



**SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ŞEVLERİNDE YAĞIŞ
YOĞUNLUĞUNUN STABİLİTEYE ETKİSİ**

Ahmet ERDAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2020

Ahmet ERDAĞ tarafından hazırlanan “SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ŞEVLERİNDE YAĞIŞ YOĞUNLUĞUNUN STABİLİTEYE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Seyhan FIRAT

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa Kerem KOÇKAR

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Ahmet ERDAĞ
21/12/2020

SUYA DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ŞEVLERİNDE YAĞIŞ YOĞUNLUĞUNUN STABİLİTEYE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet ERDAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Şev yenilmeleri, Türkiye de dahil olmak üzere tüm dünyada olumsuz sonuçları olan yaygın doğal tehlikelerdir. Şev yenilmelerinin temel sebeplerinden biri de yağış infiltrasyonudur. Doygun olmayan zeminlerde yağışlar şev yenilmelerinin temel sebeplerinden biridir. Bunun nedeni; doygun olmayan zeminlerde bulunan negatif boşluk suyu basıncının görüldüğü emme bölgesinden kaynaklanmaktadır. Bu bölge zeminin kayma mukavemetindeki artıştan sorumludur. Yağış olayları sırasında ve sonrasında yer altı suyu seviyesi yükselir ve bu etki emme bölgesinin kaybolmasını tetikler. Bu durumlarda boşluk suyu basınçları pozitif olur ve doygun olmayan zeminlerde şev yenilmeleri gelişir. Bu çalışma; literatürden seçilen üç vaka çalışması ve Ankarada gelişen bir duraysızlığın değerlendirilmesinden oluşmaktadır. Vaka ve analiz çalışmalarında doygun olmayan zeminlerde şev duraylılığı ile yağış infiltrasyonu arasındaki ilişki araştırılmıştır. Doygun olmayan zeminin yağış infiltrasyonu etkisinde duraylılık analizleri GEOSTUDIO programının SEEP/W ve SLOPE/W modülü kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, matrik emme basıncının duraylılık analizlerinde dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğu görülmüştür. Yağış infiltrasyonu ile güvenlik katsayısı arasında ters ve doğrusal olmayan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Ayrıca infiltrasyon ile boşluk suyu basıncında meydana gelen değişimlerin güvenlik katsayısını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Suyu doygun olmayan zeminler, infiltrasyon, şev stabilitesi, yağmurla tetiklenen heyelanlar
Sayfa Adedi : 97
Danışman : Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

EFFECT OF RAINFALL INTENSITY ON THE STABILITY OF UNSATURATED SOIL SLOPES

(M. Sc. Thesis)

Ahmet ERDAĞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

Slope failures are common natural hazards in the world including Turkey with all its negative consequences. One of the main causes of slope failures is rainfall infiltration. Rainfall in unsaturated soils is one of the main causes of slope failure. The reason for this is the suction zone where the negative pore water pressure on unsaturated soils is observed. This zone is responsible for the increase in the shear strength of the soil. During and after rainfall events the ground water level rises and this effect triggers the loss of the suction zone. In these cases, pore water pressures become positive causing slope failures on unsaturated soils. This study consists of three verification case studies selected from the literature and assessment of a slope failure in Ankara. The relationship between slope stability and rainfall infiltration in unsaturated soils were investigated using these cases. The stability analyses of the unsaturated soil under the effect of rainfall infiltration were analyzed using SEEP / W and SLOPE / W modules of the GEOSTUDIO program. As a result of the study, it was observed that matric suction pressure is an important parameter that must be taken into account in slope stability analysis. It was determined that there is a reverse nonlinear relationship between rainfall infiltration and factor of safety. In addition, it has been determined that changes in pore water pressure with infiltration significantly affect the factor of safety.

Science Code : 91105

Key Words : Unsaturated soils, infiltration, slope stability, rainfall triggered landslides

Page Number : 97

Supervisor : Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a, analizlerimizde kullandığımız meteorolojik parametrelerin temininde desteklerini sunan değerli hocam Prof. Dr. Zeliha SELEK'e, tez çalışmam süresince emeği geçen Dr. Öğr. Üyesi Emre TOPÇU'ya, teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMI.....	15
3.1. Emme Gerilmesi Kavramı.....	19
3.3. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti	25
4. ŞEV DURAYLILIĞI	29
4.1. Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması	30
4.1.1. Düşme	32
4.1.2. Devrilme.....	32
4.1.3. Kayma	32
4.1.4. Yanal yayılma	33
4.1.5. Akma	33

Sayfa

4.1.6. Karmaşık	33
4.2. Şev Duraylılık Analizleri	34
4.2.1. Fellenius yöntemi	36
4.2.2. Bishop yöntemi	37
4.2.3. Basitleştirilmiş Janbu yöntemi	38
4.2.4. Spencer yöntemi.....	39
4.2.5. Morgenstern-Price yöntemi.....	40
5. MODELLEME YAKLAŞIMI	43
5.1. Hesaplama Araçları	43
5.1.1 Seep/w	44
5.1.2. Slope/w.....	45
6. VAKA VE ANALİZ ÇALIŞMALARI.....	47
6.1. Örnek Vaka I.....	47
6.2. Örnek Vaka II.....	57
6.3. Örnek Vaka III	62
6.4. Örnek Uygulama	71
6.4.1. Arazi çalışmaları	74
6.4.2. Laboratuvar deneyleri	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Afetin türüne göre afet olay sayılarının genel dağılımları.....	2
Çizelge 3.1. Terminoloji tariflerinde kullanılan saha ve laboratuvar doygunluk dereceleri	19
Çizelge 3.2. Emme ölçümü ve bileşenlerini ölçme cihazları	23
Çizelge 3.3. Doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemeti denklemleri	26
Çizelge 4.1. Şev kaymalarının mühendislik sınıflaması	31
Çizelge 4.2. Limit denge analizleri	36
Çizelge 6.1. Örnek Vaka I için programda kullanılan zemin parametreleri	47
Çizelge 6.2. Örnek Vaka II için programda kullanılan zemin parametreleri	58
Çizelge 6.3. Örnek Vaka III için programda kullanılan zemin parametreleri	63
Çizelge 6.4. SPT deney sonuçları	75
Çizelge 6.5. Deformasyon modülleri ve limit basınçlar	75
Çizelge 6.6. İndeks ve sınıflama deneyleri sonuçları	76
Çizelge 6.7. Ortalama yağış miktarı sonucu elde edilen güvenlik katsayıları	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Zemin mekaniğinin sınıflandırılması.....	15
Şekil 3.2. Doygunluk derecesindeki zeminin su seviyesi üzerindeki sınıflandırılması	16
Şekil 3.3. Suyu doymayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi	17
Şekil 3.4. Yerel ve bölgesel bazda doymayan zemin bölgesinin alt bölümleri	18
Şekil 3.5. Suyu daldırılmış kılcal tüp	21
Şekil 3.6. Zemin su karakteristik eğrisi ve parametrelerin tahmini	24
Şekil 3.7. Doygun olmayan zeminler için genişletilmiş Mohr-Coulomb yenilme zarfı.....	27
Şekil 4.1. Fellenius şev duraylılık analizi yöntemi	37
Şekil 4.2. Bishop'un şev analizi yöntemi.....	38
Şekil 4.3. Basitleştirilmiş Janbu şev analiz yöntemi.....	39
Şekil 4.4. Spencer şev analiz yöntemi	40
Şekil 4.3. Morgenstern-Price şev analiz yöntemi	40
Şekil 5.1. Seep/w yazılımı arayüz görüntüsü.....	45
Şekil 5.2. Slope/w yazılımı arayüz görüntüsü	46
Şekil 6.1. Örnek Vaka I için kullanılan kesitin geometrisi	48
Şekil 6.2. Hacimsel su içeriği fonksiyonu	49
Şekil 6.3. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu.....	49
Şekil 6.4. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu	50
Şekil 6.5. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi	51
Şekil 6.6. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı	51
Şekil 6.7. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi	52
Şekil 6.8. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı	52

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. 72 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi	53
Şekil 6.10. 72 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı.....	53
Şekil 6.11. 96 saat yağış infiltrasyonundan sonra geçici koşullar altında simüle edilmiş şev geometrisi.....	54
Şekil 6.12. 96 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı.....	54
Şekil 6.13. 120 saat yağış infiltrasyonundan sonra geçici koşullar altında simüle edilmiş şev geometrisi.....	55
Şekil 6.14. 120 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı.....	55
Şekil 6.16. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi	56
Şekil 6.17. Örnek Vaka II için kullanılan kesitin geometrisi.....	58
Şekil 6.18. Hacimsel su içeriği fonksiyonu	58
Şekil 6.19. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu.....	59
Şekil 6.20. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu	59
Şekil 6.21. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı	60
Şekil 6.22. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	60
Şekil 6.24. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi	61
Şekil 6.25. Örnek Vaka III için kullanılan kesitin geometrisi	63
Şekil 6.26. Hacimsel su içeriği fonksiyonu	63
Şekil 6.27. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu.....	64
Şekil 6.28. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu	64
Şekil 6.29. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının dağılımı	65
Şekil 6.30. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	65

Şekil	Sayfa
Şekil 6.31. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı	66
Şekil 6.32. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	66
Şekil 6.33. 36 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı	67
Şekil 6.34. 36 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	67
Şekil 6.35. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı	68
Şekil 6.36. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	68
Şekil 6.38. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi	69
Şekil 6.39. Bölgenin yıllık yağış verisi.....	72
Şekil 6.40. Analiz için kullanılan kesitin geometrisi	72
Şekil 6.41. İnceleme alanında meydana gelen şev kayması.	73
Şekil 6.42. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan şev duraylılık analizi sonucu ..	76
Şekil 6.43. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu.....	77
Şekil 6.44. Hacimsel su içeriği fonksiyonu	77
Şekil 6.45. Yağışın modellendiği analizlerde (transient koşul) kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları	78
Şekil 6.46. 2013 yılına ait (25,14 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	79
Şekil 6.47. 2014 yılına ait (50,35 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	79
Şekil 6.48. 2015 yılına ait (36,68 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	80
Şekil 6.49. 2016 yılına ait (40,83 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	80
Şekil 6.50. 2017 yılına ait (38,68 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	81

Şekil**Sayfa**

Şekil 6.51. 2018 yılına ait (51,49 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	81
Şekil 6.52. 2019 yılına ait (31,29 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı.....	82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Yağış kaynaklı şev yenilme mekanizması	3
Resim 4.1. Kayma türleri	34

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 6.1. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
c'	Efektif kohezyon
c	Kohezyon
c_{ult}	Toplam kohezyon
GS	Güvenlik katsayısı
T	Mutlak sıcaklık
θ_r	Kalıcı hacimsel su içeriği
θ_w	Hacimsel su içeriği
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_k	Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	Dane birim hacim ağırlığı
λ	Düzeltilme katsayısı
χ	Bishop efektif düzeltilme katsayısı
σ	Toplam gerilme
σ'	Efektif gerilme
ϕ	Kayma mukavemet açısı
ϕ'	Efektif kayma mukavemet açısı
ϕ^b	Matrik emmeye bağlı kayma mukavemet açısı
ψ	Zemin emme gerilmesi
ψ_r	Kalıcı matrik emme değeri
ψ_e	Hava girişi ile oluşan matrik emme değeri
τ	Kayma gerilmesi
τ_f	Kayma dayanımı
ζ	Sönüm oranı
ν	Poisson oranı
β	Şev eğim açısı
w	Su içeri

Kısaltmalar**Açıklamalar****FEM**

Sonlu elemanlar metodu

LEM

Limit denge metodu

SWCC

Zemin su karakteristik eğrisi

SEEP/W

Yer altı suyu analizi için sonlu elemanlar yazılımı

SLOPE/W

Şev duraylılık analizi için limit denge yazılımı

1. GİRİŞ

Şev yatay düzleme belirli bir açıda duran zemin yüzeyidir. Şevler doğal veya mühendislik ürünü olabilmektedirler. Her şev, yerçekimine ve göçmeye karşı koyan benzersiz zemin karakteristiklerine ve geometrik özelliklere sahiptir. Şev göçmeleri, zemin kütlelerinin aşağı ve dışarı doğru, yavaşça veya aniden kaymasıyla meydana gelmektedir. Göçmeler, genellikle zemin tabakası boyunca yayılan kılcal çatlaklarından başlar [1].

Mühendislik ve doğal şevlerde duraysızlık ile ilgili sorunlar araştırmacılar için ortak zorluklardır. İnşaat alanlarında duraysızlık yağış, yer altı suyu seviyesindeki artış ve gerilme koşullarındaki değişim nedeniyle ortaya çıkabilir. Benzer şekilde uzun yıllar duraylı olan eğimler; geometrideki değişiklikler, dış etkenler ve kayma mukavemeti kaybı nedeniyle aniden yenilmeye maruz kalabilirler [2]. Dış etkenler araştırılırken klasik zemin mekaniğinde kapiler bölgede mevcut olan suyun şev duraylılığı üzerindeki etkisi tasarımlarda ihmal edilir. Fakat özellikle son yıllarda suya tam doygun olmayan zemin mekaniğinin gelişmesiyle kapiler bölgenin etkisi büyük önem kazanmıştır.

Ilıman iklimlerde doğal şevler daima değişen çevreye ve iklime maruz kalmaktadırlar [3]. Küresel iklim sisteminin değişmesi de şev göçmelerini tetiklemektedir. İklim değişikliği nedeniyle bazı bölgeler kuraklaşırken bazı bölgelerin yağışları artmaktadır. Yağışın sıklığının ve yoğunluğunun arttığı bölgede heyelanların da artacağı öngörülebilir. Ayrıca, artan nüfus nedeniyle de alan darlığından dolayı bazı bölgelerde yamaçlara ev yapılabilmektedir. Bu da ilerleyen yıllarda şev kayması sonucu oluşan hasar miktarını arttıracaktır [3].

Ülkemizde meydana gelen heyelanlar incelendiğinde mart ayı heyelanların en çok görüldüğü aydır. Mart ayını nisan, ocak, şubat ve mayıs ayları izler. Ekim ayında ise hiç etkili heyelana rastlanmamıştır. Heyelanların %65'i ilkbaharda mevsiminde meydana gelmiştir. Bunun başlıca nedeni; genellikle ilkbahar mevsiminin yağışlı geçmesidir. Ayrıca dağlarda bulunan karların bu mevsimde erimesiyle birlikte ortaya çıkan kar sularının da heyelan oluşumunu hızlandırmasıdır [4]. Afetin türüne göre en fazla afet olay sayısının ve etkilenebilecek yapı sayısının heyelan sonucu olduğu Çizelge 1.1'de görülmektedir [5].

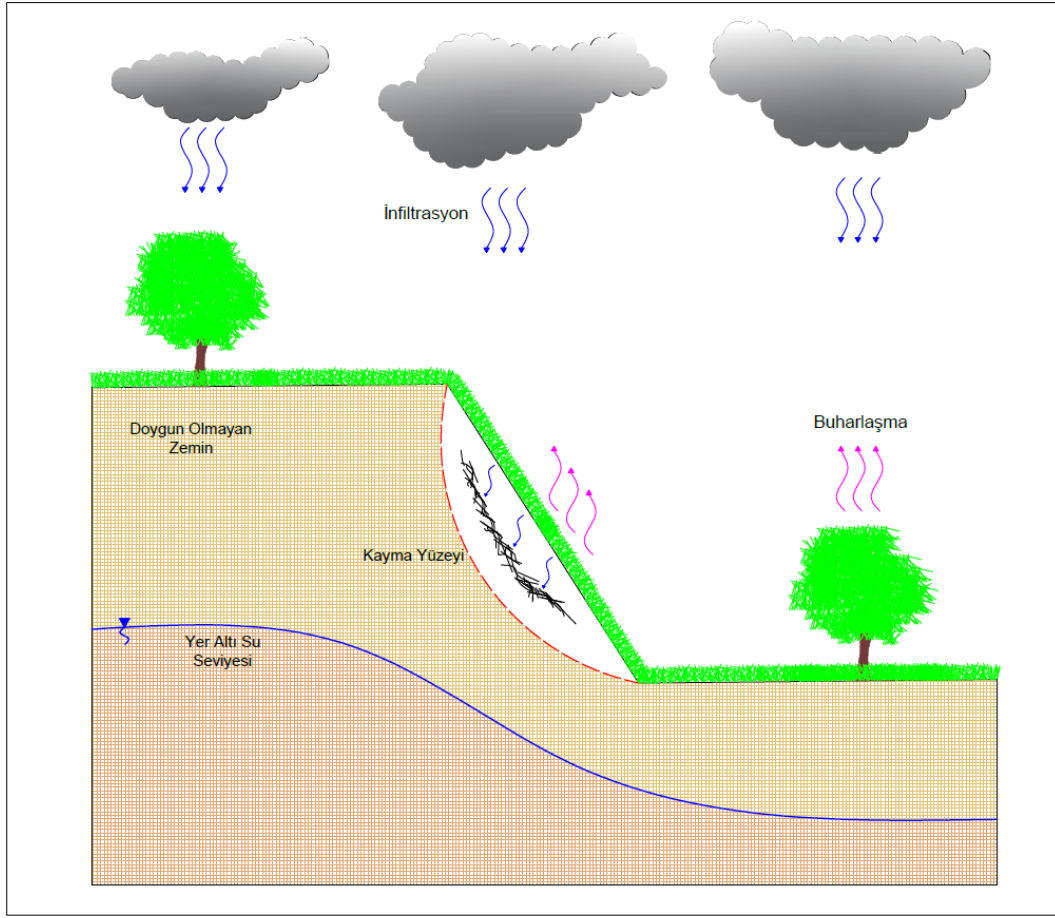
Çizelge 1.1. Afetin türüne göre afet olay sayılarının genel dağılımları

Afetin Türü	Afet Olay Sayısı	Afet Olaylarından Etkilenen/Etkilenebilecek Durumdaki Yapı Sayısı
Heyelan	13,494	59,345
Kaya düşmesi	2,956	19,422
Su baskını	4,067	22,157
Deprem	5,318	158,241
Diğer afetler	1,175	9,237
Çığ	731	12,210
Çoklu afetler	2,024	12,200

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere, afetin türüne göre dağılımda heyelanlardan etkilenen/etkilenebilecek yapı sayısı 59,345 olup, afet olay sayısında %45’lik bir paya sahiptir. Bu veriler ışığında, heyelan üzerine yapılan çalışmaların kapsamlı hale gelmesi için klasik zemin mekaniğinin yanı sıra doygun olmayan zemin mekaniğinin de önemini ve gerekliliğini arttırmıştır [5].

Doygun olmayan zeminlerin gözeneklerine etki eden suyun en azından geçici olarak mühendislik yapılarının duraylılığında önemli rol oynayabileceği uzun zamandır bilinmektedir. Suyun varlığında ve konumunda meydana gelen değişimler duraylı durumda bulunan şevleri etkilemektedir.

Son yıllarda iklimsel koşullarda meydana gelen değişim özellikle küresel sıcaklığın artmasından etkilenmektedir. Pek çok ülke uzun süren ve daha şiddetli yağışlar yaşamaktadır [6]. Doygun olmayan şevler üzerinde yapılan araştırmalar, iklim değişikliği nedeniyle önemli miktarlarda artan yağışların daha sık şev kaymalarına sebebiyet verdiğini ortaya koymuşlardır [7]. Yağış kaynaklı şev yenilme mekanizması Resim 1.1’de gösterilmektedir [8].



Resim 1.1. Yağış kaynaklı şev yenilme mekanizması [8]

Zemin şevlerine yağmurun sızması son derece karmaşık bir problemdir. Çünkü zemin permeabilitesi, zemin başlangıç nemi ve zeminin su tutma karakteristiği gibi faktörler şev duraylılığında etkin rol oynar. Aşırı yağış periyotları süresince ve sonrasında, derin ve sık kaymalar, normal yağmur koşulları altında duraylı halde bulunan şevlerde de görülebilir [9]. Genel varsayıma göre suyun infiltrasyonu bu tip şev kaymalarının nedenlerinden biridir. Klasik zemin mekaniğinin aksine doymun olmayan zemin mekaniği, kayma mukavemeti üzerine etki eden matrik emme basıncı ve zemin su karakteristik eğrisini (SWCC) duraylılık analizlerinde dikkate almaktadır. Emme basıncı; zeminin su tutma potansiyeli, zemin su karakteristik eğrisi ise matrik emme basıncının zeminin doymunluk derecesi, su içeriği veya hacimsel su içeriği ile ilişkisiyle elde edilen eğridir [10]. Doymun olmayan zeminler için önemli olan bu parametreler doymun olmayan zemin mekaniği bölümünde detaylı şekilde anlatılacaktır.

Bu çalışmada, farklı vaka analizleri ile doymun ve doymun olmayan zemin mekaniği prensiplerini kullanarak şev duraylılık analizleri yapılması amaçlanmıştır. Analizler

sonucunda Şev modelleri için güvenlik katsayıları elde edilecektir. Ayrıca yer altı su seviyesi değişiminin; hem doygun hem de doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan analizlerde güvenlik katsayısına etkisi incelenecektir. Suyun zemine infiltrasyonu ve Şev duraylılığı, sayısal analizler (SEEP/W) ve limit denge analizleri (SLOPE/W) ile suya doygun olmayan zeminlerde farklı yağış Őiddeti ve süreleri altında gerçekleştirilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Doygun olmayan zeminlerin davranışı üzerine yapılan araştırmalar 1920'lere dayanmaktadır. Ancak 1960'lı yıllarda başlayan ve son on yılda yoğunlaşan çalışmalar sonucunda doymuş olmayan zemin mekaniği ilkelerine dayanan şev duraylılığı analizleri üzerine araştırmalar yaygınlaştırılmıştır. Fredlund ve Morgenstern 1976 yılında doymuş olmayan zeminlerin, doymuş zemin davranışının bir uzantısı olarak görülebileceğini açıklamışlardır. Fredlund ve diğer bilim insanları tarafından yapılan çalışmalar ile doymuş olmayan zemin mekaniği inşaat mühendisliği uygulamalarında önem verilen bir konu haline gelmiştir [11].

Tez çalışmasının konusunu oluşturan suya doymuş olmayan zemin şevlerinde yağış yoğunluğunun şev duraylılığına etkisi ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar mevcuttur.

Cho ve Lee (2001), yağış infiltrasyonunun meydana geldiği doymuş olmayan bir şev için güvenlik sayısının hesaplanmasına yönelik bir prosedür sunmaktadırlar. Yağışın zemine sızma sürecini ve şev davranışı üzerindeki etkisini, iki boyutlu sonlu elemanlar analiz programı kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca matrik emme basıncının doymuş olmayan zemin mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek için modifiye edilmiş Mohr-Coulomb yenilme kriterini kullanmışlardır. Güvenlik katsayısını, sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme alanına dayandırarak hesaplamışlardır. Sonuçlarda, doymuş olmayan zemin şevlerinde infiltrasyon sürecinin ve infiltrasyon sırasında hidrolik iletkenliğin şev duraylılığı üzerindeki etkisini göstermektedirler [12].

Bujang, Faisal ve Low (2006), mevsimsel yağışların yoğun olduğu bölgelerdeki heyelanları araştırmak için iki laboratuvar modeli oluşturarak analizler gerçekleştirmişlerdir. İkinci şev modelinden farklı olarak ilk modelde, zemin yüzeyindeki sızmayı engelleyici kaplama bulunmaktadır. Laboratuvar analizlerinde kaplanan yüzey, çıplak yüzeye kıyasla daha düşük infiltrasyon oranına sahip olduğunu ve matrik emme basıncının ölçümünde çıplak yüzeyin matrik emme basıncının daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Matrik emme basınçlarının hesaplanan güvenlik katsayılarında farklılığa yol açtığını belirtmişlerdir [13].

Hsin-Fu, Chang, Chen ve Lee (2006), yağışların yer altı suyuna ve şev kaymalarına neden olan matrik emme basıncına etkisini inceleyerek güvenlik katsayısının hesaplanması için bir çalışma sunmaktadırlar. Yağışın zemine infiltrasyonu ve zemin davranışı üzerindeki etkisini, değiştirilmiş Mohr-Coulomb kayma kriterini kullanarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda şev duraylılığı ile yakından ilişkili matrik emme basıncının, yağış olayları tarafından kontrol edilen doygunluk derecesinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca doygun olmayan zeminlerde meydana gelen heyelanların esas olarak yağış olaylarına tepki olarak matrik emme basıncı ile tetiklendiğini açıklamışlardır. [14].

Chen ve Zhung (2008), 2000 yılında Kuzey Tayvan'ın birçok bölgesinde ciddi can ve mal kayıplarına neden olan şiddetli yağışları incelemişlerdir. Akarsu kenarında meydana gelen şev yenilmeleri Kuzey Tayvan'da maddi hasarlara yol açmıştır. Şev kaymalarını ve neden olduğu çevresel zararları incelemek için laboratuvar testleri ve şev duraylılık analizleri yapmışlardır. Yağmur suyu infiltrasyonu sırasında şev duraylılığını, gerilme varyasyonunu ve zemindeki boşluk suyu basıncını analiz etmek için infiltrasyon sürecini inceleyen sayısal analizler kullanmışlardır. Analiz sonuçlarında, doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemetine neden olan matrik emme basıncının uzun süreli yağışlarda azaldığını ve şev duraylılığını etkilediğini belirtmişlerdir [15].

Xiao-dong, Chen, Guo ve Song (2008), yağış ve sızma ile ilgili şev duraylılık analizi gerçekleştirmişlerdir. Özellikle, iki tür sızma modeli (doygun ve doygun olmayan) oluşturarak sığ yenilme ve mevcut kayma yenilmesini dikkate almışlardır. Mein-Larson infiltrasyon modeline ve sınırlı denge yöntemine dayanan yağış etkisi altında şev duraylılık analizi için uygun ve genel bir analitik model kullanarak kayma mukavemetindeki değişim, yoğunluk, boşluk suyu basıncı ve sızma kuvvetindeki değişimin etkilerini açıklamışlardır. Sızma kuvvetinin matrik emme basıncının yanında zeminin kohezyonunu ve aynı zamanda pozitif boşluk suyu basınçlarını etkilediğini belirtmişlerdir [16].

Gui ve Han (2008), 1999'da Malezya'da şiddetli yağış döneminde meydana gelen heyelanlardan sonra saha çalışması, topoğrafya araştırması, yer altı incelemesi ve laboratuvar testlerinden oluşan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada heyelan olayından 42 gün önce elde edilen yağış kayıtlarını, heyelanlar ile yağış arasındaki ilişkiyi incelemek için derlenmiş ve kullanmışlardır. Yağış döneminde bu zeminlerin davranışını iki aşamalı bir yaklaşımla incelemişlerdir. Bunlar: (1) şevlerdeki boşluk suyu basıncının

dağılımını elde etmek için sızma ve yer altı suyu akışını analiz etmek ve (2) ilk aşamada elde edilen boşluk suyu basınç profili ile şevlerin duraylılığının analiz edilmesidir. Analizler sonucunda; yağışların zemine sızması, zeminlerdeki matrik emme basıncını ve dolayısıyla şevlerin duraylılığını sürdürmede hayati olan kayma mukavemetini azalttığını belirtmişlerdir [17].

Jianping, Qingquan ve Jiachun (2009), sonlu elemanlar ve limit denge analiz yöntemini kullanarak yağış infiltrasyonunun şev duraylılığı üzerindeki etkilerini incelemek için sayısal bir model oluşturmuşlardır. Model, boşluk suyu basıncı varyasyonları, zeminin kendi ağırlığı ve yağış infiltrasyonunu içermektedir. Elde ettikleri sonuçlarda yağış infiltrasyonunun özellikle eğimlerde boşluk suyu basıncını arttırdığını ve böylece şev kaymasını tetiklediğini belirtmişlerdir. Kayma düzleminin derinliğinin yağış süresiyle doğru orantılı olduğunu ve başlangıç güvenlik katsayısının 1,052'den infiltrasyon etkisi ile 1,037'ye düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca sığ derinlikteki kayma düzleminin elde edilen güvenlik katsayısıyla duraylı kalamayacağını belirtmişlerdir [18].

Li, He, Wang ve Qwang (2009), boşluk suyu basınç artışının ve hacimsel su içeriğinin mühendislik yamaçlarındaki etkilerini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında Çin'in Yunnah bölgesinde bulunan heyelanı analiz için kullanmışlardır. Sonuçlar, öncül yağışların şev duraylılığında önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Boşluk suyu basınçlarının, zeminin üst katmanında belirgin bir şekilde değiştiğini ve şevin üst kısmında çatlaklar meydana gelmesi, şev kayması ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Şev yenilmesinin önemli nedenlerinden biri olarak yağıştan sonra durgun suyun yavaş yavaş kesme örselenmesine maruz kalmış zemin katmanlarındaki boşluk suyu basınçlarını değiştirerek matrik emme basıncına etki etmesi olarak açıklamışlardır. Analiz sonucunda hesaplanan güvenlik katsayısının 0,97'ye yaklaştığını belirtmişlerdir [19].

Oh ve Vanapalli (2010), çalışmalarında homojen bir şev modelini sıkıştırarak yağmur etkisi altında duraylılık analizi yapmışlardır. Analizlerinde dört farklı senaryo bulunmaktadır. Bunlar; doymuş durum, doymuş durumla birlikte su birikmesine izin verilen durum, doymuş olmayan durum için kısa süreli infiltrasyon analizi ve doymuş olmayan durum için uzun süreli infiltrasyon analizidir. Analiz için kullanılan modele uygun parametreleri üç eksenli basınç deneyi ile elde etmişlerdir. Analiz sonuçlarında doymuş olmayan koşulları içeren senaryolarda; kısa süreli infiltrasyon analizi güvenlik katsayısının, uzun süreli infiltrasyon

analizi sonucunda elde edilen güvenlik katsayısından büyük olduğunu ve göllenmeyi içeren doymun durumdaki şevin güvenlik katsayısının, doymun durumdaki şevin güvenlik katsayısından küçük olduğunu belirtmişlerdir [20].

Muntohar ve Liao (2010), Taiwan’da dağlık bölgelerde yağmur fırtınası ve tayfun sırasında şiddetli yağış nedeniyle sığ yamaç yenilmelerinin meydana gelmesi üzerine araştırma gerçekleştirmişlerdir. Heyelanların dağlık bölgelerde yaygın olduğunu ve şev duraylılığını analiz etmek için kullanılan modeller arasında, şev duraylılık modeli ile entegre yağmur suyu sızma modeli, yağmur fırtınası sırasında şevlerin duraylılığını değerlendirmek için etkili bir yol olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında sığ tip şev yenilmesi için Green-Ampt infiltrasyon modeli ile sonsuz şev modeli kullanmışlardır. Çalışmanın uygunluğunu doğrulamak için analizlerinde İtalya ve Hong Kong’da meydana gelen yedi heyelan vakasını kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, önerilen modelin yenilmiş veya yenilmek üzere olan yamaçları ayırt etmek için kullanılabileceğini ve modelin yağışa bağlı sığ heyelan oluşumunun, oluşum süresini ve kayma derinliğini tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21].

Tran, Thu, Lee, Sewook ve Nguyen (2015), Kuzey Vietnam’ın Yen Bia şehrindeki yağışların kazı çalışması sonucunda ortaya çıkan şevin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada yağmurun şev kaymalarına etkisini araştırmak için doğal durumdaki zemin koşullarını ve zemin permeabilitesinin boşluk suyu basıncı üzerindeki etkilerini dikkate almışlardır. Oluşturulan modellemede limit denge yöntemlerinden Bishop yöntemini kullanmışlardır. İnceleme sonucunda yağmur başlarken yenilmenin olmadığı ancak 14 saatlik yağmur süreci sonucunda kazı yapılan alanda şev yenilmesinin meydana geldiğini tespit etmişlerdir [22].

Seboong ve Ning (2015), yağışa bağlı farklı şevlerde meydana gelen yenilme mekanizmasını incelenmişlerdir. Çalışmalarında efektif gerilme, emme gerilimi karakteristik eğrisi (SSCC) ile temsil edildiğinden, emme gerilimi karakteristik eğrisi ile zemin su tutma eğrisi (SWRC) aynı hidro-mekanik parametre seti ile birleştirmişlerdir. Kaydedilen yağış, ölçülen kayma mukavemeti parametreleri ve saha jeolojisini dikkate alarak yenilme mekanizmasını yeniden yapılandırmak için geçici şev duraylılık analizleri yapmışlardır. Şev geometrisi ve hidro-mekanik özelliklerin yanı sıra, yağış geçmişindeki farklılıklar da şev yenilmesinde güvenlik katsayısını 1.0’ın altına düşmesine neden olabileceğini belirtmişlerdir [23].

Yuan, Papaioannou ve Daniel (2015), zeminin permeabilitesinin uzamsal değişkenliğini göz önünde bulundurarak rasgele yağış olayları altında sonsuz şevlerin güvenilirliğini hesaplamışlardır. Sızma sürecini, Richard denkleminin sayısal bir çözümünü uygulayan Hydrus-1D’de modelleyerek zeminin hidrolik iletkenliğinin tek boyutlu rastgele alan modeli ile birleştirmişlerdir. Sonuçlarda yağış süresinin yanı sıra yoğunluğunun da şev güvenirliliği üzerindeki etkisinin olduğu belirlemiştirlerdir. [24].

Cho (2016), şiddetli yağış nedeniyle hava ve su akışı arasındaki etkileşimlerin doygun olmayan zemin şevlerinin duraylılığı üzerindeki etkisini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Analizde sızma davranışını zemin türüne göre incelemek amacıyla, benzer ortamlar altında iki tür zeminli akış analizi uygulamıştır. İki fazlı infiltrasyon analizinden elde edilen sonuçları daha sonra mukavemet azaltma yöntemi ile duraylılık analizine girdi olarak kullanmıştır. Ayrıca tek fazlı bir su akış modeline dayanan infiltrasyon ve duraylılık analizleri de gerçekleştirerek yağış infiltrasyonundan kaynaklanan hava akışının doygun olmayan bir zemin üzerindeki etkilerini netleştirmeye çalışmıştır. Analiz sonucunda yağmurun suya doygun olmayan bölgedeki havayı değiştirerek infiltrasyon sırasında boşluk hava basıncında bir artışa neden olduğunu belirtmiştir. Zemin boşluğundaki bu tür su-hava etkileşimleri şev duraylılığını ve davranışını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemiştir [25].

Taşkıran ve Fidan (2017), yağışın ve yağış etkisindeki zeminin permeabilitesinin şev duraylılığına olan etkisini parametrik olarak incelemiştirlerdir. Zeminin permeabilitesini ve zemine ait kayma direnci parametrelerini deneysel çalışmalar ile belirlemiştirlerdir. Yağış yoğunluğu, yağış süresi ve zemin hidrolik iletkenliğinin etkileri için Geostudio yazılımını kullanmışlardır. Bishop yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada, güvenlik katsayısında meydana gelen değişimler ve incelenen tüm parametrelerin şev duraylılığını farklı oranlarda etkilediğı, yağış yoğunluğu ile güvenlik katsayısı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu yapılan çalışmayla elde etmişlerdir. Bu ilişkinin, matrik emme basıncı ve hidrolik iletkenlik arasında bulunan non-lineer ilişkiden kaynaklanmakta olduğunu belirtmişlerdir. Yağış süresinin infiltrasyona ve buna bağlı olarak şev duraylılığına olan etkileri incelendiğinde; kısa süreli yoğun yağışların, uzun süreli fakat görece olarak daha düşük yoğunluklu yağışlardan daha fazla etkili olduğunu belirtmişlerdir [26].

Hakon Heyerdahl (2017), Doğu Norveç’te 2000 yılında şiddetli yağış sonrasında meydana gelen bir şev yenilmesi üzerinde çalışmıştır. Matrik emme basıncının kayma mukavemeti

üzerindeki etkisini araştırmak için doygun olmayan bölgeden kesme kutusu aparatı kullanarak numune almıştır. Laboratuvarında infiltrasyon analizleri gerçekleştirerek şev duraylılık analizlerinde güvenlik katsayısının değişimini gözlemlemiştir. Uzun vadeli infiltrasyon ile beraber güvenlik katsayısında düşüş olduğunu belirtmiştir [27].

Lin ve Wenwen (2017), yağış şiddetinin şev duraylılığı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir sayısal model oluşturmuşlardır. Sayısal modelde farklı iki zemin türü olan killi ve kumlu zeminler üzerinde analizler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, şevin güvenlik katsayısının başlangıçta etkili yağış günleri olarak tanımlanan yağış sırasında azaldığını ve sonra duraylı hale geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca aynı yağış yoğunluğu altında, etkili yağış günlerinde kumlu zeminin nihai güvenlik katsayısının killi zeminden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [28].

Fathiyah ve Erly (2017), yağışlı mevsimlerde Endonezya'da heyelanların meydana gelmesiyle bir çalışma başlatmışlardır. Yağış infiltrasyonunun yamaçların güvenlik katsayısı üzerindeki etkisini gösteren çalışmada, farklı eğim açısına sahip doygun olmayan zeminleri analiz etmişlerdir. Analizde 30, 45 ve 60 derecelerdeki eğime sahip şev analizi ile normal, ileri ve gecikmeli üç farklı yağış yoğunluğunu dikkate almışlardır. Analizlerde, yer altı suyu akım modeli Seep/w ve şev duraylılık analizinde Slope/w yazılımları kullanmışlardır. Gelişmiş yağış paterni uygulaması altında 60 derecelik eğim için en düşük güvenlik katsayısına, normal yağmur paterni uygulaması altında 30 derecelik eğim için en yüksek güvenlik katsayısına ulaşıldığını belirtmişlerdir. Güvenlik katsayısının, negatif boşluk suyu basıncından ve yer altı suyu seviyesinden etkilendiğini açıklamışlardır [29].

Zaky ve Seboong (2017), Güney Kore'nin Busan şehrinin çeşitli bölgelerinde şiddetli yağışlar nedeniyle meydana gelen heyelanları araştırmışlardır. Doygun halde olmayan tek boyutlu zemin modeli kullanarak sızma ve duraylılık analizi gerçekleştirmişlerdir. Yenilme bölgelerindeki vaka geçmişinde, doygun olmayan zemin katmanları sızma analizi ile tüm derinlik için neredeyse doygun hale geldiğini ve sonuç olarak güvenlik katsayısının 1.0'in altına düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca heyelanın meydana gelmediği zemin bölümlerinde zamanla sızma ile birlikte doygunluk derecesinin arttığını belirtmişlerdir. Heyelan analizinde zemin su karakteristik eğrisi, hidrolik iletkenlik ve emme gerilim karakteristik eğrisi çerçevesinde geçici sızma ve duraylılık analizlerinin heyelan alanındaki yenilmeleri simüle edebileceğini açıklamışlardır [30].

Junghwan, Yongmin, Sangseom ve Moonhyun (2017), bir saha araştırması ile kısmen doymuş zemin yamaçlarında yağış kaynaklı heyelanları rapor etmek için çalışma yapmışlardır. Umyeonsan heyelanları üzerine 2011 yılında başlatılan kapsamlı bir analiz ile aşırı yağış altında doymuş olmayan zemin şevleri incelemişlerdir. Heyelanların nedeni ile ilgili temel çalışmalar yaparak zemin derinliği, yenilme mekanizması, yer altı suyu akışının etkisi, ıslatma bandının aşağı doğru hareketi ve yer altı suyu seviyesinin artması gibi bir dizi teknik bulgular elde etmişlerdir. Buna dayanarak, doymuş olmayan zeminlerin hidrolik parametrelerini elde etmek için alan matrik emme basıncını içeren, yağış kaynaklı bir heyelan analiz yöntemi önermişlerdir. Matris emiliminin, öncül bir yağışa göre heyelan analizi için infiltrasyondaki değişim oranını yönettiğini açıklamışlardır. Sonuçlarda, heyelan aktivitelerinin öncelikle yağış infiltrasyonuna, zemin özelliklerine, şev geometrilerine, bitki örtüsüne ve yer altı suyu seviyesi pozisyonlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [31].

Hsiao, Hsieh, Yeh, Lin ve Phan (2018), 2005'ten 2012'ye kadar Tayvan'ın Chaishan bölgesindeki uzun süreli çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlarda bölgedeki yıllık yanal yer değiştirmelerin Tayvan Boğazı'na doğru yaklaşık 8 santim olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında Chaishan bölgesinin jeolojik yüzey profillerinin sırasıyla kireçtaşı, kil tabakası ve çamurtaşından oluştuğunu belirtmişlerdir. Her yıl Tayvan'da meydana gelen yağışlar, yer altı suyu seviyesinin yükselmesine ve zemin kütlesi içindeki boşluk suyu basıncının artmasına buna bağlı olarak Chaishan'ın bazı bölgelerinde, özellikle A Tapınağı'nda (Shan Hai Tapınağı) zemin hareketlerine neden olduğunu açıklamışlardır. Zeminin, doymuş olmayan zemin olarak kabul edildiği şev duraylılık analizi için limit denge (LE) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, yer altı suyu miktarlarının biriktirilmesinin kolay olduğunu tabakalarda artan boşluk suyu basıncının düşük güvenlik katsayısına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada hem yer altı suyu seviyesi hem de yağmur sürelerini dikkate almışlardır [32].

Jagodnik ve Arbanas (2019), 2014 yılında Hırvatistan'ın kuzey bölgesinde birkaç ay boyunca yoğun ve kesintisiz yağmurlar sonucunda meydana gelen heyelanlar nedeniyle bir çalışma yapmışlardır. Heyelanlardan sonra kayan kütle üzerinde doymuş olmayan bölgeden örselenmemiş numuneler alarak negatif boşluk suyu basınçlarının şev duraylılığı ve heyelan aktivasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için kapsamlı zemin laboratuvarı testi ve sayısal analiz yapmışlardır. Laboratuvar çalışmalarında, kısa süreli yağış infiltrasyon işleminin ve eğiminin şev duraylılığını nasıl etkilediğine dair bazı temel bilgiler elde etmişlerdir. Elde

ettikleri sonuçlarda tanımlanan koşullar ve uygulanan yağmur altında güvenlik katsayısının 1.0'ın altına düştüğünü ve yağmurdan önce güvenlik katsayısının uzun süre boyunca 1.0'den büyük ve sabit kaldığını göstermişlerdir [33].

Peranic, Jagodnik ve Arbanas (2019), Hırvatistan'ın Valici bölgesinde 2014 yılının şubat ayında meydana gelen marnlı-killi, şistli tabakalarda oluşan ve içinde iri çakılları ve kayaç parçaları da bulunan heyelanlar nedeniyle bir araştırma yapmışlardır. Valici heyelanı Hırvatistan'da şubat ayında, çoğunlukla kesintisiz yağışlardan sonra meydana gelmiştir. Doymamış bölgedeki negatif boşluk suyu basınçlarının heyelan aktivasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için kapsamlı zemin laboratuvarı testi ve sayısal analizler yapmışlardır. Heyelan gövdesinin yüzeysel kısmından örselenmemiş zemin örnekleri ile doymamış koşullarda zeminin hidro-mekanik özelliklerini elde etmek için laboratuvar ölçümleri yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, tanımlanan koşullar ve uygulanan yağış altında güvenlik katsayısının 167 günlük simülasyon boyunca yağışla beraber 1,6 değerinden 1,0'ın altına düştüğünü belirtmişlerdir [34].

Zhongjie, Zhenjiang, Hongyu, Jianbing ve Xiangjun (2019), insan faaliyetlerinin neden olduğu heyelanları araştırmak için Çin'in Shaanxi eyaleti, Yan'an şehri Liuwanjia'daki kazıdan ve yağıştan sonra meydana gelen heyelanları araştırmışlardır. Liuwanjia heyelanını bir vaka çalışması olarak seçerek bu tür heyelan oluşum özelliklerini ve mekanizmasını incelemek için detaylı saha haritalama, 3D lazer tarama ve laboratuvar testleri yapmışlardır. Saha araştırmalarının analizlerine dayanarak, kazının doğrudan neden olan bir faktör olduğunu, yağmur infiltrasyonunun da heyelan oluşumunda önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Kazıdan kaynaklanan boşaltma çatlaklarının, yağmur suyuna sızması için tercih edilen bir yol sağladığı ve kazıyla birlikte suyun şev duraylılığına önemli ölçüde etki ettiğini belirtmişlerdir [35].

Chiu, Chen ve Yeh (2019), sızma ve yer altı suyunu yaygın olarak sığ heyelanlara neden olan ana faktörler olarak kabul etmişlerdir. Bununla birlikte akışın etkisini dikkate almışlardır. Çalışmada, akışın etkisini göstermek için fiziksel sürece dayalı sığ heyelan modelini geliştirmişlerdir. Sığ su (dinamik) ve Richards denklemini oluşturdukları modele uygulamışlardır. Bölgesel heyelanların olasılığını değerlendirmek için sonsuz bir şev duraylılığı analizi gerçekleştirmişlerdir. Küçük bir havza modelini laboratuvar ortamında oluşturarak fırtına sırasında akış ve güvenlik katsayısının varyasyonlarının simülasyonlarını

uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, yüzey doygun hale geldikten sonra, artan yüzey suyu derinliğinin neden olduğu basınç nedeniyle güvenlik katsayısının değişmeye devam edebileceğini göstermişlerdir [36].

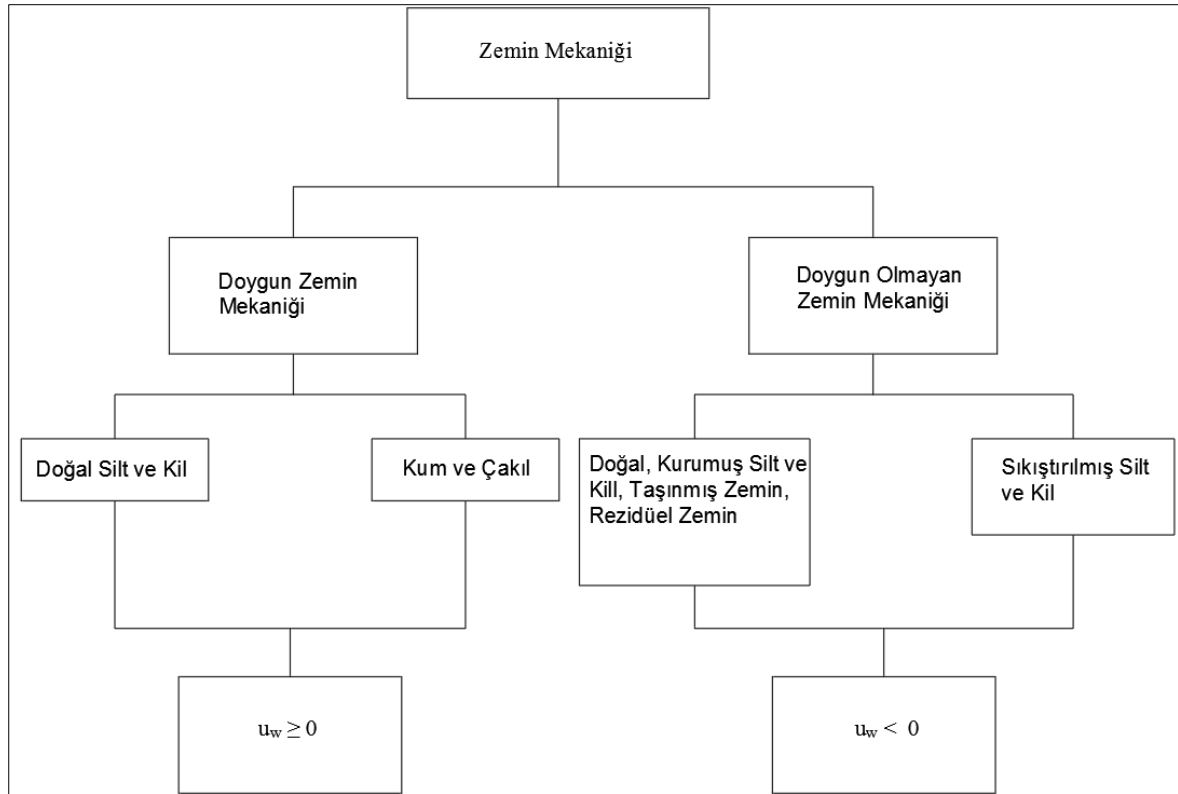
Zhanga, Zhu ve Shihua (2020), şevlerin duraylılığının evrimsel sürecini anlamak için bir dizi analizler yapmışlardır. Farklı çatlak boyutlarına sahip şevlerde yağmur suyunun analizi için Green-Ampt infiltrasyon modelini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar; doymamış infiltrasyon durumunda hem çatlama hem de yağış yoğunluğunun neden olduğu zemin infiltrasyon kapasitesindeki bir artışın olduğunu ve eğimin kararsız bir duruma doğru geliştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca güvenlik katsayısının yağışla beraber yavaş yavaş düştüğünü ve çatlaklarla beraber boşluk suyu basıncının da arttığını belirtmişlerdir [37].

Yang, Qiu, Pei, Hu, Shuyue, Zijing, Zhang ve Minhming (2020), farklı yıllarda killi ve kumlu zemine ait şevin farklı yerlerinden alınan örselenmemiş numunelerin infiltrasyon oranlarını incelemişlerdir. Çalışmadaki amaçlarının daha önce herhangi bir nedenden dolayı su etkisiyle bozulmuş ve kayma nedeniyle örselenmiş zemin ile örselenmemiş zemin arasındaki farkı değerlendirmek olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma doğrultusunda incelenen şevin heyelan gövdesinde ortalama ilk sızma oranının bir önceki heyelan gövdesindeki sızma oranından önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve her iki heyelan türünün infiltrasyon oranlarının örselenmemiş zemindekinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan güvenlik katsayısı karşılaştırılmasında infiltrasyonun meydana geldiği şevin güvenlik katsayısının örselenmemiş zemindekenden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [38].

Zhao, Shi, Peng ve Bao (2020), doygun ve doygun olmayan zeminlerde yer altı suyu akım teorisine dayanarak, yağış altındaki geniş yamaçların yer altı suyu akım modelini ve nemlendirme sürecini simüle etmişlerdir. Matris emme değişikliklerinin, sızma yumuşamasının ve sızma işlemi sırasında nemlendirme genişlemesinin şev duraylılığı üzerindeki etkilerini dikkate almışlardır. Elde edilen sonuçlarda, yağışlar azaldıktan sonra yağmur suyu kendi ağırlığı altında hızla sızmaya başlar, yüzeyde bulunan zeminin doygunluk derecesi azalır ve hacimsel su içeriği zeminin iç katmanlarından daha düşük seviyelere geriler. Kuru-ıslak döngüden sonra zemin yüzeyi ve zemin iç katmanları arasındaki heterojenlik kayma mukavemetini ve dolayısıyla şevin güvenlik katsayısının değişmesine neden olduğunu açıklamışlardır [39].

3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN MEKANİĞİ KAVRAMI

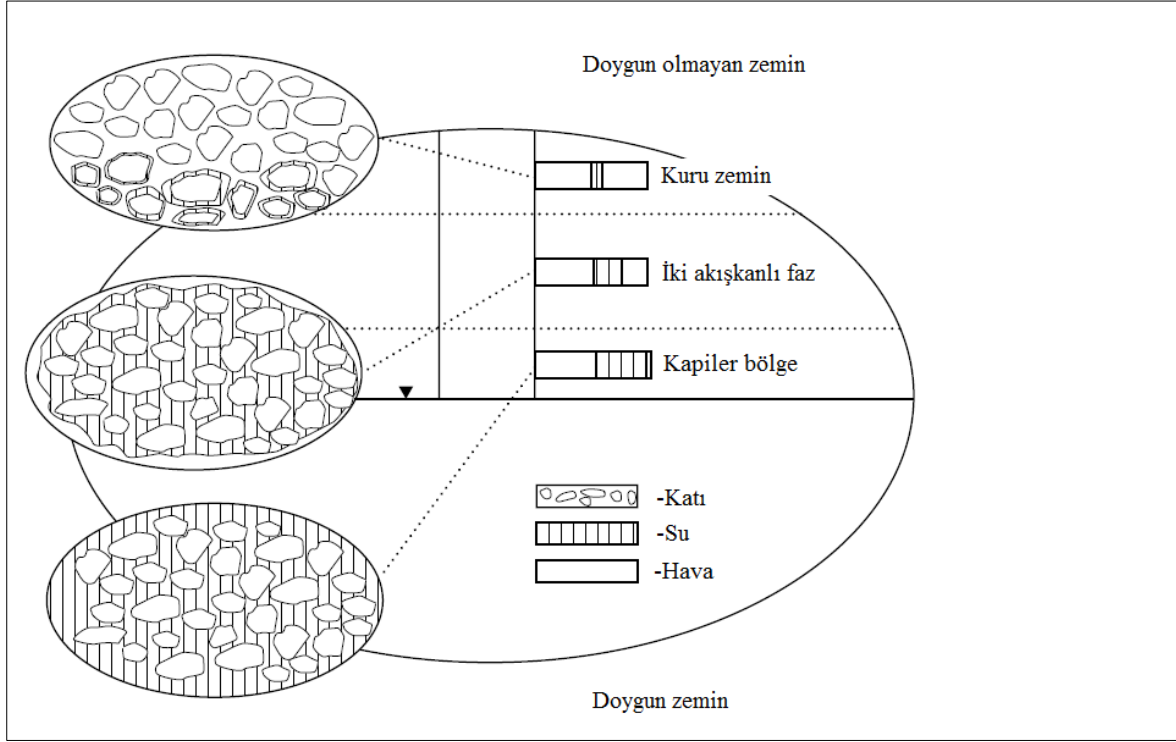
Doygun olmayan zemin mekaniği gelişimi, doygun zemin mekaniğine kıyasla nispeten yavaş olmuştur. Bunun nedeni: negatif boşluk suyu basınçlarının ölçümü ile ilgili zorluklardır [40]. Matrik emme basıncının ölçümü ile ilgili hala yapılacak çok fazla araştırma olmasına rağmen, doygun olmayan zeminlerin davranışı ile ilgili teoriler hızlı bir şekilde kabul görmektedir [41]. Zemin mekaniğinin genel alanı doygun zeminlerle ilgilenen kısma ve doygun olmayan zeminlerle ilgilenen kısma bölünebilir (Şekil 3.1). Doygun zeminler ve doygun olmayan zeminler arasındaki ayrım, doğası ve mühendislik davranışlarında ki temel farklılıklar nedeniyle gerekli hale gelmiştir [42].



Şekil 3.1. Zemin mekaniğinin sınıflandırılması

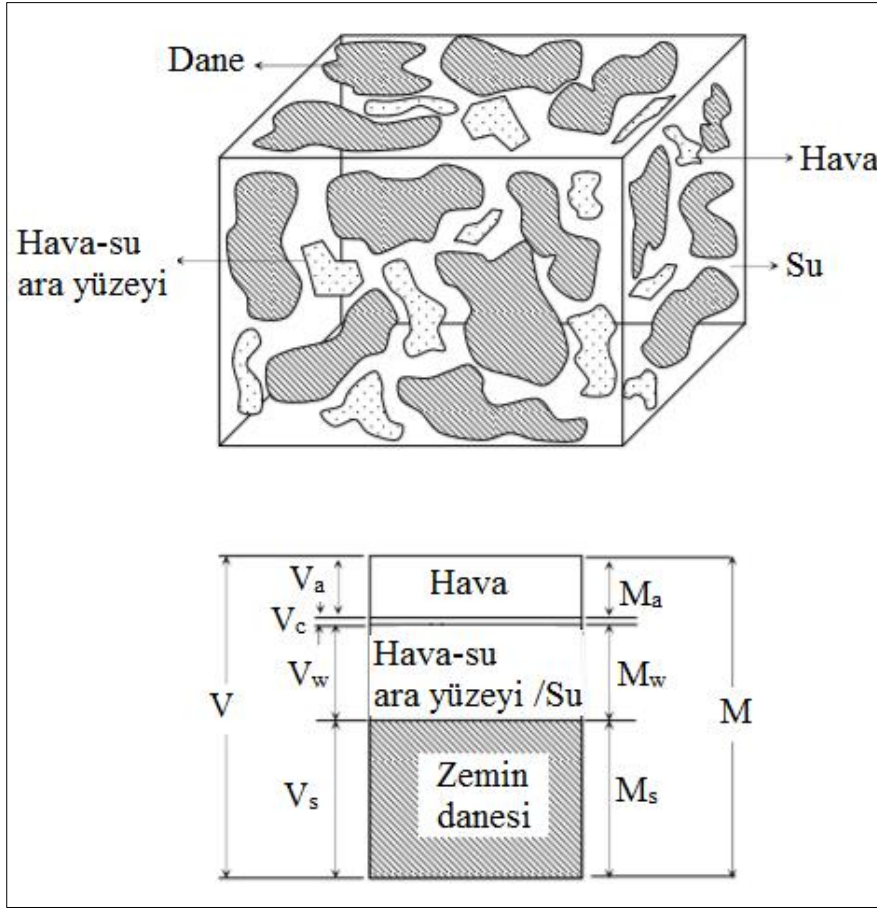
Klasik zemin mekaniğinde zeminin ya kuru ya da doygun olduğu varsayımı yapılır. Fakat birçok mühendislik problemlerinde zemin genellikle ne kuru ne de doygundur. Genel zemin mekaniği çalışma alanı su tablası tarafından doygun ve doygun olmayan zeminler olarak bölünmüştür. Su tablasının altındaki zemin davranışı efektif gerilme tarafından ($\sigma - u_w$), su tablasının üzerindeki doygun olmayan zemin ise iki bağımsız değişken olan net normal gerilme ($\sigma - u_w$) ve matrik emme basıncı ($u_a - u_w$) tarafından kontrol edilir. Su tablasının

altında, boşluk suyu basıncı pozitif olacak ve zemin genel olarak doymuş olacaktır. Su tablasının üzerindeki tüm zemin bölgesine vadoz bölgesi denir (Şekil 3.2) [43].



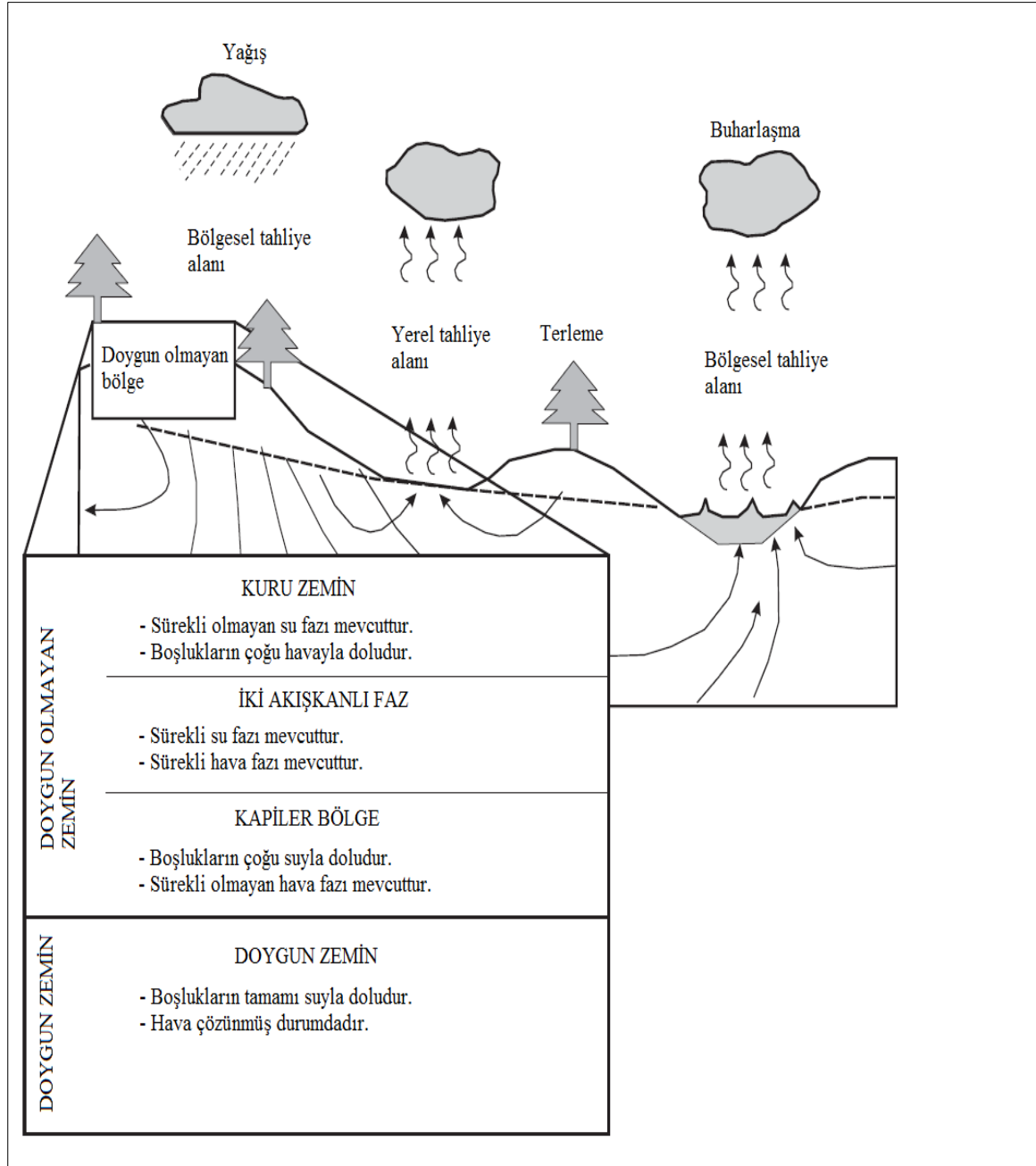
Şekil 3.2. Doygunluk derecesindeki zeminin su seviyesi üzerindeki sınıflandırılması

Doygun olmayan zeminlerin de genel olarak üç fazlı oldukları kabul edilmiştir (Şekil 3.3). Ancak son dönemde yapılan çalışmalar bu üç faza ek olarak su ile hava arasında oluşan ve su-hava ara yüzeyi (contractile skin) olarak adlandırılan çok ince bir tabakanın da bulunduğu ortaya çıkmıştır. Doygun olmayan zeminlerin kütle hacim ilişkileri incelenirken, su-hava ara yüzeyi (contractile skin) çok küçük bir hacme sahip olduğu için ihmal edilerek su fazının bir parçası olduğu varsayılır [44].



Şekil 3.3. Suya doymun olmayan bir zemin elemanında dört fazın görülmesi

Doygun zeminde boşlukların tamamı su ile doluyken, doymun olmayan durumda zeminde boşluklar su ve hava ile doludur [45]. İstinat duvarları, sığ temeller, mekanik olarak duraylı zemin duvarları, tüneller, kaldırımlar ve diğer çoğu yapı genellikle doymun olmayan zeminlerle temas halindedir. Zemin yüzeyinin iklimi, yer altı suyunun seviyesi ve dolayısıyla doymun olmayan zeminin varlığı yapıları etkilemektedir. Şekil 3.4'te yerel ve bölgesel bazda doymun olmayan zemin bölgesine ait alt bölümler gösterilmiştir [40].



Şekil 3.4. Yerel ve bölgesel bazda doymun olmayan zemin bölgesinin alt bölümleri

Doygun olmayan zemin bölgesindeki boşluk suyu basınçları sıfırdan 1.000.000 kPa mertebesinde maksimum gerilime kadar değişebilir. Zeminin doymunluk derecesi %100 ile sıfır arasında değişebilir. Zemin emişindeki değişiklikler, farklı doymunluk bölgelerine neden olur. Çizelge 3.1’de yerinde ve laboratuvarında doyma koşullarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan terminolojileri karşılaştırılmaktadır. Zeminler genel olarak su tablasında doymunlukla başlar ve yüzeye doğru doymunluk oranında azalma eğilimi gösterirler [40].

Çizelge 3.1. Terminoloji tariflerinde kullanılan saha ve laboratuvar doygunluk dereceleri

Doygunluk Derecesi, S (%)	Saha Açıklaması	Laboratuvar Açıklaması
~100	Doygun	Doygun
~90-100	Kapiler bölge	Sınır etki bölgesi
~15-90	İki akışkanlı bölge	Geçiş bölgesi
~15-0	Kuru bölge	Rezidüel bölge

Emme etkilerinin toprağın doygunluk derecesinden etkilendiği bilinmektedir. Su ve hava basınçlarının etki ettiği bağıl alan doğrudan doygunluk derecesine bağlıdır ancak aynı parametre aynı zamanda kılcal damarlar arası kuvvetlerin sayısını ve yoğunluğunu da etkiler [40].

Doygun olmayan zeminler üç temel başlık altında incelenirler. Sızma, kayma mukavemeti ve hacimsel değişim. Doygun olmayan zeminlerin inceleme alanları ise;

- Şişen zeminler
- Vadoz bölgede; kirlenme, atıkların hareketi, katı atık depolama sahaları inşası
- Yoğun yağışlardan sonra meydana gelen şev duraylılık problemleri
- Gevşek sıkıştırılmış dolguların duraylılık problemleri
- İstinat yapıları arkasında yer alan kohezyonlu dolgular
- Vadoz bölgede yer alan temellerin taşıma kapasitesi [10].

3.1. Emme Gerilmesi Kavramı

1900’lü yılların başından itibaren emme basıncı teorik olarak incelenmiş ve doygun olmayan zeminlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine ait çalışmalara İngilterede 1948 yılında Croney ve Coleman tarafından başlatılmıştır [10]. Zemin emme veya zemin su potansiyeli, doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışını tanımlamak için kullanılan temel fiziksel özelliklerden biridir. Genel olarak; emme gerilmesi kavramı, doygun olmayan bir zemin kütlesinin gözeneklerinden su çeken ve tutan serbest enerji veya gerilme ölçüsü olarak tanımlanır [46].

Aitchison ve ark. (1972), zemin-su potansiyelinin dört bileşene ayrılmasını önermişlerdir: Bunlar: yerçekimi, gaz basıncı potansiyeli, matrik emme basınç potansiyeli ve ozmotiktir.

Geoteknik mühendisliği açısından, toplam emme gerilmesi (ψ), matrik emme ve ozmotik emme olarak adlandırılan iki bileşenden oluşmaktadır. Toplam emme bu iki bileşenin toplamı olarak elde edilir (Denklem 3.1) [47].

$$\psi = (u_a - u_w) + \Pi \quad (3.1)$$

Denklemde,

$(u_a - u_w)$: Matrik emme

u_a : Boşluk hava basıncı (kPa)

u_w : Boşluk suyu basıncı (kPa)

Π : Ozmotik emme (kPa) [41].

Ridley 1993 yılında yaptığı çalışmada zemin emme gerilmesini buharlaşma yoluyla zemin matrisinden bir su molekülünü çıkarmak için gerekli enerjinin ölçümü olarak tarif etmiştir. Termodinamik yasalardan yararlanarak zemin emme gerilmesi ve kısmi boşluk suyu buhar basıncı arasındaki ilişki Denklem 3.2 ile hesaplanır.

$$\psi = - \frac{RT}{v_{w0} \omega_v} \ln \left(\frac{u_v}{u_{v0}} \right) \quad (3.2)$$

Denklemde,

ψ : Zeminin emme gerilmesi ya da toplam emme (kPa)

R : Genel gaz sabiti [8.31432 J/(mol K)]

T : Mutlak sıcaklık [273.16 + t° (K)]

t° : Sıcaklık (°C)

v_{w0} : 1/Suyun özgül hacmi [(m³/kg), (1/ ρ_w)]

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

ω_v : Su buharının moleküler kütlesi (18.016 kg/mol)

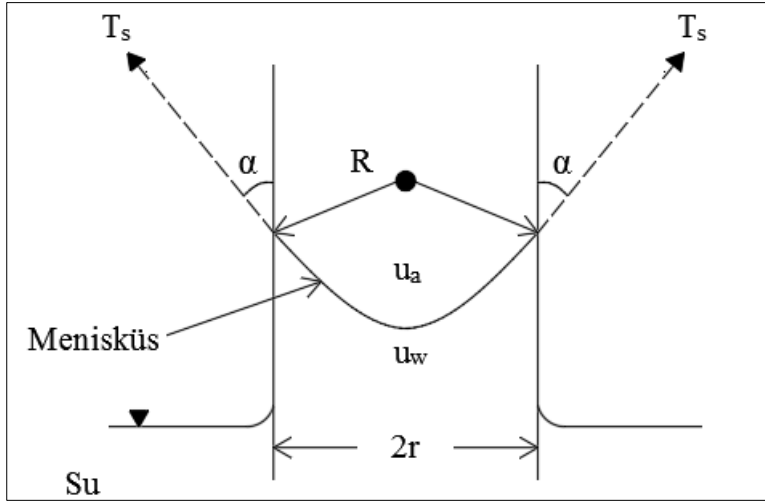
u_v : Kısmi boşluk suyu buhar basıncı (kPa)

u_{v0} : Aynı sıcaklıkta saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı (kPa) [46].

Denklem 3.2’de belirtilen $\frac{u_v}{u_{v0}}$ oranı rölatif nem olarak adlandırılır. Referans sıcaklık olarak $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ alınırsa sabit değer 135022 kPa elde edilir ve Denklem 3.3’teki gibi ifade edilir.

$$\psi = -135022 \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (3.3)$$

Hava ve su arasındaki basınç farkı matrik emme ($u_a - u_w$) ve yüzey geriliminin varlığı nedeniyle bir menisküs oluşturur [36]. Yüzey gerilimi, yüzeydeki moleküller arası çekim merkezleri (yapışma kuvvetleri) arasındaki dengesizlikten kaynaklanmaktadır. Su molekülleri, moleküller arası yapışma kuvvetleri nedeniyle birbirlerini tutarlar. Su molekülü üzerinde etkili olan kuvvetler, çözeltideki tüm yönlerde eşittir. Böylece, çözeltisindeki moleküller üzerindeki net kuvvet sıfırdır. Bununla birlikte, sonuçta ortaya çıkan bir içe doğru kuvvet, su molekülünün bulunmaması nedeniyle hava-su ara yüzündeki (yüzey) moleküller üzerinde etki eder. Yüzeyde daha az su molekülünün bulunması, moleküller arasında daha güçlü bir bağ ile sonuçlanır. Bu içe doğru net kuvvet, yüzeydeki moleküllerin kasılmasına ve gerilmesine veya kırılmasına karşı direnmesine ve menisküs oluşumuna neden olur. Şekil 3.5’te suya daldırılmış kılcal tüpte menisküs oluşumunu gösterilmektedir. Menisküs arasındaki basınç farkı Denklem 3.4 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3.5. Suyu daldırılmış kılcal tüp

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{r}{\cos \alpha} \quad (3.5)$$

T_s : Suyun yüzey gerilimi

R : Menisküs eğrilik yarıçapı

r : Tüp yarıçapı (zemindeki gözenek yarıçapına benzer)

α : Temas açısı

Gözenek yarıçapı ne kadar küçük olursa, zemin emişi de o kadar yüksek olur. Bu zemin su karakteristik eğrisi ilişkisinin bir zeminden diğerine değiştiğini gösterir. Zemin doygunlaştıkça ve su daha küçük gözeneklere dönüştükçe, menisküsün eğrilik yarıçapı (R) azalır ve böylece matrik emme basıncında bir artışa yol açar. Benzer şekilde hacimsel su içeriği arttığında da emme azalır [48].

Matrik emme basıncının belirlenmesi, doymun olmayan zeminlerin gerilme durumu değişkenlerinin belirlenebilmesi için çok önemlidir. Ancak pratik olarak negatif su basıncının kontrolü ve ölçülmesi bir takım kısıtlamalar içermektedir [10]. Toplam emme, matrik emme basıncı ve ozmotik emme gerilmelerinin ölçülmesinde bir kaç yöntem yaygın

olarak kullanılmaktadır. Ölçüm aralığı ve ölçme sistemine ait yorumlar Çizelge 3.2’de gösterilmektedir [49].

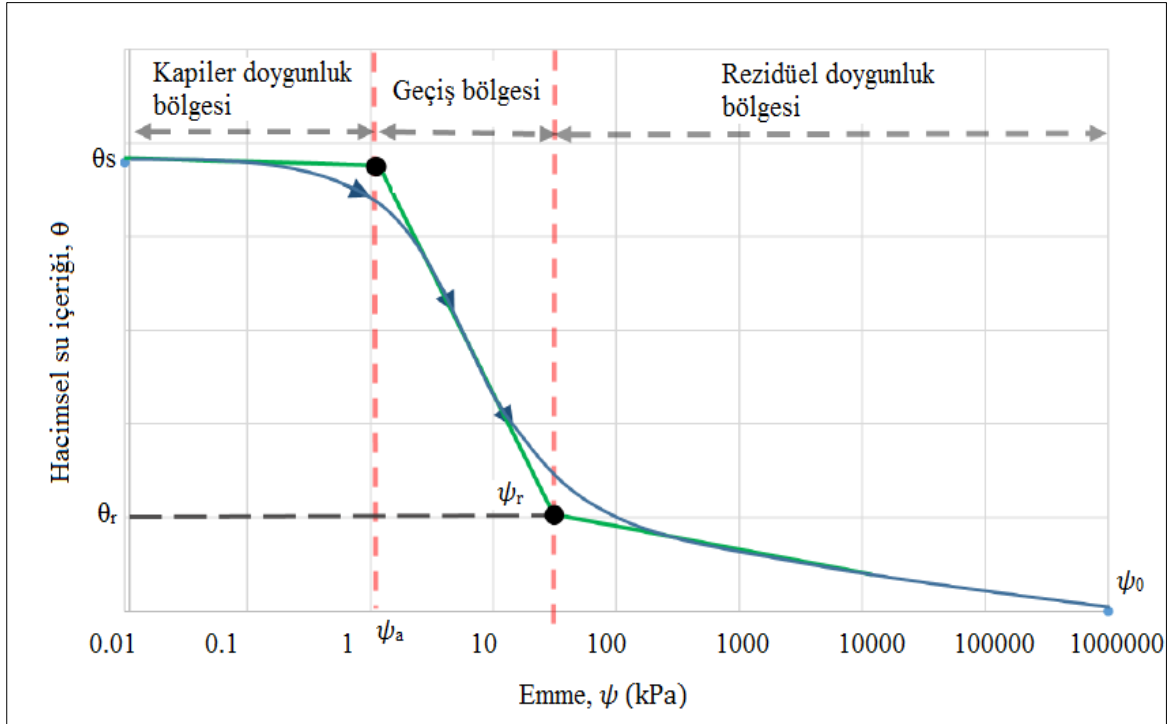
Çizelge 3.2. Emme ölçümü ve bileşenlerini ölçme cihazları [49]

Ölçme sistemi	Ölçülen bileşeni	emme Aralık (kPa)	Açıklama
Psikrometre	Toplam	100-8000	Sabit ortam sıcaklığı gereklidir
Süzgeç kağıdı	Toplam	400-30000	Nemli zeminle temas etmelidir
Tansiyometre	Matrik	0-90	Hava difüzyonuna dikkat edilmelidir
Basınç plakası	Matrik	0-1500	Ölçüm aralığı, seramik diskin hava giriş değerinin bir fonksiyonudur
Termal iletkenlik sensörü	Matrik	0-400	Değişken boyutlu seramik sensör kullanılmalıdır
Süzme	Ozmotik	30-3000	İletkenlik ölçümünde psikrometre kullanılır

3.2. Zemin Su Karakteristik Eğrisi

Su tutma eğrisi olarak da adlandırılan zemin su karakteristik eğrisi (SWCC), hacimsel su içeriği ile emme basıncı arasındaki ilişki olarak tanımlanır [50]. Zemin, farklı emme gerilmelerine maruz kaldığında hacimsel su içeriği değişikliklerine bağlı olarak zeminin su tutma kapasitesinin bir ölçümü olarak da açıklanabilir [51].

Zemin su karakteristik eğrisi (SWCC), hacim değişikliği, kayma mukavemeti ve hidrolik iletkenlik gibi doymun olmayan zeminlerin hidromekanik davranışını tahmin etmek için oldukça önemlidir. Zemin su karakteristik eğrisi tane büyüklüğü dağılımı, gözeneklilik ve malzemenin birçok faktörüne bağlıdır. Hacimsel su içeriği değişkeni zeminin gözeneklerinde bulunan su miktarını tanımlar. Değişken genellikle hacimsel su içeriğinin rezidüel veya sıfır olduğu durumu kapsayan boyutsuz bir biçimde kullanılır [50]. Şekil 3.6’da bir zemin su karakteristik eğrisinin şematik bir görünümünü gösterilmektedir. Su tablasının üzerinde homojen bir zemindeki su kılcal yükselme eğrisine benzer [52].



Şekil 3.6. Zemin su karakteristik eğrisi ve parametrelerin tahmini

Bu şekilde anahtar parametreler,

θ_r : Rezidüel su içeriği

θ_s : Doygun durumdaki su içeriği

ψ_0 : Sıfır su içeriğine karşılık gelen gerilme

ψ_r : Rezidüel su içeriğine karşılık gelen gerilme

ψ_a : Hava giriş değeri [53].

Hava giriş değeri (AEV), havanın gözenek boşluğuna girdiği noktadır [46]. Hava giriş değeri ve rezidüel su içeriği, su tutma eğrisinde bükülme noktalarından teğet çizgi çiftleri ile grafiksel olarak tahmin edilebilir. Bu değer suyun zemindeki en büyük gözenek alanından çekilmesine neden olmak için gereken matrik emme basınç değerini temsil eder. Rezidüel su içeriği, zeminden ilave suyu uzaklaştırmak için gittikçe daha büyük bir emme değişikliğinin gerekli olduğu su içeriği olarak kabul edilmektedir [46].

SWCC, bir zeminin desatürasyon sürecini emiş artışı ile tanımlayan üç aşamaya sahiptir;

1. Kapiler doygunluk bölgesi: Kılcal kuvvetler nedeniyle nispeten doymuş bir zemin örneği ile karakterize edilir. Bu bölge hava giriş değerine ulaşma seviyesine kadar uzar. Bu nokta, havanın zeminin en büyük gözeneklerine girmeye başladığı matrik emme basınç değerini gösterir. Ayrıca zemindeki maksimum gözenek boyutunun bir ölçüsü olarak kabul edilir [46].

2. Geçiş bölgesi: Matrik emme basıncının artışına göre desatürasyon oranı bu bölgede en yüksektir. Bu bölgede, gözenekler içindeki su giderek daha fazla hava ile yer değiştirmektedir. Doygunluk derecesi bu bölgede yaklaşık olarak yüzde 80-90 arasındadır [46].

3. Rezidüel doygunluk bölgesi: Bu aşamada gözenek suyu zemin matrisi içinde hareketsiz kalır. Bu bölgede çok az hidrolik akış vardır ve nem hareketi buhar akışından kaynaklanır. Rezidüel bölgede emme, bir birim zemin kütlelerinden su çıkarmak için gereken enerji olarak kabul edilir [46].

3.3. Doygun Olmayan Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Doygun ve doymayan zeminlerin şev duraylılık analizi arasındaki temel fark kayma mukavemetinin tanımlanmasında yatmaktadır. Mohr-Coulomb teorisi, zeminlerin kayma mukavemetini iki parametreyle tanımlar: zemin içindeki kohezyon (c) ve içsel sürtüme açısı (ϕ). Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti tipik olarak iki bağımsız gerilim durumuna sahip değişkeni içerir bunlar: genişletilmiş Mohr-Coulomb yenilme kriterinde ortaya çıkan net normal gerilme ($\sigma - u_a$) ve matrik emme ($u_a - u_w$) gerilmeleridir [54].

Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemetini elde edebilmek için ampirik formüllerden ya da deneysel çalışmalardan yararlanılır. Deneysel çalışmalar, emme gerilmesinin kontrolü ya da ölçülmesi tekniğine dayanarak modifiye edilmiş üç eksenli hücrede ya da kesme kutusu ile yapılabilir. Bunun yanında deneysel veya ampirik yöntemlerle elde edilmiş olan zemin suyu karakteristik eğrisi ve doymayan zemin mekaniği parametreleri ile doymayan zeminin kayma mukavemeti belirlenebilir [10].

Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti için önerilen çeşitli denklemler Çizelge 3.3’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemeti denklemleri [54]

Yazar	Eşitlikler
Freundlund vd. (1978)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$
Freundlund 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)	$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)[\tan\phi'(\lambda')]$ $\lambda' = [(u_a - u_w)/(u_a - u_w)_b]^{-0.55}$

Freundlund ve Morgenstern 1978’de doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemetinin üç gerilme durumu değişkeninden herhangi biri ile tanımlanabileceğini göstermiştir ve doymun olmayan zeminler için önerdikleri denklem yaygın olarak kullanılmaktadır (Denklem 3.6).

Bu denklem,

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (3.6)$$

Denklemde,

τ : Yenilme düzlemindeki kayma mukavemeti

c' : Efektif kohezyon

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

ϕ' : Efektif içsel sürtünme açısı

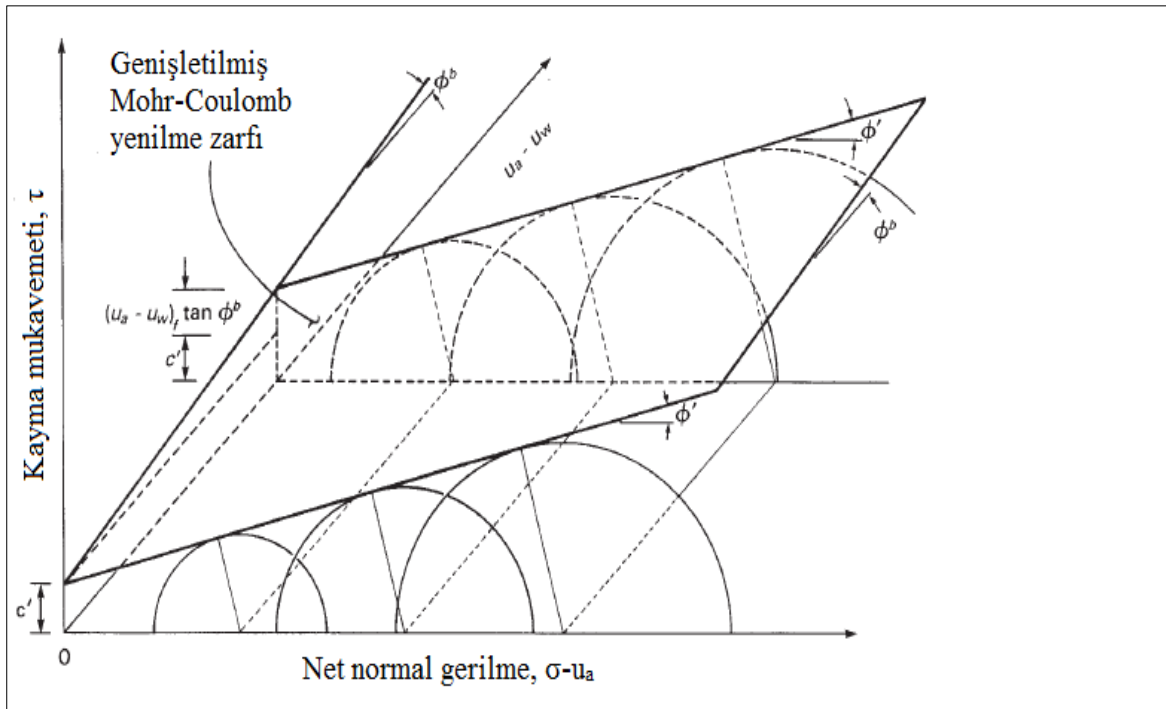
$(u_a - u_w)$: Matrik emme

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

Zemin doygunluğa yaklaştıkça, boşluk suyu basıncı (u_w), boşluk hava basıncına (u_a) ve matrik emme basıncı ($u_a - u_w$) sıfıra yaklaşmaktadır. Bu doymun olmayan zeminlerin kayma dayanımı denklemini doymun zeminlerin kayma dayanımı denklemine indirger.

Denklemler incelendiğinde, matrik emme basıncının doymun olmayan zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [55].

Doymun olmayan zeminlerde, yenilme koşullarına karşılık mohr daireleri üç boyutlu şekilde çizilir ve şekil 3.7’de gösterildiği gibi üç boyutlu çizimde ordinat olarak kayma gerilmesi (τ) ve iki gerilme durum değişkenleri net normal gerilme ($\sigma - u_a$) ve matrik emme basıncı ($u_a - u_w$) bulunur. Zemin mukavemeti üzerinde etkili olanın, bağımsız gerilme değişkenlerinden matrik emme basıncının olduğu varsayılmaktadır [56].



Şekil 3.7. Doymun olmayan zeminler için genişletilmiş Mohr-Coulomb yenilme zarfı [57]

Matrik emme basıncının hacimsel su içeriğinin ters bir fonksiyonu olduğu, doymun olmayan zeminin kayma mukavemeti ise net normal gerilme ve matrik emme basınç fonksiyonu olduğu kaydedilmiştir. Bu nedenle, hacimsel su içeriği doymun olmayan zeminin kayma mukavemetinde çok önemli bir rol oynar. Hacimsel su içeriği azaldıkça matrik emme basıncı

artar ve zeminin kayma mukavemetini etkiler. Doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için kullanılan yerinde testlerde matrik emme basıncı ve hacimsel su içeriği dikkate alınmalıdır [55].

4. ŞEV DURAYLILIĞI

Şev genel anlamda bir tanım yapmak gerekirse bu tanım doğal veya yapay oluşturulmuş bir zemin kütlelerini sınırlayan eğik yüzey olarak verilebilir. Eğik yüzey bir düzlem olabileceği gibi birbirlerini takip eden düzlemlerden de oluşabilir [58]. Doğal veya yapay yollarla oluşturulan şevlerde meydana gelen sorunlar, geoteknik mühendisliğinde zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu zorlukların giderilmesinde şevlerin duraylılık analizi inşaat mühendisliğinde çok önemli bir rol oynamaktadır.

Duraylılık analizi karayolları, demiryolları, havayolları ve kanallar gibi ulaşım tesislerinin yapımının yanı sıra, doğal kaynakların geliştirilmesi için oluşturulan birçok insan faaliyeti alanında kullanılır. Bu uygulamalarda şevlerde meydana gelen sorunlar, insan tarafından oluşturulan kazı veya dolgu, doğal eğim veya her ikisinin bir kombinasyonunu içeren hareketlerden kaynaklanabilir.

Şev hareketlerinin nedenlerinin araştırılması geoteknik mühendisliği açısından önem teşkil etmektedir. Bu hareketlerin nedenleri; jeolojik, morfolojik, fiziksel ve insanlardan kaynaklanan etkenler olarak sınıflandırılmıştır [59].

Jeolojik nedenler

- Zayıf malzeme
- Hassas malzeme
- Kesmeye uğramış malzeme
- Eklemlili ve fissürlü malzeme
- Tersine uzanan yapının kırılması (fay, uyumsuzluk, dokanak vb.)
- Tersine uzanan kütle süreksizliği (tabakalarımı, yapraklanma vb.)
- Geçirgenlikteki zıtlık
- Sertlikteki zıtlık (katı, plastik malzeme üzerindeki yoğun malzeme)

Morfolojik nedenler

- Tektonik ve volkanik yükselme
- Buzul gerilemesi

- Yamaç topuğunun akarsu tarafından aşındırılması
- Yamaç topuğundaki dalga aşındırılması
- Yamaç topuğundaki buzul aşındırması
- Yer altı aşındırması (çözülme, kanal sistemiyle aktarma)
- Yamaç üzerine veya yamacın tepesine yük konulması
- Bitki örtüsünün ortadan kaldırılması (orman yangınları, kuraklık)

Fiziksel nedenler

- Şiddetli yağmurlar
- Karın hızlı erimesi
- Taşkın ve gel-git olayında suların hızlı çekilmesi
- Deprem
- Volkanik püskürme
- Çözülme
- Donma ve çözülme yoluyla ayrışma
- Şişme-büzülme yoluyla ayrışma
- Olağanüstü yağışların devam etmesi

İnsan nedenleri

- Yamacın veya topuğunun kazılması
- Yamaca veya tepesine yük konulması
- Göl suyu seviyesinin aşağı doğru çekilmesi
- Ormansızlaştırma
- Toprağı sulama
- Maden kazıları
- Yapay titreşimler [59].

4.1. Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması

Şev duraysızlıkları için kullanılacak sınıflama sistemlerinin, duraysızlıkların nedeninin ve alınabilecek önlemlerin belirlenmesinde, ayrıca konuyla ilgili mühendislik dallarının aynı terminolojiyi kullanabilmelerine yardımcı olacak nitelikte olmaları gerekir. Bu amaçla çok

sayıda sınıflama sistemi önerilmiş olmakla birlikte; hareketin mekanizması ve kayma yüzeyinin şekli de sınıflama sisteminde dikkate alınmaktadır [60]. Önerilen sınıflandırma, Cruden ve Varnes'in (1996) yaygın olarak kullanılan Varnes sınıflandırma sisteminin (Varnes, 1978) düzeltilmiş versiyonunu takip eder [61,62]. Yakın zamanda, Hungr ve ark. (2014) kaya ve toprakların jeoteknik ve jeolojik terminolojisi ile uyumluluğu geliştirmek için Varnes'in sisteminde daha fazla değişiklik yapılmasını önermişlerdir [63,64].

Şevi oluşturan malzemenin genel niteliği ve tane boyu, duraysızlığın hızı ve yaşı gibi özelliklerden pek çoğunu dikkate alması açısından, Varnes (1978) mühendislik sınıflaması sistemi günümüzde en yaygın şekilde kullanılan bir sistemdir [60].

Varnes (1978), şev hareketlerinin iki kriteri vardır:

- İlk terim malzeme türünü tanımlar
- İkinci terim hareket türünü tanımlar [65].

Bu sınıflama kapsamında şevde meydana gelebilecek kayma türleri çizelge 4.1 'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Şev kaymalarının mühendislik sınıflaması [66]

Duraysızlık Türü			Malzemenin Türü	
			Toprak Zeminler	
			İnce Taneli	İri Taneli
Düşme			Zemin düşmesi	Moloz düşmesi
Devrilme			Zemin devrilmesi	Moloz devrilmesi
Kayma	Dönel (Dairesel)	Sınırlı sayıda birim	Zeminde dairesel kayma	Molozda dairesel kayma
	Ötelenmeli	Çok sayıda birim	Zeminde blok türü ötelenme Zemin kayması	Molozda blok türü ötelenme Moloz kayması
Yanal Yayılma			Zemin yayılması	Moloz yayılması
Akma			Zemin akması	Moloz akması
			(zeminde krip)	
Karmaşık Kaymalar			Yukarıda belirtilen diğer duraysızlık türlerinden ikisinin veya birkaçının birleşmesiyle gelişen duraysızlıklar	

Düşme, devrilme, kayma, yanal yayılma ve akma gibi farklı hareket mekanizmasında gelişen heyelanlar bölgesel olarak belirgin jeolojik, morfolojik ve fiziksel faktörlerin kontrolü altında meydana gelmektedir [67].

4.1.1. Düşme

Bu tür duraysızlıklar, kaya kütlelerinde süreksizlikler, toprak zeminlerde ise fisürlerin ayırdığı münferit blokların dik eğimli yamaçlardan, herhangi bir kesme yenilmesi olmaksızın, yer çekimi etkisi altında düşmesiyle gerçekleşir [60]. Düşme çok hızlı hareketlerin en tipik örneği olduğundan, bu terimi tüm hızlı hareket türlerini belirtmek için kullanılır [68]. Özellikle kaya düşmeleri, bu grupta değerlendirilen ve zarara yol açan en tipik düşme türüdür. Hareket hızlı ve aşırı derecede hızlı olup, yamaç topuğunda meydana gelen erozyon nedeniyle münferit blokların desteklerini yitirmesi, süreksizliklere uygulanan su veya buz basınçları, insanlar tarafından yapılan patlatma ve kazı gibi işlemlerin etkileriyle blokların oluşumu vb. nedenler kaya düşmelerine yol açan başlıca faktörlerdir [60]

4.1.2. Devrilme

Bu yenilme türü, şev eğim yönünün tersi yönde eğimli ve yüksek devamlılığa sahip süreksizlikler boyunca oluşabilmektedir [69]. Devrilme, bir çökme davranışı olmayıp, bir bükülme davranışdır ve kesme yenilmesini de içerir. Devrilmelerin oluşum mekanizmalarına göre dört ayrı grup içinde değerlendirmişlerdir. Bu sınıflamaya göre devrilmeler: Bükülme devrilmesi, blok devrilmesi, blok-bükülme devrilmesi ve ikincil devrilmeler olmak üzere dört farklı devrilme türü bulunmaktadır [70].

4.1.3. Kayma

Kaymalar bir veya birden fazla yüzey üzerinde ve kesme yenilmesi sonucu meydana gelen şev hareketleri olup, dönel (dairese) ve ötelenmeli kayma şeklinde iki gruba ayrılır [60]. Genellikle kaymalar yamaçlarının dik kısımlarında gelişir yırtılma yüzeyi tamamen üstte doymamış zemin tabakaları içinde bulunur [71]. Dönel kaymalar gerek doğal yamaçlarda, gerekse mühendislik şevlerinde en sık karşılaşılan duraysızlık türüdür. Bu tür kaymalar; toprak zeminlerde açılmış şevlerde, nehir yataklarında, dolgularda, atık sahalarında, açık işletmelerdeki pasa yığınlarında, ileri derecede eklemlili kaya kütleleri ile ileri derecede

ayrışarak büyük ölçüde toprak zemine dönüşmüş kayalarda meydana gelir. Ötelenmeli kaymalar ise, dayanımı düşük süreksizliklerin oluşturduğu tek veya birden fazla zayıflık düzlemi üzerinde gelişen duraysızlıklardır. Bunlar; düzlemsel kayma, kama tipi kayma ve çok yüzeyli kayma şeklinde farklı mekanizmalarla meydana gelebilir. Kayma en çok görülen şev yenilmelerinden biridir [60].

4.1.4. Yanal yayılma

Depremler sırasında oluşan zemin sıvılaşmasının neden olduğu yanal yayılmadan farklı olarak ve herhangi bir dinamik etkiye gerek kalmadan meydana gelen bu tür duraysızlıkta, kesme yenilmesinin ve çekilme çatlaklarının etkisiyle yanal yönde gelişen son derece yavaş bir hareket söz konusudur [60]. Kesme veya çekme kırıkları tarafından yerleştirilen yanal uzamadır [61]. Örneğin kil gibi plastik özelliğe sahip bir zemin ile bunun üzerinde yer alan bloklu bir kaya kütlesi arasındaki zayıf yüzey boyunca kesme yenilmesi sonucu üstteki blokların son derece yavaş bir hızla şev dışına doğru hareketi yanal kaya yayılması olarak bilinir. Yanal zemin yayılması ise, göreceli olarak zayıf ve ince taneli plastik bir toprak zeminin içindeki kaya bloklarının çok düşük bir hızla her iki malzemenin birlikte eğim aşağı doğru hareketidir. Her iki tür duraysızlıkta da hareket hızı 10-25 mm/yıl arasında değiştiğinden, harekete ilişkin göstergeler hareketin başlangıcından itibaren uzun süre belirgin olarak gözlenemez ve yüksek boşluk suyu basınçları da bu tür hareketlerin gelişmesinde önemli rol oynarlar [60].

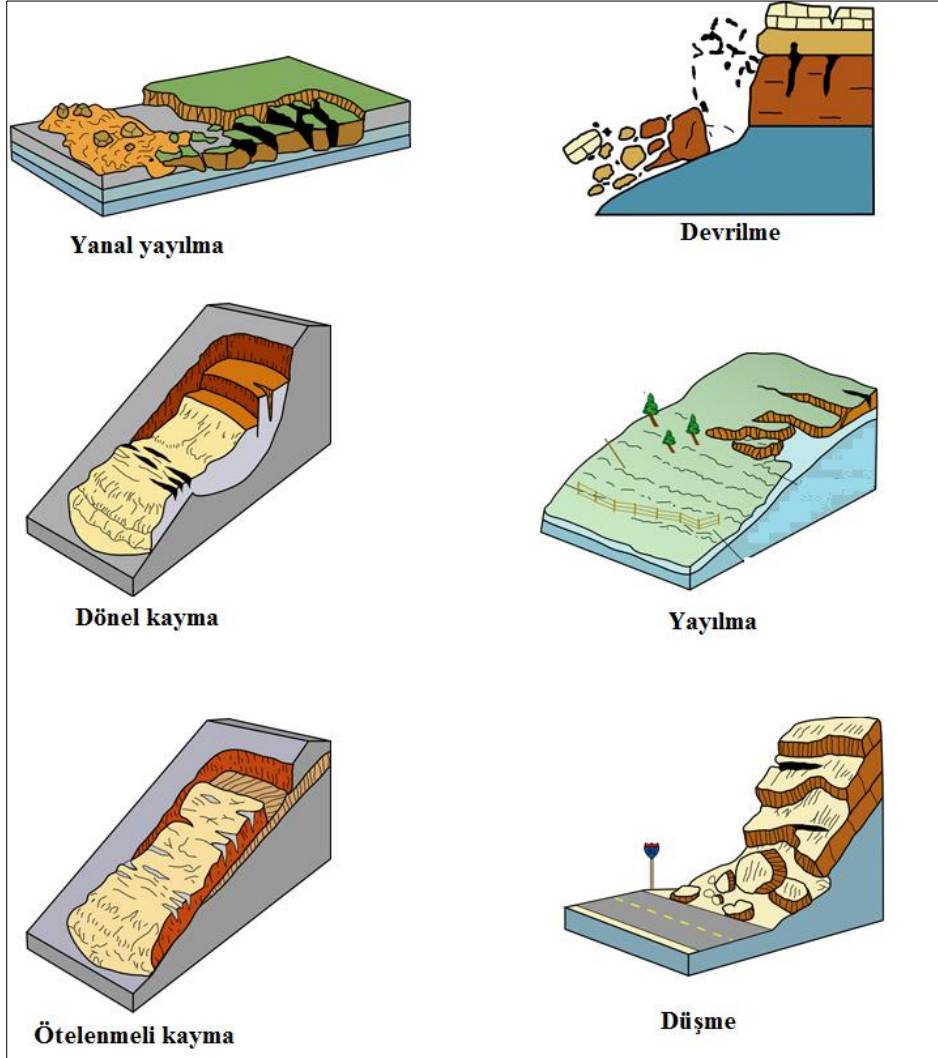
4.1.5. Akma

Konsolide olmamış malzemelerin doymuş veya kuru halde ve düşük ya da yüksek hızla viskoz bir sıvı gibi eğim boyunca dengeye erişene kadar akmasıyla meydana gelen bir duraysızlık türü olup, çoğu kez felakete yol açan sonuçlar doğurabilir. Özellikle yamaç eğimi ve su içeriği akma hareketlerini denetleyen en etkin faktörlerdir [60].

4.1.6. Karmaşık

Karmaşık kaymalar, yukarıda belirtilen duraysızlık türlerinden en az ikisinin birbirini izleyecek şekilde meydana geldiği durumlarda bu duraysızlıklara verilen genel addır. Önce dairesel bir kaymanın meydana gelmesi ve bu duraysızlık sonucu önündeki desteği yitiren

kolonsal eklemlere sahip bir kaya kütlesinde devrilmelerin gelişmesi bu tür duraysızlıklara bir örnek oluşturabilir [60].



Resim 4.1. Kayma türleri [72]

4.2. Şev Duraylılık Analizleri

Birbirine bağlı zeminlerden oluşan veya yer altı suyu akımından etkilenen yamaçlar için kritik kayma yüzeyleri genellikle (yarı) daireseldir. Bu varsayım, genellikle kayma örselenmesine maruz kalmış kütlelerin aşağı ve dışa doğru hareket ettiğini gösteren çeşitli yenilmiş şev gözlemlerine dayanmaktadır. Çoğu tasarımda veya şev duraylılık araştırmasında, güvenli tarafta duran makul sonuçlar verdiği için iki boyutlu analizler kullanılır. Şev duraylılık analizi tipik olarak limit denge yöntemi ile yapılır. Bu yöntemin ana avantajları, basitlik ve uzun süreli kullanımıdır. Ayrıca nispeten karmaşık eğim

geometrilerini, değişken zemin koşullarını ve dış sınır yüklerinin etkisini de ele alabilir. Temel formunda, bu yaklaşım bir yenilme yüzeyi varsayar ve dolaylı olarak yenilme düzlemleri üzerindeki gerilimlerin kohezyon ve kayma mukavemet parametreleri ile sınırlı olduğunu düşünür [54].

Kayma yüzeyinin üzerindeki zemin kütlesi birkaç dikey dilime bölünür. Her dilim limit denge yöntemi için tek bir eleman olarak kabul edilir. Her dilimin zemin ağırlığı dikkate alınır. Denge, dilimlere etkiyen kuvvetlerin ve/veya momentlerin toplamı açısından analiz edilir [54]. Bu yöntemi uygulamak iteratif hesaplamalar gerektirir. Bu işlemde, olası bir kayma yüzeyi varsayılır ve birkaç dilime ayrılır. Bu yüzeye etkiyen kuvvet dengesi incelenir ve kritik kayma yüzeyi (minimum güvenlik katsayısı ile) bulunana kadar işlem tekrarlanır.

Şevlerin duraylılığını değerlendirmek için limit denge tekniklerine dayanan farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu denklemler arasında temel olarak dilim içi kuvvetler ve eğim yüzeyinin şeklinin yanı sıra dilim içi kesme ile normal kuvvetler arasındaki varsayılan ilişki arasındaki farklar dikkate alınır. Bu yöntemler, boşluk suyu basınçlarının kayma yüzeyi boyunca pozitif veya sıfır olduğunu varsayar [54].

Dilim yöntemi ile birçok farklı tipte yenilme analizi literatürde sunulmuştur. Bu yöntemlerin tanımları ve farklı hesaplama yaklaşımları ile özeti Çizelge 4.2’de sunulmaktadır [73]. Ayrıca, farklı yazarlar tarafından geliştirilen ve duraylılık problemlerinin çözümü için kullanılabilen şev duraylılık grafikleri de mevcuttur (Örneğin Taylor, Bishop-Morgenstern, Barends ve Spencer grafikleri) [54].

Zeminin kayma mukavemeti, kayma gerilmelerine karşı dengeye ulaşmak için önemli bir güvenlik faktörü ile azaltılır. Bu hesaplama limit denge prosedürü denir. Statik dengeyi sağlamak için iki yaklaşım vardır. İlk yaklaşım, tüm zemin kütlesi için dengeyi dikkate almak ve tek bir serbest cisim için çözmektir. Diğer yaklaşım zemini birkaç dilime bölmektir ve her dilim dengeye giden tüm kuvvetleri tatmin etmelidir. Birkaç farklı dilim prosedürü statik dengeyi tamamen karşılar. Bu prosedürlerin her biri, statik olarak belirleyici bir çözüme ulaşmak için farklı varsayımlar yapar. Bu nedenle, denklemler ve bilinmeyenler arasında bir denge kurmak için varsayımlar yapılmalıdır [73].

Çizelge 4.2. Limit denge analizleri [73]

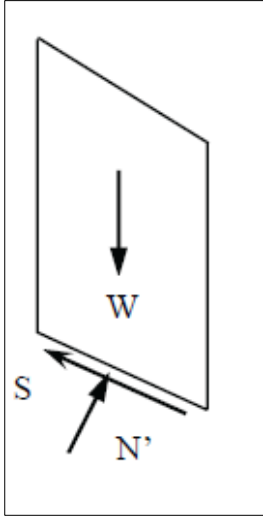
Yöntemler	Moment Dengesi	Kuvvet Dengesi	Kayma Yüzeyi Şekli	Dilimler Arası Normal Kuvvet	Dilimler Arası Kesme Kuvveti	T ve E İçin Varsayımlar
Fellenius ya da Ordinary	Evet	Hayır	Dairesel	Hayır	Hayır	Dilimler Arası Kuvvet Yok
Basitleştirilmiş Bishop	Evet	Hayır	Dairesel	Evet	Hayır	Yatay
Basitleştirilmiş Janbu	Hayır	Evet	Herhangi bir şekil	Evet	Hayır	Yatay
Morgenstern-Price	Evet	Evet	Herhangi bir şekil	Evet	Evet	Değişken, kullanıcıya bağlı
Spencer	Evet	Evet	Herhangi bir şekil	Evet	Evet	Sabit eğim, $T = E \tan \theta$
Sarma	Evet	Evet	Herhangi bir şekil	Evet	Evet	$T = ch + E \tan \phi$
Janbu	Evet	Evet	Herhangi bir şekil	Evet	Evet	Yatay düzeltme faktörü

4.2.1. Fellenius yöntemi

Fellenius yöntemi, dairesel bir kayma yüzeyi için moment dengesini karşılar, ancak dilimler arası normal ve kesme kuvvetlerini ihmal eder. Bu yöntemde dikkate alınan kuvvetler, Şekil 4.1’de gösterilmiştir [74]. Dilim içi kuvvetler dilim tabanına paraleldir [75]. Bu yöntemin avantajı, denklemin bir yineleme işlemi gerektirmediği için güvenlik katsayısının çözülmesindeki basitliğidir. Güvenlik katsayısı moment dengesine dayanır ve Denklem 4.1’de belirtilen şekilde hesaplanır [74].

$$GS = \frac{\sum(c'l + N' \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (4.1)$$

$$N' = (W \cos \alpha - ul) \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Fellenius şev duraylılık analizi yöntemi

Denklemde,

u = gözenek basıncı

l = dilim taban uzunluğu

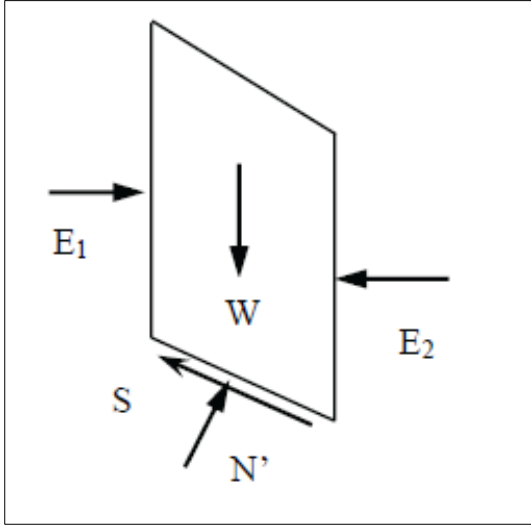
α = dilimin ortasındaki kayma yüzeyinin eğimi

Özetle Fellenius metodu,

- moment denge koşulunu yerine getirir,
- dilim içi normal ve kesme kuvvetlerini ihmal eder [74].

4.2.2. Bishop yöntemi

Bishop yöntemi, dairesel kesme yüzeyi için pratikte çok yaygındır. Bu yöntem, dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alır, ancak dilimler arası kesme kuvvetlerini ihmal eder [76]. Bu yöntemde dikkate alınan kuvvetler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Güvenlik katsayısı Denklem 4.3’te verilen bağıntıyla hesaplanmaktadır. [74].



Şekil 4.2. Bishop'un şev analizi yöntemi

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum (W - \frac{c'l \sin \alpha}{GS} - ul \cos \alpha) \quad (4.3)$$

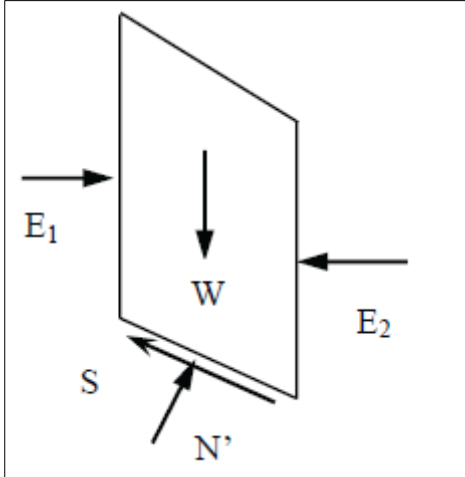
$$m_\alpha = \cos \alpha (1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi}{GS}) \quad (4.4)$$

Özetle Bishop yöntemi,

- güvenlik katsayısı için moment dengesini sağlar
- N için düşey kuvvet dengesini sağlar
- dilim içi normal kuvveti dikkate alır
- uygulamada daha yaygın ve çoğunlukla dairesel kesme yüzeyleri için geçerlidir [74].

4.2.3. Basitleştirilmiş Janbu yöntemi

Janbu'nun basitleştirilmiş yöntemi dairesel olmayan yenilmelerin hesaplanmasına dayanır ve güvenlik katsayısı yatay kuvvet dengesi ile belirlenir. Bishop yönteminde olduğu gibi, yöntem dilim içi kuvveti normal kabul eder fakat kesme kuvvetlerini ihmal eder. Temel normal kuvvet (N) Bishop yönteminde olduğu gibi belirlenir ve bu yöntemde dikkate alınan kuvvetler Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu yöntemde güvenlik katsayısı Denklem 4.5'te verilen bağıntıyla hesaplanmaktadır. [74].



Şekil 4.3. Basitleştirilmiş Janbu şev analiz yöntemi

$$GS = \frac{\sum(c'l + (N - ul)\tan\phi')\sec\alpha}{\sum W\tan\alpha + \sum\Delta E} \quad (4.5)$$

Denklemden,

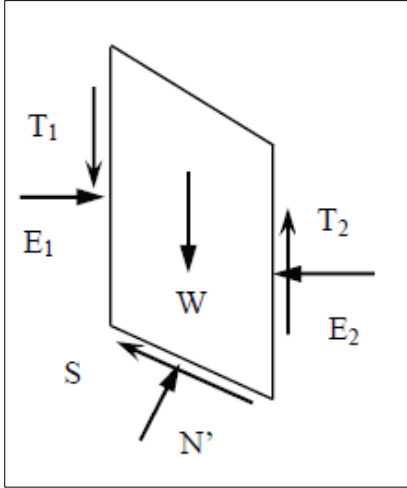
$$\Delta E = E2 - E1 \quad (\text{net dilimler arası normal kuvvetler})$$

Özetle basitleştirilmiş Janbu yöntemi,

- her iki kuvvet dengesini de karşılar
- moment dengesini sağlamaz
- dilim içi normal kuvvetleri dikkate alır ve dairesel olmayan kayma yüzeyi için yaygın olarak kullanılır [74].

4.2.4. Spencer yöntemi

Spencer yöntemi, dilimler arası kuvvetler için yapılan varsayım dışında bölgeler arası kuvvetler için sabit bir eğim varsayar ve her iki denge için de güvenlik katsayısı hesaplanır [77]. Bu yöntemde göre, dilimler arası kesme kuvvetleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bu yöntemde göre dilimler arası kesme kuvvetlerini veren bağıntı Denklem 4.8'de gösterilmiştir. [74].



Şekil 4.4. Spencer şev analiz yöntemi

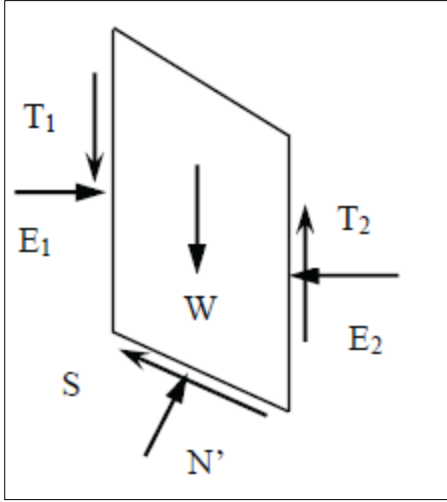
$$T = E \tan \phi \quad (4.6)$$

Özetle Spencer metodu,

- her iki dilim içi kuvveti de dikkate alır
- sabit bir dilimler arası kuvvet fonksiyonu varsayar ve moment, kuvvet dengesini karşılar [74].

4.2.5. Morgenstern-Price yöntemi

Morgenstern-Price yöntemi dilimler arası kuvvetlerin oranını sabit kabul eden Spencer yöntemine benzer bir yöntem geliştirmiştir ve dilimler arası normal ve kayma kuvvetlerini farklı kuvvet fonksiyonları ile tanımlamışlardır. Dilimler arası kayma kuvveti ile normal kuvvet arasındaki ilişki Denklem 4.6'da gösterilmiştir [78].



Şekil 4.3. Morgenstern-Price şev analiz yöntemi

$$T = f(x)\lambda E \quad (4.7)$$

Denklemden,

$f(x)$ = kayma yüzeyi boyunca sürekli değişen aralık içi kuvvet fonksiyonu

λ = varsayılan fonksiyonun ölçek faktörü

Yöntem, yarım sinüs, trapezoidal veya kullanıcı tanımlı herhangi bir kuvvet fonksiyonunun varsayılmasını önerir. Normal kuvvet ve dilimler arası kuvvetler için ilişkiler Janbu yönteminde verilenle aynıdır. Belirli bir kuvvet fonksiyonu için, dilimler arası kuvvetler, F_f denklemlerde F_m 'ye eşit olana kadar tekrarlama prosedürü ile hesaplanır.

Bu tez kapsamında, dairesel kayma mekanizması varsayıldığı için hesaplama hızı düşünülerek Bishop yöntemi kullanılmıştır.

5. MODELLEME YAKLAŞIMI

Bu bölümün amacı, doymamış koşullar altında şev duraylılık analizlerini yapmak için kullanılan metodolojiyi tanımlamaktır. Bu bölüm, sorunun temel bir açıklaması, hesaplama araçlarının sunumu, model doğrulama ve doğrulama prosedürünün uygulanması dahil olmak üzere çeşitli alanları kapsamaktadır.

Sayısal modeller, infiltrasyonun yağış yoğunluğuna göre nasıl değiştiğini ve şev duraylılığını nasıl etkilediğini incelemek için kullanılır. Sayısal modelleme ile gerçek bir fiziksel sürecin matematiksel simülasyonu oluşturularak ortamdan akan suyun fiziksel sürecini matematiksel olarak modellemek mümkündür. Ayrıca tamamen matematikselidir ve bu anlamda laboratuvardaki ölçekli fiziksel modellemeden veya tam ölçekli alan modellemesinden çok farklıdır [54].

Limit denge yaklaşım modellemesi ise şev duraylılık analizi problemlerinde oldukça bilinen bir yöntemdir. Bu yöntem, olası bir göçme yüzeyinin üzerinde kalan zemin kütlelerinin kuvvet veya moment dengesini dikkate almaktadır [54].

Limit denge yaklaşım modellemesinde kayma yüzeyinin üzerindeki zemin kütlelerinin rijit olduğu varsayılır ve yenilme anında, mevcut kesme mukavemetinin kayma yüzeyinin tüm noktalarında aynı oranda hareket ettiği varsayılır. Bu nedenle güvenlik katsayısı, yenilme yüzeyi boyunca sabittir [79]. Modelleme yaklaşımı ile karmaşık stratigrafi, düzensiz boşluk suyu basınç koşulları, çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan kayma mukavemet modelleri, hemen hemen her türlü kayma yüzeyi şekli oluşturulabilir [54].

5.1. Hesaplama Araçları

Tez kapsamında kullanılan Geostudio paket programı, 40 yılı aşkın süredir geoteknik ve jeo-çevresel modelleme için son teknoloji yazılımlar geliştirmektedir. Geostudio, jeoloji mühendisliği, inşaat mühendisliği, maden mühendisliği ve geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir yazılımdır.

Yazılım içerisinde çalışma amacına göre farklı programlar aşağıda sıralanmıştır.

- Slope / W
- Seep / W
- Sigma / W
- Quake / W
- Temp
- Ctran / W
- Vadose / W

Paket programlar yardımıyla gerilme-şekil değiştirme, yer altı suyu akım modeli, şev duraylılığı gibi analizler gerçekleştirilebilir. Slope / W ile duraylılık, Seep / W ile yer altı suyu akım, Sigma / W ile gerilme ve deformasyon, Quake / W ile dinamik, Temp ile ısı, Ctran / W ile çevreleme Vadose / W ile vadoz bölgenin modellenmesi gerçekleştirilebilir. [54].

Tez kapsamında yazılım içerisinde bulunan Seep/w ve Slope/w programları 5 Aralık 2019-31 Ocak 2020 tarihleri arasında lisanslı olarak kullanılmıştır.

5.1.1 Seep/w

Şev duraylılık analizinde zeminler içerisindeki boşluk suyu basınç dağılımını değerlendirmek için Seep/w yazılımı kullanılmıştır. Seep/w yazılımı (Şekil 5.1), zeminlerdeki yer altı suyu akımını simüle edebilen sonlu elemanlar programıdır. Kararlı durum veya geçici analiz için doymuş veya doymamış koşullar altında farklı tipte malzeme ve sınır koşullarını iki boyutlu olarak modellenenebilir. Farklı araştırmacılar tarafından yer altı suyu akım modellemesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

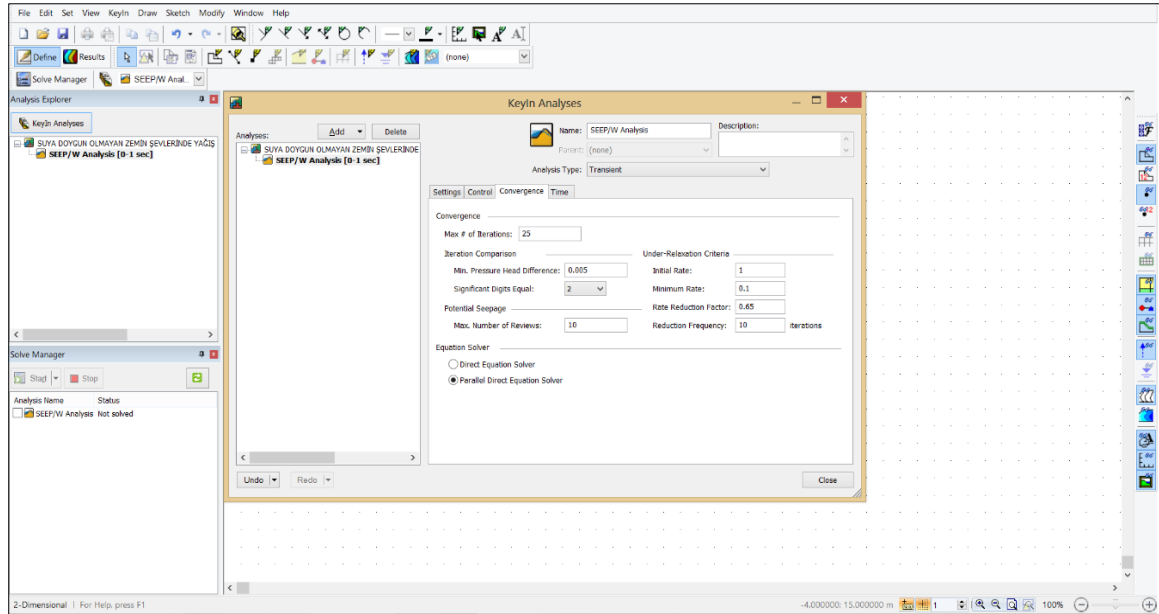
Yazılım, akış denklemlerini çözmek için girdiler olarak malzemelerin zemin su karakteristik eğrisine (SWCC) ve hidrolik iletkenlik fonksiyonlarına ihtiyaç duymaktadır.

Yazılımı kullanmak için üç temel adım gereklidir:

- 1) Model alanını küçük alanlara (elemanlara) bölme
- 2) Malzeme özelliklerini belirlemek ve uygulamak
- 3) Sınır koşullarını tanımlamak

Modelin geometrisi ilk önce iki boyutta tanımlanır. Malzeme özellikleri (doğrudan ölçümlerden oluşturulan, literatürden alınan veya öngörücü yöntemlerle üretilen) uygulanır. Modelin yapısı, başlangıç koşullarını ve sınır koşullarını (zaman içinde değişebilen) içermelidir. Dış ortamın genellikle modeller için sınır koşullarını, sabit veya zaman değişkenli sürekli akış şeklinde tanımladığı düşünülür (çeşitli yoğunluk veya süre seviyelerinde yağış içerir). Bu sınır koşulları, öğenin kenarlarına veya düğümlerine uygulanır.

Seep/w ile çalışmanın bu bölümünü yürütmek için iki varsayım (sadeleştirme) benimsenmiştir; 1) buharlaşmanın etkisi ihmal edilir; 2) su tutma ve k fonksiyonunun histerezisi dikkate alınmaz [54].

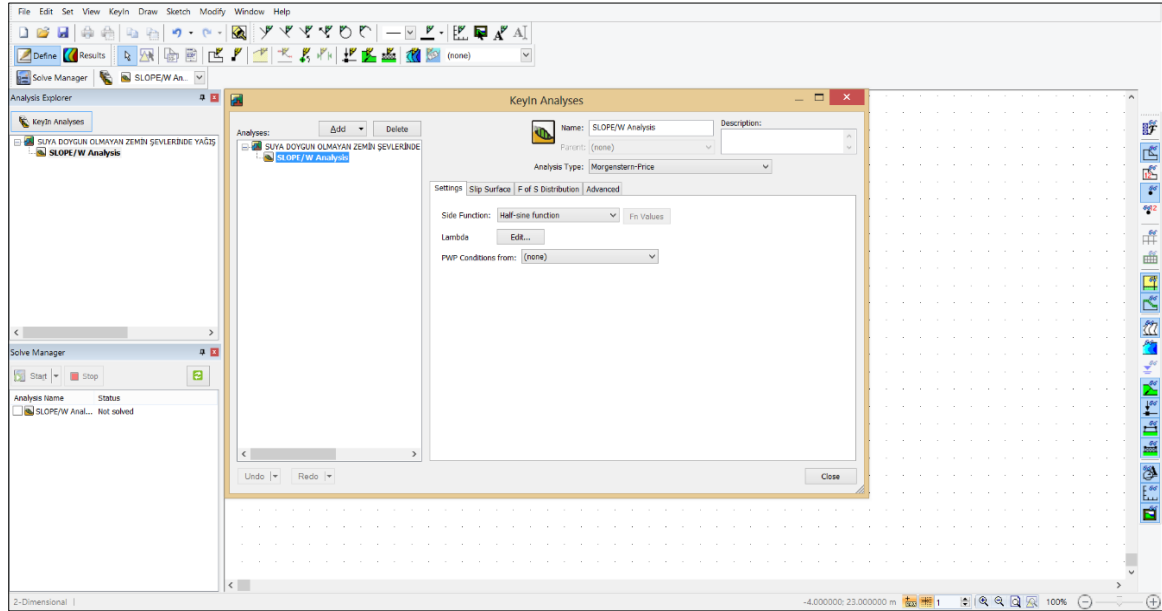


Şekil 5.1. Seep/w yazılımı arayüz görüntüsü

5.1.2. Slope/w

Slope / w yazılımı (Şekil 5.2), şev duraylılığı analizlerinde güvenlik katsayısını hesaplamak için limit denge teorisini kullanır. Yazılım, birçok araştırmacı tarafından yer altı suyu akımına maruz kalan eğimlerin duraylılığını incelemek için kullanılmaktadır. Ayrıca değişken boşluk suyu basıncı koşullarına sahip heterojen toprak türlerini ve karmaşık kayma yüzeyi geometrisini modelleme yeteneğine sahiptir.

Eğimin güvenlik katsayısını değerlendirmek için Bishop, Janbu ve Morgenstern-Price da dahil olmak üzere çeşitli dilim yöntemleri mevcuttur [54].



Şekil 5.2. Slope/w yazılımı arayüz görüntüsü

6. VAKA VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölüm; literatürden seçilen üç vaka çalışması ile Ankara'nın Kazan ilçesinde suya tam doygun olmayan Pliyosen yaşlı killi zeminde meydana gelen heyelanın analizi çalışmasından oluşmaktadır. Çalışmalar, farklı yağış yoğunlukları ve yer altı suyu koşulları altında çeşitli jeolojik birimlerden oluşan şevlerin sayısal ve limit denge modeli kullanılarak duraylılık analizlerini kapsamaktadır.

Literatürden vakalar seçilirken; suya tam doygun olmayan koşullardaki zeminlerden oluşan, yağış yoğunlukları ve topografyaları nedeniyle şev yenilmelerinin sık meydana geldiği çalışmalar seçilmiştir. Analizlerde ve incelenen vakalarda tüm parametreler sunulan verilere bağlı alınarak yapılmıştır. Literatürden seçilen vakalar hem tez kapsamında kullanılan metodolojinin doğrulanması hem de yağış yoğunluğunun şev stabilitesine etkisini değerlendirmek amacıyla değerlendirilmiştir.

6.1. Örnek Vaka I

Literatürden seçilen ilk vaka çalışması, Çin'in Changjiang bölgesinde doygun olmayan zemin koşullarında bulunan şevin yağışa bağlı yenilme sorunlarını sunmaktadır. Saha araştırmaları sonucunda çok geniş bir alanda yayılım gösteren kırmızı kil bölgenin zeminini oluşturmaktadır [80]. Özellikle yağış sırasında kırmızı killi yamaçlarda şev duraylılığı sorunu, Çin'deki ciddi jeo-çevresel felaketlerden biridir [80]. Bu nedenle Xue ve ark. tarafından 2016 yılında bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kırmızı kilin karakteristikleri ve parametrelerin değerleri Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

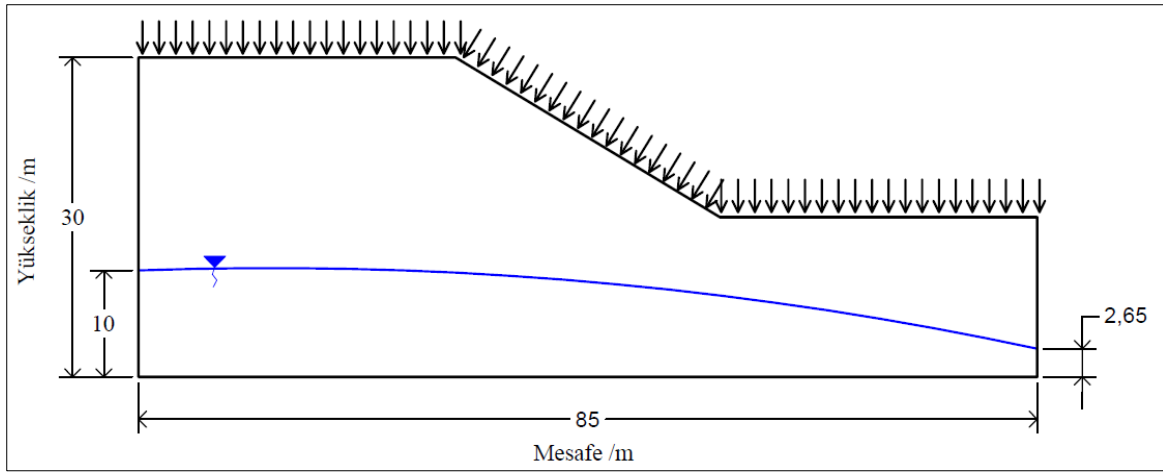
Çizelge 6.1. Örnek Vaka I için programda kullanılan zemin parametreleri

Materyal Özellikleri	Değerler
Birim hacim ağırlığı, γ (kN/m ³)	20
Efektif kohezyon, c' (kPa)	30
İçsel sürtünme açısı, ϕ' (°)	15

Bu parametreleri uygun laboratuvar testlerinin yanında saha ölçümleri ile elde etmişlerdir. Zemin örneğini killi kum olarak sınıflandırmışlardır. Xue ve arkadaşları 106 sayısal test ile dört grupta sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına dayalı en iyi

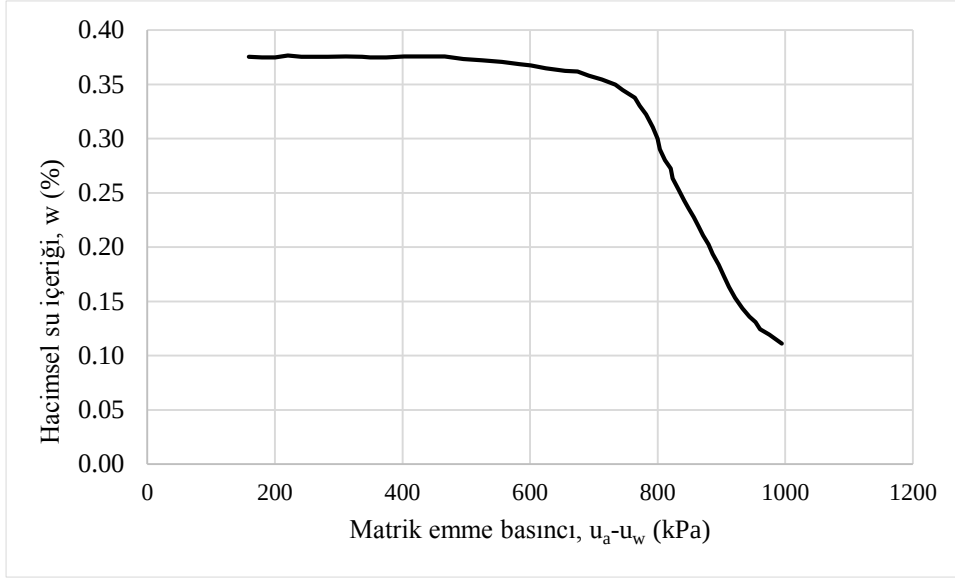
sınır ölçüsünü şu şekilde belirtmişlerdir: şev topuğundan sol kenara kadar olan mesafe şev yüksekliğinin 1,5 katı, şev kretinden sağ kenara olan mesafe şev yüksekliğinin 2,5 katı ve dip kenarından şev kretine kadar olan mesafe şev yüksekliğinin 2 katından daha fazladır.

Bu veriler doğrultusunda şev geometrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan şev geometrisi Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Oluşturulan şevin yüksekliği 15 m’dir. Su tablasının başlangıç derinliği Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Şekilde 2039 düğüm noktası ve 2004 adet sonlu eleman bulunmaktadır. Şevin üst sınırındaki elemanlar, dipteki elemanlara göre iki kat daha küçüktür. Şevde mekanik parametrelerdeki (boşluk suyu basıncı vb.) değişimleri takip edebilmek için analizler yapılmıştır [80].



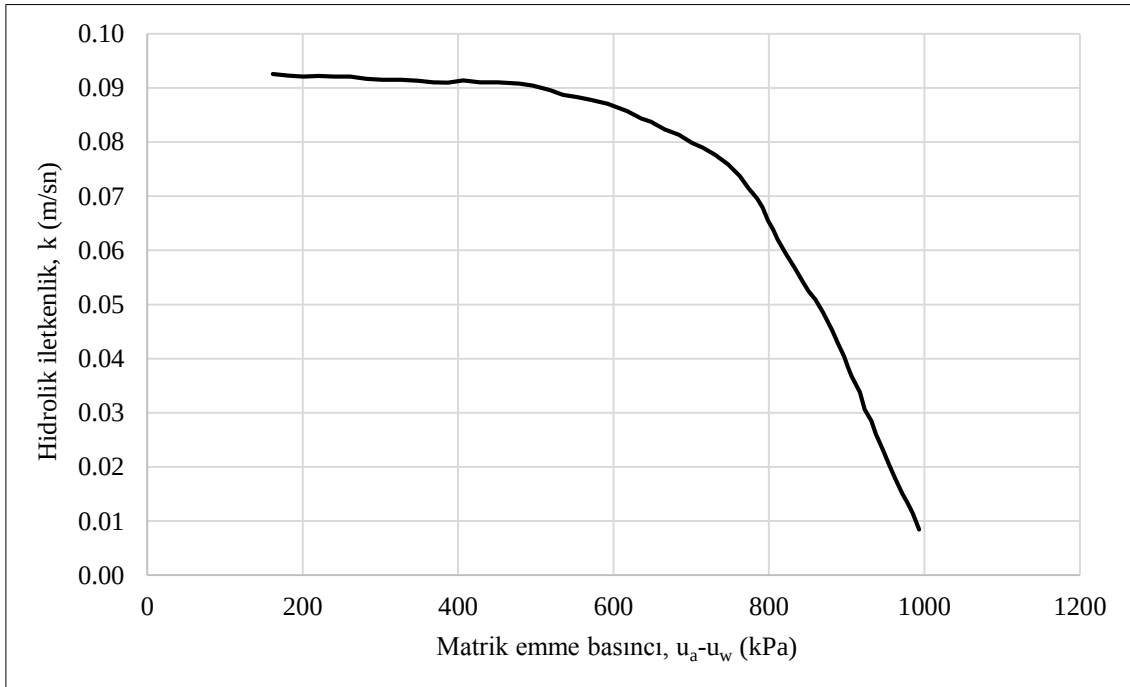
Şekil 6.1. Örnek Vaka I için kullanılan kesitin geometrisi [80]

Kırmızı kilin doymun geçirimsizlik katsayısı $k_s 0,0323$ m/s, doymun haldeki hacimsel su içeriği $\theta_w 0,37$, rezidüel su içeriği, $\theta_r 0,016$ ’dır. Hacimsel su içeriği fonksiyonunu tahmin etmek için Şekil 6.2’de gösterilen örnek fonksiyonlar metodu kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Hacimsel su içeriği fonksiyonu

Şekil 6.3'te gösterilen Fredlund ve Xing 1994 zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu kullanılarak zeminin hidrolik iletkenlik fonksiyonu analizde kullanılmıştır.

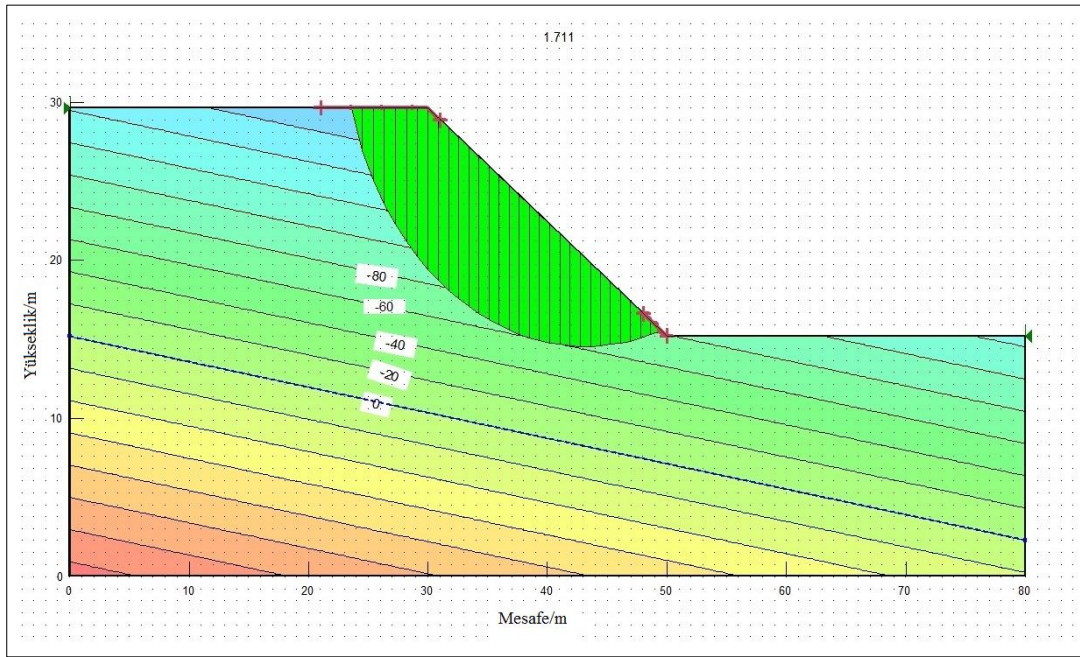


Şekil 6.3. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu

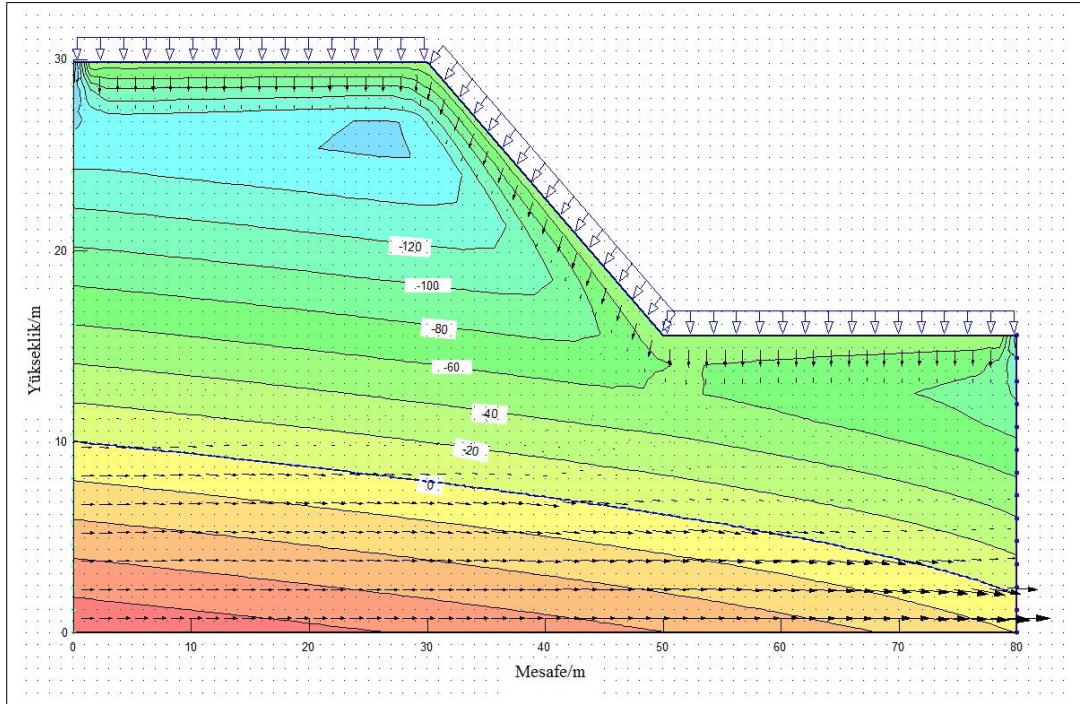
Çalışmada, yağmur yoğunluğu ile şev kayma olasılığı arasındaki ilişki analiz edilmiş ve şev kaymasını tetikleyen aşırı yağışın modellenmesi yapılmıştır. Çalışmada aşırı yağmur

yoğunluğu 168,69 mm/gün olarak sunulmuştur. Çalışmada 1, 2, 3, 4 ve 5 günlük yağmur süreleri seçilmiştir ve $6,25 \times 10^{-3}$ m/s yağmur yoğunluğu modele uygulanmıştır. Şekil 6.4'te çalışmada kullanılan şev modelinde doymun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonuçları görülmektedir. Sızıntı analizinde kullanılan sonlu elemanlar ağı, üçgen ve dörtgen elemanlardan oluşan bir hibrit ağıdır. Şevin doğal haldeki güvenlik katsayısı 1,711 olarak bulunmuştur. Daha sonra Şekil 6.5'te görüleceği üzere 24 saatlik yağmur verisi uygulanmıştır. Bunun neticesinde güvenlik katsayısı değeri Şekil 6.6'da görüldüğü gibi 1,691'e düşerken yer altı suyu seviyesi ise yükselmiştir.

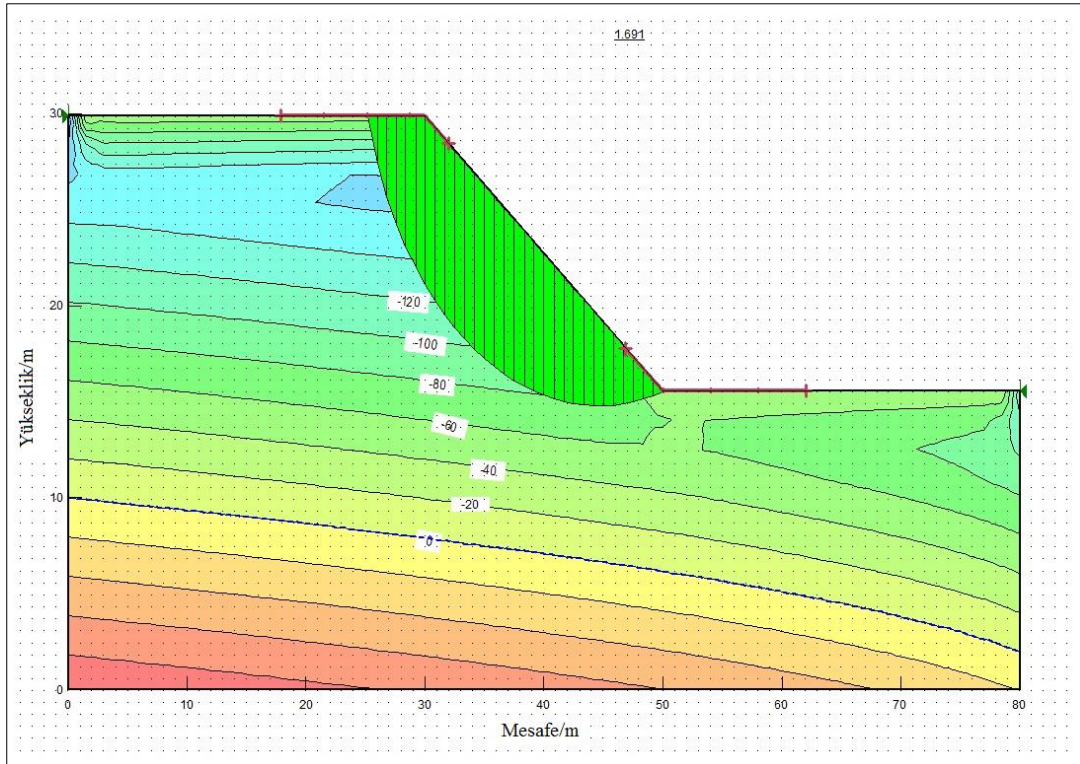
24 saatlik yağmur verisinden sonra 120 saate kadar yağış uygulanmış. Boşluk suyu basınçlarının ve güvenlik katsayılarının değişimleri Şekil 6.5'ten Şekil 6.14'e kadar olan şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu

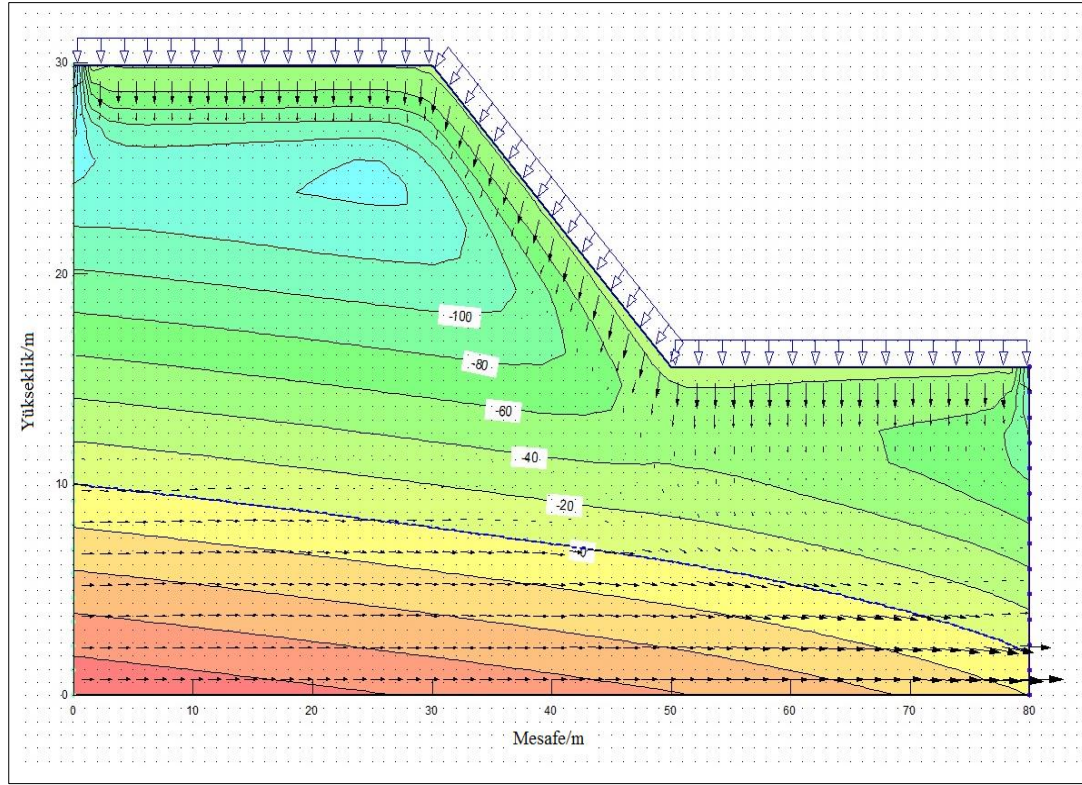


Şekil 6.5. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi

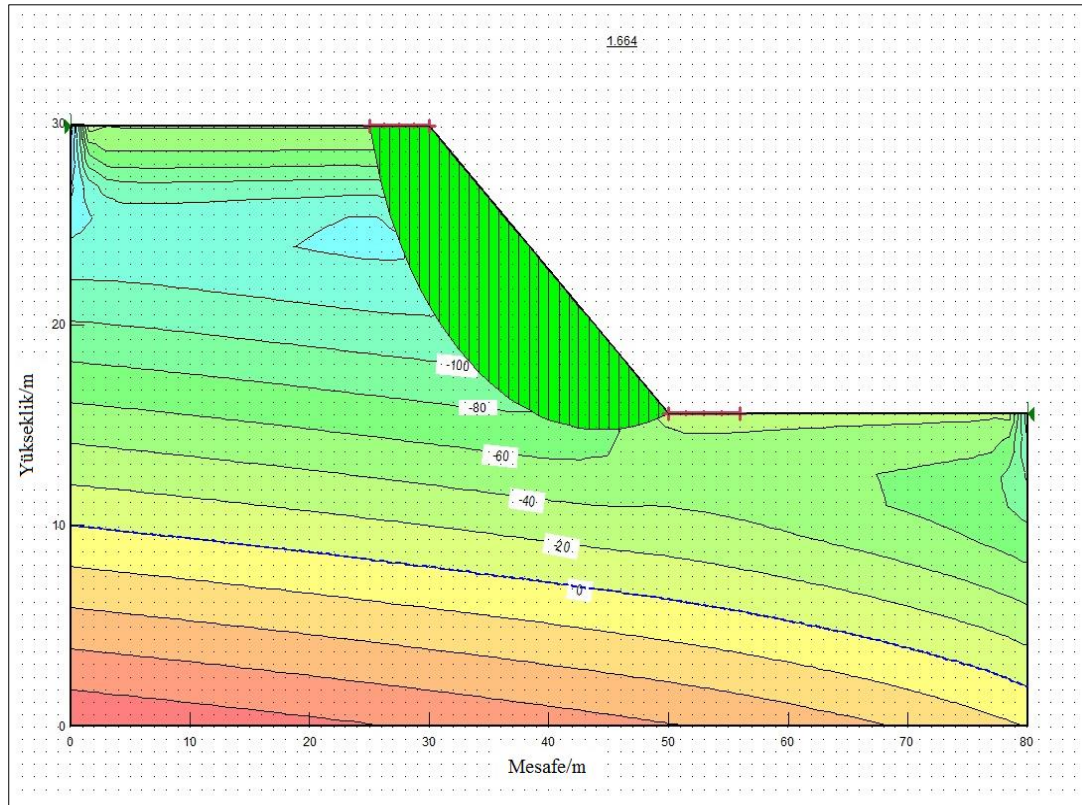


Şekil 6.6. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

48 saatlik yağmur verisi uygulandığında boşluk suyu basıncı değerleri ve güvenlik katsayısı Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de görülmektedir.

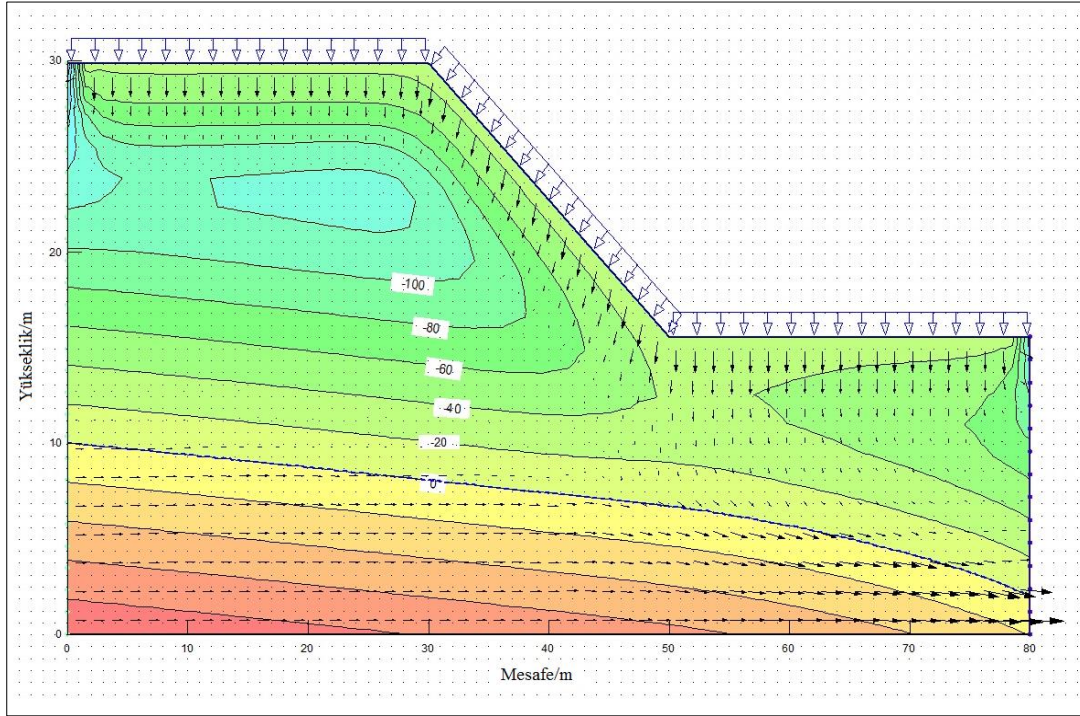


Şekil 6.7. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi

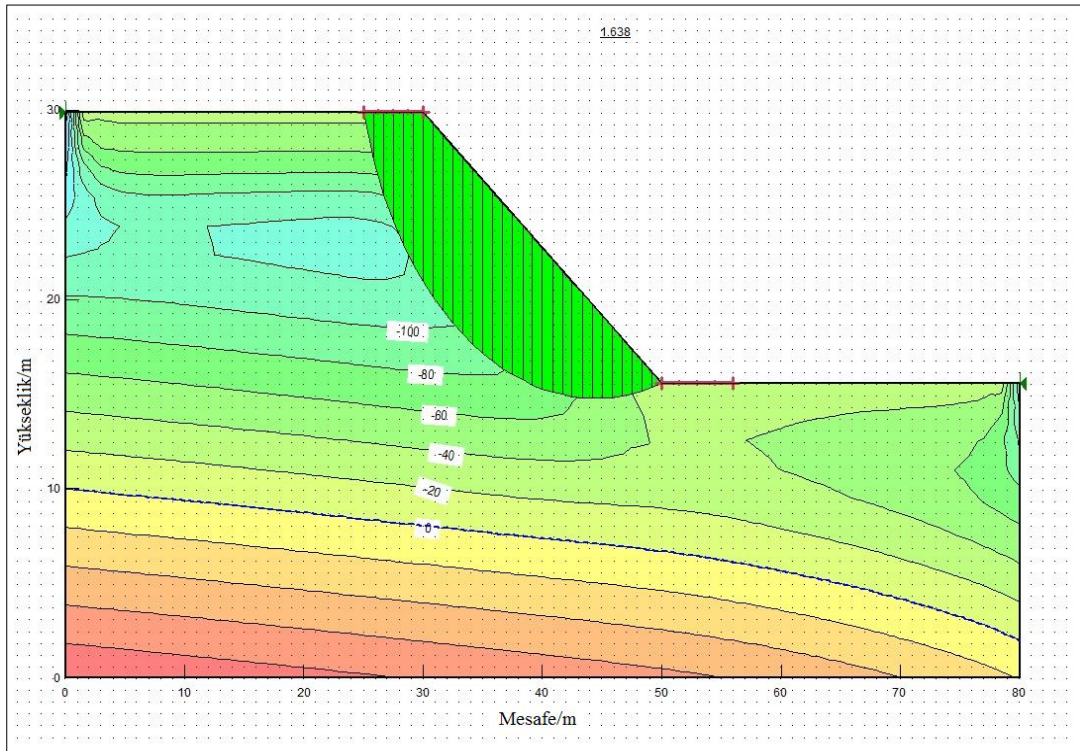


Şekil 6.8. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

72 saatlik yağmur verisi uygulandığında boşluk suyu basıncı değerleri ve güvenlik katsayısı Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da görülmektedir.

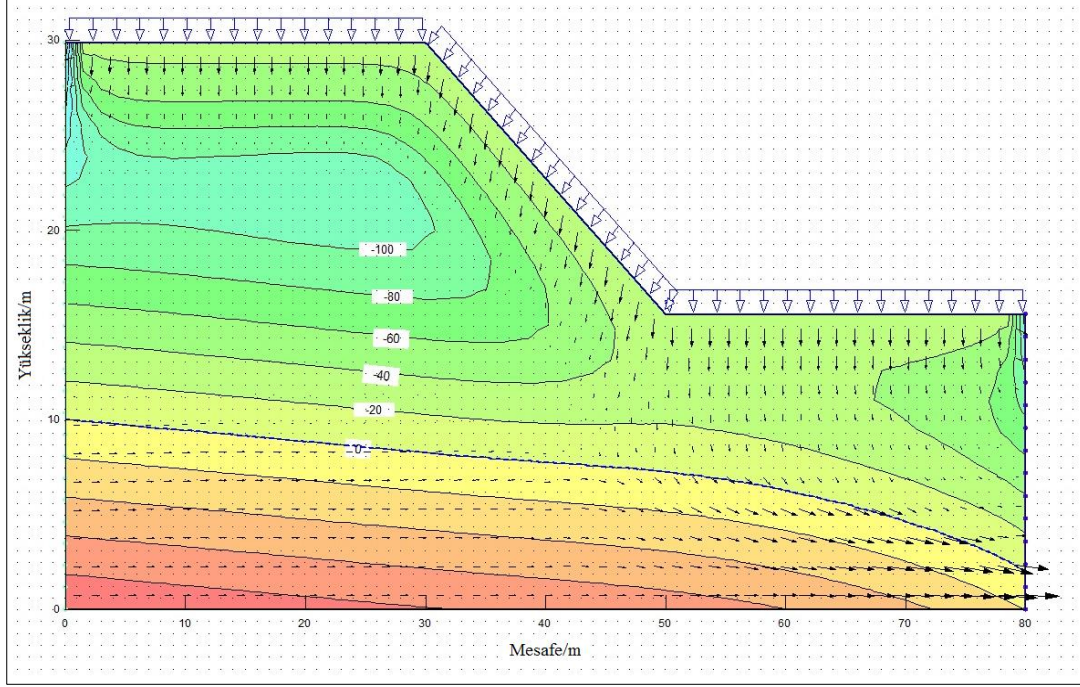


Şekil 6.9. 72 saat yağış infiltrasyonundan sonra simüle edilmiş şev geometrisi

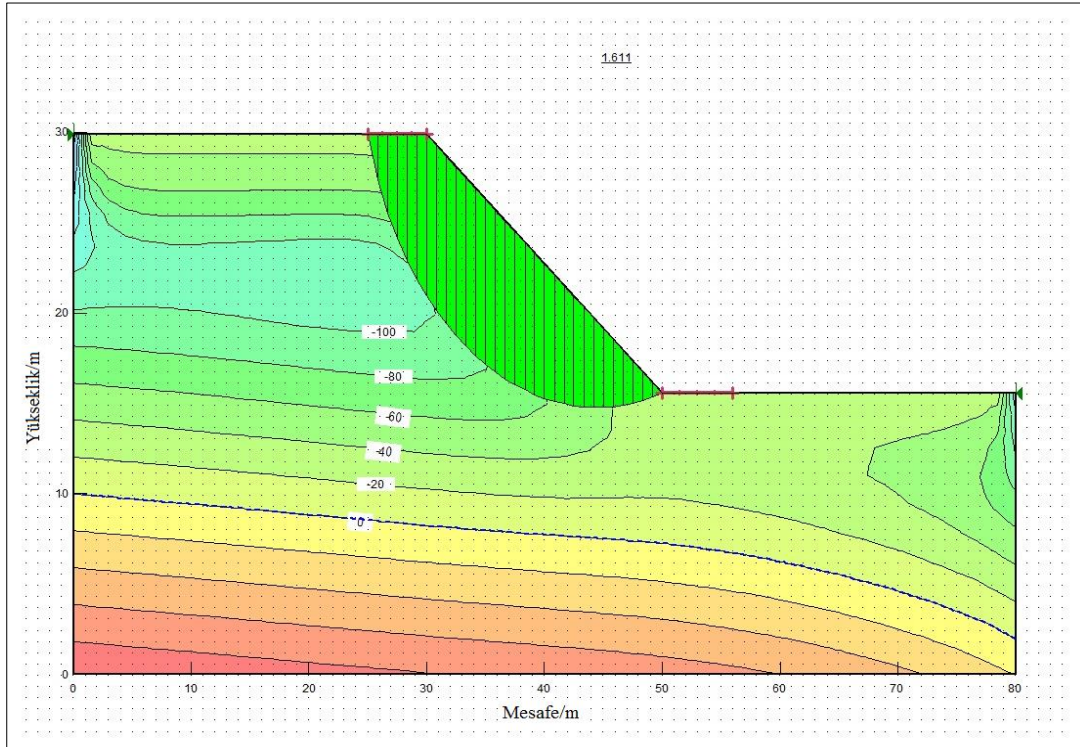


Şekil 6.10. 72 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı

96 saatlik yağmur verisi uygulandığında boşluk suyu basıncı değerleri ve güvenlik katsayısı Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de görülmektedir.

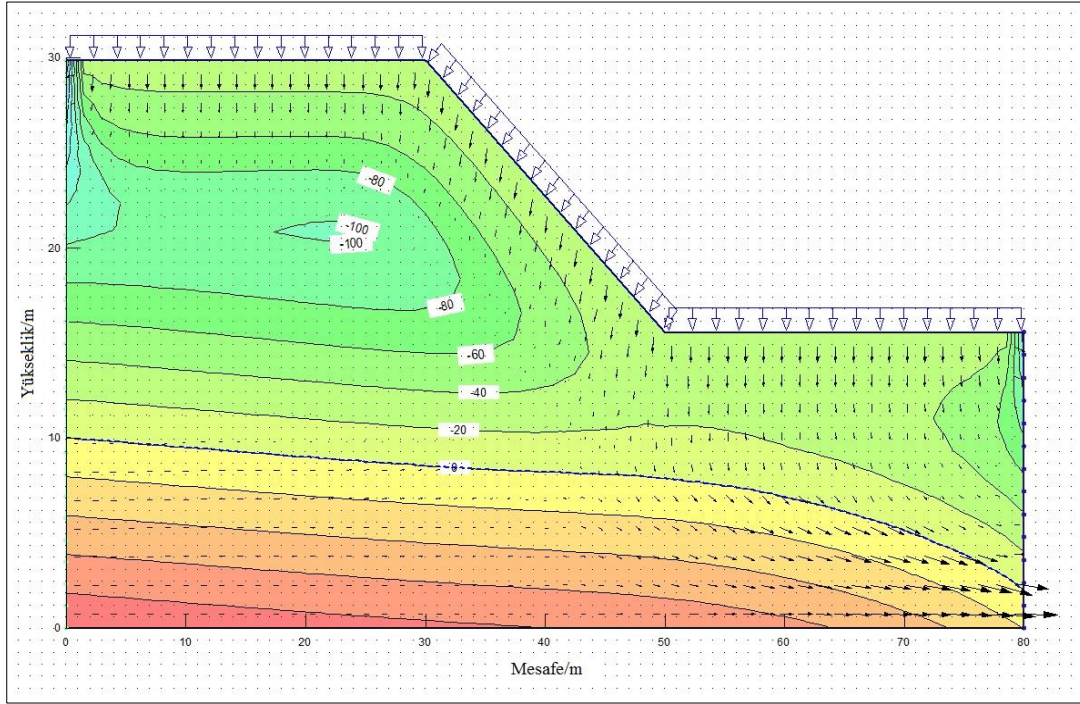


Şekil 6.11. 96 saat yağış infiltrasyonundan sonra geçici koşullar altında simüle edilmiş şev geometrisi

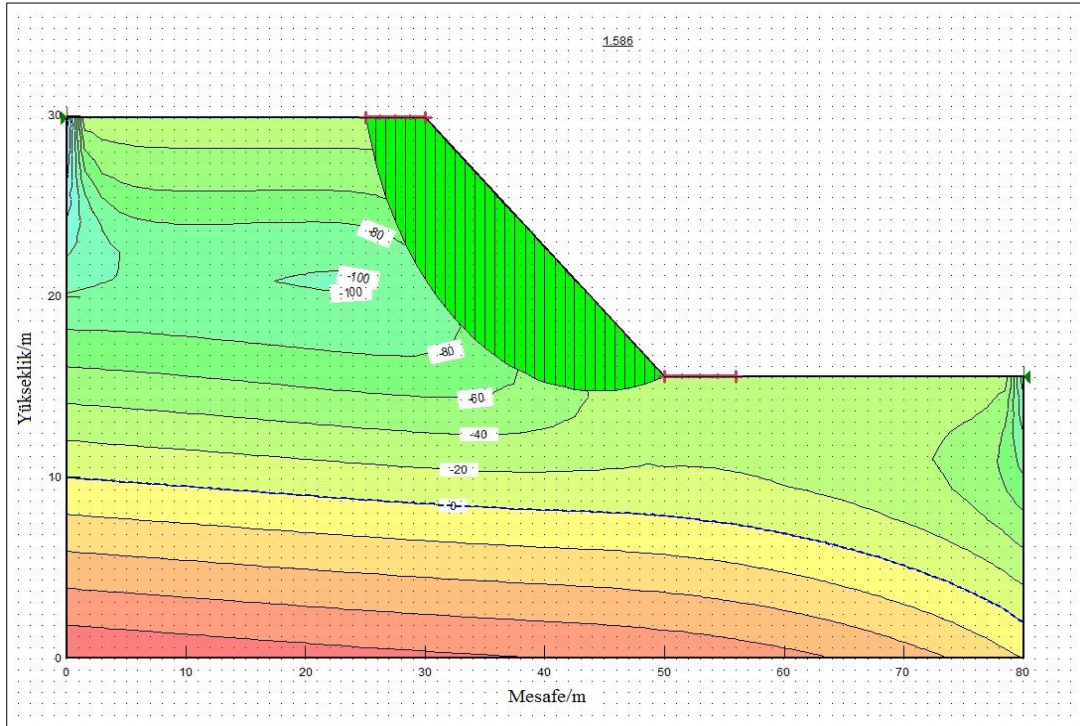


Şekil 6.12. 96 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı

120 saatlik yağmur verisi uygulandığında boşluk suyu basıncı değerleri ve güvenlik katsayısı Şekil 6.28 ve Şekil 6.29’da görülmektedir.

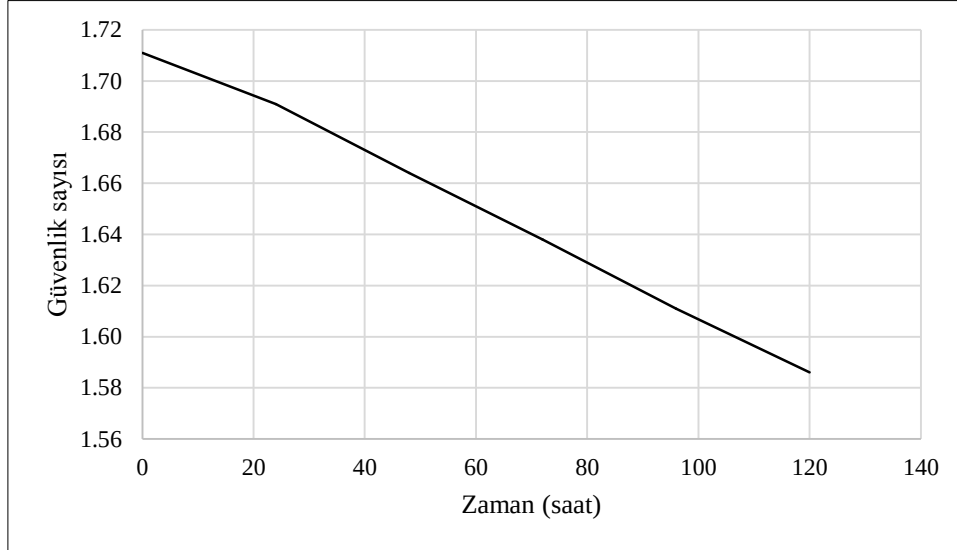


Şekil 6.13. 120 saat yağış infiltrasyonundan sonra geçici koşullar altında simüle edilmiş şev geometrisi



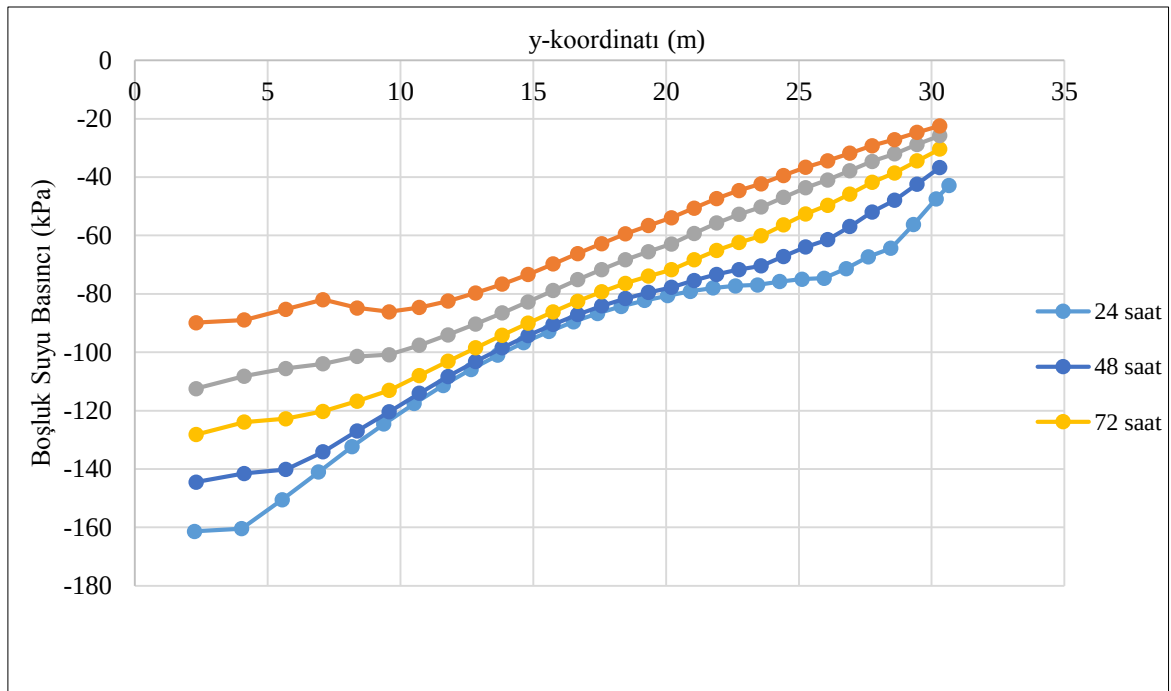
Şekil 6.14. 120 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncı dağılımı ve güvenlik katsayısı

Şekil 6.15’de ise yağmur verisi uygulandıktan sonra geçen süre içerisinde, güvenlik katsayısının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yağmur etkisinin süresi arttıkça güvenlik katsayısı düşmektedir.



Şekil 6.15. Yağış yoğunluğu ile güvenlik katsayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.16’da yağmur etkisi sonucu değişen boşluk suyu basıncı görülmektedir. Yağış sırasında, negatif boşluk suyu basıncı pozitif tarafa doğru artmıştır.



Şekil 6.16. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi

Şekil 6.16’da görüleceği gibi farklı yağış yoğunluklarına maruz kalan zemin eğimi için farklı boşluk suyu basınç dağılımlarına yol açtığını gözlemlemek mümkündür.

6.2. Örnek Vaka II

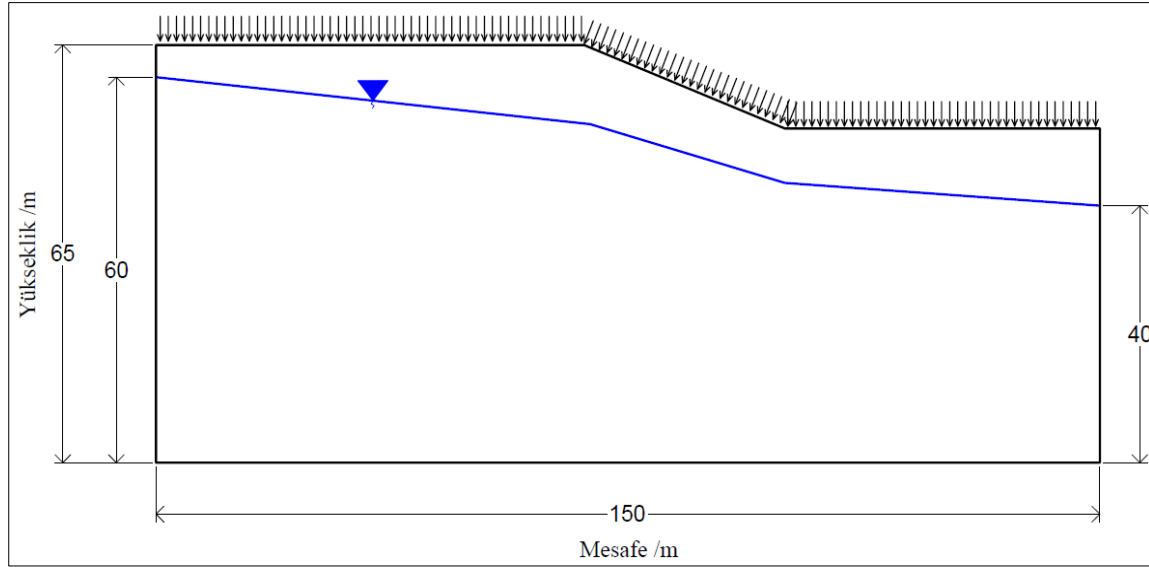
İklim değişikliğinin, geçim kaynaklarını ve yaşam ortamlarını önemli ölçüde etkilemesi nedeniyle küresel olarak insanlar için büyük bir endişe kaynağı olmuştur. Sıcaklıkların artacağı ve yağışların daha yoğun ve daha seyrek olacağı tahmin edilmektedir [81].

Literatürden seçilen ikinci vaka çalışmasında, iklim değişikliğinin etkisi altındaki Singapur’da yağış yoğunluğundaki değişimin şev duraylılığına etkisi ile ilgili olarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada Kristo ve arkadaşları Singapur’da yağış yoğunluğundaki mevsimsel değişimlerin ve bunların doygun olmayan yamaçlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın kapsamı, Singapur’daki yağış modellerinde ve yağış miktarlarındaki değişikliklerin istatistiksel analizlerini içermektedir. Buna ek olarak, yağış yoğunluğundaki değişiklikler nedeniyle güvenlik katsayısının değişimlerini gözlemlemek için şev duraylılık analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan şev zeminine ait parametreler Çizelge 6.1’de gösterilmektedir. Kristo ve ark. (2017) çalışmasından elde edilen ve sayısal analiz için kullanılan şev geometrisi, sınır koşulları, yer altı su seviyesinin konumu Şekil 6.17’de gösterilmektedir. Şev 15 metre yüksekliğinde olup 27 derece şev açısına sahiptir. 2003 yılı için 8 mm/s, 2050 yılı için 31 mm/s ve 2100 yılı için 57 mm/s yağmur yoğunluğu mevcuttur. Bu analizde en yüksek yağış yoğunluğu olan 57 mm/s yağmur yoğunluğu 10 saat boyunca etki ettirilmiştir [81].

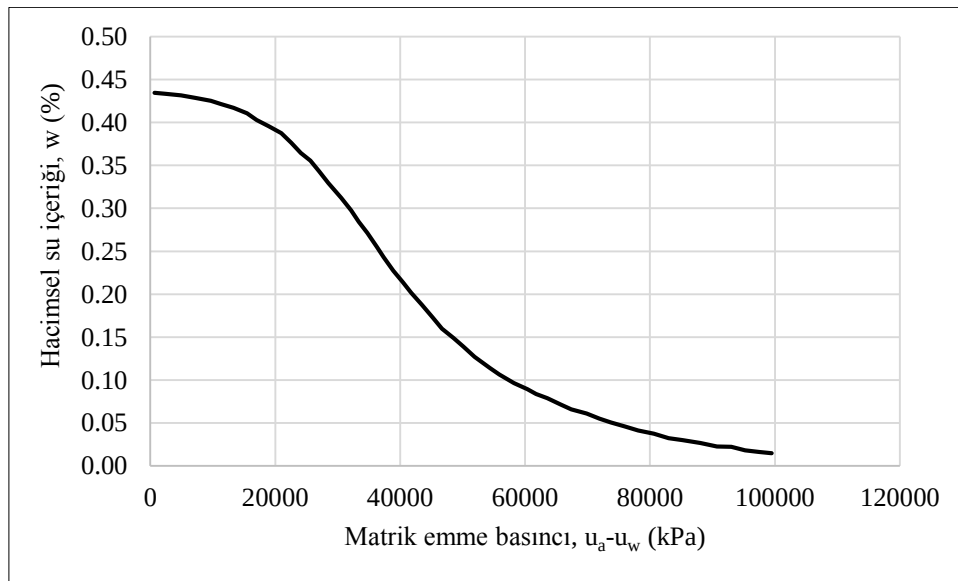
Çizelge 6.2. Örnek Vaka II için programda kullanılan zemin parametreleri

Materyal Özellikleri	Değerler
Matrik emmedeki değişime bağlı olarak kayma mukavemetindeki artışı gösteren açı, ϕ_b (°)	20
Birim hacim ağırlığı, γ (kN/m ³)	20
Efektif kohezyon, c' (kPa)	8
İçsel sürtünme açısı, ϕ' (°)	35

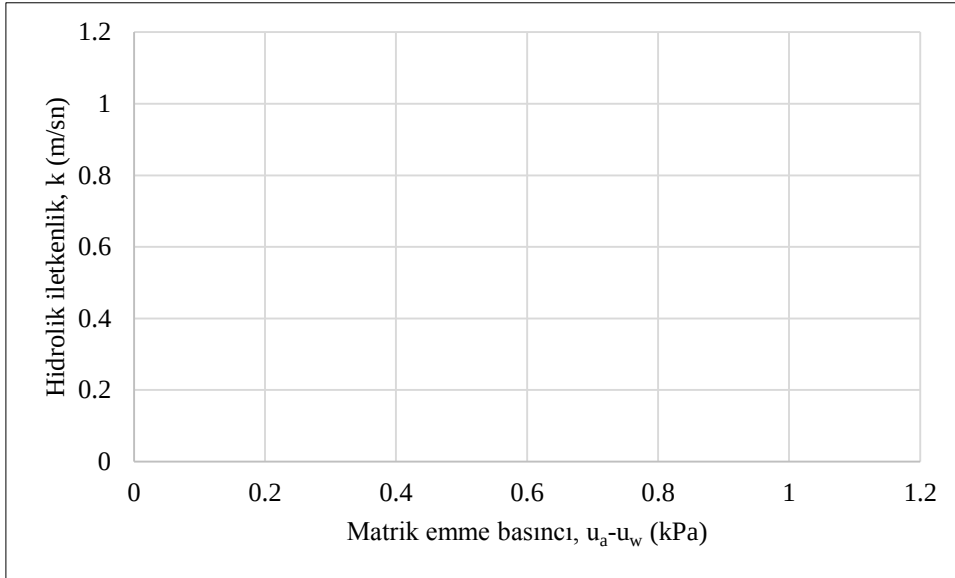


Şekil 6.17. Örnek Vaka II için kullanılan kesitin geometrisi [81]

Hacimsel su içeriğine bağlı matrik emme basıncı Şekil 6.18'de, matrik emme basıncına bağlı hidrolik iletkenlik ise Şekil 6.19'da gösterilmektedir.

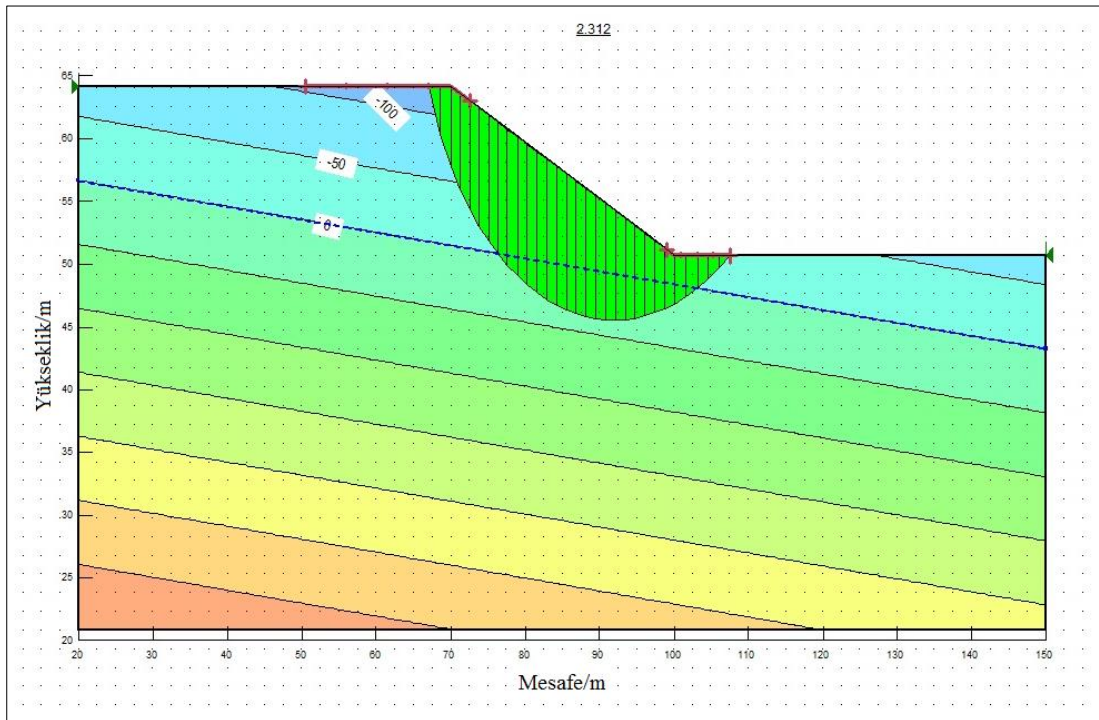


Şekil 6.18. Hacimsel su içeriği fonksiyonu



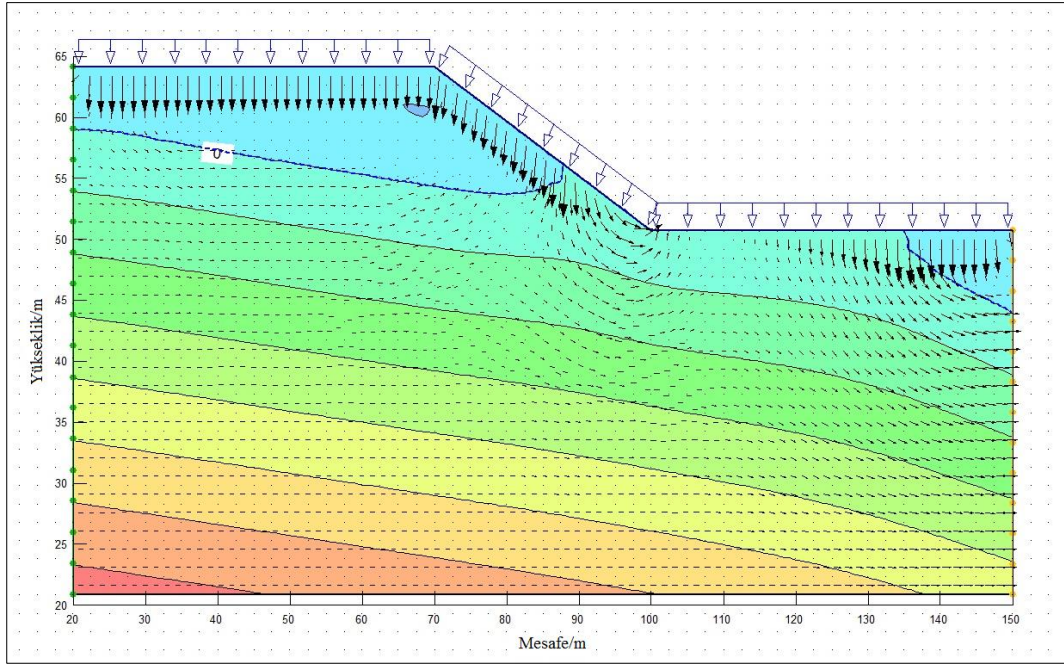
Şekil 6.19. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu

Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan şev duraylılık analizi sonucu güvenlik katsayısı Şekil 6.20’de görüldüğü gibi 2,312 olarak elde edilmiştir.

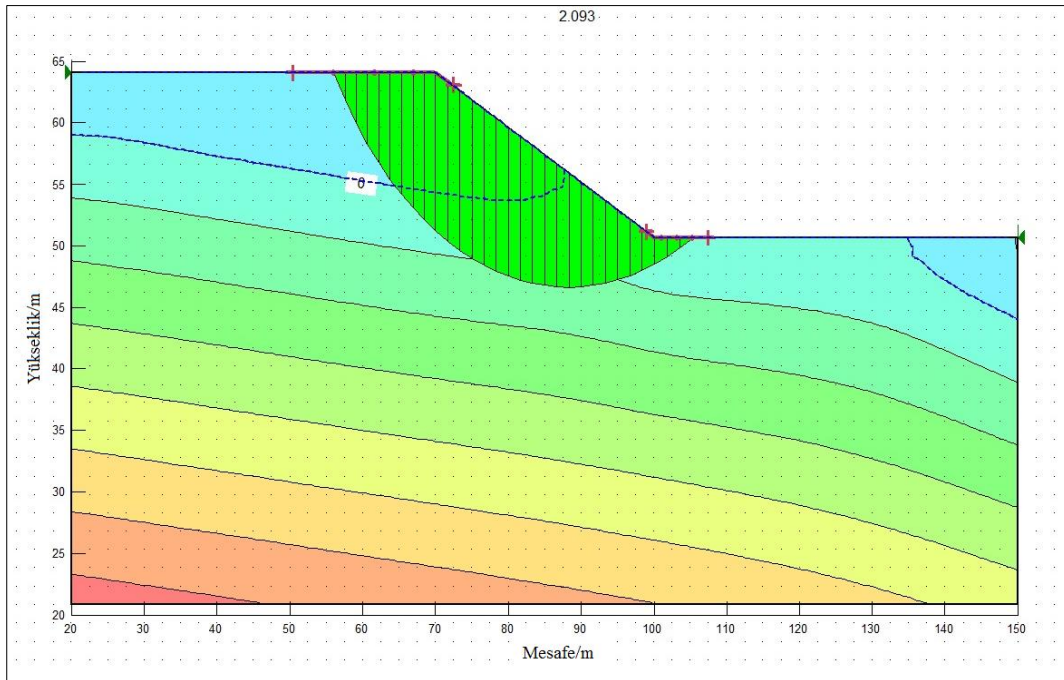


Şekil 6.20. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu

10 saat süren yağış boyunca güvenlik katsayısı değeri 2,093’e düşmüştür. Yağmurun etkidiği şev profili Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de görülmektedir.



Şekil 6.21. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı



Şekil 6.22. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

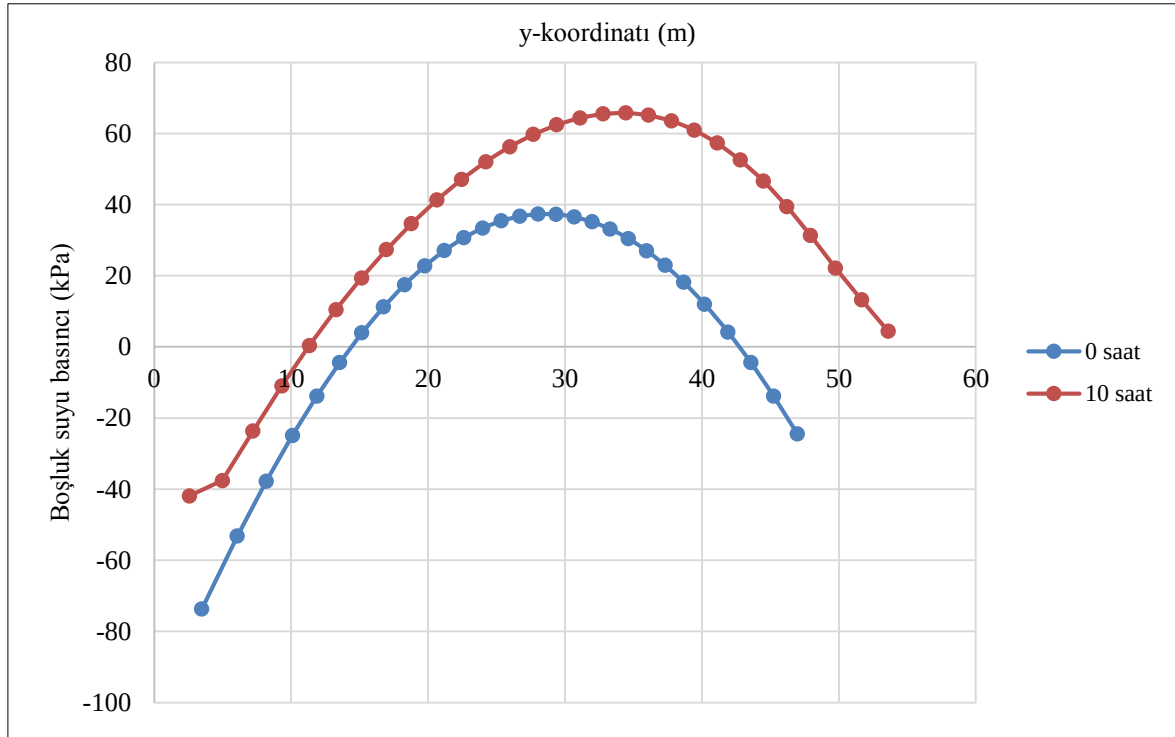
Mavi kesik çizgi yer altı suyu seviyesinin eğim çizgisini göstermektedir. Yer altı suyu seviyesinin altındaki zemin tabakası tamamen doymuş ve pozitif boşluk suyu basıncına sahipken, yer altı suyu seviyesinin üzerindeki zemin tabakaları doymun durumda değildir ve

zeminde negatif boşluk suyu basıncı görülmektedir. Analizdeki güvenlik katsayısının zamanla değişimi Şekil 6.23’de gösterilmektedir.



Şekil 6.23. Yağış yoğunluğu ile güvenlik katsayısı arasındaki ilişki

Şekil 6.24’te 10 saatlik yağışa bağlı olarak boşluk suyu basıncının derinlik üzerindeki değişimi incelenmiştir.



Şekil 6.24. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi

6.3. Örnek Vaka III

Literatürden seçilen üçüncü vaka çalışmasında, Doğu Kanada'nın Quebec şehrinde suya tam doygun olmayan zeminlerden oluşan Champlain deniz kili olarak adlandırılan hassas buzul deniz kili incelenecektir.

Bu kil yataklarındaki şev yenilme mekanizmalarını daha iyi anlamak için son 50 yılda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Champlain Deniz kili (veya Leda kili), buzul kökenlidir. Kil, St Lawrence nehrinin ovalarında ve kollarında geniş alanları kaplamaktadır [82]. Champlain Deniz kili, Kanada'nın endüstriyel ve en kalabalık bölgelerinde yaygın olarak bulunmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar, geçtiğimiz 50 yılda Champlain deniz kili yataklarındaki heyelanları incelemişlerdir. Bu çalışmalardan biri 2014 yılında Vanapalli ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir.

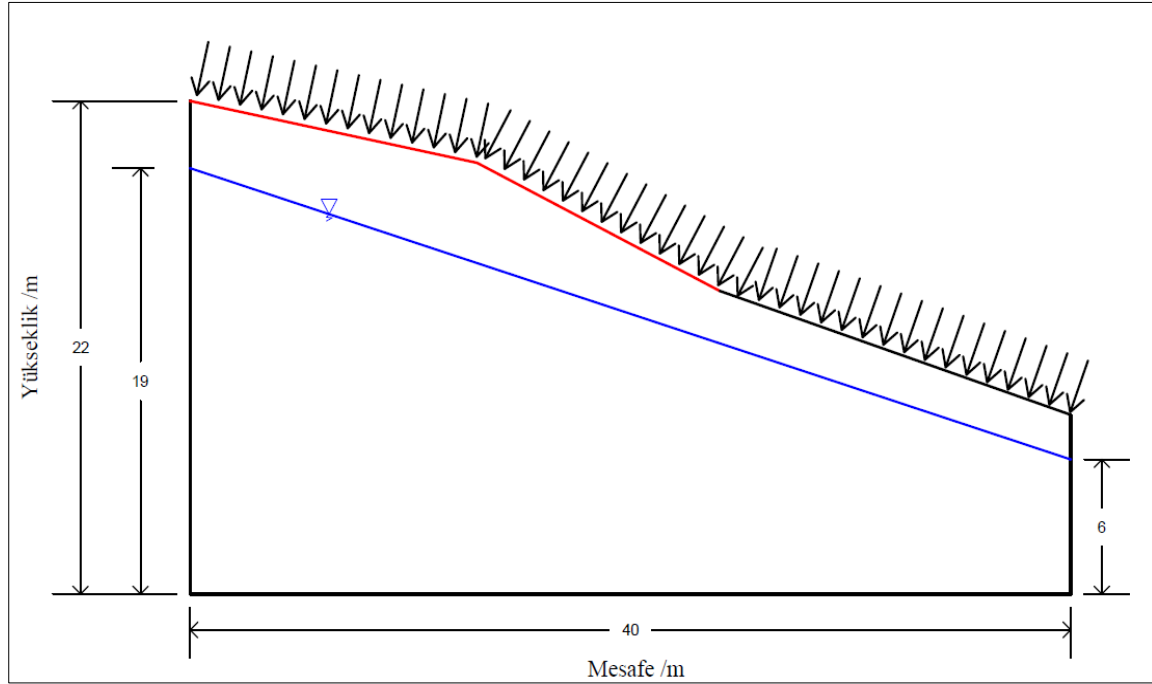
Bu vaka analizinde Kanada'nın kuzey bölgesinde bulunan Champlain deniz kili yataklarındaki boşluk suyu basınç dağılım profillerini tahmin etmek ve yamaçların güvenlik katsayılarını belirlemek için sonlu eleman yazılımları ile yer altı suyu akım modeli ve şev duraylılık analizleri incelenecektir. Analiz için kullanılan zemin parametreleri çizelge 6.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.3. Örnek Vaka III için programda kullanılan zemin parametreleri

Materyal Özellikleri	Değerler
Birim hacim ağırlığı, γ (kN/m ³)	19,8
Efektif kohezyon, c' (kPa)	0
İçsel sürtünme açısı, ϕ' (°)	33

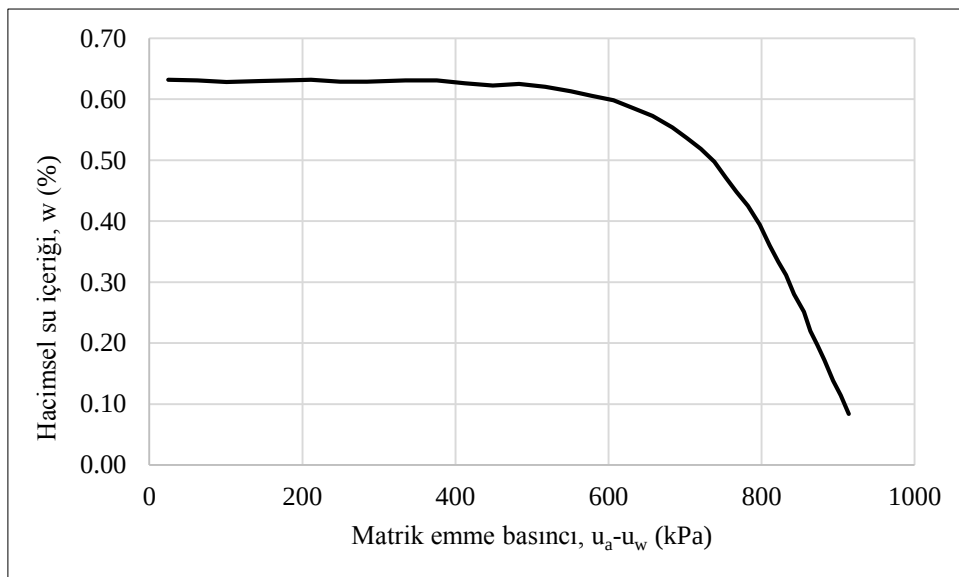
Vakanın alındığı makale çalışmasında ölçek verilmemiştir. Bununla birlikte birim içerisinde gelişen şev yenilmelerinin 10 metre kalınlığındaki ayrıışmış kabuk birim içinde geliştiği ifade edilmiştir. Tez kapsamında yapılan analizlerde kesit bu bilgi kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Şekil 6.25'te sonlu elemanlar yönteminde kullanılan sonlu eleman ağları ve sınır koşulları gösterilmektedir. Üniorm yağmur koşullarını simüle edebilmek için saatte 10 mm'lik bir yağış olduğu varsayılmıştır. Şev duraylılık analizleri giriş ve çıkış belirtme metodu ile Slope/w programı ile yapılmıştır. Bu metotda analiz yer seviyesi boyunca koyu kırmızı çizgiler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölge kayma yüzeyinin giriş ve çıkış alanıdır.

Girişlerin ve çıkışların sayısı bu iki çizgi boyunca artışların sayısı olarak belirlenebilir. Şekil 6.25'te analiz için kullanılan kesitin geometrisi ve kayma yüzeyinin giriş ve çıkış alanları gösterilmektedir [82].



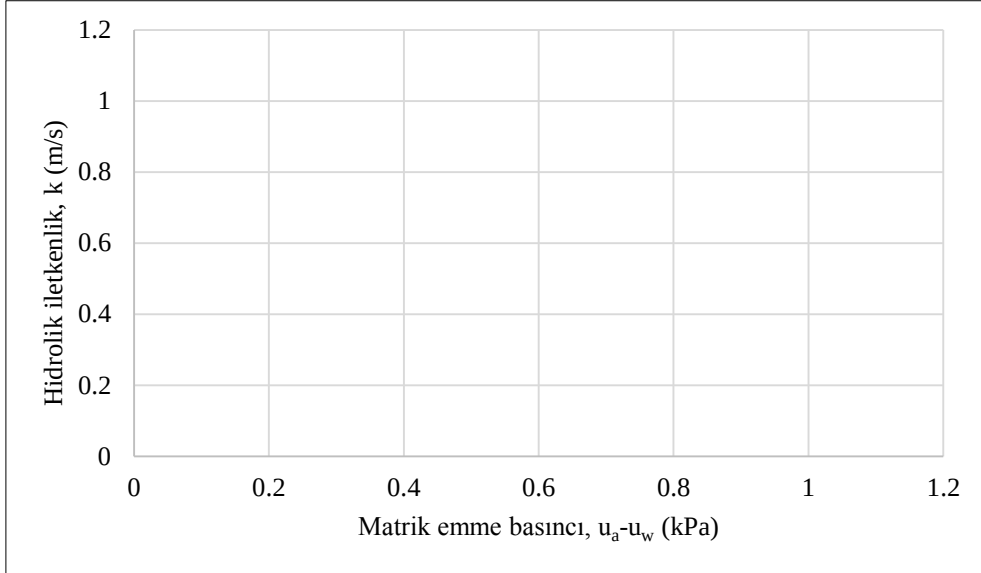
Şekil 6.25. Örnek Vaka III için kullanılan kesitin geometrisi [82]

Şekil 6.26'da sonlu elemanlar yönteminde kullanılan Champlain deniz kilinin hacimsel su içeriğine bağlı matrik emme basıncını içeren fonksiyon görülmektedir.



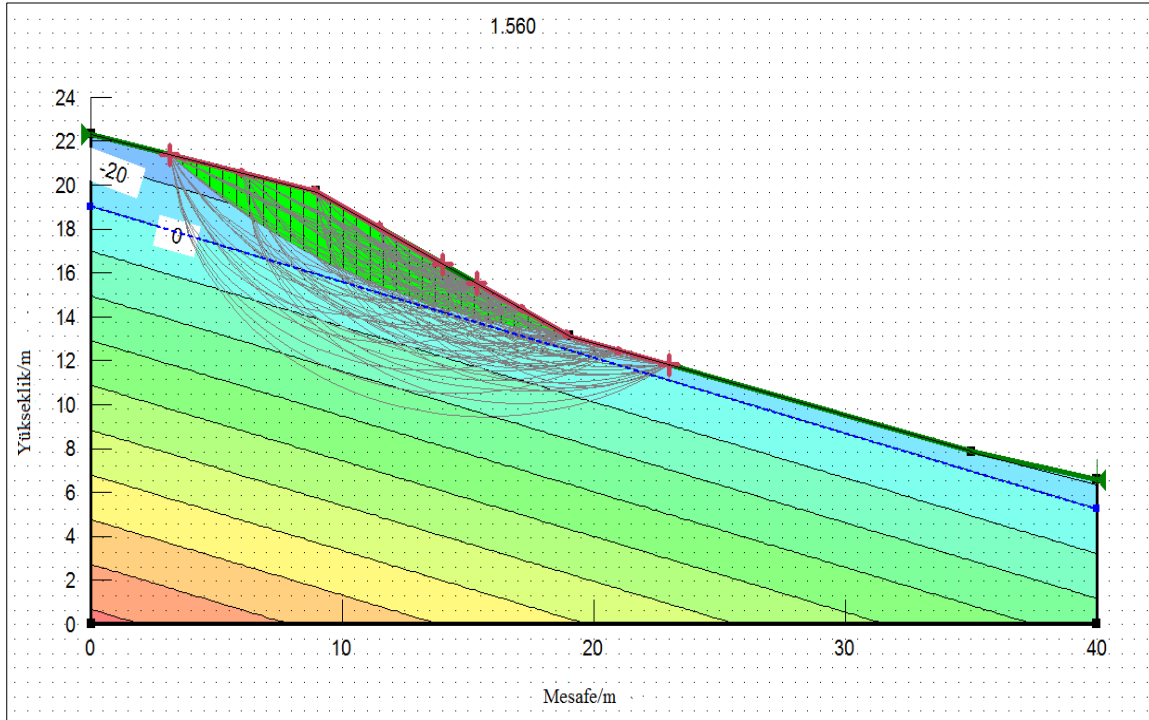
Şekil 6.26. Hacimsel su içeriği fonksiyonu

Şekil 6.27’de ise sonlu elemanlar yönteminde kullanılan zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu yer almaktadır.



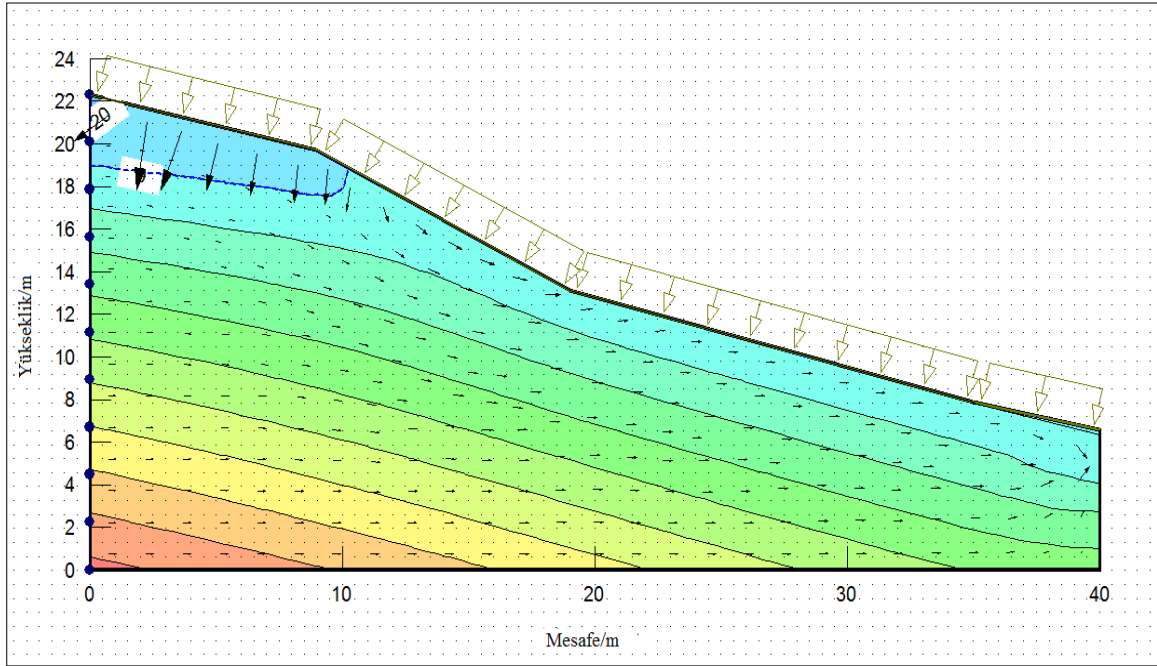
Şekil 6.27. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu

Çalışmada modellenen şevin güvenlik katsayısı, Şekil 6.28’de görüldüğü gibi doymun olmayan bölge ihmal edilerek hesaplanmıştır ve 1,560 olarak tahmin edilmiştir.



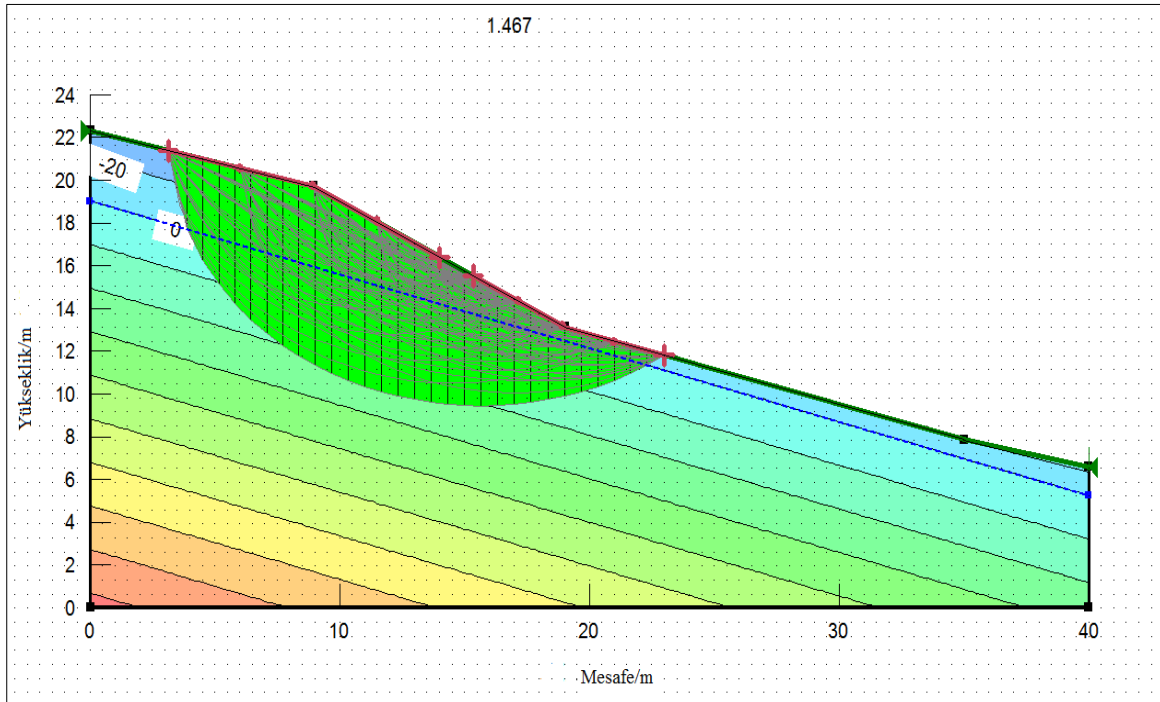
Şekil 6.28. Doymun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan duraylılık analizi sonucu

Şekil 6.29'da infiltrasyonun şev geometrisi üzerindeki dağılımı gösterilmektedir.



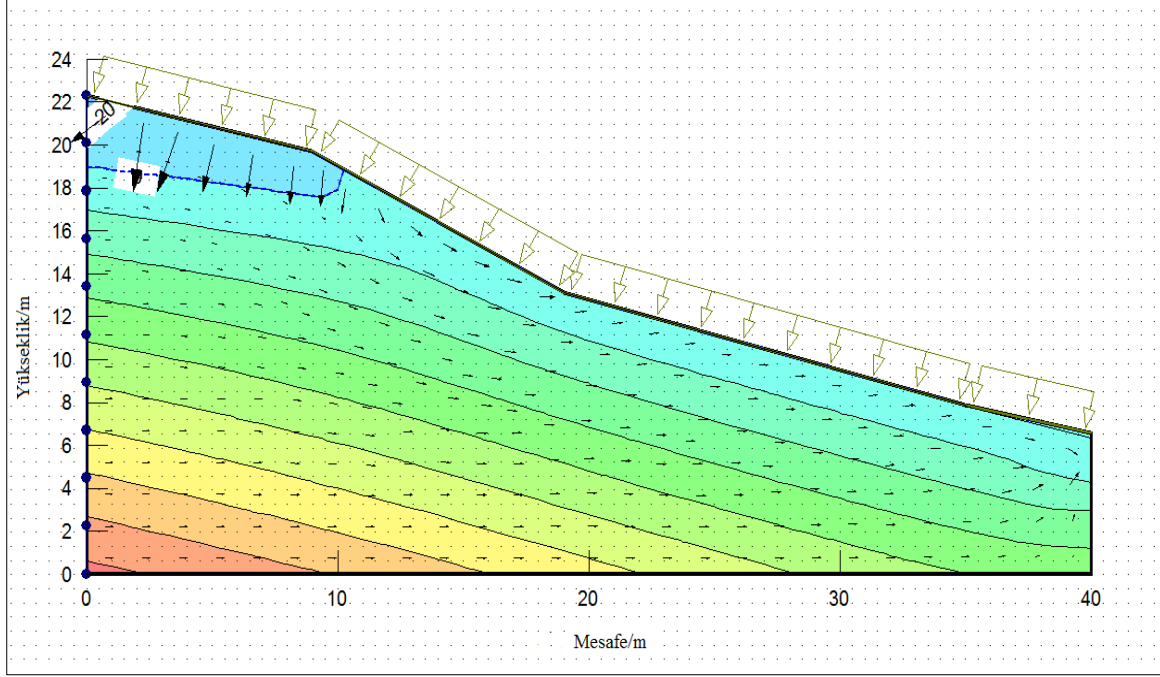
Şekil 6.29. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının dağılımı

10 saat boyunca etkiyen yağmur suyu neticesinde güvenlik katsayısı Şekil 6.30'da görüldüğü gibi 1,467'ye düşmüştür.

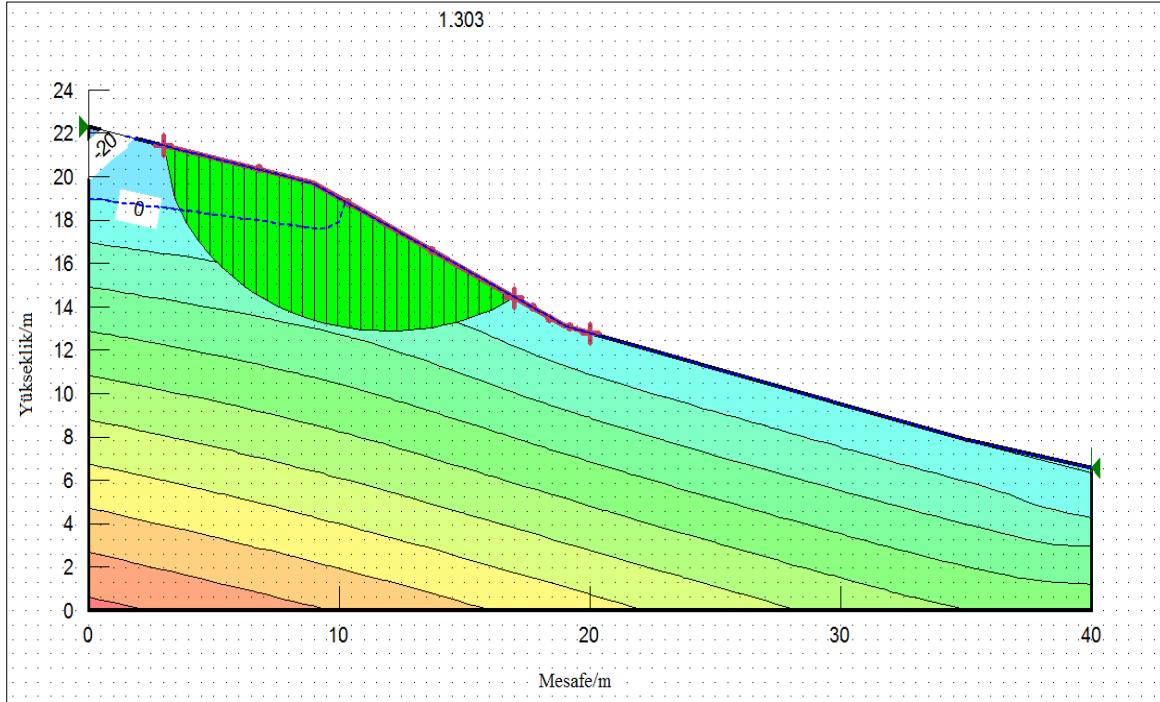


Şekil 6.30. 10 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

24 saatlik yağmur suyu etkisi sonucu şevin güvenlik katsayısı 1,303'e gerilemiştir. Şevin bu durumdaki profili Şekil 6.31 ve 6.32'de görülmektedir.

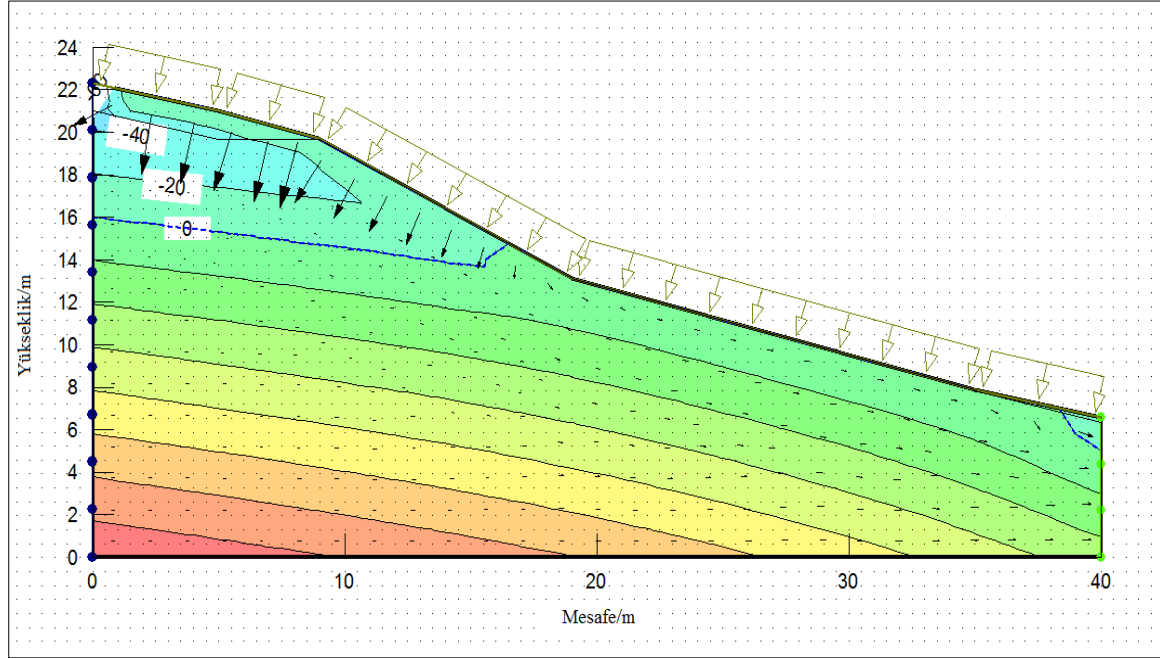


Şekil 6.31. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı

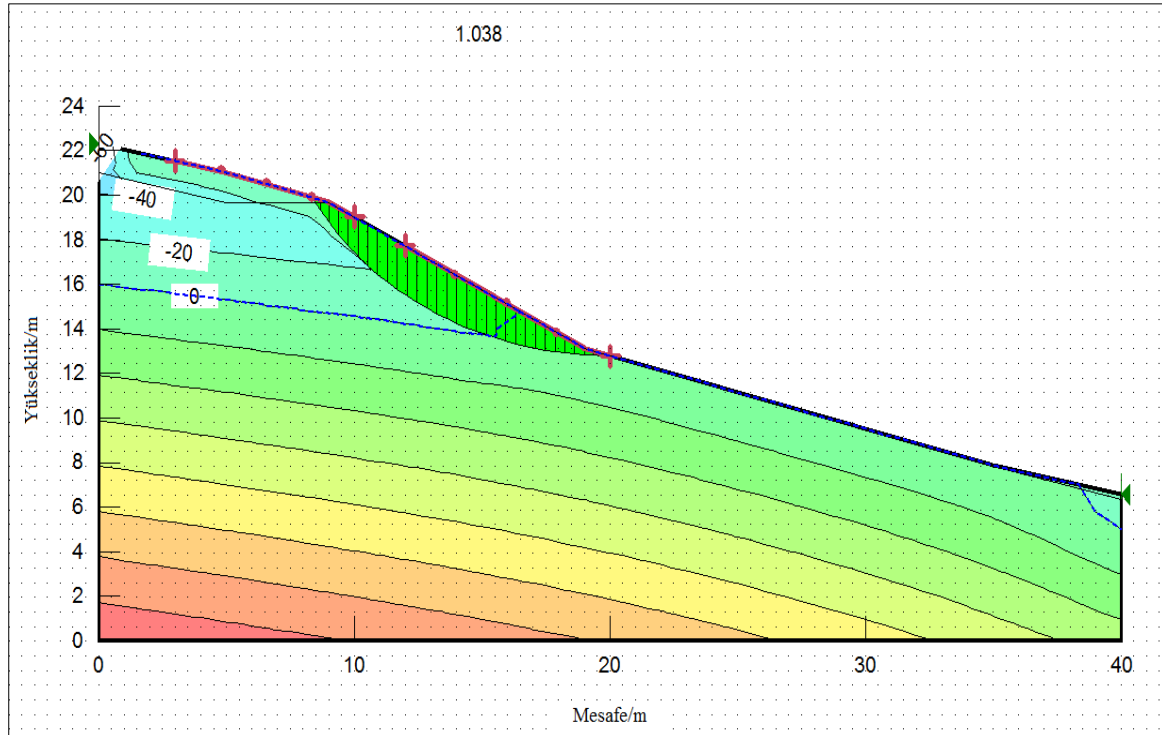


Şekil 6.32. 24 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

36 saatlik yağmur suyu etkisi sonucu şevin güvenlik katsayısı 1,038'e düşmüştür. Şevin bu durumdaki profili Şekil 6.33 ve 6.34'te görülmektedir.

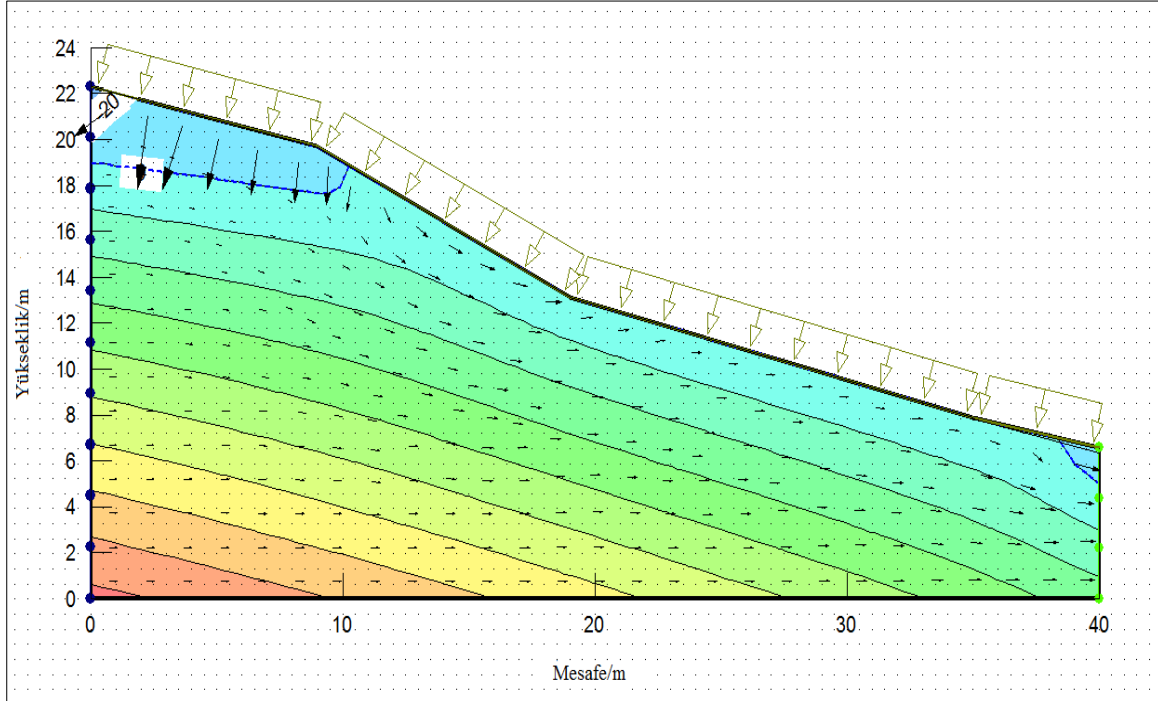


Şekil 6.33. 36 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı

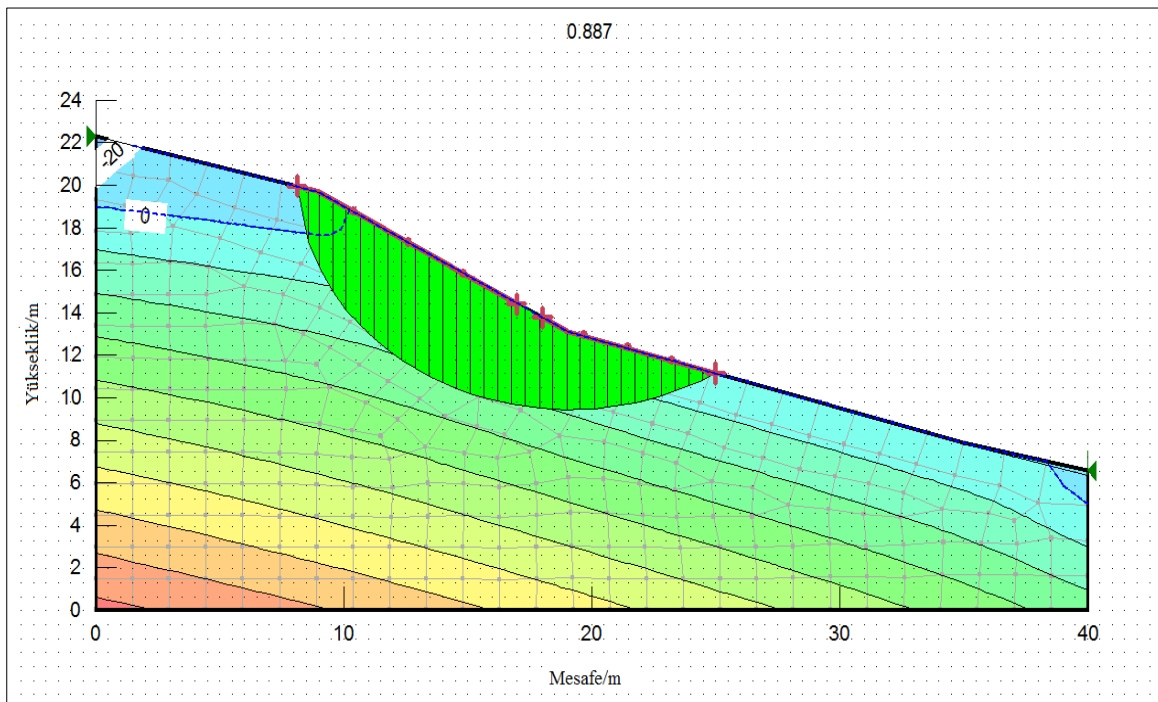


Şekil 6.34. 36 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

48 saatlik yağmur suyu etkisi altında şevin güvenlik katsayısı Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da görüldüğü gibi 0,887'ye düşmüştür.



Şekil 6.35. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra boşluk suyu basıncının derinliğe göre dağılımı



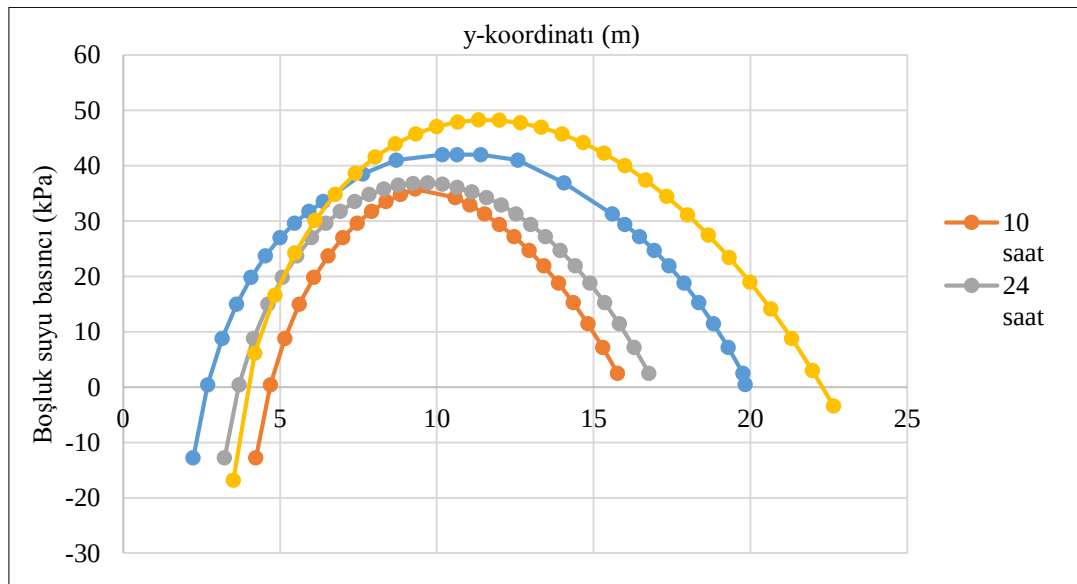
Şekil 6.36. 48 saat yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

Şekil 6.37’de güvenlik katsayısının zamanla değişimi yer almaktadır.



Şekil 6.37. Yağış yoğunluğu ile güvenlik katsayısı arasındaki ilişki

Şevin 10, 24, 36 ve 48 saatlik yağmur suyu etkisindeki boşluk suyu basıncının zamanla değişimi Şekil 6.38’de gösterilmektedir.

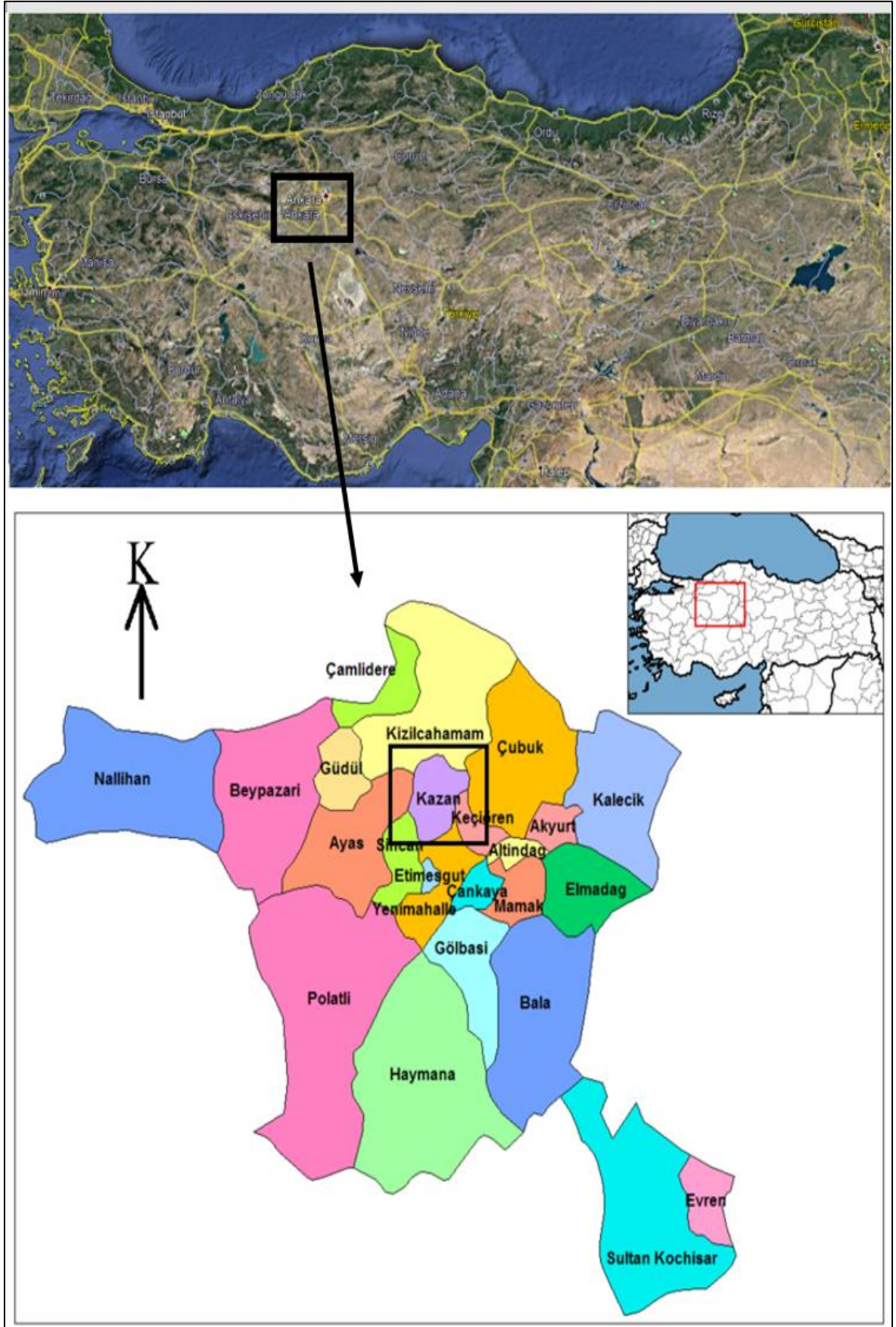


Şekil 6.38. Yer altı suyu akım analizi kullanılarak farklı yağış yoğunlukları altında derinlik boyunca boşluk suyu basıncının değişimi

Yağış yoğunluğu arttıkça zemine giren su miktarı artar ve buna bağlı olarak zemin geçirirliiliği doğrusal olmayan şekilde artarken; boşluk suyu basınçları yoğunluğa bağlı olarak değişir.

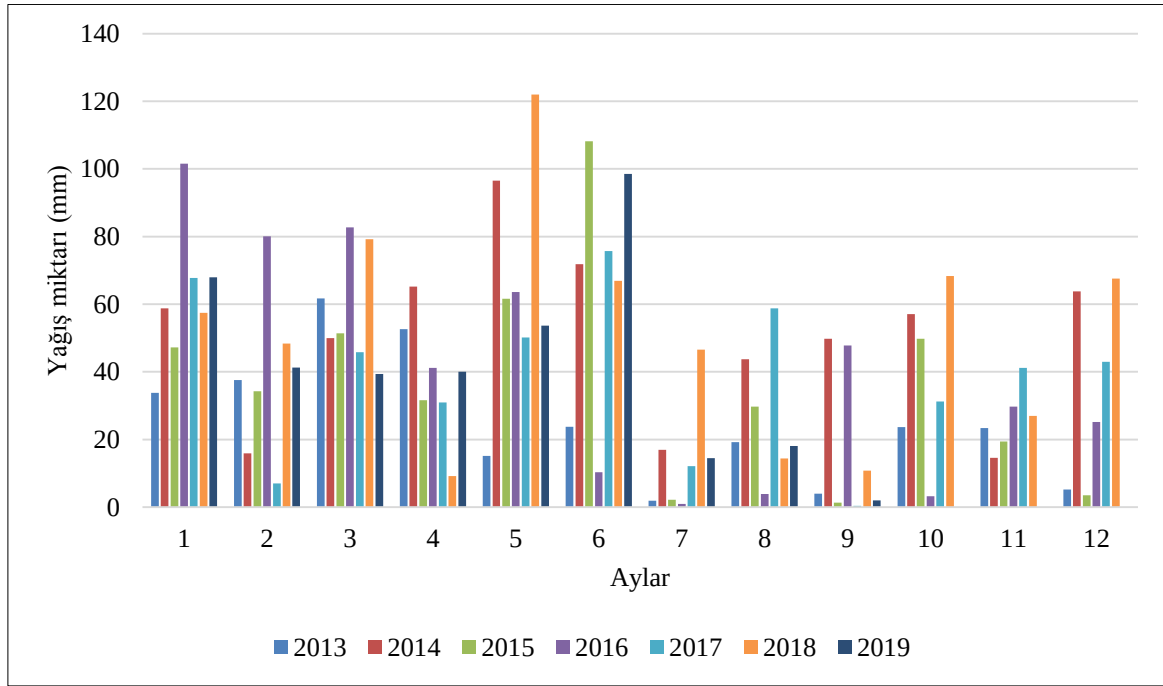
6.4. Örnek Uygulama

Yağış yoğunluğunun şev stabilitesi üzerindeki etkisini araştırmak için, Ankara Kazan ilçesinde yoğun yağışlardan sonra meydana gelen bir şev duraysızlığı seçilmiştir. Kazan, Ankara'nın 52 km kuzeyinde Çubuk, Kızılcahamam ve Ayaş ilçeleri arasında yer almaktadır (Harita 6.1). Çalışma sahasında, açık kahverengi, sarımsı, açık yeşil renkli, grimsi yer yer karbonat ve kumlu seviyeler içeren, aşırı konsolide, çok katı siltli killi pliyosen yaşlı birimler bulunduğu, bu birimlerin içerisinde de yüksek geçirimli kumlu çakıllı birimlerin bulunduğu gözlenmiştir. Bu yüksek geçirimli birimlerin yer altı ve yer üstü sularını (yağış vb.) şev içerisine taşıyarak şev duraylılığını olumsuz etkilediği ve sahada gözlenen heyelanların yağışlı dönemleri müteakiben gerçekleştiği göz önüne alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde kullanılan veriler Hendese Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır.



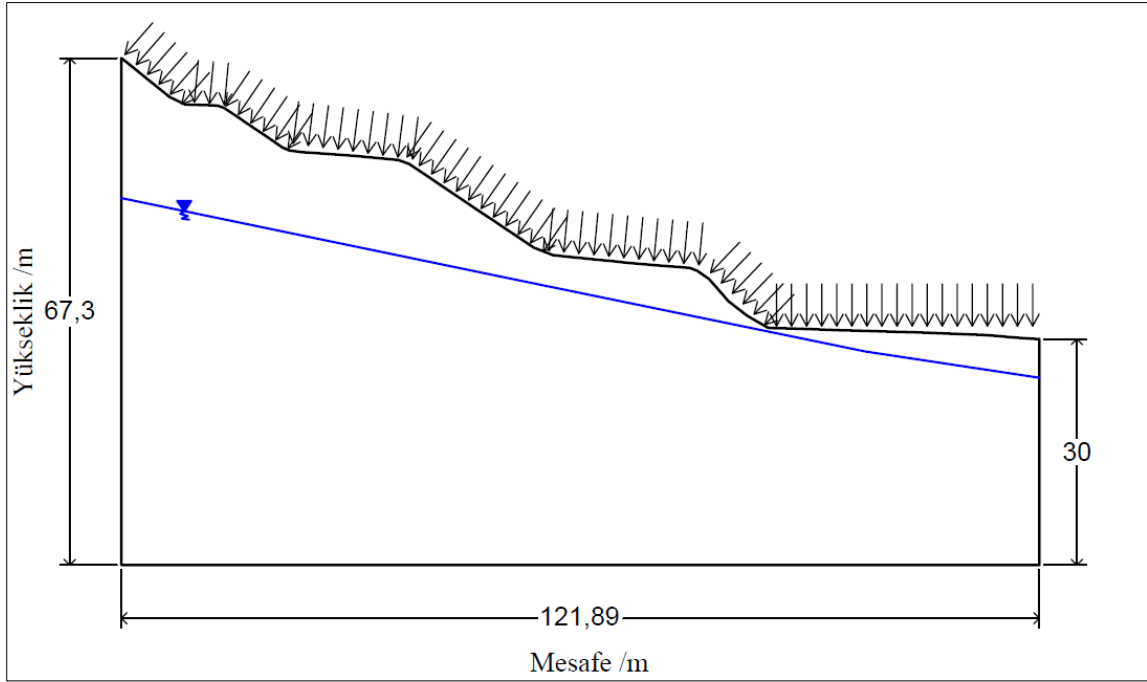
Harita 6.1. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası

Bölgenin iklimsel özellikleri incelendiğinde, ilçenin geniş arazisinde yer yer iklim farklılıkları görülür. Güneyde, İç Anadolu ikliminin belirgin özellikleri olan step iklimi, kuzeyde ise Karadeniz ikliminin ılıman ve yağışlı halleri görülebilir. Kara ikliminin hüküm sürdüğü bu bölgede kış sıcaklıkları düşüktür, yaz ise sıcak geçer. En sıcak ay temmuz-ağustos, en soğuk ay ise ocak ayıdır. Bölgeye düşen yağış miktarları kuzey ve güney kesimlerde farklılık gösterir. Çalışma alanına ait 2013-2019 yılları arasını kapsayan yağış verilerini gösteren grafik Şekil 6.39’da gösterilmiştir [83].



Şekil 6.39. Bölgenin yıllık yağış verisi [83]

Çalışma alanında bulunan şevin geometrisi Şekil 6.40’da gösterilmektedir. Ayrıca inceleme alanında meydana gelen şev kaymasının uydu görüntüsü Şekil 6.41’de gösterilmektedir.



Şekil 6.40. Analiz için kullanılan kesitin geometrisi



Şekil 6.41. İnceleme alanında meydana gelen şev kayması

6.4.1. Arazi çalışmaları

İnceleme alanında zeminlerin jeolojik ve litolojik durumlarının yanıl ve düşey yönlerdeki değişimlerinin belirlenmesi ve mühendislik parametrelerinin tespit edilmesi amacıyla derinlikleri 10.00 m ile 24.00 m arasında değişen toplam 4 adet sondaj kuyusu rotary sondaj makinası kullanılarak açılmıştır.

Sondaj kuyu tabanından örselenme olabileceği göz önüne alındığından ilk 15 cm’lik ilerleme için uygulanan darbe sayıları dikkate alınmamıştır. Son iki kademenin ilerlemesi için uygulanan darbe sayılarının toplamı ise “Zeminin Penetrasyon Direnci (SPT-N)” olarak kaydedilmiştir. SPT’lerin yapılmasında ülkemizde yaygın olarak kullanılan halat-makara sistemi kullanılmış olup, bu sistemin enerji oranı %45 olarak kullanılmıştır.

İnceleme alanında açılan tüm sondaj kuyularında çeşitli derinliklerde toplam 29 adet SPT deneyi yapılmıştır. Kayan zemin kütlelerini temsil eden sondaja ait SPT sonuçları Çizelge 6.4’de sunulmuştur.

Çizelge 6.4. SPT deney sonuçları

Derinlik (m)	SPT (N45)
1,50	29
3,00	32
4,50	34
6,00	35
7,50	43
9,00	R
-	-
-	-
-	-

Deneyde zeminde oluşturulan silindirik boşluğun su-gaz basıncı kullanılarak genişletilmesi ve basınç-hacim artışı (genişleme) ilişkisi kullanılarak zeminin gerilme ve deformasyon ilişkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Menard Presiyometre deneyi ile her bir deney seviyesinde elde edilen yük/deformasyon grafiklerinden zeminin temel mekanik özellikleri; deformasyon (presiyometre) modülü E ve limit basınç değeri PI belirlenmiştir. Çizelge 6.5’te limit basınç değeri, deneydeki son ölçümlerden, presiyometre modülü ise test esnasında kayıt edilen basınç/hacimsel değişim ölçümlerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. Deformasyon modülleri ve limit basınçlar

Sondaj No	Derinlik (m)	Deformasyon Modülü E_{PMT} (kg/cm ²)	Limit Basınç P_L (kg/cm ²)
1	1,25	40	2,1
	2,50	100	5,5
	5,75	300	20
	8,75	535	≥ 23
	11,75	315	15,5
2	1,25	390	20,25
	2,75	580	≥ 24
	5,25	260	≥ 24
	7,75	630	≥ 24
	11,25	610	≥ 22
	14,75	660	≥ 22

6.4.2. Laboratuvar deneyleri

İnceleme alanında yapılan sondajlarla alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde fiziksel ve mekanik parametrelerini belirlemeye yönelik deneyler yapılmıştır. Bu amaçla, SPT örnekleri üzerinde elek analizi, atterberg limitleri ve su içeriği tayini deneyleri, örselenmemiş örnekler üzerinde ise konsolidasyonlu-drenajlı (CD) direk kesme deneyleri yapılmıştır.

Zeminlerin likit limit, plastik limit ve plastisite indekslerini belirlemek ve birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine (USCS) göre zemin sınıflarını saptamak amacıyla SPT deneylerinden alınan 13 adet örselenmiş örnek üzerinde likit limit, plastik limit ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar özet halinde Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

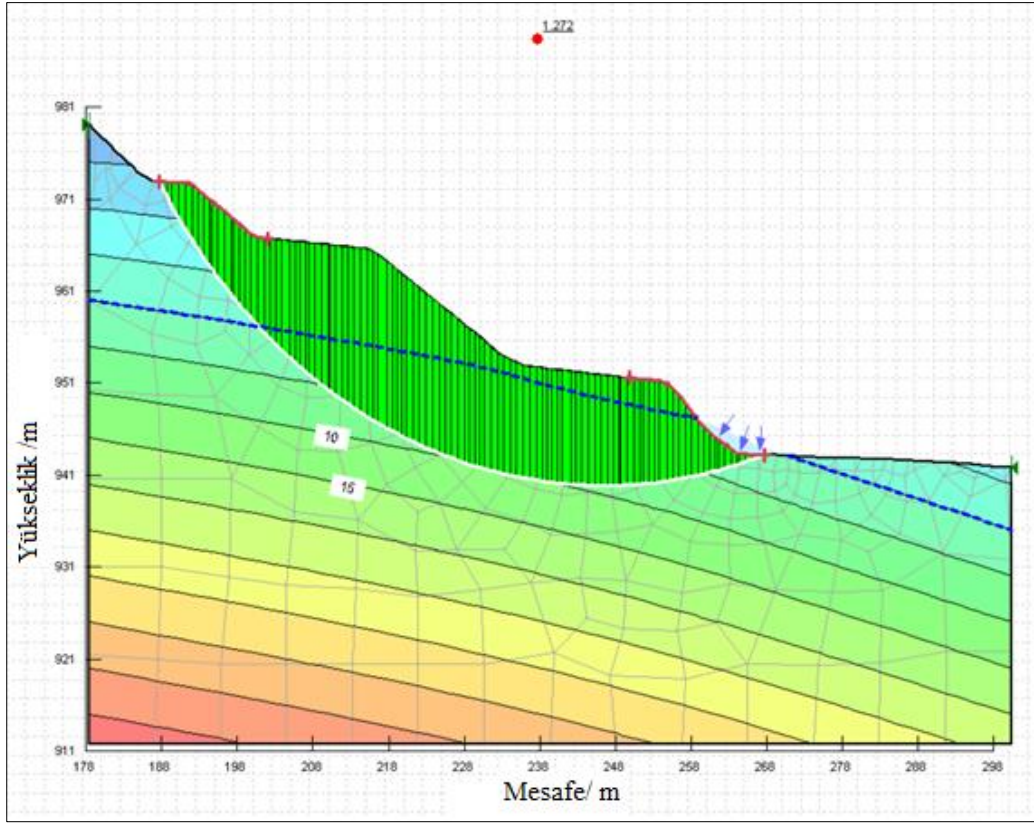
Çizelge 6.6. İndeks ve sınıflama deneyleri sonuçları

Numune No.	Derinlik (m)	No.4 Kalan (%)	No.200 geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Zemin sınıfı (USCS)
SPT-1	1,50	3,2	58,5	41	21,8	19,2	CL
SPT-2	3,00	10,1	39,9	32	16	16	SC
SPT-3	4,50	5,2	54,6	37,2	18,2	19	CL
SPT-4	6,00	0,3	86	56	24	32	CH
SPT-1	1,50	0,6	75	76	30	46	CH
SPT-2	3,00	0,0	95,9	59	25,4	33,6	CH
SPT-3	6,50	8,2	48,7	32	16,1	15,9	SC
SPT-4	11,50	0,9	81,9	48	24	24	CL
SPT-2	3,00	1,5	74,3	44	23	21	CL
SPT-4	6,00	0,0	85,5	55	24,3	30,7	CH
SPT-6	9,00	0,0	80,4	68	26,6	41,4	CH
SPT-2	3,00	1,9	74,3	47	24	23	CL
SPT-4	6,00	0,5	76,6	69	25,3	43,7	CH

Şev kayması oluşturan zeminlerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla örselenmemiş örnekler üzerinde, laboratuvarda şevden alınan 3 adet örnek üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) direk kesme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucunda hem doruk değerler hem de artık değerler kullanılarak dayanım parametreleri bulunmuştur. Buna göre doruk değerlerle elde edilen kohezyonun $0,077 \text{ kgf/cm}^2$ - $0,139 \text{ kgf/cm}^2$ arasında, içsel sürtünme açısının ise 22° - 29° arasında değişim gösterdiği, artık değerle elde edilen kohezyonun ise $0,00 \text{ kgf/cm}^2$ – $0,09 \text{ kgf/cm}^2$ arasında, içsel sürtünme açısının 18° - 20° arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Çalışma sahasında gözlenen birimlerin doruk kesme dayanımı, literatürde sunulan değerler ve laboratuvar deney sonuçları dikkate alınarak zeminin efektif kohezyon değeri $c = 10 \text{ kPa}$, efektif içsel sürtünme açısı ise $\phi = 25^\circ$ olarak alınmıştır. Zemine ait matrik emmeye bağlı kayma mukavemet açısı ϕ^b literatür taraması ile $2/3\phi$ değerine eşit kabul edilmiştir ve $\phi^b = 16,6^\circ$ olarak alınmıştır.

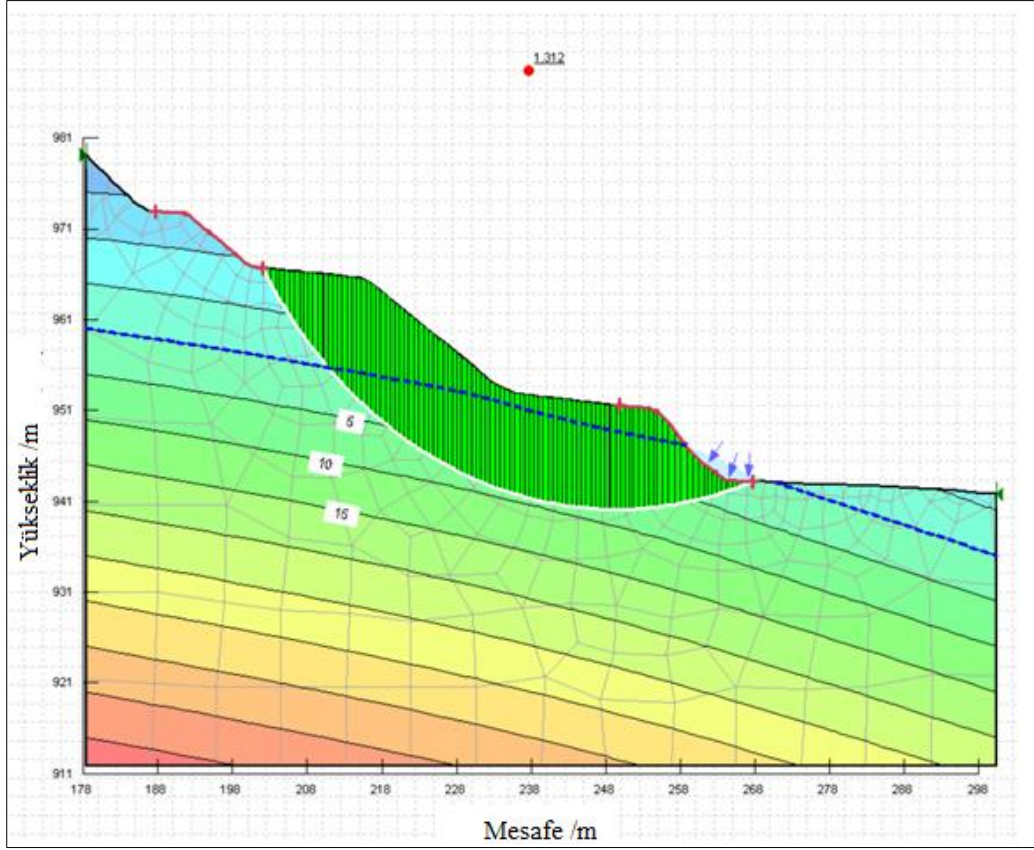
Başlangıç olarak analizde; Bishop limit denge analiz yöntemi ile 100 dilim kullanılarak ve doymun olmayan bölge ihmal edilerek şev duraylılık analizi yapılmıştır. Doymun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan şev duraylılık analizi sonucu ve matrik emme basıncının kayma mukavemetine etkisinin ihmal edildiği analiz için güvenlik katsayısı 1,272 olarak elde edilmiştir (Şekil 6.42).



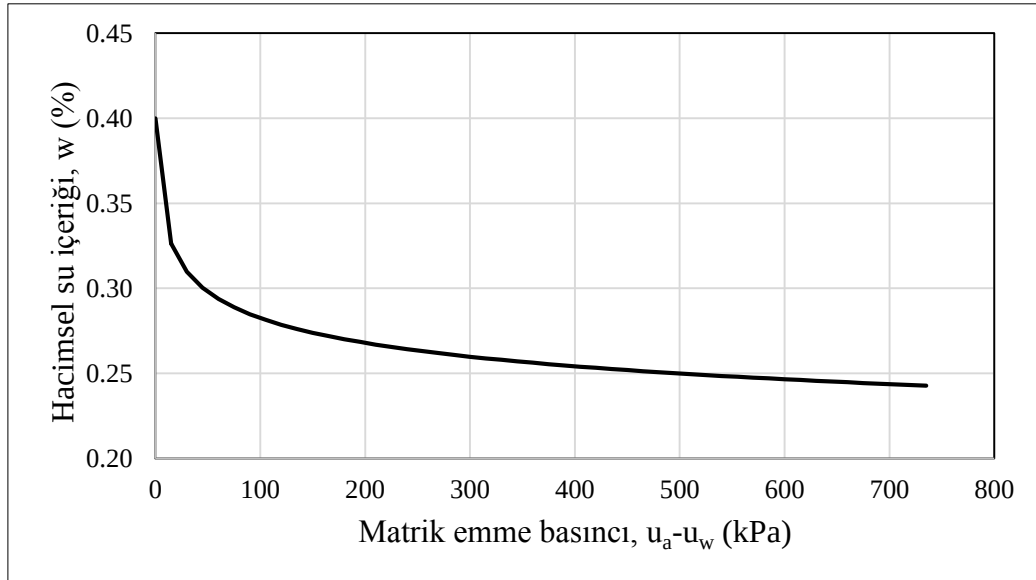
Şekil 6.42. Doygun olmayan bölge ihmal edilerek yapılan şev duraylılık analizi sonucu

Doygun olmayan zemin mekaniği prensiplerine göre yapılan yağış sızıntı analizlerinde zemin geçirimliliğinin ve hacimsel su içeriğinin matris emme basıncıyla değişimi Van Genuchten modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu modelde, doymuş durumda geçirimlilik katsayısı $5,5 \times 10^{-8}$ m/sn ve kil için önerilen α katsayısı 0,8 n katsayısı ise 1,09 olarak alınmıştır. Bu modele ait parametreler (α ve n) saha ve laboratuvar deneyleriyle belirlenebilir. Ancak deney yapma olanağı bulunmadığı için bu değerler Vogel ve Van Genuchten tarafından 2001 yılında yapılan çalışmadan kil zemin için alınmıştır [85].

Analizde kullanılan hacimsel su içeriği fonksiyonu Şekil 6.44'te gösterilmiştir. Doygun olmayan bölgenin kayma dayanımına katkısı hesaba katılarak yapılan şev duraylılık analiz sonucu Şekil 6.43'te gösterilmektedir.



Şekil 6.43. Zemin su karakteristik eğrisi ve hidrolik iletkenlik fonksiyonu

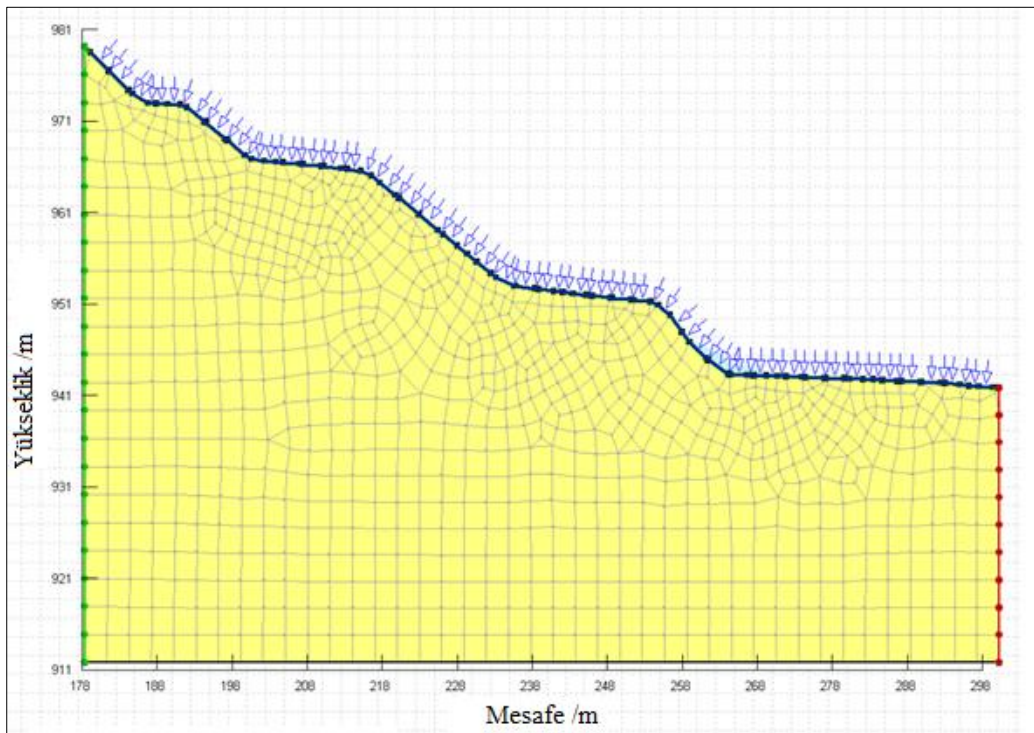


Şekil 6.44. Hacimsel su içeriği fonksiyonu

Çalışmada, yağmur yoğunluğu ile şev kayma olasılığı arasındaki ilişki analiz edilmiştir ve 2013-2019 yıllarını kapsayan bölgesel yıllık yağış, aylık ortalama verileri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde bir aylık yağış birim zamana bölünmüş ve 30 gün

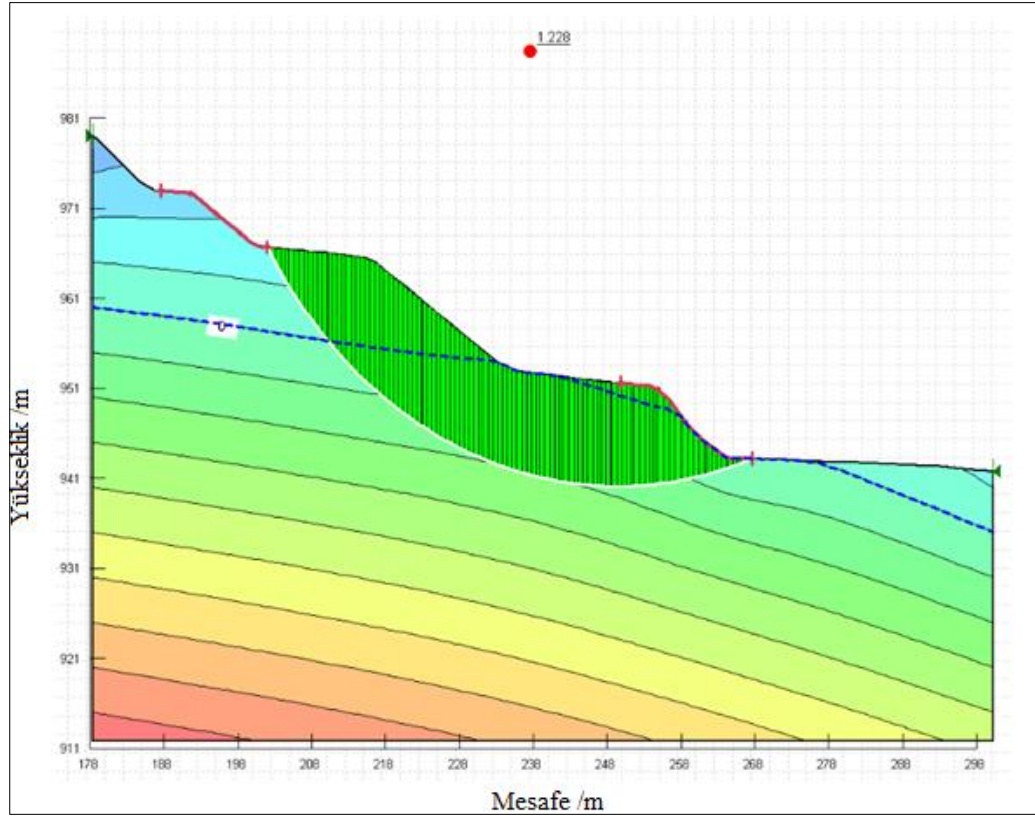
boyunca yağış infiltrasyon olarak uygulanmıştır. Böylece aylık yağış modellenmiştir. Gerçekte yağın bir miktarı yüzey yağışı olarak amakta bir miktarı da buharlaşma ve bitkiler tarafından kullanılmaktadır. Bununla birlikte basitleştirme yapılarak yağışın tamamen infiltre olduğu varsayılmıştır. Aylık ortalama yağışın değerinden günlük yağış hesaplanmış ve 30 gün boyunca sayısal modelde üst sınırdan normal filtrasyon olarak uygulanmıştır.

Yağışın modellendiği analizlerde (transient koşul) kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları Şekil 6.45’de verilmiştir.

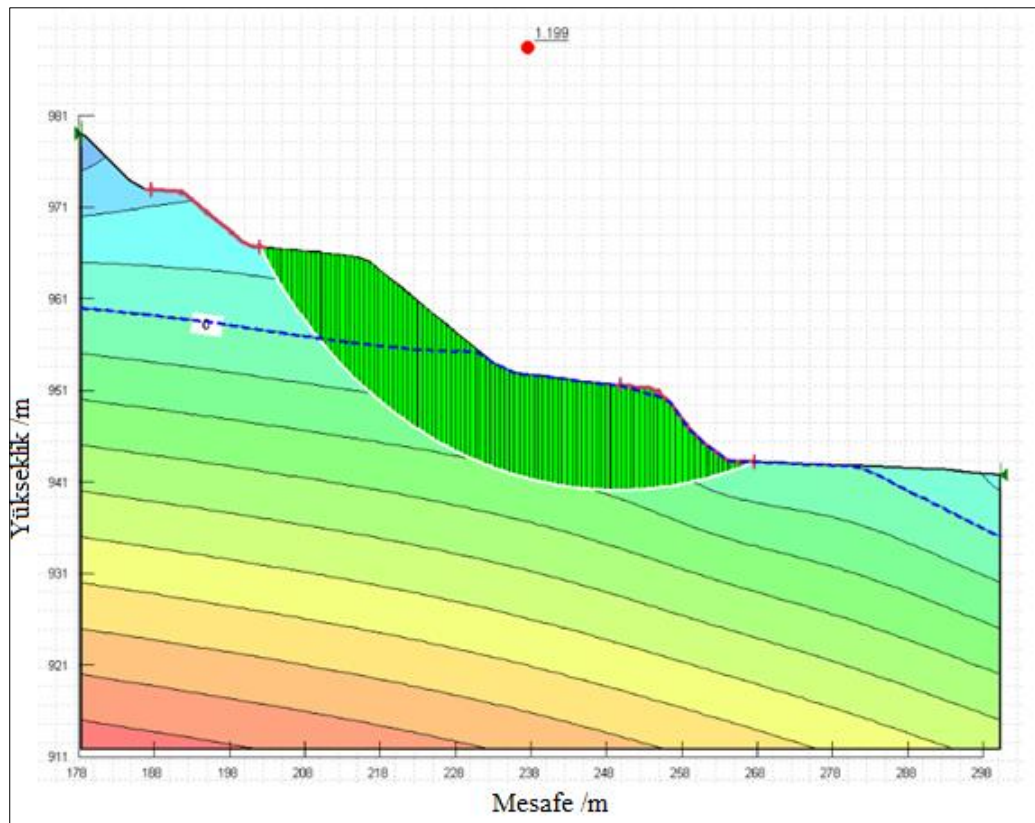


Şekil 6.45. Yağışın modellendiği analizlerde (transient koşul) kullanılan sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları

2013 ile 2019 yılları arasında gerçekleşen ortalama aylık yağış etkisi ile yapılan şev stabilitesi analizlerinden elde edilen en düşük güvenlik katsayıları hesaplanmış ve en kritik yenilme mekanizmaları ile güvenlik katsayıları Şekil 6.47 - Şekil 6.53’de sunulmuştur. Farklı infiltrasyon koşulları için güvenlik katsayısındaki değişimleri gözlemlemek mümkündür.



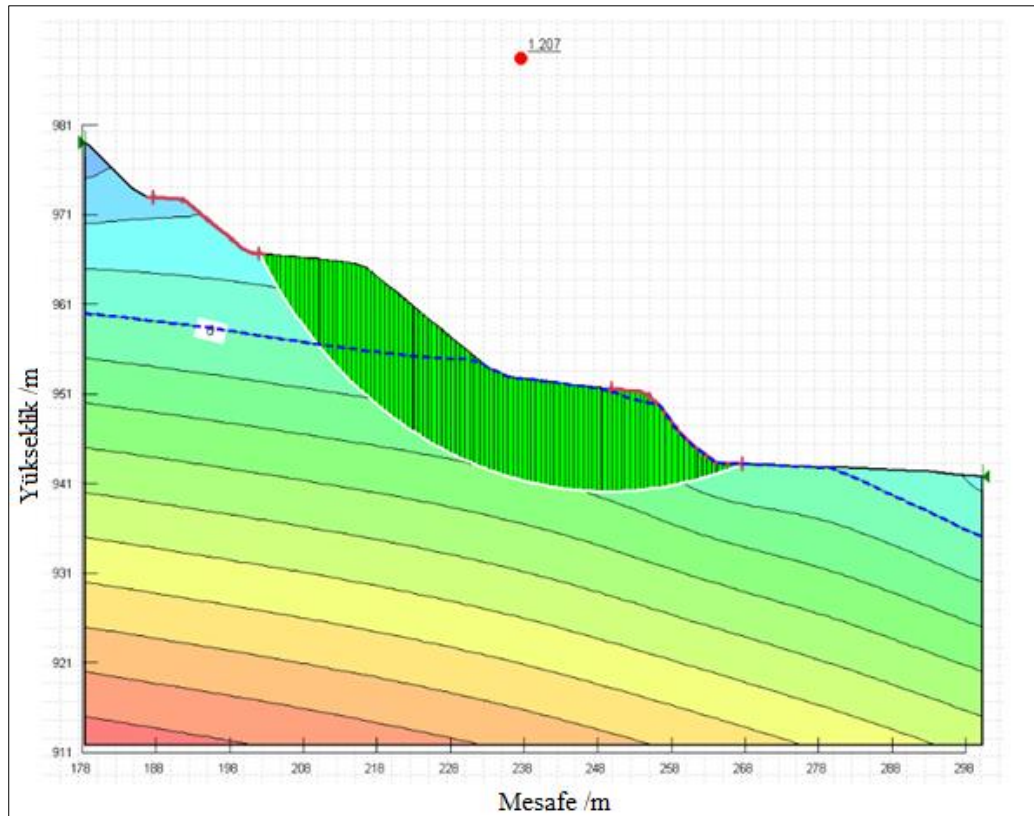
Şekil 6.46. 2013 yılına ait (25,14 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı



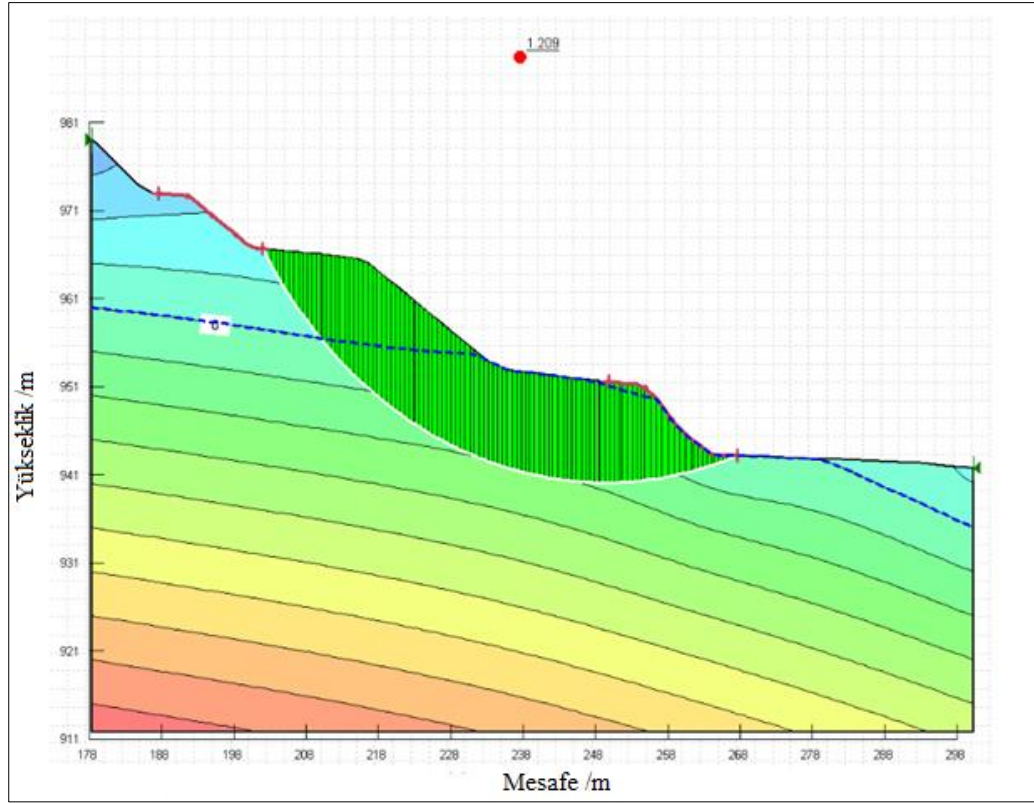
Şekil 6.47. 2014 yılına ait (50,35 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı



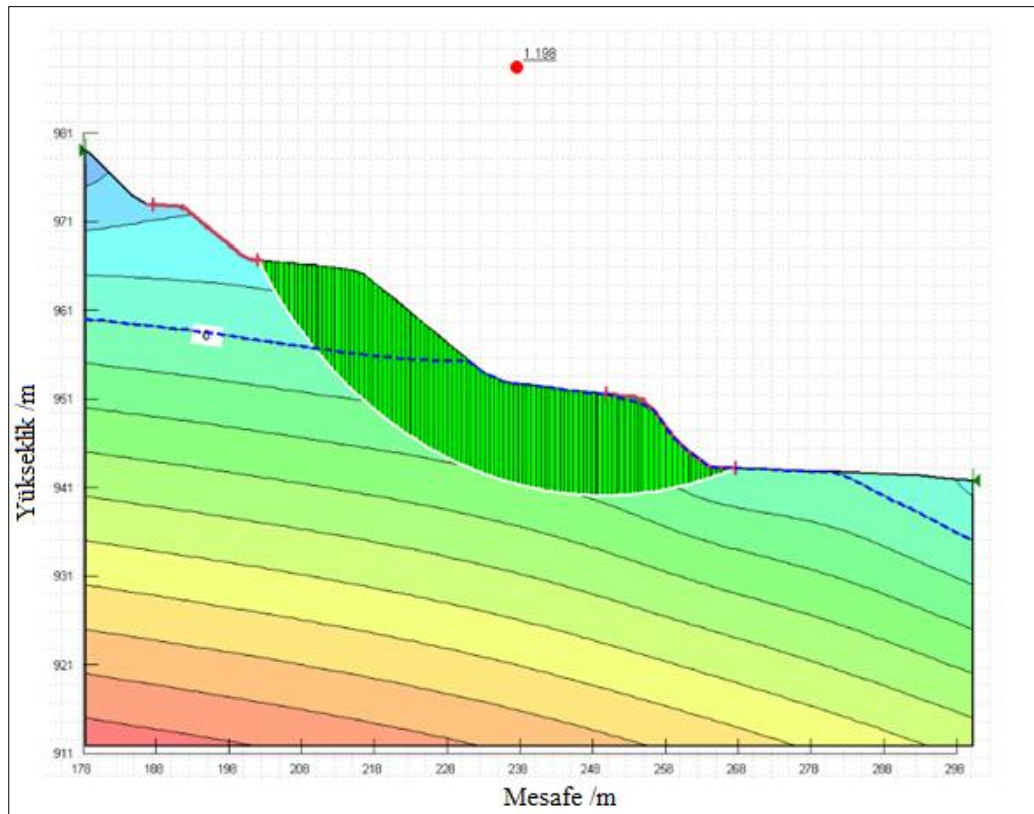
Şekil 6.48. 2015 yılına ait (36,68 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı



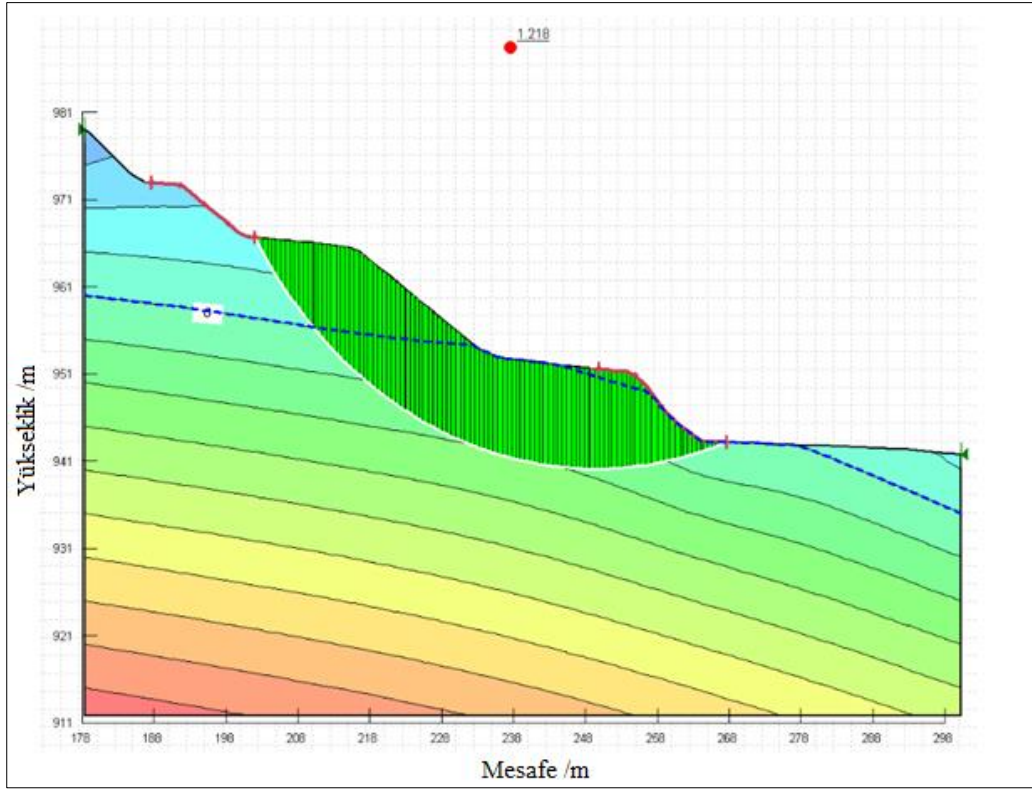
Şekil 6.49. 2016 yılına ait (40,83 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı



Şekil 6.50. 2017 yılına ait (38,68 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

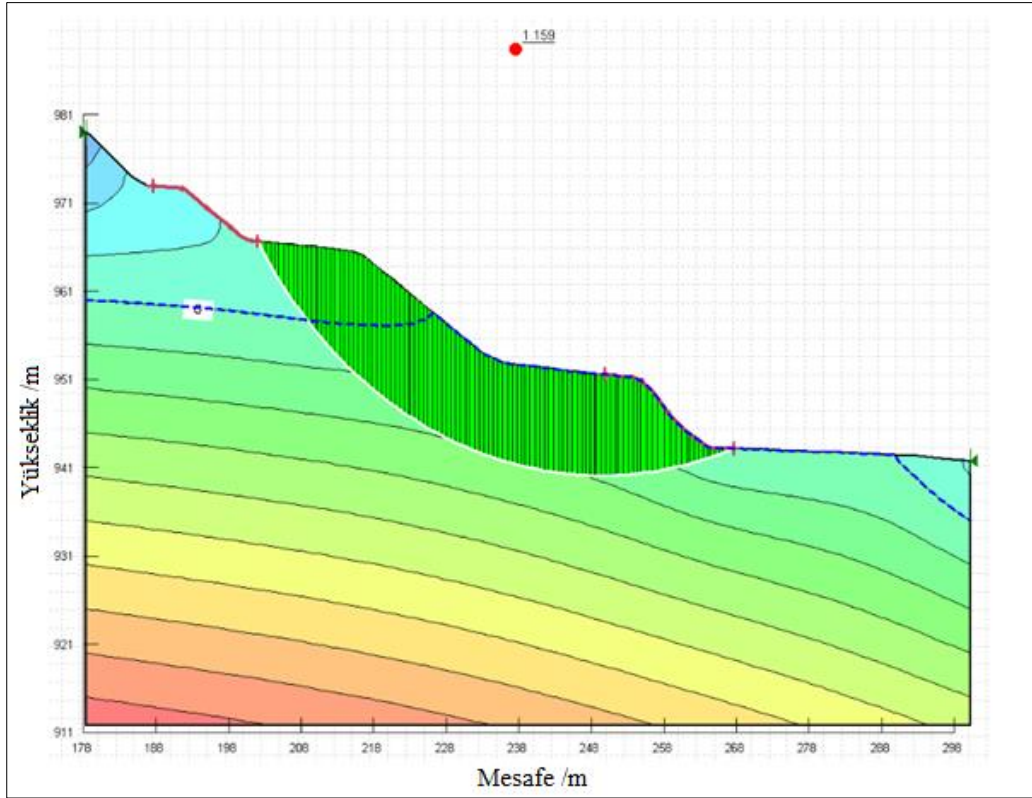


Şekil 6.51. 2018 yılına ait (51,49 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı



Şekil 6.52. 2019 yılına ait (31,29 mm/ay) yağış infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

Daha önce de belirtildiği gibi aylık ortalama yağış 30 güne yayılarak modele uygulanmıştır. Aylık ortalama yağışın etki süresi yağış suyunun infiltrasyonu dolayısıyla da güvenlik katsayısı üzerinde etkili olacaktır. Toplam yağışın uygulama süresinin güvenlik katsayısı üzerindeki etkilerinin anlaşılması için aylık ortalama yağış anlık olarak uygulanmıştır. 2014 yılı ortalama aylık yağışı anlık uygulandığında güvenlik katsayısı 1.116 olarak hesaplanmıştır. 2013 ile 2019 yılları arasında en yüksek aylık yağış 2018 yılının 5. ayında yaklaşık 120 mm olarak gerçekleşmiştir. En yoğun yağış verisi kullanılarak güvenlik katsayısı 1.159 olarak elde edilmiştir (Şekil 6.53).



Şekil 6.54. En yoğun yağış verisi olan 2018 yılının 5. Ayına ait 120 mm infiltrasyonundan sonra güvenlik katsayısı

Tüm şev stabilitesi analizleri Pliyosen yaşlı kil zeminin CD direk kesme deneylerinden elde edilen rezidüel dayanımları kullanılarak da hesaplanmıştır. Rezidüel kayma dayanımı 1 kPa kohezyon ve 19° içsel sürtünme açısı olarak alınmıştır. Zemine ait matrik emmeye bağlı kayma mukavemet açısı ϕ^b ise 16.6° olarak alınmıştır. Tüm analizlerden elde edilen güvenlik katsayıları Çizelge 6.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.7. Ortalama yağış miktarı sonucu elde edilen güvenlik katsayıları

Yıl	Yıllık Ort.Yağış Mik. (mm/ay)	Doruk kesme dayanımı G.K	Rezidüel kesme dayanımı G.K
Kuru koşullar	--	1.610	0,925
Yağışlı durum ihmal edildiğinde matrik emme olmadan yeraltı suyu akımı ile	--	1,272	0,809
Yağışlı durum ihmal edildiğinde matrik emme etkisi ve yeraltı suyu akımı ile	--	1,312	0,846
2013	25,17	1,228	0,784
2014	50,35	1,199	0,761
2015	36,68	1,211	0,771
2016	40,83	1,207	0,768
2017	38,68	1,209	0,770
2018	51,49	1,198	0,761
2019	31,29	1,218	0,777
En yoğun aylık yağış ile	120	1,159	0,727

Görece yoğun yağışlar ekisi ile kayma yüzeylerini içine alan veya yakınında yer alan bölgede matrik emme basıncı dikkate değer oranda azalmıştır. Matrik emme basıncında gerçekleşen azalma zemin mukavemetinde düşüşe ve sonuçta güvenlik katsayısında azalmaya neden olmaktadır. Yağışın dikkate alınmadığı durumda görece daha yüksek güvenlik katsayısı elde edilmesinin sebebi de matrik emme basınçlarıdır. Bununla birlikte doruk kayma dayanımlarının koşullarda elde edilen güvenlik katsayıları 1'e yaklaşırsa da en düşük 1.159 olarak elde edilmiştir. Rezidüel kayma dayanımı kullanıldığında tüm koşullarda güvenlik katsayısı 1'in altında hesaplanmıştır. Bu nedenle aşırı yağışlarla zemin matrik emme basıncı azalması ile zemin dayanımının azaldığı ve artan kayma birim deformasyonlar etkisi ile dayanımın daha da düşerek şev hareketinin tetiklendiği düşünülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın en önemli sonuçları yağış etkisindeki şev yenilmeleri için aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Bu tezde iki boyutlu kararlı durum ve geçici parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar Geostudio programı içinde yer alan Seep/w ve Slope/w yazılımları yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Doygun olmayan zeminlerde meydana gelen emme gerilmesi; zeminlerin gerilme durumunun değişmesine ve kayma mukavemetinin artmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada yağışa bağlı şev yenilme mekanizmasını, yağış infiltrasyonunun, matrik emme basıncının şev duraylılığı üzerindeki etkisini gözden geçirilmiştir. Örnek Vaka I, Örnek Vaka II, Örnek Vaka III ve örnek uygulamadan oluşan dört farklı çalışma için güvenlik katsayıları hem yer altı suyu seviyesi doymun olmayan zemin yok varsayılarak hem de doymun olmayan zemin mekaniği kabullerine göre elde edilmiştir.

Doygun olmayan zemin mekaniği ilkelerine göre yapılan analizlerde yağış yoğunlukları farklı süreler boyunca zemin yüzeylerine uygulanmıştır ve boşluk suyu basınç değişimleri ile güvenlik katsayıları değişimleri hesaplanmıştır. İnfiltrasyon analizi doymun olmayan zemin özellikleri ve gerçek yağış verileri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yağış infiltrasyonu ile negatif boşluk suyu basıncındaki değişimler yüzeyden derine inildikçe farklılık göstermektedir. Şiddetli yağış, tünemiş bir su seviyesi geliştirerek yer altı suyu seviyesini yaygın bir şekilde yükseltmektedir. Yer altı suyunun yükselmesi, eğim oluşturan malzemeyi yumuşatır ve zeminde kaymaya yol açar. Bu yükselme, zeminin kayma yüzeyine dokunduğunda kritiktir ve zeminin diğer kısmı hala kuru olmasına rağmen şevde yenilmelere neden olur.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar,

- Kritik bir süreye ulaşılan kadar yağış yoğunluğu arttıkça güvenlik katsayılarının azaldığını göstermektedir.
- Şev duraylılığının güçlü bir şekilde hidrolik iletkenliğe, zemin kesme dayanımına ve yağış yoğunluğuna bağlı olduğunu göstermektedir.

- Doygun olmayan zeminlerde boşluk suyu basıncındaki değişikliğin bir eğimin duraylılığını etkilediği tespit edilmiştir.

Heyelan eğilimli yamaçların hidrolojik çalışması ile birlikte yağış ve şev yenilme analizinin vazgeçilmez olduğu sonucuna varılmıştır.

Mevcut araştırmanın adımları ve gelecekte geniş, ayrıntılı çalışmalara katkıda bulunmak için yapılan öneriler aşağıda sıralanmaktadır

1. Zemin-su karakteristik eğrisine (SWCC) ve farklı zeminlerin hidrolik iletkenlik katsayısına çok dikkat edilmelidir. Bir zeminin hava giriş değerinin (AEV), geçirgenlik fonksiyonunu ve sonuç olarak infiltrasyona tepkisini büyük ölçüde etkilediği bulunmuştur.
2. Yağış infiltrasyonunun şev duraylılığı ile negatif korelasyonu vardır. Teorik olarak, yağış yoğunluğu ve zemin hidrolik iletkenliği arasındaki etkileşim, infiltrasyonu belirler. Bununla birlikte, diğer bazı faktörler yağış infiltrasyonuna katkıda bulunabilir, bu nedenle çeşitli saha koşullarında gerçek infiltrasyon miktarını ölçmek için yerinde çalışmalara ihtiyaç vardır.
3. Verimli yağış ve infiltrasyon tahminleri şev duraylılığı analizleri için paha biçilmez bir girdi parametresi olacağı için ucuz ve çok değerli bir katkı olacaktır.
4. Şev yenilmelerinin doğru tahmin edilmesi için, şev mekanizması ayrıntılı olarak incelenmeli, hipotezler oluşturulmalı, farklı laboratuvar ve saha deneylerinde sayısal araçlar geliştirilmeli ve doğrulanmalıdır.
5. İklimsel değişikliklere maruz kalan zeminlerde sayısal simülasyonlar yapılmalı ve iyi saha testleri kullanılarak sonuçlar doğrulanmalıdır.
6. Doygun olmayan zeminlerin zemin su karakteristik eğrisi ve kayma mukavemeti özellikleri olasılıklı bir yaklaşım açısından değerlendirilebilir.

8. Geleneksel şev tasarım metodolojisi doymuş kayma mukavemetini ve şev yüzeyinin yakınındaki yer altı suyu seviyesi konumunun kullanımını sağlar. Fakat şev duraylılık analizi ve tasarımlarında doygun olmayan zeminler için etkili gerilme prensibine dayanarak geleneksel metodolojiden daha doğru olarak tasarlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Şahin, Y. (2013). *Laboratory tests to study stability mechanism of rainfall infiltrated unsaturated fine-grained soil slopes developing into shallow landslides and their hydraulic properties*. MS Thesis, Civil Engineering, İzmir Institute of Technology, 1-74.
2. Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M. (2002). *Slope Stability And Stanilization Methods*. New York: John Wiley Publishing, 242-270.
3. Chaithong, T. (2017). Analysis of extreme rainfall induced slope failure using a rainfall infiltration infinite slope analysis model. *International Journal of Geomate*, 13 (35), 156–165.
4. Cilt, D., Bilgiler, S., ve Dal, A.B. (2002). Heyelanlar ve Türkiye'ye etkileri. *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 35–50.
5. Demir, A., (2016). *Türkiye'de yerleşim birimlerindeki heyelanların mekansal ve istatistiksel dağılımları*. 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Ankara, 45-50.
6. Chen, J., and Hai, Y. (2012). A ϕb model for predicting shear strength of unsaturated soils. *Advance Materials Research Journal*, 425–429.
7. Oh, W.T., Vanapalli, S.K., Qi, S., and Han, Z. (2016). *Estimation of the variation of matric suction with respect to depth in a vertical unsaturated soil trench associated with rainfall infiltration*. 3rd European Conference on Unsaturated Soil Paris, France, 10-18.
8. Rahardjo, H., Kim, Y., and Satyanaga, A. (2019). Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. *International Journal of Geo-Engineering*, 1–23.
9. Gabet, E.J., Burbank, D.W., Putkonen, J.K., Pratt-sitaula, B.A., and Ojha, T. (2004). Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal. *Journal of Geomorphology*, 131–143.
10. Gökoğlu, Ö. (2015). *Doygun olmayan zeminlerde şev stabilite analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 54–67.
11. Zhang, X. (2004). *Consolidation theori for saturated-unsaturated soils and numerical simulation of residential buildings on expansive soils*, PhD Thesis, Texas A&M University, 13-17.
12. Huat, B.B.K., Ali, F.H.J., and Low, T.H. (2006). Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 1293–1306.
13. Yeh, H., Chang, P., Chen, J., and Lee, C. (2006). *Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration*. 8th International Symposium on Geohazards Mitigation, Taivan, 1–6.
14. Chen, R.H., Chen, H.P., Chen, K.S., and Zhung, H.B. (2009). Simulation of a slope failure induced by rainfall infiltration. *International Journal of Geosciences*, 943–952.

15. Chen, X., Guo, H., and Song, E. (2008). *Landslides and engineered slopes: from the past to the future*. International Symposium on Landslide and Engineered Slopes, China, 1507–1515.
16. Gui, M., and Han, K. (2010). A case study on rainfall infiltration effect on the stability of two slopes. *Landslides and Engineered Slopes Journal*, 1737–1743.
17. Jianping, S.U.N., Qingquan, L.I.U., Jiachun, L.I., and Yi, A.N. (2009). Effects of rainfall infiltration on deep slope failure. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy Journal*, 108-114.
18. Lcogi, Z., He, Y.J., Li, H., Wang, L.J., and Wang, Y.Q. (2017). Antecedent rainfall induced shallow landslide : A case study of Yunnan landslide, China. *Scientia Iranica Journal*, 202-212.
19. Oh, W.T., and Vanapalli, S.K. (2010). Computers and geotechnics influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes. *Computers and Geotechnics Journal*, 37 (5), 649–657.
20. Muntohar, A.S., and Liao, H.J. (2010). Rainfall infiltration: Infinite slope model for landslides triggering by rainstorm. *Natural Hazards*. 54 (3), 967–984.
21. Lu, N., Ba, Ş., Wayllace, A., and Godt, J.W. (2012). Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety. *Water Resources Research*, 1–14.
22. The, T., Trinh, V., Thu, M., Lee, G., Oh, S., and Thi, N. (2015). Effect of extreme rainfall on cut slope stability : Case Study in Yen Bai City , Vietnam. *Journal of the Korean Geo-Enviromental Society*, 16 (4), 23–32.
23. Oh, S., and Lu, N. (2015). Slope stability analysis under unsaturated conditions : Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes. *Engineering Geology Journal*. 184 96–103.
24. Yuan, J., Papaioannou, I., and Straub, D. (2015). *Reliability analysis of infinite slopes under random rainfall events*. Conference: ISGSR, Rotterdam, Holland. 439–444.
25. Cho, S.E. (2016). Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall in filtration. *Engineering Geology Journal*, 184–197.
26. Taşkıran, T. ve Fidan, A., Ayşegül, A. (2017). *Yağış parametreleri ve zemin hidrolik iletkenliğinin doygun olmayan koşullardaki bir şevin stabilitesine etkisi*. 7. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul, 853-864.
27. Heyerdahl, H. (2017). Influence of extreme long-term rainfall and unsaturated soil properties on triggering of a landslide - a case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences Journal*, 1-17.
28. Lin, H., and Zhong, W. (2019). Influence of rainfall intensity and its pattern on the stability of unsaturated soil slope. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 37 (2), 615–623.
29. Sagitaningrum, F.H., and Bahsan, E. (2017). *Parametric study on the effect of rainfall*

pattern to slope stability. Matec Web of Conferences, Braşov, Romania, 42-67.

30. Zakiyhy, F.A., and Oh, S. (2018). Transient analysis on infiltration and stability for unsaturated soils in busan transient analysis on infiltration and stability for unsaturated soils in busan landslide area. *International Journal of Environmental Science*, 40-46.
31. Kim, J., Kim, Y., Jeong, S., and Hong, M. (2017). Rainfall induced landslides by deficit field matric suction in unsaturated soil slopes. *Environmental Earth Sciences Journal*, 76 (23), 1–17.
32. Science, E. (2018). *A study on a instability slope in Taiwan subjed to rainfalls*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Banda Aceh, Indonesia, 143-160.
33. Arbanas, Z. (2019). *Rainfall infiltration and stability analysis of an unsaturated slope in residual soil from flysch rock mass*. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Iceland, 140-154.
34. Jagodnik, V. (2019). *Rainfall infiltration and stability analysis of an unsatuted slope in residual soil from flysch rock mass*. XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering Foundation of the Future Conference, Reykjavik, Iceland, 1-10.
35. Fan, Z., Meng, Z., Ren, H., and Peng, J. (2019). *A coupled excavation and rainfall-induced loess landslide in Liuwanjia Village, Yan'an China: Case study of Middle Pleistocene loess slopes*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Hangzhou, China, 17-29.
36. Chiu, Y., Chen, H., and Yeh, K. (2019). Investigation of the influe of rainfall runoff on shallow landslides in unsaturated soil using mathematical model. *Water Journal*, 4-21.
37. Zhang, J., Zhu, D., and Zhang, S. (2020). Computers and geotechnics shaow slope stability evolution during rainwater infiltration considering soil cracking state. *Computers and Geotechnics Journal*, 117-121.
38. Yang, D., Qiu, H., Pei, Y., Hu, S., Ma, S., and Liu, Z. (2020). Spatial and temporal evolution of the infiltration characteristics of a loess landslide. *International Journal of Geo-Information*, 13-28.
39. Zhao, S., Shi, Z., Peng, M., and Bao, Y. (2020). Stability analysis of expansive soil slope considering seepage softening and moistening expansion deformation. *Water Journal*, 1–20.
40. Fredlund, D.G., Rahardjo, H., and Fredlund, M.D. (2005). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley Publishing, 1-105.
41. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H. (1993). *The role of unsaturated soil behavior in geotechnical engineering practice*. 7th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, 37-42.
42. Kim, W.S. (2007). *Influenceof water infiltration on the deformation of mechanically stabilized earth walls*, PhD Thesis, North Carolina State University, 68-83.

43. Charles, W.W., and Menzies, B. (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Abingdon, United Kingdom: Taylor Publishing, 4-68.
44. Kayadelen, C. (2005). *Doygun olmayan ince taneli zeminlerin k₀ koşullarındaki yanal basınçlarının incelenmesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 3-13.
45. Murray, E.J., and Sivakumar, V. (2010). *Unsaturated Soils*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley Publishing, 34-92.
46. Cuceoglu, F. (2016). *An experimental study on soil water characteristics and hydraulic conductivity of compacted soils an experimental study on soil*, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. 4-19.
47. Burton, G.J. (2016). *An experimental investigation of unsaturated clay: volume change and microstructural considerations*, PhD Thesis, Newcastle University. 6-21.
48. Khoury, C.N. (2010). *Influence of hydraulic hysteresis on the mechanical behavior of unsaturated soils and interfaces*, PhD Thesis, University of Oklahoma. 14-46.
49. Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley Publishing, 64-108.
50. Rowe, R.K. (2000). *Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*. New York, Kluwer Academic Publishing, 107-154.
51. Kerry, R. R. (2001). *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. New York, Springer-Verlag Publishing, 1087.
52. Stipceovich, J.T. (2018). *An experimental investigation into the drainage properties of into the drainage properties of coarse loess and pond ash*, MS Thesis, Federation University, 37-50.
53. Taban, A., Sadeghi, M.M., and Rowshanzamir, M.A. (2018). Estimation of Van Genuchten SWCC model for unsaturated sands by means of the genetic programming. *Scientia Iranica Journal*, 2026–2038.
54. Maknoon, M. (2016). *Slope stability analyses of waste rock piles under unsaturated conditions following large precipitations*, PhD Thesis, Montreal University. 64-75.
55. Tan, N.K. (2005). *Pressuremeter and cone penetrometer testing in a calibration chamber with unsaturated minco silt*, PhD Thesis, University of Oklahoma. 5-41.
56. Muse, N. (2016). *Doygun olmayan zeminlerin mekanik özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 13-18.
57. Khalilnejad, A., and Osman, N. (2012). Contribution of the root to slope stability. *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, 277-288.
58. Lakakis, K., and Savvaidis, P. (2009). *Landslide definition by an integrated monitoring system*. 5th International Conference on Construction in the 21st Century, İstanbul, 143-154.

59. Müdürlüğü, K.G. (2015). Heyelan tanımlama ve veri oluşturma kılavuzu. 3-11.
60. Ulusay, R. (2007). *Heyelanlar ve mühendislik şevlerindeki duraysızlıklar: Türleri, Etkileri ve Zararlarının Azaltılması*. Sel-Heyelan-Çığ Sempozyumu, Samsun, 159-170.
61. Varnes, D. (1958). Slope movement types and processes. *Engineering Journal*, 11-33.
62. Cruden, D.M. (2014). Landslide Types and Processes. *Landslides Journal*, 36-75.
63. Hungr, O., Picarelli, L., and Leroueil, S. (2014). The varnes classification of landslide types, an update. *Landslides Journal*, 167–194.
64. Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., and Hutchinson, J.N. (2001) A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience Journal*, 221-238.
65. Sarada, K. (2013). *Geotechnical earthquake engineering seismic slope safety*. International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Greece. 1–20.
66. Varnes, D. J., (1978). *Landslides Analysis and Control*. New York, Transportation Research Board Publishing, 176.
67. Tekin, S., and Can, T. (2017). *Gökçay havzasının karar ağaç yöntemi ile heyelan duyarlılık değerlendirmesi*. Ulusal Mühendislik Jeoloji ve Jeoteknik Sempozyumu, Adana, 119-124.
68. Hantz, D., Vengeon, J.M., Hantz, D., Vengeon, J.M., and An, C.D. (2003). An historical geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences Journal*, 693-701.
69. Alemdağ, S., Gürocak, Z., and Özkirişçi, C. (2015). Karayolundaki kaya şevlerinin kinematik ve limit denge yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Journal of Natural Application and Research Center*, 1–10.
70. Lana, M.S., Pereira, L.C., and Lopes, P. (2013). *Modeling aspects of block toppling in rock slopes*. 23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya. 18-24.
71. Li, Y., and Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes. *Geomorphology Journal*, 67–83.
72. Lynn, H., and Peter, T. (2008). The landslide handbook a guide to understanding landslides. *US Geological Survey Journal*, 1325-1342.
73. Moudabel, O.A.M. (2013). *Slope stability case study by limit equilibrium and numerical methods*, MS Thesis, Oklahoma State University. 8-12.
74. Rahman, F.I., and Mamun, M.A.A. (2016). *Evaluating the stability of slope of rajshahi city protection embankment under seismic load*, MS Thesis, Rajshahi University. 30-46.

75. Fredlund, D.G., and Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. 29th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, British Columbia. 429-439.
76. Baba, K., Bahi, L., Ouadif, L., and Akhssas, A. (2012). Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods applied to a railway in the moroccan rif. *Open Journal of Civil Engineering*, 27-32.
77. Timothy, B., Stark, D., Eid, H.T., and Members, A. (1998). Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1049-1060.
78. Lu, N., Ba, Ş., Wayllace, A., and Godt, J.W. (2012). Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety. *Water Resources Research Journal*. 1-14.
79. Etiz, M. C., (2019). *Comparison of limit equilibrium and 2D, 3D finite element slope stability models: a case study on the slope in Akpınar district, in Ankara*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-40.
80. Xue, K., Ajmera, B., Tiwari, B., and Hu, Y. (2016). Effect of long duration rainstorm on stability of Red-clay slopes. *Geoenvironmental Disasters*. 3 (1).
81. Kristo, C., Rahardjo, H., and Satyanaga, A. (2017). Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore. *International Soil and Water Conservation Research*. 5 (4), 258–264.
82. Oh, W.T., Vanapalli, S.K., and Sheikhtaheri, M. (2014). *Slope stability analysis for Champlain sea clay deposits using the mechanics of unsaturated soils*. Unsaturated Soils: Research and Applications - Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014, 2 (June), 1521–1527.
83. İnternet: Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Merkezi. URL: <https://mevbis.mgm.gov.tr/mevbis/ui/index.html>, Son Erişim Tarihi:18.11.2019
84. Vogel, T., Genuchten, V., and Milena, C. (2001). Effect of the shape of soil hydraulic functions near saturation on variably saturated flow predictions. *Advances in Water Resources Journal*, 133-144.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDAĞ, Ahmet
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.08.1990, Kars
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (541) 850 54 36
 e-mail : ahmeterdag@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği	2014
Lise	Kars Alpaslan Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Özer, M., Erdağ, A. (2019). *Effect of the mold size on the compaction parametters of the soils*. 4th International Sustainable Building Symposium, Dallas- Texas, USA, 729-737.

Hobiler

Yüzme, Kitap okuma



GAZİ GELECEKTİR..