçekleştirmek için gerekli bütün girdi parametreleri, su muhtevası % 13.2 ve kuru birim hacim ağırlığı 17.5 kN/m<sup>3</sup> olarak hazırlanan numunelerden elde edilmiştir. Bu değerlerin seçilmesinin nedeni olarak killerin veya buzul tortuların, dolguların inşasında optimum koşullardan biraz daha kuru durumda kompakte edilmesi gösterilmiştir. Tablo 1.17'de çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri özet olarak sunulmuştur.

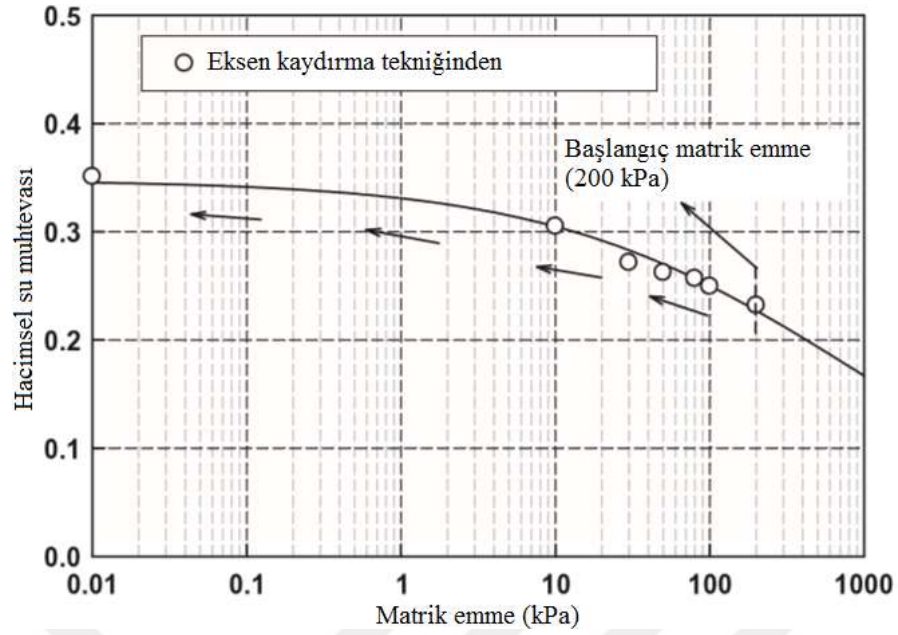


**Şekil 1.17** Indian Head birikintisinin kompaksiyon eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010)

**Tablo 1.17** Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri (Oh ve Vanapalli, 2010)

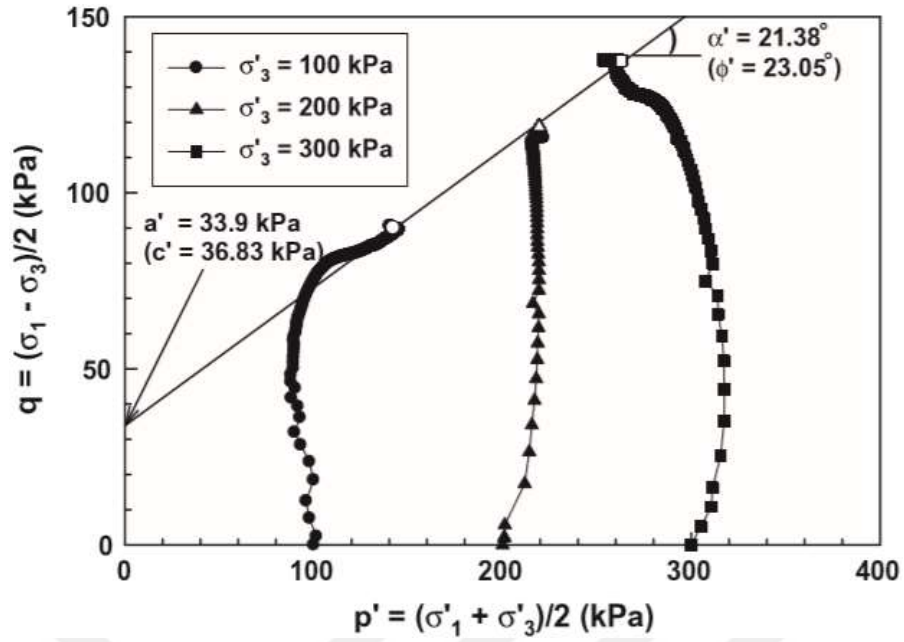
| Fiziksel Özellikler                                        | Değer |
|------------------------------------------------------------|-------|
| Likit limit, $w_l$ (%)                                     | 32.5  |
| Plastik limit, $w_p$ (%)                                   | 17.0  |
| Plastisite indeksi, $I_p$                                  | 15.5  |
| Özgül ağırlık, $G_s$                                       | 2.72  |
| Max. kuru yoğunluk, $\gamma_{k(max)}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18.0  |
| Optimum su muhtevası, OMC (%)                              | 16.3  |

Numuneye ait zemin-su karakteristik eğrisi, eksen kaydırma tekniği kullanılarak Ottawa Üniversitesi'nde geliştirilen, özel olarak tasarlanmış Tempe hücre aleti kullanılarak Şekil 1.18'teki gibi belirlenmiştir.



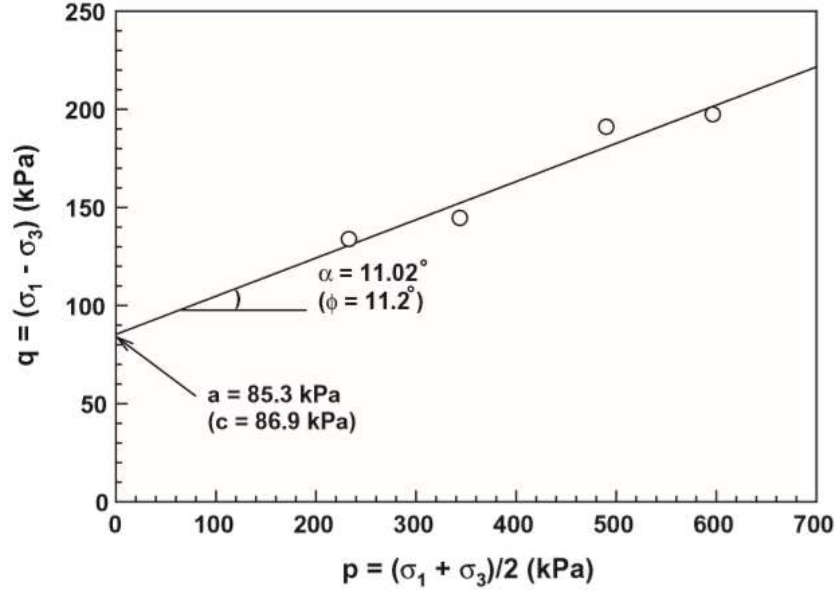
**Şekil 1.18** Indian Head birikintisine ait zemin-su karakteristik eğrisi (Oh ve Vanapalli, 2010)

750 kPa'lık gerilme altında, 5 tabakada kompakte edilerek hazırlanan zeminden 50 mm çapında ve 100 mm yükseklikte alınan zemin numunelerinde, kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için farklı tiplerde üç eksenli kesme deneyleri yapılmıştır. İlk olarak doymun zemin için boşluk suyu basıncı ölçülerek konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneyler yapılmıştır. Numunelere ters basınç uygulanmış ve üç farklı efektif yanal basınç altında kesilmiştir. Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra kesme aşaması boyunca boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Deneyler sonucunda efektif kohezyon ( $c'$ ) ve efektif kayma mukavemeti açısı ( $\phi'$ ) sırasıyla 36.8 kPa ve  $23.1^\circ$  olarak belirlenmiştir. CU deneylerinin sonucunda elde edilen  $p'$ - $q$  ilişkisi Şekil 1.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 1.19** CU deneyleri için  $p'$  ve  $q$  arasındaki ilişki (Oh ve Vanapalli, 2010)

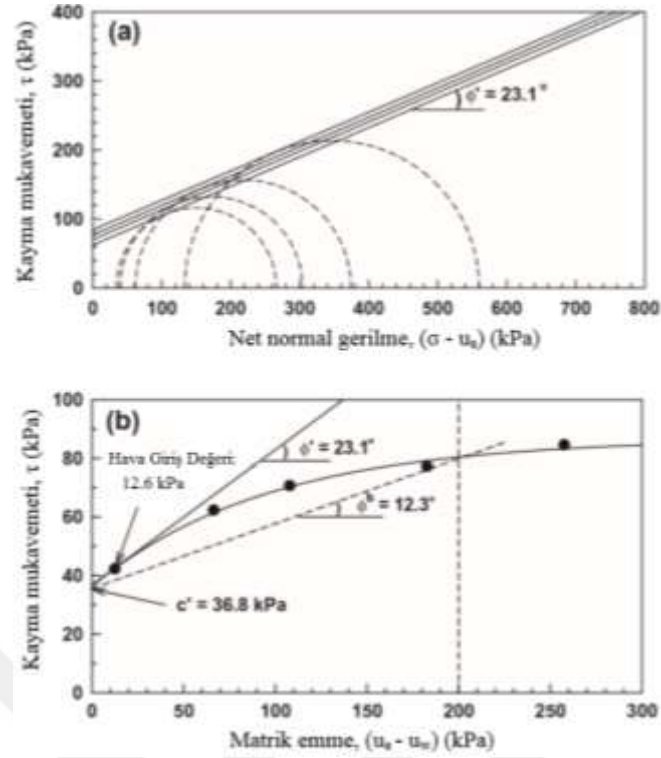
Doygun olmayan zeminler için izotropik drenajsız (IU) deneyler yapılmıştır. Kompakte edilmiş numuneler başlangıç matrik emme değeriyle birlikte izotropik yanal basınç uygulandıktan sonra geleneksel üç eksenli alet kullanılarak doymun olmayan yükleme koşulları altında hızlı olarak kesilmiştir. Uygulanan izotropik gerilme değerleri ( $\sigma_3$ ) 100, 200, 300 ve 400 kPa olarak belirtilmiş ve IU deney sonuçları için  $p'$ - $q$  ilişkisi Şekil 1.20'de verilmiştir. Deneyler sonucunda toplam kohezyon ( $c$ ) ve toplam kayma mukavemeti açısı ( $\phi$ ) değerleri sırasıyla 86.9 kPa ve  $11.2^\circ$  olarak belirlenmiştir.



**Şekil 1.20** IU deneyleri için  $p$  ve  $q$  arasındaki ilişki (Oh ve Vanapalli, 2010)

Son olarak, doymun olmayan zeminde matrik emme değerine göre içsel sürtünme açısını ( $\phi^b$ ) belirlemek için bir dizi modifiye üç eksenli (MTT) deneyler gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi uygulanmadan önce, kompakte edilmiş zemin numunelerinin MTT aletinin seramik diski vasıtasıyla su emmelerine izin verilmiş ve deneyler sızma koşullarının benzetimi için ıslanma izini takip ederek uygulanmıştır. Numuneler uygulanan yanal basınç altında hem matrik emme ( $u_a - u_w$ ) hem de hacim değişimine göre denge koşullarına ulaştıktan sonra, drenajsız yükleme koşulları altında kesilmiştir. Deney sonucunda matrik emmeye bağlı kayma mukavemeti açısı ( $\phi^b$ ) 200 kPa'lık matrik emme değerinde  $12.3^\circ$  olarak bulunduğu ve bu değer, su muhtevasının % 13.2 olduğu başlangıç matrik emme değerine karşılık geldiği görülmüştür. Numunenin matrik emme değeri eksen kaydırma tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Kayma mukavemeti ile net normal gerilme arasındaki ilişki ve matrik emmeye göre kayma mukavemetinin değişimi Şekil 1.21a ve 1.21b'de sırasıyla gösterilmiştir.

Dolgu stabilite analizleri dört farklı senaryo göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu dört farklı senaryonun detayları ve analizlerde kullanılacak kayma mukavemeti parametreleri Tablo 1.18'de özetlenmiştir.

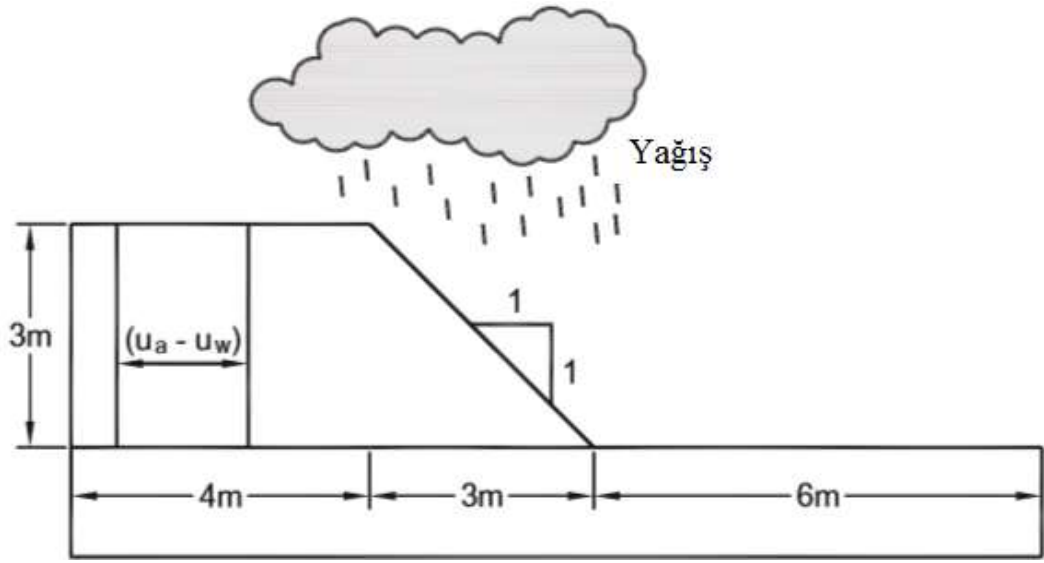


**Şekil 1.21** (a) Net normal gerilme ve kayma mukavemeti arasındaki ilişki ve (b) Matrik emmeye göre kayma mukavemetinin değişimi (Oh ve Vanapalli, 2010)

**Tablo 1.18** Analizlerin özeti (Oh ve Vanapalli, 2010)

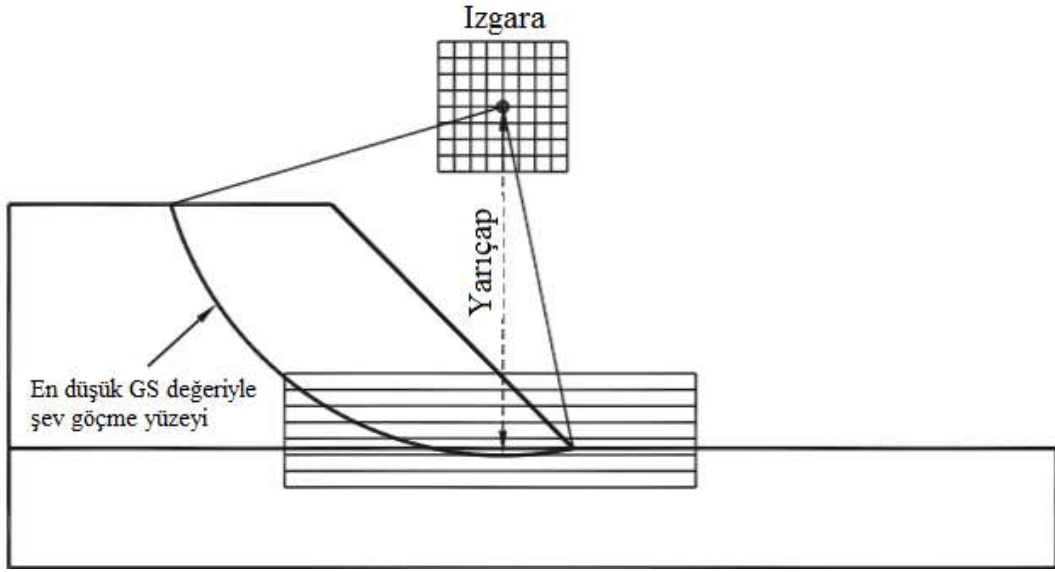
| Senaryo | Analizin Detayları                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A       | Doygun koşullar göz önünde bulundurularak dolgunun geleneksel stabilite analizi<br>Sızmanın olmadığı varsayılarak<br>Kayma mukavemeti parametreleri (deney tipi)<br>Durum 1: $c' (=36.8 \text{ kPa})$ , $\phi' (=23.1^\circ)$ (CU)<br>Durum 2: $c' (=5 \text{ kPa})$ , $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD)                                                                                                                                                               |
| B       | Doygun dolgunun stabilite analizi<br>Sızmanın $k_s$ değerine $(=10^{-7} \text{ m/sn})$ eşit olduğu varsayılarak<br>$c' (=5 \text{ kPa})$ , $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD)                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| C       | Kademe 1<br>Doygun olmayan dolgunun stabilite analizi<br>$c' (=5 \text{ kPa})$ , $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD) ve $\phi^b (=12.3^\circ)$ (MTT)<br>Sızma yok<br>Uzun dönem stabilite (200 kPa'lık üniform matrik emme)<br>Kademe 2<br>Doygun olmayan dolgunun stabilite analizi<br>$c' (=5 \text{ kPa})$ , $\phi' (=23.1^\circ)$ (CD) ve $\phi^b (=12.3^\circ)$ (MTT)<br>UCP fonksiyonuyla birlikte sızma<br>Uzun dönem stabilite (200 kPa'lık üniform matrik emme) |
| D       | Doygun olmayan dolgunun stabilite analizi<br>$c' (=86.9 \text{ kPa})$ , $\phi' (=11.2^\circ)$ (IU)<br>Sızma yok<br>Kısa dönem stabilite (200 kPa'lık üniform matrik emme)                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Şekil 1.22’de gösterilen 3m yükseklikte ve 45°’lik şev eğimine sahip sıkıştırılmış homojen dolgunun sızma ve şev stabilitesi analizleri GEOSLOPE programında sırasıyla SEEP/W ve SLOPE/W modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Başlangıç matrik emme dağılımı ve sızma SEEP/W modül kullanılarak benzetilen dolgunun içindeki boşluk suyu basıncı profili ile tetiklenmiştir. SEEP/W modülünden elde edilen boşluk suyu basıncı profillerine dayanarak SLOPE/W modülünde şev stabilitesi analizleri gerçekleştirilmiştir.

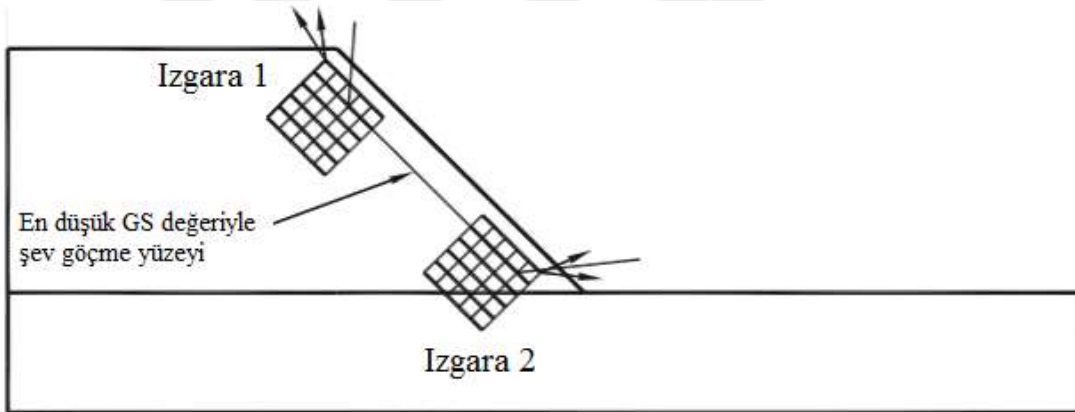


**Şekil 1.22** Çalışmada kullanılan dolgunun enkesiti (Oh ve Vanapalli, 2010)

En düşük güvenlik faktörüne sahip kritik yüzeyin pozisyonunu hesaplamak için ‘blok’ metodu ve ‘ızgara ve yarıçap’ metodu olarak iki yöntemden yararlanılmıştır. Şekil 1.23’te gösterilen ızgara ve yarıçap metodunun kritik dairesel kayma yüzeyini bulmak için kullanıldığı, en düşük güvenlik sayısı değerinin hesaplanması için her ızgara noktasının, kaymaların denemesi için dairenin merkezi olarak göz önünde bulundurulduğu belirtilmiştir. Şekil 1.24’da gösterilen blok metodunun ise eğime paralel olabilecek kritik kayma yüzeylerinin bulunması için kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Her iki yöntemde de güvenlik sayılarını hesaplamak için Bishop yaklaşımı kullanılmış ve analiz sonuçlarından elde edilen güvenlik sayıları Tablo 1.19’da gösterilmiştir.



**Şekil 1.23** Izgara ve yarıçap metodunda kayma yüzeyleri denemesinin gösterimi (Oh ve Vanapalli, 2010)



**Şekil 1.24** Blok metodunda kayma yüzeyleri denemesinin gösterimi (Oh ve Vanapalli, 2010)

**Tablo 1.19** Farklı senaryolar için güvenlik sayılarının değişimi (Oh ve Vanapalli, 2010)

| Senaryo             | Durum veya Kademe                                                                                                | GS    |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| A (doygun)          | Durum 1<br>$c' = 36.8 \text{ kPa}$ , $\phi' = 23.1^\circ$                                                        | 5.35  |
|                     | Durum 2<br>$c' = 5 \text{ kPa}$ , $\phi' = 23.1^\circ$                                                           | 1.35  |
| B (doygun+göllenme) | Sızma $k_s$ değerine ( $=10^{-7} \text{ m/sn}$ ) eşit<br>$c' = 5 \text{ kPa}$ , $\phi' = 23.1^\circ$             | 1.32  |
| C (doygun olmayan)  | Kademe 1<br>$c' = 5 \text{ kPa}$ , $\phi' = 23.1^\circ$ , $\phi^b = 12.3^\circ$<br>Sızmasız uzun dönem stabilite | 10.26 |
|                     | Kademe 2<br>$c' = 5 \text{ kPa}$ , $\phi' = 23.1^\circ$ , $\phi^b = 12.3^\circ$<br>Sızmalı uzun dönem stabilite  | 1.27  |
| D (doygun olmayan)  | $c = 86.9 \text{ kPa}$ , $\phi (=11.2^\circ)$<br>Kısa dönem stabilite                                            | 10.35 |

Analizler sonucunda, CU deney sonuçlarında yüksek efektif kohezyon değeri elde edilmiş olmasından dolayı daha yüksek bir GS değerine ulaşıldığı görülmüştür. Deneylerden yüksek kohezyon değerlerinin elde edilmesi, sıkıştırılmış zeminlerin davranışının aşırı konsolide bir zemine benzemesinden kaynaklı olabileceği belirtilmiştir. Efektif kohezyonun güvenilir bir şekilde elde edilmesi için CU ve CD deneylerinde, nispeten daha yavaş kesme deformasyon hızının kullanılmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Senaryo B'den elde edilen sonuçlardan, sıkıştırılmış dolgunun stabilitesinin göllenme derinliğine bağlı olduğu ve Senaryo B için yapılan analizlerde, dolgunun inşa edildiği bölgenin maksimum yağış bilgilerinin çevresel verileri kullanılarak yapılması gerektiği belirlenmiştir. Senaryo C - Kademe 1 ve Senaryo D'nin sızmanın olmadığı durum için stabilite analizleri sonucunda, göçme yüzeylerinin şekilleri arasında çok az bir fark olmasına rağmen elde edilen güvenlik sayılarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Bu durumun IU deney sonuçlarına matrik emmenin etkisinin dahil edilmesinden kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Son olarak Senaryo C - Kademe 2'de, yağışın sonsuz şev tipi göçmesinden önce sızmadan dolayı su cephesinin üzerinde yüzeysel dairesel göçmeye neden olabileceği görülmüştür. Bu göçme durumunda, su cephesi

derinliğinin yaklaşık 100 mm olduğu ve bu durumda gerçekleştirilen stabilite analizlerinde güvenlik sayısının 0.96 olduğu tahmin edilmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Doygun olmayan zeminlerin davranışının doygun zemin mekaniği çerçevesinde değerlendirilemeyeceği bilinmektedir. Doygun olmayan zemin özellikleri taşıyan bir dolgu şevinin stabilitesi incelenirken bu zeminlerin davranışına etki eden faktörler ayrı ayrı incelenmelidir. Bu tez çalışması kapsamında, yüksek plastisiteli kil bir zemin ile inşa edilmiş doygun olmayan yüksek bir şev kesitinde, yağışlar ile sızmasının şev stabilitesine etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Doygun olmayan zeminlerde, zeminin permeabilitesine ve zemin-su karakteristik eğrisine bağlı olarak yağış yoğunluğu ve şev içerisine sızma etkilerinin zamanla şev stabilitesinde meydana getireceği değişimler araştırılmıştır. Bu kapsamda yağışın şev içerisindeki sızması ile birlikte boşluk suyu basınçları değişimi SEEP/W modülü ile belirlenip şev stabilite analizlerini gerçekleştirmek için SLOPE/W modülü kullanılmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Suya doygun olmayan kil zemin kullanılarak inşa edilen yüksek bir dolgu şevinin inşasında, yağışların şev içine sızarak zaman içerisinde şevin stabilitesini azaltacağı düşünülmektedir. Tasarım aşamasında, şev stabilitesindeki bu azalmayı etkileyen faktörler ve miktarının belirlenmesi gereklidir. Yüksek plastisiteli kil bir zemin ile 50m yüksekliğinde inşa edilecek bir dolguda, yağışın şev içine sızmasına yağış yoğunluğu, dolgu zeminin permeabilitesi, zemin-su karakteristik eğrisi, dolgu malzemesi kayma mukavemeti açısı ve yeraltı su seviyesi değişiminin etkileri sayısal analizlerden yararlanılarak araştırılmıştır.

## DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ

Geoteknik mühendisliği uygulama ve eğitiminde, doygun olmayan zemin mekaniğinin ortaya çıkması için Terzaghi'nin temel tanımının geliştirilmesi gerekmektedir. Terzaghi'nin klasik tanımının geliştirilmesiyle birlikte doygun olmayan zemin mekaniği, mekanik, hidrolik ve arayüzey ile ilişkili fizik kurallarının kısmen doygun zeminler ile ilişkili olarak uygulanması olarak tanımlanabilir (Lu ve Likos, 2004).

Zemin mekaniğinin genel çalışma alanı Şekil 2.1'de gösterildiği gibi doygun ve doygun olmayan zeminler olarak iki alana ayrılmaktadır. Doygun ve doygun olmayan zeminler arasındaki farklılık, bu zeminlerin doğal ve mühendislik davranışları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Doygun olmayan bir zemin ikiden fazla faza ve boşluk hava basıncı ile ilişkili olarak negatif boşluk suyu basıncına sahiptir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

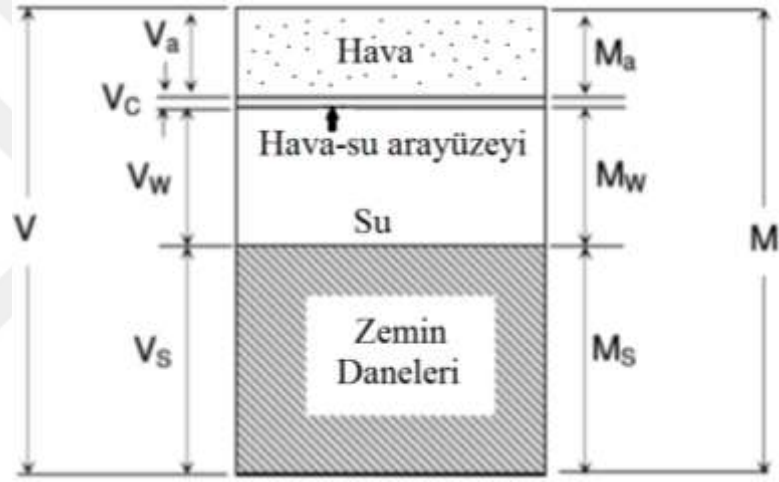
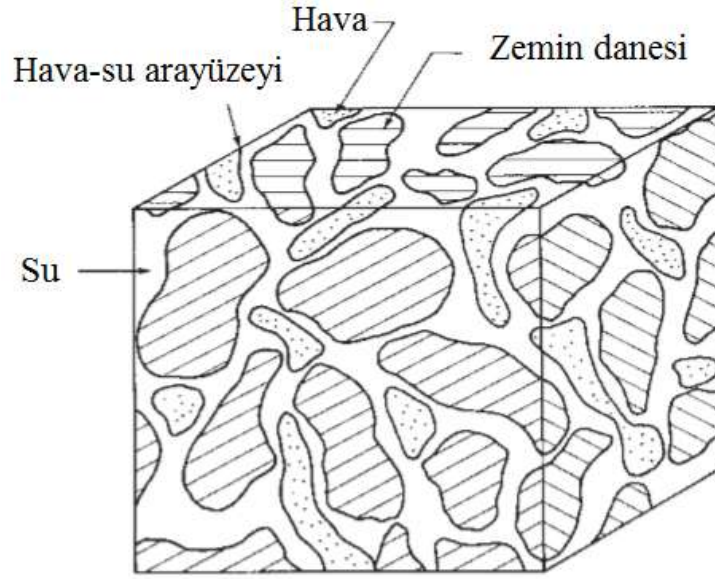


Şekil 2.1 Zemin mekaniğinin sınıflandırılması (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

Klasik zemin mekaniğinde zemin ortamının doymuş olması temel varsayımlarından biridir. Zemin boşluklarının % 98'inden fazlasının su ile dolu olması durumunda zeminin doymuş olduğu belirtilmektedir. Zemin içerisinde %2 veya daha az hacimde kalan hava birbirinden ayrık konumdadır. Zemindeki boşluklarda hacimsel olarak %95'ten daha az su bulunması halinde, zemin içerisinde bulunan hava kabarcıkları arasında oluşan bağlantı ile hava süreklilik oluşturmaktadır. Böylece zeminin doymuşluğunu kaybetmekte ve doymuş olmayan ortam özelliğini kazanmaktadır. Uygulamada doymuş olmayan zemin ortamları, yeraltı su seviyesi üstünde kalan ancak tam kuru olmayan bölümler ve mühendis tarafından sıkıştırma yolu ile imal edilmiş kitleler olarak iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Bundan dolayı doymuş olmayan zeminlerin tanımlaması yeniden yapılacak olursa, boşluklardaki hava basıncı esas alındığında doymuş olmayan zemin teriminden, negatif boşluk suyu basıncı ( $-u_w$ ) taşıyan ortam anlaşılmalıdır (Önalp ve Arel, 2013).

## **2.1 Doymuş Olmayan Zeminlerin Özellikleri**

Zemini oluşturan faz durumlarının belirlenmesi, zeminin gerilme durumunun belirlenmesinde etkili olmasından dolayı önem arz etmektedir. Bu nedenle, doymuş olmayan zeminlerin her fazının özelliklerini anlamak önemlidir. Doymuş olmayan zeminler genellikle dane, hava ve su olarak üç fazda tanımlanmaktadır. Ancak bu zeminlerde, bu üç faza ek olarak hava-su arayüzeyi yada su zarı (contractile skin) olarak tanımlanan dördüncü bir fazın da var olduğu bilinmektedir (Fredlund ve ark., 2012). Şekil 2.2'de doymuş olmayan zeminlerde mevcut dört farklı faz durumu gösterilmiştir.

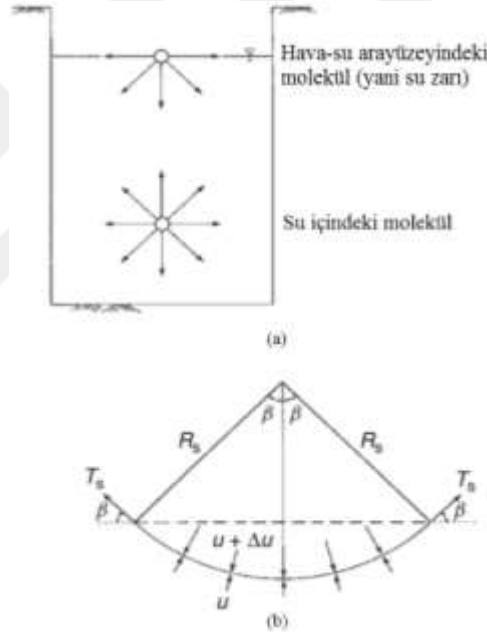


**Şekil 2.2** Doygun olmayan bir zemin elemanında zeminin fazları (Fredlund ve Rahardjo, 1993)

Su zarının kalınlığı sadece birkaç moleküler katman halinde olduğu için doymun olmayan zeminde hacim-kütle ilişkisinde su zarını fiziksel olarak ayrılması gerekli değildir. Su zarı, su fazının bir parçası olarak göz önünde bulundurulmakla birlikte, doymun olmayan zeminlerin gerilme durumu ve fenomenolojik davranışı göz önüne alındığında ayrı bir faz olarak değerlendirilmektedir (Fredlund vd., 2012).

### 2.1.1 Yüzey Gerilimi

Hava-su arayüzeyi, yüzey gerilimi olarak adlandırılan bir özelliğe sahiptir. Bu yüzey gerilimi, hava-su arayüzeyindeki moleküllere etki eden moleküller arası kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3'te hava su arayüzeyindeki yüzey gerilimi, Şekil 2.3a'da hava su arayüzeyine etkiyen moleküller arası kuvvetler ve Şekil 2.3b'de iki boyutlu yüzey eğrisine ilişkin yüzey gerilme kuvvetleri gösterilmiştir. Şekil 2.3a'da hava-su arayüzeyindeki ve suyun içindeki moleküle etkiyen kuvvetlerin farklı olduğu gösterilmiştir. Su içerisindeki molekül her yönden eşit kuvvetle karşılaştığından dolayı dengede olduğu söylenebilir. Ancak, hava-su arayüzeyindeki bir molekülün su içerisine doğru dengesiz bir kuvvetle karşılaşır (Fredlund vd., 2102).



**Şekil 2.3** Hava su arayüzeyindeki yüzey gerilimi (a) Hava su arayüzeyine etkiyen moleküller arası kuvvetler (b) İki boyutlu yüzey eğrisine ilişkin yüzey gerilme kuvvetleri (Fredlund vd., 2012)

Bu durum da hava-su arayüzeyinin dengeye ulaşabilmesi için bu yüzey boyunca bir çekme gerilmesi meydana gelir. Hava-su arayüzeyinin çekme gerilmesi uygulamasına izin veren bu özelliği, hava-su arayüzeyinin her birim uzunluğundaki çekme kuvveti olarak belirlenen yüzey gerilimi,  $T_s$  olarak tanımlanır ve birimi  $mN/m$ 'dir. Yüzey gerilimi, hava-su arayüzeyine teğet olmakla birlikte büyüklüğü

sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Tablo 2.1’de sıcaklık ile değişen yüzey gerilimi değerleri gösterilmiştir (Fredlund vd., 2012).

**Tablo 2.1** Çeşitli sıcaklık değerlerinde hava-su arayüzeyindeki yüzey gerilimi (Fredlund vd., 2012)

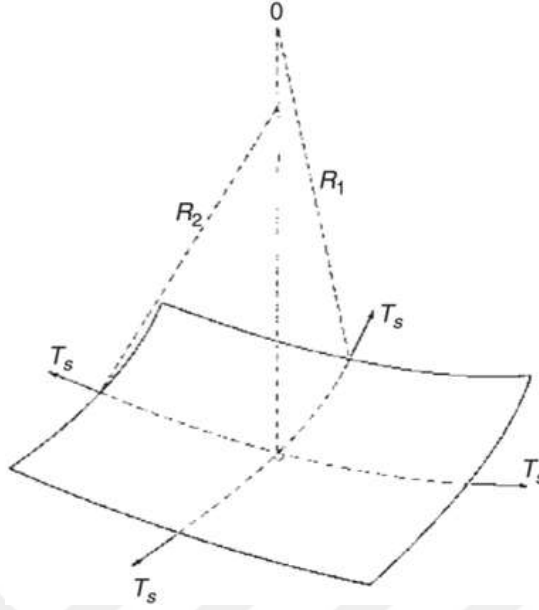
| Sıcaklık (°C) | Yüzey Gerilimi, $T_s$ (mN/m) |
|---------------|------------------------------|
| 0             | 75.7                         |
| 10            | 74.2                         |
| 20            | 72.75                        |
| 30            | 71.2                         |
| 40            | 69.6                         |
| 60            | 66.2                         |
| 80            | 62.6                         |
| 100           | 58.8                         |

Yüzey gerilimi, hava-su arayüzeyinin elastik bir membran gibi davranmasına neden olmaktadır. Hava-su arayüzeyinin bu davranışı, iç basıncı dış basıncından daha yüksek olan şişirilmiş bir balonunun davranışıyla benzerdir. Esnek iki boyutlu bir membran her bir taraftan farklı basınca maruz kaldığında, daha büyük basınca doğru içbükey bir kavis meydana gelir. Bu nedenle, membranın dengede kalabilmesi için bir gerilme meydana gelir. Bu durum Şekil 2.3b’de gösterildiği gibi kavisli yüzey boyunca farklı basınçlar, yüzey gerilimi ve membranın eğrilik yarıçapı ile ilişkili olabilir. Burada,  $u$  ve  $\Delta u + u$  ifadeleri membrana etkiyen basınçlar,  $R_s$  eğrilik yarıçapı ve  $T_s$  yüzey gerilimidir. Membran boyunca yatay kuvvetle birbirleri ile dengede olmakla birlikte düşey doğrultuda kuvvet dengesi (2.1)’deki gibidir (Fredlund vd., 2012).

$$2T_s \sin \beta = 2\Delta u R_s \sin \beta \quad (2.1)$$

Burada,  $\beta$  yüzey geriliminin yatayla yaptığı açığı,  $2R_s \sin \beta$  ifadesi ise membranın yatay düzlem üzerinde izdüşümünün uzunluğunu ifade etmektedir. (2.1) eşitliği düzenlenirse (2.2) eşitliği elde edilir.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.2)$$



**Şekil 2.4** Üç boyutlu eğri membranda yüzey gerilmeleri (Fredlund vd., 2012)

Şekil 2.4'te verilen üç boyutlu eğri bir membran için (2.2) eşitliği, Laplace denklemi kullanılarak (2.3)'teki gibi genişletilebilir.

$$\Delta u = T_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

Burada,  $R_1$  ve  $R_2$  eğri bir membranın ortogonal iki asal düzlemde eğrilik yarıçaplarını ifade etmektedir. Tüm doğrultularda eğrilik yarıçapının aynı olması durumunda  $R_1$  ve  $R_2$  değerleri  $R_s$  değerine eşit olur ve (2.4) eşitliği elde edilir.

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.4)$$

Doygun olmayan bir zeminde hava-su arayüzeyi su basıncından daha büyük olan hava basıncına maruz kalır. Bu basınçlar arasındaki fark ise matrik emme ya da kapiler basınç olarak adlandırılır. Hava-su arayüzeyinde eğrilik meydana getiren bu basınç farkı (2.5)'te gösterilmiştir.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

Burada,  $u_a$  ve  $u_w$  sırasıyla hava basıncı ve su basıncını,  $(u_a - u_w)$  ise matrik emme değerini ifade etmektedir.

(2.5) eşitliği aynı zamanda Kelvin'in kapiler model denklemi olarak da bilinmektedir. Zeminin matrik emme değeri arttıkça menisküs olarak da adlandırılan hava-su arayüzeyinin eğriliğinin yarıçapı azalmaktadır (Fredlund vd., 2012).

### 2.1.2 Hacimsel Su Muhtevası

Geoteknik mühendisliğinde genellikle (2.6)'da gösterildiği şekilde gravimetrik su muhtevası kullanılmaktadır. Ağırlıksal su muhtevası  $w$  (%), suyun ağırlığının  $M_w$ , zemin danelerinin ağırlığına  $M_s$  olarak ifade edilmektedir.

$$w = \frac{M_w(100)}{M_s} \quad (2.6)$$

Doygun olmayan zeminler ile ilgili olarak gravimetrik su muhtevasına ya da hacimsel su muhtevasına atıf yapıldığını bilmek önemlidir. Zemin-su karakteristik eğri verileri genellikle hem hacimsel hem de gravimetrik su muhtevası kullanılarak çizilmektedir. Özellikle sıvıların akışı ile ilgili olan geoteknik mühendisliği formülasyonlarında, doymun olmayan zeminlerin özelliklerini hesaplarken ya da daha fazla süreç analizi yaparken hacimsel su muhtevası ifadesi kullanılmaktadır. Bu nedenle de hacimsel su muhtevası ve diğer hacim-kütle özellikleri arasında çeşitli ilişkiler kurulduğu görülmektedir (Fredlund vd., 2012).

Hacimsel su muhtevası  $\theta$ , zemindeki su hacminin  $V_w$ , zeminin toplam hacmine  $V$ , oranı olarak (2.7)'deki gibi belirlenmektedir.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.7)$$

Hacimsel su muhtevası, porozite ( $n$ ), doymunluk derecesi ( $S$ ) ve boşluk oranı ( $e$ ) cinsinden ifade edilebilmektedir. Bu durumda hacimsel su muhtevası (2.8)'deki gibi yazılabilir.

$$\theta = \frac{SV_n}{V} \quad (2.8)$$

(2.8)'de  $V_n/V$  değeri poroziteyi ifade ettiğinden (2.9)'daki gibi yazılabilir.

$$\theta = Sn \quad (2.9)$$

(2.9)'da porozite boşluk oranı cinsinden yazılırsa (2.10) elde edilir.

$$\theta = \frac{Se}{1+e} \quad (2.10)$$

Hacim-kütle ilişkisine dayanarak hacimsel su muhtevası ve gravimetrik su muhtevası arasındaki ilişki (2.11)'deki gibi yazılabilir. Burada  $G_s$  zeminin özgül ağırlığını ifade etmektedir.

$$\theta = \frac{wG_s}{1+e} \quad (2.11)$$

Hacim-kütle ilişkisi ile (2.11) eşitliğinden (2.12) elde edilebilir.

$$\theta = \frac{SwG_s}{S+wG_s} \quad (2.12)$$

Hacimsel su muhtevası ve gravimetrik su muhtevası arasındaki ilişki bir başka ifadeyle (2.13)'teki gibi yazılabilir (Vanapalli vd., 1996).

$$\theta = w\rho_k \quad (2.13)$$

Burada,  $\rho_k$  zeminin kuru yoğunluğunu ifade etmektedir.

### 2.1.3 Zemin Emme Gerilmesi ve Ölçülmesi

Doygun olmayan zeminlerde mekanik davranış üzerinde etkili olan zemin emmesi ile ilgili teorik çalışmalara 1900'lü yılların başında başlanmıştır. Matrik emme, ozmotik emme ya da toplam emme ile ilgili olarak kullanılabilen genel bir terim olan zemin emmesi doygun olmayan zeminlerde en büyük durum değişkenidir.

Zemin emme gerilmesi, genel olarak zemin suyunun bağımsız enerjisi olarak ifade edilir. Richards tarafından 1965 yılında bu enerjinin zemindeki kısmı buhar basıncına göre ölçülebileceğini belirlemiştir. Zemin emmesi ve boşluk suyunun kısmi buhar basıncı arasındaki termodinamik ilişki (2.14)'teki gibi yazılabilir (Fredlund vd., 2012).

$$\psi = -\frac{RT_K}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.14)$$

Bu eşitlikte,

$\psi$  = Zemin emme gerilmesi veya toplam emme (kPa)

$R$  = Genel gaz sabiti (8.31432 J/(mol K))

$T_K$  = Mutlak sıcaklık ( $T_K=273.15+T$  (K))

$T$  = Sıcaklık (°C)

$v_{w0} = 1/\text{Suyun özgül hacmi (m}^3/\text{kg)}$

$\rho_w$  = Suyun özgül hacmi ( $T=20$  °C 'de  $\rho_w=998$  kg/m<sup>3</sup>)

$\omega_v$  = Su buharının moleküler kütlesi (18.016 kg/ kmol)

$\bar{u}_v$  = Boşluklardaki suyun kısmi buhar basıncı (kPa)

$\bar{u}_{v0}$  = Aynı sıcaklıkta değerinde saf su yüzeyindeki doymuş su buharının basıncı (kPa)

(2.14)'teki ( $\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}$ ) ifadesi bağıl nemi ifade etmektedir. Referans sıcaklık 20 °C olarak seçildiğinde (2.15)'teki 135,022 kPa değerini vermektedir.

$$\psi = -135,022 \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right) \quad (2.15)$$

Doygun olmayan zeminlerde, zemin emmesinin zemin suyunun serbest enerjisi ile ilgili olduğu bilinmektedir. Matrik ve ozmotik emme bu serbest enerjinin bileşenlerini oluşturmaktadır. Toplam emme, iki temel bileşen olan matrik ve ozmotik emme bileşenlerinin toplanması ile (2.16)'daki gibi ifade edilmektedir (Fredlund vd., 2012).

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.16)$$

Burada,

$u_a - u_w$  = Matrik emme (kPa)

$u_a$  = Boşluk hava basıncı (kPa)

$u_w$  = Boşluk suyu basıncı (kPa)

$\pi$  = Ozmotik emme (kPa)

Matrik emmenin çevresel değişikliklere maruz kalmasıyla zamanla değişiklik gösterdiği, buna bağlı olarak da emmedeki herhangi bir değişimin zemin kütlesinin bütün dengesini etkilediği bilinmektedir (Fredlund vd., 2012).

Ozmotik emme zeminin boşluk suyunda bulunan tuz içeriği ile ilgilidir. Ozmotik emme kavramı, doymuş zeminlerden ziyade doymuş olmayan zeminlerle ilişkilendirilmektedir (Fredlund vd., 2012). Ozmotik emme zeminin boşluk suyundaki eriyik tuzların arı suyla olan ozmotik basınç farkını ifade ettiğinden zeminin doymuşluk derecesi azaldıkça ozmotik emmenin etkisi artmaktadır. Boşluk suyunda eriyik halde bulunan tuzlar doymuş zeminlerde etkili olmazken zeminin doymuşluk derecesi düştükçe efektif gerilme değerini etkilemektedir (Önalp ve Arel, 2013).

Bir zeminde ozmotik emmedeki değişimin zeminin mekanik özelliklerini değiştirebildiği bilinmektedir. Zemindeki tuz içeriğinin değişmesi zeminin toplam hacim ve kayma mukavemetinde değişimlere neden olabilir (Fredlund vd., 2012).

Doymuş olmayan zeminlerde efektif gerilme değerlerinin elde edilebilmesi için zemine ait boşluk hava ve boşluk suyu basınçlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu basınçların bulunabilmesi için en basit yolun doğrudan ölçüm olduğu belirtilmiştir. Zeminlerdeki üç farklı emme türü laboratuvar ve arazide farklı yöntemlerle ölçülmektedir (Önalp ve Arel, 2013). Bu ölçüm yöntemleri Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.2** Emme ölçümü için yöntemler (Önalp ve Arel, 2013)

| ÖLÇÜM SİSTEMİ                    | EMME | ÖLÇÜLEN DEĞİŞKEN           | ARALIK (kPa) | DENGE SÜRESİ | ÖLÇÜM YERİ | KAYNAK                   |
|----------------------------------|------|----------------------------|--------------|--------------|------------|--------------------------|
| Transistörlü psikrometre         | T    | Bağıl nem                  | 100-70000    | Dakika       | Lab/Arazi? | Truong&Holden, 1995      |
| Termokupl psikrometre            | T    | Bağıl nem                  | 100-8000     | Dakika       | Lab/Arazi? | Brown&Collins, 1980      |
| Çiğlenme noktası psikrometresi   | T    | Bağıl nem                  | 30000-300000 | Dakika       | Lab        | ASTM                     |
| Süzgeç kağıdı (temas yok)        | T    | Su içeriği                 | 400-30000    | 7-14 gün     | Lab/Arazi  | Al-Khafaf&Hanks, 1974    |
| Süzgeç kağıdı                    | K    | Su içeriği                 | 30-30000     | 7 gün        | Lab/Arazi  | Gardner, 1930            |
| Emme plakası                     | K    | Boşluk suyu gerilmesi      | 0-90         | Saat         | Lab        | Dineen, 2000b            |
| Basınç plakası/membranı          | K    | Boşluk suyu gerilme etkisi | 0-10000      | Saat         | Lab        | Hilf, 1951               |
| Tansiyometre                     | K    | Boşluk suyu gerilmesi      | 0-90         | Dakika       | Lab/Arazi  | Soil Moisture Equipment  |
| TDR Sonda                        | K    | Su içeriği                 | 0-1500       | Saat         | Lab/Arazi  | Cook&Fredlund, 1998      |
| Eriyik tansiyometresi            | K/T  | Boşluk suyu gerilme etkisi | 0-1500       | Saat         | Lab/Arazi  | Bocking&Fredlund, 1979   |
| İC tansiyometresi (emme sondası) | K/T  | Boşluk suyu gerilmesi      | 0-1500       | Dakika       | Lab/Arazi? | Ridley&Burland, 1993     |
| Alçı blok                        | K    | Elektriksel direnç         | 30-30000     | Hafta        | Lab/Arazi  | Aitchison&Richards, 1965 |
| Isıl iletkenlik                  | K    | İletkenlik                 | 0-300        | Hafta        | Lab/Arazi  | Sattler&Fredlund, 1989   |
| Sızma                            | E    | İletkenlik                 | 30-3000      | Saat         | Lab        | Manheim, 1966            |
| Süzme                            | E    | İletkenlik                 | 30-3001      | Saat         | Lab        | Manheim, 1967            |

K: kılcal (matrik) T: toplam E: eriyik (ozmotik)

#### 2.1.4 Gerilme Durum Değişkenleri

Efektif gerilme kavramı doymuş bir zeminin fiziksel davranışının tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Efektif gerilme değişkeni zemin özelliklerinden bağımsız olmakla birlikte zeminin hacim değişimi, deformasyon, kayma mukavemeti, sızma ve diğer fiziksel süreçlerini anlayabilmeyi sağlayan birleştirici bir değişken haline gelmiştir. Terzaghi 1936'da, doymuş zeminler için efektif gerilme değişkenini (2.17)'de gösterildiği gibi tanımlamıştır (Fredlund, 2016).

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (2.17)$$

Burada  $\sigma$  zeminin toplam gerilmesini,  $\sigma'$  zeminin efektif gerilmesini ve  $u_w$  ise boşluk suyu basıncını ifade etmektedir.

Efektif gerilme kavramı, doymuş bir zeminin bütün mekanik davranışlarını üç kartezyen yönünün her birinde efektif gerilmelere ve kayma gerilmelerine bağlı olduğunu belirtir. Zeminde hacim ve kayma mukavemeti değişimleri efektif gerilmeler tarafından kontrol edilmektedir. Efektif gerilme değişimiyle doymuş bir zeminde denge durumları değiştireceğinden efektif gerilme değişkenleri gerilme durumu değişkenleri olarak değerlendirilir (Fredlund vd., 2012). Doymuş zeminlerde değişkenler sadece efektif gerilmeye bağlı iken, doymuş olmayan zeminlerde su basıncının yanında hava basıncı, matrik emme ve ozmotik emme değerlerinin etkisinin de gözönüne alınması gerekmektedir (Önalp ve Arel, 2013).

Doymuş olmayan zeminler için efektif gerilme denklemleri ile ilgili çalışmalar 1950'li yılların sonunda başlamıştır. Doymuş olmayan zeminlerle ilgili önerilen bütün efektif gerilme denklemleri arasında en bilineni Bishop'un efektif gerilme denklemidir (Fredlund, 2016). (2.18)'de Bishop'un doymuş olmayan zeminler için efektif gerilme denklemi verilmiştir.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.18)$$

Burada,  $\sigma'$  efektif gerilmeyi,  $\sigma$  toplam gerilmeyi,  $u_a$  boşluk hava basıncını,  $u_w$  boşluk suyu basıncını ve  $\chi$  ise zeminin doymuşluk derecesine bağlı bir parametredir.

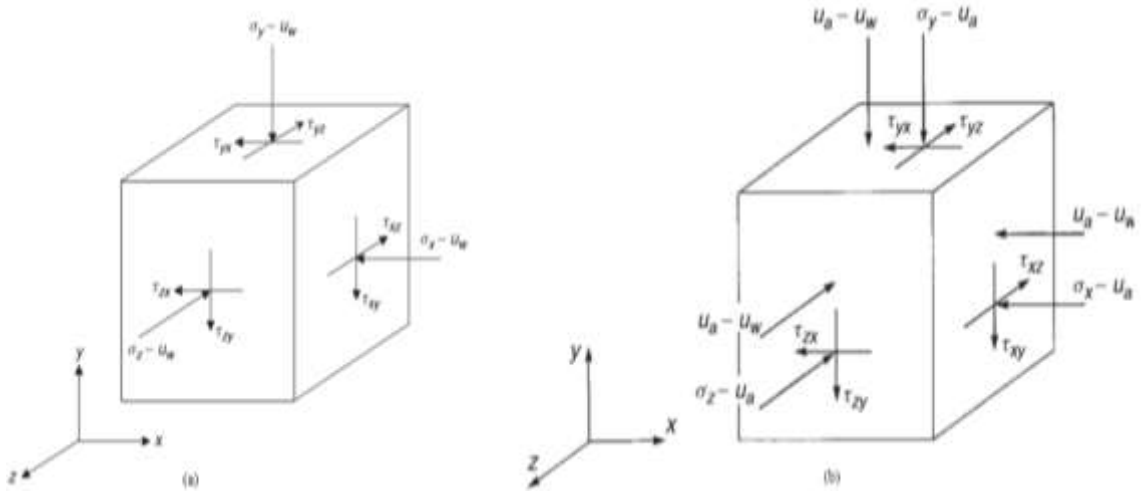
Doygun zeminlerde, boşluk hava basıncı 0 olmakla birlikte boşluk suyu basıncı pozitifdir ve  $\chi$  parametresi 1 değerini almaktadır. Bu durumda zeminin efektif gerilmesi, toplam gerilme ve boşluk suyu basıncı arasındaki farka eşit olmaktadır. Tamamen kuru zeminlerde ise  $\chi$  parametresi 0 değerini almakta ve zeminin efektif gerilmesi toplam gerilme ile boşluk hava basıncı arasındaki farka eşit olmaktadır (Lu ve Griffiths, 2004).

1970'lerde doymun olmayan bir zemin elemanı üzerinde, çok fazlı sürekli ortam mekaniği çerçevesinde teorik bir denge analizi formüle edilmiştir. Doymun olmayan zeminde yapılan çalışmada dört fazlı olarak düşünülmüş ve analizler sonucunda doymun olmayan bir zeminin gerilme durumunun tanımlanabilmesi için olası üç gerilme durumu değişkeninden herhangi ikisinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Burada, doymun olmayan zeminde gerilme durum değişkeninin üç olası kombinasyonu 1)  $(\sigma - u_a)$  ve  $(u_a - u_w)$  2)  $(\sigma - u_w)$  ve  $(u_a - u_w)$  3)  $(\sigma - u_a)$  ve  $(\sigma - u_w)$  olarak belirtilmiştir (Fredlund vd., 2012). (2.19)'da doymun zeminler için, (2.20) ve (2.21)'de doymun olmayan zeminler için gerilme tensörleri verilmiştir. Şekil 2.5a'da doymun ve Şekil 2.5b'de doymun olmayan zemin elemanları üzerine etkiyen gerilme tensörleri gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_w) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_w) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} (u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & (u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & (u_a - u_w) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$



**Şekil 2.5** (a) Doymun zeminlerde gerilme durum değişkenleri (b) doymun olmayan zeminlerde gerilme durum değişkenleri (Fredlund vd., 2012)

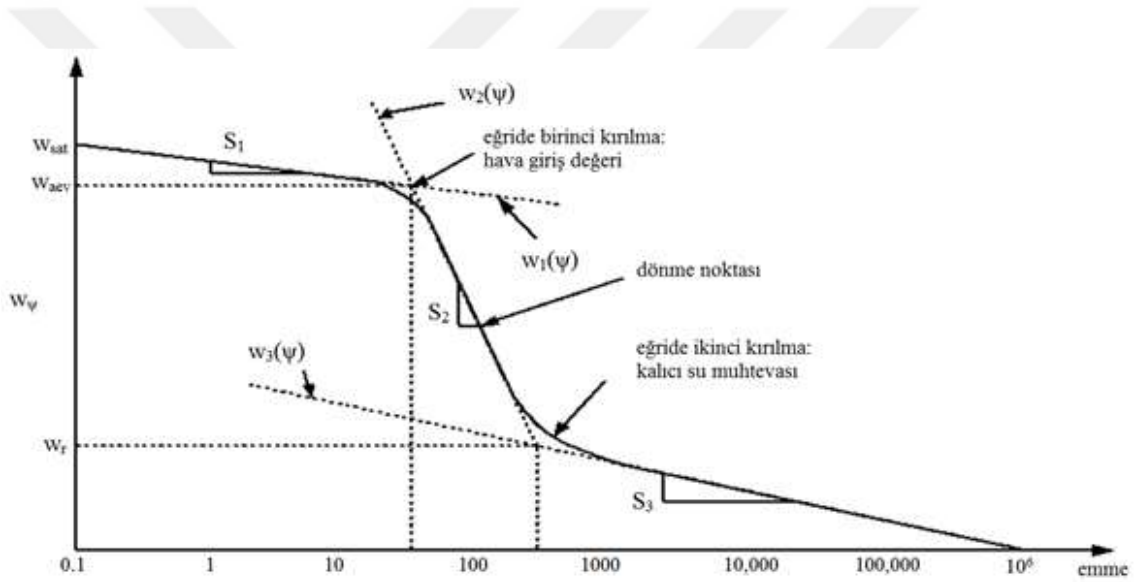
### 2.1.5 Zemin - Su Karakteristik Eğrisi

Zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) doymun olmayan zemin özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir kavramdır. Zemin-su karakteristik eğrisi genel olarak zeminin su içeriği ile emmesi arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Doymun olmayan zemin özellikleri zemin su karakteristik eğrisi ve doymun zemin özellikleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu durumda zemin-su karakteristik eğrisinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi veya ölçülmesi ve yorumlanması gerekmektedir (Fredlund vd., 2012).

Zemin-su karakteristik eğrisi ile zeminin kayma mukavemeti, geçirgenliği ve hacim değişimi gibi özellikleri belirlenebilmektedir. Zemin-su karakteristik eğrisi doymun olmayan zeminlerin mühendislik davranışının tanımlanmasını ve temel zemin özellikleriyle diğerleri arasında bir ilişki kurulmasını sağlamaktadır. Bu nedenle zemin-su karakteristik eğrisi, tek bir analizde zemin davranışının çok yönlü olarak modellenmesine olanak sağlamasından dolayı önemlidir (Fredlund, 1999).

Şekil 2.6'da tipik bir zemin-su karakteristik eğrisi verilmiştir. Şekilde zemin-su karakteristik eğrisinin yatay ekseninde matrik emme değerleri, düşey eksen de ise hacimsel su muhtevası değerleri gösterilmiştir. Burada eğrinin iki önemli özelliği; hava giriş basıncı değeri ve rezidüel (kalıcı) su muhtevası olduğu görülmektedir.

Emme değeri arttıkça zeminin doygunluğunu bir süre koruduğu daha sonra zeminde hava boşlukları sürekli hale geldikçe küçük bir emme artışı ile birlikte boşluklardaki suyun hızla boşaldığı görülmektedir. Bu aşamadan sonra su muhtevası belirgin bir azalma göstermemekte ve bu aşamada kalıcı su muhtevası değerine ulaşılmaktadır. Zemin-su karakteristik eğrisi (2.22)'de verilen bağıntılar ile temsil edilebilmektedir (Önalp ve Arel, 2013). Bütün zemin türlerinde, zeminin su muhtevasının 0 olması durumunda toplam emme değerinin 106 kPa olduğunu Croney ve Coleman 1961 yılında deneysel olarak belirlemiş ve Richards ise 1965 yılın bu çalışmayı termodinamik prensiplerle desteklemiştir (Fredlund ve Xing, 1994).



**Şekil 2.6** Zemin-su karakteristik eğrisinin özellikleri (Önalp ve Arel, 2013)

$$\left\{ \begin{array}{ll} w_1(\psi) = w_u - S_1 \log(\psi) & 1 \leq \psi \leq \psi_{aev} \\ w_2(\psi) = w_{aev} - S_2 \log\left(\frac{\psi}{\psi_{aev}}\right) & \psi_{aev} \leq \psi < \psi_r \\ w_3(\psi) = S_3 \log\left(\frac{10^6}{\psi}\right) & \psi_r \leq \psi \leq 10^6 \end{array} \right. \quad (1.22)$$

(1.22)'de,  $S_1$ ,  $S_2$  ve  $S_3$  zemin-su karakteristik eğrisindeki sırasıyla üç kısmın eğimini,  $w_1(\psi)$ ,  $w_2(\psi)$  ve  $w_3(\psi)$  herhangi emmedeki su muhtevasını,  $w_u$ ,  $w_{aev}$  ve  $w_r$  sırasıyla 1 kPa değerindeki, hava giriş değerindeki ve rezidüel ağırlıksal su muhtevalarını,

$\psi_{\text{aev}}$  ve  $\psi_r$  ise sırasıyla hava giriş değerindeki ve rezidüel emme değerlerini ifade etmektedir.

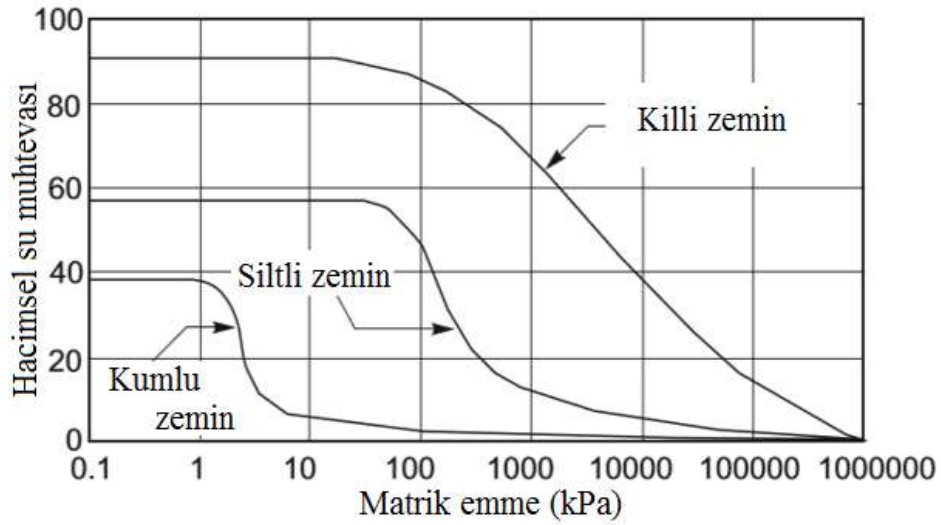
Zemin-su karakteristik eğrisinde zeminin emmesine karşı tanımlanan su miktarı ağırlıksal su muhtevası, hacimsel su muhtevası ve doygunluk derecesi olmak üzere birden fazla değişken kullanılarak tanımlanabilir (Fredlund vd., 2012). Bu terimlerin kullanımının avantaj ve dezavantajları Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.3** Zeminde su miktarının değişik gösterimlerinin avantaj ve dezavantajları (Fredlund vd., 2012).

| Gösterim                        | Avantajlar                                                                                                                                                                                                                                            | Dezavantajlar                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ağırlıksal su muhtevası, $w$    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Klasik zemin mekaniğinde kullanımı ile uyumlu</li> <li>En yaygın kullanılan ölçüm yöntemi</li> <li>Hacim ölçümü gerektirmez</li> <li>Referans değeri sabit kalan bir zemin kütlesidir</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hacim değişimi ile doygunluk derecesi arasında ayırım yapmaya izin vermez</li> <li>Kuruduğu zaman zeminde hacim değiştiğinde doğru hava giriş değerini vermez</li> </ul>                                            |
| Hacimsel su muhtevası, $\theta$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>Doygun olmayan zeminlerde geçici sızıntı ve sıvı depolama türlerinde ortaya çıkan temel formdur</li> <li>Tarım ve zemin biliminde elde edilen sonuçların veri tabanlarında yaygın olarak kullanılır</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bir hacim ölçümü gerektirir</li> <li>Özenli tanımlama için her zemin emmesinde bir hacim ölçümü gerektirir</li> <li>Geoteknik mühendisliğinde tarihsel olarak en az bilinen ve en az kullanılan gösterim</li> </ul> |
| Doygunluk derecesi, $S$         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hava giriş değerini en açık şekilde tanımlar</li> <li>Doygun olmayan zemin özellik fonksiyonları en yakından kontrol eden değişken olarak görünmekte</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bir hacim ölçümü gerektirir</li> <li>Hacim ölçümü gerektirmesiyle birlikte doygunluk derecesi değişkeni tüm hacim değişimi miktarını belirtmez</li> </ul>                                                           |

Zemin-su karakteristik eğrisi zemin türlerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Şekil 2.7'de farklı zemin türleri için zemin-su karakteristik eğrileri gösterilmiştir. Burada, doygun hacimsel su muhtevasının ve hava giriş değerinin

zeminin plastisitesiyle birlikte genellikle arttığı görülmektedir (Fredlund ve Xing, 1994).



**Şekil 2.7** Kumlu, killi ve siltli zeminler için zemin-su karakteristik eğrileri (Fredlund ve Xing, 1994)

Zemin-su karakteristik eğrisini temsil etmek için birçok parametrik model ve denklemler geliştirilmiştir. Geliştirilen denklemler arasında en bilinenleri ve en çok kullanılanları van Genuchten (1980) ve Fredlund ve Xing (1994) zemin-su karakteristik eğrisi denklemleridir (Samingan, 2005). Van Genuchten (1980) (2.23)'teki eşitliği önermiştir.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (2.23)$$

(2.23)'de  $\theta_w$  hacimsel su muhtevasını,  $\theta_s$  doymuş hacimsel su muhtevasını,  $\theta_r$  rezidüel hacimsel su muhtevasını ifade etmektedir.  $a$ ,  $n$  ve  $m$  uygun parametrelerdir. Burada,  $a$   $\text{kPa}^{-1}$  birimiyle ifade edilmekte,  $n$  zeminin boşluk boyutu dağılımı ile ve  $m$  ise tüm karakteristik eğrinin simetrisi ile ilişkilidir.  $n$  parametresi genellikle (2.24) ve (2.25)'te verilen eşitliklerle sınırlandırılmaktadır (Lu ve Likos, 2004).

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2.24)$$

$$m = 1 - \frac{1}{2n} \quad (2.25)$$

Fredlund ve Xing (1994), van Genuchten (1980) modelinde kullanılan boşluk dağılımından yararlanarak (2.26) ve (2.27)'deki eşitlikleri elde etmişlerdir.

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{ \ln[e + (\psi/a)^n] \}^m} \quad (2.26)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln[(1 + (10^6/\psi_r)]} \quad (2.27)$$

$C(\psi)$  zemin-su karakteristik eğrisini “0” su muhtevasında 106 kPa’a yönlendiren düzeltme faktörünü, “e” 2.71828’e eşit doğal logaritma sabitini, “a” hava giriş değeri ile ilişkili olup bu değerden daha büyük olan ve dönme noktasını belirten uydurma parametresini, “n” desatürasyon hızı ile ilişkili uydurma parametresini, “m” rezidüel koşullara yakın eğri ile ilişkili uydurma parametresini ifade etmektedir (Fredlund vd., 2012).

## 2.2 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti Teorisi

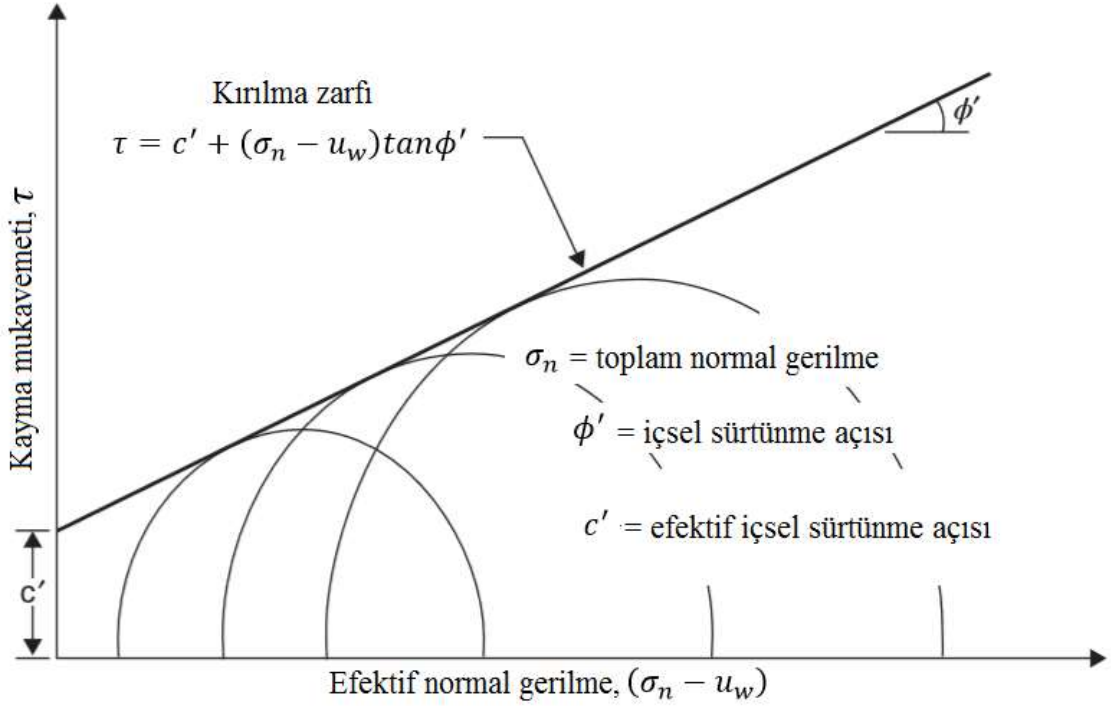
Birçok mühendislik yapısının güvenliği altındaki zeminin mukavemetine bağlıdır. Taşıma kapasitesi, yanal toprak basıncı ve şev stabilitesi zeminin kayma mukavemetine bağlı geoteknik uygulamalardır. Mühendislik yapılarının inşasında genellikle doymun olmayan zeminlerin kullanılması nedeniyle doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek önemlidir. Ayrıca, doymun olmayan zeminlerde suyun sızması sonucunda kayma mukavemetinde meydana gelebilecek değişikliklerin belirlenmesi de önemlidir (Fredlund vd., 2012).

Doygun zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi için Morh-Coulomb kırılma hipotezinde, 1936’da Terzaghi tarafından önerilen efektif gerilme değişkeni kullanılmıştır. Efektif gerilmenin lineer bir fonksiyonu olarak (2.28)’deki gibi ifade edilmiştir (Fredlund vd., 1995).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi' \quad (2.28)$$

Burada,  $\tau$  kayma mukavemetini,  $c'$  efektif kohezyonu,  $\phi'$  efektif kayma mukavemeti açısını,  $\sigma_n$  toplam normal gerilmeyi,  $u_w$  boşluk suyu basıncını ve  $(\sigma_n - u_w)$  efektif normal gerilmeyi ifade etmektedir.

Şekil 2.8'de doymun zeminler için efektif gerilmeler ve kayma mukavemeti arasındaki lineer ilişki gösterilmiştir.

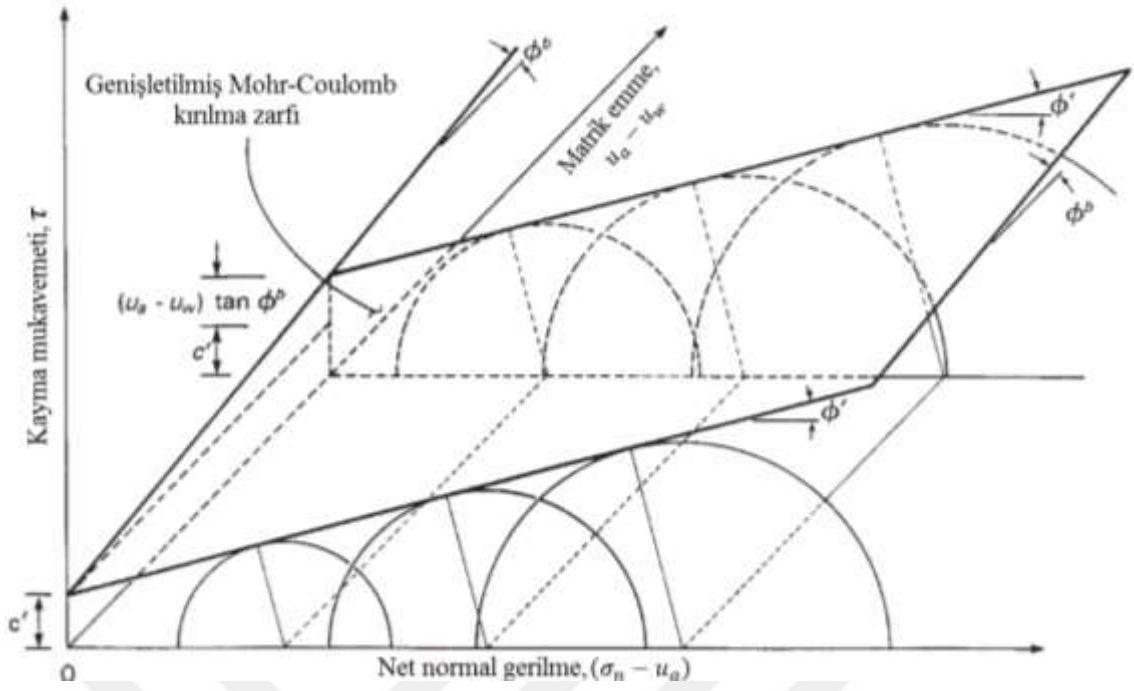


**Şekil 2.8** Doymun zemin için Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Fredlund vd., 2012)

Mohr-Coulomb kırılma hipotezi, Fredlund vd. (1978) tarafından doymun olmayan zeminler için genişletilmiştir ve genişletilmiş Mohr-Coulomb kırılma zarfı Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Fredlund vd., 2012). Doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemetinin başlıca net gerilme ve emme olarak iki bağımsız gerilme durum değişkeniyle (2.29)'da gösterildiği şekilde tanımlanması önerilmiştir (Sheng vd., 2011).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)tan\phi' + (u_a - u_w)tan\phi^b \quad (2.29)$$

Burada,  $(u_a - u_w)$  matrik emme ve  $\phi^b$  matrik emme değişimi ile ilişkili olarak kayma mukavemetindeki artış miktarını gösteren açı olarak ifade etmektedir.



**Şekil 2.9** Doygun olmayan zeminler için genişletilmiş Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Fredlund vd., 2012)

Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemetini, zemin-su karakteristik eğrisinde farklı doygunluk derecelerinde su alanının değişimini tanımlayarak elde edebilmek için Vanapalli vd. (1996) tarafından, farklı matrik emme değerlerinde kayma mukavemetinin belirlenebildiği (2.31)'de gösterilen fiziksel bir model geliştirilmiştir.

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) (\tan \phi') \right] \quad (2.31)$$

Literatürde doymun olmayan zeminler için geliştirilmiş olan kayma mukavemeti denklemleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 2.4** Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemetinin tahmini için yayınlanmış denklemler (Guan vd., 2010)

| Geliştirenler              | Durum      | Kayma Mukavemeti Eşitlikleri                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fredlund vd. (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 vd. (1996)       | Düzeltilme | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + [(u_a - u_w)\theta^K]\tan\phi'$                                                                                                                                                                                                           |
| Vanapalli vd. (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 vd. (1998)             | Tahmin     | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)(\xi)(\tan\phi')$<br>$\xi = \frac{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)}{\log(u_a - u_w)_r - \log(u_a - u_w)_b}$                                                                                                                 |
| Khalili ve Khabbaz (1998)  | Tahmin     | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(\lambda')(\tan\phi')]$<br>$\lambda' = \left\{\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b}\right\}^{-0.55}$                                                                                                                              |
| Rassam ve Cook (2002)      | Düzeltilme | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \psi\tan\phi' - \varphi(\psi - \psi_e)^\beta$<br>$\varphi = \frac{\psi_r\tan\phi' - \tau_{sr}}{(\psi_r - \psi_e)^\beta} \quad \beta = \frac{\tan\phi'(\psi_r - \psi_e)}{\psi_r\tan\phi' - \tau_{sr}}$                                     |
| Tekinsoy vd. (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 vd. (2005)             | Düzeltilme | $\tau = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan\phi'$ eğer $(u_a - u_w) \leq AEV$<br>$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + AEV] + [(u_a - u_w) - AEV]$<br>$\tan\phi' \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{(\sigma - u_a) + (u_a - u_w) - AEV}{AEV}\right)\right]$ eğer $(u_a - u_w) > AEV$ |
| Garven ve Vanapalli (2006) | Tahmin     | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + [(u_a - u_w)\theta^K]\tan\phi'$<br>$K = -0.0016 I_p^2 + 0.0975 I_p + 1$                                                                                                                                                                   |
| Vilar (2006)               | Düzeltilme | $\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)/[a + b(u_a - u_w)]$<br>$1/a = \tan\phi' \quad b = \frac{1}{(c_{ult} - c')}$                                                                                                                                                   |

### **2.3 Doygun Olmayan Zeminlerde Karşılaşılan Problemler**

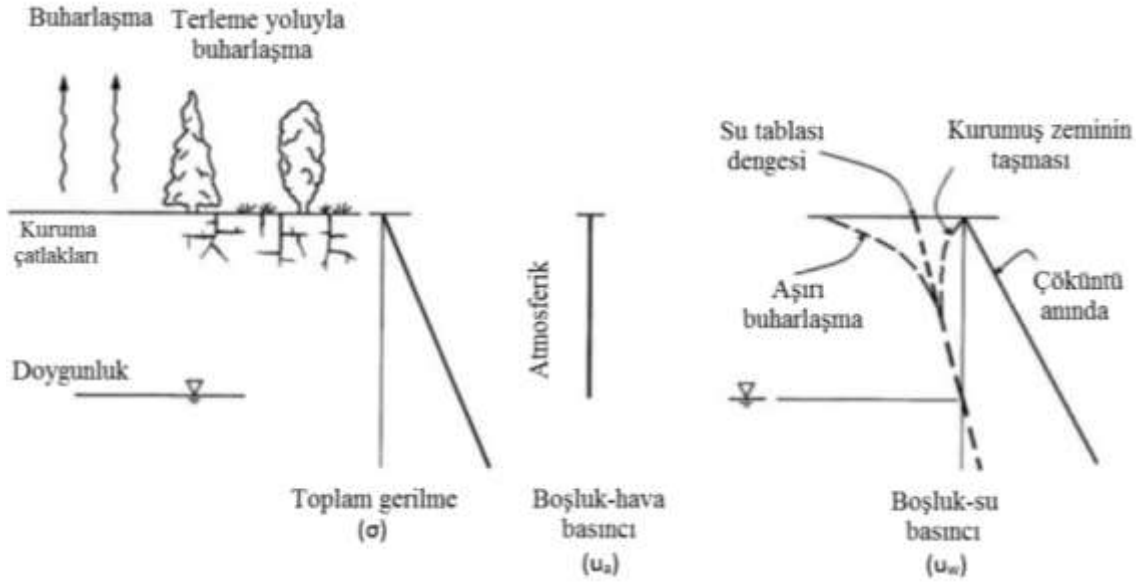
Doygun olmayan zeminler, inşaat mühendisleri tarafından yıllarca ya göz önüne alınmamıştır ya da klasik doygun zemin mekaniği çerçevesinde değerlendirilmiştir. Ancak son 30-40 yılı aşkın bir süredir doygun olmayan zemin mekaniği davranışının anlaşılmasında hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu durum, doygun olmayan zeminlerle ilgili problemlere daha uygun çözümler üretilmesini sağlamıştır (Lu ve Likos, 2004). Doygun olmayan zeminlerin davranışının belirlenebilmesi için uygun bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu teknolojinin pratik olması, maliyetinin fazla olmaması, sağlam bir teorik temele sahip olması ve kavram olarak klasik doygun zemin mekaniğine paralel olması gerekmektedir (Fredlund vd., 2012).

Doygun olmayan zemin mekaniği ile ilgili problemler, doygun zemin mekaniği problemleri ile benzerlik göstermektedir. Doygun olmayan zemin durumlarında negatif boşluk suyu basıncı ortak bir durumdur. Negatif boşluk suyu basıncı, şişen yada genleşen killerde oldukça önemli bir problem olarak kabul edilmektedir. Toprak dolgu baraj yapılarında, doğal şevlerde, atık depolama alanlarında, düşey kazılarda, yüzeysel temellerin taşıma kapasitesinde, genleşebilen zeminlerle ilgili zemin hareketlerinde, zemin örtüsü sistemleri ve kapiler boşluk tasarımında, karayolu ve demiryolu yapıları gibi durumlarda doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti, hacim değişimi, sızma ve negatif boşluk suyu gibi temel faktörlerin göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi gerekmektedir (Fredlund vd., 2012).

### **2.4 Çevresel Faktörlerin Doygun Olmayan Zeminlere Etkisi**

İklimin, zeminin doygunluğu üzerinde önemli bir rolü olduğu bilinmektedir. Zemin içerisindeki su çevresel etkilerle aşağı ve yukarı yönde olmak üzere iki şekilde akış durumuna sahiptir. Şekil 2.10'da doygun olmayan zeminde toplam gerilme, boşluk-hava basıncı ve boşluk-su basıncı dağılımları ve Şekil 2.11'de Hidrolojik çevrimde doygun olmayan zonun rolü gösterilmiştir. Zemin içerisindeki su Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, zemin yüzeyinden buharlaşma veya bitkisel örtü tabakasından terleme yoluyla buharlaşma şeklinde uzaklaşmaktadır ve bu durum suyun zeminden yukarı yönde akışına neden olmaktadır. Suyun, zeminde aşağı yöndeki hareketi ise yağmur ve diğer yağış tiplerinden kaynaklanmaktadır. Zemindeki boşluk suyu basıncının koşulları, genellikle bu iki akış durumu arasındaki fark

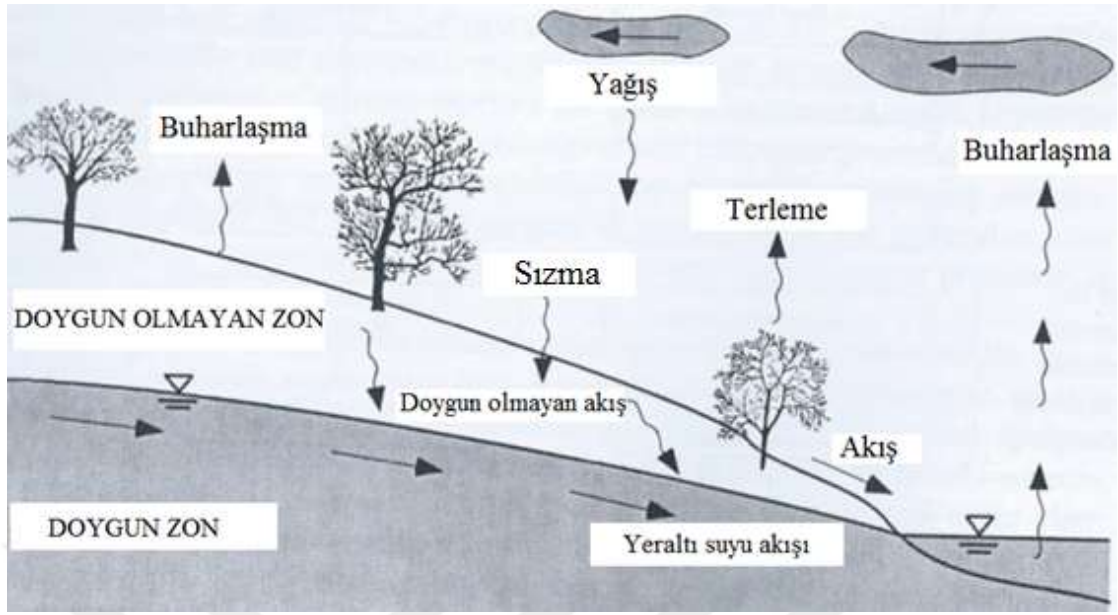
tarafından etkilenmektedir. Net yukarı akış durumu, zemin kütlesinin kademeli olarak kuruması, parçalanması ve çatlamasına neden olurken, net aşağı akış durumu ise zemin kütlesinin sonunda doymun hale gelmesine neden olmaktadır (Fredlund, 1993).



**Şekil 2.10** Doymun olmayan zeminde toplam gerilme, boşluk-hava basıncı ve boşluk-su basıncı dağılımları (Fredlund vd., 2012)

Su tablasının derinliği net yüzey akışından etkilenmektedir. Yüzey akışı olmadığı durumda su tablasının derinliği ile ilgili hidrostatik çizgi denge koşulunu temsil etmektedir. Kuru dönem boyunca boşluk suyu basıncı, hidrostatik çizgi ile temsil edilen durumdan daha negatif hale gelirken, ıslak dönem boyunca bu durumun tersi meydana gelmektedir (Fredlund, 1993).

Su tablasının sabit konumu sistemin genel topoğrafyasının, zemin özelliklerinin ve suyun yer altına sızması veya uzaklaştırılmasıyla erişilen doğal mekanizmanın kontrolü altındadır. Küresel anlamda, su tablası ve zemin yüzeyi arasında bulunan doymun olmayan zondaki su miktarı, hidrolojik çevrimdeki toplam su miktarının sadece küçük bir parçasını temsil etmektedir. Atmosfer ve derinlerdeki büyük yeraltı suyu akiferlerinin arasındaki geçişi oluşturan doymun olmayan zon içerisindeki suyun hareketi oldukça önemlidir. Yüzeye yakın doymun olmayan zeminlerin boyutu ve kapsamı, yerel veya bölgesel iklim değişikliklerinden oldukça etkilenmektedir (Lu ve Likos, 2004).



**Şekil 2.11** Hidrolojik çevrimde doymun olmayan zonun rolü (Lu ve Likos, 2004)

Şekil 2.11’de görüleceği üzere yağış, buharlaşma ve terleme yoluyla buharlaşma gibi bütün önemli çevresel etkiler doymun olmayan zeminlerin derinliği ve genişliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Lu ve Likos, 2004).

Bu çalışmada, doymun olmayan zemin özelliklerine sahip bir şev kesitinde yağış sızmasının şev stabilitesine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, bir dolgu sahasından alınan sondaj numunleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için elek analizi, hidrometre, piknometre ve kıvam limit deneyleri, mekanik özelliklerini ve zemin parametrelerini belirlemek için ise üç eksenli konsolidasyonlu-drenajsız (CU) ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Numunelere ait zemin-su karakteristik eğrisi için ise Kocaman (2018) tarafından yapılan çalışmadaki deney verileri kullanılmıştır. Kocaman (2018) çalışmasında doymun olmayan 4 farklı killi zemin numunesi üzerinde filtre kağıdı ve basınç plakası deneyleri yaparak numunelere ait matrik emme değerleri ve zemin-su karakteristik eğrilerini elde etmiştir. Bu çalışmada, 1. ve 3. numunler üzerinde yapılan filtre kağıdı deneyinden elde edilen zemin-su karakteristik eğrisi kullanılarak analiz için gerekli olan parametreler elde edilmiştir. Kocaman (2018) çalışmasında zemin-su karakteristik eğrisi gravimetrik su muhtevası kullanılarak elde etmiştir. Ancak GEOSTUDIO programında yapılan analizlerde zeminin emme gerilmesine karşılık gelen hacimsel su muhtevası değerini tanımlamak gerekmektedir. Bunun için Kocaman'ın 3. numune üzerinde yaptığı kompaksiyon sonucunda elde edilen numuneye ait kuru birim hacim ağırlık kullanılarak numuneye ait hacimsel su muhtevası değerleri hesaplanmıştır.

### 3.1 Elek Analizi

Örselenmemiş haldeki numunenin dane çapı dağılımı TS1900-1'e göre belirlenmiştir. Bir miktar numune üzerinde yıkamalı eleme metodu kullanılarak elek analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de elek analizi için yıkama işlemi gösterilmiştir. Şekil 3.1a'da 200 No'lu elek üzerinden yıkama işlemi uygulanan numune ve Şekil 3.1b'de yıkama işlemi sonrasında elek analizi üzerinde kalan numune gösterilmiştir. Elek üzerinde kalan numune 105 °C sıcaklıktaki etüvde

bekletilerek numunenin kuruması sağlanmıştır. Kuru numune üzerinde Şekil 3.2’de gösterildiği gibi elek analizi deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2a’da elek analizi için kullanılan elek seti, Şekil 3.2b’de elek analizi sonrasında elek üzerinde kalan numune ve Şekil 3.2c’de elek üzerinde kalan numune miktarının belirlenmesi gösterilmiştir. Yapılan elek analizi sonucunda her bir elekten geçen numune yüzdeleri hesaplanmış ve deney sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir.



**Şekil 3.1** Yıkamalı eleme metodu (a) 200 No’lu elek üzerinden numuneye uygulanan yıkama işlemi (b) Yıkama işleminde elek üzerinde kalan numune



**Şekil 3.2** Kuru numune üzerinde elek analizi (a) Elek seti (b) Elek üzerinde kalan numune (c) Elek üzerinde kalan numune miktarının ölçümü

**Tablo 3.1** Elek analizi deney sonuçları

| ELEK ANALİZİ |                |                                        |                                               |                                   |                                  |
|--------------|----------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Elek No      | Elek Çapı (mm) | Elek Üstünde Kalan Numune Miktarı (gr) | Elek Üstünde Kalan Toplam Numune Miktarı (gr) | Elekten Geçen Numune Miktarı (gr) | Elekten Geçen Numune Yüzdesi (%) |
| 4            | 4,75           | 12,06                                  | 12,06                                         | 526,38                            | 0,98                             |
| 8            | 2,38           | 13,97                                  | 26,03                                         | 512,41                            | 0,95                             |
| 40           | 0,425          | 24,71                                  | 50,74                                         | 487,7                             | 0,91                             |
| 60           | 0,25           | 6,15                                   | 56,89                                         | 481,55                            | 0,89                             |
| 100          | 0,15           | 3,93                                   | 60,82                                         | 477,62                            | 0,89                             |
| 200          | 0,075          | 0,38                                   | 61,2                                          | 477,24                            | 0,89                             |
| Pan          | -              | 477,24                                 | 538,44                                        | 0                                 | 0                                |

### 3.2 Hidrometre Deneyi

Numune içerisindeki ince dane çapı dağılımının bulunması için TS1900-1'e göre hidrometre deneyi yapılmıştır. Hidrometre deney aşamaları Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Numune, hidrometre deneyinden önce danelerin birbirine yapışmasını engellemek için sodyum hexametafosfat (calgon) ile hazırlanan çözelti ile Şekil 3.3'a da gösterildiği gibi karıştırılarak 24 saat bekletilmiştir. Numune Şekil 3.3b'de gösterildiği gibi 1000 ml'lik cam mezür içerisine konularak belirli zaman aralıklarında hidrometre okumaları alınmıştır. Hidrometre deney sonuçları Tablo 3.2'de verilmiştir.

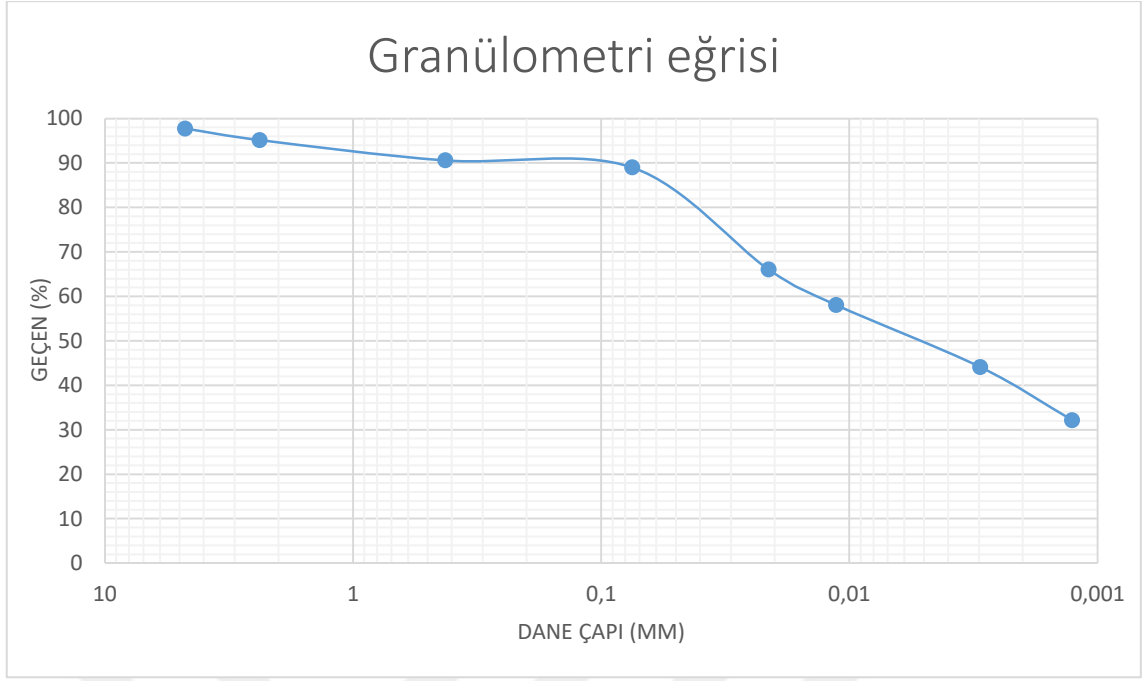
Elek analizi ve hidrometre deneyi sonucunda numuneye ait granülometri eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3.4'te deneyler sonucunda elde edilen granülometri eğrisi gösterilmiştir. Deneyler sonucunda numunede çakıl oranı %2, kum oranı %9, silt oranı %51 ve kil oranı ise %38 olarak bulunmuştur.



**Şekil 3.3** Hidrometre deneyi (a) Çözeltide bekletilen numune (b) Numunenin hidrometre okumasının alınması

**Tablo 3.2** Hidrometre deney sonuçları

| HİDROMETRE DENEYİ |               |                                           |                                                |                                      |                                                           |                          |      |         |                     |
|-------------------|---------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|------|---------|---------------------|
| Hidrometre No:    | 152H          | G <sub>s</sub> :                          | 2,67                                           | a:                                   | 0,996                                                     |                          |      |         |                     |
| Kimyasal Çözelti: | Calgon        | Kimyasal Çözelti Miktarı (ml):            | 125                                            | Numune Miktarı (gr):                 | 50                                                        |                          |      |         |                     |
| Sıfır Düzeltmesi: | 6             | Menisküs Düzeltmesi :                     | 1                                              | Sıcaklık Düzeltmesi C <sub>T</sub> : | 0,15                                                      |                          |      |         |                     |
| Süre, t (dk)      | Sıcaklık (°C) | Gerçek Hidrometre Okuması, R <sub>a</sub> | Düzeltilmiş Hidrometre Okuması, R <sub>c</sub> | Geçen Miktar (%)                     | Yalnız Menisküs Düzeltmesi Yapılmış Hidrometre Okuması, R | Efektif Derinlik, L (cm) | L/t  | A       | Efektif Çap, D (mm) |
| 0,25              | 20            | 44                                        | 38,15                                          | 75,99                                | 45                                                        | 8,9                      | 35,6 | 0,01358 | 0,081               |
| 0,50              | 20            | 43                                        | 37,15                                          | 74                                   | 44                                                        | 9,1                      | 18,2 | 0,01358 | 0,058               |
| 1                 | 20            | 41                                        | 35,15                                          | 70,02                                | 42                                                        | 9,4                      | 9,4  | 0,01358 | 0,042               |
| 2                 | 20            | 40                                        | 34,15                                          | 68,03                                | 41                                                        | 9,6                      | 4,8  | 0,01358 | 0,03                |
| 4                 | 20            | 39                                        | 33,15                                          | 66,03                                | 40                                                        | 9,7                      | 2,43 | 0,01358 | 0,021               |
| 8                 | 20            | 37                                        | 31,15                                          | 62,05                                | 38                                                        | 10,1                     | 1,26 | 0,01358 | 0,015               |
| 15                | 20            | 35                                        | 29,15                                          | 58,07                                | 36                                                        | 10,4                     | 0,69 | 0,01358 | 0,011               |
| 30                | 20            | 34                                        | 28,15                                          | 56,07                                | 35                                                        | 10,6                     | 0,35 | 0,01358 | 0,008               |
| 60                | 20            | 33                                        | 27,15                                          | 54,08                                | 34                                                        | 10,7                     | 0,18 | 0,01358 | 0,006               |
| 120               | 20            | 31                                        | 25,15                                          | 50,1                                 | 32                                                        | 11,1                     | 0,09 | 0,01358 | 0,004               |
| 240               | 20            | 28                                        | 22,15                                          | 44,12                                | 29                                                        | 11,5                     | 0,05 | 0,01358 | 0,003               |
| 480               | 20            | 25                                        | 19,15                                          | 38,15                                | 26                                                        | 12                       | 0,03 | 0,01358 | 0,002               |
| 1440              | 20            | 22                                        | 16,15                                          | 32,17                                | 23                                                        | 12,5                     | 0,01 | 0,01358 | 0,001               |

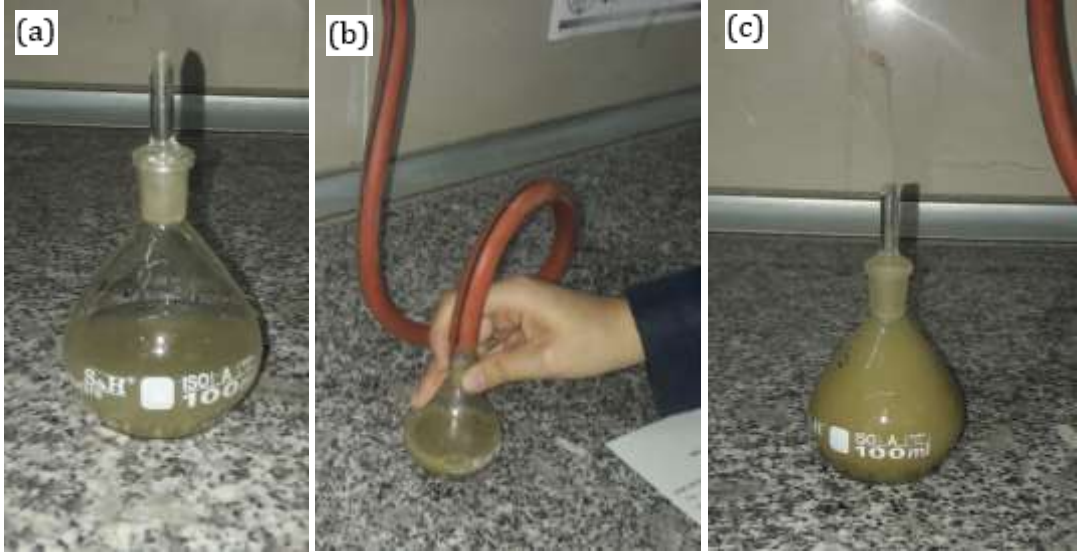


**Şekil 3.4** Granulometri eğrisi

### 3.3 Piknometre Deneyi

Numunenin özgül ağırlığı ASTM D854'e göre yapılan piknometre deneyleri ile belirlenmiştir. Piknometre deney aşamaları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Şekil 3.5a'da numunenin piknometre şişesine yerleştirilmesi, Şekil 3.5'te Numuneye vakum uygulanması ve Şekil 3.5c'de vakum sonunda su ile doldurulmuş piknometre gösterilmiştir.

Numune piknometre şişesine Şekil 3.5a'da gösterildiği gibi yerleştirildikten sonra Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi numuneye vakum uygulanarak içerisindeki hava boşluklarının çıkışı sağlanmıştır. Vakum işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.5c'deki gibi piknometre şişesinin tamamı su ile doldurularak tartılmıştır. Piknometre deney sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir. Yapılan piknometre deneyleri sonucunda her iki deney için bulunan özgül ağırlık değerlerinin ortalaması alınmış ve numunenin özgül ağırlığı ( $G_s$ ) 2.67 olarak bulunmuştur.



**Şekil 3.5** Piknometre deney aşamaları (a) Numunenin piknometre şişesine yerleştirilmesi (b) Numuneye vakum uygulanması (c) Vakum sonunda su ile doldurulmuş piknometre

**Tablo 3.3** Piknometre deney sonuçları

| PİKNOMETRE DENEYİ                              |        |        |
|------------------------------------------------|--------|--------|
| Piknometre No.                                 | 1      | 2      |
| Kuru Zemin Ağırlığı (gr)( $W_1$ )              | 10     | 10     |
| Su + Piknometre Ağırlığı (gr) ( $W_2$ )        | 142,83 | 142,69 |
| $W_1 + W_2$ (gr)                               | 152,83 | 152,69 |
| Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (gr)( $W_3$ ) | 149,1  | 148,94 |
| $W_1 + W_2 - W_3$ (gr)                         | 3,73   | 3,75   |
| $G_s = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3}$            | 2,681  | 2,667  |
| Ortalama $G_s$                                 | 2,67   |        |

### 3.4 Kıvam Limiti Deneyleri

Numuneye ait doğal su muhtevası ASTM D2216'ya göre belirlenmiştir. Zeminin doğal su muhtevasını belirlemek üzere Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bir miktar numune alınmıştır. Başlangıç ağırlıkları kaydedilen numuneler 105 °C 'de 24 saat bekletilmiştir. 24 saat sonunda numuneler tartılarak kuru ağırlıkları kaydedilmiştir. Doğal su muhtevası için yapılan hesaplar Tablo 3.4'te verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda zeminin doğal su muhtevası % 21 olarak bulunmuştur.



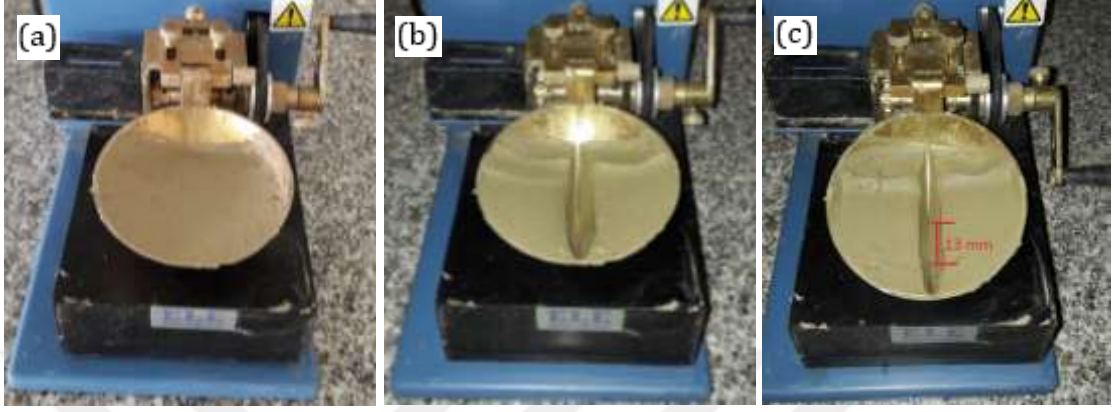
**Şekil 3.6** Doğal su muhtevası ölçümü için sondaj kesitinden alınan numune örneği

**Tablo 3.4** Doğal su muhtevası deney sonuçları

| DOĞAL SU MUHTEVASI         |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| Kap No:                    | 33     | 150    |
| Dara+Yaş Numune (gr):      | 277,25 | 172,36 |
| Dara+Kuru Numune(gr):      | 243,96 | 157,69 |
| Dara (gr):                 | 80,09  | 92,52  |
| Kuru Numune Ağırlığı (gr): | 163,87 | 65,17  |
| Yaş Numune Ağırlığı (gr):  | 197,16 | 79,84  |
| Su Miktarı (gr):           | 33,29  | 14,67  |
| Su Muhtevası, w (%):       | 20     | 22     |
| Doğal Su Muhtevası, w (%): | 21     |        |

Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvama dönüştüğü sınır su muhtevası değeri olarak bilinen likit limit ( $w_L$ ) değeri ASTM D4318'e göre belirlenmiştir. Numune porselen bir potada içerisine bir miktar su eklenerek palet bıçağı yardımıyla homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Şekil 3.7'de Cassagrande likit limit aletinde deney aşamaları gösterilmiştir. Şekil 3.7a'da gösterildiği gibi numuneden bir miktar alınarak numunenin yüzeyi tabana paralel olacak şekilde Cassagrande likit limit aletine yerleştirilmiştir. Oluk açma bıçağı ile numunenin ortasından Şekil 3.7b'deki gibi 2 mm kalınlığında V kesitli bir oluk açılmıştır. Cassagrande likit limit

aletinin krank kolu saniyede 2 devir yapacak şekilde çevrilerek kabın 1 cm yükseklikten düşürülmesi sağlanmıştır. Numunede açılan oluk Şekil 3.7’teki gibi 13 mm kapanmaya ulaştığında deney durdurulmuş ve vuruş sayısı kaydedilmiştir.



**Şekil 3.7** Cassagrande likit limit deney aletinde deney aşamaları (a) Numunenin yerleştirilmesi (b) Numunede oluk açılması (c) Numunenin kapanma bölgesinin gösterimi

Deney sonunda, vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevasını belirlemek üzere kapanan bölgeden numune alınmıştır. Likit limit deneyi, ölçülen her bir vuruş sayısından sonra numuneye bir miktar su eklenerek tekrarlanmıştır. Şekil 3.8’de her bir deney sonunda kapanan bölgeden alınan numuneler gösterilmiştir.

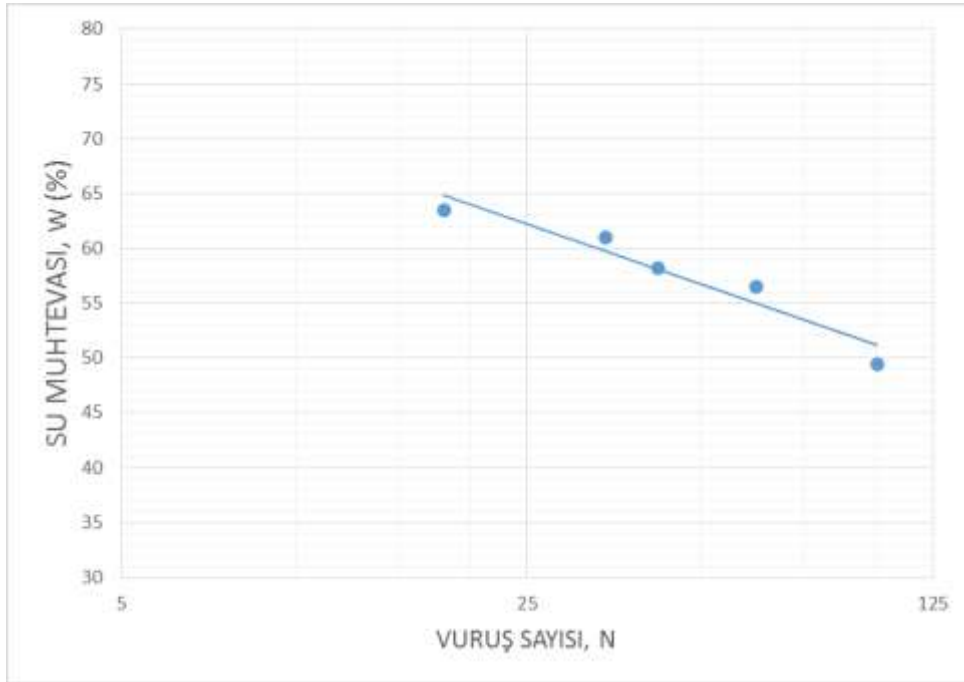


**Şekil 3.8** Deneylerin sonunda kapanan bölgelerden alınan numuneler

Numunelerin 105°C'lik etüvde kurutulması sağlanmış ve yapılan hesaplar Tablo 3.5'te verilmiştir. Her bir vuruş sayısına karşılık gelen su muhtevaları belirlenerek yarı logaritmik olarak çizilmiş ve 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası değeri numuneye ait likit limit değeri olarak kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan numunenin likit limit değeri % 62 olarak belirlenmiştir. Numuneye ait su muhtevası-likit limit grafiği ise Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

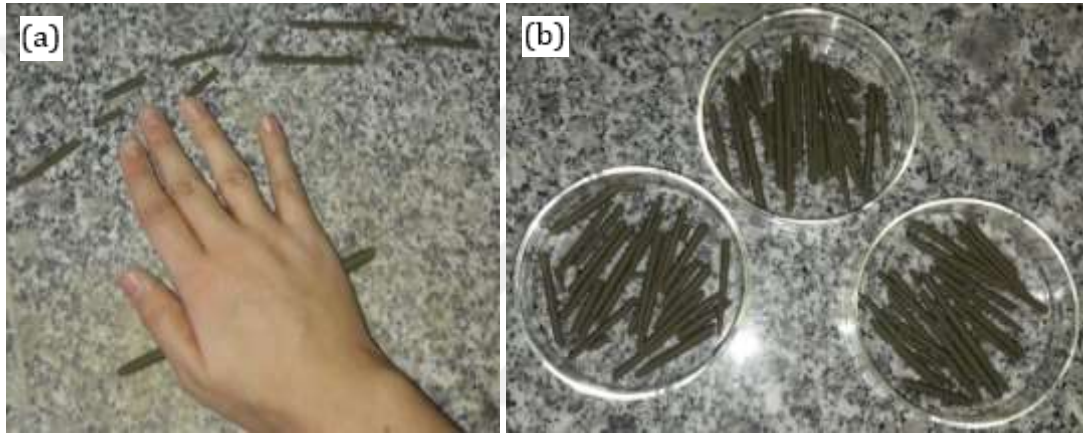
**Tablo 3.5** Likit limit deney sonuçları

| LİKİT LİMİT                |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kap No:                    | 2M1   | B23   | 2M30  | 2M27  | 2M4   |
| Vuruş Sayısı (N):          | 100   | 62    | 42    | 34    | 18    |
| Dara+Yaş Numune (gr):      | 55,58 | 64,72 | 65,22 | 60    | 66,89 |
| Dara+Kuru Numune(gr):      | 50,47 | 58,72 | 58,48 | 53,21 | 59,67 |
| Dara (gr):                 | 40,14 | 48,12 | 46,91 | 42,09 | 48,3  |
| Kuru Numune Ağırlığı (gr): | 10,33 | 10,6  | 11,57 | 11,12 | 11,37 |
| Yaş Numune Ağırlığı (gr):  | 15,44 | 16,6  | 18,31 | 17,91 | 18,59 |
| Su Miktarı (gr):           | 5,11  | 6     | 6,74  | 6,79  | 7,22  |
| Su Muhtevası, w (%):       | 49    | 57    | 58    | 61    | 64    |
| Likit Limit, $w_L$ (%):    | 62    |       |       |       |       |



**Şekil 3.9** Su muhtevası-vuruş sayısı grafiği

Zeminin plastik bir kıvamdan yarı plastik bir kıvama geçtiği sınır su muhtevası olarak bilinen plastik limit ( $w_p$ ) değeri ASTM D4318'e göre belirlenmiştir. Numuneye plastik kıvam elde edecek şekilde bir miktar su ilave edilmiştir. Numune top haline getirilerek yaklaşık olarak iki eşit parçaya ayrılmıştır. Plastik limit deney aşamaları Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Şekil 3.10a'da gösterildiği gibi her bir parça sırayla düz bir yüz üzerine konularak avuç içi ile yüz arasında silindirik çubuk şeklinde yuvarlanmıştır. Numuneler 3 mm kalınlığa indiğinde numuneler üzerinde çatlamlar ve kopmalar meydana gelmiştir. Kopan numuneler Şekil 3.10b'de görüldüğü şekilde kaplara konularak su muhtevaları ölçülmek üzere 105 °C sıcaklıktaki etüve konulmuştur.



**Şekil 3.10** Plastik limit deney aşamaları (a) Numunelerin yüz üzerinde hazırlanması (b) Numunelerin kaplara yerleşimi

Tablo 3.6'da plastik limit deneyi hesapları verilmiştir. Deney sonucunda numunelere ait plastik limit değeri % 29 olarak bulunmuştur.

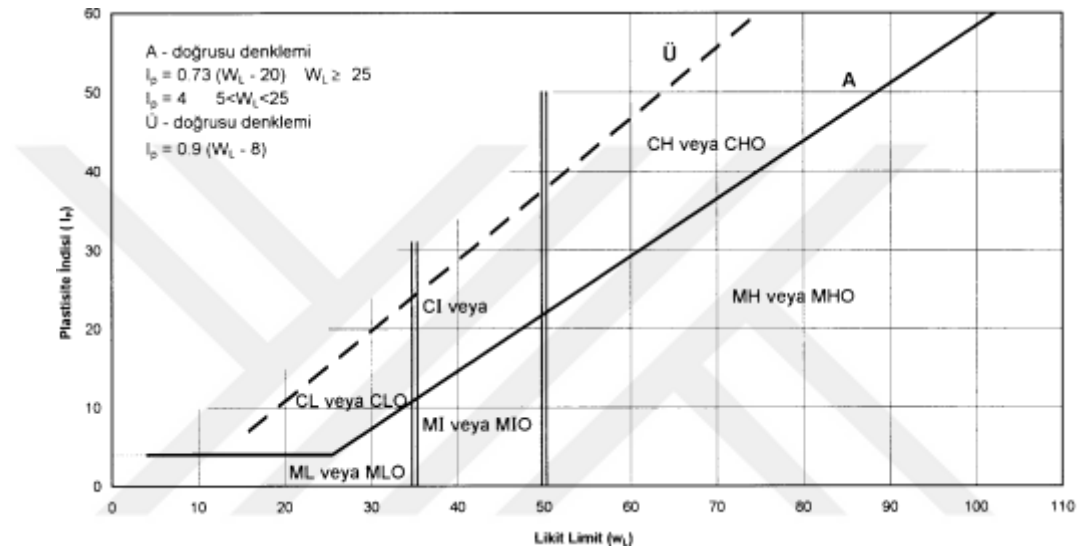
**Tablo 3.6** Plastik limit deney sonuçları

| PLASTİK LİMİT              |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| Kap No:                    | 2M17  | 2M18  | 2M20  |
| Dara+Yaş Numune (gr):      | 69,71 | 65,54 | 67,38 |
| Dara+Kuru Numune(gr):      | 65,60 | 61,32 | 63,88 |
| Dara (gr):                 | 51,60 | 46,86 | 52,08 |
| Kuru Numune Ağırlığı (gr): | 13,68 | 14,26 | 11,50 |
| Yaş Numune Ağırlığı (gr):  | 18,11 | 18,68 | 15,30 |
| Su Miktarı (gr):           | 4,43  | 4,42  | 3,80  |
| Su Muhtevası, $w$ (%):     | 32    | 31    | 33    |
| Plastik Limit, $w_p$ (%):  | 32    |       |       |

Likit limit ile plastik limit arasında kalan su muhtevası değerlerinde zemin plastik davranış göstermektedir. Bu nedenle, bu iki limit değer arasındaki fark plastisite indisi ( $I_p$ ) olarak (3.1)'deki gibi tanımlanmaktadır (Özaydın, 2005).

$$I_p = (w_L - w_P) \quad (3.1)$$

Likit limit ve plastisite indisi birlikte değerlendirilerek zeminin plastisitesi Şekil 3.11'de verilen plastisite kartından belirlenmiştir.



**Şekil 3.11** Plastisite kartı (TS 1500, 2000)

Çalışma kapsamında, kıvam limit deneyleri sonucunda numuneye ait plastisite indisi (3.2)'de gösterildiği gibi % 30 olarak bulunmuştur.

$$I_p = 62 - 32 = 30 \quad (3.2)$$

Plastisite kartında, % 62'lik likit limit değeri ve % 30'luk plastisite indisi değeri ile numune sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

### 3.5 Üç Eksenli Konsolidasyonlu-Drenajsız Deney

Dolgu sahasından alınan numuneler üzerinde zeminin toplam ve efektif parametrelerini belirlemek için TS 1900-2'ye göre üç eksenli konsolidasyonlu-drenajsız deneyler yapılmıştır.

Aynı sondaj kesitinden çapı en az 50 mm ve yüksekliği çapının iki katı olacak şekilde Şekil 3.12’de gösterildiği gibi silindirik numuneler alınmıştır. CU üç eksenli deney aletinin taban plakasına yerleştirilen numunenin alt ve üst tabanına drenajı sağlamak ve boşluk suyu basıncını ölçmek için poroz diskler yerleştirilmiştir. Poroz disklerin tıkanmasını önlemek amacıyla numunenin alt ve üst tabanında, poroz diskler ile numune arasına filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Hücredeki suyun numuneyle temasını engellemek amacıyla numune etrafına lastik kılıf yerleştirilmiştir. Lastik kılıflar numune başlığına ve taban plakasına lastik halkalar ile tutturulmuştur. Deneye başlamadan önce, çevre drenajını sağlamak amacıyla numunenin çevresine yanal filtre bandı yerleştirilmiştir. Şekil 3.13’te numunenin deneye hazırlanma aşamaları verilmiştir. Şekil 3.13a’da poroz disk, filtre kağıdı ve yanal filtre bandının yerleştirilmesi ve Şekil 3.13b’de lastik kılıfın yerleştirilmesi gösterilmiştir.



**Şekil 3.12** Sondaj kesitinden alınan CU deney numunesi



**Şekil 3.13** CU deney numunesinin hazırlanması (a) Poroz disk, filtre kağıdı ve yanal filtre bandının yerleştirilmesi (b) Lastik kılıfın yerleştirilmesi

Numune, deneye hazırlandıktan sonra üç eksenli deney aleti hücreğine yerleştirilmiştir. İlk aşamada numune doygun duruma getirilmiştir. Doygun hale gelen numuneye konsolidasyon aşaması uygulanmıştır. Konsolidasyonunu tamamlayan numune, sabit bir çevre basıncıyla eksenel yük arttırılarak belirli bir hızda kesilmiştir. Numunenin kesilmesi sırasında kuvvet halkası, boşluk suyu basıncı ve şekil değiştirmeyi ölçen mikrometre okuması alınmıştır.

Şekil 3.14’de numunenin üç eksenli deney aletine yerleştirilmesi, Şekil 3.15’te ise deney sırasında numunede beliren göçme durumu, Şekil 3.16’da ise deney sırasında beliren göçme yüzeyi gösterilmiştir.



**Şekil 3.14** Numunenin üç eksenli deney aletine yerleştirilmesi

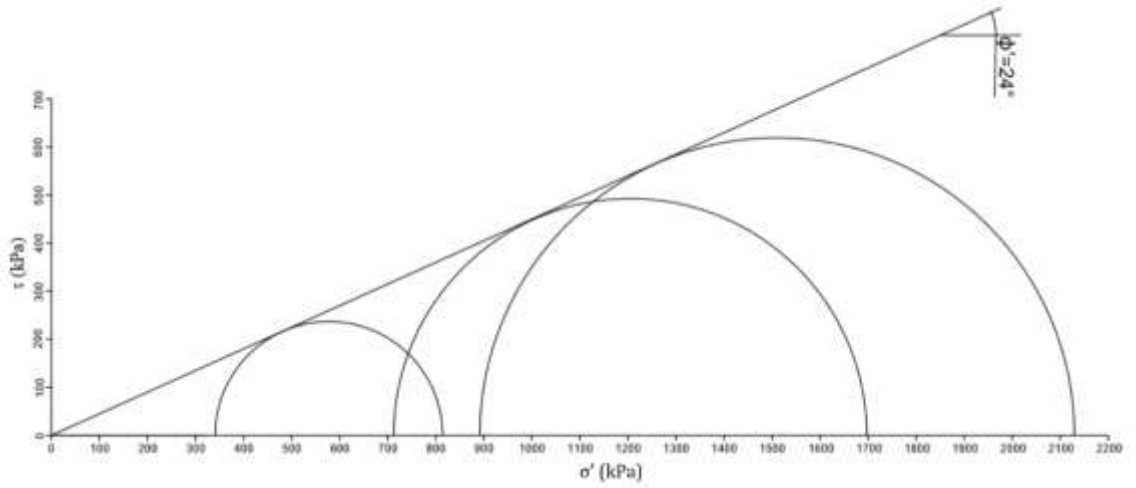


**Şekil 3.15** Numunenin deney sırasında gözlenen göçme durumu



**Şekil 3.16** Deney sonunda numunede gözlenen göçme yüzeyi

Şekil 3.17’de 500, 1000 ve 1500 kPa çevre basıncında kesilen numunelerin Mohr daireleri gösterilmiştir. Deneyler sonucunda numuneye ait efektif kayma mukavemeti açısı değeri  $24^\circ$  ve efektif kohezyon değeri 2 kPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 3.17** Numunelere ait Mohr daireleri

### 3.6 Konsolidasyon Deneyi

ASTM D2435’e göre gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri için sondaj kesitinden iki adet numune alınmış ve numune yanal şekil değiştirmeyi önleyen konsolidasyon halkalarına Şekil 3.18’deki gibi yerleştirilmiştir. Numunelerin alt ve üst tabanına drenajı sağlamak amacıyla poroz diskler yerleştirilmiştir. Poroz disklerin tıkanmasını önlemek için numune ile poroz disklerin arasına konsolidasyon

halkasının iç çapı ile aynı çapa sahip filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Şekil 3.19’da numunenin yerleştirildiği konsolidasyon deney aleti gösterilmiştir.



**Şekil 3.18** Konsolidasyon halkasına yerleştirilmiş numune



**Şekil 3.19** Konsolidasyon deney aleti

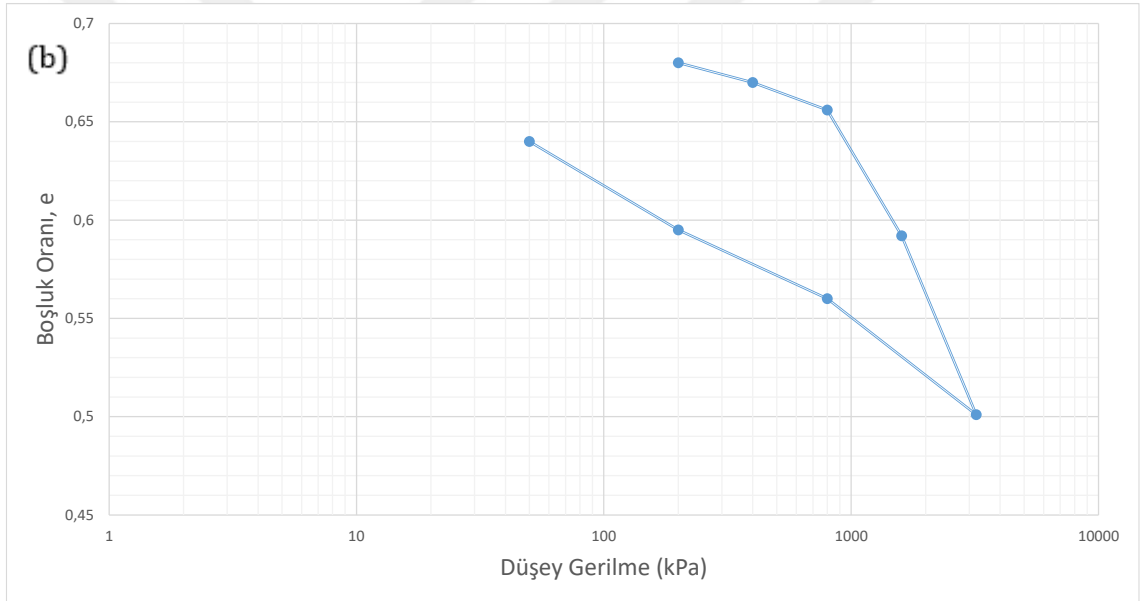
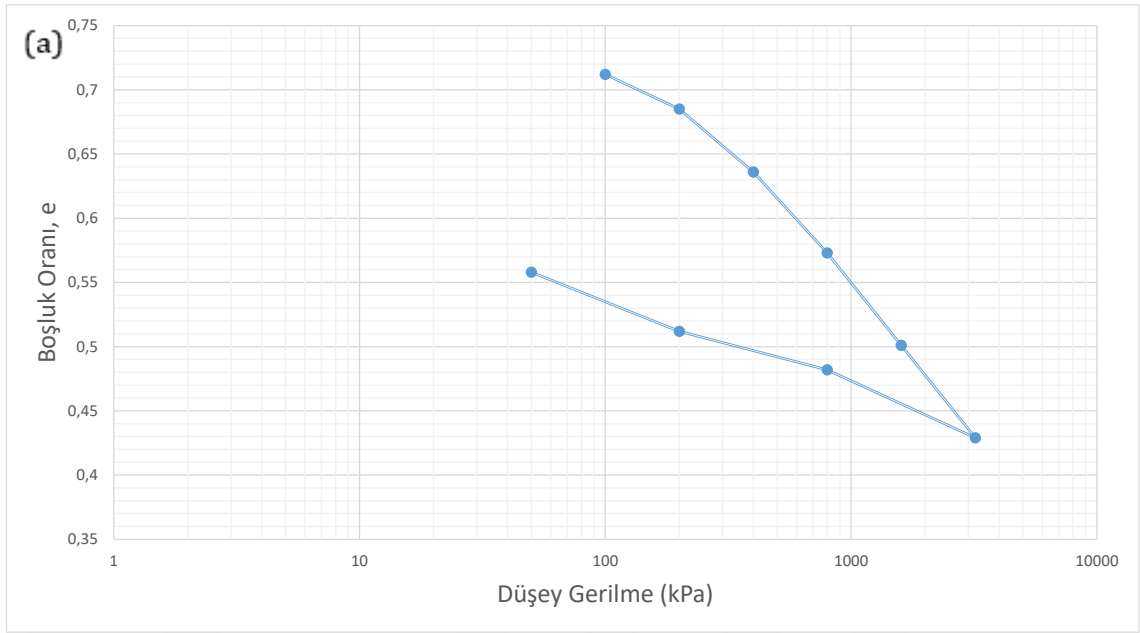
Konsolidasyon deneyinde numuneyi doygun hale getirmek için numunenin bulunduğu konsolidasyon hücresi üst yüzeyine kadar su ile doldurulmuştur. Numunelerin yüklenerek şişme basınçları ölçülmüş ve yük kademeleri arttırılarak 3200 kPa’a kadar yüklenmiştir. Her bir yükleme kademesinde 24 saat beklenmiş ve belirli zaman aralıklarında numunenin sıkışma miktarını gösteren komparatör

saatinden okumalar alınmıştır. Yükleme işlemi tamamlandıktan sonra çift yükleme kademesinde numuneler boşaltılmış ve 24 saat sonundaki şişme miktarları komparatör saatinden okunmuştur. Deney tamamlandıktan sonra numuneler 105 °C sıcaklıktaki etüve konularak deney sonundaki su muhtevaları belirlenmiştir.

Şekil 3.20’de deney sonucunda numunelere ait boşluk oranı-gerilme grafikleri gösterilmiştir. Şekil 3.20a’da birinci ve Şekil 3.20b’de ikinci numuneye ait boşluk oranı-gerilme grafiği verilmiştir. Her iki numune için yükleme-boşaltma eğrilerinden elde edilen parametreler Tablo 3.7’de gösterilmiştir. Tablo 3.8’de 1. Numune ve Tablo 3.9’da 2. Numune için her bir yükleme ve boşaltma kademesine ait hacımsal sıkışma katsayısı ve ödometrik modül değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.7** Numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

| Numune No: | 1     | 2     |
|------------|-------|-------|
| $G_s$      | 2,670 | 2,670 |
| $w_s$      | 0,200 | 0,230 |
| $e_0$      | 0,687 | 0,710 |
| $e_s$      | 0,534 | 0,610 |
| $C_c$      | 0,239 | 0,257 |
| $C_s$      | 0,076 | 0,075 |



**Şekil 3.20** Ödometre deney sonucunda elde edilen boşluk oranı-yük grafikleri (a) 1. Numune için (b) 2. Numune için

**Tablo 3.8** 1. Numune için hacımsal sıkışma katsayısı ve ödometrik modül

| Gerilme Aralığı (kPa) | $\Delta\sigma$ (kPa) | e     | $e_{ort}$ | $1+e$  | $\Delta e$ | $a_v$ (kPa <sup>-1</sup> ) | $m_v$ (kPa <sup>-1</sup> ) | $E_{oed}$ (MPa) |
|-----------------------|----------------------|-------|-----------|--------|------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
|                       | 0                    | 0,687 | -         | -      | -          | -                          | -                          | -               |
| 100-200               | 100                  | 0,66  | 0,6735    | 1,6735 | 0,027      | 0,00027                    | 0,00016005                 | 6,25            |
| 200-400               | 200                  | 0,612 | 0,636     | 1,636  | 0,048      | 0,00024                    | 0,00014226                 | 7,03            |
| 400-800               | 400                  | 0,55  | 0,581     | 1,581  | 0,062      | 0,000155                   | 9,1879E-05                 | 10,88           |
| 800-1600              | 800                  | 0,479 | 0,5145    | 1,5145 | 0,071      | 8,875E-05                  | 5,2608E-05                 | 19,01           |
| 1600-3200             | 1600                 | 0,408 | 0,4435    | 1,4435 | 0,071      | 4,4375E-05                 | 2,6304E-05                 | 38,02           |

**Tablo 3.9** 2. Numune için hacımsal sıkışma katsayısı ve ödometrik modül

| Gerilme Aralığı (kPa) | $\Delta\sigma$ (kPa) | e     | $e_{ort}$ | 1+e   | $\Delta e$ | $a_v$ (kPa <sup>-1</sup> ) | $m_v$ (kPa <sup>-1</sup> ) | $E_{oed}$ (MPa) |
|-----------------------|----------------------|-------|-----------|-------|------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
|                       | 0                    | 0,71  | -         | -     | -          | -                          | -                          | -               |
| 200-400               | 200                  | 0,64  | 0,675     | 1,675 | 0,07       | 0,00035                    | 0,00020468                 | 4,89            |
| 400-800               | 400                  | 0,6   | 0,62      | 1,62  | 0,04       | 0,0001                     | 5,848E-05                  | 17,1            |
| 800-1600              | 800                  | 0,564 | 0,582     | 1,582 | 0,036      | 4,5E-05                    | 2,6316E-05                 | 38              |
| 1600-3200             | 1600                 | 0,5   | 0,532     | 1,532 | 0,064      | 0,00004                    | 2,3392E-05                 | 42,75           |

Konsolidasyon deneyleri sonucunda numuneye ait analizlerde kullanılacak olan permeabilite değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3.10'da 1. Numune için ve Tablo 3.11'de 2. Numune için karekök-zaman metoduyla her bir yükleme kademesine ait konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) belirlenmiştir. Numunelere ait ortalama konsolidasyon katsayısı ile her yükleme kademesi için belirlenen permeabilite değerleri 1. Numune için Tablo 3.12'de ve 2. Numune için Tablo 3.13'te gösterilmiştir. Analizlerde her iki deney sonucundan elde edilen ortalama permeabilite değeri  $3,5 \times 10^{-11}$  (m/s) kullanılmış ve bu değer artırılarak permeabilitenin şev stabilitesine etkisi araştırılmıştır.

**Tablo 3.10** 1. Numuneye ait konsolidasyon katsayısı değerleri

| $\sigma$ (kPa) | x    | 1,15x | $\sqrt{t_{90}}$ (dk) | $t_{90}$ (dk) | $T_{90}$ | $H_d$ (m) | $c_v$ (m <sup>2</sup> /sn) |
|----------------|------|-------|----------------------|---------------|----------|-----------|----------------------------|
| 100            | 4,5  | 5,175 | 4                    | 16            | 0,848    | 0,02      | 8,8333E-08                 |
| 200            | 9,2  | 10,58 | 4,2                  | 17,64         | 0,848    | 0,02      | 8,0121E-08                 |
| 400            | 10,2 | 11,73 | 5,6                  | 31,36         | 0,848    | 0,02      | 4,5068E-08                 |
| 800            | 11,8 | 13,57 | 9                    | 81            | 0,848    | 0,02      | 1,7449E-08                 |
| 1600           | 13   | 14,95 | 10,6                 | 112,36        | 0,848    | 0,02      | 1,2579E-08                 |
| 3200           | 15,8 | 18,17 | 14,2                 | 201,64        | 0,848    | 0,02      | 7,0092E-09                 |

**Tablo 3.11** 2. Numuneye ait konsolidasyon katsayısı değerleri

| $\sigma$ (kPa) | x    | 1,15x  | $\sqrt{t_{90}}$ (dk) | $t_{90}$ (dk) | $T_{90}$ | $H_d$ (m) | $c_v$ (m <sup>2</sup> /s) |
|----------------|------|--------|----------------------|---------------|----------|-----------|---------------------------|
| 200            | 7,2  | 8,28   | 3,4                  | 11,56         | 0,848    | 0,02      | 1,22261E-07               |
| 400            | 12,6 | 14,49  | 5                    | 25            | 0,848    | 0,02      | 5,65333E-08               |
| 800            | 12,6 | 14,49  | 10,5                 | 110,25        | 0,848    | 0,02      | 1,28193E-08               |
| 1600           | 14,6 | 16,79  | 12,2                 | 148,84        | 0,848    | 0,02      | 9,49566E-09               |
| 3200           | 17,5 | 20,125 | 13,9                 | 193,21        | 0,848    | 0,02      | 7,31501E-09               |

**Tablo 3.12** 1. Numuneye için her bir yükleme kademesindeki permeabilite değerleri

| $\Delta P$ | $m_v$<br>( $\text{kPa}^{-1}$ ) | $c_v$<br>( $\text{m}^2/\text{sn}$ ) | $k$<br>( $\text{m}/\text{sn}$ ) |
|------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 100-200    | 0,00016005                     | 4,176E-08                           | 6,5566E-11                      |
| 200-400    | 0,00014226                     | 4,176E-08                           | 5,8281E-11                      |
| 400-800    | 9,1879E-05                     | 4,176E-08                           | 3,7639E-11                      |
| 800-1600   | 5,2608E-05                     | 4,176E-08                           | 2,1552E-11                      |
| 1600-3200  | 2,6304E-05                     | 4,176E-08                           | 1,0776E-11                      |

**Tablo 3.13** 2. Numuneye için her bir yükleme kademesindeki permeabilite değerleri

| Gerilme<br>Aralığı, $\Delta\sigma$<br>( $\text{kPa}$ ) | $m_v$<br>( $\text{kPa}^{-1}$ ) | $c_v$<br>( $\text{m}^2/\text{sn}$ ) | $k$<br>( $\text{m}/\text{sn}$ ) |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
|                                                        | 0,000204678                    | 4,1685E-08                          | 8,3699E-11                      |
| 400-800                                                | 5,84795E-05                    | 4,176E-08                           | 2,3957E-11                      |
| 800-1600                                               | 2,63158E-05                    | 4,176E-08                           | 1,0781E-11                      |
| 1600-3200                                              | 2,33918E-05                    | 4,176E-08                           | 9,5828E-12                      |

Çalışma kapsamında kullanılan zemin numunesinin mekanik ve fiziksel özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlendikten sonra analiz aşamasına geçilmiştir. Deneylerden elde edilen zemin parametreleri kullanılarak, limit denge analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen şev stabilite analizleri bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

## LİMİT DENGİ YÖNTEMİ İLE ŞEV STABİLİTE ANALİZİ

---

Çalışmada, daha önceki bölümde zemin özellikleri belirlenen şev kestinde yağış miktarı, permeabilite, yeraltı su seviyesi ve matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisi incelenmiştir. Analizler kapsamında, değişken parametrelerin şev stabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için limit denge yöntemlerini kullanarak analiz yapan GEOTSTUDIO programı kullanılmıştır. Analizler, yağış sızması GEOSTUDIO programının içerisinde yer alan SEEP/W modülü ve şev stabilitesi SLOPE/W modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 4.1 Limit Denge Yöntemi

Günümüzde bir şevin stabilitesinin tahmininde limit denge analizi ve sonlu elemanlar yöntemi olmak üzere iki farklı analiz metodu kullanılabilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde deformasyon analiziyle kayma yüzeyi belirlenirken, limit denge analizi yönteminde sayısız kayma yüzeyi için güvenlik sayıları belirlenir (Isakov ve Moryachkov, 2014). Limit denge yönteminde belirlenen en düşük güvenlik sayısına sahip kayma yüzeyi kritik kayma yüzeyi olarak ifade edilir. Bu analiz yönteminde düşey ve yatay yöndeki kuvvetlerin dengesi ve herhangi bir noktaya göre moment dengesi olmak üzere üç statik denge koşulu sağlanmalıdır. Limit denge yöntemlerinden bazıları tüm denge koşullarını kullanarak güvenlik sayısını hesaplarken diğer yöntemler denge koşullarından bazılarını kullanarak güvenlik sayısını hesaplamaktadır. Limit denge analiz yönteminde yer alan analiz yöntemleri sonsuz şev, logaritmik spiral, İsveç dairesi, basit dilim yöntemi, Basitleştirilmiş Bishop, kuvvet dengesi, Spencer, Morgenstern ve Price, Chen ve Morgenstern ve sarma olarak sıralanabilir (Duncan ve Wright, 2005).

## 4.2 GEOSTUDIO Programı

GEOSTUDIO programı geoteknik problemlerinin çözümünü esas alarak geliştirilen bir paket programdır. GEOSTUDIO paket programının içerisinde farklı geoteknik problemlerinin analizi için geliştirilmiş modüller (SLOPE/W, SIGMA/W, SEEP/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W) bulunmaktadır.

GEOSTUDIO programı ile çeşitli mühendislik yapılarında ve zeminlerde oturma, deformasyon, şev stabilitesi, donma/çözülme, deprem etkisi, zemin suyu akışı vb. mühendislik problemleri modellenenir ve analizleri gerçekleştirilebilir.

SLOPE/W, şev stabilitesi analizi için piyasadaki ilk geoteknik yazılım ürünüdür. SLOPE/W 1977 yılından beri piyasada yer almaktadır ve ilk kodları Profesör D. G. Fredlund tarafından Saskatchewan Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. İlk ticari sürüm ana bilgisayarlar kuruluş ve kullanıcılar yazılım büroları üzerinden erişebilmişlerdir. 1980'li yıllarda kişisel bilgisayarlarda kullanımı için kodları yeniden yazılmıştır. Kişisel bilgisayarların belleğinin az olması nedeniyle yeniden kodlandırma yapılması gerektiğinden ürün 1983 yılında PC-SLOPE olarak adlandırılarak yeniden piyasaya sürülmüştür. 80'li yıllardan sonra CAD benzeri bir grafiksel arayüz geliştirilmiş ve Microsoft Windows sistemine uyumlu hale getirerek SLOPE/W adıyla tekrar geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda diğer modüllerin geliştirilmesiyle program GEOSTUDIO adını almıştır (SLOPE, 2012).

Çalışma kapsamında yağış sızması SEEP/W modülü ve yağış sızması etkisindeki şev stabilitesi analizleri SLOPE/W modülü kullanılarak yapılmıştır.

### 4.2.1 SEEP/W Modülü

SEEP/W modülü suyun parçacıklı bir ortamda su akışının fiziksel süreçlerini matematiksel olarak benzeştirebilen sayısal bir modeldir. Modül temel olarak Steady-State ve Transient olmak üzere iki analiz yöntemi içermektedir. Steady-State kararlı durum olarak tanımlanmaktadır. Kararlı durum halinde modelin sınır koşulları tanımlanmakta ve bunların sürekli ve değişmez olduğu belirtilmektedir. Transient ise daima değişen durum olarak tanımlanmaktadır. Transient analizini bir örnek ile açıklamak gerekirse; bir rezervuarın hızla dolması durumunda baraj çekirdeğinin ıslanması için geçen süreyi veya zemin yüzeyine şiddetli bir yağış uygulanması

durumunda sızıntının barajın neresinde oluştuğunu öngermeyi sağlamaktadır (SEEP/W, 2012).

#### **4.2.2 SLOPE/W Modülü**

Şev stabilite analizlerinde kullanılan SLOPE/W modülü ile içerisindeki mevcut limit denge yöntemlerinden birini kullanarak şevin güvenlik sayısı elde edilebilmektedir. Programda Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer, Sarma gibi limit denge yöntemleri mevcuttur.

Çalışma kapsamında şev stabilite analizleri Bishop limit denge yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bishop limit denge yöntemi Profesör Bishop tarafından 1950'li yıllarda Londra'daki Imperial Koleji'nde geliştirilmiştir. Bishop limit denge yöntemi normal kesişen kuvvetleri göz önünde bulundururken kesişen kesme kuvvetlerini ihmal eder ve tüm moment dengesi sağlanır ancak genel yatay kuvvet dengesini sağlamaz. Bishop, dilim tabanındaki normal kuvvet için dilim kuvvetlerini düşey yönde toplayarak bir denklem geliştirmiştir. Böylece, taban normal kuvveti güvenlik sayısının bir fonksiyonu haline gelmiştir ve bu durumdan dolayı güvenlik sayısını hesaplamak için yinelemeli bir işlem gerekmektedir (SLOPE, 2012).

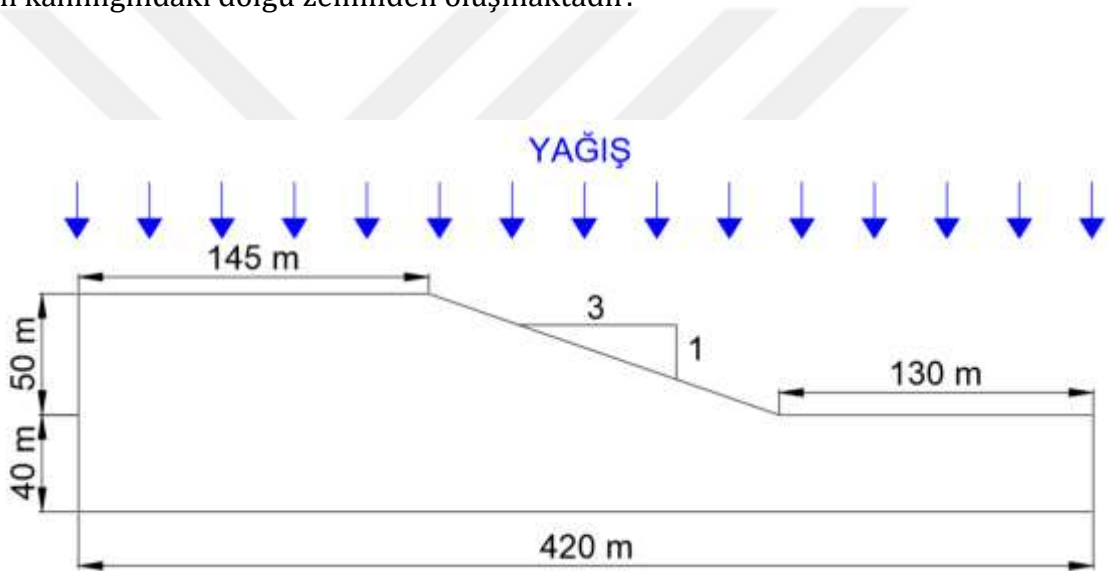
#### **4.3 Şev Stabilite Analizleri**

Çalışma kapsamında doygun olmayan şev kesitinde yağış sızmasının şev stabilitesine etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Yağışın şev içerisindeki sızması ile birlikte boşluk suyu basınçları değişimi SEEP/W modülü ile belirlenip şev stabilite analizlerini gerçekleştirmek için SLOPE/W modülü kullanılmıştır. Çalışmada, yeraltı su seviyesinin, permeabilitenin, yağış yoğunluğunun, dolgu zeminin kayma mukavemeti açısının, matrik emmenin ve buna bağlı olarak kayma mukavemetindeki artış miktarındaki değişimin şev stabilitesine olan etkisi parametrik olarak incelenmiştir.

Bu bölümde doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizlerinin GEOSTUDIO programında nasıl modellendiği anlatılmıştır.

#### 4.3.1 Model Geometrisinin Oluşturulması

Doygun olmayan zeminlerde suyun zemin içindeki sızması incelenirken boşluk suyu basınçlarının değışimi önem taşımaktadır. Doygun olmayan zeminlerde sızma süreci, zeminin permeabilitesine, matrik emme değerlerine ve hacimsel su içeriklerine bağı olarak değışiklik göstermektedir. Bu durumda doygun olmayan zeminlerde yağış sızma bu parametrelere bağı olarak yağış yoğunluğu ve yağış süresinden de etkilenmektedir. Çalışmada Şekil 4.1’de gösterilen doygun olmayan zemin özelliklerini taşıyan şev kesitinin stabilite analizleri SEEP/W modülü kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde kullanılan şev kesiti, 40 m yüksekliğinde ve 420 m uzunluğunda temel zemini ve temel zemini üzerinde şev eğimi 1/3 olan 50 m kalınlığındaki dolgu zeminden oluşmaktadır.



Şekil 4.1 Analizlerde kullanılan şev kesiti

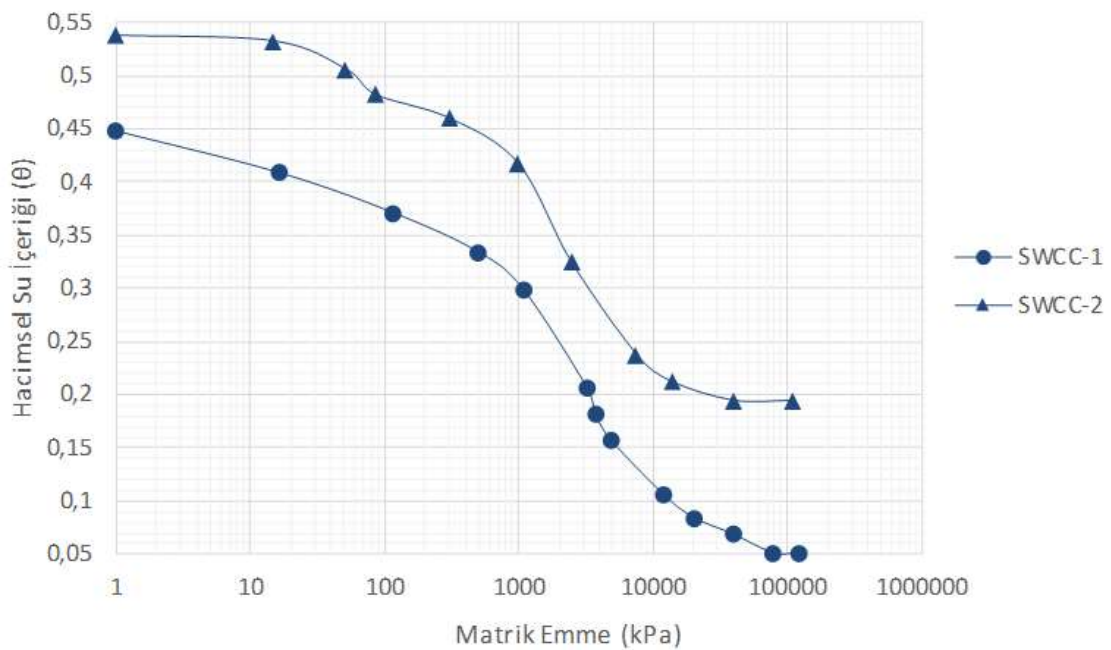
#### 4.3.2 Malzeme Parametrelerinin Tanımlanması

Suya doygun olmayan yüksek plastisiteli kil bir zemin ile inşa edilmiş bir dolgu sahasından alınan örselenmemiş numuneler üzerinde elek analizi, hidrometre, piknometre, kıvam limitleri, konsolidasyon ve üç eksenli konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deneyleri yapılarak dolgu zemine ait fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir. Deneyler sonucunda dolgu zeminine ait sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.1** Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar

| w<br>(%) | w <sub>L</sub><br>(%) | w <sub>p</sub><br>(%) | I <sub>p</sub><br>(%) | G <sub>s</sub> | Çakıl<br>(%) | Kum<br>(%) | Silt<br>(%) | Kil<br>(%) | Φ'<br>(°) | c'<br>(kPa) | k<br>(m/s)            |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|--------------|------------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------------------|
| 21       | 62                    | 32                    | 30                    | 2,67           | 2            | 9          | 51          | 38         | 24        | 2           | 3,5x10 <sup>-11</sup> |

Doygun olmayan zeminlerde önemli bir rolü olan matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisini incelemek amacıyla analizlerde iki farklı zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) kullanılmıştır. Numunelere ait zemin-su karakteristik eğrisi Kocaman (2018) tarafından elde edilmiş olup analizlerde bu eğriler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin-su karakteristik eğrileri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2** Analizlerde kullanılan dolgu zemine ait zemin-su karakteristik eğrileri (Kocaman, 2018)

Analizler, matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisini incelemek için SWCC-1 (m1) ve SWCC-2 (m2) matrik emme değerleri kullanılarak tekrarlanmıştır. Analizlerde kullanılan bu iki eğriden elde edilen matrik emmeye bağlı kayma mukavemetindeki artış miktarını gösteren açılar ( $\phi^b$ ) ve dolgu ile temel zeminine ait parametreler Tablo 4.2’de verilmiştir. Analizlerde, zeminin içsel sürtünme açısının 24° ve 22° olması durumları için şev stabilitesi ayrı ayrı incelenmiş ve kayma mukavemeti açısından değişimin şev stabilitesine etkisi değerlendirilmiştir.

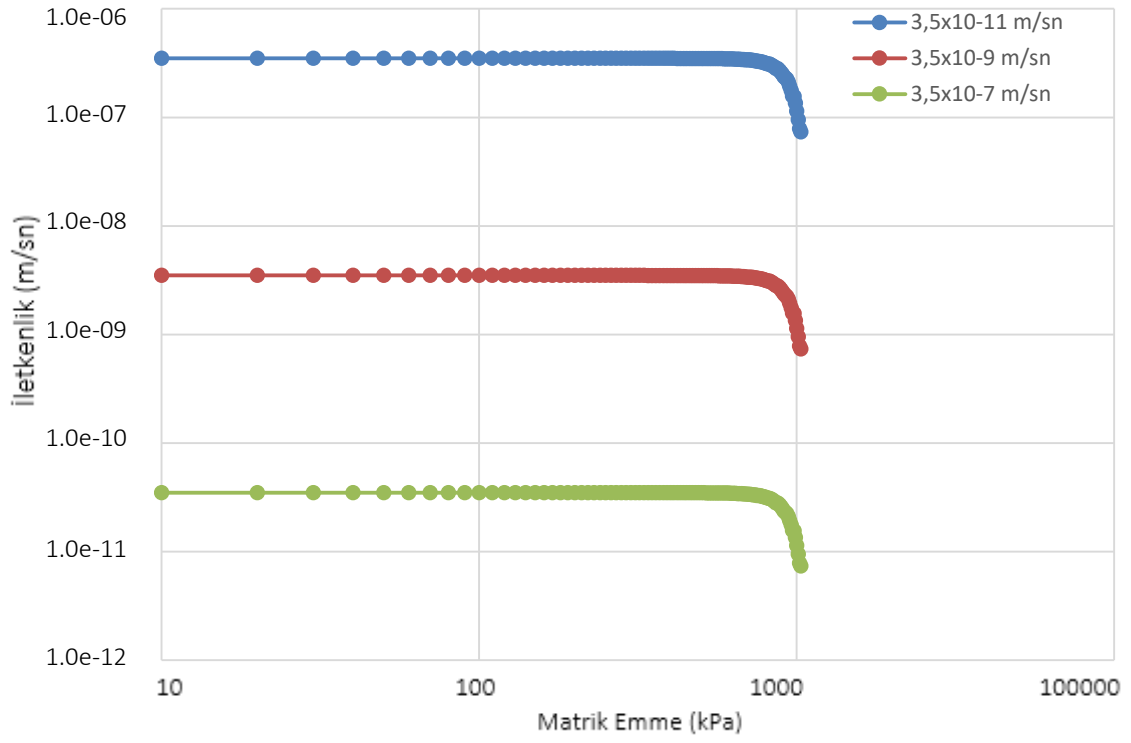
Çalışmada  $\phi^b$  parametresi için (4.1)'de verilen Vanapalli vd. (1996)'nin önerdiği denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tan\phi^b = \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) (\tan\phi') \right] \quad (4.1)$$

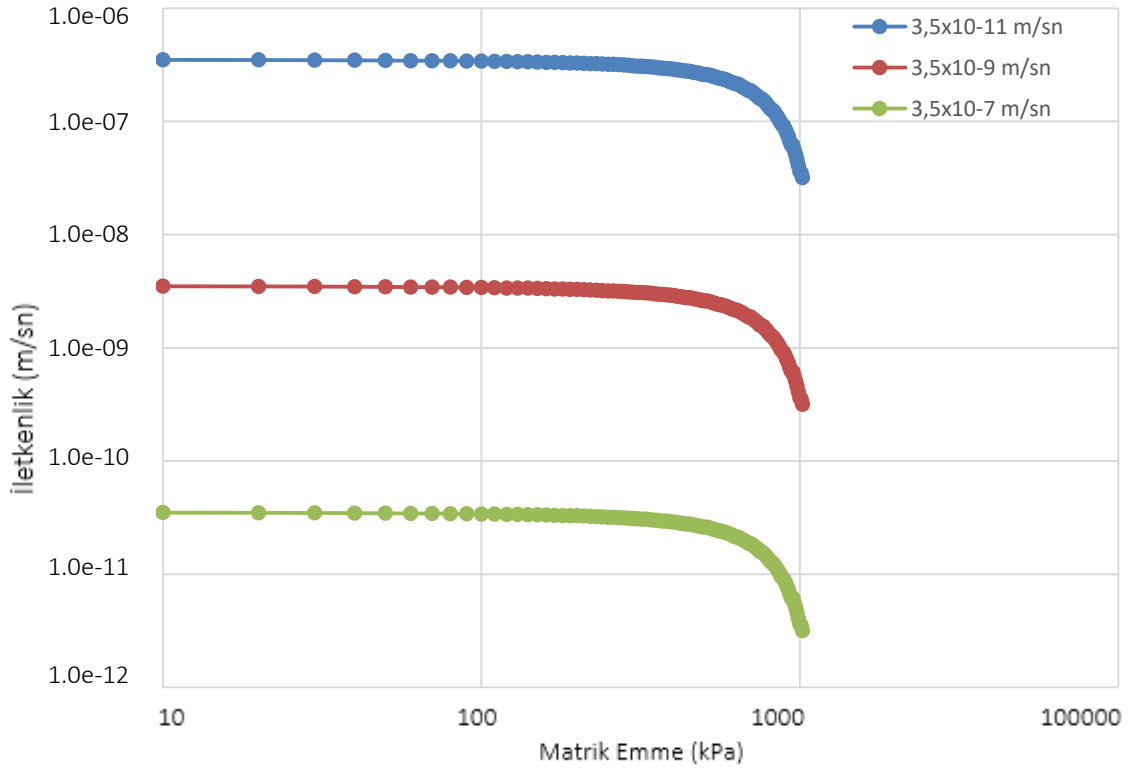
**Tablo 4.2** Analizlerde kullanılan dolgu ve temel zemine ait parametreler

| Zemin | $\Phi'$<br>(°) | SWCC-1 için<br>$\Phi^b$ (°) | SWCC-2<br>için $\Phi^b$ (°) | $c'$<br>(kPa) | $k$<br>(m/s)          |
|-------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|
| Dolgu | 24             | 10,87                       | 6,20                        | 2             | $3,5 \times 10^{-11}$ |
| Dolgu | 22             | 9,89                        | 5,80                        | 2             | $3,5 \times 10^{-11}$ |
| Temel | 15             | -                           | -                           | 40            | $5 \times 10^{-9}$    |

SEEP/W modülünde, malzeme parametreleri ve YASS tanımlanarak analizler için Steady-State aşamasında başlangıç koşulları oluşturulmuştur. Programda, şev kesiti modellendikten sonra temel ve dolgu zemine ait malzeme parametreleri tanımlanmıştır. SEEP/W modülünde malzeme parametrelerini tanımlamak için Saturated/Unsaturated ve Only Saturated malzeme modelleri bulunmaktadır. Analizlerde, dolgu zeminini tanımlamak için doymun olmayan zeminler için kullanılan Saturated/Unsaturated model seçilmiştir. Bu zemin modelinde doymun olmayan zemine ait zemin-su karakteristik eğrisi, zemin-su karakteristik eğrisine bağlı olarak hidrolik iletkenlik eğrisinin de tanımlandığı Van-Genuchten (1980) modeli ile tanımlanmıştır. Zeminin permeabilite değerinin de tanımlandığı bu aşamada, deneyler sonucunda elde edilen dolgu zemine ait mevcut permeabilite değerinin yanı sıra permeabilitenin şev stabilitesine olan etkisini değerlendirmek için analizler farklı permeabilite değerlerinde tekrarlanmıştır. Permeabilite değerleri  $3,5 \times 10^{-11}$  m/s (k1),  $3,5 \times 10^{-9}$  m/s (k2) ve  $3,5 \times 10^{-7}$  m/s (k3) olarak dikkate alınarak analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Temel zeminini için ise doymun zeminler için kullanılan Only Saturated malzeme modeli kullanılmıştır. Şekil 4.3'te SWCC-1 için Şekil 4.4'te ise SWCC-2 için hidrolik iletkenlik eğrileri verilmiştir.

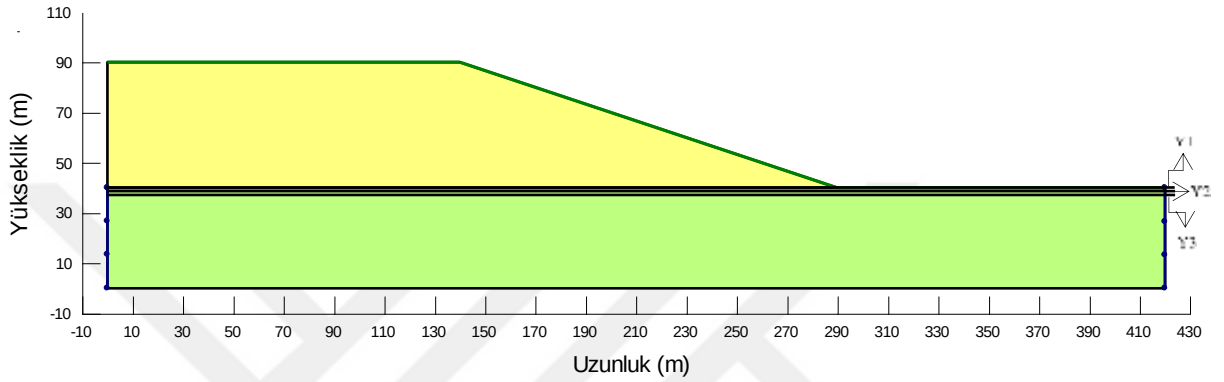


**Şekil 4.3** Farklı permeabilite değerlerinde SWCC-1 için hidrolik iletkenlik eğrileri



**Şekil 4.4** Farklı permeabilite değerlerinde SWCC-2 için hidrolik iletkenlik eğrileri

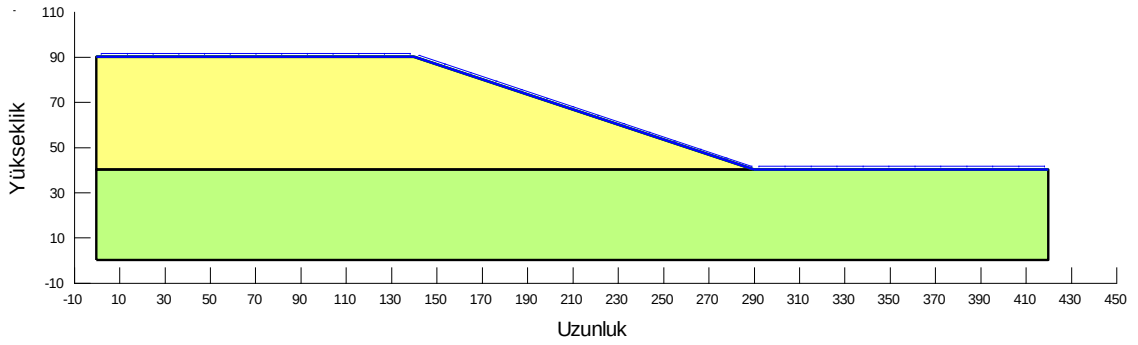
Yeraltı su seviyesi değişiminin boşluk suyu basıncına etkisini, dolayısıyla şev stabilitesine etkisini incelemek için üç farklı yeraltı su seviyesi durumu göz önünde bulundurulmuştur. Analizlerde yeraltı su seviyesi Y1, Y2 ve Y3 olarak, sırasıyla yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinde, zemin yüzeyinden 2 m aşağıda ve zemin yüzeyinden 4 m aşağıda olduğu durumlar için tekrarlanmıştır. Şekil 4.5'te yeraltı su seviyesinin farklı konumları şev kesiti üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 4.5** Analizlerde tanımlanan farklı yeraltı su seviyesi konumları

#### 4.3.3 Yağış Yoğunluğunun Tanımlanması

SEEP/W modülünde Steady-State aşamasında başlangıç koşulları oluşturulduktan sonra yağış modellenmesi için Transient aşamasına geçilmiştir. Transient aşamasında, Unit Flux sınır koşulunda yağış yoğunluğu programa tanımlanarak şev kesiti üzerine Şekil 4.6'da gösterildiği gibi yağış tanımlanmıştır. Transient aşamasında yağış yoğunluğunun yanı sıra boşluk suyu basıncının zamana bağlı olarak değişiminin analiz edilebilmesi için yağış süresi de tanımlanmıştır. Bu çalışmada, yağış süresi 1 ay olarak belirlenmiş ve analizler yağış yoğunluğunun şev stabilitesine etkisini değerlendirmek için farklı aylık yağış miktarlarında tekrarlanmıştır. Analizlerde aylık 100 mm (r1), 200 mm (r2) ve 400 mm (r3) olarak üç farklı yağış miktarı gözönünde bulundurulmuştur.

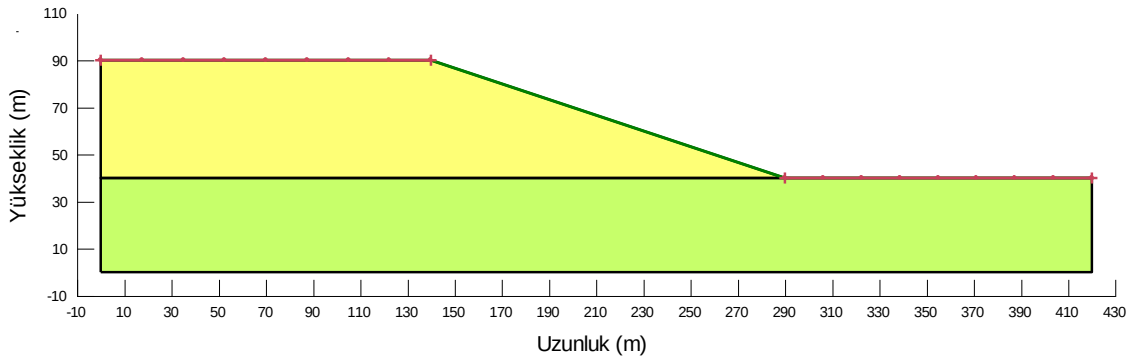


**Şekil 4.6** Analizlerde yağışın şev kesiti üzerine tanımlanması

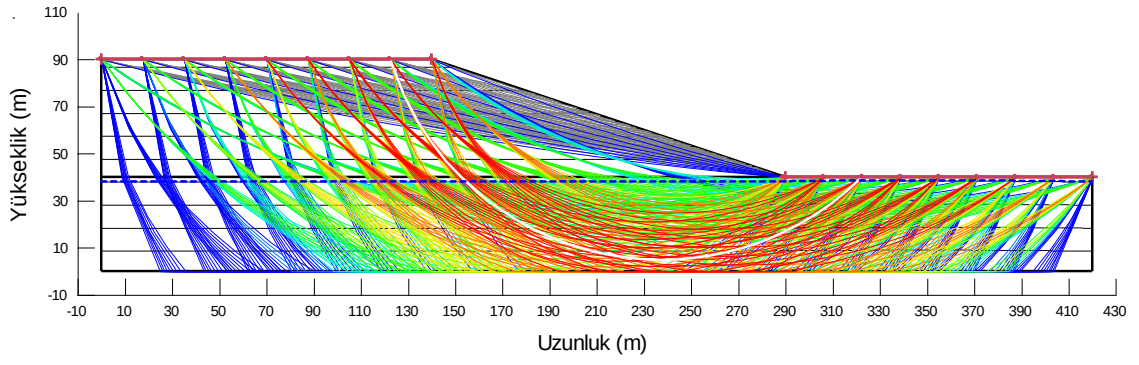
#### 4.3.4 Şev Stabilité Analizleri

SEEP/W modülünde Transient analizleri sonucunda belirlenen boşluk suyu basıncı değişimleri dikkate alınarak SLOPE/W modülünde şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada dolgu ve temel zemine ait malzeme parametreleri tanımlanmıştır. Dolgu zeminine ait parametrelerin tanımlanması aşamasında, doymun olmayan zeminler için geliştirilmiş olan zeminin matrik emme değerlerine bağlı olarak kayma mukavemeti açısındaki değişimi dikkate alan Special Mohr Cloumb malzeme modeli seçilmiştir. Temel zemini ise doymun zeminler için geliştirilmiş Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır.

Analizlerde kayma yüzeylerini belirlemek için Entry-Exit yöntemi kullanılmıştır. Şev stabilite analizlerinde seçilen başlangıç ve bitiş noktaları Şekil 4.7 ve Entry-Exit yöntemi ile oluşturulan birbirinden farklı kayma yüzeyleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7** Şev stabilite analizlerinde seçilen başlangıç ve bitiş noktaları



**Şekil 4.8** Entry-Exit yöntemi ile oluşturulan birbirinden farklı kayma yüzeyleri

Bu yöntemde Şekil 4.7’de gösterildiği gibi şevin üst ve alt yüzeyleri başlangıç ve bitiş noktaları olarak seçilmiştir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi Entry-Exit yöntemi ile oluşturulan birbirinden farklı birçok kayma yüzeyi için güvenlik sayıları elde edilmiştir. Analizler sonucunda en düşük güvenlik sayısına sahip kayma yüzeyi kritik kayma yüzeyi olarak belirlenmiştir.

### 5.1 Analizler Sonucunda Elde Edilen Güvenlik Sayısı Değişimleri

Çalışmada yağış sızmasının ve bununla birlikte yeraltı su seviyesi, permeabilite, kayma mukavemeti açısı ve matrik emme değişiminin şev stabilitesine olan etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Analizlerde, sadece şev stabilitesi üzerindeki etkisi değerlendirilen parametre değiştirilerek güvenlik sayısının değişimi irdelenmiştir. Tablo 5.1’de dolgu zeminin kayma mukavemeti açısının  $24^\circ$  olduğu durumda gerçekleştirilen kombinasyonlar ve analiz sonuçları, Tablo 5.2’de dolgu zeminin kayma mukavemeti açısının  $22^\circ$  olduğu durumda gerçekleştirilen kombinasyonlar ve analiz sonuçları gösterilmiştir.

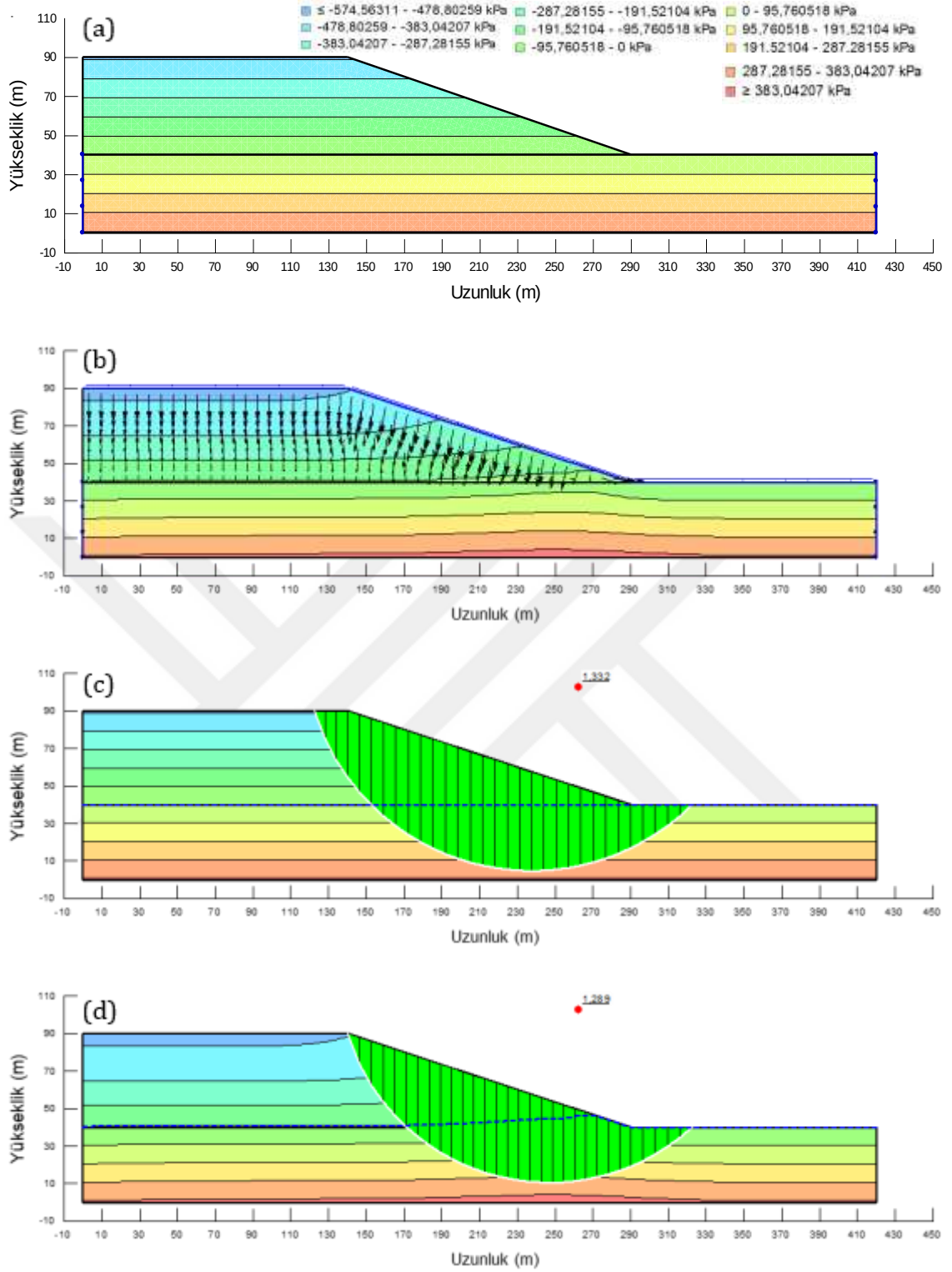
Şekil 5.1’de Y1k3r3m1 analizi için analiz aşamaları ve sonuçları gösterilmiştir. Burada yeraltı su seviyesi yüzeyde, dolgu zeminin permeabilitesi  $3,5 \times 10^{-07}$  m/s, yağış miktarı 400 mm ve analizlerde kullanılan zemin su karakteristik eğrisi ise SWCC-1’dir. Şekil 5.1a’da SEEP/W modülünde Steady-State aşamasında şevin başlangıç koşullarındaki boşluksuyu basıncı dağılımı, Şekil 5.1b’de SEEP/W modülünde Transient aşamasında yağışın şev kesiti üzerine tanımlanması ve boşluk suyu basıncı dağılımının değişimi, Şekil 5.1c’de SLOPE/W modülünde şev stabilite analizinin başlangıç durumundaki güvenlik sayısı ve Şekil 5.1d’de 1 ay sonundaki şev stabilite analizine ait güvenlik sayısı ve boşluk suyu basıncı dağılımındaki değişim gösterilmiştir. Şekil 5.1a’da boşluk suyu basıncı dağılım aralığı için verilen lejant bütün analizler için ortaktır.

**Tablo 5.1**  $\phi'=24^\circ$  için analiz kombinasyonları ve sonuçları

| <b>Analizler</b> | <b>Başlangıç<br/>GS</b> | <b>GS</b> | <b>Analizler</b> | <b>Başlangıç<br/>GS</b> | <b>GS</b> |
|------------------|-------------------------|-----------|------------------|-------------------------|-----------|
| Y1k1r1m1         | 1,332                   | 1,332     | Y1k1r1m2         | 1,312                   | 1,312     |
| Y1k1r2m1         |                         | 1,332     | Y1k1r2m2         |                         | 1,312     |
| Y1k1r3m1         |                         | 1,332     | Y1k1r3m2         |                         | 1,312     |
| Y1k2r1m1         |                         | 1,331     | Y1k2r1m2         |                         | 1,305     |
| Y1k2r2m1         |                         | 1,329     | Y1k2r2m2         |                         | 1,304     |
| Y1k2r3m1         |                         | 1,327     | Y1k2r3m2         |                         | 1,303     |
| Y1k3r1m1         |                         | 1,321     | Y1k3r1m2         |                         | 1,293     |
| Y1k3r2m1         |                         | 1,311     | Y1k3r2m2         |                         | 1,276     |
| Y1k3r3m1         |                         | 1,289     | Y1k3r3m2         |                         | 1,249     |
| Y2k1r1m1         | 1,368                   | 1,359     | Y2k1r1m2         | 1,345                   | 1,334     |
| Y2k1r2m1         |                         | 1,359     | Y2k1r2m2         |                         | 1,334     |
| Y2k1r3m1         |                         | 1,359     | Y2k1r3m2         |                         | 1,334     |
| Y2k2r1m1         |                         | 1,356     | Y2k2r1m2         |                         | 1,330     |
| Y2k2r2m1         |                         | 1,355     | Y2k2r2m2         |                         | 1,328     |
| Y2k2r3m1         |                         | 1,354     | Y2k2r3m2         |                         | 1,327     |
| Y2k3r1m1         |                         | 1,341     | Y2k3r1m2         |                         | 1,318     |
| Y2k3r2m1         |                         | 1,328     | Y2k3r2m2         |                         | 1,302     |
| Y2k3r3m1         |                         | 1,307     | Y2k3r3m2         |                         | 1,274     |
| Y3k1r1m1         | 1,401                   | 1,384     | Y3k1r1m2         | 1,377                   | 1,358     |
| Y3k1r2m1         |                         | 1,384     | Y3k1r2m2         |                         | 1,358     |
| Y3k1r3m1         |                         | 1,384     | Y3k1r3m2         |                         | 1,358     |
| Y3k2r1m1         |                         | 1,381     | Y3k2r1m2         |                         | 1,355     |
| Y3k2r2m1         |                         | 1,380     | Y3k2r2m2         |                         | 1,353     |
| Y3k2r3m1         |                         | 1,379     | Y3k2r3m2         |                         | 1,351     |
| Y3k3r1m1         |                         | 1,361     | Y3k3r1m2         |                         | 1,343     |
| Y3k3r2m1         |                         | 1,344     | Y3k3r2m2         |                         | 1,329     |
| Y3k3r3m1         |                         | 1,321     | Y3k3r3m2         |                         | 1,301     |

**Tablo 5.2**  $\phi'=22^\circ$  için analiz kombinasyonları ve sonuçları

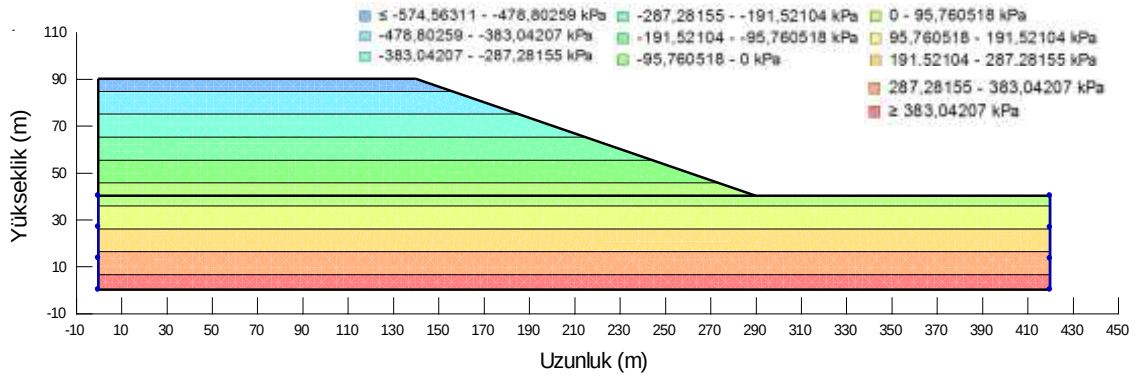
| <b>Analizler</b> | <b>Başlangıç<br/>GS</b> | <b>GS</b> | <b>Analizler</b> | <b>Başlangıç<br/>GS</b> | <b>GS</b> |
|------------------|-------------------------|-----------|------------------|-------------------------|-----------|
| Y1k1r1m1         | 1,311                   | 1,311     | Y1k1r1m2         | 1,288                   | 1,285     |
| Y1k1r2m1         |                         | 1,311     | Y1k1r2m2         |                         | 1,285     |
| Y1k1r3m1         |                         | 1,311     | Y1k1r3m2         |                         | 1,285     |
| Y1k2r1m1         |                         | 1,310     | Y1k2r1m2         |                         | 1,279     |
| Y1k2r2m1         |                         | 1,308     | Y1k2r2m2         |                         | 1,276     |
| Y1k2r3m1         |                         | 1,306     | Y1k2r3m2         |                         | 1,275     |
| Y1k3r1m1         |                         | 1,300     | Y1k3r1m2         |                         | 1,267     |
| Y1k3r2m1         |                         | 1,290     | Y1k3r2m2         |                         | 1,250     |
| Y1k3r3m1         |                         | 1,266     | Y1k3r3m2         |                         | 1,221     |
| Y2k1r1m1         | 1,346                   | 1,337     | Y2k1r1m2         | 1,325                   | 1,309     |
| Y2k1r2m1         |                         | 1,337     | Y2k1r2m2         |                         | 1,309     |
| Y2k1r3m1         |                         | 1,337     | Y2k1r3m2         |                         | 1,309     |
| Y2k2r1m1         |                         | 1,335     | Y2k2r1m2         |                         | 1,305     |
| Y2k2r2m1         |                         | 1,334     | Y2k2r2m2         |                         | 1,302     |
| Y2k2r3m1         |                         | 1,333     | Y2k2r3m2         |                         | 1,300     |
| Y2k3r1m1         |                         | 1,319     | Y2k3r1m2         |                         | 1,292     |
| Y2k3r2m1         |                         | 1,307     | Y2k3r2m2         |                         | 1,275     |
| Y2k3r3m1         |                         | 1,284     | Y2k3r3m2         |                         | 1,247     |
| Y3k1r1m1         | 1,379                   | 1,362     | Y3k1r1m2         | 1,357                   | 1,334     |
| Y3k1r2m1         |                         | 1,362     | Y3k1r2m2         |                         | 1,334     |
| Y3k1r3m1         |                         | 1,362     | Y3k1r3m2         |                         | 1,334     |
| Y3k2r1m1         |                         | 1,359     | Y3k2r1m2         |                         | 1,331     |
| Y3k2r2m1         |                         | 1,357     | Y3k2r2m2         |                         | 1,328     |
| Y3k2r3m1         |                         | 1,356     | Y3k2r3m2         |                         | 1,325     |
| Y3k3r1m1         |                         | 1,339     | Y3k3r1m2         |                         | 1,317     |
| Y3k3r2m1         |                         | 1,323     | Y3k3r2m2         |                         | 1,300     |
| Y3k3r3m1         |                         | 1,298     | Y3k3r3m2         |                         | 1,273     |



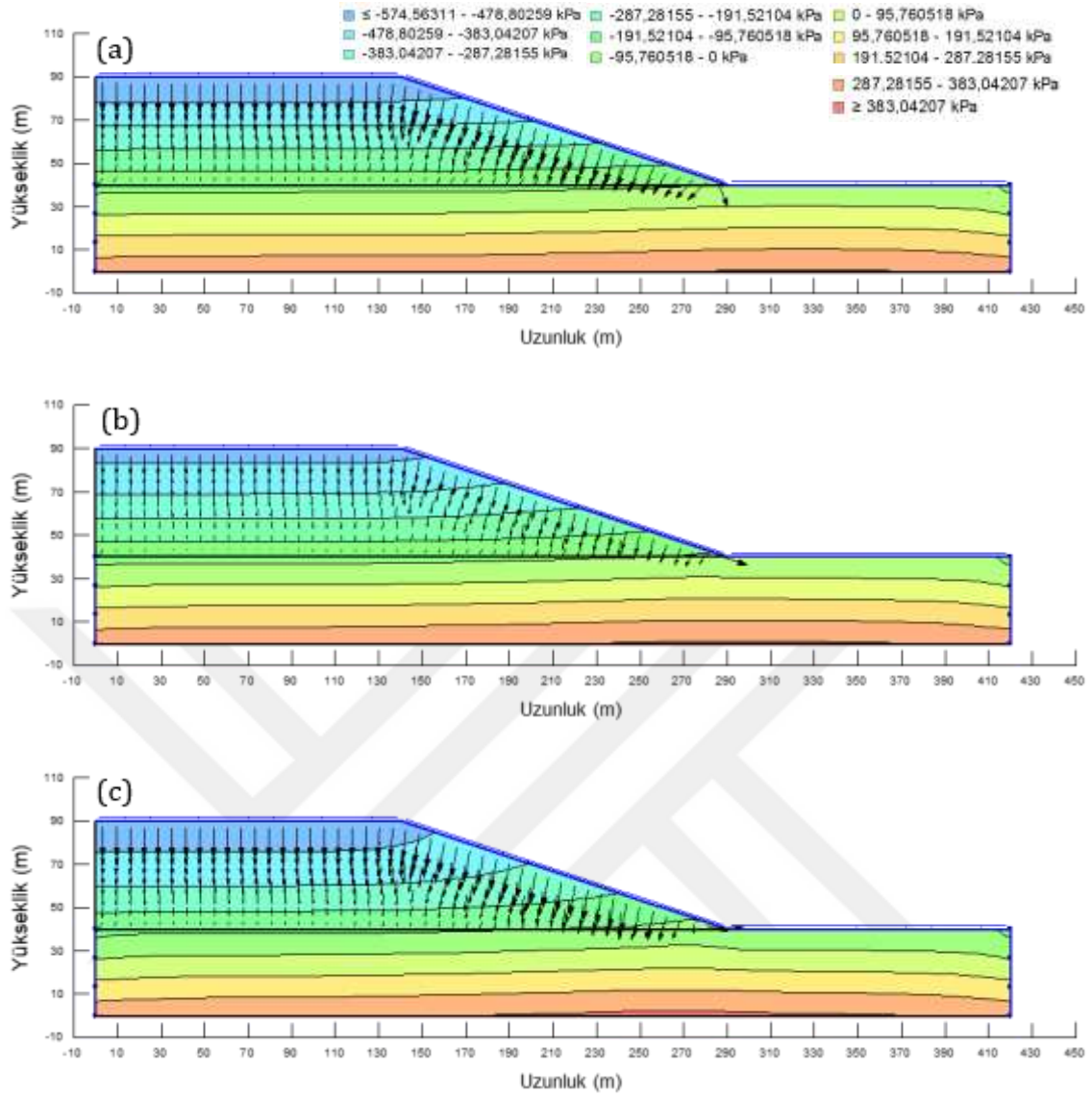
**Şekil 5.1** Y1k3r3m1 kombinasyonuna ait analiz sonuçları. (a) Başlangıç boşluksuyu basıncı dağılımı, (b) Şev kesitinde yağış sızması ve boşluk suyu basıncı değişimi, (c) Başlangıç şev stabilite analiz sonucu, (d) 1 ay sonundaki şev stabilite analiz sonucu.

## 5.2 Yağış Yoğunluğunun Şev Stabilitesine Etkisi

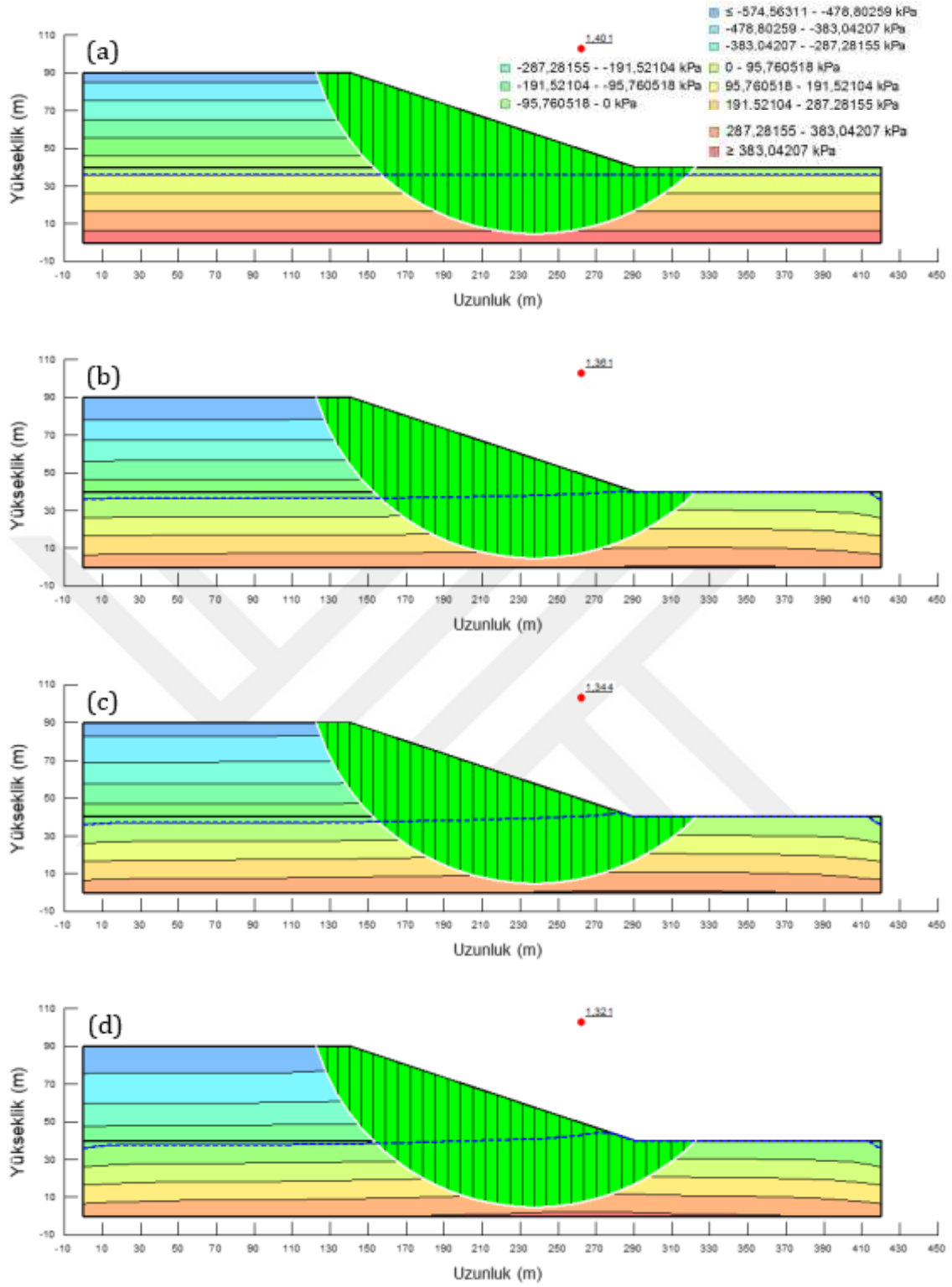
Analizlerde, diğer değişkenler sabit tutularak farklı yağış yoğunluklarının şev stabilitesine etkisi araştırılmıştır. Bunun için aylık 100 mm (r1), 200 mm (r2) ve 400 mm (r3) olmak üzere üç farklı yağış yoğunluğu dikkate alınmıştır. Yağış yoğunluğunun şev stabilitesine etkisini değerlendirmek için diğer değişkenlerin sabit tutularak farklı yağış yoğunlukları için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de Y3k3r1m1, Y3k3r2m1 ve Y3k3r3m1 analizleri için başlangıç koşullarındaki boşluk suyu basıncı dağılımı gösterilmiştir. Başlangıç koşullarındaki boşluk suyu basıncı dağılımları, her üç analiz için de tek değişkenin yağış yoğunluğu olmasından dolayı aynıdır. Şekil 3’te dolgu şevin farklı yağış yoğunluklarına maruz kalmasıyla boşluk suyu basıncının değişimi gösterilmiştir. Şekil 5.3a’de Y3k3r1m1, Şekil 5.3b’de Y3k3r2m1 ve Şekil 5.3’te Y3k3r3m1 analizleri için yağışın dolgu şevin içerisine sızması ve bunun sonucunda değişen boşluk suyu basıncı dağılımı gösterilmiştir. Şekil 5.4’te yağış yoğunluğunun değişiminin şev stabilitesine etkisi verilmiştir. Şekil 5.4a’da her üç analiz için de başlangıç şev stabilize analiz sonucu, Şekil 5.4b’de Y3k3r1m1, Şekil 5.4c’de Y3k3r2m1 ve Şekil 5.4d’de Y3k3r3m1 analizlerinin 1 ay sonundaki şev stabilize sonuçları gösterilmiştir.



**Şekil 5.2** Y3k3r1m1, Y3k3r2m1 ve Y3k3r3m1 analizleri için başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımları

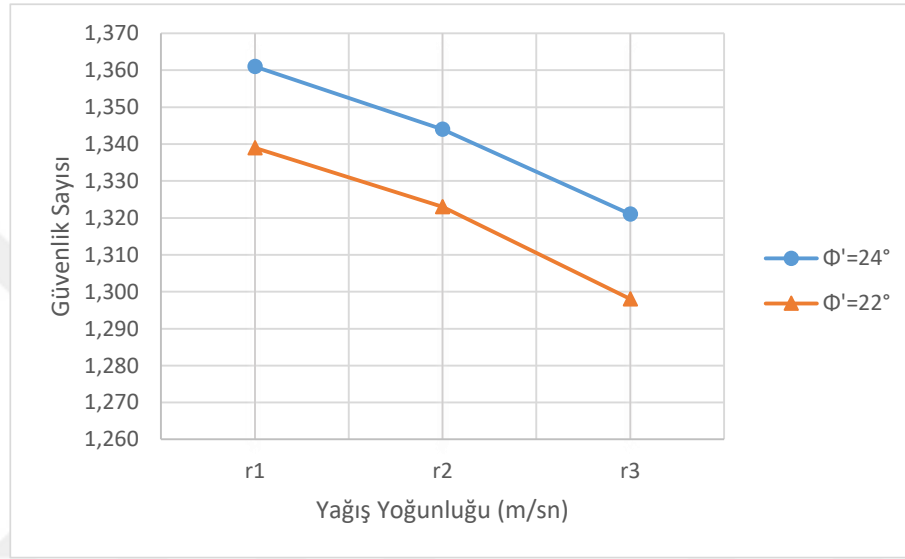


**Şekil 5.3** Yağışın şev içerisine sızması ve boşluk suyu basıncı değişimleri (a) Yağış miktarı r1 (b) Yağış miktarı r2 (c) Yağış miktarı r3



**Şekil 5.4** Şev stabilite analizi sonuçları a) Her üç analiz için başlangıç güvenlik sayısı (b) Yağış miktarı r1 (c) Yağış miktarı r2 (d) Yağış miktarı r3

Analizler sonucunda, yağış yoğunluğunun doygun olmayan bir dolgu şevin stabilitesini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Şekil 5.5'te yağış yoğunluğu ile şev güvenlik sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 5.5'te verilen her üç analizin başlangıç durumunda güvenlik sayısı 1,401 olarak belirlenmiştir. Şekilde görüleceği üzere yağış yoğunluğu arttıkça şev stabilize analizleri sonucunda güvenlik sayısında azalma görülmüştür.

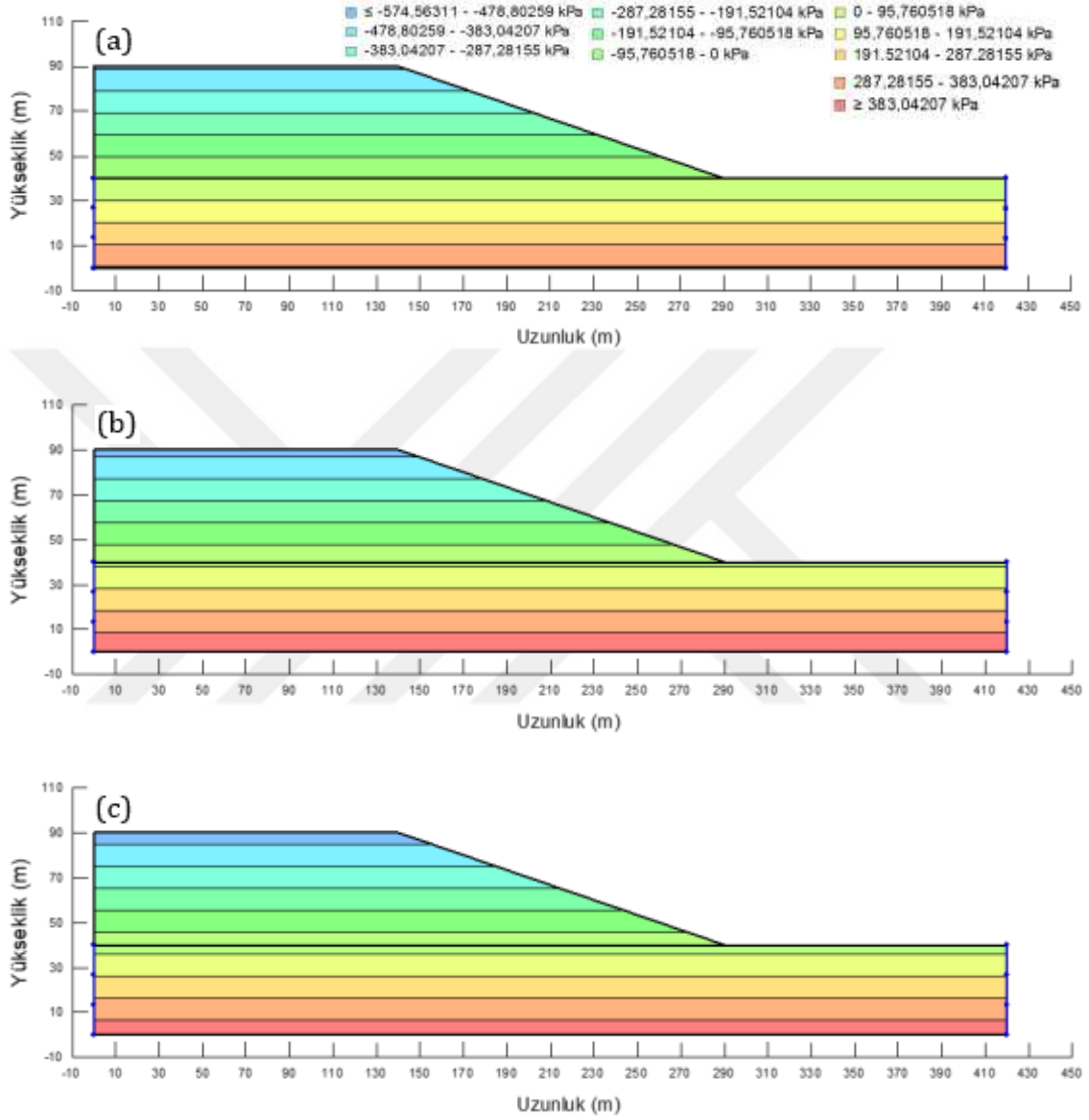


**Şekil 5.5** Güvenlik sayısı ve yağış yoğunluğu arasındaki ilişki

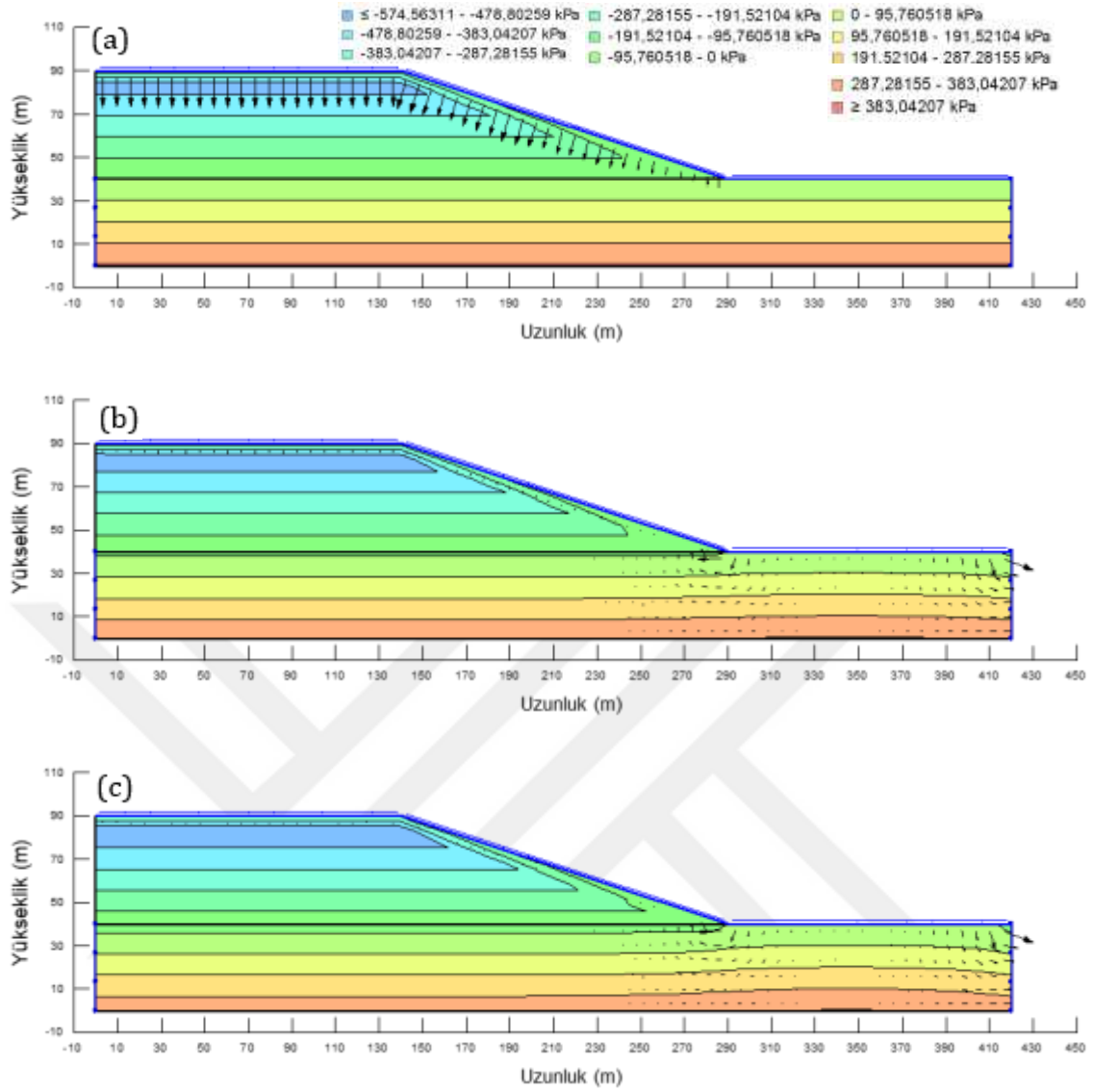
### 5.3 Yeraltı Su Seviyesinin Şev Stabilitesine Etkisi

Analizlerde diğer değişkenler sabit tutularak yeraltı suyu değişiminin şev stabilitesine etkisi incelenmiştir. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde (Y1), yüzeyden 2 m aşağıda (Y2) ve yüzeyden 4 m aşağıda (Y3) olması durumları için şev stabilitesi incelenmiştir. Şekil 5.6'da Y1k1r1m1, Y2k1r1m1 ve Y3k1r1m1 kombinasyonları için başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımları verilmiştir. Şekil 5.6a'da Y1, Şekil 5.6b'de Y2 ve Şekil 5.6c'de Y3 durumları için boşluk suyu basıncı dağılımları gösterilmiştir. Analizlerde yağış yoğunluğu, permeabilite ve matrik emme parametrelerinin aynı olmasına rağmen yeraltı su seviyesindeki değişiminin başlangıç koşullarını değiştirdiği ve dolayısıyla başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımlarının her üç analiz için de farklı olduğu görülmüştür. Farklı yeraltı su

seviyelerinde yağış etkisiyle şev içerisinde meydana gelen boşluk suyu basınçları değişimi Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Şekil 5.7a’da Y1, Şekil 5.7b’de Y2 ve Şekil 5.7c’de Y3 için yağış etkisiyle boluk suyu basıncı değişimleri gösterilmiştir.

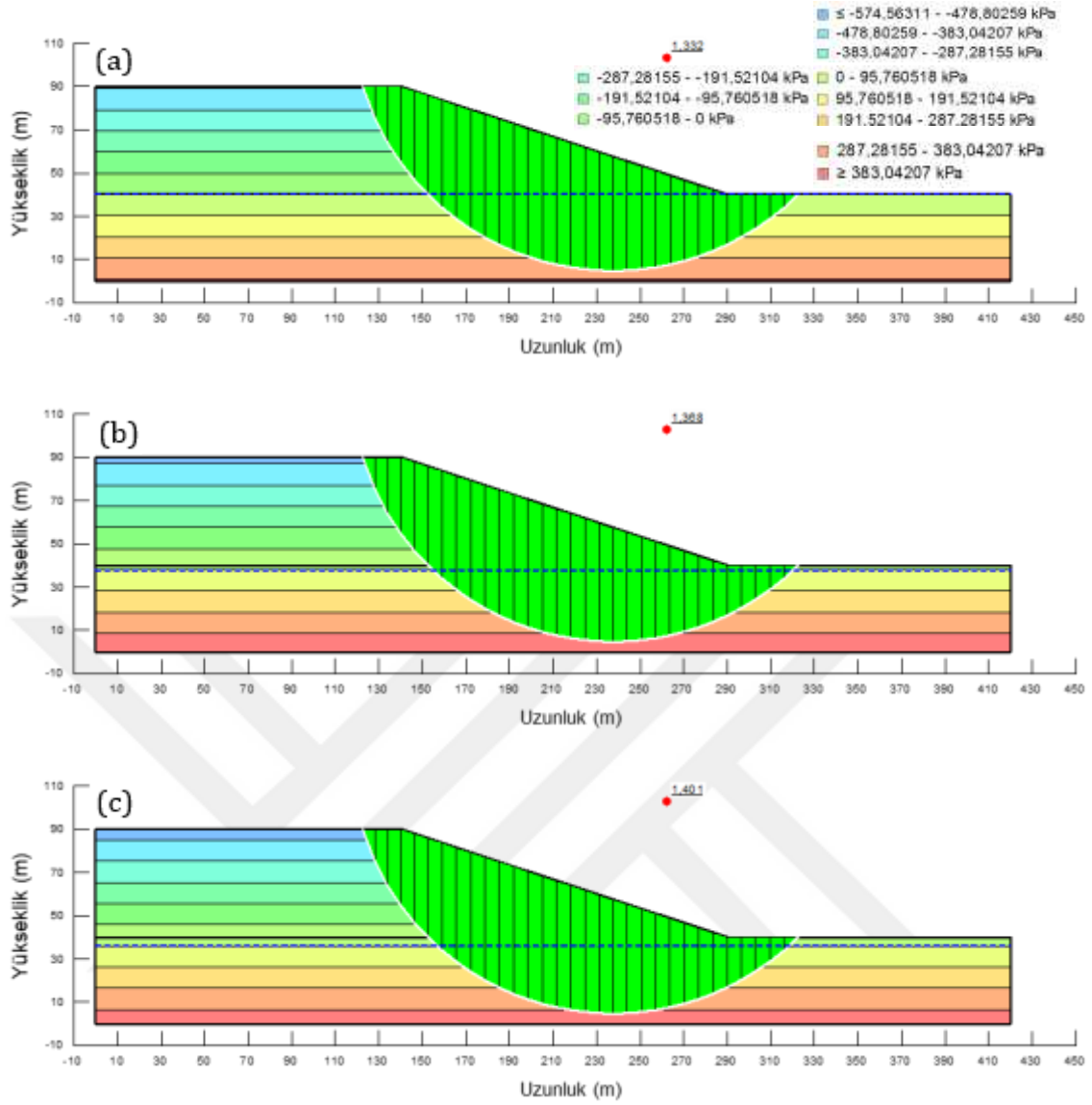


**Şekil 5.6** Farklı yeraltı su seviyeleri için başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımları  
(a) Yeraltı su seviyesi Y1 için (b) Yeraltı su seviyesi Y2 için (c) Yeraltı su seviyesi Y3 için



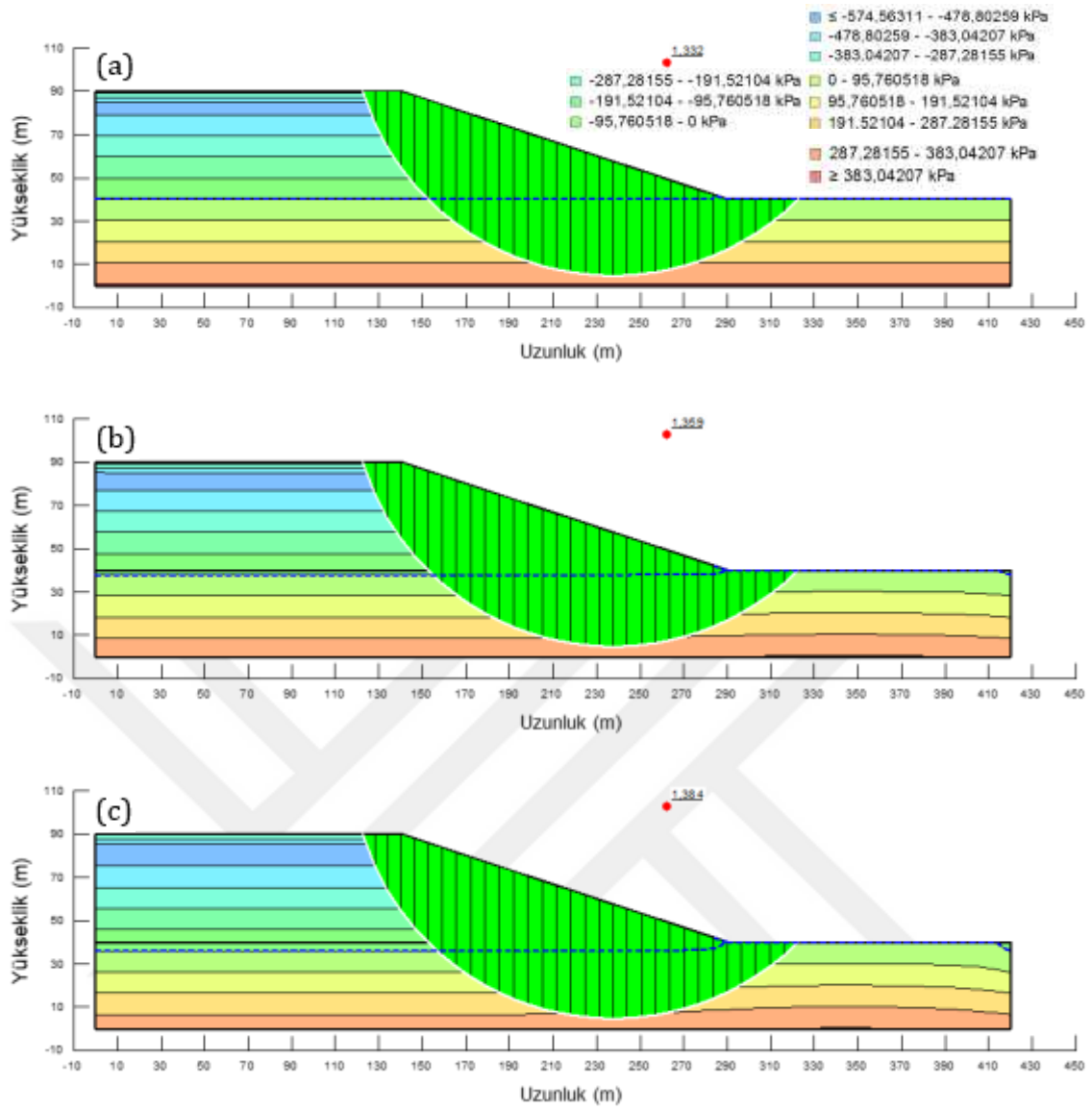
**Şekil 5.7** Farklı yeraltı su seviyelerine göre yağış etkisiyle boşluk suyu basıncı değişimleri (a) Y1 için (b) Y2 için (c) Y3 için

Başlangıç durumunda yeraltı su seviyesi konumlarına göre güvenlik sayılarının değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8a’da Y1, Şekil 5.8b’de Y2 ve Şekil 5.8c’de Y3 konumları için güvenlik sayıları gösterilmiştir. Her üç analizde de permeabilite, yağış yoğunluğu ve matrik emme değerlerinin aynı olmasına rağmen yeraltı su seviyesindeki farklılıktan dolayı başlangıç koşullarında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen güvenlik sayıları birbirinden farklıdır.



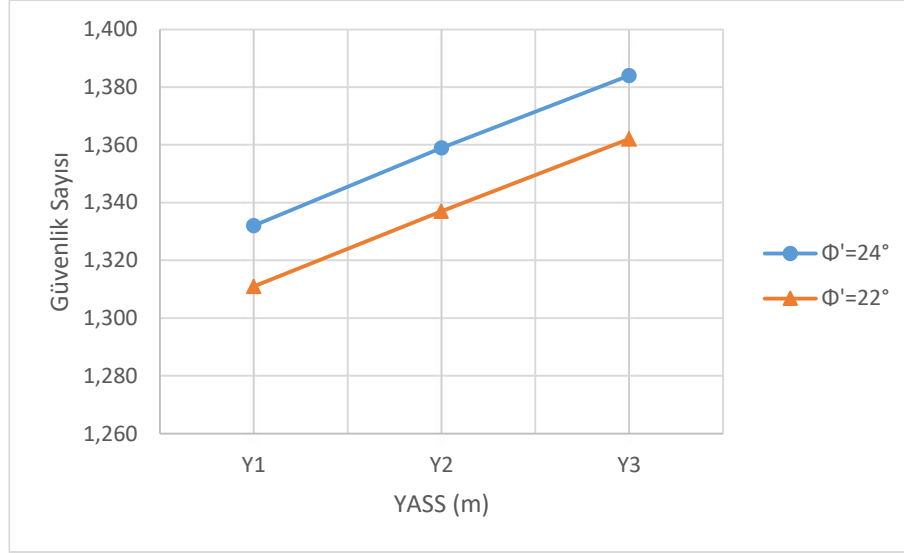
**Şekil 5.8** Başlangıç durumunda yeraltı su seviyesinin değişimine göre elde edilen güvenlik sayıları (a) Y1 için (b) Y2 için (c) Y3 için

Şekil 5.9'da 1 ay sonundaki şev stabilite analizi sonuçları Şekil 5.9a'da Y1, Şekil 5.9b'de Y2 ve Şekil 5.9c'de Y3 yeraltı su seviyesi konumları için şev stabilite analiz sonuçları gösterilmiştir. Yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle boşluk suyu basıncındaki artıştan dolayı yeraltı su seviyesinin temel zemin yüzeyinde olduğu durumda incelenen analizlerde güvenlik sayısı en düşüktür.



**Şekil 5.9** Farklı yeraltı su seviyeleri için şev stabilite analizi sonuçları (a) Y1 için (b) Y2 için (c) Y3 için

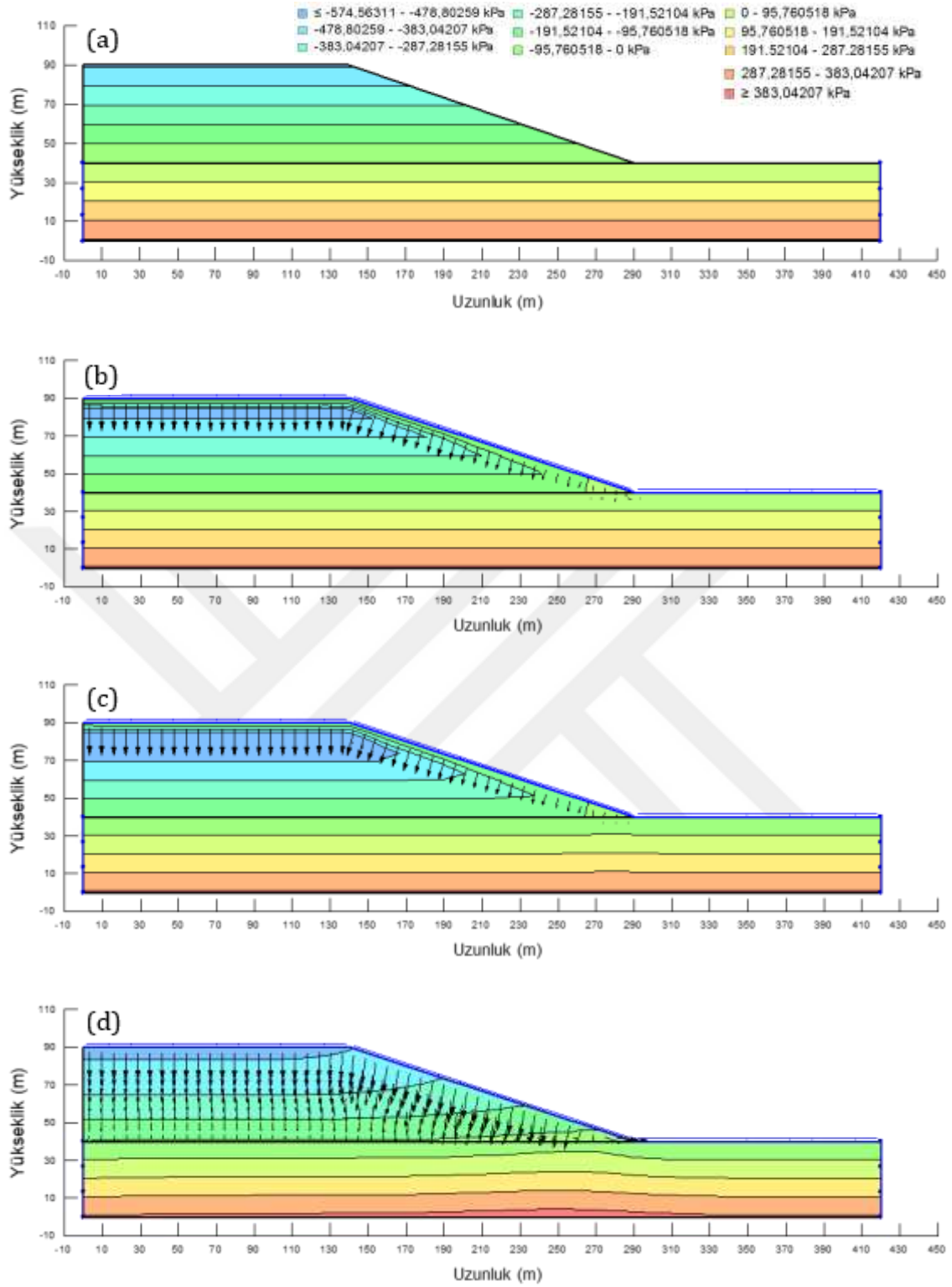
Şekil 5.10'da yeraltı su seviyesinin konumu ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Yeraltı su seviyesi azaldıkça güvenlik sayısının arttığı görülmektedir.



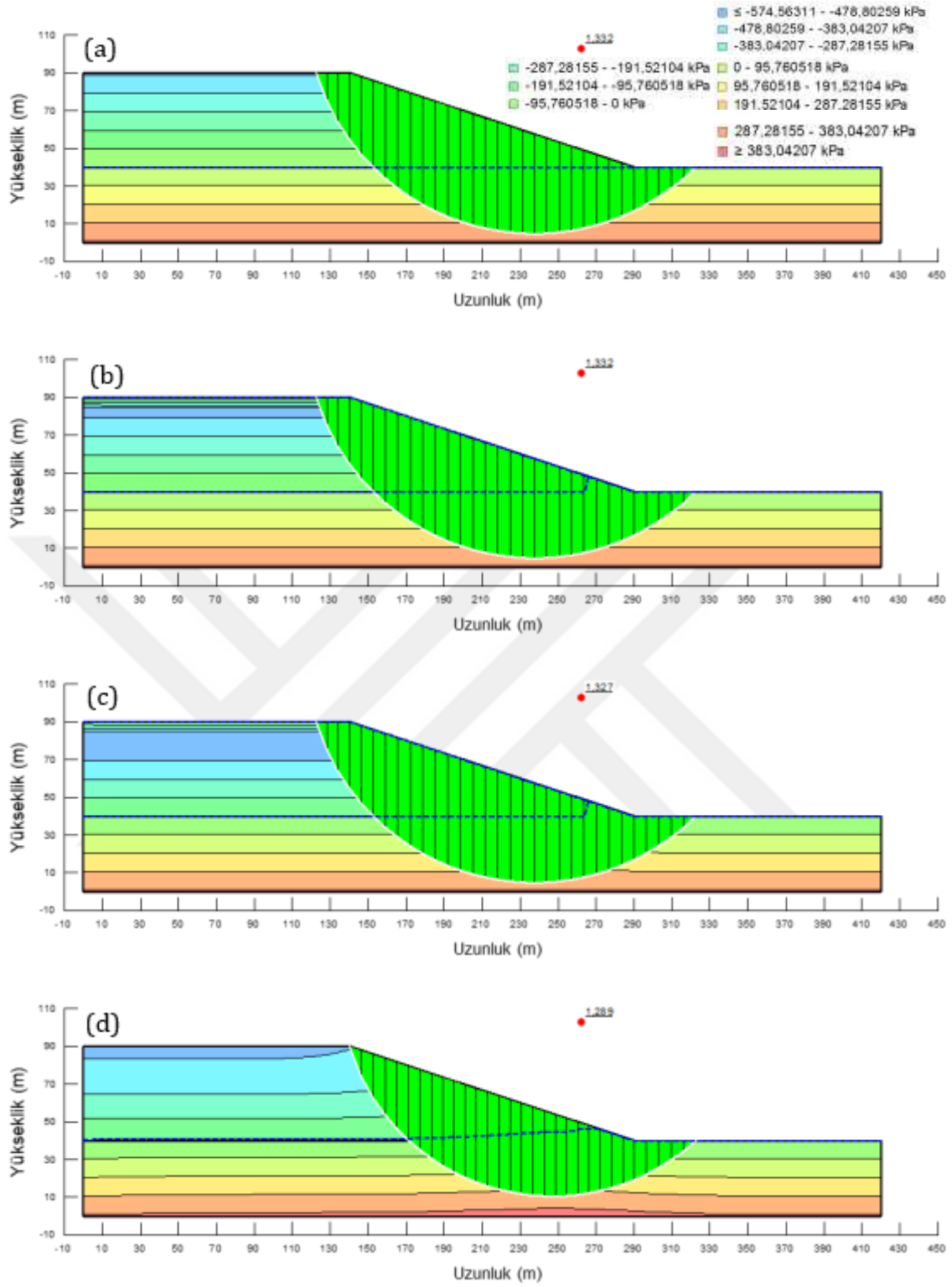
**Şekil 5.10** Yeraltı su seviyesi ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki

#### 5.4 Zeminin Permeabilitesinin Şev Stabilitesine Etkisi

Zeminin permeabilitesi şev stabilitesinde incelenen en önemli parametrelerden biridir. Zeminin permeabilitesine bağlı olarak şev içerisine sızan su boşluk suyu basınçlarını değiştirmekte ve dolayısıyla şev stabilitesine önemli ölçüde etki etmektedir. Bu nedenle permeabilitenin şev stabilitesine etkisini değerlendirmek amacıyla, diğer parametreler sabit tutularak zeminin permeabilite değerleri değiştirilmiştir. Çalışmada,  $3,5 \times 10^{-11}$  m/s (k1),  $3,5 \times 10^{-9}$  m/s (k2) ve  $3,5 \times 10^{-7}$  m/s (k3) olmak üzere üç farklı permeabilite değerinde analizler tekrarlanmış ve permeabilitenin şev stabilitesine etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 5.11'de başlangıç boşluk suyu basıncı değerleri ve yağışın dolgu içerisine sızmasıyla meydana gelen boşluk suyu basıncı değişimleri gösterilmiştir. Şekil 5.11a'da her üç analiz için de başlangıç boşluk suyu basıncı durumu, Şekil 5.11b'de Y1k1r3m1 analizi, Şekil 5.11c'de Y1k2r3m1 ve Şekil 5.11d'de Y1k3r3m1 analizi için dolgu içerisine yağış sızması ile değişen boşluk suyu basıncı dağılımı verilmiştir. Şekil 5.12'de şev stabilite analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.12a'da her üç analiz için de başlangıç koşullarında elde edilen güvenlik sayısı, Şekil 5.12b'de Y1k1r3m1 analizi, Şekil 5.12c'de Y1k2r3m1 analizi ve Şekil 5.12d'de ise Y1k3r3m3 analizi için 1 ay sonundaki şev stabilite analizi sonuçları verilmiştir.

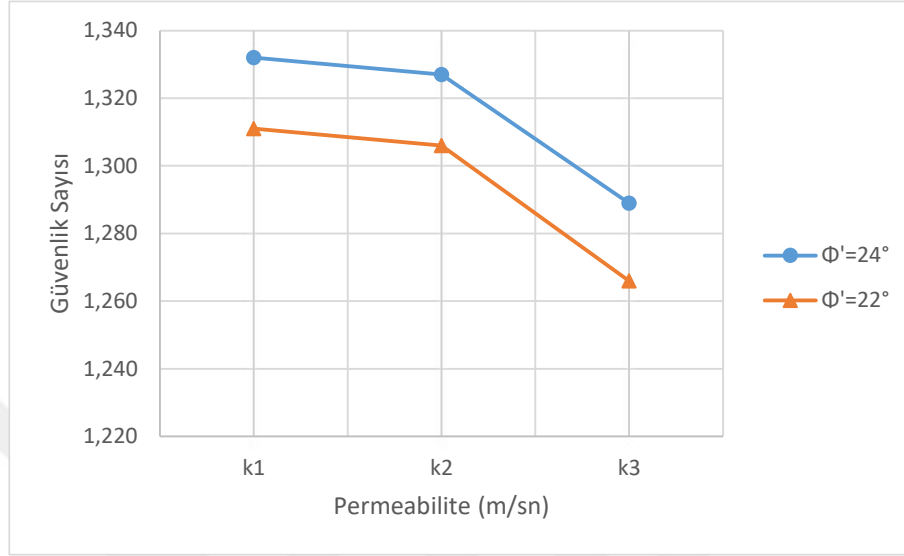


**Şekil 5.11** Başlangıç koşullarında ve permeabilite etkisiyle yağışla birlikte değişen boşluk suyu basıncı dağılımları (a) Y1k1r3m1, Y1k2r3m1 ve Y1k3r3m1 analizleri için (b) Y1k1r3m1 analizi için (c) Y1k2r3m1 analizi için (d) Y1k3r3m1 analizi için



**Şekil 5.12** Şev stabilite analizi sonuçları (a) Y1k1r3m1, Y1k2r3m1 ve Y1k3r3m1 analizleri için (b) Y1k1r3m1 analizi için (c) Y1k2r3m1 analizi için (d) Y1k3r3m1 analizi için

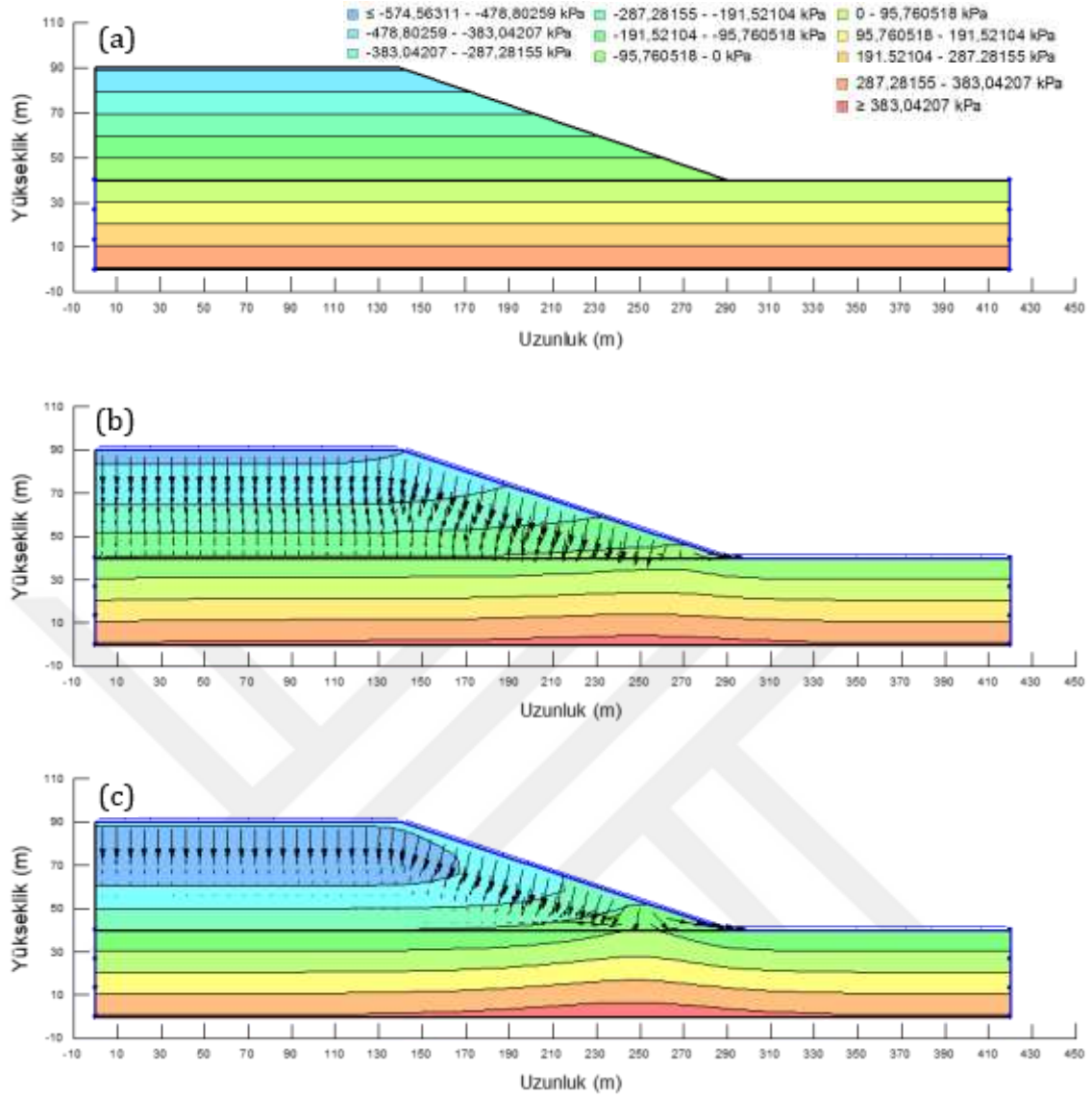
Zeminin permeabilitesi ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Zeminin permeabilitesi arttıkça güvenlik sayısının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 5.13** Zeminin permeabilitesi ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki

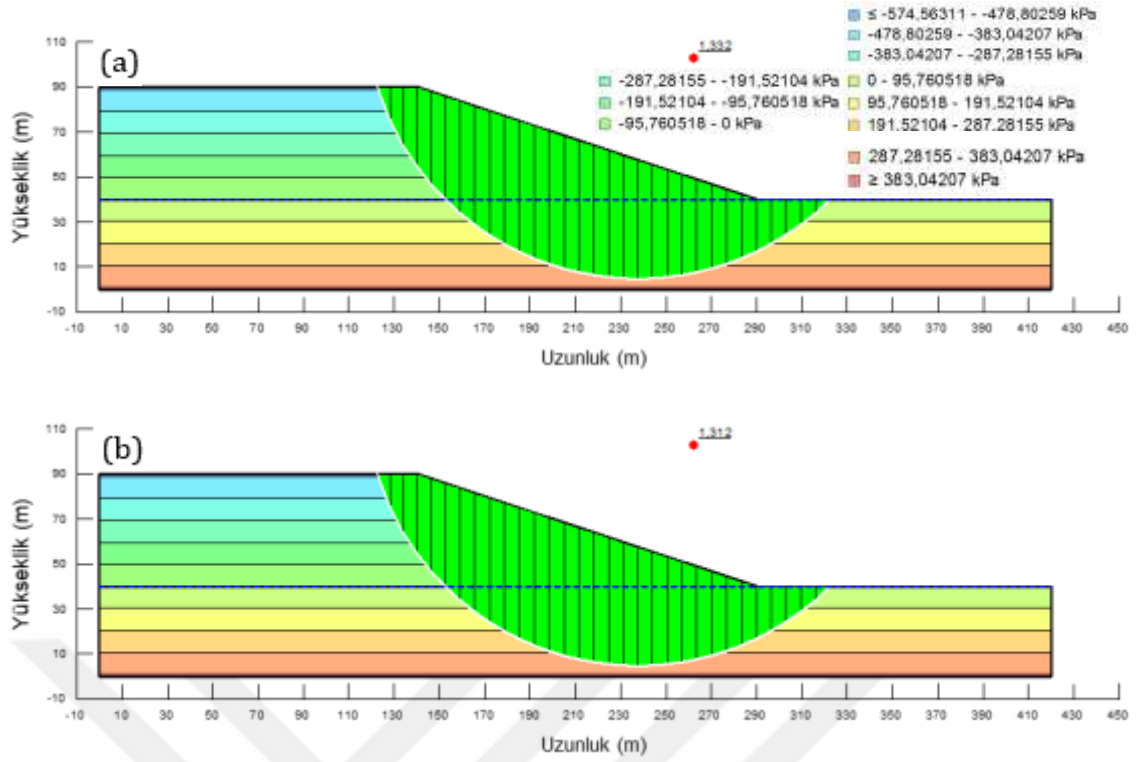
### 5.5 Zeminin Matrik EmmeDeğişiminin Şev Stabilitesine Etkisi

Doygun olmayan zeminlerin davranışında matrik emme kavramı önemli bir rol oynamaktadır. Zeminin zemin-su karakteristik eğrisinin değişimi ile matrik emme değerleri değişmektedir. Kocaman (2018)'in yapmış olduğu çalışmasından alınan iki farklı zemin-su karakteristik eğrisi analizler sırasında programa tanımlanarak matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisi incelenmiştir. Analizlerde diğer parametreler sabit tutularak SWCC-1 (m1) ve SWCC-2 (m2) için şev stabilite analizleri gerçekleştirilerek matrik emmenin stabiliteye etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 5.14'te başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı ve yağışın şev içerisine sızmasıyla birlikte değişen boşluk suyu basıncı dağılımı gösterilmiştir. Her iki analiz için de başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı Şekil 5.14a'da, yağışın sızmasıyla boşluk suyu basıncı değişimleri Şekil 5.14b'de Y1k3r3m1 analizi ve Şekil 5.14c'de Y1k3r3m2 analizi için verilmiştir.



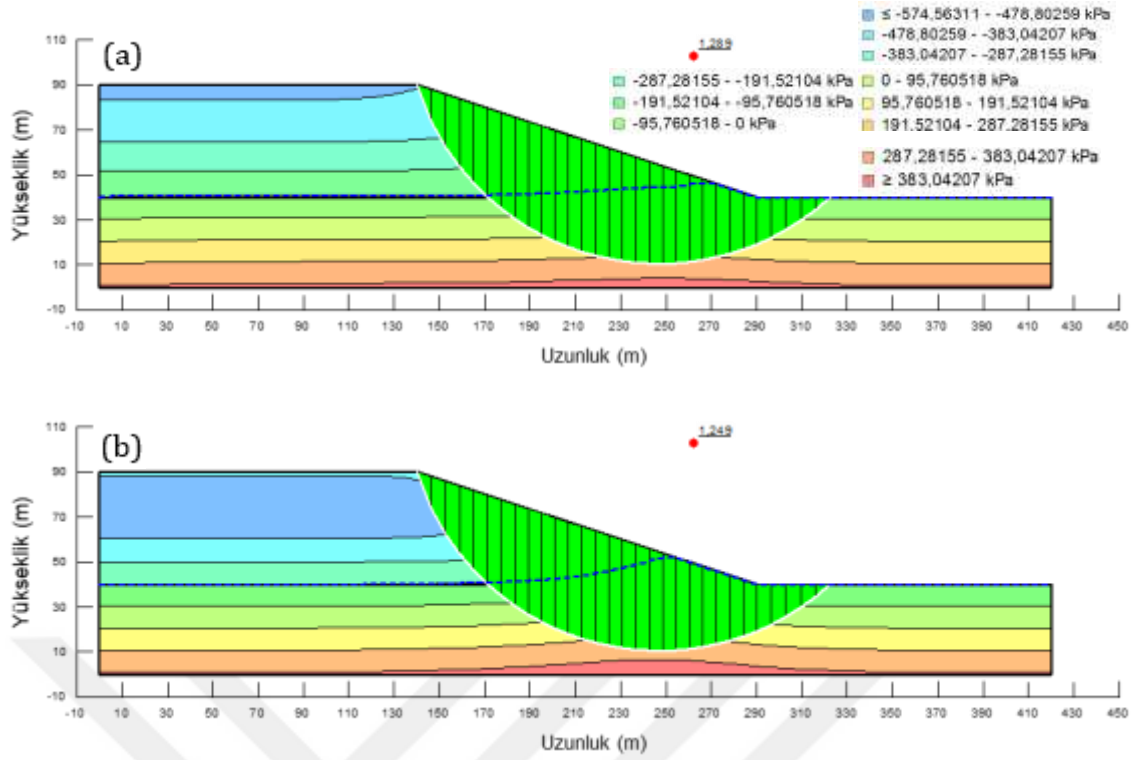
**Şekil 5.14** Başlangıç koşullarında ve matrik emme etkisiyle yağışla birlikte değişen boşluk suyu basıncı değerleri (a) Y1k3r3m1 ve Y1k3r3m2 analizleri için (b) Y1k3r3m1 analizi için (c) Y1k3r3m2 analizi için

Şekil 5.15'te şev tabilite analizlerinde başlangıç durumunda güvenlik sayıları gösterilmiştir. Şekil 5.15a'da Y1k3r3m1 ve Şekil 5.15b'de Y1k3r3m2 analizleri için başlangıç durumunda güvenlik sayıları verilmiştir.



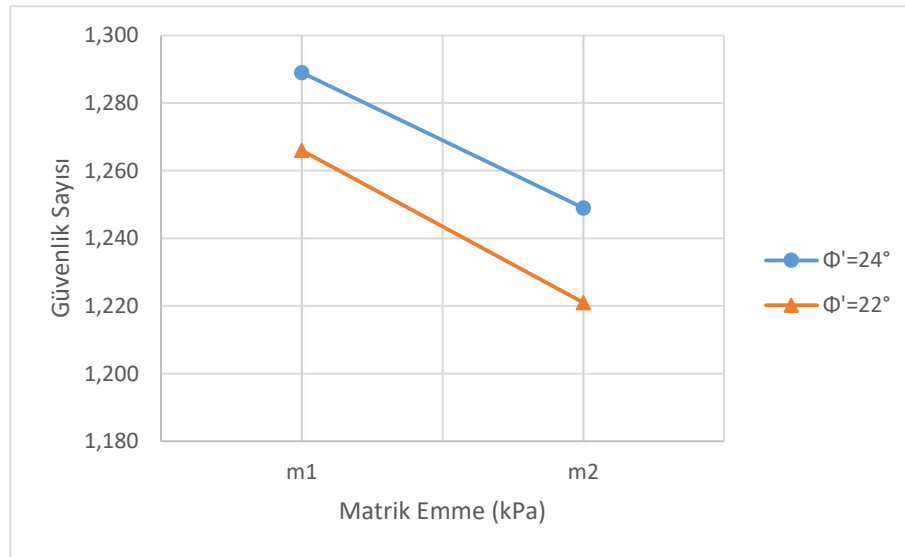
**Şekil 5.15** Başlangıç koşullarında güvenlik sayıları (a) Y1k3r3m1 analizi için (b) Y1k3r3m2 analizi için

İncelenen kombinasyonlarda her iki matрик emme değeri için 1 ay sonundaki şev stabilite analiz sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekil 5.16a'da Y1k3r3m1 ve Şekil 5.16b'de Y1k3r3m2 analizleri için güvenlik sayıları gösterilmiştir.



**Şekil 5.16** Şev stabilite analiz sonuçları (a) Y1k3r3m1 analizi için (b) Y1k3r3m2 analizi için

Analizler sonucunda zeminin matrik emme değeri ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki Şekil 5.17’de verilmiştir. Zeminin matrik emme değeri arttıkça güvenlik sayısının azaldığı görülmektedir.



**Şekil 5.17** Matrik emme ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki

## 5.6 Değerlendirme

Çalışma kapsamında doymun olmayan zemin özelliklerine sahip bir şev kesitinde, şev stabilitesine etki eden değişken parametrelerin şev stabilitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için her bir analiz sonucuna göre Güvenlik Sayısı Azaltma Katsayısı ( $GS_R$ ) tanımlanmıştır. Güvenlik Sayısı Azaltma Katsayısı her bir analiz için (7.1)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Burada ifade edilen Analiz Sonu GS, sızma sonucu elde edilen güvenlik sayısıdır.

$$GS_R = \frac{\text{Başlangıç GS} - \text{Analiz Sonu GS}}{\text{Başlangıç GS}} \times 100 \quad (7.1)$$

Her bir analiz için  $GS_R$  değerleri,  $\phi' = 24^\circ$  için Tablo 7.1'de ve  $\phi' = 22^\circ$  için Tablo 7.2'de gösterilmiştir.

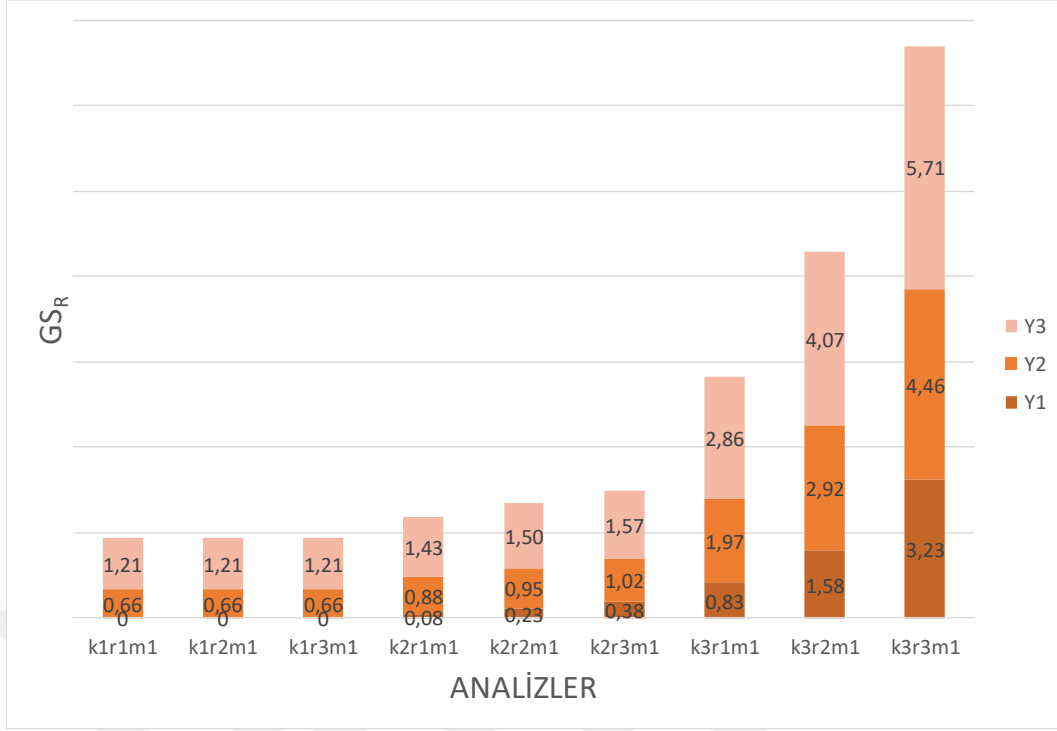
Yeraltı su seviyesinin doymun olmayan zeminlerde şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle zeminin kayma mukavemetinin dolayısıyla güvenlik sayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Başlangıç koşulları incelendiğinde yeraltı su seviyesi arttıkça zeminin matrik emme değerlerinden dolayı yükselen yeraltı su seviyesi nedeniyle güvenlik sayısının başlangıç koşullarına göre azaldığı görülmüştür. Zemin yüzeyindeki yeraltı su seviyesinin ise diğer yeraltı su seviyelerine göre yağış sızmasının etkisiyle yeraltı su seviyesinin topuk bölgesinde daha fazla artmasına neden olduğu ve bu nedenle kayma mukavemetinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Yeraltı su seviyesinin şev stabilitesine olan etkisi  $GS_R$  ile Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Yeraltı su seviyesi düşük olan dolgu şevde, doymun olmayan zonun artmasıyla matrik emmeye bağlı olarak boşluk suyu basınçlarının arttığı ve güvenlik sayısını daha çok etkilediği görülmektedir. Yeraltı su seviyesinin şev stabilitesi üzerindeki etkisinin büyük ölçüde permeabilite ve yağış yoğunluğundan etkilendiği görülmektedir. Düşük permeabiliteye sahip yüksek plastisiteli zeminde yağışın şev içerisine sızmadığı ve dolayısıyla her bir yeraltı su seviyesinde yağış yoğunluğu artsa bile güvenlik sayısının değişmediği görülmektedir. Yeraltı su seviyesinin şev stabilitesi üzerindeki etkisinin değerlendirildiği analizlerde, güvenlik sayısındaki değişimlerin permeabilitenin artmasıyla birlikte yağış yoğunluğuna bağlı olarak arttığı görülmektedir.

**Tablo 7.1**  $\phi'=24^\circ$  için analiz sonuçları ve  $GS_R$  değerleri

| Analizler | Başlangıç<br>GS | GS    | $GS_R$ | Analizler | Başlangıç<br>GS | GS    | $GS_R$ |
|-----------|-----------------|-------|--------|-----------|-----------------|-------|--------|
| Y1k1r1m1  | 1,332           | 1,332 | 0      | Y1k1r1m2  | 1,312           | 1,312 | 0      |
| Y1k1r2m1  | 1,332           | 1,332 | 0      | Y1k1r2m2  | 1,312           | 1,312 | 0      |
| Y1k1r3m1  | 1,332           | 1,332 | 0      | Y1k1r3m2  | 1,312           | 1,312 | 0      |
| Y1k2r1m1  | 1,332           | 1,331 | 0,08   | Y1k2r1m2  | 1,312           | 1,305 | 0,53   |
| Y1k2r2m1  | 1,332           | 1,329 | 0,23   | Y1k2r2m2  | 1,312           | 1,304 | 0,61   |
| Y1k2r3m1  | 1,332           | 1,327 | 0,38   | Y1k2r3m2  | 1,312           | 1,303 | 0,69   |
| Y1k3r1m1  | 1,332           | 1,321 | 0,83   | Y1k3r1m2  | 1,312           | 1,293 | 1,45   |
| Y1k3r2m1  | 1,332           | 1,311 | 1,58   | Y1k3r2m2  | 1,312           | 1,276 | 2,74   |
| Y1k3r3m1  | 1,332           | 1,289 | 3,23   | Y1k3r3m2  | 1,312           | 1,249 | 4,80   |
| Y2k1r1m1  | 1,368           | 1,359 | 0,66   | Y2k1r1m2  | 1,345           | 1,334 | 0,82   |
| Y2k1r2m1  | 1,368           | 1,359 | 0,66   | Y2k1r2m2  | 1,345           | 1,334 | 0,82   |
| Y2k1r3m1  | 1,368           | 1,359 | 0,66   | Y2k1r3m2  | 1,345           | 1,334 | 0,82   |
| Y2k2r1m1  | 1,368           | 1,356 | 0,88   | Y2k2r1m2  | 1,345           | 1,33  | 1,12   |
| Y2k2r2m1  | 1,368           | 1,355 | 0,95   | Y2k2r2m2  | 1,345           | 1,328 | 1,26   |
| Y2k2r3m1  | 1,368           | 1,354 | 1,02   | Y2k2r3m2  | 1,345           | 1,327 | 1,34   |
| Y2k3r1m1  | 1,368           | 1,341 | 1,97   | Y2k3r1m2  | 1,345           | 1,318 | 2,01   |
| Y2k3r2m1  | 1,368           | 1,328 | 2,92   | Y2k3r2m2  | 1,345           | 1,302 | 3,20   |
| Y2k3r3m1  | 1,368           | 1,307 | 4,46   | Y2k3r3m2  | 1,345           | 1,274 | 5,28   |
| Y3k1r1m1  | 1,401           | 1,384 | 1,21   | Y3k1r1m2  | 1,377           | 1,358 | 1,38   |
| Y3k1r2m1  | 1,401           | 1,384 | 1,21   | Y3k1r2m2  | 1,377           | 1,358 | 1,38   |
| Y3k1r3m1  | 1,401           | 1,384 | 1,21   | Y3k1r3m2  | 1,377           | 1,358 | 1,38   |
| Y3k2r1m1  | 1,401           | 1,381 | 1,43   | Y3k2r1m2  | 1,377           | 1,355 | 1,60   |
| Y3k2r2m1  | 1,401           | 1,380 | 1,50   | Y3k2r2m2  | 1,377           | 1,353 | 1,74   |
| Y3k2r3m1  | 1,401           | 1,379 | 1,57   | Y3k2r3m2  | 1,377           | 1,351 | 1,89   |
| Y3k3r1m1  | 1,401           | 1,361 | 2,86   | Y3k3r1m2  | 1,377           | 1,343 | 2,47   |
| Y3k3r2m1  | 1,401           | 1,344 | 4,07   | Y3k3r2m2  | 1,377           | 1,329 | 3,49   |
| Y3k3r3m1  | 1,401           | 1,321 | 5,71   | Y3k3r3m2  | 1,377           | 1,301 | 5,52   |

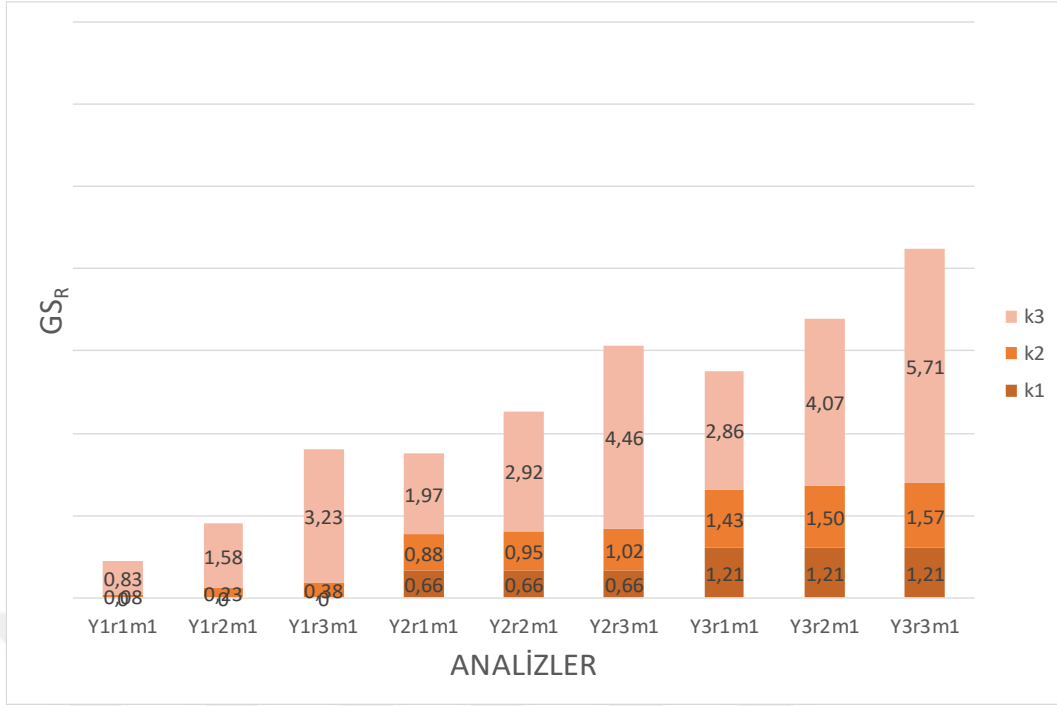
**Tablo 7.2**  $\phi'=22^\circ$  için analiz sonuçları ve  $GS_R$  değerleri

| Analizler | Başlangıç<br>GS | GS    | $GS_R$ | Analizler | Başlangıç<br>GS | GS    | $GS_R$ |
|-----------|-----------------|-------|--------|-----------|-----------------|-------|--------|
| Y1k1r1m1  | 1,311           | 1,311 | 0      | Y1k1r1m2  | 1,288           | 1,285 | 0,23   |
| Y1k1r2m1  | 1,311           | 1,311 | 0      | Y1k1r2m2  | 1,288           | 1,285 | 0,23   |
| Y1k1r3m1  | 1,311           | 1,311 | 0      | Y1k1r3m2  | 1,288           | 1,285 | 0,23   |
| Y1k2r1m1  | 1,311           | 1,310 | 0,08   | Y1k2r1m2  | 1,288           | 1,279 | 0,70   |
| Y1k2r2m1  | 1,311           | 1,308 | 0,23   | Y1k2r2m2  | 1,288           | 1,276 | 0,93   |
| Y1k2r3m1  | 1,311           | 1,306 | 0,38   | Y1k2r3m2  | 1,288           | 1,275 | 1,01   |
| Y1k3r1m1  | 1,311           | 1,300 | 0,84   | Y1k3r1m2  | 1,288           | 1,267 | 1,63   |
| Y1k3r2m1  | 1,311           | 1,290 | 1,60   | Y1k3r2m2  | 1,288           | 1,25  | 2,95   |
| Y1k3r3m1  | 1,311           | 1,266 | 3,43   | Y1k3r3m2  | 1,288           | 1,221 | 5,20   |
| Y2k1r1m1  | 1,346           | 1,337 | 0,67   | Y2k1r1m2  | 1,325           | 1,309 | 1,21   |
| Y2k1r2m1  | 1,346           | 1,337 | 0,67   | Y2k1r2m2  | 1,325           | 1,309 | 1,21   |
| Y2k1r3m1  | 1,346           | 1,337 | 0,67   | Y2k1r3m2  | 1,325           | 1,309 | 1,21   |
| Y2k2r1m1  | 1,346           | 1,335 | 0,82   | Y2k2r1m2  | 1,325           | 1,305 | 1,51   |
| Y2k2r2m1  | 1,346           | 1,334 | 0,89   | Y2k2r2m2  | 1,325           | 1,302 | 1,74   |
| Y2k2r3m1  | 1,346           | 1,333 | 0,97   | Y2k2r3m2  | 1,325           | 1,300 | 1,89   |
| Y2k3r1m1  | 1,346           | 1,319 | 2,01   | Y2k3r1m2  | 1,325           | 1,292 | 2,49   |
| Y2k3r2m1  | 1,346           | 1,307 | 2,90   | Y2k3r2m2  | 1,325           | 1,275 | 3,77   |
| Y2k3r3m1  | 1,346           | 1,284 | 4,61   | Y2k3r3m2  | 1,325           | 1,247 | 5,89   |
| Y3k1r1m1  | 1,379           | 1,362 | 1,23   | Y3k1r1m2  | 1,357           | 1,334 | 1,69   |
| Y3k1r2m1  | 1,379           | 1,362 | 1,23   | Y3k1r2m2  | 1,357           | 1,334 | 1,69   |
| Y3k1r3m1  | 1,379           | 1,362 | 1,23   | Y3k1r3m2  | 1,357           | 1,334 | 1,69   |
| Y3k2r1m1  | 1,379           | 1,359 | 1,45   | Y3k2r1m2  | 1,357           | 1,331 | 1,92   |
| Y3k2r2m1  | 1,379           | 1,357 | 1,60   | Y3k2r2m2  | 1,357           | 1,328 | 2,14   |
| Y3k2r3m1  | 1,379           | 1,356 | 1,67   | Y3k2r3m2  | 1,357           | 1,325 | 2,36   |
| Y3k3r1m1  | 1,379           | 1,339 | 2,90   | Y3k3r1m2  | 1,357           | 1,317 | 2,95   |
| Y3k3r2m1  | 1,379           | 1,323 | 4,06   | Y3k3r2m2  | 1,357           | 1,300 | 4,20   |
| Y3k3r3m1  | 1,379           | 1,298 | 5,87   | Y3k3r3m2  | 1,357           | 1,273 | 6,19   |



**Şekil 7.1** Farklı yeraltı su seviyeleri için  $GS_R$  değerleri

Şekil 7.2’de farklı permeabilite değerleri için  $GS_R$  değerleri verilmiştir. Permeabilitesi düşük yüksek plastisiteli kil zeminlerde yağış yoğunluğunun şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yağış yoğunluğu artsa bile yağışın dolgu içerisine sızmadığı bu nedenle boşluk suyu basıncında çok fazla artışa neden olmadığından kayma mukavemetinin önemli ölçüde etkilenmediği söylenebilir. Yüksek permeabilite değerlerinde gerçekleştirilen analizlerde, yağışın dolgu içerisine sızması ve suyun drene olamamasından dolayı boşluk suyu basınçlarında bir artış meydana gelerek kayma mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir.

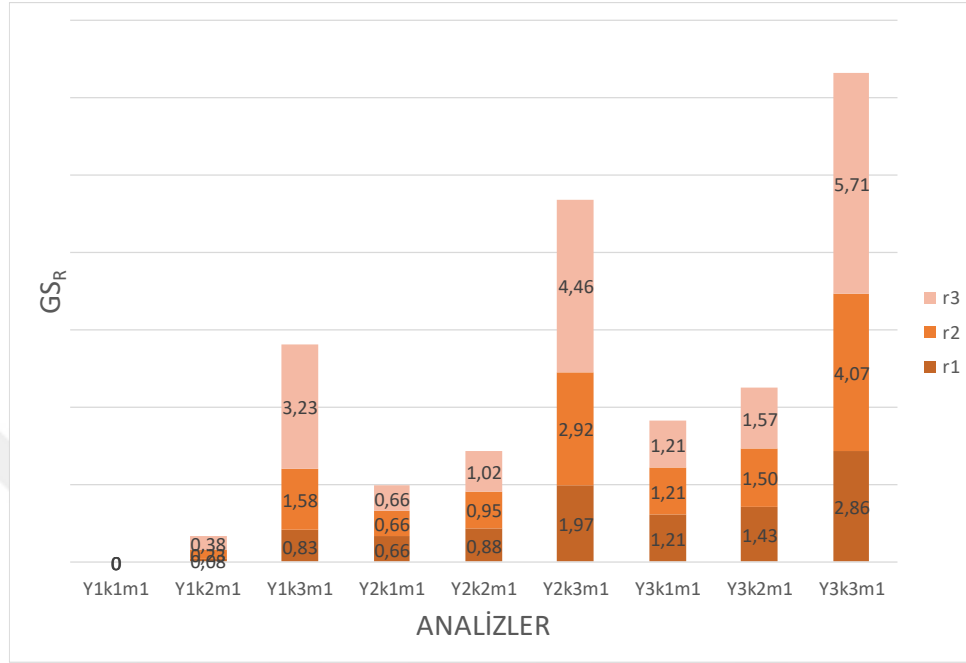


**Şekil 7.2** Farklı permeabilite değerleri için  $GS_R$  değerleri

Permeabilite için  $GS_R$  değerlendirildiğinde, permeabilitenin yüksek olduğu durumda yağış yoğunluğuna ve yeraltı su seviyesine bağlı olarak güvenlik sayısındaki değişimin daha fazla olduğu görülmüştür. Aslan Fidan'ın (2017) düşük plastisiteli zeminde yaptığı çalışmada, yüksek permeabiliteye sahip zeminde yağışın şev stabilitesini üzerinde oldukça etkili olduğu görülürken, bu çalışmada kullanılan yüksek plastisiteli kil bir zemin ile inşa edilen dolgu şevinin, permeabilitenin düşük olmasından dolayı yağıştan çok daha az etkilendiği görülmüştür.

Şev stabilite analizlerinde, yağış yoğunluğunun özellikle doymun olmayan zeminlerde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan aylık yağış yoğunluğunun artmasıyla şevin kayma mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Yağış yoğunluğunun etkisi permeabilite ile birlikte değerlendirildiğinde, permeabilitesi düşük zeminlerde yağış yoğunluğu artsa bile suyun şev içerisine sızamamasından dolayı boşluk suyu basınçlarında önemli bir artış meydana getirmediği görülmüştür. Yağış yoğunluğunun düşük permeabiliteye sahip zeminlerde şev stabilitesinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Analizler sonucunda yağış süresinin şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yoğun yağışların aynı süreli daha az yoğunluktaki yağışlara göre şev stabilitesi

üzerinde daha çok etkili olduğu görülmüştür. Şekil 7.3'te farklı yağış yoğunlukları için  $GS_R$  değerleri verilmiştir.



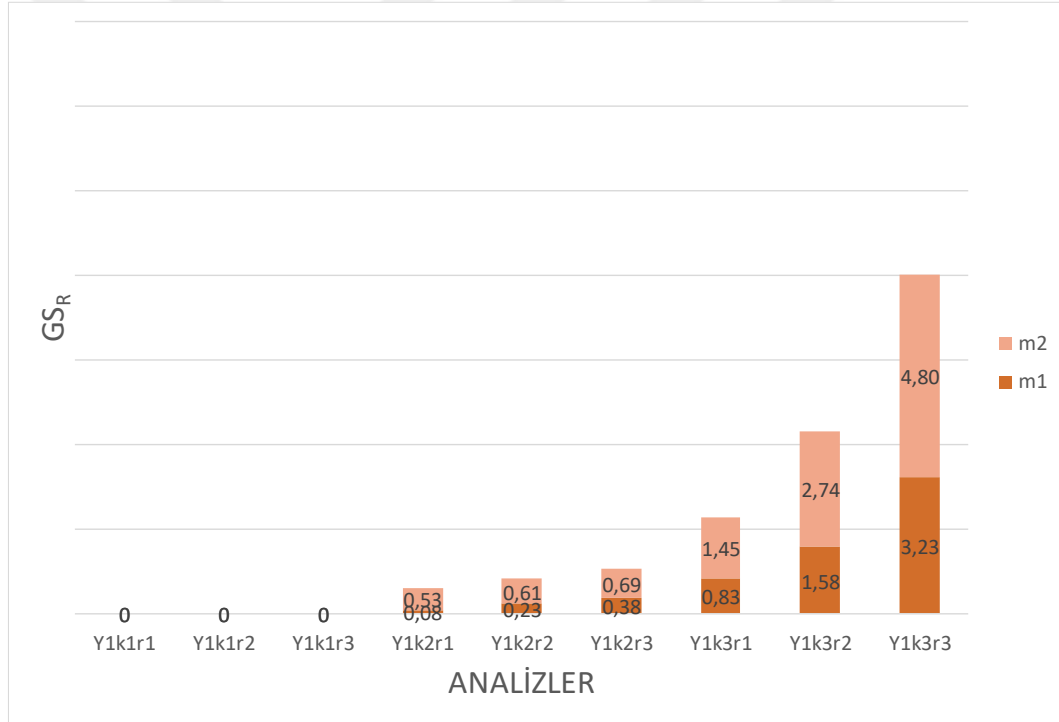
**Şekil 7.3** Farklı yağış yoğunlukları için  $GS_R$  değerleri

Permeabilitenin en düşük olduğu ve yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinde olduğu durumda, yağış yoğunluğu artsa bile güvenlik sayısında dolayısıyla kayma mukavemetinde değişiklik meydana gelmediği görülmüştür. Düşük permeabilite değerinde ve farklı yeraltı su seviyelerinde yağış yoğunluğunun artmasının güvenlik sayısında değişiklik meydana getirmediği belirlenmiştir. Ancak permeabilitenin yükselmesiyle ve yağış yoğunluğunun artmasıyla birlikte güvenlik sayısının çok fazla etkilendiği görülmüştür.

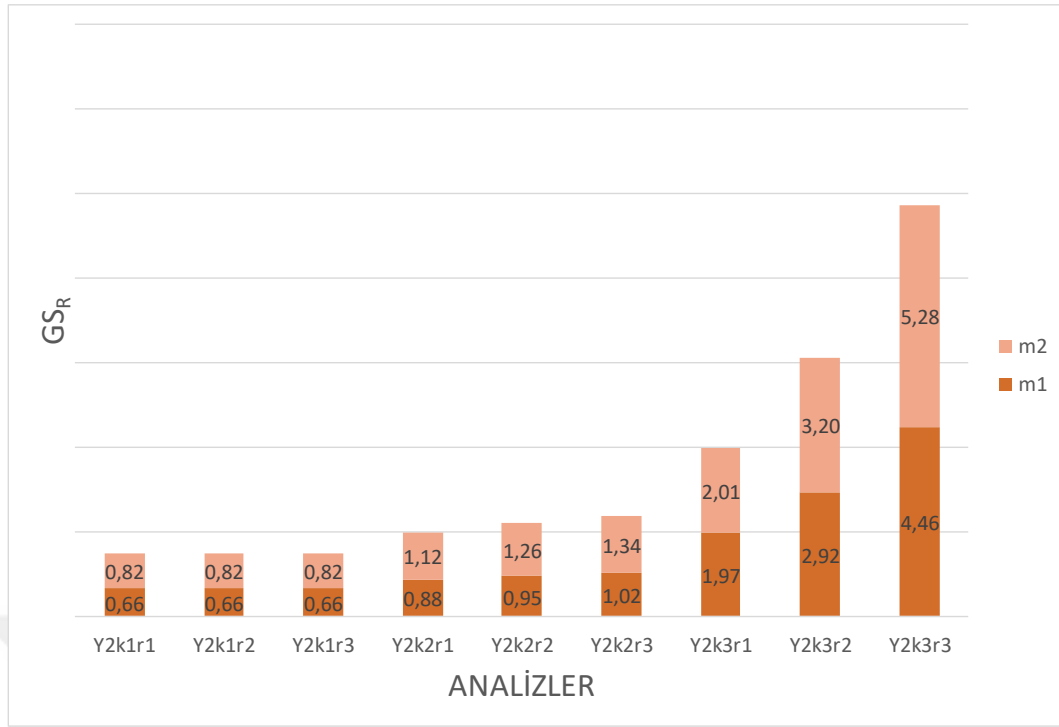
Doygun olmayan zemin özelliklerine sahip şev kesitinde zemin-su karakteristik eğrisinin dolayısıyla zeminin matrik emme değerinin önemli bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.4'te Y1 ve farklı matrik emme değerleri için, Şekil 7.5'te Y1 ve farklı matrik emme değerleri için, Şekil 7.6'da Y1 ve farklı matrik emme değerleri için  $GS_R$  değerleri verilmiştir. Aynı hacimsel su mutevası değerlerindeki matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, daha yüksek matrik emme değerine sahip zemin özelliklerine sahip şevin topuk bölgesinde, yeraltı su seviyesinin daha fazla yükseldiği ve zeminin kayma mukavemetinin daha düşük

olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.4'te düşük permeabilite değerinde yağış yoğunlu artsa bile her iki matrik emme değerinde de güvenlik sayısında bir değişim meydana gelmemiştir. Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6 ile birlikte değerlendirildiğinde genel olarak, yeraltı su seviyesi düşük seviyede iken matrik emmenin yüksek olduğu durumda güvenlik sayısının daha çok etkilendiği görülmüştür.

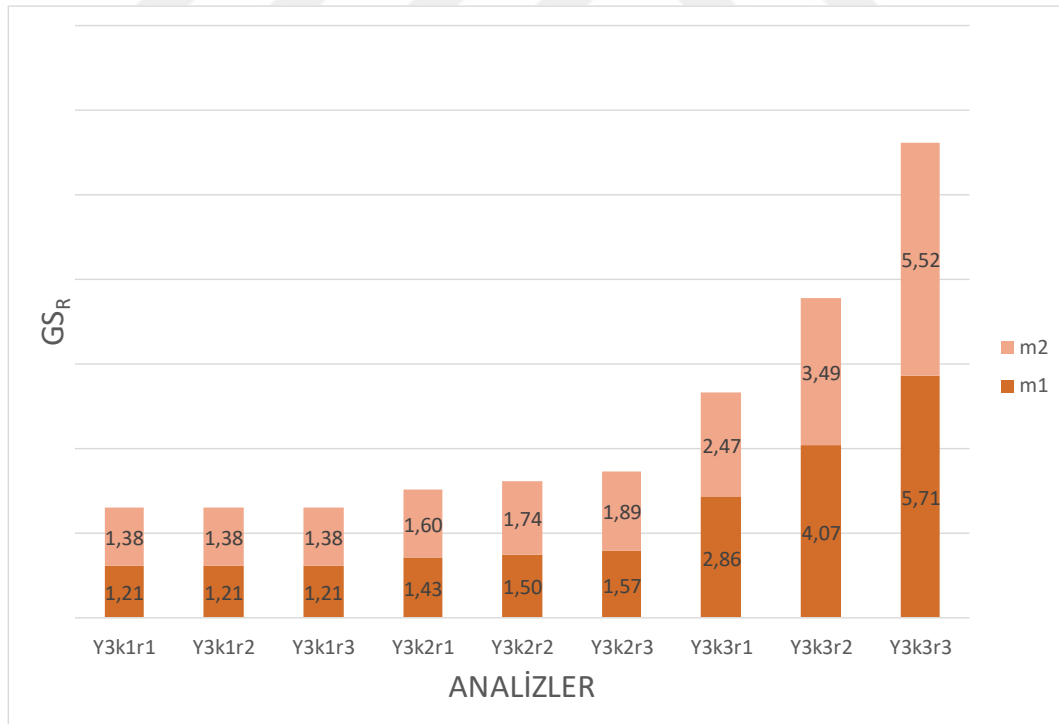
Son olarak zeminin kayma mukavemeti açısındaki değişim değerlendirildiğinde, zemin mekaniğinin temel denklemi olan kayma mukavemeti denklemi doygun olmayan zemin mekaniği çerçevesinde göz önünde bulundurulduğunda, aynı düşük kohezyon değerinde zeminin kayma mukavemeti açısının azalması ile şevin kayma mukavemetinin de azaldığı görülmektedir.



**Şekil 7.4** Y1 ve farklı matrik emme değerleri için GS<sub>R</sub> değerleri

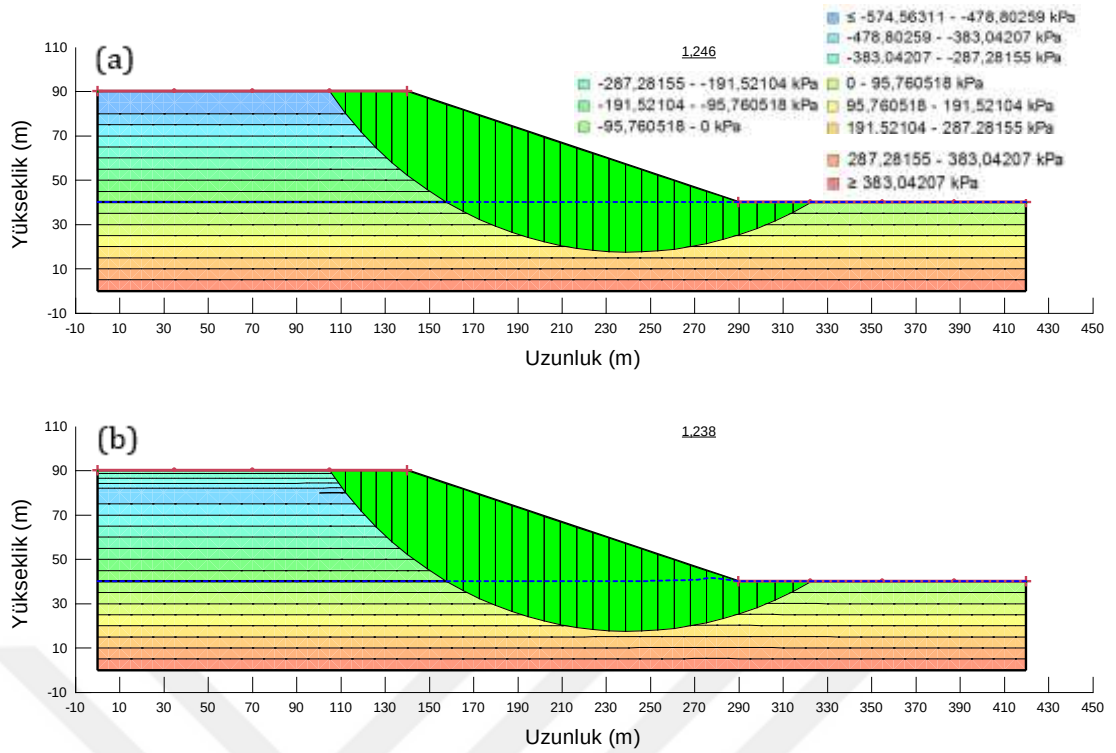


**Şekil 7.5** Y2 ve farklı matrik emme değerleri için  $GS_R$  değerleri



**Şekil 7.6** Y3 ve farklı matrik emme değerleri için  $GS_R$  değerleri

Yüksek dolgu kesitinde yüksek plastisiteli kil zeminde yapılan analizlerde, yeraltı su seviyesinin yüzeyde, permeabilite değerinin  $3,5 \times 10^{-11}$  m/s ve yağış miktarının 100 mm olduğu durumda güvenlik sayısında değişim meydana gelmemiştir. Bunun nedenini araştırmak için bu çalışmadaki şev kesiti ve Aslan Fidan (2017) çalışmasında kullanılan zemin parametreleri dikkate alınarak, tez çalışmasındaki şev kesitinin dolgu yüksekliği azaltılarak ve aynı dolgu zeminin drenajsız malzeme parametreleri kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. Şekil 7.7’de bu tez çalışmasında kullanılan şev kesitinde ve aylık 100 mm yağış miktarında, zemin sınıfının şev stabilitesine etkisini araştırmak için Aslan Fidan’ın (2017) çalışmasında kullandığı zemin parametreleri ve zemin su karakteristik eğrisi ile yapılan analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 7.7a’da başlangıç şev stabilitesi, Şekil 7.7b’de ise 1 ay sonundaki şev stabilitesi sonucu verilmiştir.

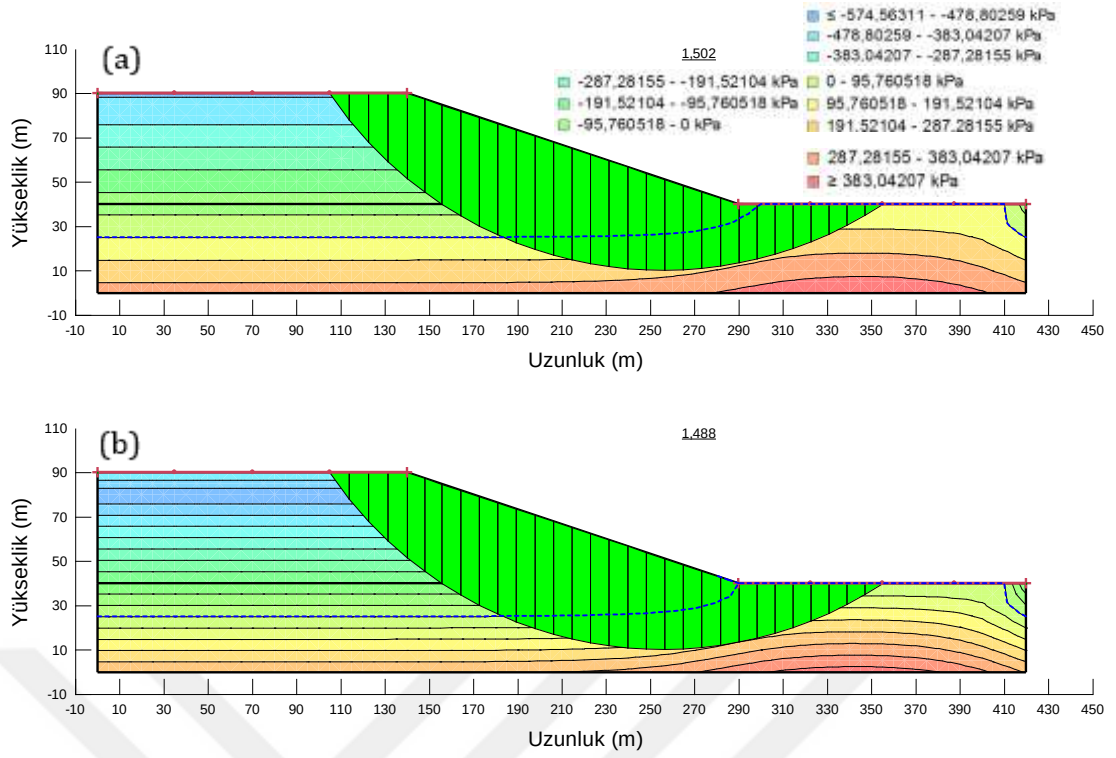


**Şekil 7.7** Bu tez çalışmasında kullanılan şev kesiti ve Aslan Fidan'ın (2017) zemin parametreleri ve zemin su karakteristik eğrisi ile gerçekleştirilen şev stabilite analizleri (a) başlangıç şev stabilitesi (b) 1ay sonundaki şev stabilitesi

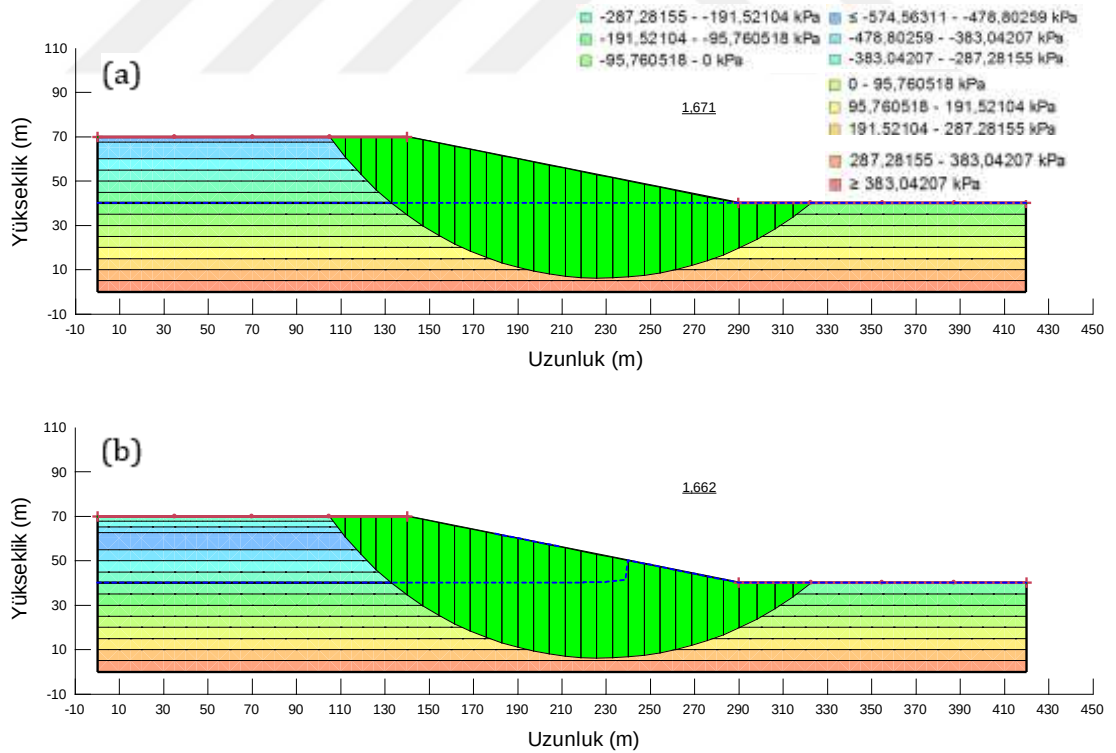
Şekil 7.8'de bu tez çalışmasında kullanılan şev kesitinde dolgu zamine ait drenajsız kayma mukavemeti parametreleri ( $c_u=110$  kPa ve  $\phi_u=3.5^\circ$ ) ile tekrarlanan analizin şev stabilite sonucu verilmiştir. Şekil 7.8a'de başlangıç şev stabilitesi, Şekil 7.8b'de ise 1 ay sonundaki şev stabilitesi sonucu verilmiştir.

Şekil 7.9'da dolgu yüksekliğinin etkisini araştırmak için bu tez çalışmasında kullanılan 50 m yüksekliği 30 m'ye indirilerek analizler tekrarlanmıştır. Şekil 7.9a'da başlangıç şev stabilitesi, Şekil 7.9b'de ise 1 ay sonundaki şev stabilitesi sonucu verilmiştir.

Tablo 7.3'te ise çalışma kapsamında yapılan analizlerin değerlendirilmesi farklı kesit ve parametrelerde gerçekleştirilen şev stabilite analiz sonuçları gösterilmiştir.



**Şekil 7.8** Drenajsız kayma mukavemeti parametreleri ile gerçekleştirilen şev stabilite analizleri (a) başlangıç şev stabilitesi (b) 1ay sonundaki şev stabilitesi



**Şekil 7.9** 30 m dolgu yüksekliğine sahip şev kesitinde Y1k1r1m1 analizi (a) başlangıç şev stabilitesi (b) 1ay sonundaki şev stabilitesi

**Tablo 7.3** Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi için gerçekleştirilen analizler

| Analizler                                                                      | Başlangıç GS | GS    |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|
| Y1k1r1m1                                                                       | 1,332        | 1,332 |
| Bu tez çalışmasındaki kesit ve Aslan Fidan'ın (2017) zemin parametreleri       | 1,246        | 1,238 |
| Drenajsız parametreler kullanılması<br>( $c_u=110$ kPa ve $\phi_u=3.5^\circ$ ) | 1,502        | 1,488 |
| Dolgu yüksekliğinin azaltılması<br>(30m olarak dikkate alınması durumu)        | 1,671        | 1,666 |

Tablo 7.3'e bakıldığında, tez çalışmasında gerçekleştirilen şev stabilite analizleri sonucunda görüldüğü gibi güvenlik sayılarında önemli bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür. Dolgu yüksekliğinin değiştirildiği analizde güvenlik sayısının başlangıç değerinde artış meydana gelmiş, ancak sızma analizleri sonucunda başlangıç değerine göre çok fazla değişim meydana gelmemiştir. Bunun nedeninin şevin dolgu malzemesinin yüksek plastisiteli kil zemin olmasıdır. Drenajsız parametrelerin kullanılması durumunda da benzer şekilde elde edilen güvenlik sayısında önemli bir değişimin meydana gelmemiştir. Özet olarak, tez çalışması kapsamında dikkate alınan şevin 50m yüksekliğinde olması ve yüksek plastisiteli bir kil (CH) zemin kullanılarak inşa edilmesi dikkate alındığında, mevcut şev geometrisinde şevin stabilitesinin yağışların sızmasından çok fazla etkilenmediği belirlenmiştir.

Çalışmada doymun olmayan zemin özelliklerine sahip bir şev kesitinde yağış sızması göz önünde bulundurularak şev stabilitesine etki eden parametreler incelenmiştir. Yeraltı su seviyesi, permeabilite, yağış yoğunluğu ve matrik emme değişimlerinin şev stabilitesi üzerindeki etkileri ayrı ayrı analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

Yeraltı su seviyesinin doymun olmayan zeminlerde şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yeraltı su seviyesinin yükselmesiyle zeminin kayma mukavemetinin dolayısıyla güvenlik sayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Başlangıç koşulları incelendiğinde yeraltı su seviyesi arttıkça zeminin matrik emme değerlerinden dolayı yükselen yeraltı su seviyesi nedeniyle güvenlik sayısının başlangıç koşullarına göre azaldığı görülmüştür. Zemin yüzeyindeki yeraltı su seviyesinde (Y1), yağış sızmasının etkisiyle şevin topuk bölgesinde yeraltı su seviyesinin yükseldiği ve bu nedenle zeminin kayma mukavemetinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.

İncelenen şev kesitine etki eden yağış yoğunluğu arttıkça güvenlik sayısının azaldığı belirlenmiştir. Permeabilitesi düşük zeminlerde yağış yoğunluğunun şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yağış yoğunluğu artsa bile yağışın dolgu içerisine sızmadığı ve bu nedenle boşluk suyu basıncında çok fazla artışa neden olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu zeminlerde kayma mukavemetinde önemli bir değişim meydana gelmeyeceği söylenebilir. Permeabilitesi yüksek zeminlerde ise yağışın dolgu içerisine daha kolay sızarak boşluk suyu basıncında artışa neden olduğu ve böylece kayma mukavemetinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

Permeabilite değişiminin şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, düşük permeabilite değerlerinin incelendiği analizlerde başlangıç koşullarına göre güvenlik sayısında çok fazla değişiklik meydana gelmediği görülmüştür. Bunun nedeni yağışın dolgu şevin içerisine sızamaması ve boşluk suyu basınçlarında

önemli artışlara neden olamaması olarak değerlendirilmiştir. Yüksek permeabilite değerlerinde gerçekleştirilen analizlerde, yağışın dolgu içerisine sızması ve suyun drene olamamasından dolayı boşluk suyu basınçlarında bir artış meydana geldiği görülmüştür. Buna bağlı olarak da şevin kayma mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Şev stabilite analizlerinde, yağış yoğunluğunun özellikle doymuş olmayan zeminlerde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan aylık yağış yoğunluğunun artmasıyla şevin kayma mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Yağış yoğunluğunun etkisi permeabilite ile birlikte değerlendirildiğinde, permeabilitesi düşük zeminlerde yağış yoğunluğu artsa bile suyun şev içerisine sızamamasından dolayı boşluk suyu basınçlarında önemli bir artış meydana getirmediği görülmüştür. Yağış yoğunluğunun düşük permeabiliteye sahip zeminlerde, şev stabilitesinde önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir. Analizler sonucunda yağış süresinin şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, yoğun yağışların aynı süreli daha az yoğunluktaki yağışlara göre şev stabilitesi üzerinde daha çok etkili olduğu görülmüştür.

Doymuş olmayan zemin özelliklerine sahip şev kesitinde zemin-su karakteristik eğrisinin dolayısıyla zeminin matrik emme değerinin önemli bir role sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı hacimsel su mutevası değerlerindeki matrik emme değişiminin şev stabilitesine etkisi değerlendirildiğinde, daha yüksek matrik emme değerine sahip zemin özelliklerine sahip şevin topuk bölgesinde, yeraltı su seviyesinin daha fazla yükseldiği ve zeminin kayma mukavemetinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak zeminin kayma mukavemeti açısındaki değişim değerlendirildiğinde, zemin mekaniğinin temel denklemi olan kayma mukavemeti denklemi doymuş olmayan zemin mekaniği çerçevesinde göz önünde bulundurulduğunda, aynı düşük kohezyon değerinde zeminin kayma mukavemeti açısının azalmasının şevin kayma mukavemetini de azalttığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan şev kesiti ve malzeme parametreleri kullanılarak yapılan parametrik çalışma sonucunda, düşük permeabiliteye sahip yüksek plastisiteli doymuş olmayan bir zemin ile inşa edilen dolguların, yağış etkisi

altında şev stabilitesinin yağışın şev içine sızmasından çok fazla etkilenmediği belirlenmiştir.



- Aslan Fidan, A. (2017). *Doygun Olmayan Koşullarda Yağış İnfiltrasyonu Etkisindeki Şevlerin Stabilite Analizi*. Dicle üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Diyarbakır.
- ASTM D854. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. ASTM International.
- ASTM D2216. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International.
- ASTM D2435. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. ASTM International.
- ASTM D4318. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International.
- Bishop, A. W. (1959). The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad, Norwegian Geotechnical Institute*, 106(39), 859-863.
- Croney, D. and Coleman, J. D. (1961). Pore Pressure and Suction in Soil. *Conference on Pore Pressure and Suction in Soils*, 31-37.
- Duncan, J. M. and Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D. G. (2016). State Variables in Saturated-Unsaturated Soil Mechanics. *Soils and Rocks*, 39(1), 3-17.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger R. A. (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. and Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994). Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D. and Barbour, S. L. (1995). The Relationship of the Unsaturated Soil Shear Strength Functions to the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 32:40-448.
- Fredlund, M. D. (1999). *The Role of Unsaturated Soil Property Functions in the Practice of Unsaturated Soil Mechanics*. Saskatchewan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kanada.

- Gofar, N. and Rahardjo, H. (2017). Saturated and Unsaturated Stability Analysis of Slope Subjected to Rainfall İnfiltration. *MATEC Web of Conferences*, 101, 05004. doi: 10.1051/mateconf/201710105004
- Gökoğlu, Ö. (2015). *Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Stabilite Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Guan, G. S., Rahardjo, H. and Choon, L. E. (2010). Shear Strength Equations of Unsaturated Soil under Drying and Wetting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(4): 594-606.
- Isakov, A. and Moryachkov, Y. (2014). Estimation of Slope Stability Using Two-Parameter Criterion of Stability. *International Journal of Geomechanics*, 14.
- Kocaman, K. (2018). *Killi Zeminlerin Zemin-Su Karakteristik Eğrisi ile Boşluk Boyutu İlişkisi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya.
- Lu, N. and Griffiths, D. V. (2004). Profiles of Steady-State Suction Stress in Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 1063-1076.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Oh, S. and Lu, N. (2015). Slope Stability Analysis Under Unsaturated Conditions: Case Studies of Rainfall-Induced Failure of Cut Slopes. *Engineering Geology*, 184, 96-103.
- Oh, W. T. and Vanapalli, S. K. (2010). Influence of Rain İnfiltration on the Stability of Compacted Soil Slopes. *Computers and Geotechnics*, 37, 649-657.
- Önalp, A. ve Arel, E. (2013). *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Özaydın, K. (2005). *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Richards, B. G. (1965). Measurement of the Free Energy Soil Moisture by the Psychometric Technique Using Thermistors. In *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symposium in Print*, Sydney Australia: Butterworths, 35-46.
- Samingan, A. S. (2005). *An Emperimental Study on Hydro-Mechanical Characteristics of Compacted Bentonite-Sand Mixtures*. İnşaat Mühendisliği Fakültesi Bauhause Üniversitesi, Almanya.
- Seepage Modeling with Seep/W. (2012). *Geo-Slope International Ltd.*
- Sheng, D., Zhou, A. and Fredlund, D. G. (2011). Shear Strenght Criteria for Unsaturated Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29: 145-159.
- Stability Modeling with Slope/W. (2012). *Geo-Slope International Ltd.*
- Terzaghi, K. (1936). The Shear Strength of Saturated Soils. *Proc. First International Conferance on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 54-56.

- TS 1500. (2000). *İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması*. Ankara: Türk Standadları Enstitüsü.
- TS 1900-1. (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. Ankara: Türk Standadları Enstitüsü.
- TS 1900-2. (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*. Ankara: Türk Standadları Enstitüsü.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996). Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.
- Yıldırım, S. (2009). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*. İstanbul: Birsen Yayınevi.



# A EKLER

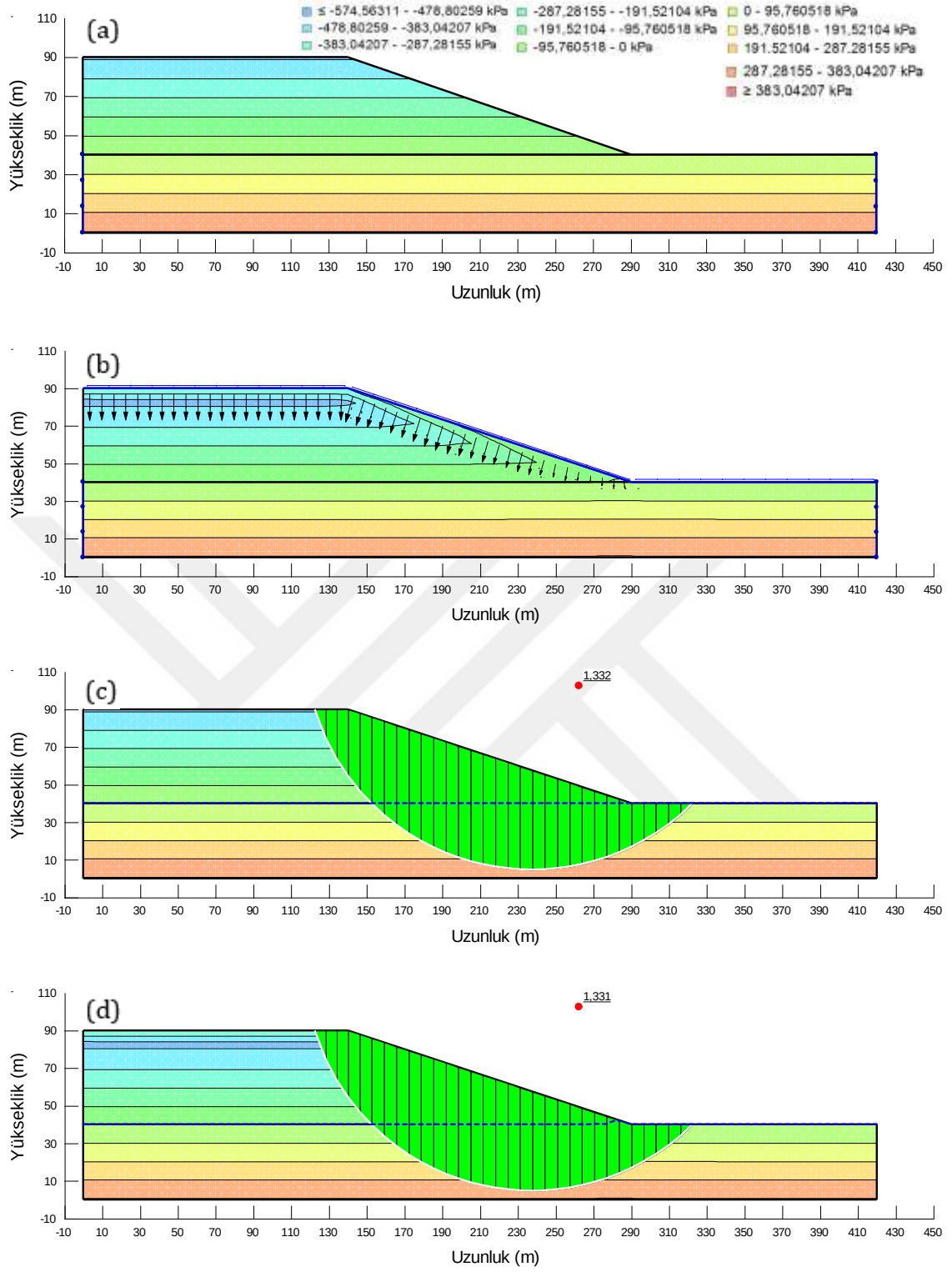
Çalışma kapsamında yapılan analizlerin hepsi mevcut olmakla birlikte, bu bölümde Ek Tablo 1 ve Ek Tablo 2’de sadece kutu içerisinde yer alan analizlerin sonucuna yer verilmiştir. Kırmızılar kayma mukavemeti açısı, matrik emme ve yeraltı su seviyesi arasında, maviler yağış yoğunlukları arasında, yeşiller permeabilite arasında ve siyahlar ise genel değerlendirme amacıyla karşılaştırma yapmak için seçilmiştir.

**Ek Tablo 1**  $\phi'=24^\circ$  için analiz sonuçları ve seçilen değerler

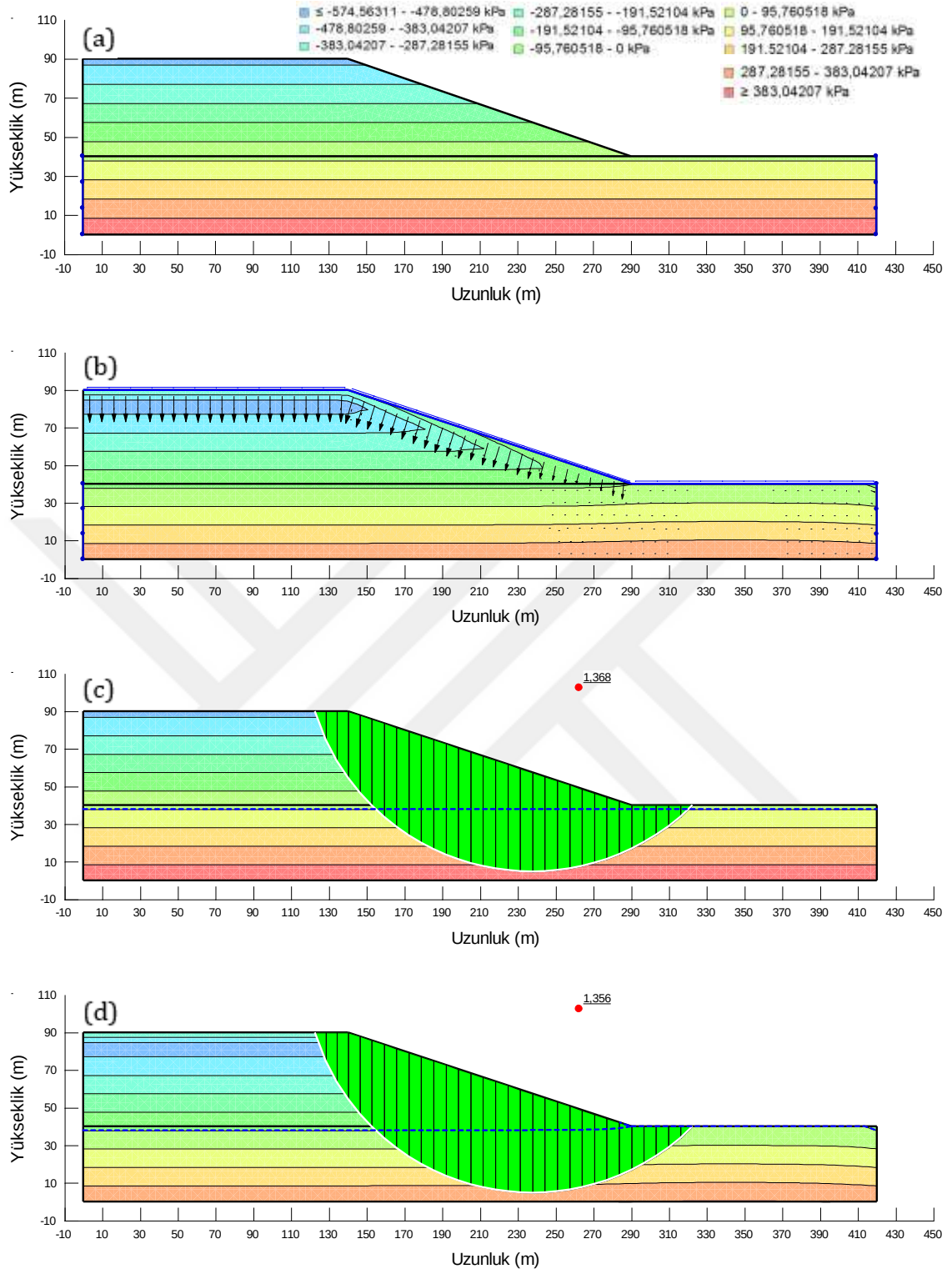
| Analizler | GS    | Analizler | GS    |
|-----------|-------|-----------|-------|
| Y1k1r1m1  | 1,332 | Y1k1r1m2  | 1,312 |
| Y1k1r2m1  | 1,332 | Y1k1r2m2  | 1,312 |
| Y1k1r3m1  | 1,332 | Y1k1r3m2  | 1,312 |
| Y1k2r1m1  | 1,331 | Y1k2r1m2  | 1,305 |
| Y1k2r2m1  | 1,329 | Y1k2r2m2  | 1,304 |
| Y1k2r3m1  | 1,327 | Y1k2r3m2  | 1,303 |
| Y1k3r1m1  | 1,321 | Y1k3r1m2  | 1,293 |
| Y1k3r2m1  | 1,311 | Y1k3r2m2  | 1,276 |
| Y1k3r3m1  | 1,289 | Y1k3r3m2  | 1,249 |
| Y2k1r1m1  | 1,359 | Y2k1r1m2  | 1,334 |
| Y2k1r2m1  | 1,359 | Y2k1r2m2  | 1,334 |
| Y2k1r3m1  | 1,359 | Y2k1r3m2  | 1,334 |
| Y2k2r1m1  | 1,356 | Y2k2r1m2  | 1,330 |
| Y2k2r2m1  | 1,355 | Y2k2r2m2  | 1,328 |
| Y2k2r3m1  | 1,354 | Y2k2r3m2  | 1,327 |
| Y2k3r1m1  | 1,341 | Y2k3r1m2  | 1,318 |
| Y2k3r2m1  | 1,328 | Y2k3r2m2  | 1,302 |
| Y2k3r3m1  | 1,307 | Y2k3r3m2  | 1,274 |
| Y3k1r1m1  | 1,384 | Y3k1r1m2  | 1,358 |
| Y3k1r2m1  | 1,384 | Y3k1r2m2  | 1,358 |
| Y3k1r3m1  | 1,384 | Y3k1r3m2  | 1,358 |
| Y3k2r1m1  | 1,381 | Y3k2r1m2  | 1,355 |
| Y3k2r2m1  | 1,380 | Y3k2r2m2  | 1,353 |
| Y3k2r3m1  | 1,379 | Y3k2r3m2  | 1,351 |
| Y3k3r1m1  | 1,361 | Y3k3r1m2  | 1,343 |
| Y3k3r2m1  | 1,344 | Y3k3r2m2  | 1,329 |
| Y3k3r3m1  | 1,321 | Y3k3r3m2  | 1,301 |

**Ek Tablo 2**  $\phi'=22^\circ$  için analiz sonuçları ve seçilen değerler

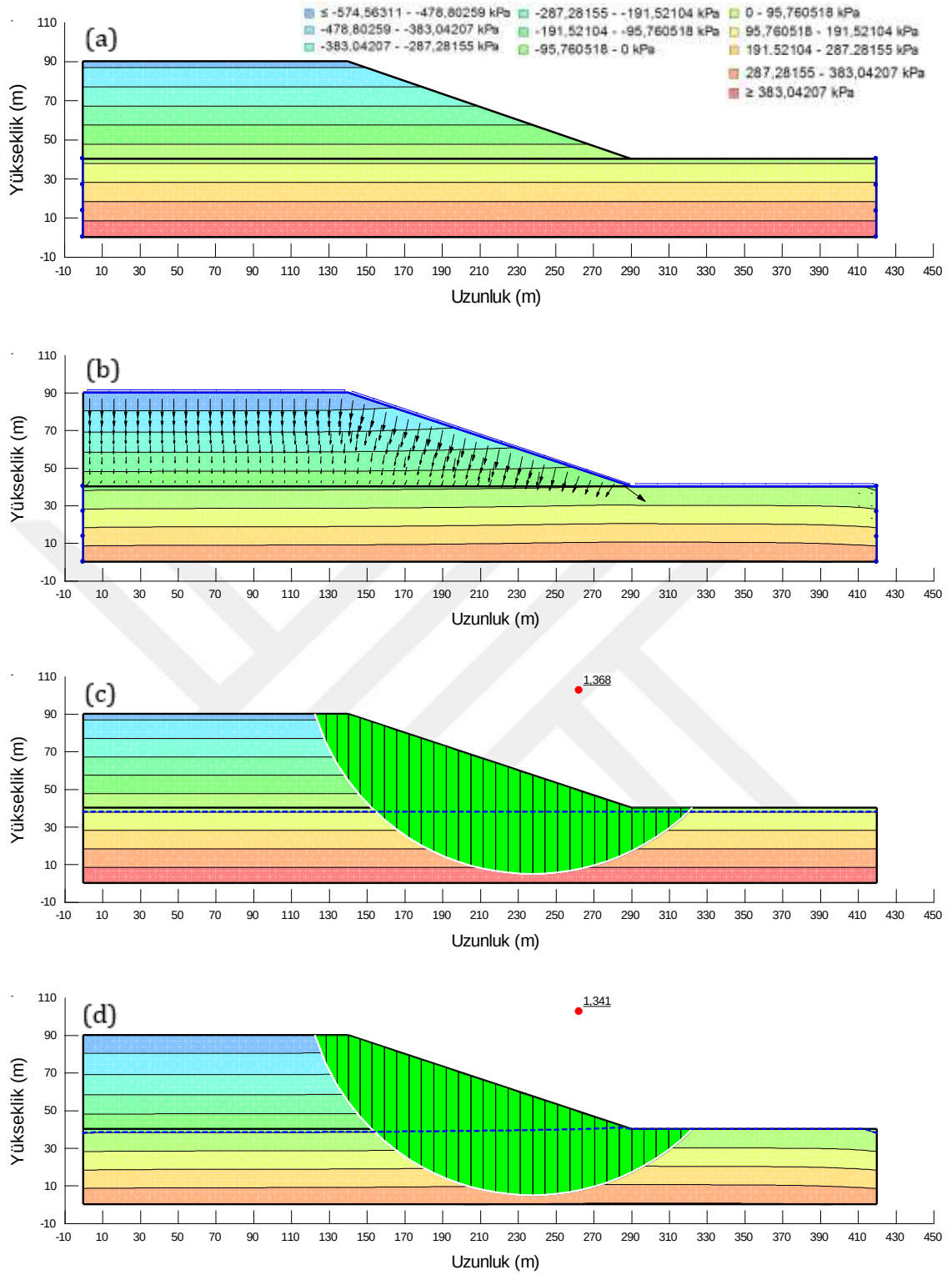
| <b>Analizler</b> | <b>GS</b> | <b>Analizler</b> | <b>GS</b> |
|------------------|-----------|------------------|-----------|
| Y1k1r1m1         | 1,311     | Y1k1r1m2         | 1,285     |
| Y1k1r2m1         | 1,311     | Y1k1r2m2         | 1,285     |
| Y1k1r3m1         | 1,311     | Y1k1r3m2         | 1,285     |
| Y1k2r1m1         | 1,310     | Y1k2r1m2         | 1,279     |
| Y1k2r2m1         | 1,308     | Y1k2r2m2         | 1,276     |
| Y1k2r3m1         | 1,306     | Y1k2r3m2         | 1,275     |
| Y1k3r1m1         | 1,300     | Y1k3r1m2         | 1,267     |
| Y1k3r2m1         | 1,290     | Y1k3r2m2         | 1,250     |
| Y1k3r3m1         | 1,266     | Y1k3r3m2         | 1,221     |
| Y2k1r1m1         | 1,337     | Y2k1r1m2         | 1,309     |
| Y2k1r2m1         | 1,337     | Y2k1r2m2         | 1,309     |
| Y2k1r3m1         | 1,337     | Y2k1r3m2         | 1,309     |
| Y2k2r1m1         | 1,335     | Y2k2r1m2         | 1,305     |
| Y2k2r2m1         | 1,334     | Y2k2r2m2         | 1,302     |
| Y2k2r3m1         | 1,333     | Y2k2r3m2         | 1,300     |
| Y2k3r1m1         | 1,319     | Y2k3r1m2         | 1,292     |
| Y2k3r2m1         | 1,307     | Y2k3r2m2         | 1,275     |
| Y2k3r3m1         | 1,284     | Y2k3r3m2         | 1,247     |
| Y3k1r1m1         | 1,362     | Y3k1r1m2         | 1,334     |
| Y3k1r2m1         | 1,362     | Y3k1r2m2         | 1,334     |
| Y3k1r3m1         | 1,362     | Y3k1r3m2         | 1,334     |
| Y3k2r1m1         | 1,359     | Y3k2r1m2         | 1,331     |
| Y3k2r2m1         | 1,357     | Y3k2r2m2         | 1,328     |
| Y3k2r3m1         | 1,356     | Y3k2r3m2         | 1,325     |
| Y3k3r1m1         | 1,339     | Y3k3r1m2         | 1,317     |
| Y3k3r2m1         | 1,323     | Y3k3r2m2         | 1,300     |
| Y3k3r3m1         | 1,298     | Y3k3r3m2         | 1,273     |



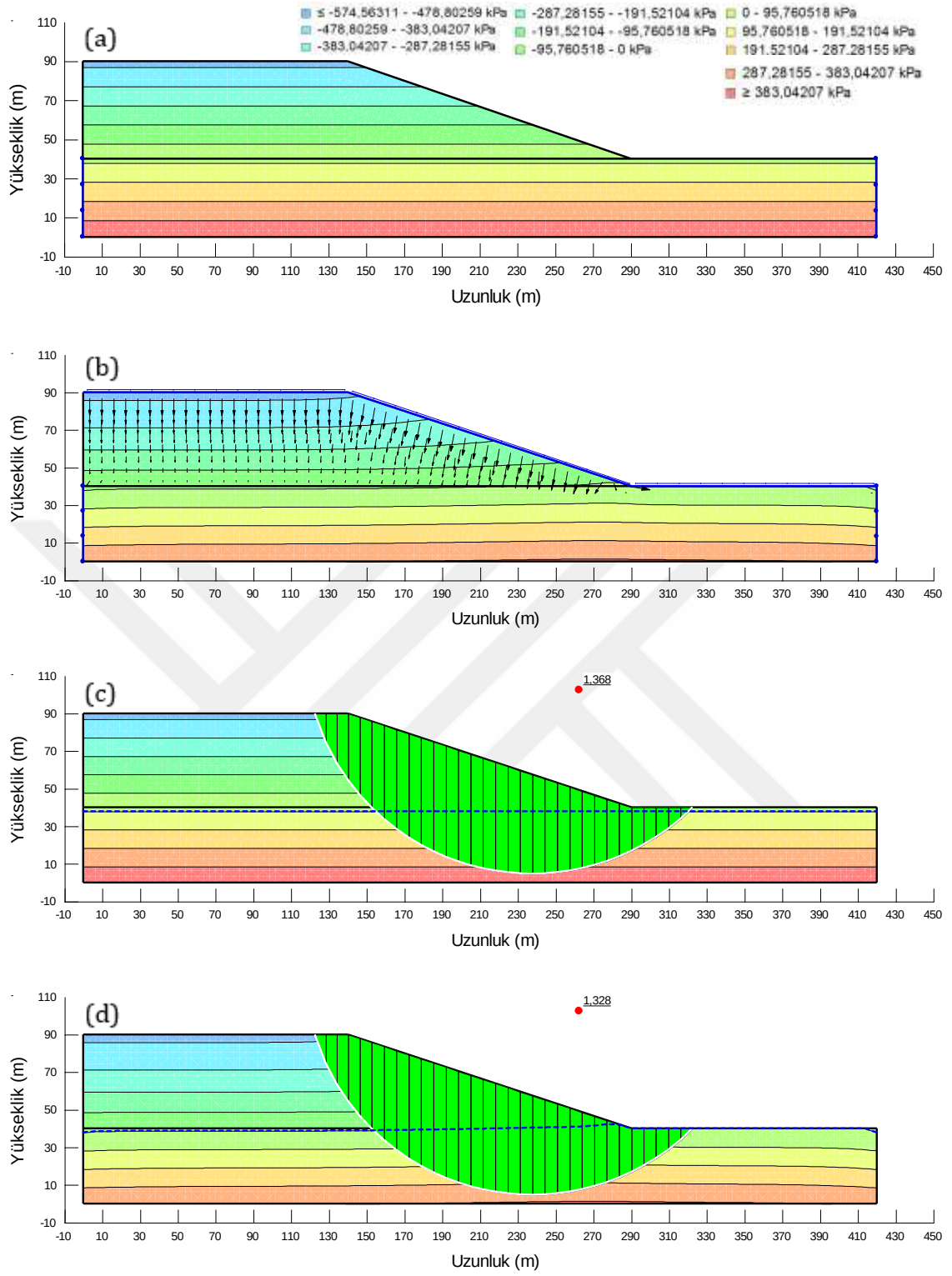
**Ek Şekil 1**  $\phi=24^\circ$  için Y1k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



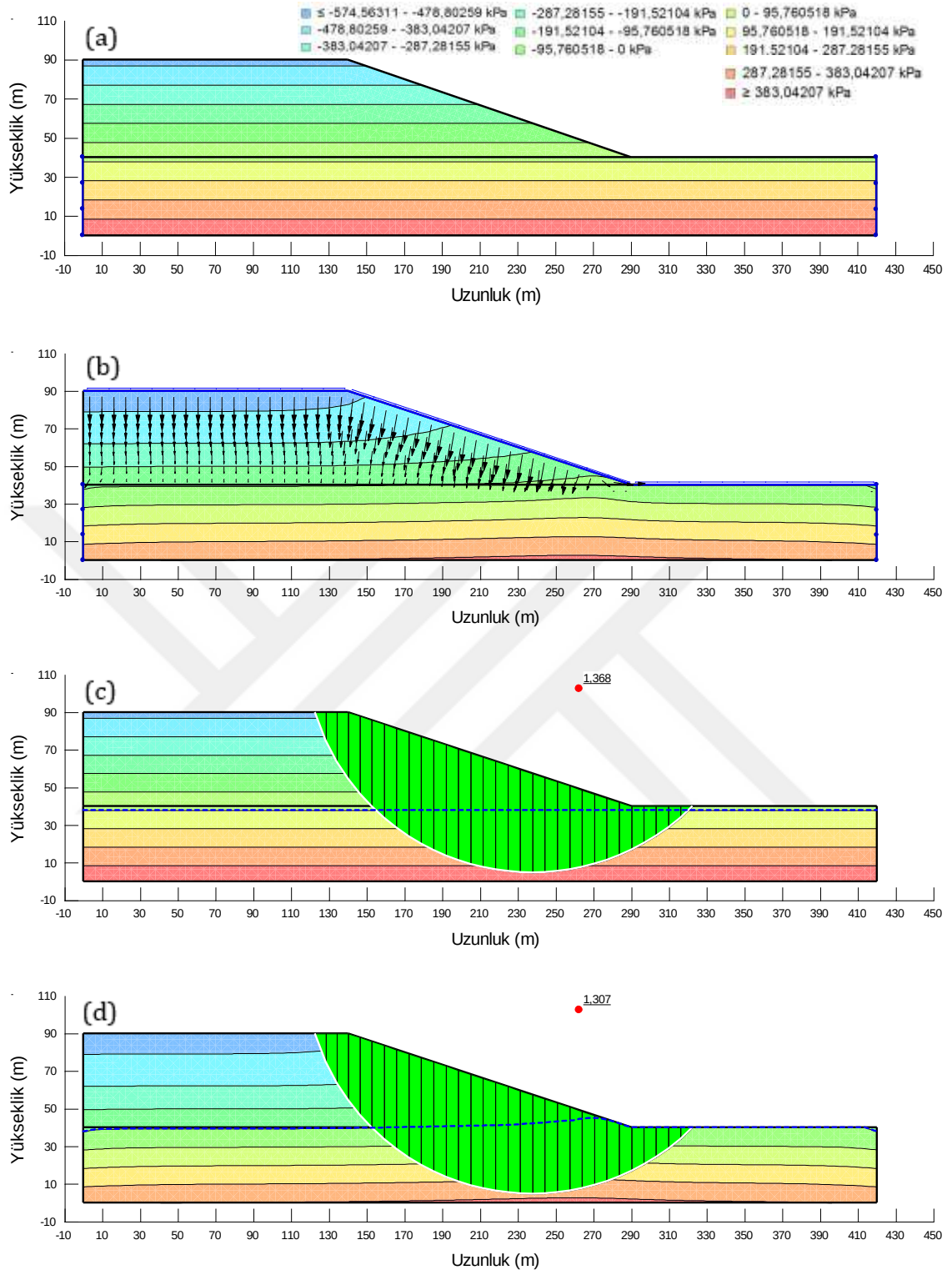
**Ek Şekil 2**  $\phi=24^\circ$  için Y2k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



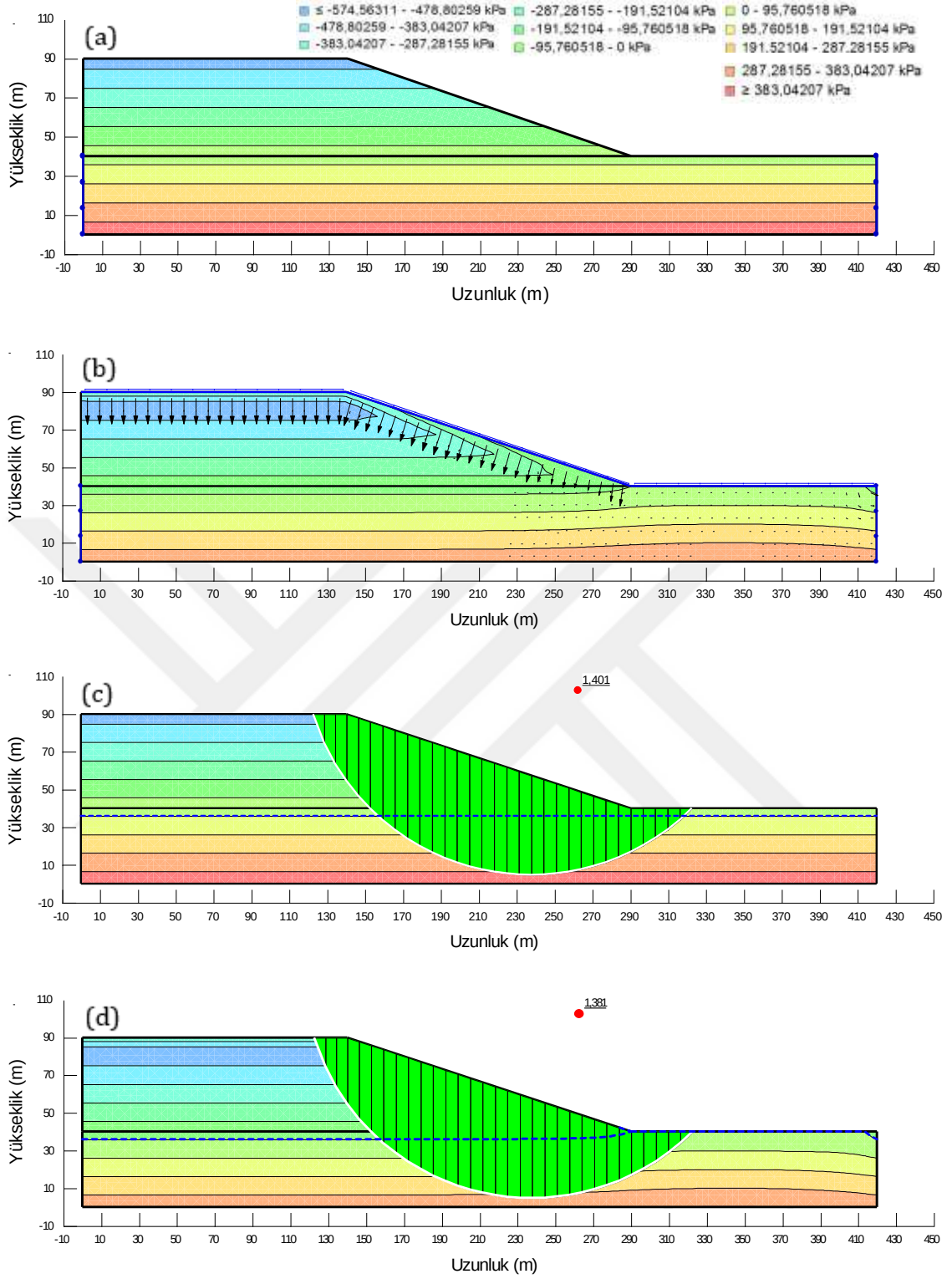
**Ek Şekil 3**  $\phi=24^\circ$  için Y2k3r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



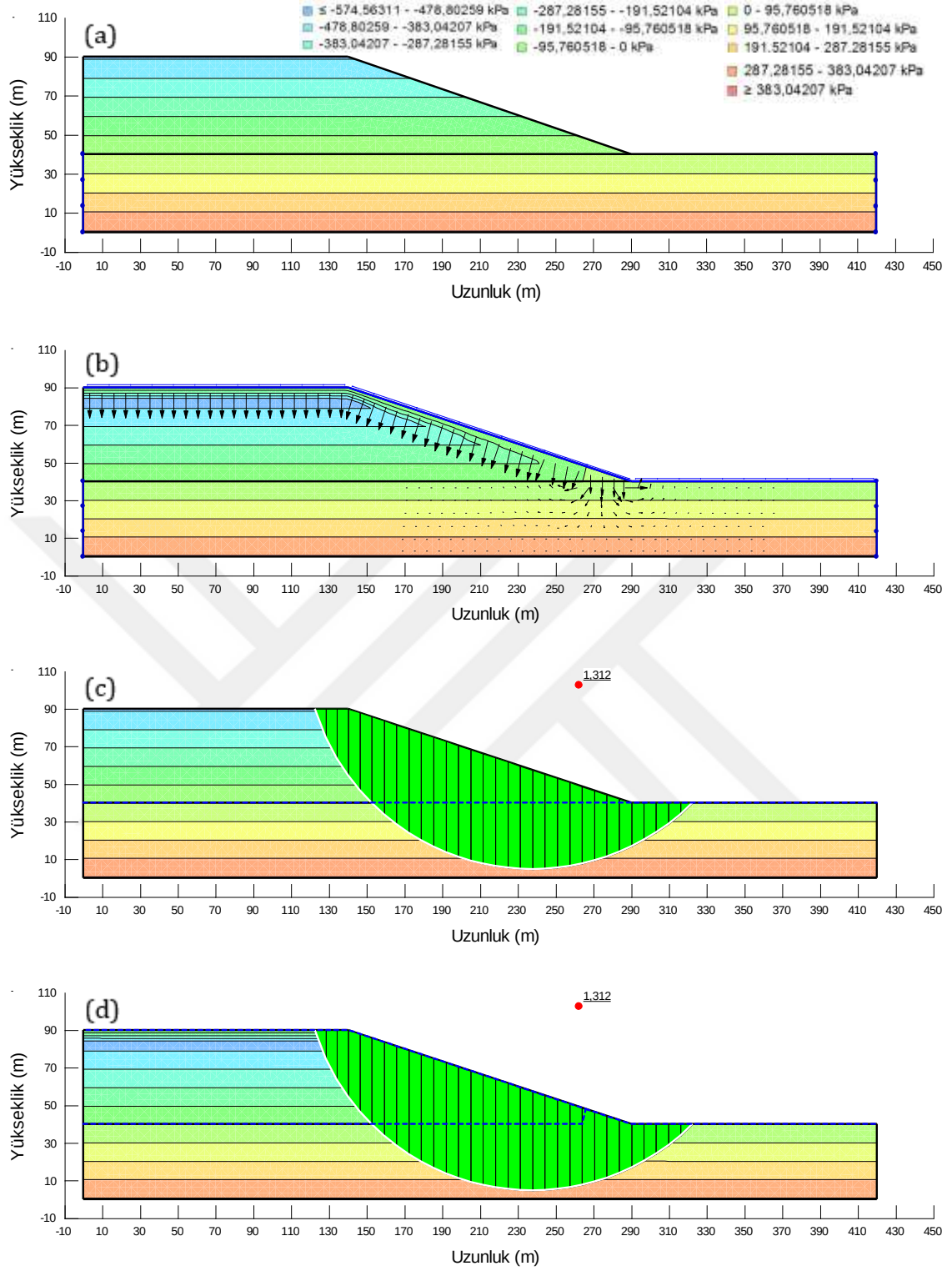
**Ek Şekil 4**  $\phi=24^\circ$  için Y2k3r2m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



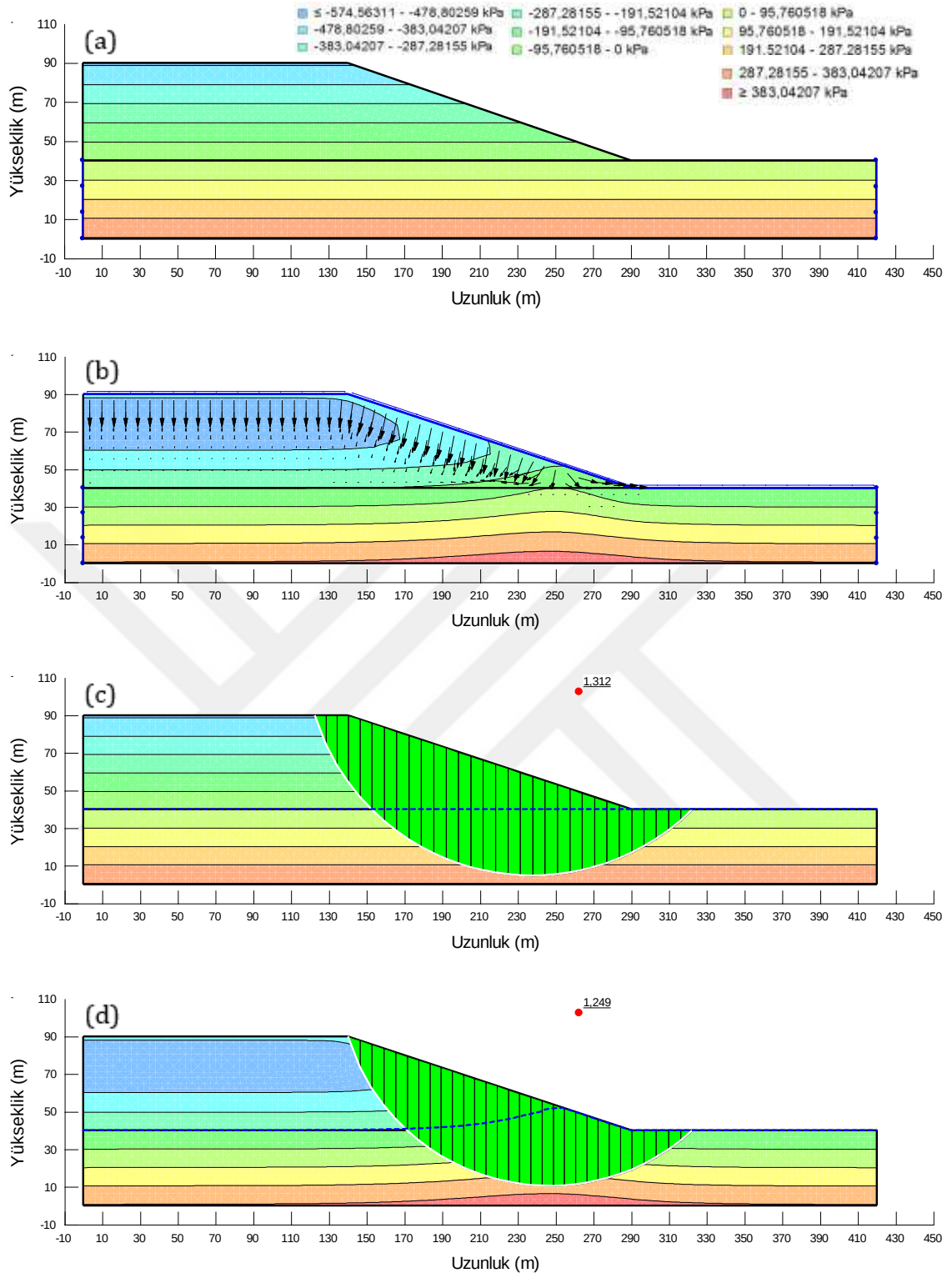
**Ek Şekil 5**  $\phi=24^\circ$  için Y2k3r3m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



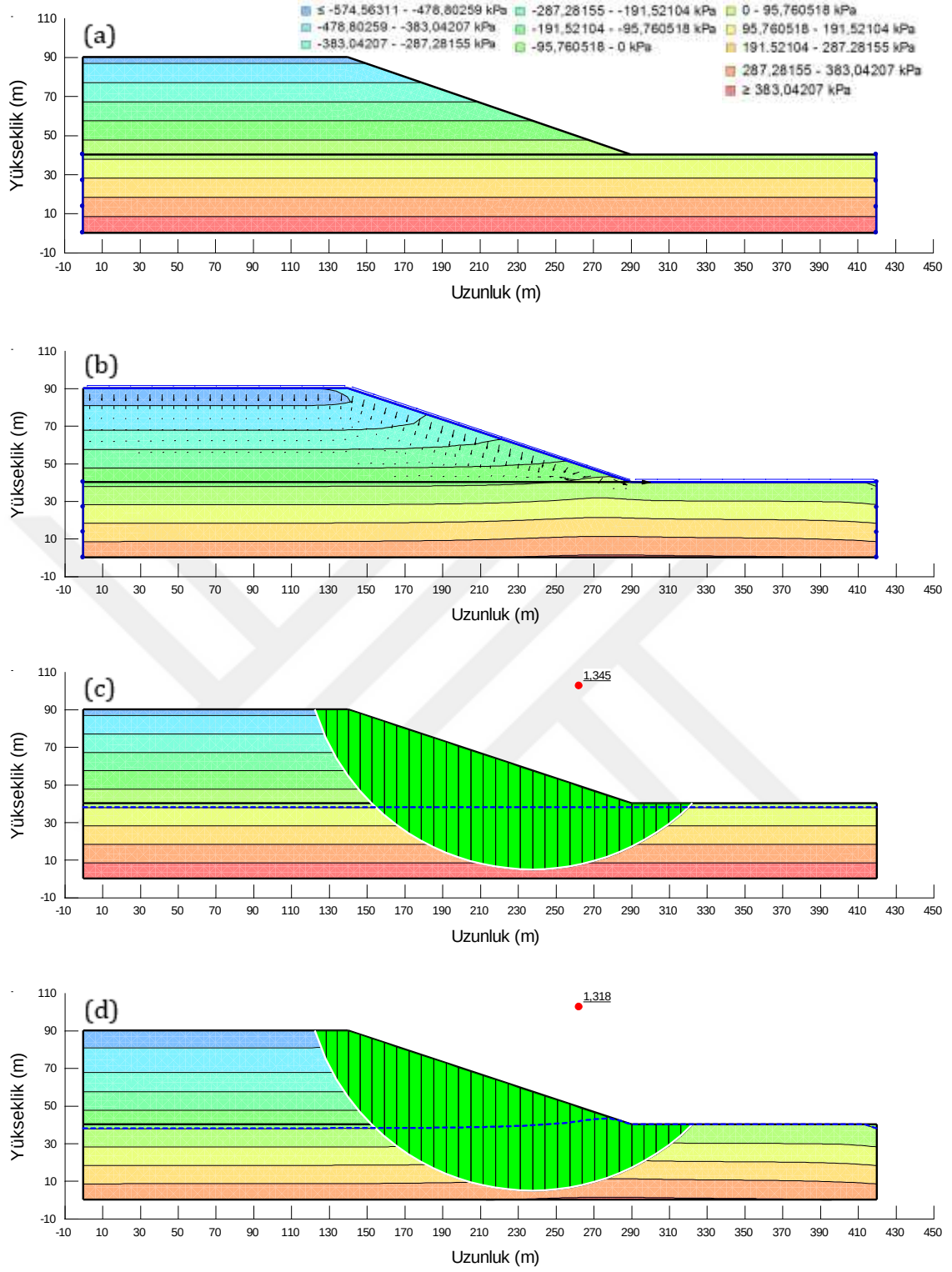
**Ek Şekil 6**  $\phi=24^\circ$  için Y3k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



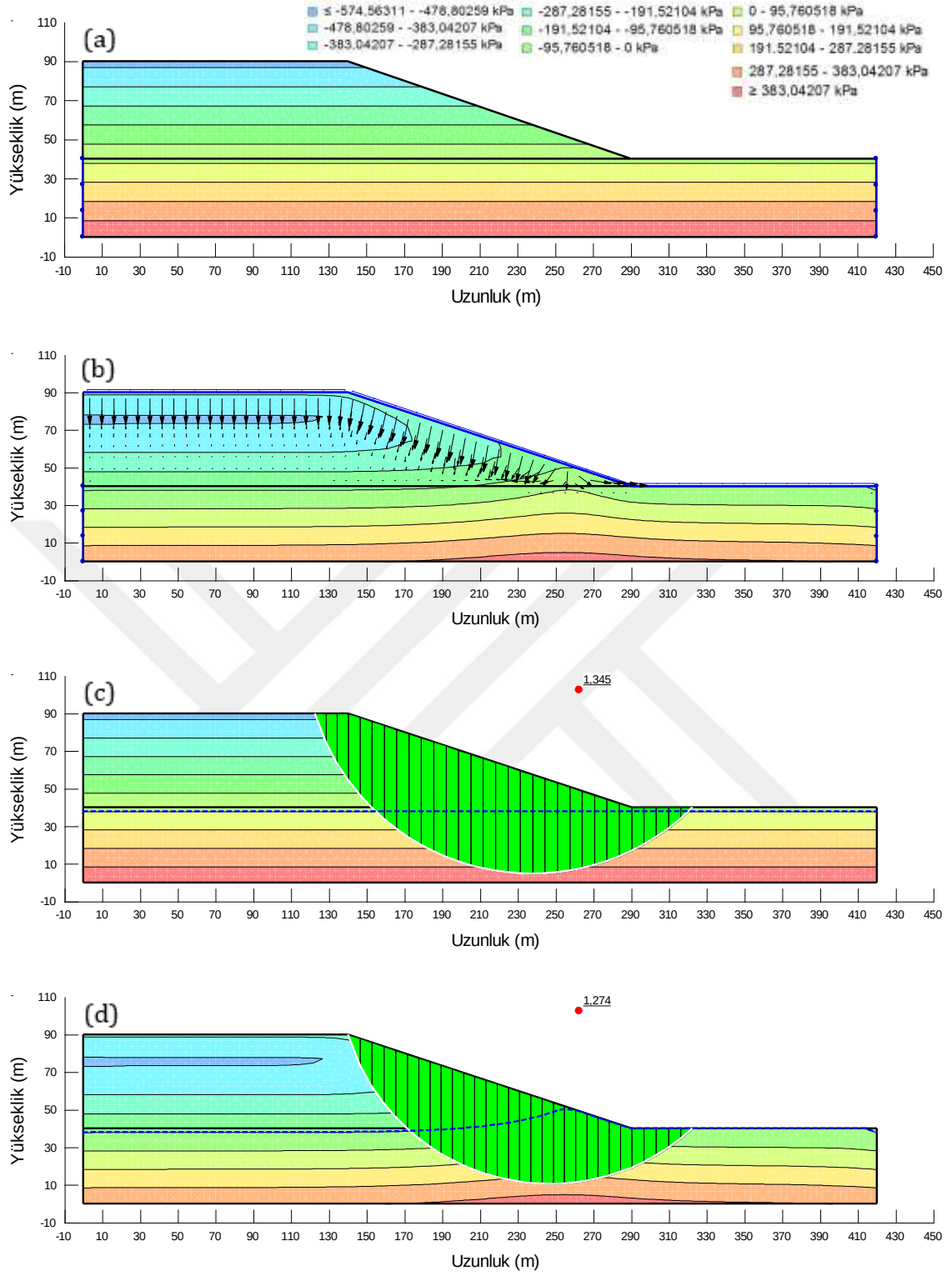
**Ek Şekil 7**  $\phi=24^\circ$  için Y1k1r3m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



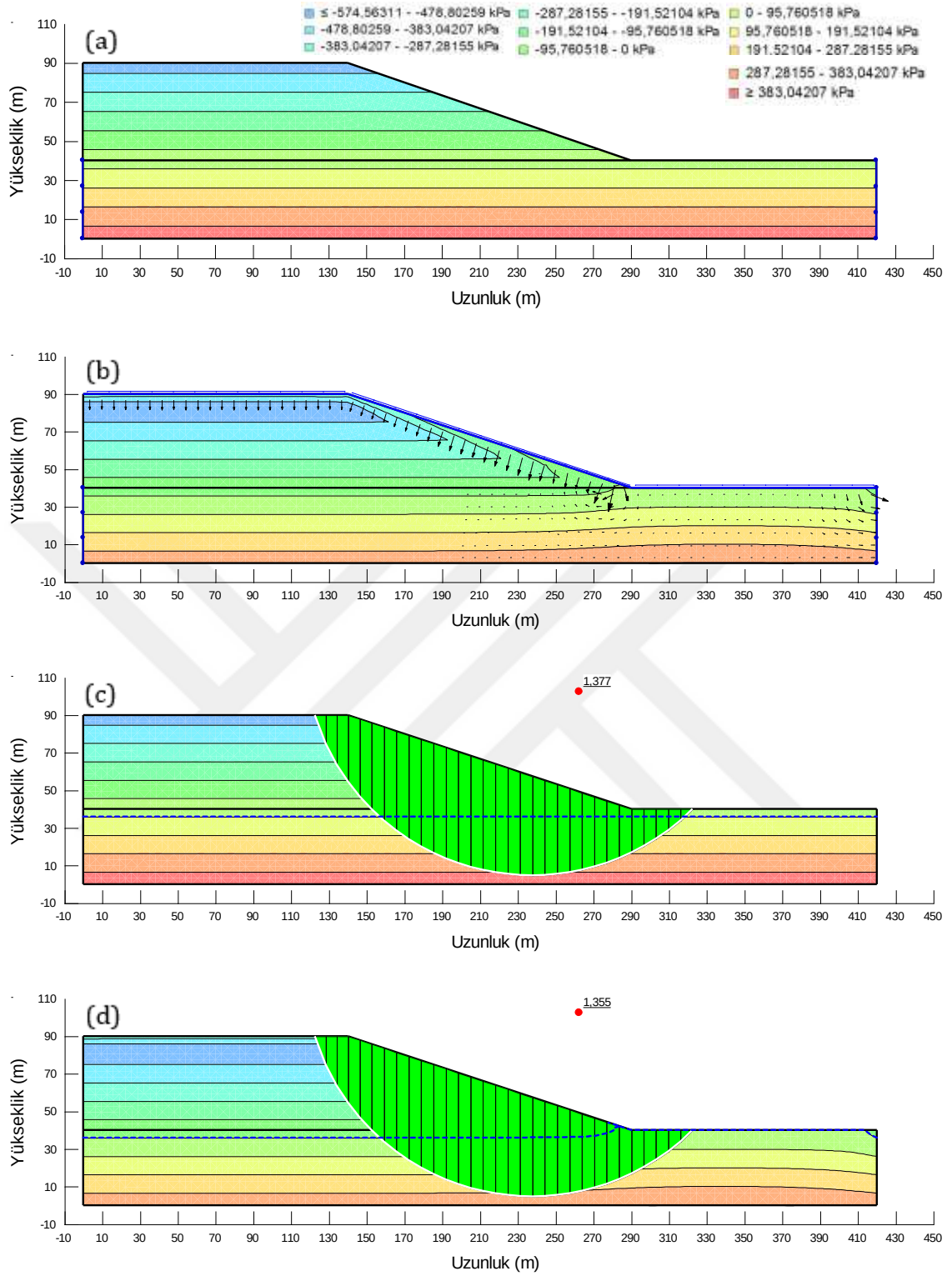
**Ek Şekil 8**  $\phi=24^\circ$  için Y1k3r3m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



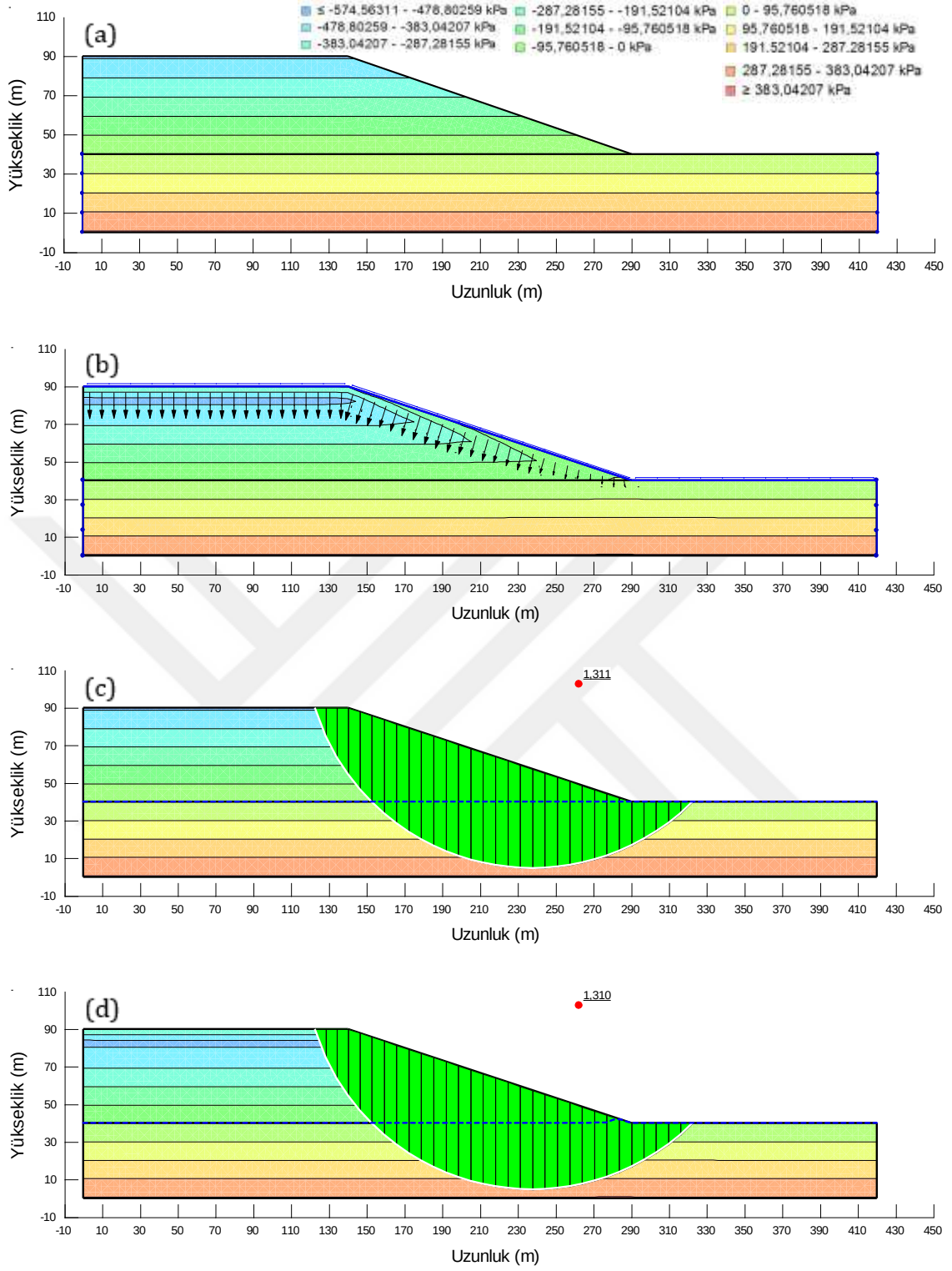
**Ek Şekil 9**  $\phi=24^\circ$  için Y2k3r1m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



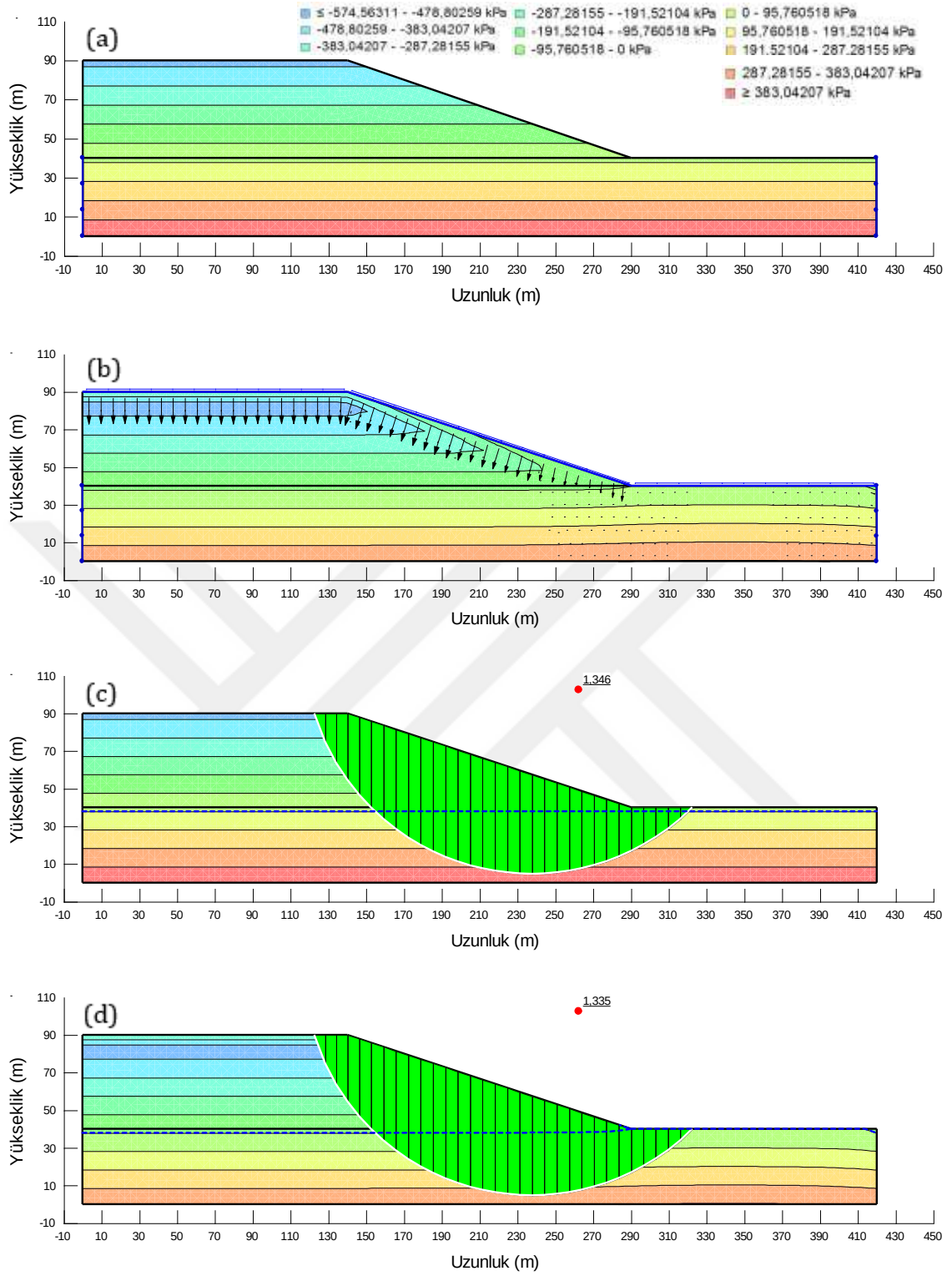
**Ek Şekil 10**  $\phi=24^\circ$  için Y2k3r3m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



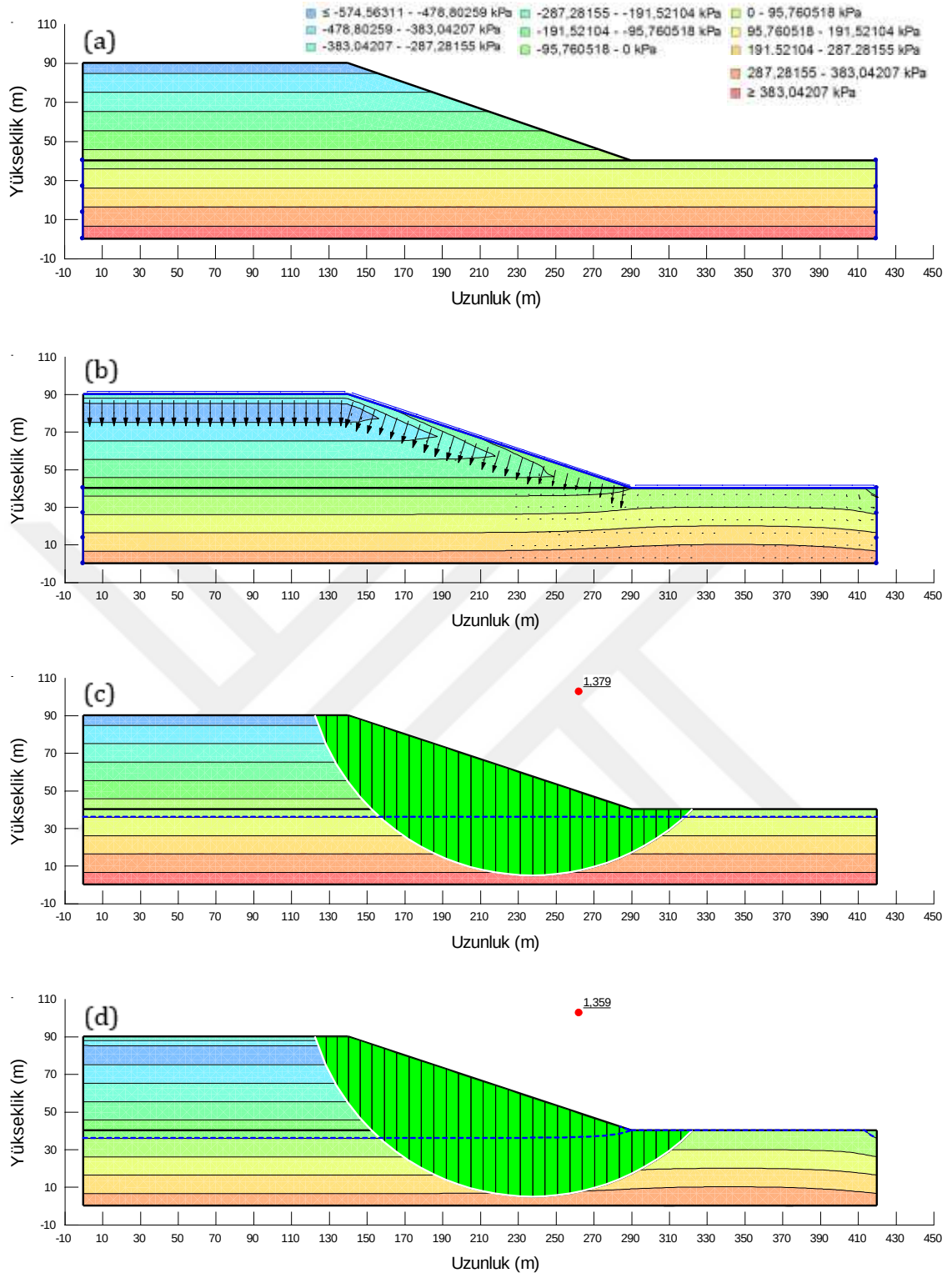
**Ek Şekil 11**  $\phi=24^\circ$  için Y3k2r1m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



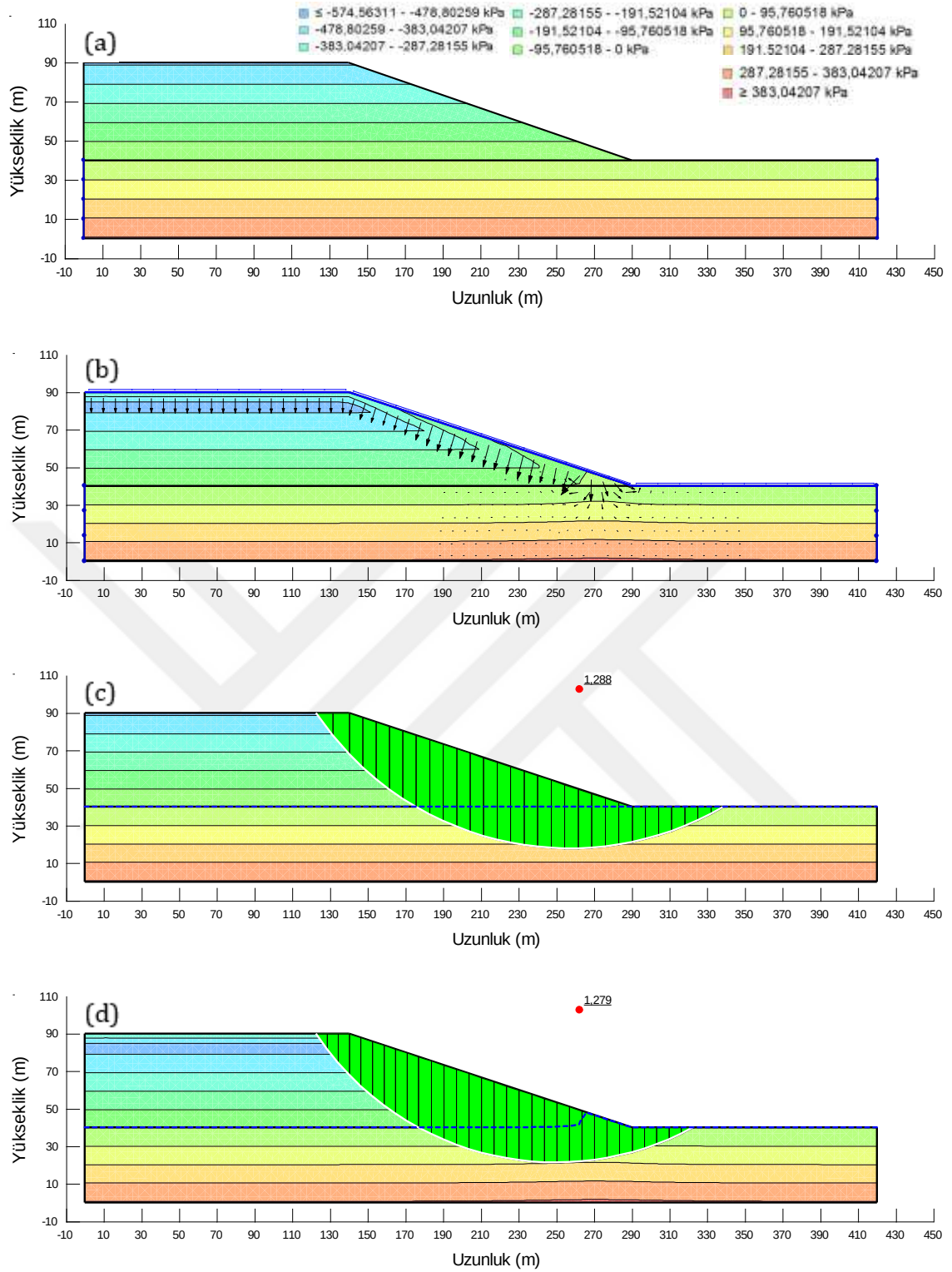
**Ek Şekil 12**  $\phi=22^\circ$  için Y1k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



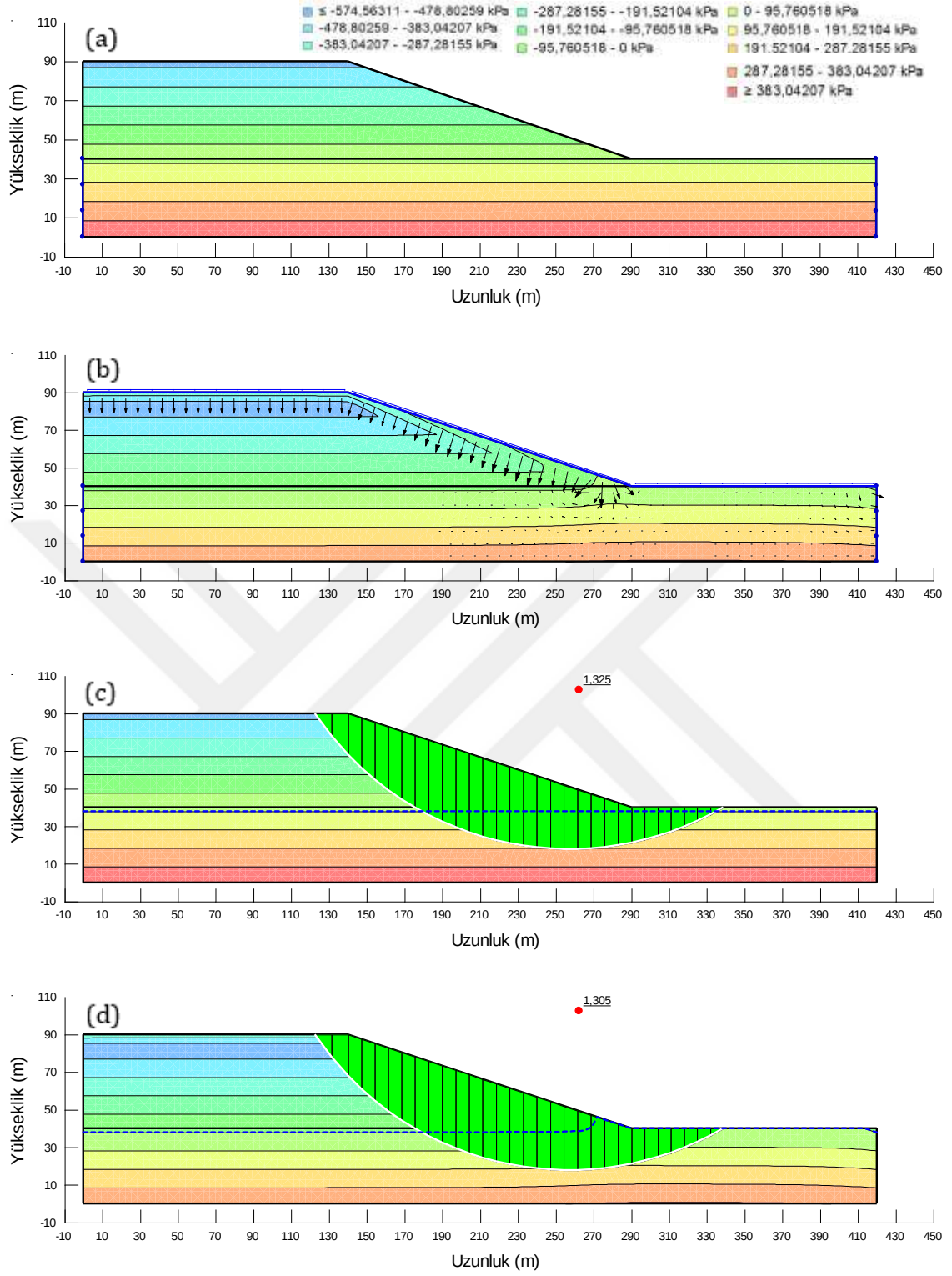
**Ek Şekil 13**  $\phi=22^\circ$  için Y2k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



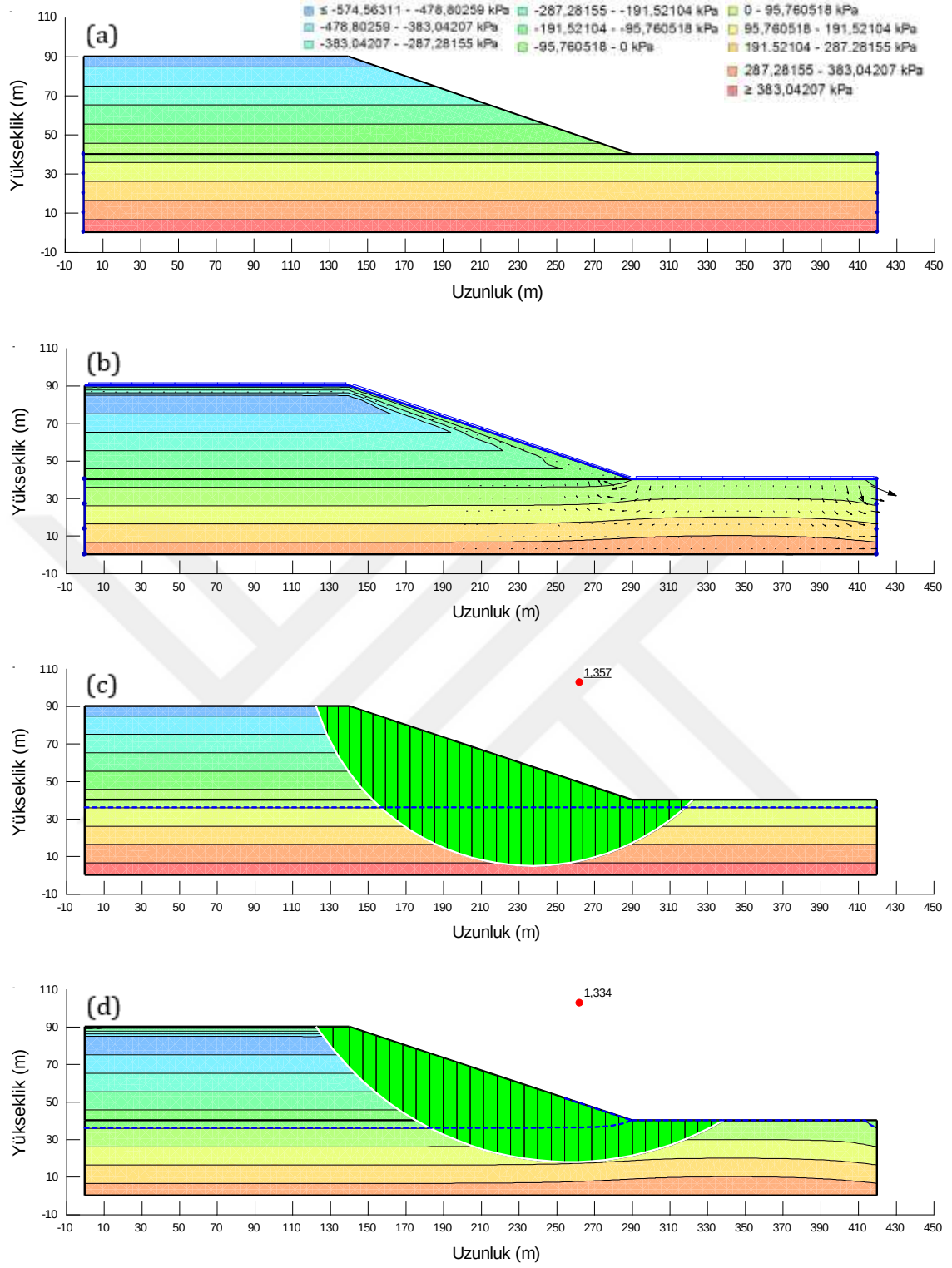
**Ek Şekil 14**  $\phi=22^\circ$  için Y3k2r1m1 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



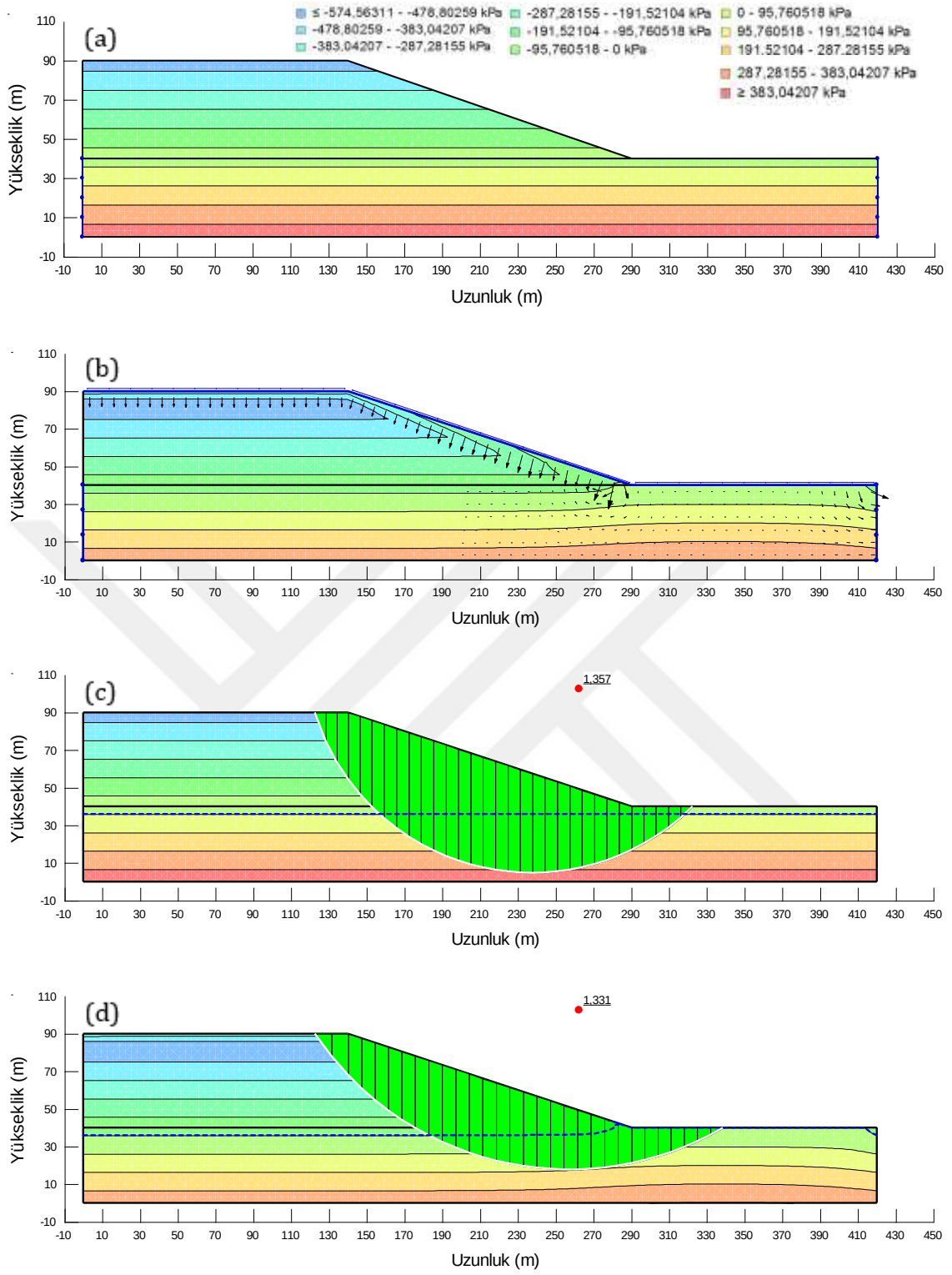
**Ek Şekil 15**  $\phi=22^\circ$  için Y1k2r1m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



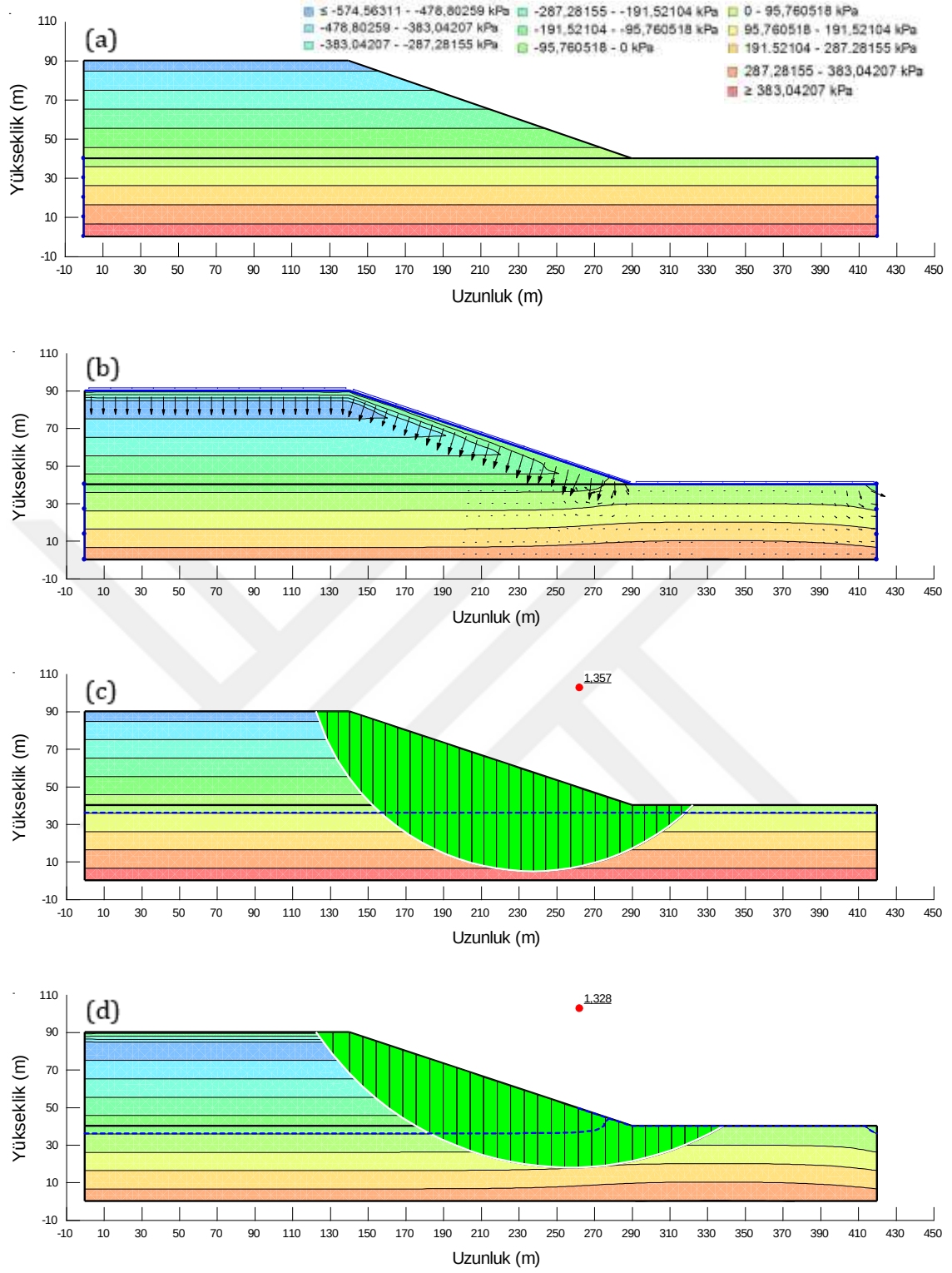
**Ek Şekil 16**  $\phi=22^\circ$  için Y2k2r1m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



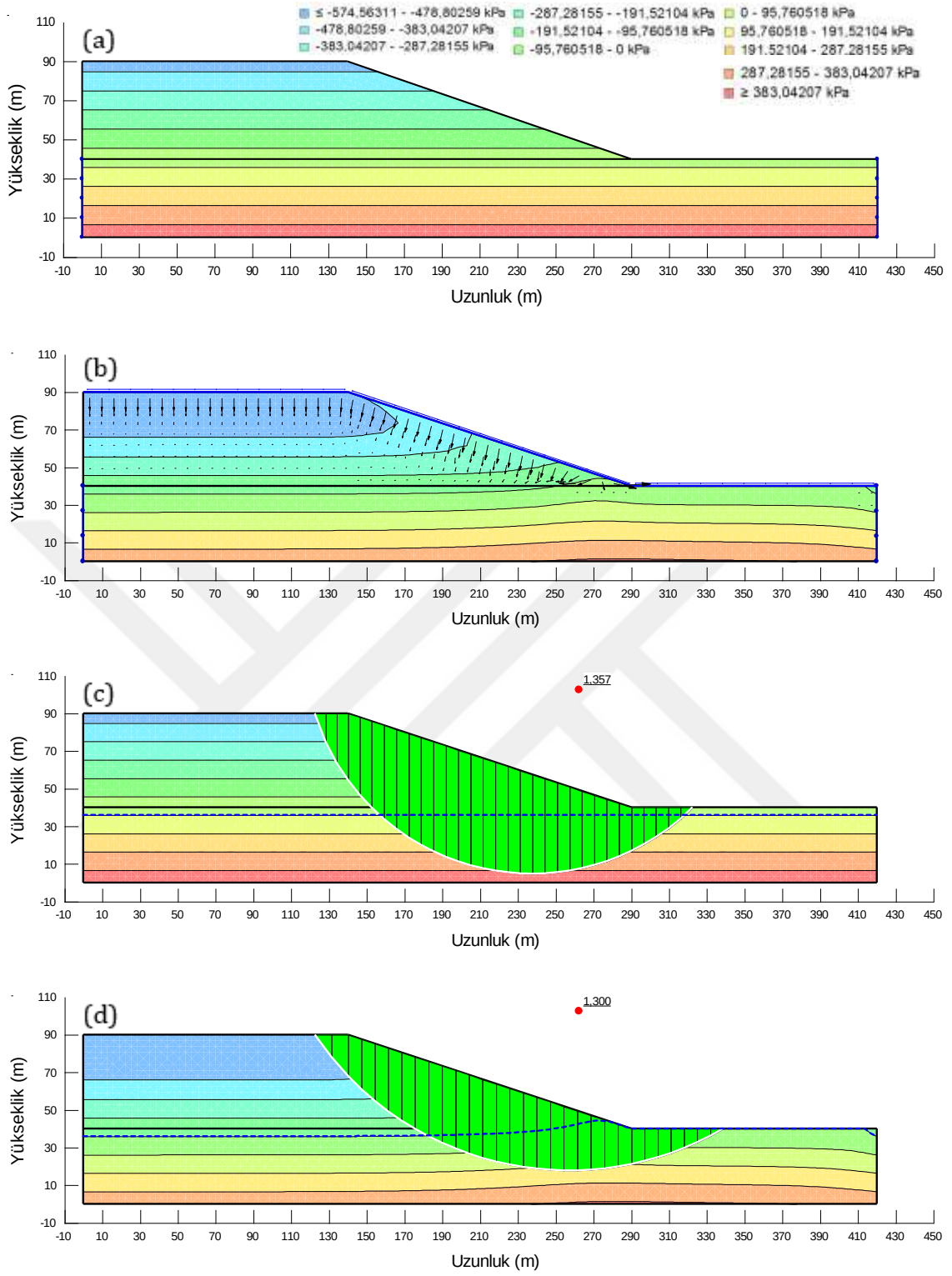
**Ek Şekil 17**  $\phi=22^\circ$  için Y3k1r2m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



**Ek Şekil 18**  $\phi=22^\circ$  için Y3k2r1m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



**Ek Şekil 19**  $\phi=22^\circ$  için Y3k2r2m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi



**Ek Şekil 20**  $\phi=22^\circ$  için Y3k3r2m2 analizi (a) başlangıç koşulları (b) yağış sızması durumu (c) başlangıç şev stabilitesi (d) 1 ay sonundaki şev stabilitesi

## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

İletişim Bilgisi: begumkrbulut@gmail.com

### Konferans Bildirileri

1. Karabulut, B. ve Kılıç, H. (2019). Yağış ile Sızmanın Dolgu Şevlerinin Stabilitesine Etkisi. *8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu*, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul.

