

T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK BİLİM DALI

MANİSA ÖZELİNDE YAĞIŞLARIN
ŞEV STABİLİTELERİNE ETKİSİ

Buğçe GÜMRAHOĞLU

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Ender BAŞARI

MANİSA- 2024

ÖZET

Yüksek Lisans

Buğçe GÜMRAHOĞLU

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI

Yağışlar, dünyanın her yerinde şevleri tetiklenmesinde önemli bir role sahiptir. Yağışlar şevlerin tetiklenmesinde genellikle ülkemizin kuzeyinde etkili olmakla birlikte uygun koşullar bir araya geldiğinde Manisa gibi farklı bölgelerde de şevleri tetikleyebilmektedir. Son yıllarda gözlemlenen iklim değişikliği ve bunun sonucunda yaşanan yağış rejimi ile yağış şiddet ve sürelerindeki değişimler, yağış infiltrasyonları neticesinde şev stabilite kayıplarına farkındalığı ve ilgiyi arttırmıştır.

Doğada şevli zeminler çoğu zaman yarı doygun bir vaziyette bulunmaktadır. Bu çalışma konusu zeminler için benzer durum söz konusudur. Manisa - Salihli civarında doğal durumda doygun olmayan zeminlerin doygunluk seviyelerindeki değişiminin şev kayma güvenliğine etkileri araştırılmıştır. Su içeriğinde değişim neticesinde kayma gözlemlenen zeminlerden numuneler alınmış ve zemin mekaniği açısından numunelerin özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen zemin özellikleri için yağış şiddeti ve süresinin mevcut zeminlere etkisi Itasca- Flac yazılımı ile iki boyutlu olarak sonlu farklar yöntemi ile araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda Manisa – Salihli bölgesindeki inceleme sahası zeminlerin mekanik özellikleri belirlenmiş, ayrıca yağış şiddeti ve süresinin inceleme konusu zeminlerin şev stabilitesine etkileri incelenmiştir. Araştırma neticesinde son 20 yıllık yağış ortalamalarının tek başlarına şevlerde göçme tehlikesi oluşturmadığı sonucuna varılmış olup elde edilen sayısal analiz sonuçları paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: şev stabilitesi, yağış, yağış süresi, yağış şiddeti, yarı doygun zemin

2024, 74 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

Buğçe GÜMRAHOĞLU

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI

Rainfall has an important role in triggering slopes all over the world. Rainfall is generally effective in triggering slopes in the north of our country, but when suitable conditions come together, it can also trigger slopes in different regions such as Manisa. Climate change observed in recent years and the resulting changes in rainfall regime and rainfall intensity and duration have increased awareness and interest in slope stability losses as a result of rainfall infiltration.

In nature, sloped soils are often semi-saturated. A similar situation applies to the soils in this study. The effects of changes in saturation levels of naturally unsaturated soils on slope slippage safety were investigated in the Manisa - Salihli area. Samples were taken from the soils where slippage was observed due to changes in water content and the properties of the samples were determined in terms of soil mechanics in a laboratory environment. Then, the effects of rainfall intensity and duration on the existing soils for the determined soil properties were investigated with the Itasca-Flac software in two dimensions using the finite difference method.

As a result of the study, the mechanical properties of the soils in the Manisa – Salihli region were determined, and the effects of rainfall intensity and duration on the slope stability of the soils under study were examined. As a result of the research, it was concluded that the last 20 years of rainfall averages alone don't have any risk about slope failures, and the numerical analysis results were shared.

Keywords: Slope stability, rainfall, rainfall duration, rainfall intensity, unsaturated soil

2024, 74 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının yürütülmesinde ve hazırlanma sürecinde değerli bilgileriyle çalışmaya katkı sunan, bilgi ve görgümün artmasına vesile olan sayın danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ender BAŞARI'ya ve her zaman desteğini benden esirgemeyen aileme ve sevgili eşim Enes ŞAHİNALP'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Buğçe GÜMRAHOĞLU

Manisa, 2024



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ	Hacimsel su içeriği
θ_r	Rezidüel hacimsel su içeriği
θ_s	Doygun zemin hacimsel su içeriği
$(u_a)_f$	Yenilme anında kayma düzlemindeki boşluk suyu basıncı
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı
$\bar{u}_v$	Kısmi boşluk suyu buhar basıncı
$\bar{u}_{vo}$	Aynı sıcaklıktaki saf su yüzeyi üzerindeki doymuş su buharı basıncı
K_r^g	Gaz (hava) fazı için rölatif iletkenlik
K_r^w	Sıvı (su) fazı için rölatif iletkenlik
c'	Efektif zemin kohezyonu
h_p	SWCC eğrisinin orta noktasındaki zemin emme basıncı
u_w	Boşluk suyu basıncı
θ_p	SWCC eğrisinin orta noktasındaki hacimsel su içeriği
σ_f	Kayma düzlemindeki toplam normal gerilme
σ'_f	Kayma düzlemindeki efektif normal gerilme
τ'_{ff}	Efektif kayma dayanımı
c'	Mohr-Coulumb dayanım zarfının düşey eksenini kestiği değer
F	Kuvvet
g_i	yerçekimi ivmesinin bileşeni
h	hidrolik yükseklik
K_a	Hava geçirgenlik katsayısı
K_d	Kuru zemin için hava geçirgenlik katsayısı
K_s	Doygun zemin için su geçirgenlik katsayısı
K_w	Sıvı (su) fazı için geçirgenlik katsayısı
n, m	Eğri uydurma katsayıları
q	Eğri uydurma katsayısı
R	Genel gaz sabiti
S	Doygunluk derecesi
S_e	Efektif doymunluk derecesi

S_r	Rezidüel doyunluk derecesi
S_s	Doygun zemin için doyunluk derecesi
T	Mutlak sıcaklık
T	zaman
V_t	Zemin örneğinin toplam hacmi
V_v	Zemin örneğindeki boşluk hacmi
V_w	Zemin örneğindeki su hacmi
v_{wo}	1/Suyun özgül hacmi
x_j	koordinat vektörünün bileşeni
Θ	Normalize boyutsuz hacimsel su içeriği
Θ_d	Boyutsuz hacimsel su içeriği
ρ	yoğunluk
ρ_w	Suyun özgül ağırlığı
σ_{ij}	gerilme tensörünün bileşeni
τ_{ff}	Yenilme anında kayma düzlemindeki kayma gerilmesi
ϕ^b	Matrik emme ile ilişkili olarak kayma direncindeki artış oranı
ψ	Zemin emme gerilmesi ya da toplam emme
ψ_m	Matrik emme
ψ_π	Osmatik emme
ω_v	Su buharının moleküler kütlesi
u	hız
u	ivme

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Eğimli zemin yüzeylerinde zemin kütle hareketleri, şev kaymaları. (a) [1]... 7	7
Şekil 2. $\phi_u = 0$ analizinin şematik gösterimi [10]..... 9	9
Şekil 3. Dilim yönteminin şematik gösterimi. 10	10
Şekil 4. Sürekli bir ortamın daha küçük üçgen şekilli sonlu elemanlardan oluşturulmuş modeli 12	12
Şekil 5. Kuvvet etkiyen bir cisimdeki ivme, hız ve yer değiştirmeler [8]. 14	14
Şekil 6. FLAC sonlu farklar yazılımının temel hesaplama döngüsü [8]..... 15	15
Şekil 7. FLAC sonlu farklar yazılımına ait göz ve gritlerden oluşan sonlu farklar sayısal modeli [8]..... 15	15
Şekil 8. Doygun olmayan (yarı doygun) zemini oluşturan fazlar [11]. 17	17
Şekil 9. Doygun ve doygun olmayan zemin bölgeleri [12]. 17	17
Şekil 10. Islanma ve kuruma için örnek bir zemin–su karakteristik eğrisi (SWCC) [17]. 21	21
Şekil 11. Zemin – su karakteristik eğrisinin (SWCC) bölgeleri (kuruma için) [15].. 21	21
Şekil 12. Kübik zemin elemanına etkiyen gerilmeler a) doygun olmayan, b) doygun, c) kuru [11]. 24	24
Şekil 13. Doygun zeminler için Mohr – Coulomb kayma kriteri – Efektif durum için [18]..... 25	25
Şekil 14. Doygun olmayan zeminlerde kayma dayanımı [19]..... 26	26
Şekil 15. Doygunluğa bağlı şev kaymalarının gözlemlendiği saha [23]..... 30	30
Şekil 16. İnceleme sahası [25] (Ender Başarı'nın izni ile)..... 32	32
Şekil 17. Birbirine yakın mesafede bulunan ve zemin su içeriğinin değişmesi neticesinde göçen şevler [25] (Ender Başarı'nın izni ile)..... 32	32
Şekil 18. ASTM 5298 standardında Watman No 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıdı türleri için önerilen kalibrasyon eğrileri [26]. 35	35

Şekil 19. ASTM 5298 standardında zeminlerin toplam emmesinin belirlenmesi için zemin numunelerinin ve filtre kağıtlarının izole kap içine yerleştirilmesi [26].	36
Şekil 20. ASTM 5298 standardında zeminlerin matrik emmesinin belirlenmesi için zemin numunelerinin ve filtre kağıtlarının izole kap içine yerleştirilmesi [26].	37
Şekil 21. Kumlu zeminden suyun geçişi [29].	39
Şekil 22. (a) Itasca – Flac yazılımında kullanılan dörtgen elemanlar. (b) Hız vektörlerine sahip tipik üçgen eleman. (c) düğüm kuvveti vektörlerine sahip tipik üçgen eleman [8].	41
Şekil 23. (a) Itasca – Flac yazılımında oluşturulan şev geometrisi ve grit yapısı.	46
Şekil 24. Türkiye Cumhuriyeti çevre şehircilik ve iklim değişikliği Bakanlığının bu resmi verilerine göre Manisa için son 20 yılın yağış ortalamaları [33]	47
Şekil 25. Türkiye Cumhuriyeti çevre şehircilik ve iklim değişikliği Bakanlığının bu resmi verilerine göre Manisa için son 20 yılın yağış ortalamaları [33]	47
Şekil 26. Birinci evre yağışları sonunda oluşan başlangıç doygunluk koşulları: (a)223.21 mm/7Ay, (b) 630 mm/7Ay (Yağışlar toplam yağıştır, 7 Ayda düşen toplam yağıştır)	50
Şekil 27. Oluşturulan sayısal modelin sınır koşulları.	51
Şekil 28. Zemin numunelerine ait filtre kâğıdı deneylerinden belirlenen matrik emme hacimsel su içeriği grafikleri.	54
Şekil 29. Hidrolik iletkenlik test sonucu	55
Şekil 30. Zeminin matrik emme basıncına karşılık röletif permeabilite eğrisi (Denklem: (23), (26), (33) yardımı ile)	55
Şekil 31. Birinci evre yağışları sonunda oluşan başlangıç durumundaki boşluksuyu basınçları: (a)223.21 mm/7Ay, (b) 630 mm/7Ay	56
Şekil 32. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 223.21 mm/Ay)	57

Şekil 33. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 223.21 mm/Ay) – Şekil 32' un devamı	58
Şekil 34. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 740 mm/Ay)	59
Şekil 35. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 740 mm/Ay) – Şekil 34'nin devamı.....	60
Şekil 36. Şev kayma güvenliği belirleme için yapılan örnek bir FoS sonuçları.	61
Şekil 37. 40° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.	62
Şekil 38. 35° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.	62
Şekil 39. 30° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Doygun olmayan zeminler için önerilen kayma dayanım ilişkileri.....	27
Tablo 2. Analizlerde dikkate alınan şev eğimleri ve yağış senaryo sayıları	48
Tablo 3. Analizlerde dikkate alınan yağış senaryoları	48
Tablo 4. Şev kütlesi için başlangıç doygunluk değerleri	49
Tablo 5. Flac – Sonlu farklar yazılımında kullanılan hesap parametreleri	52
Tablo 6. Doğal numuneler üzerinde yapılan genel zemin özelliklerine ait test sonuçları	53
Tablo 7. Zemin numuneleri için belirlenen van Genuchten parametreleri	54

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLolar DİZİNİ	IX
İÇİNDEKİLER.....	X
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	2
2.1. Şev ve Şev Duraylılığı Hakkında Genel Bilgiler	3
2.2. Şev Stabilitesi ve Şev Kayması.....	7
2.3. Şev Stabilite Analizleri	8
2.3.1. Kayma Dairesi ve Dilim Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizleri	8
2.3.2. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM).....	12
2.3.3. Sonlu Farklar Metodu (SFM).....	13
2.4. Doygun Olmayan Zeminler ve Mekanığı	16
2.5. Yarı Doygun Zeminlerde Kayma Dayanımı	28
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	30
3.1. Materyal	31
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. Laboratuvar Çalışmaları	33
3.2.2. Sonlu Farklar Yöntemi	40
3.2.3. Sayısal Model.....	46
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.1. Deneysel Çalışma Bulguları ve Sonuçları.....	53
4.2. Sayısal Analizler ve Sonuçları	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	66
EKLER	69

1. GİRİŞ

Günümüzde iklim değışiklikleri ve ekosistem bozulmaları, su kaynaklarının yönetimi üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır. Yağış rejimlerindeki değışimler, özellikle taşkın riskini artırarak, şev stabilitesi üzerinde ciddi tehditler oluşturabilmektedir. Bu bağlamda, yağışların ve taşkınların şevlerin stabilitesi üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkileri azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek hem mühendislik uygulamaları hem de çevre yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu makale, yağışların ve taşkınların şev stabilitesine olan etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. İlk olarak, iklim değışikliklerinin su döngüsü üzerindeki etkileri ve bu değışikliklerin yağış rejimlerini nasıl etkilediği ele alınacaktır. Daha sonra, taşkınların şev morfolojisi üzerindeki doğrudan etkileri ve bu etkilerin şev stabilitesine olan potansiyel tehlikeleri ele alınacaktır.

Çalışmamız, bu etkilerin mühendislik projeleri ve doğal kaynak yönetimi stratejileri üzerindeki etkilerini anlamak, gelecekteki taşkın olaylarını tahmin etmek ve şev stabilitesini artırmak için kullanılabilecek yenilikçi çözümleri keşfetmek amacıyla bir köprü görevi görecektir. Bu bağlamda, makalemiz, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ve altyapı geliştirmeleri için önemli bir bilgi kaynağı olarak hizmet etmeyi amaçlamaktadır.

Manisa İlinden alınan zemin numunelerinin parametreleri belirlenerek farklı eğim değerleri ve Manisa iline ait yağış değerleri için analizler yapılmış olup güvenlik faktörleri incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Şev stabilitesi ve şev kayma güvenliği yamaçların veya eğimli arazinin doğal veya insan kaynaklı etmenlere karşı dayanıklılığını ifade eden bir kavramdır. Bu dayanıklılık, yamaçların çeşitli faktörlere karşı direncini ve bu direncin sürdürülebilirliğini içerir. Yağışlar ve taşkınlar, şev stabilitesini olumsuz etkileyebilir.

Şev stabilitesi genellikle mühendislik ve jeoloji gibi disiplinlerde önemli bir konudur ve aşağıdaki faktörlerle ilişkilidir:

Zemin ve Kaya Cinsi: Yamaçların oluşturulduğu zemin veya kaya cinsi, şev stabilitesini büyük ölçüde etkiler. Örneğin, kumlu zeminler genellikle suyu iyi drene ederken, kil içeren zeminler suyu daha iyi tutar ve erozyona daha açık hale gelir.

Eğim Derecesi: Yamaçların eğim derecesi, şev stabilitesini etkileyen temel bir faktördür. Daha dik eğimler, yer çekimi etkisiyle aşağıya doğru kaymaya ve erozyona daha fazla açıktır.

Yağış ve Taşkınlar: Yağış miktarı, dağılımı ve şiddeti, şev stabilitesini önemli ölçüde etkiler. Aşırı yağışlar veya taşkınlar, şevlerde erozyonu artırabilir ve çeşitli geoteknik sorunlara yol açabilir.

Bitki Örtüsü: Bitki örtüsü, toprak erozyonunu azaltabilir ve yüzey akışını kontrol edebilir. Bitkilerin kökleri, toprağı bir arada tutar ve erozyona karşı direnç sağlar.

İnsan Etkisi: İnşaat faaliyetleri, madencilik, ağaç kesimi gibi insan etkinlikleri de şev stabilitesini olumsuz etkileyebilir. Yamaçlardaki doğal dengenin bozulması, kayma riskini artırabilir.

Jeolojik Yapılar: Şevlerdeki jeolojik yapılar, fay hatları veya katmanların eğimi gibi faktörler de şev stabilitesini etkiler.

Mühendislik uygulamalarında, şev stabilitesi analizleri genellikle yerinde incelemeler, jeoteknik analizler ve matematiksel modellerle yapılır. Bu analizler, yamaçların güvenliğini ve istikrarını sağlamak için alınacak önlemleri belirlemek için

kullanılır. Şev stabilitesi, özellikle inşaat projelerinde, otoyol güzergahlarında, barajlarda ve benzeri altyapı projelerinde büyük bir öneme sahiptir.

2.1.Şev ve Şev Duraylılığı Hakkında Genel Bilgiler

Şev ve şev duraylılığı konusunda incelenmesi gereken başlıca faktörler aşırı yağış ve taşkınlardır. Aşırı yağış, kar erimesi veya diğer sebeplerle suyun normal akış yollarından taşması sonucu meydana gelen su baskınlarıdır. Taşkınlar, aşırı yağış, kar erimesi, göl veya nehir taşmaları gibi sebeplerle suyun normal akış yollarından çıkarak, genellikle düşük arazilere yayılması ve ani su baskınlarına neden olan olaylardır. Taşkınlar, şevlerde erozyon ve çökme gibi sorunlara yol açabilir.

Taşkın yönetimi, bu tür olayların etkilerini en aza indirmek ve insanların, mülklerin ve çevrenin korunmasını sağlamak amacıyla yapılan bir dizi strateji ve altyapı yatırımı içerir. Bu, taşkın riskini değerlendirmeyi, uyarı sistemlerini geliştirmeyi, altyapı projelerini iyileştirmeyi ve su baskınlarının etkilerini azaltmayı içerir.

Yağış rejimi, belirli bir coğrafi bölgedeki yağış miktarı, sıklığı ve dağılımını tanımlayan bir terimdir. Bu kavram, belirli bir bölgenin iklim özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar. Yağış rejimi, bölgenin iklimini anlamak, su kaynaklarını yönetmek, tarım planlaması yapmak ve çevresel değişiklikleri takip etmek için kullanılır. İklim değişiklikleri, yağış rejimlerini etkileyerek taşkın riskini artırabilir.

Yağış rejimi ile ilgili ana faktörler şunlardır:

Yağış Miktarı: Belirli bir bölgedeki yağış miktarı, yıllık yağışların genel hacmini ifade eder. Bu, bölgenin genel iklimini belirlemede önemli bir faktördür.

Yağış Sıklığı: Yağış rejimi aynı zamanda yağışların ne sıklıkta gerçekleştiğini ifade eder. Örneğin, belirli bir bölgede sürekli yağışlar mı, belirli mevsimlerde odaklanmış yağışlar mı gözleniyor bu durumu inceler.

Dağılım Şekli: Yağış rejiminin düzeni ve dağılım şekli, belirli bir bölgede yağışların hangi aylarda ve mevsimlerde yoğunlaştığını gösterir. Bu, tarım, su yönetimi ve diğer alanlarda planlama için önemlidir.

İklimsel Etkiler: Yağış rejimi, bir bölgedeki iklimsel değişimleri anlamak için kullanılabilir. Bu, iklim değişikliklerini değerlendirmek ve buna uygun stratejiler geliştirmek açısından önemlidir.

Toprak ve Bitki Örtüsü: Yağış rejimi, bölgedeki toprak özelliklerini ve bitki örtüsünü etkiler. Bu faktörler, ekosistemlerin ve tarımın sağlığını etkiler.

Su Kaynakları Yönetimi: Yağış rejimi, belirli bir bölgede su kaynaklarını yönetmek için kullanılır. Bu, su stoğu, sulama projeleri ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını içerir.

Yağış rejimleri coğrafi bölgelere göre önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Örneğin, tropikal iklimlerde genellikle düzenli ve yüksek yağış rejimleri görülürken, çöl iklimlerinde düşük ve düzensiz yağışlar söz konusu olabilir. Bu nedenle, bir bölgedeki yağış rejimini anlamak, o bölgenin iklim, ekoloji ve su kaynakları yönetimi üzerinde önemli bir etkisi olan temel bir bilgidir.

Zemin Özelliklerinin Şev Kaymalarına Etkileri

Zeminin özellikleri, şev kaymalarını önemli ölçüde belirleyen temel faktörler arasında yer alır. Şev kaymaları, bir yamaçtaki toprak veya kayaların saklandığı yerlerin doğru kaymasıdır ve bu süreçte zeminin rolü oldukça kritiktir.

Zemin Türü: Kaya ve Sert Zeminler daha stabil olup, şev kaymalarına karşı daha dirençlidir. Ancak çatlaklı veya zayıf kayalar, ani ve büyük kaymalara neden olabilir. Killi Zeminlerde kilin plastisite ve şişme potansiyeli, su ile temas ettiğinde önemli ölçüde artar ve bu sayede stabilitesini azaltır. Kilin su içeriği, kayma direnci azalır. Kumlu Zeminler, genellikle daha iyi drenaj sağlar ve suyu hızla geçirir, bu da kayma riskini azaltır. Ancak belirli bir su içeriğine ulaşıldığında, özellikle doymuş hale geldiğinde kayma riski artar.

Zemin Yoğunluğu ve Birim Hacim Ağırlığı: Zeminin yoğunluğu arttıkça kayma direnci genellikle artar. Yoğun ve sıkışmış zeminler boşluk oranını azaltarak

şev stabilitesini artırır ve kayma riski azalır. Ancak, artan birim hacim ağırlık, şev üzerinde kaymayı teşvik eden itici kuvvetleri artırarak kayma riskini artırır.

Zemin Su İçeriği: Zemin su içeriği, kayma direncini gösteren en önemli faktörlerden biridir. Su, zeminin içindeki taneler arasındaki bağları oluşturabilir ve kayma direncini görebilir. Ayrıca su basıncı artarsa, stabilitesi ciddi şekilde bozulabilir.

Zemin Kohezyonu ve İçsel Sürtünme Açısı: Kohezyon, zemin tanelerinin bir arada tutulmasını sağlar. Yüksek kohezyonlu zeminler, kaymaya karşı daha dirençlidir. İçsel sürtünme açısı ise, zeminin direncini temsil eder. Bu değer ne kadar yüksekse, şev stabilitesi o kadar artar.

Tabakalaşma: Zemin ve kaya tabakaları arasında ayrılmalar ve çatlaklar şev kaymalarına yol açabilir. Bu zayıf hatlar boyunca kaymalar daha kolay gerçekleşebilir.

Zemin Sıkılığı ve Sıkışabilirlik: Sıkı ve düşük sıkışabilirlik özelliğine sahip zeminler, şev kaymalarına karşı daha dayanıklıdır. Gevşek ve yüksek oranda sıkışabilirlik gösteren zeminler ise kaymaya daha yakındır.

Organik İçerik: Organik madde içeriği yüksek zeminler, genellikle düşük dayanım gösterir ve bu da şev kaymalarını sebep olur.

Zemin esnekliği yanı sıra, genişlik açısı, sıcaklık, iklim koşulları, bitki örtüsü ve insan müdahaleleri de şev kaymalarını sağlayan diğer faktörlerdir. Bu nedenle, şev stabilitesini birleştirirken bu unsurların hepsi bir bütün olarak ele alınır.

Yarı Doygun Zeminlerde Şev Dayanımını Etkileyen Faktörler

Yarı doymuş zeminler, su içeriği tam doymuş olmayan ancak tamamen kuru da olmayan zeminlerdir. Bu tür zeminlerde, su ve hava koşullarında birlikte bulunur, bu da zemin davranışını ve dolayısıyla şev koşullarını önemli ölçüde etkiler.

Matrik Emme: Yarı doymuş zeminlerde, su içeriği nedeniyle matrik emiş adı verilen bir gerilim oluşur. Bu, zemin tanelerini bir arada tutar ve zemin kohezyonunu artırır. Bu, yarı doymuş zeminin kayma direncini (kayma mukavemetini) artırır, dolayısıyla şev stabilitesini olumlu etkiler.

Matrik emme, zemin doygunluğa yaklařtıkęa azalır. Yani, zemin doygun hale geldikęe emme basıncı azalır ve zemin daha duraysız hale gelir, bu da şev stabilitesini olumsuz etkiler.

İçsel Sürtünme Açısı: Yarı doygun zeminlerde matrik emme sürtünmeyi artırır ve bu durumda içsel sürtünme açısı etkili bir şekilde artar ve zemin daha yüksek kayma mukavemeti sergiler, kayma riski azalır. Yarı doygun zeminlerde içsel sürtünme açısı şev dayanımını arttıran önemli bir parametredir. Zeminlerde su içeriği arttıkęa emme düşer ve şev stabilitesi azalır.

Doygunluk Derecesi: Yarı doygun zeminlerin doygunluk derecesi, şev stabilitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Doygunluk derecesi özelliğinde, zemin suya daha fazla doygun hale gelir ve matrik emme azalır, bu da şev stabilitesini olumsuz etkiler.

Tam doygun hale gelen zeminlerde, su basıncı artar ve bu durum kayma direncini önemli ölçüde azaltır ve şev kaymalarına yol açabilir.

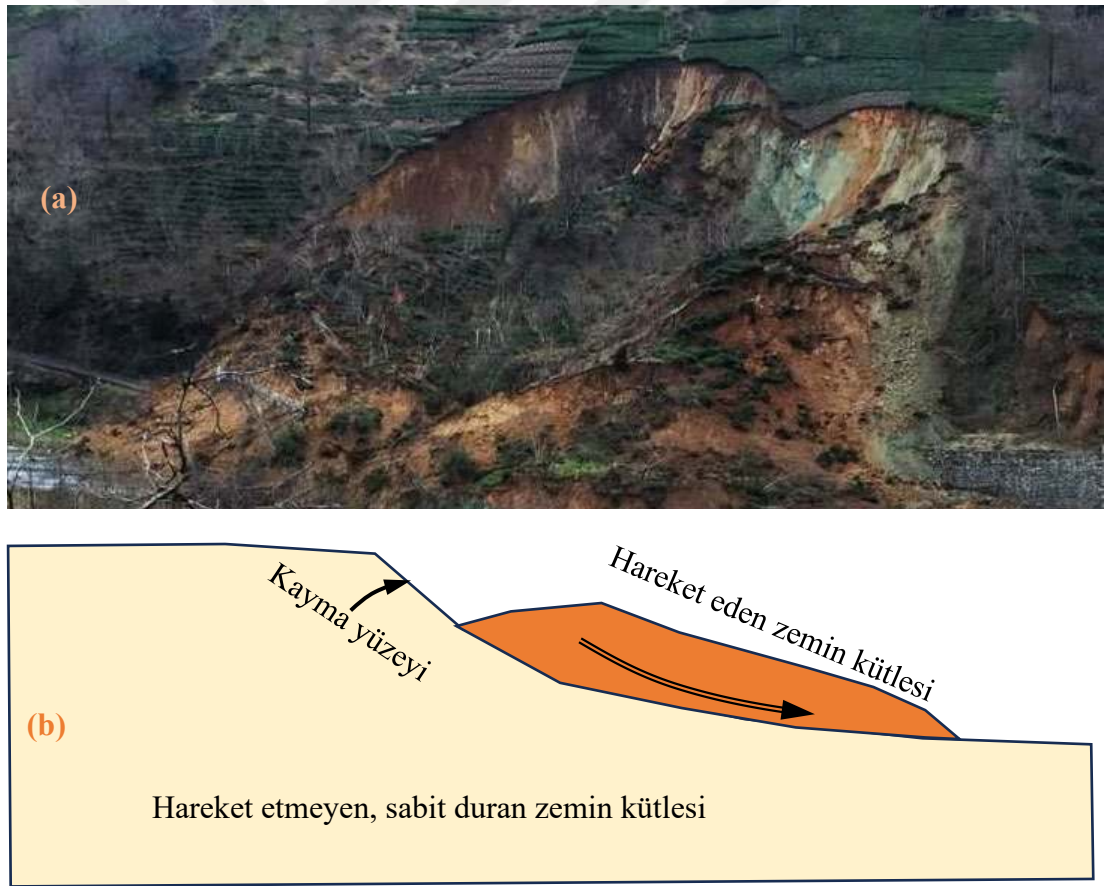
Zemin Türü: Kaya zeminler yüksek kayma mukavemeti ve düşük deformasyon ile yüksek şev stabilitesine sahiptir. Kumlu zeminler kohezyon düşük olsa da içsel sürtünme açısına bağlı olarak orta ila yüksek şev stabilitesi sağlar. Siltler orta derece drenaj özelliklerine sahiptir ve suya doygun hale geldiklerinde kayma mukavemeti hızla azalır. Killi zeminler yüksek kohezyonlu olmalarına rağmen düşük içsel sürtünme açılarına sahiptir. Bu durumda şev stabilitesi önemli ölçüde azdır.

Zemin Kohezyonu: Yarı doygun zeminlerde kohezyon, matrik emme nedeniyle artar. Bu, zemin taneleri arasındaki bağları güçlendirir ve şevin stabilitesini artırır. Ancak zemin doygun hale geldikęe kohezyon azalır ve şev stabilitesi zayıflar.

Drenaj ve Su Akışı: Yarı doygun zeminlerde, zeminin su direnci ve drenaj durumu, şev dayanıklılığını koruyabilir. Drenajın yetersiz olduğu yerde su miktarı artar ve zemin doygun halde dağılımı stabilizeyi azaltır.

2.2. Şev Stabilitesi ve Şev Kayması

Zemin yüzeylerinde doğal ya da yapay olarak oluşan eğimli zemin yüzeyleri şev olarak adlandırılır. Şevler yer kabuğu hareketleri, depremi, yağmur ya da rüzgâr erozyonu gibi doğa olayları ile oluşabileceği gibi insan kaynaklı faaliyetler neticesinde de oluşabilmektedir. Denge durumundaki eğimli zemin yüzeyleri (şevler) ağırlık, deprem, ilave yükleme, yağış, erozyon ya da kazı gibi etkiler altında denge durumları bozularak bir kısım zemin kütlesi diğer bir zemin kütesine göre hareket ederek kaymalar ve göçmeler meydana gelebilmektedir (Şekil 1). Eğimli yüzeye sahip şevli zeminlerde zemin kütesinin bir kısmında meydana gelen bu hareket ve kayma şev göçmesi – şev kayması olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1. Eğimli zemin yüzeylerinde zemin kütle hareketleri, şev kaymaları. (a) [1]

2.3.Şev Stabilite Analizleri

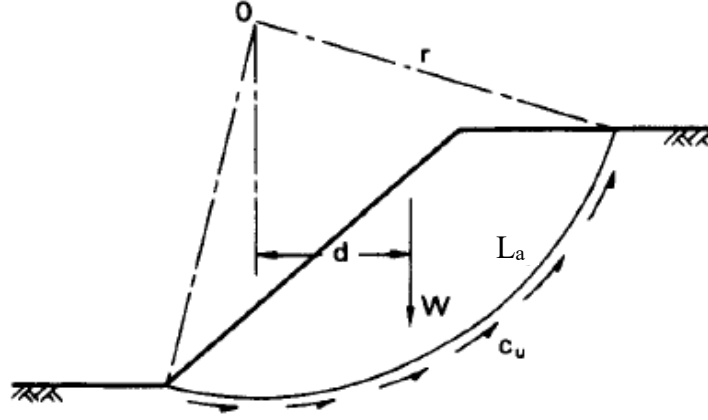
Şev duraylılık analizleri geoteknik mühendisliğinde başlıca ve en eski konularından biri olup, en sık karşılaşılan uygulamalardan birisidir. 1900’lü yılların başından günümüze birçok araştırmacı tarafından şev stabilitesi için yöntem ve metotlar geliştirilmiştir. Günümüzde limit denge yöntemine dayanan geleneksel hesap yöntemleri hala günümüzde en sık kullanılan analiz yöntemleridir. Fellenius – İsveç dilim yöntemi [2], Janbu yöntemi [3], Bishop dilim yöntemi [4], Morgenstern & Price yöntemi [5], Spencer yöntemi [6] gibi yöntemler başlıca geleneksel kayma dairesi hesap yöntemlerine örnek olarak verilebilir. Geleneksel yöntemlere ilaveten, günümüzde bilgisayar ve yapay zekanın hayatımızda yer alması ile birlikte geleneksel yöntemlere ilaveten sonlu elemanlar, sonlu farklar yöntemini kullanan yazılımlar ve yapay zekâ yöntemleri de şev stabilite analizlerinde günümüzde sıkça kullanılmakta olup bu yazılımlara Plaxis (sonlu elemanlar) [7], Itasca Flac (sonlu farklar) [8], Bardhan ve Samui, (2022) (yapay zeka) [9] örnek olarak verilebilir. Sayılan bu yöntemler ile şev stabilite tahkikleri toplam gerilmeler ile drenajsız durum ya da efektif gerilme koşulları için yapılmaktadır.

2.3.1. Kayma Dairesi ve Dilim Yöntemleri ile Şev Stabilite Analizleri

$\phi_u = 0$ Yöntemi

Tam doygun bir kilin toplam gerilmeler ile drenajsız koşullar altında inşaattan hemen sonraki durumunu kapsayan bir analizdir. Analizde yalnızca moment dengesi dikkate alınır. Potansiyel kayma yüzeyinin dairesel bir yay olduğu varsayılır. Şekil 2'de merkezi O noktasında, yarıçap r ve yay uzunluğu L_a olan potansiyel bir kayma yüzeyi gösterilmiştir. Kaymaya neden olan dengesizlik, kayma yüzeyinin üzerindeki zemin kütlelerinin toplam ağırlığından (kâğıt düzlemine dik birim uzunluk başına) kaynaklanır. Denge durumu için kayma yüzeyi boyunca mobilize olması gereken kayma dayanımı aşağıda denklem (1)’de verildiği gibi ifade edilir:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F} = \frac{c_u}{F} \quad (1)$$



Şekil 2. $\phi_u = 0$ analizinin şematik gösterimi [10]

Kaymaya karşı şevin güvenlik faktörü (F), O noktasına göre moment dengesi göz önüne alınarak aşağıda denklem (2) ve denklem (3) ile verildiği gibi hesaplanır. Birçok kayma daresi için güvenlik faktörleri hesaplanır, Hesaplanan güvenlik faktörlerinden en küçüğü şevin kaymaya karşı güvenlik katsayısını temsil eder.

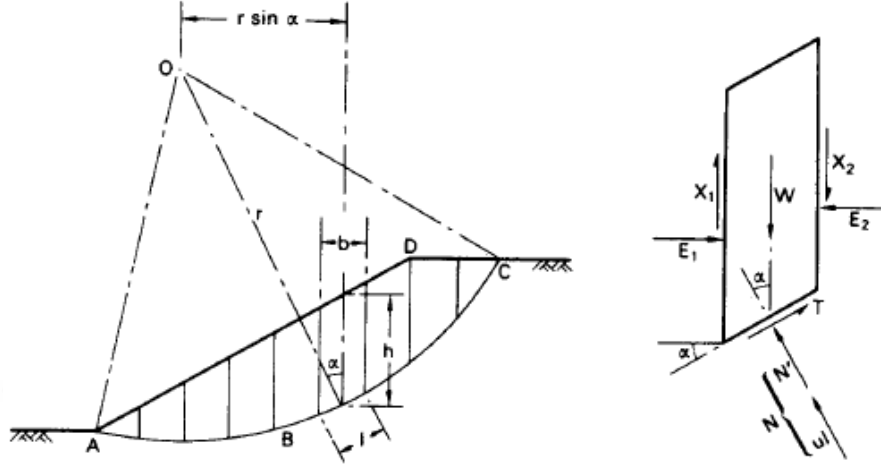
$$Wd = \frac{c_u}{F} L_a r \quad (2)$$

$$F = \frac{c_u L_a r}{Wd} \quad (3)$$

Dilim Yöntemi

Bu yöntemde Şekil 3 ile verilen kesitteki potansiyel kayma yüzeyinin bir önceki yöntemde olduğu gibi O merkezli ve r yarıçaplı dairesel bir yay olduğu varsayılır. Potansiyel kayma yüzeyinin (AC) üzerindeki zemin kütlesi (ABCD), Şekil 3’de gösterildiği gibi, düşey düzlemlerle b genişliğinde bir dizi dilime bölünür. Her dilimin tabanının düz bir çizgi olduğu varsayılır. Herhangi bir dilim için tabanın yataya olan eğimi ve merkez hattında ölçülen yükseklik h'dir. Kayma daresinin kayma

güvenliği (F) aşağıdaki denklem (4) ile ifade edildiği gibi mevcut kayma dayanımının (τ_f), limit denge durumu mobilize kayma dayanımına (τ_m) oranına dayanan bir analizdir.



Şekil 3. Dilim yönteminin şematik gösterimi.

$$F = \frac{\tau_f}{\tau_m} \quad (4)$$

Güvenlik faktörü her dilim için aynı alınır, bu da dilimler arasında karşılıklı destek ve denge olması gerektiği anlamına gelir, yani kuvvetler dilimler arasındaki yüzeye etki etmelidir.

Bir dilime etki eden kuvvetler (kesite dik birim boy için):

1. Dilimin toplam ağırlığı, $W=\gamma bh$ (doymuş kesimler için $\gamma_{doymuş}$).
2. Tabandaki toplam normal kuvvet, N (σl değerine eşit). Genel olarak bu kuvvetin iki bileşeni vardır, efektif normal kuvvet N' ($\sigma' l$ değerine eşit) ve kayma yüzeyi sınırındaki toplam su basıncı kuvveti U (ul değerine eşit), burada u dilim tabanının merkezindeki boşluk suyu basıncı ve l dilim tabanının uzunluğudur.
3. Tabandaki kayma kuvveti, $T=\tau_m l$
4. Kenarlardaki toplam normal kuvvetler, E_1 ve E_2
5. Kenarlardaki kayma kuvvetleri, X_1 ve X_2

Dilimlere etkiyen ilave dış kuvvetler varsa hesaba onlarda dahil edilmelidir.

Bilinmeyenlerin sayısının yazılabilecek statik denge denklemlerinin sayısından daha fazla olduğundan problem çözülemez. Problemin çözülebilmesi için dilimler arası kuvvetler E ve X ile ilgili varsayım ve kabullerde bulunulur. Dolayısı ile varsayım ve kabullere bağlı olarak güvenlik faktörü için ortaya çıkan çözümler gerçek olmamakla birlikte gerçeğe yakın olarak elde edilebilir. Dilimler arasındaki E ve X kuvvetleri için farklı araştırmacıların yapmış olduğu kabuller çerçevesinde gerçeğe yakın çözümlere ulaşılabilmektedir [2], [3], [4], [5], [6].

Şekil 3’de O noktası için momentler göz önüne aldığımızda, AC kayma yayı üzerindeki T kesme kuvvetlerinin momentlerinin toplamı, ABCD zemin kütlesinin ağırlığının momentine eşit olmalıdır. Herhangi bir dilim için ağırlık kuvvetinin (W) moment kolu $rsin\alpha$ 'dır. Buradan aşağıda verilen (5), (6), (7), (8), (9), (10) denklemleri yazılabilir.

$$\sum Tr = \sum Wrsin\alpha \quad (5)$$

$$T = \tau_m l = \frac{\tau_f}{F} l \quad (6)$$

$$\sum \frac{\tau_f}{F} l = \sum Wsin\alpha \quad (7)$$

$$F = \frac{\sum \tau_f l}{\sum Wsin\alpha} \quad (8)$$

Efektif analiz için;

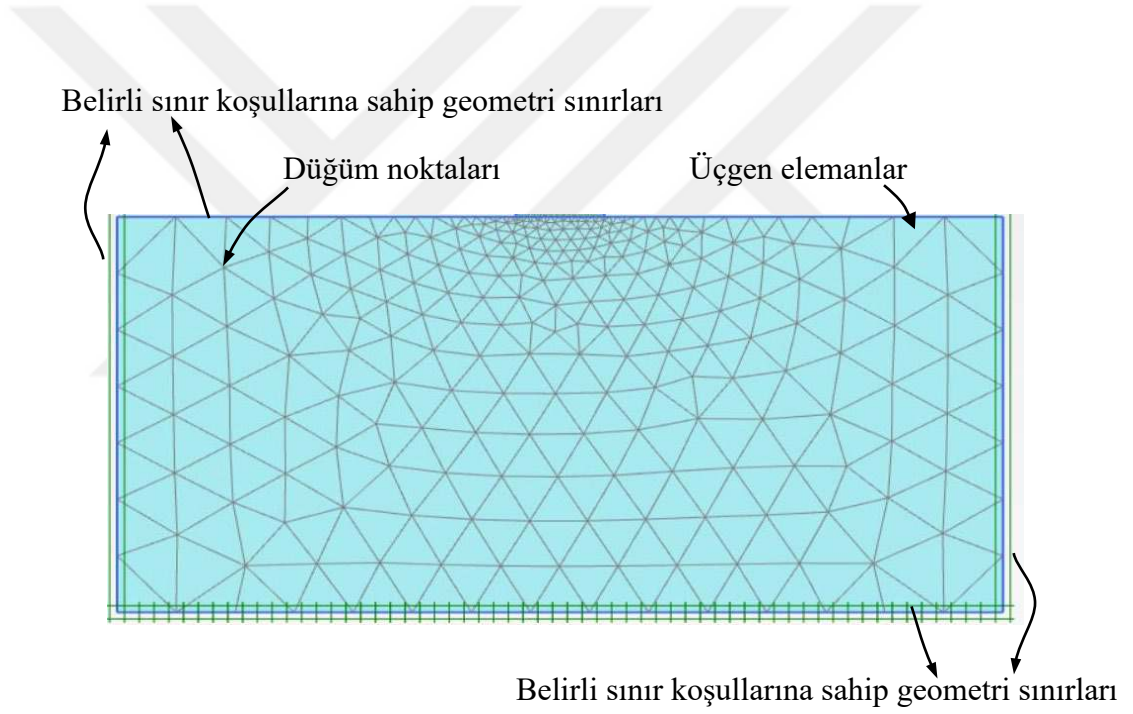
$$F = \frac{\sum (c' + \sigma' \tan \phi') l}{\sum Wsin\alpha} \quad (9)$$

$$F = \frac{c' L_a + \tan \phi' \sum N'}{\sum Wsin\alpha} \quad (10)$$

Denklem (10) ile verilen bağıntıda L_a , AC yayının uzunluğudur. Denklem (10) şev güvenliğini veren genel bağıntı olup N' kuvvetleri yukarıda bahsedilen kabullere bağlı olarak yaklaşık olarak belirlenir. Belirli bir kayma yayı için güvenlik faktörü F değeri yapılan kabullere bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir.

2.3.2. Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

Sonlu elemanlar metodu inşaat mühendisliği alanında yaklaşık yarım asırdır kullanılan bir hesap yöntemidir. Sonlu elemanlar metodunda Şekil 4 ile gösterildiği gibi sürekli bir ortam basit geometrik şekillere sahip sonlu sayıda küçük elemanlara ayrılır. Küçük geometrik şekillere sonlu eleman, birleşim noktalarına düğüm noktası, düğüm noktası ve sonlu elemanlardan oluşan sistemin tamamına ise sonlu elemanlar ağı denmektedir. Sonlu elemanlarda geometri sınırlarında belirli sınır koşulları mevcuttur. Bu sınır koşulları altında her bir sonlu eleman kuvvet ve deformasyon dengesine ulaşana kadar iteratif bir çözüm yapılır.



Şekil 4. Sürekli bir ortamın daha küçük üçgen şekilli sonlu elemanlardan oluşturulmuş modeli

Sonlu elemanlar metodunda (SEM) ortam sürekli ve homojen olarak modellenmektedir. SEM'in geoteknik sahasında şev stabilite tahkikleri, yer altı suyu akışı, oturma, taşıma gücü, dinamik yükleme gibi geniş bir uygulama alanı mevcuttur.

Sonlu elemanlar metodunda, eleman içindeki $\{\delta\}$ ve düğüm noktalarındaki $\{d\}_e$ yer değiştirmeler ile denklem (11)'de verildiği gibi ilişkili bir şekil fonksiyonu

[N] seçilir. Eleman içindeki gerileme $\{\sigma\}$ ve şekil değiştirmeler $\{\varepsilon\}$, gerilme [B] ve esneklik [D] matrisleri yardımı ile denklem (12) ve denklem (13) ile verilen bağıntılarla hesaplanır.

$$\{\delta\} = [N]\{d\}_e \quad (11)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\}_e \quad (12)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (13)$$

Minimum enerji prensibi yardımı ile her bir eleman için denklem (14) ile verilen ilişki yazılır. Denklemde yer alan $\{f\}$ elemanın dış yük vektörünü, $\{k\}$ elemanın rijitlik matrisini gösterir. Her bir eleman için yazılan denklem (14), matris formunda tüm sistem için denklem (15)'te verildiği gibi yazılır. $\{F\}$ Sistem yük vektörünü, $\{K\}$ Sistem rijitlik matrisini, $\{d\}$ sistem yer değiştirme vektörünü gösterir. Sınır koşulları altında denklem (15) iteratif bir şekilde, matris işlemleri yardımı ile istenilen hata mertebesinde çözülerek her bir eleman ve düğüm noktası için yer değiştirme ve kuvvetler hesaplanmış olur.

$$\{f\} = [k]\{d\}_e \quad (14)$$

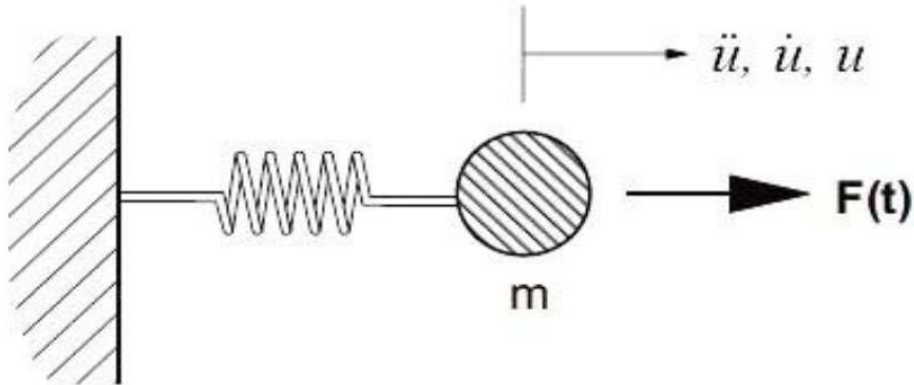
$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (15)$$

2.3.3. Sonlu Farklar Metodu (SFM)

Sonlu farklar metodu mühendislik uygulamalarında analizler için kullanılan önemli sayısal hesap yöntemlerinden biridir. Geoteknik mühendisliğinde çokça kullanılan yazılımlardan birisi olan FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Itasca Consulting tarafından geliştirilmiş Lagrangian analizi yapan bir sonlu farklar

yazılımıdır. Sonlu farklar metodunda, sonlu elemanlarda olduğu gibi belirli başlangıç ve sınır koşulları tanımlanarak çözüme ulaşılır. Sonlu farklar modelini kullanan Flac yazılımında zemin, yapı, sönüm malzemeleri gibi farklı malzeme modelleri birlikte tanımlanarak sayısal modeller oluşturularak statik veya zaman tanım alanında (dinamik) çözümler yapılabilmekte ve zeminlerin yenilme, akma, plastik davranışları hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.

FLAC kuvvet ve gerilmelerden hız ve yer değiştirmeleri hesaplamak için temel hareket denklemlerini kullanır. Hareket denklemlerinde bir kütlenin ivmesi etkiyen kuvvet ile ilişkilendirilir. Bir kuvvet etkiyen kütle için kuvvet, ivmesi, hız ilişkisi (Şekil 5) resmedilmektedir. Newton'un kuvvet – ivme ilişkisi denklem (16) ile verilmiştir. Kütle üzerine etkiyen kuvvetlerin toplamının sıfır olduğu durumda ivme sıfır olup statik denge durumuna karşılık gelir ve bu koşul ile Flac'te statik denge problemlerinin çözümü yapılır. Sürekli katı cisimler için genelleştirilmiş ilişki ise denklem (17) ile verilmiştir.



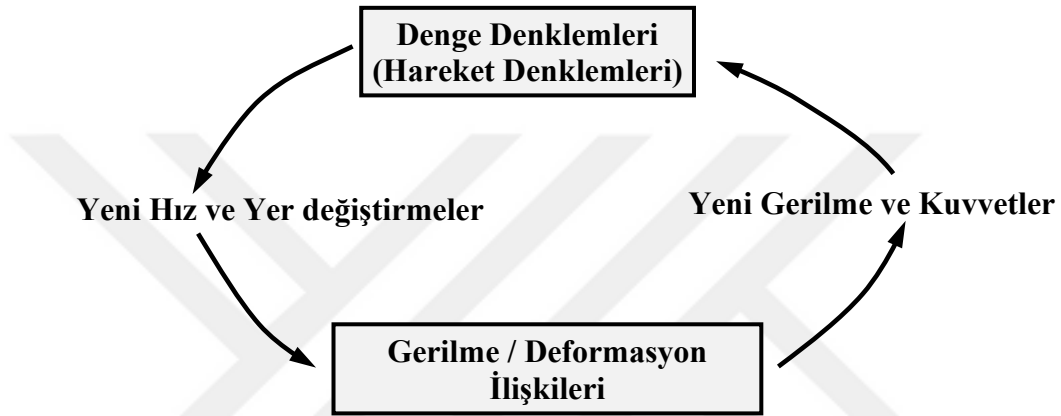
Şekil 5. Kuvvet etkiyen bir cisimdeki ivme, hız ve yer değiştirmeler [8].

$$F = m \frac{d\dot{u}}{dt} \quad (16)$$

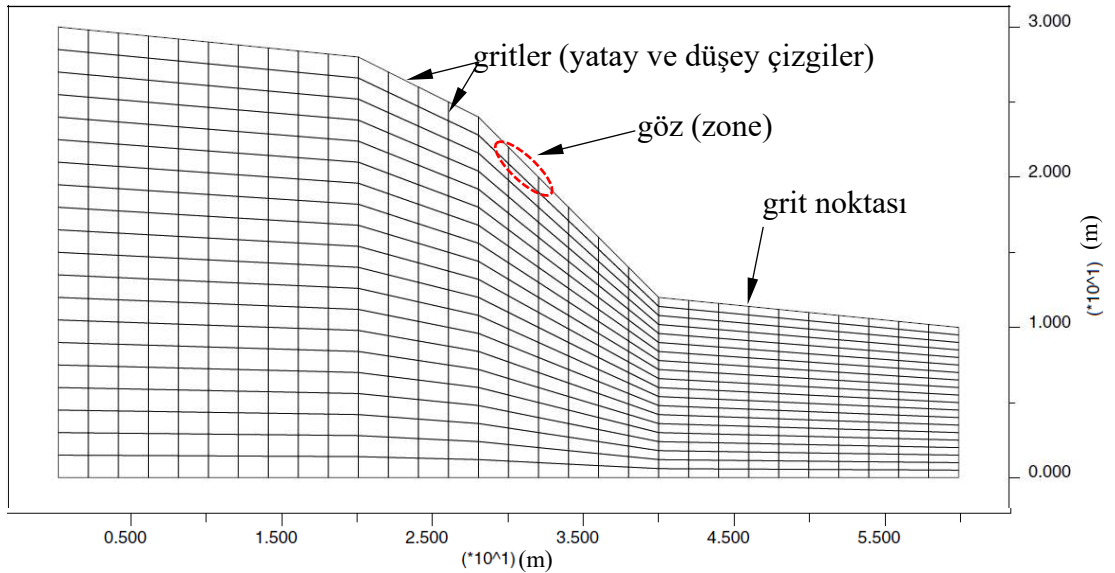
$$\rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (17)$$

F: Kuvvet, $\ddot{u}$: ivme, $\dot{u}$: hız, t: zaman, g_i : yerçekimi ivmesinin bileşeni,
 ρ : yoğunluk, x_j : koordinat vektörünün bileşeni, σ_{ij} : gerilme tensörünün bileşeni

Sonlu Farklar Metodunu kullanan Flac yazılımında ilk olarak hareket denklemleri oluşturularak mevcut kuvvet ve gerilmeler altında hız ve yer değiştirmeler hesaplanır, daha sonra hız ve yer değiştirmelerden türev işlemi ile yeni gerilme ve deformasyon oranları (stress ve strain) belirlenir (Şekil 6). Bu iterasyon istenilen doğrulukta çözüme ulaşınca kadar sürdürülür. FLAC sonlu farklar yazılımına ait göz (zon) ve gritlerden oluşan sonlu farklar sayısal modeline bir örnek Şekil 7 ile verilmiştir [8].



Şekil 6. FLAC sonlu farklar yazılımının temel hesaplama döngüsü [8].



Şekil 7. FLAC sonlu farklar yazılımına ait göz ve gritlerden oluşan sonlu farklar sayısal modeli [8].

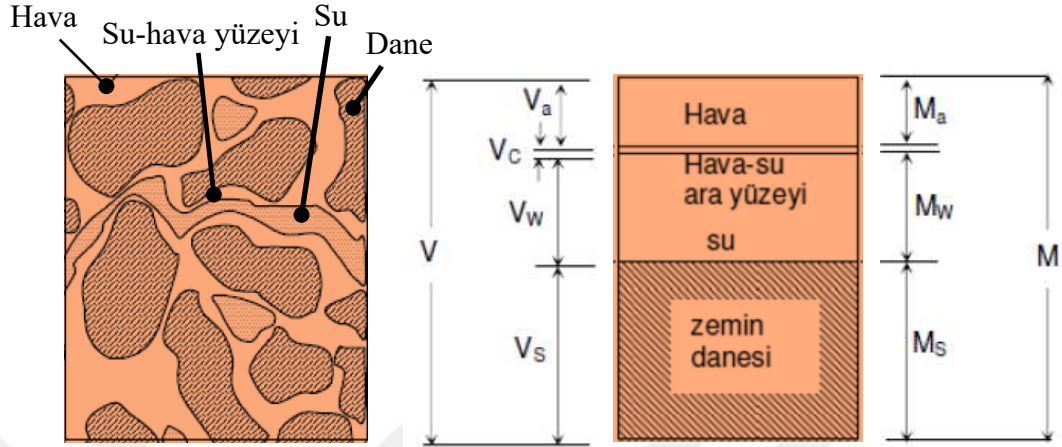
2.4.Doygun Olmayan Zeminler ve Mekanığı

Geoteknik mühendisliğinde zemin problemleri sıklıkla klasik zemin mekanığı teorileri ile diğer bir değiş ile doygun kabul edilerek ele alınmakta ve hesap yapılmaktadır. Şev stabilite analizleri de sıklıkla benzer şekilde efektif gerilmeler dikkate alınarak analiz yapılmaktadır. Gerçek durumda ise çoğu zaman tamamen doygun olmayan zeminlerle ve efektif koşulların geçerliği olmadığı yarı doygun zeminlerle karşılaşmaktadır. Tam doygun olmayan zeminlerde diğer mühendislik parametrelerinin yanında emme basıncı, geçirimsizlik, zemin karakteristik su eğrisi gibi zemin özellikleri de davranış üzerinde önemli etkiye sahip olabilmektedir.

Klasik zemin mekanığında zeminlerin gaz, sıvı ve katı olmak üzere üç fazdan oluştuğu kabul edilmektedir. Fredlund ve Rahardjo (1993)'e göre [11] zemin dört fazdan oluşmaktadır (Şekil 8). Dördüncü faz olarak su ile hava arasında oluşan ara yüzeyi tarif etmektedirler. Zeminlerin kütle-hacim ilişkisi ile tarif edildiğinde su-hava arayüzeyi diğer büyüklüklerin yanında çok küçük olduğundan ihmal edilir ve su fazının bir parçası olarak değerlendirilir. Zeminler %97.5~%98 seviyesinden daha yüksek doygunluklarda gaz molekülleri süreklilik arz etmemekte birbirlerinden ayrı kabarcıklar halinde konumlanmaktadır. Doygunluk seviyeleri %97.5~%98 daha yüksek yüksek olan zeminler tam doygun olarak kabul edilirler. Doygunluk seviyesi %95'in altında olan zeminlerde ise gaz molekülleri birbirleri ile temas ederek süreklilik arz ederler. Doygunlukları %95 seviyesinin altında olan zeminler doygun olmayan (yarı doygun) zemin olarak adlandırılırlar. %95~%98 doygunluk seviyesi aralığındaki zeminler dane boyutu, mineralojik yapıları gibi özelliklere bağlı olarak duygun veya doygun olmayan zemin davranışı gösterebilmektedirler.

Doğada genellikle yeraltı su seviyesinin altında zeminler doygun vaziyette bulunurken yer altı su seviyesinin üzerinde kalan zeminler doygun olmayan (yarı doygun) vaziyette bulunurlar (Şekil 9). Yer altı su seviyesinin altında doygun bölgede boşluk suyu basıncı pozitif değerde iken yer altı su seviyesinin üzerinde yer alan bölgede ise boşluk suyu basıncı negatif değerdedir. Yer altı su seviyesinin üzerinde yer alan ve negatif boşluk suyu basıncına sahip bölge vadoz bölge olarak adlandırılır. Yer altı su seviyesinin üzerindeki bölge ise doygun olmayan zemin mekanığı

araştırmacıları tarafından Şekil 9’de gösterildiği gibi üç alt bölge olarak ele alınmaktadır [12].



Şekil 8. Doygun olmayan (yarı doymuş) zemini oluşturan fazlar [11].

Kuru Zemin		Doygunluk < %20
Sürekli olmayan su fazı mevcuttur.	Boşlukların çoğu havayla doludur.	Hava fazı sürekli, Su fazı ayrık
İki Akışkanlı Faz		Doygunluk %20~%90
Sürekli su fazı mevcuttur.	Sürekli hava fazı mevcuttur.	Hava fazı ayrık, Su fazı ayrık
Kapiler Bölge		1 m~10 m,
YASS Boşlukların çoğu suyla doludur.	Sürekli olmayan hava fazı mevcuttur.	Doygunluk %100’ yakın,
Doygun Zemin		Hava fazı ayrık, su fazı sürekli
Boşlukların tamamı suyla doludur.		Hava çözülmüş durumdadır.

Şekil 9. Doygun ve doymuş olmayan zemin bölgeleri [12].

Zeminlerde Emme Gerilmesi ve Matrik Emme

Zeminlerin emme gerilmesi hakkındaki teorik çalışmalar 1900’lü yılların başlarından beri bir asırdan fazladır yapılmaktadır. Zemin suyunun serbest enerji durumu zemin emme gerilmesi olarak tanımlanır. Zemin emme gerilmesi olarak tanımlanan bu enerjinin Ridley (1993) [13] tarafından buharlaşma yolu ile bir su molekülünün zemin matrisinden çıkarmak için gerekli enerjinin ölçümü olarak tarif edilmiştir. Zemin emme gerilmesi ile zemin kısmi buhar basıncı arasındaki ilişki

termodinamik yasaları kullanılarak Kelvin denklemi olarak bilinen ve aşağıda verilen denklem (18) ile hesaplanabilir (Sposito 1981) [14].

$$\psi = -\frac{RT}{v_{wo}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{vo}}\right) \quad (18)$$

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

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

T: Mutlak sıcaklık (273.16+t° K)

v_{wo} : 1/Suyun özgül hacmi (m³/kg), (1/ ρ_w)

ρ_w : Suyun özgül ağırlığı (t=20°C'de ρ_w =1.0316g/ml, t°=4°C'de ρ_w =9810Nm³)

ω_v : Su buharının moleküler kütlesi (18.0105 gr/mol)

$\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{vo}}$: Rölatif nem.

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

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

Verilen denklem (18) R, T, v_{wo} , w_v sabitleri 20 °C için değerleri dikkate alındığında toplam emme aşağıdaki denklem (19) ile verilen eşitliğe dönüşür.

$$\psi = -135022 \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{vo}}\right) \quad (19)$$

Zemin emme gerilmesi (toplam emme) aşağıdaki denklem (20)'de verildiği gibi matrik emme ve osmatik emme olarak iki bileşenden oluşmaktadır.

$$\psi = \psi_m + \psi_\pi \quad (20)$$

ψ_m : Matrik emme (kPa), ψ_π : Osmatik emme (kPa)

Matrik emme ise aşağıdaki denklem (21)'de olduğu gibi boşluk hava basıncı ($u_a=P_a$) ile boşluk suyu basıncı ($u_w=P_w$) arasındaki fark olarak tanımlanır.

$$\psi_m = u_a - u_w \quad , \quad P_c = P_a - P_w \quad , \quad \psi_m = P_c \quad (21)$$

Matrik emme kapiler sudaki değişimlere bağlı olduğundan yer altı suyu seviyesinin değişimi gibi çevresel etkenlere bağlı olduğundan bir zemin için matrik emme değişkenlik arz edebilmektedir. Osmatik emme basınç ise saf su ile eriyik tuzların içinde yer aldığı boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanır ve suda çözünmüş olan tuzların konsantrasyonuna (C) bağlı olarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir (bağıntıdaki n Avagadro sayısıdır).

Zemin – Su Karakteristik Eğrisi

Zeminin su muhtevası (içeriği) ile emme basıncı arasındaki ilişki zemin – su karakteristik eğrisi (SWCC – Soil Water Characteristic Curve) olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin kayma mukavemeti, oturma, şişme gibi davranışlarında net normal gerilmeler etkili olmaktadır. Zeminlerin net normal gerilmeleri ise yukarıdaki bağıntılarda verildiği gibi matrik emmenin bir fonksiyonu olarak tarif edilmiştir. Dolayısı ile doygun olmayan zeminlerin kayma mukavemeti, oturma, şişme gibi davranışlarının hesap ve tahmininde Zemin – Su karakteristik eğrisi (SWCC) önemli bir rol oynamaktadır. Bir zemin için zemin – su karakteristik eğrisi kuruma ya da ıslanma eğilimde iken farklı matrik emme izine sahiptir (Şekil 10). Zemin su karakteristik eğrisinde Şekil 11'de gösterildiği gibi kapiler doygunluk bölgesi, geçiş bölgesi ve rezidüel doygunluk bölgesi olmak üzere üç temel bölge mevcuttur. Ayrıca eğrinin bölgelere ayrılmasını sağlayan *hava giriş değeri* ve *rezidüel doygunluk derecesi* olarak adlandırılan iki önemli karakteristik parametresi mevcuttur. Zemin – su karakteristik eğrisi deneysel yöntemlerle elde edilebilmektedir.

Zemin – su karakteristik eğrisi (SWCC) için farklı araştırmacılar farklı denklemler önermişlerdir. Bu çalışmada zemin – su karakteristik eğrisi (SWCC) için literatürde en geniş kabul görmüş önerilen bağıntılardan biri ve bu çalışmada kullanılan sonlu farklar analizlerinin temelini oluşturan Van Genuchten (1980) [16] tarafından önerilen ilişki aşağıda denklem (22) ve (23)'da takdim edilmiştir. Denklemden hidrolik yükseklik (h) fiziksel olarak emme basıncına karşılık gelmekte ve emme basıncı negatif bir basıncı tarif etmesine karşın denklem (22) için mutlak değer olarak dikkate alınır. Denklem (22) zeminin emme basıncına göre düzenlendiğinde belirli bir normalize hacimsel su içeriği için

zeminin emme basıncı denklem (23) ile verildiği gibi elde edilir. Boyutsuz hacimsel su içeriği ve normalize boyutsuz hacimsel su içeriği, sırasıyla denklem (24) ve (25) ile verilmiştir. Brooks ve Corey (1964) [20] zeminin emme basıncı – su içeriği ilişkisini (SWCC) geleneksel zemin mekaniğinde daha alışık olunan zemin doygunluk dereceleri ile belirlenen ve denklem (26) ile verilen efektif doygunluk derecesi ile kurmuştur. Brooks ve Corey (1964) [20] tarafından denklem (26)'da önerilen efektif doygunluk derecesi (S_e) ile Van Genuchten (1980) [16] tarafından denklem (25)'de önerilen normalize hacimsel su içeriği (Θ) parametreleri aynı değere karşılık gelmektedir ($S_e = \Theta$). SWCC eğrisinin orta noktasındaki hacimsel su içeriği ve zemin emme basınçları sırasıyla θ_p , h_p olarak adlandırılır ve denklem (27) ve (28) ile verildiği gibi tarif edilirler [16].

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi_m)^n} \right]^m, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (22)$$

$$h = \psi_m = \frac{1}{\alpha} [\Theta^{-1/m} - 1]^{1-m} = \frac{1}{\alpha} [S_e^{-1/m} - 1]^{1-m}, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (23)$$

$$\Theta_d = \frac{\theta}{\theta_s} = \frac{V_w/V_t}{V_t/V_t} = \frac{V_w}{V_t} = S \quad (24)$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (25)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1.0 - S_r} \quad (26)$$

$$\theta_p = (\theta_s + \theta_r)/2 \quad (27)$$

$$h_p = \frac{1}{\alpha} (2^{1/m} - 1)^{1-m}, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (28)$$

Θ : Normalize boyutsuz hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3)

α, n, m : Eğri uydurma katsayıları (α : $1/\text{kPa}$, $1/\alpha = P_0$: kPa , n ve m : boyutsuz)

θ : Hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3), θ_r : Rezidüel hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3),

θ_s : Doygun zemin hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3)

$h = \psi_m$: Zemin matrik emme basıncı (kPa), ($P_c = h = \psi$)

Θ_d : Boyutsuz hacimsel su içeriği

S_w : Su (sıvı faz) için doygunluk derecesi, S_a : Hava (gaz fazı) için doygunluk derecesi

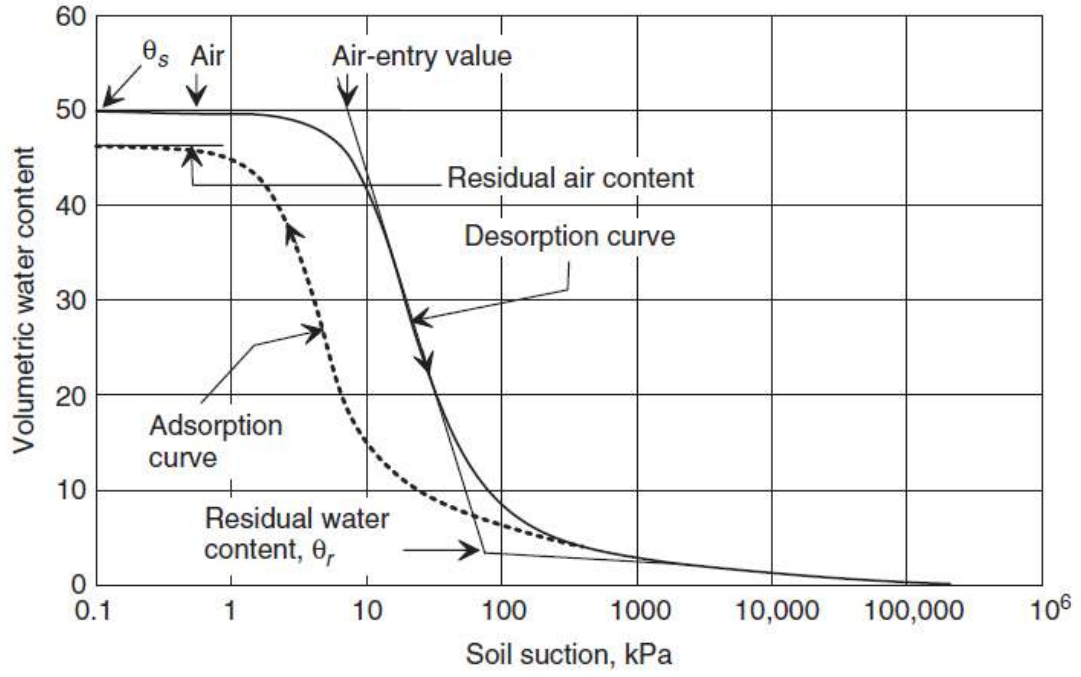
V_w : Zemin örneğindeki su hacmi (cm^3), V_v : Zemin örneğindeki boşluk hacmi (cm^3),

V_t : Zemin örneğinin toplam hacmi (cm^3)

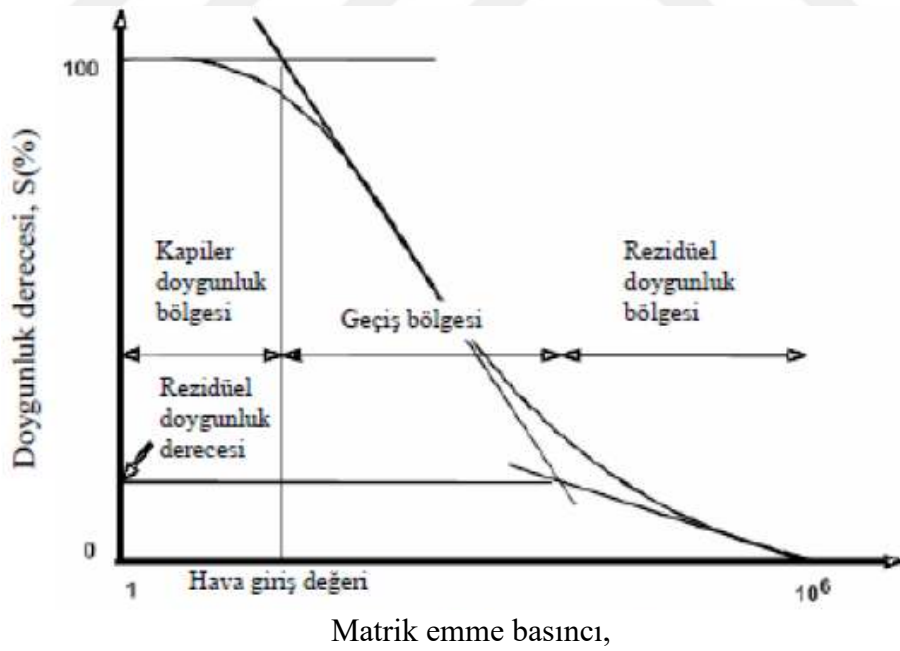
$1.0 = S_s$: Doygun zemin için doygunluk derecesi, S_r : Rezidüel doygunluk derecesi,

S_e : Efektif doygunluk derecesi

θ_p, h_p : sırasıyla SWCC eğrisinin orta noktasındaki hacimsel su içeriği (cm^3/cm^3), ve zemin matrik emme basıncı (kPa)



Şekil 10. Islanma ve kuruma için örnek bir zemin–su karakteristik eğrisi (SWCC) [17].



Şekil 11. Zemin – su karakteristik eğrisinin (SWCC) bölgeleri (kuruma için) [15].

Yarı Doygun Zeminlerde Hidrolik İletkenlik

Zeminlerin iletkenlikleri (k) (permeabiliteleri) zemindeki birçok faktör (dane çapı, başlık hacmi, boşlukların birbirleri ile bağlantılılığı, mineralojik yapı, elektriksel çekim kuvvetler vb.) tarafından kontrol edilmektedir. Bu faktörlerden birisi de zeminin doygunluk derecesidir. Yarı doymuş zeminlerin iletkenliklerinin, doymuş haldeki zeminlerin iletkenliğine oranı rölatif iletkenlik (k_r) olarak adlandırılır. Mualem (1976) tarafından aşağıda denklem (29) ile verilen ilişki rölatif iletkenliği tahmin etmek için önerilmiştir [21].

$$k_r = \Theta^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (29)$$

h : hidrolik yükseklik (matrik emme basıncı)

Denklem (29)'nin çözümü Van Genuchten (1980)'de [16] detaylı olarak verilmiş olup zeminin matrik emme basıncının fonksiyonu olarak aşağıda denklem (30) ile verildiği gibi elde edilmektedir. Denklem (30)'te yer alan hidrolik yükseklik (h) yukarıda da belirtildiği gibi fiziksel olarak emme basıncına karşılık gelmekte ve emme basıncı negatif bir basıncı tarif etmesine karşın denklemde mutlak değer olarak dikkate alınır. Yukarıda ve aşağıda verilen notasyonlarda h ile ψ parametreleri eşit olup zemin toplam emme basıncını tarif etmektedir. Van Genuchten (1980) [16] rölatif iletkenliği (k_r) normalize boyutsuz hacimsel su içeriğinin (Θ) fonksiyonu olarak denklem (31)'de verildiği gibi ifade etmiştir. Sıvı faz için Denklem (32) 'te gösterildiği gibi rölatif iletkenlik (k_r), belirli bir su içeriğindeki zeminin sıvı (su) fazı için geçirgenlik (permeabilite) katsayısını (k_w), doymuş zemin için sıvı (su) fazı için geçirgenlik (permeabilite) katsayısına (k_s) oranı olarak tarif edilmektedir. Normalize boyutsuz hacimsel su içeriğinin (Θ), efektif doymuşluk derecesi (S_e) ile aynı değer olduğu yukarıda belirtilmişti. Rölatif iletkenlik (k_r) benzer şekilde efektif doymuşluk derecesinin (S_e) bir fonksiyonu olarak denklem (33)'da gösterildiği gibi

yazılabilmektedir. Van Genuchten (1980) – Mualem (1976) modelinde gaz fazının (hava) zemin içindeki iletkenliğinin doygunluk derecesine bağlı ilişkileri ise (34) ve (35) denklemleri ile verilmiştir [16, 21].

$$k_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 - (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}}, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n}\right), \left(m = 1 - \frac{1}{n}\right) \quad (30)$$

$$k_r(\Theta) = \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/2})^m]^2, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n}\right), (0 < m < 1) \quad (31)$$

$$k_r^w = \frac{K_w x 100}{K_s}, \quad k_w = k_s \left\{ \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/2})^m]^2 \right\}, (0 < m < 1) \quad (32)$$

$$k_r^w = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/2})^m]^2, \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n}\right), (0 < m < 1) \quad (33)$$

$$k_r^g = \frac{K_a x 100}{K_d}, \quad k_a = k_d (1 - S_e)^{1/2} (1 - S_e^{1/q})^{2q} \quad (34)$$

$$k_r^g = (1 - S_e)^{1/2} (1 - S_e^{1/q})^{2q} \quad (35)$$

k_w : Sıvı (su) fazı için geçirgenlik katsayısı (permeabilite)

k_s : Doymun zemin için su geçirgenlik katsayısı (permeabilite)

k_r^w : Sıvı (su) fazı için bağıl (rölatif – göreceli) iletkenlik (permeabilite)

n, m : Eğri uydurma katsayıları

k_a : Hava geçirgenlik katsayısı

k_d : Kuru zemin için hava geçirgenlik katsayısı

k_r^g : Gaz (hava) fazı için rölatif iletkenlik (permeabilite)

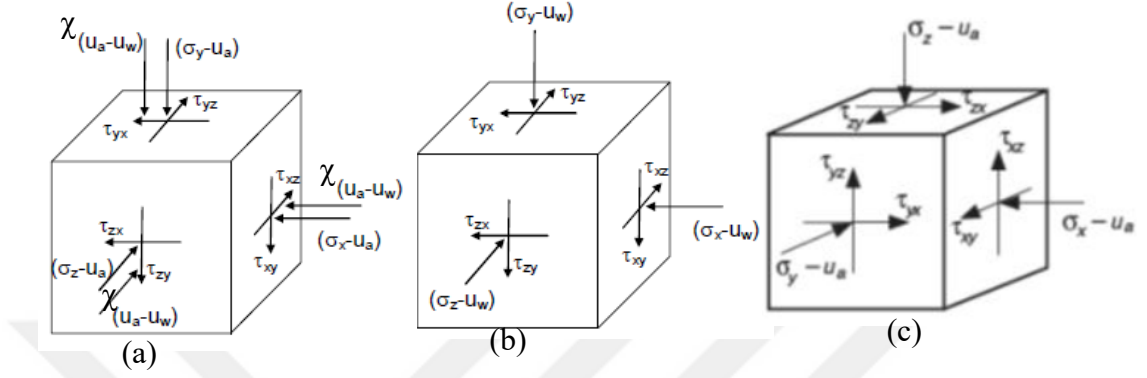
q : Eğri uydurma katsayısı

Doygun ve Doymun Olmayan Zeminlerde Gerilme Durumu

Zeminler tamamen doymun olduğu durumda efektif gerilme (σ'), toplam gerilme (σ) ile boşluk suyu basıncı (u_w) arasındaki fark olmakta. Tamamen kuru olduğunda ise net normal gerilme toplam gerilme (σ) ile boşluk hava basıncı (u_a) arasındaki fark olmaktadır. Doymun olmayan zeminlerde ise efektif gerilme Bishop [4] tarafından net normal gerilmeye ve matrik emme değerlerine bağlı olarak aşağıda denklem (36) ve (37)'de verildiği gibi hesaplanması önerilmiştir. Denklemdaki efektif gerilme katsayısı zemin doymun olduğunda 1 olmakta ve efektif gerilme Terzaghi efektif gerilmesine eşit olmaktadır. Kübik zemin elemana etkiyen gerilmeler Şekil 12 ile verilmiştir.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (36)$$

$$(\chi=1) \text{ için } \sigma' = (\sigma - u_w), \quad \chi: \text{Etketif gerilme katsayısı} \quad (37)$$



Şekil 12. Kübik zemin elemanına etkiyen gerilmeler a) doymun olmayan, b) doymun, c) kuru [11].

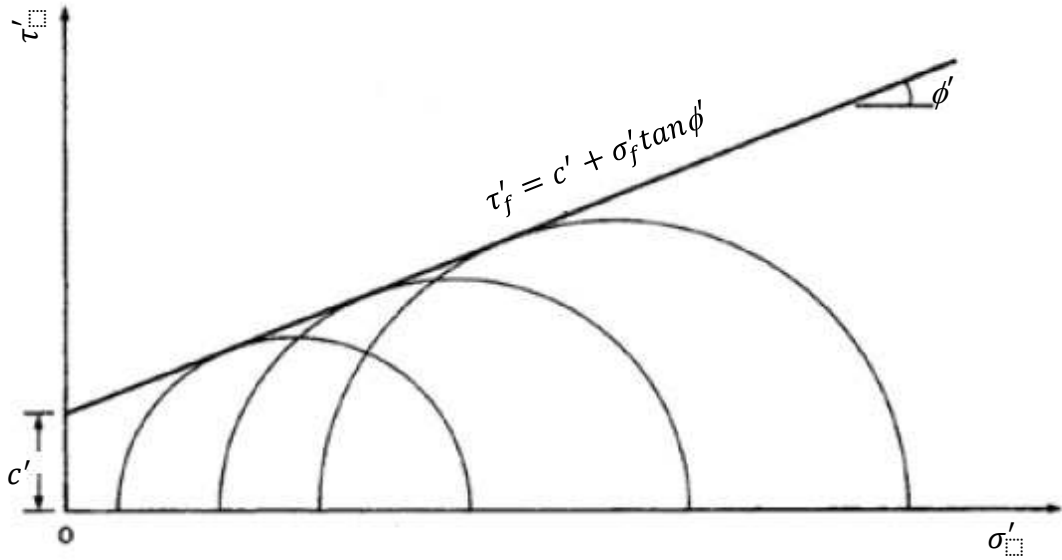
Kartezyen kordinat sistemine göre net normal gerilme tensörü ile matrik emme tensörü aşağıda denklem (38) ile verildiği gibidir.

$$\begin{array}{cc} \text{normal gerilme tensörü} & \text{matrik emme tensörü} \\ \left[\begin{array}{ccc} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{array} \right] & \left[\begin{array}{ccc} \chi(u_a - u_w) & 0 & 0 \\ 0 & \chi(u_a - u_w) & 0 \\ 0 & 0 & \chi(u_a - u_w) \end{array} \right] \end{array} \quad (38)$$

Zeminlerin Kayma Dayanımı

Doymun zeminlerin kayma dayanımı aşağıda Şekil 13'de gösterildiği gibi kayma gerçekleşmiş Mohr dairelerinin zarfı kayma dayanım doğrusu olarak tanımlanır. Kayma dayanım doğrusunun denklemi denklem (39)'da verilmiştir. Kayma dayanımının temel parametresi ve denklemin değişkeni olan efektif gerilme ise denklem (40) ile verilmiştir. Esasen kayma gerçekleşen Mohr dairelerinin zarfı doğru

olmamakla birlikte, bilhassa çok yüksek olmayan gerilmeler için yapılan hesap ve analizlerde kayma dayanım zarfını doğru olarak kabul etmek mühendislik pratiği açısından yeterli doğruluğu sağladığından kayma zarfı nispeten düşük gerilme seviyeleri için doğrusal kabul edilmektedir.



Şekil 13. Doygun zeminler için Mohr – Coulomb kayma kriteri – Efektif durum için [18].

$$\tau'_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (39)$$

$$\sigma'_f = \sigma_f - u_w \quad (40)$$

τ'_f : Efektif kayma dayanımı (Kayma düzlemindeki efektif kayma gerilmesi)

σ'_f : Kayma düzlemindeki efektif normal gerilme,

σ_f : Kayma düzlemindeki toplam normal gerilme

ϕ' : Efektif içsel sürtünme açısı, c' : Efektif zemin kohezyonu

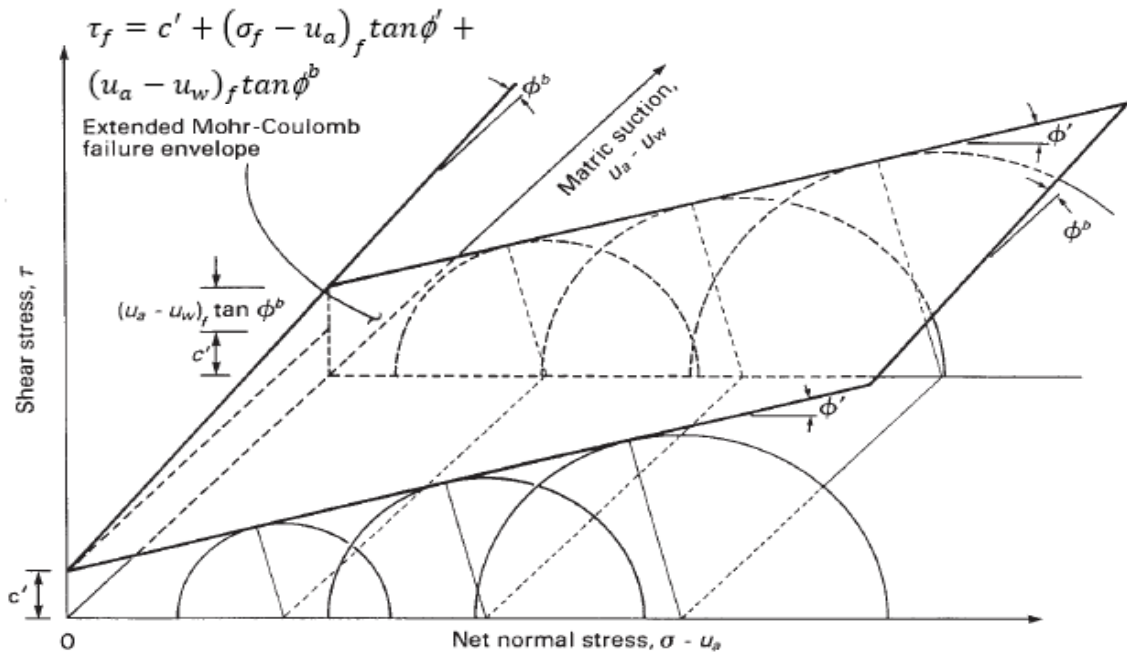
u_w : Boşluk suyu basıncı

Doygun zeminlerin kayma dayanımı yukarıda verilen (39) ve (40) denklemlerinde görüldüğü gibi dayanım parametreleri (ϕ' , c') denklem sabitlerdir. Doygun zeminler için dayanım denklemindeki değişken yukarıda da belirtildiği gibi sadece efektif gerilmedir. Literatürde kabul görmüş olan Fredlund (1978) tarafından

önerilen ve aşağıda denklem (41) verilen ilişki doygun olmayan zeminlerin dayanımı için sıkça başvurulan bir ilişkidir [18]. Doygun olmayan zeminler için genişletilmiş kayma dayanım zarfları Şekil 14 ile verilmiştir [11]. Doygun olmayan zeminler için farklı araştırmacılar tarafından kayma dayanım denklemleri önerilmiş olup Tablo 1 ile verilmiştir. Verilen denklemler incelendiğinde efektif gerilmeye ilaveten matrik emmenin de denklemlere önemli bir değişken olarak girdiği görülmektedir.

$$\tau_f = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (41)$$

- τ_f : Yenilme anında kayma düzlemindeki kayma gerilmesi
 c' : Mohr-Coulumb dayanım zarfının düşey eksenini kestiği değer
 $(\sigma_f - u_a)_f$: Yenilme anında kayma düzlemindeki net normal gerilmeyi
 $(u_a)_f$: Yenilme anında kayma düzlemindeki boşluk suyu basıncını
 ϕ^b : Matrik emme ile ilişkili olarak kayma direncindeki artış oranını
 $(u_a - u_w)_f$: Yenilme anında kayma düzlemindeki matrik emme
 ϕ' : Net normal gerilme durumundaki içsel sürtünme açısını
 $(\sigma_f - u_a)_f$: Yenilme anındaki kayma düzlemindeki net normal gerilme



Şekil 14. Doygun olmayan zeminlerde kayma dayanımı [19].

Tablo 1. Doygun olmayan zeminler için önerilen kayma dayanım ilişkileri

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

2.5.Yarı Doygun Zeminlerde Kayma Dayanımı

Şev yenilmeleri birçok nedene bağlı olarak meydana gelebilir, ancak bu çalışmanın özellikle ilgilendiği konulardan biri su sızmasıyla tetiklenen şev yenilmeleridir. Eğimler doğal olarak doymun olmayan topraklardır; ancak geleneksel zemin mekaniği prensipleri doymun koşullara ilişkin şev stabilitesi analizlerini ele almaktadır. Şevler doymun olmadıklarında çok dik açılarda bile stabil kalabilmekte, yağış, kar erimesi veya herhangi bir sızıntı nedeniyle oluşan bir sızmaya maruz kaldıklarında aynı şev doymunluk derecesinin artmasıyla stabilitesini aniden kaybedip azalmaya neden olabilmektedir. Kılcal kuvvetlerde. Literatürde sızıntıdan kaynaklanan göçmelere ilişkin pek çok örnek (Oh ve Lu, 2015; Batali ve Andreea, 2016; Xian vd., 2022) olduğu gibi erken uyarı sistemleri gibi olayı gerçekleşmeden önce tahmin etmeye yönelik birçok çalışma da bulunmaktadır (Intrieri vd., 2012). Diğerleri, 2012; Ayrıca şev kaymalarına neden olan sızma davranışının anlaşılmasını amaçlayan bu tür modelleme çalışmaları da mevcuttur (Vanapalli vd., 1996; Zhang vd., 2014; Tang vd., 2018). Aslında belirli bir şevin duraylılığını araştırmak için laboratuvar verilerini kullanmak en uygun yoldur, pratik amaçlar için pek yaygın değildir. Teorik çalışmaların bir kısmı hayali toprak özelliklerini kullanırken, bir kısmı gerçek laboratuvar verilerini ya da doymun olmayan toprak hidrolik veri tabanından alınan verileri kullanmıştır (UNSODA, 2022). Şev stabilitesini ve göçme mekanizmasını etkileyen ana karakteristik özellikler, matris emme ve hidrolik iletkenlik (HC) olarak bilinir. Doymun olmayan zemin mekaniği ile ilgili olarak, matris emme, mukavemeti arttırmak için önemli bir parametredir ve doymun olmayan zemin mukavemet ilişkileri Fredlund ve diğerleri tarafından önerilmektedir. (1978) tarafından Denklem 1 ve 2'de değiştirilmiş bir denklem olarak verilmiş olup, ayrıca ilişkinin hem doymun hem de doymun olmayan zeminler için grafiksel formları da Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

Emmeden kaynaklanan sürtünme açısı ϕ^b , Denklem 1 ve Şekil 2'de gösterildiği gibi sabit kabul edilmekte ve literatürde genellikle matris emmeye bağlı kayma dayanımındaki ortalama artış olarak adlandırılan bir sabit olarak kullanılmaktadır. Bildirilen birçok çalışmanın sonuçları (Gan ve Fredlund, 1995; Bai ve Lui, 2012; Chowdhury ve Azam, 2016) Gan ve Fredlund'a (1995) göre ϕ^b 'nin ϕ 'den küçük olduğu

bulunmuştur (1995) ϕ^b yaklaşımları Artan doygunluk ile ϕ' ve son olarak toprak tam doygunluğa yaklaştığında eşitlenir.

Doygun olmayan zeminlerle çalışırken mukavemet özelliklerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için emme değerlerinin ölçülmesi çok önemlidir. Kesme mukavemeti ölçümleri, doğrudan ve halka kesme testleri ve üç eksenli testler gibi test aparatlarının değiştirilmiş formları ile yapılabilir. Değişiklik genellikle kontrollü bir emme ölçüm sistemini içerir; ancak modifikasyonlar çoğunlukla pahalı ve zaman alıcı olduğundan, emme özellikleri ve kesme mukavemetinin ayrı ölçümleri hâlâ geçerli olarak kabul edilmektedir. Oh ve Vanapalli (2010), doymamış kayma mukavemeti parametrelerini ölçmek için değiştirilmiş bir üç eksenli aparat kullanmış ve yağış koşulları altında buzul zemininin güvenlik faktörünü araştırmıştır. Eksen öteleme yönteminin uygulandığı bu çalışmada sabit bir ϕ^b bildirilmiş, ancak matris emmeye ilişkin kesme mukavemetindeki değişim ilişkisi doğrusal olmayan bir formda verilmiştir. Bai ve Liu (2012) geleneksel doğrudan kesme testleri gerçekleştirmiş ve ardından kesme mukavemeti sonuçlarını, filtre kağıdı testlerinden elde edilen bulguların emme özellikleriyle birleştirmiştir. Çalışmanın bulguları ϕ^b ile matris emme arasındaki ilişkiyi gösterdi; sonuçlar, matris emmenin artmasıyla ϕ^b 'nin azaldığını ve emme olmadığında ϕ' ye eşit olacak şekilde çok daha küçük değerlere ulaştığını göstermiştir. Emme ve kayma mukavemeti testlerini birleştirmek için, belirli bir hacimsel su içeriği veya doyma derecesi için istenen emme değerini bulmak amacıyla hacimsel su içerikleri veya doyma dereceleri için ölçülen emme değerlerine karşılık gelen zemin su tutma eğrisi (soil water retention curve) (SWRC) oluşturulur (Fattah ve diğerleri, 2017). Daha sonra bu emme değeri Denklem 1 kullanılarak dayanım parametreleriyle ilişkilendirilir. Bu nedenle, doygun olmayan bir zemin için stabilite problemini uygun şekilde incelemek için uygun bir laboratuvar çalışması, temel başlangıç durumudur. Bu çalışmanın amacı, Manisa'da kayma gerçekleşmiş bir şevden alınan ve su sızmasıyla tetiklenen bir zeminin hidromekanik özelliklerinin araştırılması ve ortaya çıkarılmasını kapsamaktadır. Bu bağlamda indeks özellikleri, elek analizi, Atterberg limitleri, Hidrolik iletkenlik (HC) testi ve doğrudan kesme testleri (kuru ve ıslatılmış) yapılmıştır. Ayrıca matris emme ölçümleri yapılmış ve SWRC de eğrileri elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Yarı doymun zeminlerde şev stabilitesini doğru bir şekilde değerlendirebilmek için zemin su içeriği, matrik emme ve içsel sürtünme açısı gibi parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Yarı doymunluk durumu, zemin stabilitesi için olumlu bir faktör olarak görülür [22]. Yer altı suyu yükselmesi, yağışlar neticesinde yağmur sularının infiltrasyonu veya insan faaliyetleri neticesinde zeminlerin su içeriğinin artması şevlerin mevcut güvenlik durumları azalmaktadır. Bu nedenle, bilhassa şev stabiliteleri doymunluk değişimine duyarlı olan zeminlerde stabilite analizlerinde yarı doymun zemin koşulları ve doymunluk değişimleri detaylı olarak incelenmeli ve analiz edilmelidir.

Bu çalışmada yağışlar neticesinde zeminlerin doymunluk seviyesindeki değişime bağlı olarak gerçekleşen şev kayma vakasına yağışların etkisi incelenmiştir. Hesap ve analizlerde şev kaymalarının gerçekleştiği sahadaki zemin özellikleri dikkate alınmış olup, böylelikle söz konusu saha ve yakın civarı için yağışlara bağlı şev kaymalarının potansiyel riskleri de irdelenmiştir. şev kaymalarının gerçekleştiği bölge aşağıda şekil 15 ile gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında zemin özellikleri belirlenen ve analizleri yapılan zeminlerin sahada yapılan inceleme ve tespitlerimiz neticesinde Manisa Salihli ilçesinde bilhassa Organize Sanayi yerleşkesinde ve civarında oldukça geniş bir alanda yayılım gösterdiği tespit edilmiştir. Ele alınan vakalar için sayısal hesap ve analizler Itasca Flac yazılımının Manisa Celal Bayar niversitesi'nin lisanslı versiyonu ile yapılmıştır.



şekil 15. Doymunluğa bağlı şev kaymalarının gözlemlendiği saha [23].

3.1. Materyal

İnceleme Sahasında farklı lokasyonlarda şevli zeminlerin su içeriğindeki değişim neticesinde kayma ve göçmeler meydana geldiği rapor edilmiştir [cc]. Saha incelemeleri ve laboratuvar araştırmalarını içeren aşağıda verilen çalışmalardan yararlanılmıştır.

- i. 2018 yılında tamamlanan olan geoteknik açıdan araştırma, inceleme, analiz ve değerlendirme raporu [24]
- ii. 2024 yılında tamamlanan Evrak Tarih ve Sayısı 07.10.2024-E.871351 olan geoteknik açıdan araştırma, inceleme, analiz ve değerlendirme raporu [25]
- iii. Bu çalışma kapsamında yürütülmüş olan laboratuvar çalışmalarından

Zeminlerdeki su içeriği değişimi neticesinde şevlerde kayma meydana gelen bölge Manisa ili, Salihli ilçesinde yer almaktadır. Meydana gelen kaymaların konumu aşağıda Şekil 16 ile verilmiştir. İncelenen sahada zemin doygunluğunun değişmesi neticesinde şev göçmeleri gözlenmiş ve rapor edilmiştir [25]. İnceleme sahası içinde zemin doygunluğunun değişmesi neticesinde şev göçmesi yaşanan iki örnek vaka Şekil 17 ile verilmiştir. Birinci vaka zeminin su içeriğindeki değişimi neticesinde 2018 yılında gerçekleşmiş bir şev göçme vakasıdır. Göçme oluşan şevin 2018 yılından daha önceki yıllarda iki endüstriyel işletmenin parsel sınırı boyunca oluşturulduğu rapor edilmiştir. İkinci vakada yine inceleme sahası içinde olup birinci vakaya yaklaşık 300 m~ 350 m mesafededir. İkinci şev göçmesi 2024 yılında meydana gelmiş olup, ilk vakaya benzer biçimde göçmenin gerçekleştiği şevin 2024 yılından daha önceki yıllarda iki endüstriyel işletmenin parsel sınırı boyunca oluşturulduğu rapor edilmiştir. Bu çalışma kapsamında zemin mekaniği laboratuvar çalışmaları vakaların yaşandığı lokasyonlardan Ender Başarı tarafından alınan ve Manisa Celal Bayar Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına zemin numuneleri üzerinde çalışılmıştır.

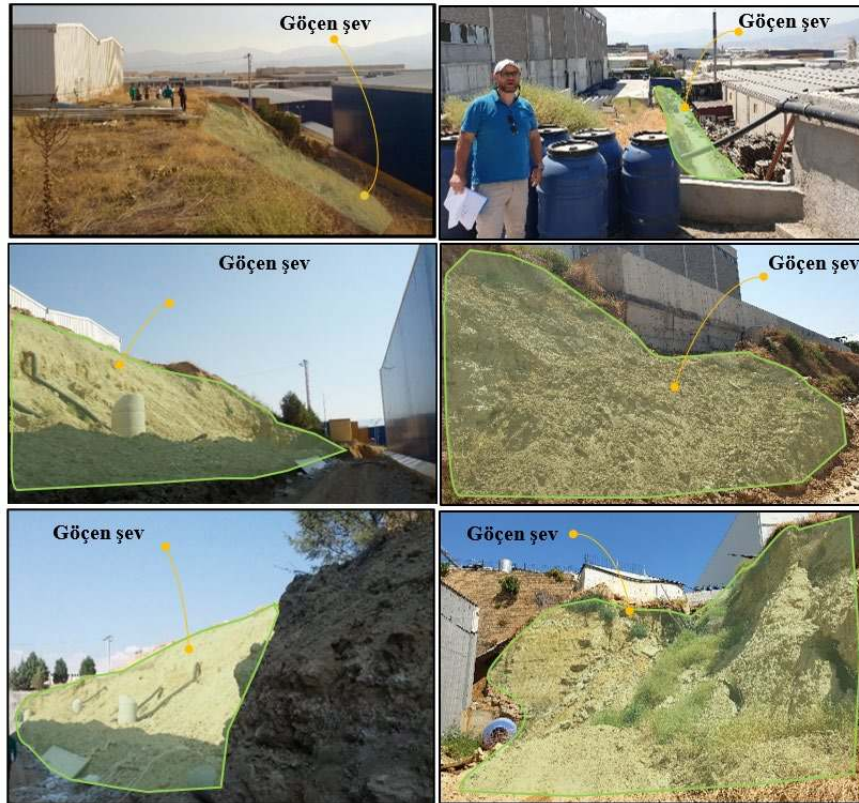
Su içeriğinde meydana gelen değişimler neticesinde göçmelerin yaşandığı şevler ve vakaların yaşandığı noktalardan alınarak Manisa Celal Bayar Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına getirilen zemin numuneleri bu çalışmanın materyalini oluşturmaktadır. Söz konusu materyaller üzerindeki bu tez kapsamında yürütölen çalışmalar Ender Başarı'nın izni ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16. İnceleme sahası [25] (Ender Başarı'nın izni ile).

Birinci Vaka: 2018

İkinci Vaka: 2024



Şekil 17. Birbirine yakın mesafede bulunan ve zemin su içeriğinin değişmesi neticesinde göçen şevler [25] (Ender Başarı'nın izni ile).

3.2. Yöntem

Bu çalışmanın yöntemi iki başlık altında aşağıda sunulmuştur. Birincisi zemin numunelerinin temel ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için yürütülen deneysel çalışmaların yöntem ve metodolojisi. İkincisi başlık ise hesap ve analizler için oluşturulan şev geometrisi ve sonlu farklar yöntemi ile yapılan şev stabilite analizleridir.

3.2.1. Laboratuvar Çalışmaları

Sahada zemindeki su içeriğindeki değişmeden kaynaklanan şev göçmelerinin olduğu şev zeminlerinden önceki araştırma ve incelemeler esnasında numuneler alınmış daha sonra önceki ve bu çalışma kapsamında Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında elek analizi, su içeriği, Atterberg kıvam limitleri, özgül ağırlık, doğal birim hacim ağırlık, boşluk oranı belirleme, porozite belirleme, doymuş ve doymuş olmayan numuneler üzerinde geçirgenlik (permeabilite), zemin – su karakteristik eğrisi (SWCC – Soil Water Characteristic Curve) belirleme (emme basıncını belirleme) deneyleri ASTM (American Society for Testing and Materials) [26] ve (1990). BS 1377-2 (British Standard) [27] standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Tanımlama ve Sınıflama Deneyleri

Zeminleri tanımlama ve sınıflama amaçlı bu çalışma kapsamında yapılan zeminlerin dane çapı dağılımı belirleme, Atterberg kıvam limitleri, doğal birim hacim ağırlık, boşluk oranı, porozite ve su içeriği belirleme deneyleri yapılmıştır.

Elek analizi veya granülometri analizi deneyleri zemin numunesindeki danelerinin boyut dağılımını belirlemek için yapılan bir testtir. Çalışma kapsamında zeminlerin

dane çapı dağılımının belirleme deneyleri ASTM D422 ve ASTM D7928 [26] standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Zemin danelerinin zgl ağırlığı, geoteknik mühendisliğinde boşluk oranı, porozite gibi parametreler olmak üzere birçok parametre hakkında bilgi temin eder. Bu alışma kapsamında zgl ağırlık deneyleri ASTM D854 [26] standardına uygun olarak yapılmıştır.

Kıvam (Atterberg) limitleri olarak bilinen zeminlerin likit limit su içeriği BS 1377 [27], plastik limit su içeriği ve plastisite indeksi deneyleri ASTM D4318 [26] standardına uygun olarak yapılmıştır.

Zeminlerin su içeriğinin belirlenme deneyi ASTM D2216 [26] standardına uygun olarak yapılmıştır.

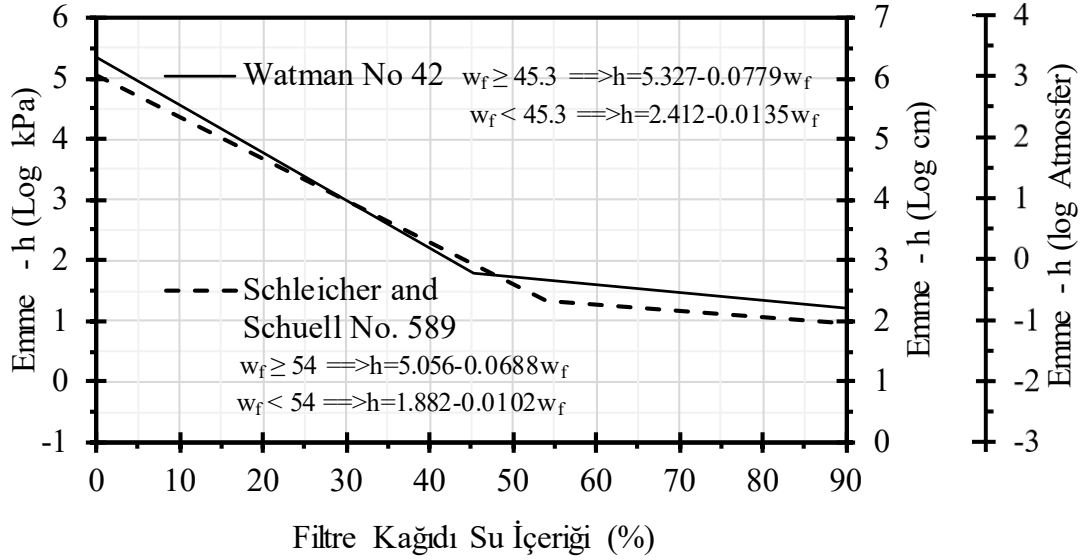
Doğal birim hacim ağırlık, porozite, boşluk oranı belirleme deneyleri parafin kaplama ve suya daldırarak hacim belirleme yöntemi ile ASTM D4531 [26] standardına uygun olarak yapılmıştır.

Zeminlerin Emme Basıncının ve Zemin – Su Karakteristik Eğrisinin (SWCC – Soil Water Characteristic Curve) Belirleme Deneyi

Doygun olmayan zeminlerin başta dayanım olmak üzere mühendislik davranışları su içeriği ile doğrudan ilişkilidir. Doygun olmayan bir zeminin su içeriği ve emme basıncı ilişkisinin belirlenmesi herhangi bir su içeriği için söz konusu zeminin diğer mühendislik parametrelerinin belirlenmesine ve davranışının tahmin edilmesine imkan tanımaktadır.

Zeminlerin toplam emme basıncı, matriks emme basıncı, ozmotik emme basıncı gibi su içeriğine bağlı emme basınçlarını ölçmek için geliştirilmiş literatürde ve standartlarda yer alan farklı ölçüm teknikleri mevcuttur. Bu çalışmada oldukça pratik, ekonomik ve güvenilir sonuçlar veren filtre kâğıdı yöntemi ile ASTM 5298 standardına uygun olarak zemin su içeriği – emme basıncı ilişkisinin belirlenmesi yapılmıştır. Filtre kâğıdı yöntemiyle zemin su içeriği emme basıncı ilişkisinin belirlenmesi testinde Watman No 42 türü filtre kâğıdı kullanılmıştır. ASTM 5298

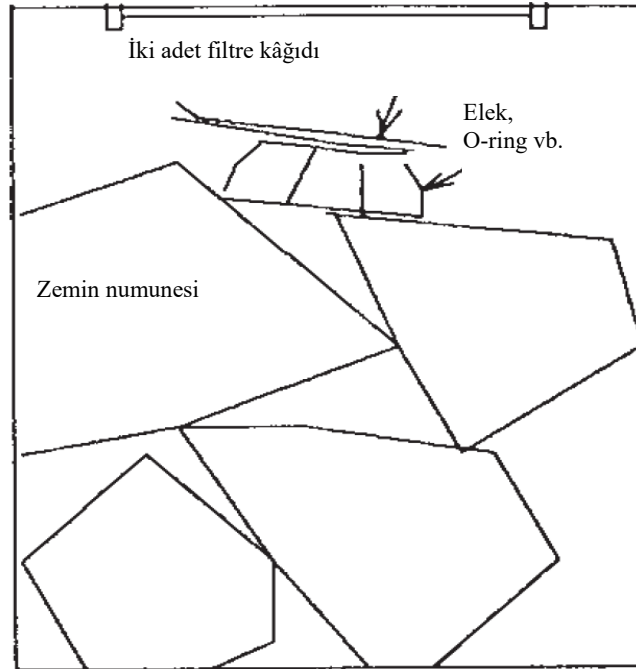
standardında Watman No 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıdı türleri için önerilen kalibrasyon eğrileri aşağıdaki Şekil 18 verilmiştir [26].



Şekil 18. ASTM 5298 standardında Watman No 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıdı türleri için önerilen kalibrasyon eğrileri [26].

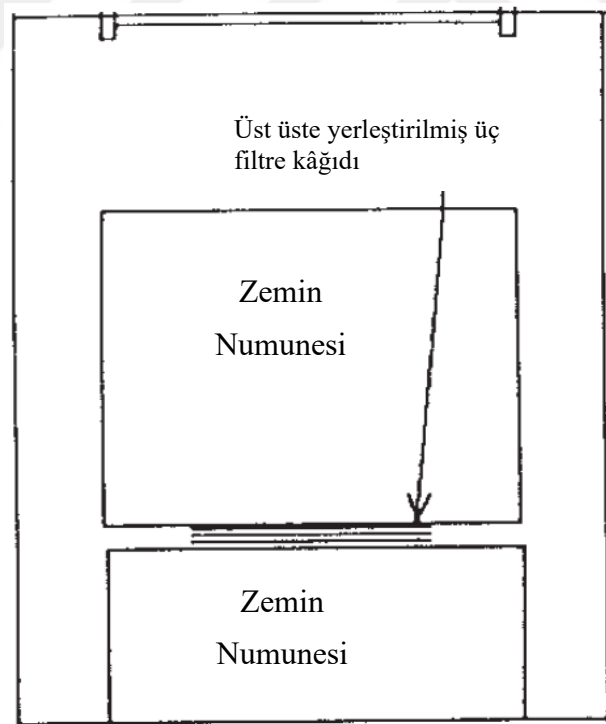
Filtre kâğıdı yöntemi ile zeminlerin toplam ya da matrik emmenin su içeriği ile değişimi belirlenebilmektedir. Bu amaç için kalibrasyonu yapılmış herhangi bir filtre kâğıdı veya yukarıda kalibrasyon eğrileri verilen Watman No 42 ve Schleicher and Schuell No. 589 filtre kâğıtları kullanılabilir. ASTM 5298 standardında tarif edildiği gibi uygun ölçülerde filtre kâğıtları kesilerek hazırlanır. Etüvde en az 24 saat kurutulur daha sonra deney anına kadar ortamdaki havadan nem kapmaması için içerisinde silika jel paketleri içeren desikatörde bekletilir. Hazırlanan filtre kâğıtları etüvde 105 °C de 24 saat bekletildiğinde kurutulmasının yanında bakteri ve mikro organizmalardan da büyük ölçüde sterilize edilebilmektedir. Filtre kâğıtlarının etüvde kurutulmasının ardından desikatöre alınan filtre kâğıtları nem içeriklerinin değişmesine ve üzerinde bakteri oluşumuna izin vermeyecek kısa süre içinde deney icra edilmelidir. Filtre kâğıtları deney icra edilmeden önce uzun süre bekletilecek ise ASTM 5298 tarif edildiği gibi formaldehit ile sterilize edilmelidir [26].

Zemin numunelerinin toplam emmesinin belirlenmesi: Şekil 19’da gösterildiği gibi iki adet filtre kâğıdı zemin numunesi üzerine değmeden ancak yakın mesafede olacak biçimde zemin numunelerinin üzerine yerleştirilir. Zemin partiküllerinin filtre kâğıdına yapışması hatalı ölçümlere neden olabileceği için filtre kâğıtları zeminle temas ettirilmemelidir. Bu amaç için su absorbe etmeyen ve minimum alana sahip oldukça ince O-ring veya elek teli gibi malzemeler filtre kâğıtları ile zemin numunesi arasına koyularak filtre kâğıtları zemin ile temas etmeden zemin numunesinin hemen üzerine yerleştirilir (Şekil 19). Daha sonra numune ve filtre kâğıtları kapalı bir kap içinde izole bir şekilde sabit sıcaklıkta dengeye ulaşınca kadar en az 7 gün bekletilir. Daha sonra ASTM 5298 standardında tarif edilen prosedürler ile farklı su içeriğindeki zemin numuneleri için bekletilen filtre kâğıtlarının su içerikleri hassas bir şekilde belirlenir. Filtre kâğıdı su içerikleri ve Şekil 18’de verilen kalibrasyon eğrileri (veya kullanılan filtre kâğıdı için özel olarak oluşturulmuş kalibrasyon eğrileri) yardımı ile zemin emme basınçları belirlenir. Bu yöntem ile zemin numunesinin farklı su içerikleri için toplam emme değerleri belirlenmiş olur.



Şekil 19. ASTM 5298 standardında zeminlerin toplam emmesinin belirlenmesi için zemin numunelerinin ve filtre kâğıtlarının izole kap içine yerleştirilmesi [26].

Zemin numunelerinin matrik emmesinin belirlenmesi: Şekil 20’de gösterildiği gibi üç adet filtre kâğıdı iki zemin numunesi arasına yerleştirilir. Zemin ile temas eden filtre kağıtlarına zemin numunelerinin yapışma ihtimali olduğundan zemin ile temas halindeki filtre kağıtları ile tartım ve ölçüm yapılmaz. Ortada bulunan zemin ile temas etmeyen filtre kağıtları ölçüm için kullanılır. Şekil 20’de gösterildiği gibi farklı su içeriklerine sahip zemin numuneleri ile hazırlanmış test numuneleri filtre kağıtları izole bir kap içine yerleştirilir. Zemin numuneleri ve filtre kağıtlarındaki su alışverişinin dengeye gelmesi için sabit sıcaklık altında en az 7 gün bekletilir. Daha sonra ASTM 5298 standardında tarif edilen prosedürler ile farklı su içeriğindeki zemin numuneleri için bekletilen ortadaki (zemin ile temas etmeyen) filtre kağıtlarının su içerikleri hassas bir şekilde belirlenir. Filtre kâğıdı su içerikleri ve Şekil 18’de verilen kalibrasyon eğrileri (veya kullanılan filtre kâğıdı için özel olarak oluşturulmuş kalibrasyon eğrileri) yardımı ile zemin emme basınçları belirlenir. Bu yöntem ile zemin numunesinin farklı su içerikleri için matrik emme değerleri belirlenmiş olur.



Şekil 20. ASTM 5298 standardında zeminlerin matrik emmesinin belirlenmesi için zemin numunelerinin ve filtre kağıtlarının izole kap içine yerleştirilmesi [26].

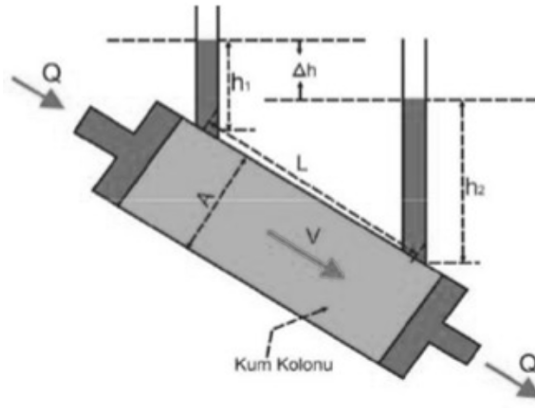
Bu çalışma kapsamında değerleri ASTM 5298 de verilen prosedürlere uygun olarak zemin numunelerinin matrik emme değerleri belirlenmiştir. Zemin numunelerinin matrik emme değerlerinin belirlenmesinde Watman No 42 standart filtre kâğıdı ve Şekil 18’de Watman No 42 filtre kâğıdı için önerilen su içeriği – emme basıncı kalibrasyon eğrisi kullanılmıştır.

Zeminlerin Hidrolik Geçirgenliği (Permeabilite) ve Bağıl (Rölatif) Permeabilite

Geçirgenlik veya hidrolik iletkenlik, bir sıvının gözenekli bir ortamdan akış hızını ifade eder. Darcy Yasası'na göre, suyun zemin içindeki akış hızı, iki nokta arasındaki basınç farkı olan hidrolik eğimden kaynaklanır, diğer bir değiş ile hidrolik eğimin sıfır olduğu iki nokta arasında akış gerçekleşmez. Akış hızı ise, hidrolik gradyandın büyüklüğüne, sıvı viskozitesine, sıcaklık, dane boyutuna, boşluk oranına, poroziteye, zeminin mineralojik yapısına, boşlukların bağlantılılığına, zeminin doygunluk seviyesi vb. gibi faktörlere bağlıdır.

Suyun varlığı ve / veya zemin içinden geçiş hızı zemin özelliklerini ve zemin içinde veya üzerinde yer alan yapıları etkiler. Bir zemin içinde bulunan ve/ veya geçen su, zemin mukavemetini ve gerilmelerini etkileyerek şev stabilitelerini, taşıma gücü, sıvılaşma potansiyeli, zeminlerin oturma ve şişme gibi davranışları üzerinde belirleyici rollere sahiptir

Çok iri, bloklu ve büyük boşluklu zeminler haricinde zeminlerdeki suyun akışı, hızı itibarı ile genellikle laminar akış olarak gerçekleşir Henry Darcy (1856) [28] tarafından suya doygun kumlu zeminlerde laminar akış için (Şekil 21) suyun akış hızını denklem (42)'de verildiği gibi tarif edilmiştir.



Şekil 21. Kumlu zeminden suyun geçişi [29].

$$V = \frac{Q}{A} = ki, \quad i = \frac{\Delta h}{L} \quad (42)$$

V : Akış hızı

Q : Debi (Hacim / Zaman)

A : Kesit alanı

k : Zeminin geçirgenliği (Hidrolik iletkenlik), (Permeabilite)

i : Hidrolik eğim

Δh : İki nokta arasındaki su seviye farkı

L : Zemin kütlesinin uzunluğu

Aşağıda sayılan deneyler ile zeminlerin geçirgenlik katsayısı laboratuvarında doğrudan belirlenebilmektedir.

- i. Sabit seviyeli rijit duvarlı geçirgenlik deneyi
- ii. Sabit seviyeli esnek duvarlı geçirgenlik deneyi
- iii. Düşen seviyeli rijit duvarlı geçirgenlik deneyi
- iv. Düşen seviyeli esnek duvarlı geçirgenlik deneyi.

Bu tez çalışmasında düşen seviyeli esnek duvarlı geçirgenlik deney düzeneği kullanılmıştır. Esnek duvarlı permeabilite deneyi 35 kPa hücre basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Deney numunesinin çapı 10 cm olup, düşen seviyeli permeabilite

deneyinde hidrolik gradient 12.5 ~ 9.5 olarak uygulanmıştır. Su akışı numunenin altından yukarıya olacak şekilde deney gerçekleştirilmiştir. Deneyde giren ve çıkan su hacimlerinin dengeye ulaşması (eşitlenmesi) gözlemlenmiş ve boşluk hacminin 2.5~3 misli kadar su geçmesi temin edilmiştir.

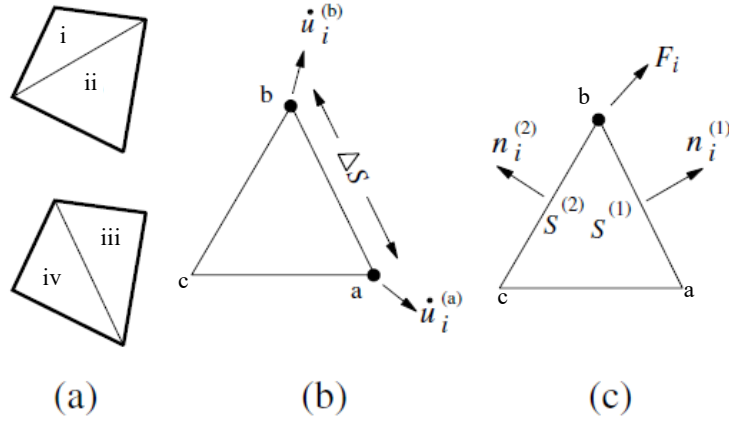
Bağıl (rölatif – göreceli) geçirgenlik, Darcy denklemini çok fazlı akış koşullarına uyarlamak için tasarlanmış boyutsal olmayan bir terimdir. Göreceli geçirgenlik, belirli bir doygunluktaki belirli bir akışkanın etkin geçirgenliğinin, o akışkanın toplam doygunluktaki mutlak geçirgenliğine oranıdır. Bir zeminde tek bir akışkan varsa, onun göreceli geçirgenliği 1.0'dir. Göreceli geçirgenliğin hesaplanması, akışkanların birbirlerinin varlığında akma yeteneklerinin karşılaştırılmasını sağlar, çünkü birden fazla akışkanın varlığında genellikle her akışkan, diğer akışkan veya akışkanların akışını engeller. Hava ve su olarak iki akışkan fazı içeren zeminler için doygunluğa seviyesine göre bağıl (rölatif – göreceli) geçirgenlik ilişkileri denklem (30) ~ (35) ile verilmiştir.

3.2.2. Sonlu Farklar Yöntemi

Bu çalışma kapsamında yarı doygun şevlerin su içeriğindeki değişimden dolayı stabilite tahkikleri sonlu elemanlar yöntemini (FDM - Finite Difference Method) kullanan Itasca Consulting Group tarafından geliştirilmiş olan FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) yazılımı kullanılmıştır. Itasca – Flac, hem 2D hem de 3D modelleme yapabilme kapasitesine sahip olup, zemin, kayaç ve inşaat yapıları gibi sürekli ortamların davranışları simüle edilebilmektedir [30].

FLAC yazılımının temel avantajı, büyük deformasyonlar ve dinamik yüklemeler gibi karmaşık geoteknik problemlerini modelleyebilmesidir. Bu yazılım, zemin-yapı etkileşimi, şev stabilitesi, tünel kazıları ve depremsel etkiler gibi çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılır. Özellikle kazıklı temeller, zemin taşıma kapasitesi, şev stabilitesi, oturma, dinamik zemin tepki analizleri, yarı doygun zemin analizleri gibi geoteknik konularda literatürde kabul görmüş bir yazılımdır [31].

Itasca – Flac yazılımında (Şekil 7) ile verilen ve sonlu farklar için oluşturulan grit ve göz ağında bir göz için hesaplamalar aşağıda Şekil 22'de verildiği gibi alt üçgenlere ayrılarak yapılmaktadır.



Şekil 22. (a) Itasca – Flac yazılımında kullanılan dörtgen elemanlar. (b) Hız vektörlerine sahip tipik üçgen eleman. (c) düğüm kuvveti vektörlerine sahip tipik üçgen eleman [8].

Bir üçgen için fark denklemleri, Gauss diverjans teoreminin genelleştirilmiş biçiminden aşağıda denklem (43) ile verildiği gibi türetilir [32].

$$\int_S n_i f ds = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_i} dA \quad (43)$$

- $\int_S$: Kapalı bir yüzeyin sınırı etrafındaki integral
- n_i : Yüzeye dik birimdir
- f : Skaler, vektör veya tensör
- x_i : Konum vektörü
- ds : Diferansiyel artım
- $\int_A$: Yüzey alanı A üzerindeki integral
- dA : Diferansiyel alan

Zemin dane, su ve hava fazlarından oluşmuş bir yapıya sahiptir. Bu fazlardan su ve hava fazları akışkan olarak tanımlanırlar. Su ıslatan (wetting), hava ise ıslatmayan (non-wetting) akışkandır. Su ve hava akışkanlarının her ikisinin de hesaplarda dikkate alındığı akış modelleri iki fazlı akış modeli olarak adlandırılırlar.

Sadece bir akışkan fazın (su fazının) hesaplarda dikkate alındığı akış modelleri tek fazlı akış modelleri olarak adlandırılır.

Tek fazlı akış dikkate alındığında ve yerçekiminin akışkan momentumu üzerindeki gibi ihmal edilebilir düzeydeki etkiler ihmal edildiğinde süreklilik ve Darcy yasasına göre aşağıdaki denklem (44) yazılabilir. Üçgen eleman için denklem (44) denklem (45)'de olduğu gibi formüle edilir. Şekil 22'de verilen bir üçgenin (ab) kenarı ve q 'nın iki bileşeni (q_1 ve q_2) için Denklem (46) – Denklem (47)'deki gibi yazılır.

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (44)$$

$$q_i \cong -\frac{k_{ij}}{A} \sum P n_j s \quad (45)$$

$$q_1^{(ab)} = \frac{1}{A} \left[-k_{11}(P^{(b)} + P^{(a)})(x_2^{(b)} - x_2^{(a)}) + k_{12}(P^{(b)} + P^{(a)})(x_1^{(b)} - x_1^{(a)}) \right] \quad (46)$$

$$q_2^{(ab)} = \frac{1}{A} \left[-k_{11}(P^{(b)} + P^{(a)})(x_2^{(b)} - x_2^{(a)}) + k_{12}(P^{(b)} + P^{(a)})(x_1^{(b)} - x_1^{(a)}) \right] \quad (47)$$

k_{ij} : Doygunluk mobilize katsayı tensörü, P : Boşluklardaki su basıncı (boşluk suyu basıncı), s : Üçgen kenar uzunluğu

Şekil 22'de verilen bir üçgenin diğer iki kenarı da q_i için benzer katkı sağlar. Üçgenin kenarlarına dik yöndeki akış vektörleri ile düğüm noktaları için skaler olarak debi aşağıda denklem (48) verildiği gibi ifade edilir. Örneğin (a) düğüm noktası için debi formülü denklem (49) ile aşağıda verilmiştir. Kenarlara dik yöndeki akışın yarısı bir düğüm noktasına diğer yarısı da diğer noktasına etki ettiği düşünüldüğünde denklemde (49) yer alan 2 böleni formüle gelmektedir.

$$Q = q_i n_i s \quad (48)$$

$$Q^{(a)} = \left| -q_1(x_2^{(b)} - x_2^{(c)}) + q_2(x_1^{(b)} - x_1^{(c)}) \right| / 2 \quad (49)$$

Benzer ifadeler (b) ve (c) düğümleri için de geçerlidir. Düğümde birleşen üç üçgenden gelen debiler toplanır. Toplama giren üç üçgen üst üste bindirilmiş üçgenlerden oluşur ve aynı alandan gelen debiler 2 defa hesaba girmiş olur bunun için üç üçgenin toplamı neticesinde ortaya çıkan ve denklem (50) ile verilmiş olan toplam

debi 2'ye bölünür. Tüm dörtgen elemanı için aşağıda denklem (51) ile verilen [M] matrisi, yukarıda türetildiği gibi dört düğümdeki basınçlar ile dört düğüm akış hızı arasındaki ilişkiyi tanımlanır. Denklem 51'de yer alan k klasik sonlu fark veya sonlu hacim yöntemlerinden biri ile elde edilebilecek olan izotropik mobilite katsayısıdır.

$$\{Q\} = [M]\{P\} \quad (50)$$

$$[M] = -\frac{k}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Bir grid noktası etrafındaki basınç gradianı $\partial P / \partial x_i = g_i \rho_w$ eğimine uyuyorsa (burada g_i yerçekimi ivmesinin vektörü), o zaman düğüm akış hızları $\{Q\}$ sıfır olmalıdır. Bu düşünce ile yerçekiminin etkisi aşağıda denklem (52)'de verildiği gibi hesaplara dahil edilir. Denklemdeki $x_i^{(1)}$ bir köşenin x - kordinatıdır.

$$\{Q\} = [M] \left\{ P - \left(x_i - x_i^{(1)} \right) g_i \rho_w \right\} \quad (52)$$

Yarı doymun koşullar için permeabilite denklem (53) ile verildiği gibi doymunluğa (s) bağlı tarif edildiğinde denklem (54)'de verilen ilişki yazılır. Denklemdeki n hesap yapılan nokta numarasıdır.

$$\hat{k}(s) = s^2(3 - 2s) \quad (53)$$

$$Q'_n = \frac{\sum Q_{(in)}}{\sum s_{(in)}} s_n \quad (54)$$

Süreklilik denklemi göz önüne alındığında, bir düğümdeki toplam debideki $(\sum Q)$ dengesizlik doymun bir düğümdeki gözenek basıncında denklem (55) ile verildiği gibi bir değişikliğe neden olur

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{M}{V} \left(\sum Q + \alpha \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (55)$$

Denklemde yer alan V düğümle ilişkili toplam hacimdir. $\sum Q$ terimi, düğüm noktasını çevreleyen bölgelerden gelen katkıları ve kullanıcı tarafından belirtilen özel tüm kaynakları (örneğin, bir kuyudan gelen çıkış) içerir. Sonlu farklar hesap yönteminde, denklem (55) aşağıdaki denklem (56)'daki gibi yazılır.

$$P_i = P - \frac{M(\sum Q \Delta t + \alpha \Delta V_{mech})}{V} \quad (56)$$

V_{mech} : oluşturulan ağ şebekesinin mekanik deformasyonlarından kaynaklanan eşdeğer düğüm hacmi artışı

Yukarıda verilen eşitlikler Itasca – Flac yazılımında sonlu farklar için bir fazlı akış durumu içindir. İki fazlı akış durumu ise aşağıda verilmiştir. Darcy yasasına göre iki fazlı akış durumunda su (ıslatan) ve hava (ıslatmayan) akışkanlar için aşağıdaki denklem (57) ve (58) ile verilen ilişkiler yazılır. Denklemlerdeki w indisi su, a indisi ise hava akışkanını göstermektedir.

$$q_i^w = -k_{ij}^w k_r^w \frac{\partial (P_w - \rho_w g x_k)}{\partial x_j} \quad (57)$$

$$q_i^a = -k_{ij}^w \frac{\mu_w}{\mu_a} k_r^a \frac{\partial (P_a - \rho_a g x_k)}{\partial x_j} \quad (58)$$

k_{ij}^w : Doygunluk mobilize katsayı tensörü, P_w, P_a : sırasıyla boşluklardaki su ve hava fazlarının basınçları, x_k : hesap yapılan ağ gözü için konum vektörü, μ_w, μ_a : su ve hava fazlarının dinamik viskozitesi,, ρ_w, ρ_a : su ve hava fazlarının yoğunlukları, g : yerçekim ivmesi

Sıvı akışkan fazının bir miktar sıkışabildiği göz önüne alındığında, kütle (toplam akışkan) korunumundan denklem (59) ve (60) yazılabilir.

$$\frac{\partial \xi_w}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} + q_v^w \quad (59)$$

$$\frac{\partial \xi_a}{\partial t} = -\frac{\partial q_i^a}{\partial x_i} + q_v^a \quad (60)$$

ξ : Poroz malzemenin birim hacminde akışkan miktarlarında meydana gelen değişim

Aşağıda yer alan (61) ve (62) denklemleri ile sırasıyla sıvı ve gaz fazı akışkanlarının bünye denklemleri verilmiştir.

$$S_w \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{K_w}{n} \left[\frac{\partial \xi_w}{\partial t} - n \frac{\partial S_w}{\partial t} - S_w \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] \quad (61)$$

$$S_a \frac{\partial P_a}{\partial t} = \frac{K_a}{n} \left[\frac{\partial \xi_a}{\partial t} - n \frac{\partial S_a}{\partial t} - S_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] \quad (62)$$

K_w ve K_a sıvı (su) ve gaz (hava) akışkan fazları için Bulk modülleri
 ϵ : Hacimsel strain, n : porozite

Denklem (59) ve (60) sırasıyla denklem (61) ve (62)'de yerlerine konulduğunda ve yukarıda verilen ilişkiler yardımı ile düzenlendiğinde aşağıdaki (63) ve (64) denklemleri elde edilir. Denklem (65) ile verilen su (S_w) ve hava (S_a) fazları için doyumluk ilişki göz önüne alındığında ve aşağıdaki denklemlerde hacimsel strainlerdeki ($\partial \epsilon / \partial t$) değişimler ihmal edildiğinde, problem denklem (21), denklem (63), denklem (64) ve denklem (65)'de yer alan P_w , P_a , S_w ve S_a dört bilinmeyen dört denklem ile non-lineer çözümüne dönüşür.

$$-\left[\frac{\partial q_i^a}{\partial x_i} + S_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] = n \left[\frac{S_a}{K_a} \frac{\partial P_a}{\partial t} + \frac{\partial S_a}{\partial t} \right] \quad (63)$$

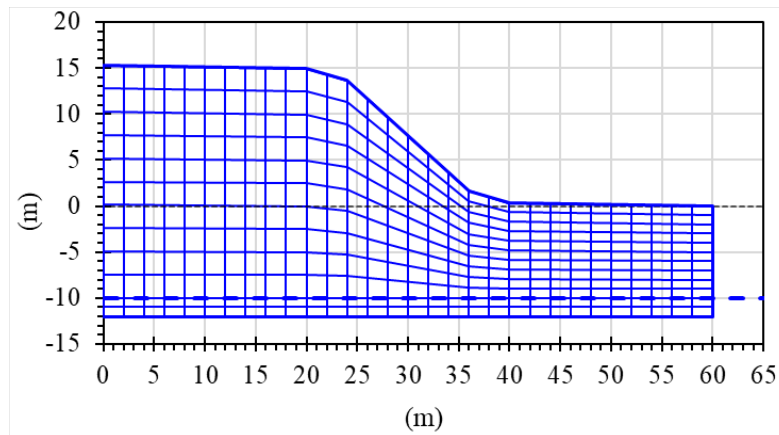
$$-\left[\frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} + S_w \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] = n \left[\frac{S_w}{K_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} \right] \quad (64)$$

$$S_w + S_a = 1 \quad (65)$$

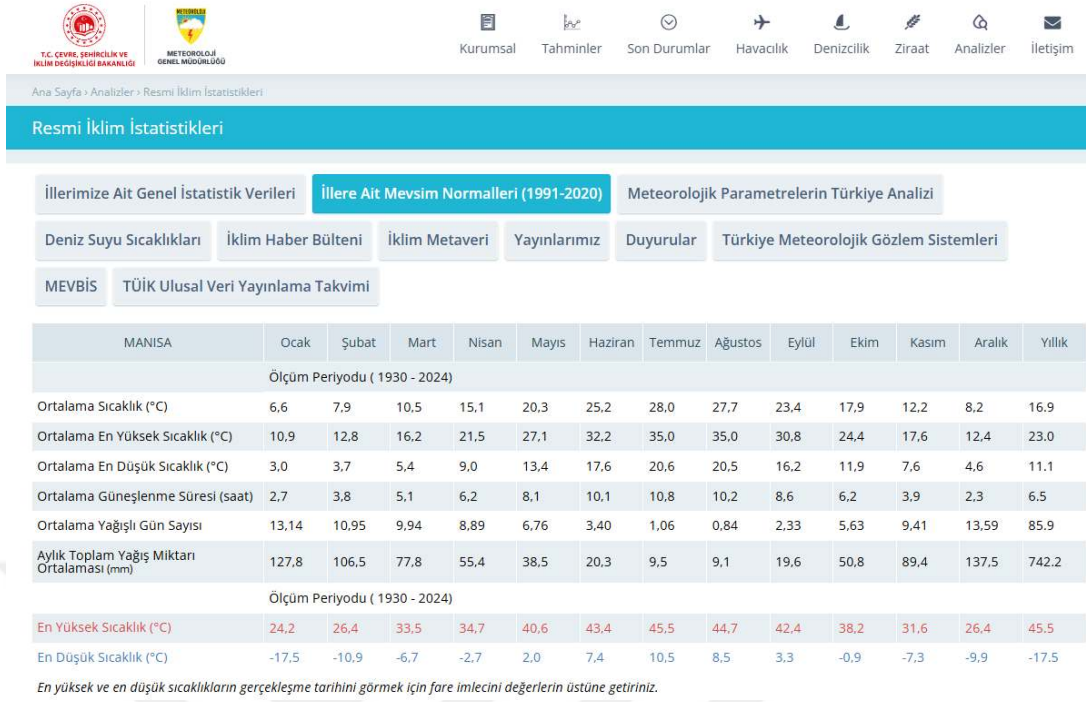
3.2.3. Sayısal Model

Sayısal model Itasca-Flac yazılımında yapılmış olup gereken zemin ve hesap parametreleri laboratuvar verilerinden elde edilmiştir. Sahadaki zeminlerin şevlerin Manisa’da gözlemlenen yağışlar altındaki duraylılığını analiz etmek için Sayısal model 30°, 35°, 40° ve 45° olmak üzere dört farklı şev açısında oluşturulmuştur. Oluşturulan şev geometrileri ve grit yapısı Şekil 23 ile verilmiştir. Oluşturulan geometride her dört eğim için şev yatay uzunlukları eşit olup şev yükseklikleri şev eğim açısına göre belirlenmiştir. Şev geometrisinin tabanında sabit yükseklikte bir yer altı suyu tablası tanımlanmıştır. Yer altı suyu şevin en alt noktasından 10 m aşağıda olacak şekilde tanımlanmıştır.

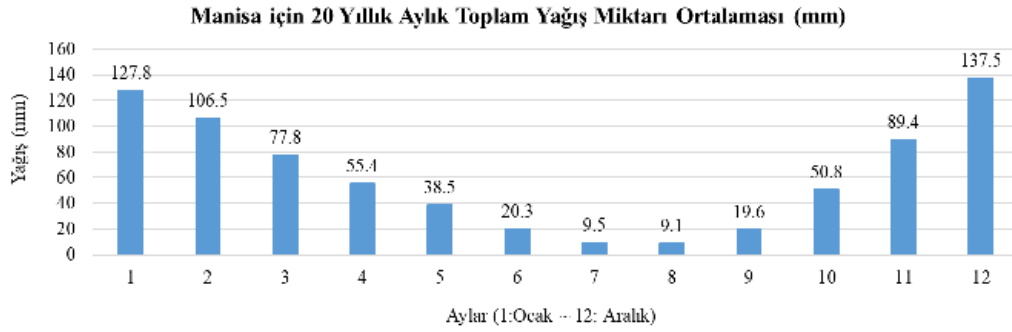
Analizlerde referans olarak alınan yağış verileri Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının resmî web sayfasından alınmıştır. Son 20 yıla ait web sayfasından alınan veriler Şekil 24 ve ile verilmiştir analizlerde son 20 yılın yağış ortalamaları dikkate alınmıştır. Analizlerden üç ardışık yağış kullanılmıştır. Şekil 25 incelendiğinde Manisa için yağışların az olduğu kurak bir dönem daha sonra yağışların yükseldiği bir dönem mevcuttur. Şekil 24 ve şekil 25 ten görüleceği üzere Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim ayları nispeten düşük Aralık, Ocak, Şubat aylarının ise nispeten yüksek, Kasım ve Mart ayları ise bu çalışma kapsamında düşük ve yüksek yağışlı dönemler arası geçiş ayları olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 23. (a) Itasca – Flac yazılımında oluşturulan şev geometrisi ve grit yapısı.



Şekil 24. Türkiye Cumhuriyeti çevre şehircilik ve iklim değişikliği Bakanlığının bu resmi verilerine göre Manisa için son 20 yılın yağış ortalamaları [33]



Şekil 25. Türkiye Cumhuriyeti çevre şehircilik ve iklim değişikliği Bakanlığının bu resmi verilerine göre Manisa için son 20 yılın yağış ortalamaları [33]

Analizler yedi aylık yağışlardan oluşan birinci evre, bir aylık yağıştan oluşan ikinci evre, nihai yağışı temsil eden üç farklı ardışık yağış evresi göz önüne alınarak yapılmıştır. Nihai yağış evresi belirli bir toplam yağış miktarlarının üç farklı süre içinde gerçekleşmesi (7.5 gün, 15 gün, 30 gün) durumu için modellenmiştir. Yedi aylık

birinci evre yağış dönem için iki farklı yağış değeri dikkate alınmıştır, birincisi kurak ayların ortalaması (29.03 mm/ay) olan ve toplam yağış miktarı $29.03 \text{ mm/ay} \times 7 \text{ ay} = 203.21 \text{ mm}$. Birinci evrenin ikinci toplam yağışı ise 630 mm olarak senaryo edilmiştir. 630 mm lik toplam yağış miktarı bilhassa insan eli ile park, yeşillendirme, mezarlık alanları gibi sahalarda yapılan sulama faaliyetleri neticesinde zemindeki infiltrasyon seviyesinin yaklaşık yıllık ortalama yağışa yaklaşmasını temsil etmektedir. Geçiş dönemini temsil eden ikinci evre yağışı için Kasım (11. Ayın) ayının ortalama yağış değeri (89.4 mm/ay) dikkate alınmıştır. Üçüncü evre yağış dönem için ise Aralık (137.5 mm/ay), Ocak (127,8 mm/ay), Şubat (106.5 mm/ay) aylarına ait toplam yağışların geçiş ayı olarak değerlendirilen Kasım ayının ardında sırasıyla 1 aylık, 15 günlük ve yaklaşık bir haftalık (7.5 gün) süre zarfı içinde yağması senaryosuna uygun olarak modellenmiştir. Dolayısı ile üçüncü evre için 9 farklı yağış şiddeti – süre senaryosu oluşturulmuştur. Senaryolaştırılan her üç ardışık yağış aşağıda Tablo 2 ile verilen farklı şev eğimlerine uygulanmıştır. Analizlerde dikkate alınan yağış senaryoları ise Tablo 3 ile verilmiştir.

Tablo 2. Analizlerde dikkate alınan şev eğimleri ve yağış senaryo sayıları

Şev eğimleri	Yağış senaryo sayısı
30°	18 yağış senaryosu
35°	18 yağış senaryosu
40°	18 yağış senaryosu
45°	18 yağış senaryosu
Toplam analiz senaryo sayısı : 72	

Tablo 3. Analizlerde dikkate alınan yağış senaryoları

Kurak Dönem		Geçiş Dönemi		Yağışlı Dönem	
Yağış (mm)	Süre	Yağış (mm)	Süre	Yağış (mm)	Süre
29.03x7 = 203.21	7 Ay	89.4	1 Ay	137.5	1 Ay
630	7 Ay				15 Gün
					7.5 Gün
				127.8	1 Ay
					15 Gün
					7.5 Gün
				106.5	1 Ay
					15 Gün
					7.5 Gün
Birinci evre yağış senaryo sayısı 2 adet				İkinci evre yağış senaryo sayısı 1 adet	
Toplam Yağış Senaryo sayısı : 18 adet					

Şev kütlesinin başlangıç koşulları birinci evre yağışlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Birinci evre yağışlarına bağlı infiltrasyon neticesinde şev zeminlerinin steady-state doymunluk seviyesi temin edilmiştir. Zeminlerin birinci evre sonunda ulaştıkları doymunluk seviyesi diğer ardışık yağış ve şev güvenlik analizlerinin başlangıç koşullarını temin etmektedir. Birinci evre yağışları için steady-state doymunluk seviyesi aşağıda Darcy yasası gereği süreklilik denkleminde yazılabilen denklem (66) da denklem (33) konulduğunda ve rezidüel doymunluk değerinin sıfır olması durumu için denklem (67) elde edilir. Denklem (67) yardımı ile zeminler için infiltrasyon neticesinde steady-state doymunluk değeri S_w hesaplanabilir. Tablo 4'te 3 farklı birinci evre yağışı için hesaplanan değerler verilmiş olup birinci evre yağışları ile oluşturulan analiz başlangıç koşulları Şekil 26 ile verilmiştir. Hesaplanan su içerikleri için sayısal model için belirlenen başlangıç emme basınçları P_w (h) değerleri de aynı tablo ile takdim edilmiştir

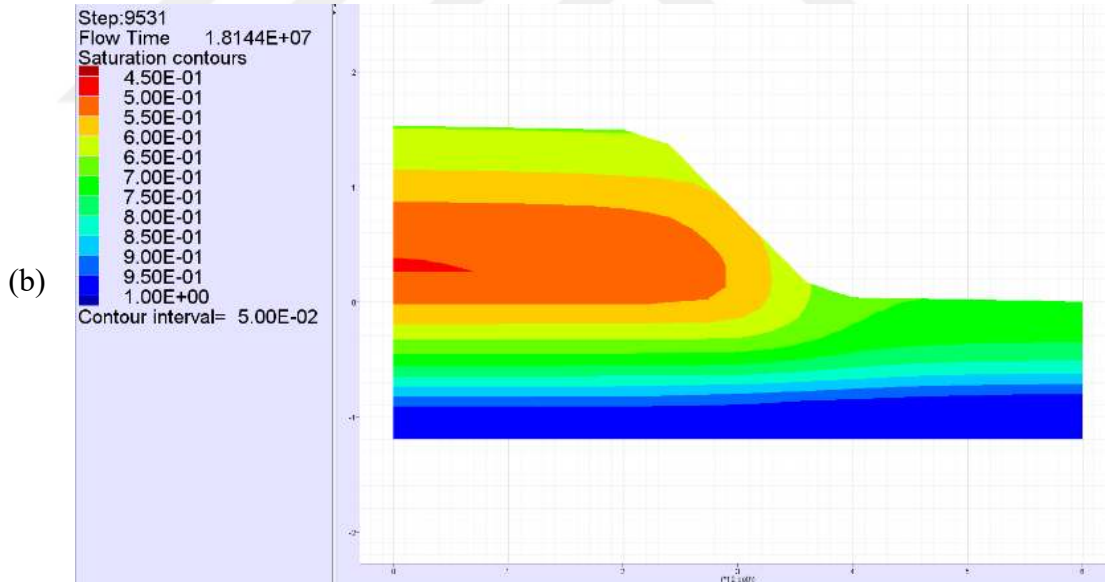
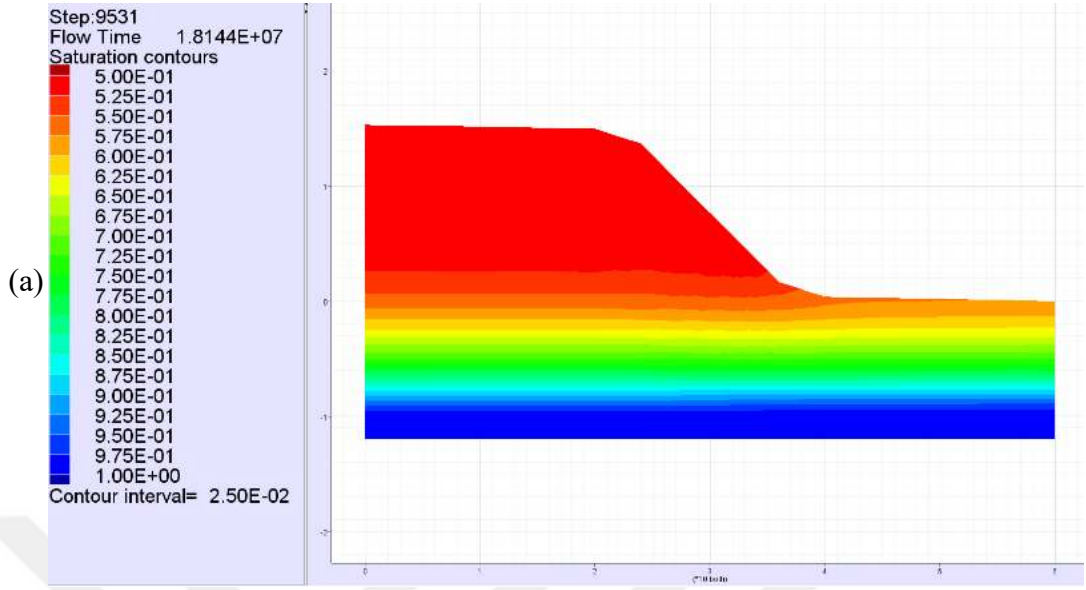
$$q = k_r^w(S_w) \cdot \rho_w g \quad (66)$$

$$S_w^b \left[1 - \left(1 - S_w^{1/a} \right)^a \right]^2 = \frac{q_i}{\rho_w g \frac{k_{ins}}{\mu}} \quad (67)$$

k_{ins} : içsel (intrinsic) permeabilite, μ : akışkan dinamik vizkozitesi, a,b : Van Genuchten katsayıları, q_i : infiltrasyon

Tablo 4. Şev kütlesi için başlangıç doymunluk değerleri

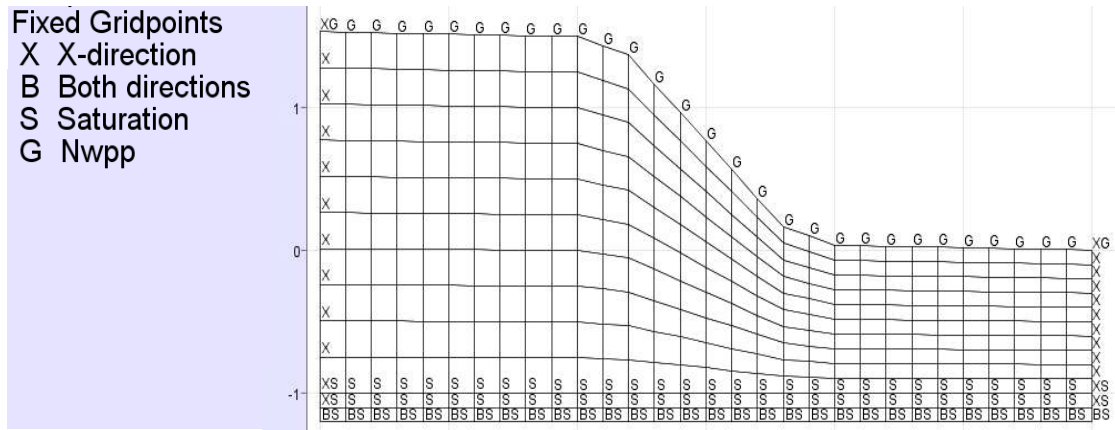
	Yağış mm/7Ay	q_i m/s	S_w (%)	P_w (Pascal)
(a)	203.21	1.11998E-08	0.5172	-125351.5
(b)	630	3.47222E-08	0.4227	-197505.9



Şekil 26. Birinci evre yağışları sonunda oluşan başlangıç doygunluk koşulları: (a)223.21 mm/7Ay, (b) 630 mm/7Ay (Yağışlar toplam yağıştır, 7 Ayda düşen toplam yağıştır)

Başlangıç koşullarının oluşturulmasından sonra elastik çözüm uygulanmıştır. Elastik çözüm sonrası sırası ile ikinci evre (geçiş dönemi) yağışı ve ardından Tablo 3 ile verilen üçüncü evre (nihai) yağışları uygulanmıştır. Her yağış uygulandıktan sonra mekanik çözüm yapılmıştır. Şev güvenlikleri mekanik çözümler sonrası belirlenmiştir. Başlangıç (ardışık iki yağış öncesi) güvenlik durumu ise elastik çözüm sonrası yapılan şev güvenlik analizlerinden belirlenmiştir.

Oluşturulan sayısal modelde atmosfer ile temas halindeki zemin yüzeyi ıslatmayan (non-wetting) akışkan (hava) boşluk basıncı sıfır olarak ayarlanmıştır. Yeraltı su tablasının bulunduğu 10 m derinlik seviyesinin altındaki grit noktalarının doygunluk derecesi 1 olacak şekilde sabitlenmiştir. Ayrıca geometrinin en alt griti (tabanı) ile sağ ve sol kenarlardaki sınır gritleri deformasyon açısından sabitlenmiştir. Bahsedilen ve oluşturulan sayısal modelin sınır koşulları Şekil 27 ile verilmiştir. Sayısal analizlerde kullanılan hesap parametreleri ve değerleri Tablo 5 ile takdim edilmiş olup hesap ve analizler için seçilen zemin modeli Mohr-Coulomb zemin modelidir.



Şekil 27. Oluşturulan sayısal modelin sınır koşulları

Tablo 5. Flac – Sonlu farklar yazılımında kullanılan hesap parametreleri

Flac	Tanım	Değeri	Birim
Density	Zemin birim hacim ağırlığı	1710	kg/m ³
bulk	zeminin bulk modülü (K)	2.00E+07	Pascal
shear	zeminin kayma modülü (G)	7.50E+06	Pascal
	poisson oranı	0.3333	
cohesion	zeminin kohezyonu (başlangıç koşullarındaki)	9400	Pascal
friction	zemin içsel sürtünme açısı (başlangıç koşullarındaki)	19.6	°
gravity	yer çekim ivmesi	9.80665	kgm/s ²
water density	suyun birim hacim ağırlığı	999.7	kg/m ³
poro	zemin porozitesi	0.36	
wpermeability	Flac - Permeabilitesi (mobilité katsayısı) = $k_{ins} / \mu = K_H / g\rho_w =$ (k_{ins} : intrinsic permeability, K_H : Hidrolik geçirgenlik - conductivity)	5.00E-10	Pa.s
visrat	su ve hava dinamik vizkozite oranı = $\mu_{su} = 0.0013059$ Pa.s, $\mu_{hava} = 1.78699e-5$ P.s (10°C)	73.08	
rsat	residüel efektif doygunluk (S_r)	~0	
fmodulus	Suyun Bulk Modülü	2.09E+09	Pascal
f2modulus	havanın Bulk modülü	101000	Pascal
vga	Van Genuchten katsayısı, a	0.33079	
vgpcw	Van Genuchten katsayısı, b	0	
vgpenw	Van Genuchten katsayısı, c	0.5	
vgp0	Van Genuchten basınç katsayısı ($P_o = 1/\alpha$), (Denklem 22,23)	36423	Pascal
pp	Başlangıç koşullarındaki su içeriği için emme basıncı P_w (Denklem 23, h)	Tablo.4	Pascal
nwpp	Başlangıç koşullarında boşluk hava basıncı	0	Pascal
udcoe	Drenajsızlık katsayısı (undreined coeff.) Hacim değişimi neticesinde boşluk suyu basıncının gelişimini kontrol eder. 1 : Hacim değişimi neticesinde boşluk suyu basıncı hesaplanır 0 : hacim değişimine bağlı boşluk suyu basıncı oluşmaz		
q	yağış infiltrasyon değerleri	Tablo. 3	m/s
age	akış hesap (infiltrasyon hesap) süresi	Tablo. 3	s

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Deneysel Çalışma Bulguları ve Sonuçları.

Zemin mekaniği laboratuvarında iki farklı numune üzerinde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

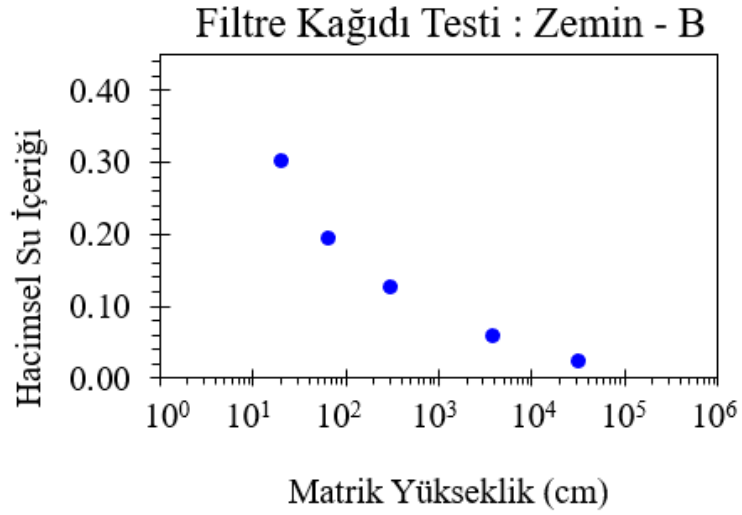
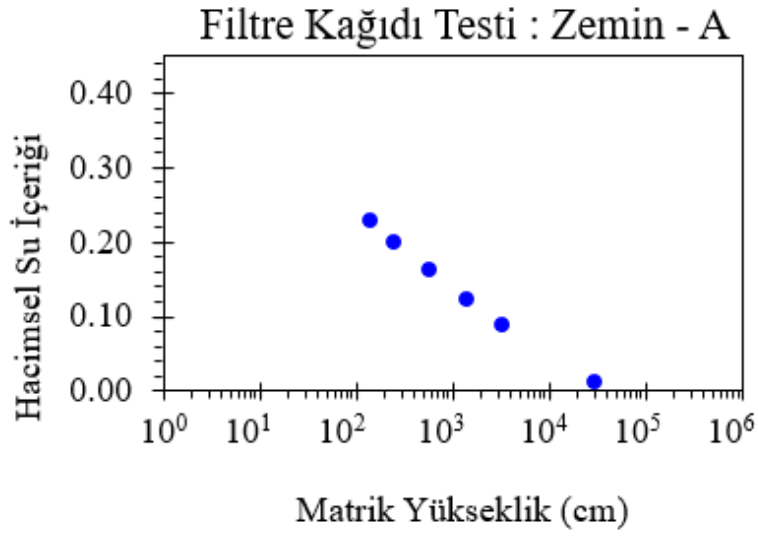
Tanımlama deneyleri olarak bilinen, elek, kıvam, özgül ağırlık, su içeriği, doğal birim hacim ağırlık deneyleri neticesinde farklı iki noktadan alınan zeminlerin zemin tanımlama deney sonuçları aşağıda Tablo 6 ile özet olarak verilmiştir. Tanımlama deneylerine ilaveten filtre kâğıdı yöntemi ile yapılan zemin emme basıncı deneylerine ait grafikler ise Şekil 28 ile verilmiş olup deney ölçüm ve değerleri ekler kısmında verilmiştir. Zemin numunelerinin matris emme basıncı – hacimsel su içeriği eğrileri için Seki vd. (2023) [34]’nin önerdiği şekilde belirlenen van Genuchten parametreleri Tablo 7 ile aşağıda verilmiştir. Zemin numuneleri için belirlenen hidrolik iletkenlik değerleri söz A ve B olarak adlandırılan zeminler için sırası ile 1×10^{-7} m/s [35] ve 5×10^{-6} m/s olarak bulunmuştur. B numunesi olarak adlandırılan zemin numunesine ait hidrolik iletkenlik test sonuçları Şekil 29 ile verilmiştir. Zeminin rölatif permeabilitesinin emme basıncı ile değişimi ise Şekil 30 ile verilmiştir. Zeminin drenajlı kayma dayanım parametreleri ($\phi=19.6^\circ$ ve $c= 9.4$ kPa) ise daha önce söz konusu zeminler üzerinde 2018 yılında sahada yağışlar neticesinde yaşanan şev kayması problemi vakası kapsamında yürütülen çalışma sonuçlarından alınmıştır [25].

Tablo 6. Doğal numuneler üzerinde yapılan genel zemin özelliklerine ait test sonuçları

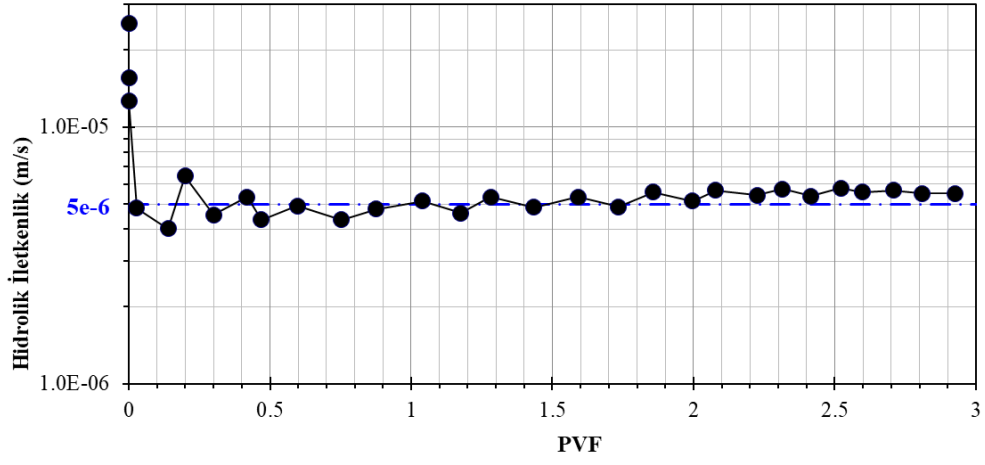
Doğal Zemin Numuneleri İçin			
	Zemin Numunesi - A	Zemin Numunesi - B	Genel Zemin Değeri
Özgül Ağırlık (G_s) :	2.67	2.67	2.67
$\gamma_{doğal}$:	1.831	1.821	1.826 (gr/cm ³)
γ_{kuru} :	1.718	1.701	1.710 (gr/cm ³)
γ_{doygun} :	2.075	2.064	2.069 (gr/cm ³)
w_n :	6.570	7.055	6.813 (%)
e :	0.554	0.554	0.561
n :	0.356	0.363	0.360
Çakıl (%) :	13	10.0	10~13 (%)
Kum (%) :	58.4	68.2	58~68 (%)
İnce Dane (%) :	28.57	21.8	21~29 (%)
I_p :	NP	NP	NP

Tablo 7. Zemin numuneleri için belirlenen van Genuchten parametreleri

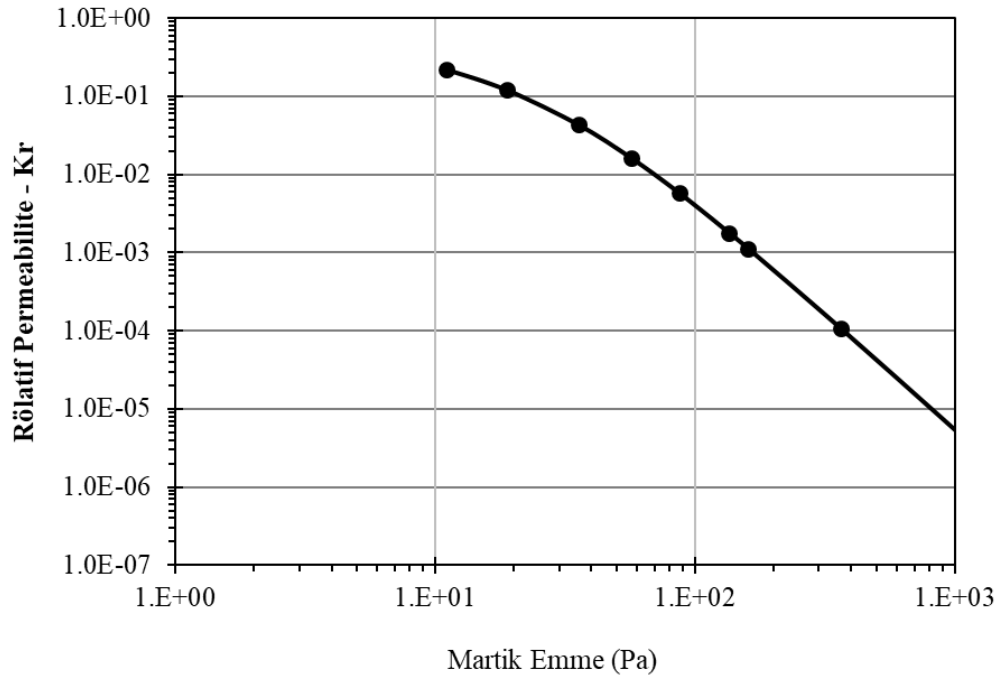
van Genuchten parametreleri	Zemin - A	Zemin - B
θ_s	0.23943	0.45473
θ_r	2.181e-15	0.011865
α	0.27455	1.3564
n	1.4943	1.3752



Şekil 28. Zemin numunelerine ait filtre kâğıdı deneylerinden belirlenen matrik emme hacimsel su içeriği grafikleri.



Şekil 29. Hidrolik iletkenlik test sonucu

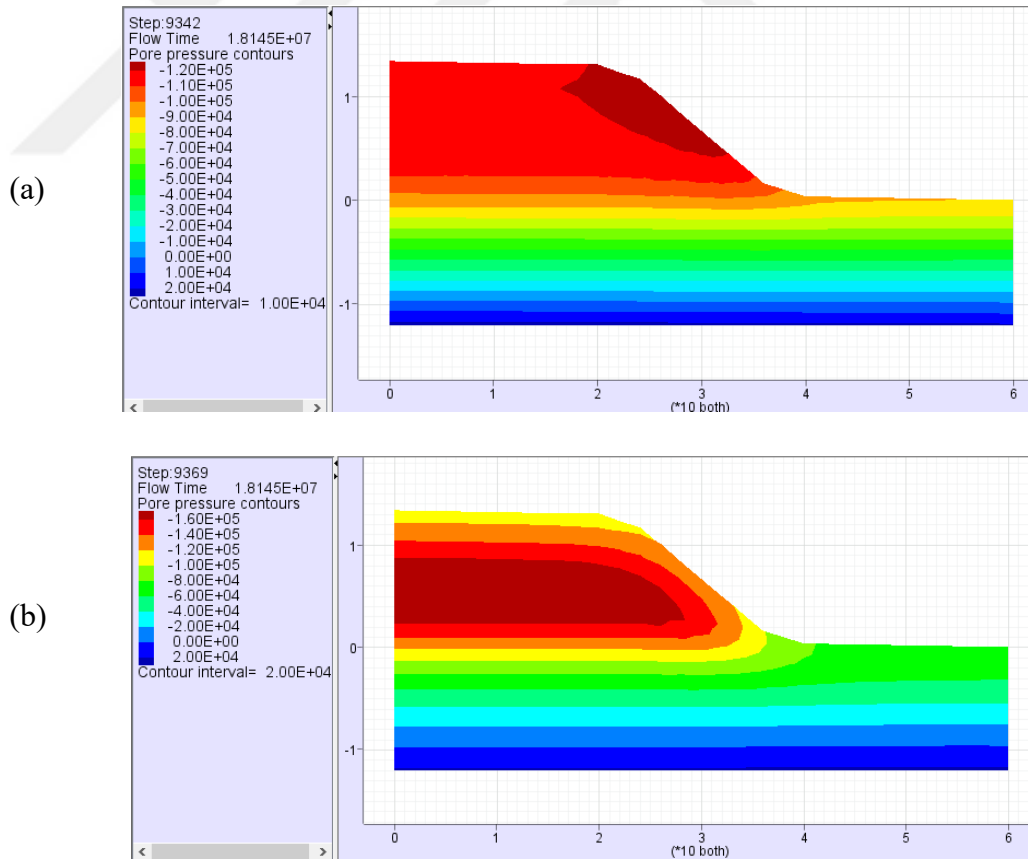


Şekil 30. Zeminin matrik emme basıncına karşılık rölatif permeabilite eğrisi (Denklem: (23), (26), (33) yardımı ile)

4.2. Sayısal Analizler ve Sonuçları

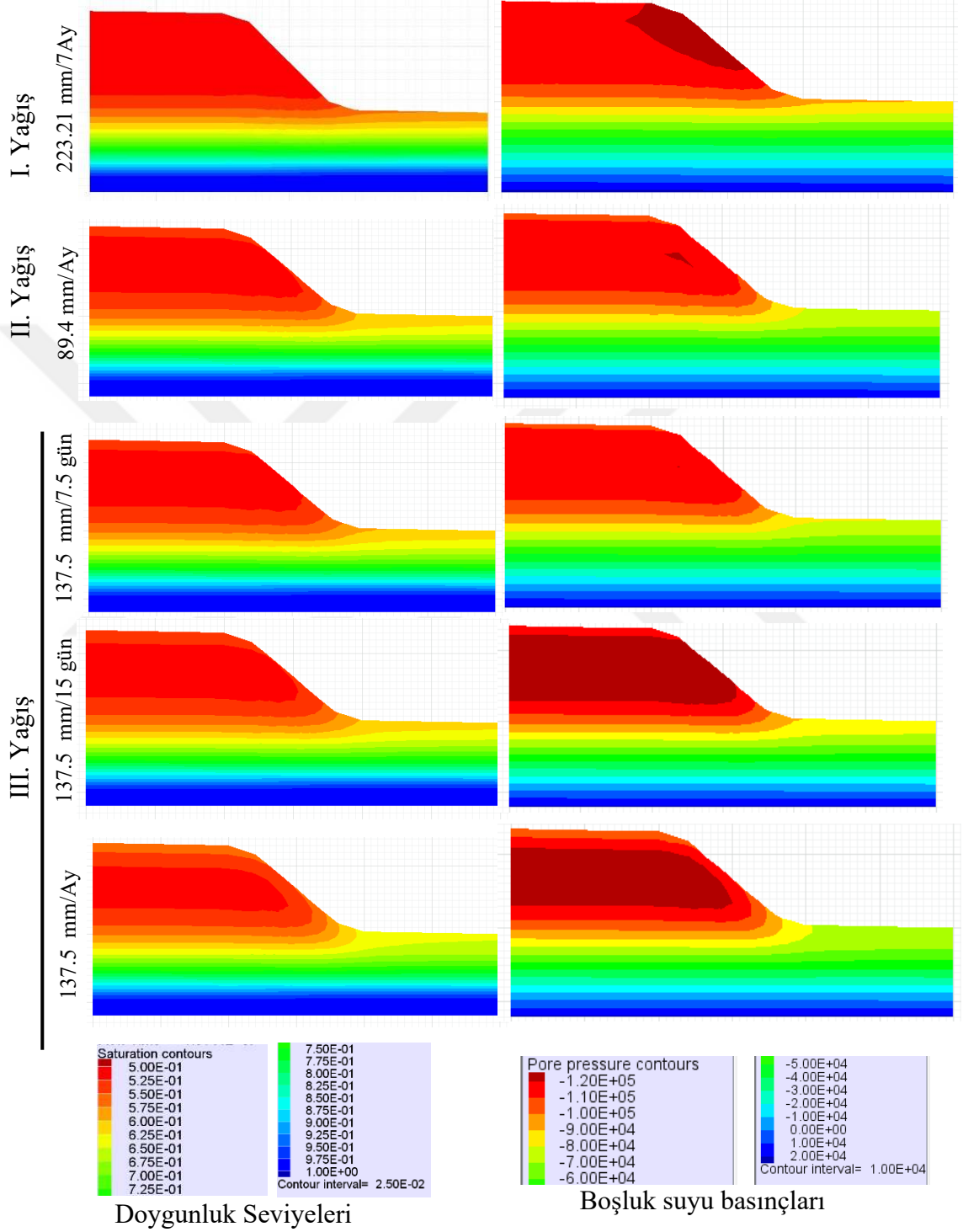
Flac yazılımında oluşturulan modelde sonlu elemanlarda yapılan sayısal analizlerde dikkate alınan hesap parametreleri zemin numunelerinin alındığı sahanın genel zemin davranışını ve bölgenin yağış koşullarını mümkün mertebe temsil etmesine özen gösterilmiştir. Bölgenin yağış koşullarına ilaveten yapay insan faaliyetleri sonucu oluşan bir yağış modeli de hesap ve analizlere eklenmiştir. Böylelikle analiz sonuçlarının sahadaki gerçek zeminlerin gerçek davranışını yansıtması amaçlanmıştır.

Başlangıç koşullarını oluşturmak için uygulanan 7 aylık ilk yağış periyodu sonucunda şev kütlesinde oluşan doygunluk seviyeleri yukarıda 45° eğimli şev için Şekil 26 ile verilmişti, boşluk suyu basıncı seviyeleri ise aşağıda Şekil 31 ile verilmiştir.

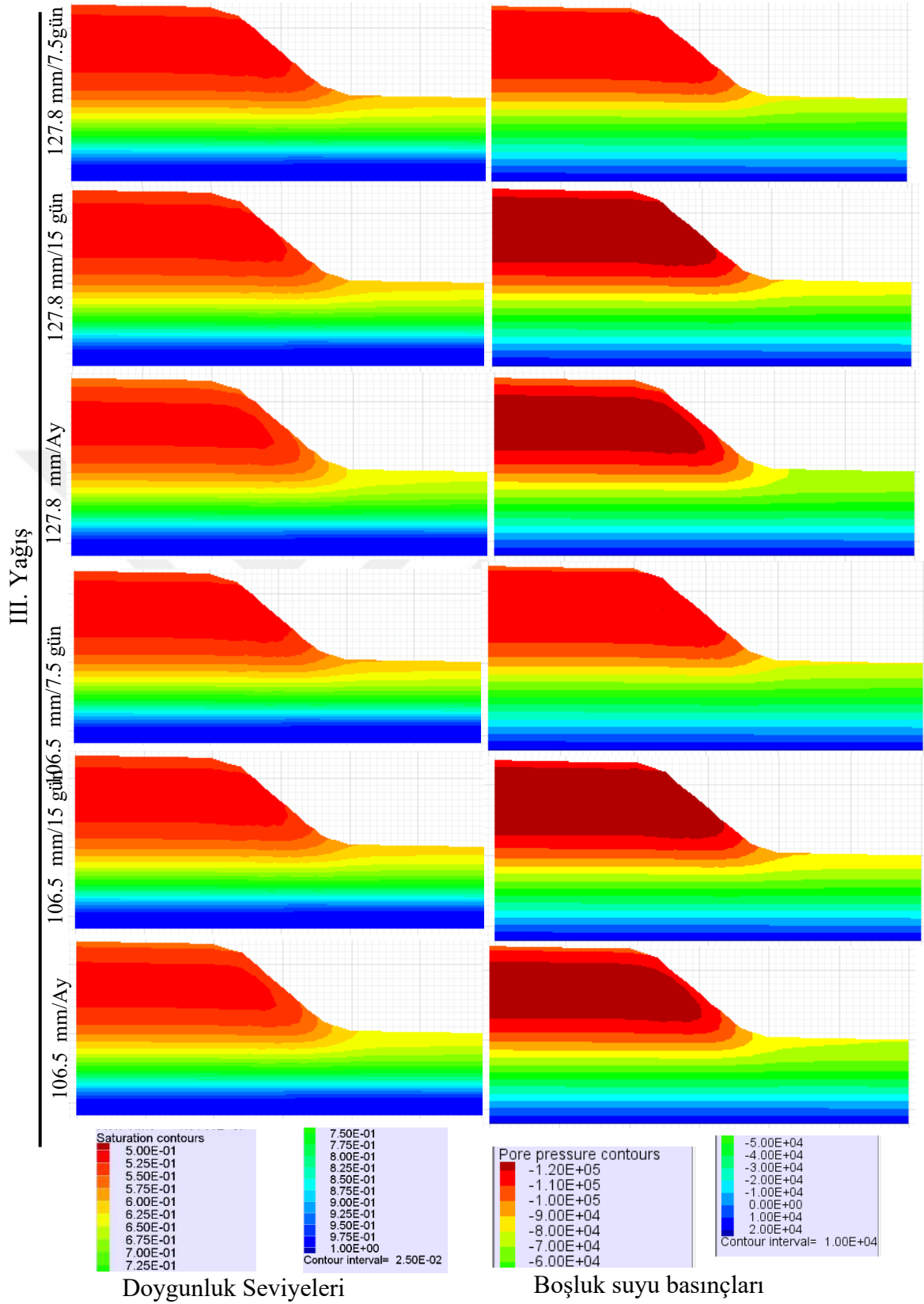


Şekil 31. Birinci evre yağışları sonunda oluşan başlangıç durumundaki boşluksuyu basınçları: (a)223.21 mm/7Ay, (b) 630 mm/7Ay

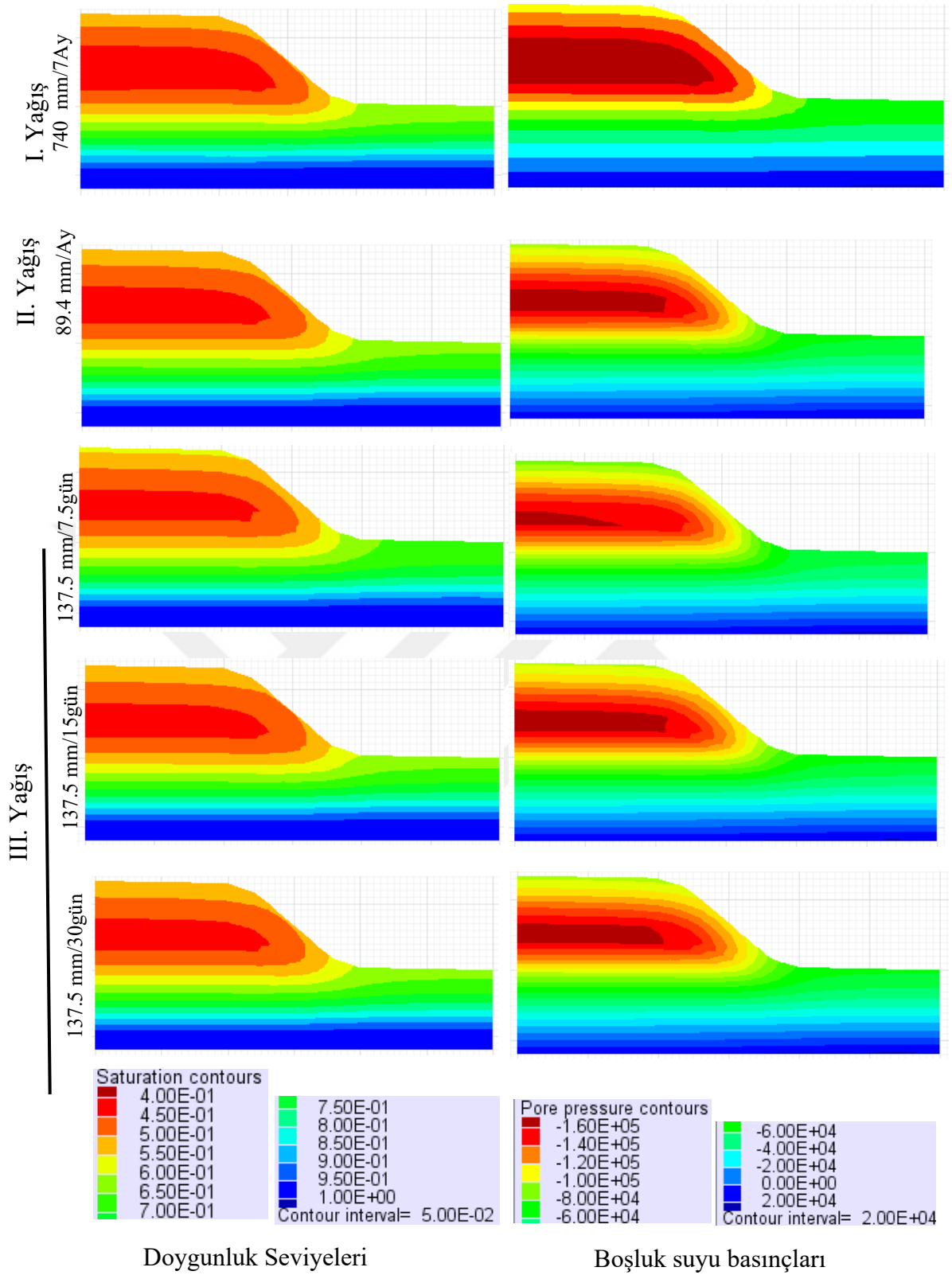
Yine 45° lik eğime sahip şev için ardışık yağışlar sonucu oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34, Şekil 35 ile verilmiştir.



Şekil 32. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 223.21 mm/Ay)

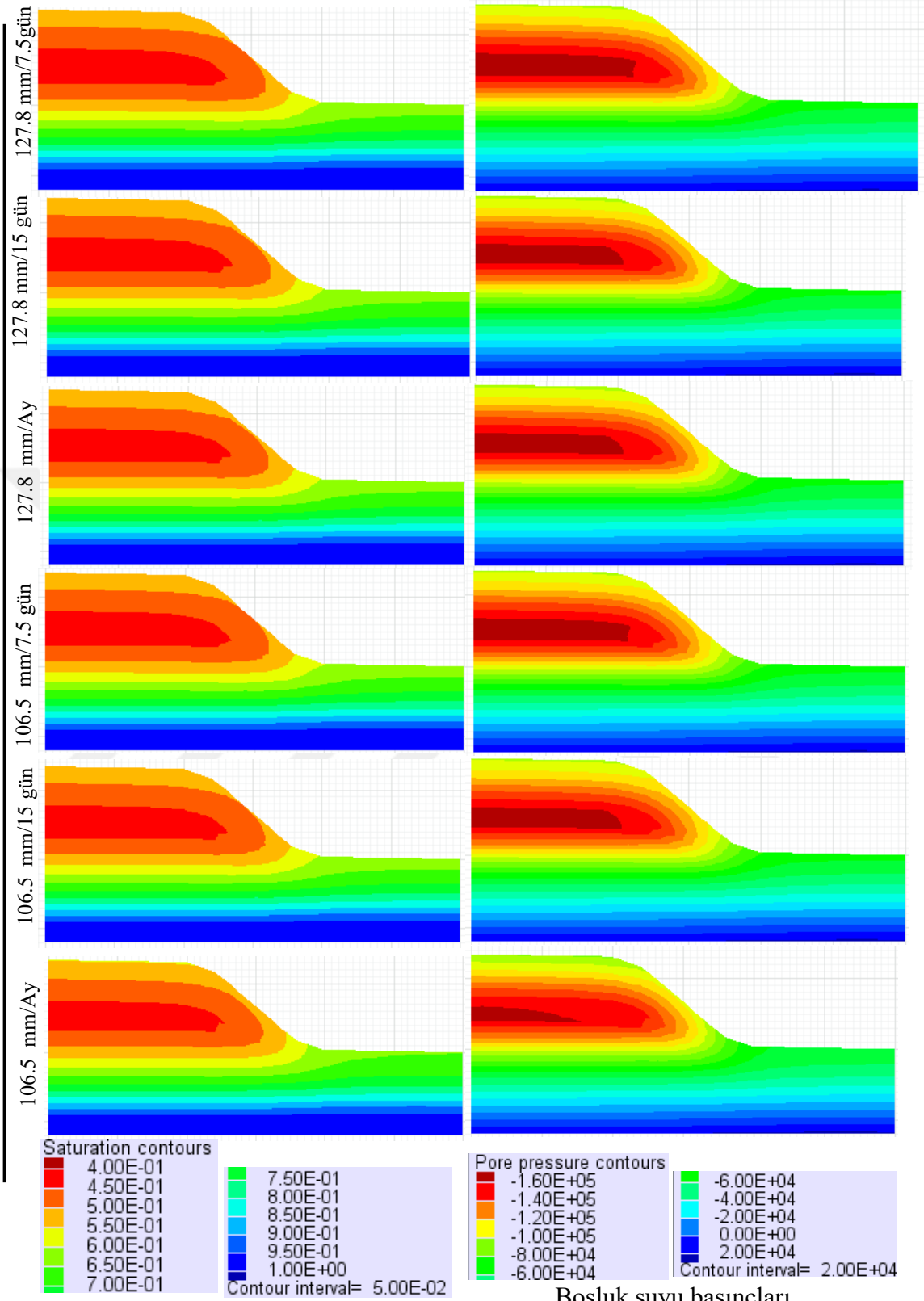


Şekil 33. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 223.21 mm/Ay) – Şekil 32' un devamı



Şekil 34. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 740 mm/Ay)

III. Yağış

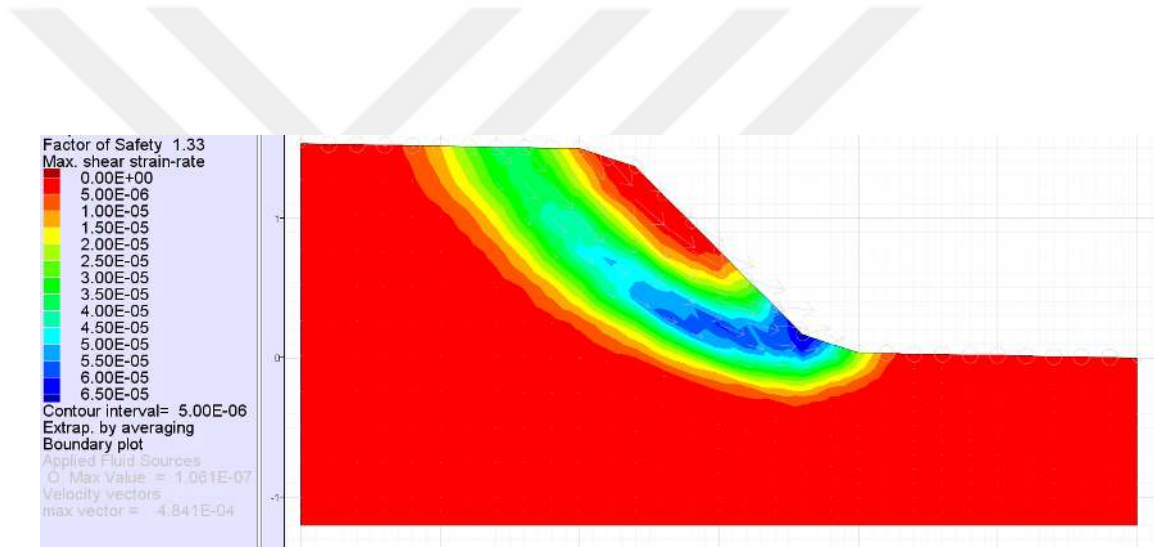


Doygunluk Seviyeleri

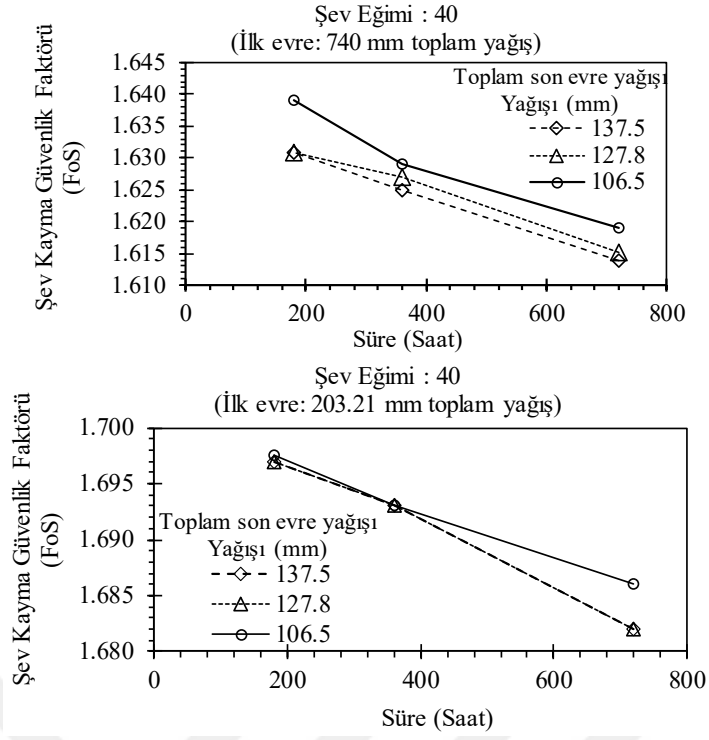
Boşluk suyu basınçları

Şekil 35. Yağışlar sonrası oluşan doygunluk ve boşluk suyu basınçları (Verilen yağışlar belirtilen sürede düşen toplam yağıştır) (ilk evre yağışı: 740 mm/Ay) – **Şekil 34'nin devamı**

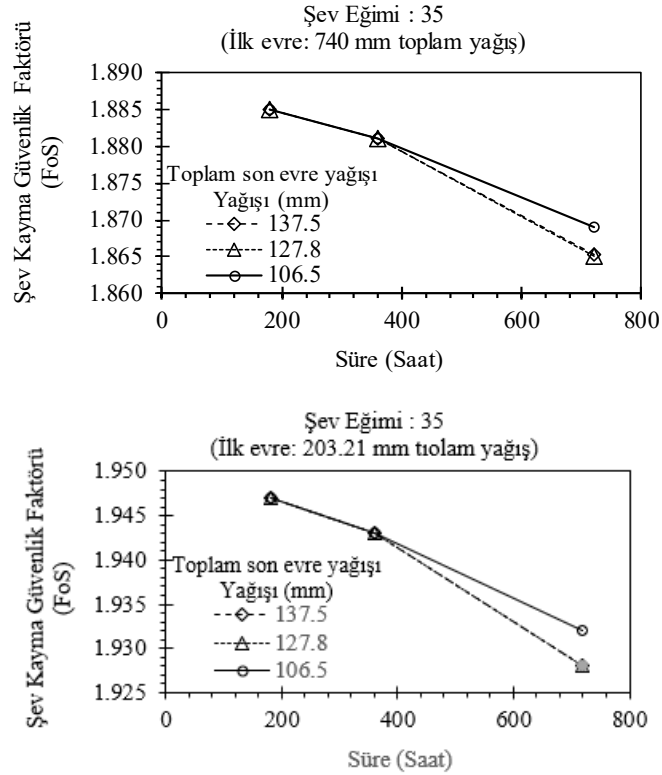
Şev güvenlikleri ardışık yağışlar uygulandıktan sonra Itasca – Flac yazılımında FoS (Factor of Safety) fis'i (modülü) çalıştırılarak şevlerin her yağış sonrası güvenlikleri belirlenmiştir. FoS işlemi bittikten sonra "restore" edilerek FoS öncesi duruma getirilmiş ve analiz kaldığı yerden devam ettirilmiştir. Aşağıda Şekil 36 ile bir FoS analizi sonrası elde edilen hız vektörleri ve şev güvenlik faktörü verilmiştir. Her yağış sonrası FoS ve restore çalıştırılarak 3 ardışık yağış (ilk yağış başlangıç koşullarını temsil etmekte) için farklı eğimlere sahip şevlerin yağışlar sonrası şev kayma güvenlikleri belirlenmiştir. Belirlenen güvenlik değerleri aşağıda Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39 ile verilmiştir.



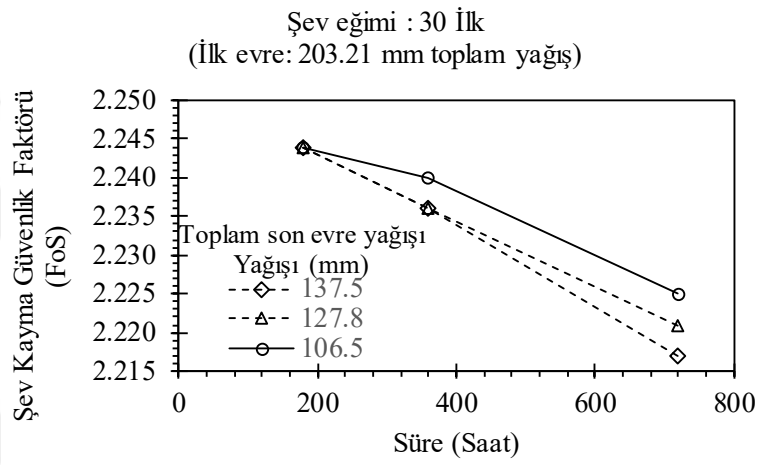
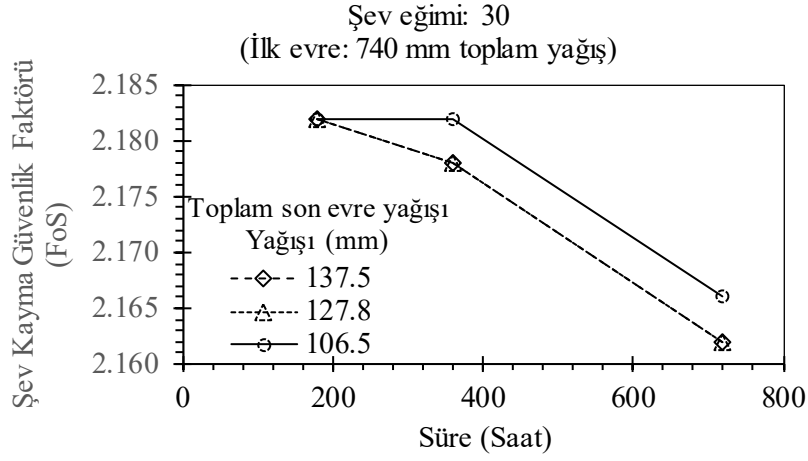
Şekil 36. Şev kayma güvenliği belirleme için yapılan örnek bir FoS sonuçları.



Şekil 37. 40° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.



Şekil 38. 35° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.



Şekil 39. 30° eğime sahip şev için ilk ve son evre yağışların şev kayma güvenliğine etkileri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile önceden Manisa Salihli bölgesinde iki farklı noktada gerçekleşmiş doygunluk değişimi neticesinde şev kayma vakaları geçmişteki çalışmaların ışığında ve laboratuvar çalışmaları ile desteklenerek yaşanan kayma vakalarına yağmur sonucu infiltrasyonun etkisi araştırılmıştır.

Şev kaymasının gerçekleştiği Manisa – Salihli civarındaki özel zeminlerin siltli kum zeminlerden oluştuğu SM sınıfı zemin olduğu laboratuvar deney sonuçları ile bulgulanmıştır.

Kayması gerçekleşen zeminlerin emme basıncı hacimsel su içeriği eğrileri filtre kâğıdı yöntemi ile belirlenmiştir. İki farklı noktada gerçekleşen şev kaymalarından alınan numuneler üzerinde yapılan emme basıncı deneylerinde iki farklı eğri elde edilmiştir. İki zemin numunesi için belirlenen zeminlerinin en büyük emme basınçları sırası ile 2887 kPa ve 3119 kPa olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında zemin numuneleri üzerinde yapılan hidrolik iletkenlik deneyinde zemin numunesinin hidrolik iletkenliği 5×10^{-6} m/s olarak belirlenmiştir. Önceki çalışmalarda şev kaymasının gerçekleştiği diğer konumdaki zemin numuneleri üzerinde yapılan hidrolik iletkenlik deneyinde zemin numunesinin hidrolik iletkenliği 1×10^{-7} om/s olarak belirlenmiştir. Bu durum sahadaki zeminlerin hidrolik iletkenliğinin değişkenlik gösterdiğine işaret etmektedir.

Laboratuvar çalışmaları ile zemin özellikleri belirlenen iki farklı noktadaki zeminler Manisa Salihli zeminleri olup konumları Şekil 16 ile verilmiştir.

Ele alınan 2 şev vakası ve bölgede benzer mevcut veya ileride oluşabilecek benzer şevlerin yağış neticesindeki infiltrasyon sonucu kayma güvenlikleri Itasca Flac yazılımında oluşturulan sayısal modeller ile analiz edilmiştir. Analizler neticesinde farklı şev açılarındaki oluşturulan şevlerin infiltrasyon neticesinde kayma güvenliklerinde azalmalar gözlemlendiği ancak analizlerde uygulanan yağış infiltrasyon değerlerinin şevlerde kayma gerçekleştirmediği görülmüştür. Geçmişte yaşanan şev kaymalarına yağışlara ilave başka etkilerin katkısı ile göçmelerin meydana gelmiş olabileceği sonucuna varılmıştır. İnceleme sahasındaki zeminlerde

doygunluk değişimi neticesinde yağışlara ilave şev göçmesine neden olabilecek diğer etkenler sulama, fabrika temiz veya atıksu deşarjı gibi daha yüksek infiltrasyonlara neden olabilecek faktörlerin eşlik etmiş olabileceği değerlendirilmiştir. Mevcut Manisa- Salihli bölgesinde yer alan inceleme sahası zeminleri için ortalama mevsimsel yağışların tek başına şev göçmesine yol açmasının pek mümkün olmadığı ve bu riskin oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır

Bu alışma ile yapılan analizlerde şev güvenliği üzerinde son yağışların yanında geçmişte uzun dönem etki eden ve şev bünyesindeki zeminlerin nem içeriğinin oluşmasına katkı sağlayan geçmiş dönem yağışlarında etkili olabileceği şekil 37, şekil 38 ve şekil 39 ile verilen grafiklerden anlaşılmaktadır. Uzun dönemli yağış infiltrasyonlarının (geçmişteki yağışların, göçmeye neden olan daha önceki yağışların) ve değişimlerinin de şev stabiliteleri üzerinde etkisinin olabileceği bu çalışmada grlmştir.

Bu alışma ile uzun dönemli yağış değişimlerine karşılık gelen iklim değişiklikleri ve bunun sonucundaki yağış rejimlerinde meydana gelebilecek değişimlerin şevlerde kaymaları tetikleyen nihai yağışlar gibi dikkate alınması, irdelenmesi ve incelenmesi gerektiği grlmştir.

İklim değişikliği olmasa dahi Dünya'nın eksenindeki eğikliğin döngüsel olarak değişmesinden dolayı Dünya'nın birçok bölgesinde iklimler periyodik olarak değişmektedir. Doğal olarak yaşanan bu sürece iklim değişikliğinin de eşlik etmesi uzun dönemli yağışlardaki değişimlerin şevlerin üzerindeki etkilerini bazı bölgeler için daha belirgin hale getirebileceği bu çalışmanın sonuçları göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] https://www.caykaragazetesi.com/wp-content/uploads/2016/02/of_caykara_yolu_heyelan-4.jpg
- [2] Fellenius, W. "Calculation of the stability of earth dams." In Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, 445-462. Washington, DC, USA; Paris, France: International Commission on Large Dams (ICOLD), 1936.
- [3] Janbu, N. "Application of composite slip surfaces for stability analysis." In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes 1954, Volume 3, pp. 43-49. Stockholm, Sweden, 1954.
- [4] Bishop, A.W. "The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes." Geotechnique 1955, 5, 7-17
- [5] Morgenstern, N.R.; Price, V.E. "The analysis of the stability of general slip surfaces." Geotechnique 1965, 15, 79-93.
- [6] Spencer, E. "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces." Geotechnique 1967, 17, 11-26.
- [7] Plaxis (2002). User Manuel 2D version 8, (Edited by Brinkgreve, R. J. B.), Delft University of Technology & Plaxis B. V., Netherland
- https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989
- [8] FLAC2D Version 7.0 Theory and Background, (2011), Fast Lagrangian Analysis of Continua Theory and Background. Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.
- <https://www.itascacg.com/software/support/documentation>
- [9] Bardhan, A., & Samui, P. "Application of artificial intelligence techniques in slope stability analysis: a short review and future prospects." International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE), 13(1) (2022), 1-22.
- <https://www.igi-global.com/article/application-of-artificial-intelligence-techniques-in-slope-stability-analysis/298988>
- [10] Taylor, D.W. "Stability of earth slopes", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, 24 (3) (1937), 337-86.

- [11] Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [12] Charles, W.W., Ng. & Menzies, B. Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering, New York: Taylor & Francis, 2007.
- [13] Richards, B.G. "Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors", in Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, A Symp. in Print, 35-46. Australia: Butterworths, 1965.
- [14] Sposito, G. The Thermodynamics of Soil Solutions. Oxford Clarendon Press, Sayfa: 223. Londra. 1981.
- [15] Fredlund, D.G., Xing, A. "Equations for Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical Journal, 31(3) (1994): 521-532.
- [16] Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal, 44(5) (1980), 892-898.
- [17] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, M. D. Fredlund, 2012 Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, S:939, New Jersey Interscience (2012).
- [18] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. An introduction to geotechnical engineering – Second Edition, NJ: Prentice-hall, Ss: 853, New York. 1981.
- [19] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. The shear strength of unsaturated soils. Canadian geotechnical journal, 15(3) (1978), 313-321
- [20] Brooks, R. H., and Corey, A. T. Hydraulic properties of porous media, Colorado State University Hydrology Paper, No. 3. Fort Collins, CO. 1964.
- [21] Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research, 12(3) 1976, 513-522.
- [22] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [23] Google Earth, (2024.12.01), <https://earth.google.com/web/>

- [24] Geoteknik Açıdan Araştırma, İnceleme, Analiz ve Değerlendirme Raporu . Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Evrak Tarih ve Sayısı 02.11.2018-E.32382 (2018).
- [25] Başarı, Ender. Geoteknik Açıdan Araştırma, İnceleme, Analiz ve Değerlendirme Raporu. Manisa Celal Bayar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Evrak Tarih ve Sayısı 07.10.2024-E.871351 (2024).
- [26] ASTM (American Society for Testing and Materials)
- [27] Standard, British, BS 1377-2: 1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests. Br Stand Institution London UK. 1990.
- [28] Darcy, H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris. 1856.
- [29] Döğan, Ö. 2025, “Zeminlerin Geçirgenliği – Slayt Sunumu, <https://slideplayer.biz.tr/slide/10301448/> (Erişim: 2025.02.17)
- [30] Itasca Consulting Group. FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua (Version 6.0). Itasca Consulting Group, 2024.
- [31] Sun, H., & Wang, Q. Stability Analysis of Slopes under Dynamic Loading Using FLAC. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 113 (2018), 51-60.
- [32] Malvern, L. E. “Introduction,” in Mechanics of a Continuous Medium. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall (1969).
- [33] Türkiye Cumhuriyeti Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının resmi iklim İstatistikleri web sayfası, (2024), <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=MANISA>.
- [34] Seki, K., Toride, N., & Th. van Genuchten, M. Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. J. Hydrol. Hydromech. 71(1) (2023): 22-34. <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039>
- [35] Durukan, S., & Başarı, E. Experimental Investigation of Hydro-Mechanical Soil Properties of a Slope Failure. GU J Sci, Part A, 9(4) (2022), 392-400.

EKLER

Ekler 1. : Laboratuvar Test Sonuçları

Özgöl Ağırlık Deneyleri											
Numune No	Deney No	Kap + Numune		Zemin Numunesi	Piknometre	T	Piknometre + Su		Dane Özgöl Ağırlığı	Sıcaklık Düzeltme Katsayısı	Düzeltilmiş Dane Özgöl Ağırlığı
		A	B				E	Zemin			
		(gr)	(gr)	D	(gr)	°C	(gr)	(gr)	G _s [*]	k	G _s
A	D-1	142.63	224.63	82.00	164.31	24.0	672.26	723.64	2.678	0.997	2.671
A	D-2	146.63	218.33	71.70	162.42	24.0	671.22	716.12	2.675	0.997	2.668
B	D-3	146.45	224.78	78.33	162.48	24.00	670.31	719.40	2.679	0.997	2.672
B	D-4	148.78	230.20	81.42	160.72	24.0	667.48	718.48	2.677	0.997	2.669

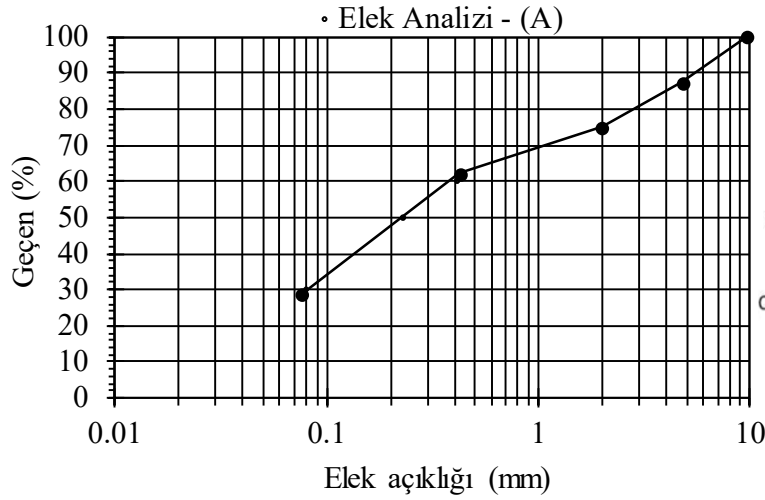
G_s : 2.67

Kıvam Deneyleri											
Numune Non Plastik Özellik Göstermiştir											

Su İçeriği Tayini Deneyi							
Numune No	Deney No	Kap +	Kap +	Zemin	Su	Su İçeriği	
		Numune (Nemli)	Numune (Kuru)				
		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(%)	
A	D-1	133.65	187.17	200.77	67.12	13.6	
A	D-2	124.78	188.65	200.65	75.87	12.0	
A	D-3	146.78	234.25	238.25	91.47	4.0	
B	D-4	133.85	284.32	289.32	155.47	5.0	
B	D-5	136.87	260.52	266.52	129.65	6.00	
B	D-6	156.47	269.43	277.43	120.96	8.0	
A	w :	6.447					
B	w :	7.123					

Elek Analizi - (A)

Elek No	Elek Açıklıklığı (mm)	Kap Ağırlığı A (gr)	Kap + Zemin B (gr)	Elekte Kalan C = B - A (gr)	Kümülatif Elek Üstünde Kalanlar	Elekten Geçen E (gr)	Elekten Geçen F (%)
					$D_i = \sum C_i$ (gr)		
3/8 inch	9.52	78.28	78.28	0	0	282.31	100.0
No : 4	4.750	78.28	108.28	35.70	35.70	246.61	87.4
No : 10	2.000	78.28	108.28	34.62	70.32	211.99	75.1
No : 40	0.425	78.28	114.51	36.23	106.55	175.76	62.3
No : 200	0.075	78.28	173.38	95.10	201.65	80.66	28.6
Elek Altı	-	78.28	143.94	65.66	282.31		



$$D_{60} \text{ (mm)} = 0.410$$

$$D_{30} \text{ (mm)} = 0.080$$

$$D_{10} \text{ (mm)} =$$

$$D_{50} \text{ (mm)} = 0.230$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = c_u =$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = c_c =$$

İnce Dane İçeriği

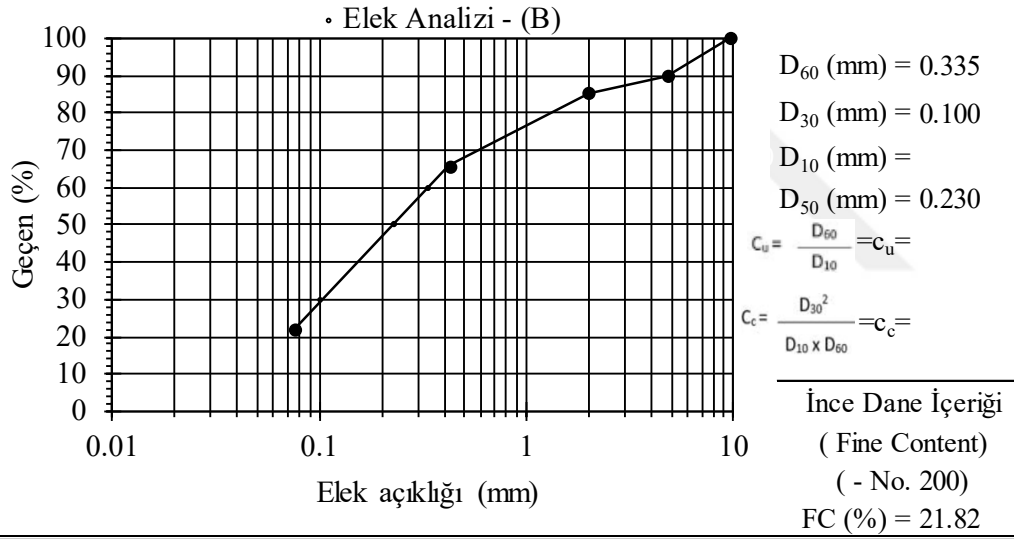
(Fine Content)

(- No. 200)

$$FC \text{ (%) } = 28.57$$

Elek Analizi - (B)

Elek No	Elek Açıklıklığı (mm)	Kap Ağırlığı A (gr)	Kap + Zemin B (gr)	Elekte Kalan C = B - A (gr)	Kümülatif Elek Üstünde Kalanlar $D_i = \sum C_i$ (gr)	Elekten Geçen E (gr)	Elekten Geçen F (%)
3/8 inch	9.52	78.17	106.59	28.42	28.42	519.0	100.0
No : 4	4.750	78.17	104.64	26.47	54.89	492.6	90.0
No : 10	2.000	78.17	102.88	24.71	79.60	467.9	85.5
No : 40	0.425	78.17	185.19	107.02	186.62	360.8	65.9
No : 200	0.075	78.17	319.58	241.41	428.02	119.4	21.8
Elek Altı	-	78.17	197.60	119.43	547.45		



Doğal Birim Hacim Ağırlık Deneyleri										
Numune No	Deney No	Numune + İlk				Numune + Son			Doğal Birim	
		Numune				Parafin	Parafin	Parafin	Numune	Hacim
		Ağırlığı	Parafin	Parafin	Hacim	Hacim	Hacmi	Hacmi	Hacmi	Ağırlık
		(gr)	(gr)	(gr)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(ml)	(gr/cm ³)
A	D-1	156.36	159.65	3.29	700	788	88.00	3.66	84.34	1.854
A	D-2	120.52	123.56	3.04	700	770	3.04	3.38	66.62	1.809
B	D-3	130.78	134.59	3.81	700	776	3.81	4.23	71.77	1.822
B	D-4	154.23	158.08	3.85	700	789	3.85	4.28	84.72	1.820
Parafin Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³) :							0.90	γ _{doğal} (gr/cm ³) =		1.826

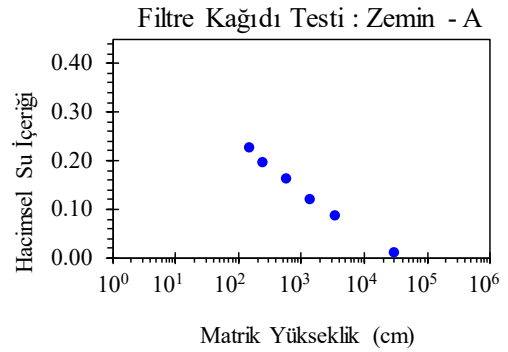
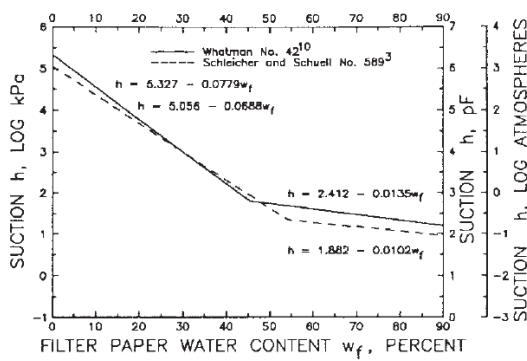
Doğal Birim Hacim Ağırlık Deneyleri											
Numune No	Deney No	w	G	W _s	V _s	V _b	e	n	γ _{kuru}	γ _{doygun}	
		%		(gr)	(ml - cm ³)	(ml - cm ³)			(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	
A	D-1	6.72	2.67	146.51	54.88	29.46	0.537	0.349	1.737	2.086	
A	D-2	6.42	2.67	113.25	42.42	24.20	0.571	0.363	1.700	2.063	
B	D-3	6.98	2.67	122.25	45.79	25.98	0.567	0.362	1.703	2.065	
B	D-4	7.13	2.67	143.97	53.93	30.80	0.571	0.363	1.699	2.063	
w (%) = 6.81							γ _{kuru} (gr/cm ³) = 1.710				
									γ _{doygun} (gr/cm ³) = 2.069		

Doğal Zemin İçin Belirlenen Değerler										
G = 2.670										
e = 0.561										
n = 0.360										
$\gamma_{\text{su}} \text{ (gr/cm}^3\text{)} = 1.00$										

Filtre Kağıdı Testi : Zemin - A										
Deney No	Yaş Numune + Kap		Kuru Numune + Kap		Kuru Zemin Ağırlığı (gr)	Su Ağırlığı (gr)	w (%)	V_{Numune} (cm ³)	Filtre Kağıdı Ağırlığı (gr)	Filtre Kağıdı Ağırlığı (gr)
	(Mold) Ağırlığı (gr)	(Mold) Ağırlığı (gr)	(Mold) Ağırlığı (gr)	(Mold) Ağırlığı (gr)					(Nemli)	(Kuru)
D-1	11.06	148.47	136.14	137.41	125.08	1.28	1.02	97.78	0.207	0.167
D-2	11.10	162.04	142.22	150.93	131.12	8.71	6.64	98.17	0.234	0.172
D-3	11.02	161.05	138.26	150.03	127.25	11.77	9.25	97.39	0.245	0.174
D-4	11.06	160.17	133.37	149.11	122.31	15.74	12.87	97.78	0.258	0.173
D-5	11.15	164.05	133.58	152.90	122.43	19.32	15.78	98.57	0.319	0.181
D-6	11.02	163.89	130.91	152.87	119.89	21.96	18.32	97.39	0.327	0.169

Deney No	w	Mold-A Yüksekliği (cm)	Mold-A Çapı (cm)	Mold-A V_A (cm ³)	Mold-B Yüksekliği (cm)	Mold-B Çapı (cm)	Mold-B V_B (cm ³)	V_{Numune} (cm ³)
D-1	1.02	2.49	5.00	48.89	2.49	5.00	48.89	97.78
D-2	6.64	2.50	5.00	49.09	2.50	5.00	49.09	98.17
D-3	9.25	2.48	5.00	48.69	2.48	5.00	48.69	97.39
D-4	12.87	2.49	5.00	48.89	2.49	5.00	48.89	97.78
D-5	15.78	2.51	5.00	49.28	2.51	5.00	49.28	98.57
D-6	18.32	2.48	5.00	48.69	2.48	5.00	48.69	97.39

γ_{su} (gr/cm ³) = 0.981		Filtre Kağıdı Su İçeriği (w _f)		Whatman No.42 Suction		Hacimsel Su İçeriği (V _{Su} /V _{Toplam})	
Deney No	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (%)	Ağırlığı (w _f)	h (cm)	h (kPa)	W _{su} (gr)	V _{su} (cm ³)
D-1	0.040	23.96	2887.46	28.87	28874.6	1.28	1.30
D-2	0.062	36.14	324.86	3.25	3248.6	8.71	8.87
D-3	0.071	41.03	135.13	1.35	1351.3	11.77	12.00
D-4	0.085	49.15	56.04	0.56	560.4	15.74	16.05
D-5	0.138	76.43	24.00	0.24	240.0	19.32	19.69
D-6	0.158	93.76	14.00	0.14	140.0	21.96	22.39



Filtre Kağıdı Testi : Zemin - B

Deney No	Kap	Yaş Numune +	Kuru Numune +	Yaş Numune +	Kuru Zemin	Su	w	V _{Numune}	Filtre Kağıdı Ağırlığı	Filtre Kağıdı Ağırlığı
	(Mold)	(Mold)	(Mold)	(Mold)	(Mold)	(Mold)			(Nemli)	(Kuru)
	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (gr)	Ağırlığı (gr)	%	(cm ³)	(gr)	(gr)
D-1	11.06	166.42	152.87	155.36	141.81	2.48	1.75	97.39	0.212	0.172
D-2	11.02	158.68	141.93	147.67	130.92	5.73	4.38	97.00	0.223	0.165
D-3	11.19	165.35	141.73	154.16	130.54	12.43	9.52	98.57	0.310	0.182
D-4	11.15	158.36	128.39	147.21	117.25	18.82	16.05	98.17	0.387	0.177
D-5	11.10	158.87	118.69	147.77	107.58	29.08	27.03	97.78	0.448	0.175

Deney No	w	Mold-A Yüksekliği	Mold-A Çapı	Mold-B V _A	Mold-B Yüksekliği	Mold-B Çapı	V _B	V _{Numune}
	%	(cm)	(cm)	(cm ³)	(cm)	(cm)	(cm ³)	(cm ³)
D-1	1.75	2.48	5.00	48.69	2.48	5.00	48.69	97.39
D-2	4.38	2.47	5.00	48.50	2.47	5.00	48.50	97.00
D-3	9.52	2.51	5.00	49.28	2.51	5.00	49.28	98.57
D-4	16.05	2.50	5.00	49.09	2.50	5.00	49.09	98.17
D-5	27.03	2.49	5.00	48.89	2.49	5.00	48.89	97.78

Deney No	Filtre Kağıdı Su Ağırlığı	Filtre Kağıdı Su İçeriği (w _f)	Whatman No.42 Suction			W _{su}	V _{su}	Hacimsel Su İçeriği (V _{su} /V _{Toplam}) □ (%)
			h	(Atmosf)	(cm)			
	(gr)	(%)	(kPa)	er	(cm)	(gr)	(cm ³)	(cm ³ /cm ³)
D-1	0.040	23.53	3119.31	31.19	31193.1	2.48	2.53	2.60
D-2	0.058	35.29	378.08	3.78	3780.8	5.73	5.85	6.03
D-3	0.128	70.59	28.78	0.29	287.8	12.43	12.67	12.85
D-4	0.210	118.75	6.44	0.06	64.4	18.82	19.18	19.54
D-5	0.273	156.25	2.01	0.02	20.1	29.08	29.64	30.32

