



**KATKILI MALZEME İLE İNŞA EDİLEN DOLGU
BARAJ ŞEVLERİNİN SAYISAL MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Veli Burak SEZEN

**Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATKILI MALZEME İLE İNŞA EDİLEN DOLGU BARAJ
ŞEVLERİNİN SAYISAL MODELLEMESİ

Veli Burak SEZEN

Danışman
Prof. Dr. İsmail ZORLUER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Veli Burak SEZEN tarafından hazırlanan “Katkılı Malzeme ile İnşa Edilen Dolgu Baraj Şevlerinin Sayısal Modellemesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30 / 07 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Başkan : Prof. Dr. İsmail ZORLUER
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Üye : Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30 / 07 / 2024

Veli Burak SEZEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KATKILI MALZEME İLE İNŞA EDİLEN DOLGU BARAJ ŞEVLERİNİN SAYISAL MODELLEMESİ

Veli Burak SEZEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail ZORLUER

Artan nüfus ve sanayi faaliyetleri, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini ve çevresel etkilerini önemli hale getirmiştir. Bu bağlamda, dolgu barajlar, su depolama ve yönetimi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Su kaynaklarının verimli kullanımı ve korunması, çevresel sürdürülebilirlik için büyük önem taşımaktadır. Ancak, dolgu barajların inşasında karşılaşılan stabilite sorunları, baraj güvenliğini tehlikeye atabilir ve ciddi çevresel problemlere yol açabilir. Bu nedenle, baraj stabilitesinin artırılması ve güvenliğinin sağlanması, mühendislik açısından öncelikli bir konudur.

Bu çalışma, iyileştirilmiş zemin koşullarında şev stabilitesinin bilgisayarla analiz edilmesini amaçlamaktadır. Katkılı dolgu malzemeleri kullanılarak inşa edilen dolgu barajların stabilitesi, Slide ve Plaxis yazılımları ile incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, katkılı malzemelerin dolgu barajların güvenlik katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek ve en uygun katkı malzemesi ve karışım oranını tespit etmektir. Analizler, memba ve mansap şev stabiliteleri üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Güncel çevre sorunları ve iklim değişikliği göz önünde bulundurulduğunda, baraj güvenliği ve stabilitesi daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle, dolguda kullanılan malzemelerin şev stabilitesine etkilerinin detaylı incelenmesi gereklidir.

Araştırma, farklı katkı malzemelerinin dolgu baraj güvenliğine olan etkilerini ortaya koyarak daha güvenli ve sürdürülebilir baraj tasarımlarının yapılabilmesini hedeflemektedir.

Bu çalışma sonucunda, iyileştirilmiş zemin koşullarının toprak dolgulu barajların stabilitesini önemli ölçüde artırdığı ve bu tekniklerin güvenli baraj tasarımı için kritik öneme sahip olduğu görülmüştür.

2024, xiv + 98 sayfa

Anahtar Kelimeler: Şev Stabilitesi, İyileştirilmiş Zemin, Dolgu Baraj, Mermer Tozu, Cam Elyaf, Polipropilen Elyaf

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NUMERICAL MODELING OF EMBANKMENT DAM SLOPES CONSTRUCTED WITH IMPROVED MATERIAL

Veli Burak SEZEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail ZORLUER

The increasing population and industrial activities have made sustainable management of water resources and their environmental impacts crucial. In this context, embankment dams play a critical role in water storage and management. Efficient use and preservation of water resources are paramount for environmental sustainability. However, stability issues encountered during the construction of embankment dams can jeopardize dam safety and lead to serious environmental problems. Therefore, enhancing dam stability and ensuring safety is a priority in engineering.

This study aims to analyze the slope stability in embankment dams with improved soil conditions using computer analysis. The stability of embankment dams constructed with stabilized fill materials was investigated using Slide and Plaxis software. The main objective of the study is to determine the effects of stabilized materials on the safety factor of embankment dams and identify the most suitable additive material and mixture ratio. Analyses were conducted on upstream and downstream slope stabilities, and the data obtained were compared. Given current environmental issues and climate change, dam safety and stability have become even more critical. Therefore, a detailed examination of the effects of fill materials on slope stability is essential.

The research aims to facilitate safer and more sustainable dam designs by highlighting the impacts of different additive materials on embankment dam safety.

The study concludes that improved soil conditions significantly enhance the stability of soil-filled dams and these techniques are critically important for safe dam design.

2024, xiv + 98 pages

Keywords: Slope Stability, Improved Ground, Embankment Dam, Marble Powder, Glass Fiber, Polypropylene Fiber



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail ZORLUER'e, araştırma ve analiz süresince her türlü öneri ve eleştirileriyle yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat KİLİT'e, araştırma süresince yardımlarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman GÜCEK'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Veli Burak SEZEN
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Zemin İyileştirme.....	3
2.1.1 Mekanik Stabilizasyon	5
2.1.1.1 Vibro Kompaksiyon (Flatasyon)	6
2.1.1.2 Dinamik Kompaksiyon.....	6
2.1.1.3 Patlatma ile Kompaksiyon.....	8
2.1.2 Kimyasal Stabilizasyon.....	8
2.1.2.1 Çimento ile Stabilizasyon.....	9
2.1.2.2 Kireç ile Stabilizasyon.....	9
2.1.2.3 Uçucu Kül Stabilizasyonu	10
2.1.2.4 Cam Elyaf Stabilizasyonu	10
2.1.2.5 Polipropilen Stabilizasyonu.....	11
2.1.3 Güçlendirme	12
2.1.3.1 Taş Kolonlar (Vibro yer değiştirme)	12
2.1.3.2 Geosentetikler ile Güçlendirme	13
2.1.4 Zemin İyileştirme ile İlgili Yapılan Çalışmalar	14
2.2 Şev Stabilitesi	18
2.2.1 Şev Kaymasının Nedenleri.....	19
2.2.2 Şev Stabilitesinin Temel Prensipleri	20
2.2.3 Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri	21
2.2.4 Limit Denge Yöntemleri	21

2.2.4.1 Fellenius (Swedish Circle) Yöntemi	22
2.2.4.2 Bishop'un Basitleştirilmiş Yöntemi.....	22
2.2.4.3 Janbu'nun Genel Limit Denge Yöntemi	22
2.2.4.4 Morgenstern-Price Yöntemi	23
2.2.4.5 Spencer Yöntemi	23
2.2.5 Sonlu Elemanlar Yöntemleri.....	23
2.2.6 Şev Stabilitesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	25
2.3 Dolgu Barajlar.....	30
2.3.1 Toprak Dolgu Barajlar	31
2.3.2 Kaya Dolgu Barajlar	33
2.3.3 Dolgu Barajlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar	35
3. MATERİYAL ve METOT	37
3.1 Materyal	37
3.1.1 Dolgu Baraj Geometrisi	37
3.1.2 Kil Zemin	39
3.1.3 Cam Elyaf.....	39
3.1.4 Polipropilen Elyaf	40
3.1.5 Mermer Tozu.....	40
3.1.6 SLIDE Programı	41
3.1.7 PLAXIS Programı.....	41
3.2 Yöntem.....	41
3.2.1 Zemin Tanımlama Deneyleri	42
3.2.1.1 Özgül Ağırlık Tayini	42
3.2.1.2 Dane Çapı Dağılımı.....	43
3.2.1.3 Kıvıam Limit Deneyi.....	44
3.2.1.4 Kompaksiyon Deneyi	46
3.2.2 Optimum Oran için Numunelerin Hazırlanması	48
3.2.3 Serbest Basınç Deneyi.....	49
3.2.4 Numune Hazırlanması.....	50
3.2.5 Üç Eksenli Basınç Deneyi.....	50
3.2.6 Slide Programı Üzerinden Modelleme ve Veri Girişi.....	51
3.2.7 Plaxis 2D Programı Üzerinden Modelleme ve Veri Girişi	54

4. BULGULAR	56
4.1 Zemin Tanımlama Deneyleri Sonuçları.....	56
4.1.1 Özgöl Ağırlık Tayini Sonuçları.....	56
4.1.2 Dane Çapı Dağılımı Sonuçları	56
4.1.3 Kıvıam Limit Deney Sonuçları	57
4.1.4 Kompaksiyon Deney Sonuçları.....	59
4.1.5 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları	60
4.1.6 Slide Programı Analiz Sonuçları.....	63
4.1.6.1 %10 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları	73
4.1.6.2 %15 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları	76
4.1.6.3 %20 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları	78
4.1.7 Plaxis 2D Programı Analiz Sonuçları	81
4.1.7.1 Plaxis 2D Memba Tarafında Güvenlik Sayılarının Elde Edilmesi.....	81
4.1.7.2 Plaxis 2D Mansap Tarafında Güvenlik Sayılarının Elde Edilmesi	83
4.1.8 Maliyet Analizi.....	86
4.1.8.1 %10 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi.....	88
4.1.8.2 %15 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi.....	89
4.1.8.3 %20 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi.....	90
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	91
6. KAYNAKLAR.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	98

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

W	Ağırlık
γ_s	Özgül Ağırlık
ρ_n	Yaş Birim Hacim Ağırlık
ρ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlık
w	Su Muhtevası
gr	Gram
cm	Santimetre
mm	Milimetre
km	Kilometre
m	Metre
cm ³	Santimetreküp
μm	Mikrometre
kg	Kilogram
P	Yük
c	Kohezon
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı
qu	Serbest Basınç Dayanımı
GPa	Gigapaskal
CO ₂	Karbondioksit
°C	Santigrad Derece
%	Yüzde
NaHCO ₃	Sodyum Bikarbonat
NaPO ₃	Sodyum Heksametafosfat

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
CE	Cam Elyaf
CL	Düşük Plastisiteli Silt, Kil
DSİ	Devlet Su İşleri
Fç	Filtre Çakıl
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
Fk	Filtre Kum
Ft	Filtre Tüvenan
K	Katkısız
LL	Likit Limit
MT	Mermer Tozu
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
PP	Polipropilen
UCSC	Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
UK	Uçucu Kül

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	5
Şekil 2.2 Homojen Dolgu Toprak Baraj.....	32
Şekil 2.3 Kaya Dolgu Baraj.....	34
Şekil 3.1 Akdeğirmen Barajı'nın Kesiti.....	37
Şekil 3.2 Akdeğirmen Barajı'nın AutoCAD çizimi	38
Şekil 3.3 Slide programı üzerinde modelleme	51
Şekil 3.4 Plaxis 2D programı üzerinde modelleme	54
Şekil 4.1 Granülometri eğrisi	57
Şekil 4.2 3 farklı numunenin likit limit grafiği	58
Şekil 4.3 3 farklı numunenin plastisite kartı	58
Şekil 4.4 Kil zemin ve cam elyaf karışımlarının eksenel basınç değerleri.....	60
Şekil 4.5 Kil zemin ve polipropilen elyaf karışımlarının eksenel basınç değerleri.....	61
Şekil 4.6 Kil zemin, cam elyaf ve mermer tozu karışımlarının eksenel basınç değerleri	62
Şekil 4.7 Kil zemin, polirpopilen elyaf ve mermer tozu karışımlarının eksenel basınç değerleri.....	63
Şekil 4.8 Katkısız malzemenin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı	63
Şekil 4.9 %1 CE malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı.....	64
Şekil 4.10 %1 PP malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı	64
Şekil 4.11 %1 CE + %15 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı.....	65
Şekil 4.12 %1 PP + %5 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı.....	65
Şekil 4.13 Katkısız malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı ..	67
Şekil 4.14 %1 CE malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı	67
Şekil 4.15 %1 PP malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı.....	68
Şekil 4.16 %1 CE + %15 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı.....	68
Şekil 4.17 %1 PP + %5 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı.....	69
Şekil 4.18 Memba tarafında Bishop ve Janbu yöntemlerine göre güvenlik sayısı değişimi	71
Şekil 4.19 Mansap tarafında Bishop ve Janbu yöntemlerine göre güvenlik sayısı değişimi	72

Şekil 4.20 Plaxis 2D memba tarafı güvenlik sayısı.....	82
Şekil 4.21 Katkısız malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı	83
Şekil 4.22 %1 CE malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı.....	83
Şekil 4.23 %1 PP malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı	84
Şekil 4.24 %1 CE + %15 MT malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı ..	84
Şekil 4.25 %1 PP + %5 MT malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı	85



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin karşılaştırılması	25
Çizelge 3.1 Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri	38
Çizelge 3.2 Kil zeminin fiziksel özellikleri.....	39
Çizelge 3.3 Cam elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri.....	39
Çizelge 3.4 Polipropilen elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri	40
Çizelge 3.5 Mermer tozunun fiziksel özellikleri	40
Çizelge 3.6 Mermer tozunun kimyasal özellikleri (%)	40
Çizelge 4.1 Özgül ağırlık tayini sonuçları.....	56
Çizelge 4.2 Dane çapı dağılımı sonuçları.....	56
Çizelge 4.3 Elek analizi sonuçları	57
Çizelge 4.4 Kompaksiyon deney sonuçları	59
Çizelge 4.5 Dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları	66
Çizelge 4.6 Dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları.....	69
Çizelge 4.7 %10 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları	73
Çizelge 4.8 %10 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları	74
Çizelge 4.9 %15 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları	76
Çizelge 4.10 %15 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları	76
Çizelge 4.11 %20 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları	79
Çizelge 4.12 %20 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları	79
Çizelge 4.13 Dolgu barajın Plaxis 2D programında elde edilen güvenlik sayıları	85
Çizelge 4.14 Dolgu barajın birim hacim verileri.....	86
Çizelge 4.15 Malzemelerin birim fiyatları	87
Çizelge 4.16 %1 PP + %5 MT maliyet analizi.....	87
Çizelge 4.17 %10 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri	88
Çizelge 4.18 %10 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi	88
Çizelge 4.19 %15 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri	89

Çizelge 4.20 %15 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi	89
Çizelge 4.21 %20 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri	90
Çizelge 4.22 %20 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi	90



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Vibro Kompaksiyon (Flatasyon) İşlemleri	6
Resim 2.2 Dinamik Kompaksiyon İşlemleri.....	7
Resim 2.3 Taş Kolon İşlemi.....	13
Resim 2.4 Gebere Barajı Toprak Dolgu Baraj	32
Resim 2.5 Hasan Uğurlu Barajı Kil çekirdekli kaya dolgu tipindeki bir baraj	34
Resim 3.1 Afyonkarahisar Akdeğirmen Barajı	37
Resim 3.2 Numune alım aşamaları, a) Etüv kurusu malzemenin ufalanması, b) Uygun oranda elyaf malzeme tartılması, c) Malzemelerin homojen şekilde karıştırılması, d) Standarda uygun şekilde sıkıştırma işlemi yapılması, e) Press makinasından numune alımı, f) Alınan numunelerin streçlenerek kür sürelerinde bekletilmesi.....	48
Resim 3.3 Slide programında materyal verilerinin girişi	52
Resim 3.4 Slide programında permeabilite ve su muhtevalarının girişi	53
Resim 3.5 Plaxis 2D programında materyal girişi	54
Resim 3.6 Plaxis 2D programında materyal parametrelerinin girilmesi.....	55

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve sanayi faaliyetleri, su kaynaklarının yönetimini ve çevresel etkilerini daha karmaşık hale getirmiştir. Su kaynakları üzerindeki bu baskı, iklim değişikliği ve kuraklık gibi çevresel sorunlarla birleşerek su depolama ve yönetimi konularında ciddi zorluklar yaratmaktadır. Zemin iyileştirme teknikleri ve şev stabilitesi, bu bağlamda, mühendislik projelerinin güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle dolgu barajlar gibi büyük ölçekli yapılar, güvenli ve sürdürülebilir su yönetimi sağlamak için güvenilir zemin stabilitesine ihtiyaç duyar (Coduto vd. 1999).

Geoteknik mühendisliği, zemin ve kaya malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini inceleyerek, yapıların güvenli ve ekonomik tasarımını sağlamak amacıyla geliştirilen bir mühendislik dalıdır (Jain ve Punmia 2005). İnşaat mühendisliği ise, bu temeller üzerine inşa edilen yapıların projelendirilmesi ve uygulanması ile ilgilenir. Dolgu barajlar, bu iki mühendislik disiplininin birleştiği ve kompleks zemin koşullarının yönetilmesi gereken projelerdir. Zemin iyileştirme teknikleri, bu tür yapıların güvenliğini sağlamak için vazgeçilmezdir. Mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon ve geoteknik mühendisliği uygulamaları, zemin mukavemetini artırarak yapısal stabiliteyi sağlar. Bu teknikler, dolgu barajların şev stabilitesi ve genel güvenliğini artırmak için kritik öneme sahiptir (Das 2011).

Şev stabilitesi, baraj güvenliği ve zemin iyileştirme çalışmaları için temel bir parametredir. Farklı zemin malzemelerinin stabilize üzerindeki etkilerinin anlaşılması, dolgu barajlar gibi yapılar için hayati öneme sahiptir. Zemin iyileştirme teknikleri arasında mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon ve geoteknik mühendisliği uygulamaları yer almaktadır. Bu yöntemler, zemin mukavemetini artırarak yapısal stabiliteyi sağlar. Örneğin, cam elyaf, polipropilen elyaf ve mermer tozu gibi malzemeler, zemin iyileştirme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Cam elyaf, yüksek çekme mukavemeti ve kimyasal direnci ile zemin stabilitesini artırırken, polipropilen elyaf, esnekliği ve çatlak direnci ile dikkat çekmektedir. Mermer tozu ise, zemin yoğunluğunu ve mukavemetini artırarak stabilizeye katkıda bulunmaktadır (Sarsby 2006).

Dolgu barajlar, su depolama kapasiteleri ve taşkın kontrolü sağlama yetenekleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu barajların inşası sırasında ve sonrasında karşılaşılan başlıca sorunlar arasında şev stabilitesi problemleri, sızma (seepage) ve zemin deformasyonları yer almaktadır. Şev stabilitesi, barajın güvenliği açısından en kritik unsurlardan biridir. Zemin malzemelerinin farklı özellikleri, şev stabilitesini doğrudan etkileyebilir ve barajın işletme ömrünü kısaltabilir.

Çevresel açıdan, dolgu barajlar inşa edildiği bölgelerde ekosistemleri değiştirebilir ve yerel su döngüsünde değişikliklere neden olabilir. Baraj göllerinin oluşumu, doğal habitatları su altında bırakarak biyolojik çeşitliliği azaltabilir ve suyun aşağı akışındaki bölgelerde su kıtlığına yol açabilir. Ayrıca, iklim değişikliği ile artan aşırı hava olayları ve yağış miktarlarındaki dalgalanmalar, barajların su yönetimi ve stabilize sorunlarını daha da karmaşık hale getirmektedir. Dolgu barajların güvenliği, bu nedenle, sadece yapısal dayanıklılık değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik öneme sahiptir. Barajların yıkılması veya sızma problemleri, ciddi çevresel ve ekonomik sonuçlara yol açabilir (Emerald Publishing 2020).

Bu çalışma, iyileştirilmiş zemin koşullarında dolgu barajların şev stabilitesinin bilgisayarla analiz edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, beş farklı zemin malzemesi kullanılarak inşa edilen dolgu barajların stabilitesi, Slide ve Plaxis yazılımları ile incelenmiş, memba ve mansap şev stabiliteyi üzerinde analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Tezin temel hedefi, farklı zemin malzemelerinin dolgu barajların güvenlik katsayısı üzerindeki etkilerini belirlemek ve en uygun zemin malzemesini tespit etmektir. Bu çalışma, dolgu barajların tasarım ve inşasında karşılaşılan zemin stabilitesi problemlerine yönelik çözüm önerileri sunarak, daha güvenli ve sürdürülebilir baraj tasarımlarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, Slide ve Plaxis yazılımlarından elde edilen sonuçların karşılaştırılması, mühendislik uygulamalarında yazılım seçiminde yol gösterici olacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Zemin İyileştirme

Barajlar, tüneller, karayolları, limanlar, rıhtım yapıları, çeşitli binalar, kanalizasyon ve içme suyu sistemleri, dayanma yapıları ile petrol ve gaz boru hatları gibi mühendislik yapıları, genellikle zemin içinde yer alır. Bu yapılaşma, zamanla yapı ve zemin koşullarının zorlanmasına ve daha elverişsiz alanlarda inşaat yapılmasına neden olmaktadır. Zeminin bu tür yapılarda oynadığı rol, yapılar tarafından oluşturulan ve zemine aktarılan gerilmeleri güvenle taşımak ve yapı yükü altında oluşabilecek deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamaktır. Ancak, mühendislik yapılarının temel zemini her zaman bu gereksinimleri karşılamayabilir. Bu durumlarda, aşağıdaki önlemler alınarak zemin iyileştirmesi yapılması gerekebilir:

- Yapı temelini tasarlarken mevcut zemini göz önünde bulundurmak,
- Zayıf zemini kaldırmak ve yerine yüksek taşıma kapasiteli zemin eklemek.
- Uygun tekniği kullanarak zayıf zemini geçmek ve temeli sağlam katmanlar üzerine inşa etmek.
- Zeminin özelliklerini yerinde yapılan işlemlerle iyileştirmek.

Yavaş ama emin adımlarla gelişen zemin teknolojileri, altyapı endüstrisine uygun, yüksek kaliteli ve güvenli çözümler sunmaktadır. Önemli olan, yeterli ve güvenli uygulamayı sağlamak için uygun teknolojiyi kullanmaktır. Geoteknik mühendisleri, arazide zemin özelliklerinin getirdiği kısıtlamaları kabullenmek veya bu özellikleri "zemin iyileştirme yöntemleri" ile ıslah etmek zorundadır. Zemin iyileştirmesi genellikle zeminin kayma direncinin artırılması, geçirimsizliğin azaltılması ve iri daneli zeminlerde sıkılığın ve ince daneli zeminlerde kıvamın artırılmasını hedefler. Zemin iyileştirilmesinde temel ilke, zeminin boşluk oranının azaltmak veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulmasıdır.

Zeminlerin ıslah edilmesinde hedeflenen başlıca amaçlar şunlardır:

- Zeminin taşıma kapasitesini arttırmak,

- Zemin deformasyonunu ve sıvılaşma riskini en aza indirmek;
- Şişme ve büzülme potansiyelini azaltmak;
- Geçirgenliği azaltmak;
- Sıkışabilirlili i azaltmak;
- Korozyon ve erozyonu önlemek;
- Yük altında oturmaları azaltıp, konsolidasyonu hızlandırmak;
- Zemini drene etmek.

Zemin iyileştirmenin başlıca amacı, zeminin temel taşıma kapasitesini artırarak yapılaşmaya uygun hale getirmektir. Bu, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından kritik bir önem taşır. Zemini stabilize etmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın olarak uygulanan yöntemler arasında mekanik stabilizasyon, kimyasal stabilizasyon, güçlendirme ve geosentetik malzemelerle yapılan iyileştirmeler bulunmaktadır.

Zemin iyileştirme yönteminin seçimini, zeminin geoteknik özelliklerine, projenin türüne, ekonomik koşullara ve çevresel faktörlere bağlı olarak yapılmaktadır. Zemin özelliklerini doğru şekilde belirlemek için kapsamlı zemin etütlerinin yapılması gereklidir. Bu etütler, zeminin taşıma kapasitesi, permeabilite, sıkışma özellikleri gibi temel mühendislik parametrelerini ortaya koyar.

Mekanik stabilizasyon, zeminin sıkıştırılması ve yoğunluğunun artırılması ile gerçekleştirilir. Kimyasal stabilizasyon ise  imento, kireç veya diğer kimyasal maddelerin zemine eklenmesi ile zeminin mukavemet ve dayanıklılığının artırılmasını sa lar. Güçlendirme yöntemleri, zemin içine yerleştirilen donatı elemanları ile zemin mukavemetinin artırılmasıdır. Ayrıca, geosentetik malzemeler (geotekstiller, geogridler, geomembranlar) kullanılarak zemin iyileştirmeleri yapılmakta ve su ge irimsizli i sağlanmaktadır.

Zemin iyileştirme projelerinde, zeminin mevcut durumunun doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve uygun iyileştirme yöntemlerinin seçilmesi, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sa lar. Bu nedenle, zemin etütlerinin detaylı bir şekilde yapılması ve

uzman mühendisler tarafından değerlendirilmesi büyük önem taşır. Zemin iyileştirme teknikleri, inşaat projelerinin başarısında önemli bir rol oynar ve yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır.



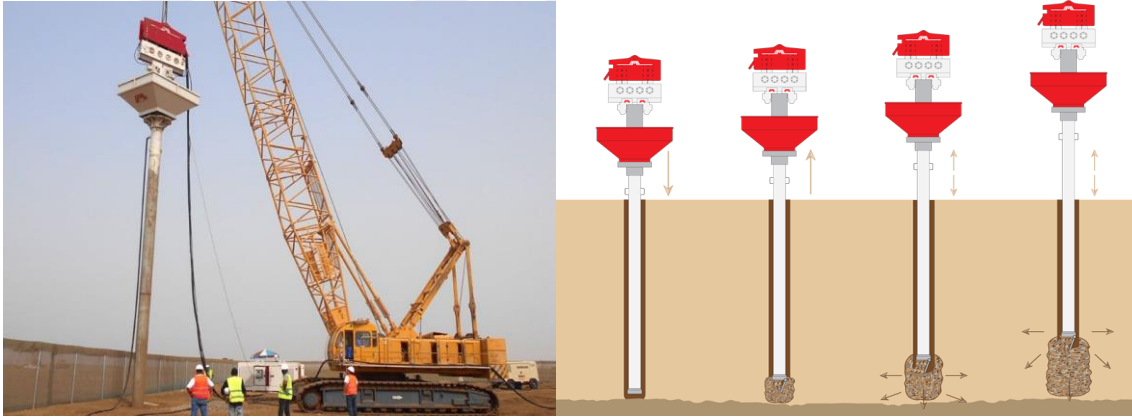
Şekil 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri

2.1.1 Mekanik Stabilizasyon

Mekanik zemin modifikasyonu, dış kuvvetler tarafından toprak yoğunlaşmasını ifade eder. Çoğu pratik uygulamada mekanik modifikasyon sıkıştırma işlemi ile eş anlamlıdır. Klasik anlamda sıkıştırma, doymamış bir toprağın hava ile doldurulmuş boşlukların hacminde bir azalma ile yoğunlaşması anlamına gelirken, katı madde hacmi ve su içeriği esasen aynı kalır. Sıkıştırma, toprak parçacıklarının ani ağır yükler veya dinamik kuvvetlerin uygulanmasıyla birbirine daha yakın paketlenmesini ima eder (Hausmann, 1990). Mekanik iyileştirme, kompaksiyon ile yük uygulayarak zeminin yoğunluğunun artırılması işlemidir.

2.1.1.1 Vibro Kompaksiyon (Flatasyon)

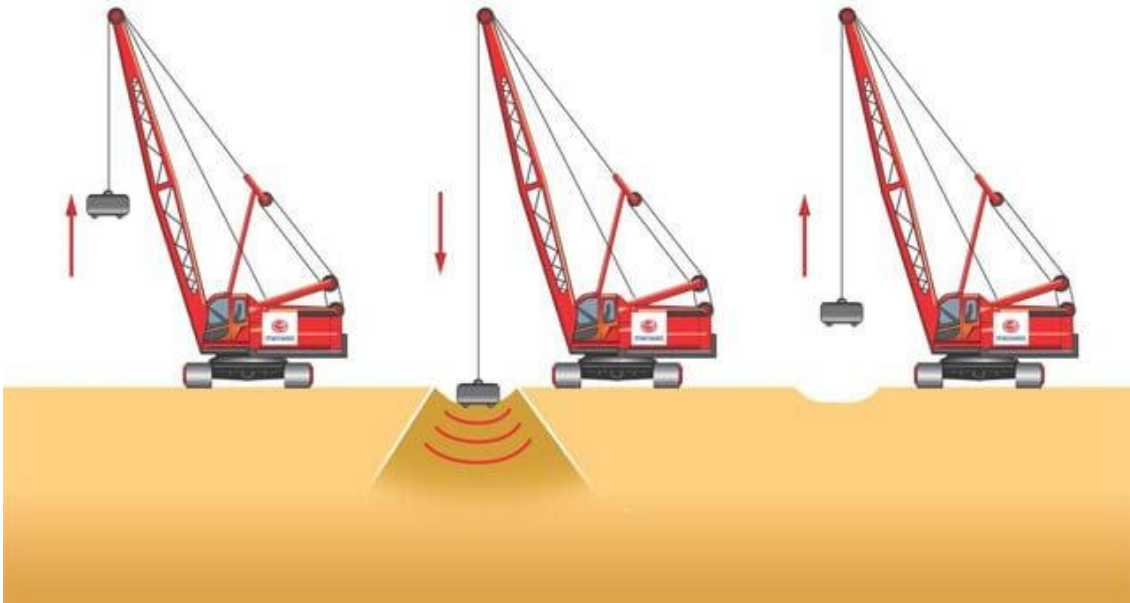
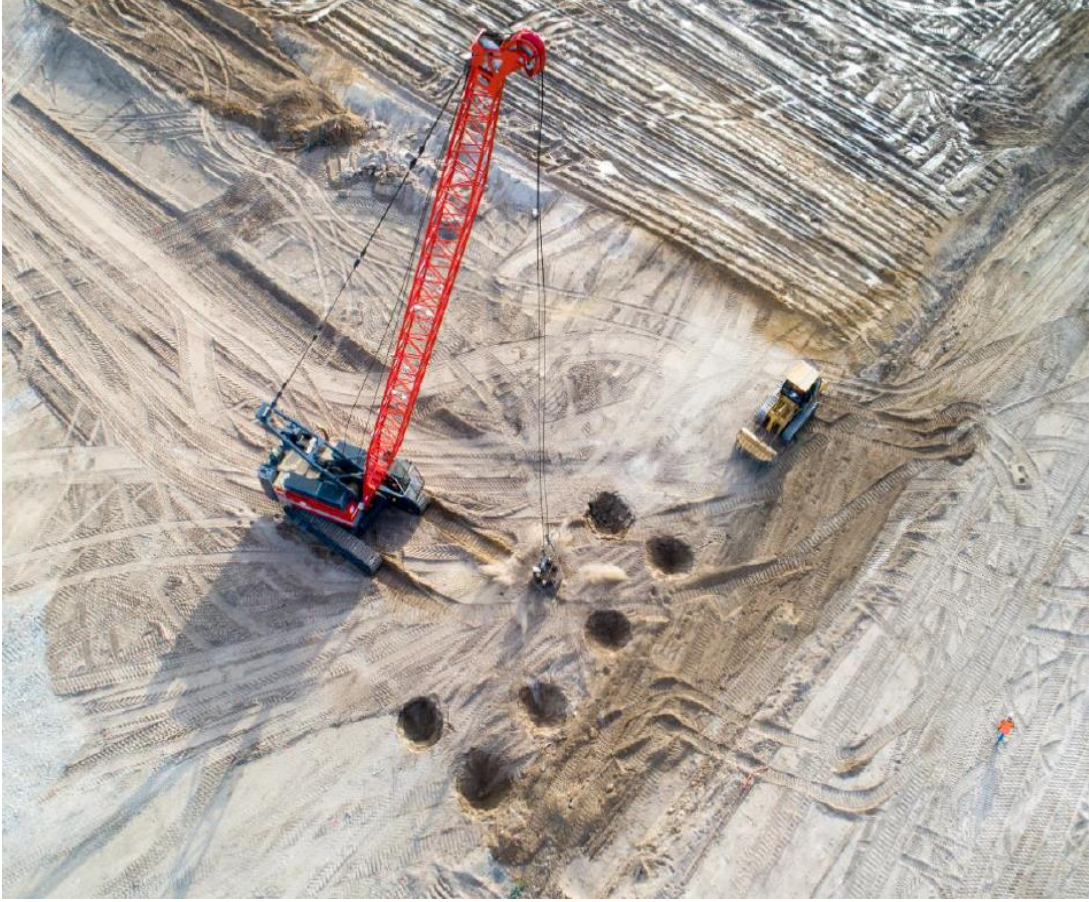
Kum, çakıl gibi derin, kohezyonsuz zeminlerde zemin iyileştirmek için kullanılan bu teknik, Vibro kompaksiyon olarak adlandırılır. Bu yöntemde, zemine yerleştirilen bir sondanın titreşim enerjisi ile zemini sıkıştırarak istenilen zemin özelliklerine ulaşılır. Yatay titreşimler sonucunda zemindeki kalın, ince ve iri daneli parçalar arasında geçici sürtünme kaybı yaşanır. Granüler zeminlerde sondayı çevreleyen bölgede sıvılaşma meydana gelir. Bu sıvılaşma, ani ve hızlı oturmalarla yol açar. Zeminde meydana gelen çökmeler, sondanın çevresindeki zeminin sıkışmasına neden olur. Sonda (vibratör) sürekli su jeti ile birlikte çalışır ve bu şekilde rölatif sıkılık %70 ile %85 arasında artırılabilir.



Resim 2.1 Vibro Kompaksiyon (Flatasyon) İşlemleri (İnt.Kyn.1)

2.1.1.2 Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon, kohezyonlu (granüler, gevşek ve yumuşak) zeminler için uygundur. Bu yöntemin temel amacı, zemine enerji vererek sıkıştırma yaparak taşıma kapasitesini artırmak, oturmaları azaltmak ve zeminin sıvılaşma potansiyelini düşürmektir. Ağır bir cismin belirli bir yükseklikten bırakılmasıyla granüler zeminin sıkıştırılması sağlanır. İstenilen sıkılık değerlerine ulaşmak için gerekli teknik bilgi ve deneyime sahip olunması gereklidir. Dinamik kompaksiyon uygulama aşamasında yeterli kontrol sağlanmazsa, zeminin içinde düzgün sıkıştırılmamış bölgeler oluşabilir ve işlem tekrarlanmak zorunda kalabilir. Bu yöntem, maliyet ve uygulama süresi açısından diğer yöntemlere göre daha uygun bir alternatiftir.



Resim 2.2 Dinamik Kompaksiyon İşlemleri (İnt.Kyn.2)

2.1.1.3 Patlatma ile Kompaksiyon

Patlayıcı kullanımı, patlama etkisiyle oluşan şok dalgaları ve titreşimlerin zemini sıkılaştırarak sıvılaşmaya yol açtığı bir yöntemdir. Bu teknik, yumuşak zeminlerin oturmalarını azaltmak ve granüler zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak için kullanılabilir. Rölatif yoğunlukta %35 ile %85 arasında artış sağlanabilir. Granüler zeminlerde patlama ile taşıma kapasitesinin artırılabilmesi için zeminin tam doygun olması önemlidir; zeminde hava varsa, taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi yetersiz kalabilir. Bu yöntemle 40 metre derinliğe kadar başarılı kompaksiyon sonuçları elde edilebilir. Uygulama süresi kısa olmakla birlikte, yöntem çok tercih edilmez. Çünkü teorik bilgi yerine tecrübeye dayanır, yanlış kullanımı güvenlik riski oluşturabilir ve doğaya zararlı etkileri olabilir.

2.1.2 Kimyasal Stabilizasyon

Yüzey tabakalarının veya zemin katmanlarının fiziksel olarak karıştırılması stabilizasyon karışımı iyileştirme olarak adlandırılır. Bu karışımda doğal zeminler, endüstriyel atık veya ürünler, çimentolar ve diğer kimyasallar kullanılarak zemin iyileştirilmeye çalışılır. Termal iyileştirme teknikleri ise zemin stabilitesini artırmak için zemini ısıtarak veya dondurarak uygulanır. Isıtma, suyun buharlaşmasını sağlar ve zeminlerin mineral yapısında kalıcı değişikliklere yol açar. Donma ise suyun katılaşmasına ve partiküllerin birbirine bağlanmasına neden olur.

Çimento, kireç, bitüm ve kalsiyum klorür gibi kimyasal bileşiklerin toprakla karıştırılmasının amacı:

- Mukavemeti arttırmak
- Biçim değiştirmeyi azaltmak
- Hacim stabilitesini sağlamak
- Geçirimsizliği azaltmak
- Aşınabilirliği azaltmak
- Dayanıklılığı arttırmak
- Değişkenliği kontrol etmek

2.1.2.1 Çimento ile Stabilizasyon

Organik zeminler dışında, zemin tabakalarını iyileştirmek için çimento kullanılarak karışım yapılmaktadır. Son yıllarda Türkiye'de endüstri ve teknolojinin gelişmesiyle bu yöntem en yaygın kullanılan yöntem haline gelmiştir. Laboratuarda belirlenen çimento oranı, arazide karışımın homojenliğini sağlamak için bir miktar artırılabilir.

Zemin-çimento karışımı en uygun şekilde sıkıştırılmalıdır, bu işlem en kısa sürede ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmelidir. İyi derecelenmiş kumlarda çimento oranı genellikle %2-6 arasında, yüksek plastisiteli killerde ise %8-12 arasında olabilir.

2.1.2.2 Kireç ile Stabilizasyon

Kireç, bilinen en eski zemin iyileştirme malzemelerinden biridir. Zemine kuru ağırlığının %2-%8'ine kadar kireç ilave edilir. Bu işlemde, kil mineralleri kireç ile reaksiyona girerek silikat jelini oluşturur. Bu jel, zemindeki boşlukları doldurur ve zemin daneleri arasında bağlayıcı görevi görür. Reaksiyon süreci yaklaşık olarak 1 yıl boyunca devam eder.

Kireç stabilizasyonu genellikle zeminin şekil değiştirme modülünün ve mukavemetinin artmasını sağlar, kabarma potansiyelini ve şişme basınçlarını azaltır ve çevresel koşullar altında zeminin özelliklerinin daha az bozulmasını sağlayarak dayanıklılığını artırır.

Ayrıca, plastisitenin azalması nedeniyle arazi çalışma koşullarının iyileşmesine katkıda bulunur. Kireçle stabilizasyon, özellikle killi zeminlerden yapılan dolgularda ve yol inşaatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geçkil vd. (2019), karışımdaki kireç miktarının artmasıyla birlikte optimum su muhtevasının yükseldiğini, numunelerin plastisite indeksinin ve maksimum kuru yoğunluğunun ise azaldığını keşfetmiştir. Ayrıca, hem 7 hem de 28 günlük kür sürelerinde yapılan serbest basınç deneylerinin sonuçlarına göre, %5 kireç katkılı kilin en yüksek serbest basınç mukavemetine (qu) sahip olduğu ortaya konmuştur.

2.1.2.3 Uçucu Kül Stabilizasyonu

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün yanması sonucu oluşan ince taneli bir yan üründür. Bu malzeme, başta silis, alümina ve demir oksit olmak üzere çeşitli oksit bileşenlerini içerir. Kimyasal bileşimi sayesinde puzolanik özellikler gösterir ve su ile reaksiyona girerek çimentomsu özellikler kazanır. Uçucu külün bu özellikleri, zemin stabilizasyonunda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanır. Zemine eklenen uçucu kül, su ile birleştiğinde hidrate olarak zemin taneleri arasında bağ oluşturur ve zeminin mukavemetini artırır.

Uçucu kül, zeminin sıkışabilirliğini azaltarak taşıma kapasitesini artırır ve zeminin daha stabil hale gelmesini sağlar. Özellikle killi ve siltli zeminlerde, uçucu külün eklenmesi, zeminin plastik özelliklerini azaltarak daha rijit ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Ayrıca, uçucu kül kullanımı zeminin su geçirimsizliğini artırarak, zeminin su ile temas ettiğinde şişme ve büzülme gibi olumsuz davranışlarını da minimize eder. Bu sayede, uçucu kül ile stabilizasyon, zeminlerin mühendislik projelerinde daha güvenilir ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

2.1.2.4 Cam Elyaf Stabilizasyonu

Cam elyaf, yüksek mukavemet ve esneklik özellikleriyle bilinen bir kompozit malzemedir. Bu özellikler, cam elyafın çeşitli mühendislik uygulamalarında, özellikle zemin stabilizasyonunda etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Zemin stabilizasyonu, zeminin taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve genel stabilitesini artırmak amacıyla gerçekleştirilen bir süreçtir. Cam elyaf, zemin partikülleri arasında güçlü bir bağ oluşturarak zeminin mukavemetini artırır. Bu, özellikle yumuşak ve zayıf zeminlerde kritik bir avantaj sağlar.

Zemin stabilizasyonunda cam elyafın kullanımı, zeminin iç yapısını değiştirerek mekanik özelliklerini iyileştirir. Cam elyafın zemine eklenmesi, zeminin dağılımını ve homojenliğini artırır, bu da zeminin sıkışma ve oturma özelliklerini iyileştirir. Yol yapımı, şev stabilizasyonu, dolgu barajlar ve temel inşaatları gibi projelerde cam elyaf,

zeminin stabilitesini ve mukavemetini artırmak için sıklıkla kullanılır. Bu süreç, zeminin yüksek yüklere dayanabilmesini sağlar ve yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşır.

Cam elyafın zemin stabilizasyonundaki etkisi, sadece mekanik özelliklerin iyileştirilmesiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda, zeminin su geçirimsizliğini artırarak suyun zemine nüfuz etmesini önler ve bu da zeminin stabilitesini artırır. Bu özellik, özellikle suya duyarlı zeminlerde önemli bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, cam elyaf ile zemin stabilizasyonu, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve inşaat projelerinin güvenliğini artırmak için etkili bir yöntemdir. Cam elyafın yüksek mukavemet ve esneklik özellikleri, zeminin taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırır, bu da yapıların güvenli ve dayanıklı bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır.

2.1.2.5 Polipropilen Stabilizasyonu

Polipropilen, dayanıklılığı, kimyasal direnci ve esnekliği ile bilinen sentetik bir polimerdir. Bu özellikler, polipropilenin zemin stabilizasyonunda etkili bir şekilde kullanılmasını sağlar. Zemin stabilizasyonu, zeminin taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve genel stabilitesini artırmak amacıyla gerçekleştirilen bir süreçtir. Polipropilen lifleri, zemine eklenerek zemin partikülleri arasında güçlü bir bağ oluşturur ve zeminin mukavemetini artırır. Bu, özellikle yumuşak ve zayıf zeminlerde kritik bir avantaj sağlar.

Polipropilen liflerinin zemin stabilizasyonunda kullanımı, zeminin iç yapısını değiştirerek mekanik özelliklerini iyileştirir. Polipropilen lifleri zemine karıştırıldığında, zeminin homojenliğini ve dayanıklılığını artırır, bu da zeminin sıkışma ve oturma özelliklerini iyileştirir. Yol yapımı, şev stabilizasyonu, dolgu barajlar ve temel inşaatları gibi projelerde polipropilen lifleri, zeminin stabilitesini ve mukavemetini artırmak için sıklıkla kullanılır. Bu süreç, zeminin yüksek yüklere dayanabilmesini sağlar ve yapıların güvenliği ve dayanıklılığı açısından büyük önem taşır.

Polipropilen liflerinin zemin stabilizasyonundaki etkisi, sadece mekanik özelliklerin iyileştirilmesiyle sınırlı değildir. Aynı zamanda, zeminin su geçirimsizliğini artırarak

suyun zemine nüfuz etmesini önler ve bu da zeminin stabilitesini artırır. Bu özellik, özellikle suya duyarlı zeminlerde önemli bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, polipropilen lifleri ile zemin stabilizasyonu, zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirmek ve inşaat projelerinin güvenliğini artırmak için etkili bir yöntemdir.

Polipropilenin yüksek mukavemet ve esneklik özellikleri, zeminin taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırır, bu da yapıların güvenli ve dayanıklı bir şekilde inşa edilmesine olanak tanır.

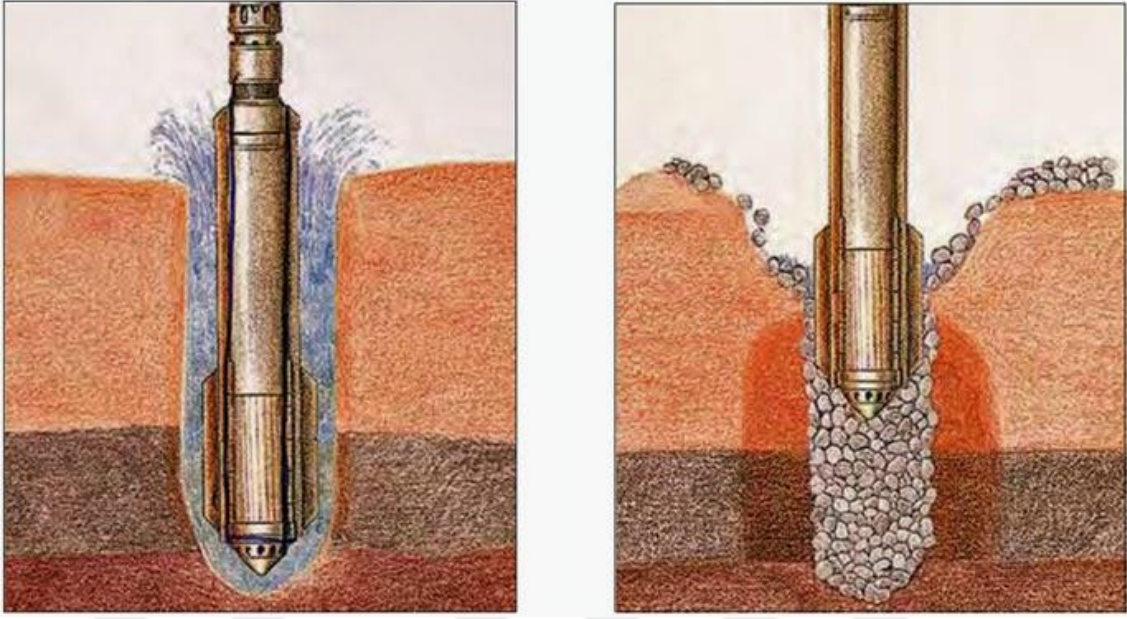
2.1.3 Güçlendirme

2.1.3.1 Taş Kolonlar (Vibro yer değiştirme)

Taş kolonlar, gevşek ve yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu yöntemle, üstyapı proje yüklerine, saha ve zemin koşullarına bağlı olarak zeminin taşıma kapasitesi artırılır, oturma süresi azaltılır ve deprem durumunda sıvılaşan veya mukavemetini kaybeden zeminler sağlamlaştırılır. CO₂ salınımına sebep olan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Yumuşak ve orta sert kil zeminlerde, genellikle problemli zemin tabakası kalınlığı 10 metreden az olan durumlarda taş kolonlar kullanılmaktadır. Taş kolonların kullanılmasıyla, taşıma kapasitesi büyük ölçüde artabilir ve oturma sorunları genellikle %50 ila %60 oranında azaltılabilir.

Taş kolonların uçlarının ideal olarak sağlam bir zemin tabanına oturtulması tavsiye edilir. Üst yapı yüklerine ve zemin koşullarına bağlı olarak, 75-100 cm çapında taş kolonları üçgen veya kare düzen planlarına göre projelendirilir. İnşaat için kullanılan taşlar temiz olmalı, genellikle 10 ila 50 cm boyutlarında olmalı ve %5 ila %10 arası ince malzeme içermelidir. Taş kolonları oluşturmak için önce zemin su ile ıslatılır ve ardından doğrudan delinir. Kırık granüler malzeme doldurulur ve titreşim ile sıkıştırılır. Bu teknikle iyileştirilmiş zeminler titreşim altında sıkışarak daha fazla yoğunluk, drenaj kapasitesi ve taşıma kapasitesi kazanabilir.



Resim 2.3 Taş Kolon İşlemi (İnt.Kyn.3)

2.1.3.2 Geosentetikler ile Güçlendirme

Geosentetikler, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan çok yönlü malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle toprak mekaniği ve zemin stabilizasyonu alanında kullanılır. Geosentetikler, yüksek mukavemetli polimerik malzemelerden üretilir ve zeminin mukavemetini artırmak, erozyonu önlemek veya yapıların dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Özellikle eğim stabilizasyonu, zemin takviyesi ve su yönetimi projelerinde etkin çözümler sunarlar. Örneğin, bir dolgu malzemesi üzerine yerleştirilen geosentetikler, yapıların uzun vadeli performansını artırarak ve bakım maliyetlerini azaltarak projenin sürdürülebilirliğini artırabilir.

Geosentetiklerin kullanımı, çeşitli zemin koşullarında ve coğrafi yapılar üzerinde başarılı sonuçlar vermiştir. Bu malzemelerin esnekliği ve dayanıklılığı, farklı zemin türlerine uyum sağlama yetenekleriyle bilinir. Ayrıca, geosentetiklerin uygulama kolaylığı ve ekonomik avantajları da dikkate alındığında, inşaat sektöründe tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir. Örneğin, bir baraj inşaatında kullanılan geosentetik malzemeler, zemin stabilitesini artırarak yapısal bütünlüğü sağlamlaştırabilir ve uzun vadeli güvenlik sağlayabilir. Bu nedenle, geosentetiklerin mühendislik projelerindeki rolü, modern yapı tekniklerinde önemli bir yer tutmaktadır.

2.1.4 Zemin İyileştirme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Gümüşer (2009) tez çalışmasında, zayıf zeminlerin güçlendirilmesi için Kangal Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül ve elyafların faydalarını incelemiştir. Bu amaçla, Şebinkarahisar-Suşehri yolu üzerindeki yarma şevinden alınan killi zemin, polifiber ve UK ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 1, 7 ve 14 gün kür edildikten sonra, fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için CBR, üç eksenli basınç ve tek eksenli basınç testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın bulguları, uçucu kül ilavesinin, zayıf, yüksek plastisiteli ve şişen zeminin genel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, bu etkiler çok belirgin olmasa da, elyafların zemin numunelerine daha yüksek mukavemet değerleri ve kayma noktasında süneklik kazandırdığı belirtilmiştir. F tipi elyafların, M tipi elyaflara göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışması, zayıf zeminlerin stabilizasyonunda uçucu kül ve elyaf malzemelerin kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Aksoy ve Gör (2011) çalışmalarında, kumlu zeminin mermer tozu ile stabilizasyonunu incelemiştirler. Kumlu zemine ağırlıkça %0, %5, %10 ve %20 oranlarında mermer tozu ekleyerek dört farklı karışım oluşturmuşlardır. Bu numuneler üzerinde Standart Proktor ve kesme kutusu testleri gerçekleştirilmiştir. Standart Proktor deneyi sonuçlarına göre, mermer tozu içeriği arttıkça numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlıkları artmıştır. Optimum su muhtevası açısından, %10 mermer tozu içeren karışımda bir azalma gözlenmiş, diğer oranlarda ise optimum su muhtevalarının doğal kumdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kesme kutusu testlerinden elde edilen sonuçlara göre, %5 mermer tozu içeren karışımın sürtünme açısı en yüksek değere ulaşmıştır; kohezyon açısından ise %20 mermer tozu oranında en yüksek değer elde edilmiştir.

Farouk ve Shahien (2013) yılında yaptıkları deneysel çalışmada düşük yoğunluktaki topraklarda derin karıştırma yöntemiyle toprak-çimento sütunları kullanarak iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında, Nil Nehri Deltası'ndan çıkarılan farklı doğal siltli kum toprakları, çimento ile karıştırılarak farklı çimento dozlarında ve farklı su-çimento oranlarında örnekler hazırlanmıştır. Kürleme işleminden sonra, sertleşmiş örnekler test edilmiş ve bunların sıkıştırılmamış basınç dayanımı incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmı, bir şerit temel modelinin ve Nil deltası toprağının bir grup toprak-çimento sütunu ile iyileştirilmiş etkileşimini araştırmaktadır. Çalışmanın ilk kısmının sonuçları, incelenen Nil deltası topraklarının basınç dayanımının çimento dozlarının düşük olduğu durumlarda bile artırılabilceğini göstermiştir. Çalışmanın ikinci kısmından elde edilen sonuçlar, toprak-çimento sütunlarının sayısı ve uzunluğuna bağlı olarak %80'e kadar önemli bir çökme azalması elde edilebileceğini göstermiştir.

Ayraçma ve Teymür (2014) araştırmalarında, ince kuma cam fiber eklemenin mukavemet değerlerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Numuneler %20, %40 ve %60 rölatif yoğunlukta hazırlanmıştır. 2 cm uzunluğundaki cam fiberler, kuru kum ağırlığının %0,25 ve %0,50'si oranında eklenmiştir. Bu numuneler üzerinde sabit seviyeli permeabilite ve kesme kutusu testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, içsel sürtünme açısı arttıkça kayma mukavemeti artmıştır, ancak %60 yoğunlukta numuneler hariç. Yeni akım yollarının oluşması sonucunda geçirgenliğin arttığı gözlemlenmiştir, fiber içeriğindeki artışın mukavemeti artırdığı belirtilmiştir. %40 yoğunlukta numunelerde, %0,5 fiber içeren numunede kayma mukavemetinde %20 artış görülmüştür. Fiberlerin eklenmesiyle gevşek kumlarda deformasyon eğrileri sıkı zeminlerin eğrilerine benzemiştir. Fiberlerin gevşek zemin numuneleri üzerinde sıkı zeminlere göre daha büyük bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Gueguin vd. (2015), yumuşak kil zeminleri taş kolonlarla güçlendirilmiş taşıma kapasitelerini incelemiştir. Hafif eğimli kum tabakalarında, sonlu elemanlar programı kullanılarak geosentetik kaplı taş kolonlar incelemişlerdir. Ayrıca, geleneksel taş kolon tasarımları geosentetik kaplı olanlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bulguları, geleneksel tasarımlı taş kolonlara göre geosentetik kaplı taş kolonların daha az yanal deformasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. Geosentetik kaplı taş kolonların, zeminin yanal genişlemesini durdurarak zemin sertliğini artırdığı tespit edilmiştir. Geosentetiğin geçirgenliği 0,1 m/s'yi aştığında yanal zemin deformasyonunda önemli ölçüde azalma gözlenmiştir. Bu sonuçlar, geosentetik kaplı taş kolonların zemin sıvılaşmasını etkili bir şekilde azaltabileceğini göstermektedir.

Çalık vd. (2019), yüksek plastisiteli kil içerisine farklı uzunluklarda ve oranlarda polipropilen lif ekleyerek serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, kilin kuru ağırlığının %0,15, %0,20 ve %0,25'ine karşılık gelen 3 mm, 6 mm ve 12 mm uzunluğundaki polipropilen lifler karışımlara eklenmiştir. Optimum nem içeriğinde ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numuneler, donma-çözülme çevrimlerinden sonra serbest basınç testlerine tabi tutulmuştur. Bulgular, lif uzunluğunun artmasının yüksek çevrimlerde dayanımı artırdığını göstermiştir. %0,15 ve %0,20 oranında polipropilen lif içeren numuneler genellikle daha düşük dayanıma sahipti, ancak %0,25 polipropilen lif içeren numunenin donma-çözülme direncinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Şahbaz ve Ünsever (2020), yüzey zemin stabilizasyonu için polipropilen lifler ve çimento kullanılarak stabilizasyon tekniklerini incelemişlerdir. Doğal zemin, UCSC'ye göre düşük plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır; bu zeminin iyileştirilmesi amacıyla %5 ve %10 oranlarında çimento ile birlikte %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında polipropilen lif eklenerek deneysel numuneler oluşturulmuştur. Bu numuneler, şişme testine, CBR (California Bearing Ratio) ve serbest basınç testlerine tabi tutulmuştur. Bulgular, polipropilen liflerin tek başına zemin koşullarını önemli ölçüde iyileştirmede, ancak çimentonun düşük plastisiteli kil zeminlerin stabilizasyonunda etkili olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, polipropilen liflerin çimento ile birlikte düşük oranlarda (%0,5 ile %1,0 arası, iyileştirme karakteristiklerine bağlı olarak) kullanıldığında çimentonun etkinliğini olumlu yönde artırdığını göstermiştir.

Solanki ve Sharma (2020) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, çöl kumunun mühendislik özelliklerini artırmak için mermer tozu kullanılmıştır. Çöl kumunun özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı oranlarda (%5 ila %30 arası) atık mermer tozu karışımlarına eklenmiştir. Bu numuneler üzerinde Proctor, CBR (California Bearing Ratio) ve Atterberg limit testleri yapılmıştır. Çalışmada, çöl kumunun maksimum kurutulmuş yoğunluğunun 1.79 g/cm³ olduğu ve optimal nem içeriğinin %11 olduğu belirlenmiştir. %30 mermer tozu ilavesi, çöl kumunun maksimum kurutulmuş yoğunluğunu 1.81 g/cm³'e çıkarmış ve nem içeriği %11,20 olarak ölçülmüş; bu durumda maksimum kurutulmuş birim ağırlıkta %1.21'lik bir artış gözlenmiştir. Bu artış, çöl

kumunun özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir. Çöl kumunun CBR değeri %13,18 olarak ölçölmüştür. %30 mermer tozu içeren karışımın CBR değeri ise %14,76'ya yükselerek CBR değeriinde %10,70'lik bir artış sağlamıştır.

Küçük (2021), tez çalışmasında sürtünme özellikleri geliştirilmiş ve alkali ile korozyona son derece dayanıklı polipropilen fiber katkılarının kil zeminin drenajsız kayma direnci üzerindeki etkisini araştırmıştır. Fiber-zemin kombinasyonları oluşturmak için fiberler, optimum su içeriğine sahip doğal zemine kuru ağırlığın %0,5, %1, %1,5 ve %2'si oranında eklenmiştir. Toplamda 300 silindirik numuneye serbest basma (UC) testi uygulanmış, bunlardan 20'si doğal kilden ve geri kalan 280'i polipropilen fiber ile güçlendirilmiş numunelerden oluşmuştur. 300 serbest basma testi sonrasında, polipropilen fiber ilavesinin kil zeminin drenajsız kayma direncini artırdığı belirlenmiştir. Kuru ağırlığın %2'si oranında ve 30 mm uzunluğunda fiber içeren karışımlar, en fazla direnç artışını göstermiştir.

Mahdi ve Nalbantoğlu (2021) çalışmalarında, gevşek kumun farklı miktarlarda mermer tozu ve çimento ile karıştırılarak nasıl stabilize edilebileceğini incelemişlerdir. İlk olarak, bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanılarak zemin-bağlayıcı karışımları hazırlanmış ve ardından farklı miktarlarda mermer tozu eklenmiştir. Mermer tozunun karışımların mekanik özelliklerine etkisini değerlendirmek için tane yoğunluğu, oturma süresi ve serbest basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Her numune için sırasıyla 7 ve 28 günlük kür süreleri dikkate alınarak serbest basınç dayanımı hesaplanmıştır. En yüksek serbest basınç dayanımı %10 mermer tozu ilavesi ile elde edilmiştir; %10'dan fazla olan mermer tozu ilavesi ise serbest basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur.

Hamdy (2022) yaptığı çalışmada, atık mermer tozunun çöken zeminleri stabilize etme potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, mermer tozu katkı oranları ağırlıkça %0, %5, %10, %20 ve %30 olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, %20 mermer tozu ilavesi maksimum kuru birim hacim ağırlığını %9 artırmış, optimum su içeriğini %29 düşürmüş, sürtünme açısını %350 artırdı ve zemin kohezyonunu %350 iyileştirmiştir. Ayrıca, farklı mermer tozu oranlarına sahip zemin karışımlarının kür koşulları incelenmiştir. 15 gün

boyunca kür edilen örneklerde, %20 mermer tozu ilavesi ile sürtünme açısında %22, zemin kohezyonunda ise %25 oranında artış gözlenmiştir.

Baba (2022) tez çalışmasında, iki endüstriyel atık ürünü olan uçucu kül ve mermer tozunun zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla, ocaklardan alınan malzemelere farklı oranlarda UK ve MT eklenerek numuneler hazırlanmıştır. Bulgular, MT ve UK ilavesinin zeminin dayanımını artırdığını göstermiştir. En yüksek dayanım artışları, Uluköy numunesinde %15 MT + %15 UK ve %15 MT + %30 UK karışımlarıyla, Ballık numunesinde ise %10 MT + %20 UK ve %15 MT + %30 UK karışımlarıyla elde edilmiştir.

2.2 Şev Stabilitesi

Şev stabilitesi, eğimli bir yüzeyin veya yamacın kayma veya çökme gibi deformasyonlara karşı direncini ifade eder ve mühendislik projelerinde kritik bir öneme sahiptir. Şevlerin çökmesi veya kayması, ciddi yapısal hasarlara, ekonomik kayıplara ve hatta can kayıplarına yol açabilir. Bu nedenle hem doğal hem de yapay şevlerin güvenliği, dikkatli ve detaylı bir stabilite analizine bağlıdır. Geoteknik mühendisliği, zeminlerin ve kayaçların mekanik özelliklerini inceleyerek, şev stabilitesinin sağlanmasında önemli bir rol oynar. Zeminlerin taşıma kapasitesi, kayma direnci, su içeriği ve yeraltı su seviyeleri gibi faktörler, şev stabilitesini doğrudan etkiler. Bu faktörlerin detaylı analizi, mühendislerin uygun tasarım kriterlerini belirlemesine yardımcı olur.

Şev stabilitesini sağlamak için kullanılan yöntemler, kesit tabanlı analizlerden modern bilgisayar destekli analizlere kadar çeşitlilik gösterir. Geleneksel limit denge analizleri, şevin kayma yüzeyindeki denge durumunu değerlendirirken, sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri gibi daha karmaşık analizler de yaygın olarak kullanılır. Slide ve Plaxis gibi yazılımlar, mühendislerin şev stabilitesini daha doğru ve güvenilir bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanır. Şev stabilitesinin sağlanması, yapıların güvenliğini temin etmenin yanı sıra, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından da önemlidir. Barajlar, otoyollar, demiryolları ve diğer büyük altyapı projelerinde şev stabilitesinin sağlanması, projelerin başarısı için hayati bir gerekliliktir. Geoteknik

mühendisliği, bu projelerde zemin iyileştirme sorunlarına çözümler sunarak, zayıf zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirir ve şevlerin daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.

Şev stabilitesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır, bu faktörler doğal koşullar, jeolojik yapılar, çevresel etkiler ve insan müdahaleleri şeklinde sınıflandırılabilir. Birinci dereceden faktörler arasında yer alan doğal koşullar, şev stabilitesini doğrudan etkileyen önemli etkenlerden biridir. Örneğin, zeminin jeolojik yapısı, kayaç türleri ve tortul oluşumlar, şevin stabilitesini belirleyen ana unsurlardır. Kayaç türlerinin dayanıklılığı ve jeolojik yapıların eğim yüzeylerindeki dağılımı, şevlerin uzun vadeli stabilitesini doğrudan etkileyebilir. Ayrıca, zeminlerin doğal eğimleri ve eğim açıları da şevlerin kayma riskini belirlemede önemli bir rol oynar.

İkinci dereceden faktörler arasında ise çevresel etkiler ve insan müdahaleleri bulunmaktadır. Çevresel etkiler, özellikle iklimsel değişiklikler, yağış miktarları ve erozyon gibi faktörlerle ilişkilendirilir. Örneğin, aşırı yağışlar veya erozyon kontrol önlemlerinin yetersiz olması, şevlerdeki stabiliteyi olumsuz yönde etkileyebilir ve kayma riskini artırabilir. İnsan müdahaleleri ise, şevlerde yapılacak olan yapısal işlemler, zemin iyileştirme teknikleri veya doğal çevre üzerindeki olumsuz etkileri kapsar. Örneğin, ağaç kesimleri, madencilik faaliyetleri veya inşaat çalışmaları, şevlerin doğal dengesini bozabilir ve stabilite sorunlarına yol açabilir.

Bu faktörlerin detaylı bir şekilde analiz edilmesi ve şev stabilitesi problemlerinin önceden tahmin edilmesi, mühendislik projelerinde başarının ve güvenliğin temelini oluşturur. Geoteknik mühendisler, bu faktörleri dikkate alarak doğru analizler yapar ve uygun önlemleri önerir, böylece şevlerin uzun vadeli stabilitesini sağlamaya çalışırlar.

2.2.1 Şev Kaymasının Nedenleri

Şev kayması, eğimli bir yüzeyin stabilitesinin bozulması sonucunda, yamacın altında bulunan zemin veya kaya bloklarının yukarı doğru hareket etmesi veya yuvarlanmasıdır.

Bu durum, şevin eğimli yüzeyindeki dengeyi ve yapısal bütünlüğünü bozarak, çeşitli boyutlarda hasarlara yol açabilir.

- Üst kısımda yapılan ağır yapılaşmalar veya yüksek hacimli dolum malzemeleri şevin stabilitesini olumsuz etkileyebilir.
- Şevin üst kısmının erozyon veya su aşındırmasıyla aşınması, alttaki zeminin destek kaybına neden olabilir.
- Zeminin aşırı yağışlar veya su birikintileri sonucu doygun hale gelmesi, kayma direncini azaltabilir ve şev kaymasını tetikleyebilir.
- Şevin doğal eğim açısının veya yapay olarak artırılan eğimlerin stabiliteyi azaltması, kayma riskini artırabilir.
- Deprem gibi doğal afetler, şevin kayma mukavemetinde ani ve ciddi azalmalara yol açabilir, bu da şev kaymasına neden olabilir.
- Zeminin jeolojik özellikleri (kırılganlık, gevreklik) veya zeminin su içeriği gibi doğal koşullar, şevin stabilitesini doğrudan etkiler.
- İnsan müdahaleleri (madencilik, inşaat çalışmaları, ormancılık vb.), doğal çevre üzerindeki dengeyi bozarak şev kaymasına neden olabilir.

Bu faktörler, şev kaymasının oluşumunda ve gelişiminde rol oynayan ana etkenlerdir. Mühendislik projelerinde bu faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi, şev stabilitesinin sağlanması ve risklerin minimize edilmesi açısından hayati öneme sahiptir.

2.2.2 Şev Stabilitesinin Temel Prensipleri

Şev stabilitesi, mühendislik projelerinde güvenliği sağlamak ve yapısal bütünlüğü korumak açısından büyük önem taşır. Şev stabilitesinin temel prensipleri, şevlerin kayma veya çökme riskini belirlemek ve bu riskleri en aza indirmek için kullanılan analiz ve tasarım yöntemlerini kapsar. Şev stabilitesinin temel prensipleri:

- Zemin ve Kayaçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi:
Zeminin kayma direnci, kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi parametrelerin analiz edilmesi.
- Şev Eğim Açısının Değerlendirilmesi:

Şevin doğal veya yapay eğim açısının belirlenmesi ve optimal açılarının kullanılması.

- Yeraltı Su Seviyesinin Rolü:

Yeraltı su seviyesinin kontrol edilmesi ve uygun drenaj sistemlerinin tasarımı.

- Dış Yüklerin Etkisi:

Yapısal yükler, trafik yükleri ve deprem gibi dinamik yüklerin analizi ve etkilerinin değerlendirilmesi.

- Zemin İyileştirme Teknikleri:

Derin karıştırma, jet grout enjeksiyonu, geosentetik malzemeler ve zemin çivileme gibi yöntemlerin kullanılması.

- Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri:

Limit denge yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemleri gibi analizlerin yapılması.

Bu temel prensipler, şev stabilitesinin sağlanması ve şevlerin güvenli bir şekilde tasarlanması için rehberlik eder. Şev stabilitesi analizleri, her projeye özgü koşullar dikkate alınarak yapılmalı ve risklerin minimize edilmesi için uygun önlemler alınmalıdır. Bu şekilde, mühendislik projelerinin başarısı ve güvenliği sağlanabilir.

2.2.3 Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri

Şev stabilitesi analizleri, mühendislik projelerinde şevlerin güvenliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için kritik bir süreçtir. Bu analizler, şevlerin kayma riskini belirlemek ve uygun önlemleri almak için çeşitli yöntemler kullanır. Şev stabilitesi analizinde yaygın olarak kullanılan yöntemler:

2.2.4 Limit Denge Yöntemleri

Şev stabilitesi analizlerinde sıklıkla kullanılan limit denge yöntemleri, şevlerin kayma riskini değerlendirmek için çeşitli teknikler sunar. Bu yöntemler, şevdeki dengelenmiş kuvvetleri ve momentleri hesaplayarak kayma yüzeyinin güvenlik faktörünü belirler. İşte yaygın olarak kullanılan limit denge yöntemleri ve detaylı açıklamaları:

2.2.4.1 Fellenius (Swedish Circle) Yöntemi

Fellenius yöntemi, en basit limit denge yöntemlerinden biridir ve özellikle dairesel kayma yüzeyleri için kullanılır. Bu yöntemde, şevin potansiyel kayma yüzeyi dairesel olarak kabul edilir ve kayma yüzeyindeki toplam kayma kuvveti ile direnç kuvveti hesaplanır. Güvenlik faktörü, bu iki kuvvetin oranı olarak belirlenir. Yöntem, şevin kayma direncini sağlayan kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi zemin parametrelerini dikkate alır. Fellenius yöntemi, basit yapısı nedeniyle hızlı değerlendirmeler için kullanışlıdır, ancak karmaşık zemin koşulları için sınırlı doğruluğa sahiptir.

2.2.4.2 Bishop'un Basitleştirilmiş Yöntemi

Bishop'un basitleştirilmiş yöntemi, dairesel kayma yüzeyleri için daha gelişmiş bir analiz sunar. Bu yöntemde, şev kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her dilimdeki kayma kuvvetleri ve momentleri hesaplanır. Bishop yöntemi, kayma yüzeyindeki normal ve kayma kuvvetlerini dikkate alarak güvenlik faktörünü belirler. Bu yöntemde, dilimler arasındaki kuvvetler ve moment dengeleri göz önünde bulundurulur. Bishop'un basitleştirilmiş yöntemi, özellikle homojen zemin koşullarında güvenilir sonuçlar verir ve mühendisler tarafından sıkça tercih edilir.

2.2.4.3 Janbu'nun Genel Limit Denge Yöntemi

Janbu'nun yöntemi hem dairesel hem de doğrusal kayma yüzeyleri için kullanılabilen genel bir limit denge yöntemidir. Bu yöntemde, şev kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her dilim için dengelenmiş kuvvetler ve momentler hesaplanır. Janbu yöntemi, kayma yüzeyinin herhangi bir şekle sahip olabileceği durumlarda daha esnek bir analiz imkanı sunar. Bu yöntemde, dilimlerin yatay ve düşey kuvvet dengeleri ayrıntılı olarak hesaplanır. Janbu yöntemi, çeşitli zemin koşullarında ve karmaşık geometrilere sahip şevlerde kullanışlıdır.

2.2.4.4 Morgenstern-Price Yöntemi

Morgenstern-Price yöntemi, en kapsamlı limit denge yöntemlerinden biridir ve hem dairesel hem de karmaşık kayma yüzeyleri için kullanılabilir. Bu yöntemde, şev kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her dilim için kuvvetler ve momentler dengelenir. Morgenstern-Price yöntemi, dilimler arasındaki etkileşimleri ve zemin parametrelerindeki değişiklikleri dikkate alarak güvenlik faktörünü belirler. Bu yöntem, dilimler arasındaki yatay ve düşey kuvvet dengelerini hesaba katarak daha hassas sonuçlar sağlar. Karmaşık geometriye ve yük koşullarına sahip şevlerin analizinde oldukça etkilidir.

2.2.4.5 Spencer Yöntemi

Spencer yöntemi, şev stabilitesi analizinde ileri düzey bir yöntemdir ve kayma yüzeyinin herhangi bir şekle sahip olabileceği durumlarda kullanılır. Bu yöntemde, kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her dilim için kuvvetler ve momentler detaylı bir şekilde hesaplanır. Spencer yöntemi, dilimler arasındaki yatay ve düşey kuvvetlerin dengelenmesini sağlar ve bu nedenle oldukça hassas sonuçlar verir. Spencer yöntemi, özellikle karmaşık zemin koşullarında ve yükleme senaryolarında güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Bu limit denge yöntemleri, mühendislerin şev stabilitesini detaylı bir şekilde analiz etmelerine olanak tanır. Her yöntemin kendi avantajları ve sınırlamaları bulunmakla birlikte, doğru yöntemin seçilmesi ve uygun analizlerin yapılması, şev stabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Şev stabilitesi analizleri, her projeye özgü koşullar dikkate alınarak yapılmalı ve risklerin minimize edilmesi için uygun önlemler alınmalıdır. Bu şekilde, mühendislik projelerinin başarısı ve güvenliği sağlanabilir.

2.2.5 Sonlu Elemanlar Yöntemleri

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), mühendislikte karmaşık yapı ve sistemlerin analizinde kullanılan etkili bir sayısal tekniktir. Bu yöntem, yapı veya sistemin geometrisini küçük ve sonlu parçalara bölerek analiz eder. Her bir parça, matematiksel fonksiyonlarla

tanımlanır ve yapı üzerindeki fiziksel etkiler bu fonksiyonlar üzerinden hesaplanır. Sonlu elemanlar yöntemi, yapıların yükler altındaki gerilmelerini, deformasyonlarını ve diğer fiziksel davranışlarını modellemek için kullanılır.

FEM, ilk olarak analiz edilecek yapının geometrisini belirler ve bu geometriyi sonlu elemanlara böler. Daha sonra, her bir elemanın malzeme özellikleri, sınır koşulları ve yüklemeler dikkate alınarak matematiksel modeller oluşturulur. Tüm elemanların katkıları birleştirilerek sistem denklemleri elde edilir ve bu denklemler sayısal yöntemlerle çözülür. Elde edilen sonuçlar, yapı veya sistemin davranışını belirlemek ve mühendislik tasarımı sürecine dahil etmek için kullanılır.

Örneğin, bir köprünün analizi için FEM kullanıldığında, köprünün geometrisi ve malzeme özellikleri sonlu elemanlar olarak modellenir ve her bir elemanın davranışı hesaplanır. Bu sayede köprünün gerilme ve deformasyonları gibi kritik veriler elde edilir.

Benzer şekilde, bir barajın analizi de sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilir. Barajın su basıncı altındaki davranışı, zeminle etkileşimi ve olası deprem etkileri analiz edilir. Bu analiz, barajın güvenliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

Sonlu elemanlar yöntemi, geniş bir uygulama alanına sahip olup, mühendislik analizlerinde ve tasarımlarında doğruluğu ve esnekliği nedeniyle vazgeçilmez bir araçtır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak en çok analiz yapılan programlar arasında PLAXİS, ANSYS, ABAQUS, COMSOL Multiphysics, SAP2000 ve LS-DYNA bulunmaktadır. Bu programlar, yapı ve malzeme analizleri için geniş kapsamlı çözümler sunar ve mühendislik projelerinde yaygın olarak kullanılır.

FEM, analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda, özellikle de karmaşık sınır şartlarına sahip problemlerin çözümünde etkin bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu yöntemin etkinliği, kullanılan eleman sayısına, elemanların şekline, sınır şartlarının doğru tanımlanmasına ve kullanılan malzeme modellerinin doğruluğuna bağlıdır.

Çizelge 2.1 Limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin karşılaştırılması

Limit Denge Yöntemi	Sonlu Elemanlar Yöntemi
1 Basitliği ve doğruluğu nedeniyle, limit denge yöntemi şu anda çoğu stabilite analizi için kullanılmaktadır.	Bilgisayar performansına dayalı sonlu analiz yöntemi, sonlu elemanların zemin mekaniği analizindeki uygulamasını geliştirmiştir.
2 Limit denge yönteminde, kritik yüzeyi geometri kullanarak aramak gereklidir.	Sonlu eleman yönteminde, çeşitli yazılımlar tarafından kritik yüzey otomatik olarak bulunur."
3 Limit denge yönteminin avantajları: Dilimlerin limit denge yöntemi, sadece statik prensiplere dayanır; yani momentlerin, dikey kuvvetlerin ve yatay kuvvetlerin toplamıyla ilgilidir. Yöntem stres, gerilme ve deplasmanlar hakkında hiçbir şey söylemez ve bu nedenle deplasman uyumluluğunu sağlamaz.	Sonlu eleman yönteminin avantajları: Sonlu eleman yönteminde yamaçları çok yüksek gerçekçilik derecesiyle modellemek mümkündür (karmaşık geometri, yükleme sırası, takviye malzemesi varlığı, su etkisi ve karmaşık zemin davranışı yasaları) ve ayrıca yerinde zemin deformasyonlarını daha iyi görselleştirir.
4 Sadece basit Mohr-Coulomb zemin modeline ihtiyaç duyulur.	Zemin için tam gerilme-şekil modeline sahip olmalıdır.
5 Deplasman hesaplayamaz.	Deplasman hesaplayabilir.
6 Limit denge yöntemi progresif hasarı modelleyemez.	Sonlu eleman yöntemi progresif hasarı modelleyebilir.

2.2.6 Şev Stabilitesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yavuz (2012), tez çalışması kapsamında PLAXIS yazılımını kullanarak donatısız ve jeogrid donatılı şev modellerini iki ve üç boyutlu olarak analiz etmiştir. Bu çalışma, donatılmış durumlarda optimal donatı parametrelerini belirlemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, donatı uzunluğu, sayısı, derinliği ve donatılar arası dikey boşlukların etkileri incelenmiştir. Donatısız durumlar için güvenlik faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca, PLAXIS yazılımı kullanılarak sayısal çözümlerle jeogrid ile güçlendirilmiş kumlu şevlerde ve donatısız şevlerde oturan şerit temellerin taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Donatıların farklı derinliklerdeki etkileri analiz edilerek en iyi donatı derinliği belirlenmiştir. Optimal donatı parametreleri kullanılarak farklı şev açıları, temel genişlikleri ve donatı tipleri için

analizler yapılmıştır. İki boyutlu analizlerin ve Keskin'in (2009) deneysel bulgularının analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Fırat ve Canik (2014) yaptıkları çalışmada, şev hareketlerine sebep olan faktörleri ve depremlerin şev stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bir yol şevinde meydana gelen kayma olayına odaklanmışlardır. Çalışmaları, şevlerin statik ve dinamik yük koşullarında, kazık boyutları, uzunlukları ve sayılarında nasıl davrandığını incelemiştir. Araştırmaları, deprem kuvvetlerine maruz kaldığında kazıksız olarak inşa edilen şevin tamamen çöktüğünü ortaya koymuştur. Doğru sayıda kazık ile desteklenen şevde, deprem sırasında kazık başları serbest bırakıldığında belirgin yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Ancak kazık başları sabitlendiğinde, deprem koşullarında stabil bir şev elde edilmiştir.

Mısır (2018), eğimli arazide inşaat faaliyetleri için kayma yüzeylerini ve güvenlik faktörlerini değerlendirmiştir. Çalışmanın ana odak noktası, sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS ve geleneksel hesaplama yöntemlerini kullanan GEO5 programlarının değerlendirilmesiydi. Her iki programda da problem, tutarlı özellikler kullanılarak üç aşamalı olarak ele alınmıştır. PLAXIS 2D'de Mohr-Coulomb zemin modeli uygulanmış ve çözümler elde edilmiştir, Geo5 ise Janbu, Spencer, Sarma ve Fellenius gibi geleneksel teknikleri kullanmıştır. Bulgular karşılaştırıldığında, her iki programın sonuçlarının genellikle benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca, PLAXIS 2D'de mukavemet azaltma tekniği ve ağ iyileştirmesi kullanılarak yapılan stabilite değerlendirmelerindeki farklılıklar vurgulanmıştır. Mukavemet azaltma sürecinde ağ iyileştirmesi seçeneği, detaylı sorun çözümüne olanak tanıyarak kayma yüzeyleri ve güvenlik faktörlerinin sınır denge yöntemlerine yakın olmasını sağlamıştır.

Karadağ vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Yalova ili Çiftlikköy ilçesinde Gençlik Caddesi'nin 0,65 km noktasında meydana gelen heyelanın stabilite sorunu, iki farklı sonlu elemanlar sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Modelleme, sahadan toplanan doğal zemin parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Stabilite çalışmaları Slide ve Plaxis kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çaplar sabit tutularak, çeşitli uzunluklarda (6,00, 8,00, 10,00, 12,00 ve 14,00 m) kazık uygulamalarıyla önerilen çözümler değerlendirilmiştir. İç

kuvvetler ve yer değiştirme değerlerine dayanarak, 8,00 m uzunluğunda tek sıra 60,00 cm çapında fore kazık en uygun çözüm olarak belirlenmiştir. Bu adımla, güvenlik faktörünü 4,90'a yükselterek ve yaklaşık 65,00 mm kazık başı deplasmanıyla şev stabilite sorununu çözerek kazıklı duvar çözümü uygulanmış ve yolun güvenli kullanımı garanti altına alınmıştır.

n (2019) yaptığı tez çalışmasında, şev stabilitesinin şev yüksekliği, eğim açısı, yükler ve zemin davranışı gibi faktörler tarafından belirlendiğini ifade etmiştir. Araştırmada, şev hareketlerine karşı alınabilecek önlemler ve bu hareketlere sebep olan etkenler incelenmiştir. Plaxis 2D ve Slide programları kullanılarak şev stabilitesinin analiz edilmesine değinilmiştir. İlk olarak, şev Plaxis 2D programı ile modellenmiş, zemin parametreleri sabit tutularak yük değerleri, şekilleri, konumları ve zemin davranış modelleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bu modellemelerin güvenlik katsayıları referans alınarak karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, en uygun çözüm olarak fore kazık uygulaması belirlenmiş ve gerekli tüm analizler yapılarak sorun çözüme kavuşturulmuştur.

Polat (2019) tez çalışmasında, st kısmında planlanmış bir yapı ve bir karayolu bulunan bir şev kesitini incelemiştir, bu nedenle dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bölgede hem statik hem de deprem yükleri nedeniyle afet riski bulunmaktadır. İlk olarak, eğimli arazinin analizi için limit denge yöntemleri kullanılarak statik yükler altında güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra, karayolundan kaynaklanan araç yükleri ve literatürde sıkça kullanılan depremler göz önüne alınarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemelerde, sonlu elemanlar yöntemlerini kullanan Plaxis yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde tanımlanan ampirik formüllerle hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. şev stabilite çalışmalarında, hem statik hem de dinamik yaklaşımların etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu bağlamda, bilgisayar yazılımları ile sonlu elemanlar yönteminin kullanılması bu özel durumda daha doğru bulgular sağladığı belirlenmiştir.

n ve Yıldız (2020), bir vaka çalışmasıyla bir şev stabilitesi sorununu incelemiştir. şev üzerinde, göçme riski yüksek bir yol güzergahı bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, şev

hareketini önleyecek tasarımı belirlemek ve şev stabilitesi analizinde kullanılan programların tutarlılığını araştırmaktadır. İlk olarak, şevin topoğrafik özellikleri belirlenmiş ve mevcut durum modeli oluşturulmuştur. Şev modeline ait veriler laboratuvar ve arazi çalışmalarıyla elde edilmiştir. Geri analiz yöntemi kullanılarak göçme yüzeyinin özellikleri belirlenmiştir. Mevcut durumu gösteren model üzerinde, şevi korumak için bir tasarım yapılmıştır. Analizler için sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D ve denge sınırı yöntemine dayalı Slide V.6.0 programları kullanılmıştır. Sonuç olarak, güvenlik analizinde kullanılan programlar tutarlı sonuçlar vermiştir. Yüzey suyu drenajı için teknikler önerilmiş ve ele alınan şev stabilitesi sorununda jet grouting ile toprak iyileştirmesi uygun bulunmuştur.

Şen (2021) tez çalışmasında, kazı türlerini tanımlayarak sığ ve derin kazılar hakkında detaylı bilgiler sunmuştur. Sığ ve derin kazılar üzerine istatistiksel bir örnek çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmanın devamında, tarihsel süreçten günümüze kadar dayanma yapıları incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Derin kazılarla ilgili yapılacak işlemler detaylandırılmış ve olumlu ve olumsuz yönleri karşılaştırılmıştır. Fore kazık, ön germeli ankrajlar ve kirişlerle ilgili şartlar özetlenmiş, ankrajlar geniş bir şekilde anlatılmış ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. İstanbul'da ankrajlı kazı yöntemi ile gerçekleştirilen bir derin kazı projesi incelenmiştir. Bu sahada zemin parametreleri kullanılarak Rocscience SLIDE programı ile analizler yapılmış, deplasman değerleri ve gerilme analizleri için ise Plaxis 2D programına başvurulmuştur. Plaxis 2D programında, malzeme modellemelerinin etkisini görmek amacıyla farklı zemin modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiş ve inklinometre ile ölçülen değerlerle kıyaslanmıştır. Plaxis 2D ve Slide programları ile elde edilen güvenlik katsayıları ve kritik kayma yüzeyleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Sivrikaya (2022) tez çalışmasında Trabzon ilindeki Düzköy Çal Orta Mahallesi'nde meydana gelen heyelanı incelemiştir. İnceleme kapsamında arazi gözlemleri, zemin araştırma çalışmaları ve laboratuvar deneyleri yapılarak detaylı bir geoteknik zemin etüd raporu hazırlanmıştır. Yapılan sondaj çalışmaları ve elde edilen deney sonuçlarıyla inceleme alanının zemin geoteknik parametreleri belirlenmiştir. Heyelanın yaşandığı bölgede uygun ıslah yöntemleri üzerinde çalışılmış ve şevde güvenliği sağlamak için

gerekli önlemler belirlenmiştir. Şev stabilite analizleri için limit denge ve sonlu elemanlar yöntemlerini kullanan paket programlar ile analizler gerçekleştirilmiş, mevcut durum değerlendirilmiş ve güvenlik faktörleri hesaplanmıştır. Belirlenen uygun ıslah yöntemleri programda tanımlanmış ve tekrar analizler yapılarak güvenlik faktörleri artırılarak şevin stabil hale getirilmesi sağlanmıştır.

Sürücü (2022) tez çalışmasında Isparta ilinde, topuk bölümünde yapı inşa edilmesi planlanan bir şevin heyelan tehlikesi incelenmiştir. Şevin projelendirilmesinde yük kaldırılması, palyelendirme, yüzeysel drenaj, fore kazık, istinat duvar ve bitkilendirme gibi iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu iyileştirme çalışmalarının şev üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için Plaxis, Slide ve FLAC Slope programları kullanılarak sonlu farklar, limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri ile kazık sistemi ile şev stabilitesini sağlamaya yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Her üç yöntemin de güvenlik faktörleri benzer sonuçlar vermiş, hesaplamalar doğrulanmıştır. Ayrıca, projenin arazide başarılı bir şekilde uygulanması sağlanmıştır.

Kul (2022) tez çalışmasında Beşikdüzü İskenderli Tonya (Trabzon) bölgesinde meydana gelen heyelanın mevcut durumunu incelemiştir. Heyelanın mevcut durumu Plaxis programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiş ve güvenlik katsayısı değeri 0,79 olarak belirlenmiştir. Heyelan riski bulunan alanda yapılan kademelendirme çalışmaları sonucunda güvenlik katsayısı değeri 1,11 olarak ölçülmüştür. İstenilen güvenlik katsayısı değerine ulaşamayan durumda iksa duvarı yapılması planlanmış ve yapılan analizler sonucunda güvenlik katsayısı 1,27 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, fore kazık sistemi kullanılarak yapılan analizlerde güvenlik katsayısı değeri 1,84 olarak bulunmuştur. Yapının güvenli hale getirilebilmesi için gereken güvenlik katsayısı sağlandıktan sonra sistem güçlendirilmiştir. Heyelanın önlenmesi amacıyla yapılan zemin iyileştirme çalışmaları ve analizler, sonlu elemanlar yöntemiyle detaylı bir şekilde çözümlenmiştir.

2.3 Dolgu Barajlar

Dolgu barajlar, genellikle toprak, kaya veya diğer doğal malzemelerden inşa edilen büyük su depolama yapılarıdır. Bu baraj türü, suyun tutulması ve yönetilmesi için kullanılır ve dünyanın birçok yerinde yaygın olarak tercih edilir. Dolgu barajlar, inşaatlarında yerel malzemelerin kullanılması ve yüksek dayanıklılıkları nedeniyle avantajlıdır. Ana bileşenleri, baraj gövdesi, dolgu malzemesi, sızdırmazlık katmanı ve drenaj sistemlerinden oluşur.

Dolgu barajlar, genellikle toprak, kaya ve silt gibi doğal malzemelerden yapılan yapılar olup, baraj gövdesi genellikle merkezi bir geçirimsiz çekirdek ve bu çekirdeği çevreleyen geçirgen dolgu malzemelerinden oluşur. Drenaj sistemleri, suyun güvenli bir şekilde boşaltılmasına yardımcı olur.

Dolgu barajlar sağlam yapılar olmalarına rağmen su sızıntısı, erozyon, stabilite sorunları ve deprem etkileri gibi problemlerle karşılaşabilirler. Su sızıntısı, barajın çekirdek kısmında veya dolgu malzemelerinde meydana gelebilir. Erozyon, su akışı nedeniyle dolgu malzemelerinin aşınmasına ve barajın zayıflamasına yol açabilir. Stabilite sorunları, inşaat malzemeleri ve zemin koşullarıyla ilişkilidir. Deprem etkileri ise yapısal hasar riski taşır.

Dolgu barajlar, çevresel etkenlerden etkilenebilir. Barajın yapımı ve işletimi, çevredeki ekosistemler üzerinde önemli etkiler yaratabilir. Su seviyesindeki değişiklikler nehir ekosistemlerini ve sucul yaşamı etkileyebilir. Ayrıca, doğal habitatların tahrip edilmesi ve yerel flora ve fauna üzerinde olumsuz etkiler oluşabilir.

Dolgu barajların çeşitli türleri vardır. Bu barajlar, homojen dolgu barajlar, kaya dolgu barajlar ve zonlu dolgu barajlar olarak sınıflandırılabilir. Homojen dolgu barajlar tek tip dolgu malzemesiyle inşa edilir ve genellikle küçük ölçekli projeler için uygundur. Zonlu dolgu barajlar ise farklı geçirgenlik ve dayanıklılık özelliklerine sahip zonlara ayrılmış dolgu malzemeleriyle yapılır ve su sızıntısını önlemekte etkilidir. Kaya dolgu barajlar

büyük kaya parçaları kullanılarak inşa edilir ve genellikle yüksek dayanıklılık ve stabilite gerektiren büyük projeler için tercih edilir.

Sonuç olarak, dolgu barajlar su yönetimi ve depolaması için önemlidir. İnşaat ve teknik çeşitlilikleriyle birlikte, çevresel etkiler ve yapısal sorunlar göz önünde bulundurulmalıdır. Dolgu baraj projelerinde çevresel etki değerlendirmeleri ve kaliteli mühendislik çözümleri büyük önem taşır.

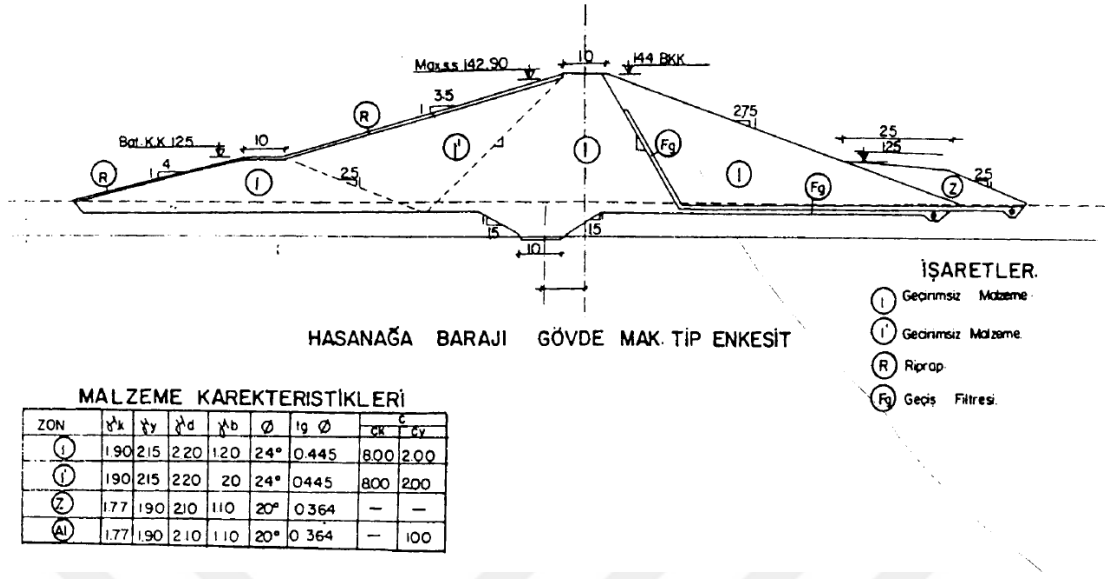
2.3.1 Toprak Dolgu Barajlar

Toprak dolgu barajlar, genellikle yerel toprak, kum ve çakıl gibi doğal malzemelerin kullanıldığı su tutma yapılarıdır. Bu barajlar, suyun depolanması ve yönetilmesi için ekonomik ve dayanıklı çözümler sunar. Genellikle su kaynaklarını koruma amacıyla tercih edilirler.

Baraj gövdeleri, genellikle toprak dolgu malzemeleriyle yapılarak suyun geçirilmesini önlemek için geçirimsiz bir çekirdek tabaka ile desteklenir. Baraj temeli geniş bir alana yayılır ve dolgu malzemeleri tabakalar halinde sıkıştırılarak yerleştirilir. Bu yöntem, barajın dayanıklılığını artırır ve su basıncına karşı direncini sağlar.

Toprak dolgu barajların inşasında yerel malzemelerin kullanımı maliyetleri düşürür ve inşaat sürecini kolaylaştırır. Ancak, bu tür barajlar su sızıntısı ve erozyon gibi sorunlarla karşılaşabilir. Bu nedenle, baraj gövdesinin doğru tasarımı ve düzenli bakımı büyük önem taşır.

Sonuç olarak, toprak dolgu barajlar, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir su yönetimi için önemli bir rol oynar. Yerel malzemelerin kullanımı ve doğru mühendislik yöntemleriyle inşa edilen bu yapılar, su kaynaklarının korunması ve yönetilmesinde güvenilir bir çözüm sunar.



Şekil 2.2 Homojen Dolgu Toprak Baraj (Orhon 1997)



Resim 2.4 Gebere Barajı Toprak Dolgu Baraj (İnt.Kyn.4)

2.3.2 Kaya Dolgu Barajlar

Kaya dolgu barajlar, büyük ölçüde kaya parçaları kullanılarak inşa edilen su tutma yapılarıdır. Bu barajlar, yüksek dayanıklılık ve stabilite gerektiren alanlarda tercih edilir. Genellikle doğal kayalardan elde edilen büyük taşlar veya kırma taşlar kullanılarak yapılırlar.

Baraj gövdeleri genellikle kaya dolgu malzemeleriyle oluşturulur ve suyun geçirilmesini önlemek için geçirimsiz bir çekirdek tabaka ile desteklenir. Barajın temeli kaya zemin üzerine sağlam bir şekilde yerleştirilir ve kaya dolgu malzemeleri büyük özenle yerleştirilir ve sıkıştırılır.

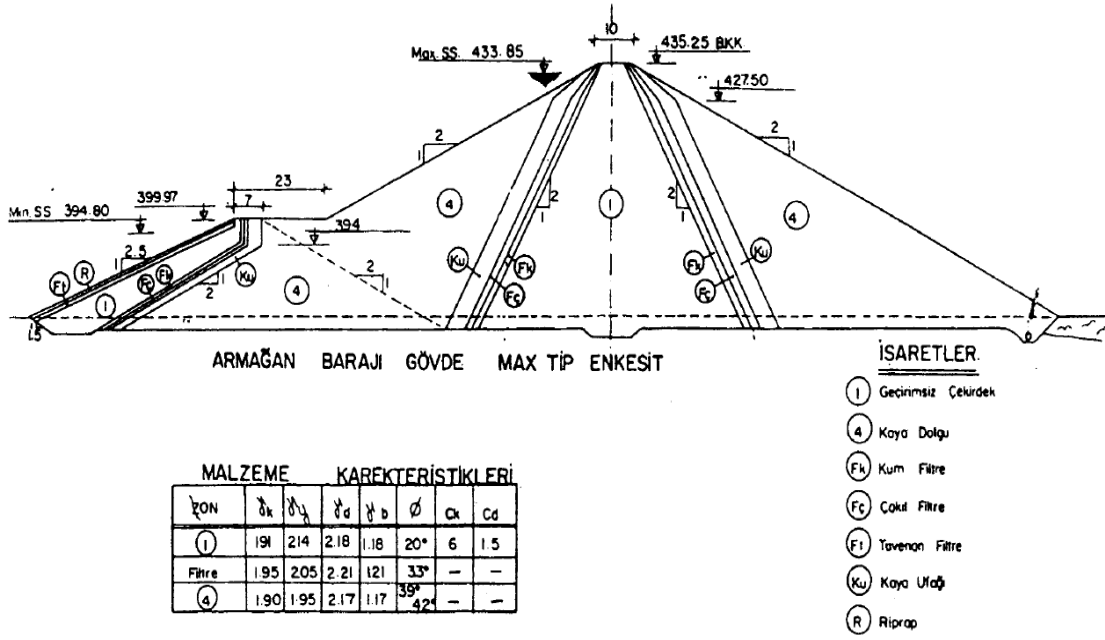
Kaya dolgu barajların inşası genellikle daha uzun sürebilir ve daha yüksek maliyetli olabilir, ancak yüksek dayanıklılık ve uzun ömürleri nedeniyle tercih edilirler. Bu tür barajlar, özellikle stabilite gerektiren ve su basıncına maruz kalan alanlarda güvenilir bir çözüm sunar.

Kaya dolgu barajlar, genellikle büyük su hacimlerini depolamak ve yönetmek için kullanılır. Yüksek dayanıklılık ve doğal malzemelerin kullanımı sayesinde çevresel etkileri minimize etme potansiyeline sahiptirler. Ancak, bu tür barajların inşası ve bakımı, doğal kaynakların korunması ve çevre faktörlerinin göz önünde bulundurulması açısından dikkatli planlama gerektirir.

Sonuç olarak, kaya dolgu barajlar, büyük mühendislik projelerinde su kaynaklarının yönetimi ve korunmasında kritik bir rol oynar. Bu barajların inşasında kullanılan teknikler, zamanla gelişmiş ve daha güvenli, verimli yapılar oluşturulmasına olanak tanımıştır.

Kaya dolgu barajlar, jeoteknik mühendisliği alanında uzun vadeli dayanıklılık ve güvenlik açısından sağlam bir çözüm sunmakta olup, doğru tasarım ve malzeme seçimi ile optimum performans sağlarlar. Bununla birlikte, bu barajların inşası sırasında çevresel

etkilerin en aza indirilmesi için sürdürülebilir mühendislik uygulamaları ve doğal kaynakların korunması da büyük önem taşır.



Şekil 2.3 Kaya Dolgu Baraj (Orhon 1997)



Resim 2.5 Hasan Uğurlu Barajı Kıl çekirdekli kaya dolgu tipindeki bir baraj (İnt.Kyn.4)

2.3.3 Dolgu Barajlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Çilingir (2007) çalışmasında, matematiksel model olarak seçilen Büyükçekmece Barajı gövdesinde meydana gelen sızıntıları değerlendirmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi ve bilgisayar uygulaması Geo-Studio kullanılmıştır. Devlet Su İşleri'nin (DSİ) sızıntı gözlemleri elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İlk olarak, çeşitli tekniklerle serbest su yüzeyi çizilmiş ve barajın alt kısmından sızıntı çıkış noktası ile birim debi genişliği belirlenerek toplam sızıntı debisi hesaplanmıştır. Program, teorik hesaplamalar ile ölçümler arasında uyumluluk göstererek baraj içindeki sızıntının olası bir tehlike oluşturup oluşturmadığını belirlemiştir.

Opan (2018) çalışmasında, deprem etkisi altında kalan beton ağırlık barajların tepe ve topuk noktalarında meydana gelen deplasman ile devrilme ve kayma durumlarına karşı güvenlik katsayıları arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmada, yüksekliği h ve taban genişliği b olan beton ağırlık barajın $0.1g-0.4g$ deprem ivme aralığında güvenlik katsayıları Pseudo Analiz yöntemiyle analiz edilmiştir. Beton ağırlık barajların b/h oranının, boşluk suyu basınç kuvveti için basınç azaltma katsayısı ve deprem ivmesi ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Sonuçlar, kayma ve devrilme durumlarına karşı güvenlik katsayılarının boşluk suyu basınç kuvveti ve deprem ivmesi arttıkça azaldığını, b/h oranı arttıkça güvenlik katsayısının arttığını ve deplasmanların azaldığını göstermektedir.

Ateş vd. (2019) yaptıkları çalışmada, Muğla ili Milas ilçesinde bulunan ön yüzü beton kaplı kum çakıl dolgu Derince Barajı'nın deprem etkilerini incelemiştir. 2014 yılında kullanılmaya başlanan barajın gövde ve anakaya üzerine ivmeölçer cihazları yerleştirilerek, bölgenin 1900 yılından günümüze kadar olan deprem geçmişi incelenmiştir. Çalışmada, bölgede meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sıralaması yapılmış ve $M_w=4.4$ 'ten büyük olan 9 depremin anakaya ve gövde üzerindeki ivmeölçer kayıtları kullanılarak Spektral Normalize Edilmiş Standart Oran ve Yatay-Düşey Spektral Oranı yöntemleriyle analiz edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, her iki yöntemin de baskın salınım frekansları ve büyütme değerlerinin benzer olduğu ve her iki yöntemin de kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kılıç (2019) yaptığı tez çalışmasında, batı Akdeniz havzasında yer alan Kaş-Kasaba Kıbrıs Barajı için deprem güvenliğini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, barajın sismik tehlike altında nasıl davrandığını anlamak için detaylı sismik tehlike analizleri yapılmış ve dolgu şevlerinin stabilite analizleri ile sayısal modelleme ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, barajın deprem etkisi altında güvenliği sağlamak için gerekli önlemler ve stabilite iyileştirmeleri önerilmiştir.

Çavuş (2021) yaptığı çalışmasında, sert ve yumuşak alüvyon temeller üzerine oturan homojen kil dolgu barajların memba ve mansap şevlerinin stabilitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şev eğimleri, temel kazı derinlikleri ve alüvyon özellikleri, kazı-dolgu maliyetleri ve baraj güvenliği açısından analiz edilmiştir. Araştırmanın sonuçları, başarısızlık yüzeylerinin alüvyona nüfuz ettiğini ve minimum güvenli başarısızlık yüzeylerinin alüvyonun sertliği azaldıkça daha derin ve geniş olduğunu göstermiştir. Bu durumda, alüvyon zeminler için dolgu şevlerinin daha yatık yapılması ve baraj altında kazıların derinleştirilmesi önerilmiştir. Öte yandan, sert alüvyon temeller üzerine inşa edilen barajlarda minimal alüvyon kazısının yeterli olabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, homojen kil dolgu barajlarda sıkı alüvyon temeller üzerine yapılan baraj dolgularının, memba ve mansap şevler için daha büyük stabilite sağladığı gösterilmiştir.

Onat (2023) tez çalışmasında, kil çekirdekli kum-çakıl tipindeki bir dolgu baraj ile kil çekirdekli kaya tipindeki bir dolgu barajın inşaat sonu, işletme ve ani boşalma durumlarında baraj gövdesinin şev stabilite analizini statik ve deprem etkisi altında karşılaştırmıştır. Baraj gövdesinin geometrisi AutoCAD 2018 programı kullanılarak çizilmiş ve stabilite analizleri Rocscience Slide programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, statik durumda elde edilen emniyet katsayılarının genellikle istenen sınırlar arasında olduğu ancak deprem etkilerinin dikkate alındığında bazı durumlarda istenen sınırların altında kaldığı tespit edilmiştir. Özellikle deprem ivme değerlerinin yüksek olduğu durumlarda ve işletme ile ani boşalma durumlarında bu durumun daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

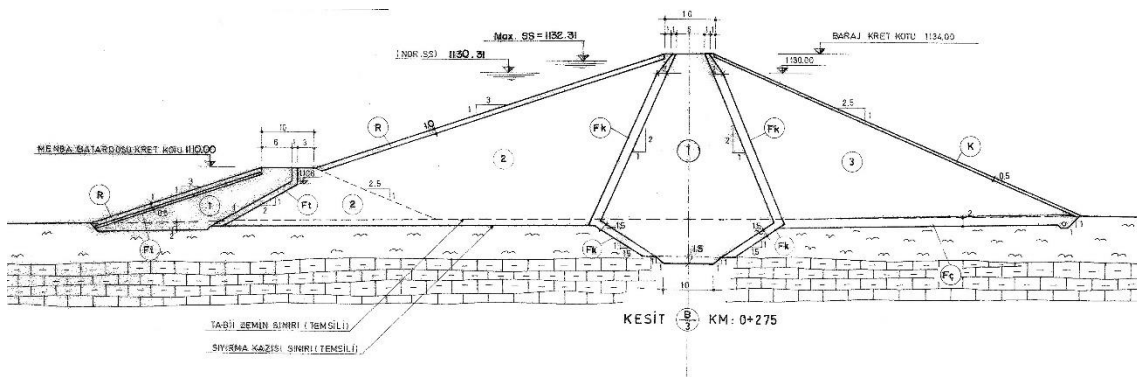
3.1 Materyal

3.1.1 Dolgu Baraj Geometrisi

Bu tez çalışmasında Afyonkarahisar’da bulunan ve 2008 yılında yapımı tamamlanan Akdeğirmen Barajı’nın 0+275 KM’sindeki B/2 kesitinin geometrisi kullanılmıştır.

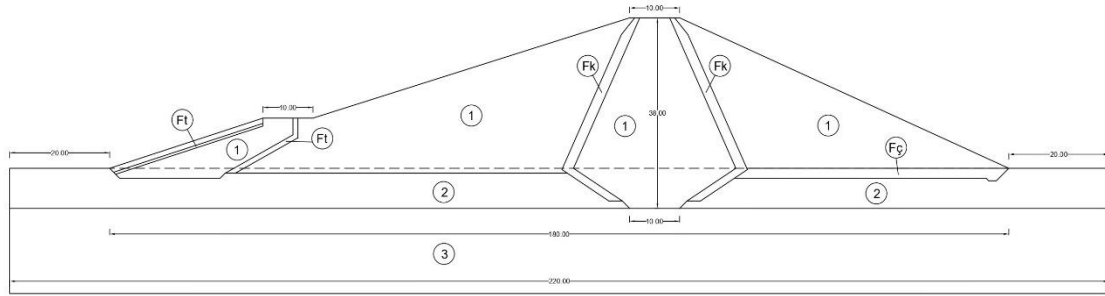


Resim 3.1 Afyonkarahisar Akdeğirmen Barajı



Şekil 3.1 Akdeğirmen Barajı’nın Kesiti

Şekil 3.1’de kesiti verilen barajın AutoCAD 2025 programı ile geometrik çizimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2). Çizimi yapılan barajın noktalarının koordinatları belirlenmiştir. Belirlenen koordinatlar doğrultusunda da analiz programları üzerinden veri girişi sağlanmıştır.



Şekil 3.2 Akdeğirmen Barajı’nın AutoCAD çizimi

Şekil 3.2’de gösterilen baraj kesiti üzerinde verilen işaretlerde kullanılacak olan malzemelerin isimleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu verilen fiziksel özellikler analiz programlarında veri girişi için kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

İşaret	Malzeme İsmi	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Kohezyon	İçsel Sürtünme Açısı (o)
1	Katkısız	15,82	119,15	14,25
1	%1 CE	15,62	146,71	14,06
1	%1 PP	14,81	115,12	23,08
1	%1 CE + %15 MT	15,8	167,47	19,58
1	%1 PP + %5 MT	15,05	159,3	20,35
2	Alüvyon	16,5	10	23
3	Marn	20	300	38
Fk	Filtre Kum	17	0	35
Fç	Filtre Çakıl	17	0	35
Ft	Filtre Tüvenan	17	0	35

3.1.2 Kil Zemin

Bu çalışmada kil zemin olarak Afyon Kocatepe Üniversitesi ANS Kampüsü'nden temin edilmiştir. Kil zeminin fiziksel özelliklerini belirlemek için TS 1900-1 standardından yararlanılmıştır. Fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Kil zeminin fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikleri	Kil zemin
<2.0 mm (%)	100
<0.075 mm (%)	89
wL (%)	40,9
wP (%)	22,3
Gs	2,64
Sınıflandırma (USCS)	CL

wL, likit limit; wP, plastik limit; Gs, spesifik gravite.

3.1.3 Cam Elyaf

Katkısız zemine katılacak olan cam elyaflar Fiber Elyaf Kompozit Malzemeler San. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Temin edilen cam elyaflar 12 mm uzunluğundadır. Cam elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Cam elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Cam Elyaf
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,6
Çekme Mukavemeti (GPa)	3,4
Elastite Modülü (GPa)	77
Lif Çapı (µm)	13 -15
Lif Uzunluğu (mm)	12

3.1.4 Polipropilen Elyaf

Katkısız zemine katılacak olan polipropilen elyaflar Kratos Kompozit Teknolojileri A. Ş.'den temin edilmiştir. Polipropilen elyaflar 12 mm uzunluğundadır. Polipropilen elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Polipropilen elyafın fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Polipropilen Elyaf
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	0,91
Çekme Mukavemeti (GPa)	0,5 - 0,7
Elastite Modülü (GPa)	2 - 2,8
Lif Çapı (µm)	18 – 20
Lif Uzunluğu (mm)	12

3.1.5 Mermer Tozu

Atık katkı maddesi olarak kullanılan mermer tozu Afyonkarahisar'da bulunan bir mermer işleme fabrikasından temin edildi. Mermer tozunun fiziksel özellikleri Çizelge 3.5'de, kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.5 Mermer tozunun fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikleri	Mermer tozu
<2.0 mm (%)	100
<0.075 mm (%)	94,6
Gs	2,56

Gs, spesifik gravite.

Çizelge 3.6 Mermer tozunun kimyasal özellikleri (%)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	LOI
Mermer Tozu	0,2	0,11	0,07	54,5	0,3	0,08	0,02	44,52

LOI, kalsinasyon kaybı (bir malzemenin ısıtılması sırasında kaybettiği ağırlığı ifade eder).

3.1.6 SLIDE Programı

SLIDE, toprak veya kaya şevlerinde dairesel veya dairesel olmayan göçme yüzeylerinin emniyet katsayısını değerlendiren bir 2D şev stabilitesi programıdır. Düşey dilim limit denge yöntemlerini kullanarak kayma yüzeylerinin stabilitesini analiz eder. Tek tek kayma yüzeyleri analiz edilebilir veya belirli bir şev için kritik kayma yüzeyini bulmak amacıyla arama yöntemleri uygulanabilir. SLIDE, kullanımı oldukça basit olup, karmaşık modeller hızlı ve kolay bir şekilde oluşturulup analiz edilebilir. Harici yükleme, yer altı suyu ve destek, çeşitli şekillerde modellenir.

3.1.7 PLAXIS Programı

Plaxis, zemin mekaniği problemlerini çözmek için geoteknik mühendislikte yaygın olarak kullanılan güçlü bir sonlu elemanlar analiz programıdır. Şev stabilitesi, kazık temelleri, tünelleme ve baraj inşaatı gibi karmaşık projeler için 2D ve 3D modelleme desteği sağlar. Yazılım, Mohr-Coulomb ve Hardening Soil gibi modeller kullanarak çeşitli zemin davranışlarını simüle edebilir ve yer altı suyu akışı, dinamik yüklemeler ve sıcaklık etkilerini içerebilir. Plaxis, harici yükler ve çeşitli destek elemanları dahil olmak üzere farklı yükleme ve destek koşullarını modelleme imkânı sunar. Kullanıcı dostu arayüzü ve kapsamlı analiz araçları, mühendislerin modelleri kolayca oluşturmasını, sonuçları etkili bir şekilde yorumlamasını ve güvenli, ekonomik ve verimli tasarım çözümleri geliştirmesini sağlar.

3.2 Yöntem

Kil zeminin özelliklerinin belirlenmesi için TS1900-1 standardında bulunan zemin tanımlama deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sırayla Özgöl ağırlık, Dane çapı dağılımı, Kıvam limit ve Kompaksiyon deneyleridir. Kil zeminin özellikleri tanımlandıktan sonra Cam elyaf, Polipropilen elyaf ve mermer tozu karışımları hazırlanmıştır ve bu karışımlara kompaksiyon deneyleri uygulanarak KBHA ve optimum su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Optimum kullanılacak olan oranı tespit etmek için katkısız numuneye %0,5 + 1 + 2 oranlarında CE ve aynı oranlarda PE katılarak numuneler hazırlanmıştır.

Hazırlanan numuneler TS1900-2 standardında bulunan Serbest basınç deneyine tabii tutularak optimum oranlar belirlenmiştir. Belirlenen optimum oranlara %5 + 10 + 15 oranlarında MT eklenerek elde edilen numuneler tekrardan Serbest basınç deneyine tabii tutulmuş ve dayanım değerleri bulunmuştur. Elde edilen değerler sonucunda en yüksek dayanımı veren oranlar belirlenmiştir. Belirlenen oranlar kullanılacak olan programlar içerisine işlenerek gerekli modellemeler yapılmıştır. Bu modeller ışığında da gerekli analizler yapılarak analiz sonuçları belirlenmiştir.

3.2.1 Zemin Tanımlama Deneyleri

Zemin özelliklerini belirlemek için Özgül ağırlık, Dane çapı dağılımı, Kıvam limit ve Kompaksiyon deneyleri yapılmıştır.

3.2.1.1 Özgül Ağırlık Tayini

TS1900-1 standardında belirtilen deney yöntemi kullanılarak numune hazırlığında kullanılacak olan zeminin özgül ağırlığı belirlenmiştir.

Aşamalar;

1. İlk olarak, özgül ağırlığı belirlenmek istenen numune etüde kurutulur ve ardından bir desikatörde soğumaya bırakılır.
2. Numune soğuduktan sonra, 4 nolu elekten (4.75 mm çaplı) geçirilir ve elek üzerinde kalan 50 gram malzeme alınır.
3. Kurutulmuş numunenin ağırlığı ile boş piknometre ve kapağının ağırlığı kaydedilir.
4. Piknometreye saf su 500 ml çizgisine kadar eklenir. Su, piknometre ve kapağının ağırlığı kaydedilir.
5. Bir huni kullanarak, suyun üçte biri boşaltıldıktan sonra hazırlanan kuru malzeme dikkatlice piknometreye dökülür.
6. Piknometre içindeki numunede hava kabarcığı kalmayacak şekilde çalkalanır.

7. Çalkalama işleminden sonra bir piset ile su, piknometrenin işaret çizgisine kadar eklenir.
8. Terazı üzerinde piknometre, su ve havası alınmış malzemenin ağırlığı kaydedilir.

Özgöl ağırlık değeri 3.1’de verilen denklem yardımıyla bulunmuştur.

$$\gamma_s = \frac{W_1}{W_1 + W_2 - W_3} \quad (3.1)$$

Denklemde;

W_1 = Kuru zemin ağırlığı (gr)

W_2 = Su + piknometre ağırlığı (gr)

W_3 = Su + piknometre + zemin ağırlığı (gr)

3.2.1.2 Dane Çapı Dağılımı

TS 1900-1 standardında yer alan yıkamalı eleme metodu uygulanarak zeminin granülometri eğrisi oluşturulmuştur.

Aşamalar;

1. Numune metal bir tepsiye konur ve +105°C’de 12 saat kurutulmak üzere etüve konur.
2. Kurutma işleminden sonra numune etüvden çıkarılır ve çeyreklemeye için zemine eşit bir şekilde dağıtılır.
3. Numune ezildikten sonra çeyreklemeye işlemi uygulanır.
4. Çeyreklemeye, 500-600 gram arasında ezilmiş numune elde edilene kadar devam eder.
5. Metal tepsi boş ağırlığı ile ezilmiş numune ile birlikte ağırlığı kaydedilir.
6. Toprak parçacıkları arasındaki bağları zayıflatmak ve statik elektriği azaltmak için bir çözelti hazırlanır. Çözelti için su eklenerek ağırlık 250 gram oluncaya

kadar su ilave edilir. Daha sonra 1.5-2,0 gram NaHCO_3 ve 8.00-9.00 gram NaPO_3 ilave edilir.

7. Çözelti iyice karıştırıldıktan sonra toprağın üzerine dökülür ve tekrar karıştırılır.
8. Karışımın toprakla tepkimesi için ortalama on iki saat beklenir.
9. Numunenin tamamen karıştırıldığından emin olduktan sonra bulanık su yavaş yavaş 75 μm elek üzerine dökülür. Eleklerin hiçbirinin aşırı doldurulmamasına dikkat edilmelidir. 75 μm elek üzerinde kalan malzeme miktarı hiçbir zaman 150 gramı geçmemelidir.
10. Numuneye tekrar su eklenir. 75 μm elekten geçirilmiş bulanık su atılır. Su, 75 μm elekten geçene kadar yıkama işlemine devam edilir.
11. Eleklerde kalan tüm malzeme tepsi veya porselen potlara boşaltılır ve $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurutulmak üzere fırına konur.
12. Fırından kurutulan malzeme uygun bir elek serisi kullanılarak elekten geçirilir.

Deney sonuçları standarda uygun bir excel tablosuna aktarılır ve granülometri eğrisi oluşturulur.

3.2.1.3 Kıvam Limit Deneyi

Kıvam limit deneyi sonucunda, zeminin likit limit ve plastik limit değerleri elde edilmiştir.

Likit limit deneyi genellikle ASTM D4318 veya TS1900-1 gibi standartlara göre yapılır.

Aşamalar;

1. Zemin numunesi alınır ve temiz bir ortamda çalışılarak hazırlanır. Numune alındıktan sonra kısa sürede deneye başlanmalıdır.
2. Numune, bir miktar su ile homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılır. Bu adım, zeminin doğal nem içeriği ile karıştırılarak kıvamının ayarlanmasını sağlar.

3. Standart likit limit cihazı kullanılır. Bu genellikle bir çubuk ve bir ayarlanabilir çarpmalı cihazdan oluşur.
4. Hazırlanan numune, likit limit cihazının içine dikkatlice yerleştirilir. Numune cihazın ortasına yerleştirilir ve düzleştirilir.
5. Numune yüzeyi düzeltilir ve üst kısmı düz bir şekilde kazınır. Bu adım, numunenin likit limitinin doğru bir şekilde belirlenmesi için önemlidir.
6. Bir sonda veya çubuk, belirli aralıklarla numunenin yüzeyinden geçirilir ve numunenin belirli bir akışkanlık durumuna ulaştığı anı belirlemek için kullanılır. Bu işlem, zeminin akışkan hale geçtiği su içeriğini belirlemek için yapılır.
7. Numunenin akışkanlık durumuna geçtiği su içeriği kaydedilir. Bu su içeriği, likit limit olarak adlandırılır.
8. Gerektiğinde, deney aynı numune için birkaç kez tekrarlanabilir ve sonuçlar ortalaması alınabilir.

Plastik limit deney aşamaları;

1. Zemin numunesi alınır ve temiz bir ortamda çalışılarak hazırlanır. Numune alındıktan sonra kısa sürede deneye başlanmalıdır.
2. Numune, bir etüvde belirli bir sıcaklıkta (genellikle $+60^{\circ}\text{C}$ veya $+110^{\circ}\text{C}$) kurutulur. Kurutma süresi, numunenin nem içeriğine bağlı olarak değişir ve numunenin tamamen kuru olduğundan emin olunmalıdır.
3. Kurutulmuş numune, uygun bir şekilde ufalanır ve homojen bir kıvam elde edilir. Bu adım, numunenin plastik limitinin doğru bir şekilde belirlenmesi için önemlidir.
4. Numune, bir rulo yöntemiyle veya elle, belirli bir kıvama getirilir. Bu işlem, numunenin belirli bir su içeriği kazandığı noktada şekil değiştirmeye başladığı belirlenene kadar devam eder.
5. Standart plastik limit cihazı kullanılır. Bu genellikle bir rulo ve bir ayarlanabilir cihazdan oluşur.
6. Hazırlanan numune, plastik limit cihazının içine dikkatlice yerleştirilir. Numune, cihazın ortasına yerleştirilir ve düzleştirilir.

7. Numune, yavaş yavaş rulo edilir veya şekil verilir. Numunenin kırılmaya başladığı veya şeklinin değişmeye başladığı su içeriği belirlenir. Bu işlem, zeminin plastik limitinin doğru bir şekilde belirlenmesi için önemlidir.
8. Numunenin şekil değiştirmeye başladığı su içeriği, plastik limit olarak adlandırılır ve kaydedilir.
9. Gerektiğinde, deney aynı numune için birkaç kez tekrarlanabilir ve sonuçlar ortalaması alınabilir.

Deney sonuçları standarda uygun excel tablosuna not edilir ve likit limit sonuçlarıyla uygun grafik oluşturulur. Oluşturulan grafikte 25 vuruşa denk gelen değer LL değeridir. 3.2’de verilen denklem yardımıyla da plastisite indisi hesaplanır ve hesaplanan değer ile plastisite kartından zemin sınıfı belirlenir.

$$PI = LL - PL \quad (3.2)$$

3.2.1.4 Kompaksiyon Deneyi

Kompaksiyon deneyi sonucunda zeminin maksimum KBHA ve optimum su muhtevasını bulunmuştur.

Aşamaları;

1. Aşırı kil içeren ve tokmaklandıktan sonra topaklanabilen numuneler, bir etüvde kurutulur ve her biri 3,5 kg ağırlığında beş veya daha fazla numuneye bölünür. Her numune, ideal nem içeriğini sağlayan en yüksek kuru birim ağırlığı aralığında farklı su miktarlarıyla tamamen karıştırılır.
2. Bir kalıp, taban plakası takılı halde 1 gram hassasiyetle tartılır. Kalıp, beton gibi sert bir zemin üzerine yerleştirilir ve ıslak zemin üç eşit katman halinde içine doldurulur. Kalıbın yakası takılır ve her katmana 305 mm yükseklikten serbest düşen bir tokmakla 25 vuruş yapılır. Her katmanın yüzeyine eşit miktarda darbe uygulanmalıdır. Tokmağın kılavuzunun, serbest düşüşünü engelleyecek şekilde zemin tarafından tıkanmamasına dikkat edilmelidir.

Kullanılan zemin miktarı, kalıbı doldurmaya yetecek kadar olmalı, ancak sıkıştırma ve yaka çıkarıldıktan sonra fazla zemin yüksekliği 6 mm'yi geçmemelidir. Yaka çıkarıldıktan sonra, sıkıştırılmış toprak, kalıbın üst kenarında bir çelik düzleştirici ile nazikçe düzeltilir. Kalıp ve zemin için 1 gram hassasiyetle ölçüm yapılır.

3. Kalıptan çıkarılan sıkıştırılmış toprak, büyük bir metal kaba konur. Bu toprağı temsil eden bir numune alınarak nem içeriğı belirlenir.
4. Testin başlangıcında yapılan ilk numuneye dayanarak kalan toprak ufalanır ve daha fazla su ile karıştırılır. Her seferinde elde edilen numuneye uygun artışlarla su eklenerek işlem tekrarlanır.
5. Test dört veya daha fazla değeri sağlayacak şekilde tekrarlanır ve kullanılan nem seviyeleri, en yüksek kuru birim ağırlığı sağlayan optimum su içeriğini içeren aralıkta değışmelidir.

Deney sonuçları excel tablosuna not edilir ve 3.3 ve 3.4'de verilen denklemlerle KBHA hesaplanır. Elde edilen KBHA değeri ve buna karşılık gelen su muhtevaları grafiğı işlenir. Grafik üzerindeki en büyük değeri maksimum KBHA değeri ve ona karşılık gelen değeri optimum su muhtevası değeri.

$$\rho_n = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 9,81 \quad (3.3)$$

Denklemdede;

ρ_n = yağ birim hacim ağırlık (kN/m³)

M_1 = Kalıp + tabanın kütlesi (g)

M_2 = Kalıp, taban ve zemin kütlesi (g)

V = Kalıp iç hacmi (cm³)

$$\rho_k = \frac{100\rho_n}{100 + w} \quad (3.4)$$

Denklemdede;

$$\rho_k = \text{KBHA (kN/m}^3\text{)}$$

$$\rho_n = \text{YBHA (kN/m}^3\text{)}$$

w = numunenin su muhtevası (%)

3.2.2 Optimum Oran için Numunelerin Hazırlanması

Kompaksiyon deney sonuçlarından elde edilen optimum su miktarına göre katkısız, K + %0,5 – 1 – 2 CE ve K + %0,5 – 1 – 2 PP olmak üzerine 7 tip numune hazırlanmıştır. Alınan numuneler 7-28-56 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir.



Resim 3.2 Numune alım aşamaları, a) Etüv kuru malzemenin ufalanması, b) Uygun oranda elyaf malzeme tartılması, c) Malzemelerin homojen şekilde karıştırılması, d) Standarda uygun şekilde sıkıştırma işlemi yapılması, e) Press makinasından numune alımı, f) Alınan numunelerin streçlenerek kür sürelerinde bekletilmesi

3.2.3 Serbest Basınç Deneyi

Kür süreleri sonlanan numuneler TS1900-2 standardına uygun şekilde Serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney 38 mm çapında olan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Aşamalar;

1. Numune, presin alt platformuna merkezlenip yerleştirildikten sonra üst başlık, numunenin üst yüzeyine tam ve rahatça değene kadar indirilir. Düşey deformasyonu ölçmek için alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilen komparatör saati sıfırlanır.
2. Yükleme bu şekilde uygulandığında, numunede dakikada %0,5 ile %2 arasında birim boy kısalması meydana gelir. Yük ve deformasyon okumaları uygun aralıklarda alınır ve kaydedilir. Her iki durumda da test süresi on dakikayı geçmemelidir. Test, numunede belirgin bir göçme (kırılma) meydana gelene kadar veya maksimum dayanımın hemen belirgin olmadığı yumuşak killerde %20 birim boy kısalmasına ulaşılan kadar yapılır.
3. Testin ardından numunenin göçme şekli çizilir ve ölçülebiliyorsa yatayla yaptığı açı belirlenir. Numunenin su muhtevasını belirlemek için yeni bir ağırlık ölçümü yapılır (TS 1900-1 Test 1).

Deneydeki hesaplamalar 3.5, 3.6 ve 3.7’de verilen denklemler yardımıyla yapılmıştır.

Eksenel birim deformasyon (%);

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (3.5)$$

ΔH = Ölçülen eksenel deformasyon (mm)

H_0 = İlk boy (mm)

Ortalama kesit alanı;

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \times 100 \quad (3.6)$$

ε = Eksenel birim deformasyon

A_0 = Numunenin deney başındaki kesit alanı (m²)

Serbest basınç dayanımı (kPa);

$$q_u = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

P = Göçmeye neden olan yük (kN)

Deney sonucunda elde edilen veriler excel tablosuna işlenerek gerekli karşılaştırma grafikleri çizilmiştir. Deney sonucunda optimum elyaf oranları belirlenmiştir.

3.2.4 Numune Hazırlanması

Serbest basınç deney sonucunda elyafların optimum oranları %1 CE ve %1 PP olarak belirlenmiştir. Bu oranlarla karışım içerisine oranca MT katılarak tekrardan aynı işlemler tekrarlanmış ve numuneler alınmıştır. K + %1 CE + %5 – 10 – 15 MT ve K + %1 PP + %5 – 10 – 15 MT olmak üzere 6 tip numune üretilmiş ve sırasıyla aynı işlemler uygulanarak dayanım değerleri bulunmuştur. Deney sonucunda en yüksek dayanımı veren numune oranları belirlenmiştir ve belirlenen oranlarla tekrardan numune hazırlanarak numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır.

3.2.5 Üç Eksenli Basınç Deneyi

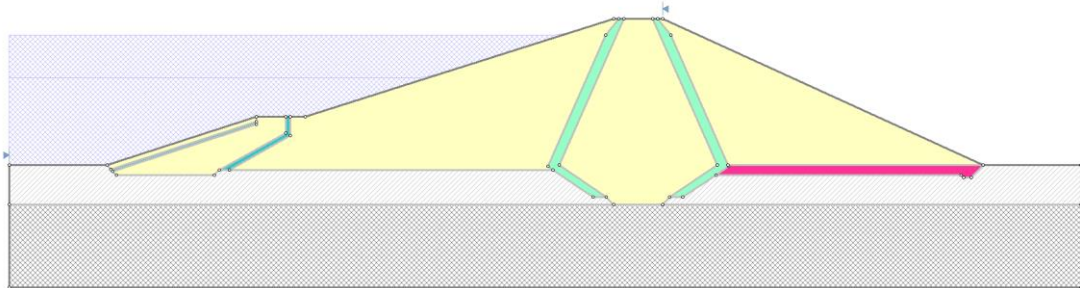
1. UU Testi için numune, deney öncesinde doygun olduğu varsayılan, üç eksenli bir deney hücresinde çevre basıncına maruz bırakılır. Numune hücre içine yerleştirildikten sonra, yanal basınç ünitesi vanası kullanılarak çevre basıncı önceden belirlenmiş değere ayarlanır. Daha sonra, sabit bir düşey gerinme oranında üretilen düşey basınç uygulanarak numunenin kırılması sağlanır.

Numunenin doğal yapısı ve su içeriği korunarak herhangi bir konsolidasyon veya doygunluk işlemi uygulanmaz. Boşluk suyu basıncı değerlendirilmediği için bu testin sonuçları yalnızca toplam gerilme açısından anlaşılabilir.

2. Genellikle, aynı örnekten alınan üç farklı deney numunesi kullanılarak bu testler yapılır ve çeşitli çevre basınçları uygulanır. Yapılan deneyde 100, 200 ve 400 kPa olmak üzere üç farklı çevre basıncı uygulanmıştır.
3. Tüm numunelerin doymun olduğu varsayıldığından, her testteki kayma dayanımları arasında bir ilişki vardır. Test bulguları için, gerinim miktarını temsil eden düşey basınç eğrileri gösterilir. Kırılma noktası, net maksimum ana gerilme değeri olarak kabul edildiğinde, Mohr daireleri toplam gerilmeyi temsil edecek şekilde oluşturulur. Doymamış kohezyon (c) ve doymamış kayma direnci açısını (ϕ) elde etmek için ortalama doymamış kayma dayanımı ölçülür ve Mohr dairelerine teğet geçen kırılma zarfı/çizgisi çizilir.

Yapılan üç eksenli deney sonucunda numunelerin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiştir ve bu değerler analiz için kullanılacak olan programlara işlenerek gerekli analizler için zemin hazırlanmıştır.

3.2.6 Slide Programı Üzerinden Modelleme ve Veri Girişi



Şekil 3.3 Slide programı üzerinde modelleme

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi AutoCAD 2025 programı üzerinden yapılan çizim doğrultusunda elde edilen koordinatlar modelleme için Slide programına girilmiş ve model çizimi oluşturulmuştur.

Elde edilen üç eksenli sonuçları Slide programında Define Material Properties sekmesine Resim 3.3'deki gibi tek tek işlenmiştir.

Define Material Properties

Katkisiz

Name: Katkisiz Colour: [Yellow] Hatch: [Black]

Unit Weight: 15.82 kN/m3 ☐ Saturated U.W. 20 kN/m3

Strength Type: Mohr-Coulomb $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters

Cohesion: 119.15 kN/m2 Phi: 14.25 degrees

Water Parameters

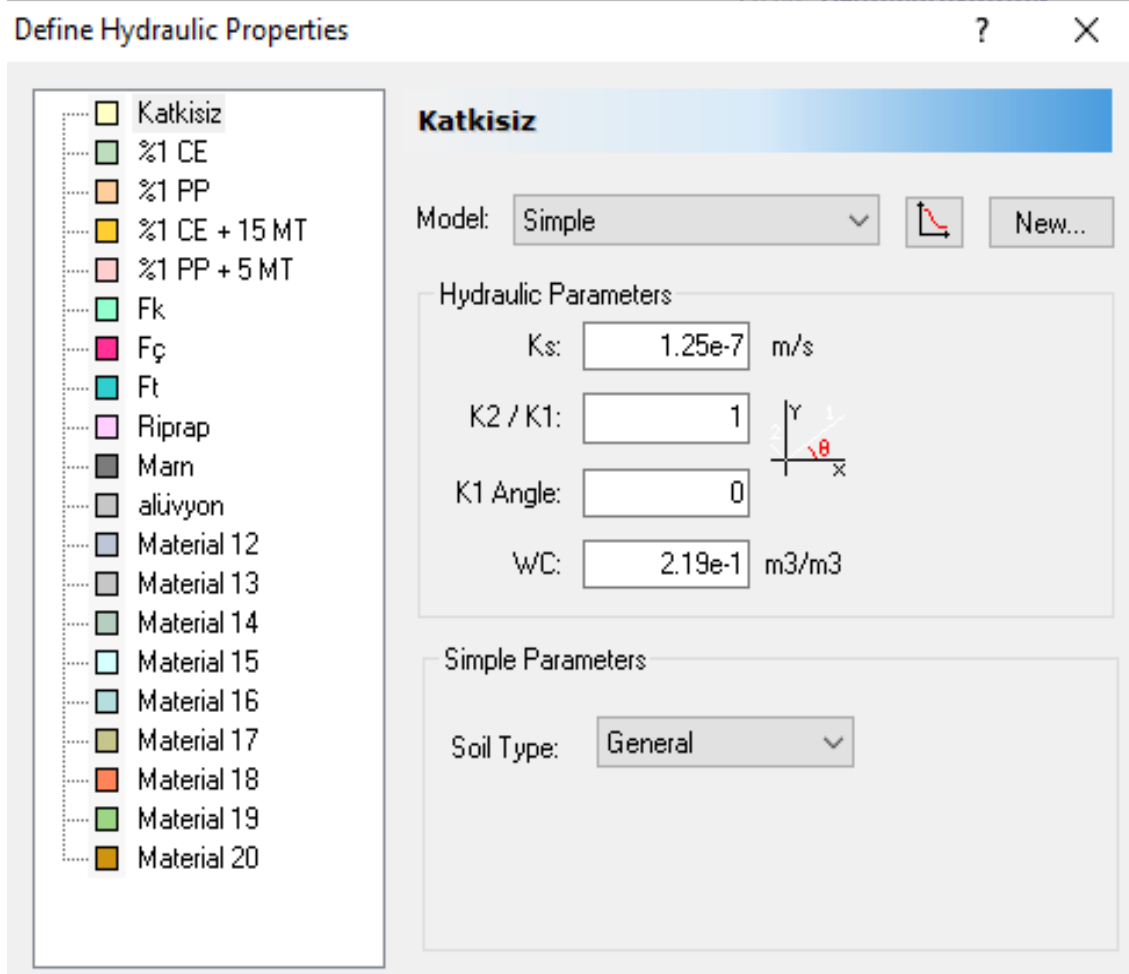
Unsaturated Shear Strength

Phi b: 0 degrees Air Entry Value: 0 kN/m2

☐ Use water content function to determine Phi b

Resim 3.3 Slide programında materyal verilerinin girişi

Resim 3.3'te de gösterildiği gibi Material sekmesine dolgu barajın içerisindeki filtrelerin, temelinde bulunan alüvyon ve marnın, dolgu malzemesi olarak kullanacak ve şev analizlerini yapacağımız dolgu numunelerinin sol tarafa isimleri sağ tarafa ise malzemelerin birim ağırlıkları, kohezyon değeri ve içsel sürtünme açıları girilmiştir. Çizelge 3.1'de verilen değerler bu sekmeye girilmiştir. Malzeme tanımlaması tamamlandıktan sonra ise gerekli atamalar model üzerinde yapılmıştır.

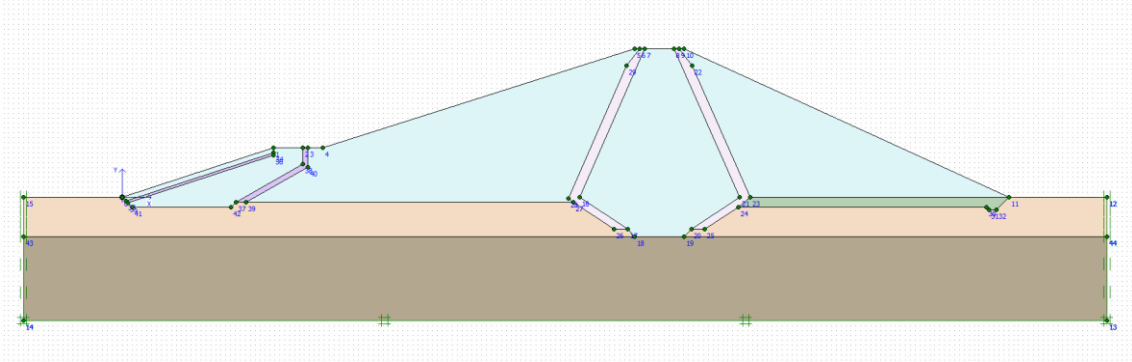


Resim 3.4 Slide programında permeabilite ve su muhtevalarının girişi

Dolgu barajın freatik hattını bilinmediğinden yapılacak olan analizde su seviye girişini Steady State Groundwater sekmesi üzerinden yapılmıştır. Bu sekmede kullanılacak olan malzemelerin permeabilite katsayıları ve su muhtevaları girilmesi gerekmektedir. Resim 3.4'te belirtildiği gibi malzemelerin verileri istenilen doğrultuda girilmiştir.

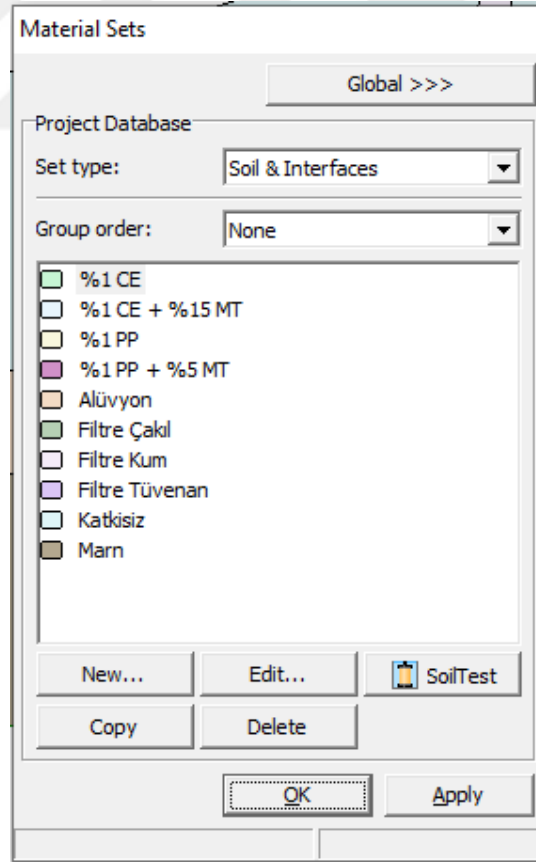
Gerekli veri girişleri sağlandıktan sonra kullanılacak olan beş farklı malzemelerin tek tek atamaları yapılmıştır. Her atama sonrasında mansap ve membadaki şev güvenlik sayıları belirlenmiş ve hazırlanmış tabloya not edilmiştir. Analiz aşamasında güvenlik sayıları için beş farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar Janbu, Bishop, Fellenius, MorgenPrice ve Spencer yöntemleridir. Her yöntemden elde edilen mansap ve memba güvenlik sayıları not edilip karşılaştırılmıştır.

3.2.7 Plaxis 2D Programı Üzerinden Modelleme ve Veri Girişi



Şekil 3.4 Plaxis 2D programı üzerinde modelleme

AutoCAD 2025 programı üzerinden yapılan çizim üzerinden elde edilen koordinatlar modelleme için Plaxis 2D programına girilmiş ve Şekil 3.4'te görüldüğü gibi model çizimi oluşturulmuştur.



Resim 3.5 Plaxis 2D programında materyal girişi

Mohr-Coulomb - Katkısız

General | Parameters | Interfaces

Material set

Identification:

Material model:

Material type:

General properties

γ_{unsat} kN/m³

γ_{sat} kN/m³

Comments

Permeability

k_x : m/s

k_y : m/s

Resim 3.6 Plaxis 2D programında materyal parametrelerinin girilmesi

Resim 3.5 ve Resim 3.6’da gösterildiği gibi Plaxis 2D programında Materials sekmesinde Soil&Interfaces bölümünde kullanılacak olan materyaller ve bu materyallere ait parametrelerin girişi yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre yapılmıştır.

Veri girişleri sağlandıktan sonra beş farklı malzeme gerekli yerlere atanarak ve baraj memba kısmındaki 26,68 m yükseklikteki su girişi yapılmıştır.

Bütün veriler eksiksiz girilip atamalar tamamlandıktan sonra gerekli analizler yapılmış ve bu analiz sonucunda elde edilen güvenlik sayıları excel tablosuna kaydedilmiştir.

4. BULGULAR

4.1 Zemin Tanımlama Deneyleri Sonuçları

4.1.1 Özgül Ağırlık Tayini Sonuçları

Zemin numunesinin özgül ağırlık tayini AKÜ İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında yapılarak Çizelge 4.1’de gösterilen değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Özgül ağırlık tayini sonuçları

Spesifik Gravite (gr cinsinden)		
Numune No	1	2
Kuru Zemin Ağırlığı (W_1)	50	50
Su+ Piknometre Ağırlığı(W_2)	643,6	643,6
W_1+W_2	693,6	693,6
Su+ Piknometre +Zemin Ağırlığı(W_3)	674,4	674,9
$W_1+W_2-W_3$	19,2	18,7
$\gamma_s = W_1/(W_1+W_2-W_3)$	2,60	2,67
Ortalama γ_s	2,64	

Yapılan deney sonucunda elde edilen iki değer ortalaması zemin danelerinin özgül ağırlığı olarak kabul edilir. Ortalama γ_s değeri 2,64 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2 Dane Çapı Dağılımı Sonuçları

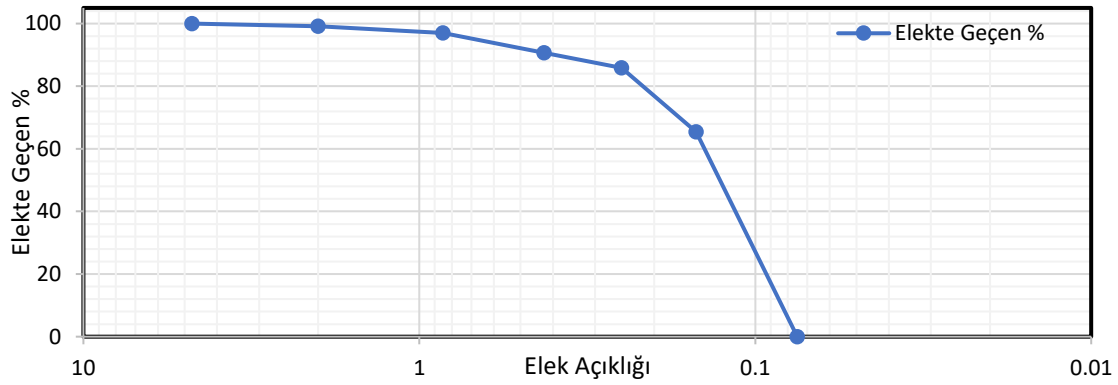
Çizelge 4.2 Dane çapı dağılımı sonuçları

	(gr)
Malzeme	503.12
NaHCO ₃	1.5
NaPO ₃	8.79
Su	240.94
Çözelti	250
Kap Ağırlığı	630.52
Etüv Sonrası Malzeme + Kap	696.1
Kuru Malzeme Ağırlığı	65.58

Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi kuru malzeme ağırlığı 65,58 gr olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 Elek analizi sonuçları

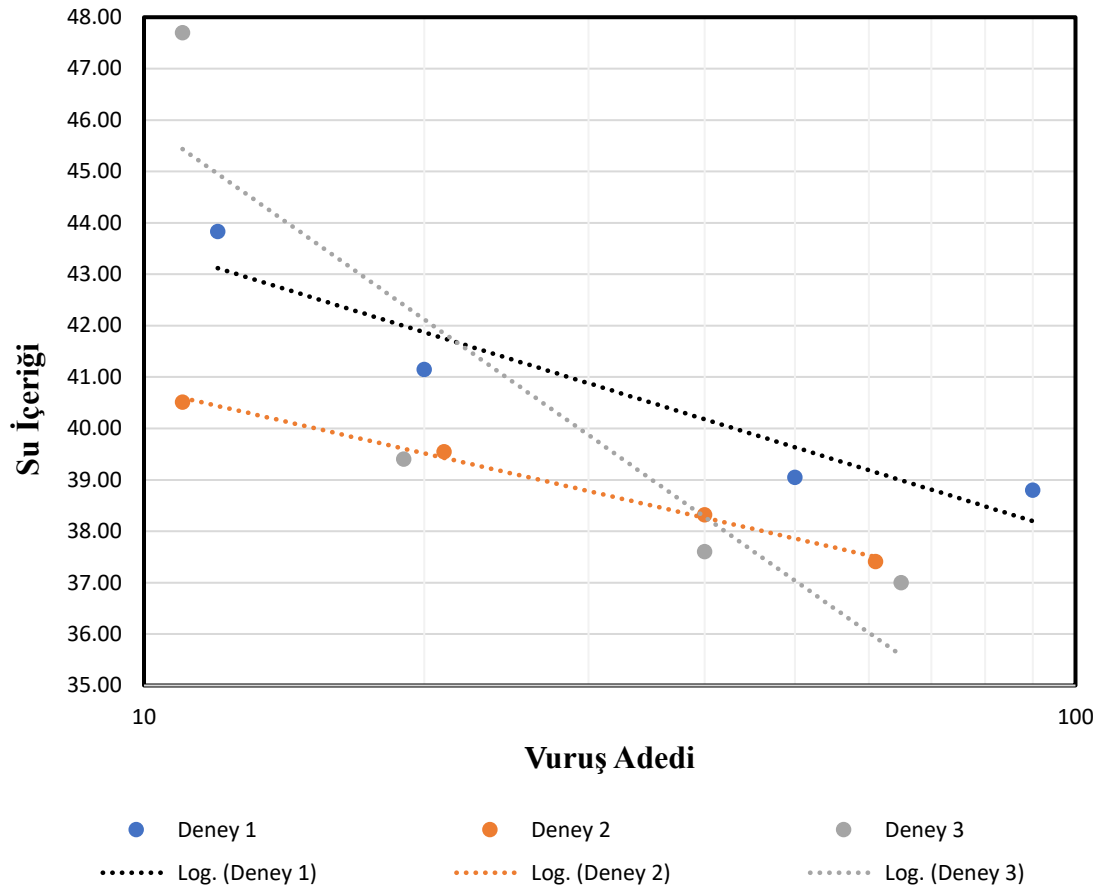
Elek No	Elek Açıklığı	Elekte Kalan (g)	Toplam Elekte Kalan (g)	Kalan %	Toplam Kalan %	Elekte Geçen %
4	4,75	0	0	0	0	100
10	2	0,57	0,57	0,87	0,87	99,13
20	0,85	1,39	1,96	2,12	2,99	97,01
40	0,425	4,16	6,12	6,34	9,33	90,67
60	0,25	3,15	9,27	4,80	14,13	85,87
100	0,15	13,44	22,71	20,49	34,62	65,38
200	0,075	41,79	64,5	63,70	98,32	0
Elek Altı	0	1,21	65,71	1,84	100,17	0



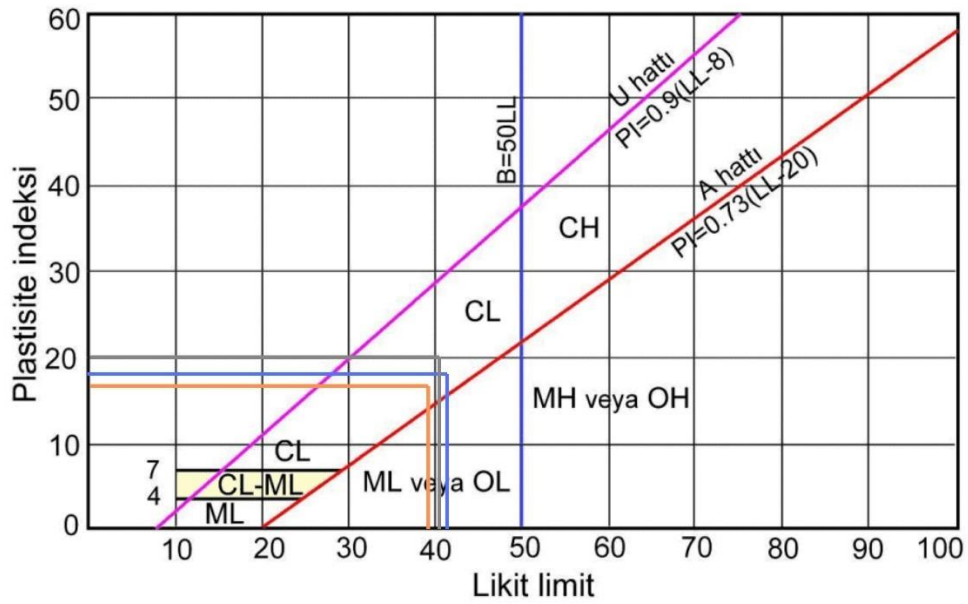
Şekil 4.1 Granülometri eğrisi

4.1.3 Kıvam Limit Deney Sonuçları

Bu deney sırasında 3 farklı numune üzerinden deney yapıp sonuçları alınmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.2’de verildiği gibi tek grafik üzerinden farklı renklerle gösterilmiştir. Şekil 4.3’te de aynı renkler kullanılarak plastisite kartı üzerinden deney sonuçlarının denk geldiği zemin türü gösterilmiştir.



Şekil 4.2 3 farklı numunenin likit limit grafiği



Şekil 4.3 3 farklı numunenin plastisite kartı

Deney hesaplamaları sonucunda veriler grafik haline getirilerek 25 vuruşa denk gelen değer (LL) bulunmuştur. Plastik limit için ortalama su içeriği (%) değeri alınmıştır. Zemin sınıfını belirlemek için likit limit ve plastisite indeksinin kesiştiği nokta plastisite kartından belirlenmiştir. Yapılan 3 deney sonucunda zemin sınıfı “CL” olarak saptanmıştır.

4.1.4 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen maksimum KBHA ve optimum su muhtevası Çizelge 4.4’de verilmiştir.

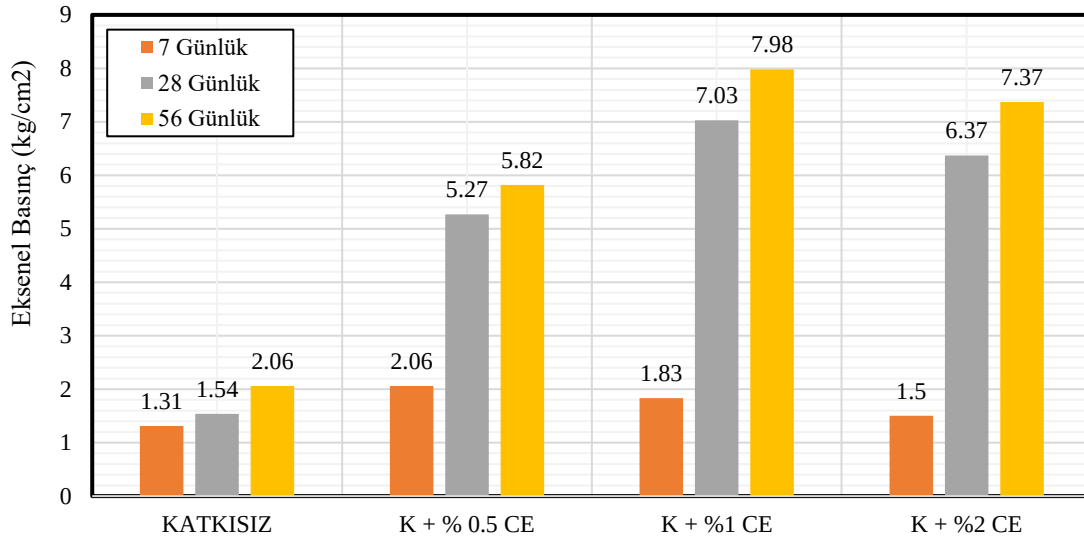
Çizelge 4.4 Kompaksiyon deney sonuçları

Numuneler	ρ_{dmax} (gr/cm ³)	W _{opt} (%)
KATKISIZ	1,582	21,9
K + %0,5 CE	1,515	22
K + %1 CE	1,562	23,5
K + %2 CE	1,497	24
K + %0,5 PP	1,515	24,6
K + %1 PP	1,481	23,3
K + %2 PP	1,46	23
K + %5 MT +%1 CE	1,59	21,9
K + %10 MT +%1 CE	1,637	23,5
K + %15 MT +%1 CE	1,58	21,7
K + %5 MT +%1 PP	1,505	23,6
K + %10 MT +%1 PP	1,493	23,5
K + %15 MT +%1 PP	1,54	22,5

Kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen veriler serbest basınç dayanım deneyinde kullanılacak olan numunelerin su içeriğinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Bu veriler ışığında numuneler hazırlanmış ve kırımı gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4’de bulunan

numuneler optimum lif oranı belirlendikten sonra elde edilen lif oranı içerisinde MT eklenerek tekrardan yapılan kompaksiyon deney sonuçlarını da kapsamaktadır.

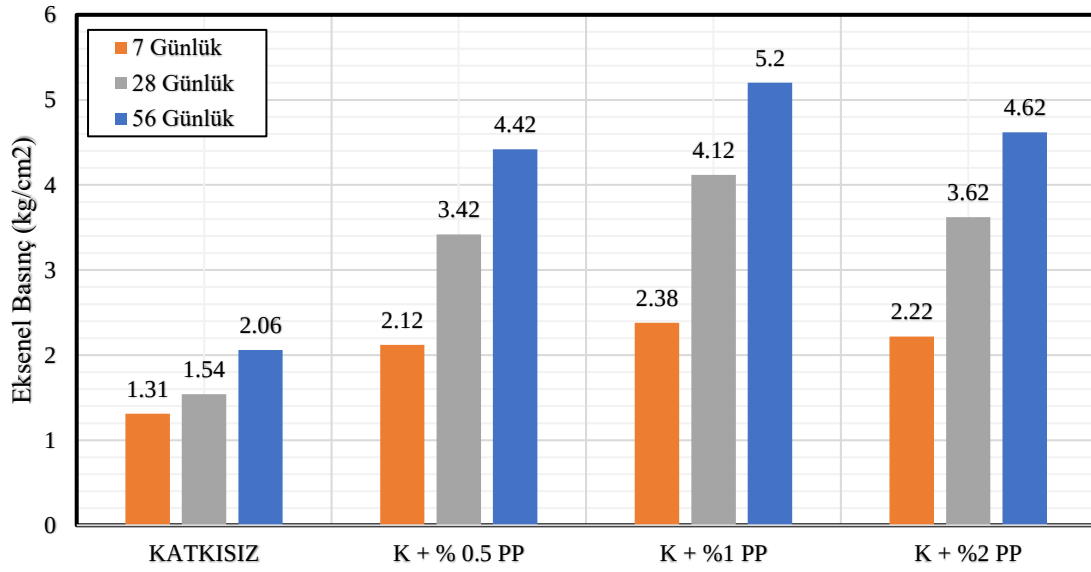
4.1.5 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları



Şekil 4.4 Kil zemin ve cam elyaf karışımlarının eksenel basınç değerleri

Kil zemine %0,5-1-2 oranlarında eklenen cam elyafı numuneler için kür süresine bağlı olarak tek eksenli basınç testi gerçekleştirilmiştir. Kil zemin ve cam elyaf karışımından elde edilen numunelerin serbest basınç dayanım değerleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir. 56 günlük kür sonunda %1 cam elyaf katkılı numunelerde dayanım maksimum değere ulaşmıştır. Kil zemin için en uygun cam elyaf oranı Şekil 4.4’e göre %1 olduğu tespit edilmiştir.

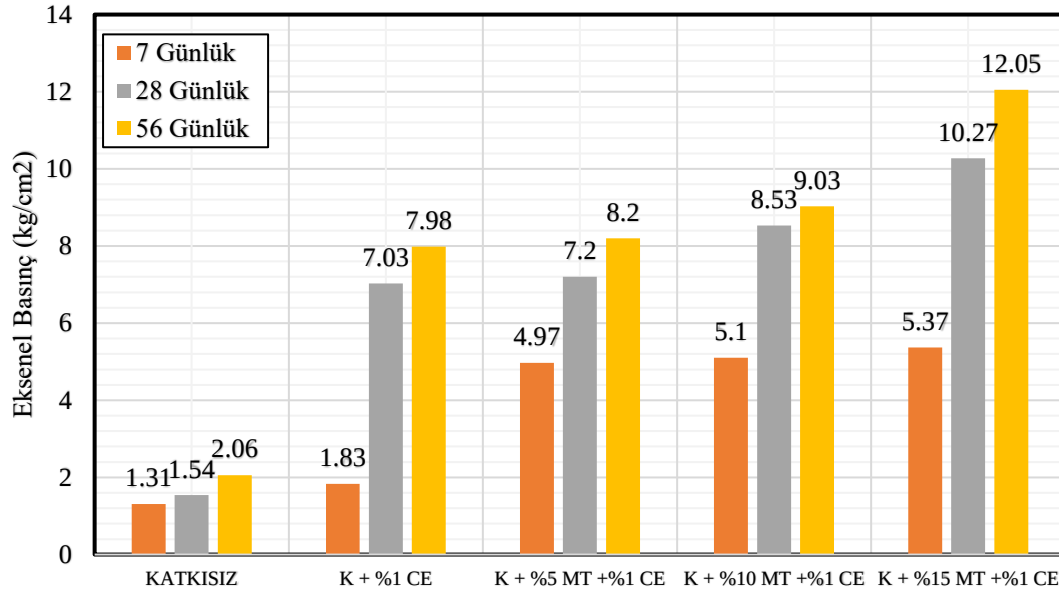
56 günlük kür süresi sonucunda ki dayanım oranlarına bakıldığında katkısız numuneye göre %1 cam elyaf karışımında %287 oranında olumlu bir artış gözlenmiştir. Katkısız numunelere göre, %0,5 ve %2’lik cam elyaf katkılı numuneler için de olumlu artışlar görülürken, %1 cam elyaf ile karşılaştırıldığında %2’lik cam elyaf dayanımında yaklaşık olarak %8 azalma meydana gelmiştir. Kil zemin için en uygun cam elyaf oranı Şekil 4.4’e göre %1 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 Kil zemin ve polipropilen elyaf karışımlarının eksenel basınç değerleri

Kil zemine %0,5, 1, 2 oranlarında eklenen polipropilen elyafı numuneler için kür süresine bağlı olarak tek eksenli basınç testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'e eksenel basınç dayanım değerleri verilmiştir. 56 günlük kür sonunda %1 polipropilen elyaf katkılı numunelerde dayanım maksimum değere ulaşmıştır. Kil zemin için en uygun polipropilen elyaf oranı Şekil 4.5'e göre %1 olduğu tespit edilmiştir. Katkısız numuneye göre %152 oranında olumlu bir artış gözlenmiştir. Katkısız numunelere göre, %0,5 ve %1 oranında polipropilen elyafın eklenmesi dayanımda olumlu artışlar gösterirken, %1 oranından fazla polipropilen elyafın eklenmesi ise dayanım değerinde %1 PP numunesine göre yaklaşık olarak %12 oranında olumsuz etki göstermiştir.

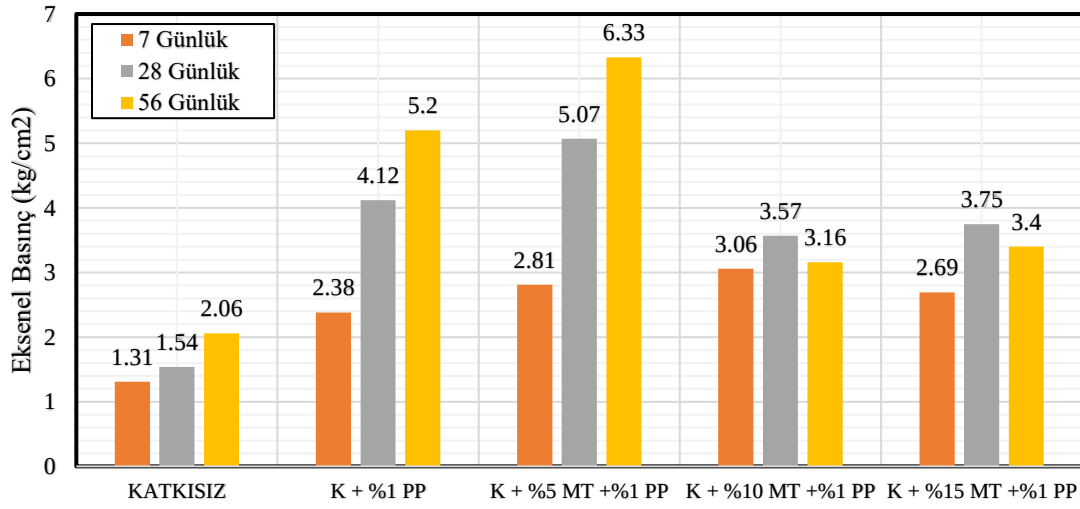
Bu grafikler ışığında mermer tozu atığının kullanım oranını arttırmak için elde edilen %1 optimum lif oranlarına %5 – 10 – 15 oranlarında MT katılarak farklı serilerde numuneler üretilmiştir. Karışımı yapılan her seri için optimum su muhtevasında her bir kür süresi için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 7, 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabii tutularak dayanım hesapları yapılmıştır.



Şekil 4.6 Kil zemin, cam elyaf ve mermer tozu karışımlarının eksenel basınç değerleri

Şekil 4.6'ya göre maksimum dayanım 56 günlük kür sonunda %15'lik mermer tozu katkılı numunelerde elde edilmiştir. Katkısız numuneye göre, K+%1CE+%15MT numunesinde yaklaşık %484 oranında olumlu bir artış gözlenmiştir. %1 Cam elyaf katkılı zemin numunesine, ağırlıkça %15 oranında mermer tozu eklenmesi sonucu dayanımda %50 artış elde edilmiştir. Zemin numunesine %1 oranında cam elyaf ile birlikte, ağırlıkça %5 ve %10 oranında mermer tozu eklenmesi sonucu dayanımda olumlu artışlar görülürken, en yüksek dayanım değeri ise %15 oranında mermer tozu katkılı numunelerde elde edilmiştir.

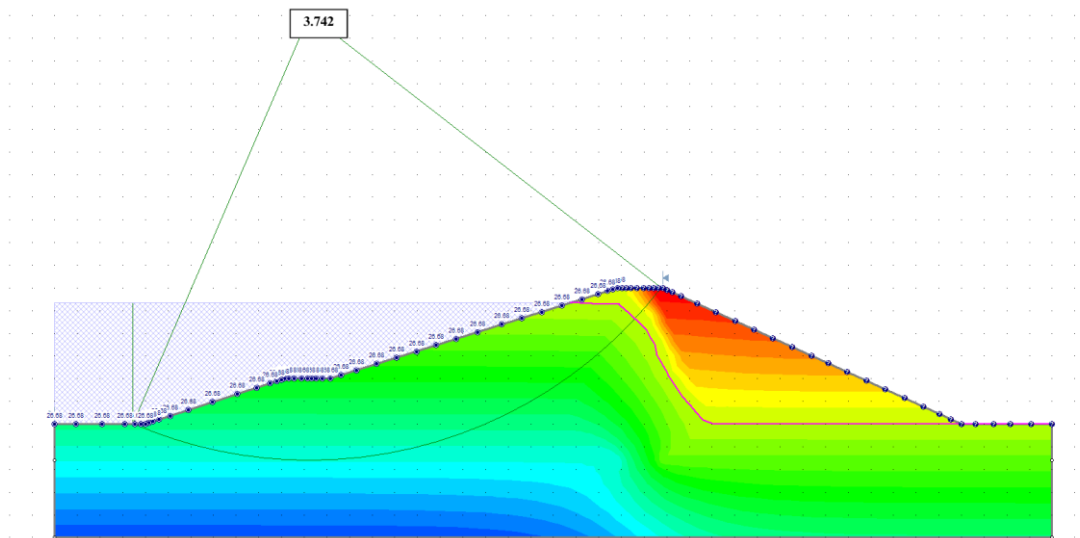
Bu sonuçlar, mermer tozunun ve cam elyafın birlikte kullanımının zemin iyileştirme çalışmalarında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle %15 mermer tozu katkısının optimum oran olarak belirlenmesi, bu malzemenin zemin stabilitesini artırmada ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu bulgular, zemin dayanımını artırmak ve daha güvenli mühendislik yapıları oluşturmak için farklı malzeme kombinasyonlarının etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu tür katkı malzemelerinin uygun oranlarda kullanılması, zemin performansını artırarak mühendislik projelerinin güvenilirliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde yükseltebilir.



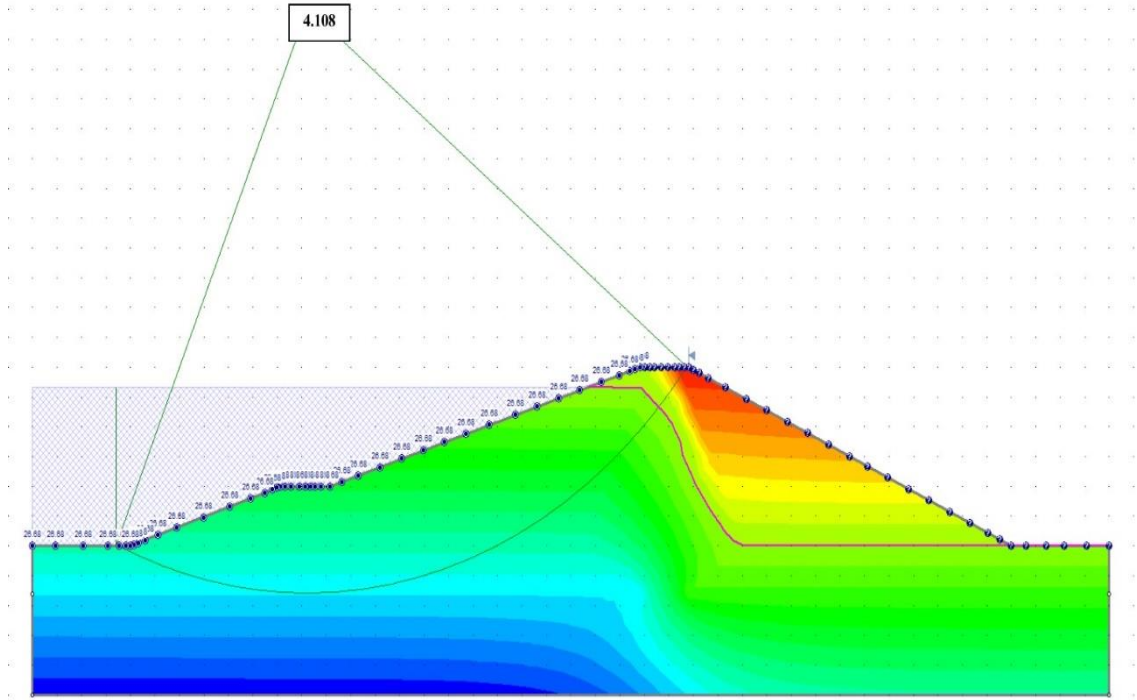
Şekil 4.7 Kıl zemin, polirpopilen elyaf ve mermer tozu karışımlarının eksenel basınç değerleri

Şekil 4.7'ye göre maksimum dayanım 56 günlük kür sonunda %5 oranında mermer tozu katkılı numunelerde elde edilmiştir. Katkısız numuneye göre, K+%1PP+%5MT numunesinde yaklaşık %207 oranında olumlu bir artış gözlenmiştir. Zemin numunesine %1 oranında polipropilen elyaf ile birlikte, ağırlıkça %5 oranında mermer tozu eklenmesi sonucu dayanım değerlerinde %22 artış elde edilirken, ağırlıkça %10 ve %15 oranında mermer tozu eklenmesi dayanım değerlerinde olumsuz etki göstermiştir.

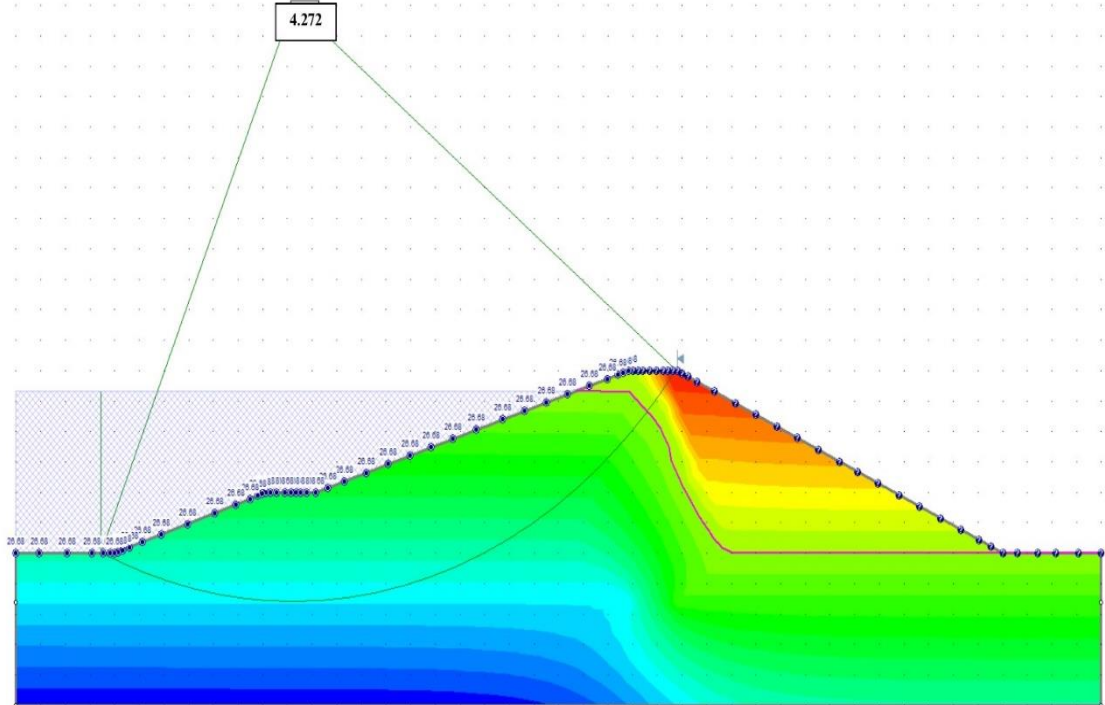
4.1.6 Slide Programı Analiz Sonuçları



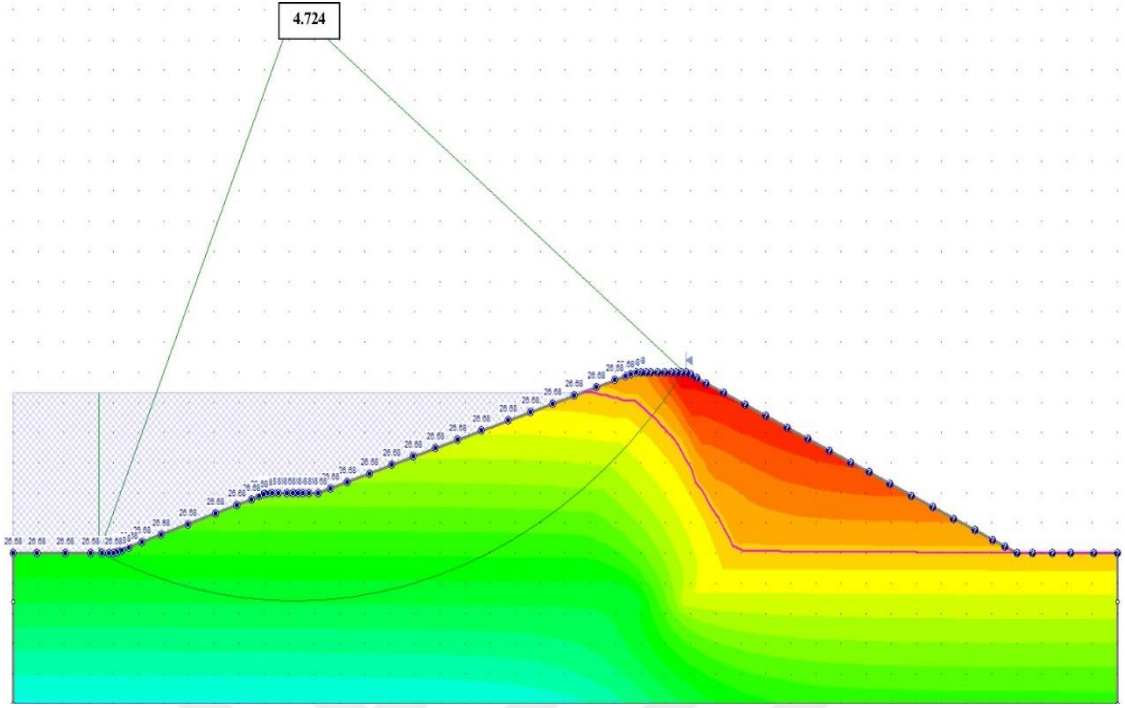
Şekil 4.8 Katkısız malzemenin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı



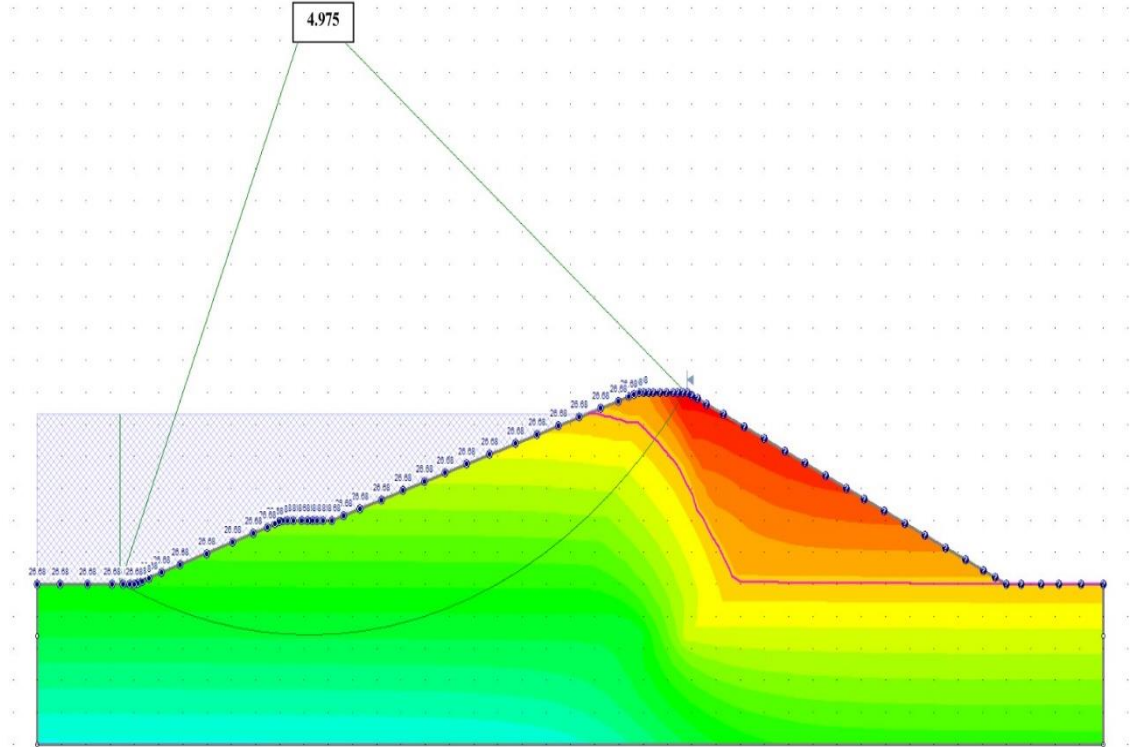
Şekil 4.9 %1 CE malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı



Şekil 4.10 %1 PP malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı



Şekil 4.11 %1 CE + %15 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı



Şekil 4.12 %1 PP + %5 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre memba güvenlik sayısı

Çizelge 4.5’de dolgu malzemelerinin dolgu baraj membasında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.5 Dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları

	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	3,742	3,85	3,714	3,853	3,854
%1 CE	4,108	4,193	4,079	4,2	4,201
%1 PP	4,272	4,408	4,25	4,404	4,405
%1 CE + %15 MT	4,724	4,844	4,745	4,843	4,843
%1 PP + %5 MT	4,975	5,105	4,988	5,104	5,104

Çizelge 4.5’de farklı stabilite analiz yöntemleri (Ord/Fell, Bishop, Janbu, Spencer ve Morgenstern-Price) kullanılarak hesaplanan güvenlik katsayılarını göstermektedir. Farklı katkı maddeleri ve oranları kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları aşağıda karşılaştırılmıştır:

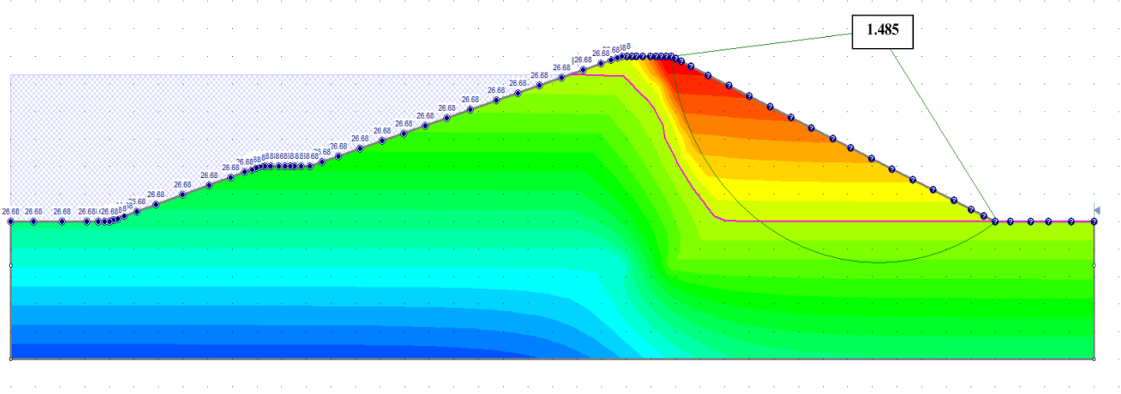
Katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde güvenlik katsayıları oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Bishop yöntemi 3,85 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 3,714 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

%1 oranında CE katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları artış göstermektedir. Bishop yöntemi 4,193 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 4,079 ile en düşük güvenlik katsayısını vermektedir.

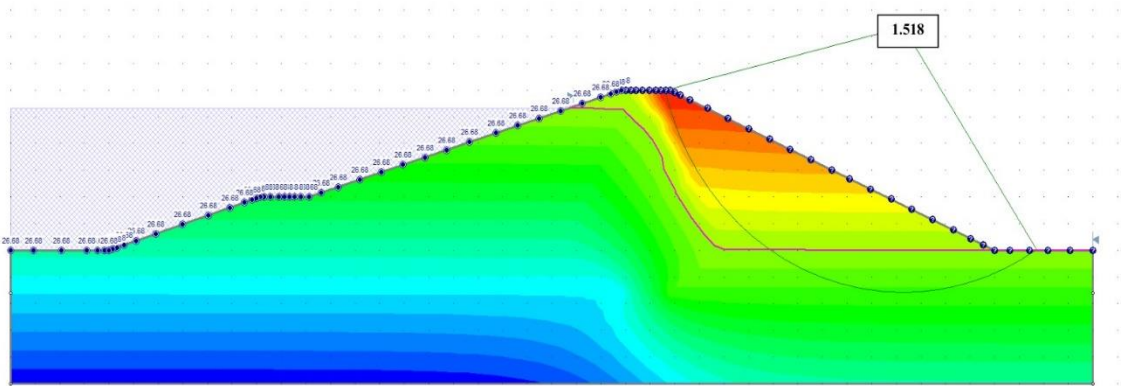
%1 oranında PP katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları daha da artmaktadır. Bishop yöntemi 4,408 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 4,25 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

%1 CE + %15 MT katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları belirgin şekilde artmaktadır. Bishop yöntemi 4,844 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 4,745 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

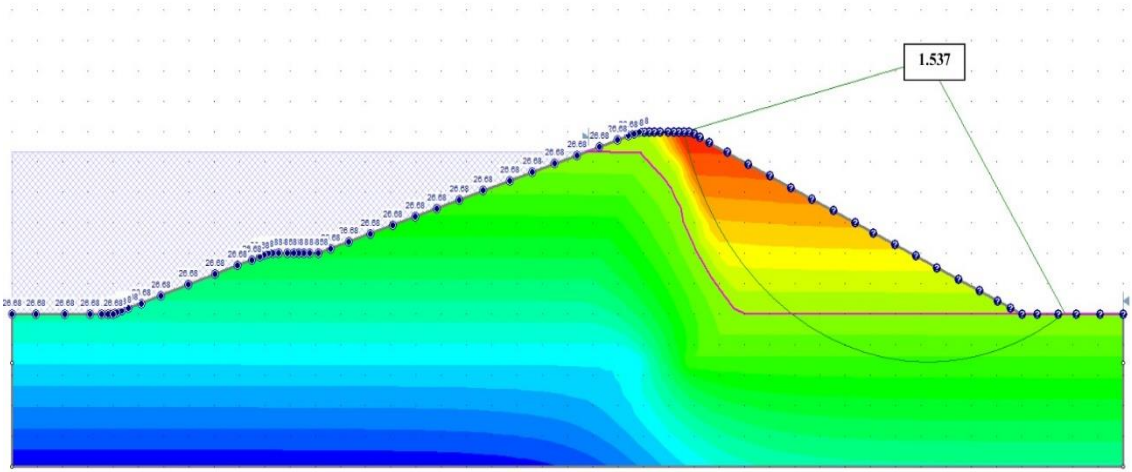
%1 PP + %5 MT katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bishop yöntemi 5,105 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 4,988 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.



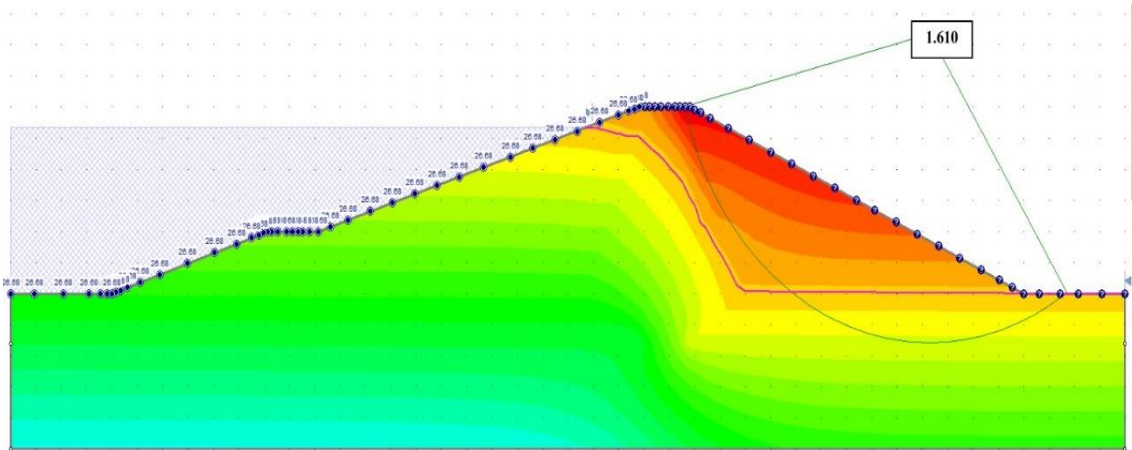
Şekil 4.13 Katkısız malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı



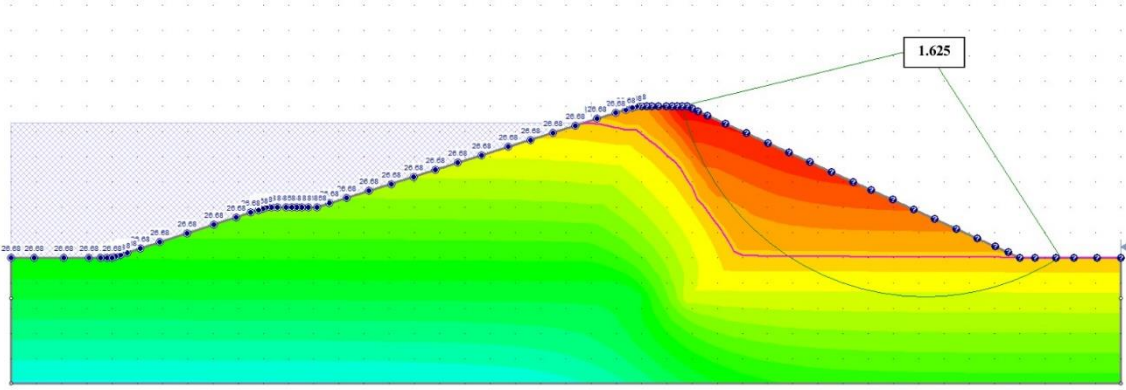
Şekil 4.14 %1 CE malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı



Şekil 4.15 %1 PP malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı



Şekil 4.16 %1 CE + %15 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı



Şekil 4.17 %1 PP + %5 MT malzemesinin Fellenius yöntemine göre mansap güvenlik sayısı

Çizelge 4.6’da dolgu malzemelerinin dolgu baraj mansabında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.6 Dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları

	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	1,485	1,684	1,536	1,68	1,686
%1 CE	1,518	1,715	1,508	1,697	1,713
%1 PP	1,537	1,752	1,531	1,726	1,735
%1 CE + %15 MT	1,61	1,813	1,599	1,787	1,796
%1 PP + %5 MT	1,625	1,833	1,612	1,806	1,814

Çizelge 4.6’da farklı stabilite analiz yöntemleri (Ord/Fell, Bishop, Janbu, Spencer ve Morgenstern-Price) kullanılarak hesaplanan güvenlik katsayılarını göstermektedir. Farklı katkı maddeleri ve oranları kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları aşağıda karşılaştırılmıştır:

Katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde güvenlik katsayıları oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Morgenstern-Price yöntemi 1,686 ile en yüksek güvenlik

katsayısını verirken, Ord/Fell yöntemi 1,485 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

%1 oranında CE katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları genelde azalmakta olup, Bishop yöntemi 1,715 ile en yüksek güvenlik katsayısını, Janbu yöntemi ise 1,508 ile en düşük güvenlik katsayısını vermektedir.

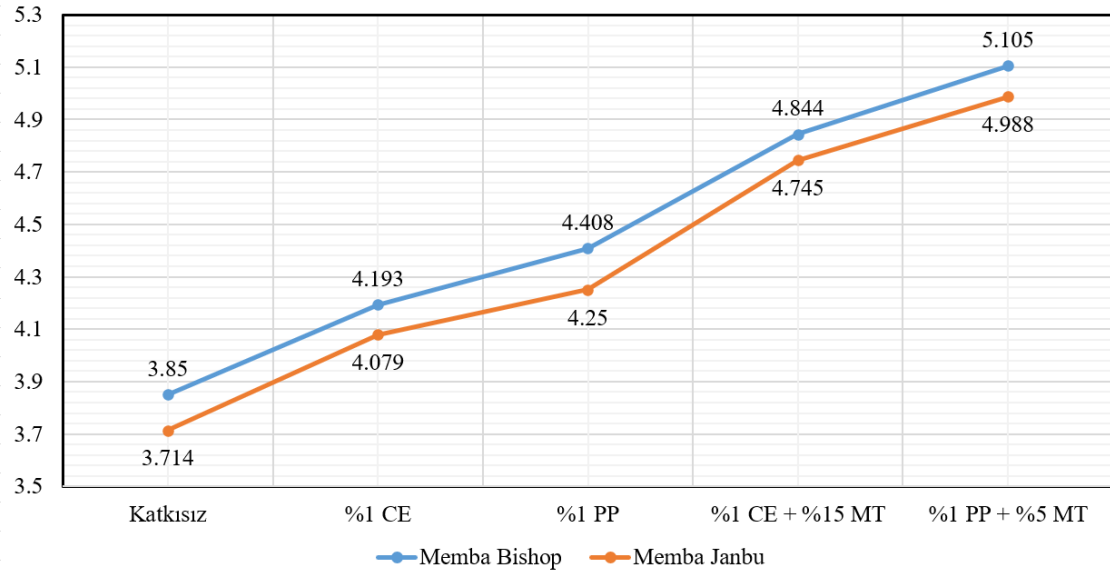
%1 oranında PP katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları belirgin bir artış göstermektedir. Bishop yöntemi 1,752 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 1,531 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

%1 CE + %15 MT katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları artmaya devam etmektedir. Bishop yöntemi 1,813 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 1,599 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

%1 PP ve %5 MT katkısı ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bishop yöntemi 1,833 ile en yüksek güvenlik katsayısını verirken, Janbu yöntemi 1,612 ile en düşük güvenlik katsayısını göstermektedir.

Elde edilen verilere göre çoğunlukla en yüksek güvenlik sayılarını Bishop yöntemi en düşük güvenlik sayılarını ise Janbu yöntemi vermiştir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da Bishop ve Janbu yöntemlerine göre memba ve mansapta elde edilen güvenlik sayılarının çizgi grafiği verilmiştir.

Bu analizler, farklı katkı maddelerinin ve yöntemlerin baraj güvenliği üzerindeki etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bishop yönteminin çoğunlukla en yüksek güvenlik katsayılarını vermesi, bu yöntemin stabilite analizlerinde daha muhafazakar bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Janbu yönteminin ise en düşük güvenlik katsayılarını vermesi, bu yöntemin daha kritik durumları daha hassas bir şekilde tespit edebileceğini düşündürmektedir. Bu bulgular, zemin stabilitesi ve güvenlik değerlendirmelerinde birden fazla yöntemin kullanılmasının, daha güvenilir sonuçlar elde etmek için önemli olduğunu vurgulamaktadır.



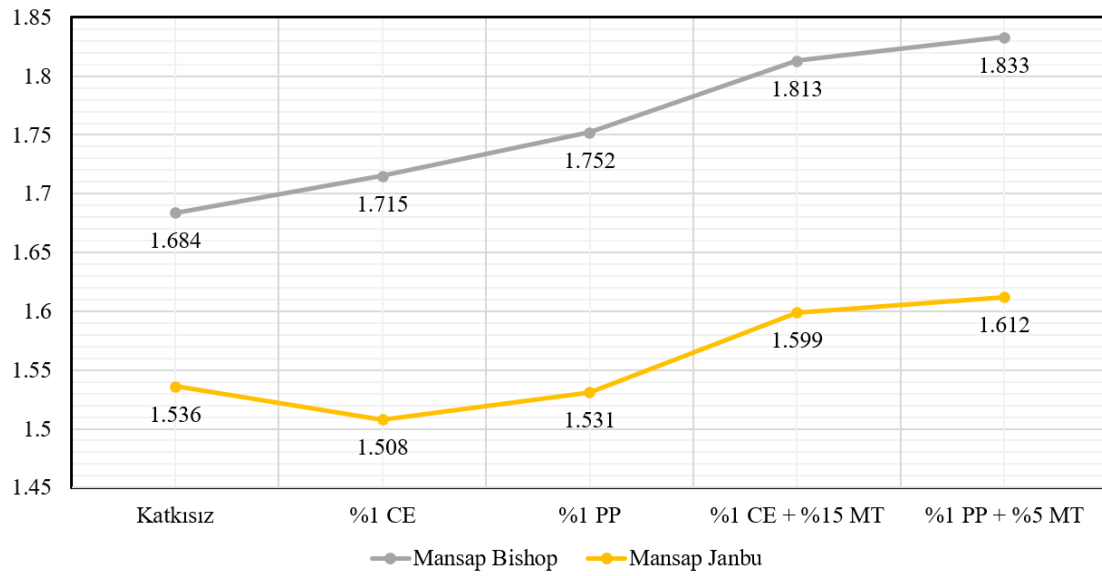
Şekil 4.18 Memba tarafında Bishop ve Janbu yöntemlerine göre güvenlik sayısı değişimi

Şekil 4.18, çeşitli katkı maddelerinin dolgu barajlarının güvenlik sayısını nasıl etkilediği gösterilmektedir. Bu katkı maddeleri, stabilize edici malzemeler olarak kullanılmış ve farklı kombinasyonlarda uygulanmıştır. İki farklı analiz yöntemi (Bishop ve Janbu) kullanılarak elde edilen sonuçlar, güvenlik sayılarında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, katkısız durumda en düşük güvenlik sayıları elde edilmiştir. Ancak, %1 oranında CE veya PP katkısı eklendiğinde, güvenlik sayılarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu durum, bu katkı maddelerinin zemin stabilizasyonunu iyileştirdiğini ve dolayısıyla barajın genel güvenliğini artırdığını göstermektedir.

Özellikle, CE ve MT kombinasyonunun kullanıldığı durumda güvenlik sayıları daha da artmıştır. Bu kombinasyon hem CE'nin lifsel yapısının hem de MT'nin ince taneli yapısının birlikte çalışarak zeminin dayanımını ve stabilitesini daha da artırdığına işaret etmektedir. Aynı şekilde, PP ve MT kombinasyonu da benzer şekilde yüksek güvenlik sayıları ile en iyi sonuçları vermiştir. Bu durum, PP'nin elastik özellikleri ile MT'nin dolgu malzemesi olarak etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, çeşitli katkı maddelerinin ve kombinasyonlarının dolgu barajlarının stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve güvenlik sayılarında kayda değer bir artış sağladığını göstermektedir. Çalışmada, bu katkı maddelerinin ve kombinasyonlarının hangi oranlarda en etkili olduğunu ortaya koyarak literatüre değerli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, kullanılan yöntemlerin (Bishop ve Janbu) farklı sonuçlar vermesi, analizlerin güvenilirliğini artırmakta ve farklı mühendislik uygulamaları için geniş bir perspektif sağlamaktadır.



Şekil 4.19 Mansap tarafında Bishop ve Janbu yöntemlerine göre güvenlik sayısı değişimi

Şekil 4.19, çeşitli katkı maddelerinin ve kombinasyonlarının dolgu barajlarının güvenlik sayısını nasıl etkilediği, iki farklı analiz yöntemi (Bishop ve Janbu) kullanılarak gösterilmiştir. Genel olarak, katkı maddelerinin eklenmesiyle güvenlik sayılarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı maddelerinin zemin stabilitesini iyileştirdiğini ve dolayısıyla barajın güvenliğini artırdığını göstermektedir.

Katkısız durumda, güvenlik sayıları en düşük seviyededir. Ancak, %1 oranında CE veya PP katkısı eklendiğinde, güvenlik sayılarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu, CE ve PP gibi malzemelerin zemin stabilizasyonunu iyileştirdiğini ve dolgu barajlarının güvenliğini artırdığını göstermektedir.

Özellikle, CE ve MT kombinasyonu ile güvenlik sayıları daha da artmıştır. Bu kombinasyon hem CE'nin lifsel yapısının hem de MT'nin ince taneli yapısının birlikte çalışarak zeminin dayanımını ve stabilitesini artırdığını ortaya koymaktadır. Aynı şekilde, PP ve MT kombinasyonu da benzer şekilde yüksek güvenlik sayıları ile en iyi sonuçları vermiştir. Bu, PP'nin elastik özellikleri ile MT'nin dolgu malzemesi olarak etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Bishop yöntemi genel olarak daha yüksek güvenlik sayıları vermekte, ancak her iki yöntemde de katkı maddeleri ve kombinasyonları ile stabilite önemli ölçüde artmaktadır. Bu sonuçlar, çeşitli katkı maddelerinin ve kombinasyonlarının dolgu barajlarının stabilitesini artırmada etkili olduğunu ve güvenlik sayılarında kayda değer bir artış sağladığını göstermektedir.

Bu bulgular, çalışmanın literatüre önemli bir katkı sunduğunu ve dolgu barajlarının güvenliğini artırmak için kullanılan katkı maddelerinin etkili olduğunu vurgulamaktadır. Kullanılan analiz yöntemlerinin farklı sonuçlar vermesi, çalışmanın kapsamını genişletmekte ve farklı mühendislik uygulamaları için değerli bilgiler sağlamaktadır.

4.1.6.1 %10 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları

Çizelge 4.7'da baraj kesitinin %10 eğim artışı sonucunda dolgu baraj membasında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.7 %10 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları

%10 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	3,638	3,734	3,623	3,737	3,738
%1 CE	4,014	4,09	4	4,096	4,097
%1 PP	4,13	4,3	3,876	4,296	4,296
%1 CE + %15 MT	4,522	4,725	4,307	4,725	4,725
%1 PP + %5 MT	4,795	4,998	4,536	4,997	4,997

Çizelge 4.8’da baraj kesitinin %10 eğim artışı sonucunda dolgu baraj mansabında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.8 %10 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları

%10 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	1,369	1,546	1,366	1,533	1,545
%1 CE	1,373	1,544	1,367	1,54	1,576
%1 PP	1,43	1,659	1,466	1,636	1,689
%1 CE + %15 MT	1,487	1,702	1,56	1,682	1,551
%1 PP + %5 MT	1,941	1,987	1,948	1,988	1,989

Aşağıda, katkı maddelerine göre memba ve mansap güvenlik sayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Katkısız

Katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde, güvenlik katsayıları oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 3,738 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,623 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Katkısız durumda mansap yönünde güvenlik katsayıları biraz daha farklılık göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,546 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,366 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf (CE) Katkısı

%1 cam elyaf katkısı kullanıldığında, memba yönünde güvenlik katsayıları artış göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 4,097 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,000 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde ise %1 cam elyaf katkısı ile güvenlik katsayıları genel olarak artış göstermiştir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,576 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,367 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen (PP) Katkısı

%1 polipropilen katkısı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,300 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,876 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen katkısı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,689 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,430 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf ve %15 Mermer Tozu (CE + MT) Katkısı

%1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,725 ile Bishop ve Spencer yöntemleri verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,307 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,702 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,551 ile Morgenstern-Price yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen ve %5 Mermer Tozu (PP + MT) Katkısı

%1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,998 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,536 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,989 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,941 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

Bu sonuçlar, baraj güvenliğini artırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanımının etkilerini ve bu etkilerin farklı analiz yöntemleriyle nasıl değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu (PP + MT) karışımının hem memba hem de mansap yönlerinde en yüksek güvenlik

katsayılarını sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımının baraj güvenliğini artırmada en etkili malzeme olduğunu göstermektedir. Özellikle bu karışım, memba yönünde Bishop yöntemi ile 4,998, mansap yönünde ise Morgenstern-Price yöntemi ile 1,989 güvenlik katsayısı vererek, diğer katkı maddelerine kıyasla daha yüksek güvenlik sağlamaktadır.

4.1.6.2 %15 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları

Çizelge 4.9’da baraj kesitinin %15 eğim artışı sonucunda dolgu baraj membasında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.9 %15 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları

%15 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	3,546	3,705	3,531	3,706	3,707
%1 CE	3,92	4,036	3,886	4,04	4,043
%1 PP	3,995	4,146	4	4,141	4,142
%1 CE + %15 MT	4,459	4,598	4,413	4,597	4,597
%1 PP + %5 MT	4,683	4,833	4,762	4,831	4,832

Çizelge 4.10’da baraj kesitinin %15 eğim artışı sonucunda dolgu baraj mansabında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.10 %15 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları

%15 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	1,33	1,53	1,409	1,517	1,53
%1 CE	1,334	1,538	1,393	1,549	1,542
%1 PP	1,394	1,607	1,449	1,584	1,595
%1 CE + %15 MT	1,447	1,649	1,525	1,627	1,638
%1 PP + %5 MT	1,492	1,691	1,541	1,673	1,682

Aşağıda, katkı maddelerine göre memba ve mansap güvenlik sayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Katkısız

Katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde, güvenlik katsayıları oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 3,707 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,531 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Katkısız durumda mansap yönünde güvenlik katsayıları biraz daha farklılık göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,530 ile Bishop ve Morgenstern-Price yöntemleri verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,330 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf (CE) Katkısı

%1 Cam elyaf katkısı kullanıldığında, memba yönünde güvenlik katsayıları artış göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 4,043 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,886 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde ise %1 cam elyaf katkısı ile güvenlik katsayıları genel olarak artış göstermiştir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,549 ile Spencer yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,334 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen (PP) Katkısı

%1 Polipropilen katkısı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,146 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,000 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen katkısı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,607 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,394 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf ve %15 Mermer Tozu (CE + MT) Katkısı

%1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,598 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,413 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,649 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,525 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen ve %5 Mermer Tozu (PP + MT) Katkısı

%1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,833 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,762 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,691 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,492 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

Bu sonuçlar, baraj güvenliğini artırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanımının etkilerini ve bu etkilerin farklı analiz yöntemleriyle nasıl değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu (PP + MT) karışımının hem memba hem de mansap yönlerinde en yüksek güvenlik katsayılarını sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımının baraj güvenliğini artırmada en etkili malzeme olduğunu göstermektedir. Özellikle bu karışım, memba yönünde Bishop yöntemi ile 4,833, mansap yönünde ise aynı yöntemle 1,691 güvenlik katsayısı vererek, diğer katkı maddelerine kıyasla daha yüksek güvenlik sağlamaktadır.

4.1.6.3 %20 Eğim Artışı Sonucunda Elde Edilen Analiz Sonuçları

Çizelge 4.11’de baraj kesitinin %20 eğim artışı sonucunda dolgu baraj membasında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.11 %20 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre memba güvenlik sayıları

%20 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	3,285	3,42	3,201	3,423	3,423
%1 CE	3,611	3,713	3,519	3,717	3,717
%1 PP	3,728	3,907	3,623	3,903	3,902
%1 CE + %15 MT	4,137	4,285	4,02	4,284	4,284
%1 PP + %5 MT	4,344	4,506	4,246	4,505	4,505

Çizelge 4.12’de baraj kesitinin %20 eğim artışı sonucunda dolgu baraj mansabında diğer yöntemlere göre hesaplanan güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.12 %20 eğim artışıyla dolgu barajın yöntemlere göre mansap güvenlik sayıları

%20 Eğim Artışı	Ord/Fell	Bishop	Janbu	Spencer	Morg. Price
Katkısız	1,289	1,483	1,376	1,469	1,484
%1 CE	1,297	1,52	1,499	1,511	1,519
%1 PP	1,329	1,571	1,414	1,549	1,552
%1 CE + %15 MT	1,442	1,63	1,529	1,615	1,626
%1 PP + %5 MT	1,427	1,625	1,504	1,606	1,615

Aşağıda, katkı maddelerine göre memba ve mansap güvenlik sayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Katkısız

Katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde, güvenlik katsayıları oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 3,423 ile Bishop ve Morgenstern-Price yöntemleri verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,201 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Katkısız durumda mansap yönünde güvenlik katsayıları biraz daha farklılık göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,484 ile Morgenstern-Price yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,289 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf (CE) Katkısı

%1 cam elyaf katkısı kullanıldığında, memba yönünde güvenlik katsayıları artış göstermektedir. En yüksek güvenlik katsayısını 3,717 ile Spencer ve Morgenstern-Price yöntemleri verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,519 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde ise %1 cam elyaf katkısı ile güvenlik katsayıları genel olarak artış göstermiştir. En yüksek güvenlik katsayısını 1,520 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,297 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen (PP) Katkısı

%1 polipropilen katkısı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 3,907 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 3,623 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen katkısı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,571 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,329 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

%1 Cam Elyaf ve %15 Mermer Tozu (CE + MT) Katkısı

%1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4.285 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,020 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 cam elyaf ve %15 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,630 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,529 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

%1 Polipropilen ve %5 Mermer Tozu (PP + MT) Katkısı

%1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı kullanıldığında, memba yönünde en yüksek güvenlik katsayısını 4,506 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 4,246 ile Janbu yöntemi göstermektedir.

Mansap yönünde %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımı ile en yüksek güvenlik katsayısını 1,625 ile Bishop yöntemi verirken, en düşük güvenlik katsayısını 1,427 ile Ord/Fell yöntemi göstermektedir.

Bu sonuçlar, baraj güvenliğini artırmak için çeşitli katkı maddelerinin kullanımının etkilerini ve bu etkilerin farklı analiz yöntemleriyle nasıl değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu (PP + MT) karışımının hem memba hem de mansap yönlerinde en yüksek güvenlik katsayılarını sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, %1 polipropilen ve %5 mermer tozu karışımının baraj güvenliğini artırmada en etkili malzeme olduğunu göstermektedir. Özellikle bu karışım, memba yönünde Bishop yöntemi ile 4,506, mansap yönünde ise yine Bishop yöntemi ile 1,625 güvenlik katsayısı vererek, diğer katkı maddelerine kıyasla daha yüksek güvenlik sağlamaktadır.

4.1.7 Plaxis 2D Programı Analiz Sonuçları

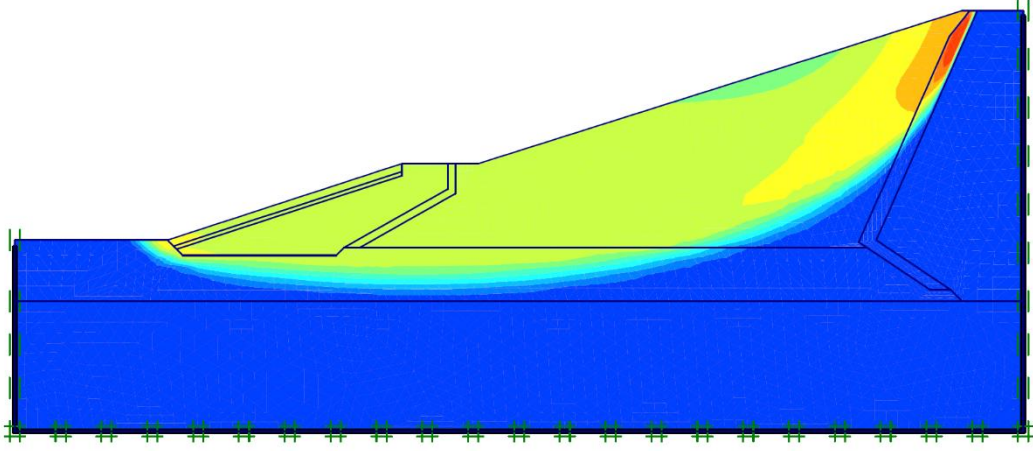
4.1.7.1 Plaxis 2D Memba Tarafında Güvenlik Sayılarının Elde Edilmesi

Plaxis programı, dolgu baraj analizlerinde kritik kayma yüzeylerini belirleyerek güvenlik sayısı hesaplamaları yapmamıza olanak tanır. Program, baraj yapısının en kritik kayma yüzeyini belirleyerek bu bölgede bir güvenlik sayısı verir. Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde, mansap tarafının daha kritik bir kayma yüzeyine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, memba tarafı için güvenlik sayısı elde edilememesine neden olmuştur.

Memba tarafı için güvenlik sayısı elde edebilmek amacıyla çeşitli çözüm yolları bulunmaktadır. Örneğin, mansap tarafını projeden tamamen çıkararak ve yapının mansap tarafında sona erdiğini programa belirterek sadece geriye kalan proje kesiti üzerinden kritik kayma yüzeyini bulmak mümkündür. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi, bu yöntem kullanıldığında memba tarafının güvenlik sayısına ulaşılabilir.

Σ -Msf:

2.236



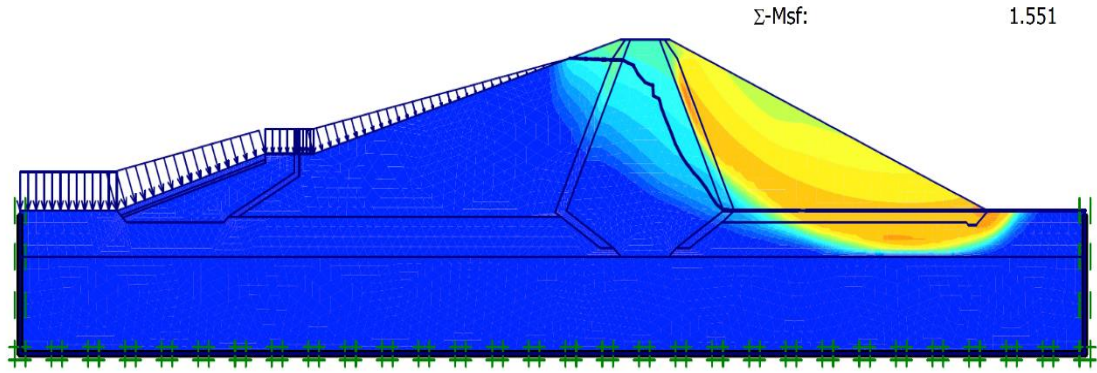
Şekil 4.20 Plaxis 2D memba tarafı güvenlik sayısı

Ancak, bu yaklaşımın sağlıklı bir sonuç vermediğini belirtmek önemlidir. Bu yöntemle analiz yapıldığında, su yükü eklenmek istendiğinde suyun çıkış noktası bulunmadığı için analizde doğru sonuçlar elde edilememektedir. Su yükü, dolgu barajların stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğundan, bu tür bir analiz eksik kalmaktadır ve gerçekçi bir sonuç vermemektedir. İnşaat sonrası düşünüldüğünde de aynı şekilde baraj bütünüyle analiz edilemediğinden ve projenin devamının hiç olmadığı varsayılarak analiz yapılmasının ne kadar sağlıklı olduğu tartışma konusudur.

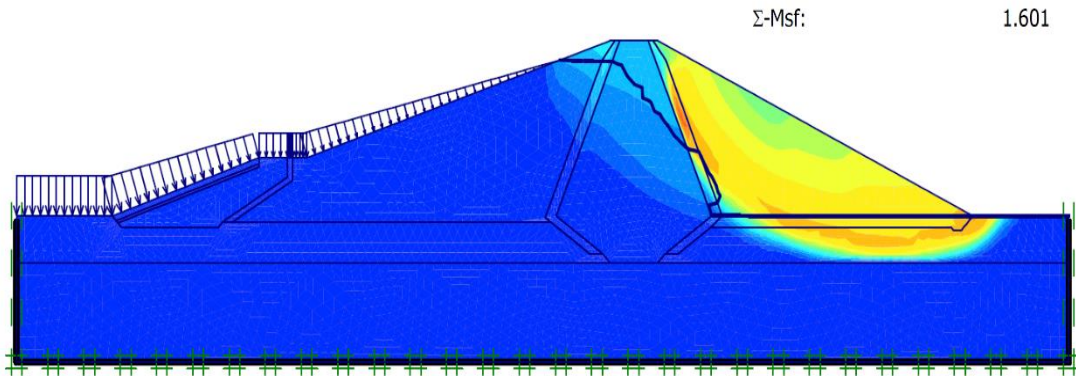
Bu nedenle, bu tez çalışmasında sadece mansap tarafının güvenlik sayıları ve çıktıları ele alınmış ve gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Mansap tarafındaki kritik kayma yüzeyleri ve güvenlik sayıları üzerinden yapılan analizler, dolgu barajın stabilitesi hakkında daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Böylece, barajın mansap tarafındaki güvenlik durumunu anlamak ve iyileştirme önerileri geliştirmek mümkün olmuştur.

Sonuç olarak, dolgu barajların stabilite analizlerinde bütüncül bir yaklaşım benimsemek önemlidir. Memba tarafında güvenlik sayısının elde edilmesi zor olsa da, mansap tarafındaki analizler barajın genel stabilitesi hakkında kritik bilgiler sağlar. Mansap tarafındaki güvenlik katsayılarının detaylı analizi, barajın daha güvenli ve dayanıklı olmasına katkıda bulunabilir. Bu sayede, barajın inşaat ve işletme sürecinde karşılaşılabileceği riskler daha iyi yönetilebilir.

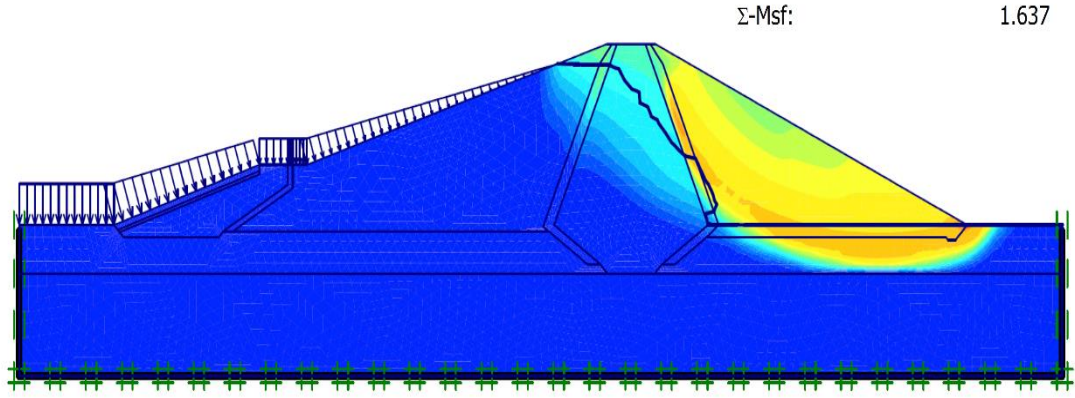
4.1.7.2 Plaxis 2D Mansap Tarafında Güvenlik Sayılarının Elde Edilmesi



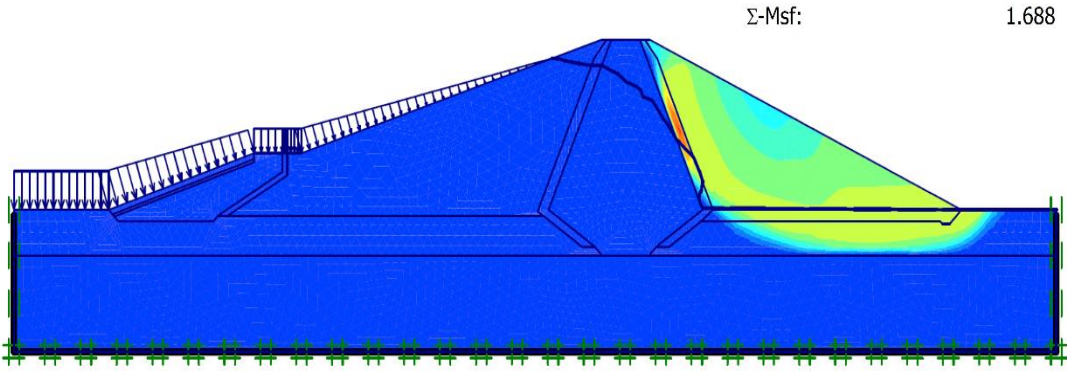
Şekil 4.21 Katkısız malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı



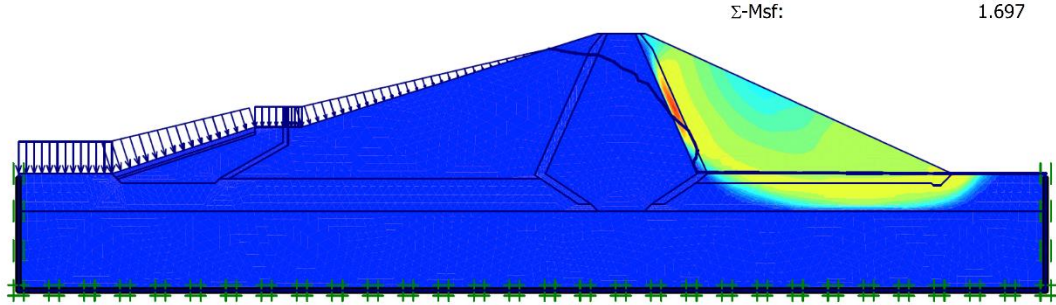
Şekil 4.22 %1 CE malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı



Şekil 4.23 %1 PP malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı



Şekil 4.24 %1 CE + %15 MT malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı



Şekil 4.25 %1 PP + %5 MT malzemesinin Plaxis 2D programında güvenlik sayısı

Çizelge 4.13’de dolgu barajın Plaxis 2D programında yapılan analiz sonucunda elde edilen güvenlik sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.13 Dolgu barajın Plaxis 2D programında elde edilen güvenlik sayıları

	Plaxis
Katkısız	1,551
%1 CE	1,601
%1 PP	1,637
%1 CE + %15 MT	1,688
%1 PP + %5 MT	1,697

Plaxis 2D programı kullanılarak elde edilen güvenlik sayıları, farklı katkı maddelerinin etkisi altında değerlendirilmiştir. Güvenlik sayıları, katkısız durum ve çeşitli malzeme katkıları (%1 cam elyaf (CE), %1 polipropilen (PP), %1 cam elyaf + %15 mermer tozu (CE + MT), %1 polipropilen + %5 mermer tozu (PP + MT)) için belirlenmiştir. Aşağıda, Plaxis 2D programı ile elde edilen güvenlik sayıları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Katkısız

Katkısız durumda, Plaxis 2D programı ile elde edilen güvenlik sayısı 1,551 olarak belirlenmiştir.

%1 Cam Elyaf (CE) Katkısı

%1 CE katkısı ile güvenlik sayısı 1,601 olarak belirlenmiştir.

%1 Polipropilen (PP) Katkısı

%1 PP katkısı ile güvenlik sayısı 1,637 olarak belirlenmiştir.

%1 Cam Elyaf ve %15 Mermer Tozu (CE + MT) Katkısı

%1 CE ve %15 MT karışımı ile güvenlik sayısı 1,688 olarak belirlenmiştir.

%1 Polipropilen ve %5 Mermer Tozu (PP + MT) Katkısı

%1 PP ve %5 MT karışımı ile güvenlik sayısı 1,697 olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, Plaxis 2D programı kullanılarak yapılan analizlerde farklı katkı maddelerinin baraj güvenliği üzerindeki etkilerini göstermektedir. %1 polipropilen ve %5 mermer tozu (PP + MT) karışımının en yüksek güvenlik sayısını sağladığı ve bu malzemenin barajın dayanıklılığını artırmada etkili olduğu gözlemlenmektedir.

4.1.8 Maliyet Analizi

Yapılan bütün analizlerde en yüksek güvenlik sayısını %1 PP + %5 MT karışımı vermiştir. Bu karışım baz alınarak dolgu barajın birim hacmi üzerinden bir maliyet analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.14 Dolgu barajın birim hacim verileri

Baraj Verileri	
Alan (m²)	3227,67
Birim Hacim (m³)	3227,67
Yoğunluk (gr/cm³)	2,64
Kütle (t)	8521,05

Çizelge 4.15 Malzemelerin birim fiyatları

Birim Fiyatlar		
Polipropilen Elyaf	1 kg	₺ 210.00
MT Nakliyesi (TL/km)	m ³	16

Çizelge 4.16 %1 PP + %5 MT maliyet analizi

		Kütle (t)	Hacim (m³)	Maliyet
Polipropilen Elyaf (%)	1%	85,21	-	₺ 17,894,202.48
MT Nakliyesi (TL/km)	5%	426,05	161,38	₺ 2,582.14

Polipropilen elyaf ve mermer tozu için ortalama bir birim fiyat belirlenmiştir. Bu fiyatlar üzerinden dolgu kütlelerine oranla belirlenen polipropilen elyaf ve mermer tozunun kütlesi ile gerekli çarpımlar yapılarak maliyet fiyatı çıkarılmıştır.

Polipropilen elyafın baraj yapımında kullanılması, malzemenin dayanıklılık ve esneklik özelliklerini artırabilir. Polipropilen elyafın maliyeti yüksek olsa da bu malzeme barajın uzun vadede güvenliğini artırabilir ve bakım maliyetlerini azaltabilir. Maliyet analizi yapılırken malzemenin 1 kg üzerindeki ortalama bir fiyatı belirlenerek hesaplama yapılmıştır. Fakat uygulamak istendiğinde tedarik sürecinde alım miktarı yüksek olacağından fiyatta ciddi oranda bir düşüş olacaktır. Yerel tedarikçilerin bulunması, nakliye maliyetlerini düşürebilir ve projeyi daha ekonomik hale getirebilir.

Mermer tozu (MT) nakliyesi için belirlenen oran (%5) ve maliyet, projenin genel maliyetine küçük bir etki yapmaktadır. MT'nin baraj dolgusunda kullanılması, malzemenin mukavemetini ve stabilitesini artırabilir. Maliyet analizinde km başına ortalama bir fiyat belirlenerek hesaplama yapılmıştır. Tedarik sürecinde alım miktarı fazla olacağından ve mermer tozunun atık malzeme olduğu düşünüldüğünde birim fiyatta ciddi oranda düşüş olacaktır. Proje alanına nakliyesinde hesaplamalar km başına olacaktır ve bu durum tedarik yerinden proje alanına olan uzaklık etkili olacaktır. Fakat total fiyat düşünüldüğünde mermer tozunun nakliye maliyeti proje genel maliyetine küçük etki yapacaktır.

4.1.8.1 %10 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi

%10 eğim artışı sonucunda elde edilen birim hacim verileri kullanılarak %1 PP + %5 MT karışımının maliyet analizi yapılmıştır. Malzeme fiyatları Çizelge 4.15'te bulunan fiyatlar baz alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.17 %10 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri

Baraj Verileri	
Alan (m²)	2960,94
Birim Hacim (m³)	2960,94
Yoğunluk (gr/cm³)	2,64
Kütle (t)	7816,88

Çizelge 4.18 %10 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi

		Kütle (t)	Hacim (m³)	Maliyet
Polipropilen Elyaf (%)	1%	78,17	-	₺ 16,415,451.36
MT Nakliyesi (TL/km)	5%	390,84	148,05	₺ 2,368.75

%10 eğim artışı yapıldığında alan ve kütle oranında düşük gerçekleşmektedir. Bu durum da maliyet analizinde fiyatı genel proje maliyetini göz önünde bulundurduğumuzda ciddi oranda düşüş gerçekleştirdiğini göstermektedir. Orijinal baraj boyutları üzerinden yapılan maliyet analizinde de bahsedildiği gibi yerel tedarikçilerin bulunması ve total oranda yüksek miktarda alım yapılması polipropilen maliyetini düşürmektedir.

Mermer tozu nakliye maliyeti düşünüldüğünde de hesaplamalar km başına olduğundan tedarik yerinden proje alanına olan mesafe önemlidir. Örneğin 10 km uzaklıktaki bir mermer ocağından tedarik edilen mermer tozunun nakliye maliyeti 23,687 TL olacaktır. Fakat bu durum yüksek miktarda temin edilmesi ve mermer tozunun atık malzeme olmasından dolayı maliyette ciddi oranda düşüş yaratacaktır.

4.1.8.2 %15 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi

%15 eğim artışı sonucunda elde edilen birim hacim verileri kullanılarak %1 PP + %5 MT karışımının maliyet analizi yapılmıştır. Malzeme fiyatları Çizelge 4.15'te bulunan fiyatlar baz alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19 %15 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri

Baraj Verileri	
Alan (m²)	2827,79
Birim Hacim (m³)	2827,79
Yoğunluk (gr/cm³)	2,64
Kütle (t)	7465,37

Çizelge 4.20 %15 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi

		Kütle (t)	Hacim (m³)	Maliyet
Polipropilen Elyaf (%)	1%	74,65	-	₺ 15,677,267.76
MT Nakliyesi (TL/km)	5%	373,27	141,39	₺ 2,262.23

Aynı şekilde %15 eğim artışı yapıldığında alan ve kütle oranlarında gerçekleşen düşüş maliyet analizinde olumlu etki yaratmaktadır. Orijinal baraj boyutları üzerinden yapılan maliyet analizine göre düşüş olduğu görülmektedir. Yerel tedarikçilerin bulunması ve yüksek miktarda alım yapılması bu durumu değiştirmektedir. Fiyatta ciddi oranda düşüş olacaktır.

Mermer tozu nakliyesinde de %10 eğim artışında bahsedildiği gibi proje alanına olan mesafe önemlidir. Ama mermer tozunun atık malzeme olması ve yüksek oranda tedarik edilmesi fiyatı aynı şekilde olumlu etkileyecektir.

Bu nedenle, yerel kaynakların etkin kullanımı ve stratejik tedarik planlaması, proje maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Mermer tozu gibi atık malzemelerin kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantaj sağlayarak projeye değer katmaktadır.

4.1.8.3 %20 Eğim Artışı Sonucunda Maliyet Analizi

%20 eğim artışı sonucunda elde edilen birim hacim verileri kullanılarak %1 PP + %5 MT karışımının maliyet analizi yapılmıştır. Malzeme fiyatları Çizelge 4.15'te bulunan fiyatlar baz alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21 %20 eğim artışı sonucunda elde edilen dolgu barajın birim hacim verileri

Baraj Verileri	
Alan (m²)	2694,32
Birim Hacim (m³)	2694,32
Yoğunluk (gr/cm³)	2,64
Kütle (t)	7113

Çizelge 4.22 %20 eğim artışı sonucunda elde edilen %1 PP + %5 MT maliyet analizi

		Kütle (t)	Hacim (m³)	Maliyet
Polipropilen Elyaf (%)	1%	71,13	-	₺ 14,937,310.08
MT Nakliyesi (TL/km)	5%	355,65	134,72	₺ 2,155.46

%20 eğim artışında yapılan maliyet analizine bakıldığında, orijinal baraj boyutlarına göre ciddi birim hacim ve kütle farkı bulunmaktadır. Bu durum aynı birim fiyatları baz alındığında maliyette düşüş yaratmaktadır.

Çizelge 4.16'daki veriler incelendiğinde, %20'lik bir eğim artışı sonucunda polipropilen elyafın maliyetinde %17 oranında bir düşüş sağlandığı görülmektedir. Bu durum total proje maliyetini düşündüğümüzde ciddi bir maliyet düşüşünü göstermektedir. Aynı şekilde yerli tedarikçilerin bulunması ve yüksek miktarda alım yapılması fiyatta düşüş bakımından etkili olacaktır.

Çizelge 4.16'daki veriler incelendiğinde, %20'lik bir eğim artışı sonucunda mermer tozu nakliyesi maliyetinde %17 oranında bir düşüş sağlandığı görülmektedir. Proje alanının uzaklığı maliyet bakımında etkilese de mermer tozunun atık malzeme olması ve alım miktarının fazla olması fiyat bakımından olumlu etkileyecektir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çizelge 4.5’de verilen sonuçlar incelendiğinde, tüm katkı maddelerinin kullanımı güvenlik katsayılarını artırmaktadır. En yüksek güvenlik katsayıları, %1 PP + %5 MT kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bu kombinasyon, tüm yöntemlerde en yüksek güvenlik katsayılarını göstermiştir. Katkısız ve katkılı tüm numunelerde Bishop yöntemi genel olarak en yüksek güvenlik katsayılarını verirken, Janbu yöntemi genellikle en düşük güvenlik katsayılarını vermiştir. Bu durum, kullanılan şev stabilite analiz yöntemlerinin birbirine yakın değerler verdiğini de göstermektedir.

Çizelge 4.6’da verilen sonuçlar incelendiğinde, %1 CE katkısının güvenlik katsayılarını azaltırken, %1 PP ve diğer kombinasyonların güvenlik katsayılarını artırdığı görülmektedir. En yüksek güvenlik katsayıları, %1 PP + %5 MT kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bu kombinasyon, tüm yöntemlerde en yüksek güvenlik katsayılarını göstermiştir. Katkısız ve katkılı tüm numunelerde Bishop yöntemi genel olarak en yüksek güvenlik katsayılarını verirken, Janbu yöntemi genellikle en düşük güvenlik katsayılarını vermiştir.

Sonuçlara göre, farklı katkı maddeleri ve oranlarının kullanılması güvenlik katsayılarını önemli ölçüde etkilemiştir. Hem katkısız durumda hem de çeşitli katkı maddeleri kullanılarak yapılan analizlerde, genel olarak şu eğilimler gözlemlenmiştir:

- **Katkısız:**
Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da verilen değerlere göre, katkı maddesi kullanılmadan yapılan analizlerde güvenlik katsayıları birbirine oldukça yakındır. Ancak katkı maddesi eklenmesi ile güvenlik katsayılarında artış veya azalışlar gözlemlenmiştir.
- **%1 CE:**
%1 CE katkısı kullanıldığında, memba ve mansap tarafındaki güvenlik katsayılarının bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.
- **%1 PP:**

%1 PP katkısı Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 incelendiğinde memba ve mansap tarafındaki güvenlik katsayılarında belirgin bir artışa yol açmıştır. Bu durum, polipropilen liflerinin zemin tanelerini bir arada tutarak içsel sürtünmeyi artırması ve kayma dayanımını yükseltmesi ile açıklanabilir.

- %1 CE + %15 MT:

%1 CE + %15 MT kombinasyonu ile yapılan analizlerde güvenlik katsayıları her iki çizelgede de artış göstermiştir. Mermer tozu, zeminin sıkışabilirliğini azaltarak boşluk oranını düşürür. Bu da zeminin stabilitesini artırır.

- %1 PP + %5 MT:

%1 PP + %5 MT kombinasyonu her iki çizelgede de en yüksek güvenlik katsayılarını vermiştir. Bu kombinasyon, polipropilenin lif yapısı sayesinde zeminin kayma dayanımını artırması ve mermer tozunun boşluk oranını düşürerek zeminin sıkışabilirliğini azaltması ile en etkili sonucu sağlamaktadır.

%1 PP + %5 MT kombinasyonunun diğer katkı maddelerinden daha yüksek güvenlik katsayıları vermesinin nedeni, bu iki katkı maddesinin zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmesidir. Polipropilen lifleri zeminin iç yapısında bir ağ oluşturur ve zemini bir arada tutarak içsel sürtünmeyi artırır. Mermer tozu ise zeminin sıkışabilirliğini azaltır ve boşluk oranını düşürerek suyun zeminin zayıflatıcı etkilerini minimize eder. Bu iki katkı maddesi birlikte çalışarak, zeminin kayma dayanımını ve genel stabilitesini önemli ölçüde artırır.

MT'nin %15 kullanıldığında %5 MT kullanımına göre daha düşük dayanım ve güvenlik sayısı elde edilmesinin sebebi mermer tozu artışının zeminin kohezyonunu ve plastisesini düşürmesinden kaynakladığı ifade edilebilir.

Bu sonuçlar, dolgu barajların stabilitesini artırmak için %1 PP + %5 MT kombinasyonunun en yüksek güvenlik sayılarını verdiğini ve bu katkı maddeleri beraber kullanıldığında bu karışım oranlarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Polipropilen katkısını maliyet açısından değerlendirdiğimizde maliyetin yüksek olması polipropileni baraj malzemesi olarak uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. İleriki

süreçlerde dayanımı yüksek dolgu malzemesi elde etmenin güçlüğü ve dolgu malzemesi elde ederken çevreye verdiği olumsuz etkilerin artabileceği düşünüldüğünde bu malzemenin yüksek maliyeti göz ardı edilerek kullanılabileceği söylenebilir. Öte yandan polipropilenin atık malzemelerden elde edilmesi sonucunda maliyetinin düşmesi ileriki yıllarda polipropilenin katkı malzemesi olarak kullanımını kolaylaştıracaktır.

Bu katkı maddelerini kullanımı düşünüldüğünde, her zemin türü ve proje lokasyonu için detaylı bir analiz yapılmalı ve uygun karışım oranları belirlenmelidir. Çünkü sonuçlar zemin sınıfı ve zeminin fiziksel özelliklerine göre farklı sonuçlar verebilir.

Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemine göre şev stabilitesi analizi yapılmaktadır. Slide programında ise limit dengeye dayalı yöntemler kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında birbirine yakın güvenlik sayıları elde edilmiştir. Veriler ışığında da dolgu barajın güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için bu çalışmada kullanılan katkı maddelerinin farklı oranlarının ve kombinasyonlarının etkileri de araştırılmalıdır. Ayrıca, uzun vadeli performans değerlendirmeleri yapılarak, katkı maddelerinin zamanla stabilite üzerindeki etkileri incelenmelidir.

Önerilen katkı maddelerinin sahada uygulanması ve sonuçların sürekli izlenmesi gerekmektedir. Bu durum, teorik bulguların pratikte doğrulanmasını ve gerekli iyileştirmelerin yapılmasını sağlayacaktır.

Bu çalışma, dolgu barajlarının stabilitesini artırmak için katkı maddelerinin potansiyel faydalarını ortaya koymuş ve bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir temel oluşturabileceği düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, dolgu baraj inşaatında katkı maddelerinin kullanılabileceğini, bunun çevreye olumlu katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak günümüzde bu malzemelerin kullanımı ekonomik olmadığından ilerleyen zamanlarda değişen şartlara göre değerlendirmenin daha sağlıklı olabileceği ifade edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Aksoy H S, Gör M, 2011, Kumul Zeminlerin Farklı Malzemeler Kullanılarak Stabilize Edilmesi, 4. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Alnunu M Z, Nalbantoglu Z, 2022, Performance of using waste marble dust for the improvement of loose sand in deep soil mixing, Arabian Journal for Science and Engineering, 47(4), 4681-4694.
- Ateş E, Kuru T, Aydın R K, 2019, Deprem Kayıtları Kullanılarak Muğla-Milas Derince Barajının Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(2), 319-338.
- Ayraçma B B, Teymür B, 2014, Fiber katkılı kumların geoteknik özellikleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 15. Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 593-602.
- Baba S, 2022, Baraj dolgu malzemesi iyileştirmesinde uçucu kül ve mermer tozu kullanımı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, Afyonkarahisar.
- Çalık Y, Akbulut R K, Zaimoğlu A Ş, Yetimoğlu T, 2019, Polipropilen Lif ile Rastgele Donatılan Bir CH Kil Zemininin Donma-Çözülme Çevrimlerinde Serbest Basınç Dayanımının Araştırılması, Journal of the Institute of Science and Technology, 9(2), 911-921.
- Çavuş U Ş, 2021, Alüvyon Özelliklerinin Homojen Dolgu Barajların Stabilitésine ve Kazı Derinliklerine Etkisinin Araştırılması, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(1), 143-148.
- Farouk A, Shahien M M, 2013, Ground improvement using soil–cement columns: Experimental investigation, Alexandria Engineering Journal, 52(4), 733-740.
- Fırat S, Canik B, 2014, Şev İyileştirmelerinde Kullanılan Kazıklara Uygulanan Deprem Etkisi, Politeknik Dergisi, 17(1), 31-34.

- Gueguin M, Hassen G, De Buhan P, 2015, Stability analysis of homogenized stone column reinforced foundations using a numerical yield design approach, Computers and Geotechnics, 64, 10-19.
- Gümüşer C, 2009, Uçucu Kül ve Polipropilen Elyaflarla Zayıf Zeminlerin Stabilizasyonu, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 167s, Sivas.
- Hamdy D B, 2022, A sustainable approach for improving the behavior of collapsible soil using marble dust, Innovative Infrastructure Solutions, 7(4), 260.
- Hasan K, 2019, Dolgu Barajların Stabilité Analizleri ve Bir Uygulama, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Eskişehir.
- Karadağ M B, Evirgen B, Tuncan M, 2019, Çiftlikköy ilçesi gençlik caddesindeki heyelanın vaka analizi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(1), 640-649.
- Kul M Y, 2022, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Heyelan Analizi: Beşikdüzü İşkenderli Tonya (Trabzon) Heyelan Örneği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s, Trabzon.
- Küçük F, 2021, Yüksek performanslı polipropilen fiber katkısının kil zeminin drenajsız kayma direncine etkisinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Sakarya.
- Mısır G, 2018, şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakóltesi Mühendislik Dergisi, 9(1), 429-438.
- Opan M, 2018, Beton ağırlık barajında deprem durumunda oluşan kuvvetlerin baraj güvenliğine etkileri, Uluslararası Doğal Afetler ve Afet Yönetimi Sempozyumu, 6-4 Mayıs, Sakarya, 264-269.
- Polat A, 2019, şev stabilitesinde sonlu elemanlar yöntemi uygulaması ve karşılaştırmalı analiz, Bilecik şeyh Edebalı Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 83s, Bilecik.

- Salunkhe D P, Bartakke R N, Chvan G, Kothavale P R, Digvijay P, 2017, An overview on methods for slope stability analysis, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 6(03), 2278-0181.
- Sivrikaya M, 2022, Düzköy – Çal Orta Mahalle Heyelanının Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Avrasya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 185s, Trabzon.
- Solanki A, Sharma J K, 2020, Enhancing the Properties of Dune Sand Using Marble Dust, In Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020 At: IGC 2020 Andhra University, Visakhapatnam.
- Sürücü B, 2022, Gevşek Zeminlerden Oluşmuş Heyelan Riski Bulunan Şevlerin Tasarımı ve Projelendirmesi Üzerine Bir Vaka Analizi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 197s, İzmir.
- Şahbaz İ, Ünsever Y S, 2020, Çimento ve polipropilen lif kullanarak düşük plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(3), 1409-1420.
- Şen B, 2021, Bir Ankrajlı İksa Sistemi Geoteknik Tasarımda Malzeme Modeli Etkisinin İncelenmesi ve Aletsel Ölçüm Sonuçları ile Karşılaştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 197s, İstanbul.
- Şeymanur O, 2023, Dolgu Barajlarda Şev Stabilitesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Rize.
- Ün B, Yıldız A, 2021, Şev Stabilitesi Probleminin Geri Analizle Çözümü: Örnek Bir Vaka, Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 9(1), 174-181.
- Ün B, 2019, Şev Stabilitesi ve Şev Hareketlerine Karşı Alınacak Önlemler, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Adana.
- Yavuz V S, 2012, Şev stabilitesi problemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle iki ve üç boyutlu analizi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 147s, Diyarbakır.
- TS 1900-1, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, TSE, Ankara

TS 1900-2, 2006, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Lâboratuvar Deneyleri- Bölüm 2:
Mekanik Özelliklerin Tayini, TSE, Ankara

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.ozkanlarmakina.com.tr/zemin-iyilestirme/vibro-kompaksiyon/>,
29.05.2024
- 2- <https://volkanatabey.com.tr/insaat-projelerinde-kullanilan-kompaksiyon-yontemleri/>, 29.05.2024
- 3- <https://zemincilerbirligi.blogspot.com/2014/09/tas-kolon-stone-column.html>,
30.05.2024
- 4- <https://insapedia.com/baraj-nedir-baraj-tipleri-ve-cesitleri/>, 31.05.2024