

T.C.
HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ A.B.D.

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ
ZEYNEL BEY YERLEŞKESİNİN ŞEV STABİLİTESİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

Kadir BOSTANCI

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Nuri BODUR

HAKKÂRİ

2024

T.C.
HAKKARI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE
HAKKARI

İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı öğrencisi Kadir BOSTANCI tarafından hazırlanan Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hakkari Üniversitesi Zeynel Bey Yerleşkesinin Şev Stabilitésinin Değerlendirilmesi başlıklı tez, 23.08.2024 tarihinde yapılan savunma sonucunda aşağıda isimleri bulunan jüri üyelerince kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı Soyadı	Kurumu	İmzası
Başkan : Prof. Dr. Mehmet Nuri BODUR	Hakkari Üniversitesi	
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DAŞKIRAN	Hakkari Üniversitesi	
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Osman KARA	Gümüşhane Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilen bu yüksek lisans tezi, Enstitü Yönetim KurulununSayılı kararıyla tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezde sunulan tüm bilgi ve sonuçların, bilimsel yöntemlerle yürütülen gerçek deney ve gözlemler çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, çalışmada bana ait olmayan tüm veri, düşünce, sonuç ve bilgilere bilimsel etik kuralların gereği olarak eksiksiz şekilde uygun atıf yaptığımı ve kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

23/08/2024

İmza

Kadir BOSTANCI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ ZEYNEL BEY YERLEŞKESİNİN ŞEV STABİLİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

KADİR BOSTANCI

HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof Dr. Mehmet Nuri BODUR
2024 103 sayfa

Bu tezde Hakkari Üniversitesi Zeynel Bey Yerleşkesinde kritik olduğu düşünülen şev üzerinde çalışma yürütülmüştür. Çalışma bölgesinde önceden sıklıkla şev yenilmeleri meydana gelmiştir. Yerleşkenin zemin yapısı genel olarak benzerdir. Bu sebepten dolayı sondaj verilerine göre en kritik şev seçilip şev yapısı ile ilgili genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Çalışmada, arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler Plaxis 2D programına işlenmiştir. Öncelikle arazi mevcut durumu sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir. Şev duraylılığı açısından zemin parametreleri incelenmiş olup kritik durumlar belirlenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda şev duraylılığı güvenlik faktörü, kritik değer üstünde çıkmış olsa da yakın bir değer elde edilmiştir. Şevin dayanım parametrelerinde küçük değişiklikler yapıldığında ise güvenlik faktörü kritik değer altında çıkmış olup gerekli önlemler önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis 2D.

ABSTRACT

MSc THESIS EVALUATION OF SLOPE STABILITY OF HAKKARI UNIVERSITY ZEYNEL BEY CAMPUS BY FINITE ELEMENT METHOD

KADİR BOSTANCI

**HAKKARI UNIVERSITY GRADUATE EDUCATION INSTITUTE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**Supervisor: Prof Dr. Mehmet Nuri BODUR
2024 103 pages**

In this thesis, a study was carried out on the slope that is thought to be critical in Hakkari University Zeynel Bey Campus. Slope failures occurred frequently in the study area. The ground structure of the region is generally similar. For this reason, the most critical slope was selected according to the drilling data and evaluations were made regarding the slope structure.

In the study, data obtained from field and laboratory studies were processed into the Plaxis 2D program. First of all, the current state of the land was simulated with the finite element method. Soil parameters were examined in terms of slope stability and critical situations were determined.

As a result of the analysis, although the slope stability safety factor was above the critical values, a value close to it was obtained. For small changes in strength of the slope, the safety factor is taken below the critical value and the necessary precautions are recommended.

Key Words: Slope stability, finite element method, Plaxis 2D.

ÖNSÖZ

Zeynel Bey Yerleşkesi kurulduğundan bu yana sık sık şev yenilmeleri ile gündeme gelmektedir. Ayrıca şev stabilitesi Hakkari Bölgesi açısından da büyük önem arz etmektedir. Şev hareketlerini incelemek, yapılacak olan yapıların tasarımı, onarımı açısından önemli bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır.

Şev hareketlerine karşı alınacak önlemlerle heyelan riski bulunan bölgelerde zararın önüne geçilebilir. Zeminin yapısına ve eğimine bağlı olarak daha dayanıklı tasarımlar yapılabilir.

Şev duraylılığını incelemek için birçok yaklaşım bulunmaktadır. En çok kullanılan yaklaşımlar limit denge ile sonlu elemanlar yöntemidir. Çalışmamızda sonlu elemanlar yöntemini ile çözüm yapan Plaxis 2D programı kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında Zeynel Bey Yerleşkesinde yapılmış olan birçok sondaj verisi incelenmiştir. Bu veriler içerisinde en kritik güzergah belirlenmiş olup çalışma bölgesi ile ilgili genel değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler, Plaxis 2D programına işlenmiş veriler üzerinden sağlanmıştır. Kritik durumlar belirlenip buna karşı alınacak önlemler önerilmiştir. Farklı zemin parametreleri ile analizler yapıp bu parametrelerin nasıl bulunacağı detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Yapılan farklı analizlerin sonuçları detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Daha sonra mevcut durum üzerinden dayanım yapıları tasarlanmıştır. Bu dayanım yapılarının şev duraylılığına nasıl bir etkisinin olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın, bölgede şev duraylılığı ile ilgili yapılacak olan çalışmalara altlık olması amaçlanmıştır.

Kadir BOSTANCI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecim ve tez sürecim boyunca yardımlarını esirgemeyen ve gelişimim açısından elinden geleni yapan danışman hocam Sayın Prof Dr. Mehmet Nuri BODUR'a teşekkür ederim.

Dr. Öğr. Üyesi Osman KARA hocama ve Doç. Dr. Mesut GÖR hocama desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Sondaj verilerini elde etmemde önemli yardımları olan ve bölgedeki geoteknik yapıya hakim olan, bu bilgisi ile beni yönlendiren Jeoloji Mühendisi Cihat KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Yardımlarını esirgemeyen ve her zaman yanımda olan babam Abdullah BOSTANCI'ya, annem Süheyla BOSTANCI'ya ve ablam Sevim BOSTANCI'ya teşekkür ederim.

Her konuda destek olan, bilgisi ile tezime önemli katkılarda bulunan ağabeyim Harita Mühendisi Serhat BOSTANCI'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ.....	III
TEŞEKKÜR	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
ÇİZELGE DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	4
2. ŞEV YENİLME ÖRNEKLERİ ve ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Şev Yenilme Örnekleri	5
2.2. Şev Duraylılığı Üzerine Yapılan Çalışmalar	9
3. MATERYAL ve YÖNTEM	12
3.1. Şev Terminolojisi	12
3.2. Şev Hareket Tipleri.....	14
3.2.1. Düşme-Yuvarlanma.....	15
3.2.2. Devrilme	15
3.2.3. Kayma.....	16
3.2.4. Yanal Yayılma.....	17
3.2.5. Akma	17
3.3. Şev Yenilmelerine Neden Olan Etkenler	19
3.4. Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri	21
3.4.1. Şevlerde Güvenlik Katsayısı	21
3.4.2. Limit Denge Analiz Yöntemleri.....	22

3.4.2.1. İsveç dilim (fellenius) yöntemi.....	23
3.4.2.2. Bishop yöntemi.....	24
3.4.2.3. Morgenstern – Price yöntemi	24
3.4.2.4. Spencer yöntemi	25
3.4.2.5. Janbu yöntemi.....	26
3.4.2.6. Sarma yöntemi.....	28
3.4.2.7. Limit denge analiz yöntemlerinin karşılaştırılması	28
3.4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi.....	30
3.5. Şev İyileştirme Yöntemleri.....	31
3.5.1. Şev Geometri Değişikliği İle İyileştirme.....	32
3.5.1.1. Drenaj	32
3.5.1.2. Kazı	33
3.5.2. Yapısal Önlemler.....	35
3.5.2.1. Dayanma yapıları.....	35
3.5.2.2. Kazıklar	38
3.5.2.3. Donatılı zemin	40
3.5.2.4. Palplanşlar	41
3.5.3. Diğer Önlemler	41
3.5.3.1. Ağaçlandırma	41
3.5.3.2. Kimyasal stabilizasyon.....	42
3.6. Arazi Deneyleri	42
3.6.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)	43
3.6.2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)	45
3.6.3. Arazi Veyn Deneyi	47
3.7. Laboratuvar deneyleri”	47
3.7.1. Kıvam Limitleri Deneyi	48

3.7.2. Kompaksiyon Deneyleri	49
3.7.3. Kesme Kutusu Deneyi	49
3.7.4. Elek Analizi Deneyi	50
3.7.5. Serbest Basınç Deneyi	51
3.7.6. Üç Eksenli Basınç Deneyi	51
4. PLAXİS 2D PROGRAMI	53
4.1. Geometrik Model	53
4.2. Plaxis Arayüzü ve Malzeme Modelleri	55
4.2.1. Plaxis Programı Tanıtımı ve Arayüzü	55
4.2.1.1. İntput sekmesi	55
4.2.1.2. Çıktı (output) sekmesi	67
5.BULGULAR ve TARTIŞMA	69
5.1. İnceleme Alanının Özellikleri	69
5.2. Parametrelerin Belirlenmesi	72
5.3. Plaxis 2D Programına İşlenen Veriler	81
5.4.3. Modelin tanımlanması ve analiz aşaması	81
5.4. Drenajlı Durum Analizinde Güvenlik Faktörü	84
5.5. İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyonun Güvenlik Faktörüne Etkisi	85
5.6. İstinat Duvarının Güvenlik Faktörüne Etkisi	89
5.7. Teğet Kazıkların Güvenlik Faktörüne Etkisi	92
5.7.1. Kazığın konumunun güvenlik faktörüne etkisi	94
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	96
KAYNAKÇA	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

E_{ur}^{ref}	: Referans boşaltma/tekrar yükleme modülü
E_{50}^{ref}	: Referans rijitlik modülü
E_{oed}^{ref}	: Referans tanjant modülü
A	: Yüklemin x yönündeki etkin derinliği
a	: Şev topuğu
ab	: Şev yüzeyi
ac	: Kayma yüzeyi
B	: Yüklemin y yönündeki etkin derinliği
b	: Daire dilimi eni
bc	: Şev tepesi
c	: Kohezyon
c'	: Efektif kohezyon
c_u	: Drenajsız kohezyon
C_A	: Çakma başlığı düzeltme faktörü
C_B	: Sondaj çapı düzeltme faktörü
C_{BF}	: Tokmak düşürülme sıklığı (hızı) düzeltme faktörü
C_C	: Tokmak yastığı düzeltme faktörü
C_E	: Enerji düzeltme faktörü
C_N	: Jeolojik yük düzeltme faktörü
C_R	: Tij uzunluğu düzeltme faktörü
C_S	: Numune alıcı kılıf (liner) düzeltme faktörü
C_U	: Uniformluk katsayısı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
d	: Kayan kütlenin ağırlık merkezinin kayma dairesi merkezine dik uzaklığı
e	: Boşluk oranı
e_{int}	: Başlangıç boşluk oranı
E	: Elastisite modülü
E_u	: Drenajsız elastisite modülü

EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
g	: Yer çekimi ivmesi
G_s	: Güvenlik katsayısı
H	: Şev yüksekliği
f_0	: Düzeltme faktörü
I	: Atalet momenti
K	: Bağıl kıvam değeri
K_0	: Yatay toprak basıncı katsayısı
L	: Yükün şev tepesine olan uzaklığı
LL	: Likit limit
N	: Tabanda efektif normal kuvvet
$N_{1,60}$	: Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60'ına ve efektif jeolojik basıncı 100 kPa olarak düzeltilmiş vuruş sayısı
N_{60}	: Teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı
N_{arazi}	: Arazide ölçülen darbe sayısı
UD	: Örselenmemiş numune
P_{ref}	: Referans gerilme değeri
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
r_u	: Boşluk suyu basıncı oranı
R_f	: Referans gerilme değeri
q	: Çizgisel yük
SC	: Killi kum
SK	: Sondaj Kuyusu
SM	: Siltli kum
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
T_d	: Kesme gerilmesi
T_f	: Zeminin kesme dayanımı
τ	: Toplam kayma gerilmesi

τ_d	: Potansiyel kayma yüzeyi boyunca gelişen zeminin kaymasına sebep olan direnç
τ_f	: Zeminin kaymaya karşı gösterdiği direnç
m	: Stabilite faktörü
u	: Boşluk suyu
V_s	: Kayma dalgası hızı
w	: Ağırlık
w_L	: Akmadan katışalmaya geçme sınırındaki su muhtevası
w_n	: Tabii su muhtevası
w_p	: Katıdan orta sertliğe geçme sınırındaki su muhtevası
Θ	: Merkez açısı
φ	: İçsel sürtünme açısı
φ'	: Efektif İçsel sürtünme açısı
β	: Eğim açısı
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_{unsat}	: Kuru birim hacim ağırlık
σ	: Toplam normal gerilme
ν	: Poisson oranı
ψ	: Dilatasyon açısı

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1 Şev Analizi Yöntemlerinde Limit Denge	10
Çizelge 3.1 Şev Hareketinin Sınıflandırılması.....	18
Çizelge 3.2 Şev Hareket Tipleri (Varnes,1978).....	19
Çizelge 3.3 Limit Denge Yöntemleriyle Sağlanan Statik Denge Şartları.....	30
Çizelge 3.4 Yerel Zemin Sınıfları.....	44
Çizelge 3.5 SPT Düzeltme Katsayıları	45
Çizelge 4.1 Kohezyonsuz Zemin Özellikleri Hesap Değerleri.....	64
Çizelge 4.2 Kohezyonlu Zemin ve Organik Zeminlerin Hesap Değerleri.....	65
Çizelge 5.1 Su Muhtevası ve Kıvam Limitleri Deneyi Sonuçları	72
Çizelge 5.2 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları.....	74
Çizelge 5.3 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları	74
Çizelge 5.4 3 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri	75
Çizelge 5.5 7 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri	75
Çizelge 5.6 8 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri	76
Çizelge 5.7 Paulos ve Small, Young Modülü	78
Çizelge 5.8 Elastisite Modülleri.....	79
Çizelge 5.9 8 No'lu Sondaj Kuyusu İçin Kullanılan Parametreler.....	81
Çizelge 5.10 3 No'lu Sondaj Kuyusu İçin Kullanılan Parametreler.....	81
Çizelge 5.11 Dolgu Tabakası Parametreleri	90

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1 Hakkari İl Merkezine Ait Heyelan Haritası.....	6
Şekil 3.1 Şev Geometrisinin Genel Görünümü	13
Şekil 3.2 Şeve Ait Parametreler	14
Şekil 3.3 Şev Göçme Tipleri.....	15
Şekil 3.4 Düşme Hareketi	15
Şekil 3.5 Devrilme Hareketi	16
Şekil 3.6 Kayma Hareketleri a) Düzlemsel Kayma b) Dairesel Kayma c) Kama Tipi Kayma	17
Şekil 3.7 Yanal Yayılma Hareketi	17
Şekil 3.8 Akma Hareketi.....	18
Şekil 3.9 Derinlik/Uzunluk Oranına Göre Sınıflandırma	18
Şekil 3.10 İsveç Dilim Yönteminde Bir Dilime Etkiyen Kuvvetler ve Kuvvet Poligonu	23
Şekil 3.11 Dilimler Arası Kuvvetler	25
Şekil 3.12 Spencer Yönetimi Şev Stabilitesi Abakları	26
Şekil 3.13 Yamaçtaki Uzunluk-Derinlik Kavramı.....	27
Şekil 3.14 Güvenlik Katsayısı Grafiği	28
Şekil 3.15 Yamaç ve Şevlerde Suyun Kontrolü İçin Alınabilecek Önlemler.....	33
Şekil 3.16 Şev-Yamaç Geometrisinde Değişiklik Örnekleri	34
Şekil 3.17 Duraylılığın, Şev Yüksekliğinin Azaltılması ile Sağlanması	34
Şekil 3.18 Duraylılığın, Şev Oranının Arttırılması ile Sağlanması	34
Şekil 3.19 Sığ ve Derin Kayma Yüzeylerinde Topuk Dolgusunun Etkinliği.....	35
Şekil 3.20 Taş Duvar Örneği	36
Şekil 3.21 İstinat Duvar Örneği	37
Şekil 3.22 Payandalı Duvar Örneği	37
Şekil 3.23 Diyafram Duvar Örneği.....	38
Şekil 3.24 Gabyon Duvar Örneği.....	38
Şekil 3.25 Teget Kazıkların Görünüşü ve Şevde Kazık	40
Şekil 3.26 Donatılı Zemin Uygulama Örneği	40
Şekil 3.27 Palplanş İmalatı Örneği	41
Şekil 3.28 Bitki Kök Yayılımı	42

Şekil 3.29 SPT Örnek Alıcısı.....	43
Şekil 3.30 SPT Deneyinin Halat ve Kedibaşı ile Arazide Uygulanması	44
Şekil 3.31 CPT Koni Boyut Detayları	46
Şekil 3.32 CPT Deneyi Saha Örneği.....	46
Şekil 3.33 Arazi Veyn Deneyi Kanatlı Kesici Detayı.....	47
Şekil 3.34 Casagrande Deney Aleti	48
Şekil 3.35 Kesme Kutusu Deneyi Aleti	50
Şekil 3.36 Elek Analizi Deneyi.....	50
Şekil 3.37 Serbest Basınç Deneyi Aleti	51
Şekil 3.38 Üç Eksenli Basınç Deneyi	52
Şekil 4.1 (a) Düzlem Şekil Değiştirmeler (b) Eksenel Simetrik Problem	54
Şekil 4.2 “Zemin Elemanlarındaki düğüm ve gerilme noktalarının konumu	54
Şekil 4.3 Proje Özellikleri.....	55
Şekil 4.4 Yüzeysel Temel	56
Şekil 4.5 Dolgu Örneği	56
Şekil 4.6 Kazı Örneği.....	57
Şekil 4.7 İnpıt Modları	57
Şekil 4.8 Programda Sondaj Kuyusu Örneği	58
Şekil 4.9 Zemin Modelleri	59
Şekil 4.10 Drenajlı 3 Eksenli Deney Sonucu İçin E50ref Tanımı	61
Şekil 4.11 Ödeometrik Test Sonucuna Göre Eoedref Değeri	62
Şekil 4.12 Structures Bölümündeki Araçlar	66
Şekil 4.13 Programdaki Ağ (Mesh) Yapısı.....	67
Şekil 4.14 Çıktı (Output) Sekmesinde Yapısal Kuvvetler	68
Şekil 5.1 Zeynel Bey Yerleşkesi Uydu Görünümü.....	69
Şekil 5.2 Jeoteknik Açından Yerleşke Alanındaki Başlıca Sorunlu Alanlar	70
Şekil 5.3 Yerleşke Alanında Yapılan Sondaj Çalışmasının Koordinatları	71
Şekil 5.4 3 Adet Sondaj Çalışmasının Konumu.....	71
Şekil 5.5 Plastisite İndisi ile Drenajsız Kayma Mukavemeti İlişkisi.....	76
Şekil 5.6 SPT N Değeri ile Drenajsız Kayma Mukavemeti İlişkisi.....	77
Şekil 5.7 Killer için Eu/cu-PI-OCR ilişkisi	78
Şekil 5.8 Arazi Kesitinin Boykesiti	80

Şekil 5.9 Plaxis Programında Oluşturulan Model.....	83
Şekil 5.10 Mevcut Durum Deformasyon Durumu Haritası	83
Şekil 5.11 Mevcut Durum Güvenlik Faktörü Grafiği	84
Şekil 5.12 Drenajlı Durum Deformasyon Durumu Haritası	84
Şekil 5.13 Drenajlı Durum Güvenlik Faktörü Grafiği	85
Şekil 5.14 İçsel Sürtünme Açısının 5° Azaltılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası	85
Şekil 5.15 İçsel Sürtünme Açısının 5° Azaltılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği	86
Şekil 5.16 İçsel Sürtünme Açısının 5° Arttırılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası	86
Şekil 5.17 İçsel Sürtünme Açısının 5° Arttırılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği	87
Şekil 5.18 Kohezyon Değerinin Azaltılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası	87
Şekil 5.19 Kohezyon Değerinin Azaltılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği	88
Şekil 5.20 Kohezyon Değerinin Arttırılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası	88
Şekil 5.21 Kohezyon Değerinin Arttırılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği	89
Şekil 5.22 Programa Çizilen Model.....	91
Şekil 5.23 İstinat Duvarı Yapılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası ..	91
Şekil 5.24 İstinat Duvarı Yapılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği.....	91
Şekil 5.25 İstinat Duvarı Donatı Detayı.....	92
Şekil 5.26 Teğet Kazık Örneği	93
Şekil 5.27 Teğet Kazık Yapılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası ...	93
Şekil 5.28 Teğet Kazık Yapılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği	94
Şekil 5.29 Teğet Kazığının Konumunun Deformasyona Etkisi.....	94
Şekil 5.30 Teğet Kazığının Konumunun Güvenlik Faktörüne Etkisi	95

1. GİRİŞ

Heyelan afeti ülkemizde ve dünyada insan yaşamı üzerine çeşitli şekilde etki etmektedir. Ülkemizin Doğu Anadolu ve Karadeniz bölgesinin dağlık yapısından dolayı bu heyelan riski daha da artmaktadır. İnceleme bölgemiz olan Hakkâri bölgesinin ise çoğunluğu dağlıktır. Yerleşim alanları yamaçlara yapılmıştır. Heyelan riski ise azımsanamayacak derecededir.

Heyelanların, birçok inşaat faaliyeti sebebi ile artışta geçtiği belirlenmiştir. Yapılan temel inşası ile şevlerin topuk bölgelerindeki kazılardan dolayı stabilite kaybı yaşanmaktadır. Yol çalışmalarında ise hesap eksikliklerinden dolayı şev göçükleri sıkça meydana gelmektedir.

1.1. Genel

Hakkâri, Türkiye'nin güney doğusunda bulunan 286.470 nüfusa sahip bir şehirdir. İl merkezinin nüfusu, 59.465'i şehir merkezinde 19.051'i kırsalda olmak üzere toplamda 78.516'dır. Bölgede 30°'nin üzerinde bir topografik eğim vardır. Bölgenin ortalama yükseltisi 1650 m olup %87,6'sı dağlık, %10,3'ü platoluk, %2,1'i ovalıktır. Büyük bir kısmı dağlık olan bölgede heyelan riski ve çığ riski azımsanamayacak bir orandadır. Bölgede heyelan riskinin yüksek olması, yerleşim yerleri ve altyapı tesislerini risk altında bırakarak önemli bir tehdit oluşturmaktadır.

Mühendislik açısından zayıf zeminler üzerine yapılan yerleşim yerleri stabilite açısından önemli sorunlar teşkil etmektedir. Özellikle eğimli, dağlık arazilerin bulunduğu bölgelerde şev yenilmeleri çok sık rastlanan sorunların başında gelmektedir. Bu sorunlara doğru mühendislik çalışmaları ile yaklaşılmadığında can kaybı başta olmak üzere ekonomik açıdan da önemli kayıplara sebebiyet vermektedir. Ülkemizde yakın tarihte iliç ilçesinde oluşan toprak kayması, şev duraylılığının önemini ve iyi mühendislik hizmeti alınması gerektiğini bir kez daha gözler önüne sermiştir. Hakkâri bölgesinde de sık sık heyelan görülmekte ve riskin azımsanamayacak bir seviyede olduğunu gözler önüne sermektedir. 29.12.2023 tarihinde Yüksekova Hakkâri karayolunda, 18.01.2024 tarihinde ise Hakkâri-Çukurca karayolunda heyelan meydana gelmiştir. Bu afet sonucunda yaralanan vatandaşlar olmuştur. Ayrıca karayolu uzun süre

trafiğe kapatılmıştır. Risk oranının bu kadar yüksek olduğu bir bölgede şev analizi önemli bir yer teşkil etmektedir.

Şev stabilitesine etki eden faktörleri mühendislik açısından anlamak, inşa edilen tüm yapıların güvenilirliği açısından büyük önem arz etmektedir. Yapılar inşa edilemeden önce zemin yapısının iyi analiz edilmesi ve yapı zemin etkileşiminin iyi gözlemlenmesi gerekmektedir. Zeminde zaman içerisinde meydana gelecek değişimlerin önceden belirlenip yaklaşımların bu yönde yapılması gerekmektedir. Şev stabilite kaybına neden olabilecek tüm senaryolar oluşturulup hesaplamaların bu yönde yapılması hayati önem arz etmektedir. Şev stabilite analizlerinden elde edilen veriler ve bu konuda önlem alınması yaklaşımları ile yapılan yapılar, statik aşamada önemli bir etken olmaktadır.

İnşaat projelerine başlamadan önce detaylı bir jeolojik araştırma yapılır. Bu araştırma geoteknik temeline oturtulup risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Proje aşamasında öncelikli aşama olan geoteknik raporlama doğru yapılmadığı takdirde, yapılan yapılarda öngörülemez statik sorunlar meydana gelmektedir. İlk aşamanın yanlış yapılması, diğer bütün safhaları etkilemekte ve olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Şevler, doğal ve yapay olmak üzere 2 temel sınıflandırmaya tabi tutulur. Doğal şevler jeolojik yapı dolayısı ile zaman içerisinde oluşmuştur. Yapay şevler ise, karayolları, baraj, bent, kanal v.s oluşturmak için insan eliyle oluşturulur. Yapay dolgu şevlerinde; Doğada var olan yarmalarda toprağın kontrollü, üniform ve istenildiği zaman şekillendirilebilmesi nedeniyle gerekli kabuller daha az olmakla birlikte; homojen yapının olmayışı, süreksizlikler vb. nedenlerden dolayı gerekli kabuller daha yüksek olup, güvenlik faktörü daha büyük seçilmiştir (Ulusay ve Sönmez, 2007).

Geoteknik mühendisleri açısından şev stabilitesi değerlendirmesinde, drenaj durumuna, yer altı su seviyesine zeminin kayma mukavemetine ve parametrelerine dikkat edilmektedir. Kısa ve uzun dönem şev stabilitesi analizlerinde drenaj durumu büyük önem arz etmektedir. Kısa dönem analizinde zemin yapısının drenajsız davrandığı varsayılırken uzun dönem analizlerde zemin yapısının drenajlı davrandığı varsayılır. Bunun haricinde yüzey suları, şev topuğunu aşındırmakla birlikte yüzeydeki malzemeyi de sürükleyebilmektedir. Yüzey sularının akışı

sonucu ta bölgesi ve topuk bölgesini aşındırmaktadır. Bu da yüzeyde önemli bir basınç oluşturmakta ve topuk bölgesi aşınması sonucu duraylılık kaybı yaşanmaktadır. şev stabilitesi hesaplarında genel olarak kayma gerilmesine maruz kalan yüzeyler belirlenmektedir. Kayma gerilmesi ve kayma mukavemeti belirlenir. Belirlenen bu parametreler ile güvenlik katsayısı belirlenir. Güvenlik katsayısının istenilen bir düzeyde olması istenir.

şev duraylılığının bozulmasının birçok nedeni mevcuttur. Kaymaya zorlayan kuvvetlerin artması, kaymaya karşı dirençlerin azalması ile stabilite bozulmakta ve şev yenilmeleri olmaktadır. Doğal nedenlerin yanında yapay nedenlerde mevcuttur. Doğal nedenlerin başında yağışlar ve depremler gelmektedir. Yapay nedenlerin başında ise insan eli ile yapılan bilinçsiz kazılar, aşırı yüklemeler, titreşimler gibi nedenler gelmektedir.

şev stabilitesinin sağlanmasında, duraylılığa karşı olan faktörlerin ortadan kaldırılması öncelikli çözümdür. Bu, şev topuğunu desteklemekle, drenaj uygulamalarıyla, palyeli kazılarla sağlanabilir. Bunun dışında stabilite sağlanması açısından istinat duvarı, kazık, jetgroud, DSM, ankrajlı palplanş, dayanma yapıları gibi inşaalışmaları da yapılabilir.

Tez konumuz olan şev stabilitesi, şevli bölgelerin duraylılığının, kayma veya çökme olmadan yerinde kalmasının yeteneğidir. Hakkâri merkez bölgesinin şev stabilitesi açısından öneminin birçok sebebi vardır. Bunların başında yerleşim yerlerinin güvenilirliği, altyapının korunması, ekonomik kayıplar ve çevresel etkiler gelmektedir.

- Bölgenin büyük bir kısmının dağlık olması nedeni ile yerleşim yerleri çoğunlukla dağ yamaçlarına kurulmuştur. şevin duraylılığını kaybetmesi sonucu yerleşim yerlerine büyük zararlar vermekle beraber can kayıplarına da sebebiyet verebilir.
- Bölgenin altyapı tesislerinin büyük çoğunluğu yamaçlara kurulmuştur. Heyelan riski yüksek olduğundan bu altyapı tesisleri zarar görebilir ve ulaşım açısından kesintiler meydana gelebilir.
- Bölgede meydana gelebilecek heyelanlar, tarım arazileri başta olmak üzere birçok doğal kaynağa zarar verebilir.

- Heyelanlar bilindiği üzere zemin kütlesinin birçok unsur sebebi ile dışa doğru hareketini ifade etmektedir. Bu hareket sonucunda su kirliliği, erozyon ve habitat tahribatına neden olabilmektedir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada Hakkâri Üniversitesi Zeynel Bey yerleşkesinde seçilen bir bölgenin şev analizi yapılmıştır. Bölgede önceden alınmış sondaj verileri ve yapılan deney verileri Plaxis 2D yazılımına işlenmiş ve çıkan sonuçlar mühendislik açısından yorumlanmıştır. Bölgede önceden de raporlanmış olan toprak kayması mevcuttur. Bu vakaya ait sorunların nedenleri araştırılıp, kayma mekanizması ile şeve ait özellikler belirlenmiştir. Mevcut verilerle arazi bilgisayar ortamına aktarılıp analizi yapılmıştır. Bölgenin stabilitesinin sağlanması için öneriler sunulmuştur. Yapılan analiz sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Plaxis 2D yazılımı ile yapılmıştır.

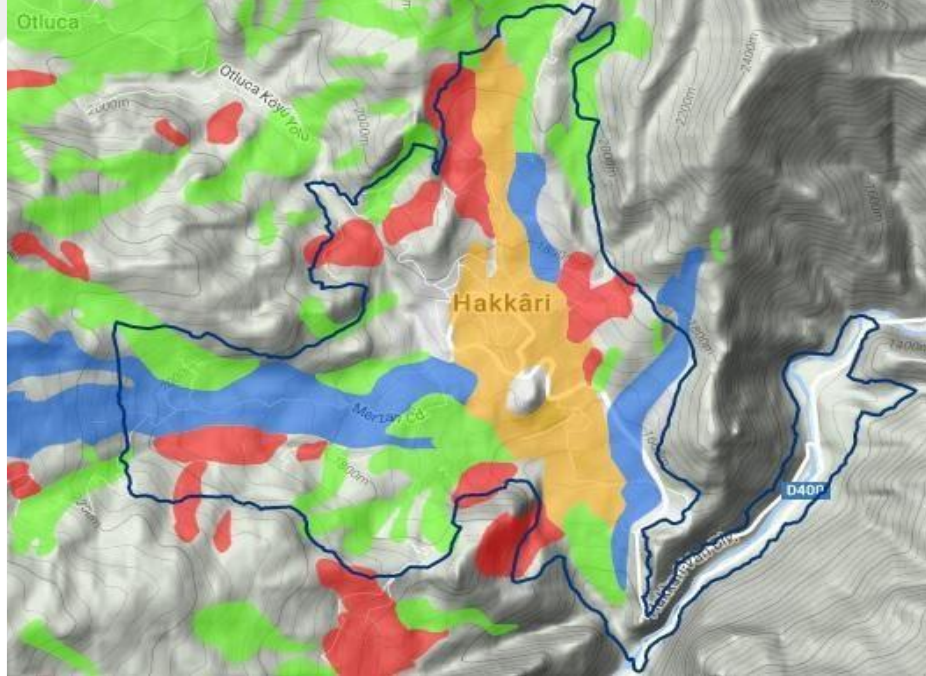
Çalışma 5 temel başlık altında ele alınmıştır. İlk bölümde amaç belirlenmiştir. 2. bölümde şev yenilmeleri ve önceki çalışmalar ele alınmıştır. 3. bölümde şev duraylılığı açısından önemli yaklaşımlar, arazi ve laboratuvar deneyleri üzerine durulmuştur. Bunların çözüm yaklaşımlarının yanı sıra şev yenilmelerine karşı alınacak önlemler sunulmuştur. Şev stabilitesi konusunda detaylı bilgiler yer verilmiştir. 4. bölümde Plaxis 2D programının arayüzü tanıtılmış olup zemin parametreleri hakkında da bilgilere yer verilmiştir. 5. bölümde arazimiz bilgisayar ortamında simüle edilmiştir ve ele alınan bölgenin stabilitesi incelenmiştir. Yapılan analizlerin sonucu verilmiş olup önleyici uygulamalar sunulmuştur. 6. bölüm sonuç kısmı olup yapılan çalışma irdelenmiştir ve bu çalışmanın sonucu ve öneriler sunulmuştur.

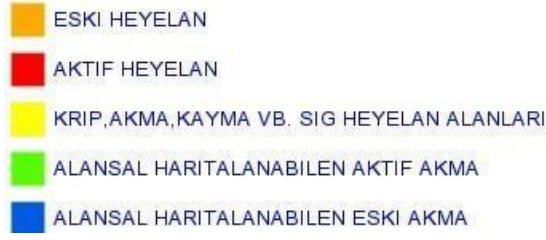
2. ŞEV YENİLME ÖRNEKLERİ ve ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Şev Yenilme Örnekleri

Hakkari bölgesinde AFAD Başkanlığınca yürütülen ARAS sisteminde kayıtlı altına alınmış 16 heyelan mevcuttur. AFAD Başkanlığı tarafından hazırlanan 2019 yılı doğa olayları istatistiklerine göre, Hakkari'de 1950-2019 yılları arasındaki 70 yıllık döneme ait verilere göre 97 heyelan ve kaya düşmesi yaşandığı belirtildi (İRAP, 2021).

Heyelanların dik yamaçlı dağlık alanlarda yoğunlaştığı belirlenmiştir. Şehir merkezinin neredeyse tamamının aktif ve uzun süredir devam eden heyelan alanı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.1). Bölgedeki en etkili heyelanlar küçük, sık düzlemsel kırılmalar (katmanlar) şeklinde meydana gelmektedir. Özellikle bindirme zonu bölgesinde yer alan bölgelerde yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Heyelanların, iklim faktörlerinin etkili olduğu durumlarda, don sonrası kar ve yüzey akışı etkisiyle suya doymun hale gelen killi-siltli zeminlerde aşağı doğru kaymalar şeklinde meydana geldiği tespit edilmiştir (İRAP, 2021).





Şekil 2.1: Hakkari İl Merkezine Ait Heyelan Haritası (MTA, 2012)

Şev hareketlerinin geoteknikte önemli bir yeri vardır ve bu durum geçmişten günümüze karşılaşılan hasarlara bakıldığında kolaylıkla anlaşılmaktadır. Şev hareketlerinden kaynaklanan hasarlara bakıldığında Japonya, yıllık 4 milyar dolarlık zararlar ilk sırada yer alıyor. Japonya'yı, yılda 1 ila 2 milyar dolar arasında tahmin edilen hasarla ABD, İtalya ve Hindistan takip etmektedir (Schuster, 1996).

Kaydedilen olaylardan biri de 1786 yılında Çin'in Sichuan kentinde meydana gelen heyelan olmuştur. Kayıtlara göre bu heyelanda kayan malzemeler nehri tıkayarak bir baraj oluşturmuş ve biriken bu su kısa sürede baraj üzerinden geçerek barajın oluşmasına neden olmuştur. 100.000 kişinin boğularak ölmesi ile sonuçlanmıştır (Coduto, 2006).

Büyük depremlerde şev stabilitesi sorunları da ortaya çıkabilir. Depremlerden kaynaklanan heyelanlar nispeten küçük olmasına rağmen büyük heyelanlar meydana gelebilir. Bu heyelanların bir kısmı yerleşim yerlerinin yer altında kalmasına neden olmuştur (Kramer, 2003). 1970 yılında Peru'nun Yungay şehrinde meydana gelen depremde, 8.000 kilometrekarelik alanı tamamen kaplayan yaklaşık 50 milyon metreküplük malzeme çığ gibi başlamıştır. $8,2 \times 10^6$ kg ağırlığındaki kaya parçasını yutmuştur ve 270 km/saat hıza ulaşmıştır (Şekil 2.3.). Birçok deprem sırasında meydana gelen heyelanlar, depremin doğrudan verdiği zarardan daha büyüktür. 1964 Alaska depreminde meydana gelen hasarın %56'sının depremin tetiklediği heyelanlardan kaynaklandığı bildirilmiştir. Kobayashi (1981), 1964-1980 yılları arasında Japonya'da kaydedilen büyük depremlerdeki ($M > 6.9$) kayıpların çoğunun heyelanlardan dolayı olduğunu raporlamıştır (Kramer, 2003).



(a)



(b)

Şekil 2.2: (a) Perunun Yungay Kasabası'nda Meydana Gelen Depreminden Önceki (a) ve Sonraki (b) Hali. Aynı Palmiye Ağaçları İki Resimlerde Görülmektedir (Kramer, 2003).

Doğal afetler açısından küresel risk raporlarında en riskli ülkeler arasında 12. sırada yer alan ülkemizde 2016 yılında hasar ve can kaybına neden olan afet türlerine bakılınca; En fazla can ve mal kaybına neden olan olay %25 ile sel, %22 ile şiddetli fırtına ve %20 ile heyelanlardır (Ersoy ve diğ.. 2017). Ülkemizdeki

heyelanların çoğunluğu Doğu Karadeniz bölgesinde görülmektedir. Bunun başlıca sebepleri, eğimli arazilerin fazla olması ve yağışların etkili olmasıdır.

Ülkemizde ise şev yenilmeleri sıklıkla yaşanmakta ve zararlarının GSMH'nin %1 ile %3'ü arasında değişmektedir.

Türkiye Ölümcül Heyelan Veri Tabanı'na (FATALDOT) göre Türkiye'de her yıl ortalama 4 ölümcül heyelan meydana gelmektedir, ortalama 15 kişi ise hayatını kaybetmektedir. Türkiye'de doğal afet kayıpları arasında en fazla ölüme neden olan afet türü olarak heyelanların depremlerden sonra ikinci sırada yer aldığı belirlenmiştir. Son 20 yılda ortalama ölümcül heyelan sayısı 12,2'ye, ortalama ölümlü sayısı ise 23,6'ya çıkmıştır. Araştırmaya göre Türkiye'nin 81 ilin 67'sinde ölümlü heyelan meydana gelmiştir. Ölümlü heyelanda olay ve ölüm sıklığının en fazla olduğu iller arasında 38 olay ve 336 ölümlü Trabzon, ve 58 olay ve 85 ölümlü İstanbul ve 30 olay ve 191 ölümlü Rize olduğu belirlenmiştir. Türkiye'nin en ölümcül heyelanı 1929 yılında Trabzon-Rize sınırında meydana gelmiştir. Toplam 19 köyün etkilendiği heyelanda, kayıtlara göre 148 kişi hayatını kaybetmiştir. 1995 yılında Isparta'nın Şenurkent İlçesinde meydana gelen moloz akması olayında 74 kişi hayatını kaybetmiştir (Başer,2021).

Ayrıca ülkemizde meydana gelen son heyelanda (Şekil 2.2.) 9 kişi hayatını kaybetmiştir. Erzincan'ın İliç ilçesinde meydana gelen şev yenilmesinde mühendisliğin önemi bir kez daha gözler önüne serilmiştir. Meydana gelen vakada yapay olarak oluşturulan şev, stabilite kaybına neden olmuştur ve 100 bin ton atık toprak, 700- 800 m hareket ettiği belirtilmiştir. Bilirkişi raporu şev açılarına dikkat edilmediği yönünde. Ayrıca yığın liçinde olduğu belirlenen çatlaklar için önlem alınmayıp ciddi riske rağmen imalata devam edilmiştir. Bu vaka ile şev stabilite analizinin önemi bir kez daha anlaşılmıştır.



Şekil 2.3: Erzincan’ın İliç İlçesinde 13 Şubat 2024 Tarihinde Meydana Gelen Altın Madeninin Kaza Alanı Görüntüsü

2.2. Şev Duraylılığı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Şev kaybının meydana gelmesi önceki bölümde de belirtildiği üzere insan hayatı üzerine büyük olumsuz etkileri olmuştur. Bu sorunun giderilmesi için de 20. Yy da çalışmalar artmış ve çözüm yolları aranmıştır. Literatürde konu üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar öncelikli olarak deneysel çalışmalarla başlanmıştır ve bu çalışmalar sayısal ortama aktarılmıştır. 1937 yılında Taylor, yayınladığı “Stability of Earth Slopes” kitabı ile şev stabilitesi tanımını yapmıştır ve çalışmalar başlamıştır. Terzaghi ise 1950 yılında, “Mechanism of Landslides” adlı çalışmasıyla ile şev stabilitesindeki problemler üzerine çalışma alanında öncü olmuştur.

Limit dengeyi temel alan şev analiz yöntemleri Çizelge 2.1. de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Şev Analizi Yöntemlerinde Limit Denge (Budhu, 2007)

Metot Denge	Kayma Tipi	Denge Şartı	Çözüm Aracı
Fellenius (1927)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Bishop (1955)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Modifiye Bishop (1955)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Morgenstern ve Price (1965)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Spencer (1967)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Bell (1966)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Janbu (1973)	Non-lineer	Düşey	Geleneksel
Sarma (1976)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar

Yakın tarihte ise ülkemizde de birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar, geleneksel metodlar dışında bilgisayar destekli olarak da yapılmıştır.

2009 yılında Olgun ile Acar, deprem esnasında şev geometrisi ile zemin özelliklerinin stabilite etkisini belirlemek amacıyla 2 farklı çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada özellikle kohezyonlu zeminlerde boşluk suyu basıncının olumsuz sonuçları ile karşılaşmışlardır. Bu olumsuz sonuçlar şev güvenlik faktörünü ciddi oranda düşürdüğü gözlemlenmiştir. Şev stabilitesini deprem etkisi altında değerlendirirken şevin fay hattına olan uzaklığı, depremin özellikleri, zeminin özellikleri ve şev geometrisinin bütün olarak incelenmesinin gerektiğini vurgulanmıştır.

2009 yılında Kahyaoğlu, sonlu elemanlar metodunu kullanarak, şevlerin kazıklı sistemler kullanılarak güçlendirilmesi üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır.

Fırat ve Canik, 2014 yılında şev stabilitesine deprem kuvvetlerinin etkisini incelemişlerdir. Ayrıca şev hareketlerine sebep olan etkiler üzerine de çalışma yürütmüşlerdir. Yol şevinde meydana gelen bir kayma üzerine yürüttükleri çalışmada, kazıkların nicel özelliklerini değiştirerek analizlerde bulunmuşlardır.

Taşkıran ve arkadaşları, 2015 yılında şev stabilite analizlerinde sonlu elemanlar yönteminin uygunluğunu Plaxis 2D ve 3D programlarını kullanarak araştırmışlardır. Bu uygunluğun kontrolü için ise limit denge analizi kullanmışlardır. İki farklı yöntemde de bulunan güvenlik faktörünün uygunluğunu belirtmişlerdir.

Bol ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada, yağış etkisi ile stabilitesi bozulmuş bir şevi inceleyip stabilitesinin sağlanması için çözüm yolları oluşturmuşlardır.

Pınarlık ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada, şev stabilitesinin uzun dönem sağlanması açısından geotekstil kullanmışlardır. Limit denge yöntemi ile de farklı analizler yapıp sonuçları karşılaştırmışlardır.

2018 yılında Arama, şeve komşu olan dolgu yapılarının temel zemini göçme davranışlarını birçok değişkenler kullanarak incelemiştir.

Mısır, 2018 yılında yaptığı çalışmada, inşaat faaliyetlerini dikkate alarak eğimli bir arazide kayma yüzeyleri ile güvenlik sayılarını farklı yaklaşımlar kullanarak incelemiştir.

Genel olarak Türkiye’de yapılan çalışmaların büyük bir kısmı sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile yapılmıştır. Bu yöntemleri bilgisayar destekli yazılımlarla kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar, farklı metotlarla ulaşılan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmaların büyük bir kısmı vaka analizi üzerine yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

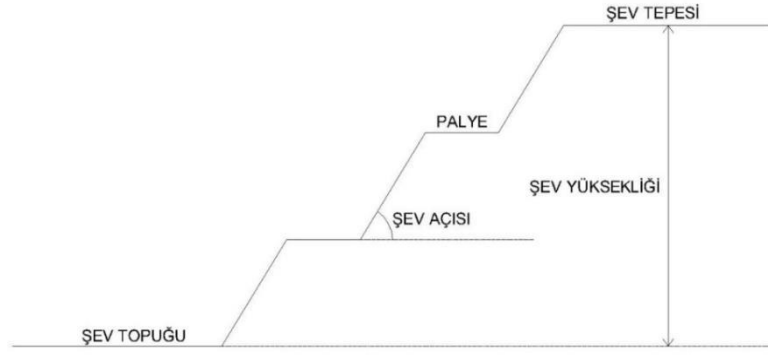
Bu bölümde şev ile ilgili kavramlar açıklanmıştır ve kayma tiplerine yer verilmiştir. Şev stabilitesinin belirlenmesi açısından kavramların tam anlamı ile bilinmesi gerekmektedir. Duraylılığı anlamak açısından da şev kayma tiplerinin bilinmesi gerekmektedir.

3.1. Şev Terminolojisi

Zeminlerin veya kayaların meydana getirmiş olduğu yatayla belirli bir açı yapan yeryüzü şekilleri geoteknik mühendisliğinde şev olarak isimlendirilir. Bu yüzeyler doğal olarak oluşabilirken beşeri olarak da meydana getirilebilir. Doğal haliyle bulunan şev yapılarına yamaç veya doğal şev ismi verilir. Yapay olarak oluşturulanlar ise yarma veya dolgu şevi olarak nitelendirilmektedir. Ulaşım hatları ve kanallar için yapılan yarmalar ve dolgular, toprak barajların eğimli kısımları yapay şevlere örnek verilebilir (Huvaj, 2017).

Kısacası “Şev”, zeminin yatayla yaptığı açı olarak adlandırılır. Eğimli yüzey yamaç anlamına da gelen şev, doğal ve yapay şekilde oluşabilir. Doğal olarak oluşan şevler “yamaç” olarak da adlandırılabilir ve insan eliyle oluşmamıştır. Yapay şevler ise insan eliyle oluşturulup “yarma ve dolgu” olarak da adlandırılabilir.

Şev geometrisine baktığımızda farklı parçalardan oluştuğunu görmekteyiz. Eğik yüzeylerin yatay eksenle oluşturduğu açıya şev açısı denmektedir. Bu açı, eğim yüzeylerinin şekline bağlı olarak bir veya daha fazla olabilir. Eğim açısının teğet değerine şev oranı denmektedir. Bahsi geçen oran eğimin dikliği ile ifade edilebilir. Şev yüzeyinin alt kısmındaki taban alanı şev topuğu olarak tanımlanır. Yamacın tepesi, eğimli yüzeyin yamacın tepesindeki düz yüzeyle birleşim noktası olarak tanımlanır. Topuk bölgesinden eğimin üst alanına kadar olan dikey mesafeye şev yüksekliği denmektedir. Yamaçların güvenliğini sağlamak amacıyla yamaç üzerinde insan eliyle veya doğal olarak oluşan yatay yüzeylere palye adı verilmektedir (Sönmez, 2020).

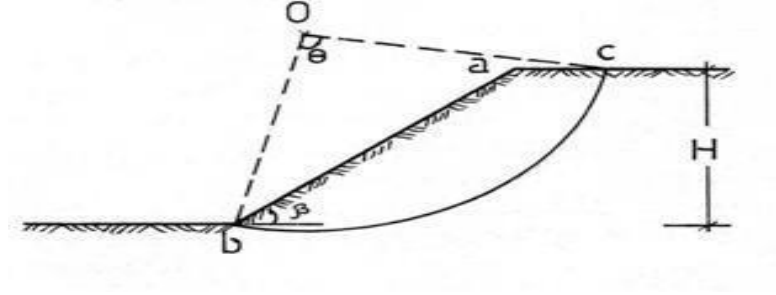


Şekil 3.1 Şev Geometrisinin Genel Görünümü

Şev stabilitesi dediğimiz kavram ise şevin duraylılığıdır. Yani herhangi bir dış yük altında göçmeye ve deformasyona karşı göstermiş olduğu dirençtir. Dış yüklemelere birçok örnek verilebilir. Bunlar, yağış etkisi, depremin oluşturduğu sismik etki, şev yakınlarında meydana gelen titreşimler, bina yükleri, yeraltı suyunun oluşturduğu boşluk etkisi gibi örneklerdir. Şevlerin belirgin biçimde harekete geçmesi neticesinde kayma hareketleri meydana gelmektedir. Bu durumda şevin stabilitesini yitirip duraysız/labıl duruma geldiği söylenebilir (Duncan, 2014). Yeraltı su seviyesindeki değişimler, sismik etkilerin artması, şev etrafındaki yüklerin ve titreşimlerin artışı da şev yenilmelerine sebebiyet verebilir. Ayrıca şev göçmesi kavramı, şevin stabilitesinin bozulması sonucu şevin arkasındaki veya altındaki toprak kütesinin yer değiştirmesine denir.

Şevler kayma şekillerine göre sonsuz şevler ve sonlu şevler olarak iki grupta incelenmektedir. Sonsuz şevlerde kaymanın gerçekleştiği kırılma yüzeyinin sonsuz uzunlukta eğimli bir yüzeyi temsil ettiği düşünülmektedir. Sonlu şevlerde ise kaymanın gerçekleştiği kırılma yüzeyi belirli bir kesim olarak tanımlanabilir. Şev yüzeyinin eğimi şevin yüksekliğine bağlıdır (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005).

Şev stabilite analizinde kullanılacak diğer parametreler Şekil 3.2.' de ayrıca gösterilmektedir (Kara, 1980).

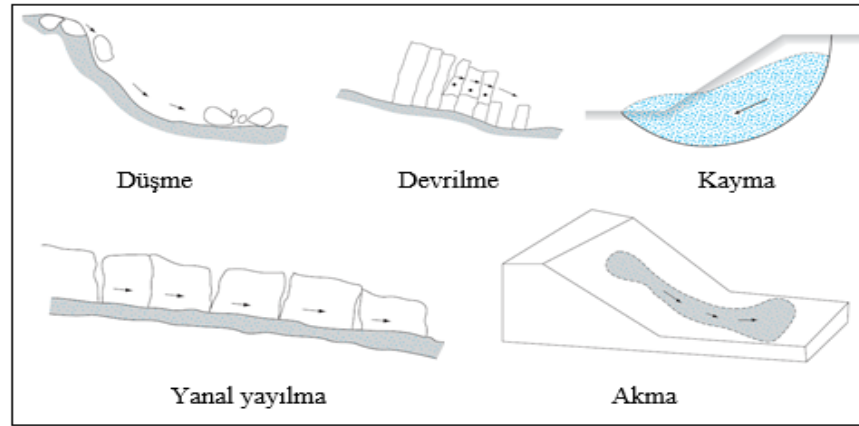


Şekil 3.2: Şeve Ait Parametreler (Kara 1980)

H	: Şev yüksekliği
B	: Şev açısı, Eğim açısı
θ	: Merkez açısı
[ab]	: Şev yüzeyi
(bc)	: Kayma yüzeyi, Kayma dairesi
B	: Şev topuğu
Şev Açısı	: Bir şev yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır.
Kritik Şev Yüksekliği	: Bir şevin denge halinde ki maksimum yüksekliğidir.
Kritik Şev Açısı	: Bir şevin duraylılığı bozulmadan verilebilecek maksimum dikliktir.

3.2. Şev Hareket Tipleri

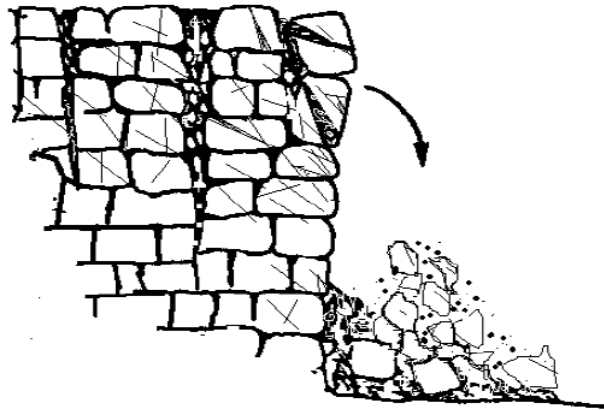
Kitle hareketleri; Jeolojik oluşuma, toprak veya kayanın yapısal özelliklerine, faylara, tabakalaşmaya, hava koşullarına ve yeraltı suyuna bağlı olarak farklı geometrik şekillerde ve farklı hızlarda yayılabilir. Şevlerde oluşabilecek hareketler beş ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; Devrilme, düşme-yuvarlanma, yanal yayılma, kayma ve akma şeklinde gerçekleşmektedir. (Varnes, 1978).



Şekil 3.3 Şev Göçme Tipleri (Das 2010)

3.2.1. Düşme-Yuvarlanma

Eğimden dolayı zemin kütesinin ya da eklemlili kaya parçalarının şevden koparak serbest şekilde düşmesi ile açığa çıkan hareket tipidir. Bu hareket türünün olmasındaki başlıca sebepler ani yağışlar ve dinamik faktörlerdir.

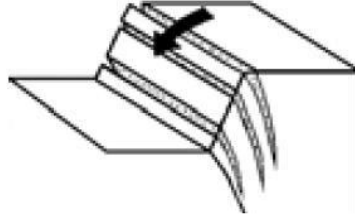


Şekil 3.4 Düşme Hareketi (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

3.2.2. Devrilme

Kütlenin ağırlık merkezi etrafında (belli bir eksen etrafında) dönmesi ile ileriye doğru yer değiştirmesi sonucu meydana gelen harekettir.

Oluşması muhtemel şev hareketleri zayıf yüzeyler tarafından kontrol edilmektedir. Bu zayıf yüzeylere fay bağlantı düzlemleri ve kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi örnek verilebilir (Sezer, 2020).

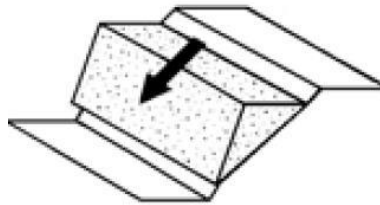


Şekil 3.5 Devrilme Hareketi (Arioğlu ve Tokgöz, 2005)

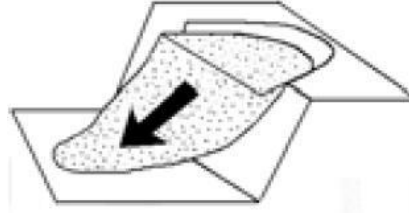
3.2.3. Kayma

Kayma, eğimi oluşturan toprak kütlelerinin belirli bir yenilme yüzeyi boyunca alçalması durumunda meydana gelmektedir. Üç şekilde olabilir: dairesel, düzlemsel ve köşe. Belirli süreksizliklerin olduğu şevler, çatlaklar ve yüzey katmanları gibi kaya kütlelerinde düzlemsel kayma gözlenmektedir. Bu durum hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde meydana gelebilir. Belirli bir yapıya sahip olmayan homojen zeminlerin oluşturduğu şevlerde, dolgu şevlerde, çatlaklı kaya kütlelerinden oluşan şevlerde dairesel kaymalar meydana gelir. Eklemlili (çatlaklı) kayalarda kesişen iki süreksizlik yüzeyi olduğunda kama tipi kaymalar görülür (Arioğlu ve Tokgöz, 2005).

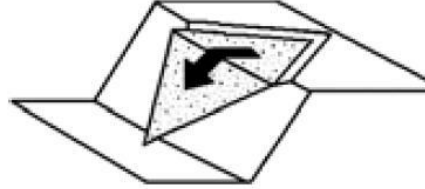
Kısacası bir kütlenin kayma yüzeyi üzerinden aşağı doğru hareketidir. Kayma hareketleri ana hatları ile 3 temel başlık altında toplanmıştır. Bu hareket tipleri temel alınınca kayma hareketini modlara ayırmak mümkündür. Örneğin düzlemsel kayma hareketi ile ötelemeli kayma hareketinin birlikte gerçekleştiği şev yenilmelerine karmaşık ve birleşik kaymalar denilmektedir. Dairesel (Dönel) kayma hareketi içerisinde ise kaşık şeklinde kayma ve silindirik yüzey üzerinde dönel kayma hareketleri görülmektedir.



(a) Düzlemsel Kayma Hareketi (Arioğlu ve Tokgöz, 2005)



(b) Dairesel Kayma Hareketi (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

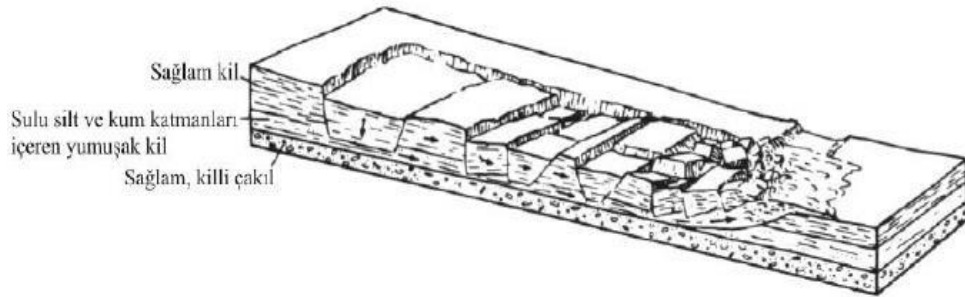


(c) Kama Tipi Kayma Hareketi (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

Şekil 3.6 Kayma Hareketleri a) Düzlemsel Kayma b) Dairesel Kayma c) Kama Tipi Kayma (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

3.2.4. Yanal Yayılma

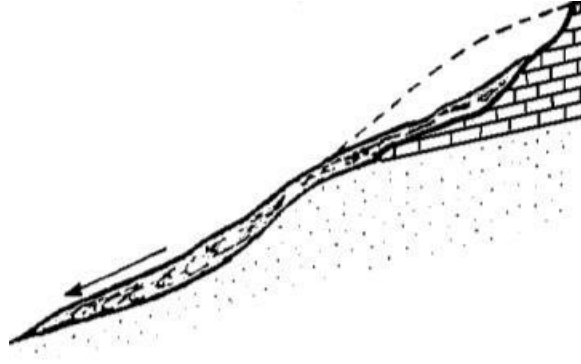
Yanal yayılma hareketi kumlu ve siltli zeminlerde deprem etkisi altında sıvılaşmaya bağlı olarak yatay yöndeki yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Suyu doymuş zeminin suyun zayıflatıcı etkisi nedeni ile geniş bloklara bölünmesi sonucu bu büyük blokların topografik eğimine de bağlı olarak harekete geçmesi şeklinde oluşur.



Şekil 3.7 Yanal Yayılma Hareketi (Varnes, 1978)

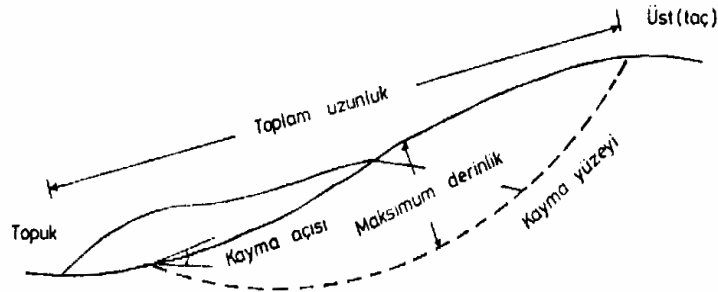
3.2.5. Akma

Bu hareket türü özellikle siltli zeminlerin donma ve çözülme etkisi ile doygunluğunun artıp viskoz bir akışkan gibi hareket etmesidir. Zemin kütlesi viskoz bir sıvı gibi aşağı doğru yer değiştirmektedir.



Şekil 3.8 Akma Hareketi (Arıoğlu ve Tokgöz, 2005)

Bunlar dışında kayma hareketlerinin farklı sınıflandırıldığı da görülmüştür. Skempton ve Hutchinson 1959 yılında yaptıkları çalışmalarda şev hareketleri için, şevin kayma yüzeyi derinliği ile boy oranı değerlerine göre ayrı bir sınıflandırma önermişlerdir (Çizelge 3.1.). Varnes tarafından 1978 yılında ortaya koyulan TS(1951)'e de konu olan şev hareketlerine ait sınıflandırma aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.2.).



Şekil 3.9 Derinlik/Uzunluk Oranına Göre Sınıflandırma (Skempton, 1953).

Çizelge 3.1 Şev Hareketinin Sınıflandırılması (Skempton-Hutchinson) (Öz, 2007)

Hareket Tipi	D/L (%)
Kayma	5.0-10
Akma	0.5-3.0
Dönel Göçme	15-30

Çizelge 3.2 Şev Hareket Tipleri (Varnes,1978)

Hareket Türü			Şev Malzemesi		
			Kayaç	Zemin	
				Kaba Daneli	İnce Daneli
Düşme			Kaya düşmesi	Moloz düşmesi	Toprak düşmesi
Devrilme			Kaya devrilmesi	Moloz devrilmesi	Toprak devrilmesi
Kayma	Dönel		Kaya yığılması	Moloz yığılması	Toprak yığılması
	Öteleme	Birkaç birim	Kaya bloğu kayması	Moloz bloğu kayması	Toprak bloğu kayması
		Çok birim	Kaya kayması	Moloz kayması	Toprak kayması
Yanal yayılma			Kaya yayılması	Moloz yayılması	Toprak yayılması
Akma			Kaya akması	Moloz akması	Toprak akması
Karmaşık			İki veya daha fazla türlü hareket birleşimi		

3.3. Şev Yenilmelerine Neden Olan Etkenler

Şev yenilmesine sebep olan faktörleri anlamak birçok açıdan önemlidir. Bunlardan ilki yapılacak bir inşaatın şev açısından riskini irdelemek, şevin uzun süreli maruz kalacağı yüklemeler sonucu deformasyonuna bağlı olarak inşaat açısından riskinin tahmin edilmesi açısından önemlidir. İkinci önemli faktör ise duraylılığını kaybetmiş şevlerin yenilenmesi ve onarılması, yenilmenin tekrar meydana gelmemesi için yenilmeye sebep olan geoteknik bileşenlerinin anlaşılması önemlidir.

Şev duraylılığı açısından temel parametre kesme dayanımıdır. Duraylılığın sağlanması için zeminin kesme dayanımının kesme gerilmesinden büyük olması gerekmektedir. Bu şarta göre şev yenilmesinin en önemli nedenlerinden biri

zeminin kesme dayanımının denge açısından gerekli olan kesme dayanımından küçük olmasıdır. Bu durumun ortaya çıkmasının iki nedeni vardır:

- Zemin kesme dayanımında azalım yoluyla
- Denge için gerekli kesme gerilmesinde artış yoluyla (J. M. Duncan, Stephen G. Wright. 2005).

Zeminin kayma mukavemetinin kaybı, jeolojik etmenlerden dolayı olabilmektedir.

Artan boşluk suyu basıncı, sağanak yağış dönemlerinde anormal sızma koşulları ile efektif gerilmeyi azaltıp sürtünmeyi azaltmaktadır. Bunun sonucunda zeminin kayma mukavemetine negatif yönde etki etmektedir.

Plastisitesi yüksek ve aşırı konsolide killi suyla temasa girdikleri zaman şişerler. Bu şişme sonucu zeminde ciddi dayanım kayıpları meydana gelmektedir.

Su gözeneklerden sızdıkça boşluk suyu basıncının kimyasal bileşiminde yıkama adı verilen değişiklikleri içerir. Tuzun deniz killlerinden gözenek suyuyla süzülmesi, akışkan kil oluşumuna katkıda bulunur; Hasar gördüklerinde dirençleri neredeyse sıfırdır (J. M. Duncan, Stephen G. Wright. 2005).

Tekrarlı olarak meydana gelen yüklemeler sonucu zemin parçacıkları arasındaki bağlar kırılabilir. Bunun sonucunda boşluk basıncı artar. Tekrarlı yükler altında dayanımını kaybeden zeminler genellikle dolgu zeminler ve gevşek zeminlerdir.

Şev yenilmelerinde su dışında killi zemin davranışı da önem taşımaktadır. Su etkisi ve killi zeminlerin bulunmadığı durumlarda şev yenilmeleri seyrek olmaktadır.

Şev tepesine yüklenen yükler sonucu gerilme artışı meydana gelmektedir. Bu gerilme artışı sonucu şev dayanımını kaybedip göçebilir.

Şev tepesine yüklenen yüklemeler gibi şev topoğrafyasında yapılan kazı sonucu eğim artabilir ve duraylılık azalabilir.

Depremler zemine düşey ve yatay ivmeler uygulamaktadır. Bu ivmeler sonucu şev içerisinde gerilmeler olmaktadır. Bu gerilmeler tıpkı tekrarlı yüklemeler gibi devimsel olmaktadır ve dayanım kaybına sebep olmaktadır.

3.4.Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri

Şev stabilitesi analizleri sahada yapılan tetkikler ve alınan numunelerin deneylere tabi edilmesi sonucu çıkan parametreleri irdeleyerek yapılmaktadır. Birçok yöntemi olan şev stabilize analizinin temel noktası kritik kayma yüzeyindeki kütlenin dengesini araştırmaktır. Kayma mekanizması araştırılan şevin, gerekli parametreler araştırıldıktan sonra yenilenmesi ve yenilmesine karşı iyileştirici önlemler alınması hedeflenir.

Kayma problemlerinin çözümü, sonucun sayısal ve kesin olduğu kabul edilen deterministik yöntemlerle elde edilebildiği gibi, toprak özellikleri, jeolojik koşullar ve çevre koşulları değişken olduğu varsayılarak kayma probleminin çözümü de istatistiksel-gözlemsel ve olasılık teorisine dayalı yöntemlerle (olasılıksal) elde edilebilir (Önalp ve Arel, 2004). Çoğunlukla kullanılan yöntemler limit denge yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemidir.

Şev analizlerine ilk önce sahadan veri alınarak başlanır. Alınan bu veriler deneysel yöntemlerle işlenerek parametreler belirlenir. Belirlenen bu parametreler gerek programlar vasıtası ile gerek deneysel yöntemlerle analiz edilip şev stabilitesine ulaşılır. Stabil olmayan şevlere gerekli iyileştirme yöntemleri önerilip problemler çözülmüş olur.

3.4.1. Şevlerde Güvenlik Katsayısı

Analiz yöntemlerine geçmeden önce bilinmesi gereken parametrelerden biri de güvenlik katsayısıdır. Güvenlik katsayısı (G_s) denilen kavram kaymaya karşı koyan kuvvetlerin (τ_f), kaydırıcı kuvvetlere oranıdır (τ_d).

$$G_s = \frac{\text{Kayma Dayanımı}}{\text{Kayma Düzleminde Mobilize Dayanım}} = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (3.1)$$

Formülü ile ifade edilir.

τ_f = Zeminin kaymaya karşı gösterdiği direnç

τ_d = Potansiyel kayma yüzeyi boyunca gelişen zeminin kaymasına sebep olan direnç

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi \quad (3.2)$$

$$\tau_d = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (3.3)$$

Burada;

c' : Kohezyon,

ϕ' : İçsel sürtünme açısı,

σ' : Olası kayma yüzeyi üzerindeki normal gerilmeyi ifade eder.

Geoteknik mühendisleri tarafından güvenlik faktörü yaygın olarak 1,5 değerinde kullanılmaktadır. Bazı karayolu projelerinde belirli şartlarda güvenlik katsayısı 1,3' e çekilebilir (Coduto, 2006). Güvenlik katsayısının 1 olması şevin göçme sınırında olduğunu gösterir. İstenilen güvenlik faktörü $G_s > 1$ olmasıdır.

3.4.2. Limit Denge Analiz Yöntemleri

Bu yöntemin temel yaklaşımı kayma dayanımının kırılma yüzeyi boyunca yeterli gelmemesine dayanmaktadır. Temel mantığı, şevde kayma ihtimali olan bir kısımdan parça alınır. Bu kısım için bilinmeyen kuvvetler yaklaşımlarla belirlenir. Belirlenen tüm kuvvetler ile sistemin stabil olabilmesi için dengede tutan kuvvetler hesaplanır. Daha sonra kaydırıcı kuvvetler hesaplanır. Sistemi denge tutan kuvvetler ile sistemi kaydıran kuvvetler oranlanır ve güvenlik faktörü elde edilir.

Limit denge analizleri şev problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Limit denge analizleri oluşacak şev deformasyonları hakkında bilgi vermez. Bu analiz yönteminde kaymanın belirli bir yüzey boyunca meydana geldiği varsayılır. Sonrasında kayan kütle bütün dilimlere bölünür ve kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilmeler kesme dayanımı ile karşılaştırılır (Akçakal, 2009).

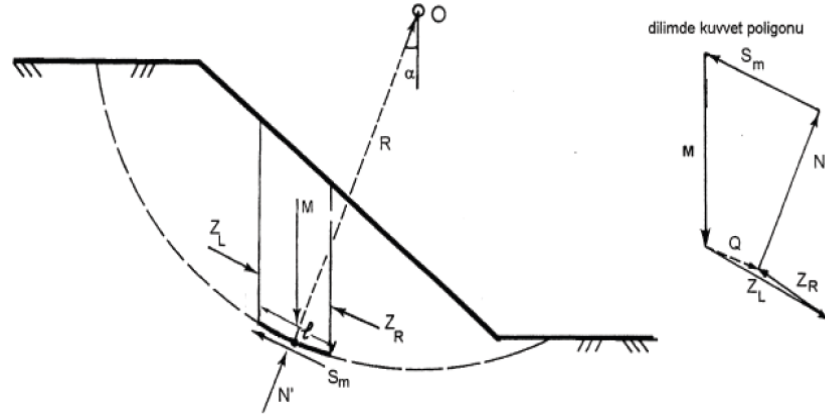
Limit denge analiz yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

- Fennelius (1936)
- Bishop (1955)
- Modifiye Bishop (1955)
- Morgenstern ve Price (1965)
- Spencer (1967)
- Janbu (1973)
- Sarma (1976)

3.4.2.1. İsveç dilim (fellenius) yöntemi

Bu yöntemde düşey doğrultuda kayma dairesi dilimlere ayrılarak incelenir. Dilimler arasında kesme kuvvetleri ve normal kuvvetler ihmal edilir. Bu yöntemde dilimler arasındaki kuvvetlerin bileşkesinin tabana dik doğrultuda olduğu kabulü yapılır. Her bir dilimin ağırlığı tabana dik bir şekilde ve tabana paralel olarak bileşenlere ayrılır. Tabana dik olarak gelen kuvvet kaymaya karşı koyan kuvvet, paralel olarak gelen kuvvet ise kaydırıcı kuvvet olarak nitelendirilir. Kayma mukavemeti hesaplarında tabana dik gelen kuvvet kullanılır. Dengelenen momentten ise güvenlik sayısı elde edilmektedir.

Bu yöntemde ortamdaki boşluk suyu basıncının arttığı ve eğimin dik olduğu durumlarda basitleştirici varsayımlardan kaynaklanan hataların arttığı söylenebilir. (Önalp ve Arel, 2004).



Şekil 3.10 İsveç Dilim Yönteminde Bir Dilime Etkiyen Kuvvetler ve Kuvvet Poligonu (Önalp ve Arel, 2004)

Fellenius yöntemine göre güvenlik sayısı denklem 3.4'e göre hesaplanır.

$$G_s = \frac{\sum (c' + (M \cos \alpha - u_w) \tan \phi')}{\sum M \sin \alpha} \quad (3.4.)$$

Bu yöntemde basitleştirici kabuller sonucu ortaya çıkan belli hatalar mevcuttur. Bu durumlar boşluk suyu basıncı arttığında şevin eğiminin düşük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemin dezavantajlarının yanında avantajları da mevcuttur. Görüldüğü üzere şev hesap esnasında dilimlere ayrılır. Bu ayrılan

dilimlerin her birine ayrı ayrı müdahale edilebilmektedir. Özellikle homojen olmayan zeminlerde bu durum avantaja çevrilebilir.

3.4.2.2. Bishop yöntemi

Fellenius yönteminden sonra ortaya atılan bir yöntemdir ve Fellenius yönteminin eksiklerini ortaya konmuştur.

1954 yılında geliştirilmiştir ve kayma yüzeyinde moment ile kuvvet denge koşullarını sağlamak amaçlanmıştır. Bu yöntemde geliştirilen çözüm uzun ve karmaşıktır. Bu yüzden sadeleştirilerek “Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi” olarak da kullanılmaktadır.

Bu yöntemde dilimler arasındaki normal kuvvetler hesaba katılırken kesme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Yöntemde, kütle vektörünün dilim tabanının tam ortasına etki ettiği kabulü yapılmaktadır.

$$G_s = \frac{[(M_a + M_b - u_w b) \tan \varphi' + c' b] / m_a}{(M_a + M_b) \sin \alpha} \quad (3.5)$$

Formülde verilen a ve b alt indisleri dilimin doğal, batık ve kuru kitlerini ifade etmektedir.

$$m_a = \left(1 + \frac{\tan \alpha + \tan \varphi}{G_s} \right) \cos \alpha \quad (3.6)$$

Formülde verilen m_a , 3.6. formüldeki G_s oranını göstermektedir.

3.4.2.3. Morgenstern – Price yöntemi

Morgenstern – price yöntemi kesitler arası kuvvetleri hem kuvvet hem de moment dengelerini karşılayarak kabul yapar.

Morgenstern ve Price yöntemi, problemin her diliminden entegre diferansiyel denklemlerin formüle edilmesiyle oluşturulur. Dolayısıyla arazinin tek sınıftan oluştuğu durumlarda dilim oldukça büyük olabiliyor. Bir problem için denge denklemlerini sağlayacak birçok $f(x)$ fonksiyonu da olabilir.

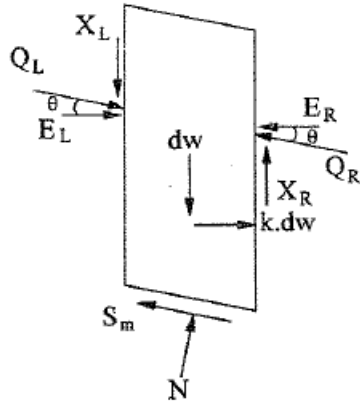
Dilimler arasındaki kuvvetlerin bindirme çizgisi ve dilimin yan yüzeyindeki ortalama kayma geriliminin tabanındaki normal gerilime oranı, $f(x)$ 'e bağlıdır ve

elde edilen çözümün bir parçasıdır. Çözümün kabul edilebilir olması için gerekenler aşağıda sıralanmıştır:

- İtme çizgisi dilimler arası kuvvetlerin toplamının dilim tabanından itibaren yüksekliğin 1/3'ünden etki ettirecek şekilde olmalıdır. Bu her dilimin yan yüzü boyunca çekme gerilmesi oluşmamasına eşdeğerdir.
- Zemin için aşılmaması gerekenler, göçme kriterlerinin öngördüğü değerlerdir.
- Her bir dilimin tabanındaki basınç gerilmeleri normal gerilmelere eşdeğer olmalıdır (Bromhead,1986).

3.4.2.4. Spencer yöntemi

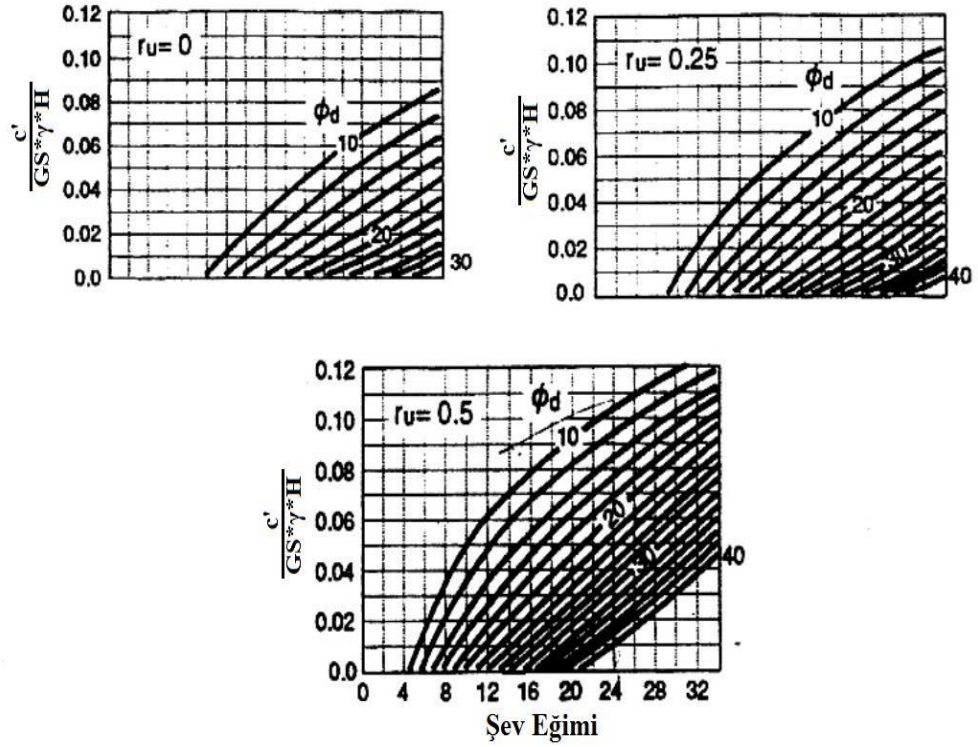
Bishop yöntemi moment dengesini temel alırken Spencer Yöntemi kuvvetler dengesini temel almıştır. Şeve etkiyen düşey ve yatay kuvvetler stabilitenin sağlanması için büyük önem arz etmektedir. Kuvvet dengesine göre yapılan hesaplamada kesme kuvvetinin ve normal kuvvetin yatayla yaptığı θ açısı bulunarak hesaplamaya devam edilir. Güvenlik katsayısı değeri çözümü θ 'ye farklı değerler verilerek hem kuvvet dengesine göre hem de moment dengesine göredir.



Şekil 3.11 Dilimler Arası Kuvvetler (Yıldırım, 2004)

Spencer Yöntemine göre güvenlik sayısının belirlenmesinde sırasıyla arazi ve laboratuvar ortamında elde edilecek zemin parametreleri olan c' , ϕ' , γ ve şev geometrisine bağlı olarak şev açısı (β) ve şev derinliği (H) değerleri belirlenmelidir. Şevdeki su akışına bağlı olarak gözenek basıncı oranının (r_u) belirlenmesi

gerekmektedir. Bu parametre Bishop yönteminde olduğu gibi $r_{u(n)} = r_u = \frac{u_n}{\gamma * z_n} = \frac{h_n * \gamma_{su}}{\gamma * z_n}$ şeklinde hesaplanır. Güvenlik sayısını tahmini olarak belirlenir. Ardından stabilite faktörü $m = \frac{c'}{GS(Tahmin) * \gamma * H}$ şeklinde hesaplanmaktadır. β ve m parametrelerine bağlı olarak r_u değeri de göz önünde bulundurularak ilgili Spencer abağından kayma dairesi içerisinde oluşan içsel sürtünme açısı (ϕ'_d) belirlenir. Sistemin tahmin edilen güvenlik sayısı ile hesaplanmaktadır. Tahmin edilen güvenlik sayısı ile bu işlemler sonucu olan güvenlik sayısı, $GS = \frac{\tan \phi'_i}{\tan \phi'_d}$ kıyaslanır. Bu güvenlik sayıları eşitleninceye dek bu işlemler tekrarlanmalıdır. Bu deneme yanılma işlemleri neticesinde şevin güvenlik sayısı belirlenir (Arioğlu ve Tokgöz, 2005).



Şekil 3.12 Spencer Yöntemi Şev Stabilesi Abakları (Spencer, 1967)

3.4.2.5. Janbu yöntemi

Dairesel ve dairesel olmayan kayma dairelerinin hesaplamasında kullanılan Janbu yöntemi, Bishop yöntemi ile benzerlikler göstermektedir.

Şevlerde yapısal süreksizliklerin var olduğu veya oldukça yumuşak kilden meydana gelmiş şev tabakalarından oluşmuş düşük kayma mukavemetine sahip şevlerde yenilme yüzeyleri düzlemsel olarak meydana gelmesi muhtemeldir. Bu tarz şevlerde Janbu yönteminden faydalanmak etkili sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu yöntem şevin tepe kısmında dairesel başlayıp ilerleyen derinliklerde düzlemsel devam eden kayma yüzeylerine sahip şevlerin analizlerinde de kullanılmaktadır (Arioğlu ve Tokgöz, 2005).

Bu yöntemde dilimler arasındaki kesme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Dilim tabanındaki normal kuvvetler F' 'ye bağlı olarak bulunmaktadır. Şeve etkileyen dış kuvvetlerden de güvenlik katsayısı belirlenmektedir.

$$F_0 = \frac{\Sigma[c'b + (M - u_w b) \tan \phi'] \sec \alpha \cdot k_a}{M \cdot \tan \alpha} \quad (3.7.)$$

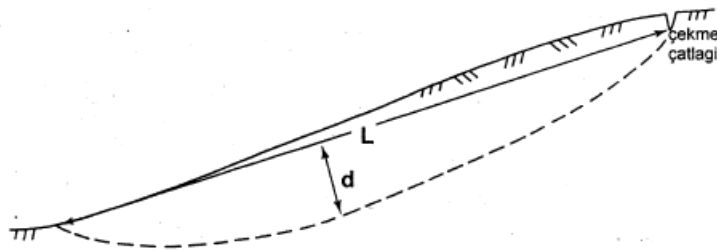
$$k_a = \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi}{G_s}} \quad (3.8.)$$

$$f_0 = 1 + b \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right) \right] \quad (3.9.)$$

Bu faktörler bulunduktan sonra güvenlik faktörü şekil 3.10'a göre belirlenir:

$$G_s = f_0 \times F_0 \quad (3.10)$$

“Denklemden b değeri, $\phi=0$ zeminlerde 0.69, $c=0$ zeminlerde 0.31, c ve ϕ değeri olan zeminler için 0.50 olarak alınır. Formülasyonlarda yer alan d ve L değerleri Şekil.3.13.'te gösterilmiştir (Önalp ve Arel, 2004).”

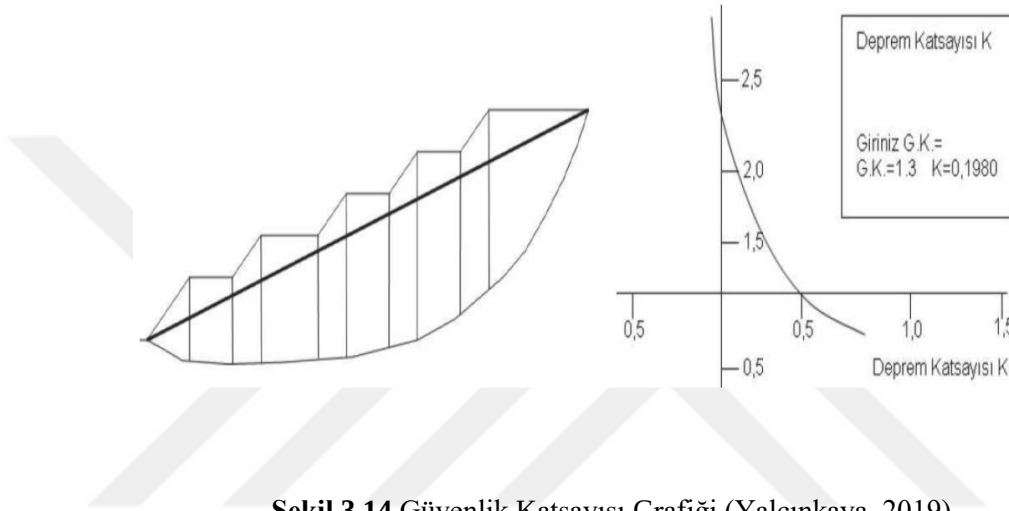


Şekil 3.13 Yamaçtaki Uzunluk-Derinlik Kavramı (Önalp ve Arel, 2004)

3.4.2.6. Sarma yöntemi

Bu yöntem, diğer yöntemlerden farklı olarak şev stabilitesinin bozulmasına neden olan yatay ivmenin bulunması üzerinedir.

“‘Şekil 3.14.’ de, şevin geometrisi, şeve ait kayma yüzeyi, deprem katsayısına bağlı elde edilen güvenlik katsayısı gösterilmektedir (Yalçinkaya, 2019).”



Şekil 3.14 Güvenlik Katsayısı Grafiği (Yalçinkaya, 2019).

3.4.2.7. Limit denge analiz yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntemlerin karşılaştırılması için tüm parametreler göz önüne alınarak açıklanır. Hesaplamalarda yapılan doğruluk ise güvenlik sayılarının doğruluğu ile açıklanır. TS 8853’e göre bir şevin stabil sayılması için önerilen güvenlik sayısı 1.5 değerinden büyük olması gerekmektedir.

İsveç dilim (Fellenius) yöntemi ilk geliştirilen yöntemdir. Bu yöntemde dilimler arasındaki kuvvetler ihmal edilir. Bu yüzden hem dilimler için hem de kayan kütleler için kuvvet dengesi sağlanmaz. Bu yöntem sadece dairesel yenilme yüzeylerine uygulanır.

Bishop yönteminde dilim üzerindeki kuvvetleri sadece dikey yönde ele alarak çözüm yapılır. Dairesel şekilli kayma yüzeyleri ile sınırlı olduğu için çözümde yaklaşımlara gidilir. Zeminin dairesel kayma yüzeylerinin efektif gerilme

ve toplam gerilme analizleri için kullanılır. Genellikle yumuşak kayalarda uygulanır.

Morgenstern & Price hem kuvvet hem de moment dengesi sağlar. Bu hem dairesel hem de yenilme olan ve dairesel olmayan yüzeyler için kullanılmaktadır. Çok yönlü bir yöntem olmasına rağmen yöntem sonucu ortaya çıkan sonuçları yorumlamak için önemli tecrübe gerektirir. Bu yöntemde kaya şevlerinin efektif ve normal gerilme analizleri için kullanılmaktadır.

Spencer yönteminde kuvvetler sabit ve paralel olduğu varsayılır. Yöntem dairesel olan ve olmayan kayma yüzeyleri için kullanılır. Bu yöntem hem kuvvet hem de moment dengesini sağlamaktadır.

Janbu yönteminde ise dilimler arasındaki kayma mukavemetini sıfır (0) olarak çözümleme yapılır. Bu yöntemde denge koşulları tam olarak sağlanamaz ve düzeltme faktörüne (f_0) ihtiyaç duyulur. Bu yöntem dairesel olmayan kayma yüzeylerinde kullanılır. Genellikle kaya şevlerinde uygulanır. Şevin efektif ve normal gerilme analizlerinin yapılması için kullanılmaktadır.

Janbu, Spencer, Morgenstern-Price ve Sarma analiz yöntemlerinde bulunan güvenlik sayıları ile sonlu elemanlar yönteminde elde edilen ve sonucu tam olarak yansıtması beklenen güvenlik sayıları arasındaki farkın %6'yı geçmediği kaydedilmiştir (Yalçınkaya, 2019). Fellenius yöntemi dışındaki yöntemler karşılaştırıldığında %5 civarı bir farklılık gösterdiği belirtilmektedir.

Dairesel kayma yüzeylerinin Basitleştirilmiş Janbu veya Basitleştirilmiş Bishop yöntemleri kullanılarak analiz edilmesi veya jeolojik koşullar ve dış etkiler gerektiriyorsa genel Spencer veya Morgenstern - Price yöntemlerinin analiz edilmesi önerilir (Morrison ve Greenwood, 1989).

Anderson ve Richards 1987 yılında limit denge yöntemleri için statik denge şartlarını bir çizelge üzerinde vermiştir.

Çizelge 3.3 Limit Denge Yöntemleriyle Sağlanan Statik Denge Şartları
(Anderson ve Richards, 1987)

Yöntem	Kuvvet Dengesi		Moment dengesi	Kayma Yüzeyinin Şekli	Dilimler Arası Kuvvetlerle İlgili Kabuller
	x	y			
Fellenius	X	X	√	Dairesel	Bileşke Tabanına Paralel
Bishop	√	X	√	Dairesel	Yatay
Janbu	√	√	X	Dairesel Olmayan	Yatay-Düzeltme Faktörü
Spencer	√	√	√	Dairesel ve Dairesel Olmayan	Sabit Eğim
Geliştirilmiş Janbu	√	√	X	Dairesel Olmayan	İtme Çizgisi
Morgenstern ve Price	√	√	√	Dairesel ve Dairesel Olmayan	$X/E=\lambda f(x)$

3.4.3. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

Sonlu elemanlar yönteminin genel mantığı zemini parçalara bölerek her bir parçayı ayrı ayrı çözümlemesi üzerine dayanır. Her bir düğüm noktasında meydana gelen deplasmandan yararlanarak gerilmeler ve şekil değiştirmeler elde eder. Ayrıca yöntem diferansiyel denklemler ve sınır değer problemleri içeren mühendislik problemlerini modeller. Yöntem zemin-yapı etkileşimi, taşıma gücü kapasitesini, gerilme ve şekil değiştirme durumlarını konsolidasyonu, zeminin dinamik durumunu gerçeğe en yakın şekilde çözümler. Materyal modellemesinde genellikle Hardenin soil (sertleşen zemin) modeli ile Mohr-Coulomb modelleri kullanılmaktadır. Zeminin boşaltma durumunun olduğu yerde Hardenin soil model, Mohr Coulomb modeline göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Limit denge yöntemlerinde kritik kayma yüzeyinin tanımlanması ile ilgili şekil ve konum varsayımı yapılırken sonlu elemanlar yönteminde yapılmamaktadır. Bu da sonlu elemanlar yönteminin limit denge yöntemine göre üstünlük sağladığını ayrıca gösterir.

Duncan 1996 yılında yayınladığı raporda, sahada görülen deformasyonun sonlu elemanlar analizi sonucu hesaplanan deformasyondan daha az olduğunu belirtmiştir. Bu yöntemin çözümü için bilgisayar programları kullanılmaktadır. Kullanılan bilgisayar programlarından en çok tercih edilen Plaxis (2D) programıdır.

Bilgisayar destekli sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapmak için ilk aşama modellemenin gerçekleştirilmesidir. Zemin formasyonlarının derinliğe bağlı çizimi, yapı elemanlarının çizimi ve gerekli olması halinde yapı-zemin etkileşiminin tanımlandığı arayüz elemanlarının çizimi modelleme safhasında oluşturulur. Çizim işleminin tamamlanmasının ardından zemin ve yapı elemanlarının parametreleri programda tanımlanmaktadır. Sınır koşullarının belirlenmesiyle birlikte modelin sonlu elemanlar ağı (mesh) meydana getirilir. Modelin mesh sıklığı analizi gerçekleştirilen kişi tarafından ayarlanabilir. Sonlu elemanlar ağının sık bir yapıya sahip olması daha detaylı hesaplamalar yapabilmeye imkan tanımaktadır (Sürücü, 2022).

3.5. Şev İyileştirme Yöntemleri

Bir şevde güvenilirliği sağlamak için kaydırıcı kuvvetleri azaltıp tutucu kuvvetleri arttırmamız gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için ise şev kaybına neden olan etkileri bilmemiz gerekmektedir. Şev iyileştirilmesi için birçok yöntem mevcuttur. İyileştirme yöntemlerini birkaç başlık altında toplayabiliriz. Yapılacak iyileştirme çalışmalarında yapısal ve yapısal olmayan tüm etkilerin araştırılması gerekmektedir. Öncelikle şev geometrisinin değişimi üzerine yoğunlaşılır. Şev geometrisinin değişimi yeterli değilse yapısal önlemlerle stabilite sağlanmaya çalışılır.

Şevlerde yapılması planlanan iyileştirme alternatifleri arasında doğru seçimi gerçekleştirmek stabilite açısından oldukça önemlidir. Alternatifler arasında seçim işleminde; şevlerde meydana gelecek kaymanın şekli, yeraltı suyu koşulları, müsaade edilebilir parsel sınırlarının aşılması, malzemelerin temininin imkanı, projenin gerçekleştirilmesi için gereken zaman ve maliyet koşulları doğru iyileştirme metodunun seçimi açısından önemli bir husustur (Duncan, 2014).

3.5.1. Şev Geometri Değişikliği İle İyileştirme

Bu yöntemdeki amaç şevi kazı veya dolgu ile stabil duruma getirmektir. Kazı yapılmadan önce drenaj uygulamaları ile şeve etki eden su basıncının ortadan kaldırılması iyi sonuçlar vermiştir. Kazı veya dolgu yaparak şev kademelendirilir, topuk bölgesi desteklenir, hendekler oluşturulur ya da taç bölgesindeki yük alınır.

3.5.1.1. Drenaj

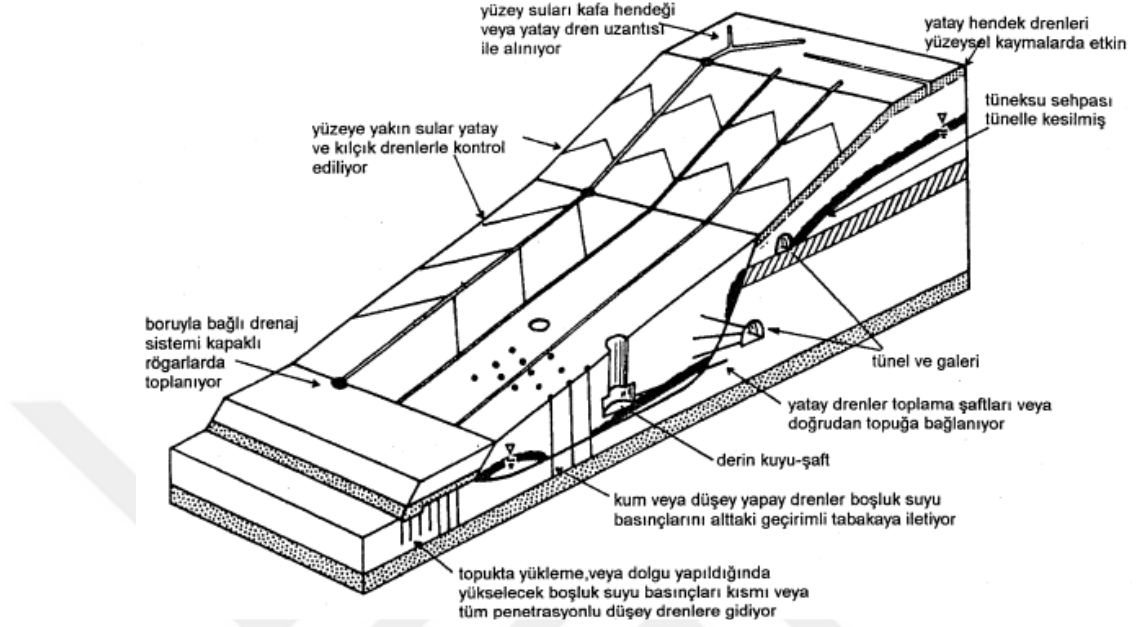
Şevde meydana gelen dayanım kaybının büyük bir kısmı sudan kaynaklı meydana gelmektedir. Zemindeki suyun artması ile boşluk suyu basıncı artar ve doğal çimentolama etkisi kaybolur. Drenaj uygulaması genellikle hendeklerle yapılır. Kafa hendeği ve topuk hendeği, suyun şeve etki etmesini önlemektedir.

Yatay ve düşey drenajlar yeraltı sularının drenajında etkilidir. Geçirgenliğin fazla olduğu durumlarda yatay drenajlar şeve eğimli olarak yerleştirilerek borular aracılığıyla suyun tahliyesini sağlar. Düşey drenajlar geçirgenliğin değişken olduğu katmanlı durumlarda kullanılması uygundur. Katmanlar kesilerek döşenir. Topuktaki yatay bir gidere bağlanarak su tahliye edilir. Düşey kolonlar yerleştirildikten sonra boruların içi malzeme ile dolduğu için bu durum kolon etrafındaki toprağın sıkışmasını ve yanıl gerilmelerin artmasını sağlayarak avantaj sağlar. (Duncan, 2014).

Drenaj uygulaması yüzeysel ve yeraltı olarak iki sınıfta incelenmektedir.

- Yüzeysel drenaj yapımı kolay ve maliyet açısından düşüktür. Yüzeyden gelen suları açık bir kanalla şev bölesinden uzaklaştırılması ile yapılır.
- Kayma yüzeyi yer altı suyunun içinde ise yeraltı drenaj yöntemi kullanılır. Zemin kütlesi içine yerleştirilen bren boruları yardımı ile su şeve etki etmeden uzaklaştırılır. Bu yöntem kullanılmadan önce zeminin permeabilite durumları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yöntemdeki en önemli etmen heyelan durduktan sonra uygulanmasıdır. Eğer akma devam ediyorsa dren hendekleri tıkanabilir.
- Drenaj hendekleri uygulama açısından maliyetli bir yöntemdir. Kazı sorunu sebebi ile de en fazla 3-4 m derine kadar açılabilir.
- Galeriler su debisinin yüksek olduğu durumlarda uygulanır. Şev stabilitesine etkisi diğer yöntemlerden daha iyidir. Yöntem uygulama

açısından maliyetli bir yöntem olduğu için yapının tehlikeye girmesi ile ve derin kaymalarda tercih edilmektedir.

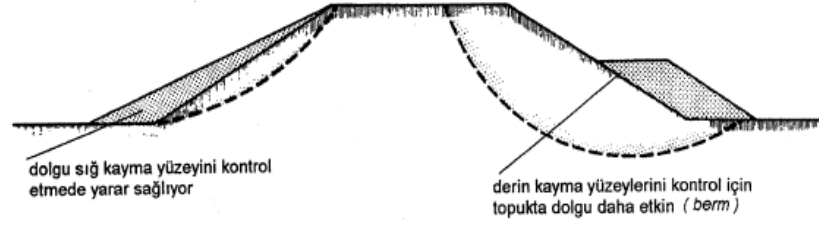


Şekil 3.15 Yamaç ve Şevlerde Suyun Kontrolü İçin Alınabilecek Önlemler
(Önalp ve Arel, 2004)

Heyelan alanlarında hendek ve drenaj galerilerinin inşaatı yapıldığında birçok sorun ortaya çıkar. Kazı, drenaj borularının döşenmesi ve hendeklerin doldurulması arasındaki süre minimumda tutulmalıdır. Heyelan hareketine dik yönde yapılacak hendeklere inşaat anoları yapılmalıdır. Drenaj hendeklerinde borunun kullanılmasına gerek yoktur. Ancak boru etkili bir drenaj ortamı oluşturur. Bundan dolayı boru kullanımı tavsiye edilmektedir. Kullanılacak boruların çapı çoğu durumda 20 cm'dir. Hendeklere doldurulacak malzeme ise beton kumu gibi bir malzeme olmalıdır. Böylece siltlenme önlenir. Yatay drenaj yapımında delik açılması ve borunun içeriye yerleştirilmesi dışında herhangi bir sorun yaşanmaz. Her durumda yatay drenaj için 5 cm'lik borular yeterlidir. (Öz, 2007)

3.5.1.2. Kazı

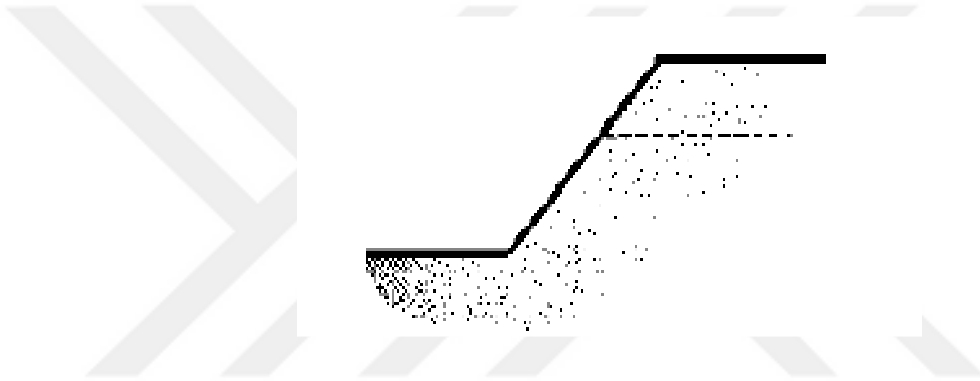
Şevde kazı yapılmasının amacı devirici kuvvetleri ortadan kaldırmaktır. Kayma gerilmeleri kazı yöntemleri ile azaltılıp duraylılık sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 3.16 Şev-Yamaç Geometrisinde Değişiklik Örnekleri (Önalp ve Arel, 2004)

a. Şev yükünün azaltılması

Şev duraylılığının sağlanması için gereken önlemler, şev yüksekliğinin düşürülmesi ve üzerindeki yükün azaltılması olabilir (Akçakal, 2009).



Şekil 3.17 Duraylılığın, Şev Yüksekliğinin Azaltılması ile Sağlanması (Akçakal, 2009).

b. Şev açısının değiştirilmesi

Şev eğimi azaltılarak şev yükünü bir miktar azaltmak mümkündür.



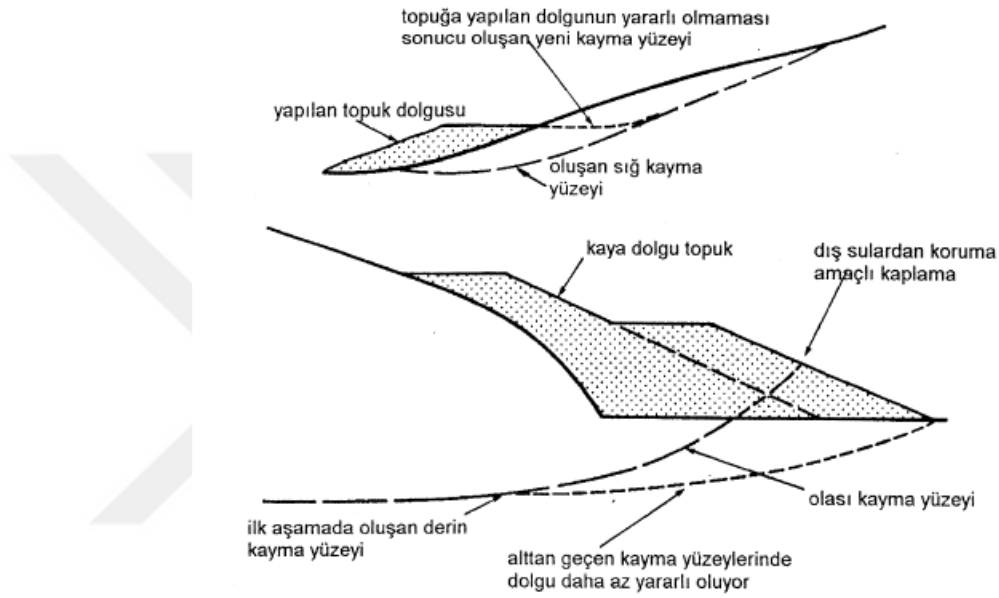
Şekil 3.18 Duraylılığın, Şev Oranının Arttırılması ile Sağlanması (Akçakal, 2009).

c. Kademelendirme

Kademelendirme işleminde şev birkaç küçük parçaya ayrılarak yük azaltılır. Yüksekliği fazla olan şevlerde eğim boyunca çalışma yapılması sorun olmaktadır. Şev eğimleri kritik eğim geçilmeden düzenlenir.

d. Topuk yüklemesi

Şevin kayma etkisini azaltmak için topuk bölgesine yük konularak stabil kalması sağlanır (Şekil 3.19.).



Şekil 3.19 Sığ ve Derin Kayma Yüzeylerinde Topuk Dolgusunun Etkinliği
(Önalp ve Arel, 2004)

3.5.2. Yapısal Önlemler

Kayan kitlenin önüne yapılar kurarak stabilitenin desteklenmesi amaçlanmaktadır. Kurulan yapıların esnek olması tercih edilmektedir. Dayanma yapıları, kazıklar, donatılı zemin, palplanşlar, püskürtme beton veya yüzeyin örtülmesi stabilizeyi artırıcı yapısal önlemlerin başında gelmektedir.

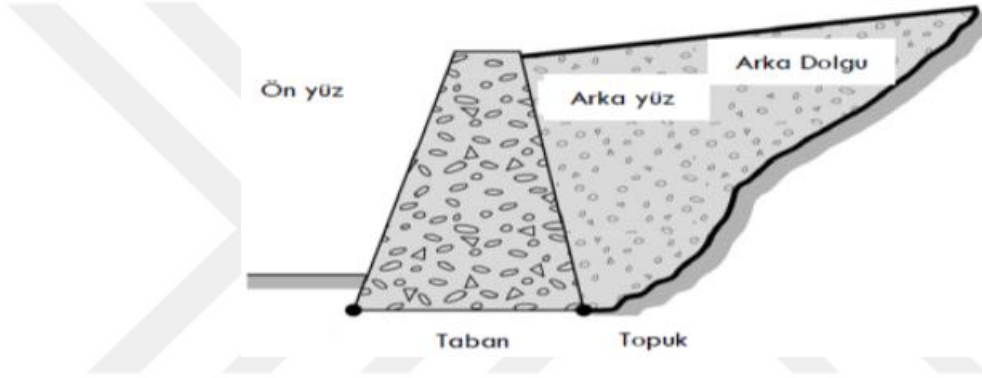
3.5.2.1. Dayanma yapıları

Zeminde suyu veya herhangi bir yanal basıncı engellemek için yapılan tüm yapılara dayanma yapıları denilmektedir. Dayanma yapıları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Ağırlık duvarlar
- Betonarme konsol duvarlar
- Payandalı duvar
- Toprakarme duvarlar
- Diyafram duvarlar
- Gabyon duvar

a. Ağırlık duvarları

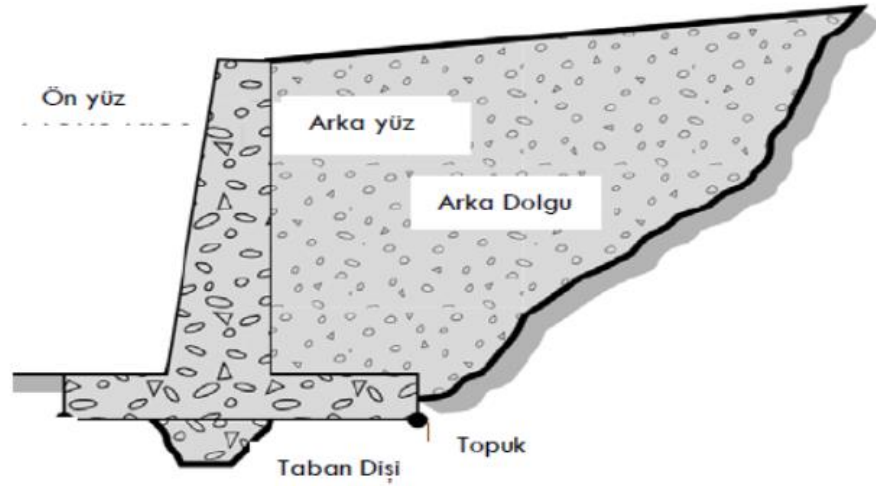
Ağırlık duvarı halk arasında bilinen adıyla taş duvar en eski dayanma yapısıdır. Kaya parçaları harçla birleştirilerek inşa edilir. Arkasındaki dolgu yüklerini kendi ağırlığı ile karşılamaktadır.



Şekil 3.20 Taş Duvar Örneği

b. Betonarme konsol duvar

Betonarme konsol duvar bilinen adıyla istinat duvarı zeminin doğal şevini daha dik tutmak için ve kayma ihtimali olan zeminlerin güvenliğinin sağlanması için inşa edilir. İstinat duvarı betonarme bir konsol duvardır. Düşey bir duvardan ve yatay bir temelden. Duvarın stabil kalması Topuk altındaki zemin kütlesinin ağırlığı ile sağlamaktadır. Konsol duvarlar genellikle 10m yüksekliğe kadar yapılmaktadır. 10m yükseklikten sonra ekonomik koşulları sağlamayabilir.



Şekil 3.21 İstinat Duvar Örneği

c. Payandalı duvar

Bu duvar tipi konsol duvar yeterli olmadığında kullanılır. Duvarın taban ve gövdesini bağlayan üçgen payandalar mevcuttur. En az 2.5 m aralıklarla düzenlenen payandalar gövde plağındaki momentleri daha üniform şekilde dağıtır. Gövde arkasında bir konsol oluşturan payandalar yanıl gerilmeleri azaltmaktadır.



Şekil 3.22 Payandalı Duvar Örneği

d. Diyafram duvar

Diyafram duvarlar yer altı su seviyesinin altında yapılan kazılarda, geçirimsiz özellikleri iyi olduğu için kullanılmaktadır. Derin kazılarda kazı yüzlerinin desteklenmesi amacı ile komşu yapıların güvenliğinin sağlanması amacı

ile tercih edilmektedir. Her zemine uygulanabilir ve kısıtlı imalat imkanı olan durumlarda çalışma olanağı sağlamaktadır.



Şekil 3.23 Diyafram Duvar Örneği

e. Gabyon duvar

Diğer adıyla bilinen sandık duvarlar, paslanmaz çelik tellerle yapılan tel örgü sandıkların içine kaya parçaları doldurularak imal edilmektedir. Üst üste konularak sandık tipi bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 3.24 Gabyon Duvar Örneği

3.5.2.2. Kazıklar

Büyük kütleli hareketlere karşı dayanma yapıları yetersiz kalabilmektedir. Dayanma yapılarının büyük kütleli hareketler karşısında yetersiz kalması durumunda maliyeti ve uygulama zorluğu daha fazla olan kazıklı sistemlerden

yararlanılmaktadır. Çakma ve delme olarak yapılmakta olan kazıklı sistemler kayan tabakanın içinde bir set oluşturmakta ve şevin duraylılığını sağlamaktadır.

Şev stabilitesini sağlamak ve kaydırma kuvvetlerini dengelemek için kayması muhtemel toprak kütlelerinin önüne bir destek yapısı inşa etmek gerekli olabilir. Büyük kazılar gerektiren duvarlar ekonomik bir çözüm değildir. Aynı zamanda duvar yapımı sırasında hafriyatla çıkarılan toprak kütlesi şev stabilitesini bozar ve durdurma kuvvetlerini azaltarak şevin çökmesine neden olabilir (Tekin, 2011). Bundan dolayı kazık imalatı şev kaybının önlenmesinde etkili bir yöntemdir.

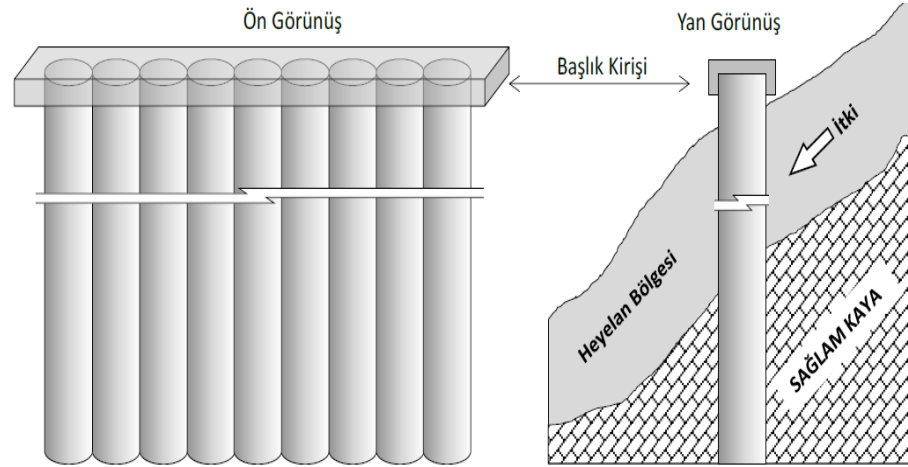
Kazıkların amacı kötü zemin tabakasını geçip sağlam zemine saplanarak kaydırıcı kuvvetlere karşı direnç sağlamaktır. Kazık yapılarak şevin güvenlik faktörü yükseltilip şev stabil duruma getirilir.

Kazığın şev kaybını önlemesi açısından yumuşak zeminlerde istenilen sonuçlar alınamayabilir. Bunun sebebi şevde meydana gelecek herhangi bir hareket esnasında kazıkların akıp gitme durumudur.

Kazığın yanal yükler altındaki davranışı incelenirken, kazıkların tasarım yükleri etkisindeki sehim ve direnci dikkate alınmalıdır. Serbest başlıklı kazık kısa ise yükleme etkisinden dolayı kazık yer değiştirir. Uzun kazıkların ise yanal yüklerin etkisi altındaki davranışı farklıdır. Genellikle yükün artmasıyla birlikte uzun kazıkların alt kısımları dik kalırken üst kısımları hareket eder. Zeminler için basit gerilme-gerinim ilişkileri verilemediğinden kazıkların tasarım yükleri altındaki deplasmanları doğru olarak hesaplanamamaktadır. Bu nedenle kazıkların tasarımı için bazı varsayımların yapılmalıdır. Problemler ele alınırken iki farklı yol kullanılabilir

Bunlar:

- “Zemin davranışını yansıtacak bir yatak katsayısı tanımlamak,
- Zemini ideal elastik bir cisim olarak kabul etmektir (Toğrol ve Tan, 2003).”

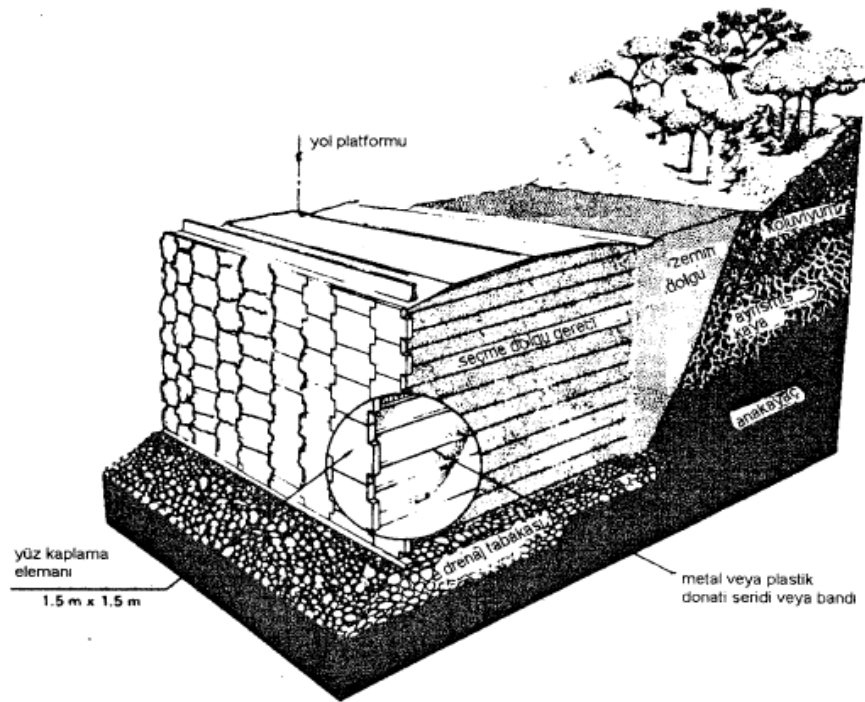


Şekil 3.25 Teğet Kazıkların Görünüşü ve Şevde Kazık

3.5.2.3. Donatılı zemin

Karayollarında bulunan şevlerde sıkça rastlanılmaktadır.

İri daneli zemin arasına geosentetik malzeme, çelik veya plastik katmanların döşenmesi ile oluşturulur. Zeminde mevcut olmayan çekme mukavemeti sağlamaktadır. Kırılgan zeminlere kolaylıkla uygulanabilmesinin nedeni geniş alanlarda yapıldığından taşıma kapasitesi sorununun olmamasıdır (Ün, 2019).



Şekil 3.26 Donatılı Zemin Uygulama Örneği (Önalp ve Arel, 2004)

3.5.2.4. Palplanşlar

Palplanşlar şev iyileştirmelerinde geçici olarak kullanılmaktadır. Palplanşların en önemli özelliği su geçirimsizliğinin yok denecek kadar az olmasıdır. Su geçirimsizliği sayesinde şevde su basıncını azaltmaktadır.

Ahşap, betonarme ve çelik türleri bulunmaktadır.

En çok tercih edilen de kullanım kolaylığından ve tekrar kullanılabilmesinden çelik palplanşlardır.

Ahşap palplanşlar, sudan etkilendiğinden ve çakılma zorluğundan dolayı pek tercih edilmemektedir.

Betonarme palplanşlar ise zemine çakılma işleminin zorluğundan dolayı pek tercih edilmemektedir.

Ankrajlı palplanşlar 10 m den kazı yapılması durumunda yatay basınç kuvvetlerini rahatlıkla karşılayabilmektedir. Bu yüzden kazı derinliğinin fazla olduğu yerlerde ankrajlı palplanşlar tercih edilmektedir.



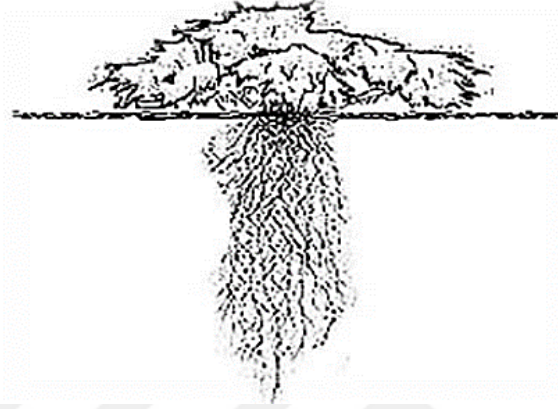
Şekil 3.27 Palplanş İmalatı Örneği

3.5.3. Diğer Önlemler

3.5.3.1. Ağaçlandırma

Şevlerde yapılan bitkilendirme ve ağaçlandırma çalışmaları kaymaya karşı koruma sağlar. Bitkilerin ve ağaçların köklerinin zemine tutunmasından dolayı

kaymaya karşı direnç artar. Köklerinden su çekerek ilave fayda da sağlamaktadır. Bitkilendirme ve ağaçlandırma sisteminin doğal olması, ekonomik olması ve estetik görünmeleri yapısal sistemlere karşı tercih edilmesinin en önemli sebepleri arasındadır (Arkun, Ergen ve Çakır, 2014).



Şekil 3.28 Bitki Kök Yayılımı (Arkun, Ergen ve Çakır, 2014)

3.5.3.2. Kimyasal stabilizasyon

Sadece granüler zeminlerde ve boşluklu çatlaklı zeminlerde stabilizasyon, zeminlerin çimento ve diğer kimyasal maddelerle mümkündür. Kimyasal stabilizasyonun başarısı, heyelan kütlelerinin kayma mukavemetinin özellikle kayma yüzeyi boyunca değiştirilmesine bağlıdır. Kayma direncinde artış yoksa stabilizasyon etkisiz olduğu anlamına gelir. Bundan dolayı kayma yüzeyi etrafındaki malzemenin sıkıştırılmış olması gerekmektedir. Prensip olarak kil malzemenin geçirgenliğinin düşük olmasından kaynaklı stabilize edilemezler. Kimyasal stabilizasyon pahalı bir yöntem olmakla birlikte fiyatının önceden tayini de zordur (Öz, 2007).

3.6. Arazi Deneyleri

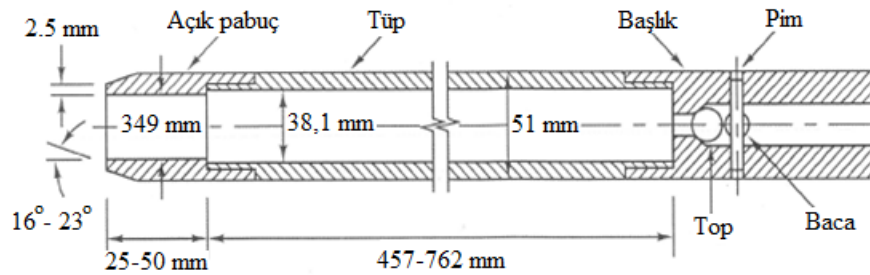
Saha testleri, çeşitli zemin parametreleri belirlemek için kullanılan yöntemlerdir. Saha testi, özellikle çok hassas killi ve siltli zeminlerde örselenmemiş numune almanın çok zor olduğu durumlarda kullanılır. Saha testleri sırasında, çekiçle (dinamik sonda) veya iterek (statik sonda) bir nesnenin yerde hareket etmesi

sağlanır. Bu işlemler esnasında zeminin mukavemeti çeşitli yöntemlerle ölçülmekte ve sertlik-yumuşaklık, sertlik-gevşeklik, kayma direnci parametreleri, oturma durumu, taşıma kapasitesi, vb. ile ilgili bilgiler edinilmektedir. (Özüdoğru ve diğ., 1997). Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT), Arazi Veyn Deneyi gibi deneyler yaygın olarak yapılmaktadır.

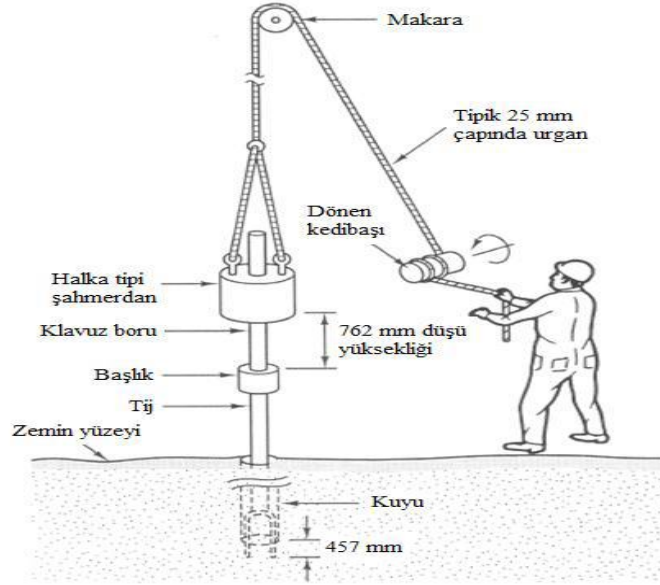
3.6.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Standart penetrasyon deneyi 1920'lerin sonlarında geliştirilmiştir ve günümüzde en çok kullanılan deneydir. Bu deney zeminin çakmaya karşı direncini belirlemek için yapılmaktadır. Ayrıca zeminden numune de alınabilmektedir.

SPT deneyi daha önce açılmış bir sondaj kuyusunda uygulanır. Genellikle 1-2 m'de bir sondaja ara verilir ve kuyu tabanı temizlenir. Boyutları Şekil 3.28'de gösterilen numune alıcı (SPT kaşığı veya sonda), birbirine kenetlenen çelik tijler kullanılarak sondaj kuyusuna indirilir. Bu işlemten sonra 63,5 kg ağırlığındaki şahmeran Şekil 3.29'da gösterildiği gibi halat ve kedibaşı mekanizması veya otomatik düşürme mekanizması kullanılarak 76 cm yükseklikten serbestçe düşürülür. Örnek alıcı, önce zemine 15 cm kadar batırılır ve kuyu dibindeki örselenmiş zemin geçilir. Daha sonra, sonda 30 cm daha zemine çakılır. Bu son 30 cm'lik delme için gerekli darbe sayısına Standart Penetrasyon Direnci veya SPT sayısı (SPT-N) denir. Çakma işlemi tamamlandıktan sonra, örnek alıcı kuyudan çıkarılır ve zemin numunesi saklanır (ASTM D 1586).



Şekil 3.29 SPT Örnek Alıcısı (ASTM D 1586).



Şekil 3.30 SPT Deneyinin Halat ve Kedibaşı ile Arazide Uygulanması

TBDY 2018 de 16. Bölüm Zemin ve Temel Tasarımını incelemektedir. Bölüm 16.4. Yerel Zemin Sınıflarının Belirlenmesi Bölümünü zemin sınıflandırılması için bir kılavuздur.

Yönetmelikte 6 adet zemin sınıfı(ZA, ZB, ZC, ZD, ZE ve ZF) tanımlaması yapılmıştır.

Zemin sınıfı $(V_s)_{30}$ $(N_{60})_{30}$ $(c_u)_{30}$ değerleri ile hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.4 Yerel Zemin Sınıfları (TBDY 2018'e göre)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/sn]	$(N_{60})_{30}$ [darbe/30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250

$$(V_s)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N (v_{s,i})} \quad , \quad (N_{60})_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N (h_i)} \quad , \quad (c_u)_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N (c_{u,i})} \quad (3.11.)$$

Burada h_i (m) değeri tabaka alt kalınlığını, $V_{s,i}$ (m/s) kayma dayanım hızı, $N_{60,i}$ (darbe/30) standart penetrasyon darbe sayısı, $c_{u,i}$ (kPa) drenajsız kayma dayanımını göstermektedir.

SPT Düzeltmeleri: Sahadan alınan SPT verilerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Çizelge 3.5'e göre verilen değerlere göre N_{60} değerine düzeltilmelidir.

$$N_{60} = N C_N C_R C_S C_B C_E \quad (3.12.)$$

Çizelge 3.5 SPT Düzeltme Katsayıları (TBDY 201'e göre)

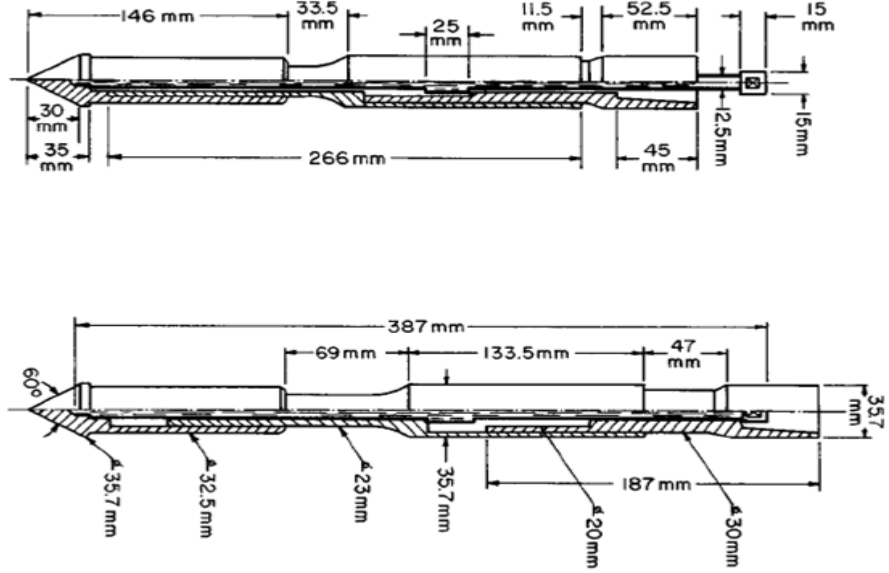
Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C_R	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C_S	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C_B	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C_E	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

N = Arazide Ölçülen SPT sayısı
 N_{60} = Prosedüre göre düzeltilmiş SPT N değeri
 C_R = Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı
 C_S = Numune alıcı tipi düzeltme katsayısı
 C_B = Sondaj delgi çapı düzeltme katsayısı
 C_E = Enerji oranı düzeltme katsayısı (TBDY 2018)''

3.6.2. Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)

Boyutları detaylı olarak gösterilen koni, hidrolik bir mekanizma kullanılarak 10 ila 20 mm/sn hızla yere doğru itilir ve delme direnci kaydedilir. Ortaya çıkan penetrasyon direnci, çeper sürtünme direnci f_s ile konik uç direnci q_c 'nin toplamından oluşur. Burada, uç direnci q_c , koniye etki eden toplam kuvvetin yüzey alanına (10 cm²) bölümünden elde edilir; çeper sürtünmesi f_s , kol yüzeyine

etkiyen toplam sürtünmenin yüzey alanına (150 cm²) bölünmesiyle elde edilmektedir (Tonyalı, 2011).



Şekil 3.31 CPT Koni Boyut Detayları

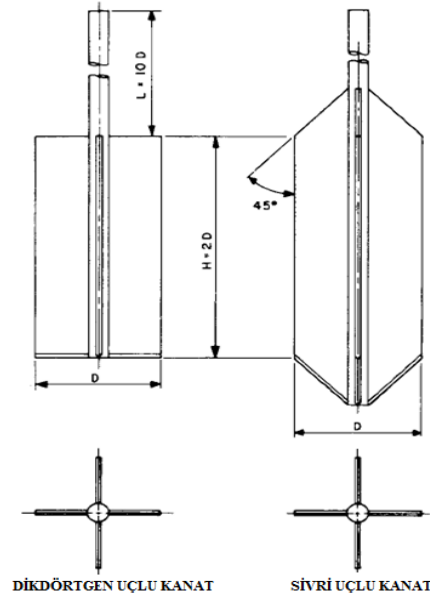
CPT deney aleti dijital ölçüm yaparken SPT deney aleti mekanik olarak ölçüm yapmaktadır. CPT, SPT ye göre daha doğru sonuçlar verirken deney esnasında numunenin alınmaması bir dezavantajdır. Ayrıca CPT deneyi aşırı boşluk suyu bulunan ve çakıllı zeminlerde yeterince doğru sonuçlar vermemektedir.



Şekil 3.32 CPT Deneyi Saha Örneği

3.6.3. Arazi Veyn Deneyi

1920’lerde John Olsson tarafından geliştirilen Arazi Veyn deneyinin yapılış şekli, detayda belirtilmiş olan kanatlı kesicinin zemine sürülerek, zeminde kesme meydana gelinceye kadar döndürülmesi ile yapılmaktadır. Drenajsız kayma mukavemeti deney süresinin kısa olmasından dolayı rahatlıkla ölçülebilmektedir (Tonyalı, 2011). Çok katı olmayan kil zeminlerde yapılmaktadır. Zeminin örselenme durumuna bağlı olarak düzeltme faktörleri yapılmalıdır.



Şekil 3.33 Arazi Veyn Deneyi Kanatlı Kesici Detayı

3.7. Laboratuvar deneyleri

Yapılacak analiz kapsamında kullanılacak zeminin tüm parametre özellikleri laboratuvarlarda deneylere tabi tutularak bulunmaktadır. Zeminin kohezyon, birim hacim ağırlığı, içsel sürtünme açısı, boşluk oranı, poisson oranı gibi parametreleri deneylere tabi tutularak bulunmaktadır. Kıvam limitleri deneyi [Likit limit deneyleri (casagrande, düşen koni), plastik limit deneyi], kompaksiyon deneyleri (standart proktor, modifiye proktor), permeabilite deneyleri, konsolidasyon deneyleri (kesme kutusu deneyi), elek analizi, 3 eksenli basınç, hidrometre gibi deneyler mevcuttur. Deneylerde ASTM standartları temel alınmaktadır. En gerekçi sonuç veren deney 3 eksenli basınç deneyidir. 3 eksenli basınç deneyi 3 farklı koşulda gerçekleştirilebilmektedir. Bunlar;

- Konsolidasyonlu drenajlı (CD)
- Konsolidasyonlu drenajsız (CU)
- Konsolidasyonsuz drenajsız (UU)

3.7.1. Kıvam Limitleri Deneyi

Atterberg limitleri deneyi olarak da bilinen kıvam limitleri deneyi ince malzemenin tanımlanması için ASTM standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Kıvamın belirlenmesi açısından likit ve plastik limit deneyleri mevcuttur. Likit limitin belirlenmesinde ise casagrande ve düşen koni deneyi yapılır.

Likit limit, zeminin sıvı gibi davranma durumuna geldiği andaki su muhtevasını gösterir. Likit limitin belirlenmesi için numune fırında (etüv) kurutulur ve 40 numaralı elekten geçirilir. Farklı su muhtevaları için numunenin casagrande deney aletinde farklı sayıda vuruşlar yapılır ve eksen üzerinde su muhtevası – vuruş sayısı grafiği çizilir. Likit limiti veren değer grafikte 25 vuruş sayısına karşılık gelen değerdir (Davis, 2008).



Şekil 3.34 Casagrande Deney Aleti

Plastisite sınırı, zeminin yarı katı durumdan plastik duruma geçtiği su içeriğini gösterir. Likit limit analizi için hazırlanan numunenin birinci veya ikinci noktasından alınan numune ile plastik limit analizi gerçekleştirilir. Hazırlanan numune avuç içi ile düz bir plaka üzerinde 3mm çapında silindirler oluşana kadar yuvarlanır. Silindirlerde çatlaklar oluşması durumunda test tamamlanır ve

numunelerin su içeriği belirlenir. Silindirlerde herhangi bir çatlak görülmezse önceki adımlar tekrarlanır (Davis, 2008).

3.7.2. Kompaksiyon Deneyleri

Kompaksiyon, zemindeki boşluğun azalıp danelerin birbirine yaklaşarak yoğunluğun artması olarak tarif edilir. Kısacası sıkışmış zeminlerdir. Bu deneylerin amacı optimum su muhtevasında en büyük kuru yoğunluğun elde edilmesidir. Standart proktor ve modifiye proctor olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. İki deney de farklı su muhtevalarında zeminin bir tokmak yardımı ile sıkıştırılması ile yapılmaktadır.

Standart Proktor testinde deney, hacmi ve ağırlığı bilinen bir kalıpta yaklaşık %5 su ile 3 kat halinde hazırlanan numune ile başlar. Her kat eşit hacimde hazırlanır ve tokmak standart bir yükseklikten 25 kere bırakılarak sıkıştırılmaktadır. Daha sonra sıkıştırılan numune tartılır. Alt ve üst noktadan, su içeriğinin belirlenmesi açısından belirli miktarda numune alınır. Su içeriği bir önceki numuneye göre yaklaşık olarak %5 arttırılarak bu işlemler 5 yada 6 nokta için tekrarlanır ve su muhtevası – kuru birim hacim ağırlığı grafiğinden optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenerek yapılmaktadır (Bardet, 1997).

3.7.3. Kesme Kutusu Deneyi

Geoteknik mühendisliği alanında karşılaşılan problemlere çözüm bulabilmek için zeminlerin teknik davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Zeminlerin kayma direncini elde edebilmek için zemin mekaniğinde kullanılan parametreler efektif kohezyon (c') ve efektif kayma mukavemeti açısı (ϕ')'dır. Şev stabilite analizi, zemin mekaniğinin en temel konularından biridir ve şev stabilite analizinin yapılabilmesi için hem doymun hem de doymun olmayan zemin mekaniğinde zeminin kohezyon değeri ve kayma mukavemeti açısı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi hem ampirik formüllerle hem de yapılan deneylerle mümkündür (Gökoğlu, 2015). Bu parametrelerin belirlenmesi için de bu deneyden faydalanılır.

Deney aleti birbirinden bağımsız hareket eden dikdörtgen veya dairesel kesitli bir kutudan oluşmaktadır. Kutuya numune yerleştirildikten sonra konsolide

olması için normal kuvvet uygulanır. Üst başlık sabit kalacak şekilde alt başlık hareket ettirilir. Numune kırılmaya zorlanır.



Şekil 3.35 Kesme Kutusu Deneyi Aleti

3.7.4. Elek Analizi Deneyi

Elek analizi deneyi dane çapı dağılımının belirlenmesi için yapılan bir deneydir. Elek analizi deneyinde zemin iri ve ince dane olarak iki sınıfa bölünür. İri daneli zeminler de çakıl ve kum olarak iki sınıfa bölünür. İnce daneli zemin türü olan kil ve siltler (200 No'lu elekten geçen) hidrometre deneyine tabi tutularak oranları belirlenir.



Şekil 3.36 Elek Analizi Deneyi

3.7.5. Serbest Basınç Deneyi

Tek eksenli basınç deneyidir. Killi zeminlerde uygulanır. Numuneye bir yönde basınç etkililir ve bu etkitilen kuvvete karşı gösterdiği direnç belirlenir. Silindir şeklinde alınan numuneye (Şekil 3.36) eksenel olarak yükleme yapılır ve zemin numunesinin boyunda kısalma meydana gelir. Gerilme ve birim şekil değişikliği verileri elde edildikten sonra eksenel gerilmenin maksimum değeri serbest basınç mukavemetini (q_u) verir.

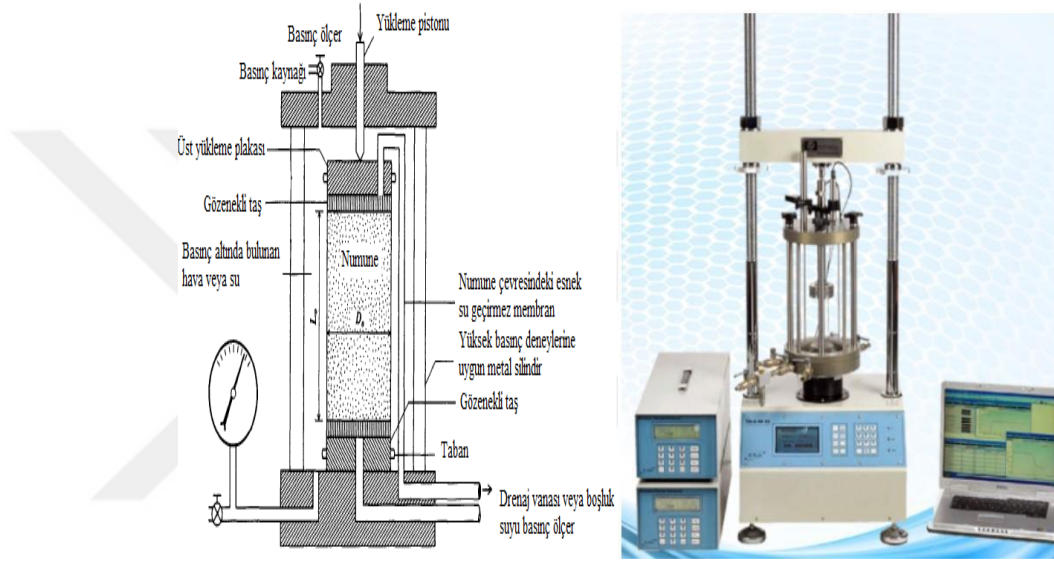


Şekil 3.37 Serbest Basınç Deneyi Aleti

3.7.6. Üç Eksenli Basınç Deneyi

Geoteknik mühendisliği yapı-zemin etkileşimi üzerine çalışma yürütmektedir. Bu etkinin de doğru belirlenmesi için zemin parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Zemin özelliklerinin belirlenmesi için kapsamlı arazi deneylerinin yanı sıra laboratuvar deneylerinin de özenli şekilde yapılması gerekmektedir. Üç eksenli basınç deneyi de gerçeğe en yakın deneydir. Kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) parametrelerini gerçeğe en yakın şekilde vermektedir.

Üç eksenli basınç deneyinde, Şekil 3.37'de gösterilen deney düzeneğinde hücre içerisine silindirik bir zemin numunesi yerleştirilir ve ardından hava veya su kullanılarak numune üzerinde hidrostatik basınç oluşturulur. Numunenin etrafına yerleştirilen kauçuk kılıf sayesinde hücre içindeki suyla doğrudan temas önlenir. Bu şekilde, numune içinde veya dışında farklı basınç değerleri oluşturmak mümkündür. Deney sırasında numuneye bir piston vasıtasıyla dikey yönde eksenel gerilmeler uygulanır. Bu sırada numunenin üst ve alt başlıklarına bağlanan kanallar kullanarak deneyin drenaj durumu kontrol edilebilmektedir (Tonyalı, 2011)



Şekil 3.38 Üç Eksenli Basınç Deneyi

4. PLAXİS 2D PROGRAMI

Plaxis 2D (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) programı geoteknik problemler için geliştirilmiş sonlu elemanlar yöntemi tabanlı çözüm yapan programdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile stabilite analizi ve deformasyon analizleri gerçekleştirir.

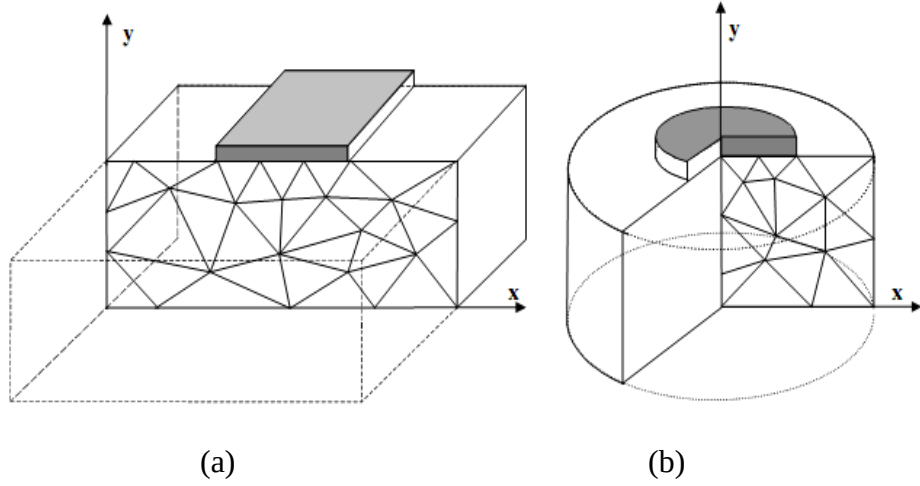
İlk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yumuşak zeminlerdeki nehir setlerini kolayca analiz etmek için tasarlandı. Sonraki yıllarda bu alan geotekniğin diğer uygulama alanlarına da genişletildi. Program, geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan, gerilme – şekil değiştirme, zemin-yapı etkileşimi, konsolidasyon, akım ağı, zemin dinamiği, taşıma gücü gibi konularda ve malzeme farklılıkları durumlarında kullanılabilmekte ve uygulanabilir sonuçlar sağlamaktadır (Natur, 2018).

4.1. Geometrik Model

Plaxis programı geoteknik model oluşturulması esnasında özel bir grafik ortamı kullanmaktadır. Bu grafik ortamı sayesinde program, yapılan modeli gerçeğe en yakın şekilde tasarlar ve çözümler. Program düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetrik geoteknik koşullarını kullanmaktadır.

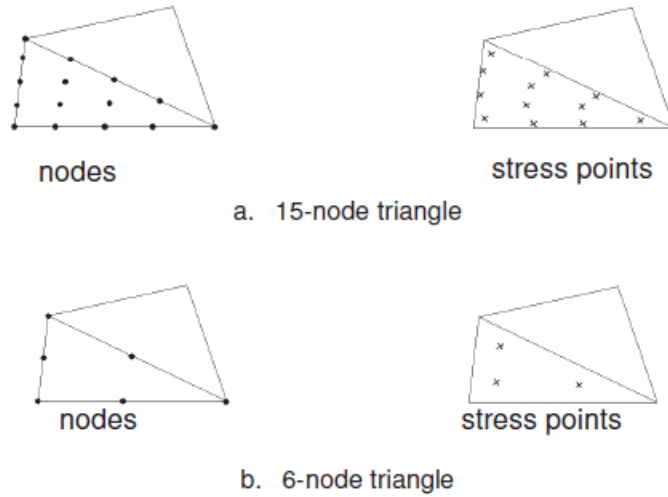
Düzlemsel şekil değiştirme geoteknik durumu cismin z doğrultusundaki boyutuna dik doğrultudaki boyutundan büyük olması durumunda kullanmaktadır. Bu durumun plaxis programında kullanılması şartı, z doğrultusunda sadece yayılı yüklerin ektirilmesi ve hacimsel kuvvetlerin bağımsız olmasıdır.

Tasarlanan modelin z eksenine etrafında simetrik olması durumunda ise eksenel simetrik modeli devreye girmektedir.



Şekil 4.1 (a) Düzlem Şekil Değiştirmeler (b) Eksenel Simetrik Problem
(PLAXİS 2D Reference Manuel, March 05.2020)

Plaxis'te nokta ve çizgi, ana bileşenleri meydana getiren temel geometrilerdir. Nokta geometrinin başlangıç ve bitiş yerlerini belirler. Ayrıca yüklerin yerlerini belirlemede yardımcı olan elemandır. Çizgi ise farklı zemin tabakalarını birbirinden ayırmada kullanılır. Çözümüne gidilirken program sonlu elemanlar yöntemi ile ağ (mesh) oluşturur. Program iki düğüm noktalı farklı eleman bulundurmaktadır. 15 noktalı düğüm elemanlar 6 noktalı düğüm elemanlara göre daha hassas analizler yapmaktadır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2 “Zemin Elemanlarındaki düğüm ve gerilme noktalarının konumu
(PLAXİS 2D Reference Manuel, March 05.2020)”

4.2. Plaxis Arayüzü ve Malzeme Modelleri

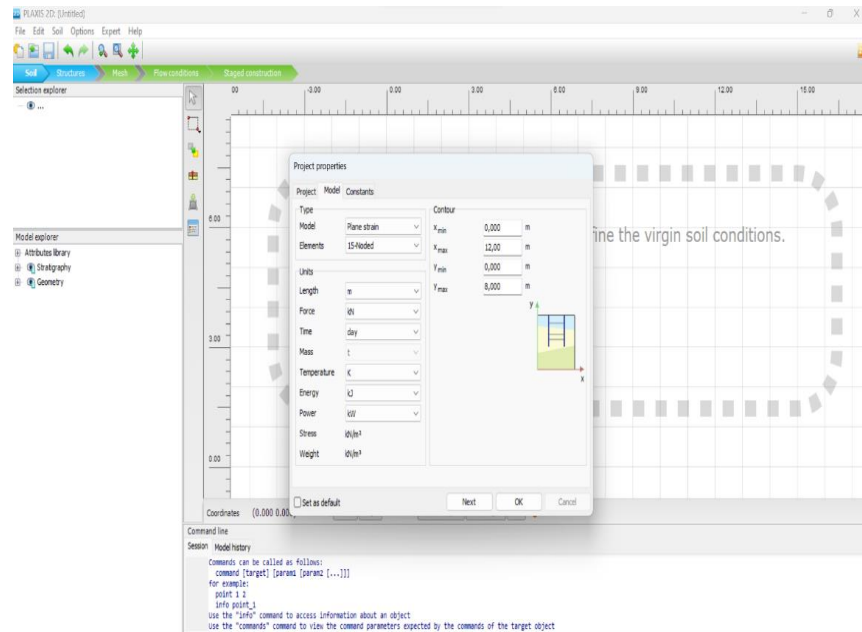
4.2.1. Plaxis Programı Tanıtımı ve Arayüzü

Plaxis 2D V20 programının “Input”, “Calculation”, “Output” ve “Curves” olmak üzere dört ana bölümü vardır.

- Input kısmında analizi yapılacak olan geoteknik model her şeyi ile programa tanıtılıp çözüme hazır hale getirilir.
- Calculation bölümü hesaplama bölümüdür. Tanıtılan geoteknik modelin çözümlemesi yapılır.
- Output bölümü çıktı bölümüdür. Hesaplanan geoteknik model bu bölümdeki yorumlanır. Modelin tüm yüklemeler karşısında gösterdiği tepki bu bölümde görülür.
- Curves bölümünde istenilen grafikler oluşturulur.

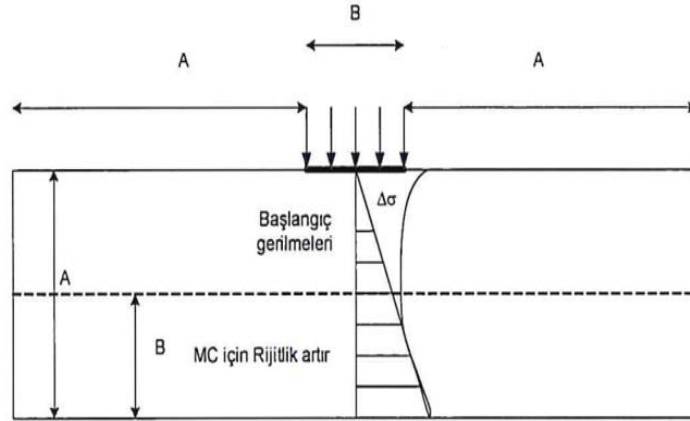
4.2.1.1. Input (girdi) sekmesi

Yöntemlerin doğruluğu verilerin düzgün işlenmesine bağlıdır. Plaxis programında ilk olarak minimum sınır koşullar belirlenir. Analizi yapılacak olan modelin geometrik koşulları işlenir. (Şekil 4.3.)



Şekil 4.3 Proje Özellikleri

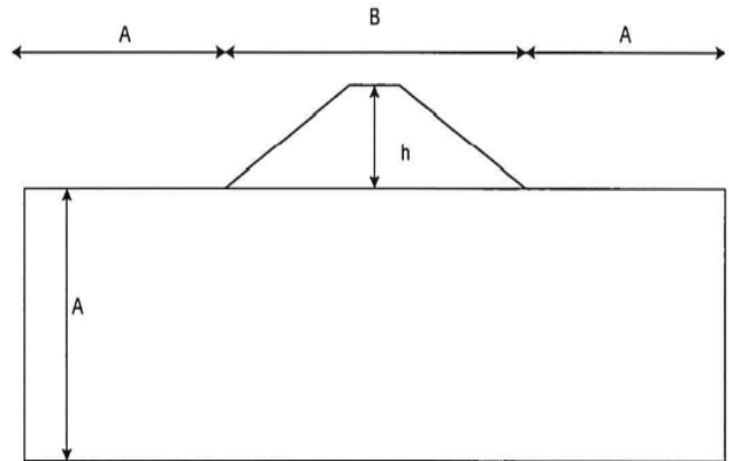
- Yüzeysel temeller için sınır koşulları;



Şekil 4.4 Yüzeysel Temel

- Stabilité: $A \geq 2B$,
- Drenajlı Deformasyon: $A \geq 3B$,
- Drenajsız Deformasyon: $A \geq 4B$)

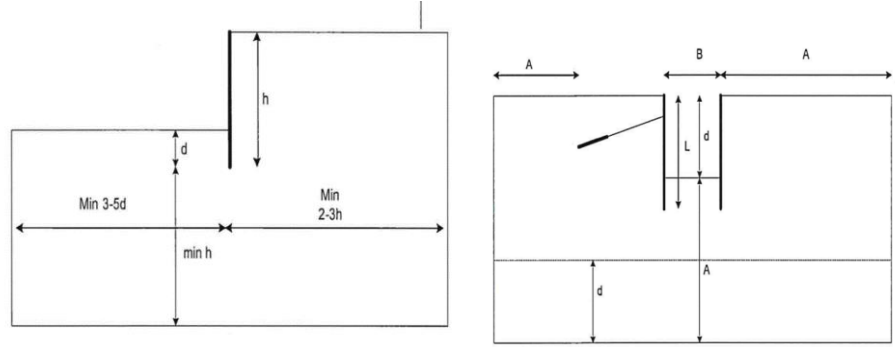
- Dolgular için sınır koşulları



Şekil 4.5 Dolgu Örneği

- Stabilité: $A \geq 2B$,
- Drenajlı Deformasyon: $A \geq 3B$,
- Drenajsız Deformasyon: $A \geq 4B$)

- Kazılar için sınır değer koşulları

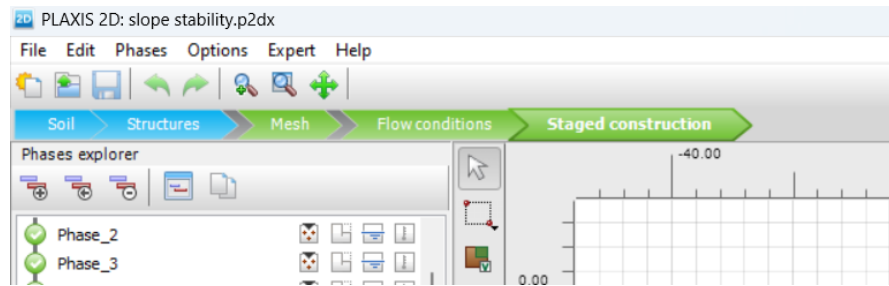


Şekil 4.6 Kazı Örneği

- Stabilitate: $A > L$ ve $A \geq 2d$
- Yapı kuvvetleri: $A \geq 2d$
- Drenajlı deformasyon: $A \geq 2d-3d$ veya $2B-3B$ (max d ve B)
- Drenajsız deformasyon: $A \geq 2d$

İnput modları aşağıdaki kısımlardan oluşur (Şekil 4.7.):

- Soil: zemin tabakalarının tanımı
- Structures: yapısal eleman ile yüklemelerin tanımı
- Mesh: sonlu eleman ağının oluşturulması
- Water levels: boşluk suyu basıncının tanımlanması
- Staged construction: inşaat aşamalarının tanımlanması

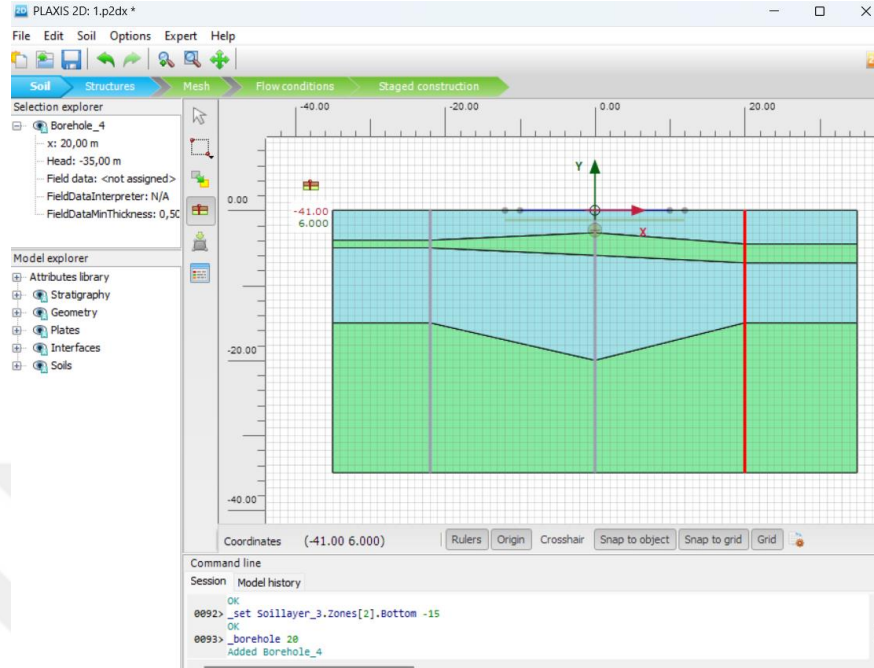


Şekil 4.7 İnput Modları

a- Soil mod

Bu bölümde katmanlar ve zemin özellikleri tanımlanır. Katmanlar “sondaj logu (boreholes)” adı verilen log ile tanımlanır (Şekil 4.8.). Katmanlar belirlendikten sonra zeminin özellikleri için “malzeme gösterimi (show material)”

kısından ‘‘zemin ve etkileşim (soil and interface)’’ seçilir ve zemin tanımlaması yapılır.



Şekil 4.8 Programda Sondaj Kuyusu Örneği

Plaxis 2D programında kullanılan belirli malzeme modelleri aşağıda sıralanmıştır (Şekil 4.9.):

- Lineer Elastik (LE)
- Mohr-Coulomb (MC)
- Hardening Soil (HS)
- Hardening Soil with Small Strain Stiffness – HS_{small}
- Soft Soil (SS)
- Soft Soil Creep (SSC)
- Jointed Rock (JR)
- Modified Cam Clay (MCC)
- NGI-ADP Modeli
- Sekiguchi-Ohta Modeli
- Hoek Brown

Şekil 4.9 Zemin Modelleri

- **Lineer Elastik Model (LE):** İzotropik elastisiteye (Hooke Yasası) bağlı bir modeldir. Bu yöntemde 2 tane elastik parametre söz konusudur. Bunlar elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) parametreleridir. Genellikle zemin içindeki rijit yapıları (beton, duvar, intak kaya v.s) modellemek için kullanılan bu yöntem zemin davranışını sınırlı bir şekilde temsil eder.
- **Mohr-Coulomb Modeli (MC):** Elasto plastik bir zemin modelidir. Modele, elastisite modülü (E), poisson oranı (ν) gibi parametlerin yanı sıra zemin plastisite parametreleri olan kohezyon (c'), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatansi açısı (ψ) olmak üzere 5 parametre girilir. Bu model için yapılan analiz genellikle hızlı ve kısa sürer. Bu analiz yöntemi zeminde oluşacak olan deformasyonlar hakkında ilk izlenim için kullanılmaktadır.

Mohr-Coulomb Parametreleri:

Young Modülü-Elastisite Modülü (E): Elastisite modülünün tanımı; malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsü olarak yapılmaktadır. Modelde kullanılan elastisite modülü tüm zemin parametreleri için sabittir, tek bir modül kullanılır. Yükleme durumları için E_0 ve E_{50} , tünel ve kazı durumlarında yükleme ve boşaltma için E_{ur} modülü kullanılmaktadır. Gerçekte

modül, gerilme miktarına bağlıdır. Artan gerilmelerde modül de artmaktadır (Demirbaş, 2022).

Poison Oranı (ν): Poison oranı düşey basınç altındaki eksenel basınç değişimidir. 0 ile 0.5 arasında değer almaktadır. Zemindeki yükleme durumunda genellikle 0.3-0.4 aralığında alınırken yükleme-boşaltma durumunda 0.15-0.25 aralığında seçilir. Yatay toprak basıncı katsayısı (4.1.) $K_0 > 1$ olduğu durumda (bu değer aşırı konsolide killerde genellikle >1 'dir) MC modeli kullanımı mümkün olmamaktadır.

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (4.1.)$$

Kohezyon (c)/Drenajsız Kayma Mukavemeti (c_u): Drenajlı durumda efektif kohezyon (c') ile efektif içsel sürtünme açısı (ϕ'), zemin mukavemetini modellemek için kullanılmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde $c=0$ olarak alınmalıdır. Fakat programca kohezyon katsayısı 0 alınınca çeşitli hatalarla karşılaşılabilir. Bu yüzden programa kohezyon katsayısı çok küçük (0.2 gibi) bir değer olarak girilmelidir. Kohezyon var olması halinde ise zeminde az da olsa çekme dayanımı alınmaktadır. Bunu gidermek için de tension-cut off seçeneği seçilmelidir (Demirbaş, 2022).

İçsel Sürtünme Açısı (ϕ): Şev yüzeyindeki eğimin yatay düzlemle yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır. İçsel sürtünme açısı genel olarak kil ve siltlerde 20° - 30° olarak, kum ve çakıllarda ise 30° - 40° olarak alınabilmektedir.

Dilatansi Açısı (ψ): aşırı konsolide killer dışındaki killer çok az dilatansi göstermektedir. Kumlarda dilatansi açısı içsel sürtünme açına bağlıdır.

$$\psi = \phi - 30 \quad (4.2.)$$

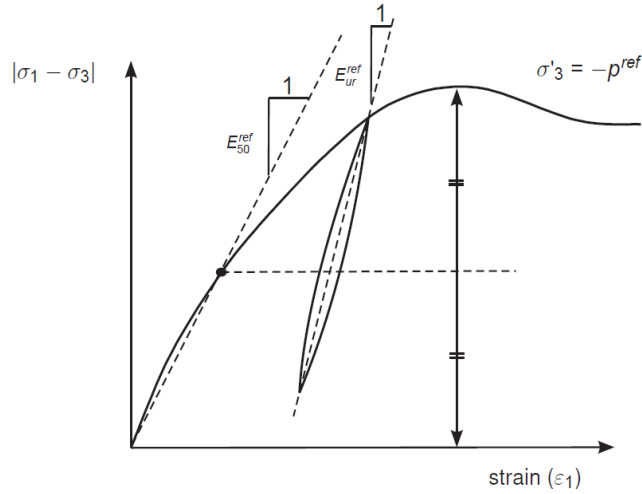
- **Hardening Soil Model (HS)**: Zemin için en gelişmiş modellerden biri olan hardening soil model (pekleşen zemin modeli), zemin rijitliğini tanımlarken daha gelişmiş parametreler kullanılmaktadır E_{50} , E_{oed} , E_{ur} . Gerilme seviyesi ise MC parametreleri ile (c , ϕ , ψ) tanımlanmaktadır. MC modelinde sabit bir elastisite modülü varken bu modelde zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır.

HS model, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin hiperbol formunda olmasına bağlıdır (Natur, 2018).

Bu modelde akma yüzeyi sabit değildir. Modelde deviatörük yüklemekten kaynaklı oluşan plastik şekil değiştirmeler için kullanılan “ kayma pekişmesi (deviatörük pekişme, shear hardening)” ve izotropik veya odömetrik yüklemekten dolayı oluşan şekil değiştirmeler için kullanılan “sıkışma pekişmesi (hacimsel pekişme, compression hardening)” mevcuttur. Sıkışma pekişmesi yumuşak zeminlerde olup MC modelinde olmayan bir özelliktir.

E_{50}^{ref} değeri (Şekil 4.10.) üç eksenli basınç deneyindeki hücre basıncının (P_{ref}) olduğu durumda oluşan maksimum deviatörük yükün %50’sindeki rijitlik modülünü temsil eder. E_{50} değeri üç eksenli basınç deneyinin rijitlik modülünü ifade etmektedir. E_{50} denklem 4.3.’e göre hesaplanmaktadır.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + P^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (4.3.)$$



Şekil 4.10 Drenajlı 3 Eksenli Deney Sonucu İçin E_{50}^{ref} Tanımı

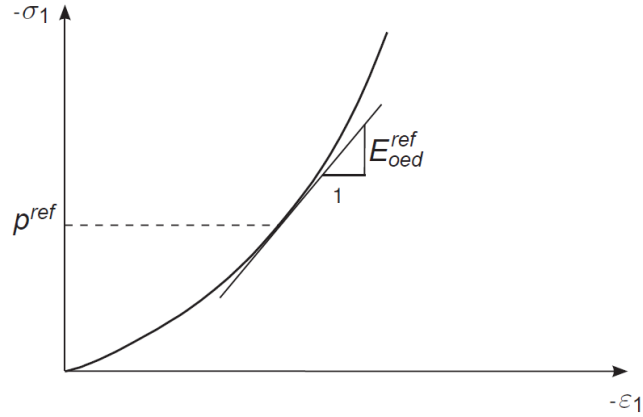
E_{ur} değeri (4.4.) üç eksenli basınç deneyinin yük boşalması esnasındaki rijitliğini ifade etmektedir. Standart ayarlarda $E_{ur}^{ref} = 3xE_{50}^{ref}$ olarak alınmaktadır.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\phi - \sigma'_3 \sin\phi}{c \cos\phi + P^{ref} \sin\phi} \right)^m \quad (4.4.)$$

E_{oed}^{ref} değeri ödometre deneyinde P_{ref} basıncına karşılık gelen teğet modülünü ifade etmektedir. Modül formüllerinde yükleme seviyesi bağıllığını kontrol eden m değeri genellikle 0.5 ile 1 arasında değişmektedir (Plaxis Material

Model). Yumuşak killler için bu değer 1 alınabilecekken kumlu ve siltli zeminlerde 0.5 alınabilir (Demirbaş, 2022).

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (4.5.)$$



Şekil 4.11 Ödeometrik Test Sonucuna Göre E_{oed}^{ref} Değeri

Gelişmiş parametreler:

- v_{ur} : Yükleme boşaltma sırasındaki poisson oranı
- P_{ref} : Referans gerilme değeri
- K_0^{nc} : Normal konsolidasyon için K_0 değeri ($1 - \sin \phi$)
- R_f : Yenilme oranı (genellikle 0.9 olarak alınır.)
- $\sigma_{tension}$: Çekme dayanımı
- c_{inc} : Derinliğe bağlı kohezyon artışı

Alternatif parametreler:

C_c : Konsolidasyon basma indisi

$$C_c = \frac{2.3(1+e_{init})P_{ref}}{E_{oed}^{ref}} \quad (4.6.)$$

C_s : Konsolidasyon şişme indisi

$$C_s = \frac{2.3(1+e_{inti})(1+\nu)(1-2\nu)P_{ref}}{(1-\nu)E_{ur}^{ref}K_0} \quad (4.7.)$$

e_{init} : Başlangıç boşluk oranı

- **Jointed Rock Model (JR):** Bu, plastik kaymanın yalnızca sınırlı sayıda kayma yönünde meydana geldiği anizotropik elastoplastik bir modeldir. JR modeli katmanlı veya kompozit kayaların davranışını modellemek için kullanılır (Natur, 2018).
- **Soft Soil Model (SS):** Zemin mekaniğinde normal konsolide killi ve killi siltler gevşek zemin olarak kabul edilir. Bu tip zeminler, yüksek sıkışabilirlik derecelerine bağlı olarak farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle bu zeminlerde SS model kullanılmaktadır. Model birincil sıkışma durumlarında en iyi şekilde çalışır (Natur, 2018).
- **Soft Soil Creep Model (SSC):** SSC modeli, konsolide kil ve killi siltler gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışlarını modellemek için kullanılır. Bu model, temel ve dolgularda zamana bağlı oturma problemlerinin yanı sıra tünel ve derin kazı gibi zemin yükü hafifletme problemlerinde de kullanılmaktadır (Natur, 2018).

Drenaj tipi seçimi uzun ve kısa dönem analizler için önem art etmektedir.

Aşağıda belirtilen üç tip drenaj durumu mevcuttur.

- **Drained:** Uzun dönem için drenajlı durumda kullanılmaktadır. Efektif durum parametreleri (E' , ν' , c' ve ϕ') ile malzeme rijitliği ve mukavemeti mukavemeti ile malzeme davranış modellemesi yapılmaktadır.
- **Undrained (A):** Kısa dönem analizleri için drenajsız durumda kullanılmaktadır. Efektif durum parametreleri (E' , ν' , c' ve ϕ') ile malzeme rijitliği ve mukavemeti ile malzeme davranış modellemesi yapılmaktadır. Drenajsız analizin efektif parametrelerle yapılmasının avantajı, konsolidasyon sırasında mukavemet artışının modellenebilmesidir.
- **Undrained (B):** Kısa dönem analizleri için drenajsız durumda kullanılmaktadır. Efektif durum parametreleri (c' ve ϕ') ile malzeme rijitliği ve drenajsız kayma mukavemeti ($c_u = s_u$) ile malzeme davranış modellemesi yapılmaktadır. Efektif mukavemet parametreleri hakkında bilgi yoksa tercih edilir. Konsolidasyon için uygun değildir.
- **Undrained (C):** kısa dönem analizleri için drenajsız durumda kullanılmaktadır. Drenajsız durum parametreleri (E_u , ν_u ve s_u) ile malzeme rijitliği ve mukavemeti ile malzeme davranış modellemesi

yapılmaktadır. Toplam gerilme analizidir ve boşluk suyu basıncı üretilmez. Konsolidasyon söz konusu değildir. Başlangıç gerilmeleri de dahil tüm analizler ve sonuçlar toplam analiz sonuçlarıdır.

Kohezyonlu (Çizelge 4.2.) ve kohezyonsuz (Çizelge 4.1.) zemin özellikleri zeminin durumuna göre hesap değerleri TS-498'den çekilebilir.

Çizelge 4.1 Kohezyonsuz Zemin Özellikleri Hesap Değerleri (TS-498)

Sıra No	Zemin türü	Sembol	Sıklık	Birim Hacim Ağırlık			Kayma Direnci Açısı (ϕ)
				Tabii (γ_n)	Doygun (γ_d)	Batık (γ')	
				kN/m ³	t/m ³ (kN/m ³)	t/m ³ (kN/m ²)	Derece
1	İyi derecelenmiş kum, az siltli kum, kum-çakıl	Cu≤6 olan SW, SM	Gevşek Orta Sıkı Sıkı	17,0	19,0	9,0	30
2				18,0	20,0	10,0	32,5
3				19,0	21,0	11,0	35
4	İyi derecelenmiş az kumlu çakıl, yassı çakıl ve taş	GW	Gevşek Orta Sıkı Sıkı	17,0	19,0	9,0	32,5
5				18,0	20,0	10,0	35
6				19,0	21,0	11,0	37,5
7	Kötü derecelenmiş kum, kum-çakıl ve çakıl	6 < Cu≤15 olan SP, SM, GP	Gevşek Orta Sıkı Sıkı	18,0	20,0	10,0	30
8				19,0	21,0	11,0	32,5
9				20,0	22,0	12,0	35
10	Kötü derecelenmiş kum, kum-çakıl, az siltli çakıl	Cu≥15 olan SP, SM, GP veya GM	Gevşek Orta Sıkı Sıkı	18,0	20,0	10,0	30
11				20,0	22,0	12,0	32,5
12				22,0	24,0	14,0	35

Gevşek $0,15 < Dr \leq 0,3$

Ortasıkı $0,30 < Dr \leq 0,50$

Sıkı $0,50 < Dr \leq 0,75$

$$\text{Sıklık oranı: } Dr = \frac{e_{max} - e_o}{e_{max} - e_{min}}$$

e_{max} = En büyük boşluk oranı

e_o = Tabii boşluk oranı

e_{min} = En küçük boşluk oranı

$C_U \frac{D_{60}}{D_{10}}$:Uniformluk katsayısı

D_{10} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %10'unun tekabül ettiği dane büyüklüğü

D_{60} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %60'ının tekabül ettiği dane büyüklüğü

Çizelge 4.2 Kohezyonlu Zemin ve Organik Zeminlerin Hesap Değerleri (TS-498)

Sıra No	Zemin türü	Sembo l	Sıklık	Birim Hacim Ağırlık		Efektif Kayma Direnci Açısı ϕ' Derece	Kohezyon	
				Tabii (γ_n)	Batık (γ')		c' kN/m ²	$c'u$ kN/m ²
				kN/m ³	t/m ³ (kN/m ²)			
1	Yüksek Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler (wL>%50)	CH MH	Yumuşak Katı Ortasert	18,0	8,0	17,5	0	50
				19,0	9,0	17,5	10	35
				20,0	10,0	17,5	25	75
2	Orta Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler (%50>wL ≥ % 35)	CL Ml	Yumuşak Katı Ortasert	19,0	9,0	22,5	0	5
				19,5	9,5	22,5	5	25
				20,5	10,5	22,5	10	60
3	Düşük Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler (wL<%35)	OL CL ML	Yumuşak Katı Ortasert	20,0	10,0	27,5	0	0
				20,5	10,5	27,5	2	15
				21,5	11,0	27,5	5	40
4	Organik kil, organik silt	OH OL	Yumuşak Katı	14,0	4,0	15	0	10
				17,0	7,0	15	0	20

Yumuşak : 0,50 < K ≤ 0,75

Katı : 0,75 < K ≤ 1,00

Ortasert : K > 1,00

$$\text{Bağıl kıvam değeri } (K) = (w_L - w_n) / (w_L - w_p)$$

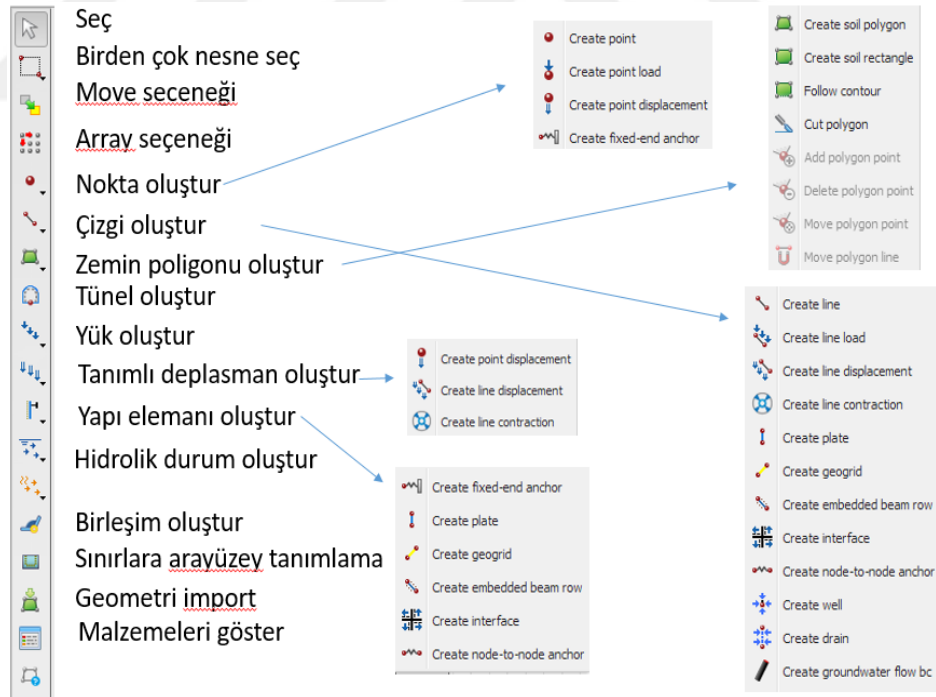
w_L = Akmada katılaşmaya geçme sınırındaki su muhtevası (Likit Limit)

w_n = Tabii su muhtevası

w_p = Katıdan orta sertliğe geçme sınırındaki su muhtevası (Plastik Limit)

b- İnşaat (Structures)

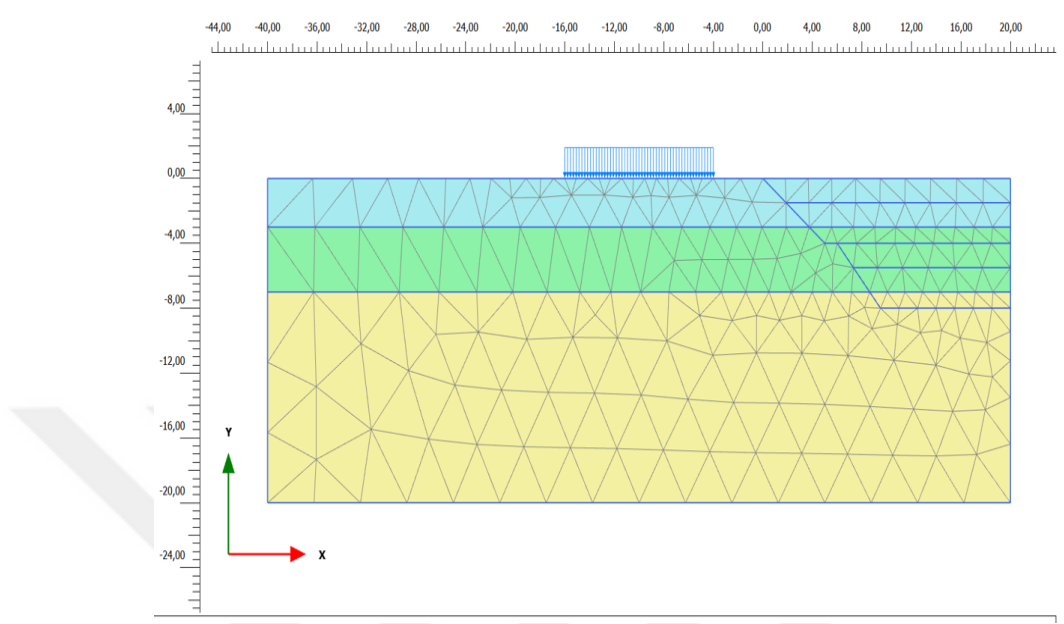
Malzeme tanımlandıktan sonra inşaat (structures) bölümüne geçilir. Burada yüklemeler varsa yapılar zemin modeli inşa edilir. Zemin modeli noktalar (points) ve çizgiler (lines) ile inşa edilir. Noktalar nokta yükler, nokta tanımlı deplasmanlar, sabit uçlu ankrajlar (fixed-end anchors) için kullanılır. Çizgiler ise kirişler, çizgisel yükler çizgide tanımlı deplasmanlar, noktadan noktaya ankrajlar (node-to-node anchors) ve gömülü kazıklar (embedded piles) için kullanılır (Demirbaş, 2022). Ayrıca bu bölümde varsayılan sınır koşulları belirlenir. Zemindeki sağ sol yanal deplasmanlar veya alt kısım deplasmanları sınırlanır. İmport geometri kısmı ile farklı formatlardaki kaynakların içe aktarımı sağlanır. Yüklemeler tanımlanırken kazı olduğu durumlarda deplasmanlar sıfırlanmalıdır.



Şekil 4.12 Structures Bölümündeki Araçlar (Demirbaş, 2022)

c- Ağ (mesh) bölümü

Sonlu elemanlar ağı bu bölümde oluşturulur. Çizim alanındaki değişik renkler farklı eleman boyutlarını tarif eder.



Şekil 4.13 Programdaki Ağ (Mesh) Yapısı

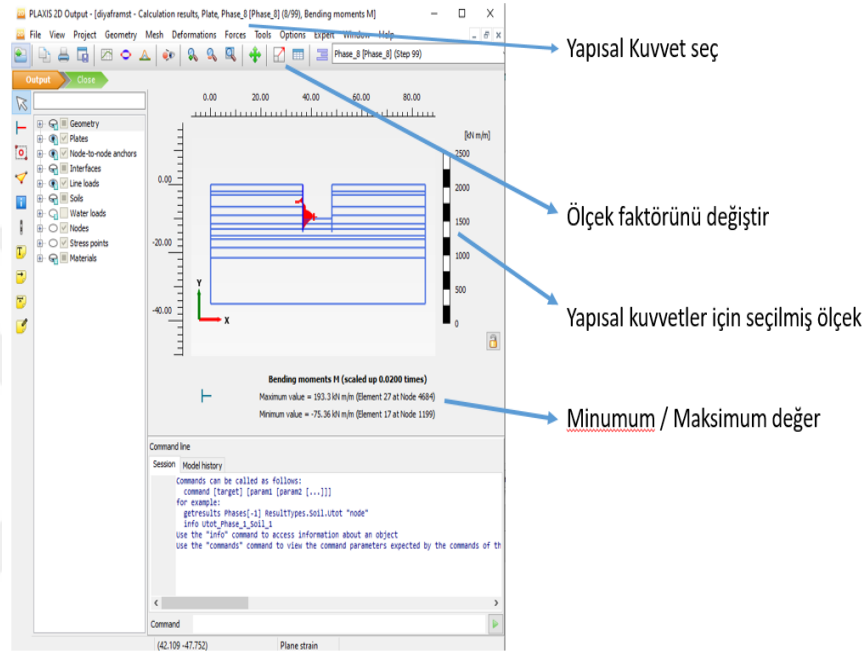
4.2.1.2. Çıktı (output) sekmesi

Çizimi yapılan projenin inşaat (structures) bölümünden hesaplama (calculate) seçeneği ile hesaplaması yapılır. Hesaplaması yapılan proje hesap sonuçları kısmına tıklanır. Bu bizi çıktı (output) sekmesine yönlendirerek sonuçlar kısmının yorumlanması sağlanır.

Çıktı (output) sekmesinde sonuçlar hem grafik hem de tablolar halinde görülür.

- Deplasmanlar: toplam hesap safhaları, mutlak yatay ve düşey deplasmanlar, deplasman yönünü ve büyüklüğünü gösteren oklar, kontur çizgileri ve kontur tarama çizgilerinin tarama cinsinden gösterimi mevcuttur.
- Gerilmeler: efektif ve normal gerilmeler, aktif ve boşluk suyu basıncı, Kartezyen ve ortalama deviyatorik gerilme, asal gerilmelerin tarama ve çizgi şeklinde gösterimi verilmektedir.
- Birim deformasyon: toplam, hesap safhası ve adımsal, hacimsel ve kayma şeklinde asal düzlemde çizgisel ve tarama şeklinde verilmektedir.

- Su akış analizi sonuçları: akım ağı ve pizyometrik su seviyesi olarak gösterimi.
- Dinamik analiz: hız ve ivme verileri gösterilmektedir.
- Yapısal kuvvetler: eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve çekme kuvveti gösterilmektedir.
- Enkesit oluşturulup rapor oluşturma da bu bölümdedir.



Şekil 4.14 Çıktı (Output) Sekmesinde Yapısal Kuvvetler (Demirbaş, 2022)

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde şev inceleme alanı tanıtılıp Plaxis 2D programına işlenen farklı geoteknik parametrelerin sonuçları açıklanmıştır. Analiz sonucu güvenlik katsayısı hesaplanmıştır ve çözüm önerileri sunulmuştur.

5.1. İnceleme Alanının Özellikleri

İnceleme alanı olarak seçilen Hakkari Üniversitesi Zeynel Bey Yerleşkesi, Hakkari'nin doğu kesiminde Keklikpınar mahallesinde kurulmuştur (Şekil 5.1.). Sık sık zemin kaymaları ile gündeme gelen Zeynel Bey Yerleşkesi en son toprakarme duvarın 2019 yılında göçmesi ile tekrar gündeme gelmiştir. Yerleşkenin kurulumuna 2012 yılında yapılan zemin etütleri ile başlanmıştır. Bölgede öncelikli olarak 13 adet sondaj AVA Mühendislik tarafından yapılmıştır. Sondajlardan alınan numuneler ise Özcan Mühendislik Tarafından deney amaçlı İstanbul Teknik Üniversitesi Hamdi Peynircioğlu Zemin Etüdü Laboratuvarına gönderilmiştir. Talep üzerine elek ve hidrometre analizi, kıvam limitleri, serbest basınç deneyi ve kondolidasyon (odometre) deneyleri yapılmıştır.

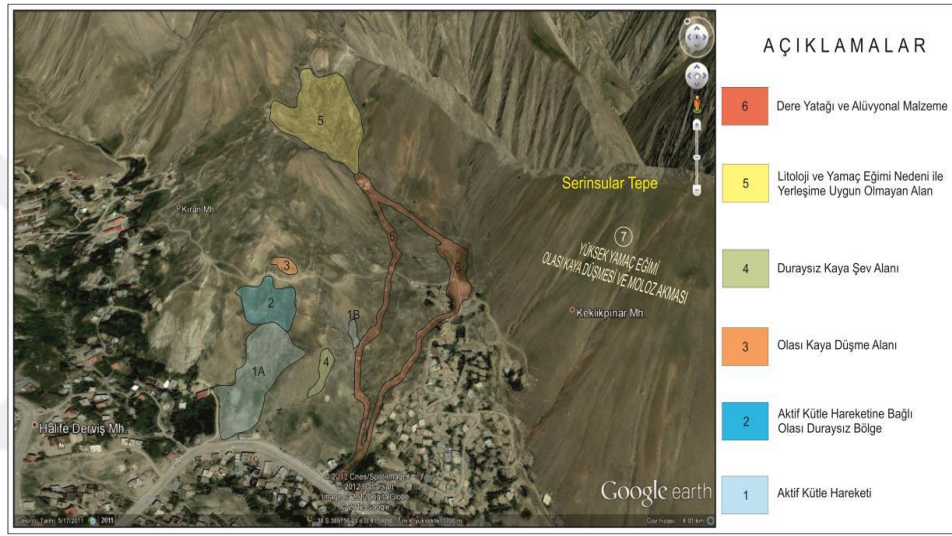


Şekil 5.1 Zeynel Bey Yerleşkesi Uydu Görünümü

Toplamda 7 adet numune üzerinde çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucu zeminin büyük bir kısmının kil olduğu saptanmıştır. 2017 yılında Onur Mühendislik tarafından İller Bankası bünyesinde yapılan mikrobölgeleme

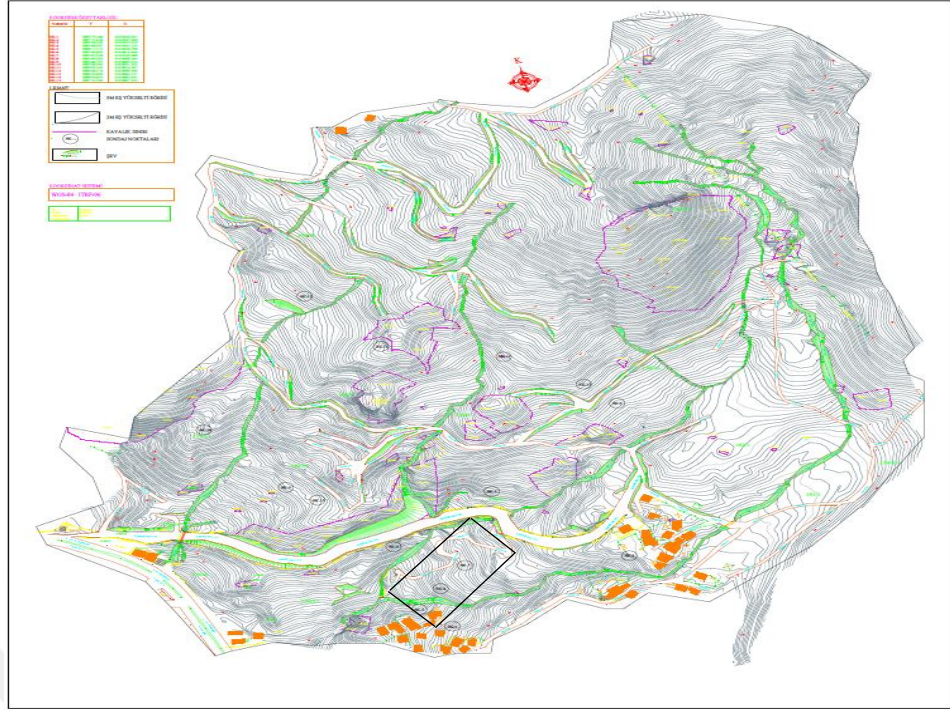
alışmasında da Keklikpınar Mahallesiinde 3 adet sondaj verisi alınmış olup bu verilerin sonucunda zemin sınıfının kil olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca Prof. Dr. Mehmet Nuri Bodur öncülüğünde 2012 yılında üniversitenin kurulması planlanan yerleşke ile ilgili jeolojik ve jeoteknik açıdan bir rapor düzenlenmiştir. Bölgede aktif kütle hareketlerine bağılı duraysız bölgeler ve aktif kütle hareketlerinin olduğu bölgeler belirlenmiştir (Şekil 5.2.). Raporda kütle hareketlerine karşı öneriler sunulmuştur. Bunların başında drenaj ağı sistemi, istinat duvarı planı, palyeli kazı planı, elik hasır uygulaması, püskürtme beton ve kaya bulonu uygulaması önerileri gelmektedir.

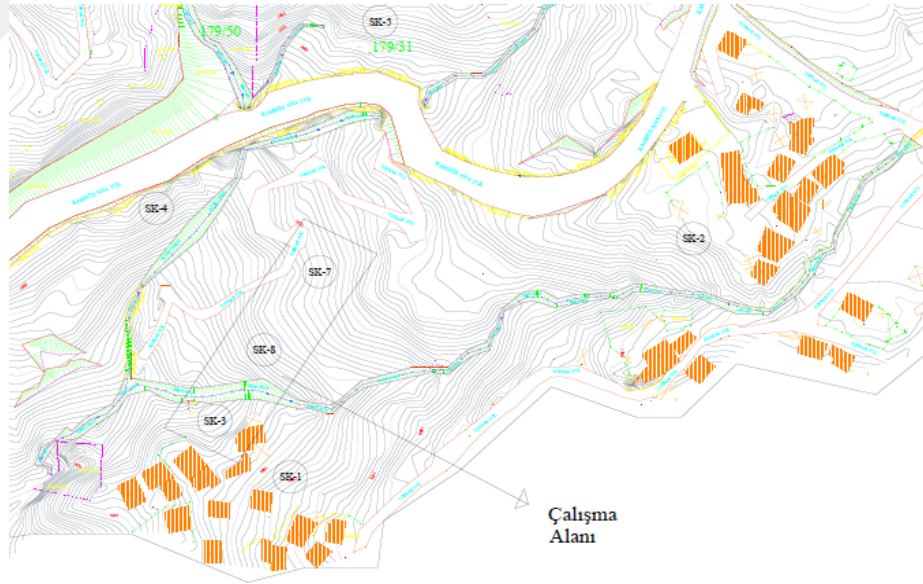


Şekil 5.2 Jeoteknik Açından Yerleşke Alanındaki Başlıca Sorunlu Alanlar
(Bodur, M. N., Özbek, A., Kop, A., 2012.).

Şev stabilitesi yapılacak alanın seçilmesinde ise 2012 yılında yapılan SPT verileri temel alınmıştır. Yapılan 13 adet SPT verilerinden (Şekil 5.3.) en riskli olan 2 adet sondaj verisi ele alınmıştır. Bunlar, SK8 ve SK3'tür (Şekil 5.4.).



Şekil 5.3 Yerleşke Alanında Yapılan Sondaj Çalışmasının Koordinatları
(Kahraman, 2012)



Şekil 5.4 3 Adet Sondaj Çalışmasının Konumu (Kahraman, 2012)

5.2. Parametrelerin Belirlenmesi

13 adet sondaj kuyusunun numuneleri alınıp İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında 4 adet deneye tabi tutulmuştur. SK-3 kıvam limitleri deneyi, serbest basınç deneyi ve konsolidasyon deneylerine tabi tutulurken SK-8, kıvam limitleri deneyine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.1 Su Muhtevası ve Kıvam Limitleri Deneyi Sonuçları

Su Muhtevası ve Kıvam Limitleri						
Numune No	Derinlik (m)	w_n (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	Zemin Sınıfı
SK3-UD1	4.5-4.95	16	47	16	31	CL
SK8-UD1	3.0-3.45	15	59	17	42	CH
SK8-D2	10.5-10.95	17	63	18	45	CH

TS 498 yönetmeliğinde kohezyonlu zeminlerin hesap değerleri tablosuna (Çizelge 4.2.) deney sonuçları işlenmiştir ve veriler alınmıştır;

Bağıl kıvam değeri (K) = $(w_L - w_n)/(w_L - w_p)$

Yumuşak : $0,50 < K \leq 0,75$

Katı : $0,75 < K \leq 1,00$

Ortasert : $K > 1,00$

SK3:

$$(K) = (47 - 16)/(47 - 16) = 1$$

K değerine göre sıklık “Katı” olarak belirlenmiştir. Zeminimiz likit limit değerinin %47 ($w_L=47$) olmasından dolayı “Orta Plastisiteli” zemin türündendir. Çizelge 5.2 ayrıca aşağıda belirtilmiştir.

Sıra No	Zemin türü	Sembol	Sıkılık	Birim Hacim Ağırlık		Efektif Kayma Direnci Açısı ϕ' Derece	Kohezyon	
				Tabii (γ_n)	Batık (γ')		c' kN/m ²	c_u N/m ²
				kN/m ³	kN/m ³			
1	Yüksek Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler ($w_L > \%50$)	CH MH	Yumuşak Katı Ortasert	18,0	8,0	17,5	0	50
				19,0	9,0	17,5	10	35
				20,0	10,0	17,5	25	75
2	Orta Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler ($\%50 > w_L \geq \%35$)	CL ML	Yumuşak Katı Ortasert	19,0	9,0	22,5	0	5
				19,5	9,5	22,5	5	25
				20,5	10,5	22,5	10	60
3	Düşük Plastisiteli İnorganik kohezyonlu zeminler ($w_L < \%35$)	OL CL ML	Yumuşak Katı Ortasert	20,0	10,0	27,5	0	0
				20,5	10,5	27,5	2	15
				21,5	11,0	27,5	5	40
4	Organik kil, organik silt	OH OL	Yumuşak Katı	14,0	4,0	15	0	10
				17,0	7,0	15	0	20

SK8 UD1:

$$(K) = (59 - 15)/(59 - 17) = 1.05$$

K değerine göre sıkılık “Katı” olarak belirlenmiştir. Zeminimiz likit limit değerinin $\%59$ ($w_L=59$) olmasından dolayı “Yüksek Plastisiteli” zemin türündendir.

SK8 D2:

$$(K) = (63 - 17)/(63 - 18) = 1.02$$

K değerine göre sıkılık “Katı” olarak belirlenmiştir. Zeminimiz likit limit değerinin $\%63$ ($w_L=63$) olmasından dolayı “Yüksek Plastisiteli” zemin türündendir. Bu veriler ışığında SK8 D2’nin parametreleri SK8 UD1 ile aynıdır.

Çizelge 5.3 Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

Serbest Basınç Deneyi				
Numune No	Derinlik (m)	γ_n (kN/m ³)	w_n (%)	q_u (kPa)
SK3-UD1	4.5-4.95	21.2	16	145

γ_n : Tabi Birim Hacim Ağırlığı

w_n : Deney Başı Su Muhtevası

q_u : Serbest Basınç Mukavemeti

Çizelge 5.4 Konsolidasyon Deneyi Sonuçları

Konsolidasyon Deneyi							
Numune No	Derinlik	w_{son} (%)	γ_0 (kN/m ³)	γ_{son} (kN/m ³)	P_s (kN/m ²)	Basınç Kademesi	M_c (kN/m ²)
SK3-UD1	4.5-4.95	9	20.7	21.0	115	0-25	
						25-50	
						50-100	
						100-200	7196
						200-400	7232
						400-800	10489

w_{son} : Deney sonu su muhtevası

γ_0 : Deney başı birim hacim ağırlık

γ_{son} : Deney sonu birim hacim ağırlık

P_s : Şişme basıncı

M_c : Sıkışma modülü

SPT Deneyleri Sonuçları

Çizelge 5.5 3 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri

SK3	Derinlik (m)	0- 15 cm	15- 30 cm	30- 45 cm	N30	Zemin Sınıfı	ND	ort N60	h	h/SPTN	N60,30
SPT1	1.5-1.95	4	4	5	9	CL	9	10	4.95	0.495	20.763
SPT2	3.0-3.45	5	5	6	11	CL	11				
UD	4.50- 4.95					CL					
SPT4	6.0-6.45	5	7	10	17	CH	17	32.2	15	0.466	
SPT5	7.5-7.95	10	14	16	30	CH	30				
SPT6	9.0-9.45	12	16	17	33	CH	33				
SPT7	10.5- 10.95	11	15	18	33	CH	33				
SPT13	19.5- 19.95	23	22	26	48	CH	48				

Çizelge 5.6 7 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri

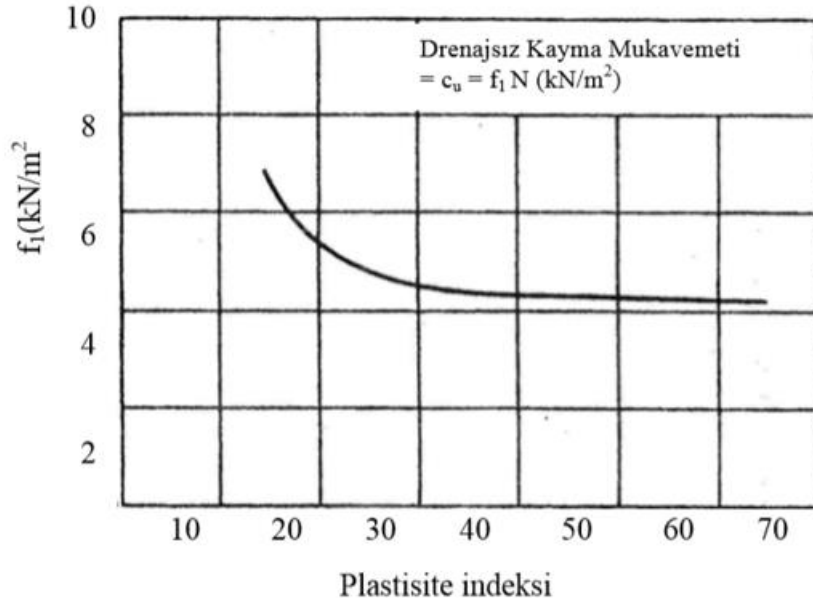
SK7	Derinlik (m)	0- 15 cm	15- 30 cm	30- 45 cm	N30	Zemin Sınıfı	ND	ort N60	h	h/SPTN	N60,30
SPT1	1.5-1.95	5	6	6	12	CL	12	22.3	10.95	0.491	22.286
SPT2	3.0-3.45	4	6	4	10	CL	10				
SPT3	4.50- 4.95	7	9	9	18	CL	18				
SPT4	6.0-6.45	6	10	11	21	CL	21				
SPT5	7.5-7.95	10	11	14	25	CL	25				
SPT6	9.0-9.45	13	15	26	41	CL	41				
SPT7	10.5- 10.95	11	14	15	29	CL	29				

Çizelge 5.7 8 No'lu Sondaj Kuyusunun Verileri

SK8	Derinlik (m)	0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm	N30	Zemin Sınıfı	N D	ort N60	h	h/SPTN	N60,30
SPT1	1.5-1.95	11	13	18	31	CH	31	34.2	15.45	0.451	34.222
UD	3.0-3.45					CH					
SPT3	4.50-4.95	10	14	21	35	CH	35				
SPT4	6.0-6.45	13	17	21	38	CH	38				
SPT5	7.5-7.95	10	11	14	25	CH	25				
SPT6	9.0-9.45	12	16	15	31	CH	31				
SPT7	10.5-10.95	11	13	18	31	CH	31				
SPT8	12.0-12.50	14	17	21	38	CH	38				
SPT9	13.50-13.45	15	18	22	40	CH	40				
SPT10	15.0-15.45	15	19	20	39	CH	39				

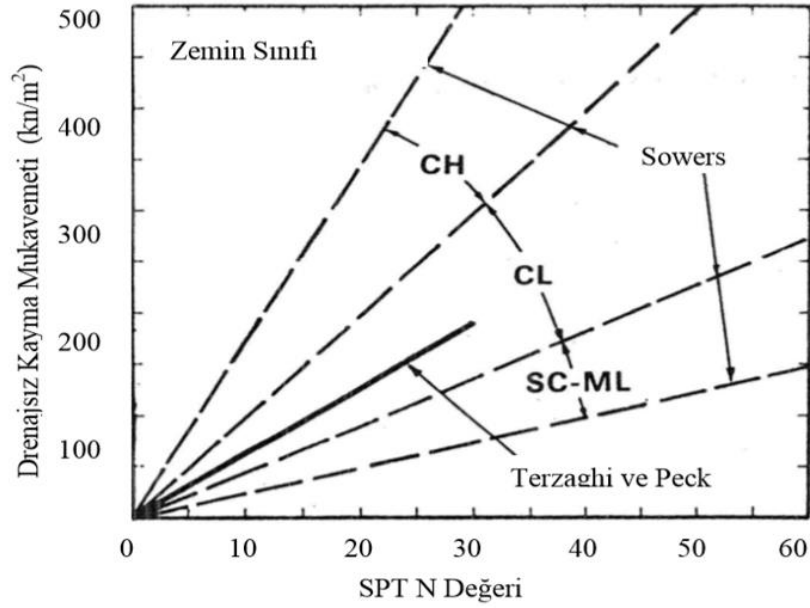
Elastisite modülü

Drenajsız durum için drenajsız kayma mukavemeti (c_u) parametresi yardımı ile elastisite modülü korelasyonu yapılabilir. Bunun için Sowers'in 1979 yılında önerdiği abak kullanılabilir (Şekil 5.5.).



Şekil 5.5 Plastisite İndisi ile Drenajsız Kayma Mukavemeti İlişkisi (Sowers, 1979)

Ayrıca Terzaghi ve Peck 1967 yılında SPT-N değeri ile drenajsız kayma mukavemeti parametresi (c_u) ilişkisini belirtmişlerdir (Şekil 5.6.).

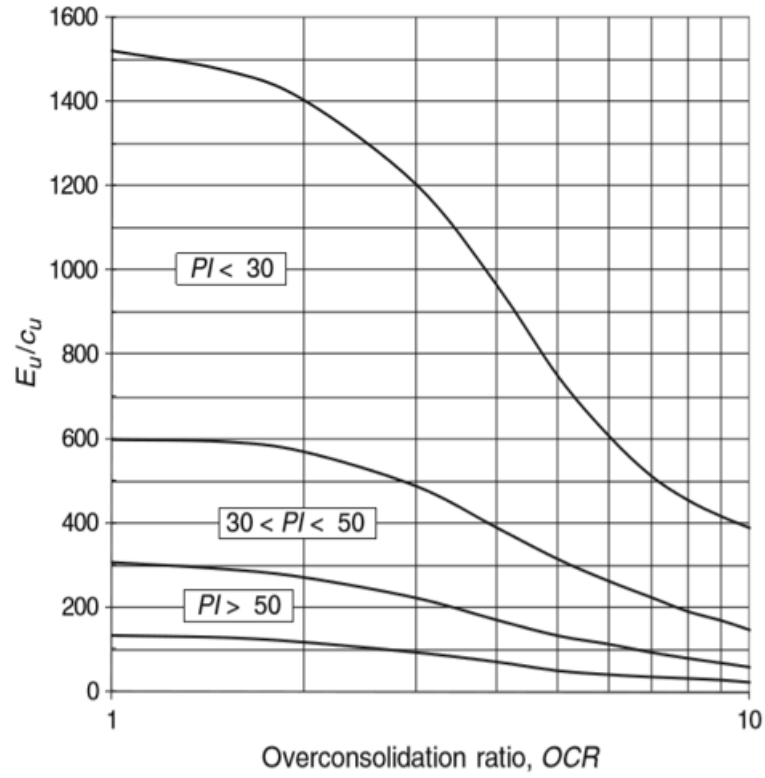


Şekil 5.6 SPT N Değeri ile Drenajsız Kayma Mukavemeti İlişkisi (Terzaghi ve Peck, 1967, ve Sowers, 1979)

Drenajsız kayma mukavemeti ile SPT N değerini karşılaştırırken denklem 5.1. kullanılabilir.

$$4 \text{ SPT-N} = (c_u) \quad (5.1.)$$

Drenajsız elastisite modülü için Şekil 5.7.'ye göre PI, $30 < PI < 50$ olarak belirlenmiştir ve bu aralığa göre $E_u/c_u = 400$ olarak seçilmesi uygun görülmüştür.



Şekil 5.7 Killer için E_u/c_u -PI-OCR ilişkisi (USACE, 1990)

$$E_u = 400c_u \quad (5.2.)$$

Statik durumdaki elastisite modülü için ise Poulos ve Small'ın tablosu kullanılabilir (Çizelge 5.7.).

E' : Drenajlı durum Young Modülü (kN/m^2)

$$E's = \beta' E_u \quad (5.3.)$$

Çizelge 5.8 Paulos ve Small, Young Modülü

Zemin Türü	β' Faktörü
Çakıl	0.9
Kum	0.8
Silt, Siltli Kil	0.7
Sert Kil	0.6
Yumuşak Kil	0.4

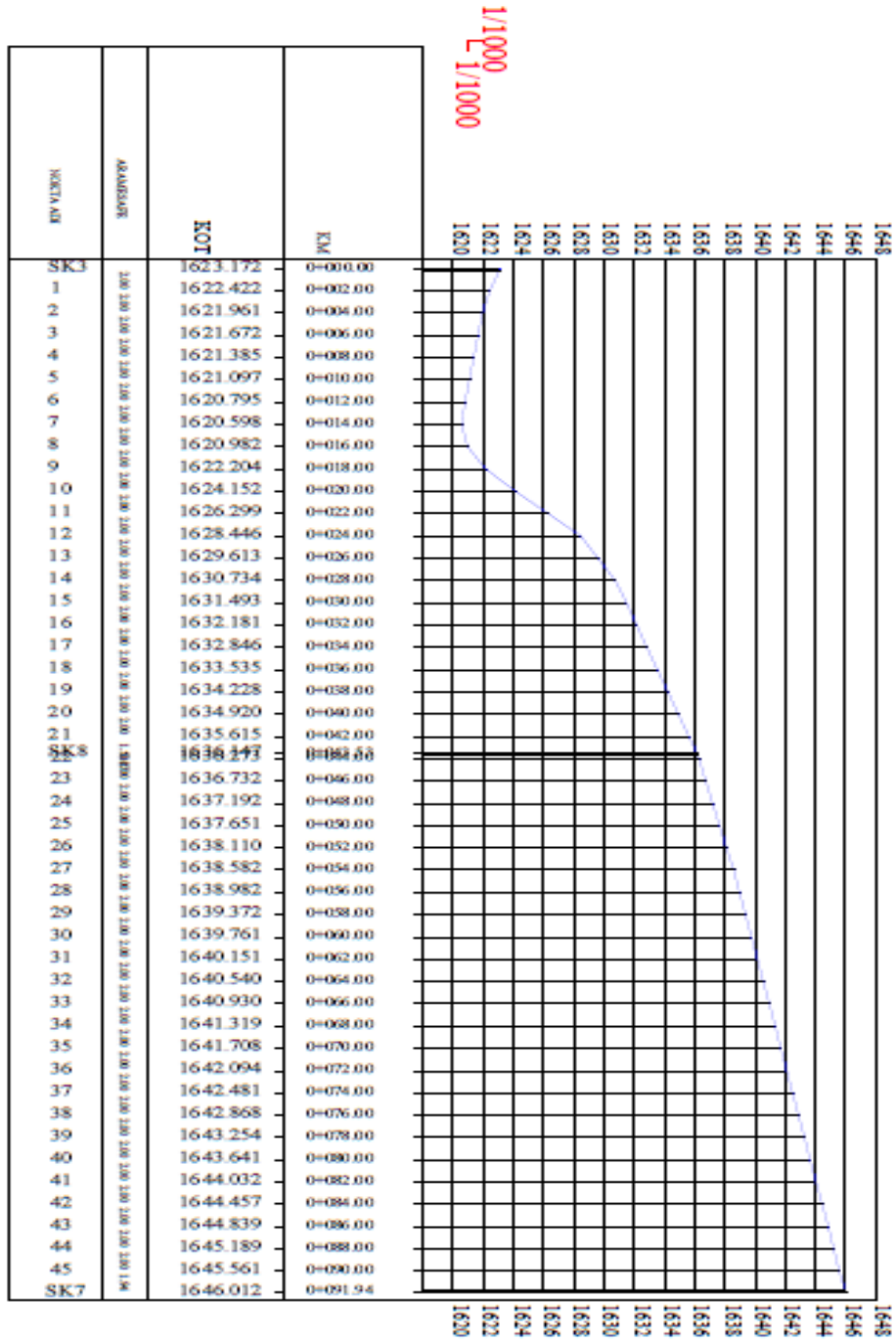
Yapılan korelasyonlara göre programda kullanılacak olan elastisite modülleri çizelge 5.8'e göre belirtilmiştir.

Çizelge 5.9 Elastisite Modülleri (Demirbaş, 2022)

SK-No	SPT N	$c_u=$	$E_u=$	$E_s=$
3	20.67	82.68	33072	19843.2
7	22.29	89.16	35664	21398.4
8	34.22	136.88	54752	32851.2

SK-3, SK-7 ve SK-8 kuyularının boy kesitleri

Belirlenen sondaj kuyularının boy kesitleri NetCAD programından alınmıştır. NetCAD programına bölgenin halihazır haritası işlenmiş olup istenilen bölgenin hem enkesiti hem de boykesiti alınmıştır. Alınan bu boykesit verilerine göre Plaxis programında sınır değerler ve arazinin boykesit yapısı işlenecektir. Arazimizin maksimum eğimi 43°'dir.



Şekil 5.8 Arazi Kesitinin Boykesiti

5.3. Plaxis 2D Programına İşlenen Veriler

Analizde pekleşen zemin modeli davranışı prensibini kabul eden hardening-soil modeli kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Çizelge 5.9. ve Çizelge 5.10. da verilmiştir.

Çizelge 5.10 8 No'lu Sondaj Kuyusu İçin Kullanılan Parametreler

SK-8 YASS: 6.5m	
Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	19
Doygun birim hacim ağırlık, $\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20
E_{50} elastisite modülü, (kN/m^2)	33000
E_{oed} elastisite modülü, (kN/m^2)	33000
E_{ur} elastisite modülü, (kN/m^2)	99000
Power (m)	0.8
Kohezyon, $c(kN/m^2)$	10
İçsel sürtünme açısı, $\phi(^{\circ})$	17.5
Dilatansi açısı, $\psi(^{\circ})$	0
Poisson oranı, ν	0.2

Çizelge 5.11 3 No'lu Sondaj Kuyusu İçin Kullanılan Parametreler

SK-3, YASS:6.5m	
Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	19.5
Doygun birim hacim ağırlık, $\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20.5
E_{50} elastisite modülü, (kN/m^2)	20000
E_{oed} elastisite modülü, (kN/m^2)	20000
E_{ur} elastisite modülü, (kN/m^2)	60000
Power (m)	0.8
Kohezyon, $c(kN/m^2)$	5
İçsel sürtünme açısı, $\phi(^{\circ})$	22.5
Dilatansi açısı, $\psi(^{\circ})$	0
Poisson oranı, ν	0.2

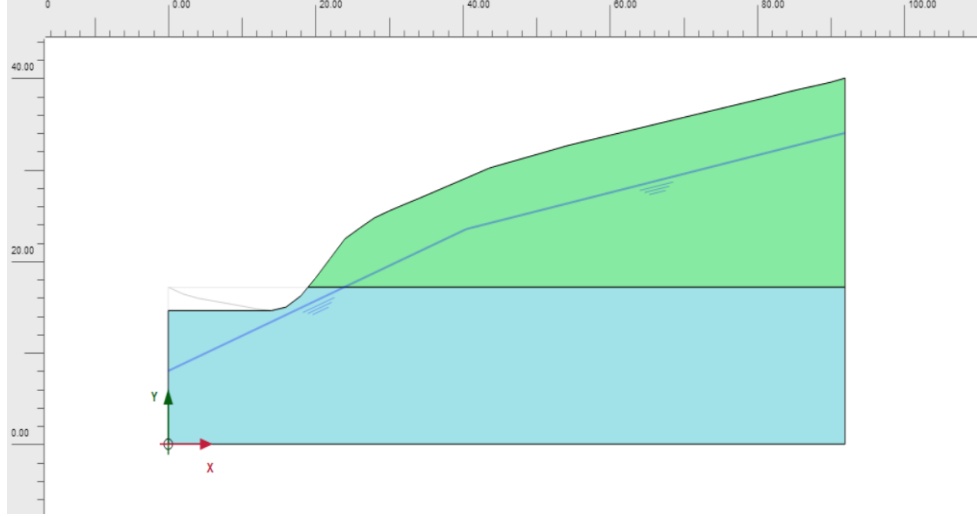
5.4.3. Modelin tanımlanması ve analiz aşaması

Plaxis 2D programında yapılan analizde genel olarak aşağıdaki adımlar izlenmiştir. Analiz statik analiz olarak yapılmıştır.

- “Düzlemsel Deformasyon (Plane Strain)” koşulları ve elemanlar 15 düğüm noktalı olarak seçilmiştir.
- kN, m, gün birimleri SI birim sistemine göre kullanılmıştır.
- Çalışma alanı sınırları genel ayarlar sekmesinden belirlenmiştir ve şev geometrisi çizilmiştir. Sınır koşullarından etkilenmeyecek şekilde çalışma alanı sınırları belirlenmiştir. (x_{min} : 0.00, x_{max} :92.00, y_{min} :0.00, y_{max} :150.00)
- Zemin özellikleri değerleri “Malzeme Ayarları (Material Sets)” komutu kullanılarak atanmıştır.
- Malzemenin davranışı UndrainedA olarak tanımlanmıştır.
- Ara yüzey elemanı “Arayüz (Interface)” kullanılmamıştır. Çünkü analizde herhangi bir temel etkileşimi yoktur.
- Programın önerdiği şekilde Dilatansi açısı (ψ) için $\phi-30$ formülü kullanılmıştır. İçsel sürtünme açımız 30 derecenin üzerinde olmadığı için 0 olarak alınmıştır.
- Sonlu elemanlar ağı “Ağ Oluşturma (Generate Mesh)” komutu ile oluşturulmuştur. Ortalama hassasiyette sonuçlar elde edilebilmesi için analizlerde sonlu elemanlar ağı “Orta (Medium)” olarak tanımlanmıştır.
- Yeraltı su seviyesi “Başlangıç Koşulları (Initial conditions)” bölümünde tanımlanmaktadır.
- K0 prosedürü uygulamadan “Başlangıç Koşulları (Initial conditions)” bölümünde analiz aşamasına geçilmiştir (Emir, 2005).

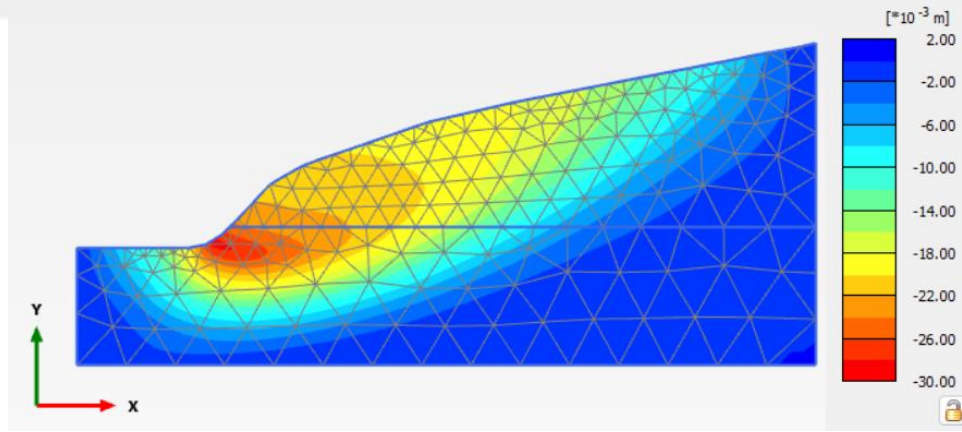
Zemin modelimiz eğimli olduğundan dolayı K₀ denilen başlangıç yüklemesi yerine ağırlık yüklemesi (gravity-loading) seçilerek analiz yapılmıştır.

Ağırlık yüklemesi (gravity-loading) prosedüründe zeminin başlangıç gerilmeleri hesaba katılmaz. Daha sonradan zemin gerilmelerini hesaba katıp analiz aşamasını tamamlar. Zemin katmanımız UndrainedA olarak tanımlandığı için “Drenajsız Davranışı Gözardı Et (Ignore Undrained Behavior)” seçeneği de tıklanmıştır. Bunun sebebi zeminin geometrisinde herhangi bir değişiklik yapılmadığından zeminin ilk aşamada drenajlı bir durumda olmasıdır.

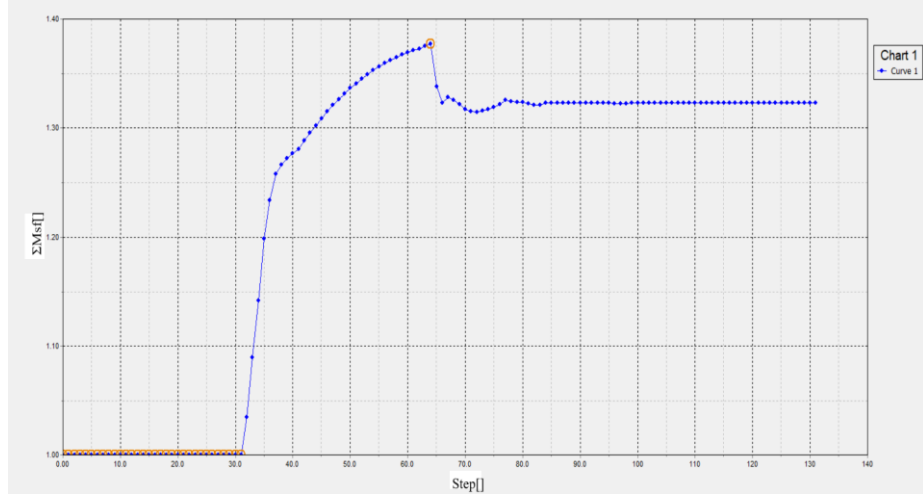


Şekil 5.9 Plaxis Programında Oluşturulan Model

Mevcut durumda yapılan analiz sonucunda güvenlik faktörünün 1.323 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca x yönündeki deformasyon durumu şekil 5.10’da görülmektedir. Deformasyon durumu çoğunlukla eğimin fazla olduğu kısımda oluşmuştur. Bu kısımdaki eğim daha önceden de belirtildiği gibi 43°’dir. Bu durumda şev güvenlidir.



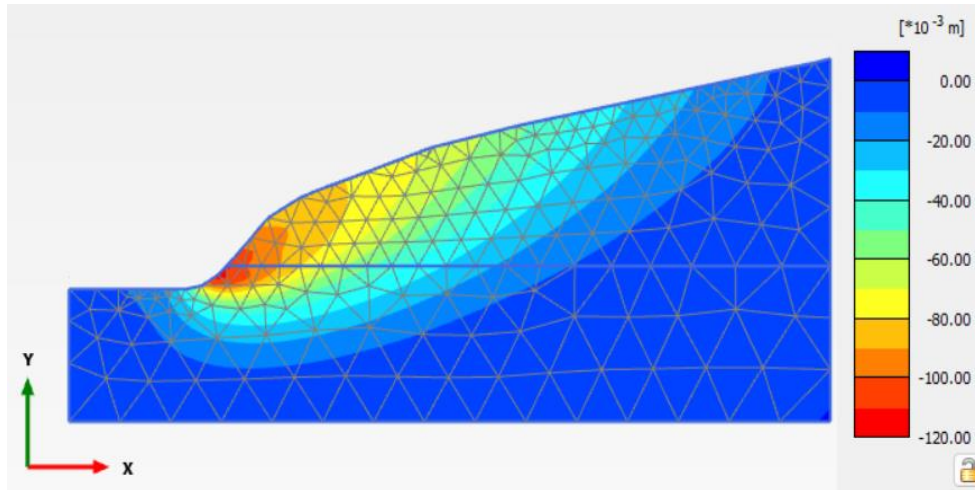
Şekil 5.10 Mevcut Durum Deformasyon Durumu Haritası



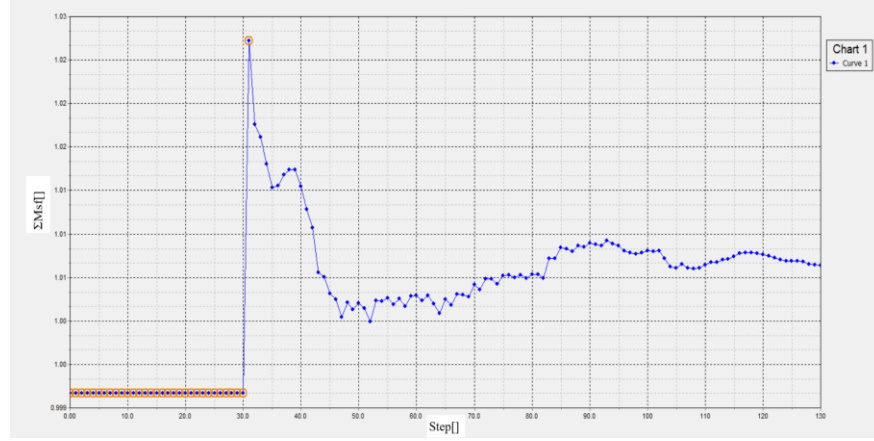
Şekil 5.11 Mevcut Durum Güvenlik Faktörü Grafiği

5.4. Drenajlı Durum Analizinde Güvenlik Faktörü

Şev modeli için aynı parametreler üzerinden drenajlı durum analizi yapılmıştır. Drenajlı durum analizi uzun dönem analizidir. Uzun dönemde zemin yapısının drenajlı olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Killi zeminlerin permeabilite katsayısı düşük olduğu için, yani geçirgenlik az olduğu için normal şartlarda drenajlı durum önerilmez. Fakat drenajlı durum verilerinin de incelenmesi için analizler yapılmıştır.



Şekil 5.12 Drenajlı Durum Deformasyon Durumu Haritası



Şekil 5.13 Drenajlı Durum Güvenlik Faktörü Grafiği

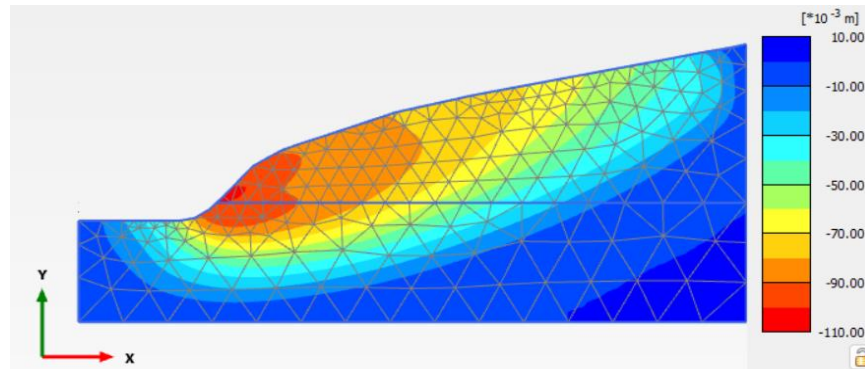
Analiz sonuçlarında göre güvenlik faktörü 1.009 çıkmıştır. Deformasyon durumu ise drenajsız duruma göre daha dar bir alanda yoğunlaşmıştır ve eğimin fazla olduğu yerdedir. Yapılan uzun dönem analizine göre şev, göçme sınırına çok yakındır ($G_s > 1$). Bu durumda yapısal önlemlerin alınması gerekmektedir.

5.5. İçsel Sürtünme Açısı ve Kohezyonun Güvenlik Faktörüne Etkisi

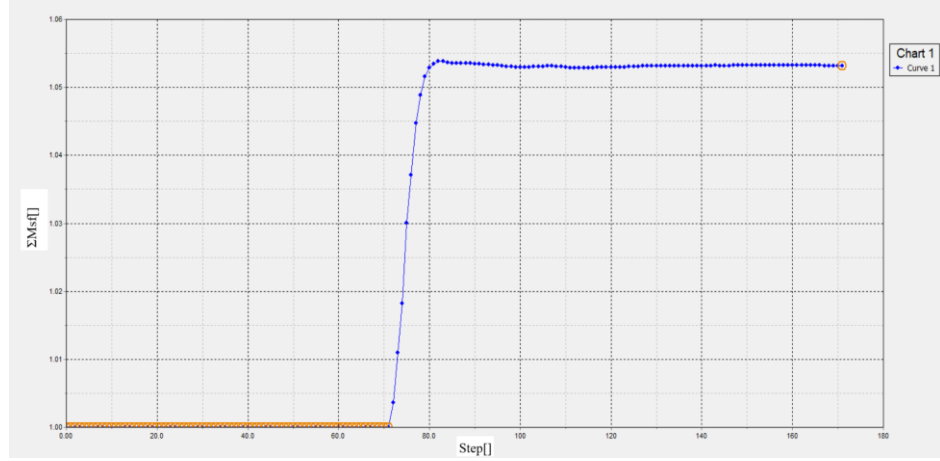
Mevcut durum için kullanılan kohezyon kuvveti ve içsel sürtünme açısı ayrı ayrı değiştirilip güvenlik faktörüne etkisi incelenmiştir. İçsel sürtünme açısı ve kohezyon zeminin cinsi, kıvamı ve su muhtevası ile ilgilidir. Zemindeki su muhtevası değeri arttıkça daneler arası sürtünme azalmaktadır. Dolayısı ile içsel sürtünme açısı ve kohezyon azalmaktadır.

Diğer parametrelerin sabit kalması şartı ile

içsel sürtünme açısı 5° azaltılmıştır.



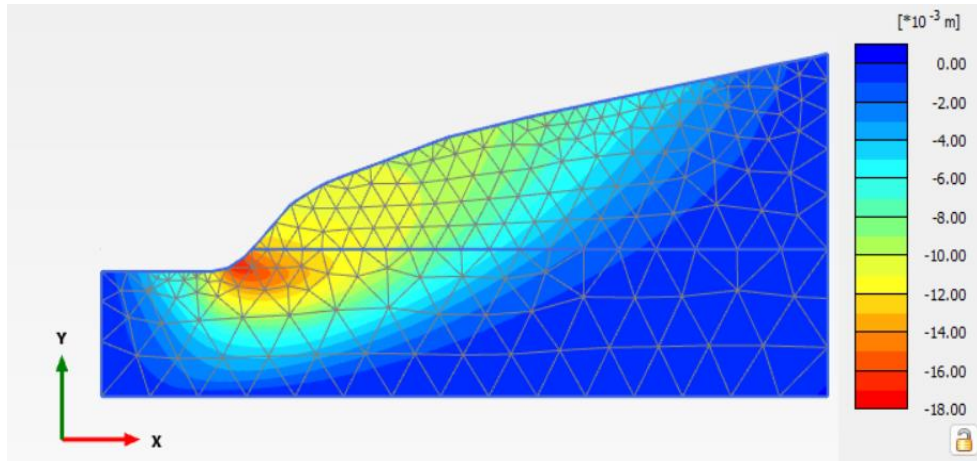
Şekil 5.14 İçsel Sürtünme Açısının 5° Azaltılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası



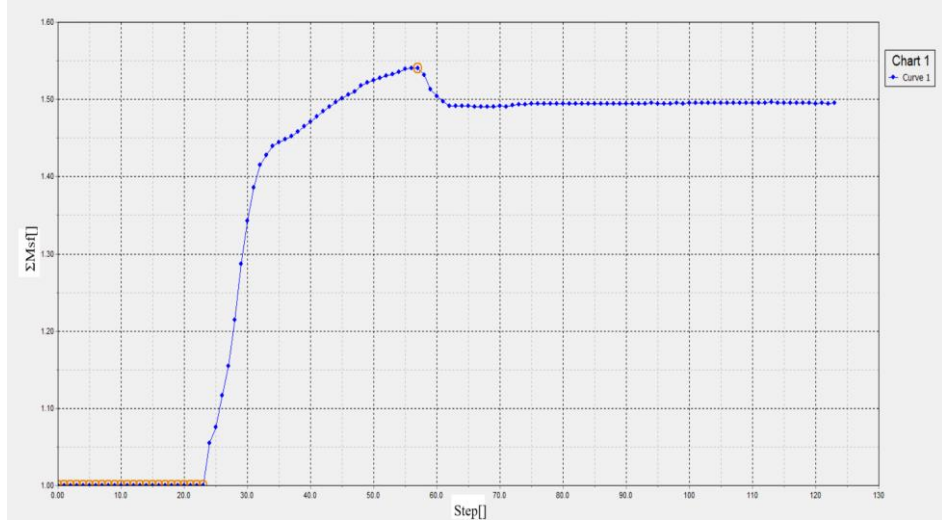
Şekil 5.15 İçsel Sürtünme Açısının 5° Azaltılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

İçsel sürtünme açısının 5° azaltılması durumunda güvenlik faktörünün 1.053 değerinde olduğu, yani kritik seviyede olduğu ($G_s > 1.0$) görülmektedir. Bu durumda şevin göçmesi muhtemeldir. Göçmeyi önlemek açısından yapısal önlemler alınması önerilmektedir.

Diğer parametrelerin sabit kalması şartı ile içsel sürtünme açısı 5° arttırılmıştır.



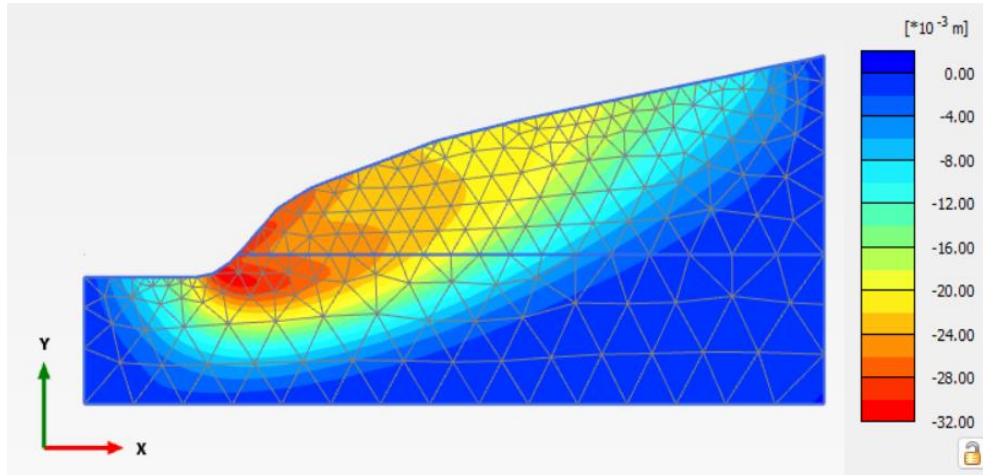
Şekil 5.16 İçsel Sürtünme Açısının 5° Arttırılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası



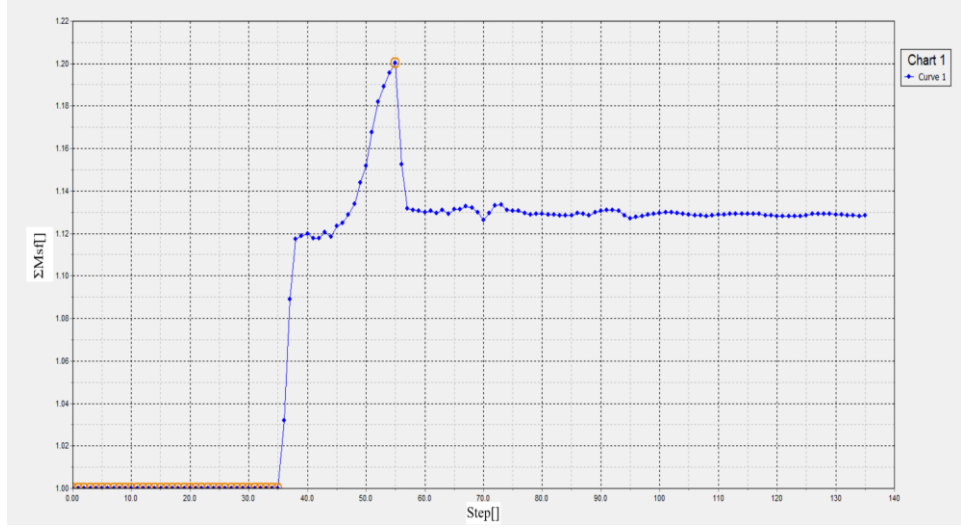
Şekil 5.17 İçsel Sürtünme Açısının 5° Arttırılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

İçsel sürtünme açısının 5° arttırılması durumunda güvenlik faktörünün 1.495 değerine kadar çıktığı görülmektedir. Bu durumda şev güvenli bir hale gelmiştir. Kayma dairesi ise daha geniş bir alana yayılmıştır. Birim deformasyon gözle görülür bir şekilde azalmıştır.

Kohezyon değerleri, diğer parametrelerin sabit kalması şartı ile 2 kPa azaltılmıştır.



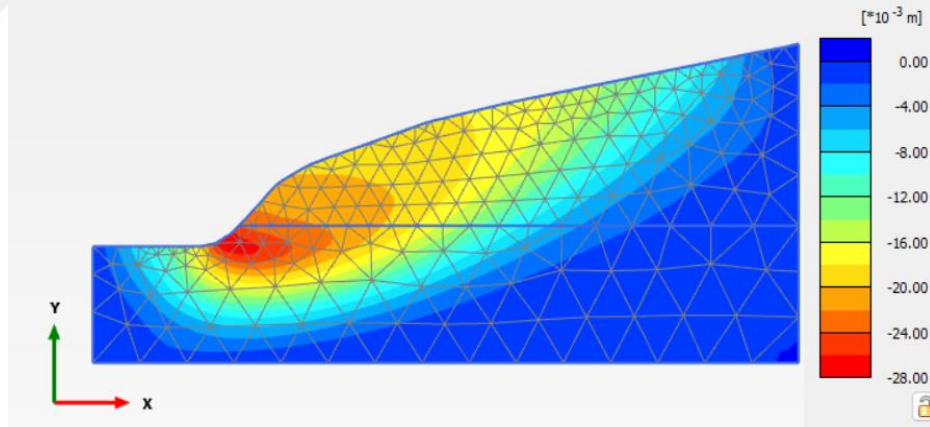
Şekil 5.18 Kohezyon Değerinin Azaltılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası



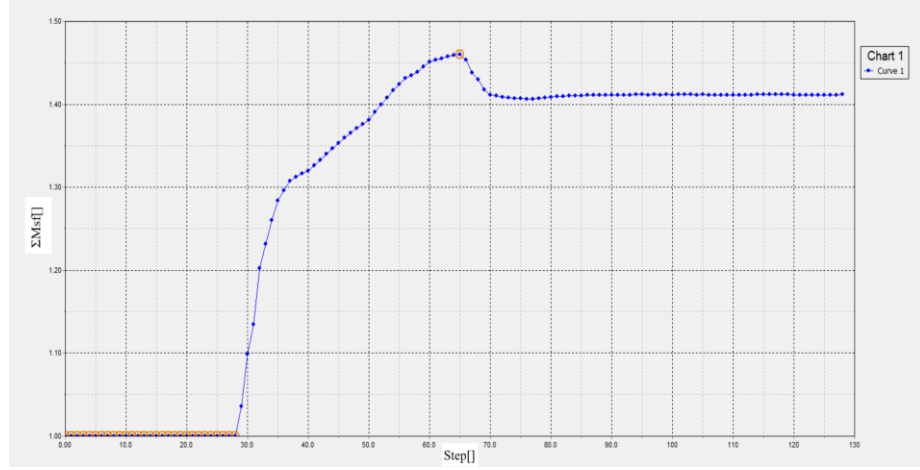
Şekil 5.19 Kohezyon Değerinin Azaltılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

Kohezyon değerinin azaltılması durumunda güvenlik faktörünün azaldığı görülmektedir. Güvenlik faktörü 1.130 değerinde olup kritik seviyenin üstündedir.

Kohezyon değerleri, diğer parametrelerin sabit kalması şartı ile 2 kPa arttırılmıştır.



Şekil 5.20 Kohezyon Değerinin Arttırılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası



Şekil 5.21 Kohezyon Değerinin Arttırılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

Kohezyon değerinin arttırılması durumunda güvenlik faktörünün de arttığı görülmektedir. Güvenlik faktörü 1.420 değerinde olup kritik seviyenin üstündedir. Ayrıca kayma dairesi de daha geniş bir alana yayılmıştır.

5.6.İstinat Duvarının Güvenlik Faktörüne Etkisi

Şev güvenliğini arttırmak için farklı tasarım yöntemlerine başvurulmuştur. Bunlardan ilki olan istinat duvarı tasarımı, kayma dairesi içerisinde farklı yerlere konumlandırılarak güvenlik faktörüne etkisi belirlenmiştir.

İstinat duvarı için kullanılacak dolgu malzemesi iyi derecelenmiş çakıldır (GW). Dolgu malzemesi tarafımızca belirlenmiştir. Derecelendirme durumu üniformalık katsayısı C_u ve derecelenme katsayısına C_c göre hesaplanır. Bu katsayılar için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır. Ayrıca Çizelge 4.1. de detayları verilmiştir.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Uniformalık katsayısı;}$$

D_{10} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %10'unun tekabül ettiği dane büyüklüğü

D_{60} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %60'ının tekabül ettiği dane büyüklüğü

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad \text{Derecelenme katsayısı;}$$

D_{10} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %10'unun tekabül ettiği dane büyüklüğü

D_{30} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %30'unun tekabül ettiği dane büyüklüğü

D_{60} : Elek analizinde elekten geçen malzemenin %60'ının tekabül ettiği dane büyüklüğü

İyi derecelenmiş iri daneli zemin için $C_U > 6$, $1 < C_c < 3$ olmalıdır.

Dolgu için kullanılan parametreler Çizelge 5.11.'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 Dolgu Tabakası Parametreleri

Dolgu Tabakası (GW)	
Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	19
Doygun birim hacim ağırlık, $\gamma_{sat}(kN/m^3)$	20
E_{50} elastisite modülü, (kN/m^2)	75000
E_{oed} elastisite modülü, (kN/m^2)	75000
E_{ur} elastisite modülü, (kN/m^2)	225000
Power (m)	0.5
Kohezyon, $c(kN/m^2)$	5
İçsel sürtünme açısı, $\phi(^{\circ})$	34
Dilatansi açısı, $\psi(^{\circ})$	4
Poison oranı, ν	0.2

İstinat duvarı, programda tabaka (plate) eleman olarak tanımlanır. Tabaka (plate) eleman parametrelerinin hesapları aşağıdaki gibi yapılır. TS500'e göre C30 betonun elastisite modülü 32 GPa olarak alınmıştır.

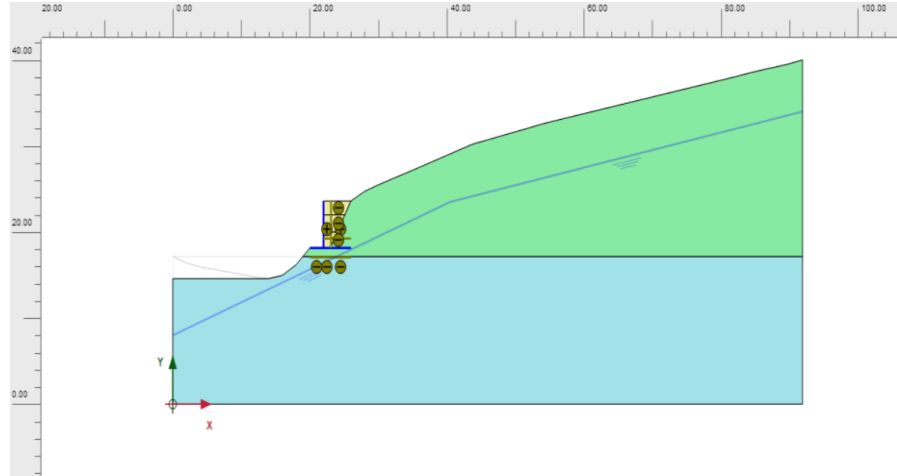
Betonarme Eleman Alanı: $A = 0.7 \times 1 = 0.7 \text{ m}^2$

$$EA = 32.000.000 \times 0.7 \times 1 = 22.400.000 \text{ kN/m} \quad (5.4.)$$

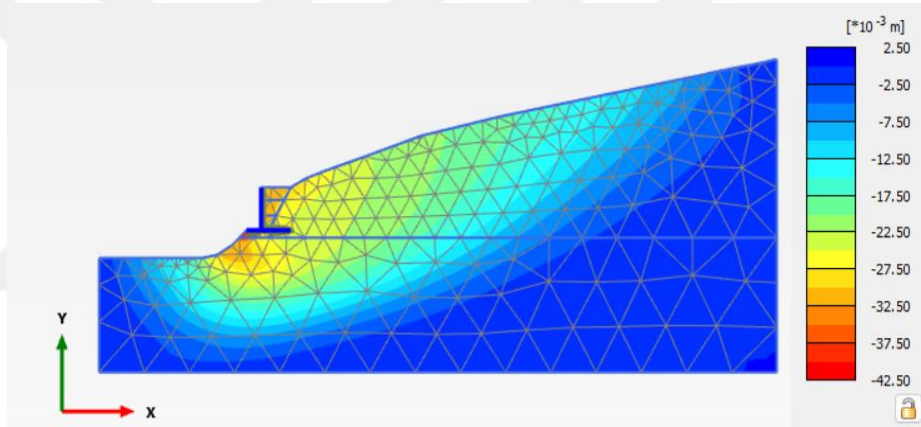
Eleman Atalet Momenti: $I = \frac{bxh^3}{12} = \frac{1 \times 0.7^3}{12} = 0,0286$

$$EI = E \frac{bxh^3}{12} = 32.000.000 \frac{1 \times 0.7^3}{12} = 914.666,667 \text{ kNm}^2/\text{m} \quad (5.5.)$$

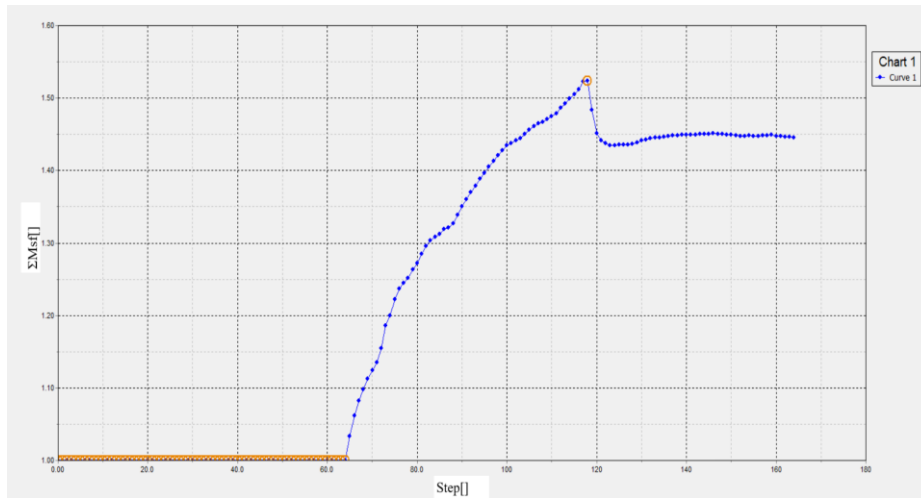
$$w = (24 - 18) \times 0.7 = 4.2 \text{ kN/m/m} \quad (5.6.)$$



Şekil 5.22 Programa Çizilen Model



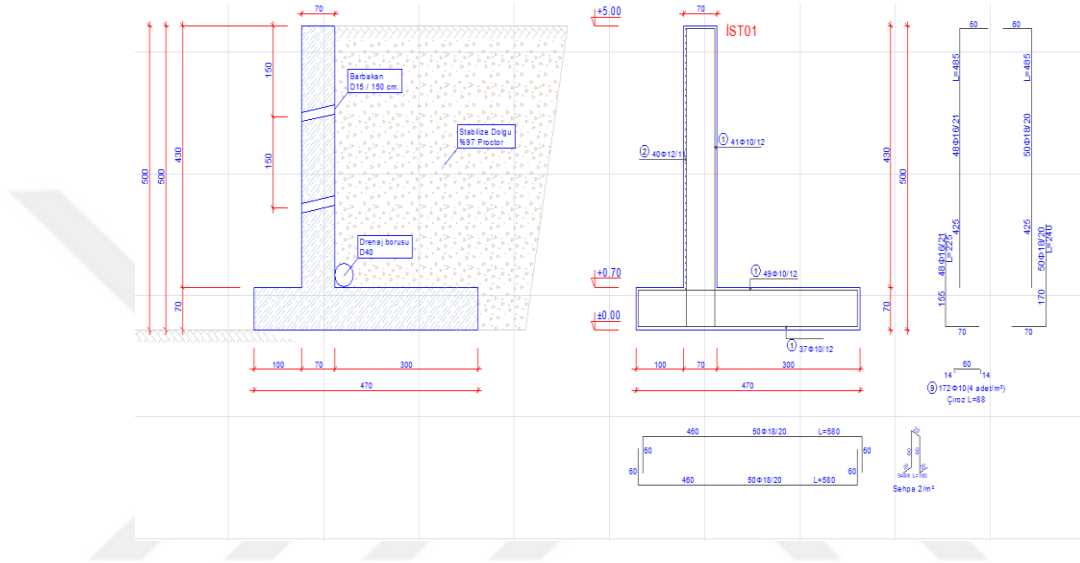
Şekil 5.23 İstinat Duvarı Yapılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası



Şekil 5.24 İstinat Duvarı Yapılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

Yapılan istinat duvarı sonucunda yanal deformasyonların önemli ölçüde giderildiği görülmektedir. Güvenlik faktörünün ise 1.300 değerinden 1.45 değerlerine kadar çıktığı belirlenmiştir. Yapılan dayanım yapısı sonucu şevimiz daha güvenli hale gelmektedir.

İdeCAD programı yardımı ile donatı analizi de yapılmıştır. Zemin parametreleri AFAD sitesinden çekilmiş olup donatı detayı Şekil 5.26.'da verilmiştir.

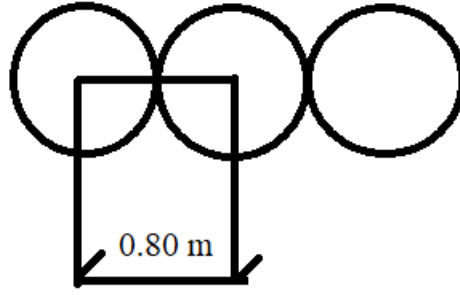


Şekil 5.25 İstinat Duvarı Donatı Detayı

5.7. Teğet Kazıkların Güvenlik Faktörüne Etkisi

Şev güvenliğini sağlamak ya da arttırmak amacı ile imal edilen teğet kazıklar, programda tabaka (plate) eleman olarak tanımlanır. Tabaka (plate) eleman parametrelerinin hesapları aşağıdaki gibi yapılır. C30 betonunun elastisite modülü TS500'e göre 32 GPa'dır. Fakat hesaplamalarda 30 GPa olarak alınmıştır. Bunun sebebi imalat esnasında tiremi borusu kullanılmaması ihtimalidir. Tasarımımızı teğet kazık olarak yapmaktayız.

Çalışmada 80 cm çapında ve 12 m boyunda imal edilecek teğet kazıklar tanımlanmıştır. Plaxis modelinde tanımlanan kazıkların yerleşim planı şekil 5.26'de verilmiştir.



Şekil 5.26 Teğet Kazık Örneği

$$\text{Kazık Alanı: } A = \frac{0.8^2 x \pi}{4} = 0,503 \text{ m}^2 \quad (5.7.)$$

$$\text{Etkin Alan: } A = \frac{0.8^2 x \pi}{4} / 0.8 = 0,628 \text{ m}^2 / \text{m} \quad (5.8.)$$

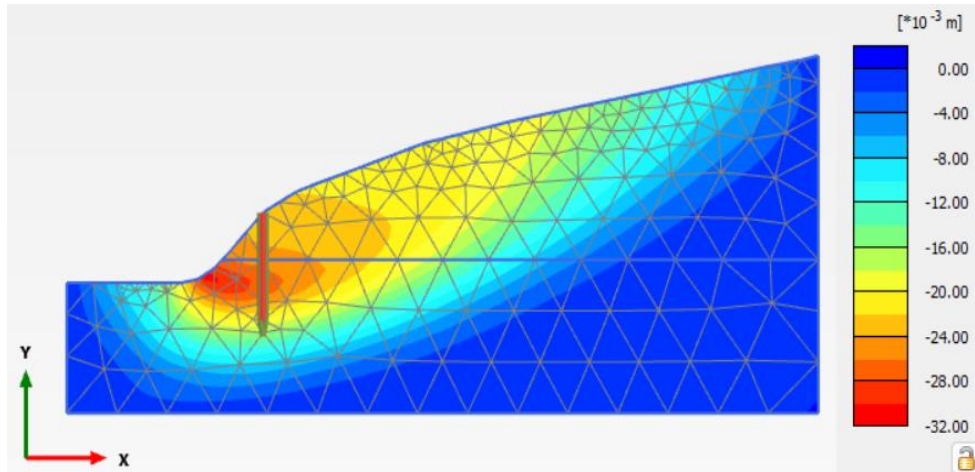
$$EA = \frac{30.000.000 x \frac{0.8^2 x \pi}{4}}{0.8} = 18.849.555,92 \text{ kN/m} \quad (5.9.)$$

$$\text{Kazık Atalet Momenti: } I = \frac{D^4 x \pi}{64} = \frac{0.8^4 x \pi}{64} = 0,0201 \quad (5.10.)$$

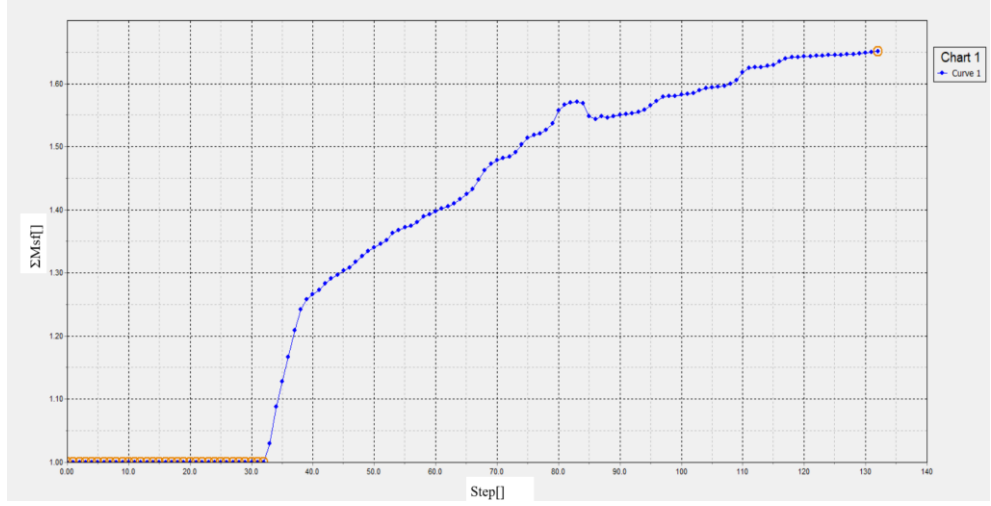
$$\text{Etkin Atalet Momenti: } I = \frac{D^4 x \pi}{64} / 0.8 = \frac{0.8^4 x \pi}{64} / 0.8 = 0,0251 \quad (5.11.)$$

$$EI = E \frac{D^4 x \pi}{64} = \frac{30.000.000 \frac{0.8^4 x \pi}{64}}{0.8} = 753.982,24 \text{ kNm}^2 / \text{m} \quad (5.12.)$$

$$w = (24 - 18) x 0.69 = 4.1568 \text{ kN/m/m} \quad (5.13.)$$



Şekil 5.27 Teğet Kazık Yapılması Durumunda Oluşan Deformasyon Haritası

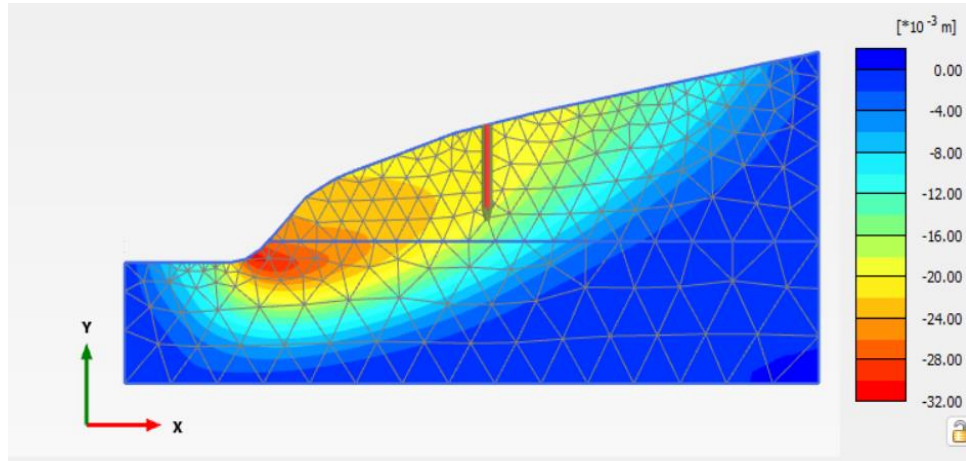


Şekil 5.28 Teğet Kazık Yapılması Durumunda Güvenlik Faktörü Grafiği

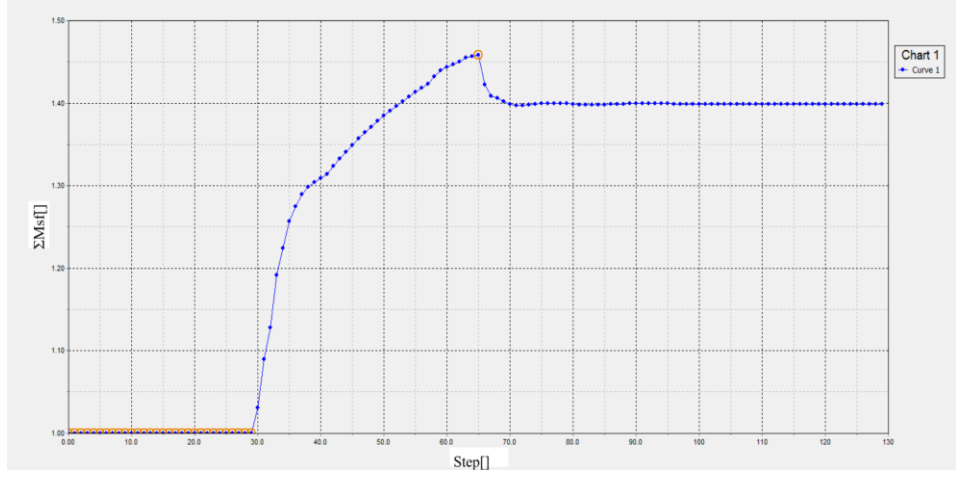
Yapılan kazık imalatı sonucunda kayma dairesinin önemli ölçüde değiştiği ve güvenlik faktörünün ise istinat duvarlı imalattan da yüksek olduğu görülmektedir. Güvenlik faktörü 1.650 değerine ulaşmış olup şevimizin güvenliği daha fazla sağlanmıştır.

5.7.1. Kazığın konumunun güvenlik faktörüne etkisi

80 cm çapında 12m boyunda yapılacak olan kazığımızı şevimizin orta kısımlarında imal edip bunun güvenlik faktörüne ve kayma dairesine etkisi incelenmek istenmiştir. Yapılan kazık imalatının parametrelerinde değişiklik olmamıştır.



Şekil 5.29 Teğet Kazığın Konumunun Deformasyona Etkisi



Şekil 5.30 Teğet Kazığın Konumunun Güvenlik Faktörüne Etkisi

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yapılan kazığın konumunun değiştirilmesi ile deformasyon durumu da değişmiştir. Ayrıca güvenlik faktörünün de 1.400 seviyelerine kadar indiği görülmüştür. Yapılması gereken kayma dairesinde kritik konuma kazık imalatının yapılmasıdır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Hakkari Üniversitesi Zeynel Bey Yerleşkesinde sık sık meydana gelen şev göçmeleri ile ilgili sonlu elemanlar yöntemi ile Plaxis programına veriler işlenerek analizler yapılmıştır. İncelenen bölgenin seçiminde Sondaj verileri kullanılarak SPT-N verilerine bağlı en kötü bölge seçilmiştir. Analizi yapılan bölgenin eğimi 43°'ye kadar çıkmaktadır ve zemin tipi genel olarak kilden oluşmaktadır. Yaşanılan göçmelere bir çözüm olması amaçlanan tezimizde önceden yapılmış olan sondaj çalışmalarının verileri alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Eksik bulunan veriler ise korelasyonlarla bulunmuştur. Alınan parametreler programa işlenip çeşitli senaryolar oluşturulmuştur.

Çalışma bölgesinin batı ve kuzey yönünde bulunan yollar kısmi olarak şev etki alanı içerisinde bulunmaktadır. Çalışmamızda güvenlik faktörü sınırimız 1.3 olarak alınmıştır. Güvenlik faktörünün 1.3 alınmasının sebebi çalışma bölgesinin yaşamsal tehlikelere ve yapısal hasarlara yol açmayacak bir bölgede bulunmasıdır.

Tez çalışması kapsamında zeminin dayanım parametreleri değiştirilerek senaryolar oluşturulmuştur. Ayrıca dayanım yapıları yapılarak şev güvenlik faktörü irdelenmiştir.

- Yapılan analiz sonucunda mevcut veriler ile güvenlik faktörü 1.323 bulunmuştur. Mevcut durumda şevin güvenli olduğu saptanmıştır.
- Şev analizimiz uzun dönem analizi ile hesaplandığında güvenlik faktörünün göçme sınırında olduğu görülmüştür. Güvenlik faktörünün 1.009 olarak hesaplanan şevde yapısal önlemler alınması gerekmektedir.
- İçsel sürtünme açısının, diğer parametreler sabit kalmak şartıyla, azaltılması sonucu güvenlik faktörü 1.053 değerinde olduğu ve göçme sınırında olduğu görülmüştür. Bu durumda önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Zemindeki mukavemet parametrelerinin arttırılması ile güvenlik faktörü de yaklaşık %40 artmaktadır.
- Yapılan dayanım yapıları ile güvenlik faktöründe artış meydana gelmiştir. Özellikle yapılan teğet kazık imalatı sonucunda güvenlik faktörünün 1.650 değerine ulaştığı görülmüştür.

Zeminin eğimli yapısı nedeni ile göçmeye müsait olan bölgede şev göçmeleri açısından önlemler alınması gerekmektedir. Bölgede öncelikli olarak drenaj ağı sistemi ile su uzaklaştırılabilir. Çalışma bölgesi için drenaj ağı sistemi ile ilgili çalışmalar önceden yapılmıştır. Dayanım yapıları ile güvenlikler artırılıp göçmeler önlenir.

Bölgede şev analizi için daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir. Yapılacak olan bu çalışmada sondaj verileri büyük önem arz etmektedir. Alınacak olan numunelere daha fazla deneyler yapılabilir ve daha gerçekçi parametreler elde edilebilir. Bölgede yapılan şev analizi, farklı programlara işlenip analiz edilebilir. Ayrıca farklı dayanım yapıları ile şev güvenlik faktörü elde edilebilir.



KAYNAKÇA

- Akçakal, Ö. (2009). Şev Stabilitesi Analizinde Geri Hesap Yöntemi Ve Bir Vaka Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akçakal, Ö. (2009). Şev Stabilitesi Analizinde Geri Hesap Yöntemi Ve Bir Vaka Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arama, A., Akın, M., & Çinicioğlu, S. (2018). Komşu zemin yapılarının parametrik analizi “dolgu-şev etkileşimi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(2):109-128.
- Arioğlu, E., & Tokgöz, E. (2005). *Çözümlü Problemlerle Şev Stabilité Analizi*. İstanbul: Evrim Yayınevi.
- ASTM. (1999). *Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling*. Philadelphia.
- Bardet, J. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. New Jersey.
- Başer, H. F. (2021, 01 24). *Türkiye'de son 90 yılda 1343 kişi heyelan nedeniyle hayatını kaybetti. Anadolu Ajansı*: <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/turkiyede-son-90-yilda-1343-kisi-heyelan-nedeniyle-hayatini-kaybetti/2120967> adresinden alındı
- Bodur, M., Özbek , A., & Kop, A. (2012). *T.C. Hakkari Üniversitesi Yerleşke Alanının Jeolojik ve Jeoteknik Açısından Değerlendirilmesi*. Hakkari.
- Bol, E., Özocak , A., & Sert, S. (2017). Kazıklı iksa sistemi ile şev duraylılığının sağlanması. *Sakarya University Journal of Science*, 21(5): 860-870.
- Bromhead, E. (1986). *The Stability of Slopes*. Surrey University Press, A.B.D, 102-123.
- Budhu, M. (2007). *Soil Mechanics Fundamentals*. John Wiley and Sons, Second edition. Canada.
- Coduto, D. (2006). *Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar*, (Çev: M. Mollamahmutoğlu, K. Kayabalı). Gazi Kitabevi.

- Çetin, K. Ö. (2018, 11 08). Geoteknik ve Sayısal Modelleme Sunumu, Ortadoğu Teknik Üniversitesi. İzmir.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, USA.
- Davis, T. (2008). Geotechnical Testing, Observation and Documentation. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Demirbaş, G. (2022). Geoteknik Uygulamalar İçin Plaxis 2D V20 Eğitimi.
- Duncan, J. M. (2014). Soil Strength And Slope Stability. John Wiley & Sons, United States Of America: 125-134p.
- Duncan, J., & Wright, S. (2005). *Zemin Şevlerinin Duraylılığı*. Çeviri: Prof. Dr. Kâmil Kayabalı.
- Emir, A. S. (2005). Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Statik ve Dinamik Yüklere Göre Tasarımı. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 227s.
- Ersoy, Ş., Nurlu, M., Gökçe , O., & Özmen, B. (2017). 2016 Yılında Dünyada ve Türkiye’de Meydana Gelen Doğa Kaynaklı Afet Kayıplarının İstatistiksel Değerlendirmesi. Mavi Gezegen, 22, 13-27.
- Fırat, S., & Canik, B. (2014). Şev İyileştirmelerinde Kullanılan Kazıklara Uygulanan Deprem Etkisi. Politeknik Dergisi, 17(1): 31-34.
- Gökoğlu, Ö. (2015, Ocak). Doygun Olmayan Zeminlerde Şev Stabilite Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Huvaj, N. (2017). Şev Stabilesi Geoteknik Kurs Notları. İstanbul, 1-90s: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- İRAP. (2021). İl Afet Risk Azaltma Planı, Hakkari İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Hakkari. Hakkari.
- Kahraman, C. (2012). Hakkari İli Merkez İlçesi – Kıran Mahallesi Hakkari Üniversitesi Zeynel Bey Yerleşkesine AİT 30L2c, 30M1d, 30L3b ve 30M4a Paftalarında, 179 Ada ve 3-6-7-8-9-11-13-14-15-16-17-20-26-27-28-29-30-31-36-50-51-52-56 Parseller, 181 Ada 1 Parsel ve 182 Ada 1 No. Hakkari.
- Kahyaoglu, M., İmançlı, G., & Özden, G. (2009). Şev Stabilesi Kazıklarına Etkiyen Yatay Yüklerin Belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2): 194-202.

- Kara, H. (1980). Heyelanlar ve Deve bağirtan Heyelanları Üzerine Bir Araştırma. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kramer, L. S. (tarih yok).
- Kramer, L. S. (2003). *Geoteknik Deprem Mühendisliği*. Ankara: (Çev: K. Kayabalı), Gazi Kitabevi, 1. Baskı.
- Mısır, G. (2018). Şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1): 429-438.
- Morrison, I., & Greenwood, J. (1989). Assumptions in Simplified Slope Stability Analysis by The Method of Slices. *Geotechnique*, p: 39-3, 503-509.
- Moudabel, O. A. (2013). Slope Stability Case Study By Limit Equilibrium and Numerical Methods. Libya p. 69.: Oklahoma State University, Doctoral dissertation.
- Natur, O. (2018). Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri ve Bir Vaka Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Diyarbakır: Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Olgun, M., & Acar, M. (2009). Deprem kuvvetleri etkisi altındaki şevlerin stabilitesini etkileyen faktörlerin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24(2): 9-20.
- Önalp, A., & Arel, E. (2004). *Geoteknik Bilgisi II: Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği*. Birsan Yayınevi.
- Öz, E. (2007). Şev Stabilitesi Ve Mühendislik Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*. Kayseri: Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özüdoğru, K., Tan, O., & Aksoy, İ. (1997). *Çözümlü Problemlerle Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsan Yayınevi.
- Pınarlık, M., Kardoğan, P., & Demircan, R. (2017). Şev Stabilitesine Zemin Özelliklerinin Etkisinin Limit Denge Yöntemi İle İrdelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3): 675-684.
- PLAXİS 2D Referance Manuel. (March 05.2020).
- PLAXİS Materail Model CONNECT Edition V20.02. (tarih yok).

- Poulos, H., & Small, J. (2000). Development of Design Charts for Concrete Pavements and Industrial Ground Slabs, Design Applications of Raft Foundations, Hemsley, J.A., Thomas Telford, 39 – 70. London.
- Schuster, R. (1996). *Socioeconomic Significance of Landslides*. Landslides: Investigation and Mitigation, Washington: Transportation Research Board, Special Report 247, 12-35.
- Sowers, G. F. (1979). Introductory Soil Mechanics and Foundation. 4th edition, Macmillan, NewYork.
- Spencer, E. (1967). A Method Of Analysis Of The Stability Of Embankments Assuming Parallel İnter-Slice Forces, *Geotechnique*, 17(1), 11-26p.
- Sürücü, B. (2022). Gevşek Zeminlerde Oluşmuş Heyelan Riski Bulunann Şevlerin Tasarımı Ve Projelendirilmesi Üzerine Bir Vaka Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İzmir: Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Taşkıran, T., Yavuz, V., & Keskin, M. (2015). Şev stabilitesinin iki ve üç boyutlu modeller ile incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 6(1): 1-8.
- TBDY 2018. (tarih yok). Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar.
- Tekin, Ç. (2011). Sonlu Elemanlar Ve Limit Denge Yöntemleri İle Şev Stabilitesi Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of landslides*.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons. Inc., New York.
- Toğrol , E., & Tan, O. (2003). *Kazıklı Temeller*. İstanbul, 142s.: Birsen Yayınevi.
- Tonyalı, İ. (2011). Laboratuvar Arazi ve Jeofizik Deney Sonuçarını Kullanan Zemin Taşıma Gücü Hesap Yöntemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, syf 18-19.
- Ulusay, R., & Sönmez, H. (2007). *Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: Ankara, 289s.

- USACE. (1990). *Engineering and Design: Settlement Analysis. CECW-EG EM1110-1-1904. Department of the Army, U.S. Army Corps. of Engineers, Washington DC, 20314-1000, 30 September .*
- Ün, B. (2019). Şev Stabilitesi ve Şev Hareketlerine Karşı Alınacak Önlemler. *Yüksek Lisans Tezi*. Adana: Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes, Chapter 2 in *Landslides: Analysis*, Transportation Research Board, Highway Research Council, 1-23p.
- Yalçinkaya, E. (2019). Şev Stabilitesi Analizinde Bir Vaka Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Yıldırım, S. (2004). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*. İstanbul: Birsen yayınevi, 471s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Kadir BOSTANCI

Doğum Yeri ve Tarihi :

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik
Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : Hakkari Üniversitesi İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı

Yabancı Diller : İngilizce

İLETİŞİM

E-Posta Adresi :

Tarih :.../.../....