

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK BİLİM DALI**

**EKSTREM YAĞIŞLAR ALTINDAKİ BİR ŞEVİN
MODELLENMESİ**

Kübra Fitnat Ayvalık

Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN

MANİSA-2024

KÜBRA
FİTNAT
AYVALIK

EKSTREM YAĞIŞLAR ALTINDAKİ BİR ŞEVİN MODELLENMESİ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

KÜBRA FİTNAT AYVALIK



ÖZET

Yüksek Lisans

Kübra F. AYVALIK
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN

Son yıllarda doymun olmayan zeminler üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda negatif boşluk suyu basıncı ve emme basıncının stabilite üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Suyun şev içerisinde ilerlemesiyle, zemindeki boşluk suyu basıncı artmaktadır. Bu da emmenin sağladığı ilave kayma dayanımını azaltmakta ya da tamamen yok olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, doymun olmayan şevlerin, 3 farklı zemin türüyle, yağış etkisi altındaki stabiliteleri incelenmiştir. Her zemin türü için şevdeki başlangıç doymunluk derecesi 0,54 olarak tanımlanmış daha sonra bir zemin türü için 0,4 ve 0,5 değerlerinde de analizler yapılmıştır. Analizlerde, sonlu farklar metoduyla çalışan bir paket program kullanılmıştır. İlk olarak zemin türlerini istenilen doymunluk derecelerine getirmek için gerekli veriler sisteme yüklenmiştir. Daha sonra farklı yoğunluk ve sürelerde seçilen yağışlar sırayla farklı mekanik özelliklere ve farklı doymunluk derecelerindeki şevlere uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, emme basıncının stabilite üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: doymun olmayan zeminler, şev stabilitesi, emme basıncı, aşırı yağışlar, kayma dayanımı

2024, 100 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.

Kübra F. AYVALIK

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Seda DURUKAN

In recent years, many studies have been conducted on unsaturated soils and as a result of these studies, it has been revealed that negative pore water pressure and suction pressure have a significant effect on stability. As water penetrates in the slope, the pore water pressure in the soil increases. This reduces the additional shear strength provided by suction or causes it to disappear completely. In this study, the stability of unsaturated slopes under the effect of rainfall with 3 different soil types was examined. For each soil type, the initial saturation degree in the slope was defined as 0.54, then analyses were performed for a soil type at 0.4 and 0.5 values. A package program working with the finite difference method was used in the analyses. First, the necessary data were loaded into the system to achieve the desired saturation degrees. Then, the selected rainfalls with different intensities and durations were applied to slopes with different mechanical properties and different saturation degrees, respectively. As a result of the analyses, it was understood that the suction pressure had a significant effect on stability.

Keywords: unsaturated soils, soil stability, suction, extreme rainfall, soil strength

- 2024, 100 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, doygun olmayan şevlerin, 3 farklı zemin türüyle, yağış etkisi altındaki stabiliteleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, konuya giriş yapılmış ve daha önce yapılan çalışmalardan söz edilmiştir. Kullanılan malzeme ve metot hakkında bilgi verilmiş ve yapılan analizler, sonuçları ile sunulmuştur.

Yüksek lisans eğitimim süresince ve ayrıca bu çalışmamda bana verdiği destek ve yardımlarından dolayı sevgili hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Seda DURUKAN'a, hayatımın her anında yanımda olan ve bu süreçte de yardımlarını maddi manevi eksik etmeyen canım aileme teşekkürlerimi sunarım.

Kübra AYVALIK
Manisa, 2024

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

S_r	Doygunluk Derecesi
σ	Toplam Gerilme
u_w	Boşluk Suyu Basıncını
u_a	Boşluk Hava Basıncı
SWCC	Zemin Suyu Karakteristik Eğrisi
NBSB	Negatif Boşluk Suyu Basıncı
Ψ	Toplam Emme
Ψ_{II}	Ozmotik Emme
Ψ_m	Matrik Emme
T	Su Yüzeyindeki Çekme Kuvveti Bileşkesi
A	Su/Cam Yüzeyinin Islanma Açısı
r	Hava-Su Kesişme Yüzeyi (Meniküs) Yarıçapı
c	Efektif Boşluk Çapını Efektif Dane Çapına Bağlayan Bir Katsayı
D_{10}	%10'u Elek Altına Geçen En Büyük Tane Çapı (Mm)
E	Boşluk Oranı
AEV	Hava Girişi Basıncı
τ	Kayma Mukavemeti
c'	Efektif Kohezyon
ϕ'	Efektif Kayma Mukavemeti Açısı
σ_n	Toplam Normal Gerilme
χ	Toprağın Doygunluk Derecesine Bağlı Olarak 0 İle 1 Arasında Katsayı
ϕ_b	Matrik Emme Basıncına Göre Kayma Mukavemetindeki Artış Oranını Gösteren Açık
a	Van Genuchten Parametresi
b	Van Genuchten Parametresi
P0	Van Genuchten Parametresi Zemin Kılcal Kuvveti
W	Islatıcı Akışkan
n_w	Gözenekli Ortam
P_c	Kılcal Basınç
S_r^w	Artık Islatma Sıvısı Doygunluğu
S_e	Etkili Doygunluk

σ_b	Bishop Efektif Gerilme
c	Kohezyon
P_w	Su Basıncı
P_a	Hava Basıncı
C_c	İlave Kohezyonunun
κ	İçsel Geçirgenlik
N	Gözeneklilik
ρ_w	İslatma Sıvısının Yoğunluğu
g	Yerçekimi
k	İzotropik Hareketlilik Katsayısı
κ_w	Sıfır Rezidüel Doygunluk Durumunda Bağlı Geçirgenlik
q	Yağış

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1. Şev kayma düzlemi ve şev çeşitleri	2
Şekil 2. Bir şevin yağış kaynaklı yıkılma mekanizması	3
Şekil 3. Türkiye heyelan yoğunluğu haritası	4
Şekil 4. 1959-2013 yılları arasında Türkiye’de yaşanan heyelanların AFAD Başkanlığı kayıtlarına göre illere dağılımı	5
Şekil 5. Türkiye’de meydana gelen ve ölümle sonuçlanan heyelan olaylarına örnekler	6
Şekil 6. Babadağ yerleşkesindeki yamaç hareketlerinin yağış ile ilişkisi.....	8
Şekil 7. Genelleştirilmiş zemin mekaniği gösterimi	13
Şekil 8. Zemin mekaniği sınıflandırması	14
Şekil 9. Doygun olmayan zeminlerin faz durumları	15
Şekil 10. Doygun ve doymayan zeminleri birbirinden ayıran bölgeler	15
Şekil 11. Doygun ve doymayan zemin bölgeleri	16
Şekil 12. Basitleştirilmiş yüzey gerilim şeması	22
Şekil 13. Zeminlerde kılcallık ile ilgili bir modelleme	22
Şekil 14. Zemin suyu karakteristik eğrisi (SWCC)	24
Şekil 15. Zemin suyu karakteristik eğrisi üzerindeki farklı noktalarda zemin fazları.....	25
Şekil 16. Islanma ve kuruma etkisi altındaki zeminlerin, zemin suyu karakteristik eğrisi üzerinde gösterimi	26
Şekil 17. Farklı zemin türlerinde SWCC	26
Şekil 18. Zemin suyu karakteristik eğrisi üzerinde zemin koşullarının etkisi	27
Şekil 19. Suyu doymayan zeminlerin Mohr kırılma zarfı	28
Şekil 20. Doygun olmayan zeminler için Mohr dairelerinin kırılma zarfı	30
Şekil 21. Hejin, Zhonghuchao köyünde meydana gelen tipik bir düşme örneği	32
Şekil 22. Zaoling köyünde meydana gelen devrilme örneği.....	33
Şekil 23. Çeşitli kayma düzlemleri	33
Şekil 24. Yongjing kentinde meydana gelen derin akma örnekleri	34
Şekil 25. Analizlerde kullanılacak şev modelinin AutoCad çizimi	35
Şekil 26. Filtre kağıdı yöntemi için hazırlanmış numunenin şematik gösterimi	39
Şekil 27. Z2 zeminini için elde edilen zemin suyu karakteristik eğrisi	41
Şekil 28. Yapılacak analizlerin şematik gösterimi	42
Şekil 29. Z1 için başlangıç doygunluğu dağılımı	51
Şekil 30. Z1 için başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı.....	51
Şekil 31. Z1’de q1 yağışından sonra oluşan göçmeden hemen önceki doygunluk dağılımı	52
Şekil 32. Z1’de q1 yağışından sonra oluşan göçmeden hemen önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	53
Şekil 33. Z1’de q2 yağışından sonra oluşan göçmeden hemen önceki doygunluk dağılımı	54
Şekil 34. Z1’de q2 yağışından sonra oluşan yıkılmadan hemen önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	54
Şekil 35. Z1’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı	55
Şekil 36. Z1’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı	55
Şekil 37. Z2 için başlangıç doygunluğu dağılımı	57

Şekil 38. Z2 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı	57
Şekil 39. Z2’de q1 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı	58
Şekil 40. Z2’de q1 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı	58
Şekil 41. Z2’de q2 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı	59
Şekil 42. Z2’de q2 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı	60
Şekil 43. Z2’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı	61
Şekil 44. Z2’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı	61
Şekil 45. Z3 %54 için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı	62
Şekil 46. Z3 %54 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı....	63
Şekil 47. Z3 %54 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	64
Şekil 48. Z3%54 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	64
Şekil 49. Z3%54 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı.....	65
Şekil 50. Z3 %54 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı.....	66
Şekil 51. Z3 %54 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	67
Şekil 52. Z3 %54 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	67
Şekil 53. Z3 %40 için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı	68
Şekil 54. Z3 %40 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı....	69
Şekil 55. Z3 %40 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	70
Şekil 56. Z3%40 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	70
Şekil 57. Z3%40 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı.....	71
Şekil 58. Z3%40 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	71
Şekil 59. Z3%40 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	72
Şekil 60. Z3%40 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	73
Şekil 61. Z3%50 için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı	74
Şekil 62. Z3%50 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı....	74
Şekil 63. Z3%50 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	75
Şekil 64. Z3%50 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	75
Şekil 65. Z3%50 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	76

Şekil 66. Z3(hadong%50) için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	77
Şekil 67. Z3(hadong%50) için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	78
Şekil 68. Z3(hadong%50) için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	78
Şekil 69. Z3 için her bir suya doygunluk derecesi için farklı yağış koşullarında göçme için gereken süre.....	79
Şekil 70. Tüm zeminler için farklı yağış koşullarında göçme için gerekli süre	80
Şekil 71. Z2 zemini (c=0 Ø=30) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı	81
Şekil 72. Z2 zemini (c=0 Ø=30) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı	81
Şekil 73. Z2 zemini (c=0 Ø=3) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	82
Şekil 74. Z2 zemini (c=0 Ø=30) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	83
Şekil 75. Z2 zemini (c=0 Ø=30) için q2 yağışından dolayı yıkılmadan önceki doygunluk derecesi dağılımı	84
Şekil 76. Z2 zemini (c=0 Ø=30) için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	84
Şekil 77. Z2 zemini (c=0 Ø=30) için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	85
Şekil 78. Z2 zemini (c=0 Ø=30) için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	85
Şekil 79. Z3 zemini (c=0 Ø=30) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı	86
Şekil 80. Z3 zemini (c=0 Ø=30) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı	86
Şekil 81. Z3 zemini (c=0 Ø=30 Se=%54) q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı	87
Şekil 82. Z3 zemini (c=0 Ø=30 v=1330 Se=%54) q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	88
Şekil 83. Z3 zemini (c=0 Ø=30 v=1330 Se=%54) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı.....	89
Şekil 84. Z3 zemini (c=0 Ø=30 v=1330 Se=%54) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı	89
Şekil 85. Z3 zemini (c=0 Ø=30 v=1330 Se=%54) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı.....	90
Şekil 86. Z3 zemini (c=0 Ø=30 v=1330 Se=%54) q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı.....	91

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1. Emme basıncı ölçümünde kullanılan yöntemler	19
Tablo 2. Doygun olmayan zeminler için önerilen kayma mukavemeti denklemleri	29
Tablo 3. Şev duraysızlıklarının mühendislik sınıflandırması Varnes (1978).....	32
Tablo 4. Zemin1 için zemin ve akışkan özellikleri	36
Tablo 5. Zemin2 için zemin ve akışkan özellikleri	36
Tablo 6. Zemin3 için zemin ve akışkan özellikleri	37
Tablo 7. Ülkemizde standart zamanlarda görülen en yüksek yağış miktarları, yer ve tarihleri	38
Tablo 8. Uygulanan yağış hızları.....	38
Tablo 9. Uygulanan tüm yağışlar sonrasında tüm zemin çeşitlerinin göçmesi için gereken süreler	79
Tablo10. Uygulanan tüm yağışlar sonrasında $c=0$ ve $\phi=30$ varsayılan zemin çeşitlerinin göçmesi için gereken süreler	91

İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT	IV
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	V
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
İÇİNDEKİLER	XII
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ŞEV STABİLİTESİ

1.1. Doygun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri.....	13
1.1.1. Zeminlerde Emme Kavramı	17
1.1.1.1. Zeminlerde Emme Basıncı Ölçümü	18
1.1.1.1.1. Eksen Kaydırma	19
1.1.1.1.2. Filtre Kağıdı	19
1.1.1.1.3. Basınç Plakası.....	20
1.1.1.1.4. Isıl İletkenlik.....	20
1.1.1.1.5. Psikometre	20
1.1.1.1.6. Tensiyometre	21
1.1.1.1.7. Emme Probu	21
1.1.2. Zeminlerde Vadoz Bölge	21
1.1.3. Zeminlerde Kılcallık.....	21
1.1.4. Su Karakteristik Eğrisi	23
1.2. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Direnci	27
1.3. Şev Stabilesi	31
1.3.1.Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması	31
1.3.1.1. Düşme.....	32
1.3.1.2. Devrilme.....	33
1.3.1.3. Kayma.....	33
1.3.1.4. Akma.....	34

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal	35
2.2. Metot.....	39
2.2.1. Filtre Kağıdı Metodu	39
2.2.2. FLAC Programı	42
2.2.1.1. İki Fazlı Akış Modeli	43
2.2.1.1.1. Bağlı Geçirgenlik Kanunları.....	44
2.2.1.1.2. Kılcal Basınç Kanunları	44
2.2.1.1.3. Görünen Kohezyon	44
2.2.1.1.4. Karalı Durum Doygunluğu Ve Gözenek Basıncı	46
2.3. FLAC Programında Analizler Sırasında Takip Edilen Adımlar	47

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Z1 Zemininde Yapılan Analizler.....	50
3.2. Z2 Zemininde Yapılan Analizler.....	56
3.3. Z3 Zemininde Yapılan Analizler.....	62
3.3.1. Z3 Zemininde %54 Doygunlukta Yapılan Analizler.....	62
3.3.2. Z3 Zemininde %40 Doygunlukta Yapılan Analizler.....	68
3.3.3. Z3 Zemininde %50 Doygunlukta Yapılan Analizler.....	73
3.4. Tüm Zeminlerde Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısının Eşit Kabul Edilmesi Hali.....	80

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

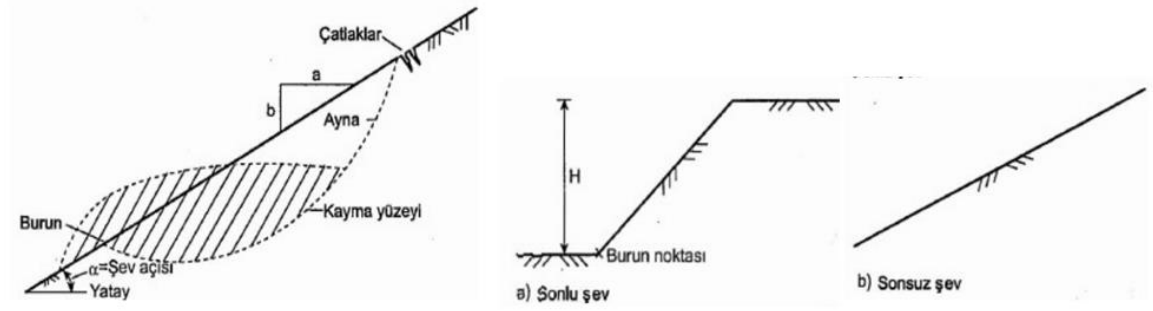
SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar Ve Öneriler	92
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ.....	100

GİRİŞ

Depremler, volkan etkinlikleri, heyelanlar, su baskını, fırtına gibi doğal afetler olarak adlandırılan olaylar insan yaşamını yakından ilgilendiren ve dünyanın nüfusu arttıkça etkisi ve önemi artan olaylardır. Bu etkenler ile topoğrafyanın doğal yapısı değişmektedir. Arazilerin doğal yapısındaki bu değişiklikler stabilite problemlerine yol açmaktadır. Nüfusun hızlı bir şekilde artmasıyla, kontrolsüz yapılaşma eğimli arazilere doğru kaymış ve şev stabilitelerinde dengesizliklere yol açmıştır. Bu da heyelan vakalarının artmasına neden olmuştur. Ülkemizde de birçok örneği görülmekle birlikte, dünya çapında gerekli önlemler alınmadığı takdirde, şevlerdeki stabilite problemleri büyük kayıplara sebep olması beklenmektedir. Heyelanların verdiği zararların büyüklüğü göz önüne alındığında, şev stabilitesi analizleri geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir [1].

Şev genel anlamda “yatay ya da mevcut arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan kitle” olarak tarif edilebilir [2]. Şekil 1’de tipik bir şev modeli ve kayma düzlemi gösterilmiştir. Eğik bir yüzeyi olan zemin kütlesi yerçekimi kuvvetinin etkisi ile kaymaya zorlanır. Böylece zemin kütlesinin içindeki yaklaşık bütün yüzeylerde, farklı miktarlarda kayma gerilmesi ortaya çıkar. Bu gerilmeye karşı meydana gelen mukavemete göre zemin kütlesi kararlı kalır veya kayar. Şev yüzeylerinde bulunan zeminin kararlı kalabilmesi için kayma mukavemetinin maruz kalınan gerilmeden büyük olması gerekir. Buna karşılık kayma mukavemeti en büyük kayma gerilmesinden küçük olduğu durumda, eğik yüzeydeki zemin kütlelerinin bir bölümü kayar. Zemini kaydırmaya çalışan kuvvetin büyüklüğü zemin kütlesinin kayma düzlemine paralel bileşeni olduğu için şev yüzeyinin eğimine bağlı olarak değişir. Kuşkusuz zeminin dengede kalabilmesi için şev yüzeyinin belli bir dereceden daha fazla eğimli olmaması gerekir. Mühendislik amaçlı yapılan analizlerde şev duraysızlığı, bir şevde mevcut kuvvetlerin toplamının, sevi etkisi altına alan dış kuvvetlerin toplamından az olduğu durumlarda zemin kütlesinin kayması olarak adlandırılır [3].



Şekil 1. Şev kayma düzlemi ve şev çeşitleri [3]

Şevlerin stabilitesinin bozulmasına neden olan faktörler, doğal ve insanlardan kaynaklanan faktörler olmak üzere iki grupta toplanır [4];

1. Doğal faktörler;

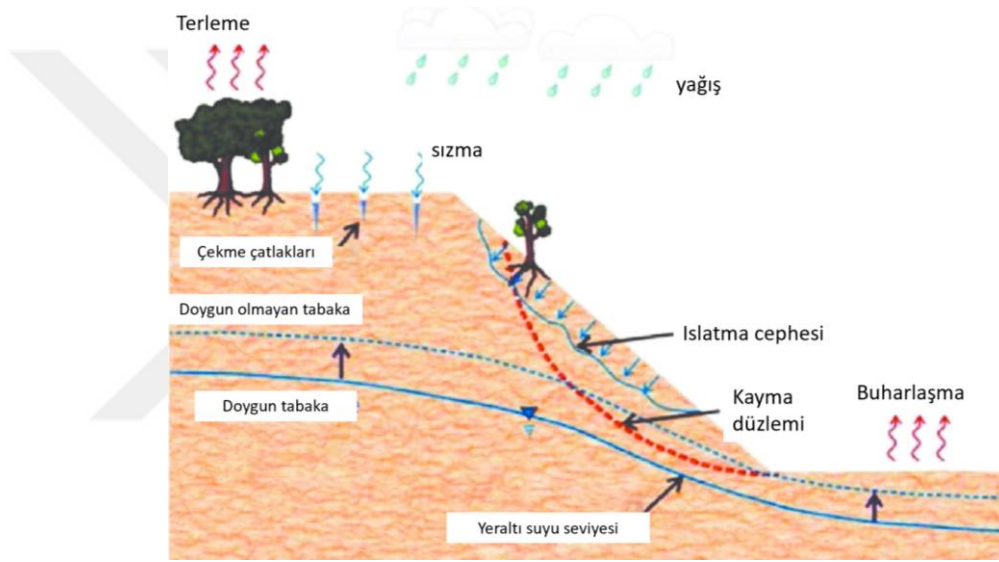
- Dış etkiler: Akarsu, göl veya deniz tarafından şevin (yamacın) topuğunun aşındırılması, sismik etkiler (deprem) ve volkanik aktivite
- İklim etkileri: Aşırı yağışlar ve karın ani erimesi (yeraltı ve yerüstü suları, gözenek suyu basıncındaki artışlar)
- Bozunma nedeniyle şevi oluşturan malzemelerin veya süreksizliklerin makaslama dayanımında azalma
- Şevde gerilme durumunun değişmesi.

2. İnsan aktivitesinden kaynaklanan faktörler;

- Yapı inşası, şev üstüne dolgu yığılması vb. gibi nedenlerden kaynaklanan statik, trafik ve patlatma gibi dinamik etkilerin neden olduğu dış yükler
- Denetimsiz kazı yapılması (örneğin; topukta kazı, özellikle yerleşim alanlarında veya civarında taşocağı ve maden işletmeleri)
- Boşluk suyu basıncını arttıran faktörler (gömülü alt yapı elemanlarından kaçakların olması) ve su tablasındaki ani değişimler
- Bitki örtüsünün tahrip edilmesi

Geçmişte birçok araştırmacı doymun olmayan zemin mekaniğinin stabilite üzerinde etkisinin çok fazla olmadığını düşünmüş ve tüm zeminleri doymun gibi değerlendirmiştir. Bu da klasik zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan şev stabilite analizlerinde elde edilen güvenlik katsayılarının gerçekte olandan daha fazla çıkmasına neden olmuştur. 1960'lerden itibaren doymun olmayan zeminler üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmış ve bu çalışmalar sonucunda negatif boşluk suyu

basıncı ve emme basıncının stabilite üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Suyun şev içerisinde ilerlemesiyle, zemindeki boşluk suyu basıncı artmaktadır. Bu da emmenin sağladığı ilave kayma dayanımını azaltmakta ya da tamamen yok olmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte şevin kaymaya karşı toleransı azalmaktadır. Diğer bir yandan, terleme ve buharlaşma gibi olaylar, zemindeki emme kaybının geri kazanılmasını sağlamaktadır. Şekil 2’de suyun bir şevin içindeki hareketiyle oluşan yıkılma mekanizması modellenmiştir. Bu gibi iklimsel değişiklikler sürekli tekrarlanmakta ve bu da doymamış bölgeyi şev ve çevre arasında kalan dinamik bir ara yüz haline getirmektedir [4].

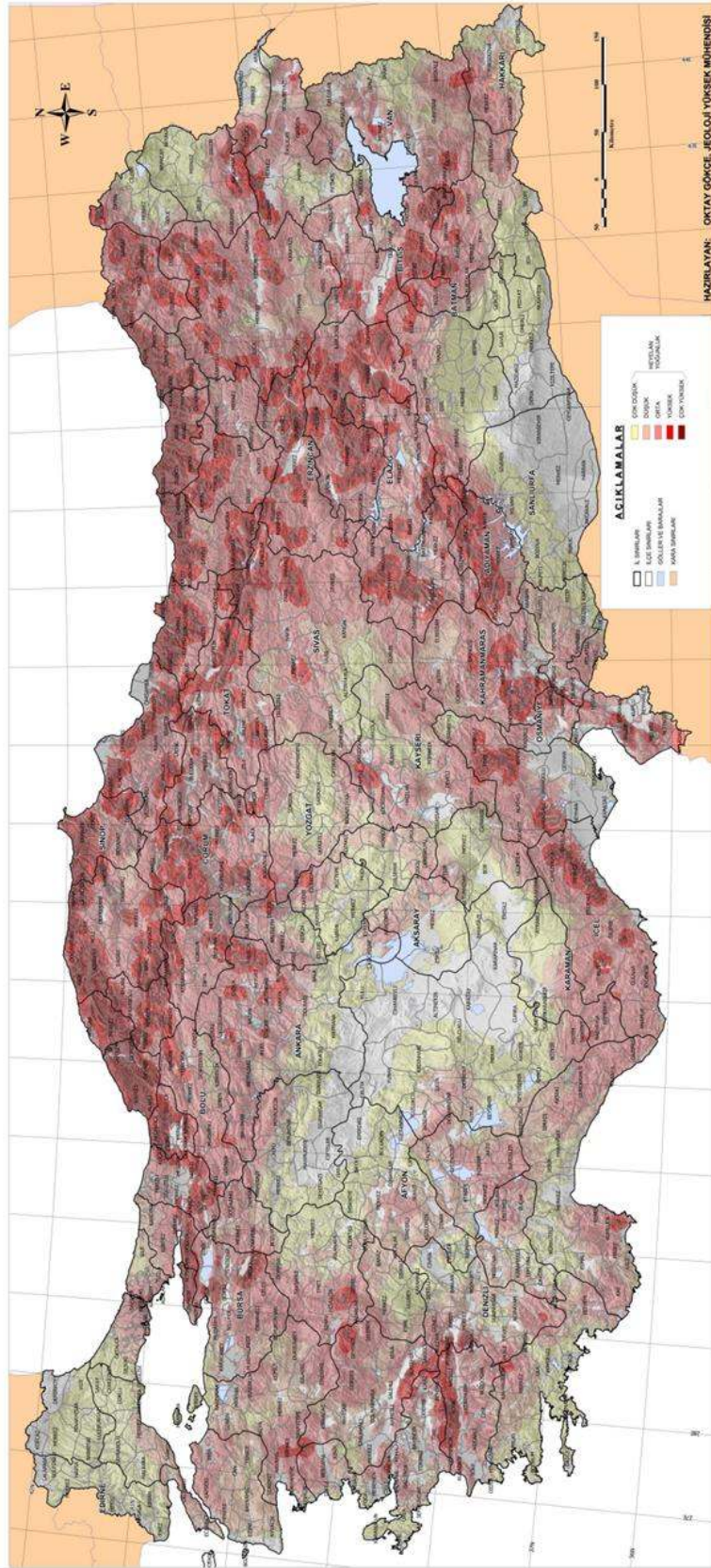


Şekil 2. Bir şevin yağış kaynaklı yıkılma mekanizması [4]

Ülkemizin jeolojik yapısı ve coğrafi özellikleri nedeniyle heyelan olayları sıkça yaşanmakta ve çoğu kez aynı bölgede tekrarlanarak doğal afete dönüşmektedir. Uzun süreli ve bol yağışın etkili olduğu, nemli iklime sahip olan Karadeniz Bölgesi ülkemizde heyelanların en sık gözlemlendiği bölge olması itibarı ile heyelanların yarattığı sosyal ve ekonomik kayıpların da en fazla olduğu bölgedir. Ülkemizde doğal afetlerden etkilenen yapılar ele alındığında heyelanlardan kaynaklanan kayıplar, %27 ile depremlerden sonra ikinci sırayı almaktadır [5]. Heyelanlardan kaynaklanan hasarların artmasının nedenleri, artan nüfus yoğunluğunun ve inşa edilen yolların giderek heyelana duyarlı alanlarda bilinçsizce yoğunlaşması, değişen iklim şartları ve yanlış arazi kullanımı sayılabilir. Şekil 3’te Türkiye’de meydana gelen heyelan yoğunluğu haritası gösterilmiştir [5]



TÜRKİYE HEYELAN YOĞUNLUK HARİTASI



HAZIRLAYAN: OKTAY GÖKÇE, JEOLUJİ YÜKSEK MÜHENDİSİ

T.C.
BAYINDIRLIK VE İSKAN BAKANLIĞI
AFET İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
AFET ETÜT VE HASAR TESPİT DAİRESİ
İMAR PLANINA ESAS JEOLUJİK-JEOTEKNİK ETÜT
VE PROJELER ŞUBESİ, PROJELER ŞEFLİĞİ
TARAFINDAN HAZIRLANMIŞTIR
EKİM, 2008

Ülkemizdeki afet olaylarının mekansal ve istatistiksel dağılımını ortaya koyabilmek, Türkiye'de 1950'li yıllardan bu yana meydana gelen afet olaylarını kapsayan bir başvuru kaynağı oluşturmak, teknik elemanlara, büro ve arazi inceleme ekiplerine kolaylık sağlamak, her tür ve ölçekteki afet tehlikesi çalışmalarına temel atabilmek amacıyla, Afet Etüt ve Hasar Tespit Dairesi'nin, yerleşim birimleri ile ilgili afet etütleri argivini oluşturan afet etüt raporlarından, bu çalışmayı yapabilmek için belirlenen veriler, tasarlanan bir veritabanına girilmiştir. Veriler daha sonra mümkün olan detayda Coğrafi Bilgi Sistemine (CBS) aktarılmış (yaklaşık 1/500.000 ölçekli harita detayında gözlenen yerleşim birimleri bazında) ve analiz edilmiştir. Afetlerin değerlendirilmesi, genellikle, afet olay sayıları ve afetlerde sayıları bazında yapılmıştır. Ülkemizde meydana gelen afetlerin; afet olay sayıları, nakli sayıları, etkilenen toplam afetlerde ve yerleşim birimi sayıları baz alınarak yapılan değerlendirmesi sonucunda, afetlerin türüne göre dağılımlar belirlenmiştir. Buna göre; ülkemizde heyelan olayı gözlenen yerleşim birimleri haritası işlenmiş ve Coğrafi Bilgi Sistemi olanaklarıyla, noktasal yoğunluk haritası oluşturulmuştur. Bu harita, Heyelan Duyarlılık ya da Heyelan Tehlike Haritası değildir. Türkiye'de heyelanların yoğun olarak gözlemlendiği yerleri gösteren bir harita olup, "çok düşük" heyelan yoğunluğuna sahip bir yerde heyelan olma olasılığının az olduğu ya da heyelan olmayacağı anlamına gelmez. Heyelanların çok yoğun, yoğun olarak gözlemlendiği alanların, Kuzey Anadolu Fay Kuşağı, Doğu Anadolu Fay Kuşağı ve Ege Horst ve Graben Sistemi gibi aktif faylar ve fay kuşakları boyunca yoğunlaştığına dikkat ediniz.

Şekil 3. Türkiye heyelan yoğunluğu haritası [6]



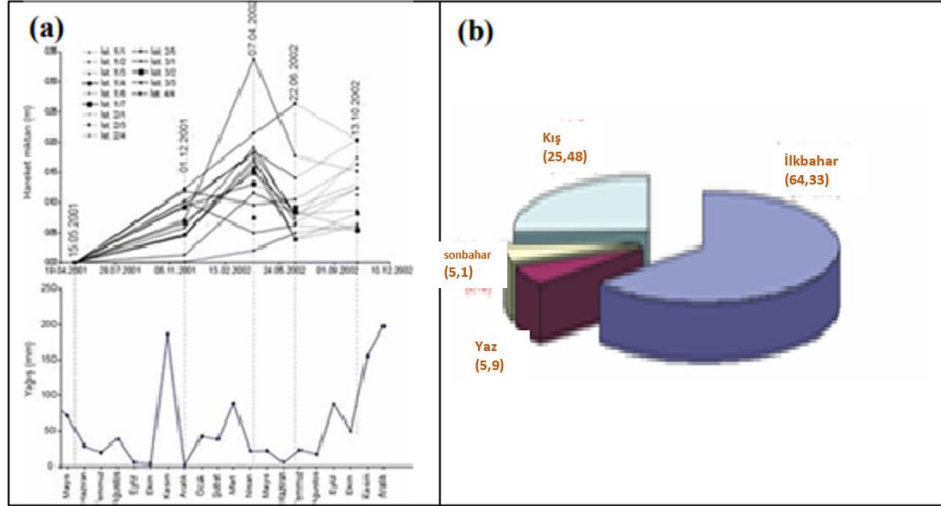
Şekil 5. a) Türkiye’de meydana gelenve ölümlle sonuçlanan heyelan olaylarına örnekler b) Sugözü (Sivas/Koyunhisar)’nde 17 Mart 2005 tarihinde 15 kişinin ölümüyle sonuçlanan moloz akması (fotoğraf: AFAD heyelan albümü), c) Gündoğdu (Rize)’da 26 Ağustos 2010 tarihinde 13 kişinin ölümüyle sonuçlanan heyelanlar (fotoğraf: AFAD heyelan albümü),d) Çatak (Trabzon/Maçka)’da 23 Haziran 1988 tarihinde 64 kişinin ölümüyle sonuçlanan heyelan(Fotoğraf: m.me/214415935350213), e) Senirkent (Isparta)’da 13 Temmuz 1995 tarihinde 74 kişinin ölümüyle sonuçlanan heyelan (Fotoğraf: Yeşilkaya vd., 1996),f) Çöllolar (Kahramanmaraş/Afşin)’da 10 Şubat 2011 tarihinde10 kişinin ölümüyle sonuçlanan açık ocak işletmesi heyelanı(Fotoğraf: Özbay and Cabalar, 2014).[9]

Şev stabilitesi analizleri, doğal ve insan yapımı şevlerin güvenlik faktörünü değerlendirmek için yaygın bir analitik araç haline gelmiştir. Analizlerde genellikle doymuş kayma mukavemeti parametreleri kullanılır. Zemin profilinin, boşluk suyu basınçlarının negatif olduğu yeraltı suyu tablasının üzerindeki kısmı genellikle göz ardı edilir. Bu, kayma yüzeyinin büyük kısmının doymuş zeminden geçtiği birçok durum için makul bir varsayımdır. Bununla birlikte, yeraltı suyu tablasının derin olduğu veya sığ yenilme olasılığının söz konusu olduğu durumlarda, zeminin doymun olmadığı durumlarda şev duraylılık analizlerinin nasıl gerçekleştirileceğinin anlaşılması gerekmektedir [10].

Literatüre bakıldığında doymun olmayan zeminlerin davranışları hakkında yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca son zamanlarda doymun olmayan zeminlerin şev duraylılığı analizleri hakkında yapılan çalışmalarda gittikçe hız kazanmaktadır.

Yağış ve heyelan ilişkisini konu alan çalışmalarda, dik yamaçlardaki ayrıışmış kaya ya da zeminlerde aşırı yağışın sığ heyelanlara neden olduğu görülmüştür. Campbell (1975) tarafından Kaliforniya’da yapılan çalışmada, 6,35 mm/saatlik eşik değerini aşan bir yağışın moloz yığınlarını tetikleyerek akmaya sebep olduğunu gözlemlemiştir.

Denizli, Babadağ ilçesinde, 60 yıldan fazla süredir yavaş bir yamaç hareketi tehdidi saptanmaktadır. Çevik ve Ulusay (2004), bu bölgede uzun süreli yağış ve hareket kayıtlarını incelediklerinde (Şekil 6a), aşırı yağış dönemlerinden kısa süre sonra hareket hızında belirgin bir artış, kuraklık döneminde ise hareket hızında yavaşlama görmüşlerdir. Bununla birlikte yağışların heyelanlar üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, 1971-1989 yılları arasında Türkiye’de meydana gelen heyelanlar, gerçekleştikleri mevsime göre incelendiğinde (Şekil 6b), diğer mevsimlere kıyasla kış ve bahar aylarında daha çok heyelanın meydana geldiği görülmüştür. Buradan, yağışların heyelanlar üzerinde önemli bir etken olduğu gösterilmiştir [11].



Şekil 6. a) Babadağ yerleşkesindeki yamaç hareketlerinin yağış ile ilişkisi, b) 1971-1989 tarihleri arasındaki Türkiye'de meydana gelen heyelan felaketlerinin mevsimsel dağılımı [11]

Bujang ve ark. (2006), şev eğiminin ve yüzey örtüsünün, zemine su sızması ve zemin matrisi emmesi üzerindeki etkisine ilişkin bir laboratuvar modeli üzerinde çalışmışlardır. Model çalışmasının sonucunda, şevlerdeki farklı yüzey örtülerinin su sızmasına etkisi olduğu, örtülü yüzeyin (çim veya geosentetik ağ), çıplak (örtüsüz) yüzeye kıyasla daha düşük bir sızma oranına sahip olduğu ve şev açısının etkisine bakıldığında da, şev dikliği arttıkça sızmasının azaldığı gözlenmiştir. Geçirgenlik oranı daha yüksek olan şev için duraysızlığın arttığını ifade etmişlerdir [12].

1 Kasım 2000'de Xangsane Tayfunu, kuzey Tayvan'ın birçok bölgesinde ciddi felaketlere neden olan şiddetli yağışlara sebep olmuştur. Taipei İlçesindeki Shanher Çayı'nda yeralan bir şevde kayma meydana gelmiştir. Şev kayması ve bu felaketin etkilerini araştırmak için gerekli laboratuvar testleri ve şev stabilitesi analizleri yapılmıştır. Zeminlerin doymuş ve doymuş olmayan hali üzerinde mekanik ve hidrolik özelliklerini elde etmek için gerekli testler yapılmıştır. Daha sonra, yağmur kaynaklı sızma sırasında zemindeki şev stabilitesini, gerilme değişimini ve boşluk suyu basıncını araştırmak için limit denge yöntemi ve sızma sürecini simüle eden sayısal analiz kullanılmıştır. Stabilite analizinin sonuçları, yağış yoğunluğu-zaman geçişinin en önemli etki faktörü olduğunu ve analiz edilen yenilme bölgesi ile eğimin yenildiği, tahmini sürenin saha gözlemiyle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir [13].

Malezya'da 1999 yılında şiddetli bir yağış döneminden sonra ciddi bir heyelan felaketi yaşanmıştır. Saha keşfi, topoğrafya çalışması, yer altı incelemesi, laboratuvar testleri ve geri analizlerden oluşan bir inceleme yapılmıştır. Heyelan olayının meydana gelmesinden 42 gün öncesine kadar olan süreyi kapsayan yağış kayıtları derlenmiş ve heyelan ile yağış arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılmıştır. Yağış döneminde bu şevlerin davranışı iki aşamalı bir yaklaşım kullanılarak incelenmiştir: 1) şevlerdeki boşluk suyu basıncının dağılımını elde etmek için; sızmayı ve yeraltı suyu akışını analiz etmek; ve 2) 1'de elde edilen boşluk suyu basıncı profili ile şevlerin stabilitesini analiz etmek. Analiz, heyelanların gerçekten de uzun süreli yağışlarla ilişkili olduğunu doğrulamıştır [14].

Sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge yöntemi ile yağış infiltrasyonunun şev stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemek için sayısal bir model kurulmuştur. Bu model, şevlerdeki boşluk basıncı alanındaki değişimleri, zeminin ağırlığını ve yağış infiltrasyonunun neden olduğu zemin mukavemetinin azalmasını uygun şekilde yansıtabilir. Bir vaka çalışması olarak, Chongqing'deki Nongji Jixiao'da bulunan gerçek bir heyelan, yağış infiltrasyonunun sızıntı alanı ve şev stabilitesi üzerindeki etkilerini analiz etmek için incelenmiştir. Simüle edilen sonuçlar, derin bir şev yenilmesinin, özellikle şevlerdeki geniş aralıklı boşluk suyu basıncı artışı için, yağış infiltrasyonunun sızıntı alanında dikkate değer bir değişikliğe yol açacağı durumlarda meydana gelme eğiliminde olduğunu göstermiştir. [15].

Oh ve Vanapalli (2010), homojen sıkıştırılmış bir dolgu için stabilite analizlerini dolgu su sızması durumunu dikkate alarak yapmıştır. Analizler birkaç farklı senaryo içermektedir: (i) doymuş durum, (ii) doymuş durumla birlikte göllenme (veya akış), (iii) doymuş olmayan koşullar için kısa süreli analiz ve (iv) doymuş olmayan koşullar için uzun süreli analizdir. Farklı senaryoların analizi için gerekli olan sıkıştırılmış zeminin uygun kayma mukavemeti parametreleri, geleneksel ve modifiye edilmiş üç eksenli kesme deneyi ile belirlenmiştir. Çalışmaların sonucu yenilmenin geleneksel sonsuz şev tipi yenilmelerden ziyade sızma nedeniyle meydana geldiğini göstermektedir [16].

Tran ve ark. (2015), Kuzey Vietnam, Yen Bai şehrinde aşırı yağışın yarma şevlerin stabilitesi üzerindeki etkilerini ele almışlardır. Son yıllarda özellikle yağışlı mevsimlerde bu yarmalar boyunca çok sayıda şev yenilmesi meydana gelmiştir. Bunun nedenini açıklamak için, aşırı yağışların, ilk zemin koşullarının ve zemin

geçirgenliğinin tipik şev içindeki boşluk suyu basıncındaki değişimler üzerindeki etkisini analiz etmişler ve daha sonra bu değişimlerin şev üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Aşırı yağışlar, 1960'tan 2009'a kadar olan dönemde meydana gelen heyelan olaylarını tetikleyen tüm yağışlara göre seçilmiştir. Güvenlik faktörü (FS), Bishop'ın basitleştirilmiş yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, maksimum sızma kapasitesinin yağış yoğunluğundan az olduğu durumlarda, şev yenilmelerinin yağmur başladıktan 14 saat sonra meydana gelebileceğini göstermektedir. Kısacası, Yen Bai'deki eğimli yamaçların, kazıdan sonra normal koşullarda stabil olabileceği, ancak tropikal yağmur fırtınalarının etkisi altında stabilitelerinin her zaman sorgulanabileceği ortaya konmuştur [17].

Taşkıran ve Fidan (2019), yağışlı mevsimlerde şev duraysızlıklarının sıklıkla görüldüğü bir bölgede, doymun olmayan koşullardaki şevin duraylılığını etkileyen parametreleri incelemiştir. İncelenen parametreler; yağış yoğunluğu, yağış süresi, hidrolik iletkenlik ve şev eğimi olup; bölgeye ait gerçek yağış verilerini de içeren bir veri aralığı kullanılarak, bir yarı-parametrik çalışma yapılmıştır. Bu şekilde şevin mevcut durumu ve parametre değişiminin etkisi aynı anda incelenebilmiştir. Yağışın etkisiyle oluşan emme basınçlarındaki değişim nümerik yöntemle elde edilmiştir. Şev analizlerinde negatif boşluk suyu basıncındaki değişim dikkate alınarak, Bishop limit denge yöntemi kullanılmıştır. Analizler sonucunda belirli bir yüksekliğin üzerindeki şevlerde yağışlı dönemde görülen göçmelerin nedeni ve incelenen parametrelerin duraylılığa etkisi gösterilmiştir [18].

Bu tezde, aşırı yağışların farklı koşullardaki etkileri bir modelleme çalışması ile incelenmiştir. Bu kapsamda, aynı öncül doymunluk derecelerine sahip üç farklı doymamış zeminin, ayrıca tek bir zemin türünün farklı doymunluk derecelerinde değişen aşırı yağış koşulları altında şevin davranışını araştırmak amaçlanmaktadır. Tek bir şev profili kullanılarak, farklı şiddet ve sürelerdeki yağışların şev stabilitesi üzerindeki etkileri araştırılmış ve analizlerde sonlu farklar yöntemi ile çalışan Itasca Group Consulting Inc.'ye ait FLAC programı kullanılmıştır. Bu programın iki fazlı akış modülü kullanılarak, hem kısa ve uzun süreli şiddetli yağış altında hem de uzun süreli düşük yoğunluklu yağış altında doymun olmayan şevlerin stabilite analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca meteorolojik veriler ışığında, şevlerde meydana gelecek olan göçme süreleri hesaplanarak, bu göçmeler sonucunda

meydana gelebilecek potansiyel can ve mal kayıplarını en aza indirebilecek bir erken uyarı sisteminin geliştirilmesi için temel oluşturmak hedeflenmektedir.

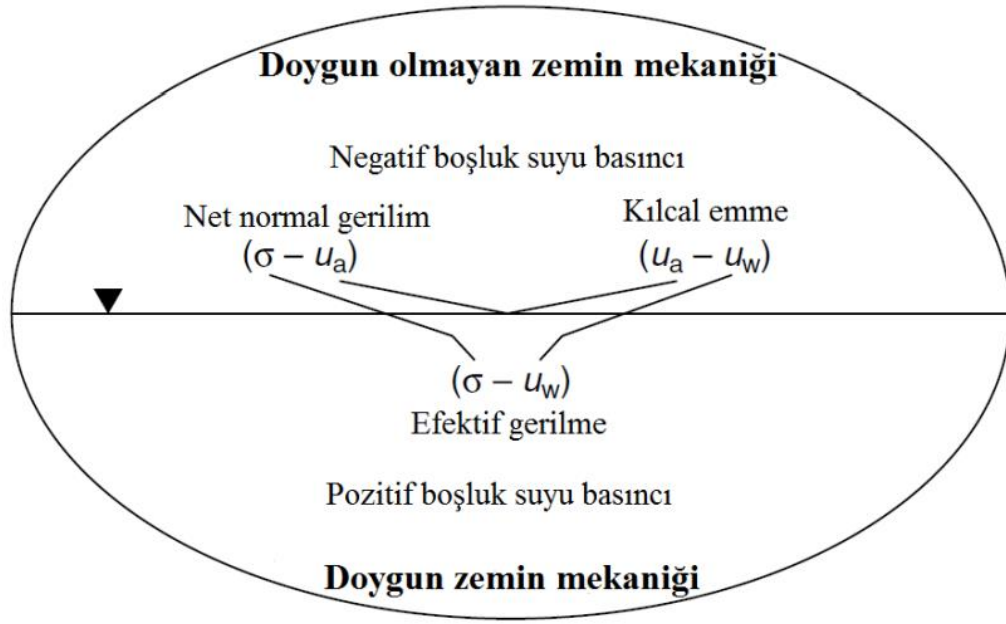


1- DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ŞEV STABİLİTESİ

Mühendislikteki güvenli tarafta kalma kaygısı, zeminlerin mukavemetinin en düşük olduğu durum olan doygun haldeki zeminlerin incelenmesine neden olmaktadır. Fakat doğada %100 suya doygun zemin bulmak imkansıza yakındır. Yarı kurak ve kurak bölgelerde, zemin yeraltı su seviyesinin altında değilse tamamen doygun durumda değildir.

Su, zeminlerin mühendislik özelliğini belirleyen önemli bir faktördür. Zeminlerin doygunluk derecesi pratik olarak $S_r = \%95$ 'in altına düştüğü zaman, zemin daneleri arasında kalan boşluklarda su-hava arayüzeyleri oluşur. Bu ara yüzeyler menüsküs yarı çaplarını değiştirerek, yüzey gerilme kuvvetlerini aktifleştirir. Bu durumda zemine ait mühendislik özelliklerinin su içeriğine bağlı olarak değişmesine neden olur [19].

1930'larda Terzaghi, “efektif gerilmeyi ($\sigma - u_w$)” doygun bir zeminin gerilme durumunu tanımlamak için kullanılabilecek değişken olarak tanımlamıştır. Burada σ toplam gerilmeyi ve u_w boşluk suyu basıncını ifade etmektedir. Bundan yıllar sonra araştırmacılar, doygun olmayan zeminle ilişkili fiziksel süreçleri tanımlarken iki bağımsız gerilme durumu değişkenine sahip olmaları gerektiğinin farkına varmışlardır. Önerilen değişkenler ($\sigma - u_a$) ve ($u_a - u_w$) olmuştur; burada u_a , boşluk havası basıncıdır. Şekil 7’de, sırasıyla doygun ve doygun olmayan zeminler için bir ve iki gerilme durumu değişkeninin kullanımı arasındaki sınır olarak yeraltı suyu tablasının kullanımı gösterilmektedir. [2].

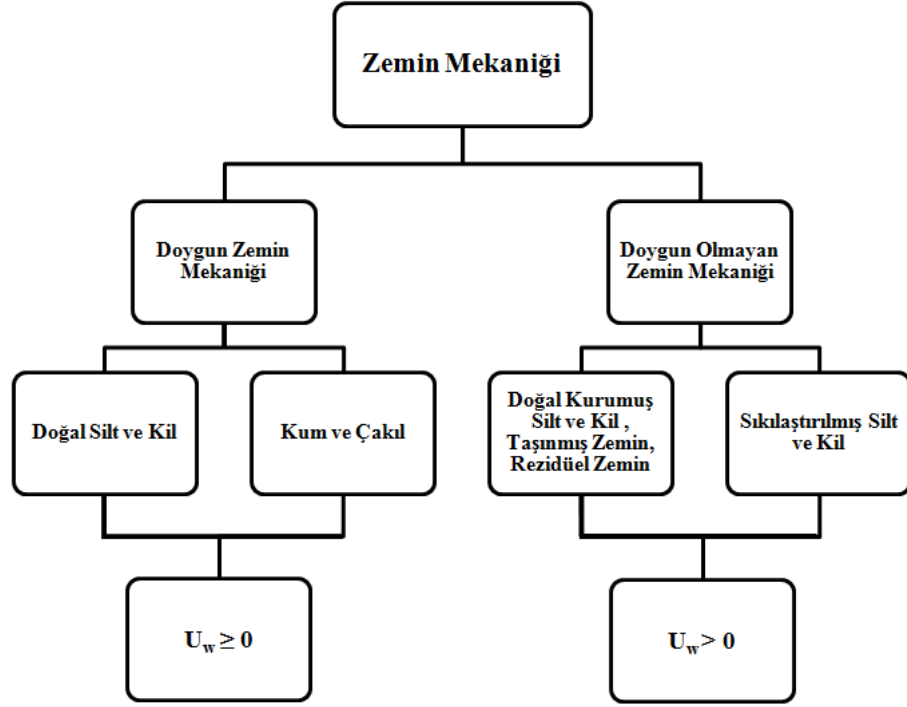


Şekil 7. Genelleştirilmiş zemin mekaniği gösterimi [19-20]

1.1 Doygun Olmayan Zeminlerin Genel Özellikleri

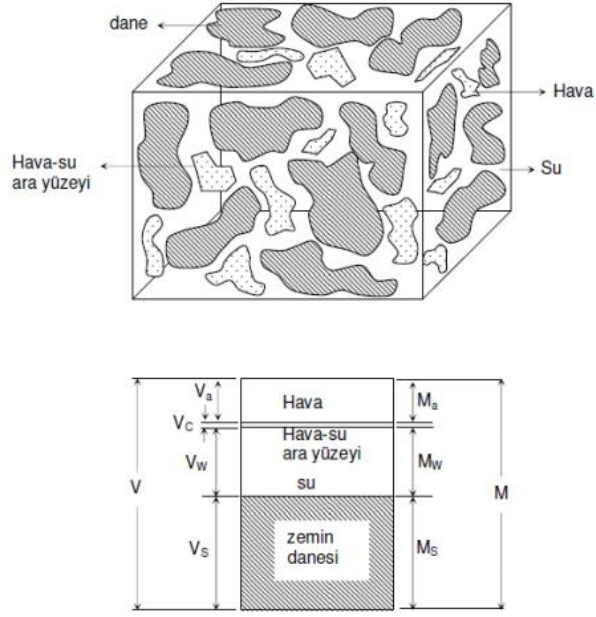
Şişen killer, çöken zeminler ve rezidüel zeminler mühendislik uygulamalarında karşılaşılan doymun olmayan zemin örnekleridir. Bu zeminler genellikle "Sorunlu Zeminler" olarak adlandırılır. Tüm bu zeminlerde ortak olan, mekanik davranışlarında önemli bir rol oynayan ve laboratuvarı test edilmelerini zorlaştıran negatif boşluk suyu basınçlarıdır [21].

Şekil 8'de gösterildiği üzere, zeminler sınıflandırılırken boşluklarındaki suyun durumuna göre de sınıflandırılabilir [22]. Eğer boşluklar tamamen su ile doluyrsa doymun zemin, kısmen suyla doluyrsa doymun olmayan zemin olarak isimlendirilir.



Şekil 8. Zemin mekanîği sınıflandırması [22]

Doygun zeminlerde sadece iki fazdan (katı ve su) bahsedilirken, doymun olmayan zeminlerde üç fazdan (katı, su ve hava) bahsedilmektedir (Şekil 9). Bu durum, doymun olmayan zeminlerde iki tip boşluk basıncına sebep olmaktadır. Bunlar, boşluk hava basıncı u_a ve boşluk suyu basıncı u_w 'dir. Ayrıca, su ve hava arasında kasılabilen deri (kontraktil) olarak bilinen bir arayüz oluşmasıyla dördüncü fazdan bahsetmek de mümkündür. Fakat bu arayüzün kalınlığı moleküler seviyede olduğu için ihmal edilerek su fazının bir parçası olarak kabul edilmektedir. Mühendislik problemlerinde, gerilme durumları doymamış zeminler için matrik emme ($u_a - u_w$) ve net gerilme ($-u_a$) olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, matrik emme değişimleri ve zemine etkileri oldukça önemli bir konudur [23].



Şekil 9. Doygun olmayan zeminlerin faz durumları [24]

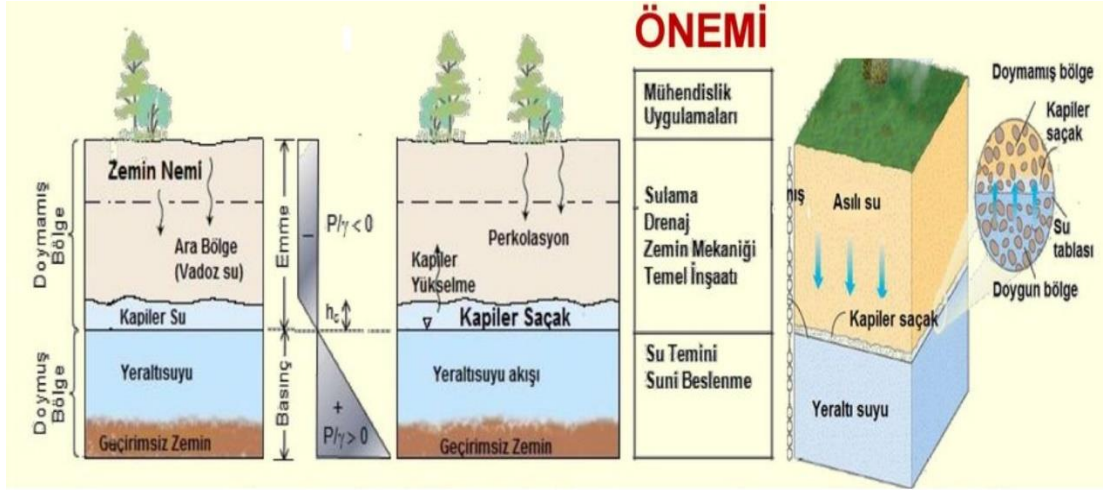
Şekil 10'da doymuş ve doymuş olmayan zeminleri birbirinden ayıran katmanlar gösterilmiştir.

Doygun Olmayan Zemin



Şekil 10. Doygun ve doymuş olmayan zemini birbirinden ayıran bölgeler [25]

Doymamış zeminlerde oluşan kontraktıl arayüzey ve matrik emme, zeminin hidromekanik davranışında karmaşıklığa sebep olmaktadır. Zeminlerde emme ve su miktarı arasındaki ilişki Zemin Suyu Karakteristik Eğrisi (SWCC) adı verilen eğriyle ifade edilmektedir. Burada bahsedilen su miktarı, hacimsel su içeriği (θ), gravimetrik su içeriği (w) ve doymuşluk derecesi (S) olarak ifade edilebilir [24].



Şekil 11. Doymuş ve doymuş olmayan zemin bölgeleri [25]

Şekil 11’de de gösterildiği üzere, doymuş olmayan bölgenin üst bölümünü oluşturan zemin nemi bölgesindeki su fazlalığı perkolasyon (sızma) yoluyla, yerçekimi kuvvetinin etkisiyle daha derinlerdeki katmanlara ilerler. Uzun süreli ve şiddetli yağışlar sonrası meydana gelen bu olay, yeraltı su düzeyine ulaşırken, bir kısım su daneler arası temas noktaları civarında, yüzey gerilim kuvvetlerince tutulur. Böylece kısmen doymuş bölge oluşur. Bu bölgede, taneler arası boşluklar; kısmen su, kısmen de hava ile (kısmen doymuş zemin, yaş zemin) kaplıdır. Kurak dönemlerde, serbest yeraltı su düzeyinin hemen üzerindeki kapiler bölgede, kılcallıktan dolayı su, kılcal yükselme yoluyla yukarı doğru çıkar. Ancak, kılcal bölgede, kılcal yükselmenin zemin kitlesinde değişkenlik göstermesinden dolayı; kılcal tam doymuş bölge ve kılcal kısmen doymuş bölge oluşur [25]. Bu süreçler ve zemin su içeriğinin değişkenliği, zeminlerde önemli bir diğer kavram olan emme gerilmesinin anlaşılmasında kritik rol oynar.

1.1.1 Zeminlerde Emme Kavramı

Zemin emme teorisinin gelişimine ilişkin bir tartışma Fredlund ve Rahardjo (1993) tarafından yapılmış ve özet olarak, “zeminlerde emme, genellikle zemindeki suyun serbest enerji durumu olarak anılır” denmiştir. Yani su, zeminin içinde bulunduğu duruma göre farklı potansiyel enerjiye sahiptir ve zemin içindeki hareketi bu enerji farkları sayesinde açıklanabilir. Zemin kütlesi içinde hareket edecek olan su, doğanın kanunu gereği potansiyel enerjinin yüksek olduğu yerden az olduğu yere doğru hareket ederek enerjinin uniform olarak dağılmasını sağlar. Zemin içerisinde suyun bu hareketini engellemek ve daneler arasında tutunmasını sağlamak için bir gerilme kuvveti uygulanmalıdır. Bu gerilme kuvvetine “zeminlerde emme basıncı” denmektedir. Kısaca, zeminlerin suyu tutmaya ve çekmeye olan yeteneği olarak adlandırılır. Anlaşılacağı üzere zeminlerin emme basıncı su içeriğine göre değişkenlik göstermektedir. Zeminlerde su içeriği arttıkça emme basıncı azalacak ve su içeriği azaldıkça emme basıncı artacaktır [26].

Zemin danelerinin suyu tutmak için oluşturduğu kuvvetler kılcal gerilmeyi oluşturur. Danelerin yüzeysel kuvvetlerini ve kapiler çekme gerilmelerini içerir. Ayrıca hidrasyon kuvvetleri de matrik emmeyi etkilemektedir. Killi zeminlerde, su ile buluşmamış katyonlar kapiler kuvvetlere benzer hidrasyon kuvvetlerine neden olmaktadır. Bu kuvvetler kil danelerinin yüzeyinde emici kuvvetler oluştururlar. Şevlerin stabilitesinde de matrik emme veya negatif boşluk suyu basıncı önemli bir etkidir. Zeminlerde emme, kılcal gerilme ve ozmotik emme olarak kabaca iki bileşenden oluşmaktadır denebilir. Zemin gerilme davranışlarını incelerken, kılcal gerilme değerleri ozmotik emme değerinden daha ön plandadır. Zemin suyundaki artış kılcal gerilmenin azalmasına ya da tamamen sönümlenmesine neden olur ve buda şevin göçmesine sebebiyet verir [27].

Ozmotik emme, boşluk sıvısının çözelti içeren zemin suyuna sahip olduğu durumlarda etkilidir. Tuz içeriği önemlidir. Zemin suyunun farklı noktalarında farklı miktarlarda madde çözünmesinden kaynaklanır. Ozmotik emme, kil danelerinin etrafındaki elektriksel tabaka ile boşluk suyunun fiziko-kimyasal tepkimeleriyle ilişkilendirilmektedir [27].

$$\Psi = \Psi_m + \Psi_{\Pi} \quad (1)$$

$$\Psi_m = u_a - u_w \quad (2)$$

Burada;

Ψ : Toplam emme,

Ψ_m : Matrik emme,

Ψ_{II} : Ozmotik emmedir.

Doygun olmayan zeminlerin, mukavemet ve deformasyon karakteristikleri özellikle matrik emme ile yakından ilgilidir. Su hareketleri ise toplam ve matrik emme ile kontrol edilmektedir. Bu nedenle, emme kuvvetlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği ileri sürülmüştür [27].

Doygun olmayan zeminlerde emme, zeminin içsel gerilmelerini etkileyerek; taşıma gücü, kayma mukavemeti, yanal zemin basınçları, hacimsel deformasyon ve şev stabilitesi gibi bazı mühendislik özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilmektedir. Bu sebeple, emme basıncının doğru ölçülmesi çok önemlidir. Literatürde emme basıncı ölçümüyle alakalı birçok metot bulunmaktadır [28].

1.1.1.1 Zeminlerde Emme basıncı ölçümü

Pan ve ark.(2010), zeminlerde emme kavramının, zeminin yeraltı su seviyesinin üstünde bulunan tüm katmanlarında bahsedilebileceğini söylemiş ve doygun olamayan zeminlerde emme basıncının en önemli parametrelerden biri olduğunu ileri sürmüşlerdir. Doygun olmayan zeminlerde efektif ve toplam gerilme değerlerini belirleyebilmek için emme basıncının laboratuvar deneyleriyle ölçülebilmesinin çok fayda ve kolaylık sağlayacağını söylemişler ve yaptıkları çalışmada zeminlerdeki emme basıncının doğrudan ya da dolaylı yoldan belirlenebilmesi için çeşitli metotların temel çalışma ilkelerini, uygulamalarını ve ölçümelerini Tablo 1’de ki gibi özetlemişlerdir [29].

Tablo 1. Emme basıncı ölçümünde kullanılan yöntemler [30]

ALETİN İSMİ	ÖLÇÜLEN EMME CİNSİ	ÖLÇME ARALIĞI (kPa)
Psikometre	Toplam Emme	100-71000
Filtre Kağıdı	Toplam ve Matrik Emme	400-30000
Emme Plakası	Matrik Emme	0-90
Basınç Plakası	Matrik Emme	0-1500
Basınç Membranı	Matrik Emme	0-1500
Standart Tansiyometre	Matrik Emme	0-90
Osmotik Tansiyometre	Matrik Emme	0-1500
Gözenekli Blok	Matrik Emme	30-3000
Isı İletkenlik Sensörü	Matrik Emme	0-175

Matrik emme işlemi, negatif boşluk suyu basıncının doğrudan ölçülmesi yoluyla elde edilebilir. Boşluk hava basıncı genellikle sahadaki atmosferik basınca eşittir ve matrik emme, hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki farktır.

1.1.1.1.1 Eksen Kaydırma Tekniği

Bu tekniğin çalışma prensibi, negatif boşluk suyu basıncının ölçülmesini önlemek için boşluk suyu basıncını pozitif referans basıncında tutarken, bir zemin numunesinin maruz kaldığı atmosferik basıncı yapay olarak yükseltmektir. Bu nedenle, matrik emme olarak da bilinen basınç farkı $u_a - u_w$ değişmez. Bu teknik kullanılarak matrik emme ölçümü yalnızca kullanılan seramik diskin hava giriş değeri ile sınırlıdır, çünkü artan boşluk suyu basıncı nedeniyle kavitasyon önlenemez. Piyasada maksimum hava giriş değeri 1500 kPa olan seramik diskler mevcuttur [31].

1.1.1.1.2 Filtre kağıdı

Filtre kağıdı yöntemi zemin emme miktarını ölçmenin ucuz ve kolay bir yöntemidir. Aynı zamanda tüm emiş aralığını kapsayan bilinen tek yöntemdir. Filtre kağıdı yönteminin çalışma prensibi, filtre kağıdının buhar akışı veya sıvı akışı yoluyla zeminle dengeye gelmesi ve dengede ki filtre kağıdı ile zeminin emme değerinin aynı olmasıdır. Filtre kağıdı yöntemiyle hem toplam hem de matrik emme ölçülebilir. Filtre kağıdının buhar akışı yoluyla (temassız yöntem) suyu emmesine

izin verilirse, yalnızca toplam emme ölçülür. Bununla birlikte, filtre kağıdının sıvı akışı yoluyla (temas yöntemi) suyu emmesine izin verilirse, o zaman yalnızca matrik emme ölçülür [32].

1.1.1.1.3 Basınç plakası

Bu deney düzeneği; kompresör, basınç kabini ve seramik diskten oluşmaktadır. Seramik disk gözenekleri sayesinde yüksek hava giriş değerine sahiptir. Gözenek çapları küçüldükçe, disklerin hava girişi değeri büyür. Seramik diskler aynı zamanda su ve hava fazını birbirinden ayırmak için kullanılır [33].

1.1.1.1.4 Isıl iletkenlik

Arazide emme basıncı ölçümü yapmak için çok ideal bir yöntemdir. Zeminlerdeki su içeriği ve termal iletkenlik doğru orantılıdır. Bu metot için kullanılan sensör, ısıya duyarlı seramik bir parça ve geçirimli porozdan meydana gelmektedir. Seramik bloktaki sıcaklık değişimi zemindeki kılcal gerilmeyle ilgilidir. Zemin içine açılan bir deliğe sensör yerleştirilir ve su muhtevasının hem zeminde hem de sensörde kararlı olduğu durumda okuma yapılır. Kararlı durum, zemin ve sensör içindeki poroz arasındaki su akışının kesildiği durumdur. Gözenekli poroz bloktan etrafına yayılan ısıнын miktarı ile bloktaki su miktarı birbirine bağlıdır [34].

1.1.1.1.5 Psikometre

Dolaylı emme ölçümü yöntemlerinden biri olan psikometre içinde elektromotor kuvvet oluşturan termokupllar bulunmaktadır. Oluşan elektromotor kuvvet ortam nemi ile ilgili bilgi verir. Fakat ortamdaki sıcaklık değişimleri termokuplları etkiler ve bu da emme ölçümlerinde hataya neden olur. Sıcaklık değişimlerinden etkilenmelerinden dolayı sahada çok güvenilir bir yöntem değildir [34].

1.1.1.1.6 Tensiyometre

Tensiyometre zeminin negatif boşluk suyu basıncını doğrudan ölçmek için kullanılır. Temel prensip, yüksek hava girişli bir malzemede bulunan suyun basıncının, zemin su basıncı ile dengeye gelerek negatif zemin su basınçlarının ölçülmesini mümkün kılmasıdır. Tensiyometrede çözünebilir tuzlar için gerçek bir yarı geçirgen membran mevcut olmadığından emmenin ozmotik bileşeninin etkisi ölçülmez. Böylece ölçüm yalnızca zemindeki matrik emme bileşeninin değerini sağlar [34].

1.1.1.1.7 Emme Probu

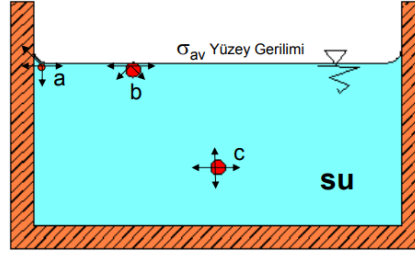
Ridley ve Burland (1993) zeminin matrik emmesini ölçmek için bir emme probu geliştirmişlerdir. Emme probu kullanarak emme ölçümleri yapma prensibi, zemindeki boşluk suyu basıncı ile su bölmesindeki boşluk suyu basıncı arasındaki dengeye dayanır. Dengeye ulaşmadan önce su, su bölmesinden zemine akar veya tam tersi yönde akış sağlanır. Emme probu boşluk suyu basıncını (u_w) ölçer [34].

1.1.2 Zeminlerde Vadoz Bölge

Yeraltı su seviyesinin, yüzeyden uzak olduğu durumlarda, yüzey ve su seviyesi arasındaki tabakada negatif boşluk suyu basınçları oluşmaktadır. Bu tabakaya vadoz bölge denilmektedir. Şekil 11’de gösterilmiştir [35].

1.1.3 Kılcallık

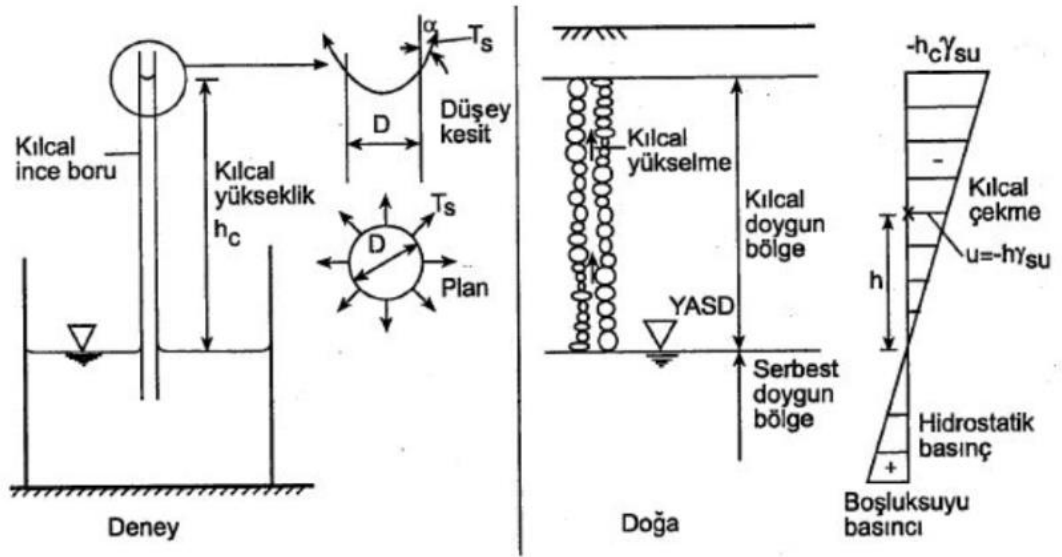
Su, zeminin gözenekleri içinde tutulduğu için su tutma kapasitesi kılcal harekete ve zemin daneleri arasında bulunan gözeneklerin boyutuna bağlıdır. Bu tutuk suya kılcal su denir. İri daneli zeminler, büyük parçacıklara ve geniş gözeneklere sahiptir ve bu sebeple suyu tutma yeteneği fazla değildir, drenaj kapasiteleri yüksektir. Killi zeminlerde ise küçük parçacıklar ve küçük gözenekler bulunur. Küçük gözeneklerin su tutma kapasitesi daha fazla olduğundan killi zeminlerin su tutma kapasitesi daha yüksektir ve kapiler (kılcal) borulara ait özellikleri gösterir [36].



Şekil 12. Basitleştirilmiş yüzey gerilim şeması [37]

Şekil 12’de yüzey gerilimi basit bir şekilde gösterilmiştir. C noktası suyun içinde moleküler dengededir. B noktası ise yüzeyde bulunmakta ve havada bulunan su molekülleri tam bağ yapamadığı için kuvvetler bileşkesi aşağı yönde oluşmaktadır. Buda suyun havaya karşı oluşturduğu yüzey gerilimine neden olarak su yüzeyinde büzülme isteği doğurmaktadır. A noktası ise kabın tam kenarında ve yukarı doğru hareket eğilimindedir. Kabın çapı küçüldükçe bu durum daha net görülmektedir. İnce bir tüp, içi su dolu kaba daldırıldığında, yüzey gerilimi etkisiyle su yükselmektedir. Aynı durum yeraltı suyu ve zemin daneleri arasında da gerçekleşmektedir. Zemin daneleri arasında kalan boşluklar, ince tüp görevi görmekte ve yeraltı suyunun yükselmesine neden olmaktadır [37].

Şekil 13’te zeminlerde kapilarite olayı basit bir model ile anlatılmıştır. Bu model düşünülerek Eşitlik 3 elde edilmiştir.



Şekil 13. Zeminlerde kılcallık ile ilgili bir modelleme

$$h_c = \frac{-2T \cos a}{r} \quad (3)$$

T: Su yüzeyindeki çekme kuvveti bileşkesi

a: su/cam yüzeyinin ıslanma açısı

r : hava-su kesişme yüzeyi (meniküs) yarıçapı

Efektif çap D_{10} esas alınır, zeminlerde kapiler yükseklik ampirik olarak;

$$h_c(cm) = \frac{c}{eD_{10}(cm)} \quad (4)$$

Burada;

c: efektif boşluk çapını efektif dane çapına bağlayan bir katsayı (doğal zeminler için yaklaşık 0.1-0.2)

D_{10} : %10 geçen yüzde için en büyük dane çapı (mm)

e: boşluk oranı

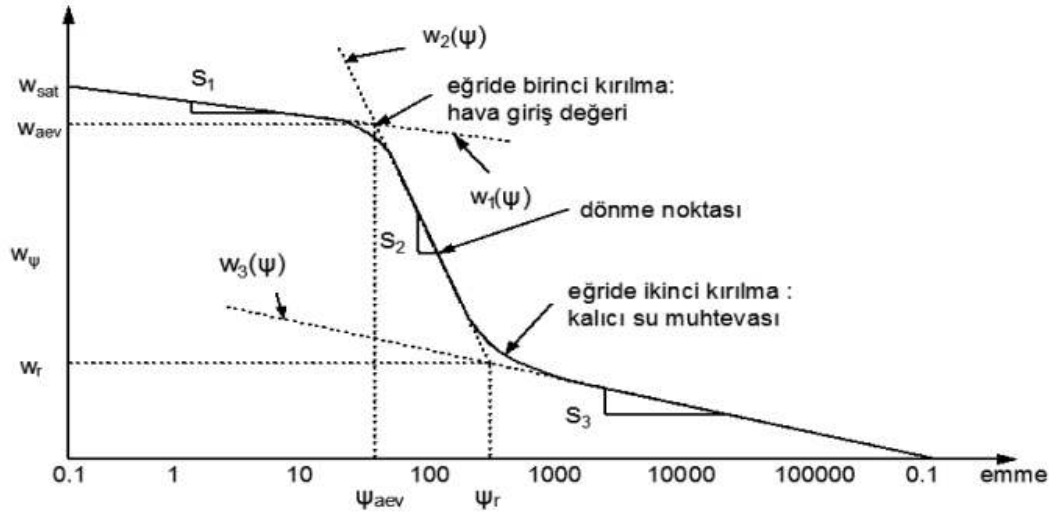
Yeraltı suyu seviyesi altında su basıncı pozitif (+) işaretlendirilirken, yeraltı su seviyesi üstünde su basıncı negatif (-) işaretlidir.

1.1.4 Zemin Su Karakteristik Eğrisi

Doygun zeminlerin uzun dönem davranışları incelenirken efektif zemin gerilme parametreleri kullanılmaktadır. Bu da gerçekte olan sonuçlardan çok daha fazla güvenli tarafta kalarak analiz yapılmasına sebep olmaktadır. Tasarım yapan kişiler çok fazla güvenli tarafta kalarak doymun olmayan zeminlerin mekanikini göz ardı etmektedir. Ancak anlaşılmıştır ki, doymun ve doymun olmayan zemin mekanik arasında ciddi farklar mevcuttur [38].

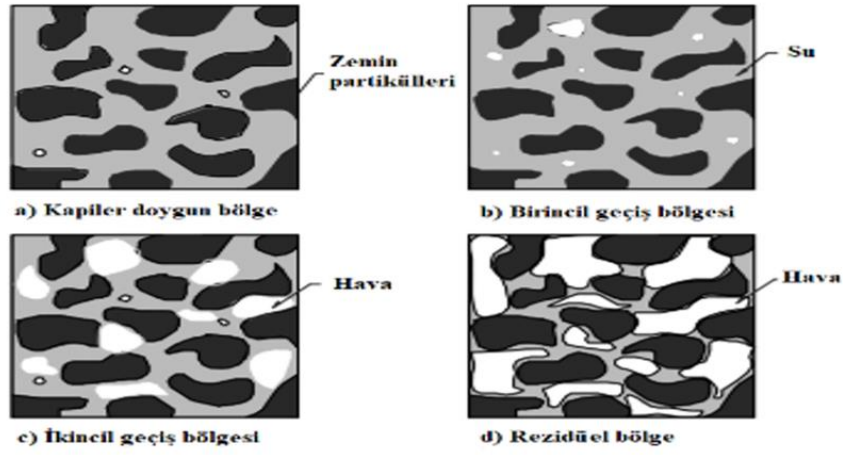
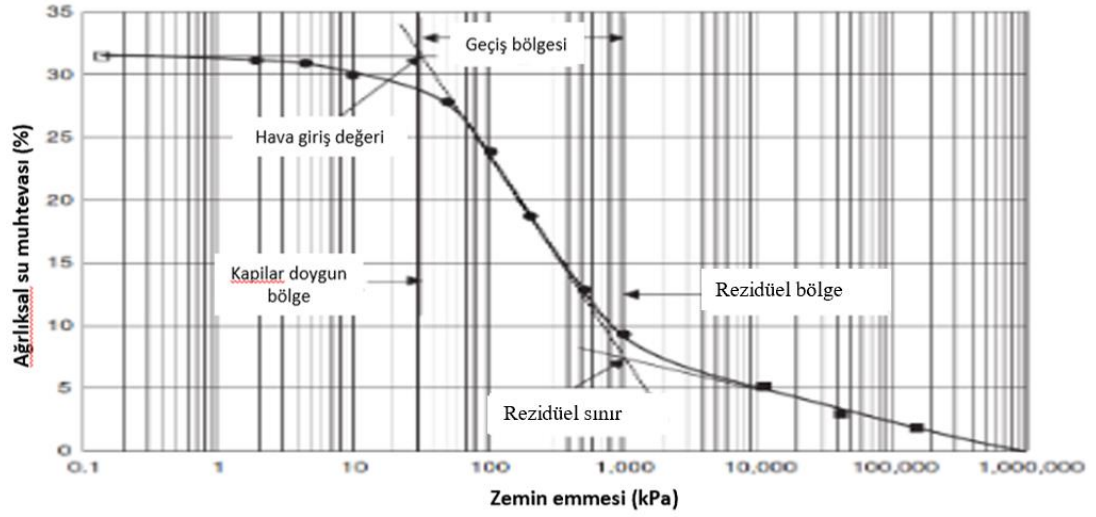
Doygun olmayan zeminlerin davranışını belirlerken kullanılan kavramlardan biri de zemin su karakteristik eğrisidir (SWCC). Zeminin su içeriği ile emme gerilmesi arasındaki ilişki, Şekil 14'te gösterilen, hacimsel su içeriğine karşılık gelen emme gerilmesinin; zemin-su karakteristik eğrisi ile anlatılmaktadır [38].

Tipik bir zemin su karakteristik eğrisinde, yatay eksen matrik emmeyi ifade ederken düşey eksen ise hacimsel su muhtevası, doymunluk derecesi veya gravimetrik su muhtevasını ifade edebilir [39].



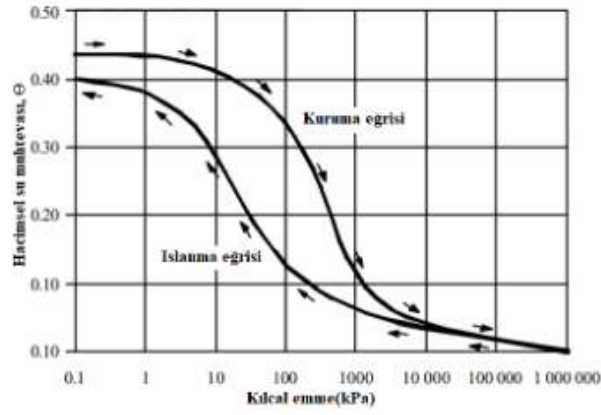
Şekil 14. Zemin suyu karakteristik eğrisi (SWCC)[39]

Zemin su karakteristlik eğrisinden 2 önemli değeri elde edilmektedir. Bunlardan birisi hava giriş basıncı (AEV) değeri ve ikincisi ise rezidüel (kalıcı) doygunluktur. Hava giriş basınç değeri, havanın zemin daneleri arasındaki boşluklara nüfus ettiği diğer bir değişle, suyun drenajının başladığı değeri olan matrik emmeyi ifade etmektedir. Hava giriş değerinin elde edilebilmesi için eğri üzerinde, zeminin tamamen doymun olduğu (%100) noktadan (w_{sat}) bir doğru çizilir ve birinci kırılma noktasından sonra gelen doğru uzatılarak paralel çizilen doğru ile kesiştirilir. Bu kesişim noktasıyla hava giriş değeri (w_{aev}) elde edilmiş olur. Rezidüel doygunluk değerinin (kalıcı doygunluk derecesi) elde edilebilmesi içinse; eğrinin ikinci kırılma noktasındaki doğrular uzatılarak kesiştirilir. Bu noktadan sonra ise, zeminden su çıkışı çok zor olmaktadır. Su drenajı azalır, su buharlaşarak uzaklaşmaya başlar. Şekil 14'ten de görüleceği üzere, zeminin emme değeri artarken doygunluğunu bir süre daha koruduğu ve daha sonra boşluklarındaki havanın kalıcı hale gelmesiyle, doygunluğunun hızla azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 15'te SWCC'nin bazı bölgelerinin hangi zemin fazlarını ifade ettiği gösterilmiştir [27,39].



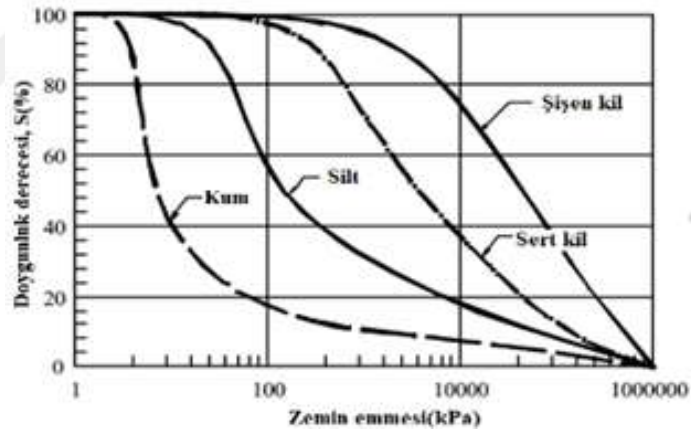
Şekil 15. Zemin su karakteristik eğrisi üzerindeki farklı noktalarda zemin fazları[27]

Şekil 16'da ıslanma ve kuruma etkisi altındaki zeminlerin, zemin su karakteristik eğrileri gösterilmiştir. İnce dane oranı yüksek olan zeminlerin su tutma kapasitesi, iri daneli zeminlere göre daha fazladır. Fakat, ince daneli zeminlerde kuruma hızı iri danelere göre daha yavaştır. Tüm zeminlerde doymunluk derecesi azalırken emme değeri en fazla 1.000.000 kPa değerine ulaşır [27].

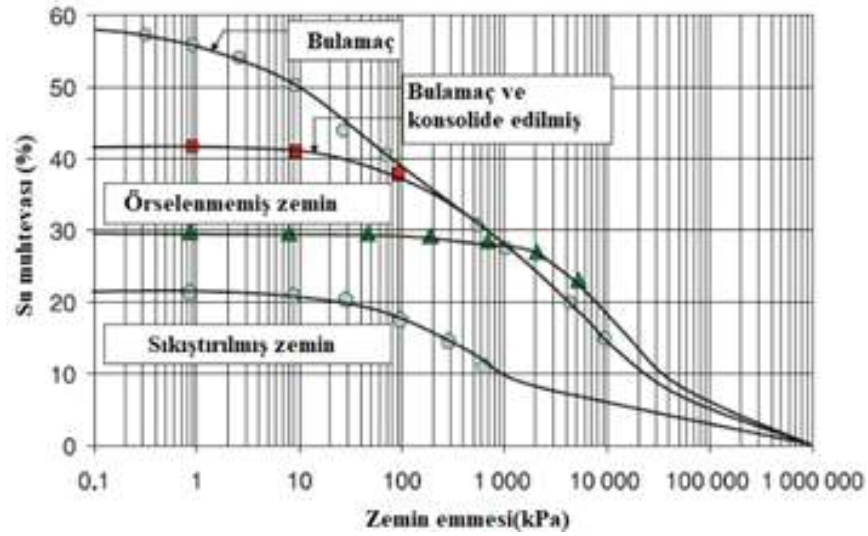


Şekil 16. İslanma ve kuruma etkisi altındaki zeminlerin, zemin su karakteristik eğrisi üzerinde gösterimi [27]

Zemin türü, boşluk yapısı, dane yarıçapı, gerilme durumu, mineral bileşimi ve çevre koşulları gibi faktörler zemin su karakteristik eğrisini etkilemektedir. Bu etkenler, eğrideki iki önemli nokta olan hava giriş değeri ve kalıcı su içeriğini etkileyerek eğriyi şekillendirir (Şekil 17-18) [27].



Şekil 17. Farklı zemin türlerinde SWCC [27]



Şekil 18. Zemin su karakteristik eğrisi üzerinde zemin koşullarının etkisi [27]

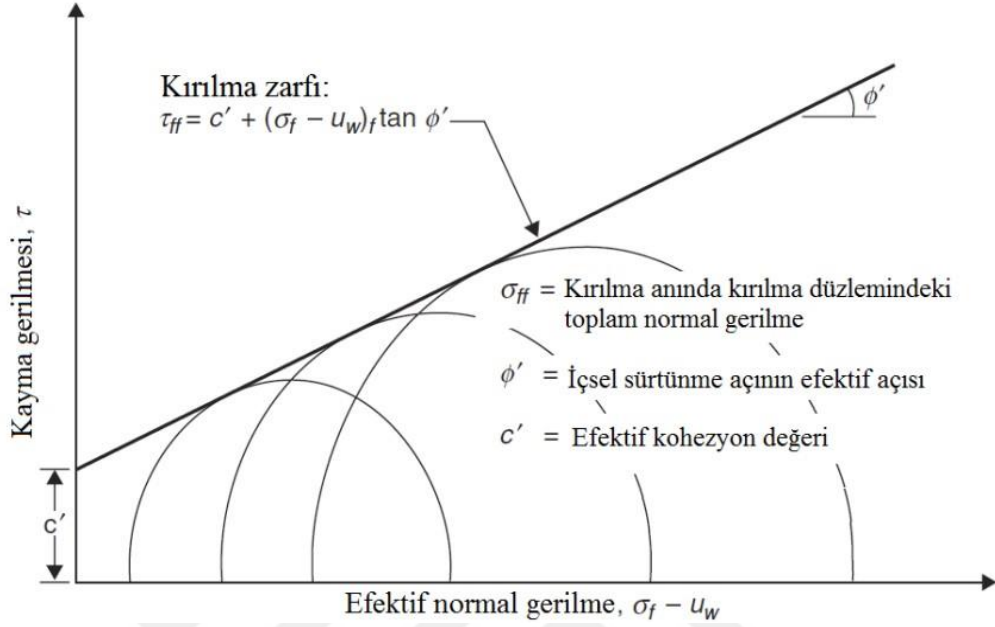
1.2 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Direnci

Suya doymuş zeminler üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen parametreler, kritik durum parametreleridir. Bu sebeple klasik zemin mekaniği problemlerinin çözümünde, güvenli bölgede kalınmak istenmesi sebebiyle zeminler sanki suya doymuş gibi incelenmektedir. Gerçeğe baktığımızda ise, kurak ya da yarı kurak iklimlerin yaşandığı bölgeler yeryüzünün büyük bir bölümünü kaplamaktadır ve bu bölgelerdeki zeminler suya doymuş hale gelememektedir. Bu sebeple, zeminlerin doymuş olduğu düşünülerek, geoteknik özellikleri incelendiğinde eksik sonuçlar elde edilebilmektedir. Son 15 yılda bu tür zeminler için çeşitli modellerin formüle edilmesine yol açan, kapsamlı deneysel laboratuvar test programları geliştirilmiştir [40].

Zemin kayma mukavemeti, bir zeminin kayma yenilmesi meydana gelmeden önce dayanabileceği maksimum kayma gerilimidir. Doygun zeminlerde, kayma mukavemetini ifade etmek için kullanılan iki ana terim vardır. Bunlar içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyondur (c). Doygun olmayan zeminlerin Mohr kırılma zarfı Şekil 19'da gösterilmiştir ve kayma mukavemeti ölçülürken, Mohr-Coulomb denklemi yaygın olarak kullanılır (Eşitlik 5) [41];

$$\tau = c' + (\sigma_N - U_w) \tan \phi' \quad (5)$$

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



Şekil 19. Suya doymuş zeminlerin Mohr kırılma zarfı [42]

Doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışı ise iki bağımsız gerilme değişkenine bağlıdır. Bu değişkenler net gerilme $(\sigma - u_a)$ ve matrik emmedir $(u_a - u_w)$. Ampirik formüller ve deneysel çalışmalar doymuş olmayan zeminlerin kayma mukavemetini belirlemede kullanılan yöntemlerdir. Deneysel çalışmalarda en önemli nokta emme basıncının kontrolü ve ölçümüdür. Bunun için modifiye edilmiş üç eksenli hücre ya da kesme kutusu kullanılabilir. Ayrıca, zemin suyu karakteristik eğrisi ve doymuş olmayan zemin parametreleri de kayma mukavemeti belirlemek için kullanılan parametrelerdir. Aşağıda Tablo 2’de doymuş olmayan zeminler için çeşitli kayma mukavemeti denklemleri verilmiştir [42].

Tablo 2. Doygun olmayan zeminler için önerilen kayma mukavemeti denklemleri [42]

Yazar	Eşitlikler
Frendlund vd. (1978)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$
Frendlund vd. (1996)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\theta(u_a - u_w)]^k \tan\phi'$
Shen ve Yu (1996)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[(1/(1+(u_a - u_w)d))]\tan\phi'$
Vanapalli vd. (1996)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + [(u_a - u_w)\theta^k]\tan\phi'$
Vanapalli vd. (1996)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\tan\phi'(\theta_w - \theta_r/\theta_s - \theta_r)]$
Öberg ve Sallfors (1997)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\tan\phi'(S)]$
Khalili ve Khabbaz (1998)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\tan\phi'(\lambda')]$ $\lambda' = [(u_a - u_w)/(u_a - u_w)_b]^{-0.55}$

Bishop 1959 yılında, efektif normal gerilme için hem boşluk hava basıncı, hem de boşluk suyu basıncı, u_w cinsinden aşağıdaki ifadeyi öneren ilk kişi olmuştur [43]:

$$\sigma' = (\sigma - U_a) + \chi (U_a - U_w) \quad (6)$$

Burada χ toprağın doygunluk derecesine bağlı olarak 0 ile 1 arasında bir parametredir.

Fredlund 1978 yılında kayma mukavemeti için aşağıda verilen eşitliği önermiştir ve yaygın olarak kullanılmaktadır [44];

$$\tau_f = c' + (\sigma - U_a)\tan\phi' + (U_a - U_w)\tan\phi^b \quad (7)$$

Denklemden,

τ : Kayma mukavemeti

c' : Efektif kohezyon

$(\sigma - u_a)$: Net normal gerilme

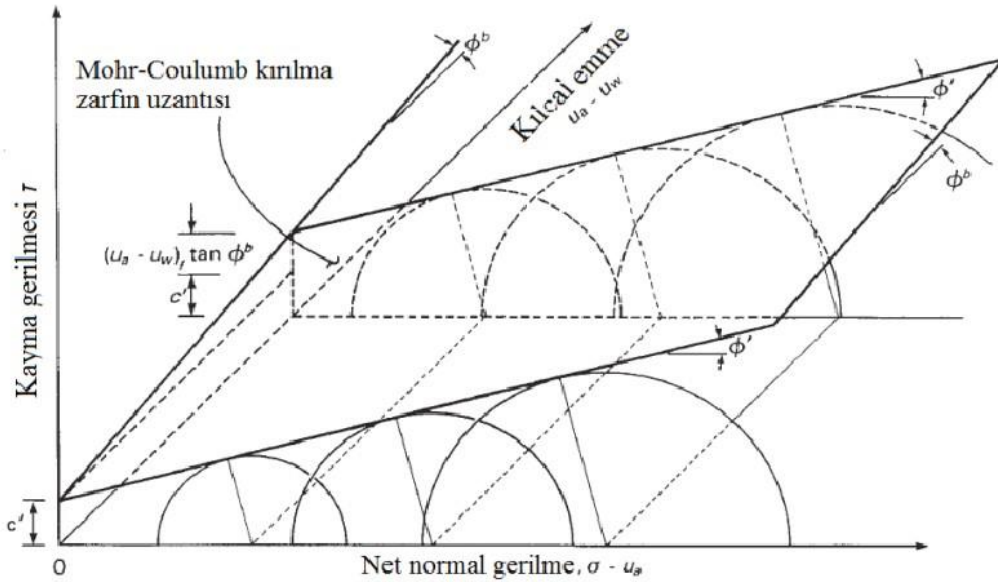
ϕ' : Efektif içsel sürtünme açısı

$(u_a - u_w)$: Matrik emme

ϕ^b : Matrik emme basıncına göre kayma mukavemetindeki artış oranını gösteren açı

Zemindeki doygunluk arttıkça, boşluk hava basıncı, boşluk suyu basıncına yaklaşmakta ve bununla birlikte matris emme de sıfıra yaklaşmaktadır. Böylece, doygun olmayan zeminlerin kayma basıncı denklemi de doygun zeminlerin kayma dayanımı denklemine dönüşmektedir [44].

Hacimsel su içeriği, doygun olmayan zeminlerin mukavemetinde önemli bir etkidir. Hacimsel su içeriği matris emme basıncı ile ters orantılıdır ve matris emme kayma mukavemetini değiştirmektedir. Doygun zeminlerde çizilen mohr daireleri doygun olmayan zeminlerde üç boyutlu olarak çizilmektedir. Doygun olmayan zeminler için yenilme zarfı Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Doygun olmayan zeminler için Mohr dairelerinin kırılma zarfı[44]

Bu grafik, doygun olmayan zeminlerdeki kayma mukavemetinin net normal gerilme ve emme koşulları altında nasıl değiştiğini gösterir. Kritik emme, doygun olmayan zeminin kırılma zarfını etkileyen önemli bir faktördür ve bu nedenle zeminin kayma direncinde kritik bir rol oynar. Grafik, zemin mekaniğinde emme etkisinin önemini ve kayma mukavemetini nasıl etkilediğini anlamak için kullanılır.

1.3 Şev Stabilitesi

Eğimli yüzeylere sahip zemin veya kaya kütlelerinde, ister doğal ister sonradan inşa edilmiş olsun, aşağı ve dışarı doğru hareket eden bir zemin kütlelerinin yenilmesi kayma veya şev yenilmesi olarak adlandırılır. Kaymalar hemen hemen akla gelebilecek her şekilde, yavaş ya da aniden ve görünürde herhangi bir tetikleyici olsun ya da olmasın meydana gelebilir. Bunlar genellikle kazı, mevcut bir eğimin tabanının alttan kesilmesi, zemin yapısının kademeli olarak parçalanması, birkaç istisnai geçirgen katmandaki boşluk suyu basıncının artması veya zemini sıvılaştıran bir şoktan kaynaklanabilir.

Disiplinler arası bir konu olan yamaç/şev stabilizesinde inşaat mühendisinin işlevi diğerlerinden önemli farklılıklar göstermektedir. Stabilité analizi, verilen veya önerilen eğimin güvenlik gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını belirler: Belirli yükler altındaki zemin kütlesi, kesme kırılmasına göre yeterli bir güvenlik faktörüne sahip olmalı ve verilen yükler altında zemin kütlelerinin deformasyonu, belirli tolere edilebilir sınırları aşmamalıdır. Analiz, araştırma sırasında nadiren ortaya çıkan en kötü koşullar için yapılmalıdır. Koşullardaki olası değişiklikleri tahmin etmek için yalnızca analitik yöntemlere ilişkin bilgi gerekli değildir, aynı zamanda deneyim ve muhakeme de gereklidir [45].

1.3.1 Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması

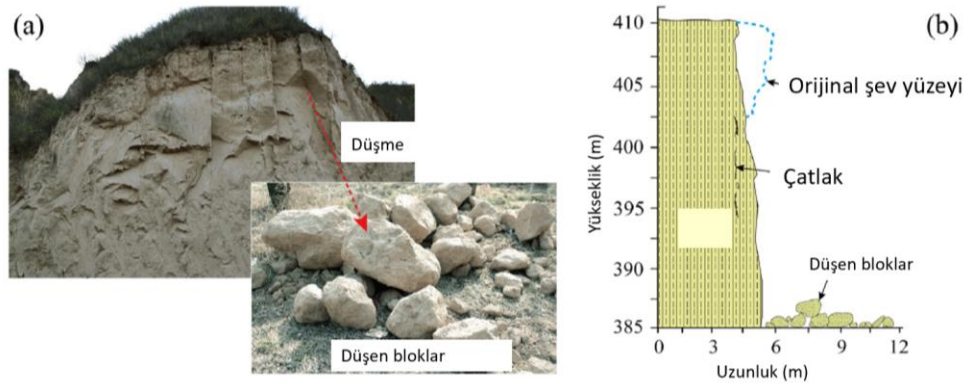
Şevlerde meydana gelen duraysızlıkların nedenini ve alınabilecek önlemleri belirlemek için çok sayıda sınıflandırma sistemi önerilmiştir. Şevlerde meydana gelen hareketlerin mekanizması, kayma yüzeyi şekli ve şevi oluşturan malzemenin niteliği gibi özelliklerini dikkate alarak Varnes (1978) günümüzde de hala yaygın şekilde kullanılan sınıflandırma sistemini önermiştir. Bu sistemde 6 farklı duraysızlık türü bulunmaktadır. Ayrıca şevi oluşturan zemin malzemesi boyutuna göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma sistemi Tablo 3'te özetlenmiştir [46].

Tablo 3. Şev duraysızlıklarının mühendislik sınıflandırması Varnes (1978) [46]

DUYARSIZLIK TÜRÜ			MALZEMENİN TÜRÜ		
			TOPRAK ZEMİNLER		ANA KAYA
			İNİXE TANELİ	İRİ TANELİ	
DÜŞME			Zemin Düşmesi	Moloz Düşmesi	Kaya Düşmesi
DEVİRİLME			Zemin Devrilmesi	Moloz Devrilmesi	Kaya Devrilmesi
KAYMA	DAİRESEL	SINIRLI SAYIDA BİRİM	Zeminde Dairesel Kayma	Molozda Dairesel Kayma	Kayada Dairesel Kayma
	ÖTELENMELİ	ÇOK SAYIDA BİRİM	Zeminde Blok Türü Ötelenme Zemin Kayması	Molozda Blok Türü Ötelenme Moloz Kayması	Kayada Blok Türü Ötelenme Kaya Ötelenmesi
YANAL YAYILMA			Zemin Yayılması	Moloz Yayılması	Kaya Yayılması
AKMA			Zemin Akması	Moloz Akması	Kaya Akması
			(Zeminde krip)		
KARMAŞIK KAYMALAR			Yukarıda belirtilen diğer duraysızlık türlerinden ikisinin veya birkaçının birleşmesiyle gelişen duraysızlıklar		

1.3.1.1 Düşme

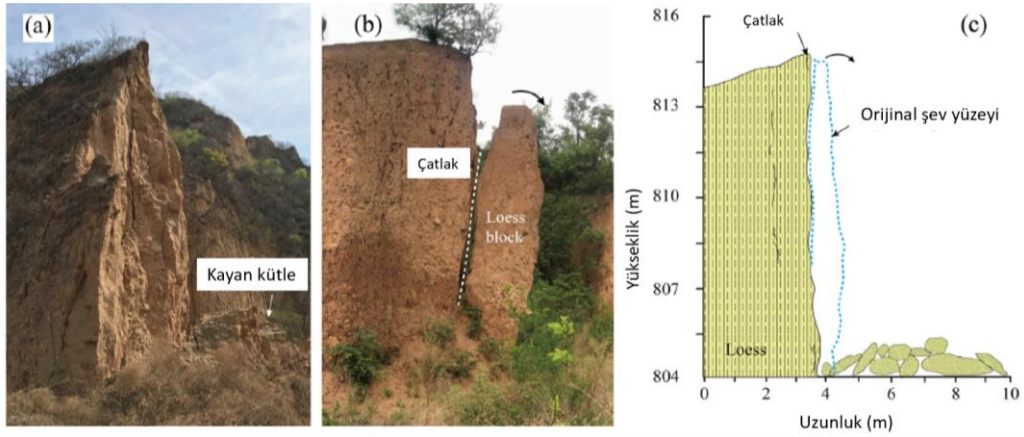
Düşme, zemin veya kaya kütlelerinin yamaç yüzlerinden ayrılmasıdır. Ayrılma, bir çatlak oluştuğunda veya mevcut bir çatlak kritik boyuta ulaştığında meydana gelir. Ayrılan parçaların hareketi genellikle serbest düşüş şeklindedir. Serbest düşüş son derece hızlıdır ($>5\text{m/s}$), yuvarlanma ve geri sıçrama sırasındaki hızlar ise eğimin dikliğine bağlıdır. Düşen blokların hareket mesafeleri, çökme alanlarının morfolojisine bağlı olarak büyük ölçüde değişir (0-300 m) [47]. Şekil 21’de Hejin’de meydana gelen tipik bir düşme örneği verilmiş ve profil şematize edilmiştir.



Şekil 21. Hejin, Zhonghuchao köyünde meydana gelen tipik bir düşme örneği [47]

1.3.1.2 Devrilme

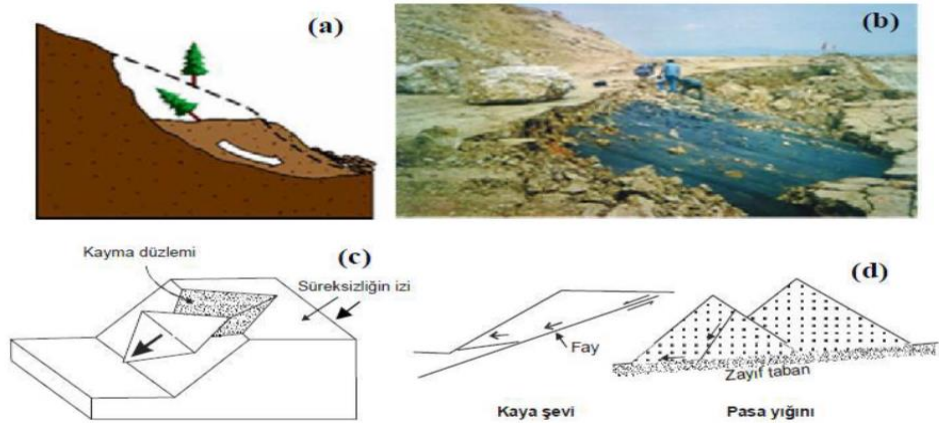
Zemin yada kaya kütlesinin ağırlık merkezi, şevin ucunda erozyon veya zayıf bir bölge oluşmasıyla dışa doğru kayar ve kütlenin dönmesine yol açar[47]. Şekil 22’de Zaoling köyünde meydana gelen tipik bir devrilme örneği verilmiş ve profil şematize edilmiştir.



Şekil 22. a)Zaoling köyünde meydana gelen devrilme örneği b)Duanshi kentinde meydana gelen devrilme örneği c)22a’daki devrilme olayının jeolojik profili [47]

1.3.1.3 Kayma

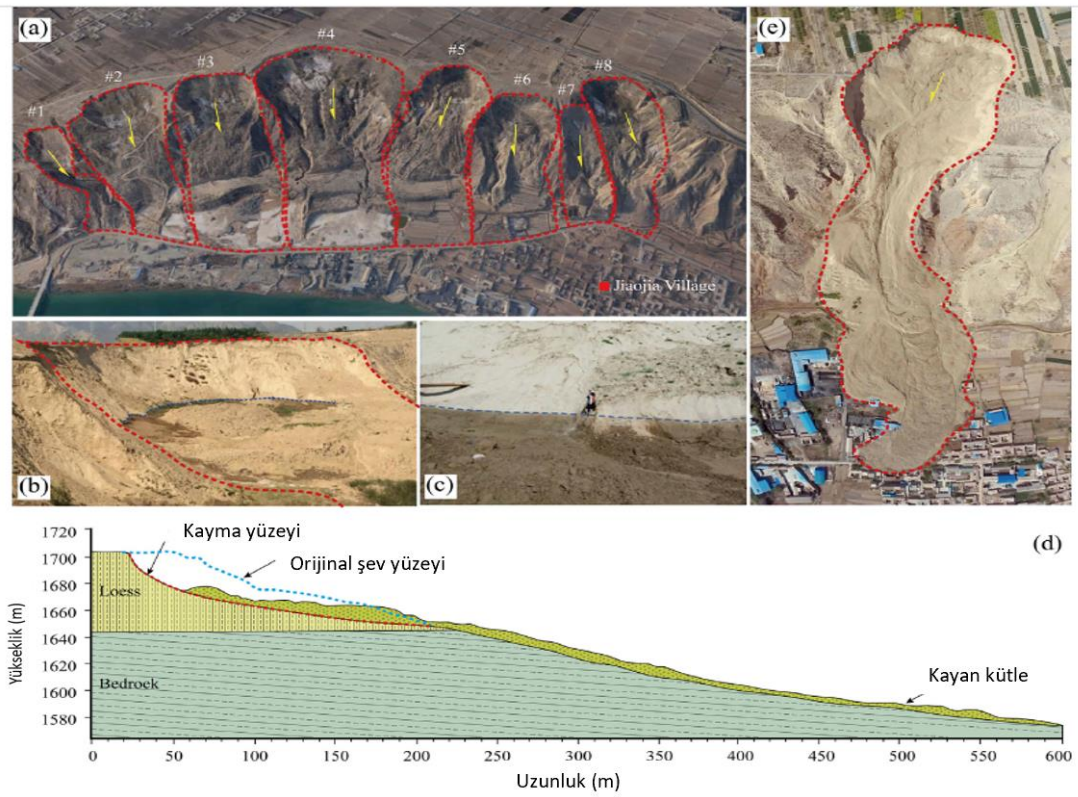
Zemin yada kaya kütlelerinin kesme yenilmesi sonucunda bir veya daha fazla yüzeyde hareketidir. Hareket mekanizmasına göre kaymalar, dairesel ve ötelemeli kaymalar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilir [48]. Şekil 23’te çeşitli kayma düzlemleri gösterilmiştir.



Şekil 23. Çeşitli kayma düzlemleri a) dairesel kayma b) düzlemsel kayma c) kama d) çok yüzeyli kayma[7]

1.3.1.4 Akma

Hareketli kütle içindeki kayma yüzeyleri genellikle görünmez veya kısa ömürlüdür. Yüzeysel çamur akışları, bitki kökleri ağı ve yüksek su içeriği içeren ince bir zemin tabakasının (< 2 m) kayması ve akışı ile karakterize edilir. Hareketli kütle içindeki derin akışlar ise, suya doymuş zemin, organik madde ve havanın karışımının karışık bir bulamaç halinde harekete geçtiği hızlı kütle hareketleridir. Bu hareket vizkos akışkanlarınkine benzer bir hareket şeklindedir [48]. Şekil 24'te Yongjing kentinde meydana gelen derin akma örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 24. Yongjing kentinde meydana gelen derin akma örnekleri b)4 numaralı kaymanın yakından görünümü c)4 numaralı kayma sonucunda biriken zemin kütlesi d)4 numaralı kaymanın jeolojik profili [47]

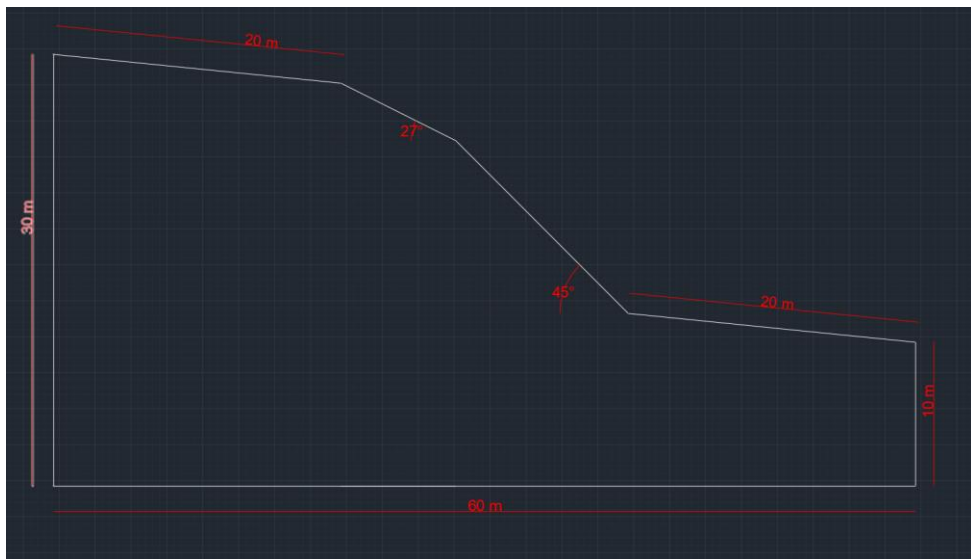
2 MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Doygun olmayan zeminlerin içindeki boşluklarda bulunan hava, yağmur etkisi altında su ile yer değiştirmek ister. Bu durum doygun olmayan zeminlerin stabilitesinde negatif bir etkiye sahiptir ve bu konuyla alakalı literatürde pek çok çalışma mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında ise, kılcal basınçların kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için iki boyutlu sonlu farklar yöntemiyle çalışan FLAC Ver. 7.0 (Itasca, 2011) programı kullanılmış ve analizler iki fazlı akış modülüyle çözülmüştür. İki fazlı akış modülü ile, iki farklı tip karışmaz sıvının akışının, gözenekli ortamda sayısal olarak modellenmesi sağlanmaktadır. Analizler sırasında ıslatma sıvısı olarak su ve ıslatmayan sıvı olarak da hava kullanılmıştır.

Analizlerde kullanılmak üzere bir şev modeli FLAC Ver. 7.0 programı içindeki örnek problemlerden seçilmiştir. Seçilen şev modeli, alttan ve yanlardan geçirimsiz, yüzeyde ise göllenme olmayacak şekilde tanımlanmıştır. Şev, 60 m genişliğinde olup, tabandan en yüksek yüksekliği 30 m (modelin sol tarafı), en kısa yükseklik ise 10 m'dir (modelin sağ tarafı). Modele dahil edilen vadinin yukarıda yer alan düz kısmı 20 m genişliğinde ve bu düzlüğü takip eden ilk eğim 26.7° , ikinci eğim ise 45° dir (derece). Modelin Autocad çizimi Şekil 25'te sunulmuştur.



Şekil 25. Analizlerde kullanılacak şev modelinin AutoCad çizimi

Bu çalışma kapsamında, zeminlerin karakteristik özelliklerinin analizler üzerindeki etkisini görmek ve karşılaştırmak için birbirinden farklı özelliklere sahip 3 çeşit zemin kullanılmıştır. Kullanılan zeminlerden ilkinde (Zemin1 - Z1), şev modelini seçtiğimiz FLAC içerisindeki örnek problemde kullanılan zemin parametreleri esas alınmıştır. İkinci zemine ait emme basıncı parametreleri, (Zemin2 - Z2) laboratuvar ortamında filtre kağıdı yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sonuncu zemin ise (Zemin3 - Z3), daha önce Oh ve Lu (2015)'nin çalışmalarında Hadong bölgesinde gerçekleştirmiş oldukları bir vaka analizinde kullandıkları zemindir. Zemin özellikleri belirlenirken hem deneylerden faydalanılmış hem de literatürdeki verilere uygun olacak şekilde kabuller yapılmıştır. Z2 ve Z3 zeminleri siltli kum sınıfına girerken, Z1 zemini sınıfı hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Malzeme özellikleri Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 4. Zemin1 için zemin ve akışkan özellikleri

Z1 ZEMİNİ MODEL ÖZELLİKLERİ			
Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	2000	Islatan sıvı yoğunluk (kg/m ³)	1000
Drenaj kütle modülü (MPa)	200	Islatmayan sıvı yoğunluk (kg/m ³)	0
Kohezyon (Pa)	0	van Genuchten prametresi, a	0,336
İçsel sürtünme açısı	30	van Genuchten prametresi, b	0,5
Mobilite (m ² /(Pa-sec))	1,00E-09	van Genuchten prametresi, P0 (Pa)	15000
Porozite	0,1	Islatan sıvı modülü (MPa)	1
		Islatmayan sıvı modülü (Pa)	1
		Drenajsız katsayı	0
		Rezidüel doygunluk	0
		Viskozite	1

Tablo 5. Zemin2 için zemin ve akışkan özellikleri

Z2 ZEMİNİ MODEL ÖZELLİKLERİ			
Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	1750	Islatan Sıvı Yoğunluk (kg/m ³)	1000
Drenaj kütle modülü (MPa)		Islatmayan sıvı yoğunluk (kg/m ³)	0
Kohezyon (Pa)	5000	van Genuchten prametresi, a	0,304
İçsel sürtünme açısı	28	van Genuchten prametresi, b	0,5
Mobilite (m ² /(Pa-sec))	1,00E-10	van Genuchten prametresi, P0 (Pa)	22541,82
Porozite	0,25	Islatan sıvı modülü (MPa)	1
		Islatmayan sıvı modülü (Pa)	1
		Drenajsız katsayı	0
		Rezidüel doygunluk	0
		Viskozite	1

Tablo 6. Zemin3 için zemin ve akışkan özellikleri

Z3 ZEMİNİ MODEL ÖZELLİKLERİ			
Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	1330	Islatan sıvı yoğunluk (kg/m ³)	1000
Drenaj kütle modülü (MPa)		Islatmayan sıvı yoğunluk (kg/m ³)	0
Kohezyon (Pa)	0	van Genuchten parametresi, a	0,270
İçsel sürtünme açısı	34	van Genuchten parametresi, b	0,5
Mobilite (m ² /(Pa·sec))	5,60E-10	van Genuchten parametresi, P0 (Pa)	22480
Porozite	0,28	Islatan sıvı modülü (MPa)	1
		Islatmayan sıvı modülü (Pa)	1
		Drenajsız katsayı	0
		Rezidüel doygunluk	0
		Viskozite	1

Yukarıda verilen zemin modelleri özelliklerinde bulunan van Genuchten parametreleri a, b, ve P0 zeminlerin zemin su karakteristik eğrisi çizdirilerek elde edilmiştir. Bu aşamada filtre kağıdı deneyinden elde edilen veriler, kullanıma çevrimiçi açık olan SWRCFit programında değerlendirilmiştir [52].

Yapılacak olan analizlerde zeminler kısmi doygun kabul edilecektir. FLAC örnek problemindeki şev profili ve kararlı durum başlangıç doygunluğu gerçek hayatta karşılaşılabileceğimiz değerler olduğu için ilk analizler yapılırken bu problemdeki zemin ve sıvı parametreleri dikkate alınmıştır. Burada, kararlı durum başlangıç doygunluk derecesi %54 olarak belirlenmiş ve analizler sonucunda daha rahat karşılaştırma yapabilmek için bütün zemin türlerinin analizleri için kararlı durum başlangıç doygunluk derecesi aynı kabul edilmiştir. Modelin altı ve yan tarafları geçirimsiz kabul edilmiş olup, istenilen suya doygunluğa ulaşabilmek için uygun bir sızma hızı hesaplanmış ve bu sızma yağış hızı gibi sisteme tanımlanmıştır. Gerçekte böyle bir yağış ya da sızma elbette yoktur, bu işlem sadece istenilen suya doygunluk dağılımını elde etmek için uygulanan bir yöntemdir. Bunun sonucunda tüm zeminleri %54 doygunluğa getirmek için, denklem 20 kullanılarak gerekli sızma hızları hesaplanmış ve Z1 zeminine 3,219E-8 m/sn, Z2 zeminine 1,755E-9 m/sn, Z3 zeminine 4,6E-09 m/sn hızların tanımlanması gerektiği bulunmuştur. Zemin modellerini istenilen suya doygunluk dağılımına getirebilmek için uygulanan kriter sadece sızma hızı değildir, van-Genuchten parametrelerine göre istenen doygunluk oranına göre belirlenen hedef boşluk suyu basıncı da hesaplanarak sisteme tanımlanmıştır.

Şevlerin olası kayma bölgesindeki doygunlukları %54 seviyesine getirildikten sonra, yağışların şevler üzerindeki etkisini incelemek için meteorolojinin sayfasında bulunan, ülkemizdeki en yüksek yağış miktarları tablosundan 2 adet yağış seçilmiştir. Bu yağışlar Tablo 7’de verilmiştir. Bunlar sırasıyla; q3; 70.7mm/15dk Hopa ve q2; 490,8mm/24sa Antalya/Kemer yağışlarıdır [49]. Ayrıca düşük yoğunluklu ve uzun süreli bir yağışı da temsil edecek şekilde q1; 120mm/48sa tasarı yağışı sisteme uygulanmıştır. Sisteme uygulanan sızma hızları hesaplanmış ve Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 7. Ülkemizde standart zamanlarda görülen en yüksek yağış miktarları, yer ve tarihleri [49]

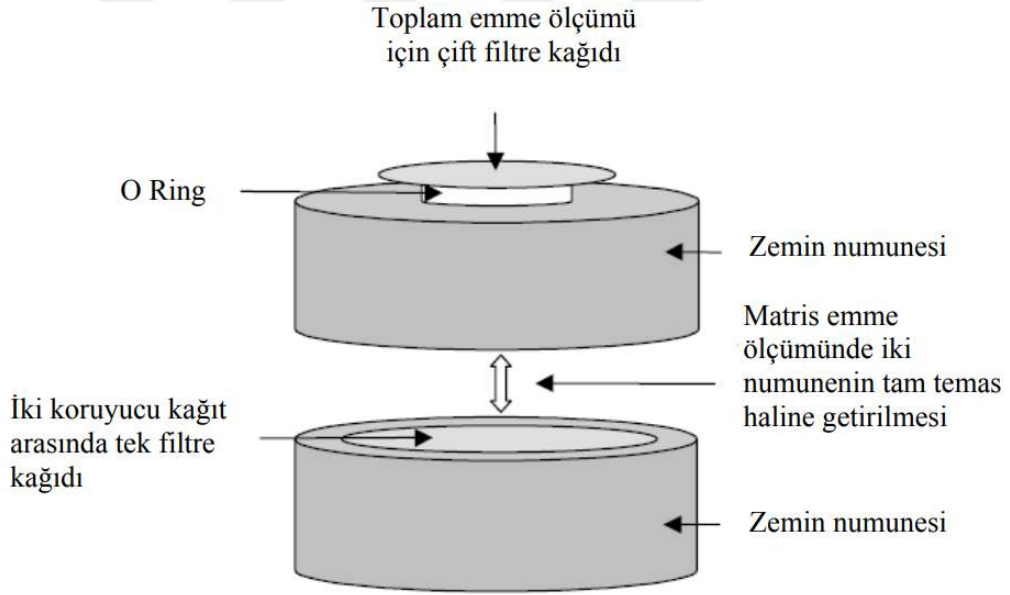
SÜRE (dk)	MİKTAR(mm)	YER	TARİH
5 DK	50.5	HOPA	7.07.1988
10 DK	60.6	HOPA	7.07.1988
15 DK	70.7	HOPA	7.07.1988
30 DK	90.9	HOPA	7.07.1988
1 SA	133.8	BARTIN, ULUS, CEYÜPLER	10.08.2021
2 SA	210.0	BARTIN, ULUS, CEYÜPLER	10-11.08.2021
3 SA	252.8	BARTIN, ULUS, CEYÜPLER	10-11.08.2021
4 SA	332.3	ANTALYA	4.11.1995
5 SA	374.3	ANTALYA	4.11.1995
6 SA	390.3	ANTALYA	4.11.1995
8 SA	410.4	ANTALYA	4.11.1995
12 SA	428.1	ANTALYA	4.11.1995
18 SA	464.8	MARMARIS	10-11.12.1992
24 SA	490.8	ANTALYA - KEMER	16-17.12.2018

Tablo 8. Uygulanan yağış hızları

YAĞIŞLAR	YAĞIŞ SÜRESİ (dk)	YAĞIŞ MİKTARI (mm)	YAĞIŞ HIZI (m/sn)
q1	2880	120	6,94E-7
q2	1440	490,8	5,68E-6
q3	15	70,7	7,86E-5

2.2 Metot

Z1 ve Z3 zeminleri için kullanılacak olan parametreler literatürden olduğu gibi alınmış olup Z2 zemini için gerekli parametreler ise laboratuvar ortamında bulunmuş ya da literatür ile uyumlu olacak şekilde kabul edilmiştir. Z2 zemininin emme kapasitesini belirlemek için laboratuvar ortamında filtre kağıdı deneyi gerçekleştirilmiştir. Filtre kâğıdı olarak Whatman 42 kullanılmış ve farklı su içeriklerine sahip olacak şekilde 7 numune hazırlanmıştır. Örneklerin su içerikleri kontrollü şekilde ayarlanmış olup her bir zemin örneğinin su içeriği değeri öncesinden belli olacak şekilde hazırlanmıştır. Filtre kağıdının dengelenmesine izin vermek için, hazırlanan numuneler hava almaz bir kap içine yerleştirilerek 7 gün bekletilmiştir [50]. Filtre kâğıdı yöntemi için hazırlanmış bir numune Şekil 26'da şematize edilmiş hali ile sunulmuştur.



Şekil 26. Filtre kağıdı yöntemi için hazırlanmış numunenin şematik gösterimi [31]

2.2.1. Filtre Kâğıdı Metodu

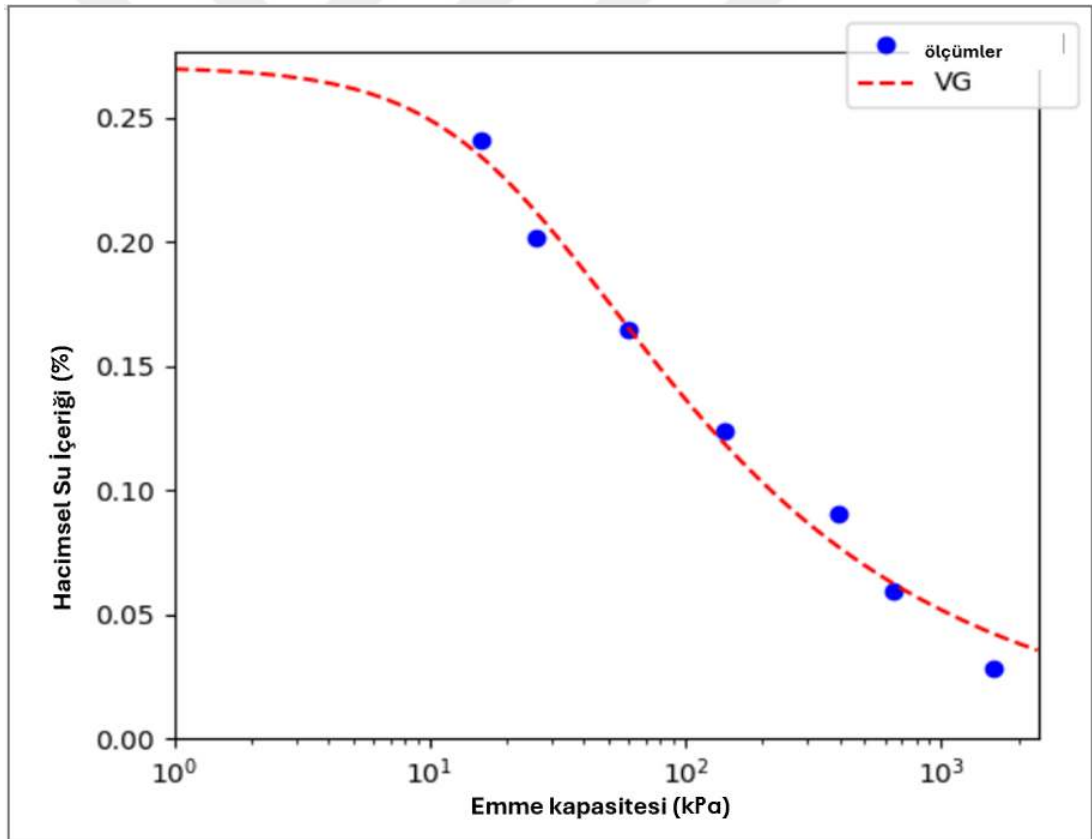
Filtre kâğıdı ile zemin arasındaki doğrudan temas, sıvı fazdaki suyun ve çözünen maddelerin serbestçe değişimini sağlar. Filtre kâğıdı yönteminde, zemin numunesi ve filtre kâğıdı ya temaslı (matrik emme ölçümü) ya da temassız (toplam emme ölçümü) yöntemiyle sabit sıcaklık ortamında dengeye getirilir. Temaslı filtre

kâğıdı tekniğinde, başlangıçta kuru olan filtre kağıdının su içeriği, zeminden filtre kağıdına sıvı haldeki suyun akışı nedeniyle her ikisi de dengeye gelinceye kadar artar. Bu nedenle filtre kâğıdı ile zemin arasında iyi bir temas sağlanmalıdır. Filtre kâğıdı ile zemin arasında denge sağlandıktan sonra filtre kağıdının su içeriği ölçülürken [31];

- a) Cam kavanoz kapları ve su içeriği ölçümü için kullanılan tüm kaplar 0,0001 g hassasiyetle tartılır.
- b) Takip eden tüm ölçümler iki kişi tarafından gerçekleştirilir. Örneğin, bir kişi kapalı cam kavanozu açarken, diğer kişi filtre kağıdını cımbız kullanarak çok hızlı bir şekilde alüminyum kutunun içine koymalıdır. Kalibrasyonun neredeyse tüm adımlarında malzemeleri tutmak için eldiven ve cımbız kullanılır. Filtre kağıtlarına ve alüminyum kutulara asla çıplak elle dokunulmamaktadır.
- c) Daha sonra içerisinde ıslak filtre kağıtları bulunan her kutunun ağırlığı çok hızlı bir şekilde alınır. Kutuların ve ıslak filtre kağıtlarının ağırlıkları, ilgili kutu numaraları ve üst veya alt filtre kağıdının içeride olup olmadığı ile birlikte kaydedilir.
- d) Her cam kavanoz için (c) adımı takip edilir. Daha sonra tüm kutular, buharlaşmayı sağlamak için kapakları yarı açık olacak şekilde fırına konur. Tüm filtre kağıtları 24 saat boyunca $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta fırın içinde tutulur.
- e) Daha sonra fırından çıkartılan ve içerisinde kuru filtre kâğıdı bulunan kutu yine çok hızlı bir şekilde tekrar tartılır.
- f) Söz konusu spesifik filtre kâğıdı tipi için bir kalibrasyon eğrisi de elde edilebilir [32]. Bununla beraber genelde ASTM D5298-16'da tanımlanan kalibrasyon eğrilerinin kullanılması önerilmektedir.

Filtre kâğıdı tekniğinde yalnızca kül içermeyen filtre kağıtlarının kullanılması gerektiğini ve yalnızca Whatman 42 ve Schleicher ve Schuell 589 (veya SS 59) filtre kağıtlarının yaygın olarak kullanıldığını belirtmek de önemlidir (Leong ve diğerleri, 2002) [31]. Bu çalışma kapsamında da deney sonuçları değerlendirilirken Whatman 42 filtre kağıdına ait ASTM D5298-16'da verilmiş kalibrasyon eğrileri kullanılmıştır [51].

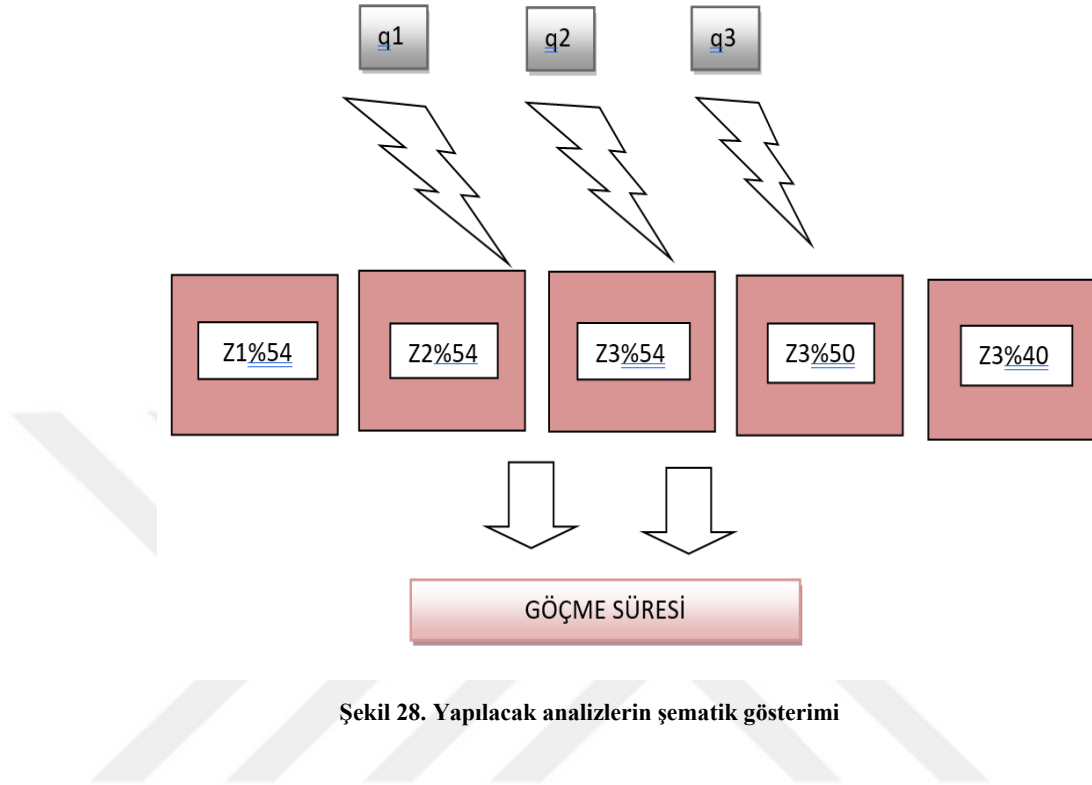
Z2 zemini için yukardaki adımlar takip edilerek yapılan filtre kâğıdı yöntemiyle önce filtre kağıtlarının su içerikleri ölçülmüş ardından, kalibrasyon eğrisi vasıtası ile emme basıncı değerleri belirlenmiştir. Her bir su içeriği değeri kontrollü hazırlanan ve bilinen bu zemin örneklerinden elde edilen veriler ile zemin su karakteristik eğrisi çizdirilmiştir. Bu aşamada da kullanıma çevrimiçi açık olan SWRCFit programı kullanılmıştır [52]. SWRCFit programı, girilen su içeriği ya da suya doygunluk değerleri ve emme basıncı ikili değerlerinden farklı yaklaşımlarla tanımlanmış zemin su karakteristik eğrisi oluşturabilen pratik ve kullanışlı bir yazılımdır. Yazılımda tanımlı yaklaşımlardan van-Genuchten modelinin olduğu şık seçilmiştir. Z2 zemini için oluşturulan eğri ise Şekil 27’de verilmiştir. İlgili zemin su karakteristik eğrisinden elde edilen van-Genuchten parametreleri ise yukarıda Tablo 6’da sunulmuştur.



Şekil 27. Zemin2 için elde edilen zemin su karakteristik eğrisi

Bu çalışma kapsamında, yukarıda özellikleri verilen zeminler ve şev modeli kullanılarak, zeminlerin doymamış oldukları durumlarda, belirlenen yağışlar etki ettirilmiştir ve neden oldukları göçmeler incelenmiştir. Çalışmanın özeti şematik olarak

Şekil 28’de gösterilmiştir. Analizler sırasında FLAC programı ve iki fazlı akış modeli tercih edilmiştir.



2.2.2. FLAC Programı

FLAC, mühendislik mekaniği hesaplanmalarına yönelik sonlu farklar yöntemi ile çalışan bir programdır. Bu program, zeminlerin akma sınırına ulaştığı andaki davranışlarını simüle etmektedir. Malzemeler, kullanıcı tarafından oluşturulan modelin şekline uyacak şekilde oluşturulan ızgara şeklindeki bölgelerle gösterilir. Her eleman, etki ettirilen kuvvetlere veya sınır kısıtlamalarına yanıt olarak doğrusal veya doğrusal olmayan gerilim/gerinim yasasına göre davranış sergiler. Bu gerilmeler altında, kullanılan modellerde deformasyonlar gözlemlenebilir. Lagrange hesaplama şeması ve karmaşık ayırıklaştırma bölgeleme tekniği FLAC programında kullanılan bir yöntemdir ve bu yöntem, plastik göçme ve akışın modellenmesindeki en iyi yöntemlerden biridir.

FLAC ilk olarak geoteknik ve maden mühendisleri için geliştirilmiş olsa da şu an, mekanikteki karmaşık problemleri çözmek için geniş bir yetenek yelpazesi sunmaktadır. Bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Kayma ya da ayrılma olabilecek düzlemleri simüle etmek için arayüz elemanları
- Yapısal eleman modelleri ile yapısal desteği simüle etmek
- Büyük gerinim simülasyonlarında çözüm süresi boyunca düzenli bir ağ oluşturmak ve ızgaranın kötü biçimde bozulmasının önlenmesi için otomatik yeniden eşleştirme mantığı
- Model oluşumunu kolaylaştırmak için grafiksel kullanıcı arayüzü aracılığıyla kullanılabilen “sanal ızgara” oluşturma araçları (örneğin, sınırlar çizilebilir ve doğrudan bir model ızgarasına dönüştürülebilir)
- Termal modelleme ve dinamik analiz özelliği
- Birbiriyle karışmayan iki sıvının (örneğin su ve gaz) gözenekli bir ortamdaki akışının simülasyonu amacıyla iki fazlı akış modeli (isteğe bağlı)

2.2.2.1. İki Fazlı Akış Modeli

FLAC programındaki iki fazlı akış modeli, birbiriyle karışmayan iki sıvının gözenekli ortamdan akışının sayısal olarak modellenmesine olanak tanır. Formülasyon, bir akışkanın diğerinin yerini aldığı ve iki akışkanın gözenekli ortamda aralarında herhangi bir kütle aktarımı olmadan eşzamanlı akışının gerçekleştiği problemlere uygulanır. İki fazlı akışta boşluklar tamamen iki akışkan ile doludur. Akışkanlardan biri olan, ıslatıcı akışkan (W) simgesiyle tanımlanır ve gözenekli ortamı (g ya da n_w) simgesiyle gösterilen ıslatmayan diğer akışkana oranla daha çok ıslatır. Bu iki akışkan arasında basınç farkı olacaktır ve fark ($P_g - P_w$) şeklinde gösterilmektedir. Ortaya çıkan fark ($P_g - P_w$) zemin doygunluğunun (S_w) bir fonksiyonu olan kılcallıkla (P_c) ifade edilir. Her iki akışkanın da akışını tanımlamak için Darcy kanunu kullanılır. Van Genuchten yasaları, FLAC programında, kılcal basınç ve bağıl geçirgenlik eğrileri oluşturulmak için kullanılmaktadır.

Doygun olmayan zemin türlerinde kılcal basınçlar, şevlerin stabilitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu kılcallık sayesinde zemin içindeki küçük parçacıklar birbirine tutunarak, zemine ekstra bir kohezyon sağlar. Bu kohezyon, görünür kohezyon olarak adlandırılır ve zeminin doygunluk derecesi arttıkça düşüş sergiler.

FLAC programının, iki fazlı akış modülünde, sıvı taşınması Darcy yasasının genişletilmiş bir versiyonunu kullanılır ve geçirgenlik, doygunluğun ampirik bir fonksiyonudur. Doygun olmayan kısımda oluşan boşluk suyu basıncı negatiftir. Hem kılcal basınç hem de geçirgenlik yasaları, zeminler için yaygın olarak kullanılan Van Genuchten formundadır. Ayrıca Akışkan Mekaniği Bishop efektif gerilmesine dayanmaktadır.

2.2.2.1.1 Bağlı Geçirgenlik Kanunları

Bağlı geçirgenlik Van Genuchten formunun ampirik yasalarına göre (S_w) doygunlukla ilişkilidir.

$$S_e = \frac{S_w - S_r^w}{1 - S_r^w} \quad (8)$$

Burada;

S_r^w : Rezidüel ıslatma sıvısı doygunluğu

S_e : Etkili doygunluk' tur.

2.2.2.1.2 Kılcal Basınç Kanunu

Kılcal basınç kanunu, akışkan boşluk basınçlarıyla doygunluk arasındaki fark ile ilgilidir.

$$P_g - P_w = P_c S_w \quad (9)$$

FLAC'te bu ampirik yasa van Genuchten formundadır;

$$P_c S_w = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (10)$$

2.2.2.1.3 Görünen Kohezyon

Doygun olmayan bir Mohr-Coulomb malzemesini FLAC programında iki fazlı akış modelinde ele alındığında akma koşulu;

$$\tau_{max} = \sigma^b \tan \phi + c \quad (11)$$

Burada;

τ_{max} : kayma mukavemeti

σ^b : Bishop efektif gerilme

ϕ : içsel sürtünme açısı

c : kohezyon 'dur.

Bishop efektif gerilmesi ise ;

$$\sigma^b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a) \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir ve burada;

σ : toplam gerilme

S_w : su doygunluğu

P_w : su basıncı

P_a : hava basıncı

S_a : $1 - S_w$

Denklem (11) ve (12) birleştirilirse;

$$\tau_{max} = (\sigma - P_a) \tan \phi + S_w (P_a - P_w) \tan \phi + c \quad (13)$$

Denklem 13'ten de anlaşılacağı üzere zeminler doygunluk kazandıkça klasik Mohr-Coulomb kriteri geri kazanılır. Doygun olmayan zemin koşullarında, $S_w (P_a - P_w) \tan \phi$ ifadesi kılcal kuvvetler tarafından zemine sağlanan ilave kohezyonunun (C_c) rolünü oynar. Kılcal basınç $P_c = P_a - P_w$ olarak ifade edilir ve C_c kohezyonu şu şekilde tanımlanabilir.

$$C_c = S_w P_c \tan \phi \quad (14)$$

Zemindeki doygunluğun azalan bir fonksiyonu olan kılcal basınç, FLAC programında Van Genuchten parametreleriyle gösterilir;

$$P_c = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (15)$$

Burada;

S_e doygunluğu, P_0 ve a ise deneysel olarak belirlenecek parametreleri anlatır.

P_0 parametresi, zeminin kılcal basıncının bir ölçüsünü verir ve ince taneli malzemelerde daha yüksek değere sahiptir. a parametresi kılcal eğrinin eğimini nitelendirir; kötü derecelenmiş zeminler için 1'e, iyi derecelenmiş zeminler için sıfıra yakındır.

$$P_0 = \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{\kappa}{n}}} \quad (16)$$

Burada;

σ : yüzey gerilimi
 κ : içsel geçirgenlik
 n : porozitedir.

Literatürde bazen P_0 yerine “alfa katsayısı” kullanılmaktadır ve bu eşitlik;

$$P_0 = \frac{\rho_w g}{\alpha} \quad (17)$$

Burada;

ρ_w : ıslatma sıvısının yoğunluğu
 g : yerçekimi'dir.

2.2.2.1.4 Kararlı Durum Doygunluğu ve Gözenek Basıncı

FLAC programı iki fazlı akış modülü, sabit hızlı ve uzun zaman süren yağışlar sebebiyle doymun olmayan zeminlerde sızmanın sebep olacağı sorunları belirlerken doymunluk ve gözenek basıncı değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$q = k \kappa^w S_w \rho_w g \quad (18)$$

Burada k ; izotropik mobilite katsayısını ifade etmekte ve sıfır rezidüel doymunluk durumunda bağıl geçirgenlik κ^w şu şekilde verilir;

$$\kappa^w = S_w^b [1 - (1 - S_w^{1/a})^a]^2 \quad (19)$$

Denklemler 18, Denklem 19 içine yerleştirilirse;

$$S_w^b [1 - (1 - S_w^{1/a})^a]^2 = \frac{q_1}{\rho_w g k} \quad (20)$$

Bu denklem, başlangıç kararlı durum doygunluğunun tahminini sağlamak üzere S_w için çözülebilir. Ayrıca doymun olmayan bölgedeki su basıncı (zemin emmesi), doymunluk cinsinden verilebilmektedir. Van Genuchten formu şöyledir ;

$$-P_w = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (21)$$

2.3 Flac Programında Analizler Sırasında Takip Edilen Adımlar

Bu bölümde, FLAC programı kullanılarak yapılan analizlerin detayları adım adım ele alınacaktır. Bu aşamalar, modellenen şev stabilitesi probleminin çözümüne yönelik olarak belirlenen parametrelerin tanımlanması ve sonuçların yorumlanması süreçlerini içermektedir.

1. Şevin geometrisi sisteme tanımlanmıştır.
2. Zemin parametreleri olan kuru yoğunluk, kütle modülü, kayma modülü, kohezyon, ve içsel sürtünme açısı ve porozite sisteme tanımlandı.
3. Zemin mobilitesi, zeminin suya doymun hidrolik iletkenlik değerine göre hesaplanarak sisteme tanımlandı.
4. Zeminde ait van Genuchten parametreleri a , b , α ve P_0 değerleri zemin su karakteristik eğrisi ile elde edilmiştir. Bu aşamada da kullanıma çevrimiçi açık olan SWRCFit programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar sisteme tanımlanmıştır. Flac programında kullanılan notasyonlarının klasik van Genuchten notasyonları ile aynı olmadığına ve doğru parametrenin doğru yerde kullanılmasına dikkat edilmelidir.
5. Islatan ve ıslatmayan sıvı yoğunlukları sisteme girilmiştir.
6. Başlangıç doymunluk derecesine karar verilmiş ve sistemi o doymunluğa getirmek için gerekli sızma hızı Denklem 20 kullanılarak hesaplanmıştır. Bulunan bu hız yağmur hızı gibi sisteme girilmiştir.

Buradaki sızma hızı değeri her doygunluk değışimi için tekrar hesaplanmıştır.

7. Hedeflenen doygunluk derecesi sisteme girilmiştir.
8. İstenilen doygunluk derecesindeki negatif boşluk suyu basıncı Denklem 21 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu negatif boşluk suyu basıncı her doygunluk değışimi için tekrar hesaplanmıştır.
9. Yağışın ya da sızmanın uygulanacağı yüzeylerin koordinatları belirlenmiş ve sisteme tanımlanmıştır.
10. Daha sonra istenilen doygunluğa getirmek için uygulanan yağmur hızı ve sisteme uygulanacak olan yağışlar sırayla m/sn cinsinden sisteme tanımlanır.
11. Esas yağışın uygulanacağı koordinatlar sisteme tanımlanır.
12. Bu adımın son aşamasında, sistemin dengeli bir doygunluk dağılımına ulaşması için gerekli olan süre önceden belirlenerek sisteme tanımlanır ve çözüm yaptırılır. Bu adımda göçme hesabı yapılmaz sadece sızma ele alınır.
13. İkinci adımda, dengeye getirilmiş sistem için güvenlik katsayısı hesabı yaptırılır.
14. Üçüncü adımda, modelin en alt katmanlarında su birikiminin oluşması amacıyla akışa izin verilerek girilen süre arttırılarak tekrar hesaplamalar yaptırılır. Bu aşamaya kadar sisteme yağmur uygulanmamış sadece istenilen başlangıç doygunluğuna ulaşmak için girdiğimiz sızma hızı hesaplamalara dahil edilmiştir.
15. Dördüncü aşamada, sistem yine dengeye getirilerek başlangıç doygunluğunda güvenlik katsayısı hesaplamaları yaptırılmıştır. Sızma hesabı ve mekanik hesap aşamalarında parametreler kontrollü olarak takip edilmiş ve yerine göre tekrar tanımlanmıştır.
16. Beşinci aşamada, yağışın etki edeceği yüzeylerin koordinatları sisteme tekrar tanımlanır.
17. Yağışın uygulanacağı süre, saniye cinsinden sisteme tekrar girilir.
18. Altıncı adımda akış tamamlanıp, sistem stabil duruma getirilip güvenlik katsayısı hesaplatılır.

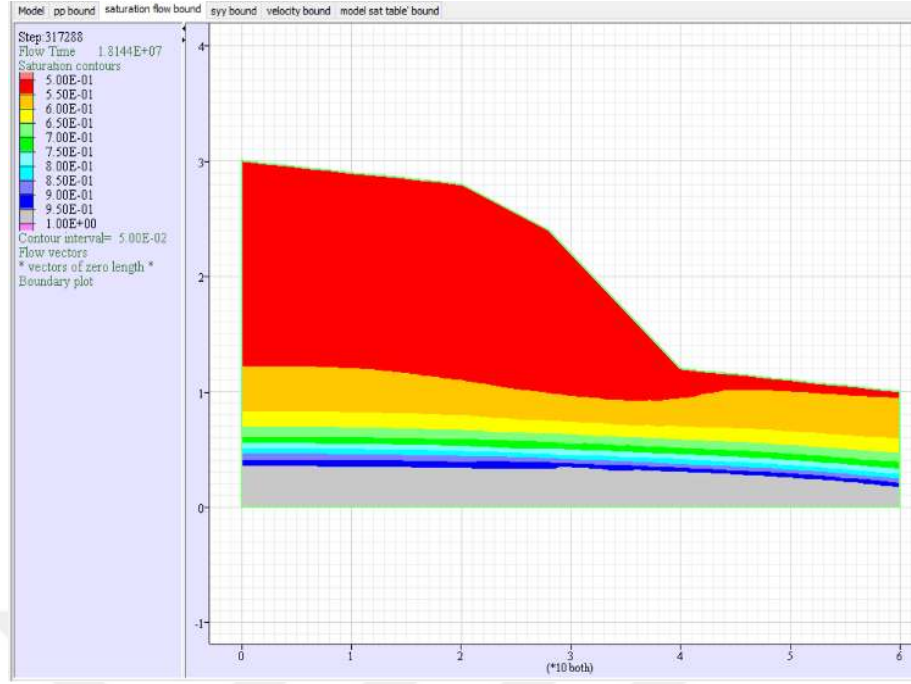
19. 17. Adımda tanımlanan süre sonunda göçme gerçekleşmediyse göçme gerçekleşmediyse, göçme gerçekleşene kadar süre artırılarak analizlere devam edilip göçmenin gerçekleştiği süre not edilir.



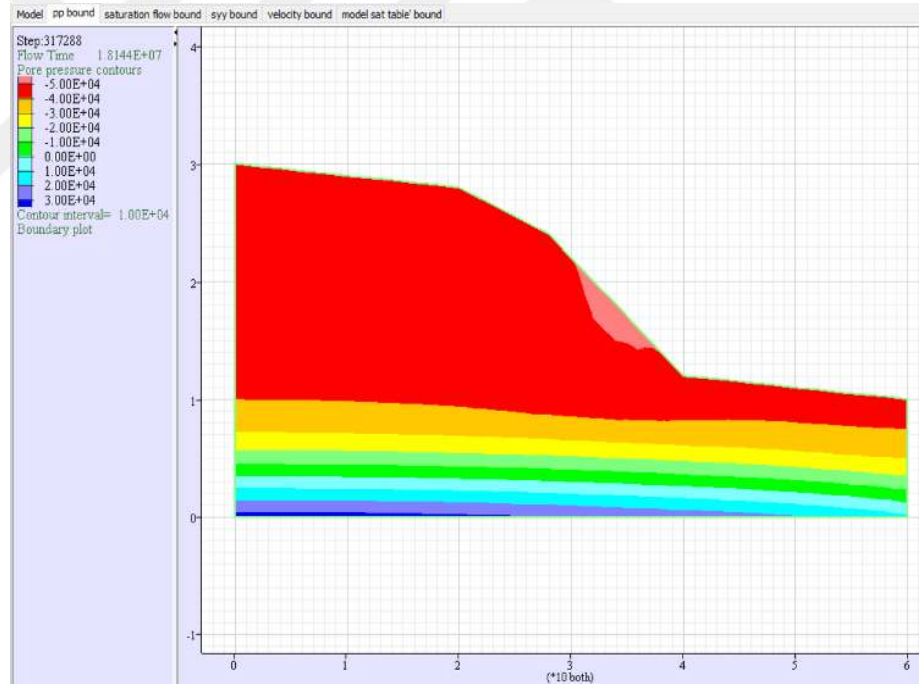
3-ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1 Z1 Zemini Üzerinde Yapılan Analizler

Z1 verilerine bakıldığında, kararlı durum başlangıç doygunluk derecesi %54 olarak belirlenmiş ve Denklem 20 kullanılarak bu doygunluk derecesine ulaşmak için gerekli sızma hızı $3,22E-8$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, bu doygunluk derecesinde, Denklem 21 kullanılarak boşluk suyu basıncı değeri hesaplanmış ve -45000 Pa bulunmuştur. Z1 zemini için suya doymun olmayan koşullarına ait parametreler kullanılarak hesaplanan bu değeri, kontrol amacı ile FLAC örneğinde verilen değeri ile karşılaştırılmış ve aynı sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Ardından bu veriler FLAC programında oluşturulan şev modeline tanımlanmış ve güvenlik katsayısı 1,24 bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan negatif boşluk suyu basıncı dağılımları, renk skalasında kırmızıdan yeşile azalmıştır. Zeminin yüzeyinde istenilen doygunluk derecesi %54 olarak sağlanmış ve yüzeyinden derinlere indikçe zemin doygunluğa daha çok yaklaşmıştır. Yapılan analizler sonrası elde edilen grafiklerin görsellerindeki renk kodlaması, şevdeki farklı doygunluk seviyelerini ve suyun şev içerisindeki dağılımını ifade ediyor. Boşluk suyu basıncı dağılımları ve doygunluk dereceleri Şekil 29 ve Şekil 30’da verilmiştir. Hesaplanarak girilen boşluk suyu basıncına ulaşıldığı da Şekil 30’da görülmektedir. Renk skalasına bakıldığında, zemin yüzeyinde 40000-50000 arasında tanımlanmış negatif basınçların olduğu görülmektedir.



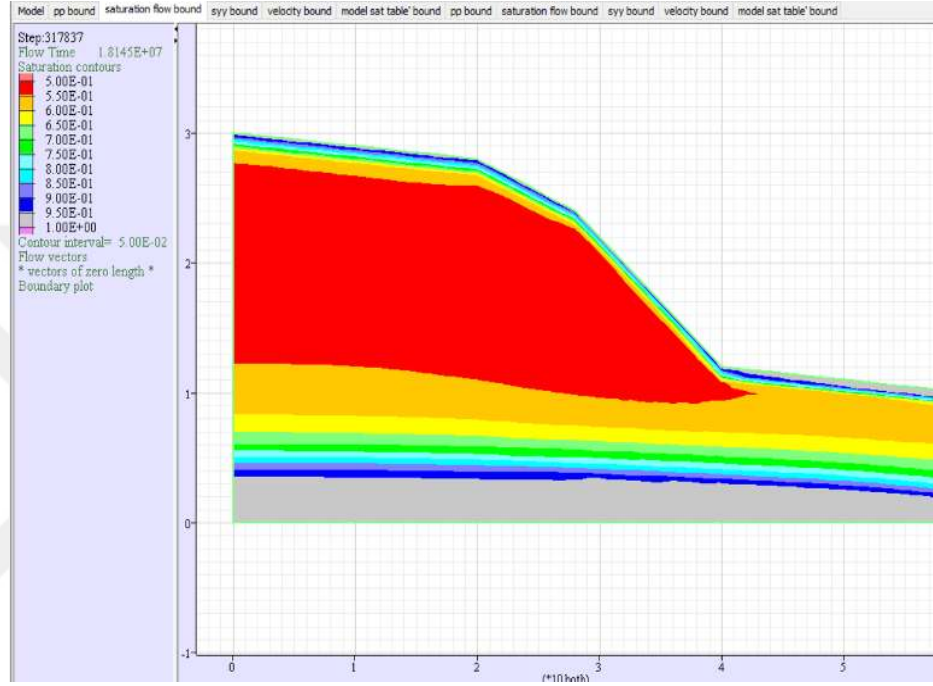
Şekil 29. Z1 için başlangıç doygunluğu dağılımı



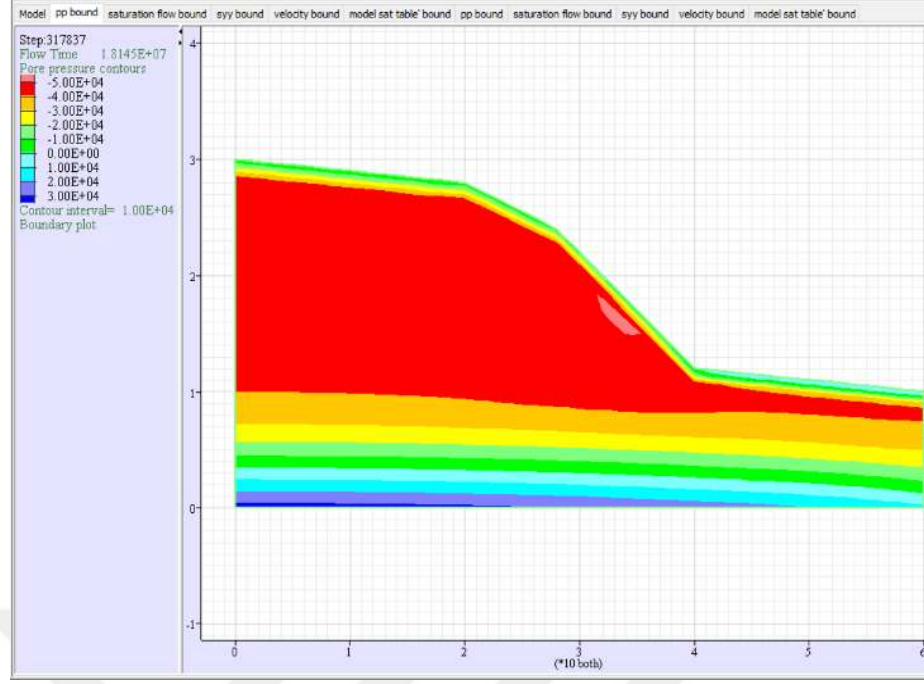
Şekil 30. Z1 için başlangıç boşluk suyu basıncı dağılımı

İlk sızma uygulanıp %54 doygunluk dercesine getirilen sistem kararlı duruma getirilip şev q1 yağışı ($6,94E-7$ m/sn) etki ettirilmiştir. Yağış sonunda şevin güvenlik katsayısı kritik değere ($FOS=1,08$) ulaşmıştır. Doygunluk derecesindeki dağılım, renk skalasından da görülebileceği gibi lacivertten turuncuya, %95 ve %60 arasında değişmiş ve bu değişim yüzeysel kalmıştır. Başlangıç koşulunda suya

doymunluk oranı %54 olan zemin yüzeyi %95 gibi pratik açıdan doymun olarak tanımlanabilecek bir değere ulaşmıştır. Bu değeri göçmenin gerçekleştiği eğimin en yüksek olduğu bölgede de gözlenmiştir. Su, zemin içerisinde derinlere ilerleyememiştir. Boşluk suyu basıncı ise yüzeyde -45 kPa' dan neredeyse sıfıra kadar ulaşmıştır. Boşluk suyu basıncı ve doymunluk derecesindeki değişimler Şekil 31 ve 32'de verilmiştir.

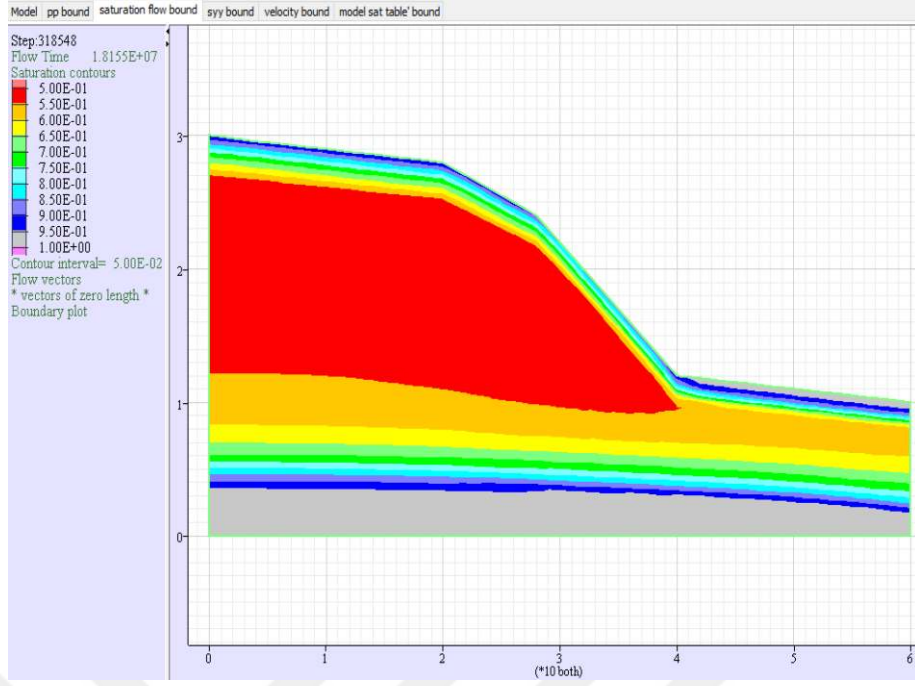


Şekil 31. Z1'de q1 yağışı sonra oluşan göçmeden hemen önceki doymunluk dağılımı

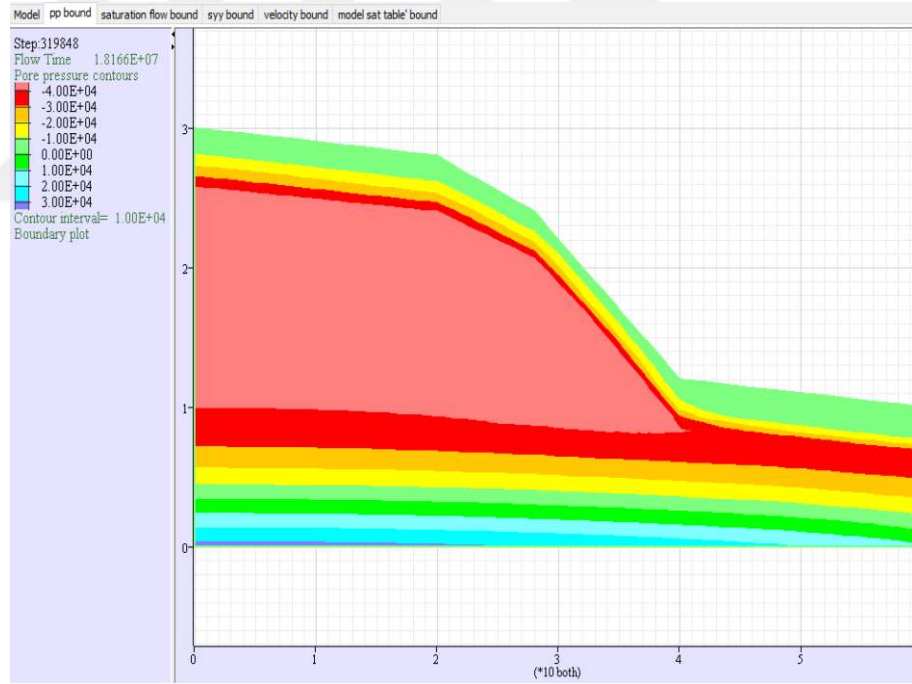


Şekil 32. Z1’de q1 yağışından sonra oluşan göçmeden hemen önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluğa ulaşmış kararlı durumdaki Z1 zeminine q2 yağışı uygulanmış ve yağış süresi sonunda şevin stabilitesini koruyamadığı görülmüştür. Şevin stabilitesini yağışın 3. saatinde kaybettiği hesaplanmıştır. Gerçek koşullarda yağış süresinin 24 saat olarak verildiği göz önüne alınırsa Z1 zemini için yağış bitmeden göçmenin gerçekleşeceği belirlenmiştir. Yağış sonunda oluşan negatif boşluk suyu basıncı (NBSB) grafiğine baktığımızda, NBSB’nin yüzeyde sıfırlanırken derinlere inildikçe hala etkisini sürdürdüğü görülmektedir. Doygunluk derecesi dağılımının ise %54 ve %100 arasında değiştiğini renk skalasından anlamaktayız. Yine doygunluk derecesindeki değişim yüzeyde değişkenlik gösterirken, suyun zemin içerisinde derinlere ulaşamamasından derinlerdeki değişim sabit kalmıştır. Göçmenin gerçekleştiği eğimli bölgede ise en yüksek %80 suya doygunluk oranı izlenmiştir. Doygunluk dağılımları ve boşluk suyu basıncı değişimleri Şekil 33 ve 34’te gösterilmiştir.



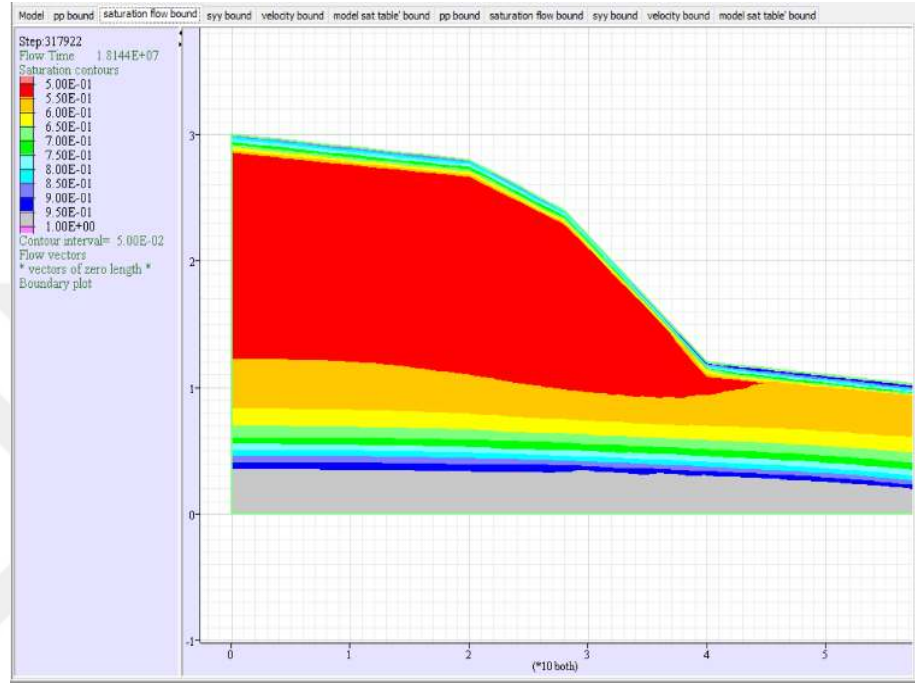
Şekil 33. Z1’de q2 yağışından sonra oluşan göçmeden hemen önceki doygunluk dağılımı



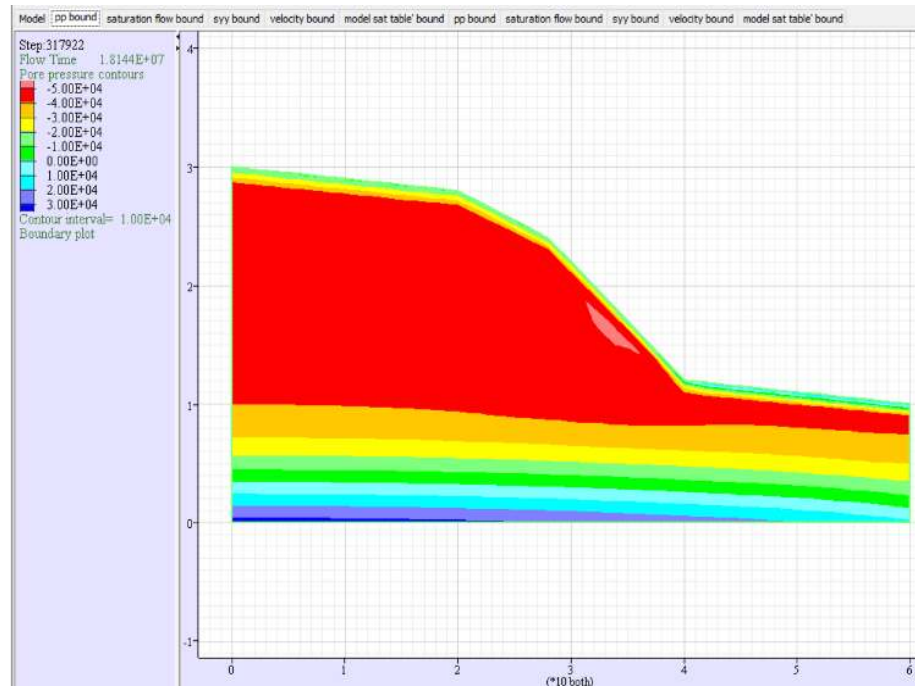
Şekil 2. Z1’de q2 yağışından sonra oluşan yıkılmadan hemen önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

Aynı başlangıç koşullarında q3 yağışı etki ettirildiğinde ise şevin stabilitesini 7. dakikada kaybettiği belirlenmiştir. Yağışın gerçek süresinin 15 dakika olarak kayıtlara geçtiği düşünüldüğünde yine bir önceki yağış (q2) gibi yağış bitmeden göçmenin gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Doygunluk derecesindeki dağılımlara baktığımızda %95 ve %60 arasında değiştiği fakat değişimin q1 ve q2 yağışlarına

kıyasla çok daha yüzeysel kaldığı görülmüştür. Göçmenin gerçekleştiği bölgede ise suya doygunluk derecesi %80 mertebesinde kalmıştır. NBSB dağılımları yine yüzeyde sıfıra yaklaşırken zemin derinliklerine doğru NBSB etkileri hala görülmektedir. Göçmeden hemen önceki dağılım grafikleri Şekil 35 ve 36'da gösterilmiştir.



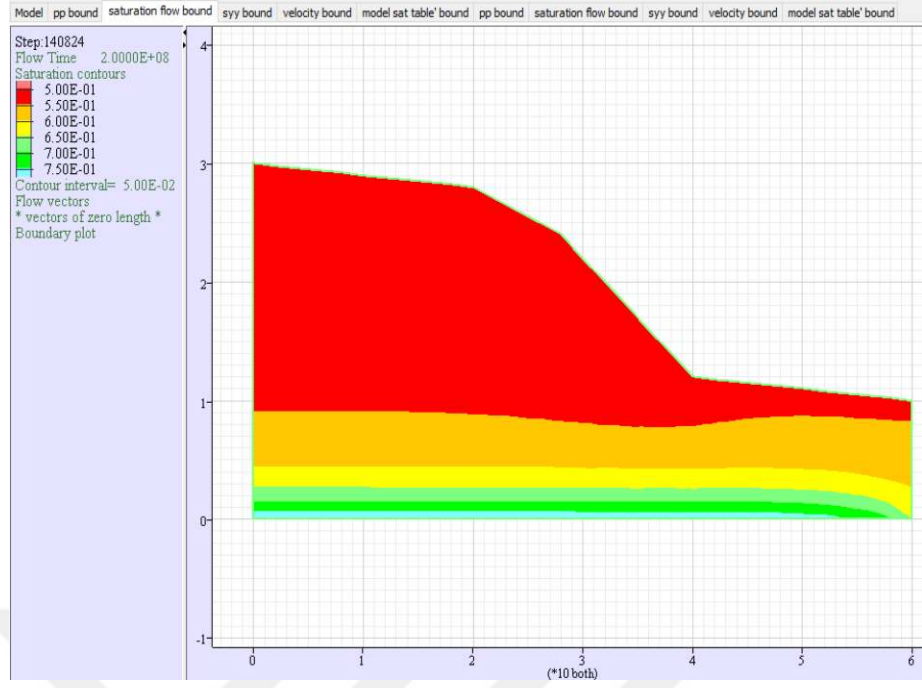
Şekil 353. Z1'de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı



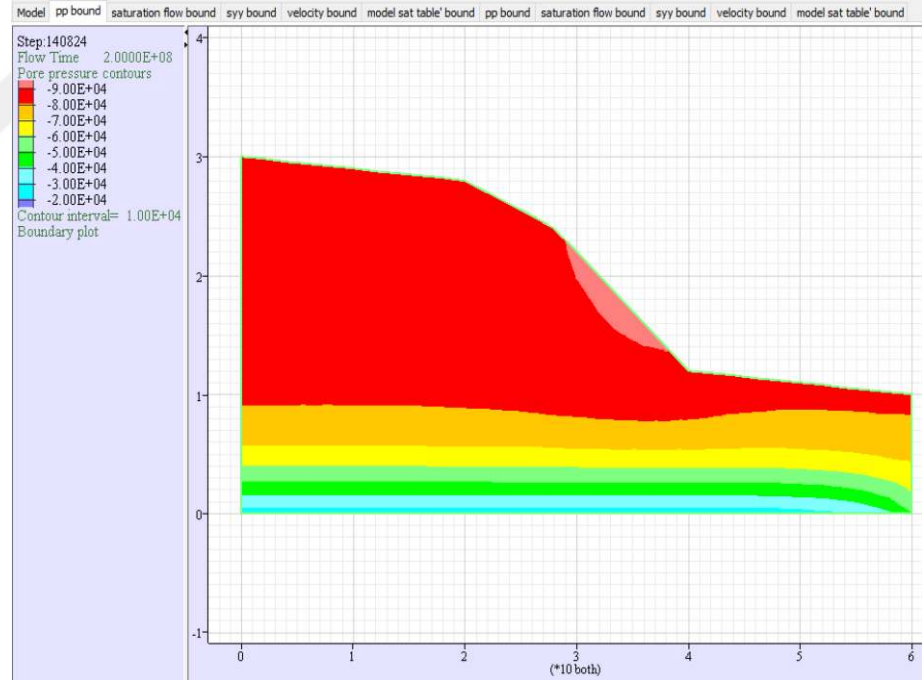
Şekil 36. Z1'de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı

3.2 Z2 Örneği Üzerinde Yapılan Analizler

Z1 zemininde kararlı durum başlangıç doygunluk derecesi %54 olarak belirlemiş olup, gerekli karşılaştırmaları yapabilmek adına Z2 zemininde de aynı doygunluk derecesinde olması tercih edilmiştir. Z2 zemininde istenilen doygunluk derecesine ulaşmak için gerekli olan sızma hızı Denklem 20 Kullanılarak $1,755E-9$ m/sn olarak hesaplanmış ve sisteme tanımlanmıştır. Ayrıca, bu doygunluk derecesine karşılık gelen boşluk basıncı değeri Denklem 21 kullanılarak hesaplanmış ve -83947 Pa bulunmuştur. Bu veriler FLAC programında oluşturduğumuz şev modeline tanımlanmış ve güvenlik katsayısı 1,65 olarak hesaplanmıştır. Şekil 37 ve 38’de sunulan görsellerdeki renk skalası, şevdeki farklı doygunluk seviyelerini ve suyun şev içerisindeki dağılımını ifade etmektedir. Analiz sonucunda oluşan NBSB, -90 kPa’dan başlayarak renk skalasından da görüleceği üzere azalmaktadır. Başlangıç doygunluk derecesi dağılımı ise yüzeyi kapsayacak şekilde %54 olarak okunmaktadır. Böylelikle, hedeflenen doygunluk ve boşluk basıncı değerlerinin, hesaplanıp sisteme girilen veriler sayesinde doğru olarak elde edilmiş olduğu şekil üzerinden görülmektedir. Kaymanın beklendiği bölgede istenilen değerlere ulaşıldığı için analizlerin daha kısa sürmesi (analiz süresi kısaltılmıştır) adına en altlarda sızmanın birikerek %100 doygunluğa ulaşması beklenmemiştir. Doygunluk dereceleri ve NBSB dağılımları sırası ile Şekil 37 ve Şekil 38’de gösterilmiştir.



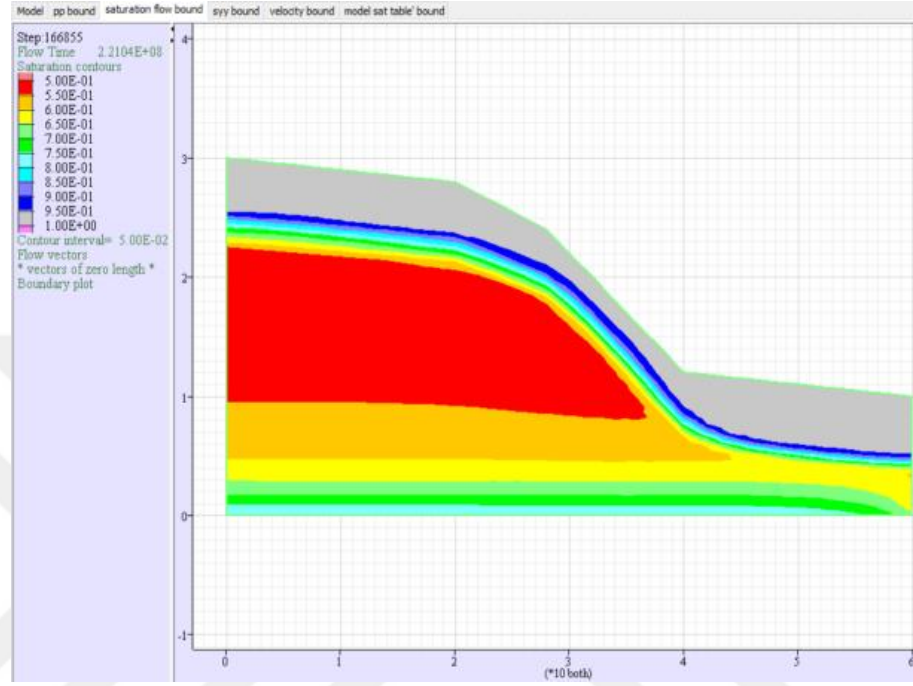
Şekil 37. Z2 için başlangıç doygunluğu dağılımı



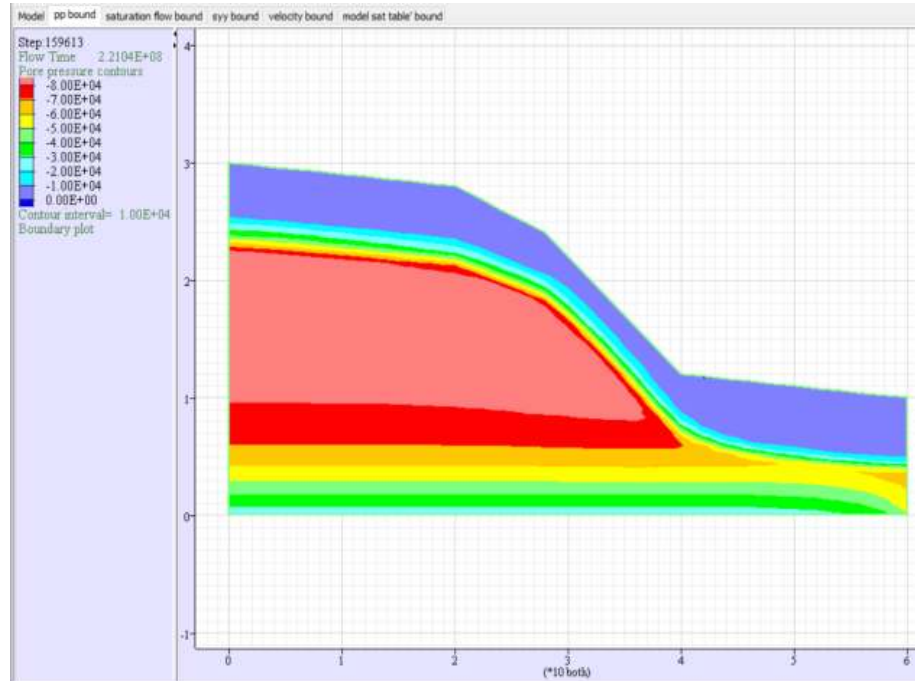
Şekil 38. Z2 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluk derecesinde kararlı durumda olan Z2'ye q1 yağışı etki ettirilmiş ve 48 saat sunucunda şevin stabilitesini korumaya devam ettiği görülmüştür. q1 yağışı sonrasında şevin güvenlik katsayısı 1,59 olarak hesaplanmıştır. Şevde göçme olması için bu yağışın en az 13 gün sürmesi gerektiği

hesaplanmıştır. q1 yağışı sonrasında zemin göçene kadarki sürede, zeminin doygunluk derecesi dağılımı %55 ve %100 arasında değişmiştir. NBSB ise zemin profilinin üst kısmında sıfırlanmıştır. Göçme anındaki doygunluk derecesi ve boşluk suyu basıncı dağılımları Şekil 39 ve Şekil 40'ta verilmiştir.

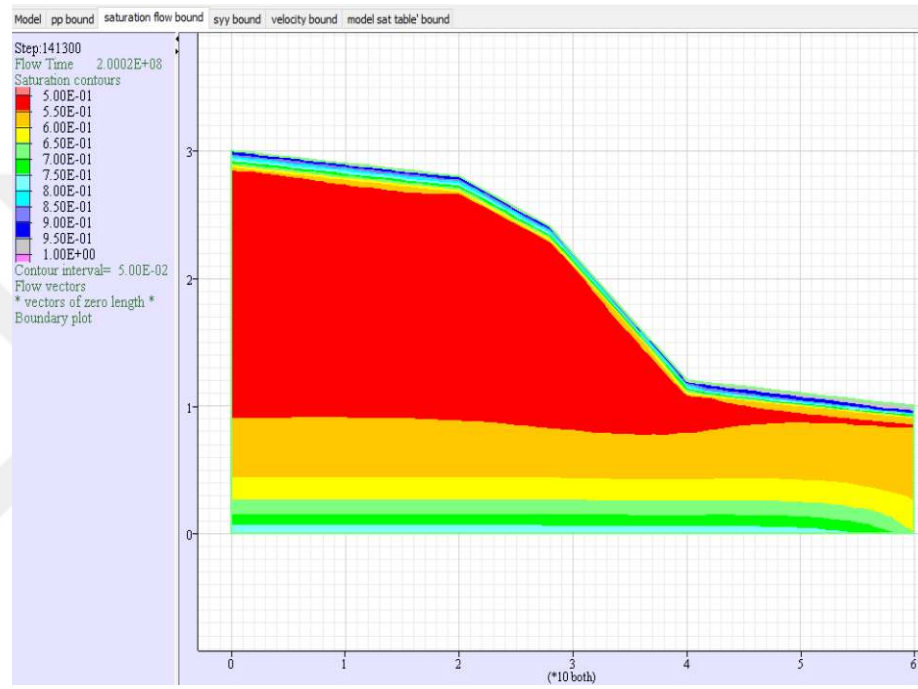


Şekil 39. Z2'de q1 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı

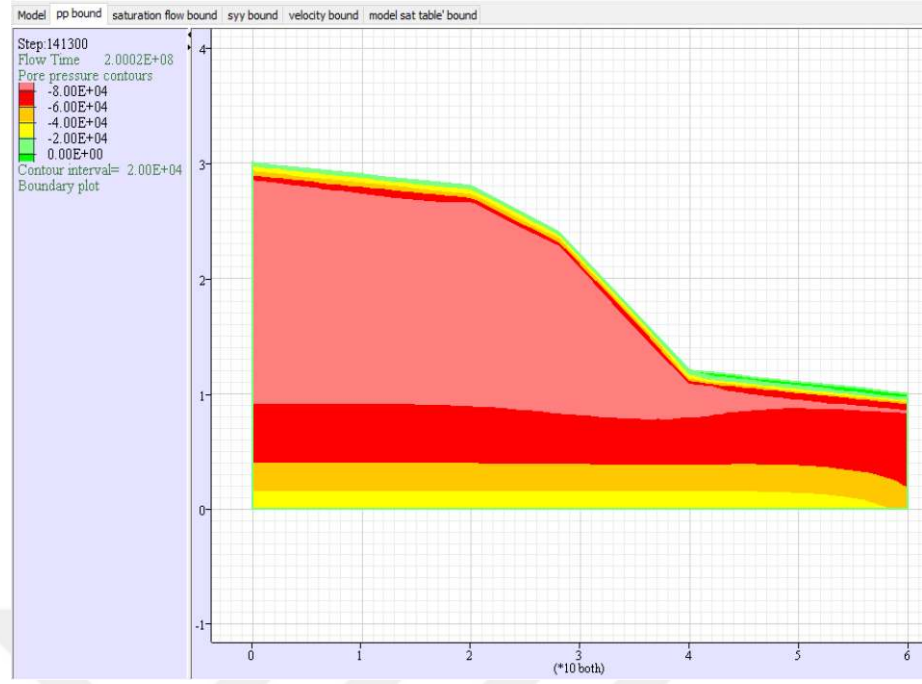


Şekil 40. Z2'de q1 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluk derecesinde olan Z2 zeminine q2 yağışı etki ettirilmiş ve gerçek yağış süresi olan 24 saat sunucunda şevin stabilitesini koruyamadığı ve 6. saatte göçtüğü görülmüştür. Doygunluk derecesinde dağılım q1 yağışına kıyasla daha yüzeysel olurken, %65 ve %95 arasında değişmiştir. NBSB yine yüzeyde çok ince bir tabakada sıfırlanırken, 28. Metreden sonra etkisini devam ettirmektedir. Göçmeden hemen önceki boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları şekil 41 ve 42’de verilmiştir.

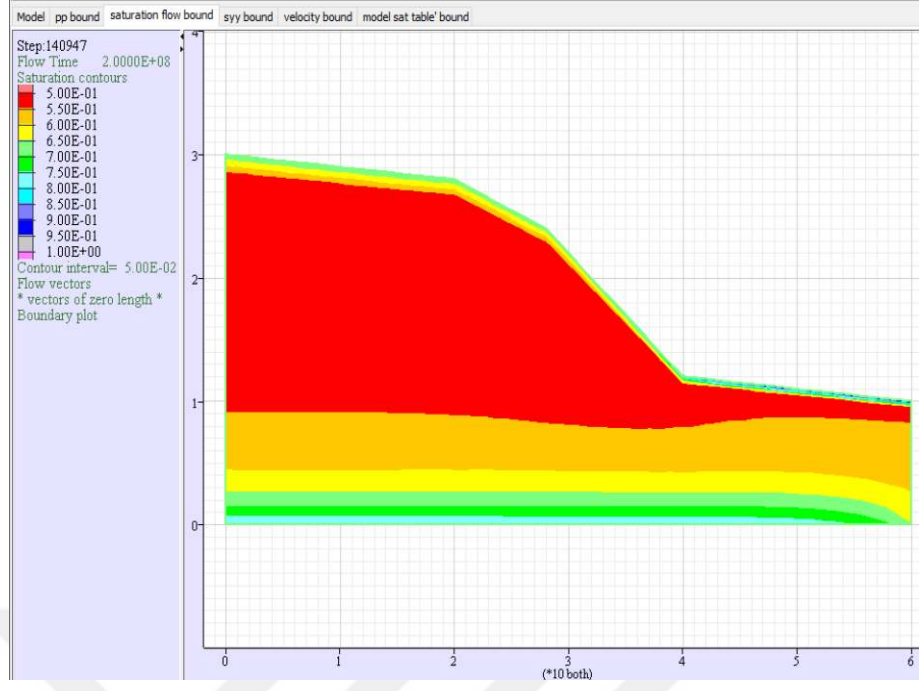


Şekil 41. Z2’de q2 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı

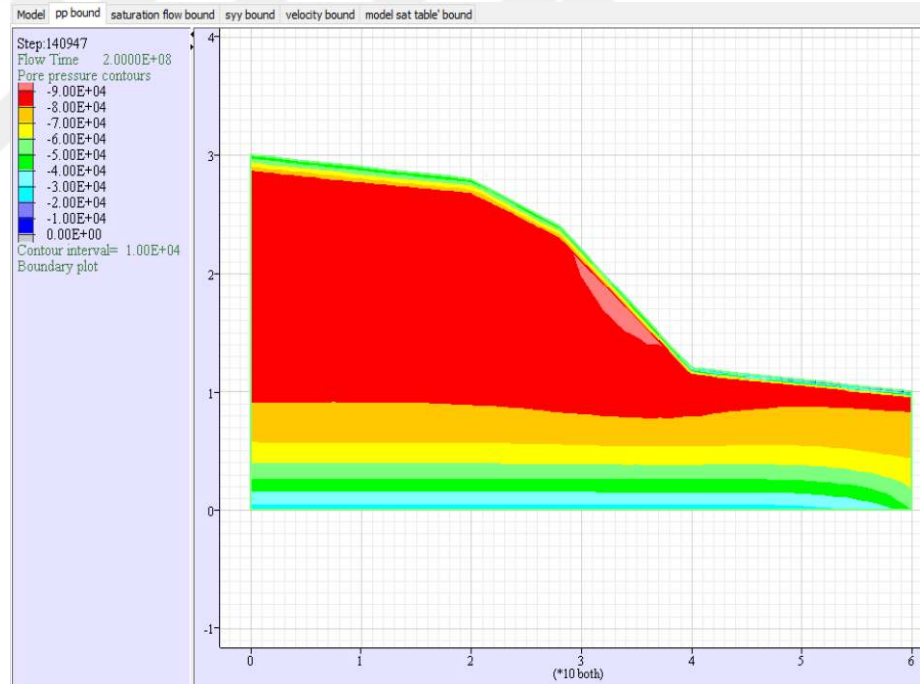


Şekil 42. Z2’de q2 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluk derecesinde olan Z2 zeminine q3 yağışı etki ettirilmiş ve gerçek yağış süresi olan 15 dakika sonunda şevin stabilitesini koruduğu görülmüştür. Şevde göçme meydana gelmesi için ise yağışın 25 dakika boyunca yağmaya devam etmesi gerektiği hesaplanmıştır. Zemin profilinde doygunluk derecesi dağılımı 28 metreye kadar %70 ve %60 arasında değişmiştir. NBSB ise, yine aynı derinliğe kadar -50kPa ile -70kPa arasında değişmiştir. Göçmeden hemen önceki boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları şekil 43 ve 44’te verilmiştir.



Şekil 43. Z2’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan doygunluk dağılımı

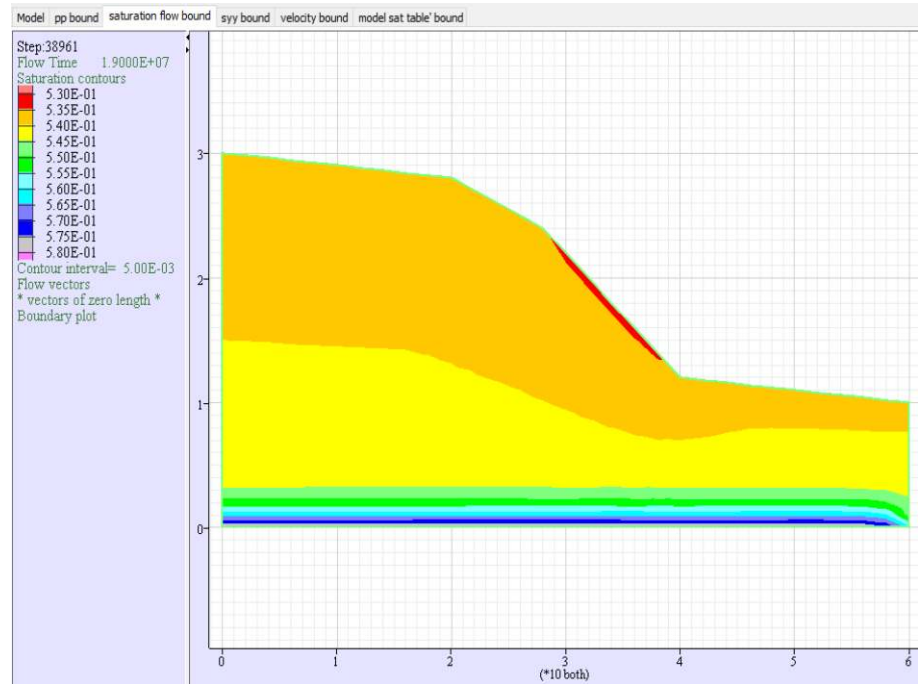


Şekil 44. Z2’de q3 yağışından dolayı göçmeden hemen önce oluşan boşluk suyu basıncı dağılımı

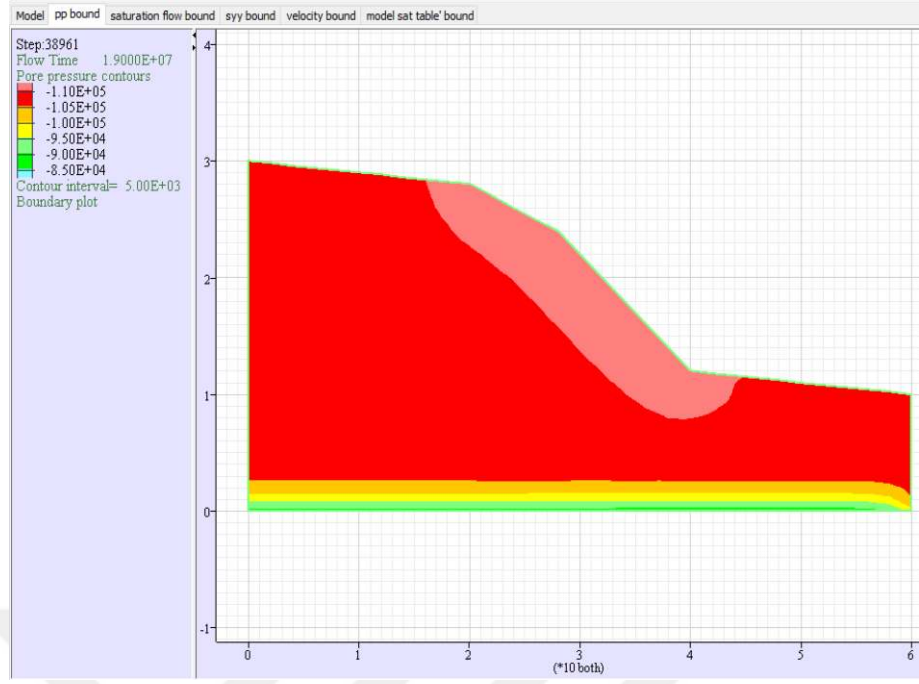
3.3 Z3 Örneği Üzerinde Yapılan Analizler

3.3.1 Z3 Örneği %54 Başlangıç Doygunluk Derecesi (Z3%54)

Yapılan analizlerde başlangıç doygunluk derecesi %54 olarak belirlemiş olup, gerekli karşılaştırmaları yapabilmek adına diğer zemin çeşitlerinde olduğu gibi Z3 zemininde de aynı doygunluk derecesinde olması hedeflenmiştir. Z3 zemininde istenilen doygunluk derecesine ulaşmak için gerekli olan sızma hızı Denklem 20 kullanılarak $4,6E-9$ m/sn olarak hesaplanmış ve sisteme tanımlanmıştır. Ayrıca, bu doygunluk derecesinde, denklem 21 kullanılarak boşluk basıncı değeri hesaplanmış ve -109880 Pa bulunmuştur. Bu veriler FLAC programında oluşturulan şev modeline tanımlanmış ve sonucunda güvenlik katsayısı 2,36 olarak bulunmuştur. Oluşturulan şev modellerine baktığımızda şev yüzeyinin istenilen doygunlukta ve NBSB dağılımlarının yapılan hesaplamalarla uyuştuğunu görmekteyiz. NBSB -110 kPa ve -105 kPa arasında değişirken, şey yüzeyindeki doygunluk dağılımı %54 olarak görülmektedir. Yine analiz süresindeki pratikliği kullanabilmek adına, bu modelde de göçme bölgesinde elde edilen hedef değerler ile daha az süre kullanarak devam edilmiştir. Analiz sonucunda oluşan boşluk suyu basıncı ve doygunluk dereceleri Şekil 45 ve Şekil 46'da verilmiştir.

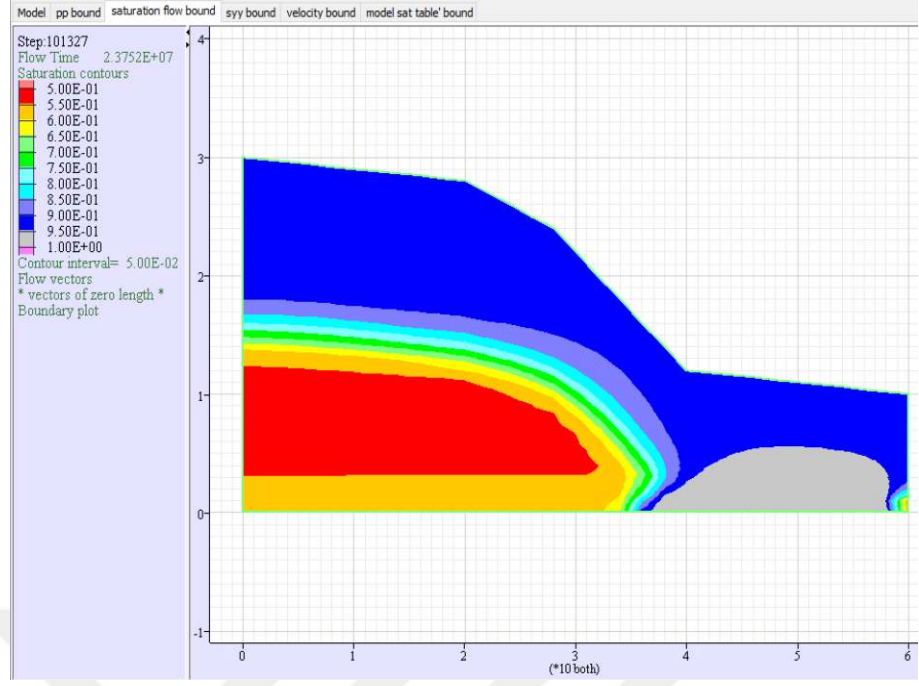


Şekil 45. Z3%54 için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı

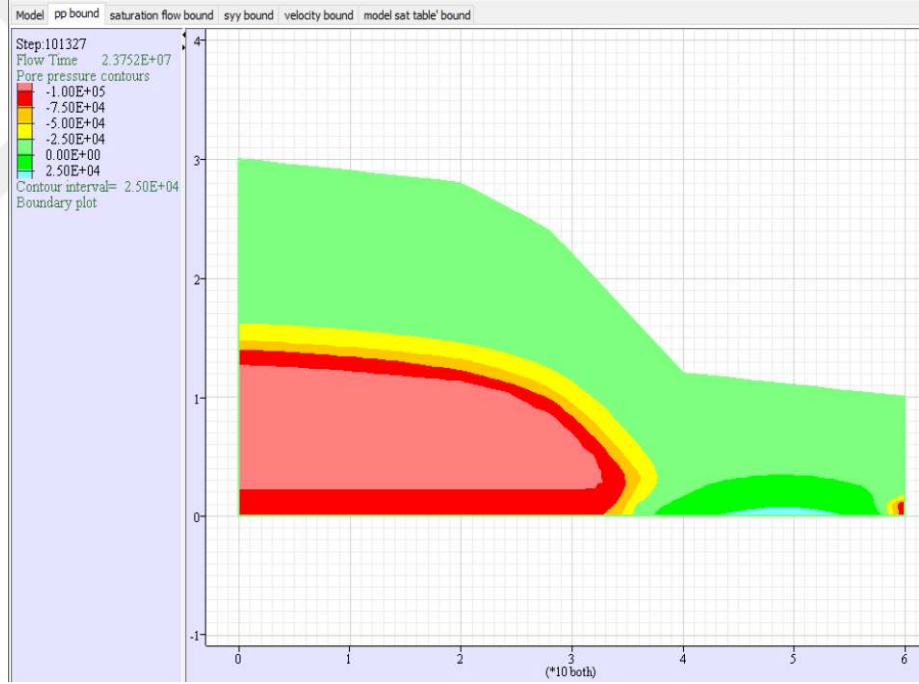


Şekil 464. Z3%54 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı

Kararlı durumdaki Z3 zeminine q1 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda şevin göçmediği ve güvenlik katsayısı değerinin 2,29 çıktığı görülmüştür. Şevde göçmenin gerçekleşmesi için gerekli olan yağış süresi 55 gün olarak hesaplanmıştır. Göçmeden önceki boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları Şekil 47 ve 48’de verilmiş olup, q1 yağışıyla birlikte suyun zemin içerisinde iyice alt katmanlara ulaştığını, doygunluk derecesi dağılımının diğer modellere göre daha dengeli olduğunu ve doygunluk derecesi değişiminin gerçekleştiği derinliğin daha derinlere ulaştığı görülmektedir. Yine NBSB, yüzeyde sıfırlandığı ve bu tabakanın oluşturulan diğer modellere göre en fazla derinliğe sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber, pratik açıdan q1 yağışının 55 gün sürmeyeceği ve bu yağış analizinin gerçek koşullardan oldukça uzak bir duruma sahip olduğu da belirtilmelidir. Yine de göçme anındaki koşulları görmek açısından analiz süresi bu mertebeye kadar uzatılmıştır. Yaklaşık ilk 14m’de NBSB sıfırlanırken, daha derin katmanlarda etkisini sürdürmektedir.



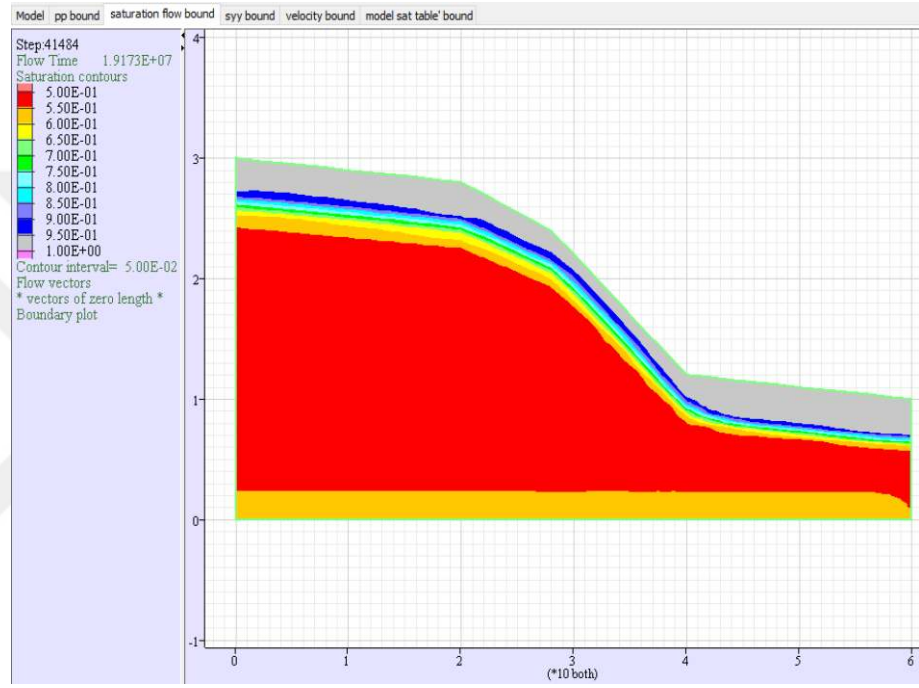
Şekil 47. Z3%54 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı



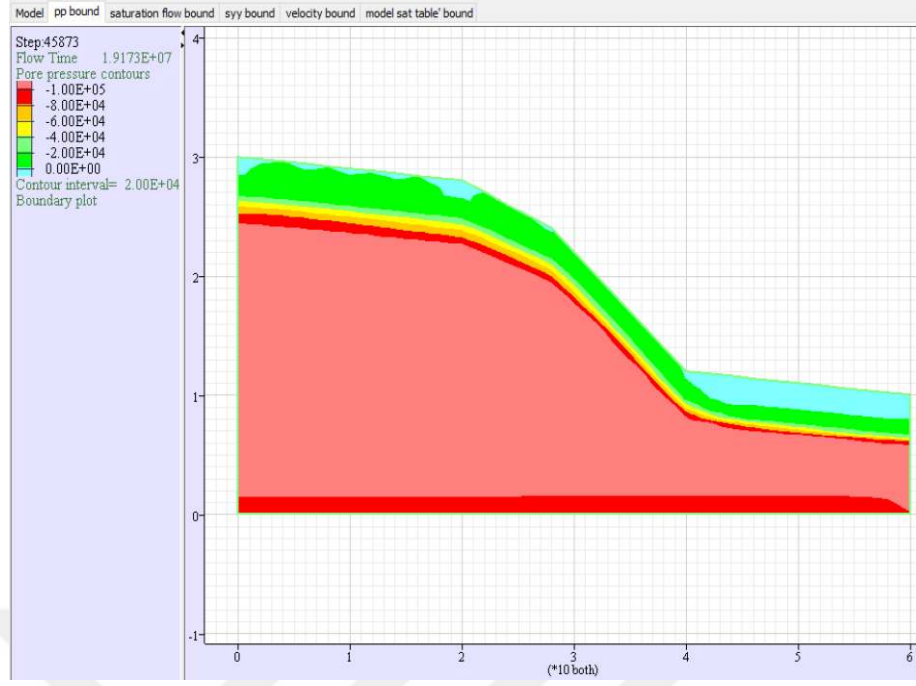
Şekil 485. Z3(hadong%54) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluk derecesine sahip kararlı durumdaki Z3 zeminine q2 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı değerinin 2,10 çıktığı görülmüştür. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q2 yağışının 48 saat yağması gerektiği hesaplanmıştır. Bu durum da gerçekçi olmaktan uzak olduğu için Z3 zemininde q2 yağış koşullarında göçmenin beklenen şartlar altında

gerçekleşmeyeceği söylenebilmektedir. q2 yağışının yoğunluğu ve göçme için gereken süre kısaldığı için doygunluk derecesi dağılımı grafiğinde görüldüğü üzere su alt katmanlara ulaşmakta zorluk yaşamış ve q1 yağışına kıyasla doygunluk dağılımındaki değişim daha yüzeysel kalmıştır. Doygunluk derecesindeki değişim ilk 5 m’de %100 ve %60 arasında değişmiştir. NBSB dağılımında ise, yüzeyde NBSB sıfırlanmış fakat sıfırlanan zemin tabakasının kalınlığı q1 yağışına göre yine azalmıştır. Göçmeden önceki dağılımlar Şekil 49 ve 50’de verilmiştir.

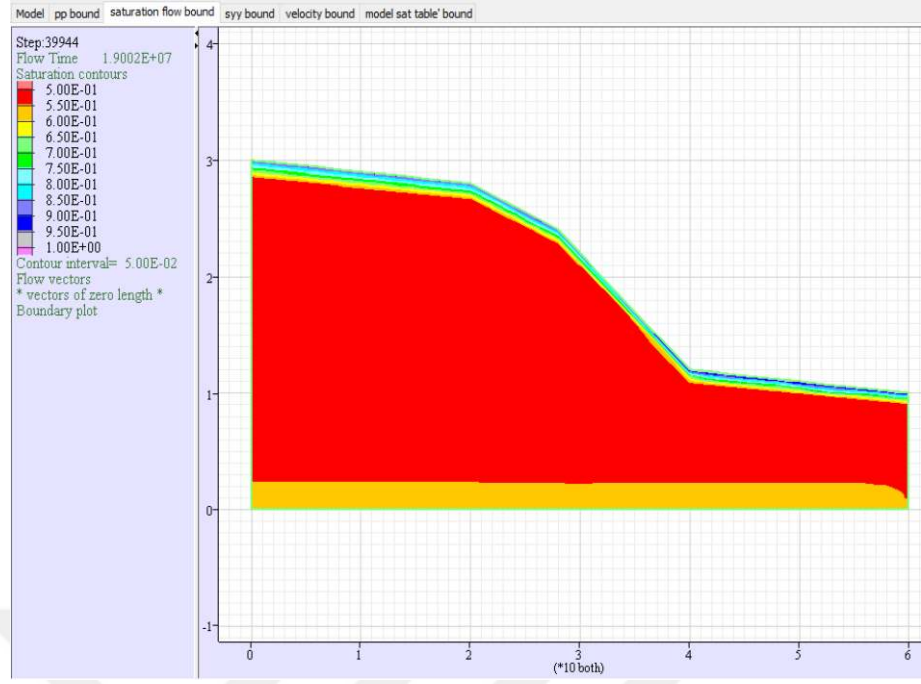


Şekil 49. Z3 %54 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

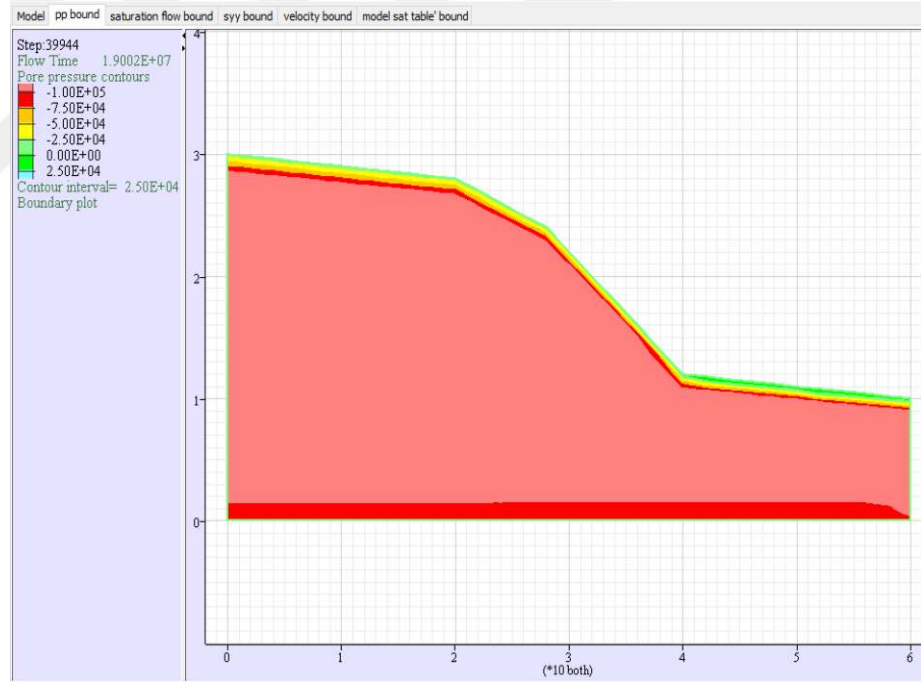


Şekil 50. Z3 %54 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

%54 doygunluk derecesinde olan kararlı durumdaki Z3 zeminine q3 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı değerinin 2,33 çıktığı görülmüştür. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q3 yağışının 35 dakika yağması gerektiği hesaplanmıştır. Gerçek yağış süresinin 15 dakika olduğu düşünülürse göçme için gerekli olan 35 dakikalık sürenin gerçekleşme olasılığının düşüklüğü de göz önüne alınırsa yine Z3 zemininde q3 yağışı için beklenen şartlarda göçmenin gerçekleşmeyeceği söylenebilir. Göçmeden önceki dağılımlar Şekil 51 ve 52’de verilmiştir. Doygunluk derecesindeki dağılım yüzeyde iyice incelerken yaklaşık 1,5m derinliğe kadar %100 ve %65 arasında değişmiş olup eğimin en yüksek olduğu bölgede %95 civarında belirlenmiştir. NBSB yüzeyde yaklaşık 0,5m’lik derinlikte tamamen etkisini kaybederek 0 kPa’a ulaşmıştır. Derinlerde etkisini korumaya devam etmektedir.



Şekil 51. Z3 %54 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

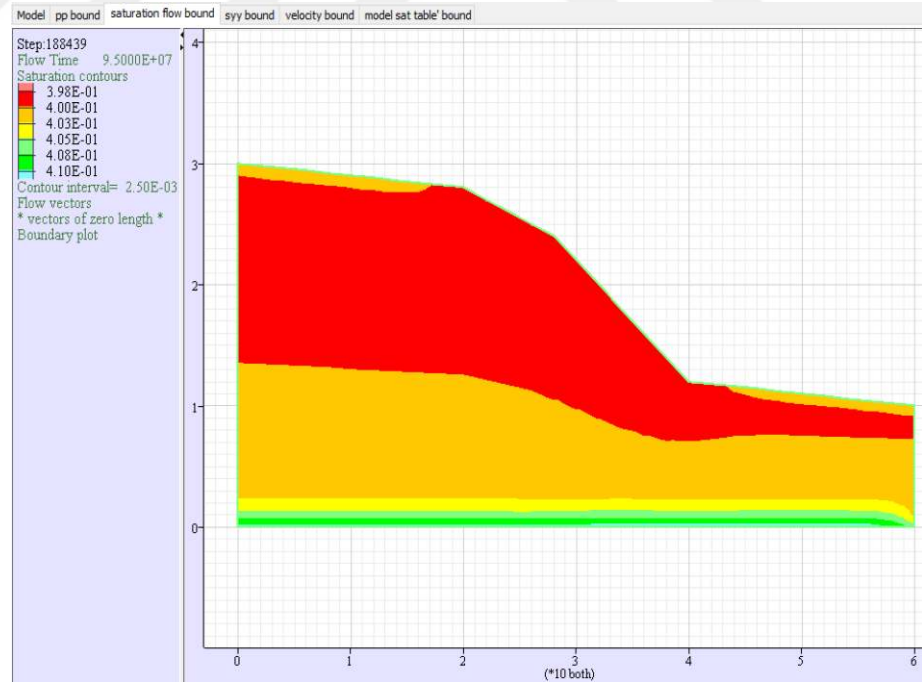


Şekil 52. Z3%54 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

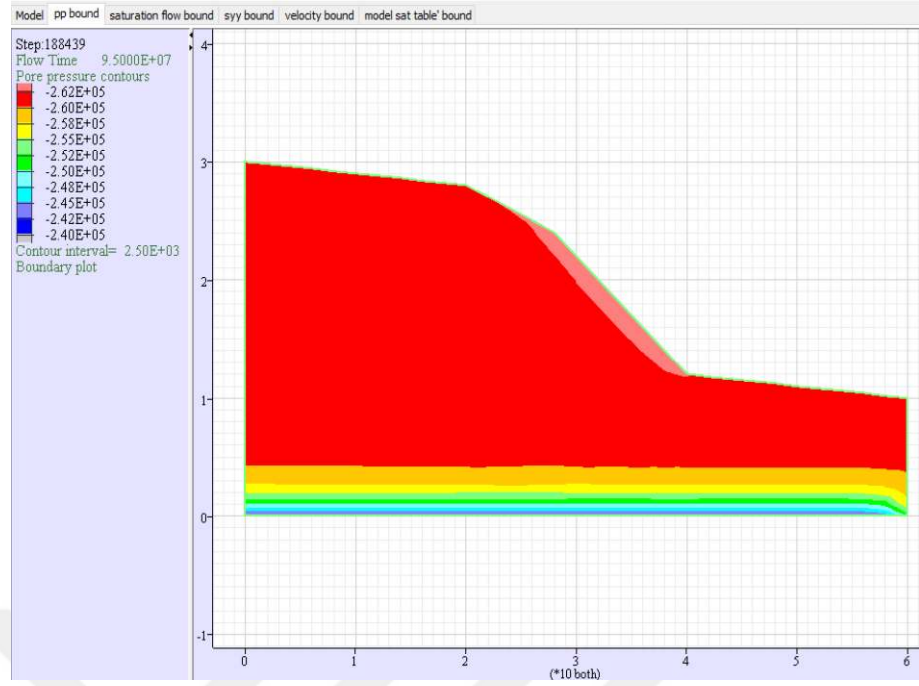
3.3.2 Z3 Zemini %40 Başlangıç Doygunluk Derecesi

Daha önce yapılan analizlerde farklı zemin çeşitleri arasında karşılaştırmaların yapılabilmesi için başlangıç doygunluk derecesi %54 olarak belirlenmiş ve analizler bu doygunluk derecesine göre yapılmıştır. Ayrıca aynı zemin türü içinde farklı doygunluk derecelerinde şev davranışlarının karşılaştırılmasının yapılabilmesi için Z3 zemininde %40 ve %50 doygunluk dereceleri oluşturulmuş ve aynı analizler tekrar yapılmıştır.

Z3 zemininde %40 doygunluk derecesine ulaşmak için gerekli olan yağmur hızı Denklem 20 kullanılarak $4,73E-10$ m/sn olarak hesaplanmış ve sisteme tanımlanmıştır. Ayrıca, bu doygunluk derecesinde, Denklem 21 kullanılarak boşluk basıncı değeri hesaplanmış ve -260903 Pa bulunmuştur. Bu veriler FLAC programında oluşturduğumuz şev modeline tanımlanmış ve güvenlik katsayısı 3,28 olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan boşluk suyu basıncı ve doygunluk dereceleri Şekil 53 ve 54'te verilmiştir. Görseldeki renk kodlamaları, şevdeki farklı doygunluk seviyelerini ve suyun şev içerisindeki dağılımını ifade etmektedir.

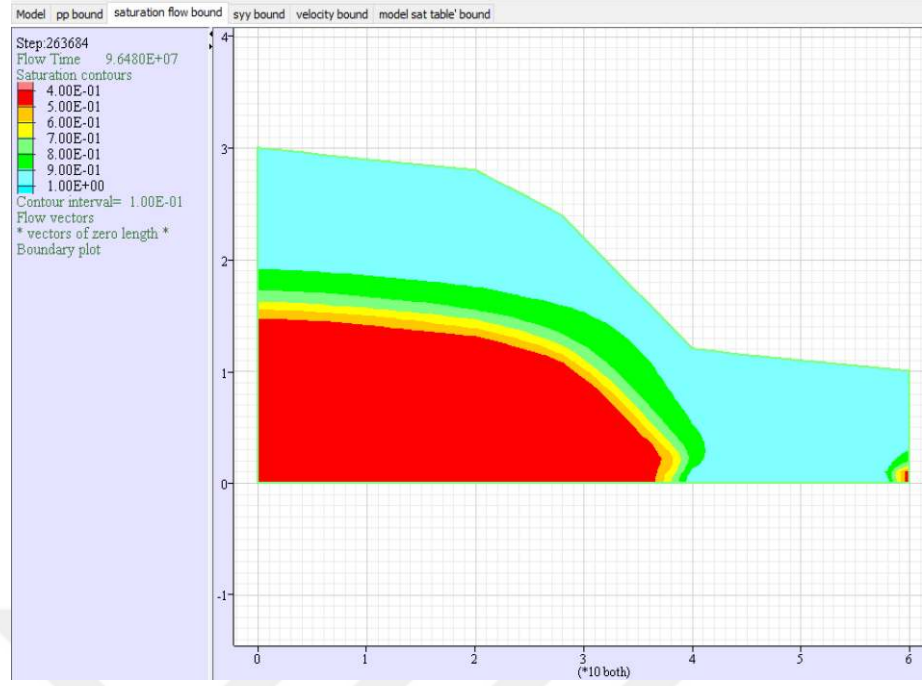


Şekil 53. Z3(hadong%40) için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı

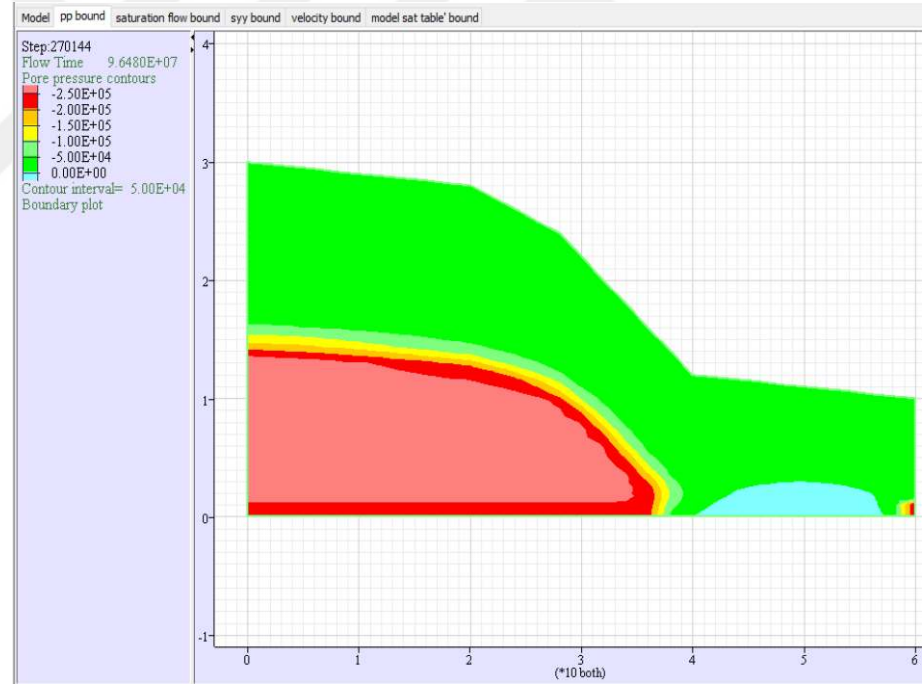


Şekil 54. Z3(hadong%40) için başlangıç kararlı durum boşluk basıncı dağılımı

%40 doygunluk derecesinde kararlı durumdaki Z3 zeminine q1 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı değerinin 3,2 çıktığı görülmüştür. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q1 yağışının 75 gün devam etmesi gerektiği hesaplanmıştır. Göçmeden önceki dağılımlar Şekil 55 ve 56'da verilmiştir. Doygunluk derecesi dağılım grafiğinde açık maviyle ifade edilen katman göçme anından hemen önce %100 doygunluğa ulaşmıştır. Su zemin içinde derinlere ilerleyebilmiş fakat zeminin derinliklerine doğru doygunluğun azaldığı görülmektedir. NBSB dağılımına bakıldığında, yaklaşık 15m'ye kadar NBSB sönümlenmiş daha alt kısımlarda ise -25kPa değerine ulaşmıştır.



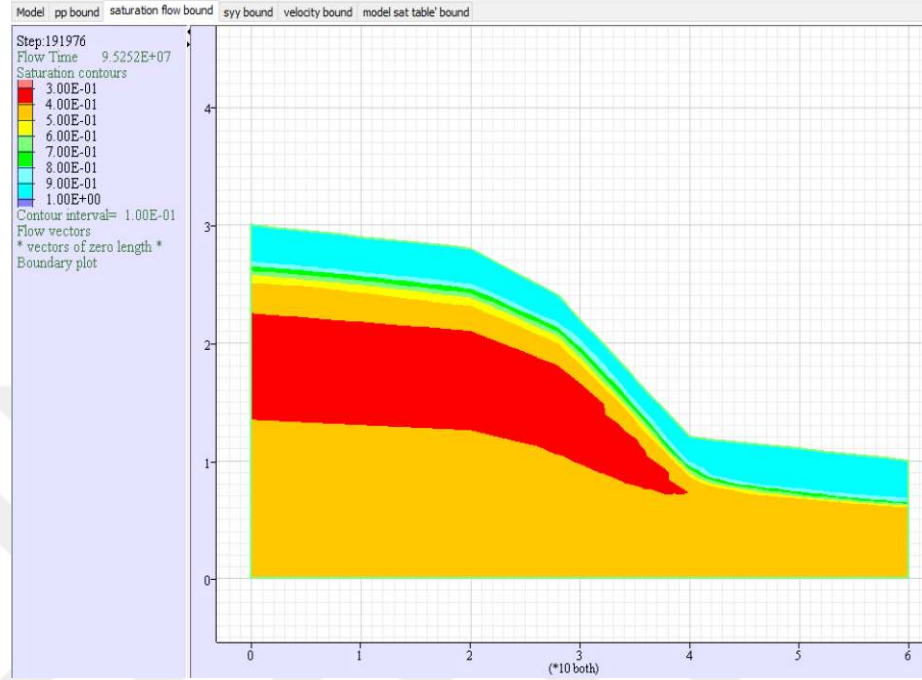
Şekil 55. Z3(hadong%40) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı



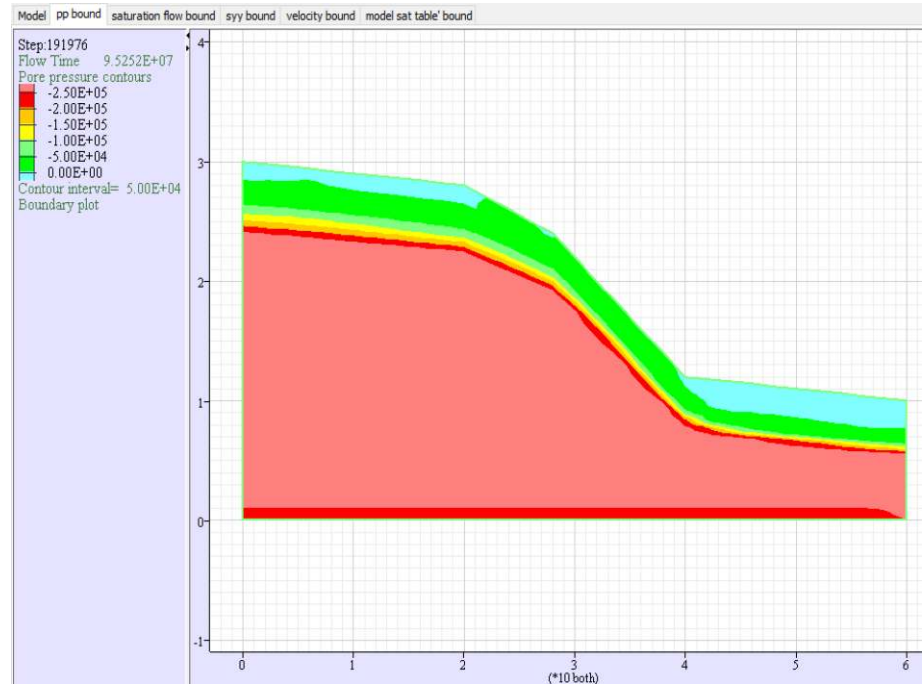
Şekil 56. Z3 %40 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

%40 doygunluk derecesinde kararlı durumdaki Z3 zeminine q2 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı değerinin 3,00 çıktığı görülmüştür. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q2 yağışının 71 saat devam etmesi gerektiği hesaplanmıştır. Göçmeden önceki dağılımlar Şekil 57 ve 58’de verilmiştir. Doygunluk derecesi dağılım grafiklerine bakıldığında,

doğunluğun ilk 3 m'de %100e ulaştığı sonrasında kademe kademe %40'a kadar düştüğü görülmektedir. NBSB yüzeyden 4m derinliğe kadar etkisini kaybederken, zeminin derinliklerinde etkisini hala devam ettirdiği görülmektedir.

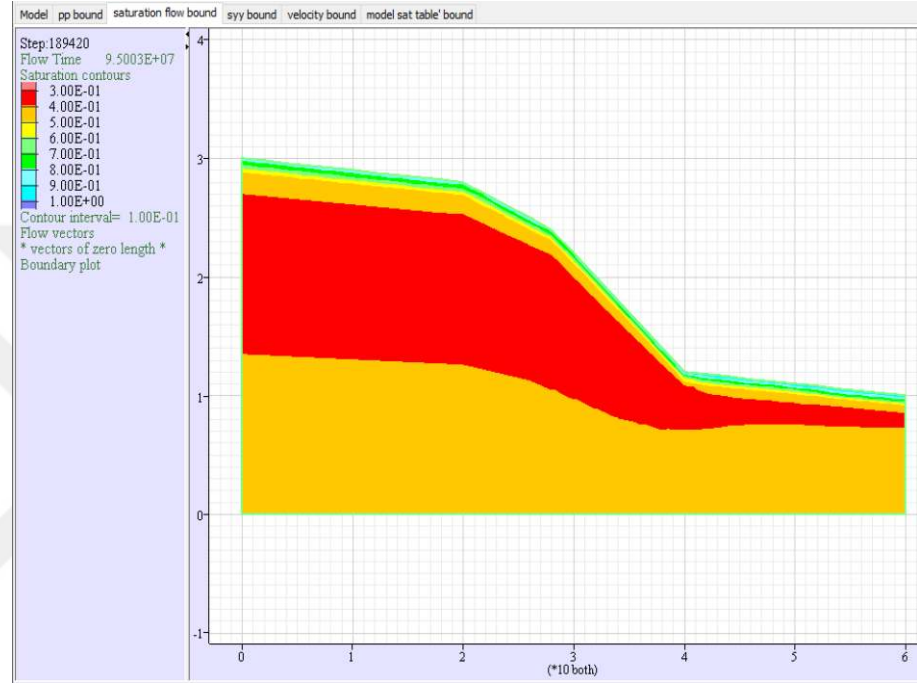


Şekil 57. Z3 %40 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doğunluk derecesi dağılımı

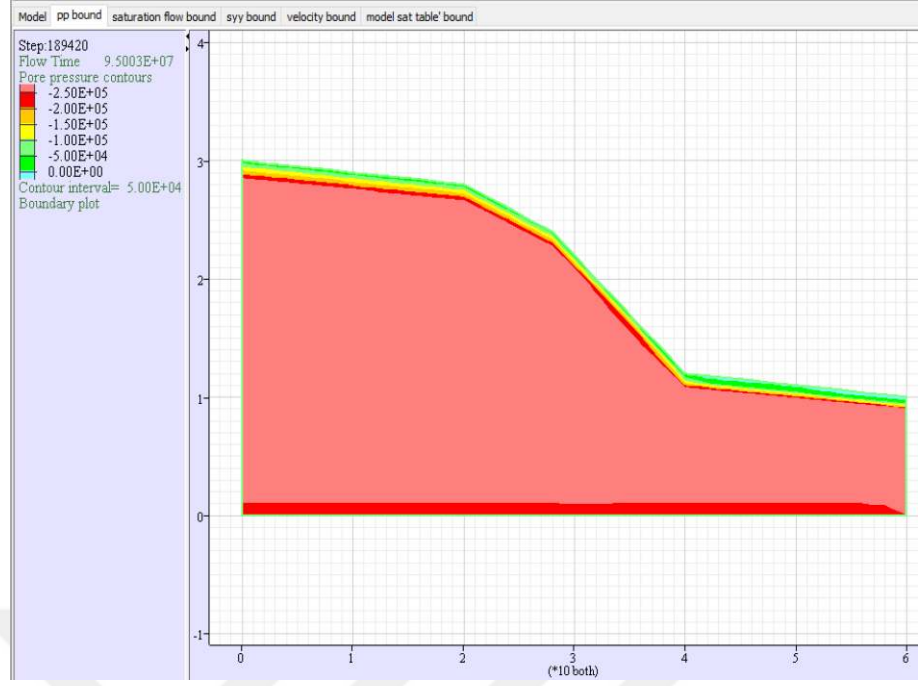


Şekil 58. Z3 %40 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

q3 yağışının etki ettirildiği %40 doygunluk derecesinde ki Z3 zemininde, yapılan analizler sonucunda güvenlik katsayısı değerinin 3,24 çıktığı ve şevin stabilitesini koruduğu görülmüştür. q3 yağışının 52 dakika devam etmesi durumunda şevin stabilitesini kaybettiği bulunmuş ve göçme anından önceki dağılımlar Şekil 59 ve 60'da verilmiştir. q3 yağışının 52 dakika sürmesiyle zemin yüzeyindeki doygunluk %80'lere ulaşırken alt kademelerde gittikçe azalmaktadır.



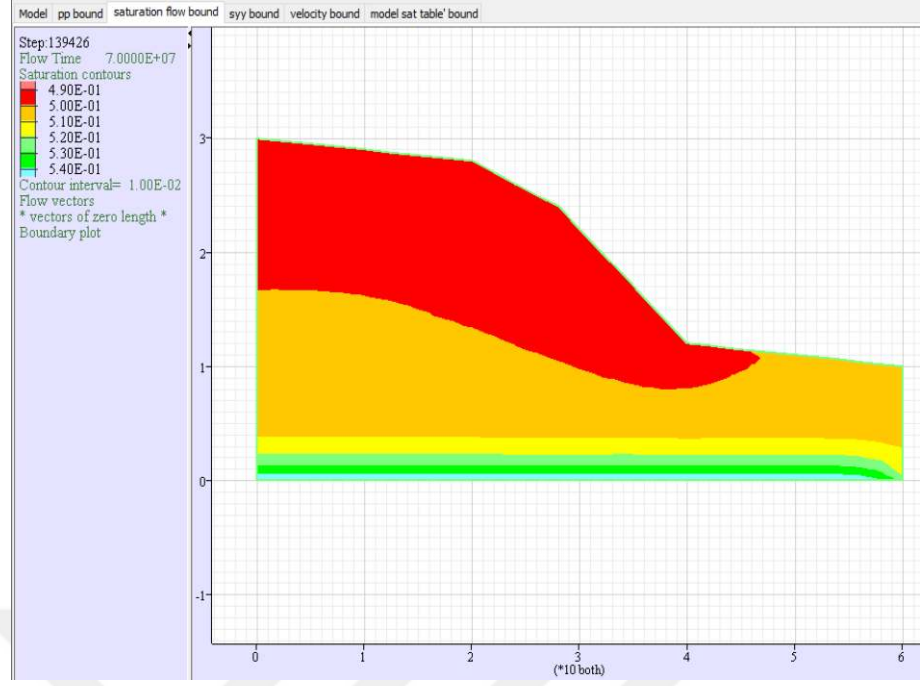
Şekil 59. Z3 %40 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı



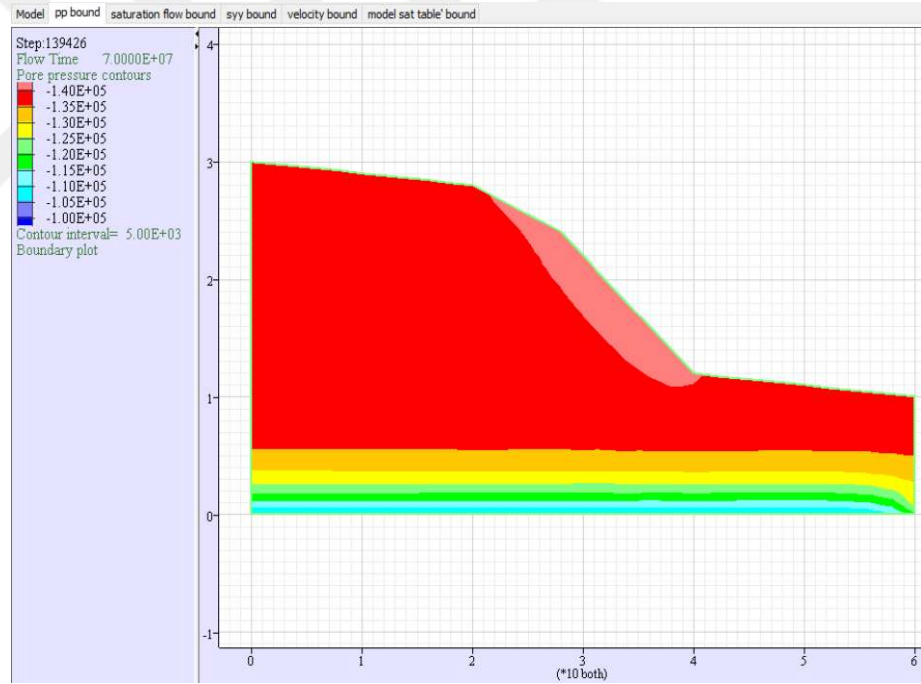
Şekil 60. Z3%40 için q3 yağışından dolayı geçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

3.3.3 Z3 Zemini %50 Başlangıç Doygunluk Derecesi

Z3 zemininde %50 doygunluk derecesine ulaşmak için gerekli olan yağmur hızı Denklem 20 kullanılarak $2,55E-9$ m/sn olarak hesaplanmış ve sisteme tanımlanmıştır. Ayrıca, bu doygunluk derecesinde, Denklem 21 kullanılarak boşluk basıncı değeri hesaplanmış ve -138060 Pa bulunmuştur. Bu veriler FLAC programında oluşturduğumuz şev modeline tanımlanmış ve güvenlik katsayısı 2,57 olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda oluşan boşluk suyu basıncı ve doygunluk dereceleri Şekil 61 ve 62’de verilmiştir.



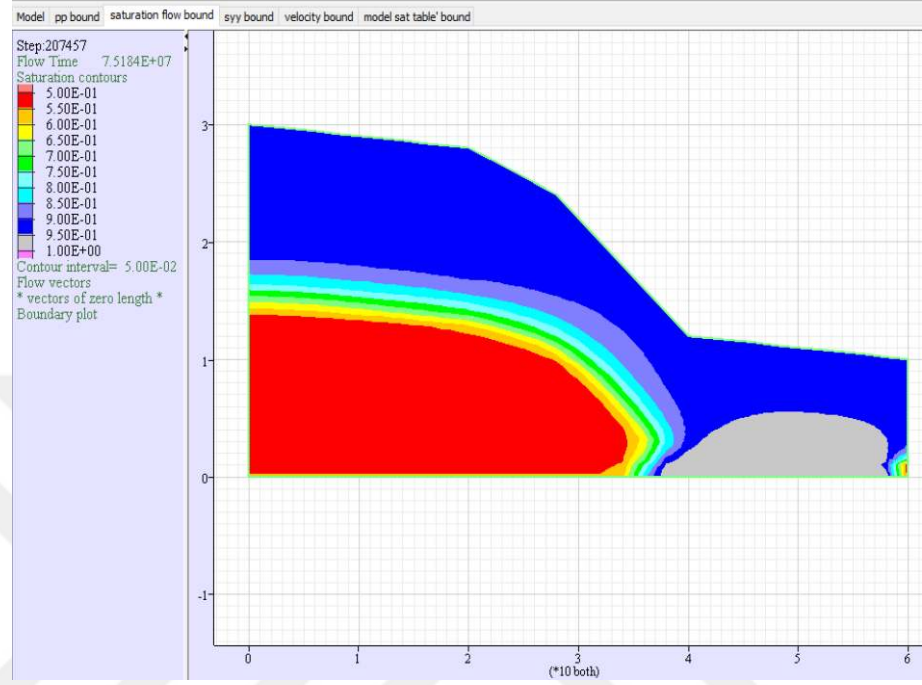
Şekil 61. Z3 %50 için başlangıç kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı



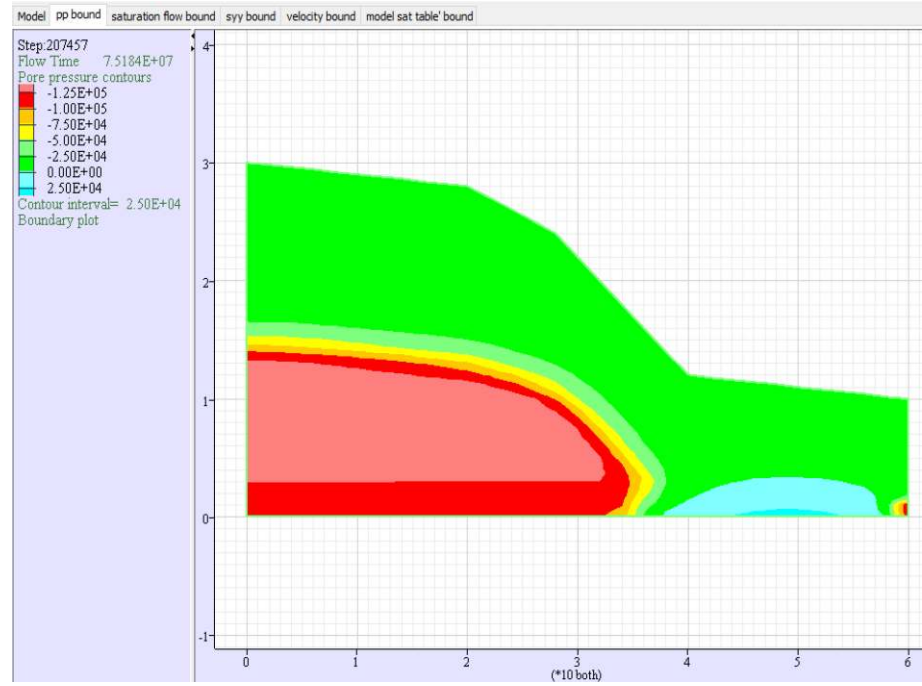
Şekil 62. Z3 %50 için başlangıç kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı

q1 yağışının uygulandığı %50 doygunluk derecesindeki Z3 zemininde yapılan analizler sonucunda, yağış sonunda şevin güvenlik katsayısı 2,5 bulunurken şevin stabil olduğu anlaşılmıştır. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q1 yağışının 60 gün devam etmesi gerektiği hesaplanmış ve göçme anından önceki dağılımlar Şekil 63 ve 64’de verilmiştir. Göçme için gereken süre artmış ve su zemin içerisinde daha uzun sürede daha derinlere ilerleyebilmiştir. Yüzeyde %95’lere ulaşan doygunluk

derinlere indikçe %60 seviyelerine kadar gerilemiştir. Z3 zemini için q1 yağışının 60 gün boyunca devam etmesi gerçekçi olmadığından Z3 zemininde q1 yağışı için göçme riski yoktur denebilir.

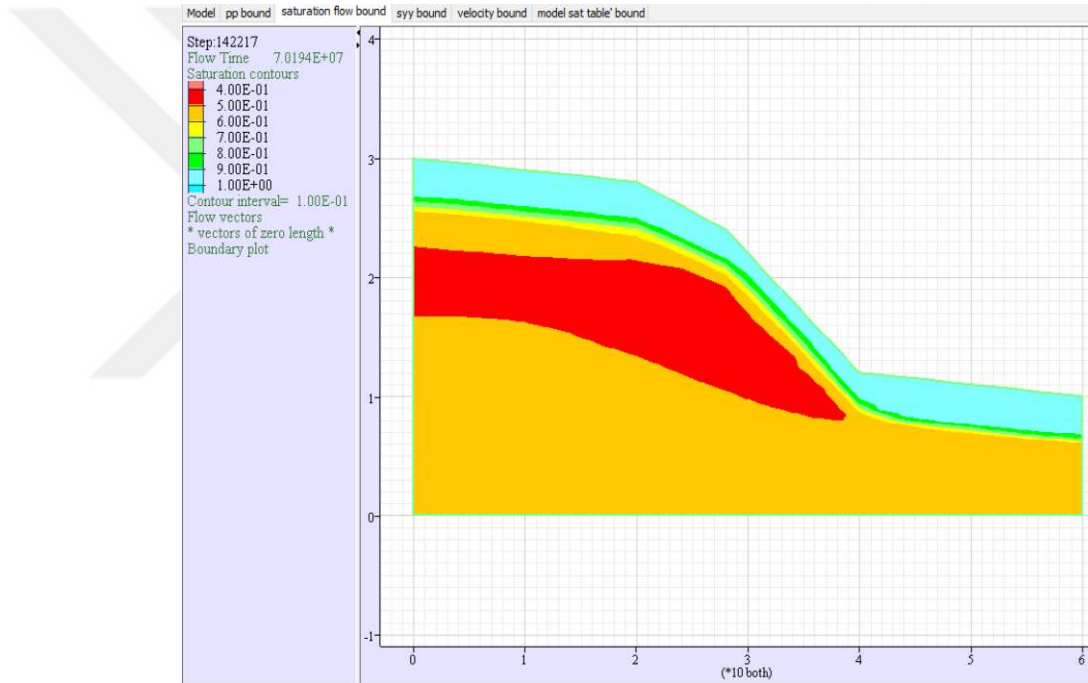


Şekil 63. Z3 %50 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

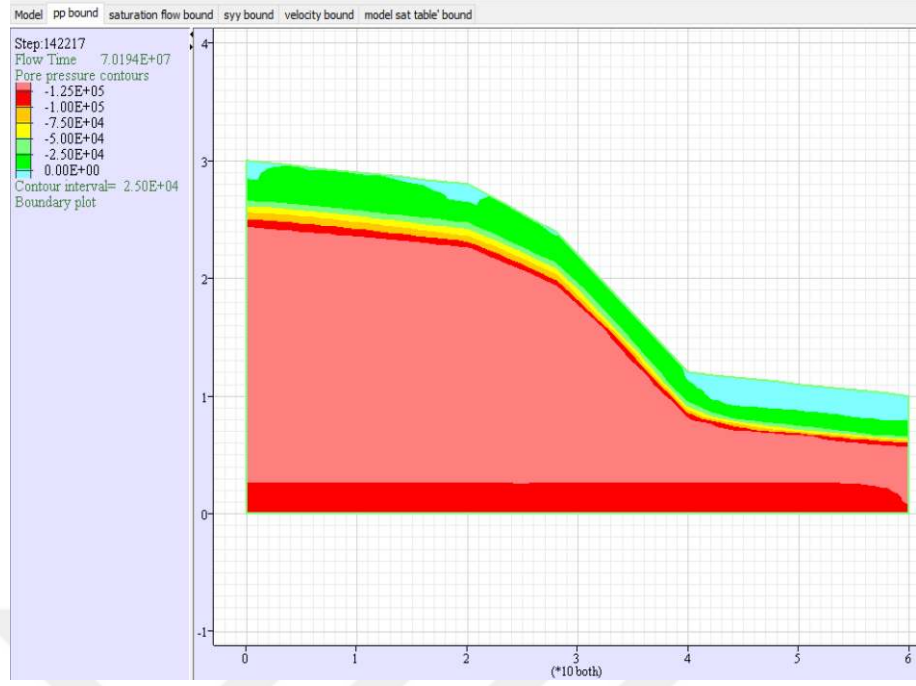


Şekil 64. Z3 %50 için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

%50 doygunluk derecesinde kararlı durumdaki Z3 zeminine q2 yağışı etki ettirildiğinde, yağış süresi sonunda stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı değerinin 2,31 çıktığı görülmüştür. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q2 yağışının 55 saat devam etmesi gerektiği hesaplanmış ve göçme anından önceki dağılımlar Şekil 65 ve 66’da verilmiştir. Doygunluk derecesi dağılım grafiğine bakıldığında, en üst yüzey tabakasının tamamen doygunluğa ulaşmasına rağmen, zeminin derinliklerine inildikçe doygunluk derecesindeki azalmalar görülmektedir. NBSB dağılımlarına bakıldığında ise, tamamen doygunluğa ulaşmış olan tabakada NBSB etkisini tamamen kaybederken, derinlere gidildikçe etkisinin devam ettiği görülmektedir.

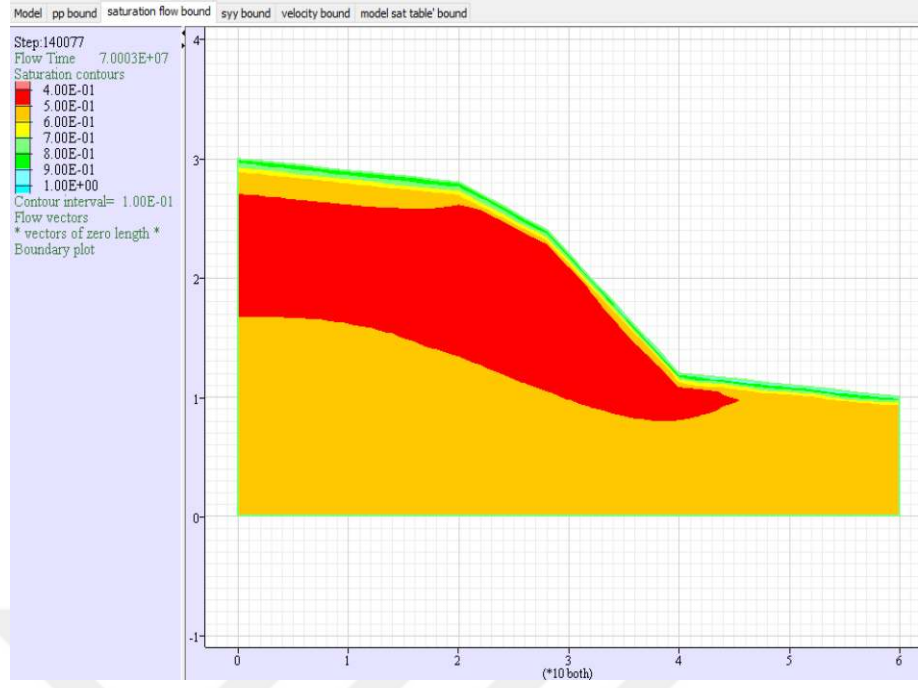


Şekil 65. Z3 %50 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

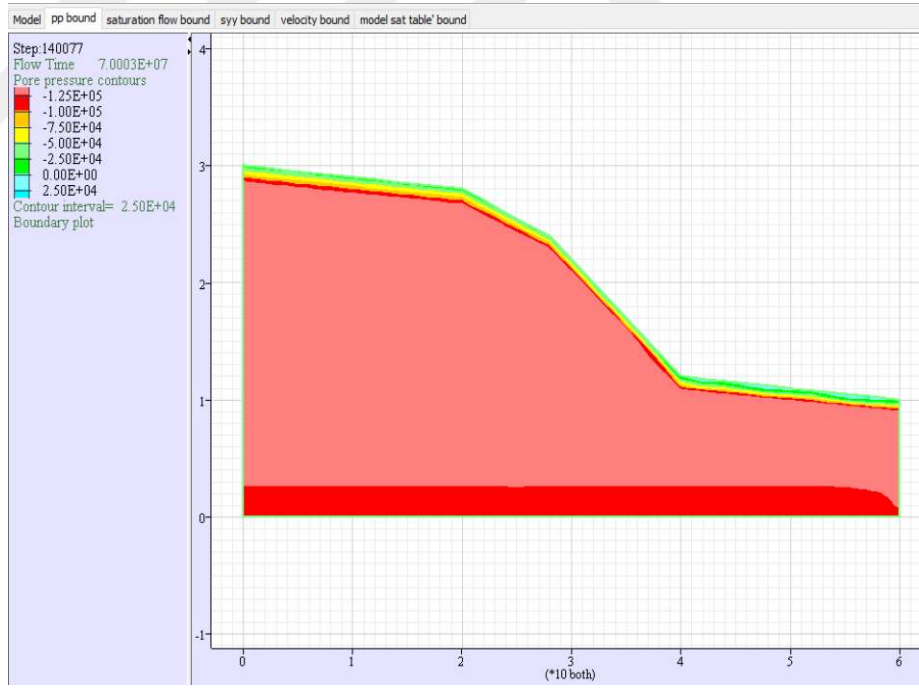


Şekil 66. Z3 %50 için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

Z3 zemini %50 doygunluk derecesinde iken q3 yağışı etki ettirilmiş ve modelin yağış süresi sonunda stabilitesini koruduğu görülmüştür. Güvenlik katsayısı değeri 2,54 hesaplanmıştır. Şevin stabilitesini kaybetmesi için q3 yağışının 44 saat devam etmesi gerektiği tespit edilmiş ve göçme anından önceki dağılımlar Şekil 67 ve 68’de verilmiştir. göçme anında yüzeyden yaklaşık 1m derinlikteki kısmın doygunluk derecesi %90’a ulaşırken, zemin profilinin alt kısımlarına doğru doygunluk derecesi kademeli olarak azalmıştır. NBSB’nın ise yüzeyde etkisini kaybettiği fakat alt kısımlarda hala etkisini koruduğu görülmektedir.

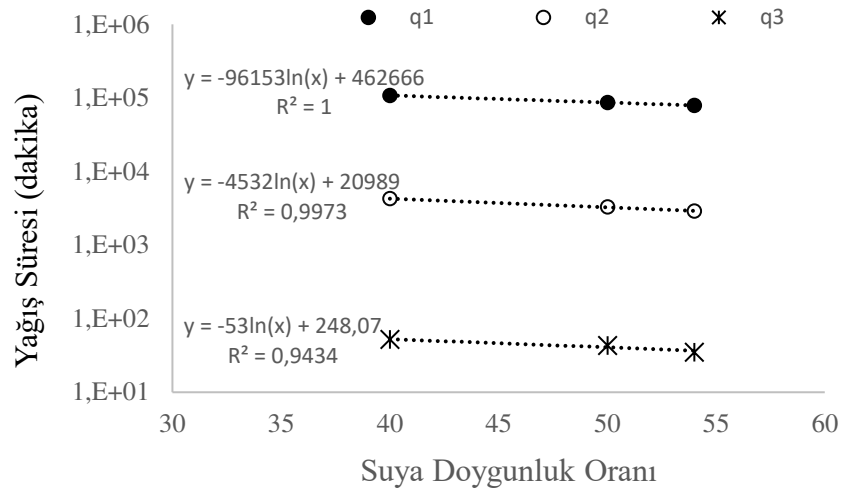


Şekil 67. Z3 %50 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı



Şekil 68. Z3 %50 için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk basıncı dağılımı

Z3 zeminin tüm yağış koşullarında farklı suya doygunluk derecelerindeki göçme için gerekli süreleri anlatan grafik Şekil 69’da sunulmuştur.



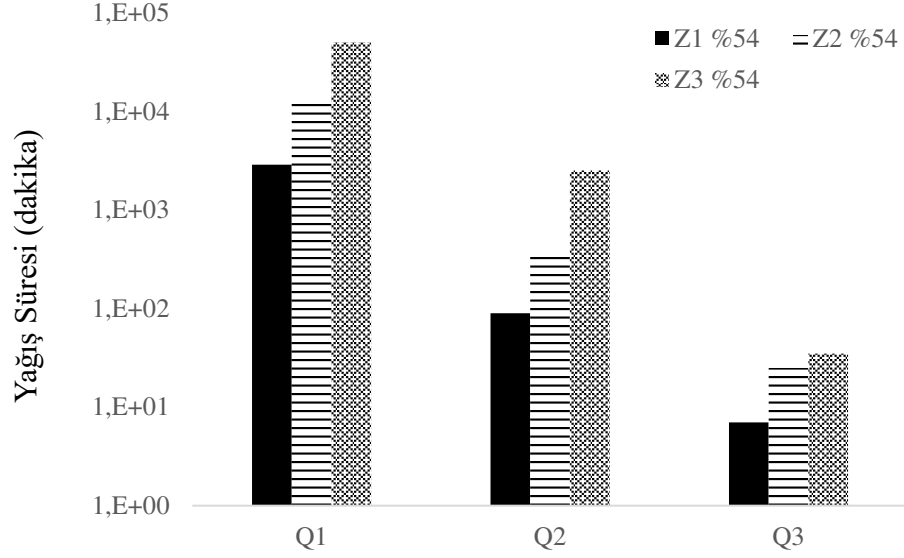
Şekil 69. Z3 için her bir suya doygunluk derecesi için farklı yağış koşullarında göçme için gereken süre

Analizler sonucunda elde edilen göçme süreleri tüm zeminler için Tablo 9'da listelenmiştir.

Tablo 9. Uygulanan tüm yağışlar sonrasında tüm zemin çeşitlerinin göçmesi için gereken süreler

	BAŞLANGIÇ DURUMU	Q1	Q2	Q3
Z1 %54	1,25	2 GÜN	3 SAAT	7 DK
Z2 %54	1,65	12 GÜN	6 SAAT	25 DK
Z3 %54	2,36	55 GÜN	48 SAAT	35 DK
Z3 %50	2,57	60 GÜN	55 SAAT	43 DK
Z3 %40	3,28	75 GÜN	71 SAAT	52 DK

Tüm zeminler için %54 suya doygunluk koşulunda farklı yağışlar etkisinde iken göçme için gereken süreleri gösteren grafik ise aşağıda Şekil 86'da sunulmuştur.



Şekil 70. Tüm zeminler için farklı yağış koşullarında göçme için gerekli süre

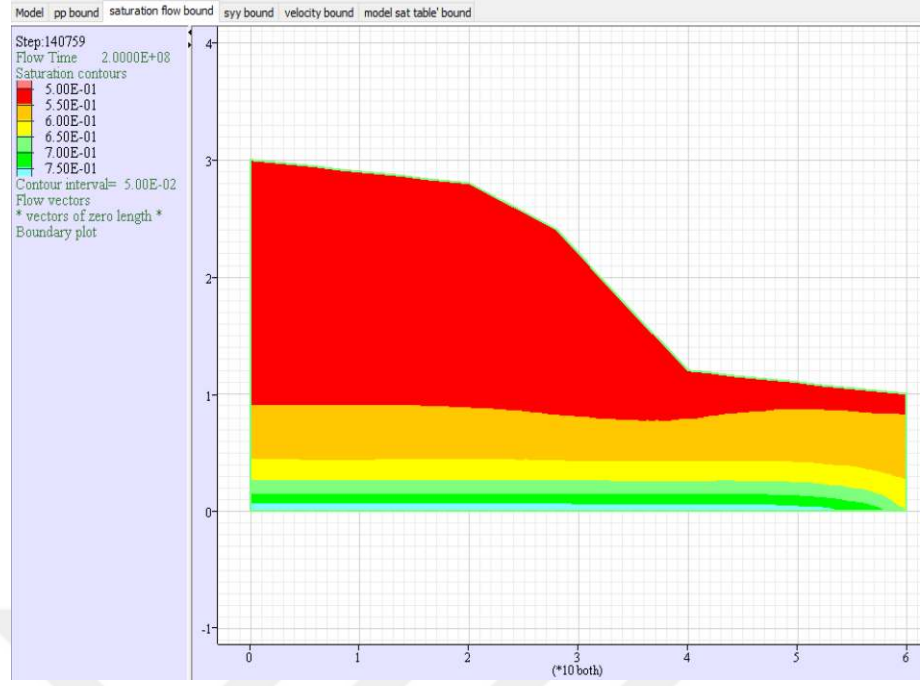
3.4 Tüm Zeminlerde Kohezyon ve İçsel Sürtünme Açısının Eşit Kabul Edilmesi Hali

Bu analiz aşamasında da yağış etkisi altındaki şevlerin 3 zemin çeşidinde de %54 doygunluk derecesinde; sadece emme basıncının etkisini karşılaştırabilmek adına mukavemet parametreleri aynı kabul edilmiştir. Tüm zeminler için analizlerde içsel sürtünme açısı 30 ve kohezyon değeri de 0 alınmıştır. 3 çeşit zeminde de % 54 doygunluk derecesinde yağış etkisi altında olmadan ve q1, q2, q3 yağışları etki ettirilerek hesaplamalar tekrar yapılmış ve sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

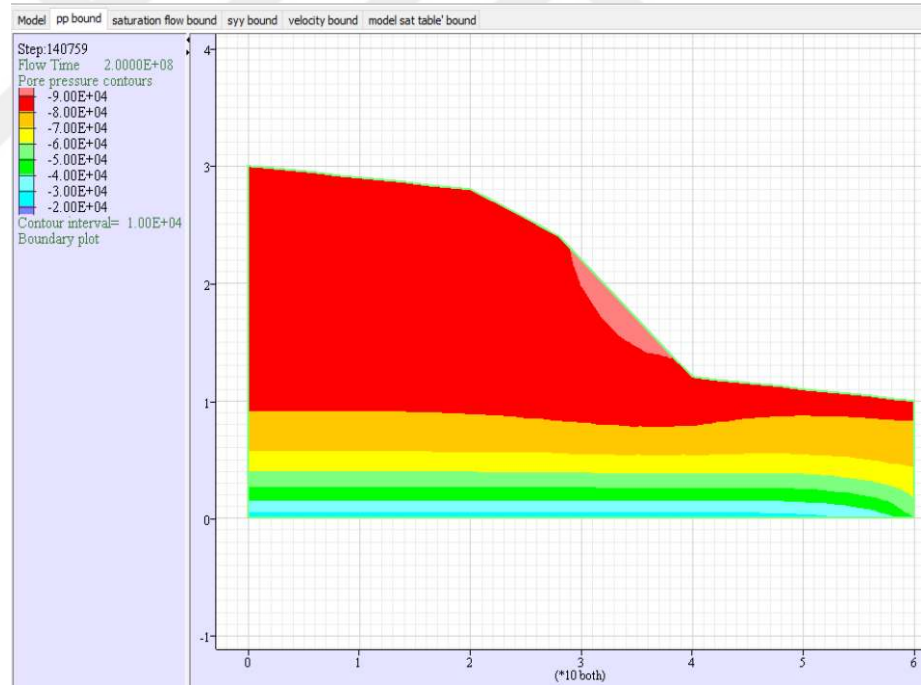
Ortak kabul edilen değerler Z1 zeminine ait parametreler olduğu için Z1 zemini için analizler tekrar edilmemiştir. Daha önce yapılan analiz sonuçları kullanılmıştır.

Z2 zemininde kohezyon sıfır ve içsel sürtünme açısı 30 kabul edilmiş ve analizler tekrarlanmıştır.

%54 doygunluk derecesini sağlamak adına sisteme tanımlanması gereken yağış hızı Denklem 20 kullanılarak bulunmuş ve 1,755E-9 m/sn olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, %54 doygunluk derecesinde, Denklem 21 kullanılarak su basıncı değeri hesaplanmış ve -83947 Pa bulunmuştur. Bu veriler FLAC programında oluşturduğumuz şev modeline tanımlanmış ve güvenlik katsayısı 1,65 olarak bulunmuştur. Herhangi bir yağışa maruz bırakılmadan yapılan analizler sonucunda elde edilen dağılım grafikleri Şekil 71 ve Şekil 72’de verilmiştir.



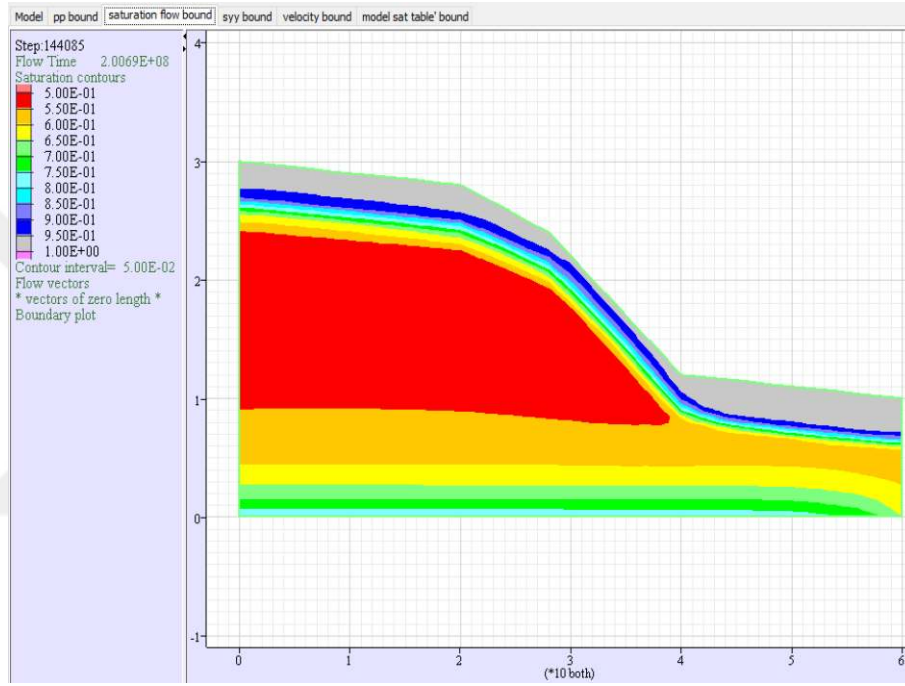
Şekil 71. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı



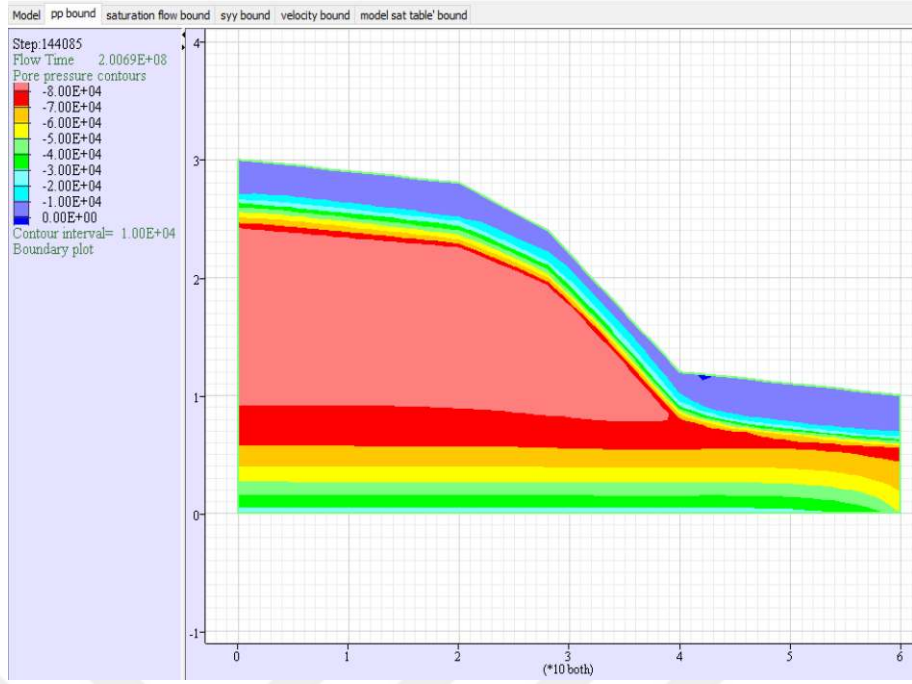
Şekil 72. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı

Z2 zemininde %54 doygunluk derecesinde kohezyonun sıfır ve içsel sürtünme açısının da 30 kabul edildiği koşullarında ($c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1750\text{kg/m}^3$) q1 yağışı etki ettirildiğinde 48 saat sonucunda şev stabilitesini koruduğu görülmüştür. Güvenlik katsayısı 1,58 bulunmuştur. Şevin stabilitesini kaybetmesi için yağışın 9 gün boyunca devam etmesi gerektiği belirlenmiş ve şevin stabilitesini kaybetmeden

hemen önce boşluk basıncı ve doymunluk derecesi dağılımları Şekil 73 ve 74’te verilmiştir. Doymunluk derecesindeki değişimin ilk 6m’de görüldüğü Şekil 73’deki grafikten anlaşılmaktadır. İlk 2m derinlikteki tabaka tam doymunluğa ulaşırken daha sonrası kademeli olarak azalmaktadır. Ayrıca kendi orijinal verilerindeki sonuçlarla kıyaslandığında da doymunluk dağılımının değiştiği derinliğin daha yüzeysel olduğu anlaşılmaktadır. NBSB dağılımına bakıldığında ise yüzeyde NBSB’nın etkisini kaybettiği fakat 3m’den sonra azalmasına rağmen etkisini devam ettirdiği görülmektedir.

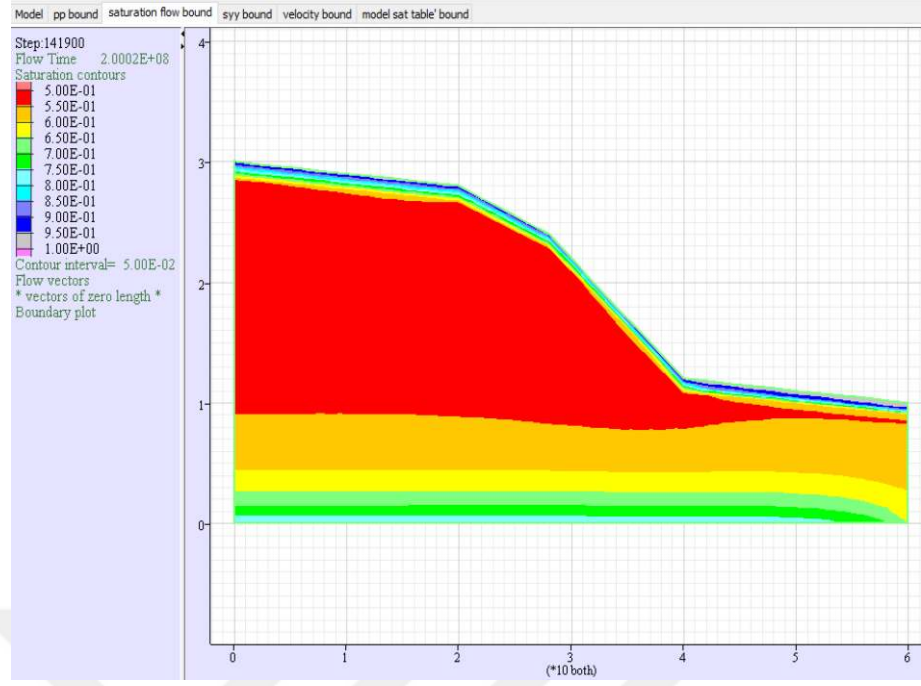


Şekil 73. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doymunluk derecesi dağılımı

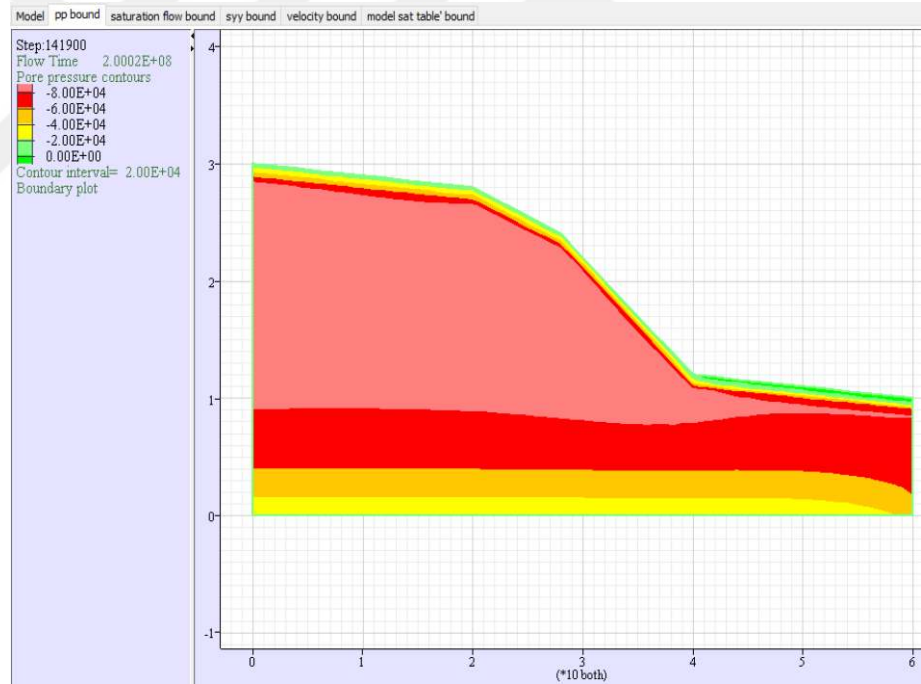


Şekil 74. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

$c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1750\text{kg/m}^3$ koşullarında ki Z2 zemininin %54 doygunluk derecesinde q2 yağışı sisteme eklenmiş ve 24 saat sonucunda şev stabilitesini koruyamamıştır. Şevin stabilitesini 5. Saat sonunda kaybettiği belirlenmiştir. Stabilitesini kaybetmeden hemen önce boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları Şekil 75 ve 76’da verilmiştir. q2 yağışıyla zemin yüzeyi tam doygunluğa ulaşamamıştır. Doygunluk derecesinin değiştiği derinlik 2m’ye kadar düşerken %95 ile %65 arasında değişmiştir.



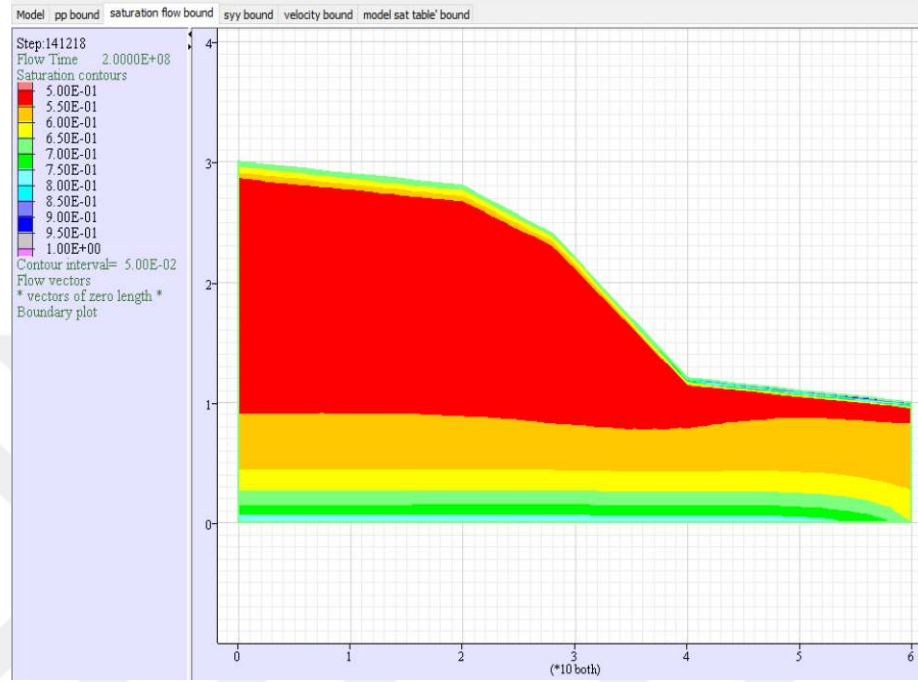
Şekil 75. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q2 yağışından dolayı yıkılmadan önceki doygunluk derecesi dağılımı



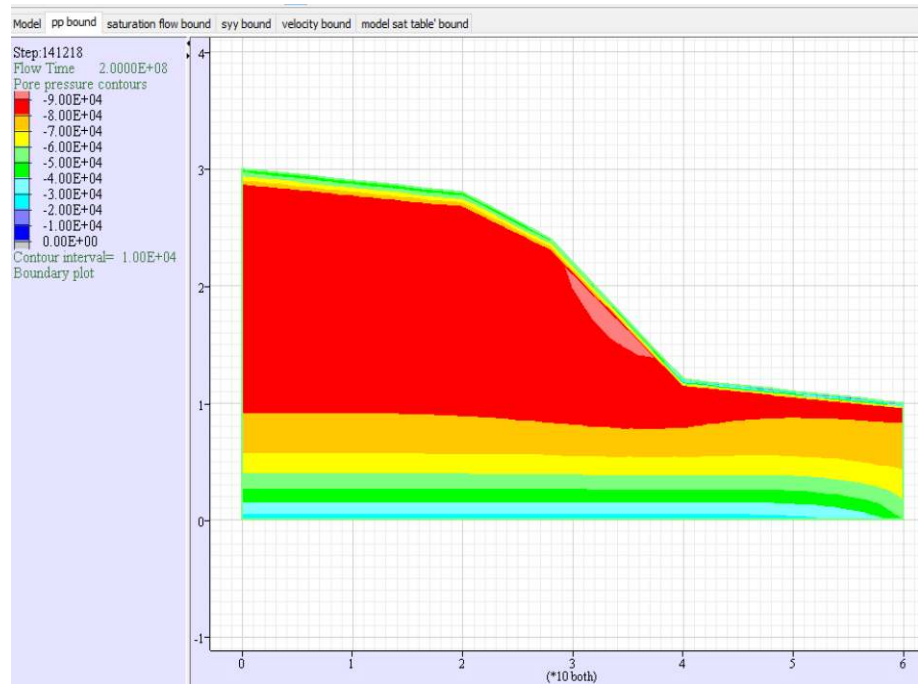
Şekil 76. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

q3 yağışı Z2 zemininde %54 doygunluk derecesinde ve $c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1750$ kg/m^3 koşullarında etki ettirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 15 dakika sonucunda şev stabilitesini korumuş ve güvenlik katsayısı 1,65 bulunmuştur. Şevin stabilitesini kaybetmesi için yağışın 25 dakika boyunca devam etmesi gerektiği belirlenmiş ve şevin stabilitesini kaybetmeden hemen önce boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları Şekil 77 ve 78’de verilmiştir. Modeldeki doygunluk derecesinin

göçme anında yüzeyde %70 olduğu ve doygunluk derecesi dağılımının yaklaşık 1m içerisinde değiştiği Şekil 77’de görülmektedir. Ayrıca NBSB’ nin göçme anında tamamen sönümlenmediği ancak -40kPa’a kadar düştüğü Şekil 78’de görülmektedir.

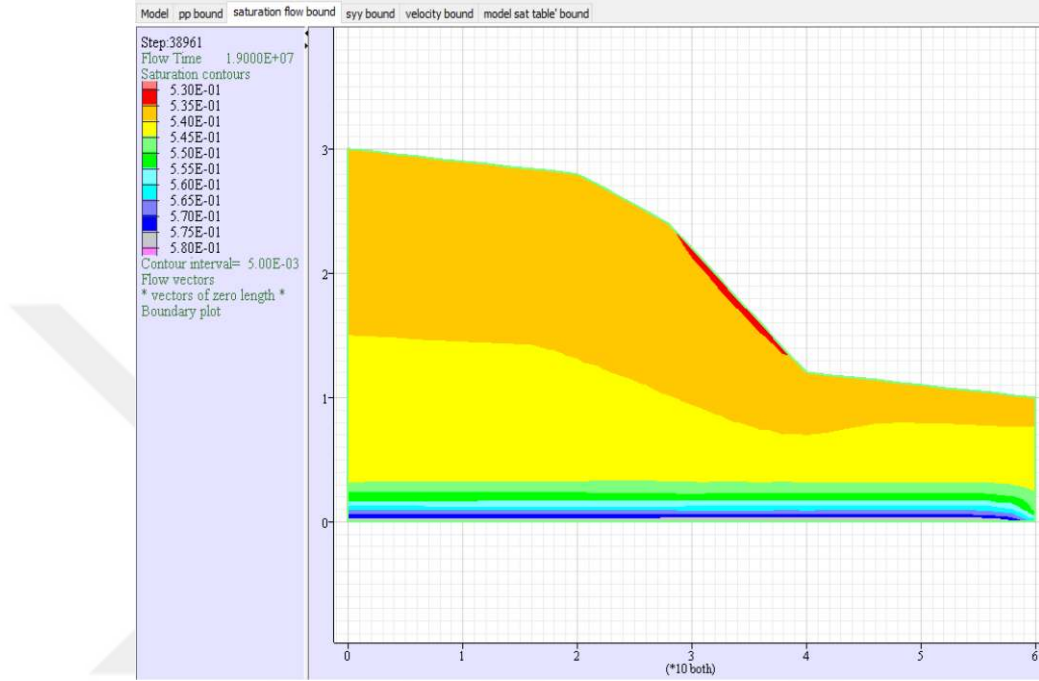


Şekil 77. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

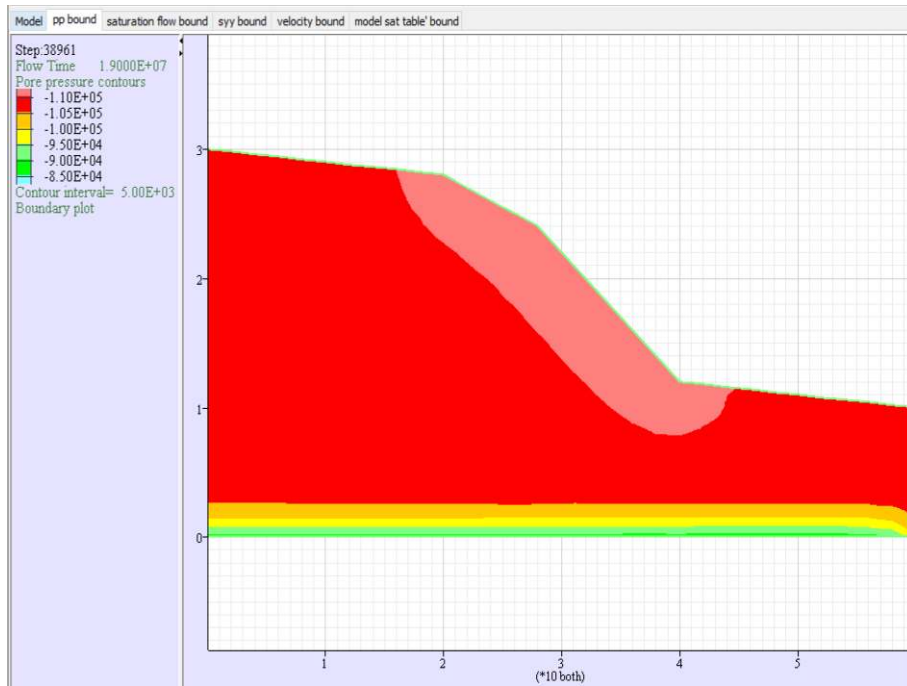


Şekil 78. Z2 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) için q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

Z3 zemininde kohezyon sıfır ve içsel sürtünme açısı 30° kabul edilmiş ve analizler tekrarlanmıştır. %54 doygunluk koşullarındaki kararlı halde yapılan analizlerin sonucunda güvenlik katsayısı 2,02 bulunmuştur. Analizler sonucunda oluşan boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları Şekil 79 ve Şekil 80’de verilmiştir.

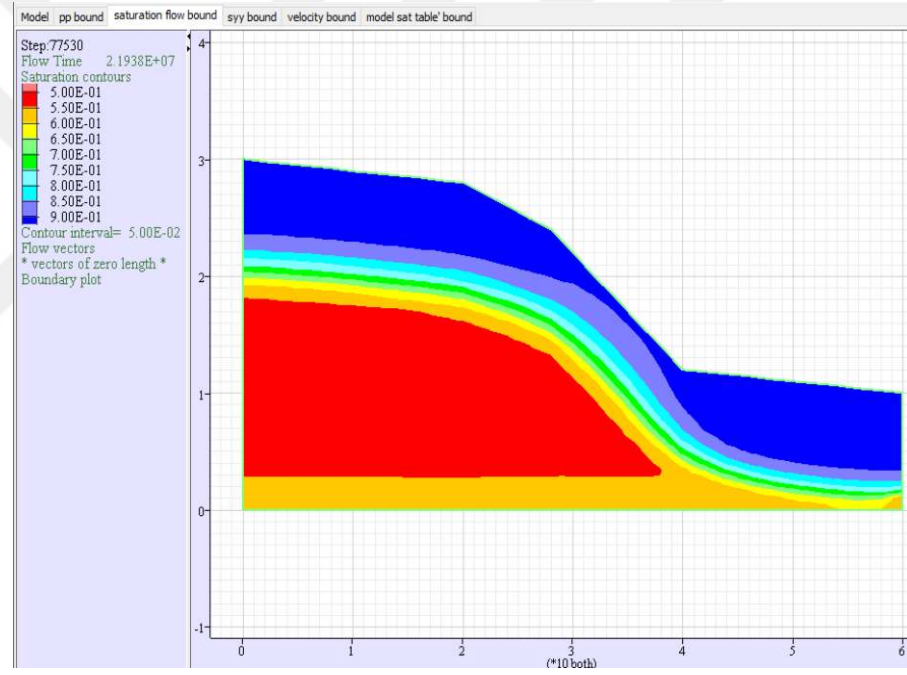


Şekil 79. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum doygunluk derecesi dağılımı

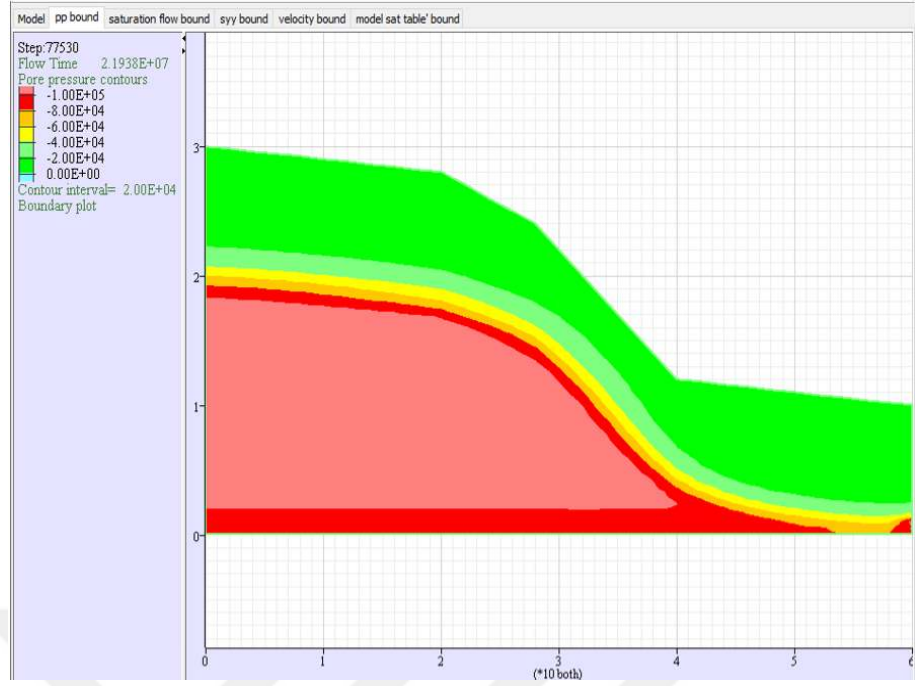


Şekil 80. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$) başlangıç %54 doygunluk kararlı durum boşluk suyu basıncı dağılımı

q1 yağışı Z3 zemini %54 doygunluk derecesinde ve $c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1330$ kg/m³ koşullarında iken etki ettirilmiş ve 48 saat sonucunda şevin stabilitesini koruduğu gözlemlenmiştir. Güvenlik katsayısı 1,96 bulunmuştur. Şevin stabilitesini kaybetmesi için yağışın 35 gün boyunca devam etmesi gerektiği belirlenmiş ve şevin stabilitesini kaybetmeden hemen önce boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları Şekil 81 ve 82’de verilmiştir. Yağmur etkisinden sonra, şevin yüzeyinde zeminin tamamen doygunluğa ulaşmadığı görülmektedir. Doygun derecesindeki dağılım %95 ile %60 arasında kademeli olarak azalmaktadır. NBSB yüzeyden yaklaşık 8 m derinliğe kadar etkisini kaybederken daha derinlerde hala etkisini göstermektedir.

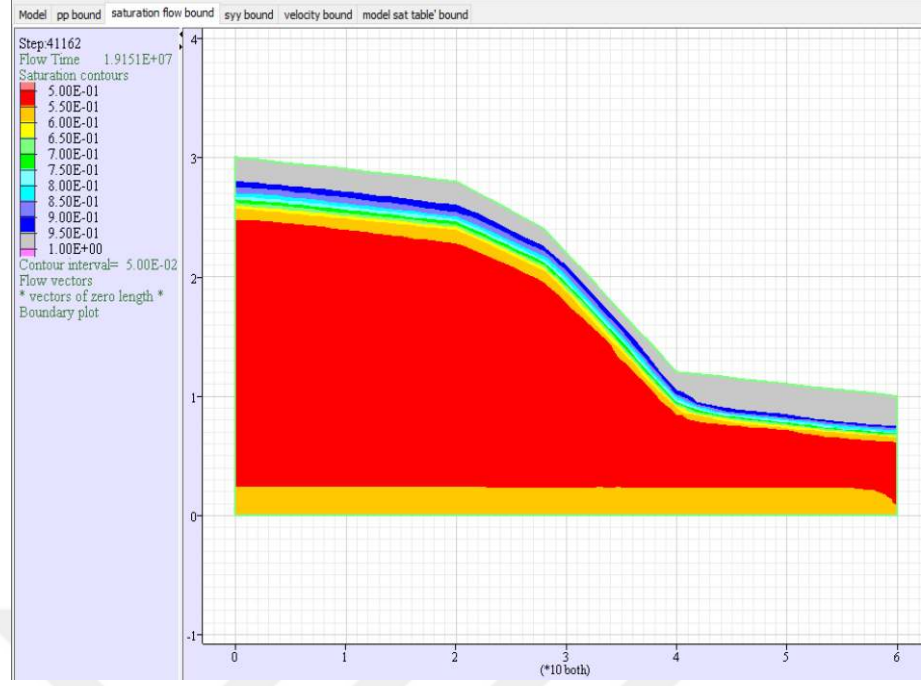


Şekil 81. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$ $S_e=\%54$) q1 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı

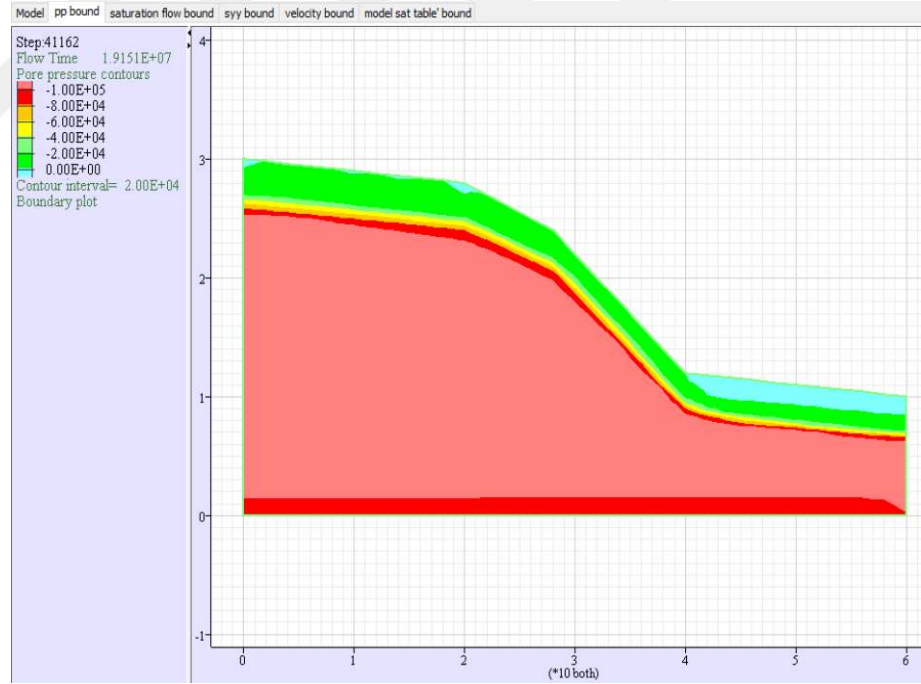


Şekil 82. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=1330$ $S_e=54$) q1 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

Z3 zemininde %54 doygunluk derecesinde ve $c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1330 \text{ kg/m}^3$ koşullarında q2 yağışı etki ettirildiğinde 24 saat sonucunda şev stabilitesini koruduğu görülmüş ve güvenlik katsayısı 1,80 bulunmuştur. Şevin stabilitesini kaybetmesi için yağışın 43 saat boyunca devam etmesi gerektiği belirlenmiş ve şevin stabilitesini kaybetmeden hemen önce boşluk suyu basıncı ve doygunluk derecesi dağılımları şekil 83 ve 84’te verilmiştir. Doygunluk derecesi dağılım grafiğine bakıldığında, kendi orijinal parametreleriyle yapılan analizler sonucunda doygunluk derecesinin değişim gösterdiği derinlik azalmıştır. Yüzeyden yaklaşık 2m derinliğe kadar zemin tamamen doymuş halde iken derinlere doğru gidildikçe doygunluk derecesindeki dağılımın, başlangıç doygunluğuna ulaştığı görülmektedir. Yüzeyden 3m derinliğe kadar NBSB’ nın etkisini tamamen kaybettiği, basıncın sıfırlandığı görülmektedir.



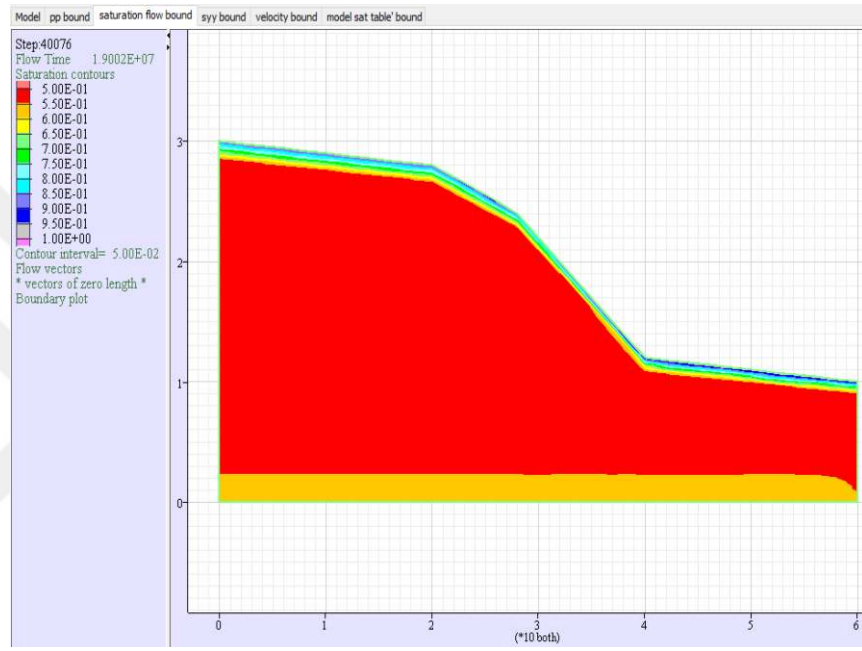
Şekil 83. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=1330$ $S_e=\%54$) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doygunluk derecesi dağılımı



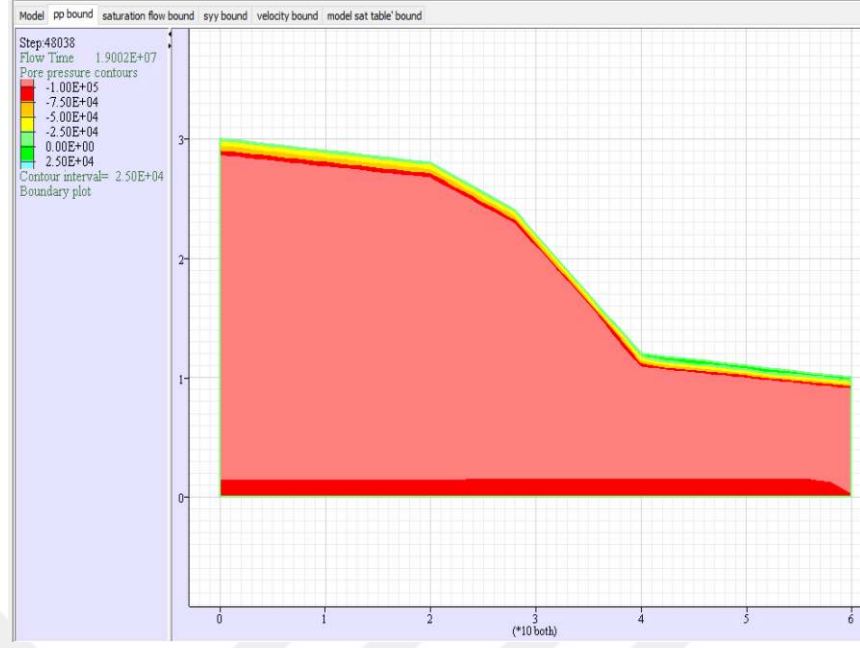
Şekil 84. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=1330$ $S_e=\%54$) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk suyu basıncı dağılımı

Z3 zemininde %54 doygunluk derecesinde $c=0$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=1330$ kg/m^3 koşullarında q3 yağışı etki ettirildiğinde 15 dakika sonucunda şev stabilitesini koruduğu görülmüş ve güvenlik katsayısı 1,99 bulunmuştur. Şevin stabilitesini

kaybetmesi için yağışın 35 dakika boyunca devam etmesi gerektiği belirlenmiş ve şevin stabilitesini kaybetmeden hemen önce boşluk suyu basıncı ve doymunluk derecesi dağılımları Şekil 85 ve 86’da verilmiştir. Doymunluk derecesi değişim grafiğinde, zemin yüzeyinin tamamen doymunluğa ulaşmadığı, doymunluk derecesinin ilk 1,5m’de %95 ile %65 arasında değiştiği görülmektedir. NBSB yüzeyden 0,5 m’den daha az bir derinlikte sıfırlanmış ve derinlere gidildikçe -75kPa’ a kadar ulaşmıştır.



Şekil 85. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=1330$ $S_e=54\%$) q2 yağışından dolayı göçmeden önceki doymunluk derecesi dağılımı



Şekil 86. Z3 zemini ($c=0$ $\phi=30$ $\gamma=1330$ $S_e=\%54$) q3 yağışından dolayı göçmeden önceki boşluk basıncı dağılımı

Z1,Z2,Z3 zeminlerinin tümünde $c=0$ $\phi=30$ $\gamma=1330$ kg/m^3 $S_e=\%54$ parametreleri ortak kabul edilen analizler sonucunda elde edilen göçme süreleri Tablo 10’da listelenmiştir.

Tablo 10. Uygulanan tüm yağışlar sonrasında $c=0$ ve $\phi=30$ varsayılan zemin çeşitlerinin göçmesi için gereken süreler

	BAŞLANGIÇ DURUMU	Q1	Q2	Q3
Z1 %54	1,250	2 GÜN	3 SAAT	7 DK
Z2 %54	1,650	9 GÜN	6 SAAT	25 DK
Z3 %54	2,015	35 GÜN	42 SAAT	35 DK

5- SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doygun olmayan 3 farklı zemin türüne sahip şevlerin, yağış etkisi altında stabiliteleri incelenmiştir. Bu 3 farklı doymayan zemin için hem aynı başlangıç doymuluk derecelerinde hem de farklı başlangıç doymuluk derecelerinde analizler yapılmıştır. İlk olarak zemin türlerini hedeflenen doymuluk derecelerine getirmek için gerekli sızma koşulları sisteme yüklenmiş daha sonra biri tasarı yağışı, diğerleri ise meteoroloji verilerinden olacak şekilde seçilen yağışlar sırayla uygulanmıştır. Sistem istenilen doymuluğa getirildikten sonra uygulanan ilk yağış düşük yoğunluklu ve uzun süreli kurgusal bir yağış olarak tanımlanmıştır. Yağışlardan diğer ikisi, Meteoroloji Genel Müdürlüğünün sisteminde kayıtlı Türkiye’de meydana gelen gerçek yağışlardan; Antalya ve Hopa yağışları seçilmiştir. Antalya yağışı uzun süreli ve yüksek yoğunluklu iken, Hopa yağışı kısa süreli ve yüksek yoğunluklu olarak sisteme tanımlanmıştır. Tasarlanan şev, alttan ve yanlardan geçirimsiz olarak, 60m genişliğinde, sağ taraftan 30m, sol taraftan 10 m yüksekliğinde ve ilk eğim 45 derece ve 2. eğim 26,7 derece olarak tasarlanmıştır. Her zemin türü için şevdeki başlangıç doymuluk derecesi 0,54 olarak tanımlanmış daha sonra bir zemin türü için başlangıç suya doymuluk derecesinin etkisini görebilmek için 0,4 ve 0,5 değerlerinde de analizler yapılmıştır.

Analizlerde ıslatma sıvısı olarak su, ıslatmayan sıvı olarak hava kabul edilmiştir. Kullanılan sıvı ve zeminlerin teknik özellikleri verilmiştir. İlgili değerler programa tanımlanmış ve zeminler istenilen doymuluk derecelerine getirildikten sonra yağışlar tek tek uygulanarak, FLAC Ver. 7.0 (Itasca, 2011) programındaki iki fazlı akış modeli ile analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları yukarıda Tablo 9’da listelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Çalışma kapsamında oluşturulan 5 modele bakıldığında, herhangi bir yağış etkisi altında kalmadan güvenlik katsayıları kontrol edildiğinde; en yüksek güvenlik katsayısı, hava giriş değeri en yüksek olan ve başlangıç doymuluğu en düşük olan Z3%40 zeminiyle oluşturulan şev modeliyle elde edilmiştir.

- q1 yağışı sonrası elde edilen verilere göre; Z2 ve Z3 zeminlerinin göçme süreleri, gerçek hayattaki yağış süreleriyle karşılaştırıldıklarında gerçeklikten uzaktır. Türkiye’de meydana gelen yağış süreleri göz önüne alındığında bu zeminlerde göçme olmayacağı söylenebilir. Fakat Z1 zemini bu yağış sonucunda kritik değerlere ulaşmıştır. Bu sebeple Z1 zemini için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.
- q1 yağışı sonunda Z1 ve Z3 zeminleri tamamen doygunluğa ulaşamazken, Z2 zemini tam doygunluğa ulaşmıştır. Buna rağmen, doygunluk derecelerindeki değişim derinliği en fazla olan zemin Z3 iken en az olan ise Z1 zemini olmuştur. Burada emme basıncının etkilerini görmekteyiz. En yüksek emme basıncı değerine sahip olan zeminde göçme süresi en uzun olmuş ve su zemin içerisinde ilerleme fırsatı bulmuştur. Yağışın uzun süreli ve düşük yoğunluklu olması sebebiyle de diğer yağışlara kıyasla su zemin içerisinde daha derinlere ulaşmıştır. Yağışların hızları arttıkça bu derinlik azalmıştır.
- q1 yağışı ile birlikte; Z1 zemininde yüzeyden 0,5 m, Z2 zemininde 4,5m ve Z3 zemininde 14m derinliğe kadar negatif boşluk suyu basıncı (NBSB) sıfırlanırken daha derinlerde etkisini göstermeye devam etmektedir. 3 zemin türünde de artan doygunluk dereceleri ve NBSB’nın etkisini kaybetmesi şevlerin göçmesine sebep olmuştur.
- q2 yağışı sonrası elde edilen verilere göre; Z1 zemininde yağış başladıktan kısa bir süre sonra, Z2 zemininde ise Z1 zemininden biraz daha fazla bir sürede göçme meydana gelmiştir. İki zemin içinde gerekli önlemlerin hemen alınması gerekirken, Z3 zeminin yağış sonunda stabil kaldığı fakat yağışın devam etmesi durumunda Z3 zemininin de tehlike arz edebileceği görülmektedir.
- q2 yağışıyla Z3 zemini tam doygunluğa ulaşırken Z1 ve Z2 zemini %95 doygunluk derecesine ulaşmıştır. Göçme süresi en uzun zemin Z3 olduğu için su zemin içinde daha derine ulaşabilmiş ve doygunluk derecesindeki değişim derinliği de en fazla Z3 zemininde meydana gelmiştir.

- q2 yağışıyla birlikte NBSB yüzeyde etkisini kaybederken şev derinliklerine doğru hala etkisini koruduğunu görmekteyiz. q1 yağışı sonucunda oluşan dağılıma kıyasla daha sık bir bölgede değişim gözlenmiştir.
- q3 yağışı sonrası elde edilen verilere göre; Z1 zeminini neredeyse yağış başladıktan hemen sonra göçmüştür. Z1 zemininde gerekli önlemlerin hemen alınması gerekmektedir. Z2 ve Z3 zeminleri yağış sonunda stabil kalmış fakat göçme sürelerine baktığımızda, yağışın devam etmesi durumunda bu zeminlerde de göçme meydana geleceği için gerekli tedbirler alınmalıdır.
- q3 yağışı etki ettirilen tüm zemin türlerinde analiz sonuçlarında göçme süresi göz önüne alındığında, doygunluk derecelerindeki değişim miktarının en az olduğu yağış türü olduğu görülmektedir. Göçme anında NBSB, Z1 ve Z3 zeminlerinde yüzeyde sıfırlanırken Z2 zemininde hala etkisini sürdürmektedir.
- Genel olarak Z3 zemininin, muhtemelen emme özelliklerinin etkisinden dolayı diğer zemin türleri ile karşılaştırıldığında heyelanı tetikleyen yağışlara karşı daha dirençli olduğu bulunmuştur.
- Başlangıç doygunluk dereceleri aynı olan 3 farklı zemin türüyle oluşturulan şevlerde en uzun göçme süresi; Z3 zemininin olmuştur. Hava giriş (AEV) değeri yüksek olan zemin, suyun gözeneklere girişine direnç gösterir ve bu nedenle negatif boşluk suyu basıncı (emme kapasitesi) daha yüksek olur. Bu, zemin içindeki suyun girişinin gecikmesine ve dolayısıyla negatif boşluk suyu basıncının daha uzun süre korunmasına neden olur. Negatif boşluk suyu basıncının yüksek ve uzun süreli olması, zemin parçacıkları arasındaki bağlanmayı güçlendirir ve zemin stabilitesini artırır. Sonuç olarak, göçme süresi uzar.
- Aynı zeminin farklı başlangıç doygunluklarında yapılan analizler sonucunda, başlangıç doygunluğu en az olan Z3%40 zeminini, en uzun göçme süresine ulaştırmıştır. Başlangıç doygunluğu arttıkça göçme süresi kısalmaktadır. Bunun nedenini emme kapasitesi ile ilişkilendirilerek açıklanabilir. Doygunluğu

düşük olan zemin, yağış başladığında gözeneklerinde daha fazla boşluk (hava boşluğu) bulundurur. Bu durum, suyun zemine infiltrasyonunu kolaylaştırır, böylece zemin doygun hale gelmeden önce daha uzun süre yağışa maruz kalabilir. Zemin suyla dolarken, gözeneklerdeki boşluk suyu basıncı yavaş yavaş artar. Boşluk suyu basıncının yavaş artması, şevin dayanımını aniden kaybetmesini engellemiş ve göçme süresini uzatmıştır.

- 3 farklı zemin türüyle oluşturulan şevlere, ayrı ayrı 3 farklı yağış uygulanmış ve uzun süreli düşük yoğunluklu yağışın (q1) etkisiyle en uzun göçme süresine ulaşılmıştır. Yağışın şiddeti arttıkça göçme süresi kısalmıştır. Düşük yoğunluklu yağış, zemine suyun yavaş ve sürekli bir şekilde nüfuz etmesini sağlar. Su, zemine yavaşça nüfuz ederken, gözeneklerdeki su basıncı kademeli olarak artar. Bu süreçte, zemin suyu daha yavaş emerken, negatif boşluk suyu basıncı (emme kapasitesi) korunur ve zemin stabilitesi uzun süre devam eder. Zemin parçacıkları arasındaki bağlanmayı aniden azaltmaz ve zemin stabilitesinin uzun süre korunmasını sağlar.
- q1, q2 ve q3 yağışları kıyaslandığında; uzun süreli düşük yoğunluklu yağış (q1), zemine yavaş fakat sürekli bir su girişi sağlamıştır. Suyun zemin içinde daha derinlere nüfuz etmesine neden olmuş ve yüzeyde ani doygunluk artışları yerine daha dengeli bir doygunluk dağılımı oluşturmuştur. Kısa süreli yüksek yoğunluklu yağış(q3) ise, yüzey katmanlarının hızla doygun hale gelmesine neden olmuş ve zemin yüzeyi, suyu hızlı bir şekilde emmiştir. Ancak yağışın süresinin kısa olması nedeniyle suyun derin katmanlara ulaşması sınırlanmıştır. q2 yağışında ise, q1 ve q3 arasında bir dağılım söz konusudur.
- Z1, Z2 ve Z3 zeminlerinin yağışlar altında doygunluk dağılımlarına bakıldığında, Z3 zemininde yağışlar sonucunda doygunluk seviyelerindeki değişimlerin daha derinlerde olduğu görülmesine rağmen, en uzun göçme süreleri yine Z3 zeminlerinden elde edilmiştir.
- Tüm zeminlerin mukavemet özelliklerinden kohezyon değerlerinin ve içsel sürtünme açılarının sırasıyla sıfır ve otuz olarak kabul edildiği durumlarla

yapılan analizler sonucunda; Z1zemininin orijinal değerleriyle kıyaslandığında değişen bir şey olmamış, Z2 zemininde meydana gelen içsel sürtünme açısındaki artış, kohezyonda meydana gelen azalmayı karşılayamamış olabileceğinden ve Z3 zeminlerinde meydana gelen içsel sürtünme açısındaki azalma q1 yağışıyla birlikte, bu zeminlerde göçme sürelerinde azalmaya sebep olmuştur. q2 yağışıyla Z1 ve Z2 zeminlerinin göçme süresi sabit kalırken Z3 zeminde azalma meydana gelmiştir. q3 yağışıyla birlikte Z1, Z2 ve Z3 zeminlerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Bu da yağışın çok hızlı ve kısa süreli olmasından kaynaklanmaktadır.

- Uygulanan yağışlar ve zemin çeşitleri dikkate alındığında, yüksek emme basıncına sahip zeminlerde, yağış türünden bağımsız olarak stabilitenin daha iyi korunduğu görülmüş ve bu durum, emme basıncının suyun zemin içindeki hareketini sınırlayarak, su doygunluğunun artmasını engellemesiyle açıklanabilmektedir. Düşük emme basıncına sahip zeminlerde ise, özellikle şiddetli yağışlar stabilizeyi önemli ölçüde azaltmıştır. Bu, düşük emme basıncının zemin partikülleri arasındaki bağları zayıflatması ve suyun hızla zemin içindeki boşluklara sızması nedeniyle meydana gelmiştir.

Daha sonra yapılacak olan çalışmalar için öneriler ise aşağıda sıralanmıştır;

- ✓ Yapılan analizlerde kullanılan farklı zemin türlerinin tüm değerleri laboratuvar ortamında gerekli deneysel çalışmalar ile elde edilebilir.
- ✓ Analizler birbirini takip eden yağışlar altında yapılabilir.
- ✓ Yapılan şev stabilize analizlerinde deprem etkisi incelenebilir.
- ✓ Bu çalışma laboratuvar ortamında yapılmış küçük ölçekli bir çalışmadır ve bir temel oluşturulmuştur. Bu çalışma geliştirilerek sahada yapılan ölçümler ile analizler tekrarlanabilir.

REFERANSLAR

- [1] Ün, B., & Yıldız, A. (2021). *Şev stabilitesi probleminin geri analizle çözümü: örnek bir vaka*. Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 9(1), 174-181.
- [2] Taşkıran, T., Yavuz, V. S., & Keskin, M. S. (2015). *Şev stabilitesinin iki ve üç boyutlu modeller ile incelenmesi*. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 6(1), 1-8.
- [3] Önalp, A. (2004). *Geoteknik bilgisi II: yamaç ve şev'lerin mühendisliği*. Birsen Yayınevi.
- [4] Rahardjo, H., Satyanaga A., and Leong E. C. (2012). *Unsaturated soil mechanics for slope stabilization*. Southeast Asian Geotechnical Journal, 43.1, 48-58.
- [5] <https://www.tarimorman.gov.tr/CEM/Belgeler/yay%C4%B1nlar/yay%C4%B1nlar%202016/HEYELANLAR.pdf>
- [6] <https://www.afad.gov.tr/afet-haritalari>
- [7] Fidan, S., & GÖRÜM, T. (2020). *Türkiye’de ölümcül heyelanların dağılım karakteristikleri ve ulusal ölçekte öncelikli alanların belirlenmesi*. Türk Coğrafya Dergisi, (74), 123-134.
- [8] https://tr.wikipedia.org/wiki/İliç_maden_kazası
- [9] Nam, S., Gutierrez, M., Diplas, P., & Petrie, J. (2011). Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. *Engineering Geology*, 122(3-4), 272-280.
- [10] Fredlund, D. G. (1987). *Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction*. Slope stability, 113-144.
- [11] Ulusay, R. (2007). *Heyelanlar ve mühendislik şevlerindeki duraysızlıklar: Türleri, etkileri ve zararların azaltılması*. Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu, Samsun, 157-185.
- [12] Huat, B. B., Ali, F. H., & Low, T. H. (2006). *Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability*. Geotechnical & Geological Engineering, 24, 1293-1306.
- [13] Chen, R. H., Chen, H. P., Chen, K. S., & Zhung, H. B. (2009). Simulation of a slope failure induced by rainfall infiltration. *Environmental Geology*, 58, 943-952.
- [14] Chen, Z., Zhang, J. M., Ho, K., & Wu, F. Q. (2008). A case study on rainfall infiltration effect on the stability of two slopes. In *Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future, Two Volumes+ CD-ROM* (pp. 1781-1788). CRC Press.
- [15] Sun, J., Liu, Q., Li, J., & An, Y. (2009). Effects of rainfall infiltration on deep slope failure. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 52(1), 108-114.
- [16] Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2010). Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes. *Computers and Geotechnics*, 37(5), 649-657.
- [17] Thu, T. M., Lee, G., Oh, S., & Van, N. T. H. (2015). *Effect of Extreme Rainfall on Cut Slope Stability: Case Study in Yen Bai City, Viet Nam: Case Study in Yen Bai City, Viet Nam*. *한국지반환경공학회 논문집*, 16(4), 23-32.

- [18] Taşkıran, T., & Fidan, A. A. (2019). Doymamış Koşullardaki Bir Şevin Yağış Etkisindeki Duraylılığını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi. *Teknik Dergi*, 30(5), 9483-9506.
- [19] <https://www.imo.org.tr/TR,82965/cagrili-bildiri-doymamis-zeminlerin-ozellikleri---m-arслан-tekinsoy.html> (1.7.2023)
- [20] <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cgj-2014-0095> (1.07.2023)
- [21] Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *An overview of unsaturated soil behaviour*. Geotechnical special publication, 1-1.
- [22] Kim, W. S. (2008). Influence of Water Infiltration on the Deformation of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls.
- [23] Khaboushan, E. A., Emami, H., Mosaddeghi, M. R., & Astarai, A. R. (2018). *Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties*. *Soil and Tillage Research*, 184, 118-127.
- [24] Tekinsoy, M. A., Kayadelen, C., & TAŞKIRAN, T. (2005). *Suya doymun olmayan zeminlerin üç eksenli parametrelerinin belirlenmesi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(1), 65-74.
- [25] <https://slideplayer.biz.tr/slide/12761194/>
- [26] AYTEKİN, M. (1995). *Zemin Emme Basıncı Zarflarının Belirlenmesi*. *Teknik Dergi*, 6(27).
- [27] Kocaman, K. (2018). *Killi zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi ile boşluk boyutu ilişkisi* (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [28] Göksan, T. S. (2007). *Zeminlerin emme özelliklerinin belirlenmesinde bir yaklaşım*. Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı. Isparta.
- [29] Pan, H., Qing, Y., & Pei-yong, L. (2010). *Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 1-14.
- [30] Zapata, C.E., 1999. *Uncertainty in Soil Water Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions*, Ph.D. Thesis, Arizona State University.
- [31] Pan, H., Qing, Y., & Pei-yong, L. (2010). *Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 1-14.
- [32] Tilgen, H. P. (2003). *Relationship between suction and shear strength parameters of compacted METU campus clay*, Master's thesis, Middle East Technical University.
- [33] Kanbur, M. A. (2011). *Siltlerde Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesinde Boşluk Geometrisinin Etkisi*, Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi, Turkey.
- [34] Kayadelen, C. (2005). *Doymun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin K₀ Koşullarındaki Yanal Basınçlarının İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana).
- [35] Kocaman, K. (2018). *Killi zeminlerin zemin-su karakteristik eğrisi ile boşluk boyutu ilişkisi*, Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi, Turkey.

- [36] [https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/87987/mod_resource/content/0/Hafta9.pdf#:~:text=Kapilarite%20\(k%C4%B1lcall%C4%B1k\),olup%20kapilarite%20olay%C4%B1na%20imkan%20vermez.](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/87987/mod_resource/content/0/Hafta9.pdf#:~:text=Kapilarite%20(k%C4%B1lcall%C4%B1k),olup%20kapilarite%20olay%C4%B1na%20imkan%20vermez.)
- [37] <https://docplayer.biz.tr/109194095-Zeminde-su-zemin-hidrologi.html>
- [38] Tetik, A. F. (2020). *Yağış etkisi altındaki şevlerin stabilitesi*. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa.
- [39] Gökoğlu, Ö. (2015). *Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizi*. Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, İT Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 389250.
- [40] Tekinsoy, M. A., Kayadelen, C., & TAŞKIRAN, T. (2005). *Suya doymun olmayan zeminlerin üç eksenli parametrelerinin belirlenmesi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(1), 65-74.
- [41] Khaboushan, E. A., Emami, H., Mosaddeghi, M. R., & Astaraei, A. R. (2018). *Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties*. Soil and Tillage Research, 184, 118-127.
- [42] Erdağ A. (2020). *Suya Doymun Olmayan Zemin Şevlerinde Yağış Yoğunluğunun Stabiliteye Etkisi*. Gazi üniversitesi, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 43.
- [43] Baker, R., & Frydman, S. (2009). *Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations*. Engineering Geology, 106(1-2), 26-39.
- [44] Gökoğlu, Ö. (2015). *Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizi*. Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, İT Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 389250.
- [45] Fang, H. Y., & Mikroudis, G. K. (1991). Stability of earth slopes. In *Foundation Engineering Handbook* (pp. 379-409). Boston, MA: Springer US.
- [46] Önalp, A. (2004). *Geoteknik bilgisi II: yamaç ve şev'lerin mühendisliği*. Birsen Yayınevi., 414 s.
- [47] Li, Y., & Mo, P. (2019). *A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review*. Geomorphology, 340, 67-83.
- [48] Varnes, D. J. (1958). *Landslide types and processes*. Landslides and engineering practice, 24, 20-47.
- [49] <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/maksimum-yagislar.aspx>
- [50] Bayrak, M. Ç. (2008). *Zemin suyu özelliklerinin emme basıncı üzerindeki etkileri*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [51] ASTM D5298-16. (2016). Standart test methhod for measurement of soil potential (suction) using filter paper.
- [52] Seki, K., Toride, N., & Th. van Genuchten, M. (2023) *Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties*. J. Hydrol. Hydromech. 71(1): 22-34. <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>