

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Buse N

**ŞEV STABİLİTESİ VE ŞEV HAREKETLERİNE KARŞI
ALINACAK ÖNLEMLER**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2019

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEV STABİLİTESİ VE ŞEV HAREKETLERİNE
KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER**

Buse ÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez / /2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Prof.Dr.A.Azim YILDIZ
DANIŞMAN

.....
Doç. Dr. Murat ÖRNEK
ÜYE

.....
Dr. Öğr.Üyesi Baki BAĞRIAÇIK
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ŞEV STABİLİTESİ VE ŞEV HAREKETLERİNE
KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER**

Buse ÜN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Yıl: 2019, Sayfa: 103
Jüri : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Doç. Dr. Murat ÖRNEK
: Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK

Bir şevin bütünsel stabilitesini; şevin yüksekliği, eğim açısı, şev üzerinde bulunan yükün değeri ve konumu, zemin davranışı ve özellikleri, kaymayı önleyici yapının varlığı etkilemektedir. Bu çalışmada, bir şev modeli üzerinde bu etkileri incelemek için parametrik çalışma kapsamında bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında şev güvenliği değeri her durum için ayrı ayrı karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve sonuçlar grafiklerle sunulmuştur. Çalışmanın devamında vaka incelemesine yer verilmiştir. Üzerinde yol inşaatı bulunan ve kayma potansiyeli yüksek olan şev ele alınmıştır. Arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen verilerle Plaxis ve Slide programları kullanılarak arazi mevcut durumu simüle edilmiştir. Analiz sonuçlarının arazinin mevcut durumunu yansıttığı görülmüştür. Şev hareketini önlemeye yönelik örnek uygulama ve yapılabilecek diğer çalışmalara değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, Geri analiz, Ağırlık yükleme, Slide V.6.0, Plaxis 2D.

ABSTRACT

MSc THESIS

SLOPE STABILITY AND PRECAUTIONS AGAINST SLOPE MOVEMENTS

Buse ÜN

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Year: 2019, Pages: 103
Jury : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Assoc. Prof. Dr. Murat ÖRNEK
: Asst. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK

The height of the slope, the value and position of the load on the slope, inclination angle, soil behavior and properties, non-slip structure affect the overall stability of a slope. In this study, a series of analyzes were performed within the scope of a parametric study to examine these effects on a slope model. In the analysis results, the slope safety value was examined separately for each case and the results were presented with graphs. Case study is included in the study. Slope with road construction and high shear potential was studied. The current situation of the land was simulated by using Plaxis and Slide programs with the data obtained from field and laboratory studies. The results of the analysis reflect the current situation of the land. Sample application and other studies to prevent slope movement are mentioned.

Keywords: Slope stability, Back analysis, Gravity loading, Slide V.6.0, Plaxis 2D.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Şev stabilitesine etki eden faktörleri anlamak, inşa edilen yapıların güvenli olması konusunda büyük önem taşımaktadır. Şev hareketlerini incelemek; şev tasarımında, inşa ve onarım işlerinde kullanılacak önemli bilgilerin elde edilmesini sağlar.

Şev hareketlerine karşı alınan önlemlerle hareketinin sebep olacağı zararın önüne geçilebilir. Zeminin mühendislik özellikleri, topoğrafya, tabii faktörler, yer altı ve yer üstü sularının durumu göz önünde bulundurularak uygun tasarım önerilebilir.

Şevlerde stabilite incelemesinde birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge yöntemleri en yaygın kullanıma sahip yaklaşımlardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini esas alan “Plaxis” ve limit denge yöntemlerini kullanan “Slide” programları kullanılmıştır.

Bir şevin bütünsel stabilitesini; şevin yüksekliği, eğim açısı, şev üzerinde bulunan yükün değeri ve konumu, zemin davranışı ve özellikleri, kaymayı önleyici yapının varlığı etkilemektedir. Plaxis 2D V.8 programı üzerinde, şev güvenliğini incelemek için örnek modeller oluşturulmuştur. Zemin parametreleri ve geometrisi sabit tutularak; yük değeri, yükün konumu, diyafram duvarın konumu ve zemin davranışı özelliği değiştirilmiştir. Daha sonra benzer şekilde tüm zemin parametreleri sabit tutularak şev yüksekliği (eğim sabit) ve sonra eğim açıları değiştirilmiştir. Farklı özellikteki iki tabaka halinde oluşturan bir başka şev modelinde tabaka kalınlıkları değişimi ile analizler tekrarlanmıştır. Her bir faktör için ayrı başlık altında analizler yapılmıştır. Şev davranışını anlamak için yapılan bu örnek uygulamada analiz sonuçları güvenlik sayıları baz alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar grafik ve tablolar ile sunulmuştur.

Ayrıca Slide programı ile tekrarlanan analizlerde güvenlik sayılarının birbirlerine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın devamında vaka incelemesine yer verilmiştir. Bir yarma üzerinde bulunan yol güzergâhının heyelandan korunarak güvenli hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan arazi çalışmaları ile laboratuvar deneyleri ile yarmaya ait analiz parametreleri belirlenmiş, şev hareketini önlemeye yönelik uygun geoteknik tasarımın oluşturulması üzerinde durulmuştur. Yapılan analizlerde kaymayı önleyici yapı olarak fore kazık kullanılmıştır. Belirlenen kritik kesitler üzerinde çok sayıda analiz gerçekleştirilmiştir. Uygulama için farklı uygulama ve önerilere değinilmiş ve en uygun bulunan sonuçlar sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince, yardımlarını esirgemeyen, çalışmamın her aşamasında yapıcı ve yönlendirici fikirleriyle bana daima yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Yardım ve destekleri için tüm değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan moral ve motivasyonumu yüksek tutmama yardımcı olan biricik eşim İnş. Müh. Özkan Hilmi ÜN'e ve biricik kardeşim Tuğçe YÜZEREROĞLU'na teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her aşamasında yanımda olan bu günlere gelebilmem için her türlü fedakârlığı yapan annem Çiğdem YÜZEREROĞLU'na ve babam Tufan YÜZEREROĞLU'na tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1. Genel.....	11
3.2. Şevle İlgili Kavramlar ve Şev Hareketi Tipleri.....	11
3.2.1. Şevle ilgili kavramlar	11
3.2.2. Şev Hareket Tipleri	12
3.3. Şev Hareketine Neden Olan Etkenler	14
3.3.1. Kayma Gerilmesinin Artmasına Neden Olan Etkenler	14
3.3.2. Kayma Mukavemetinin Azalmasına Neden Olan Etkenler	15
3.4. Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri.....	15
3.4.1. Güvenlik Katsayısı Kavramı	16
3.4.2. Limit Denge Yöntemleri	17
3.4.2.1. Dilim Yöntemleri	18
3.4.2.1.(1). İsveç Dilim (Fellenius,1936) Yöntemi	19
3.4.2.1.(2). Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi.....	21
3.4.2.1.(3). Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi.....	22

3.4.2.1.(4). Spencer Yöntemi	23
3.4.2.2. Kama (Blok) Yöntemi.....	24
3.4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz (Plaxis Programı)	26
3.4.4. Slide Programı	28
3.5. Şev Hareketlerine Karşı Alınacak Önlemler ve İyileştirme Yöntemleri.....	29
3.5.1. Şev-Yamaç Geometrisinde Değişiklik Yapılması	29
3.5.1.1. Kademelendirme	30
3.5.1.2. Topuk Yükleme.....	30
3.5.1.3. Hendek	31
3.5.2. Yamaç veya Şeve Etki Eden Suyun Kontrol Altına Alınması	32
3.5.3. Yapısal Önlemler İle Stabilité Sağlama	34
3.5.3.1. Kazık Uygulaması (Yanal Dirençli Kazık)	34
3.5.3.1.(1). Yatak Katsayısı Kullanarak Hesap Yapılması.....	36
3.5.3.1.(2). Zemini İdeal Elastik Bir Cisim Olarak Kabul Ederek Hesap Yapılması	36
3.5.3.2. İstinat Duvarı.....	37
3.5.3.3. Püskürtme Beton	38
3.5.3.4. Donatılı zemin.....	39
3.5.4. Ortam Özelliklerinin İyileştirilmesi İle Stabilitéyi Sağlama.....	39
3.5.4.1. Ankraj	40
3.5.4.2. Taş Kolon.....	40
3.5.4.3. Zemin Çivisi	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1. Genel.....	43
4.2. Parametrik Çalışmalar	43
4.2.1. Plaxis 2D ‘de Modelin Tanımlanması ve Analiz Aşamaları.....	44
4.2.2. Şev Yüksekliğin Güvenlik Sayısına Etkisi	47
4.2.3. Yük Değerinin Güvenlik Sayısına Etkisi	49
4.2.4. Yükün Konumunun Güvenlik Sayısına Etkisi	50

4.2.5. Eğim Açısının Güvenlik Sayısına Etkisi.....	51
4.2.6. Drenajlı ve Drenajsız Durumda Güvenlik Sayısı.....	52
4.2.7. Tabakalı Durumda Güvenlik Sayısı.....	55
4.2.8. Diyafram Duvar Konumunun Güvenlik Sayısına Etkisi.....	57
4.3. Vaka İncelemesi.....	59
4.3.1. Yapılan Çalışmalar.....	60
4.3.2. İnceleme Alanında Bulunan Mevcut Zemin Tabakaları İçin Değerlendirmeler.....	64
4.3.3. Arazinin Durumu ve Heyelan Mekanizması ile ilgili Değerlendirmeler.....	69
4.3.4. Geri Analiz.....	70
4.3.5. Plaxis 2D Programı ile Gerçeğe Uygun Arazi Durumunun Elde Edilmesi	78
4.3.5.1. Tek Sıra Kazık ile Analizler.....	85
4.3.5.2. Çift Sıra Kazık İle Analizler	89
4.3.5.3. Farklı iki konumda kazık analizleri.....	91
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	95
5.1. Sonuçlar	95
5.2. Öneriler	96
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	103



ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1. Limit Dengeyi Temel Alan Şev Analizi Yöntemleri).....	6
Çizelge 3.1. Hareket çeşitlerine göre D/L oranları	13
Çizelge 3.2. Şev Hareket Tipleri.....	14
Çizelge 3.3. Kama yöntemi hesap tablosu	25
Çizelge 4.1. Kullanılan zemin parametreleri.....	44
Çizelge 4.2. Slide analizlerinden elde edilen sonuçlar.....	51
Çizelge 4.3. Slide analizlerinden elde edilen sonuçlar.....	52
Çizelge 4.4. Drenajsız durumda kullanılan zemin parametreleri	53
Çizelge 4.5. Drenajlı durumda kullanılan zemin parametreleri	54
Çizelge 4.6. 1 ve 2 numaralı zemin türü için kullanılan parametreler	56
Çizelge 4.7. Tabakalı zeminde üç farklı durum için hesaplanan güvenlik sayıları.....	57
Çizelge 4.8. Diyafram duvar için kullanılan parametreler (Plaxis Tutorial, 2018)	58
Çizelge 4.9. Diyafram duvarının konumu ile güvenlik sayısının değişimi	58
Çizelge 4.10. Sondaj kuyusu derinlikleri	62
Çizelge 4.11. Mevcut yol dolgusu için zemin değerlendirmesi	65
Çizelge 4.12. Siltli, killi, çakıllı kum - kumlu çakıl (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee) için zemin değerlendirmesi	66
Çizelge 4.13. Çakıllı, siltli, killi kum, siltli kum, kumlu kil (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): için zemin değerlendirmesi.....	67
Çizelge 4.14. Çakıllı, kumlu, killi silt (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): için zemin değerlendirmesi.....	68
Çizelge 4.15. Grafit şist için zemin değerlendirmesi	69
Çizelge 4.16. Yer altı su seviyesi durumu	69
Çizelge 4.17. Üç farklı kesit için geri analiz veri çiftleri	75

Çizelge 4.18. Zemin tabakları ve SPT değerleri	78
Çizelge 4.19. SPT-N değerlerine göre killi zemin özellikleri (Bowles, 1996)	79
Çizelge 4.20. SPT-N değerlerine göre kumlu zemin özellikleri (Bowles, 1996)	79
Çizelge 4.21. Bieniawski (1989) tarafından önerilen kaya kütle puanlaması tablosu ilgili kısım	80
Çizelge 4.22. Zemin parametreleri.....	81
Çizelge 4.23. Kazık için kullanılan parametreler.....	87
Çizelge 4.24. Kazık başlığı için kullanılan parametreler	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 3.1. Bir şevin şematik kesiti	12
Şekil 3.2. Şev göçme tipleri.....	13
Şekil 3.3. Dilimin Boyutları ve Etkiyen Kuvvetler	18
Şekil 3.4. İsveç Dilim Yönteminde bir dilime etkiyen kuvvetler ve kuvvet poligonu.....	20
Şekil 3.5. Yamaçtaki uzunluk-derinlik kavramı.....	23
Şekil 3.6. Spencer Yöntemi' nde dilimler arası kuvvetler	24
Şekil 3.7. Zemin elemanında gerilme ve düğüm noktalarının konumu	27
Şekil 3.8. Şev-yamaç geometrisinde değişiklik yapılması örnekleri.....	30
Şekil 3.9. Topuk dolgusunun sığ ve derin kayma yüzeylerinde etkinliği	31
Şekil 3.10. Düşmelere karşı alınan pasif önlem (Hendek, hendek ve çit, sandık duvar ve hendek).....	31
Şekil 3.11. Yamaç ve şevlerde suyun kontrolü için alınabilecek önlemler.....	33
Şekil 3.12. Dolgu altında drenaj şiltesi uygulaması	33
Şekil 3.13. Drenajlı bitişik kazık uygulaması.....	35
Şekil 3.14. Sandık duvar kesiti	38
Şekil 3.15. Donatılı zemin uygulaması	39
Şekil 3.16. Bir ankrajın basit kesiti	40
Şekil 3.17. Zemin çivisi uygulaması	41
Şekil 4.1. Genel şev modeli	43
Şekil 4.2. Plaxis'te zemin yüzeyinin yatay olup olmaması durumunda izlenecek hesap adımı şeması.....	46
Şekil 4.3. Şev yüksekliğinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi.....	47

Şekil 4.4.	Yüksüz durumda 5m ve 30m yüksekliğindeki şevlerin toplam deplasman görüntüleri	48
Şekil 4. 5.	Plaxis ile analizde “Calculation” sekmesinden görüntü	49
Şekil 4.6.	Yük değerinin güvenlik sayısına etkisi.....	49
Şekil 4.7.	Yükün konumunun güvenlik sayısına etkisi.....	50
Şekil 4.8.	Şev eğiminin güvenlik sayısına etkisi	51
Şekil 4.9.	Kohezyonun güvenlik sayısına etkisi	53
Şekil 4.10.	İçsel sürtünme açısının güvenlik sayısına etkisi.....	55
Şekil 4.11.	Tabakalı zemin için kullanılan geometrik model ($H_{1,2}$: zemin türlerine ait tabaka kalınlığı, 1 ve 2 numaralı zemin türü)	56
Şekil 4.12.	Diyafram duvarının konumu ile kayma yüzeyi değişimi	59
Şekil 4.13.	İnceleme alanı yer buldu haritası.....	60
Şekil 4.14.	Heyelan sahasından genel görünüm	61
Şekil 4.15.	Sondajlar ve yol dolgusuna ait şematik görüntü.....	61
Şekil 4. 16.	2 nolu sondaj çalışması ve inceleme alanına ait görüntü.....	65
Şekil 4.17.	İnceleme alanında bulunan zemin tabakaları ve yapılan sondaj çalışmaları	67
Şekil 4.18.	Grafit şist biriminden genel görünüm.....	69
Şekil 4.19.	Mevcut yol üzerinde heyelandan dolayı meydana gelen çatlaklar ve oturmalar	70
Şekil 4.20.	A kesitine ait model.....	73
Şekil 4.21.	B kesitine ait model	74
Şekil 4.22.	C kesitine ait model	74
Şekil 4.23.	Geri analiz veri çiftleri grafiği.....	76
Şekil 4.24.	Şevin A kesitine ait görüntü	77
Şekil 4.25.	Şevin B kesitine ait görüntü	77
Şekil 4.26.	Şevin C kesitine ait görüntü	78
Şekil 4.27.	SPT-N değeri ile drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi.....	80
Şekil 4.28.	A kesitine ait görüntü	83

Şekil 4.29. A kesitine ait analiz sonucu görüntüsü	84
Şekil 4.30. B kesitine ait görüntü	84
Şekil 4.31. B kesitine ait analiz sonucu görüntüsü	85
Şekil 4.32. Kazık detayı.....	86
Şekil 4.33. A kesiti tek sıra kazık için analiz sonucuna ait görüntüler	87
Şekil 4.34. B kesiti tek sıra kazık için analiz sonucuna ait görüntüler	88
Şekil 4.35. Analiz Plaxis 2D (2018) “staged construction” sekmesi analiz adımları.....	89
Şekil 4.36. Çift sıra kazık A-B kesitlerinde analiz sonucu görüntüsü	90
Şekil 4.37. A kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan model.....	91
Şekil 4.38. A kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan modelde analiz sonucu	92
Şekil 4.39. B kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan model	92
Şekil 4.40. B kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan modelde analiz sonucu.....	93



SİMGELER VE KISALTMALAR

E_{ur}^{ref}	: Referans boşaltma/tekrar yükleme modülü
E_{50}^{ref}	: Referans rijitlik modülü
E_{eod}^{ref}	: Referans tanjant modülü
$\Sigma-M_{weight}$	: Toplam ağırlık çarpanı
a	: Şev topuğu
ab	: Şev yüzeyi
ac	: Kayma yüzeyi
b	: Daire dilimi eni
bc	: Şev tepesi
c	: 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
$CRR_{7,5}$	: Sıvılaşma direnci
C_S	: Numune alıcı kılıf (liner) düzeltme faktörü
CSR	: Zemin tabakasında oluşan tekrarlı gerilme oranı
d	: Eşdeğer kalınlık
E	: Elastisite modülü
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
E_L	: Soldaki dilimden gelen toprak itkisi
E_R	: Sağdaki dilimden gelen toprak itkisi

g	: Yer çekimi ivmesi
G _s	: Güvenlik katsayısı
h	: Dilim yüksekliği
H	: Şev yüksekliği
I	: Atalet momenti
k	: Yatak katsayısı
L	: Yükün şev tepesine olan uzaklığı
l	: Daire dilimi taban genişliği
LL	: Likit limit
M,W	: Dilimin kütlesi
MSF	: Deprem büyüklüğü katsayısı
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
ø	: Kayma dairesi merkez açısı
p	: Bir kirişin herhangi bir noktasındaki gerilme
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik limit
q	: Çizgisel yük
S	: Kazık merkezleri arasındaki mesafe
S	: Tabanda maksimum kayma direnci
SK	: Sondaj kuyusu
S _m	: Uyanmış direnç
RQD	: Kaya kalitesi göstergesi
TCR	: Toplam karot verimi
T _d	: Kesme gerilmesi

T_f	: Zeminin kesme dayanımı
u_w	: Tabanda boşluk suyu kuvveti
w	: Ağırlık
X_L	: Dilimler arası kesme kuvveti (sağ)
X_R	: Dilimler arası kesme kuvveti (sol)
Z_L	: Yanal kuvvetler bileşkesi (sol)
Z_R	: Yanal kuvvetler bileşkesi (sağ)
α	: Dilim tabanının yatayla yaptığı açı
β	: Eğim açısı
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_{unsat}	: Kuru birim hacim ağırlık
σ'	: Olası kayma yüzeyi üzerindeki normal gerilme
ν	: Poisson oranı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ψ	: Dilatasyon açısı



1.GİRİŞ

1.1. Genel

Doğal afetler ve iklim faktörleri topoğrafyanın değişmesine neden olduğundan insan yaşamını yakından etkilemektedir. Nüfusa paralel olarak ihtiyaç duyulan yapı sayısının artmasıyla arazilerin doğal yapısına sıkça müdahale edilmektedir. Mühendislik özelliği bakımından zayıf zeminler üzerine yapılan dolgular, derin kazılar, hatalı zemin ıslah çalışmaları stabilite problemlerini arttırmaktadır. Şev stabilitesinin bozulması en çok rastlanan problemlerden biridir ve üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. Bu problem uygun önlemler alınmadığı takdirde toplumda birçok can ve mal kaybına neden olduğu gibi, milli servetlerin yok olmasına da sebep olmaktadır. Ülkemizde ve dünyada bu duruma birçok kez şahit olunmuştur. Afganistan'da 2014 yılında meydana gelen heyelanla şev stabilitesinin bozulması sonucu birçok kişi hayatını kaybetmiş ve yine birçok kişi evsiz kalmıştır. Ülkemizde ise 1990 yılında Maçka'da meydana gelen heyelanda yaşam kaybı olurken ve trilyonlara varan maddi kayıp yaşanmıştır.

Ülkemizde gerçekleştirilen ve gerçekleştirilmesi planlanan bayındırlık faaliyetlerinde, şev stabilitesi problemlerinin ekonomik ve güvenli bir şekilde sonuçlandırılması için konu ile ilgili araştırmaların ve deneyimlerin önemi büyüktür.

Şev stabilitesine etki eden faktörleri anlamak, inşa edilen yapıların güvenli olması açısından büyük önem taşımaktadır. Şevdeki zemin tabakalarında zaman içinde meydana gelebilecek değişikliklerin, yüklemeler ve sızmaların önceden tahmin edilmesi gerekmektedir. Stabilitesi bozulan şevlerde ise olaya sebep olan etkenler araştırılmalıdır. Şev hareketlerinden elde edilen araştırmalar; şev tasarımında, inşa ve onarım işlerinde kullanılacak önemli bilgilerin elde edilmesini sağlar.

Doğada ve inşa edilen yapılarda kayadan ve zeminden oluşan şevlere sıkça rastlanır. Karayolları, barajlar, kanallar, bentler şev oluşturularak yapılır. Çünkü şev oluşturmak çoğu zaman istinat yapıları inşa etmekten daha ekonomik bir çözümdür.

Yarma ve dolgu şevlerinin kayma ve göçme olmadan stabil kalmaları için oluşturulacak eğim açısının stabilite hesaplarıyla belirlenmesi gerekir. Stabilite hesaplarında kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerin çoğu bir takım kabullere dayalıdır. Zeminin homojen kabul edilmesi, basit tabakalanmanın olduğu, zeminin sürekliliği gibi kabuller bunlardan bazılarıdır. Kabuller zemin özelliklerini probleme tam olarak yansıtmaya olanak vermez ve tespit edilemeyen kayma düzlemleri, çatlaklar, süreksizlikler göz ardı edilir. İnsan eliyle yapılan dolgu şevlerinde; zemin kontrollü, üniform ve istenilen şekilde teşkil edilebildiğinden gerekli kabuller daha az iken doğada var olan yarmalarda; homojen yapının olmaması, süreksizlikler vb. sebeplerden dolayı gerekli kabuller daha fazladır ve güvenlik katsayısı daha büyük seçilir. (Ulusay ve Sönmez, 2007)

Geoteknik mühendisleri, şev stabilitesini değerlendirirken özellikle; yüzey drenajına, yer altı sularına ve zeminin kayma mukavemetine dikkat etmektedir. Şev stabilitesi için suyun önemi oldukça fazladır. Yüzey suları; şev üzerindeki malzemeyi sürükleyebilmekte, şev topuğunu aşındırabilmekte, şev yüzüne basınç uygulayabilmektedir. Yer altı suları ise; su seviyesinin değişmesi, boşluk basıncı ve sızma basıncı etkisi ile şev stabilitesini etkilemektedir. Genel olarak şev stabilitesi hesaplarında, şev içerisinde en büyük değerli kayma gerilmesine maruz kalabilecek yüzeyler belirlenir. Bu yüzeyler üzerindeki kayma gerilmesi ve kayma mukavemetleri karşılaştırılır. İncelenen yüzeyler arasında elde edilen en düşük güvenlik katsayısı istenen düzeyde ise (çoğu zaman 1.5 olması istenir) şevin stabil durumda olduğu söylenir.

Şevlerde stabilite incelemesinde birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Genel olarak çözüme iki farklı şekilde gidilebilir. Bunlar, elde edilen sonucun

sayısal ve kesin olduğu deterministik yöntemler (limit denge yöntemi, dilim yöntemi, sonlu eleman analizi) ve çevre şartlarının değişken olduğu kabul edilerek yapılan olasılıksal (gözlemsel, istatistiksel) yöntemlerdir.

Şev stabilitesinin bozulmasında birçok neden etkili olabilir. Genel olarak, kaymaya zorlayan kuvvetlerin artması, kaymaya karşı direncin azalması stabilitenin bozulmasına sebeptir. Yağış, sıcaklık, bitki örtüsü, deprem gibi doğal nedenlerin yanında; kazılar, aşırı yükler, titreşimler gibi yapay nedenler de şev stabilitesinin bozulmasına sebep olabilir.

Şev hareketlerine karşı alınan önlemlerle şev hareketinin sebep olacağı zararın önüne geçilebilir. Zeminin mühendislik özellikleri, topoğrafya, tabii faktörler, yer altı ve yer üstü sularının durumu göz önünde bulundurularak uygun yöntem seçilmelidir.

Harekete neden olan faktörleri ortadan kaldırmak, şev hareketini önleyen yöntemlerden biridir. Şev topuğunun desteklenmesi, drenaj ve kazılar ile harekete sebep olan etkenler ortadan kaldırılabilir. Ayrıca istinat yapıları (kazık, palplanş, istinat duvarı vb. yapılar) ile hareket edebilecek kütlenin desteklenmesi, zeminin kimyasallarla stabilize edilmesi, patlayıcı madde kullanma ve ağaçlandırma da şev stabilitesini sağlayan çalışmalar arasında yer almaktadır.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada, şev stabilitesi problemi incelenmiştir. Kurulan örnek şev modelleri üzerinde parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bir vakaya ait problemin nedenleri araştırılmış, kayma mekanizması ve şeye ait mühendislik özellikleri belirlenmiş, uygun önlemin incelenmesi için arazi mevcut durumu bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Kaymayı önleyici uygun önlemler önerilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, limit denge yöntemlerini esas alan “Slide V.6.0” ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D bilgisayar yazılımları kullanılmıştır.

Çalışmaya ait bölümler aşağıda verilmiştir.

2. bölümde, konu ile ilgili geniş bir literatür çalışması gerçekleştirilmiş ve konu hakkındaki önemli bölümler detaylı olarak sunulmuştur.

3. bölümde, şev stabilitesi problemlerine yaklaşımlar, çözüm yöntemleri, şev hareketlerine karşı alınacak önlemler üzerinde durulmuştur.

4. bölümde, belirlenen örnek şev modelleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Ele alınan bir vaka için şev stabilitesi problemi incelenmiş, ilgili analizler gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, analizler ve şev hareketini önlemek için uygun görülen uygulamalar sunulmuştur.

5. bölümde, elde edilen sonuçlardan bahsedilmiş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Şev hareketleri ve şev stabilitesi problemleri, geoteknik mühendislerinin ilgilendiği en eski konulardan biridir. Şev stabilitenin bozulması, insan hayatında büyük olumsuz etkilere neden olduğundan üzerinde durulması gereken önemli bir konudur. 20. Yüzyılda konu ile ilgili çalışmalara yoğunluk verilmiş ve çalışmalar giderek hız kazanmıştır (Çizelge 2.1.). Literatürde konu üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Şev hareketlerinin nedenlerini anlayıp doğru bir şekilde problemi çözmek için; sayısal, deneysel, istatistiksel ve analitik yöntemlere dayanan birçok çalışma literatüre sunulmuştur.

Taylor (1937), yayınladığı “Stability of Earth Slopes” adındaki kitabında, şev stabilitesinin genel tanımlamalarını yapmıştır.

Skempton (1948), “The $\phi=0$ Analysis for Stability and its Theoretical Basis” adındaki çalışmasında, içsel sürtünme açısının şev stabilitesi analizlerinde kullanımını açıklamıştır.

Terzaghi (1950), yaptığı “Mechanism of Landslides” çalışmasıyla şev stabilitesi problemleri araştırmalarının öncüsü olmuştur.

Janbu (1954), yayınladığı “Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis” isimli çalışmasında günümüzde kendi adıyla anılan stabilite analizlerinde Janbu yöntemini anlatmıştır.

Bishop (1955), “The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes” isimli çalışmasında, en yaygın kullanıma sahip limit denge yöntemlerinden biri olan ve kendi ismiyle anılan dairesel şev stabilite analizinde Bishop yöntemini anlatmıştır.

Erguvanlı (1995), “Mühendislik Jeolojisi” isimli kitabında, inşaat mühendisliği çalışmalarıyla ilgili temel bilgilere değinmiş ve değerlendirmede kullanılan zeminin mühendislik özelliklerinden bahsetmiştir.

Londe ve ark (1969), “Stability of Rock Slopes-A Three-Dimensional Study” adındaki çalışmada üç boyutlu şev stabilitesi analizini anlatmıştır.

Çizelge 2.1.Limit Dengeyi Temel Alan Şev Analizi Yöntemleri (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

Moudabel (2013), beş farklı şev vakasını, sonlu farklar yöntemi ve limit denge yaklaşımlarını kullanarak değerlendirmiştir. Limit denge yöntemlerini temel alan “Geostase” ve sonlu farklar yöntemini ele alan “Flac” yazılımlarıyla çalışma yürütülmüştür. Güvenlik faktörleri, farklı yaklaşımlardan yola çıkılarak yapılan hesaplamalarla elde edilmiş ve uygulanabilirlikleri açısından karşılaştırılmıştır. Genel olarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak sonlu farklar yöntemiyle elde edilen güvenlik sayısının limit denge yöntemleriyle elde edilenden az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise; sonlu farklar yönteminde kullanılan parametrelerin fazla olması, zemin tabakalarında meydana gelen gerilmelerin daha ayrıntılı bir biçimde ele alınmış olmasıdır.

Olgun ve Acar (2009), şev geometrisi ve zemin özelliklerinin deprem sırasında stabilitenin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla, 2 farklı şev kesiti ve 2 farklı zemin cinsi için uygun bilgisayar yazılımı kullanarak örnek analizler yapmış ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Özellikle kohezyonlu zeminlerde ilave boşluk suyu basınçlarından dolayı stabiliteye ciddi olumsuz etkilerinin olduğu, analizlerde şevin fay hatlarına yakınlığının güvenlik sayısını düşürdüğü görülmüştür. Şevi deprem etkisinde değerlendirirken deprem özellikleri, şevin fay hattına olan

uzaklığı, zemin tabakası ve şev geometrisi gibi faktörlerin bir bütün olarak incelenmesi gerektiği açıklanmıştır.

Kahyaoğlu ve ark (2009), parametrik çalışma yaparak ve sonlu elemanlar metodunu kullanarak şevlerin kazıklı sistemlerle güçlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, kazıklara etki eden yüklerin belirlenmesi için tasarlanan deneysel çalışmanın simülasyonu iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Mbarka ve ark (2010), şev stabilitesi için farklı yaklaşımlar kullanarak birleşik bir güvenli yöntem önermişlerdir. Çalışmada olasılıksal yöntem ve parametrik yöntemler kullanılmıştır.

Zehtab ve ark (2012), doymamış zeminlerin kayma mukavemetini tahmin etmede kullanılan formülleri deneysel verilerin sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda doymamış zeminlerin kayma mukavemetini tahmin etmede kullanılan, çalışmadaki deneysel verilere en yakın sonucu veren formülü saptanmıştır.

Fırat ve Canik (2014), şevlerin stabilitesine depremin etkisini, şev hareketlerine sebep olan faktörleri incelemişlerdir. Bir vaka üzerinde yol şevinde meydana gelen kayma üzerinde çalışılmıştır. Şeve gelen statik ve dinamik yüklerin etkisinde farklı kazık boylarında, kazık kalınlıklarında ve kazık adetlerinde şevin davranışları incelenip değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda deprem etkisi altında kazıksız olarak teşkil edilen şevin tamamen yıkıldığı görülmüştür. Vakaya uygun kazıklarla şev desteklendiğinde kazık başları serbest durumda iken deprem etkisi ile büyük deplasmanlarla karşılaşmıştır. Ancak kazık başları sabitlendiğinde deprem etkisi altında şev stabil hale getirilmiştir.

Tschuchnigg ve ark (2015), çalışmalarında bir şev göçmesine ait geri analizle ilgilenmişlerdir. Güvenlik faktörünü incelemek için ϕ'/c' azaltması uygulayan iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Bunlar sonlu elemanlar limit analizi ve

sonlu elemanlar mukavemet azaltma analizidir. Çalışmalarda, her iki yöntemden elde edilen sonuçlarda güvenlik faktörü değerinin uyumlu olduğu görülmüştür.

Taşkıran ve ark (2015), sonlu elemanlar yönteminin, şev stabilitesi problemleri çözümü için uygunluğunu Plaxis'te 2D ve 3D modeller kullanılarak araştırmışlardır. Çalışmada, şev stabilitesi hesaplamalarında sonlu elemanlar yöntemi ile mukavemet azaltma yöntemi kullanılmıştır. Bir şev örneği üzerinde göçmeye karşı güvenlik sayısı, mukavemet azaltma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca iki ve üç boyutlu modellemenin sonlu elemanlar çözümü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Limit denge yöntemleri kullanılarak stabilite analizleri yapılmış ve elde edilen güvenlik sayıları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, üç boyutlu şev modeliyle elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin iki boyutlu durumda elde edilen değerden daha yüksek olduğu ve mukavemet azaltma yöntemi ile elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin, limit denge yöntemleri ile elde edilen güvenlik sayısı değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Neves ve ark (2016), limit denge ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak şev stabilitesi iyileştirme yöntemi değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis 2D ve limit denge yöntemiyle hesaplama yapan SLOPE/W yazılımlarını kullanmışlardır. Ayrıca bu çalışmada en yaygın iyileştirme tekniklerinden bahsedilmiş, bu tekniklerin etkinliği arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Mısır (2018), eğimli bir arazide inşaat faaliyetlerini dikkate alarak kayma yüzeylerini ve güvenlik sayılarını farklı yaklaşımlarla incelemiştir. Bu problem için sonlu elemanlar yöntemini esas alan PLAXIS ve geleneksel yöntemler ile hesaplama yapan GEO5 programları kullanılmıştır. Problem üç aşamalı olarak programlara yansıtılmış ve her iki program için uyumlu parametreler kullanılmıştır. Plaxis 2D'de Mohr-Colomb zemin modeli kullanılmıştır. Geo5' te ise Janbu, Spencer, Sarma, Fellenius gibi geleneksel yöntemlerle çözüme gidilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında genel olarak iki ayrı programdan elde edilen

sonucun uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca Plaxis 2D’ de mukavemet azaltma yöntemi uygulanırken ağ güncellemesi ile stabilite analizi yapmanın farkı ortaya konulmuştur. Mukavemet azaltma işleminin aşamalarında ağ güncellemesi seçeneği; problemi bütünüyle ele almayı sağlamış, güvenlik sayıları ve kayma yüzeylerinin yerlerini limit denge yöntemlerinin sonuçlarına yakın hale getirmiştir.

Bol ve ark (2017), yağış etkisiyle stabilitesi bozulan ve üzerinde bir yolun ve evlerin bulunduğu şevi incelemiş şev stabilitesi için çözüm oluşturmuşlardır. Limit denge yöntemleri ve sonlu elemanlar yaklaşımını esas alan yazılımları kullanarak şev hareketini önlemek, şevin güvenliğini sağlamak ve yükseltilen yol kotunun eski haline getirilebilmek için kazıklı iksa sistemi tasarlamışlardır. Çözüm öncesi hemen her yıl ilave edilen dolgu ile yükseltilmeye çalışılan yol, kazıklı iksa sisteminin imalatından sonra yağışlı mevsim geçirmesine rağmen sorunsuz bir şekilde hizmet vermeye devam etmektedir.

Poşluk ve ark (2014), bir şevin stabilitesini limit denge metodu kullanarak değerlendirmişlerdir. Şevin stabil hale getirilmesi için yapılabilecek önlem çalışmalarına değinilmiştir.

Pınarlık ve ark (2017), yaptıkları çalışmada şevin uzun vadede stabilitesini sağlamak ve şevde yer altı suyunun olumsuz etkilerine önlem almak amacıyla geotekstil kullanmışlardır. Limit denge yöntemleriyle farklı şev açıları için hesaplamalar yapılmış, analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Pirone ve Urciuoli (2018), çalışmalarında kayma mukavemeti azaltması tekniğini kullanarak şevi denge konumuna getirecek kazıklar için 2D ve 3D analizler yapmışlardır. Plaxis’te uygulanan “ ϕ ’-c’ azaltma hesaplaması”, stabil olmayan üst zemin ve stabil olan alt zeminler arasında yer alan kayma yüzeylerini içeren sonsuz bir şevde, teşkil edilen kazık sırasının nihai sınır koşullarını analiz etmek üzere benimsenmiştir. Sürekli bir kazık sırasında kazık aralığına göre değişen kazık ara yüzlerindeki deplasmanlar, gerilmeler ve şevin göçmesi sırasında zayıf tabakanın rolü üzerinde durulmuştur. Ayrıca stabilize kullanılan kazık sıralarının tasarımı için basit grafikler sunulmuştur.

Arama ve ark (2018), şev komşu dolgu yapılarının temel zemini göçme davranışını farklı değişkenler kullanarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemine dayanan incelemede, şev yüksekliği ve açısı, dolgu yüksekliği, mukavemet değerleri, dolgu-şev arası mesafe değişken olarak kullanılmıştır. İncelemeler sonucunda değişkenlerin göçme davranışına etkisi irdelenmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Genel

Bu bölümde bir şev stabilitesi problemini değerlendirmede önemli olan hususlar ve problemin çözümüne yönelik yöntemler birer başlık altında açıklanmıştır.

Bir şev probleminin çözümü için şevle ilgili kavramların ve şev tiplerinin iyi bilinmesi gerekir. Şevde stabilite problemi değerlendirilirken sırasıyla; şevde harekete neden olan etkenlerin belirlenmesi, analizlerin yapılması ve stabiliteyi sağlayacak önlemin belirlenmesi, uygun önlem yerinde teşkil edildikten sonra çözümün yeterli olup olmadığının takibi işlemleri gerçekleştirilir.

3.2. Şevle İlgili Kavramlar ve Şev Hareketi Tipleri

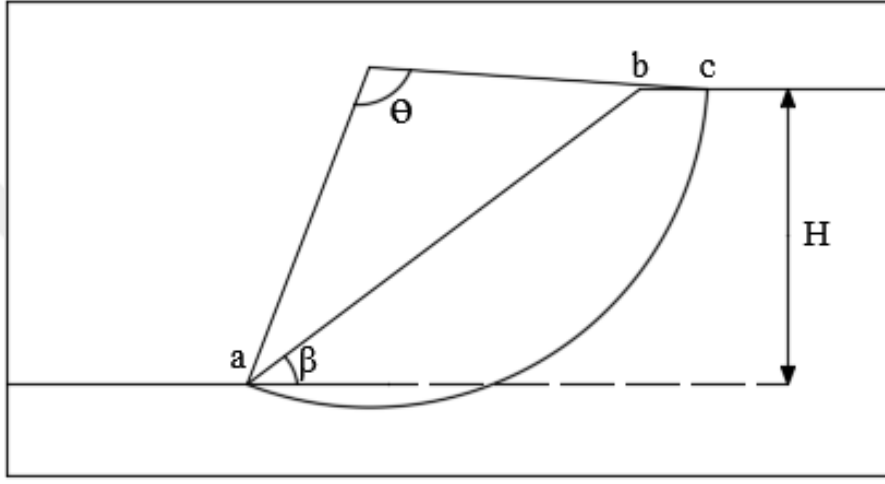
3.2.1. Şevle ilgili kavramlar

Bu başlık altında şev ile ilgili yaygın olarak kullanılan önemli kavramların tanımlarına değinilecektir.

Zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı “şev” olarak isimlendirilir. Şev, eğimli yüzey anlamında da kullanılmaktadır. Şevler insan eliyle oluşturulabilir veya doğal halde bulunabilir. Doğal halde bulunan şevlere “yamaç” ya da “doğal şev” insan eliyle oluşturulan şevlere ise “yarma veya dolgu şevi” ya da “yapay şev” adı verilir.

Şevin yatayla yaptığı açı “şev açısı”dır. Şev tabanı ile üst yüzeyi arasındaki düşey uzaklığa “şev yüksekliği” adı verilir. Şevin yüzeyi ile şev tabanının kesiştiği nokta “şev topuğu” olarak isimlendirilir (Şekil 3.1.). Kayma yüzeyi, doğal zeminin üst kısmında kalır ve hareket eden kütlenin alt yüzeyidir. Ayna, kayan zemin kütlelerinin dik veya dike yakın yüzeyine denir. Esas aynanın ön tarafında kayan kısım içerisinde bir kayma kaması ve tali aynalar oluşabilir. Tepe, hareket eden kütle ile ana aynanın kesiştiği yerin en üst noktasına denir. Kritik şev açısı, stabiliteyi bozmadan şeve verilebilecek maksimum açıdır. Kritik şev yüksekliği, çekme gerilmeleri etkisi ile çatlaklar oluşmadan, şeve verilebilecek maksimum

yüksekliktir. Şev düzleminde bulunan kütlenin; kayma, düşme, göçme vb. tehlikelerinin varlığının araştırılmasına “şev stabilitesi incelemesi” adı verilir. Şev stabilitesinin bozulmasıyla şev altındaki ve arkasındaki toprak kütlesi aşağı ve dışa doğru yer değiştirir. Bu harekete “şev göçmesi” denir.



Şekil 3.1. Bir şevin şematik kesiti (H: Şev yüksekliği, β : Şev Açısı, Eğim açısı, θ : Kayma dairesi merkez açısı, ab: Şev yüzeyi, ac: Kayma yüzeyi, bc: Şev tepesi, a: Şev topuğu)

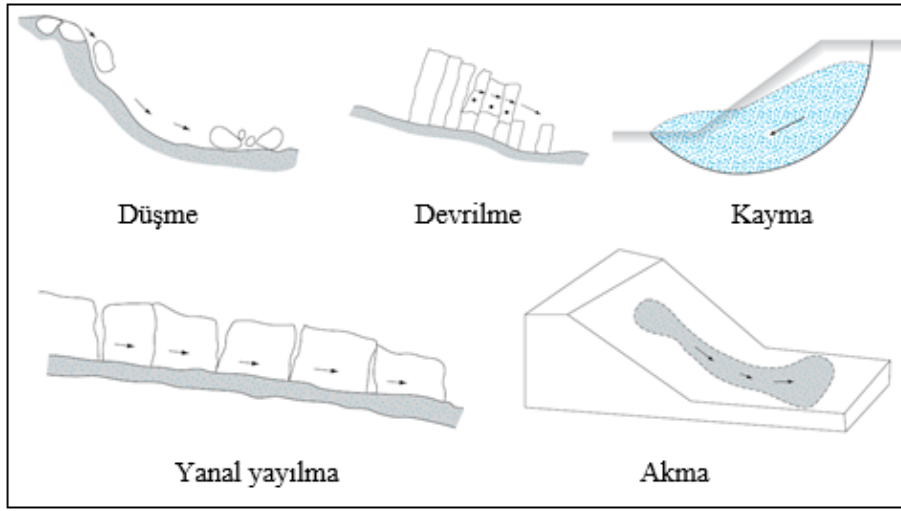
3.2.2. Şev Hareket Tipleri

Geoteknik mühendisleri, bir şev hareketini; düzeltme, önleme veya tanıma amacına göre farklı şekillerde sınıflandırmışlardır. Sınıflandırmada; harekete geçen malzemenin cinsi, hareket eden kütlenin diğer zemin tabakalarıyla bağlantısı, kayma mukavemeti parametreleri, zemindeki su muhtevası, kütlenin boyutu ve hızı, hareketin gelişme aşamaları gibi faktörler etkili olmaktadır.

Şev göçme tiplerini Cruden ve Varnes (1996), beş ana kategori ile sınıflandırmıştır (Şekil 3.2.).

- **Düşme:** Zemin veya kaya parçalarının şevden aşağı düşmesi şeklindeki göçme tipidir.

- **Devrilme:** Kütlenin belli bir eksen etrafında ileriye doğru yer değiştirmesidir.
- **Yana yayılma:** Özellikle deprem etkisiyle oluşan sıvılaşmaya bağlı olarak birbirine komşu konumdaki zeminlerin yatay yönde yer değiştirmesidir.
- **Akma:** Zemin kütlesinin bir viskoz sıvı gibi aşağı hareket etmesidir.
- **Kayma:** Bir kayma yüzeyi üzerinde kütlenin aşağıya doğru hareketidir.



Şekil 3.2. Şev göçme tipleri (Das, 2010)

Skempton ve Hutchinson (1959), şev hareketleri için, şevin kayma yüzeyi derinliği ve boy oranına göre ayrı bir sınıflandırma önermişlerdir (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.1. Hareket çeşitlerine göre D/L oranları (D: Kaymanın maksimum derinliği, L: Şevin maksimum uzunluğu) (Yıldırım, 2004)

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

Varnes (1978), tarafından ortaya koyulan TS(1951)' de de benimsenen şev hareket tiplerine ait sınıflandırma aşağıda verilmiştir (Çizelge 3.2.).

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
	Ötelenme	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 Hareketine Neden Olan Etkenler

Şev göçmesine, genel olarak, doğal güçler ve insan kaynaklı aktiviteler sebep olmaktadır. Şev göçmesinin nedenleri genel olarak iki başlık altında toplanabilir. Bunlar:

1. Kayma gerilmesinin artmasına neden olan etkenler,
2. Kayma mukavemetinin azalmasına neden olan etkenlerdir. (Öz, 2007)

3.3.1. Kayma Gerilmesinin Artmasına Neden Olan Etkenler

Şevin alt ve yanal desteklerinin kalkması kayma gerilmesini artırır. Şev topuğunda yapılan kazılar, yamaçlarda buz erimesi, erozyon, kıyılarda gel-git

olayı, var olan istinat yapısının kaldırılması, şev yakınında su olması ve su seviyesinin değişmesi kayma gerilmesinin arttırmada alt ve yanal desteğin etkisine örnek verilebilir.

Şev üzerinde sürşarj yükünün artması kayma gerilmesini arttırmaktadır. Su basıncı değişimi, bitki örtüsü faktörlerinin etkisiyle doğal şev yapısının bozulmasına sebep olabilmekte ve malzeme yığılması olabilmektedir. Şev üzerine inşa edilen yapılar, geçen araçların ağırlığı gibi insan etkileriyle de şev üzerine gelen ağırlık artabilmektedir.

Volkanik faaliyetler, makine, patlama ve yıldırım düşmesi gibi faktörler de şevde kayma gerilmesinin artmasına sebep olabilmektedir.

3.3.2. Kayma Mukavemetinin Azalmasına Neden Olan Etkenler

Zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimler, jeolojik etmenler kayma mukavemetini azaltabilmektedir.

Zeminin önemli mühendislik özelliklerinden biri olan boşluk suyu basıncının artmasıyla sürtünme azalmakta, suyun kaldırma kuvveti etkisiyle zemin mukavemeti azalmaktadır.

Gece-gündüz ısı farklı sonucunda kayalarda meydana gelen fiziksel parçalanma mukavemeti azaltmaktadır. Zeminin jeolojik yapısında bulunan fay, çatlak, boşluk, ek veya kıvrımlar kesme kuvvetine karşı direnci azaltmaktadır. Kilin bünyesine su alması zamanla kohezyonu azaltmaktadır.

Dane yapısı ve şeklinin de kütle hareketlerine etkisi büyüktür. Köşeli yapıda zemin daneleri içsel sürtünmeyi artırmaktadır. İri daneli zeminlerde dane boyutu stabiliteyi çok fazla etkilemez ancak ince daneli zeminlerde durum böyle olmamaktadır. İnce daneli zeminlerde dane boyutu etkisi sıkışma ve permabiliteyi önemli ölçüde etkilediğinden stabiliteyi etkilemektedir.

3.4. Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri

Şev analizinde ulaşılmak istenen başlıca amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Farklı şartlarla farklı özelliklerdeki şevlerin incelenerek deneyimlenmesi,
- Statik ve dinamik etkilerin şev üzerinde meydana getirdiği etkilerin araştırılması,
- Şevle ilgili analizlerde gerekli parametrelerin belirlenmesi, bu parametrelerin değişmesi halinde stabiliteye etkisinin ne olacağının araştırılması,
- Şevin kayma mekanizmasının saptanması,
- Gerekli hallerde şevin tasarımının yenilenmesi ya da şev dengesinin bozulmasına karşı iyileştirici önlemlerin yapılmasıdır.

Şev analizlerinin güvenli ve ekonomik bir şekilde çözüme ulaştırılması için ilk önce ön analizler yapılmazdır. Bunlar, çevre koşullarının belirlenmesi, jeolojik ve hidrojeolojik etkilerin saptanması, ekonomik değerlendirmelerin yapılarak söz konusu şev probleminin üzerinde çalışmaya uygun olup olmadığının belirlenmesidir.

Ön analizler yapıldıktan sonra ayrıntılı analizlere geçilir. Ayrıntılı analizlerde elde edilen veriler ışığında çözüm yöntemi belirlenip hesaplamalar yapılır. Şev stabilitesini sağlayacak çözüm getirilir ve uzun vadede şev dengesinin durumu araştırılır.

3.4.1. Güvenlik Katsayısı Kavramı

Şev stabilitesini analiz etmek için güvenlik katsayısının belirlenmesi gerekir. Güvenlik katsayısı (G_s) genel olarak, kayma yüzeyi boyunca kaymaya karşı koyan kuvvetlerin (zeminin kesme dayanımı, T_f), kaydıran kuvvetlere (kesme gerilmesi, T_d) oranıdır. Güvenlik katsayısı:

$$G_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (3.1.)$$

formülü ile ifade edilir.

τ_f, τ_d ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

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

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

Burada,

c' : Kohezyon,

φ' : İçsel sürtünme açısı,

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

Güvenlik katsayısının 1' e eşit olması şevin dengede ve göçme sınırında olduğu anlamına gelir. Şev tasarımı yapılırken şevin dengesinin güvenli tarafta kalması için güvenlik katsayısı genelde 1.5 olarak alınır.

3.4.2. Limit Denge Yöntemleri

Limit denge yöntemleriyle şev stabilitesi hesaplaması yapılırken kaymanın belirli bir doğrultuda olduğu kabul edilir. Analizi dört aşamada özetlenebilir:

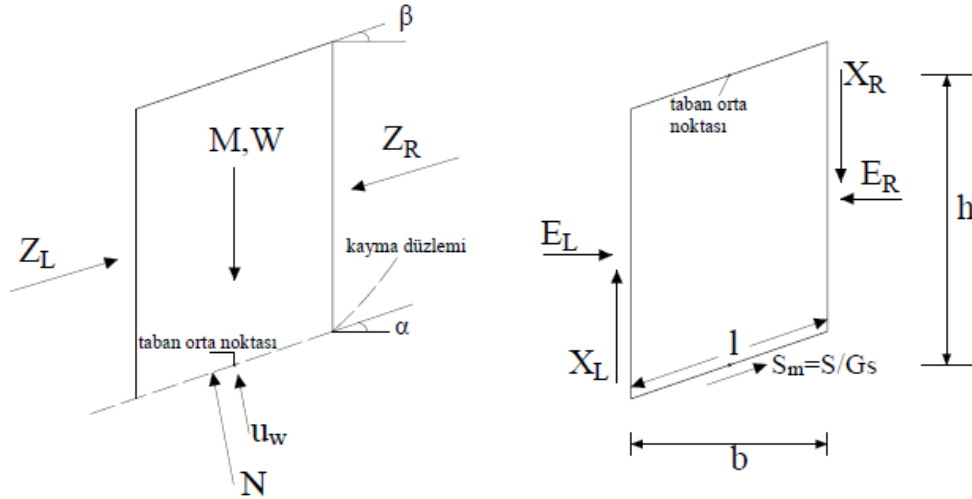
- Kayma mekanizması jeolojik şartlara uygun olarak belirlenir.
- Kaymayı önleyici ve kaydıran kuvvetler saptanır. Güvenlik katsayısı elde edilir.
- En olumsuz şartlar göz önünde bulundurulması gerektiğinden uygun sayıda kayma yüzeyi belirlenir. Güvenlik katsayısı hesabı bu yüzeyler için yinelenir.
- Minimum güvenlik katsayısı elde edilir.

Güvenlik katsayısı hesabı yapılırken çok fazla bilinmeyen parametre ile karşılaşılır. Çözümü basite indirmek için kabuller yapılmıştır ve yapılan kabullerin sonuca çok büyük bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kayan kütlelerin

bir bütün olduğu veya yeterli sayıda küçük dilimlerden oluştuğu kabulleri yapılmıştır. Kama yöntemi, ϕ dairesi yöntemi, logaritmik spiral yöntemi, dilim yöntemi gibi analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Burada dilim yöntemleri ve kama yöntemi ele alınacaktır.

3.4.2.1. Dilim Yöntemleri

Kayan kütleyi bir bütün olarak ele alarak analiz yapmak beraberinde bazı problemler doğurmuştur. Kayma yüzeyinin bir doğrudan eğriye geçmesi normal gerilme dağılımını değiştirmektedir. Buna bağlı olarak çözümde iç kuvvetler ihmal edilmekte ve çözümde hatalara sebep olmaktadır. Bu sebeple en doğru yol, kayan kütleyi kendi içinde dilimlere ayırarak her birinin kendi içinde dengesini incelemektir. Böylece çözüm sonunda olabilecek hatalı sonuçlar en aza indirgenir. Aşağıda dilim yöntemlerinde sıkça kullanılan parametreler şekil üzerinde gösterilmiştir (Ulusay, 2001).



Şekil 3.3. Dilimin Boyutları ve Etkiyen Kuvvetler

Şekil 3.3.'te yer alan :

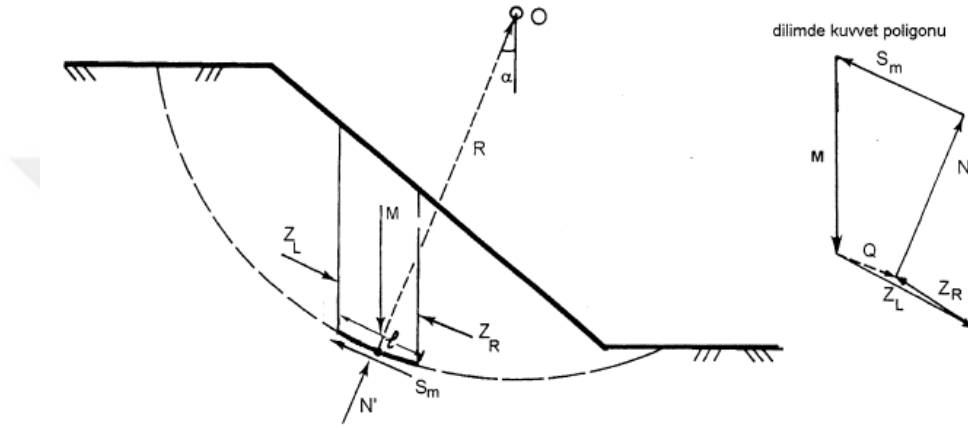
S: Tabanda maksimum kayma direnci,
 S_m : Uyanmış direnç,
Gs: Güvenlik sayısı,
N: Tabanda efektif normal kuvvet,
 u_w : Tabanda boşluk suyu kuvveti,
M,W: Dilimin kütlesi,
 Z_R : Yanal kuvvetler bileşkesi (sağ),
 Z_L : Yanal kuvvetler bileşkesi (sol),
 E_L : Soldaki dilimden gelen toprak itkisi,
 E_R : Sağdaki dilimden gelen toprak itkisi,
 X_L : Dilimler arası kesme kuvveti (sağ),
 X_R : Dilimler arası kesme kuvveti (sol),
b: Dilim Genişliği,
h: Dilim yüksekliği,
 α : Dilim tabanının yatayla yaptığı açı,
 β : Dilim yüzeyinin (şev) eğimi olarak ifade edilmektedir.

Dilim yöntemleriyle yapılan analizler kabul edilen varsayımlarla birbirinden ayrılır. Dilim yöntemlerinin en önemli özelliği dilimler arası kuvvetlerin analize dahil edilebilmesidir. Bu tüm denge denklemlerini sağlamada önemli rol oynar. Belirlenen olası kayma yüzeyinin kapsadığı alan en az 10 adet parçaya ayrılır. Ayrılan dilimlerin her birinin aynı zemin tipi içinde olması tercih edilir.

3.4.2.1.(1). İsveç Dilim (Fellenius) Yöntemi

Bu yöntemde yapılan ana kabul, dilimler arası kuvvetler bileşkesinin tabana paralel olduğudur. Bu yöntemle bulunan güvenlik katsayısı değeri gerçek değerlerin %20-60 kadar düşüğü olmaktadır. Bu yöntem, çözümde güvenli yerde kalma ve güvenlik katsayısının kontrolü açısından önemlidir. Çözüm için:

1. Her dilime etki eden kuvvetler dengede olmalı,
2. Dilimler arası reaksiyon bileşenlerinin vektörel toplamı sıfır olmalı,
3. Bu bileşkelerin aynı düzlemdeki herhangi bir noktaya göre momentleri toplamı sıfır olmalıdır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. İsveç Dilim Yönteminde bir dilime etkiyen kuvvetler ve kuvvet poligonu (Önalp ve Arel, 2004)

Mohr Colomb denklemi ve yapılan ihmaller ile,

$$S_m = \frac{1}{G_s} \{ (c'l + N - u_w l) \tan \phi \} \quad (3.4.)$$

Dilim tabanına dik doğrultuda etki eden kuvvet dengesinden,

$$N = M \cdot \cos \alpha \quad (3.5.)$$

Dilime etkiyen toplam yatay kuvvetler ihmal edildiğinde merkez noktasına göre moment denklemi yazılırsa,

$$\sum_1^n M_o = 0 \rightarrow \sum M.R \sin \alpha = \sum S.R \quad (3.6.)$$

$$\sum_1^n M.\sin \alpha = \sum \frac{1}{G_s} (c'l + (N - u_w l) \tan \phi) \quad (3.7.)$$

Bu denklem 3.5 ile birleştirildiğinde güvenlik katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_s = \frac{\sum (c'l + (M \cos \alpha - u_w l) \tan \phi')}{\sum M.\sin \alpha} \quad (3.8.)$$

Bu yöntemin dezavantajı, boşluk suyu basıncının yüksek olması ve şev eğimin düşük olması durumlarında yapılan analizlerde hatalı sonuçlar elde edilebilmesidir. Avantajı ise, homojen olmayan yamaç ve şevlerde zemin tabakalarında farklı kayma direnci açılarıyla uygulanabilmesidir.

3.4.2.1.(2). Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

1954 yılında Bishop tarafından, kayma yüzeyinde moment ve kuvvet denge koşullarının tümünü sağlayan bir yöntem oluşturulmuştur. Çözümün uzun olması sebebiyle genel kullanım bulamayan bu yöntem yerine “Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi” daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemde dilimler arası kesme kuvvetleri (X_R , X_L) ihmal edilirken dilimler arası etkiyen normal kuvvetler (E_R , E_L) göz önünde bulundurulmaktadır. Bu yöntemde yapılan temel kabul dilim kütlesi vektörünün tabanın tam ortasına etkimesidir. Güvenlik katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_s = \frac{[(M_a + M_b - u_w b) \tan \phi' + c'b] \div m_a}{(M_a + M_b) \sin \alpha} \quad (3.9.)$$

Burada a ve b alt indisleri dilimin kuru, doğal ve batık kitlelerini ifade ederken m_a ise G_s ' yi içeren aşağıda verilmiş oranı göstermektedir.

$$m_a = \left(1 + \frac{\tan \alpha + \tan \varphi}{G_s}\right) \cos \alpha \quad (3.10.)$$

3.4.2.1.(3). Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi

Bu yöntemde Bishop Yöntemi'nde olduğu gibi dilimler arası kesme kuvvetleri (X 'ler) ihmal edilmiş dilim tabanı normal kuvvetleri F' e bağlı olarak bulunmaktadır. Güvenlik katsayısı ise tüm şevde şeve etkiyen dış kuvvetlerinden dengesinden hesaplanır.

Kuvvet dengesini sağlayan ilk güvenlik sayısı,

$$F_0 = \frac{\sum \{ [c' b + (M - u_w b) \tan \varphi'] \sec \alpha . k_a \}}{M . \tan \alpha} \quad (3.11.)$$

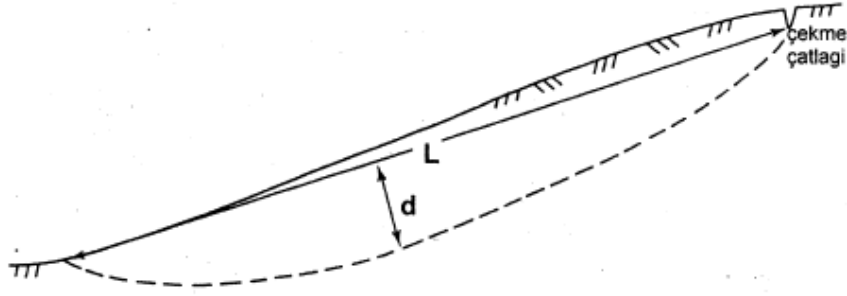
$$k_a = \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha . \tan \varphi}{G_s}} \quad (3.12.)$$

Daha sonra güvenlik katsayısı aşağıdaki şekilde düzeltilir.

$$G_s = f_0 \times F_0 \quad (3.13.)$$

$$f_0 = 1 + b \left[\frac{d}{L} - 1.4 \left(\frac{d}{L} \right) \right] \quad (3.14.)$$

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 3.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Yamaçtaki uzunluk-derinlik kavramı (Önalp ve Arel, 2004)

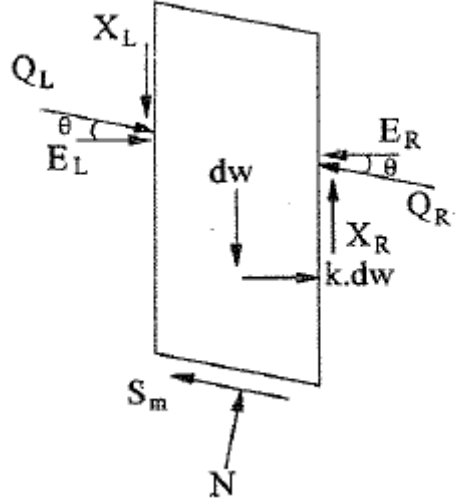
3.4.2.1.(4). Spencer Yöntemi

Bu yöntemde dilimler arası kesme kuvvetlerinin ve normal kuvvete oranının sabit olduğu kabulü yapılmaktadır. İki kuvvetinin bileşkesinin ise yatayla aynı θ açısı yaptığı ele alınarak çözüme gidilmiştir.

X_L ve X_R değerleri her bir dilimin kenarlarındaki düşey kesme kuvvetlerini, E_L ve E_R değerleri yatay normal kuvvetlerini, θ değeri ise bileşke kuvvetin yatayla yaptığı açıyı ifade etmektedir (Şekil 3.6.).

θ 'nın değeri bilinmemektedir. θ değerini bulmak için hem kuvvet dengesine göre bir güvenlik katsayısı değeri hem de moment dengesine göre bir güvenlik katsayısı değeri, θ 'ya farklı değerler verilerek çözümlenir. Sonuç olarak iki şekilde elde edilen güvenlik katsayısı birbirine eşit olduğunda θ değeri bulunmuş olur.

$$\frac{X_L}{E_L} = \frac{X_R}{E_R} = \tan \theta = \text{sabit} \quad (3.15.)$$



Şekil 3.6. Spencer Yöntemi' nde dilimler arası kuvvetler (Yıldırım, 2004)

3.4.2.2. Kama (Blok) Yöntemi

Kama yöntemi göçme yüzeyinin dairesel olmadığı problemlerde uygulanabilecek en uygun yöntemdir. Bu yöntemde kayma düzlemi iki veya üç doğrudan oluşan bir geometrik şekilden oluşur. Zayıf tabaka üzerindeki dolgularda göçme yüzeyinin zayıf tabaka içinde ve doğrusal olması öngörülür. Kama yönteminde göçmeye karşı güvenlik denge için gerekli kayma mukavemetinin kayma gerilmesine oranıdır.

Yöntem grafik ve sayısal olarak iki şekilde çözüme götürür. Deneme yanılma yoluyla çözüme gidilir. Sayısal olarak çözüm adımları şu şekilde açıklanabilir:

- Bir deneme yüzeyi belirlenir.
- Kayma yüzeyi üzerinde bulunan kütle bloklara (kamalara) ayrılır. Burada önemli olan nokta, her kama ya da dilim tabanı bir zemin türü içerisinde olmalıdır. 3-5 kama uygulama için yeterlidir. (Şev dışında su bulunuyorsa suyun etkisi probleme, ağırlığı olan ancak kayma mukavemeti bulunmayan bir zemin gibi tanımlanır).

- Her dilim ve kamanın ağırlığı bulunur.
- Taban açısı (α), boşluk suyu basıncı (u), taban uzunluğu (l), kayma mukavemeti parametreleri (c , ϕ) belirlenir. Aşağıda verilen çizelgeler yardımıyla hesaplamalar yapılır.

Çizelge 3.3. Kama yöntemi hesap tablosu

Dilim No	w	α	l	c	ϕ	u	N_1 $\frac{c.l}{\cos \alpha}$	$N_2 W.tg \phi$	N_3 $\frac{u.l.tg \phi}{\cos \alpha}$

Deneme	Gs	Dilim No	N_4 $G_s.W.tg \alpha$	N_5 $G_s + tg \phi.tg \alpha$	ΔE	$\sum \Delta E$

$$\Delta E = \frac{N_4 - N_1 - N_2 + N_3}{N_5} \quad (3.16.)$$

Bu denklemi açık halde yazacak olursak,

$$\Delta E = \frac{G_s.W.tg \alpha - \frac{c.l}{\cos \alpha} - W.tg \phi + \frac{u.l.tg \phi}{\cos \alpha}}{FS + tg \phi.tg \alpha} \quad (3.17.)$$

- Denemede alınan Gs doğru ise $\sum \Delta E = 0$ olmalıdır. Eğer bu değer < 0 ise Gs değeri küçük seçilmiş, > 0 ise Gs değeri büyük seçilmiş demektir. Yeni bir Gs için işlem yenilenir, $\sum \Delta E$ değerinin sıfıra en yakın olduğu iterasyonda işlem bitirilir.
- Yeni bir göçme yüzeyi belirlenip aynı işlemler tekrarlanır ve minimum güvenlik sayısı elde edilir.

3.4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz (Plaxis Programı)

Sonlu elemanlar yöntemi, diferansiyel denklemler içeren yükleme, zemin-yapı etkileşimi, konsolidasyon, gerilme-şekil değiştirme, taşıma gücü ve zemin dinamiği konularında mühendislik problemlerini çözmeye yardımcı olan sayısal çözüm metodudur. Sonlu elemanlar yöntemi, geleneksel çözüm yöntemlerine uygun bir alternatif olmaktadır. Çünkü göçme mekanizmasıyla ilgili daha az kabul gerektirir ve analizlerde gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

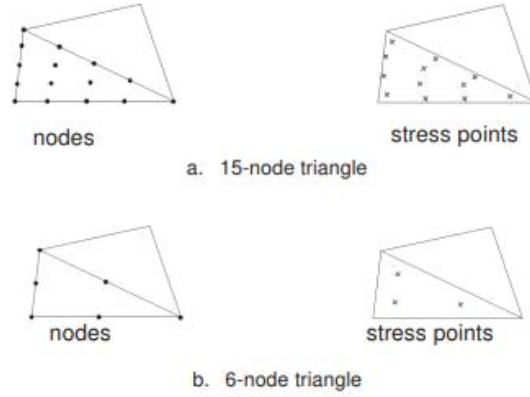
Plaxis, daha çok stabilite ve deformasyon analizleri için geliştirilmiş bir paket programdır. Plaxis, geoteknik mühendisliği projelerinde sıkça kullanılarak elde edilmek istenen çözüme hızlı ve güvenli bir şekilde ulaşmayı mümkün kılmaktadır.

Plaxis 2D V.8, “Input”, “Calculation”, “Output” ve “Curves” olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Input bölümünde çözülecek problem tüm yönleri ile programa tanıtılır. Calculation bölümünde analizler gerçekleştirilir. Output kısmı çıktı bölümüdür, burada analiz sonuçları grafikler halinde elde edilebilir. Curves ise istenilen grafiklerin oluşturulmasına olanak sağlayan bölümdür.

Plaxis programında ilk olarak düğüm noktası, model ve sınırlar belirlenir. Analizi yapılacak projenin geometrik modeli işlenir. Sonlu elemanlar yönteminden elde edilecek sonuçların doğruluğu, oluşturulan modelin zemin davranışının uygun bir şekilde simüle edilmesine bağlıdır. Oluşturulan modelin sınırları sonuçlara etkisi bakımından çok geniş tutulmamalıdır. Probleme ait gerçek veriler ile model detaylandırılır. Zemin tabakaları ve zemin özellikleri (zeminde ait parametreler), yapısal elemanlar, yükler ve inşaat aşamaları birer birer sistemde tanımlanır ve analizler gerçekleştirilir.

Plaxis’te nokta, çizgi ve hücre geometriyi meydana getiren ana bileşenlerdir. Nokta, çizgilerin başlangıç ve bitişlerini elemanların ve yüklerin yerini belirtmeye yardımcı olur. Geometrik modelin sınırları, farklı zemin tabakalarını birbirinden ayırma işlemi ve tanımlanacak yapısal elemanlar çizgi ile

gösterilir. Hücre ise, zemin tabalarını oluşturan homojen özellikteki etrafı çizgilerle çevrili alanlardır.



Şekil 3.7. Zemin elemanında gerilme ve düğüm noktalarının konumu (Plaxis, Reference Manual, 2018)

Çözümeye giderken sonlu elemanlar ağı (mesh) oluşturulduğunda hücreler üçgen elemanlara ayrılır. Bu elemanlar üzerinde deplasman hesabının yapıldığı düğüm noktaları yer alır (Şekil 3.7.). Plaxis, elemanlar için 6 ve 15 düğüm olmak üzere iki farklı seçenek sunmaktadır. Düğüm noktası arttıkça daha hassas sonuçlar elde edilir ve analiz süresi uzar. Gerilme için referans noktalar deplasman hesabının yapıldığı noktalarla aynı konumda değildir.

Plaxis ile yapılan şev analizlerinde güvenlik katsayısını hesaplamak için iki yol izlenmektedir. Bunlar kesme gerilmesi azaltması (ϕ -c reduction) yöntemi ve yer çekimi artırma (gravity) yöntemi olarak isimlendirilir.

ϕ -c reduction yönteminde sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) parametreleri kademeli olarak değerleri düşürülür. Bu parametreler göçme meydana gelene kadar azaltılır. Göçmenin meydana geldiği andaki güvenlik katsayısı toplam çarpanı, sistemin göçmeye karşı güvenlik katsayısını ifade eder. Plaxis’te güvenlik katsayısı toplam çarpan “ ΣM_{sf} ” aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\sum M_{sf} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \frac{c}{c_r} \quad (3.18.)$$

Burada φ ve c probleme ait programa girilen parametreleri ifade ederken φ_r ve c_r değerleri azaltılan parametreleri ifade etmektedir. Hesaplamaların başında ΣM_{sf} değeri 0.1 olarak ayarlanır. Kesme gerilmesinde yapılan azaltmalarla analizin her aşamasında ΣM_{sf} değeri kontrol edilir.

Gravity yönteminde zeminin dayanımını ifade eden tüm değerler sabit tutulur ve zemin kütlesi üzerinde yer çekimi göçme meydana gelene kadar artırılır. Şev stabilitesi hesaplarında yer çekimi arttırma yönteminde yer çekimi arttıkça dış kuvvetlerin arttığı varsayılır. Yer çekimi kuvvetinin arttırılması şev göçmesine neden olacağından şev göçmesine karşı yer çekimini temel alan güvenlik faktörü aşağıdaki gibi ifade edilir. ($g_{gerçek}$, 9.81 m/s^2 değerindeki yer çekimi ivmesidir).

$$F_{sgi} = \frac{g_{limit}}{g_{gerçek}} \quad (3.19.)$$

Plaxis 2D (2018) ara yüzünün eski versiyondan farkına da kısaca değinilecek olursa, eski program sekmelerinden farklı olarak yeni versiyonda “Soil”, “Structures”, “Mesh”, “Flow conditions”, “Staged constructions” aşamaları yer almaktadır. Eski versiyon ile aynı esaslar üzerine kuruludur. Ara yüzde bulunan “Model Explorer” sekmesi ile hesaplama fazları oluşturulurken ve sistem kurulduktan sonra sistemin kontrolü için kolaylık sağlanmıştır.

3.4.4. Slide Programı

Slide V.6.0. zemin veya kaya yamaçlarındaki dairesel ve dairesel olmayan yüzeylerin güvenlik faktörünü veya duraysızlık olasılığını değerlendirmek için 2D şev stabilize programıdır. Harici yükleme, yeraltı suyu ve destek yapıları çeşitli

şekillerde modellenabilir. Program limit denge yöntemlerini esas alarak çözüm yapar. Proje ayarlarından istenilen yöntem seçilip güvenlik sayısı hesaplanabilir.

3.5. Şev Hareketlerine Karşı Alınacak Önlemler ve İyileştirme Yöntemleri

Şev hareketlerine karşı alınacak başlıca önlemler; kaydırıcı kuvvetleri azaltmak, tutucu kuvvetleri arttırmak, hareketi meydana getiren sebepleri ortadan kaldırmaktır.

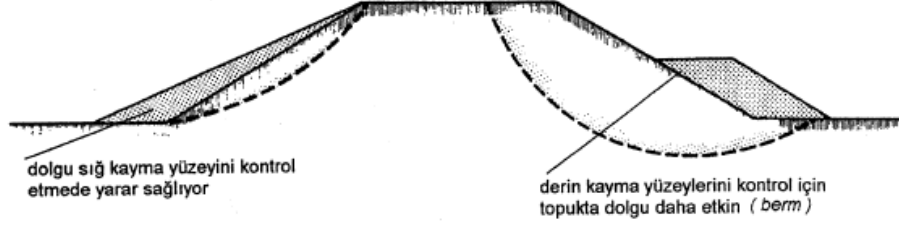
Şev harekete geçmişse bunu kontrol altına almak için sebep olan faktörleri ve süreci iyi bilmek gereklidir. Terzaghi'nin günümüzde geçerliliğini koruyan bu görüşü şev hareketlerini önlemede önemli bir yere sahiptir. Örneğin, stabilite boşluk suyu sebebiyle bozuluyorsa önce drenaj yöntemleri akla gelmelidir. Bu şekilde ekonomik ve hızlı çözümler oluşturulabilir.

Yamaç ve şevlerde stabiliteyi artırıcı başlıca iyileştirmeler aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

1. Şev-yamaç geometrisinde değişiklik yapılması
2. Yamaç veya şeve etki eden suyun kontrol altına alınması
3. Yapısal önlemler ile stabilite sağlama
4. Ortam özelliklerinin iyileştirmesi ile stabiliteyi sağlama

3.5.1. Şev-Yamaç Geometrisinde Değişiklik Yapılması

Bu konu; yamaç eğiminin azaltılması, şev yükünü azaltmak için kazı veya patlatma yardımıyla kaymaya sebep olacak kütlenin kaldırılması, topuğun desteklenmesi gibi iyileştirme yöntemlerini içerir (Şekil 3.8.).



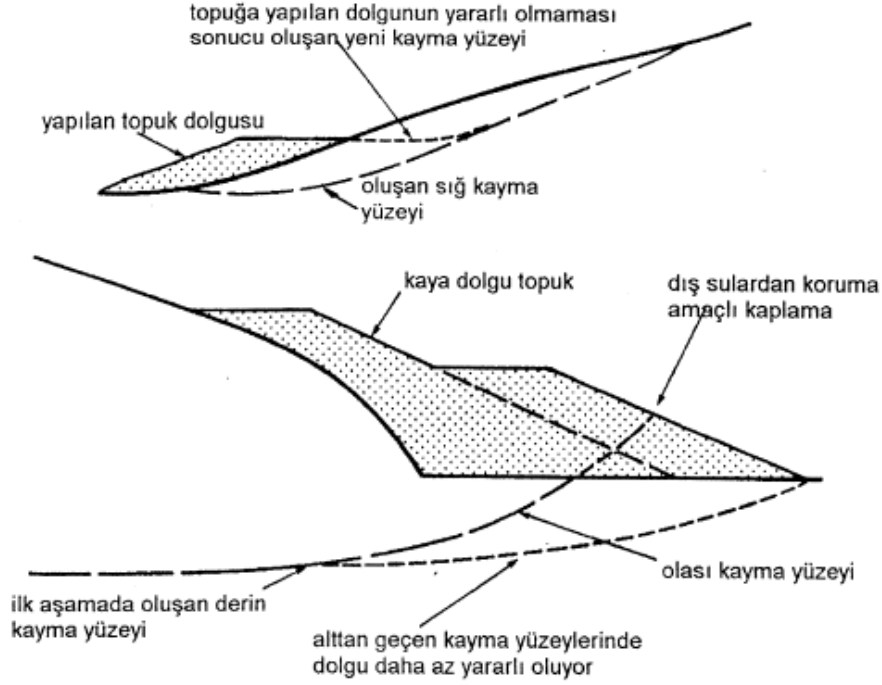
Şekil 3.8. Şev-yamaç geometrisinde değişiklik yapılması örnekleri (Önalp ve Arel, 2004)

3.5.1.1. Kademelendirme

Şevlerde stabiliteyi korumanın yollarından biri kademelendirmedir. Kademelendirme ile şev birkaç küçük şeve ayrılmış olur. Bu yöntem, güvenlik katsayısını büyütür, erozyon etkisi azaltılır ve bitkilendirme için elverişli yüzeyler oluşturulmuş olur. Ülkemizde yapılan kademelendirme uygulamalarında, 10m'lik kademe yüksekliği ile 3-5m platform teşkil edilmesi standart halini almıştır.

3.5.1.2. Topuk Yüklemesi

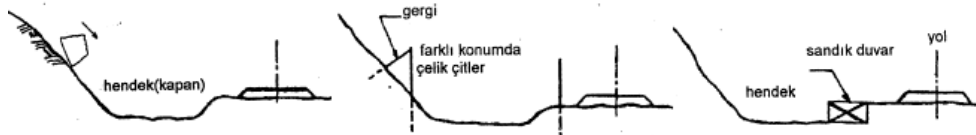
Şev ya da yamaçta sürücü kuvvetlerin etkisini azaltmak için topuğa yük konulur. Yapılacak yüklemenin kaymada önleyici olup olmayacağı öngörülmelidir. Sığ kayma yüzeylerinde elverişsiz olan bu yöntem derin kayma yüzeylerinde daha etkin hale gelir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Topuk dolgusunun sığ ve derin kayma yüzeylerinde etkinliği (Önalp ve Arel,2004)

3.5.1.3. Hendek

Bu yöntem özellikle kaya düşmesinin meydana gelebileceği yol projelerinde sıkça uygulanmaktadır. Hareket eden kütlelerin enerjisini azaltmak da düşmeye karşı alınabilecek bir önlemdir (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Düşmelere karşı alınan pasif önlem (Hendek, hendek ve çit, sandık duvar ve hendek) (Önalp ve Arel,2004)

3.5.2. Yamaç veya Şeve Etki Eden Suyun Kontrol Altına Alınması

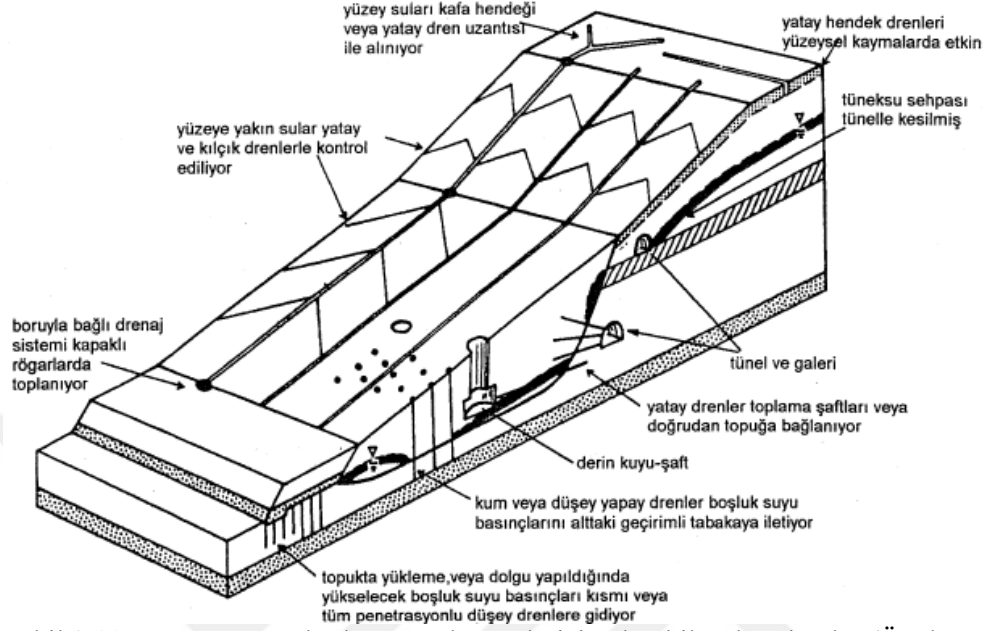
Şevlerde meydana gelen stabilitenin bozulması vakalarının çoğu su etkisinden olmaktadır. Stabilité yönünden, suyun zeminle temas etmesi, kapiler kuvvetleri azaltılması, birim hacim ağırlığını arttırması, doğal çimentolama etkisinin kaybolmasına sebep olması önem taşımaktadır.

Suyun şeve zararlı etkilerinden korunmak için suyu uzaklaştırmak veya drene etmek gereklidir. Drenaj yüzeysel drenaj ve derin drenaj olmak üzere iki şekilde incelenmektedir (Şekil 3.11.).

Yüzeysel drenaj, yapımı kolay ve maliyeti düşük olan önlemdir. Çok yaygın olarak kullanılan bu önlem ile yüzey sularının zemine girmesi önlenerek su yamaç/şevden uzaklaştırılır. Zeminde hareket başlamışsa ilk olarak alınacak önlem, çekme çatlaklarının püskürtme beton, akıcı beton, membran vb. malzemelerle kapatılarak zemine su girişleri derhal önlenmesidir.

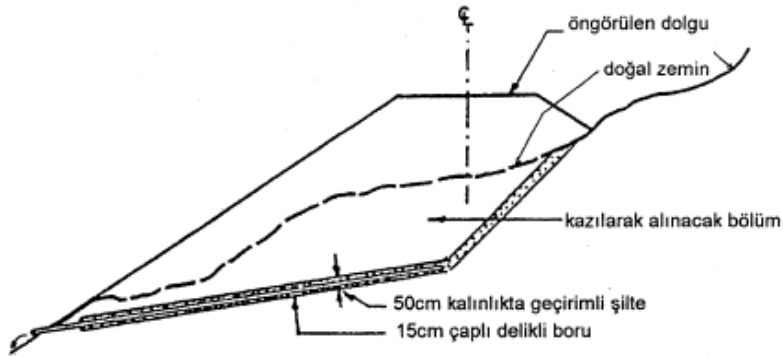
Yeraltı drenajı, olası kayma yüzeyinin yer altı suyunun içinde bulunduğu durumda kullanılan yöntemdir.

Hendekler: Şeve paralel veya dik pozisyonda teşkil edilebilir. Olası kazı problemleri sebebiyle 3-4 m' den daha derin açılmazlar.



Şekil 3.11. Yamaç ve şevlerde suyun kontrolü için alınabilecek önlemler (Önalp ve Arel, 2004)

Şilteler: Dolgu yapılacak alanın altındaki zemin zayıf ise bu kısım alınarak yerine başka malzeme koyulur. Drenajın sağlanması için kazıdan sonra zemine geçirimli şilte serilmektedir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Dolgu altında drenaj şiltesi uygulaması (Önalp ve Arel, 2004)

Yatay Drenaj: Bu yöntemde yatay drenler zemin içerisine sondaj makineleri yardımıyla yerleştirilir. Yatay drenlerin 100m'ye kadar çalışabildiği bilinmektedir. Kayalarda uygulanacak yatay drenlerde genellikle boru kullanılması gerekmez. Bu yöntemle ilk su seviyesi 5m kadar aşağı çekilebilir.

Drenaj kuyuları: Yamaç içinde geçirimsiz tabakaya kadar inen düşey yapılarıdır. Drenaj kuyularının çapları 150mm ile 500mm arasında değişebilir. Pompalı ve serbest akımlı olarak oluşturulabilirler.

Galeriler: Su debisinin yüksek olduğu büyük projelerde galerilerle drenaj yöntemine başvurulur. Galerilerin stabiliteye etkisi diğer yöntemlere kıyasla yüksek düzeydedir ve başarılı sonuçlar vermektedir.

Elektro ozmoz yöntemi: Kil ve siltlerde uygulanabilen bu yöntemde suyun çekilmesi işlemi yer çekimi kuvvetinden farklı bir kuvvetle yapılır. Zemine yerleştirilen anot ve katoda doğru akım uygulanarak su anotdan katoda doğru gönderilmekte ve buradan pompaj ile tahliye edilmektedir.

3.5.3. Yapısal Önlemler ile Stabilite Sağlama

Şev stabilitesinde direnen kuvvetleri arttırmak için yapısal önlemler uygulanmaktadır. Bunun için kayan kütlelerin önüne destek sistemleri yapılmaktadır. Destek sistemlerinde rijit elemanlar yerine esnek elemanlar kullanılması sistemin ömrünü arttırmaktadır.

Kazık, istinat duvarı, palplanş, payanda uygulaması, sandık duvar, kafes duvar, perde uygulaması, donatılı zemin uygulamaları, yüzeysel önlemler (beton püskürtme, yüzeyin örtülmesi vb.) şev stabilitesi için alınabilecek yapısal önlemler arasındadır. Aşağıda kazık, istinat duvarı, püskürtme beton ve donatılı zemin gibi günümüzde sıkça kullanılan uygulamalardan bahsedilmektedir.

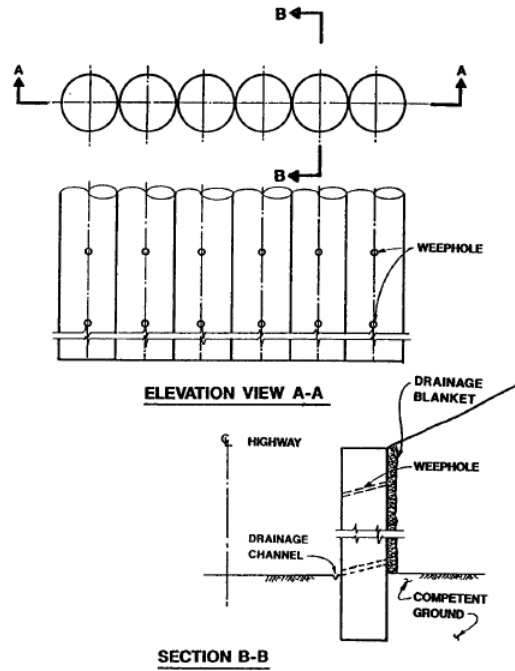
3.5.3.1. Kazık Uygulaması (Yanal Dirençli Kazık)

Duvarlı sistemlerin büyük boyuttaki kütle hareketlerini durdurmaya yeterli olmaması üzerine kazıklı sistemlerden yararlanılmaya başlanmıştır. Çakma ve

delme olarak iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Olası göçme yüzeyinin sürtünmeli olması durumunda çakma kazık uygulamasıyla ortam sıkıştırılabilmektedir.

Yanal dirençli kazıklar tercihe göre çapı 1m'den az olan genellikle bir başlık ile birleştirilmiş ayrıık veya birbirine teğet olarak teşkil edilebilen ankastre kazıklardan oluşur (Şekil 3.13.). Kazıklarda ankraj uygulamasıyla da karşılaşılabilmektedir.

Kazığın amacı, kaymış veya kayacak olan kütleyi rijit (ötelenmeye müsait olmayan) bir cisimle geçip kazığı sağlam tabakaya yeterli derinlikle saplayarak direnen kuvvetlere destek sağlamaktır. Kazık ile önlem alındığında zemin hareketlerinin önüne geçilir. Güvenlik katsayısı yükseltilmiş olup şev denge konumuna getirilir. Bu uygulama sert zeminler ve kayalarda daha uygun olmaktadır. Yumuşak zeminlerde, zeminin kazıklar arasından akıp gitme durumu vardır.



Şekil 3.13. Drenajlı bitişik kazık uygulaması (Abramson ve ark, 1996)

Yanal yükler altında kazığın davranışı incelenirken proje yükleri etkisiyle kazığın eğilmesi ve direnci göz önünde bulundurulmak zorundadır. Serbest başlı kazık kısa ise yük etkisiyle kazık ötelenir. Ancak uzun kazıkların yanal yük etkisinde davranışı farklı olmaktadır. Genel olarak artan yüklerle uzun kazıkların alt tarafları düşey olarak kalır, üst kısımları yer değiştirme yapar. Zeminler için basit gerilme şekil değiştirme bağıntısı verilemediğinden kazığın proje yükleri altında yer değiştirmesi kesin olarak hesaplanamaz. Bu yüzden, kazıkların tasarımı için belirli kabuller yapmak gerekir. Problemleri incelerken iki farklı yol kullanılabilir. Bunlar:

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

3.5.3.1.(1). Yatak Katsayısı Kullanarak Hesap Yapılması

Problemi basite indirmeye yarayan yatak katsayısı yönteminde, herhangi bir noktadaki zemin direnci ile yer değiştirme arasındaki ilişki tanımlanır. Yatak katsayısı gerçeğe yakın tahmin edilmeye çalışılır. Çünkü yatak katsayısı gerçek bir zemin sabiti değildir ve fiziksel bir özelliği doğrudan temsil etmez.

Yatak katsayısı kavramı 1867 yılında Winkler tarafından geliştirilmiştir. Genel olarak zemin üstündeki bir kirişin herhangi bir noktasındaki gerilme (p) ile o noktadaki yer değiştirme (y) arasındaki bağıntıya yatak katsayısı (k) denir. ($k=p/y$) Terzaghi (1955) kazıkları da düşey kirişler gibi düşünerek bu alanda yatak katsayısı tanımını geliştirmiştir. Günümüzde geliştirilen yazılımlarla yöntemin kullanımı sağlanmaktadır.

3.5.3.1.(2). Zemini İdeal Elastik Bir Cisim Olarak Kabul Ederek Hesap Yapılması

Zemini homojen, izotrop, elastik yarı ortam; kazığı ise elastik bir cisim olarak kabul eden yaklaşımdır. Bu yöntem, elastik sabitler, elastisite modülü (E) ve

poisson oranının (ν) zemin davranışını temsil etmesi beklenen killi zemin tabakaları için iyi sonuç verebilmektedir.

3.5.3.2. İstinat Duvarı

İstinat duvarları belirgin özellikleri ve tipleri bakımından çeşitli gruplara ayrılmaktadır. Dayanma yapıları esnek, yarı rijit ya da rijit olarak tasarlanabilir. Aşağıda bazı dayanma yapısı tiplerinden bahsedilmektedir.

Ağırlık tipi dayanma duvarı, yanal toprak itkisini kendi ağırlığı ile karşılayan istinat duvarı tipidir.

Konsol duvar tipinde topuk tarafındaki temel uzun yapılı ve temel üzerine binen zeminin de desteğinden faydalanılır.

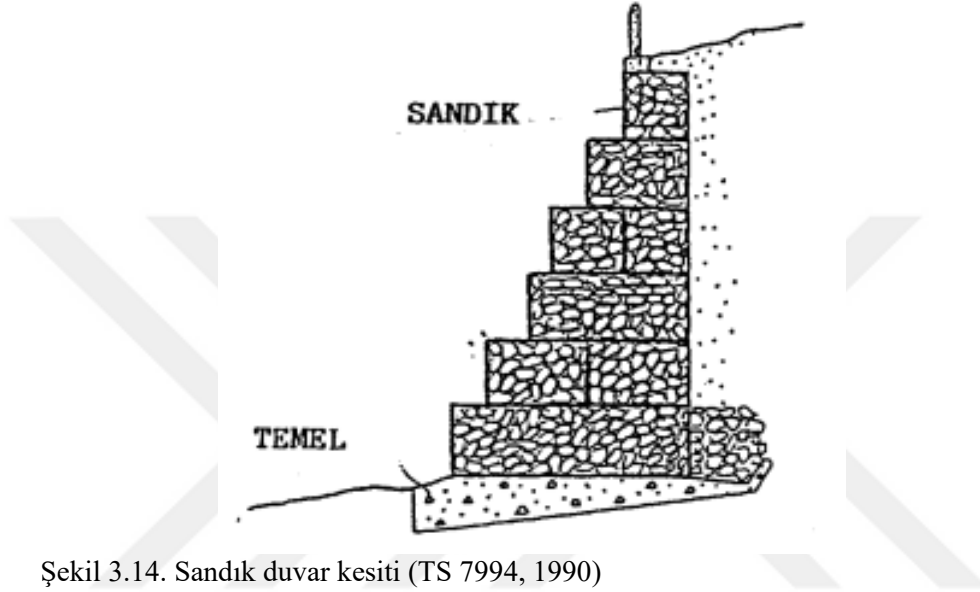
Payandalı duvar tipine, eldeki problem için konsol duvarın yeterli olmadığı durumlarda başvurulur. Duvarın taban ve gövdesini bağlayan payanda denilen destek elemanlar konularak sistemin yük taşıma kapasitesi artırılır.

Kafes duvarlar, yanal ve düşey hareketlere karşı çok esnek olmaları nedeniyle yamaç ve şevlerin dengede tutulmasında önemli yere sahiptir. Hızlı ve kolay bir şekilde birbirine geçmeli metal veya betonarme kirişlerle istenilen uzunluk ve yükseklikte birbirine bağlı hücreler yapılabilir. Bu yapı elemanları ile kurulan kafeslerin içi taşla, gerektiğinde daneli malzemeler ile doldurularak dayanma duvarı yapılabilir.

Kazıklı perdeler, tutulması gereken zemin yüksekliği fazla zemin özelliklerinin yetersiz olduğu durumda oluşturulur. İlk önce yerinde dökme perdeler yapılır arkasından kazıya geçilir.

Diyafram duvar, zeminin kendini taşıyamayacak kadar zayıf olması durumunda, derin kazılarda kazı yüzlerinin önceden desteklenmesi, yer altı suyunun kazı çukuruna girişinin önlenmesi ve kazıya başlamadan önce komşu yapıların güvenliğinin sağlanması amacıyla yapılır. Kısıtlı alanlarda çalışma olanağı sağlar.

Sandık duvar tipinde, paslanmaz çelik tellerle yapılan kafes tipi tel örgü sandıkları içine kaya dolgu yerleştirilir. Bu sandıklar üst üste konularak sandık tipi dayanma yapısını oluştururlar (Şekil 3.14.).



Şekil 3.14. Sandık duvar kesiti (TS 7994, 1990)

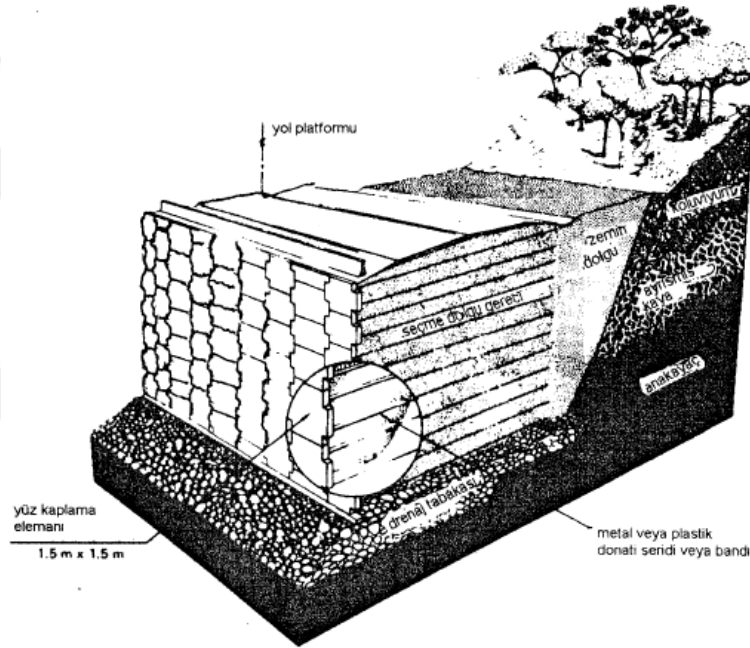
Palplanş perdeleri; ahşap, hazır beton veya çelik elemanların zemine yan yana çakılmasıyla oluşturulur. Çelik olarak kullanılan palplanşların en önemli özellikleri; ekonomik, kolay taşınabilir, suya karşı önemli ölçüde geçirimsiz olmasıdır. Gömme ve destekli olarak teşkil edilen tipleri mevcuttur.

3.5.3.3. Püskürtme Beton

1960’larda tünel desteklemesinde kullanılan püskürtme beton günümüzde altına serilen hasır çelik ve karışıma ilave edilen malzemelerle taşıyıcı özellik de göstermektedir. Betonun korumak için yamaç veya şevlerde drenaj boruları kullanılmasında fayda vardır. Drenaj ile zemin içindeki su basıncı azaltılmadır. Kaya türü yamaçlarda yüzeye destek vermekle birlikte kazıdan sonra ana kayanın deforme olmasını önlemektedir.

3.5.3.4. Donatılı zemin

Ulaşım yapılarında sıkça kullanılan bir uygulama haline gelmiştir. İri daneli zemin arasına katmanlar halinde geosentetik malzeme, çelik veya plastik şeritler serilerek oluşturulur. Zeminde var olmayan çekme dayanımını sağlar. Zayıf zeminlerde kolaylıkla uygulanmasının sebebi geniş alanlar kullanılarak yapıldığından taşıma gücü sorununun bulunmamasıdır (Şekil 3.15.).



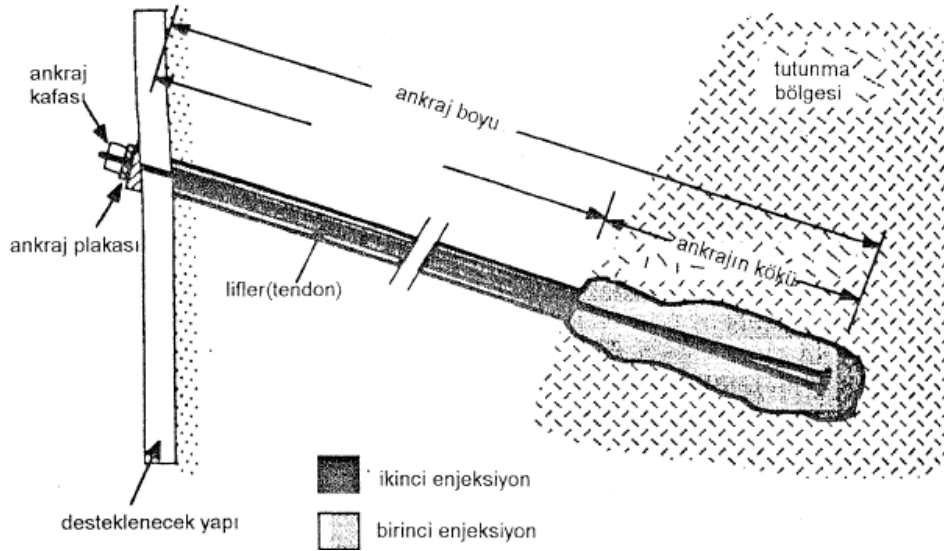
Şekil 3.15. Donatılı zemin uygulaması (Önalp ve Arel, 2004)

3.5.4. Ortam Özelliklerinin İyileştirilmesi ile Stabilitayı Sağlama

Bu yöntemlerin genelinde amaç kaydıran kuvvetlere karşı direncin artırılmasıdır. Ankraj, zemin çivisi, taş kolon, mikro kazık, derin karıştırma ve bitkilendirme, ortam özelliklerini iyileştiren uygulamalardan bazılarıdır. Burada yaygın olarak kullanılan ankraj, zemin çivisi ve taş kolon uygulamaları ele alınmıştır.

3.5.4.1. Ankraj

İşlevine göre serbest ve öngermeli şekilde yapılabilen ankraj; kafa, gövde ve kök olmak üzere üç kısımdan oluşur. Kök kısmı ortama çimento veya kimyasal enjeksiyonla tutturulur, kafa kısmı ise çekme kuvvetlerini karşılayan bölümdür. Tipik zemin akrajlarının boyu 4-12m ve yük taşıma kapasitesi ise 60-1000kN'dur. Kayalarda yük kapasitesi daha da artmaktadır. Maliyeti yüksek bir yöntemdir (Şekil 3.16.).



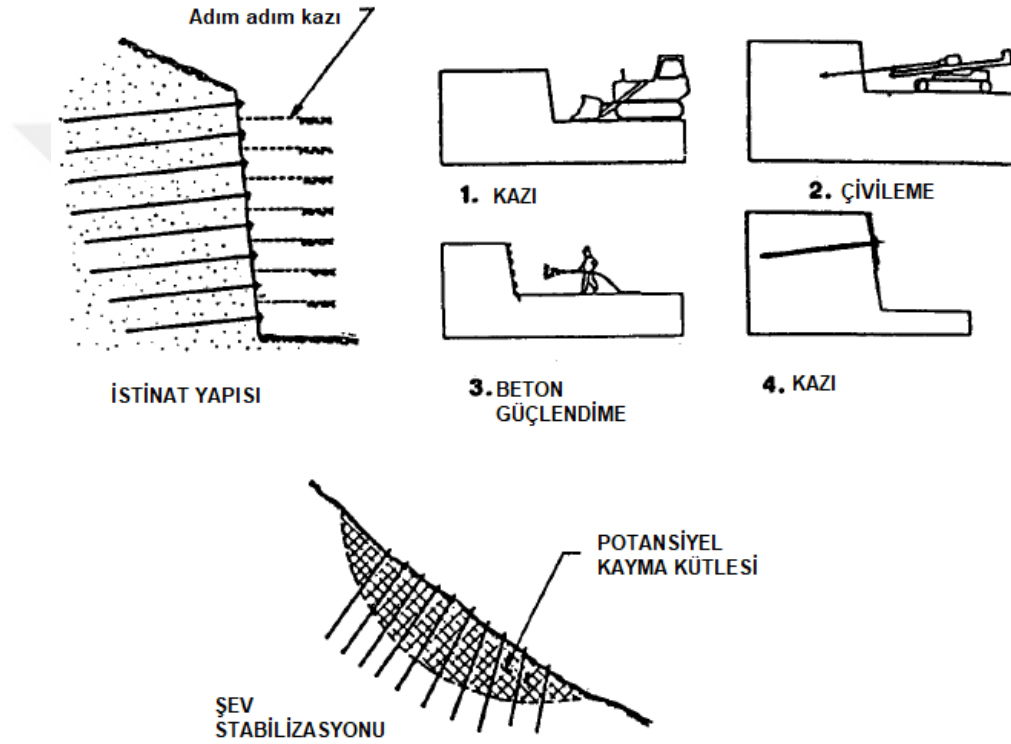
Şekil 3.17. Bir ankrajın basit kesiti (Önalp ve Arel, 2004)

3.5.4.2. Taş Kolon

İlk olarak Japonya'da uygulama alanı bulan bu yöntem hızla gelişim göstermiş uygulama alanı genişlemiş bir iyileştirme yöntemidir. Zemin içerisine sıkıştırılmış taş kolonlar imal edilmektedir. Taş kolonların boyutlandırılmasında kolon çapı 0.6m'den aralığı ise 2m'den az olamaz. Kolon oluşturulurken malzemeyi sıkıştırmak için titreşim kullanılır. Taş kolon çok zayıf zeminlerde etkili olmayabilir Zayıf zeminlerde dağılma riskini ortadan kaldırmak için kolon içine çimento enjekte edilir.

3.5.4.3. Zemin Çivisi

Zemin çivisi, gerilme alanı içerisinde sağladığı çekme dayanımı ile meydana gelebilecek ötelemeleri kontrol altına alır. Zemine açılan delik içine betonarme demiri gönderilir, çimento enjeksiyonu yapılır ve çivi zemin yüzeyine bir plaka ile sabitlenir.



Şekil 3.18. Zemin çivisi uygulaması (Mitchell ve Villet, 1987)



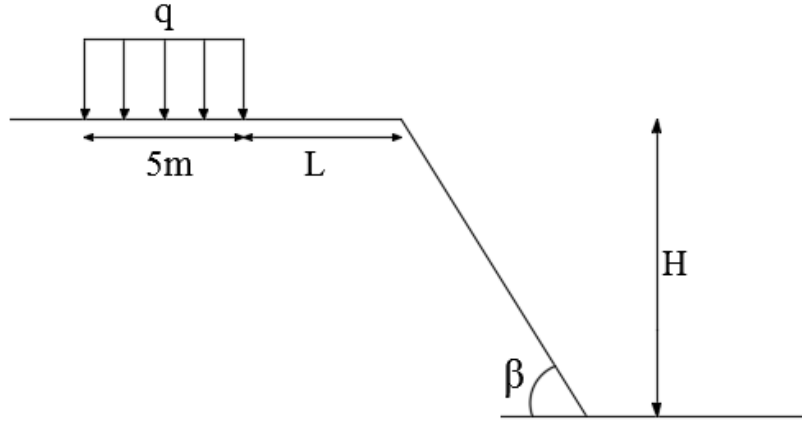
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Genel

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemine dayanan Plaxis 2D programı yardımıyla şev dengesi incelenmiştir. Çalışmada şeve etki eden parametrelerin farklı kombinasyonlarıyla güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Grafikler üzerinde sonuçlar gösterilmiştir.

4.2. Parametrik Çalışmalar

Analizler için bir şev modeli belirlenmiş ve bu model üzerinde farklı değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Genel şev modeli

Burada,

q: Çizgisel yük,

L: Yükün şev tepesine olan uzaklığı,

H: Şev yüksekliği,

β : Eğim açısını ifade etmektedir.

Çizgisel yükün uzunluğu yükün olduğu her problemde sabit olarak B:5m olarak alınmıştır.

Analizlerde doğrusal elastik-mükemmel plastik davranışı prensip kabul eden Mohr Colulomb zemin modeli kullanılmıştır. Kullanılan parametreler aşağıdaki çizelgede yer almaktadır (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (kN/m ³)	18.0
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	20.0
Elastisite modülü E (kN/m ²)	20000
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	30
Dilatasyon açısı, ψ (°)	0
Kohezyon, c (kN/m ²)	25
Poisson Oranı, ν	0.35

4.2.1. Plaxis 2D’de Modelin Tanımlanması ve Analiz Aşamaları

Plaxis 2D programında bir şevde güvenlik sayısını hesaplamak için genel olarak şu adımlar izlenmiştir.

- ‘Plane Strain’ (düzlemsel deformasyon) koşulları ve elemanlar 15 düğüm noktalı olarak seçilmiştir.
- SI birim sisteminde m, kN, gün birimleri kullanılmıştır.
- Genel ayarlar sekmesinden çalışma alanı sınırları belirlenip şev geometrisi çizilmiştir. Çalışma alanı sınırları, sınır koşullarından etkilenmeyecek şekilde belirlenmiştir.
- “Standard fixities” ile sınır koşulları tanımlanmıştır.
- “Material Sets” komutu kullanılarak zemin özellikleri değerleri girilmiş ve zemin özelliği şev modeli üzerine atanmıştır.

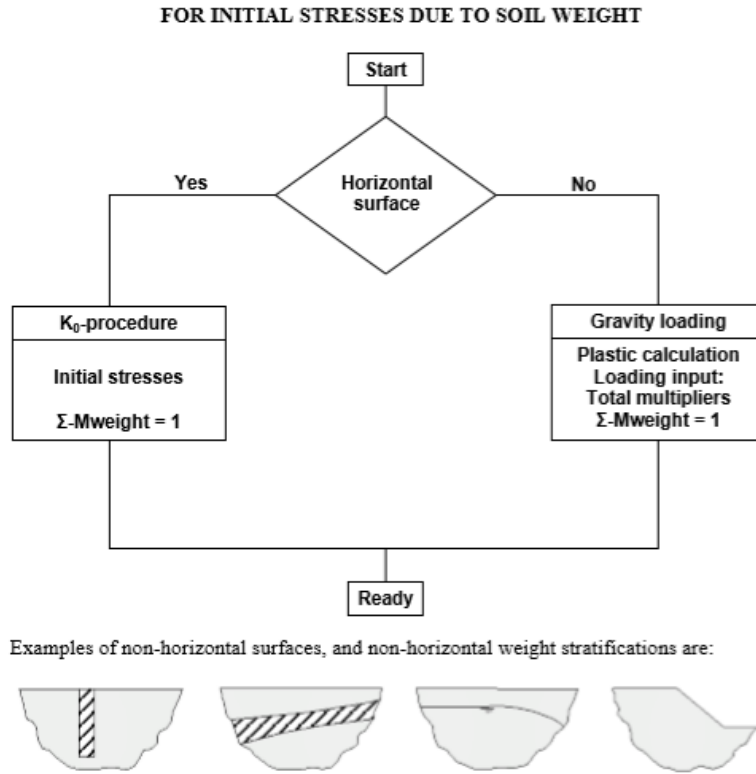
- Malzeme davranış tipi drenajsız olarak alınmıştır.
- Analizlerde ara yüzey elemanı ‘Interface’ kullanılmamıştır.
- Dilatasyon açısı (ψ) için Plaxis programının önerdiği şekilde ϕ -30 formülü kullanılmıştır.
- “Distributed load” komutu ile çizgisel yükün konumu ve değeri model üzerine işlenmiştir.
- “Generate Mesh” komutu ile sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Analizlerde sonlu elemanlar ağı daha hassas sonuçlar elde edilebilmesi için “Fine” olarak tanımlanmıştır.
- “Initial conditions” bölümünde varsa yeraltı suyu seviyesi tanımlanmaktadır. Modelde yeraltı suyuna yer verilmemiştir.
- “Initial Conditions” bölümünde K_0 prosedürü uygulamadan hesap (analiz) aşamasına geçilmiştir. (Emir, 2005)

Zemin yüzeyi eğimli olduğundan dolayı başlangıç zemin gerilmeleri K_0 prosedürü (K_0 Procedure) yöntemi yerine ağırlık yüklemesi (Gravity loading) ile hesaplanmıştır (Şekil 4.2.).

Başlangıç gerilmeleri drenajsız davranışa maruz kalmadığı için gravity loading süresince drenajsız davranış etkisizleştirilir. Bu işlem “Calculation” penceresinden “Parameters” sekmesinin “Ignore Undrained Behavior” seçilerek yapılabilir (Plaxis Material Models Manual, 2002).

Ağırlık yüklemesi, ilk aşamada, K_0 prosedüründe $\sum M_{weight}=0$ ayarlayarak yapılır. Bu şekilde, zemin kütlesi içinde hiçbir başlangıç gerilimi oluşmaz. Zemin kütlesinin ilk gerilmeleri daha sonra programın hesaplama modülünde birinci aşamanın “Calculation Type” plastik olarak seçilmesiyle hesaplanır. Eğer zemin katmanlarından herhangi biri “Undrained” olarak modellenirse, “Parameters” sekmesinden “Ignore Undrained Behavior” seçilmelidir. Bunun nedeni, başlangıçta, harici bir yük olmadığında ve geometride hiçbir değişiklik

yapılmadığında, zeminin drenajlı bir durumda olmasıdır. “Loading input” bölümünde toplam çarpan seçeneği işaretlenir ve “Multiplier” sekmesinde $\Sigma M_{weight}=1$ yazılır. Ardından bir sonraki gerçek inşaat aşamaları modellenir (Gouw, 2014).



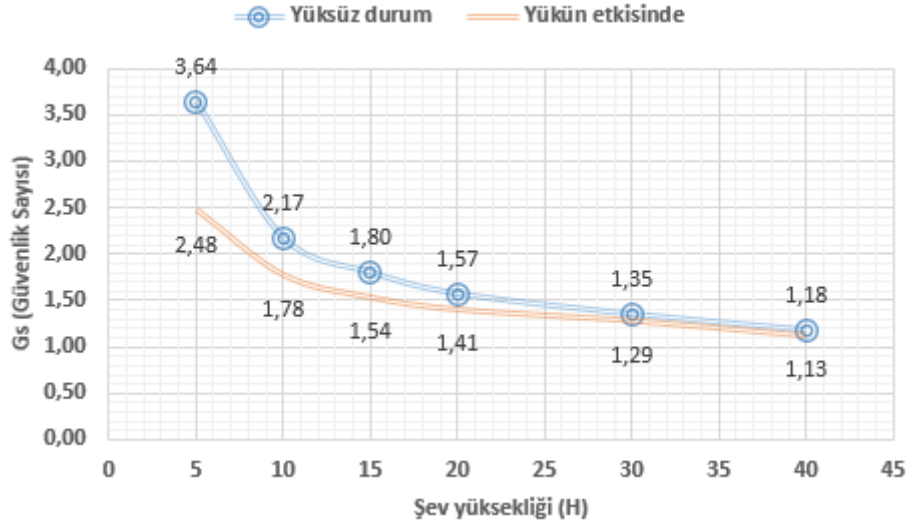
Şekil 4.2. Plaxis’te zemin yüzeyinin yatay olup olmaması durumunda izlenecek hesap adımı şeması (Plaxis Material Models Manual, 2002)

- İkinci aşamada yük etki ettirilir. Problemde yüksekliğin, şev eğimin ve yükün konumunun etkisi incelenirken sabit yük değeri 50 kN/m^2 olarak alınmıştır. “Calculation type” plastik, “Loading input” bölümünden inşaat aşaması seçilip “Define” sekmesi ile yük etkin hale getirilir ve değeri girilmektedir.

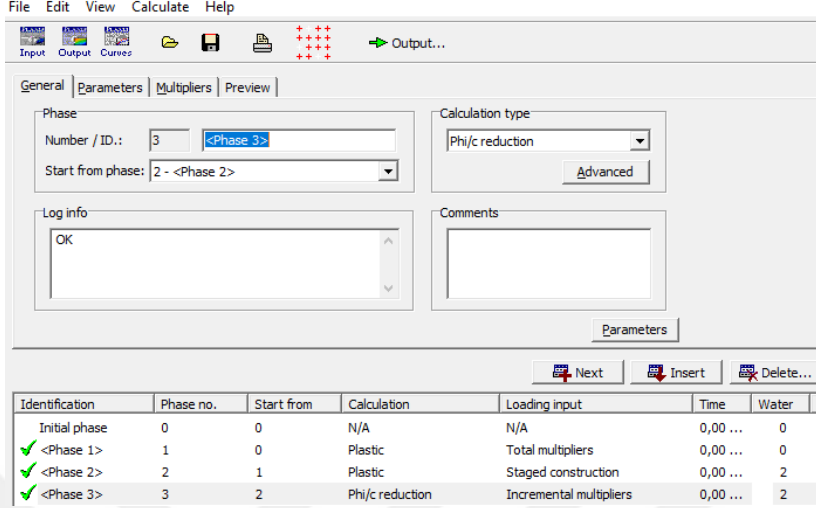
- Analizin üçüncü aşamasında şevin göçme analizi “Calculation type” sekmesinden “Phi-c Reduction” seçimi ile yapılır. Burada mukavemet azaltması yöntemiyle güvenlik sayısı hesaplanmaktadır. ‘Reset displacements to zero’ komutunun da seçili olması ağırlık yüklemesi sonucunda oluşan ve gerçek olmayan deplasmanların sıfırlanması yönünden önemlidir.

4.2.2. Şev Yüksekliğinin Güvenlik Sayısına Etkisi

Analizlerde tüm parametrik değerler sabit tutulurken şev yüksekliği (H) değiştirilmiştir. Şev eğimi 45° olarak alınmıştır. Yükün şev tepesine olan uzaklığı 5m’dir. Çizgisel yükün uzunluğu 5m, değeri $q: 50 \text{ kN/m}^2$ ’ dir. Şev yüksekliğinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca analizler şev yüksekliği değiştirilirken yükün etki etmesi ve yükün kaldırılması şeklinde iki farklı durum için tekrarlanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.3.’te gösterilmiştir.



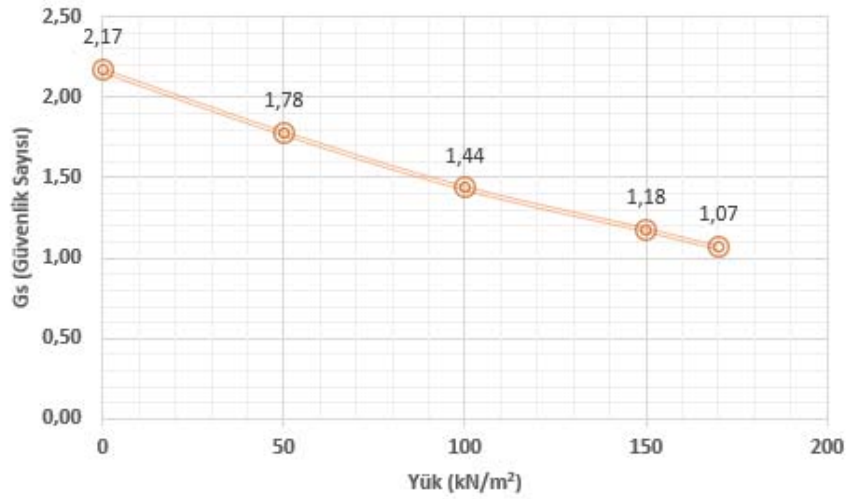
Şekil 4.3. Şev yüksekliğinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi



Şekil 4. 5. Plaxis ile analizde “Calculation” sekmesinden görüntü

4.2.3. Yük Değerinin Güvenlik Sayısına Etkisi

Analizlerde H: 10m, $\beta:45^\circ$ değerleri esas alınarak model kurulmuştur. Tüm parametreler sabit tutulurken yükün; 50, 100, 150, 170 kN/m² olduğu durumlar için güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Çizgisel yük, 5m uzunluğundaki alana etki ettirilmiştir, yükün şev tepesine olan uzaklığı ise (L) 5m’dir.



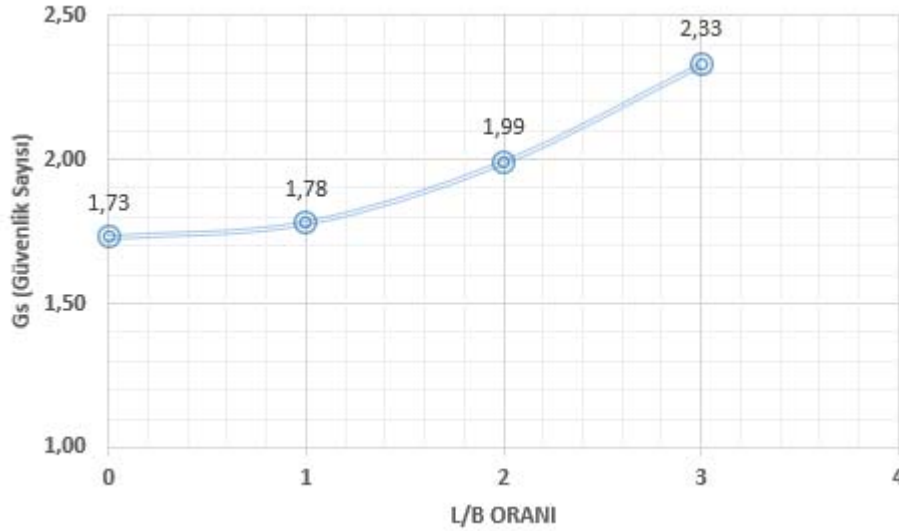
Şekil 4.6. Yük değerinin güvenlik sayısına etkisi

Yük miktarı arttıkça güvenlik sayısı azalmıştır. Yük değerinin 170 kN/m^2 olduğu değerde, güvenlik sayısının 1.07'ye gelmesiyle şevin göçme sınırına yaklaştığı görülmüştür (Şekil 4.6).

4.2.4. Yükün Konumunun Güvenlik Sayısına Etkisi

Analizlerde H: 10m, β : 45° değerleri esas alınarak model kurulmuştur. Tüm parametreler sabit tutulurken sadece yükün konumu (şev tepesine olan uzaklığı) değiştirilmiştir. Her durum için güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Ayrıca Slide programı ile analizler gerçekleştirilmiş sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir.

Şekil 4.7.'de verilen çizelgede L/B oranı ile güvenlik sayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yük, şev tepesinden uzaklaştıkça güvenlik sayısının arttığı görülmüştür (B: çizgisel yükün etkidiği uzunluk, L: şev tepesine olan mesafe olarak belirtilmiştir).



Şekil 4.7. Yükün konumunun güvenlik sayısına etkisi

Aynı analiz Slide programında tekrarlandığında L/B oranına göre güvenlik sayıları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Sonuçların Plaxis analizlerinden elde edilen sonuçlarla yakın olduğu görülmüştür.

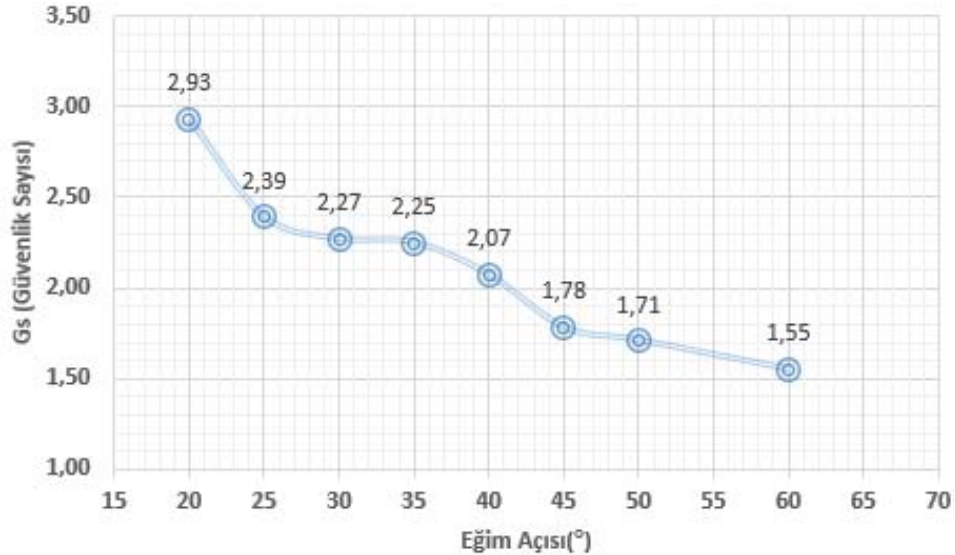
Çizelge 4.2. Slide analizlerinden elde edilen sonuçlar

L/B	Slide- Güvenlik sayısı		
	Bishop	Jambu simplified	Spencer
0	1.737	1.622	1.736
1	1.837	1.726	1.880
2	2.010	1.970	2.104

4.2.5. Eğim Açısının Güvenlik Sayısına Etkisi

Analizlerde H: 10m, eğim açıları 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 60° değerleri esas alınarak model kurulmuştur. Tüm parametreler sabit tutulurken sadece eğim açısı değiştirilmiştir. Her durum için güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Çizgisel yük 5m uzunluğundaki alana etki ettirilmiştir, değeri $q: 50 \text{ kN/m}^2$ dir.

Aşağıdaki verilen grafikten de anlaşılabacağı üzere şev eğim açısı arttıkça güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür (Şekil 4.8.).



Şekil 4.8. Şev eğiminin güvenlik sayısına etkisi

Slide programında, eğim açısına göre güvenlik sayısı hesaplanmış sonuçlar aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Sonuçların Plaxis analizlerinden elde edilen sonuçlarla yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Slide analizlerinden elde edilen sonuçlar

Eğim açısı	Slide- Güvenlik sayısı		
	Bishop	Jambu simplified	Spencer
30	2.350	2.180	2.350
45	1.837	1.726	1.880

4.2.6. Drenajlı ve Drenajsız Durumda Güvenlik Sayısı

Burada analizlerde drenajlı ve drenajsız durumda iki farklı zemin için parametreler belirlenmiştir. Zeminin kayma mukavemeti parametreleri kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve bu değerlere göre farklı elastisite modülleri (E) değerleriyle ele alınarak güvenlik sayısının nasıl değiştiği gözlenmiştir.

Şev modeli için eğimi 0.5 olan şev modeli kullanılmıştır.

Drenajlı durum için Plaxis programında $c=0$ kN/m² değeri yerine, hesaplama performansını geliştirmek için küçük bir kohezyon değeri olarak $c=2$ kN/m² kullanılmıştır.

Drenajsız durumda da aynı sebepten dolayı $\phi=0,01^\circ$ olarak alınarak hesap yapılmıştır.

Analizlerde doğrusal elastik-mükemmel plastik davranışı prensip kabul eden Mohr Colulomb zemin modeli kullanılmıştır. Şev üzerinde herhangi bir yük bulunmamaktadır.

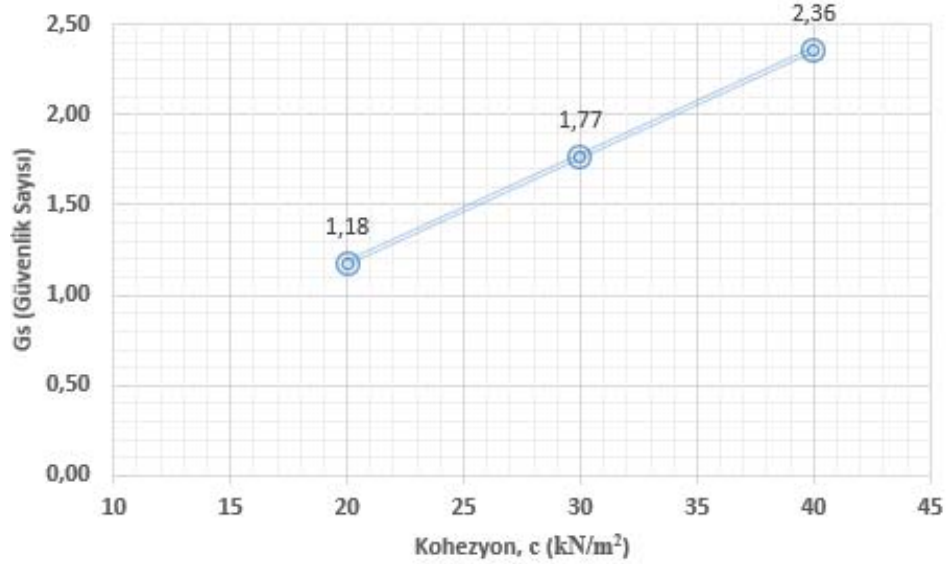
Farklı kohezyon ve elastisite modülleriyle güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Genel olarak “*Plaxis 2D’de Modelin Tanımlanması ve Analiz Aşamaları*” başlığı altında anlatılan işlem adımlarıyla çözüme gidilmiştir. Herhangi bir yük olmadığından analiz; ağırlık yükleme ve mukavemet azaltması yöntemiyle güvenlik sayısının hesaplanması olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. Drenajsız durumda kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (kN/m ³)	18.0
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	20.0
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	0.01
Dilatasyon açısı, ψ (°)	0
Poisson Oranı, ν	0.35
Malzeme tipi	Drenajsız

Kohezyon, c (kN/m ²)	Elastisite Modülü, E (kN/m ²)
20	5000
30	7500
40	10000

Kullanılan zemin parametreleri Çizelge 4.4.'te, elde edilen sonuçlar Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kohezyonun güvenlik sayısına etkisi

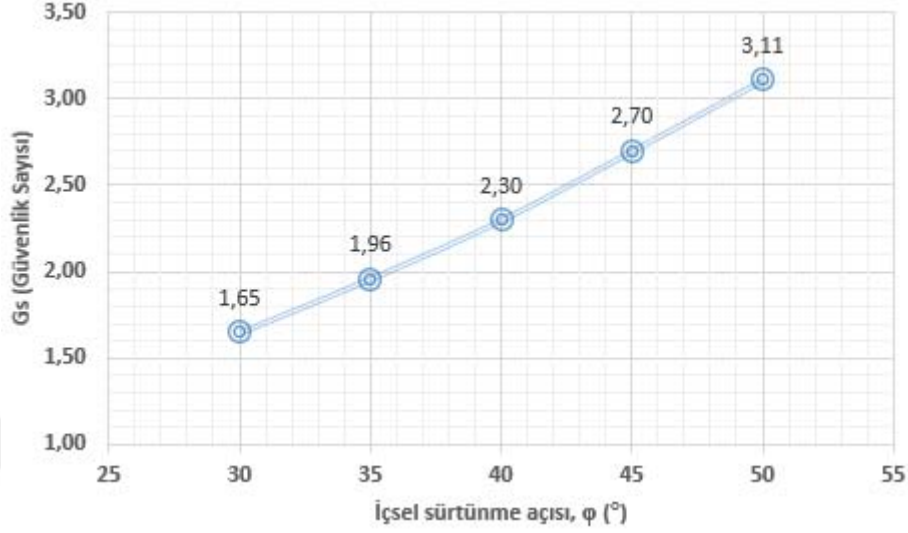
Çizelge 4.5. Drenajlı durumda kullanılan zemin parametreleri

Parametre	Değeri
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (kN/m ³)	18.0
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	20.0
Kohezyon, c (kN/m ²)	2
Poisson Oranı, ν	0.3
Malzeme tipi	Drenajlı

İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	Dilatasyon açısı, ψ (°)	Elastisite modülü (E) (kN/m ²)
30	0	22000
35	5	24000
40	10	26000
45	15	30000
50	20	34000

Farklı içsel sürtünme açıları ve elastisite modülleriyle güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Genel olarak “*Plaxis 2D’de Modelin Tanımlanması ve Analiz Aşamaları*” başlığı altında anlatılan işlem adımlarıyla çözüme gidilmiştir. Herhangi bir yük olmadığından analiz; ağırlık yükleme ve mukavemet azaltması yöntemiyle güvenlik sayısının hesaplanması olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan zemin parametreleri Çizelge 4.5.’te, elde edilen sonuçlar Şekil 4.10.’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. İçsel sürtünme açısının güvenlik sayısına etkisi

Drenajlı ve drenajsız zemin tipi için içsel sürtünme açısı ve kohezyonun artmasıyla değişen güvenlik sayıları değerleri yukarıda grafiklerle gösterilmiştir. Zeminin mukavemet parametrelerinin artmasıyla güvenlik sayısının da arttığı görülmüştür.

4.2.7. Tabakalı Durumda Güvenlik Sayısı

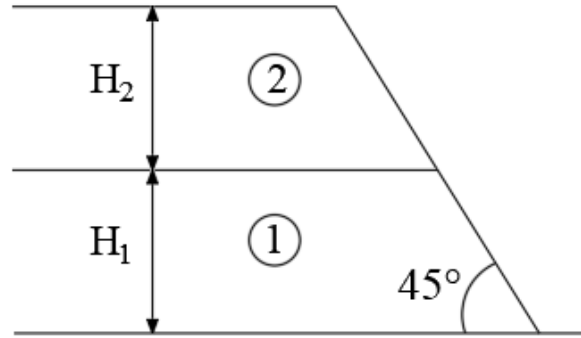
İçinde iki farklı zemin türü bulunan şevin güvenlik sayısı hesaplanmıştır. Tabaka kalınlıkları değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Alt tabakada üst tabakaya göre kaymaya karşı daha dirençli bir zemine yer verilmiştir. Alt tabaka 1 numaralı zemin türü, üst tabaka ise 2 numaralı zemin türü olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.11.). Kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.6.).

Çizelge 4.6. 1 ve 2 numaralı zemin türü için kullanılan parametreler

Parametre	1 numaralı zemin	2 numaralı zemin
Malzeme modeli	M.C.	M.C.
Kuru birim hacim ağırlık, γ_{unsat} (kN/m ³)	18.0	18.0
Doygun birim hacim ağırlık, γ_{sat} (kN/m ³)	20.0	20.0
Kohezyon, c (kN/m ²)	2	20
Elastisite modülü E_{ref} (kN/m ²)	34000	5000
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	50	0.01
Dilatasyon açısı, ψ (°)	20	0
Poisson Oranı, ν	0.30	0.35
Malzeme tipi	Drenajlı	Drenajsız

Üç farklı durum için aşağıdaki model üzerinde analizler yapılmıştır.

1. durum: $H_1=4\text{m}$, $H_2=6\text{m}$
2. durum: $H_1=5\text{m}$, $H_2=5\text{m}$
3. durum: $H_1=7\text{m}$, $H_2=3\text{m}$



Şekil 4.11. Tabakalı zemin için kullanılan geometrik model ($H_{1,2}$: zemin türlerine ait tabaka kalınlığı, 1 ve 2 numaralı zemin türü)

Model tanımlanırken sınır etkisi oluşmaması için sınırlar uygun şekilde uzatılmıştır. Genel olarak “*Plaxis 2D’de Modelin Tanımlanması ve Analiz*”

Aşamaları” başlığı altında anlatılan işlem adımlarıyla çözüme gidilmiştir. Kullanılan modelde yer altı suyu ve yük bulunmamaktadır.

Çizelge 4.7. Tabakalı zeminde üç farklı durum için hesaplanan güvenlik sayıları

Analiz koşulları	Güvenlik sayısı
1.durum	1.200
2.durum	1.410
3.durum	1.700

Kaymaya karşı daha dayanıklı olan 1 numaralı zeminin tabaka kalınlığı arttıkça güvenlik sayısının arttığı görülmüştür (Çizelge 4.7.). $H_1=2\text{m}$, $H_2=8\text{m}$ olduğu durum için analiz yapıldığında göçme meydana geldiği görülmüştür.

4.2.8. Diyafram Duvar Konumunun Güvenlik Sayısına Etkisi

Şev göçmesine karşı diyafram duvar etkisini incelemek için analizler yapılmıştır. Analizlerde $H:10\text{m}$, $\beta:45^\circ$ değerleri esas alınarak Şekil 4.12. de verilen model kurulmuştur. Çizgisel yük 5m uzunluğundaki alana etki ettirilmiştir, yükün şev tepesine olan uzaklığı 5m 'dir.

Yük değeri 180 kN/m^2 iken sistemde göçme meydana geldiği görülmüştür. Göçmeyi önlemek amacıyla şevde farklı konumlara diyafram duvar eklenerek şev davranışı ve bunun güvenlik sayısına etkisi araştırılmıştır.

Diyafram duvar tanımlanırken input kısmından “Plate” butonu kullanılmaktadır. Daha sonra “Interface” kullanılarak yapının ile zemin ile etkileşimi dikkate alınmış olmaktadır. “Material set” bölümünden, “Set type” sekmesinden “Plate” seçimi yapılarak diyafram duvara ait malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. 20m uzunluğunda diyafram duvar için analizlerde kullanılan parametreler Çizelge 4.8.'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Diyafram duvar için kullanılan parametreler (Plaxis Tutorial, 2018)

Parametre	Değeri
Malzeme davranışı	Elastic
Eksenel rijitlik, EA (kN/m)	$7.5 \cdot 10^6$
Eğilme rijitliği, EI (kNm ² /m)	$1.0 \cdot 10^6$
Eşdeğer kalınlık, d (m)	1.265
Poison oranı, ν	0.0

Diyafram duvar ilk önce şev tepesine, daha sonra şev yüksekliğinin orta noktasına ve son olarak şev topuğuna teşkil edilmiştir. 20m' lik duvar tüm durumlar için; duvar tepe noktası zeminle hem yüz ve zemine gömülü olarak, yatayla dik bir açı yapacak şekilde modellenmiştir.

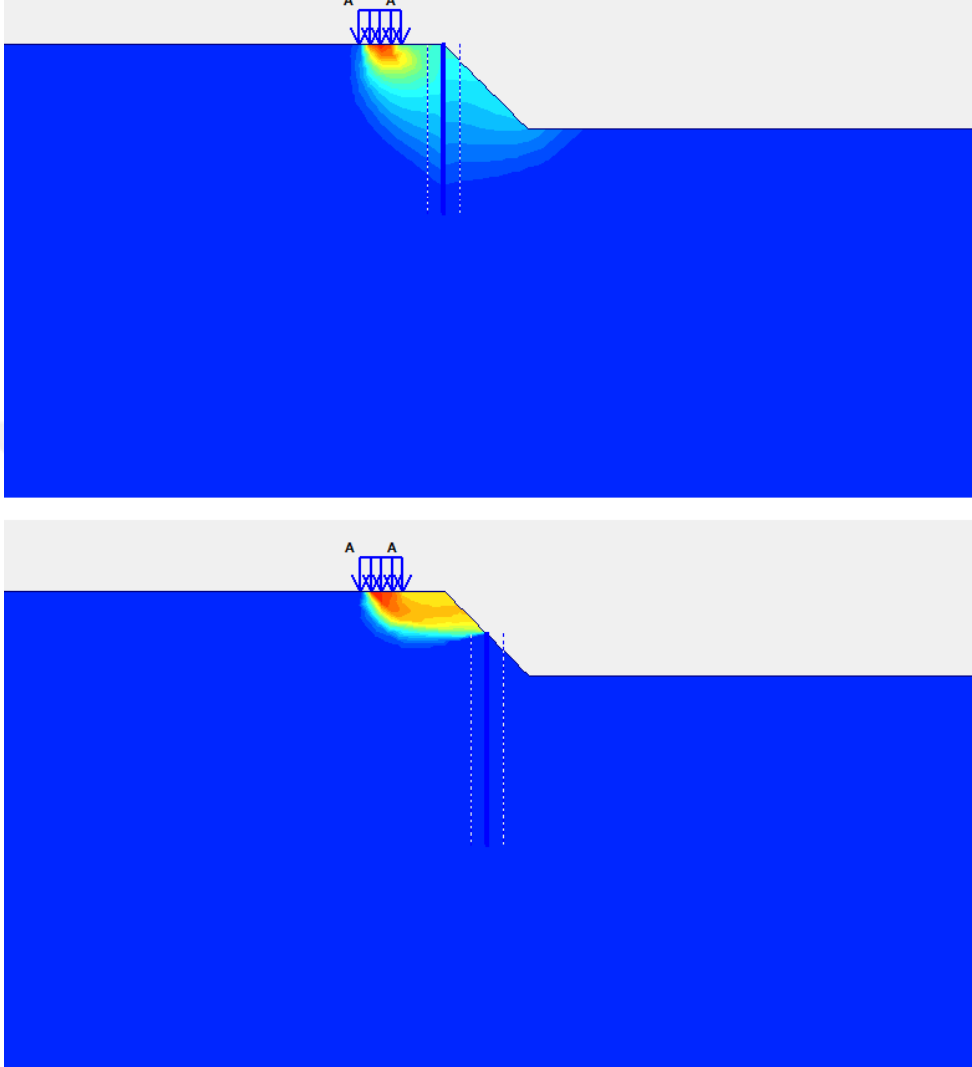
Sonuçlar Çizelge 4.9.'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Diyafram duvarının konumu ile güvenlik sayısının değişimi

Analiz koşulları	Güvenlik sayısı
180 kN/m ² yük etkisinde, diyafram duvar dahil edilmeden	Göçme
Diyafram duvar şev tepesinde iken	1,302
Diyafram duvar şev yüksekliğinin ortasında iken	1,268
Diyafram duvar şev topuğunda iken	Göçme

Modellenen problem için 180 kN/m² sürşarj yükü etkisinde diyafram duvar şev tepesinde ve şev yüksekliğinin ortasında iken stabilite korunmuştur. Diyafram duvar şev topuğunda modellendiğinde ise yapının stabiliteye etkisi olmadığı görülmüştür.

Diyafram duvarının konumu ile kayma yüzeyi değişimi Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.

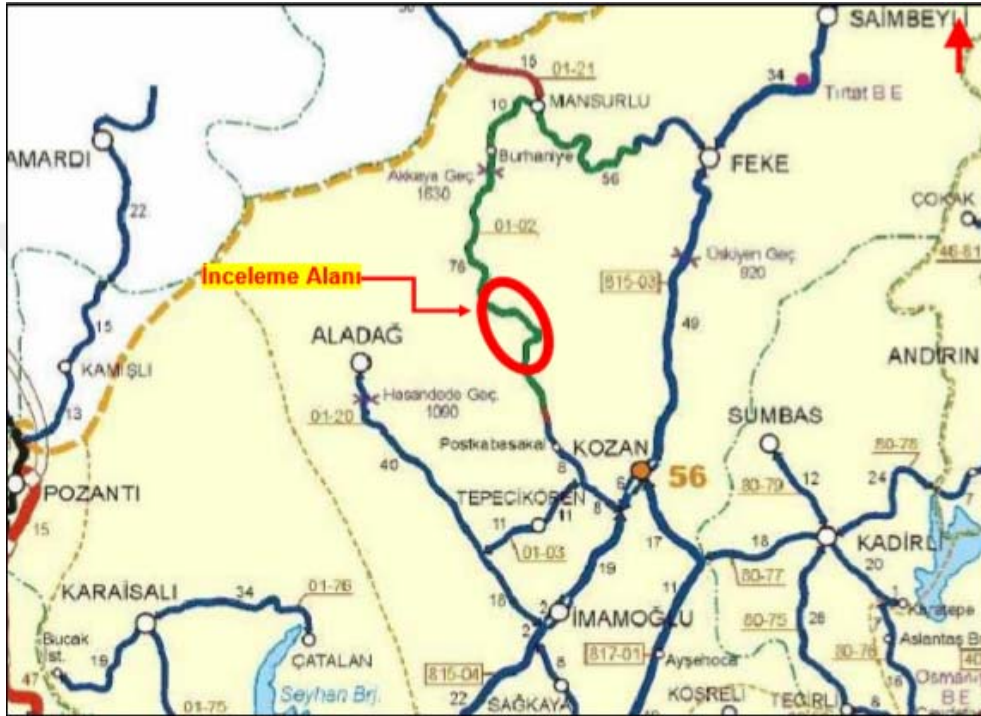


Şekil 4.12. Diyafram duvarının konumu ile kayma yüzeyi değişimi

4.3. Vaka İncelemesi

Adana'ya bağlı Kozan ilçesinin kuzey batısında, Kozan – Mansurlu yol inşaatı üzerinde bulunan güzergahta heyelan vakası meydana gelmiştir (Şekil 4.13.).

Vaka incelemesi dahilinde sunulan arazi ve laboratuvar sonuçları verileri, vakaya ait fotoğraflar, işin yapımını üstlenen Limit Teknik Araştırma firması yardımıyla sunulmuştur.



Şekil 4.13. İnceleme alanı yer buldu haritası

Yapılan çalışmaların amacı, yol inşaatına zararı olacak potansiyel kaymaları araştırarak heyelanı önlemeye yönelik uygun tasarımın önerilmesidir. Bu amaç doğrultusunda arazi ve laboratuvar incelemeleri yapılmıştır.

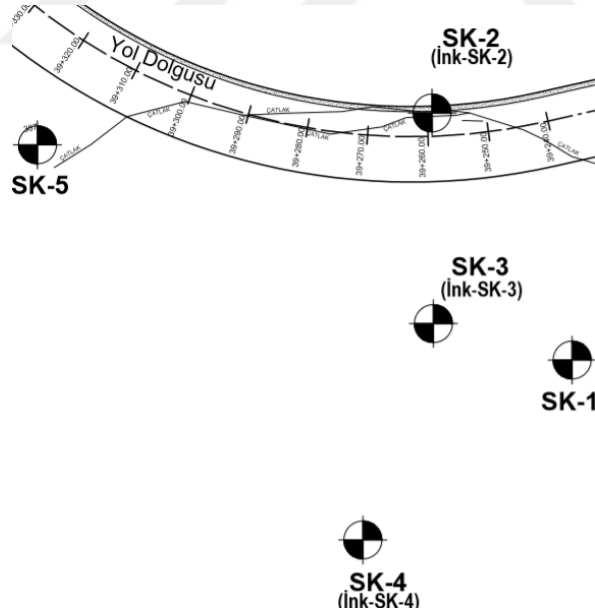
4.3.1. Yapılan Çalışmalar

Arazi çalışmaları kapsamında; gözlemsel incelemeler yapılmış, sondaj kuyuları açılmış, yerinde deneyler yapılmış, örselenmiş ve karot numuneler alınmış ve heyelan izleme çalışmaları yapılmıştır. Heyelan sahasının genel görünümü Şekil 4.14.'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Heyelan sahasından genel görünüm

Şev kayması incelemeleri kapsamında toplam derinliği 144m olan 5 adet sondaj kuyusu açılmıştır (Çizelge 4.10.). Üç sondaj kuyusuna yerleştirilen inklinometre aletleri ile heyelan hareketi izlenmiştir. Sondajlar ve yol dolgusuna ait şematik görüntü aşağıda verilmiştir (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. Sondajlar ve yol dolgusuna ait şematik görüntü

Çizelge 4.10. Sondaj kuyusu derinlikleri

Sondaj Kuyu No	Derinlik (m)
SK-1	30
SK-2	33
SK-3	30
SK-4	21
SK-5	30

Yerinde deneylerde standart penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Bu deney çok sert zeminler için uygun değildir. Zeminin serbest basınç mukavemeti, kıvam ve sıklık özellikleri hakkında bilgi verir. Numune alıcı 63.5 kg ağırlıktaki şahmerdanın 76cm'den düşürülmüş, kuyu tabanının altında her 15cm' lik ilerlemeler için darbe sayıları kaydedilmiştir. Numune alıcı daha sonra 30cm ya da 50 darbe elde edilene kadar 63.5 kg ağırlıktaki şahmerdanın 76cm'den düşürülmesi ile ilerletilmiştir. Her 15cm penetrasyon için darbe sayıları kaydedilmiştir. İlk 15cm'de zemin örselendiği için hatalı sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle son 30cm penetrasyon için gereken darbe sayısı penetrasyon direnci, N olarak ifade edilmiştir. İşlem sonunda 30cm' den az penetrasyon elde edilmiş ise kayıtlar darbe sayısını ve ilerlenen mesafeyi ifade eder.

Standart penetrasyon deneyi sonuçları belirli standartlar dahilinde kabul görür. Yer altı suyu mevcutken yapılan deneylerde, farklı tij uzunluğu, kuyu derinliği, farklı tokmak ve düzeneği vb. olan durumlarda bu farklılıkların sonuç üzerindeki etkisini dikkate almak için düzeltmeler önerilmiştir.

$$N_{60} = N_{\text{arazi}} * C_E * C_R * C_B * C_S * C_A * C_{BF} * C_C \quad (4.1.)$$

$$N_{1,60} = N_{60} * C_N \quad (4.2.)$$

Burada; N_{60} =teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı, $N_{1,60}$ =teorik serbest düşme tokmak enerjisinin % 60'ına ve efektif jeolojik basıncı 100 kPa olarak düzeltilmiş vuruş sayısı, N_{arazi} = arazide ölçülen darbe sayısı, C_N = jeolojik yük düzeltme faktörü, C_E = enerji düzeltme faktörü, C_R = tij uzunluğu düzeltme faktörü, C_B = sondaj çapı düzeltme faktörü, C_S =numune alıcı kılıf (liner) düzeltme faktörü, C_A =çakma başlığı düzeltme faktörü, C_{BF} =tokmak düşürülme sıklığı (hızı) düzeltme faktörü, C_C =tokmak yastığı düzeltme faktörüdür.

Geoteknik mühendisliğinde çoğunlukla yukarıda sıralanan son altı düzeltme faktörü kullanılmamaktadır. Ancak bazı durumlarda, bunlar daha iyi veri sağlamak için kullanılabilir (Güneş, 2013).

Birçok durumda, N_{60} ve $N_{1,60}$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$N_{60}=N_{arazi}*C_E \quad (4.3.)$$

$$N_{1,60}=N_{60}*C_N \quad (4.4.)$$

Standart penetrasyon deneyi sonuçları ile taşıma gücü arasında gerçeğe uygun bir bağıntı kurmak mümkün olmaktadır. Hesaplarda SPT sonuçları kullanılırken arazide ölçülen N_{30} değerleri gerekli düzeltmeler yapılarak ($N_{60/1,60}$) kullanılmaktadır.

Sıvılaşma potansiyelinin irdelenmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri standart penetrasyon deneylerinden elde edilen SPT darbe sayılarının kullanılmasıdır. Bu kapsamda sıvılaşma potansiyelinin belirlenebilmesi için Nceer (1997) ve Youd ve ark. (2001) tarafından önerilen “Geliştirilmiş Basit Yöntem” kullanılmıştır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (G_s) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$G_s= (CRR_{7.5} / CSR) MSF \quad (4.4.)$$

CSR: Zemin tabakasında oluşan tekrarlı gerilme oranı

CRR_{7,5}: Sıvılaşma direnci ($M_w=7.5$ için)

MSF: Deprem büyüklüğü katsayısı

Güvenlik katsayısı $G_s > 1$ ise, inceleme alanında sıvılaşma beklenmemektedir. $G_s < 1$ ise, inceleme alanında sıvılaşma beklenebilir.

İnceleme alanında; geçilen birimler, dane boyutları, SPT darbe sayıları, yeraltı suyu seviyesi ve deprem bölgesi göz önüne alındığında, sıvılaşma potansiyeli beklenmemektedir.

Araziden alınan numuneler ile laboratuvar çalışmaları kapsamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elek analizi deneyi ile dane dağılımı ve zemin cinsi, zemin tabakalarına ait dane birim hacim ağırlıkları, kıvam limitleri deneyleri ile plastisite indisi, likit limit ve plastik limit değerleri elde edilmiştir.

4.3.2 İnceleme Alanında Bulunan Mevcut Zemin Tabakaları İçin Değerlendirmeler

Mevcut yol dolgusu, anayol güzergâhı üzerinde yer almaktadır. İnceleme alanında mevcut yol üzerinde SK-2 no' lu araştırma sondaj kuyusu açılmış olup bu birime ait zemin incelemesi aşağıda kısaca özetlenmiştir (Çizelge 4.11.). Şekil 4.16.'da 2 nolu sondaj çalışması ve inceleme alanına ait görüntüye yer verilmiştir.



Şekil 4. 16. 2 nolu sondaj çalışması ve inceleme alanına ait görüntü

Çizelge 4.11. Mevcut yol dolgusu için zemin değerlendirilmesi

Deneyin adı		Değeri
Su muhtevası (W_n)		% 6.72
Elek analizi	No:4 kalan	% 35.78
	No:200 geçen	% 21.92
Atterberg Limitleri	Likit limit (LL)	% 22
	Plastik Limit (PL)	% 17
	Plastisite İndisi (PI)	% 5
SPT Deneyi	Arazide ölçülen değer (N_{30})	15
	Düzeltilmiş Değer ($N_{60/1.60}$)	11
Zemin Sınıfı	SC	

Mevcut yol dolgusu; killi kum türü zeminden meydana gelmektedir.

Yapay Dolgu (Q_{yd}): Yapay dolgu, inceleme alanında yüzeyde hareketin meydana geldiği kısımda bulunmaktadır. SK-3 no'lu sondaj kuyusunda, 0.00 -

5.75m'ler ve SK-5 no'lu sondaj kuyusunda, 0.00 - 2.75m'ler seviyelerinde tespit edilmiştir.

Yapay dolgu genel olarak; çakıllı, siltli, killi kum türü zeminden meydana gelmektedir.

Siltli, killi, çakıllı kum - kumlu çakıl (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): Emirgazi Formasyonu, genel olarak başlıca şist ve kuvarsitten oluşmaktadır. Aralarında yanal ve düşey geçiş gösteren subarkoz, silttaşı ve kıltaşları da bu formasyon içerisinde gözlenmektedir. İnce, yer yer kalın tabakalı, bazı seviyeleri dereceli ve çapraz tabakalanmalı olan Emirgazi formasyonu mor, gri, yeşil ve kahve renklidir.

Arazideki ilgili birim Emirgazi formasyonu ayrışma ürünü olarak belirlenmiştir. Birim; gevşek, sıkı, orta sıkı, çok sıkı, ıslak olarak geçiş göstermekte olup, içerisinde yer alan çakıllar, ince - iri danelidir. Genel olarak, ince daneleri non - plastik, düşük plastisiteli olarak tanımlanmış olup, %16 ince malzeme, %42 kum ve %42 çakıldan oluşmaktadır. Yer yer kil oranı artmaktadır. 5 sondaj kuyusunda da farklı derinliklerde karşılaşılmıştır. Alınan farklı numuneler üzerinde yapılan değerlendirmeler Çizelge 4.12.'de mevcuttur.

Çizelge 4.12. Siltli, killi, çakıllı kum - kumlu çakıl (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee) için zemin değerlendirmesi

Deneyin adı		Değeri		
		Min.	Ort.	Max.
Su muhtevası (W_n)		3.22	8.75	% 15.23
Elek analizi	No:4 kalan	17.67	41.84	% 60.30
	No:200 geçen	6.32	16.34	% 38.79
Atterberg Limitleri	Likit limit (LL)	NP	-	% 34
	Plastik Limit (PL)	NP	-	% 23
	Plastisite İndisi (PI)	NP	-	% 11
SPT Deneyi	Arazide ölçülen değer (N_{30})	9	39	R
	Düzeltilmiş Değer ($N_{60/1.60}$)	7	30	>50
Zemin Sınıfı	GM, GC, SM, SC, SP-SM, GW-GM, GP-GM			

Çakıllı, siltli, kumlu kil, killi kum (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): Birim genel olarak; %41 ince malzeme, %38 kum ve %21 çakıldan oluşmaktadır. Çakıllar ince ve iri danelidir. Yer yer ise çakıl oranı artmaktadır (Çizelge 4.13.).

Çizelge 4.13. Çakıllı, siltli, killi kum, siltli kum, kumlu kil (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): için zemin değerlendirme

Deneyin adı		Değeri		
		Min.	Ort.	Max.
Su muhtevası (W_n)		6.35	9.58	%15.65
Elek analizi	No:4 kalan	2.58	21.42	%45.54
	No:200 geçen	17.93	40.92	%92.26
Atterberg Limitleri	Likit limit (LL)	NP	-	% 37
	Plastik Limit (PL)	NP	-	% 22
	Plastisite İndisi (PI)	NP	-	% 16
SPT Deneyi	Arazide ölçülen değer (N_{30})	10	-	R
	Düzeltilmiş Değer ($N_{60/1.60}$)	8	-	>50
Zemin Sınıfı	SM, GM, GC, SC, ML, CL, CI			

İnceleme alanında bulunan zemin tabakaları ve yapılan sondaj çalışmaları aşağıda verilmiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. İnceleme alanında bulunan zemin tabakaları ve yapılan sondaj çalışmaları

Çakıllı, kumlu, killi silt (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee):

Birim genel olarak; çakıllı, kumlu, killi silt ile temsil edilmektedir. Genel olarak, ince daneleri non-plastik olarak tanımlanmış olup, %71 ince malzeme, %18 kum ve %11.00 çakıldan oluşmaktadır. Ayrıca içerisinde yer alan çakıllar ise ince - orta danelidir. 3 nolu sondaj kuyusundan alınan numunelerde karşılaşılmıştır (Çizelge 4.14.).

Çizelge 4.14. Çakıllı, kumlu, killi silt (Emirgazi Formasyonu-Ayrışma Ürünleri/Ee): için zemin değerlendirmesi

Deneyin adı		Değeri
Su muhtevası (W_n)		% 4.02
Elek analizi	No:4 kalan No:200 geçen	% 11 % 70.69
Atterberg Limitleri	Likit limit (LL) Plastik Limit (PL) Plastisite İndisi (PI)	NP NP NP
SPT Deneyi	Arazide ölçülen değer (N_{30}) Düzeltilmiş Değer ($N_{60/1.60}$)	R >50
Zemin Sınıfı	ML	

Şist: Yüzeyde genel olarak ayrıışmış olarak gözlenilen formasyona ait kaya birimleri, açılan araştırma sondaj kuyularında alt seviyelerde gözlenmektedir. Birim genel olarak; sarımsı kahve, yeşilimsi renkli, çok ayrıışmış, zayıf dayanımlı ve parçalanmıştır. Eklem yüzeyleri az pürüzlü, kaygandır. Sadece 1 nolu sondaj kuyusunda karşılaşılmıştır.

Grafit Şist: Birim genel olarak; siyah, koyu gri renkli, çok ayrıışmış, zayıf, çok zayıf, orta derecede sağlam dayanımlı, genelde parçalanmış, yer yer çok çatlaklı ve kırıklıdır (Çizelge 4.15.). Eklem yüzeyleri az pürüzlü, kaygandır (Şekil 4.18.).

Çizelge 4.15. Grafit şist için zemin değerlendirmesi

Parametre	Ort.
Doğal birim hacim ağırlığı (kN/m^3)	25.56
Nokta yükü dayanımı (MPa)	0.23
Toplam karot verimi: TCR (%)	48.5
Kaya kalite göstergesi: RQD (%)	5



Şekil 4.18. Grafit şist biriminden genel görünüm

Yeraltı su seviyesi durumu: Yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen yer altı su seviyesi durumu özeti aşağıda yer almaktadır (Çizelge 4.16.).

Çizelge 4.16. Yer altı su seviyesi durumu

Sondaj Kuyu No	Derinlik (m)	Kot (m)	YASS derinliği
SK-1	30.	380.04	14.50
SK-2	33	386.95	15.00
SK-3	30	377.70	6.00
SK-4	21	363.88	5.80
SK-5	30	386.77	22.00

4.3.3. Arazinin Durumu ve Heyelan Mekanizması ile ilgili Değerlendirmeler

Yapılan incelemeler sonrasında meydana gelen heyelanda stabilite sorununun nedenleri üstünde durulmuştur.

İnceleme alanı ve çevresinde yeraltı ile yüzey suları bakımından zengindir. Yeraltı suyu etkisi ile zeminin kayma mukavemeti parametrelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Mevcut yarmalar üzerindeki çatlaklara yüzey sularının dolması ile oluşan su basınçları, buna bağlı olarak soğuk mevsimde donma basınçları oluşmaktadır. Şevin taç bölgesinde taşıtların oluşturduğu sürşarj yükleri heyelanı tetiklemektedir. Yol dolgusunun kontrolsüzce sıkıştırılmış olabileceği tahmin edilmektedir. Tüm bu sebeplerin şev stabilitesinin bozulmasına sebep olabileceği düşünülmektedir. Ancak burada şev kaymasına yol açan en önemli sebepler şevin yer altı suyu bakımından zengin olması ve zemin yapısıdır (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. Mevcut yol üzerinde heyelandan dolayı meydana gelen çatlaklar ve oturmalar

4.3.4. Geri Analiz

Geriye dönük analiz, kayma dairesini analizlere doğru bir şekilde yansıtmak amacıyla; stabilitenin bozulmuş olduğu şevde, kaymaya neden olan ilk durumdaki zemin parametrelerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır.

Bir şev kayarak göçtüğünde, göçme sırasındaki şev koşulları hakkında yararlı bir bilgi kaynağı ve stabilite analiz yöntemlerini doğrulamak için bir fırsat sağlayabilir. Şev stabilitesi bozulduğu için, emniyet faktörünün göçme anında bir (1.0) olduğu düşünülmektedir. Bu bilgiyi ve uygun bir analiz yöntemini kullanarak göçme olduğu zamanlarda bir şev modeli oluşturmak mümkündür. Model; zemin, yeraltı suyu, gözenek suyu basıncı koşullarının birim ağırlıkları, kayma dayanımı özellikleri ve göçme mekanizmalarının dahil olduğu analiz yönteminden meydana gelir. Böyle bir model, göçmenin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilir ve iyileştirici önlemlerin analizinde temel olarak kullanılabilir. Koşulları belirleme ve bir başarısızlıktan eğim için uygun bir model oluşturma süreci geri analiz veya geri hesaplama olarak adlandırılır (Duncan ve ark, 2014).

Geriye dönük analizde aşağıda belirtilen yaklaşımlar esas alınır.

- Göçmeye uğrayan şevin kayma öncesi ve sonrasına ait geometrisi bilinmelidir.
- Göçme anında $G_s=1$ geçerlidir.
- Göçme mekanizması bilinmelidir.
- Analiz sonucunda belirlenen zemin dayanımı parametreleri, kayma yüzeyi boyunca etkin olan ağırlıklı ortalama dayanım parametreleridir.

Geri analiz yapılırken seçilen limit denge yöntemleriyle ile $G_s=1$ koşulunu sağlayan “c-φ” veri çiftleri deneme yanılma yöntemiyle hesaplanır. Aynı işlem en az 3 veya 4 veri çifti için tekrarlanır. Sonuçlar “c-φ” grafiğine işlenir.

Aynı şevin farklı kesitlerinde birden fazla kayma olduysa farklı kesitler üzerinde veri çiftleri seçilip birden fazla “c-φ” zarfı oluşturulur. “c-φ” zarflarının kesiştiği noktadan kayma dayanımı parametreleri elde edilir. Böyle bir analiz yapılırken şevden alınan en az 3 farklı kesit değerlendirilmelidir (Ulusay, 2002) .

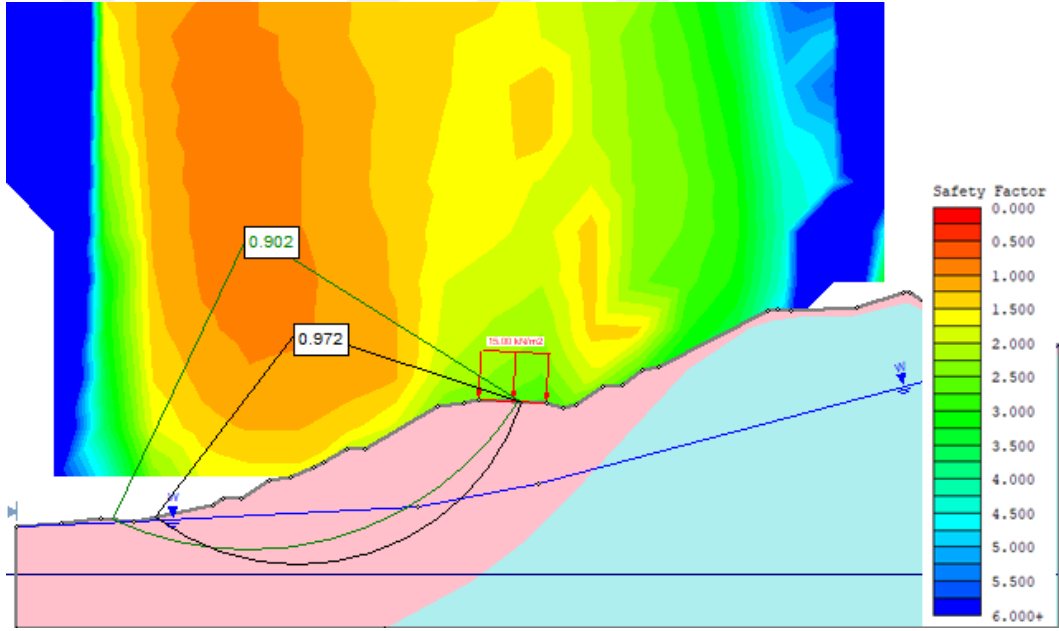
Üzerinde bir yol güzergâhı bulunan şevin farklı kesitleri üzerinde analizler yapılmıştır. Kesitlerin ortalama geometri uç değerleri en olarak 195m, yükseklik olarak 60m'dir. Farklı kesitler için doğal şeve ait modeller oluşturulmuştur.

Tahmin edilen en kritik kayma dairesi kesitleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler için güvenlik sayısını belirlemede limit denge yöntemlerini esas alan “Slide V.6.0” yazılımı kullanılmıştır. Analizler Bishop, Janbu ve Spencer yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Burada kayma dairesine ait parametrelerin gerçeğe yakın hesaplanması amacıyla en kritik potansiyel kayma dairesi tanımlanmıştır. Slide yazılımında hesaplamalar için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

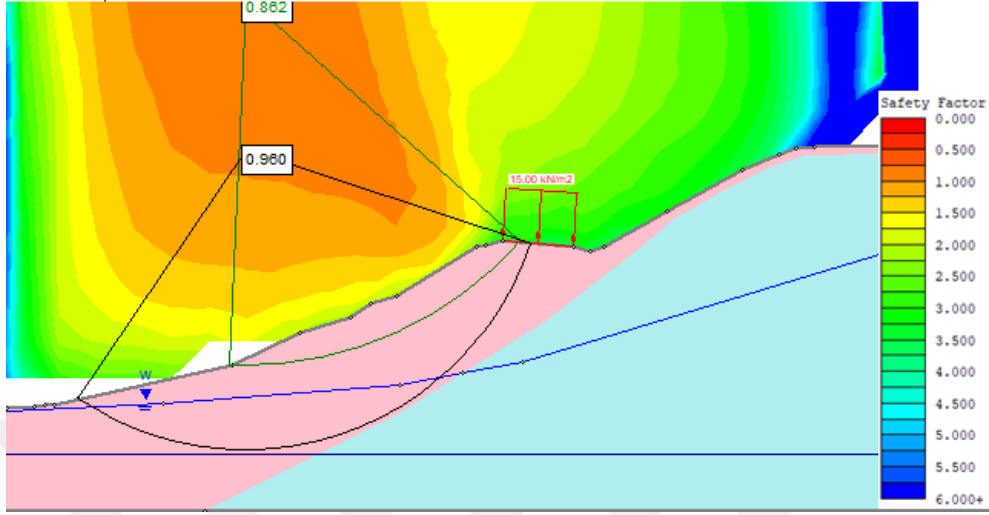
- İlk önce “Analysis”, “Project Setting” sekmesinden şevin yönü, ölçü birimleri, kullanılacak limit denge yöntemleri gibi ayarlar yapılmaktadır.
- Model sınırları; “File”, “Import” seçeneği ile “dxf” uzantılı Autocad dosyasından getirilmektedir.
- “Properties” menüsünden “Define Materials” ile malzemelere ait parametreler ve malzeme davranış tipi atanır. Şev modeli iki katman halinde tanımlanmıştır. Şevde mavi ile gösterilen alan “Grafit şist” malzemesini ifade etmektedir. Üstteki pembe renkli tabaka ise, Emirgazi Formasyonu ayrışma ürünleri adı verilen zayıf tabakayı temsil etmektedir. Yapılan çalışmalarla kaymanın bu üst tabakada olduğu bilindiğinden geri analiz hesaplamaları bu tabaka için uygulanmıştır. Grafit şist için “unit weight” 19 kN/m^3 , $c=100 \text{ kPa}$, $\phi=15^\circ$ parametreleri sisteme tanımlanmıştır.
- “Boundaries” menüsünden “Add water table” ile su seviyesi tanımlanmıştır.
- “Loading” menüsü “Add Distributed Load” sekmesinden, yol güzergâhının geçtiği kesit üzerine, trafik yükü ve üst yapı yükü olarak 15 kN/m^2 sürşarj yükü uygulanmıştır.

- “Surfaces” menüsünden “Surface Options” sekmesinden “Surface Type” ile kayma yüzeyinin tipi belirlenmiştir.
- Analizler yolun A, B ve C olarak adlandırılan farklı kesitlerinde belirlenen veri çiftleri için, $G_s=1$ elde edilecek şekilde tekrarlanmıştır.

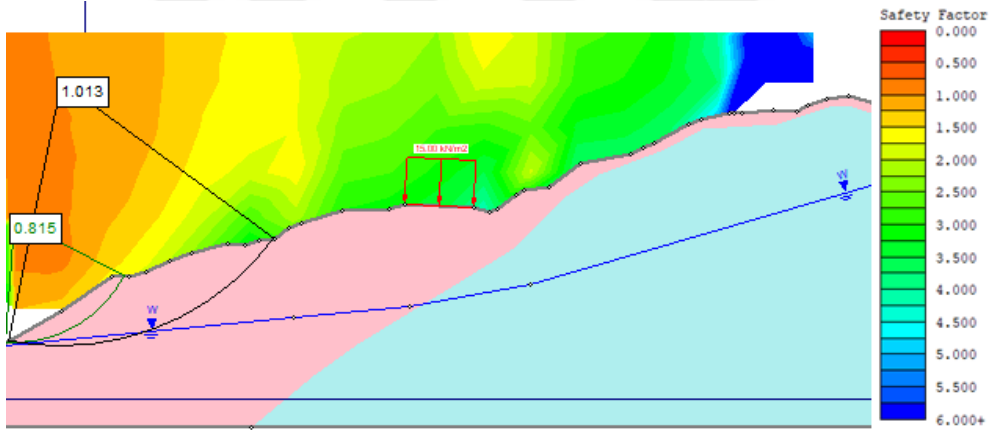
Geri analizden önce kayma dairesi yeri, değeri ve parametre değerleriyle ilgili bir ön çalışma yapılmıştır. Şekil 4.20., Şekil 4.21. ve Şekil 4.22. Slide programı analiz çalışmalarıyla elde edilen kayma daireleri ve güvenlik sayıları görülmektedir.



Şekil 4.20. A kesitine ait model



Şekil 4.21. B kesitine ait model



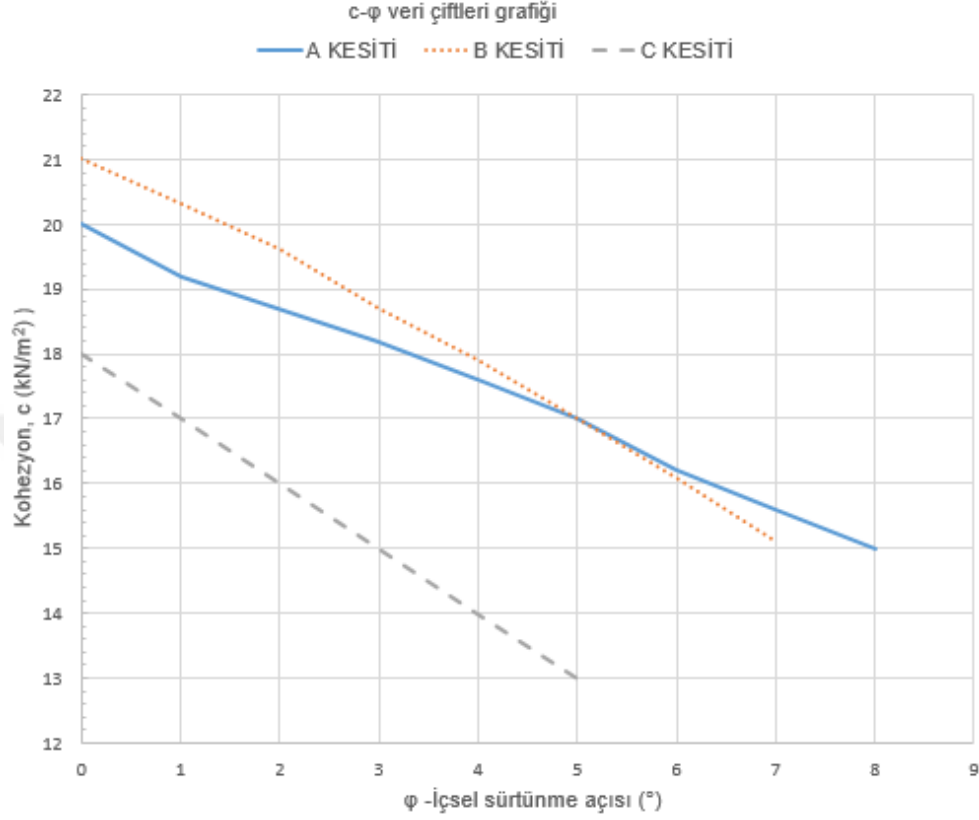
Şekil 4.22. C kesitine ait model

Kayma dairesinin yerini tahmin etmek için arazi gözlemlerinden, slide analizleriyle elde edilen verilerden ve inklinometre sonuçlarından yararlanılmıştır. Üç farklı kesitte kaymanın gerçekleşeceği tahmin edilen tabaka için aşağıda görülen kayma mukavemeti veri çiftleri ile analizler yapılmıştır (Çizelge 4.17.).

Çizelge 4.17. Üç farklı kesit için geri analiz veri çiftleri

	<i>c- kohezyon (kN/m²)</i>	<i>φ- içsel sürtünme açısı (°)</i>
A KESİTİ	1	19.2
	3	18.2
	4	17.6
	5	17.0
	8	15.0
B KESİTİ	1	20.3
	2	19.6
	4	17.9
	6	16.1
	7	14.1
C KESİTİ	1	17.0
	2	16.0
	3	15.0
	4	14.0
	5	13.0

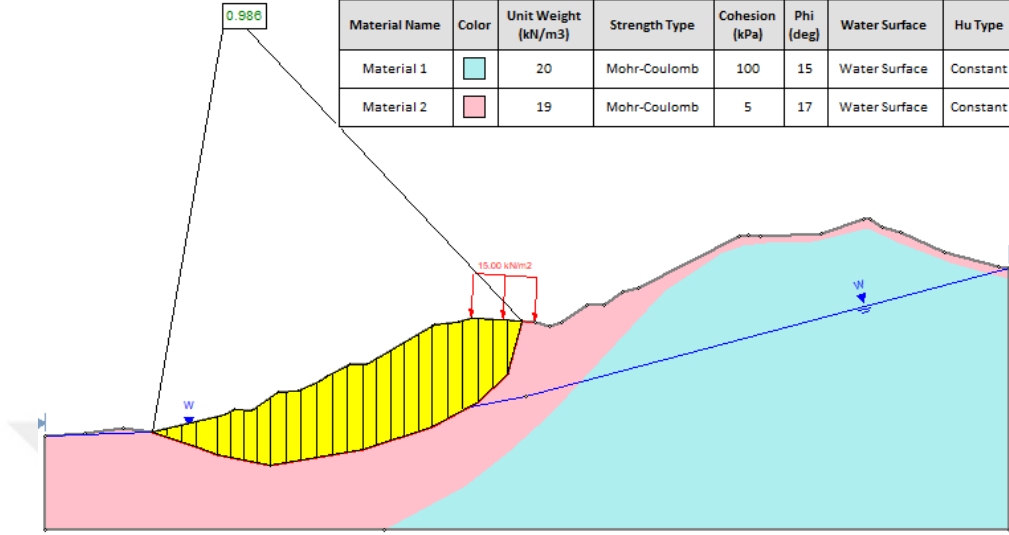
Yer altı su seviyesi, kayma dairesinin yeri bilgilerine A kesiti için S.K-2 ve S.K-3 nolu, B kesiti için S.K-4 nolu, C kesiti için S.K-1 nolu sondaj kuyularına ait verilerden ve Slide analizi ile yapılan çalışmalardan faydalanılmıştır.



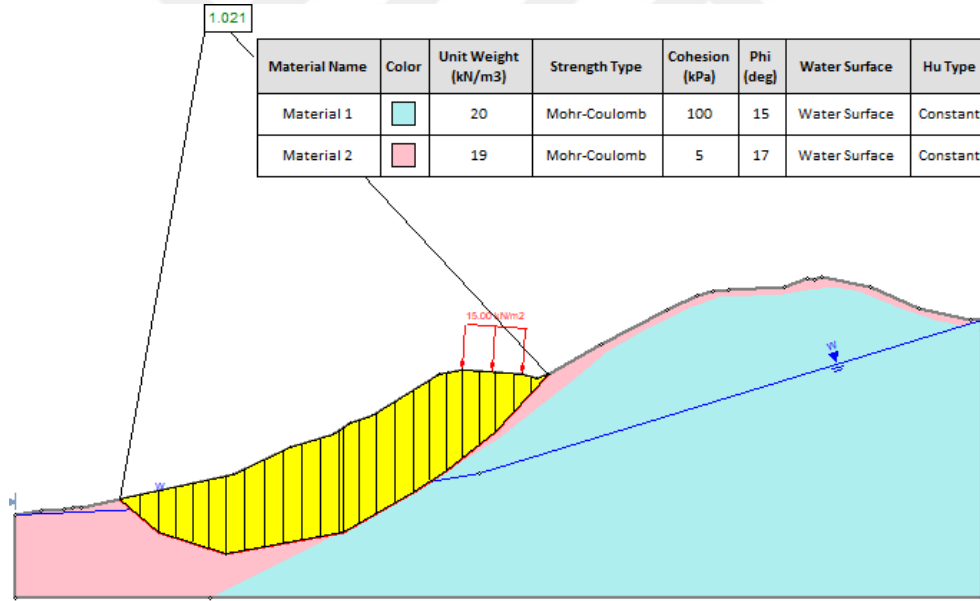
Şekil 4.23. Geri analiz veri çiftleri grafiği

Geri analiz için yapılan analizlerdeki veri çiftleri Şekil 4.23.'teki grafik ile özetlenmiştir. Grafikten anlaşılacağı gibi kesişen bölge içerisinde c-φ değeri 5 kN/m²-17° olarak elde edilmiştir. Burada C kesiti için yapılan analizlerde c-φ zarfının diğer kesitlerle çakışmadığı görülmektedir. Bu durum, C kesitinde eğiminin daha düşük olması, topuğun daha yüklü olması sebeplerinden G_s=1 değerini sağlayacak veri çiftlerinin daha düşük değerlerle sağlanabilmesi ile açıklanabilmektedir.

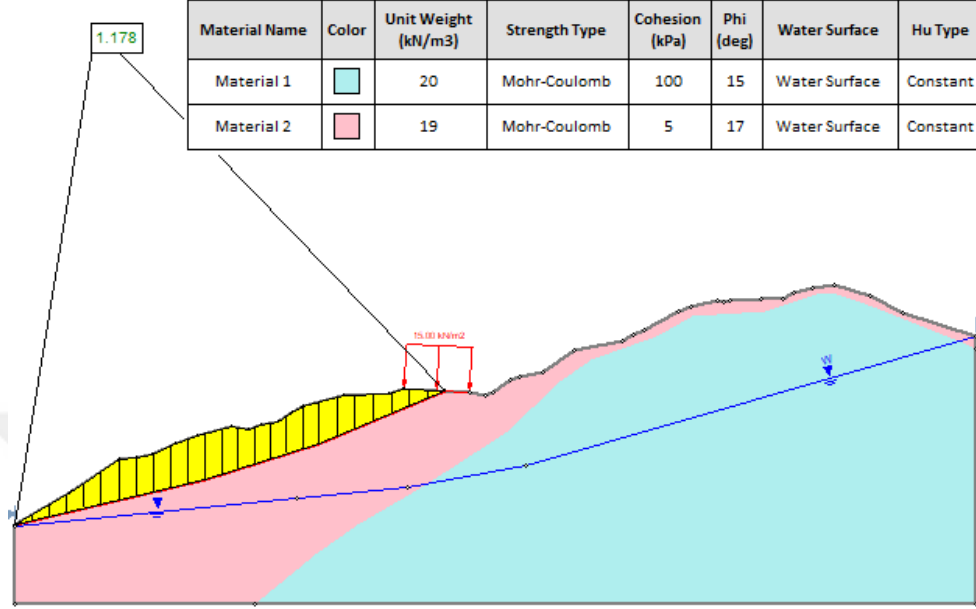
Şekil 4.24., Şekil 4.25., ve Şekil 4.26.'da belirlenen kritik kayma daireleri ile yapılan analizlerin, c:5 kN/m² ve φ: 17° değerleri için Slide programından elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Şevin A kesitine ait görüntü



Şekil 4.25. Şevin B kesitine ait görüntü



Şekil 4.26. Şevin C kesitine ait görüntü

4.3.5. Plaxis 2D Programı ile Gerçeğe Uygun Arazi Durumunun Elde Edilmesi

Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile elde edilen verilerle kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Özellikle SPT-N değerleri ile literatürde yer alan çalışmalar yararlanılmıştır. Aşağıda zemin tabaklarına ait araziden elde edilen ortalama SPT-N ve düzeltilmiş değerlerine yer verilmiştir (Çizelge 4.18.).

Çizelge 4.18. Zemin tabakları ve SPT değerleri

	Ortalama SPT- $N_{(arazi)}$	Ortalama SPT- $N_{(60/1.60)}$
Mevcut yol dolgusu	15	11
Yapay dolgu	10	8
Siltli, killi, çakıllı kum, kumlu çakıl	39	30
Çakıllı, siltli, kumlu kil, siltli kum	>50	>50
Çakıllı, siltli, killi kum	35	24
Çakıllı, kumlu, killi silt	>50	>50

Bowles (1996), SPT-N değerlerine göre, Çizelge 4.19. ve Çizelge 4.20.'da görülen, kumlu zemin özelliklerini ve killi zemin özellikleri gösteren tablolar önermiştir.

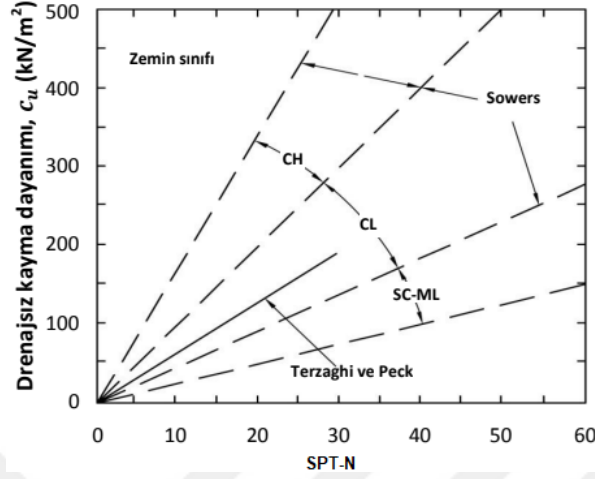
Çizelge 4.19. SPT-N değerlerine göre killi zemin özellikleri (Bowles, 1996)

Kıvam Tanımlaması	Darbe Sayısı (SPT-N)	Serbest Basınç Dayanımı (kg/cm ²)
Çok yumuşak	0-2	<0.25
Yumuşak	3-5	0.25 -0.50
Orta	6-9	0.50-1.0
Katı	10-16	1.0-2.0
Çok katı	17-30	2.0-4.0
Sert	>30	> 4.0

Çizelge 4.20. SPT-N değerlerine göre kumlu zemin özellikleri (Bowles, 1996)

Darbe Sayısı SPT-N	Tanımlama Sıklık Durumu (Terzaghi ve Peck, 1967)	Rölatif Sıklık veya Rölatif Yoğunluk (ID) (Gibbs ve Holtz, 1957)	Tij Enerjisine Göre SPT (N ₁) ₇₀	Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Sürtünme Açısı ϕ (derece)
0-4	Çok gevşek	%0-%15	0-3	11-16	İnce 26°-28°
					Orta 27°-28°
					Kaba 28°-30°
4-10	Gevşek	%15-%35	3-8	14-18	İnce 28°-30°
					Orta 30°-32°
					Kaba 30°-34°
10-30	Orta sıkı	%35-%65	8-25	17-20	İnce 30°-34°
					Orta 32°-36°
					Kaba 33°-40°
30-50	Sıkı	%65-%85	25-42	17-22	İnce 33°-38°
					Orta 36°-42°
					Kaba 40°-50°
>50	Çok sıkı	%85-%100	42-58	20-23	>50

Terzaghi ve Peck, 1967; Sowers, 1979 yılında drenajsız kayma mukavemeti değeri ile SPT-N değeri ilişkisinin aşağıdaki şekil ile sunmuştur (Şekil 4.27.).



Şekil 4.27. SPT-N değeri ile drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Terzaghi ve Peck, 1967; Sowers, 1979)

Grafit şist ve şist katmanları için kaya özellikleri incelenmiş olup kaya parametrelerini belirlemek için RQD değerlerinden faydalanılmıştır. Bieniawski (1989) tarafından önerilen kaya kütle puanlaması tablosunun bir kısmı Çizelge 4.21.'de verilmiştir.

Grafit şist ve şist katmanları için RQD değerine bakıldığında < 25 (%) olduğu görülmektedir. Bu tabaka “çok zayıf kaya” olarak nitelendirilebilir.

Çizelge 4.21. Bieniawski (1989) tarafından önerilen kaya kütle puanlaması tablosu ilgili kısım

Kayaç kalite göstergesi, RQD (%)	90-100 (%)	75-90 (%)	50-75 (%)	25-50 (%)	<25(%)
Puan	20	17	13	8	3
Tanımlama	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya
Kaya kütlelerinin kohezyonu	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Kaya kütlelerinin içsel sürtünme açısı	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Hesaplarda kullanılan zemin ve kaya katmanları ve bunlara ait parametreler aşağıda özetlenmiştir (Çizelge 4.22.).

Çizelge 4.22. Zemin parametreleri

Parametre	Sembol	Mevcut yol dolgusu (Qyd)	Yapay dolgu	Siltli killi çakıllı kum - kumlu çakıl	Çakıllı, siltli, kumlu kil - siltli kum	Şist, Grafit Şist	Çakıllı, siltli killi kum	Çakıllı, kumlu, killi silt	Kayma düzlemini temsil eden tabaka
Malzeme Modeli	-	Hardening Soil Model							
Malzeme Davranışı	-	Drenajlı							
Kuru Birim Hacim Ağırlık	γ_{dry} (kN/m ³)	18	18	18	18	19	18	18	19
Doygun Birim Hacim Ağırlık	γ_{sat} (kN/m ³)	19	19	19	19	20	19	19	20
Elastisite Modülü	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	9600	9600	54000	9600	150000	40000	150000	5000
	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	9600	9600	54000	9600	150000	40000	150000	5000
	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	25000	20000	162000	25000	450000	120000	450000	15000
Kohezyon	c (kPa)	5	5	2	5	100	5	100	5
Sürtünme Açısı	ϕ (°)	30	30	33	30	15	30	10	17
Dilatasyon Açısı	ψ	0	0	3	0	0	0	0	0

Geri analizlerden anlaşılabacağı gibi C kesitine ait veri çifti değerleri diğer kesitlere göre daha güvenli yöndedir. Bu nedenle kritik görülen A ve B kesiti için analizler gerçekleştirilmiştir.

Hesaplarda zemin davranış tipi “Hardening Soil Model” kullanılmıştır. Bu model zemin davranışının simülasyonu için geliştirilmiş bir model olup bu ikinci derece model, kil ve siltler gibi daha yumuşak toprak türlerinin yanı sıra kum ve çakıl davranışını simüle etmek için kullanılabilir (Plaxis Reference Manual, 2018).

Analizlerde kullanılan elastisite modülü değerleri literatürden alınan denklemlerle hesaplanmıştır. Aşağıda kullanılan denklemlere yer verilmektedir.

- Bowles (1996) “killi kumlar” için; $E = 320 * SPT-N_{55}$
- FHWA (2002) “kumlu çakıl” için; $E = 1200 * SPT-N_{1(60)}$
- Bowles (1996) “çakıllı kumlar” için; $E = 1200 * (SPT-N_{55} + 6)$
- FHWA (2002) “silt, kumlu silt, düşük kohezyonlu karışık zeminler” için; $E = 400 * SPT-N_{1(60)}$

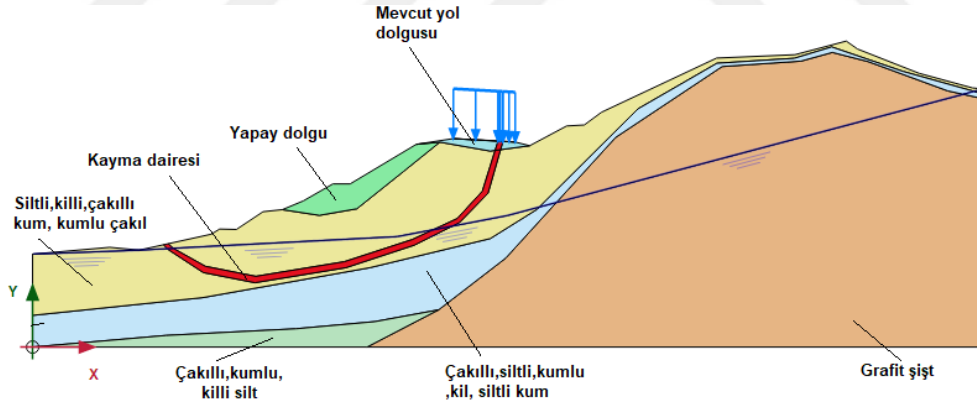
Yol platformu üzerindeki üstyapı ve trafik nedeniyle oluşacak yükler, 15kPa’lık düzgün yayılı yük olarak hesaba alınmıştır.

Analizlerde Plaxis 2D (2018) programı kullanılmıştır. Programda uygulanan adımlar aşağıdaki gibidir.

- ‘Plane Strain’ (düzlemsel deformasyon) ve elemanlar 15 düğüm noktalı olarak seçilmiştir.
- SI birim sisteminde m, kN, gün birimleri kullanılmıştır.
- Genel ayarlar sekmesinden çalışma alanı sınırları belirlenip şev geometrisi çizilmiştir. Karmaşık geometrileri yazılıma tanımlamak için “borehole” kullanmak kullanışlı değildir. Bu nedenle koordinatları belirlenen geometri “line” komutu yardımıyla sisteme tanımlanmış ardından “soil polygon” seçeneği ile zemin kütleleri ve belirlenen kayma daireleri sisteme atanmıştır.
- “Material Sets” komutu kullanılarak zemin özellikleri değerleri girilmiş ve zemin özelliği şev modeli üzerine atanmıştır. Kaymaya neden olan katman olarak kritik kayma dairesi de bu bölümde oluşturulmuştur.
- Malzeme davranış tipi drenajlı olarak alınmıştır.

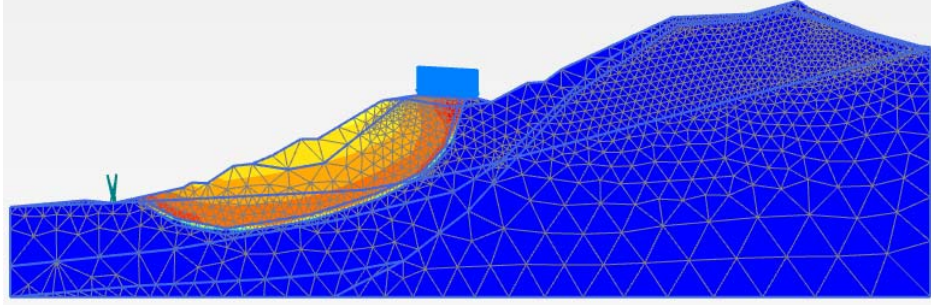
- Dilatasyon açısı (ψ) için Plaxis programının önerdiği şekilde ϕ -30 formülü kullanılmıştır.
- “Distributed load” komutu ile çizgisel yükün konumu ve değeri model üzerine işlenmiştir.
- “Generate Mesh” komutu ile sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur.
- “Flow conditions” bölümünden yer altı su seviyesi belirlenen koordinatlar esas alınarak “Create water level” komutuyla girilmiştir.
- “Stage construction” bölümünden analiz aşamaları tanımlanmıştır. Model geometrisi ve zemin katmanları düzlemsel olmadığından ilk aşamada hesaplama tipi olarak “Gravity loading” seçilmelidir.
- Bir sonraki aşamada hesaplama tipi olarak “Safety” seçeneği ile güvenlik sayısı hesabına gidilmektedir.

A kesitine ait model geometrisi, zemin katmanları, kritik kayma dairesi ve yer altı su seviyesi aşağıdaki gibidir (Şekil 4.28.).



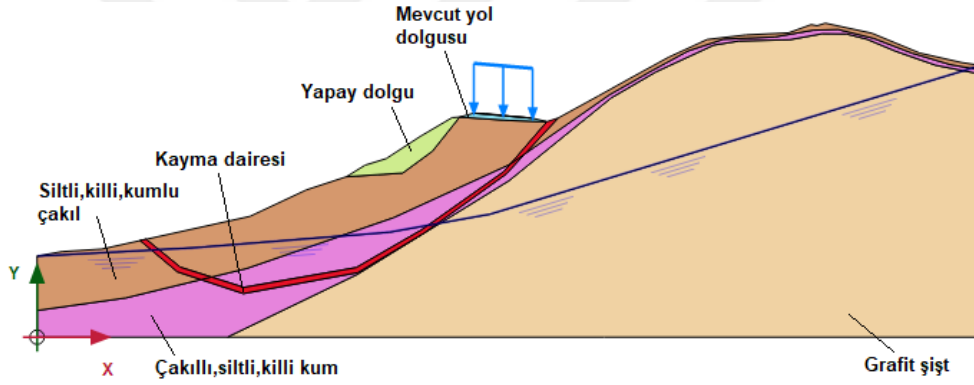
Şekil 4.28. A kesitine ait görüntü

Analiz sonucunda, oluşturulan sistemin arazi mevcut durumuna uygun olduğu görülmüştür. Güvenlik sayısı A kesiti için 1.067 olarak belirlenmiştir. Sistem dengededir ancak göçme sınırındadır (Şekil 4.29.).



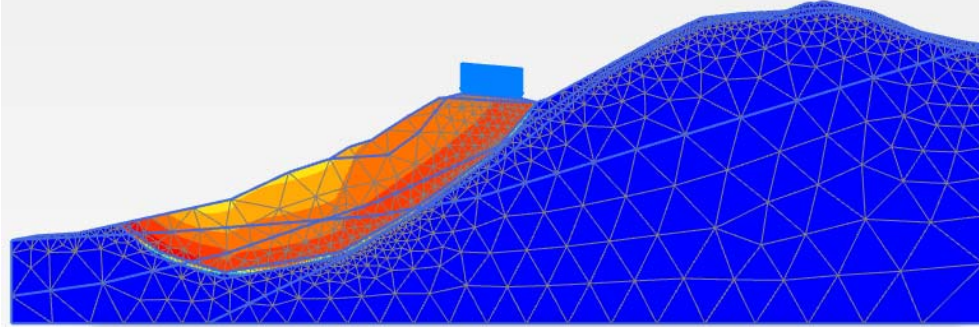
Şekil 4.29. A kesitine ait analiz sonucu görüntüsü

B kesitine ait model geometrisi, zemin katmanları, kritik kayma dairesi ve yer altı su seviyesi aşağıdaki gibidir (Şekil 4.30.).



Şekil 4.30. B kesitine ait görüntü

Analiz sonucunda, oluşturulan sistemin arazi mevcut durumuna uygun olduğu görülmüştür. Güvenlik sayısı B kesiti için 1.041 olarak belirlenmiştir. Sistem dengededir ancak göçme sınırındadır (Şekil 4.31.). Arazinin mevcut durumunda bulunan çatlak ve küçük çaplı oturmalar bu duruma kanıt gösterilebilmektedir.

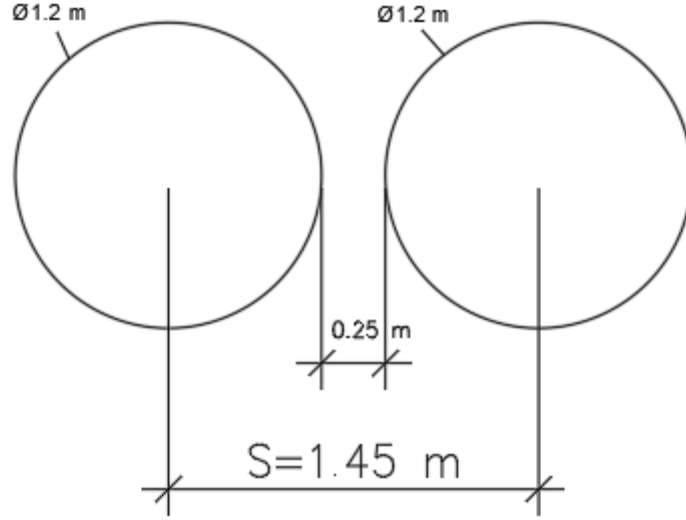


Şekil 4.31. B kesitine ait analiz sonucu görüntüsü

Arazi mevcut durumu belirlenmiş olup şev güvenliğini arttırmaya yönelik tasarım için ortam oluşturulmuştur. Şev güvenliğini iyileştirmek için fore kazık tasarımına başvurulmuştur. Şev hareketini önlemeye yönelik, kayma dairesi sınırları içerisinde kalan kazıklarla bir dizi analiz gerçekleştirilmiştir.

4.3.5.1. Tek Sıra Kazık ile Analizler

Yol ekseninin solunda çapı 1.20m, boyu 30m, 25cm arayla kazık tek sıra halinde teşkil edilmiş üç farklı durum için analizler tekrarlanmıştır. Kazıkların bulundukları konumlar her iki kesit için yoldan eşit uzaklıkta oluşturulmuştur. Kazık, Plaxis 2D programına diyafram duvar gibi tanımlanabilmektedir. Bu nedenle kazığa ait birim metre için etkili alan ve etkili atalet momenti hesaplanıp modellemek için uygun parametreler hesaplanmıştır (Şekil 4.32.).



Şekil 4.32. Kazık detayı

$$\text{Kazık alanı: } A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (1.20)^2}{4} = 1.131 \text{ m}^2$$

$$\text{Etkili alan: } A' = \frac{1.131}{1.145} = 0.780 \text{ m}^2 / \text{m}$$

$$\text{Kazık (dairesel kesitte) atalet momenti: } I = \frac{\pi D^4}{4} = \frac{\pi (1.20)^4}{4} = 0.102 \text{ m}^4$$

$$\text{Etkili atalet momenti: } I = \frac{0.102}{1.45} = 0.00703 \text{ m}^4 / \text{m}$$

Kazık rijitlik parametrelerinin belirlenmek için (EA' ve EI'); TS 500'e göre, C 25/30 betonarme kazık için elastisite modülü, $E = 300 \times 105 \text{ kN/m}^2$ olarak alınabilir. Buna göre;

$$\text{Normal rijitlik, } EA' = 300 \times 105 \times 0.780 = 23\,399\,449 \text{ kN/m}$$

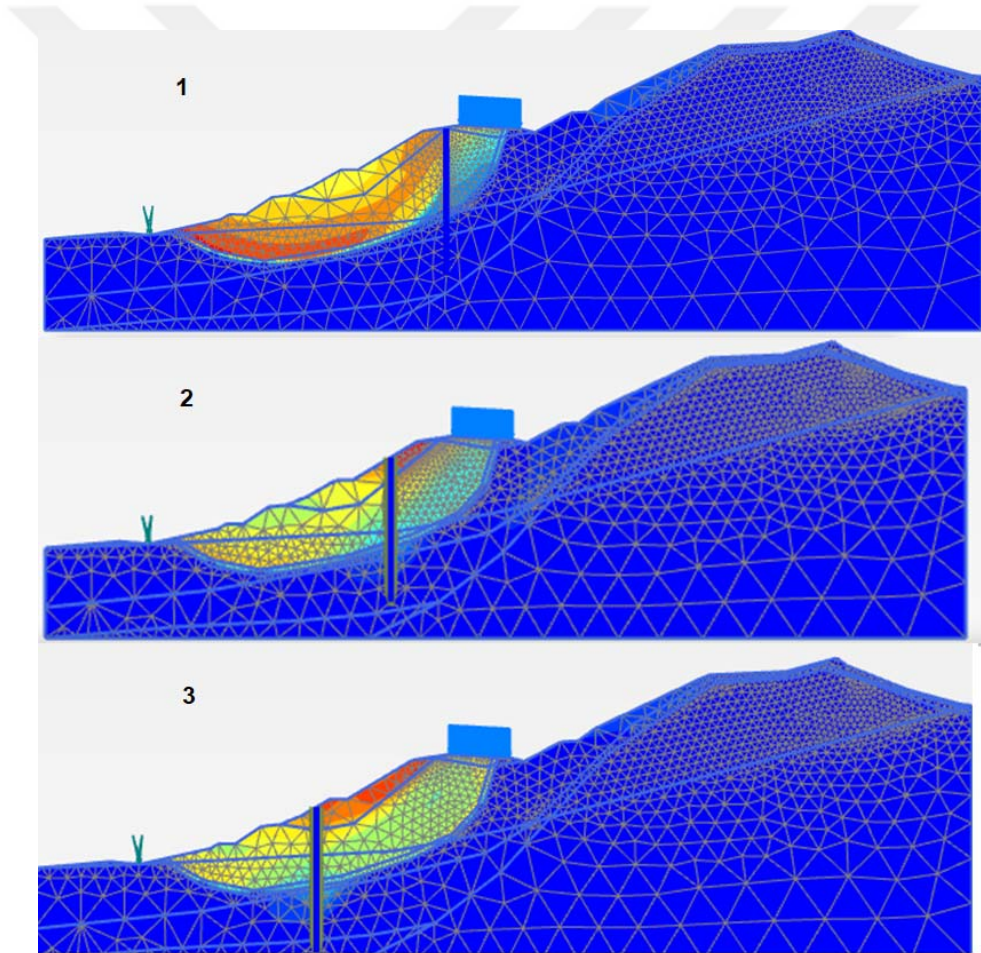
$$\text{Eğilme rijitliği, } EI' = 300 \times 105 \times 0.00703 = 2\,105\,950 \text{ kNm}^2/\text{m}$$

Aşağıda kazıklar için kullanılan parametreler mevcuttur. (Çizelge 4.23.)

Çizelge 4.23. Kazık için kullanılan parametreler

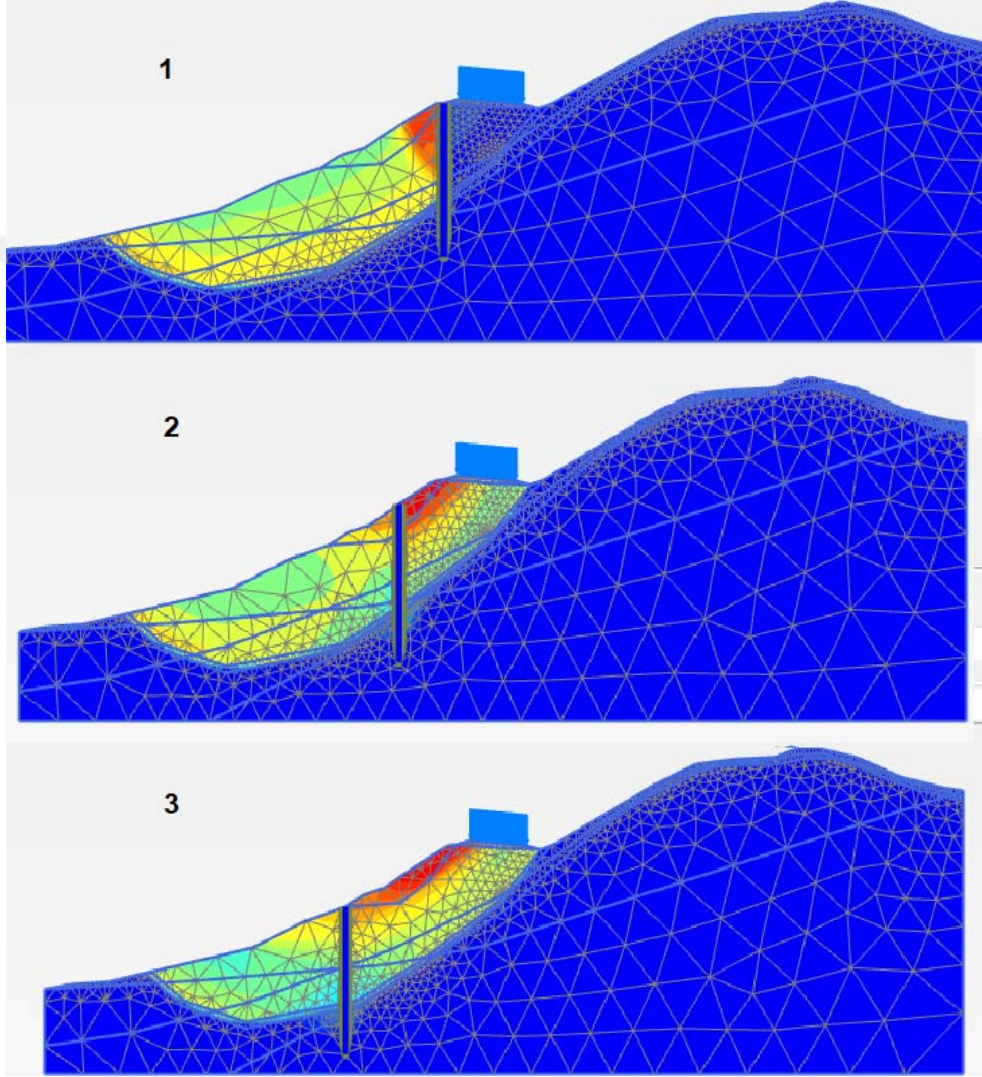
Parametre	Değeri
Malzeme Modeli	Elastik
Normal Rijitlik- EA' (kN/m)	23 399 449
Eğilme Rijitliği EI' (kNm ² /m)	2 105 950
Ağırlık w' (kN/m/m)	5
Poisson Oranı ν	0.20

Şekil 4.33.'te A kesitine ait analiz sonuçları görüntüleri yer almaktadır. Durum 1 için G_s :1.201, durum 2 için G_s :1.316, durum 3 için G_s :1.401 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.33. A kesiti tek sıra kazık için analiz sonucuna ait görüntüler

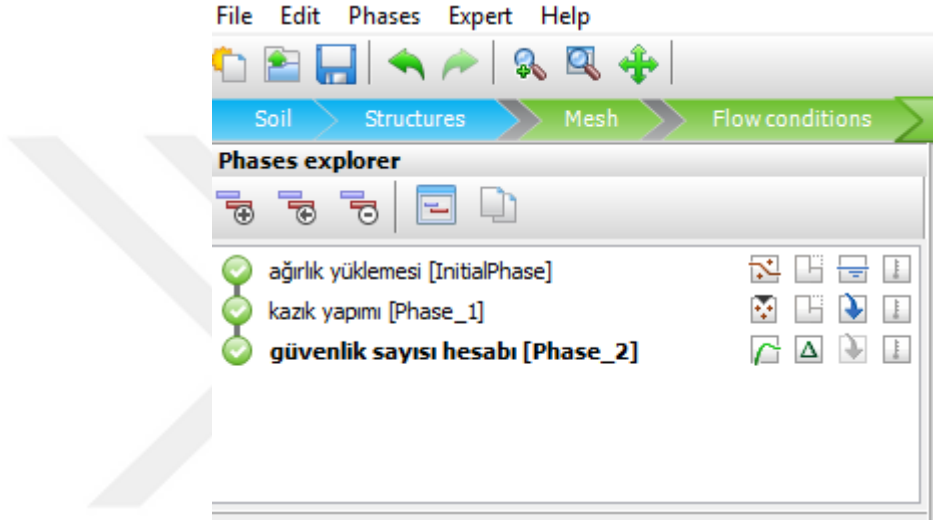
Şekil 4.34.'te B kesitine ait analiz sonuçları görüntüleri yer almaktadır. Durum 1 için $G_s:1.189$, durum 2 için $G_s:1.297$, durum 3 için $G_s:1.372$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.34. B kesiti tek sıra kazık için analiz sonucuna ait görüntüler

Analiz sonuçları incelendiğinde kazık yol ekseninden uzaklaştıkça güvenlik sayısı artmış kayacak kütle için deplasmanlar azalmıştır. Ancak kazık

yoldan uzaklaştıkça yapay dolgu denilen tabaka kayma için kritik hale gelmektedir. Ayrıca analizler çapı 1.50m, 30m boyunda, 10cm aralıkla teşkil edilip analizler tekrarlanmış ancak sonuç değerleri yükselse de fazla bir etki olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.35.'te Plaxis 2D (2018) ara yüzüne ait görüntü yer almaktadır.



Şekil 4.35. Analiz Plaxis 2D (2018) “staged construction” sekmesi analiz adımları

4.3.5.2. Çift Sıra Kazık ile Analizler

Yol ekseninin solunda çapı 1.20m, boyu 30m, 25cm arayla kazık çift sıra halinde teşkil edilmiş üç farklı durum için analizler tekrarlanmıştır. Dolayısıyla Çizelge 4.22. ile aynı kazık parametreleri kullanılmıştır. Burada kazıkların birlikte hareket etmesini sağlamak dayanımını arttırmak amacıyla kazık başlığı kullanılmıştır. İksa kazıklarının tutulacağı dikdörtgen kesitli sıra kazık başlığının net yüksekliği (h) 1.50m olup, genişliği (b) 5.60m'dir. Kazıklar arası mesafe 2.40m'dir. Başlıkta birim metre için parametreler şu şekilde belirlenmiştir (Çizelge 4.24.):

Kazık başlığının alanı: $A = 1.50 * 1.00 = 1.50 \text{ m}^2/\text{m}$

Kazık başlığının (dikdörtgen kesitte) atalet momenti:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1 \cdot (1.50)^3}{12} = 0.281 \text{ m}^4 / \text{m}$$

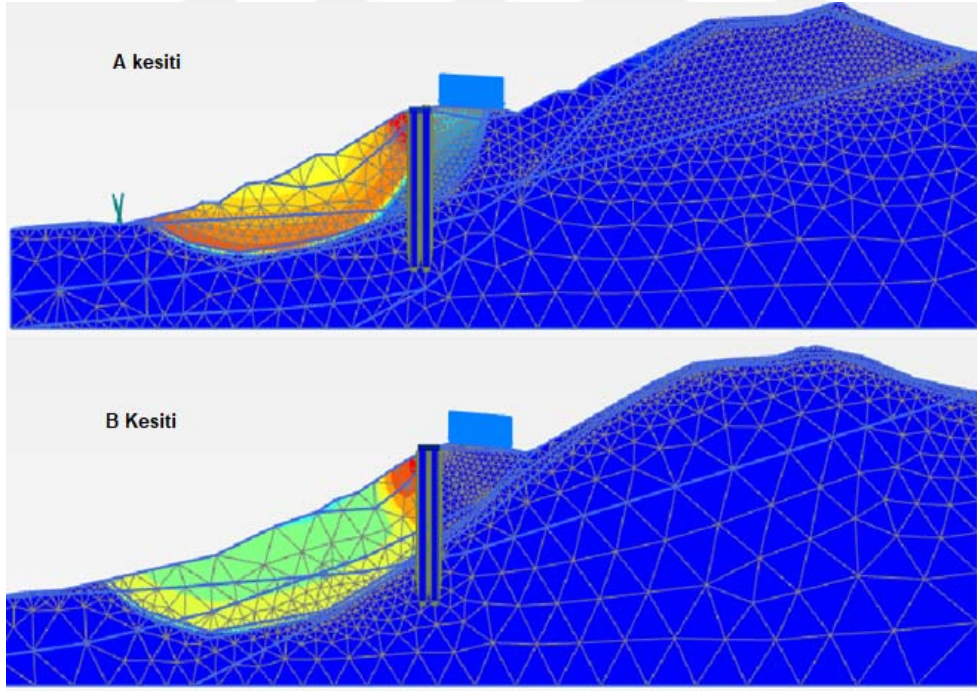
TS 500'e göre, C 25/30 betonarme kazık için elastisite modülü, $E = 300 \times 105 \text{ kN/m}^2$ olarak alınabilir. Buna göre;

Normal rijitlik, $EA' = 300 \times 105 \times 1.50 = 45\,000\,000 \text{ kN/m}$

Eğilme rijitliği, $EI' = 300 \times 105 \times 0.281 = 8\,437\,500 \text{ kNm}^2/\text{m}$

Çizelge 4.24. Kazık başlığı için kullanılan parametreler

Parametre	Değeri
Malzeme Modeli	Elastik
Normal Rijitlik- EA' (kN/m)	45 000 000
Eğilme Rijitliği EI' (kNm ² /m)	8 437 500
Ağırlık w' (kN/m/m)	5
Poisson Oranı ν	0.20



Şekil 4.36. Çift sıra kazık A-B kesitlerinde analiz sonucu görüntüsü

Analiz sonuçlarında A kesiti için G_s : 1.267, B kesiti için G_s : 1.243'tür. Yüzeyde bulunan zayıf tabakanın kesitlerdeki konumu göz önüne alındığında kayma mekanizmasına etkisi fark edilmektedir (Şekil 4.36.).

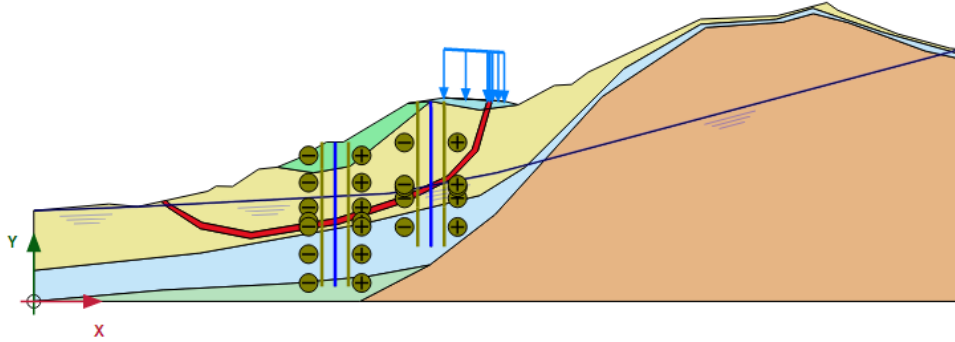
4.3.5.3. Farklı İki Konumda Kazık Analizleri

Önceki yapılan tasarım analizlerinde her durum için güvenlik sayısının arttığı ancak tasarım için istenilen değere ulaşmadığı görülmüştür. Ancak kesitin farklı iki noktasında kazık teşkil edildiğinde şev güvenliğinin istenilen şekilde arttığı, güvenlik sayısının 1.5 değerine yaklaştığı görülmüştür.

İki sıra halinde, çapı 1.20m, boyu 30m, 25cm arayla kazık teşkil edilmiş olup iki kritik kesit için şev güvenlik katsayısı kontrol edilmiştir.

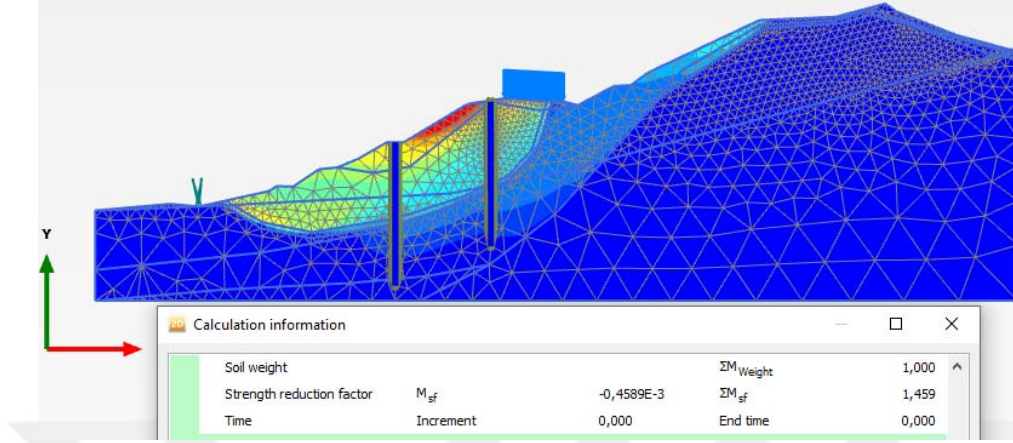
Kazıkların her iki kesit içinde yol ekseninden uzaklıkları eşittir. Kazık uçları mümkün olduğunca sağlam tabaka içerisine soketlenmeye çalışılmıştır.

A kesiti için Plaxis 2D programında kurulan model Şekil 4.37.'te görülmektedir.



Şekil 4.37. A kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan model

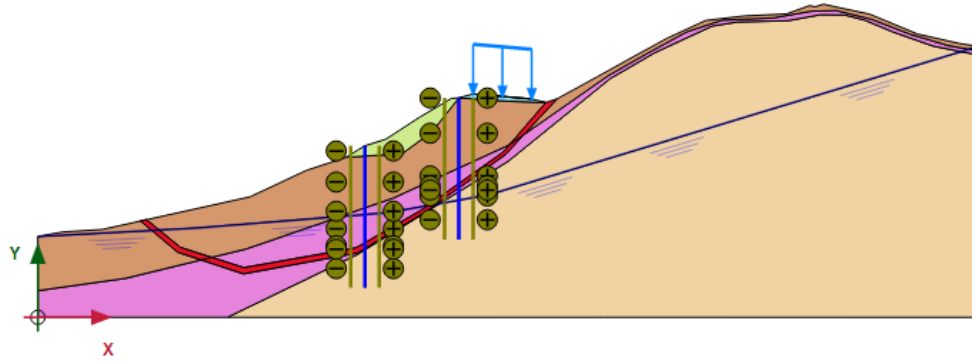
A kesiti için analiz sonuçları Şekil 4. 38.'te yer almaktadır.



Şekil 4.38. A kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan modelde analiz sonucu

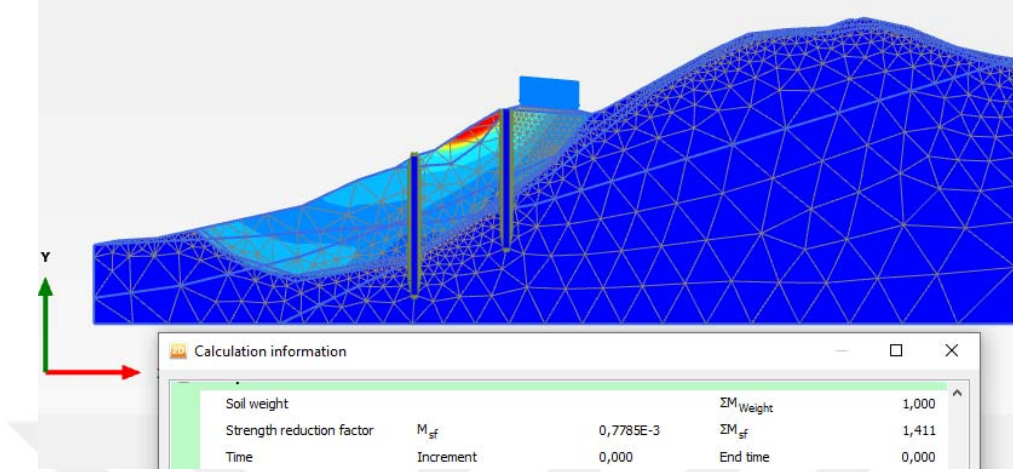
A kesiti için iki sıra halinde kazık imal edildiğinde güvenlik sayısı 1.459'a yükselmiştir.

Aynı şekilde B kesiti için de analizler tekrarlanmıştır. B kesiti için Plaxis 2D programında kurulan model aşağıda görülmektedir (Şekil 4.39.).



Şekil 4.39. B kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan model

B kesiti için analiz sonuçları Şekil 4. 40.'da yer almaktadır.



Şekil 4.40. B kesiti iki sıra kazık ile oluşturulan modelde analiz sonucu

B kesiti için iki sıra halinde kazık imal edildiğinde güvenlik sayısı 1.411'e yükselmiştir.

Analiz sonuçlarına bakıldığında tasarım için öngörülen güvenlik sayısı (1.5) değerine yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Kayma mekanizmasının yerlerine göre sonuçlar kabul edilebilir nitelikte olarak yorumlanmıştır. Drenaj önlemlerinin desteği ile şevin daha güvenli duruma geçeceği düşünülmektedir. Bu tarz bir projenin uygulanma safhasında ekonomik unsurlar göz önünde bulundurularak, kayma potansiyeli yüksek yüzeysel zemin katmanının uzaklaştırılması veya kademelendirilmesi, ankrajla kazığın desteklemesi gibi farklı şev iyileştirme yöntemleri de değerlendirilebilmektedir.

Drenaj önlemi olarak, yol ile yol üstünde bulunan yarmanın kesiştiği yere şev yüzeyinde birikebilecek yüzey sularını drene etmek amacı standart drenaj hendeği yapılması önerilmektedir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan sayısal analizler “Parametrik Analiz”, “Vaka İncelemesi” olarak iki ana başlık altında toplanmıştır.

Parameterik analizlerde Plaxis 2D V.8 ile şev modelleri üzerinde; şev yüksekliğinin, yük değerinin, yükün konumunun, şev eğim açısının, zeminin mukavemet parametrelerinin, iki tabakalı durumun ve diyafram duvarın konumunun güvenlik sayısına etkisi araştırılmıştır. Belirlenen koşullar altında sonlu elemanlar programından elde edilen parametrik analiz sonuçlarında,

- Şev yüksekliği 5m’den 40m’ye kadar kademeli olarak arttırılmış, totalde yüksüz durumda güvenlik sayısının %67, Yüklü durumda ise %54 azaldığı görülmüştür.
- Analizlere yüksüz durumdan başlanmış ve yük değeri şevin göçme sınırına kadar arttırılmıştır. Güvenlik sayısının yaklaşık %50 azaldığı görülmüştür.
- Şevin eğim açısının iki katına çıkarılmasıyla güvenlik sayısı yaklaşık %30 azalmaktadır.
- Zeminin mukavemet parametrelerinin artmasıyla güvenlik sayısı artmaktadır. Kohezyon değerinin iki katına çıkarılmasıyla güvenlik sayısı %50 arttırmakta, 30°’den 50°’ye kadar arttırılan içsel sürtünme açısı ise güvenlik sayısını %47 oranında arttırmaktadır.
- Şev üzerinde diyafram duvarın konumunun kayma dairesinin yerini değiştirdiği görülmüştür. Kayma dairesi içerisinde kalan diyafram duvar en güvenli çözümü vermiştir.
- İki tabakalı zeminle oluşturulan modelde kayma mukavemeti yüksek olan zeminin tabaka yüksekliğinin arttırılmasıyla güvenlik sayısının arttığı görülmüştür.

Ayrıca limit denge yöntemini esas alan Slide programı ile tekrarlanan analizlerde güvenlik sayılarının, sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis programı ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Vaka incelemesi başlığı kapsamında şev stabilitesi problemi incelenmiştir. Yarma üzerinde bulunan yol güzergâhının heyelandan korunarak güvenli hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, arazi çalışmaları ile laboratuvar deneyleri yapılmış, tespit edilen bulgularla heyelanı önlemeye yönelik uygun geoteknik tasarımın oluşturulması üzerinde durulmuştur.

Heyelan mekanizmasını tanımak ve oluşturulacak geoteknik tasarımda kullanılacak parametreleri belirlemek amacıyla toplam derinliği 144m olan 5 adet sondaj kuyusu açılmıştır.

İnceleme alanında ortaya konan geoteknik tasarımın esası, kayan kütlelerin, fore kazıklar ile tutulması ve yeraltı ile yüzey sularının etkin drenajına dayanmaktadır. Bu kapsamda Slide programı ile kayma dairesine ait verileri elde etmek amacıyla geri analizler gerçekleştirilmiştir. Şevin mevcut durumu Plaxis 2D (2018) ile simüle edilmiş ve uygun tasarım için analiz çalışmaları yapılmıştır. Şev güvenliği sağlayan tasarım ortaya konulmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada şev modelleri üzerinde şeve etki eden parametrelerin etkisi Plaxis 2D programı ile araştırılmıştır. Vaka incelemesinde Slide V.6.0 ve Plaxis 2D programları kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalar üç boyutlu sonlu elemanlar programı veya limit denge yöntemini esas alan başka yazılımlar kullanılarak incelenebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir.

Vaka incelemesinde problem, şev hareketini önleyen diğer uygulamalarla tekrar analiz edilip şev güvenliğine etkisi araştırılabilir. Farklı örnek vakalar incelenerek zemin yapısı, yer altı suyu durumu vb. koşullar ile iyileştirme yöntemleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M., 2002. Slope stability and stabilization methods. John Wiley and Sons, Canada, 712s.
- Arama, Z. A., Akın, M. S., ve Çinicioğlu, S. F., 2018. Komşu zemin yapılarının parametrik analizi “dolgu-şev etkileşimi”. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 23(2):109-128.
- Bell, J. M., 1966. Dimensionless parameters for homogeneous earth slopes. J. Soil Mech. Found. Eng. Div. ASCE, 95(SM6):1253–1270.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley and Sons.
- Bishop, A. W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1): 7-17.
- Bol, E., Özocak, A., ve Sert, S., 2017. Kazıklı iksa sistemi ile şev duraylılığının sağlanması. Sakarya University Journal of Science, 21(5): 860-870.
- Bowles, L. E., 1996. Foundation analysis and design. McGraw-hill, ABD, 1027s.
- Budhu, M., 2007. Soil Mechanics Fundamentals. John Wiley and Sons, Second edition, Canada, 626s.
- Cruden, D. M., and Varnes, D. J., 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, 247s.
- Das, B. M., 2010. Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning, USA, 666s.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., and Brandon, T. L., 2014. Soil strength and slope stability. John Wiley and Sons, Canada, 1175s.
- Emir, A. S., 2005. Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Statik ve Dinamik Yüklere Göre Tasarımı. İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 227s.

- Türk Standartları Enstitüsü, 1990. TS-7994 Zemin Dayanma Yapıları: Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 69s.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2000. TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Ankara, Türkiye.
- Erguvanlı, K., 1995. Mühendislik Jeolojisi. 4. Baskı, Seç Yayın, İstanbul, 590s.
- Fellenius, W., 1927. Erdstatische berechnungen. W. Ernst und Sohn, Berlin.
- FHWA-IF-02-034, 2002. Geotechnical Engineering Circular No.5: Evaluation of Soil and Rock Properties” Federal Highway Administration, U.S.
- Fırat, S. ve Canik, B., 2014. Şev İyileştirmelerinde Kullanılan Kazıklara Uygulanan Deprem Etkisi. Politeknik Dergisi, 17(1): 31-34.
- Gibbs, H. J., and Holtz, W. G., 1957. Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing. Proc. 4th Int'l Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, England, Vol. 1: 35-39.
- Gouw., T. L., 2014. Common Mistakes on the Application of Plaxis 2D in Analyzing Excavation Problems. International Journal of Applied Engineering Research, 9(21): 8291-8311.
- Güneş, E., 2013. Zemin İncelemelerinde Standart Penetrasyon Deneyi ile Koni Penetrasyon Deneyi Değerlerinin Karşılaştırılması. Namık Kemal Üniv., Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ, 106s.
- Janbu, N., 1954. Application of composite slip surface for stability analysis. In Proceedings of European Conference on Stability of Earth Slopes, Sweden, Vol. 3: 43-49.
- Janbu, N., 1973. Slope stability computations. Embankment Dam Engineering, Casagrande Memorial Volume. Wiley, New York, 47–86.
- Kahyaoğlu, M. R., İmançlı, G. ve Özden, G., 2009. Şev Stabilesi Kazıklarına Etkiyen Yatay Yüklerin Belirlenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2): 194-202.

- Limit Teknik Araştırma, 2015. Adana – Kozan - Mansurlu - 6. Bölge Hud. I. Kısım Yolu Geoteknik Proje Raporu. Ankara. (yayınlanmamış)
- Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R., 1969. Stability of rock slopes, a three dimensional study. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., Vol. 95 (1): 235-262
- Mbarka, S., Baroth, J., Ltifi, M., Hassis, H., ve Darve, F., 2010. Reliability analyses of slope stability: Homogeneous slope with circular failure. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 14(10): 1227-1257.
- Mısır, G., 2018. şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü. DÜMF Mühendislik Dergisi, 9(1): 429-438.
- Mitchell, J. K., and Villet, W. C., 1987. Reinforcement of earth slopes and embankments. NCHRP report, 290s.
- Morgenstern, N. R., and Price, V. E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15(1): 79–93.
- Moudabel, O. A. M., 2013. Slope Stability Case Study By Limit Equilibrium and Numerical Methods. Oklahoma State University, Doctoral dissertation, Libya, p. 69.
- Neves, M., Cavaleiro, V., and Pinto, A., 2016. Slope Stability Assessment and Evaluation of Remedial Measures Using Limit Equilibrium and Finite Element Approaches. Procedia engineering, 143:717-725.
- Olgun, M. and Acar, M. H., 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 şev'lerin Mühendisliği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 414s.
- Öz, E., 2007. şev stabilitesi ve mühendislik uygulamaları. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 154s.

- Pınarlık, M., Kardoğan, P. S. Ö., ve Demircan, R. K., 2017. Şev Stabilitesine Zemin Özelliklerinin Etkisinin Limit Denge Yöntemi İle İrdelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3): 675-684.
- Pirone, M., and Urciuoli, G., 2018. Analysis of Slope-Stabilising Piles With the Shear Strength Reduction Technique. Computers and Geotechnics, 102: 238-251.
- Plaxis Material Models Manual, 2002. Reference Manual. (Edited by Brinkgreve, R.B.J.), Delft University of Technology and Plaxis b.v., Netherlands, p. 146.
- Plaxis Reference Manual, 2018. (Edited by: Brinkgreve R.B.J., Kumarswamy S., Swolfs W.M., Foria F.) Delft University of Technology and Plaxis b.v., Netherlands, p. 494.
- Plaxis Tutorial, 2018. (Edited by: Brinkgreve R.B.J., Kumarswamy S., Swolfs W.M., Foria F.) Delft University of Technology and Plaxis b.v., Netherlands, p. 190.
- Poşluk, E., Dalgıç, S., Kuşku, İ., Apaydın Poşluk, E., 2014. Heyelan Islahında Gereken Dayanma Kuvvetinin Limit Denge Yöntemi ile Belirlenmesi. İstanbul Yerbilimleri Dergisi, 27(2): 77-88.
- Sarma, S. K., 1979. Stability analysis of embankments and slopes. J. Geotech. Eng. Div. ASCE, 105(GT12), 1511–1524.
- Skempton, A. W., 1948. The $\phi = 0$ Analysis of Stability and Its Theoretical Basis. In Proc. 2nd. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1: 72.
- Skempton, A. W., and Hutchinson, J. N., 1969. Stability of Natural Slopes. Proc. 7th ICSMF, Mexico, Vol 3: 291-340.
- Sowers, G. F., 1979. Introductory Soil Mechanics and Foundation. 4th edition, Macmillan, NewYork.
- Spencer, E., 1967. A method of analysis of embankments assuming parallel interslices technique.” Geotechnique, 17(1): 11–26.

- Taşkıran, T., Yavuz, V. S., ve Keskin, M. S., 2015. Şev stabilitesinin iki ve üç boyutlu modeller ile incelenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 6(1): 1-8.
- Taylor, D. W., 1937. Stability of Earth Slopes. J. Boston Soc. Civil Engineers, 24(3):197-247.
- Terzaghi, K., 1950. Mechanism of landslides. Application of geology to engineering practice, Geol. Soc. Am, 83-123.
- Terzaghi, K., 1955. Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. Geotechnique, Vol 5 (4): 297-236.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons. Inc., New York.
- Toğrol E., Tan O., 2003. Kazıklı Temeller. Birsen Yayınevi İstanbul, 142s.
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H. F., Sloan, S. W., Lyamin, A. V., and Raissakis, I., 2015. Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques. Géotechnique, 65(4): 249-257.
- Ulusay R., 2002. Şevlerin Duraylılığı ve Tasarımı. Kurs Notu. Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 177s. (yayınlanmamış)
- Ulusay, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:38, 385s.
- Ulusay, R., Sönmez, H., 2007. Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 289s.
- Varnes, D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes. Special report, 176: 11-33.
- Yıldırım, S., 2004. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı. Birsen yayınevi, İstanbul, 471s.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127(4): 297-313.

Zehtab, K. H., Toker, N. K., ve Adli, M. A., 2012. Comparison of Formulae for Shear Strength of Unsaturated Soils. In Proc. of 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, s. 795-802.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Adana’da doğdu. Tüm öğrenimini Adana’da tamamladı. 2011-2015 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde eğitim aldı. 2015 yılında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik alanında yüksek lisans eğitimine başlamasıyla birlikte iş hayatında da proje mühendisliği ve şantiye şefliği görevlerini yürüttü.

