

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI ATIK SAHALARINDA ŞEV STABİLİTESİ

Sedat KEZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Haziran 2019

T.C

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Sedat KEZER tarafından yapılan “Katı Atık Sahalarında Şev Stabilitesi” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

Ünvanı

Adı Soyadı

Başkan: DOÇ. DR.

ERCAN IŞIK

Üye : PROF. DR.

TAHA TAŞKIRAN

Üye : DOÇ. DR.

MEHMET SALİH KESKİN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 08/07/2019

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

..../...../20...

Prof. Dr. Sevtap SÜMER EKER

ENSTİTÜ MÜDÜR V.

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Hazırlanmış olan bu Yüksek Lisans Tezinde Geoteknik Mühendisliğinin özel uzmanlık isteyen konulardan biri olan katı atık sahalarındaki şev stabilitesi konusu ele alınmıştır. Günümüz şartlarında güncelliğini hiç kaybetmeyecek gibi gözükten katı atık sahaları gerek konuya olan ilgim, gerekse de çalıştığım kurum olan İller Bankası'nın çalışma alanında olmasından dolayı bu konu seçilmiştir.

Tez çalışmam esnasında beni yönlendirirken ilgisini ve değerli yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet Salih KESKİN başta olmak üzere, bu çalışmada bana yardımcı olan hocalarımdan Sayın Prof. Dr. Taha TAŞKIRAN 'a ve yine bu süreçte bana her konuda yardımcı olan Diyarbakır Bölge Müdürlüğü'ndeki değerli müdür ve mesai arkadaşlarıma, manevi açıdan desteklerini esirgemeyen aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİL LİSTESİ.....	X
KISALTMA VE SİMGELER.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Katı Atık.....	2
1.2. Katı Atık Türleri.....	2
1.2.1. Evsel Nitelikli Katı Atıklar.....	2
1.2.2. Endüstriyel Nitelikli Atıklar (Tehlikeli ve Tehlikesiz Atıklar).....	4
1.2.3. Tıbbi Atıklar.....	4
1.2.4. Özel Atıklar.....	4
1.3. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri.....	4
1.3.1. Düzensiz (Vahşi) Depolama.....	4
1.3.2. Düzenli Depolama.....	5
1.3.3. Kompostlama.....	5
1.3.4. Tekrar Kullanım.....	6
1.3.5. Geri Dönüşüm.....	6
1.3.6. Geri Kazanım.....	6
1.3.7. Kontrollü Yakma.....	6
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	7
2.1. Katı Atıkların Fiziksel Özellikleri.....	7
2.1.1. Su Muhtevası.....	7
2.1.2. Porozite.....	7
2.1.3. Birim Hacim Ağırlık.....	8

2.1.4.	Permeabilite.....	9
2.2.	Katı Atıkların Mukavemet Özellikleri.....	9
2.3.	Katı Atık Sahalarında Şev Stabilesi.....	11
2.3.1.	Şevlerin Stabilesi.....	12
2.3.2.	Önceki Çalışmalar.....	17
2.4.	Donatılı Şevler.....	18
2.4.1.	Geosentetikler.....	19
2.4.2.	Geogridler.....	20
2.4.2.1.	Geogrid-Zemin Etkileşimi.....	21
2.4.2.2.	Geogridlerin Kullanım Alanları.....	21
3.	MATERYAL ve METOT.....	23
3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	23
3.1.1.	Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliği'nde Kullanımı.....	25
3.1.2.	Donatılı Zemin Davranışının Modellenmesi.....	26
3.2.	Plaxis Programı.....	27
3.2.1.	Geometrik Modelin Oluşturulması.....	27
3.2.2.	Elemanlar.....	28
3.2.2.1.	Zemin Elemanları.....	28
3.2.2.2.	Kiriş Elemanlar.....	29
3.2.2.3.	Geogrid Elemanı.....	30
3.2.2.4.	Ara Yüzey Elemanı.....	30
3.3.	Zemin Modelleri.....	31
3.3.1.	Lineer Elastik Model (LE).....	31
3.3.2.	Mohr-Coulomb Model (MC).....	31
3.3.3.	Jointed-Rock Model (JR).....	31
3.3.4.	Soft Soil Model (SS).....	31
3.3.5.	Soft Soil Creep Model (SSC).....	32
3.3.6.	Hardening Soil Model (HS).....	32
3.4.	Limit Denge Yöntemleri.....	32

3.3.1	Dilim Yöntemi.....	33
3.3.1.1.	İsveç Dilim (Fellenius) Yöntemi.....	33
3.3.1.2.	Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi.....	34
3.3.1.3.	Janbu Yöntemi.....	34
3.3.1.4.	Spencer Yöntemi.....	34
3.3.1.5.	Morgenstern-Price Yöntemi.....	35
3.3.1.6.	Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE).....	35
3.4.	Geostudio Programı.....	35
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
4.1.	Analiz Yöntemi.....	39
4.1.1.	Geometrik Model.....	39
4.1.2.	Model Zemin.....	40
4.2.	Sonlu Elemanlar Analizi	40
4.2.1.	Sınır Koşulları.....	41
4.2.2.	Geogrid Donatı Tabakaları.....	42
4.2.3.	Sonlu Elemanlar Ağı.....	42
4.2.4.	Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulması.....	43
4.2.5.	Hesaplamalar.....	45
4.2.6.	Analiz Sonuçları.....	45
4.2.6.1.	Donatısız Analizler.....	45
	- İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) Etkisi.....	45
	-Kohezyon (c) Etkisi.....	49
	-Dilatasyon Açısı (ψ) Etkisi.....	52
	-Elastisite Modülü (E) Etkisi.....	53
	-Poisson Oranı (ν) Etkisi.....	54
	-Birim Hacim Ağırlığı (γ) Etkisi.....	56
	-Şev Açısı (β) Etkisi.....	58
4.2.6.2.	Donatılı Analizler.....	61
	- $H/h=30$ Durumu (Geogrid Aralığı $h=1$ m.).....	62

- H/h=15 Durumu (Geogrid Aralığı h=2 m.).....	66
- H/h=10 Durumu (Geogrid Aralığı h=3 m.).....	69
- H/h=6 Durumu (Geogrid Aralığı h=5 m.).....	71
- H/h=5 Durumu (Geogrid Aralığı h=6 m.).....	73
- H/h=4 Durumu (Geogrid Aralığı h=7.5 m.).....	75
- H/h=3 Durumu (Geogrid Aralığı h=10 m.).....	77
4.3. Limit Denge Yöntemi Analiz Sonuçları.....	79
4.3.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması.....	80
4.3.2. Dairesel Kayma Yüzeyi.....	81
4.3.3. Analiz Sonuçları.....	81
4.3.3.1. Donatısız Analizler.....	81
-Analiz Yöntemi.....	81
-İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) Etkisi.....	84
-Kohezyon (c) Etkisi.....	87
-Birim Hacim Ağırlığı (γ) Etkisi.....	91
-Şev Açısı (β) Etkisi.....	93
4.3.3.2. Donatılı Analizler.....	97
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
5.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	101
5.1.1. Donatısız Analizler.....	101
5.1.2. Donatılı Analizler.....	102
5.2. Limit Denge Analiz Sonuçları.....	105
5.2.1. Donatısız Analizler.....	105
5.2.2. Donatılı Analizler.....	105
5.3. Sonlu Elamanlar Yöntemi ile Limit Denge Yöntemlerinin Karşılaştırılması....	106
5.3.1. Donatısız Analizlerin Karşılaştırılması.....	106
5.3.2. Donatılı Analizlerin Karşılaştırılması.....	107
6. KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	113

ÖZET

KATI ATIK SAHALARINDA ŞEV STABİLİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedat KEZER

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

Bu çalışmada, ilk olarak katı atık hakkında gerekli tanımlamalar yapılarak fiziksel ve geoteknik özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra örnek bir katı atık depolama sahası modelinde şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ilk aşamada, sonlu elemanlar yöntemi ile katı atık depolama sahalarında şev stabilitesini etkileyebilecek parametreler (içsel sürtünme açısı, kohezyon, dilatasyon açısı, elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlık ve şev açısı) göz önüne alınmış ve bu parametrelerin farklı değerleri için Plaxis v.8 paket programı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada, geogrid donatı ile güçlendirilmiş katı atık dolgularının davranışı ile ilgili sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise, limit denge yöntemi ile şev stabilitesini etkileyebilecek parametreler (içsel sürtünme açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve şev açısı) göz önüne alınmış ve bu parametrelerin farklı değerleri için analizler, Geostudio 2012 yazılımı kullanılmıştır. Daha sonra ise, birinci aşamada analizi yapılan optimum geogrid donatılı durum için limit denge analizleri gerçekleştirilerek her iki yöntemin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonunda, sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile yapılan analizlerde içsel sürtünme açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve şev açısının katı atık dolgu şevinin stabilitesi üzerinde etkili olduğu, donatılı analizlerde geogrid kullanılması durumunda stabilitenin önemli miktarda artırılabilceği görülmüştür. Ayrıca limit denge yöntemi ile elde edilen güvenlik sayılarının daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar ortaya konularak gerekli öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Katı Atık, Şev Stabilitesi, Geogrid, Geostudio, Plaxis.

ABSTRACT

SLOPE STABILITY IN SOLID WASTE LANDFILLS

M.Sc. THESIS

Sedat KEZER

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

2019

In this study, at first physical and geotechnical properties of solid wastes are mentioned. Then, slope stability analyzes are performed in solid waste landfill model.

In the first part of the study, parameters that can affect slope stability (internal friction angle, cohesion, dilatation angle, modulus of elasticity, poisson ratio, unit weight and slope of the soil) are analyzed by finite element method. For the different values of these parameters, analyzes are performed with Plaxis v.8 package program. In the next stage, finite element analyzes are performed in geogrid reinforced solid waste.

In the second part of the study, parameters that can affect slope stability (internal friction angle, cohesion, unit volume weight and slope of the soil) are analyzed by limit equilibrium method. For the different values of these parameters, analyzes are performed with Geostudio 2012 software. Later, for the optimum geogrid-equipped case that analyzed in the first stage, limit equilibrium analyzes are performed and the results of the two methods are compared.

At the end of the study, in the analysis with finite element and limit equilibrium methods is showed that the internal friction angle, cohesion, unit weight and slope of the soil are effective on the stability of the solid waste. It has also been found that the stability can be significantly increased with the use of geogrid. In addition, the factor of safety in limit equilibrium analysis becomes higher than finite element analysis. Also analysis results and the necessary recommendations are presented.

Key Words: Solid Waste, Slope Stability, Geogrid, Geostudio, Plaxis.

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1.	Türkiye' deki Katı Atık Dağılımı (TÜİK, 1992)	3
Çizelge 1.2.	Türkiye' deki Geri Kazanılabılır Atıkların Dağılımı (TÜİK,1992)	3
Çizelge 2.1.	Katı Atıkların Mukavemet Parametreleri	11
Çizelge 3.1.	Limit Denge Yöntemlerinde Yapılan Kabullerin Karşılaştırılması	33
Çizelge 4.1.	Katı Atık Sahası İçin MC Model Zemin Parametreleri	40
Çizelge 4.2.	Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Analiz Sonuçları	46
Çizelge 4.3.	Farklı Kohezyon Değerleri İçin Analiz Sonuçları	50
Çizelge 4.4.	Farklı Dilatasyon Açıları İçin Analiz Sonuçları	53
Çizelge 4.5.	Farklı Elastisite Modülü Değerleri İçin Analiz Sonuçları	54
Çizelge 4.6.	Farklı Poisson Oranı Değerleri İçin Analiz Sonuçları	55
Çizelge 4.7.	Farklı Birim Hacim Ağırlığı Değerleri İçin Analiz Sonuçları	56
Çizelge 4.8.	Farklı Şev Açısı Değerleri İçin Analiz Sonuçları	59
Çizelge 4.9.	H/h=30, N=30 İçin Analiz Sonuçları	62
Çizelge 4.10.	H/h=15, N=15 İçin Analiz Sonuçları	67
Çizelge 4.11.	H/h=10, N=10 İçin Analiz Sonuçları	69
Çizelge 4.12.	H/h=6, N=6 İçin Analiz Sonuçları	71
Çizelge 4.13.	H/h=5, N=5 İçin Analiz Sonuçları	73
Çizelge 4.14.	H/h=4, N=4 İçin Analiz Sonuçları	75
Çizelge 4.15.	H/h=3, N=3 İçin Analiz Sonuçları	78
Çizelge 4.16.	Farklı Analiz Yöntemi Sonucu Elde Edilen Güvenlik Sayıları	82
Çizelge 4.17.	Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Analiz Sonuçları	85
Çizelge 4.18.	Farklı Kohezyon Değerleri İçin Analiz Sonuçları	89
Çizelge 4.19.	Farklı Birim Hacim Ağırlığı Değerleri İçin Analiz Sonuçları	92
Çizelge 4.20.	Farklı Şev Açısı Değerleri İçin Analiz Sonuçları	94
Çizelge 4.21.	Geogrid Özellikleri	97
Çizelge 4.22.	H/h=4, N=4 İçin Analiz Sonuçları	98

Çizelge 5.1.	Farklı c ve ϕ Parametrelerine Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması	106
Çizelge 5.2.	Farklı Şev Açılarına Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması	107
Çizelge 5.3.	Geogird Donatı Sayısına Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması	107



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1.	Düzenli Katı Atık Depolama Sahası Kesiti (Çubukçu E.,2008)	5
Şekil 2.1.	Katı Atıklar İçin Singh ve Murphy'nin Önerdiği Sürtünme Açısı-Kohezyon Diyagramı	10
Şekil 2.2.	Şevin Dilim Yöntemi ile Analiz Edilmesi (a) Dilimlere Ayrılmış Şev (b) Dilimine Etkiyen Yatay ve Düşey Kuvvetler	13
Şekil 2.3.	Ağırlık Arttırma Yöntemi ile Denge Çözümü Elde Edilmesi	15
Şekil 2.4.	Mukavemet Azaltma Yöntemi	16
Şekil 2.5.	Geosentetiklerin Çeşitlerine Göre Ana ve Yan İşlevleri	19
Şekil 2.6.	Geogridler (a) Tek Eksenli Geogrid (b) Çift Eksenli Geogrid	20
Şekil 3.1.	Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanma Şekli	24
Şekil 3.2.	Sonlu Elemanlar ve Düğüm Noktaları	25
Şekil 3.3.	(a) Düzlem Şekil Değiştirme Koşulu (b) Eksenel Simetri Koşulu	28
Şekil 3.4.	Üçgen Elemanlarındaki Düğüm ve Gerilme Noktalarının Konumları	29
Şekil 3.5.	Üç ve Beş Düğümlü Kiriş Elemanlar	29
Şekil 3.6.	Üç ve Beş Düğümlü Geogrid Elemanları	30
Şekil 3.7.	Ara Yüzey Elemanlarının Sisteme Bağlantı Şekli	30
Şekil 4.1.	Analizlerde Kullanılan Katı Atık Sahası Geometrisi	40
Şekil 4.2.	(a) Donatısız ve (b) Donatılı Modeller	41
Şekil 4.3.	Analizlerde Kullanılan Sonlu Elemanlar Ağ Modelleri (a) Donatısız Model (b) Donatılı Model	43
Şekil 4.4.	Ağırlık Yükleme Yönteminin Kullanıldığı Durumlar	43
Şekil 4.5.	Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulma Şeması	44
Şekil 4.6.	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	46
Şekil 4.7.	Analizlerden elde edilen çıktılar (a) Deformasyona Uğramış Sonlu Elemanlar Ağı ($\phi=15^\circ$), b)Toplam deplasman vektörleri ($\phi=15^\circ$), c) Toplam deplasman konturları ($\phi=15^\circ$))	48
Şekil 4.8.	İçsel Sürtünme Açılarının Farklı Değerleri İçin Hesaplanan Kayma Yüzeyleri ($\phi=5^\circ$ - 20° - 35° - 50°)	49

Şekil.4.9.	Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	50
Şekil 4.10.	Farklı Kohezyon (c) Değerlerinde Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (c= 5-20-35-50kPa)	52
Şekil 4.11.	Dilatasyon açısı (ψ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	53
Şekil 4.12.	Elastisite Modülü (E) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	54
Şekil 4.13.	Poisson Oranı (ν) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	55
Şekil 4.14.	Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	56
Şekil 4.15.	Farklı Birim Hacim Ağırlık Değerleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\gamma=9-11-13\text{kN/m}^3$)	58
Şekil 4.16.	Analizlerde Kullanılan Şev Modelleri	59
Şekil 4.17.	Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	59
Şekil 4.18.	Değişik Şev Açılarında Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\beta=45^\circ-26.56^\circ-18.43^\circ-14.04^\circ-11.31^\circ$)	61
Şekil 4.19.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=1 m.)	63
Şekil 4.20.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=1 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=5,10,15,20,25,30)	66
Şekil 4.21.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=2 m.)	66
Şekil 4.22.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre h=2 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=5,10,15)	68
Şekil 4.23.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=3 m.)	69
Şekil 4.24.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=3 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=5,8,10)	71
Şekil 4.25.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=5 m.)	72
Şekil 4.26.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=5 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,4,6)	73
Şekil 4.27.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=6 m.)	74
Şekil 4.28.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=6 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,3,4)	75
Şekil 4.29.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=7.5 m.)	76
Şekil 4.30.	Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=7.5 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,3,4)	77
Şekil 4.31.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=10 m.)	78

Şekil 4.32.	Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre (h=10 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,3)	79
Şekil 4.33.	Geometrik Modelin Oluşturulması (a) Donatısız (b) Donatılı Model	80
Şekil 4.34.	Farklı Analiz Yöntemleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (Ordinary, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu , Bishop)	84
Şekil 4.35.	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	85
Şekil 4.36.	Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\phi=5^\circ-20^\circ-35^\circ-50^\circ$)	87
Şekil 4.37.	Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	88
Şekil 4.38.	Farklı Kohezyon (c) Değerlerinde Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (c= 5-20-35-50 kPa)	91
Şekil 4.39.	Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	92
Şekil 4.40.	Farklı Birim Hacim Ağırlık Değerleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\gamma=9-11-13$ kN/m ³)	93
Şekil 4.41.	Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi	94
Şekil 4.42.	Değişik Şev Açılarında Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\beta=45^\circ-26.56^\circ-18.43^\circ-14.04^\circ-11.31^\circ$)	97
Şekil 4.43.	Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=7.5 m.)	98
Şekil 4.44.	Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre h=7.5 m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=1,2,3,4)	100

KISALTMA VE SİMGELER

[B]	: Eleman şekil değiştirme matrisi
c	: Kohezyon
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
{d}	: Elemanın düğüm noktasındaki deplasmanları
E	: Elastisite modülü
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
{f}	: Eleman yük vektörü
g	: Yer çekimi ivmesi
GS	: Güvenlik Sayısı
h	: Geogrid aralıkları
H	: Şev yüksekliği
HS	: Hardening Soil Model
JR	: Jointed-Rock Model
k	: Permeabilite katsayısı
kg	: Kilogram
[k]	: Eleman rijitlik matrisi
[K]	: Sistem rijitlik matrisi
LE	: Lineer Elastik Model
MAF	: Mukavemet azaltma faktörü
MC	: Mohr-Coulomb Model
N	: Geogrid donatı tabaka sayısı
[N]	: Şekil fonksiyonu

R_{inter}	: Mukavemet azaltma faktörü
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SS	: Soft Soil Model
SSC	: Soft Soil Creep Model
vs.	: vesaire
vb.	: ve benzeri
β	: Şev açısı
τ	: Kesme mukavemeti
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
$\{\delta\}$	: Elemanın herhangi bir noktasındaki deplasman bileşenleri
ν	: Poisson oranı
ψ	: Dilatasyon açısı
λ^*	: Modifiye sıkışma indeksi
κ^*	: Modifiye şişme indeksi
γ	: Birim hacim ağırlık

1.GİRİŞ

Günümüzde hızlı nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler kirlilik problemini de ortaya çıkarmıştır. Kirlilik probleminin büyük bir kısmını oluşturan katı atıklar ise, tüm dünya ülkeleri ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelere yönetilmesi ve iyileştirilmesi gereken bir durumdur. Katı atıklar zemin ve yer altı sularını kirletmiş ve kirletmeye devam etmektedir. Zemin ve yer altı suyu kirlenmesinin yarattığı zararlar gözle görülebilir hale geldikten sonra, bu tip kirliliğin önemi anlaşılmış ve meydana gelmiş kirliliğin giderilmesini öngören kanun ve yönetmelikler hazırlanmıştır.

Atıkların çevreye minimum zarar verecek şekilde depolanmadığı takdirde, gelecekte olumsuz etkiler ortaya çıkması kaçınılmazdır. Atıkların bütünüyle imha edilmesi söz konusu olamayacağından, kütlelerinin yani hacimlerinin azaltılarak ve sonraki yıllarda olabilecek teknolojik gelişmelerle, tekrar kullanıma imkan sağlayacak şekilde düzenli olarak depolanmaları temel amaç olmalıdır.

Düzenli katı atık depo sahalarında karşılaşılan önemli problemlerden biri, katı atık dolgu şevlerinin stabilite durumlarıdır. Katı atık depolama sahalarındaki şev stabilite analizleri; hem şevlerde herhangi bir hareket olmaksızın ne kadar yüksekliğe kadar dolgu yapılabileceğinin bilinmesi, hem de, eski veya terk edilmiş olan katı atık sahalarının tekrardan inşaat sahası olarak kullanılması durumunda yeniden oluşturulacak olan şevlerin eğimlerinin belirlenebilmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, örnek bir katı atık depolama sahası modelinde şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge yöntemleriyle çözüm yapan bilgisayar programları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar çözümleri iki boyutlu PLAXIS v.8 yazılımı; limit denge çözümleri ise GeoStudio yazılımı ile yapılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, katı atık depolama sahalarında şev stabilitesini etkileyebilecek içsel sürtünme açısı, kohezyon, dilatasyon açısı, elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlık ve şev açısı parametreleri göz önüne alınmış ve bu parametrelerin farklı değerleri için analizler her iki yöntem (sonlu eleman ve limit denge) ile gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise, katı atık dolgusu içerisine güçlendirme amaçlı farklı kombinasyonlarda geogrid tabakaları yerleştirilerek stabilite üzerindeki etkisi yine her iki yöntem ile incelenmiştir.

Çalışma sonunda, içsel sürtünme açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve şev açısının katı atık dolgu şevinin stabilitesi üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Geogrid kullanılması durumunda stabilitenin önemli miktarda arttırılabileceği görülmüş ve elde edilen sonuçlar ortaya konularak gerekli öneriler sunulmuştur.

Ayrıca, nonatısız ve geogrid donatılı durumlarda, sonlu eleman yöntemi ve limit denge yöntemi analiz sonuçları karşılaştırılarak gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

1.1. Katı Atık

Katı atık ile ilgili literatür ve mevzuatta çeşitli tanımlamalar mevcuttur. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'nde Katı Atık; “Üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler ve arıtma çamuru” olarak tanımlanırken, Çakır ve Yılmaz (1998) tarafından “İnsanların endüstriyel, tarımsal, ticari ve evdeki günlük faaliyetleri, yeni bir bina yapımı, su ve atık su arıtılması gibi değişik işlemleri sonucu işe yaramaz hale gelen her türlü katı madde “katı atık” olarak isimlendirilmektedir.”

1.2. Katı Atık Türleri

Katı atıklar, oluşum şekillerine göre aşağıdaki gibi 4 ana guruba ayrılabilir. Bunlar; evsel nitelikli katı atıklar, endüstriyel nitelikli atıklar, tıbbi atıklar ve özel atıklar şeklinde sıralanabilir.

1.2.1. Evsel Nitelikli Katı Atıklar

Bu atıklar, günlük mutfak çöpleri, park, bahçe gibi ortak alanlardan gelen, tehlikeli atık sınıfına girmeyen, normal, belediye tarafından rutin olarak toplanıp taşınan, depolama sahalarında depolanabilen, geri kazanılabilen veya yakılabilen evsel veya endüstri nitelikli atıklardır.

Kısacası, günlük faaliyetler sonucu ev ortamında oluşabilecek tehlikeli ve zararlı atık sınıfına girmeyen her türlü katı atık evsel katı atık sınıfına girer (MEB 2009).

Evsel katı atıkların içeriğinde genellikle yiyecek artığı, bahçe çöpleri, kağıt artıkları, plastik ve lastik artıkları, tekstil, ahşap, kül, toprak vb. maddelerden oluşmaktadır.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, ülkemizde kişi başına ortalama günlük 1.0 kg belediye atığı üretilmekte, bunun 0.6 kg.'ı evsel nitelikli olmaktadır. Neyim (2008) tarafından günde ortalama 68.000 ton, yılda toplam 28.4 Milyon ton civarında evsel nitelikli (belediye atığı) üretildiği belirtilmiştir.

TÜİK tarafından 1992 yılında evsel nitelikli katı atıkların kompozisyonu ile ilgili tüm Türkiye'yi kapsayan ilk ve tek çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen katı atık dağılımı Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1. Türkiye' deki Katı Atık Dağılımı (TÜİK 1992)

Atık Cinsi	(%)
Organik Atık	65.45
Kül-Curuf	22.48
Geri Kazanılabılır Atık	12.05

Geri Kazanılabılır Atıkların İçeriği ise Çizelge 1.2.' görülmektedir.

Çizelge 1.2. Türkiye' deki Geri Kazanılabılır Atıkların Dağılımı (TÜİK 1992)

Atık Cinsi	(%)
Kağıt- Karton	45.48
Metal	8.62
Cam	18.46
Plastik	13.19
PET-PVC	6.15
Lastik Kauçuk	3.30
Tekstil	4.80

1.2.2. Endüstriyel Nitelikli Atıklar (Tehlikeli ve Tehlikesiz Atıklar)

Endüstriyel işlemler sonucu meydana gelen atıklar bu kapsama girmektedir. Tehlikesiz atıklar grubuna cam, kâğıt, tahta, metal gibi çeşitli ambalaj atıkları; inşaat ve moloz atıkları girmektedir. Tehlikeli atıklar grubuna ise tehlike potansiyeli taşıyan her türlü kimyasal, biyolojik, toksit, yanıcı, patlayıcı ve radyoaktif katı atıklar girmektedir.

1.2.3. Tıbbi Atıklar

Her türlü sağlık kuruluşlarındaki tedavi ve operasyonlar sonucu ortaya çıkan patolojik atıklar, kesici-delici katı atıklar ve enfekte atıklar bu gruba giren atıklardır. Bu atıkların toplanması ve bertarafı 22 Temmuz 2005 tarih ve 25883 sayılı “Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği” nde belirtilen hususlar dikkate alınarak yapılır.

1.2.4. Özel Atıklar

Evsel Katı atık grubu dışında kalan ve özel yöntemlerle toplanması, taşınması, ve depolanması gereken atıklar bu sınıfa girmektedir. Başka bir deyişle atık yağlar, jips, yakma fırını külleri özel atık sınıfına girer. Özellikle atık yağlar bir takım geri dönüşüm işlemlerinden sonra sanayide tekrar kullanılmaktadır.

1.3. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

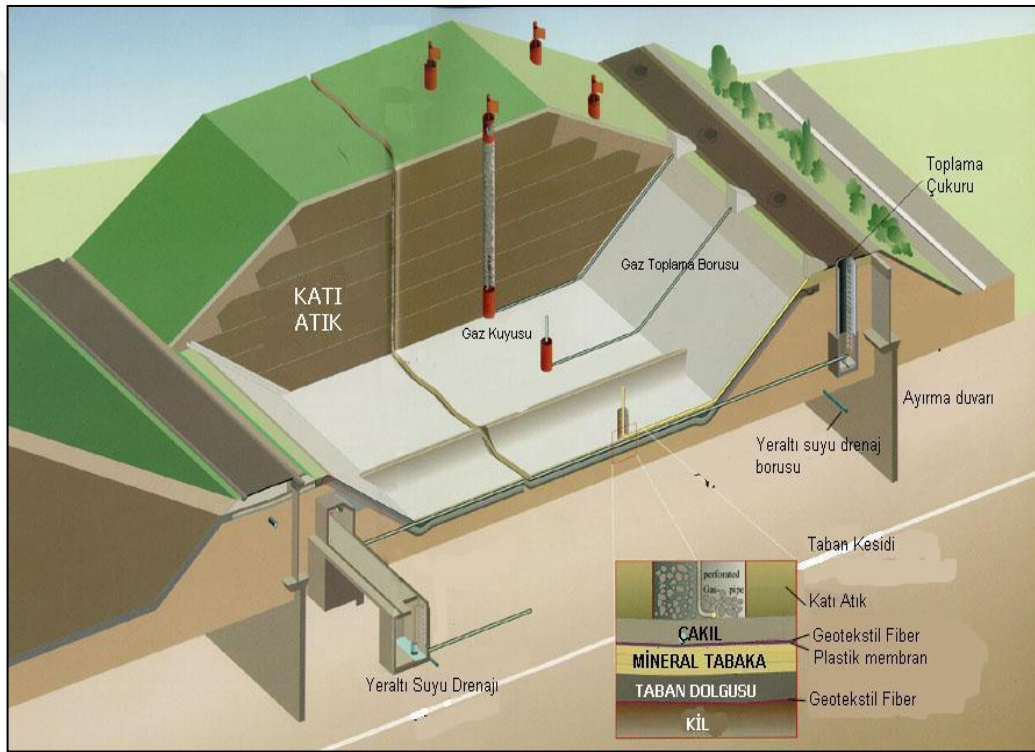
Katı atıkları bertaraf etmek için kullanılan yöntemler: “Düzensiz (vahşi) depolama, düzenli depolama, kompostlama, tekrar kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve yakma şeklinde sıralanabilir” (Palabıyık 2001).

1.3.1. Düzensiz (Vahşi) Depolama

Bu yöntem genellikle gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde kullanılan en ilkel yöntemdir. Bu yöntem ile katı atıklar açık araziye hiçbir önlem alınmaksızın gelişigüzel araçlar yardımıyla boşaltılır. Bu tür sahalar, depo alanında rüzgâr etkisi ile zehirli toz bulutlarının oluşması, oluşan gazların hava kirliliği oluşturması, çevre ve görüntü kirliliğine neden olması ve bu alanlarda barınan ve beslenen hayvanların bulaşıcı hastalıklara sebep olması gibi ciddi sağlık problemlerini ortaya çıkarmaktadır.

1.3.2. Düzenli Depolama

Katı atıkların bertaraf edilmek amacıyla depolandığı, bu bağlamda çevreye minimum zarar verecek şekilde serilip sıkıştırılma yapılarak son örtü tabakasının serildiği, depolamadan kaynaklanan sızıntı sularının yeraltı veya yüzeysel sulara karışmasının önlendiği, çıkan gazın toplanıp çeşitli yöntemler ile bertaraf edildiği depolama yöntemidir. Düzenli depolama alanları projelendirilip inşa edilir, bir plan ve program çerçevesinde işletilir ve işletme süresi tamamlandığında, yapılacak peyzaj çalışması sonucunda park, bahçe, dinlenme alanı gibi farklı kullanım amaçlarına hizmet edecek şekilde üst örtü tabakası ile kaplanarak kapatılır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Düzenli Katı Atık Depolama Sahası Kesiti (Çubukçu E.,2008)

1.3.3. Kompostlama

Organik atıkların hava ile çürümeye maruz bırakılarak, içeriğinde bitki besinlerini ihtiva eden, organik, sağlıklı, humus görünümündeki son haline kompost, bu işlemin kontrollü yapılmasına da kompostlama adı verilir.

Bu yöntemin; “toprağa besleyici maddeler kazandırması, yararlı toprak organizmalarını artırması, depolama alanları dışındaki organik atıkların geri kazanılması, belirli bitkisel hastalıkları önlemesi, gübre ve pestisitlere olan ihtiyacı azaltması, toprak erozyonunu engellemesi, kirlilik problemine çözüm getirmesi ve doğal kaynakları koruması gibi birçok yararı vardır” (Uluatam ve ark. 2008).

1.3.4. Tekrar Kullanım

Katı atıkların toplama ve temizleme dışında herhangi bir kimyasal veya biyolojik işleme tabi tutulmadan aynı şekli ile ekonomik ömrünü tamamlayıncaya kadar defalarca kullanılmasıdır. Katı atık içindeki; kağıt, plastik, cam, değerli metal vb. maddeler tekrar kullanılarak ekonomiye ciddi katma değer katabileceği gibi çevreye de verilecek zararları en aza indirilebilir.

1.3.5. Geri Dönüşüm

Geri Dönüşüm; Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015)’nde “Atıkların bir üretim prosedürüne tabi tutularak, orijinal amaçlı ya da enerji geri kazanımı hariç olmak üzere, organik geri dönüşüm dahil diğer amaçlar için yeniden işlenmesi” şeklinde tanımlanmaktadır.

1.3.6. Geri Kazanım

Geri Kazanım; Atık Yönetimi Yönetmeliği (2015)’nde, “Tekrar kullanım ve geri dönüşüm kavramlarını da kapsayan, atıkların özelliklerinden yararlanılarak içindeki bileşenleri fiziksel, kimyasal ya da biyo-kimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye çevrilmesi” şeklinde tanımlanmaktadır.

1.3.7. Kontrollü Yakma

Katı atıkları çevresel ve sağlık açısından zararsız hale getirmek, kütlelerini veya hacimlerini azaltmak ve yapılan değerlendirme sonucu ekonomik olarak avantajlı olduğu tespit edilen katı atık depolama sahalarında enerji elde etmek amacı ile uygulanan yöntemdir. Bu yöntemin avantajlı olması için atık birleşimindeki maddelerin yanma bakımından zengin olması gerekmektedir. Ayrıca yakma işlemi esnasında oluşabilecek zehirli gazlar ve yakma prosedürü esnasında oluşabilecek tehlikeler ile ilgili de gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Katı Atıkların Fiziksel Özellikleri

Evsel nitelikli katı atıkların fiziksel özellikleri; su muhtevası, porozite, birim hacim ağırlık ve permeabilite şeklinde sıralanabilir.

2.1.1. Su Muhtevası

Katı atıktaki su muhtevası, atığın içindeki su muhtevasının ilk haldeki kuru ağırlığına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Yapılan deney ve araştırmalarda, katı atıktaki su muhtevasının, depo alanlarındaki ayrışmayı etkileyen en önemli faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Katı atık sahalarındaki su muhtevası; atık bileşimi, yörenin sıcaklık durumu, atık türü ve özellikleri, atıktaki birincil sıkıştırma, depo alanının işletme yöntemi, sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sisteminin etkinliği değerlerine bağlı olarak değişmektedir.

Tan (2001) tarafından yapılan çalışmada katı atıkların su muhtevasının %5 - %20 aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

Tchobanoglous vd. (1977) ise bu oranın; hava koşulları, atık bileşim oranları ve mevsimsel koşullara bağlı olarak %15 - %40 aralığında değiştiğini hesaplamıştır.

2.1.2. Porozite

Porozite, katı atık içindeki boşluk hacminin toplam hacme oranıdır. Zamanla katı atıkta meydana gelen basınç ve oturmalarla porozite değeri düşer, bu da birim hacim değerinin değişmesine neden olur.

Katı atıkların porozitesi; sıkışma derecesi ve atık bileşimine bağlı olarak 0.4-0.67 oranları arasında değişir (Sharma ve Lewis 1994).

2.1.3. Birim Hacim Ağırlık

Birim hacim ağırlığı; katı atık içeriği, ayrışma durumu, depo alanındaki tabaka kalınlığı, sıkıştırılma miktarı, günlük depolanan miktarın kalınlığı, numunenin alındığı derinlik etkenlerine bağlı olarak farklı değerler alır. Büyük miktarda katı atığın depolandığı alanlarda birim hacim ağırlığı yüksek değerler alır.

Birim hacim ağırlığı; mevcut düzensiz depolama alanlarının analizini, projelendirilecek olan tesislerin her türlü şev stabilite analizlerini, zeminin maruz kaldığı gerilmeleri, sızıntı suyu drenaj borularına gelen kuvvetleri ve depolama alanının kapasitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerdendir.

Oweis ve Khera (1990) tarafından yapılan çalışmalarda, katı atıkların birim hacim ağırlığının 2.80- 10.50 kN/m³ arasında değiştiği belirlenmiştir.

Sharma (1990), çeşitli kaynaklardan elde ettiği bilgiler, kendi yaptığı deney ve ölçümlere göre katı atıkların birim hacim ağırlığının 3.10- 13.20 kN/m³ değerleri arasında değiştiğini hesaplamıştır.

Elde edilmiş kesin bir veri olmamakla birlikte katı atık sahalarındaki mühendislik analizlerinde, birim hacim ağırlıklarının 9.40-11.00 kN/m³ değerleri arasında alınması önerilmektedir (Sharma ve Lewis 1994).

Kavazanjian vd. (1995) tarafından yapılan araştırmalarda birim hacim ağırlığını yüzeye yakın yerde 6.00 kN/ m³, 45 m derinlikte 13.00 kN/ m³ olarak hesaplamıştır.

Kavazanjian vd. (1999) yaptıkları deneysel çalışmada ele alınan San Francisco Tri-Cities Katı Atık Depolama Sahasında yüzeye yakın yerde 10.00 kN/m³, 50 m derinlikte ise 15.00 kN/ m³ hesaplanmışlardır.

Tan (2001) yaptığı çalışmada birim hacim ağırlığını 6.00 -14.00 kN/m³ arasında değiştiğini belirlemiştir.

2.1.4. Permeabilite

Permeabilite, katı atık sahalarındaki sıvı akışını etkileyen önemli bir parametredir. Katı atığın dane çapı dağılımına, yüzey alanına, doygunluk derecesine ve porozitesine göre farklı değerler alır. Permeabilitenin belirlenmesinde laboratuvar deneylerinden çok, arazi deneyleri tercih edilerek daha sağlıklı sonuçlar elde edilir.

Fang (1983) laboratuvarında yaptığı deneyler sonucunda; birim hacim ağırlığı 11.20 kN/m^3 olan katı atık numunelerinde permeabilitenin $7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ olduğunu tespit etmiştir.

Fungarali ve Steiner (1979) yaptıkları çalışmada permeabilite değerini 10^{-4} - 10^{-6} m/s olarak hesaplamışlardır.

Yapılan çalışmalar özetlenecek olursa; birim hacim ağırlığı 7.00 - 8.00 kN/m^3 olan numunelerde ortalama k permeabilite değerinin $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ olarak alınması önerilmektedir. Genel olarak evsel katı atıkların permeabilitesinin $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ alınmasının, yapılacak hesaplamalarda uygun sonuçlar vereceği düşünülmektedir (Akyol 2008).

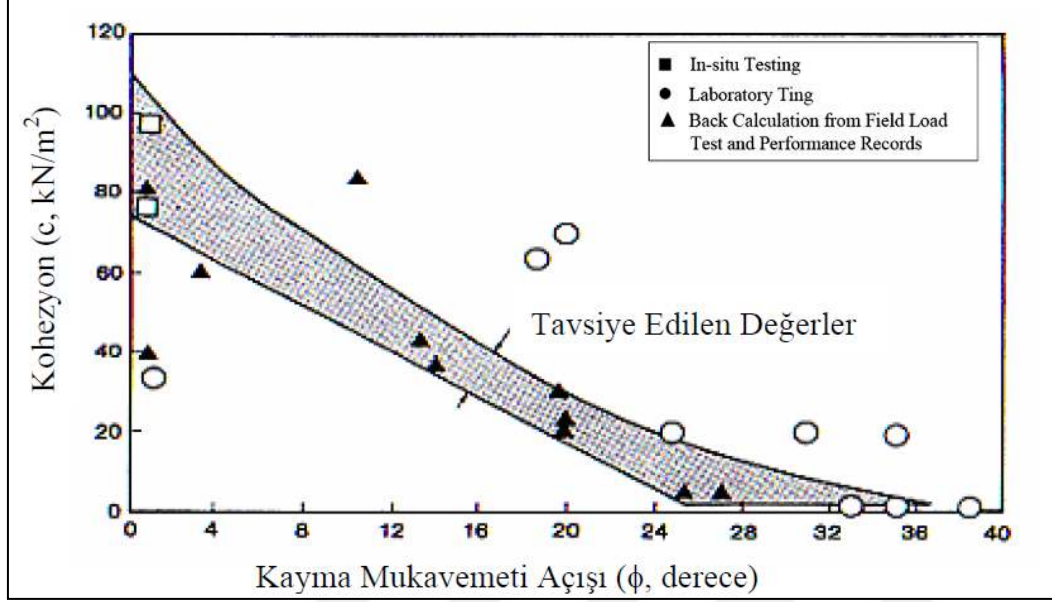
2.2. Katı Atıkların Mukavemet Özellikleri

Günümüzde katı atık sahalarında stabilitenin sağlanması için önemli çalışmalar yapılmasına rağmen stabilite kararsızlıkları görülmeye devam etmektedir. Şevlerin stabilitesinin sağlanması için katı atık sahalarında, doğru ve güvenilir mukavemet parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler, arazi veya laboratuvar deneylerinde belirlenmektedir. Katı atıkların, Mohr - Coulomb göçme dairesine göre mukavemet parametrelerinin hesaplanmasında aşağıdaki (2.1) denklemi kullanılır.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.1)$$

τ : kayma mukavemeti, c : kohezyon , ϕ : içsel sürtünme açısı ve σ_n : Normal gerilme parametrelerini belirtir.

Singh ve Murphy (1990) çeşitli araştırmalar sonucu elde ettikleri katı atık sahalarında güvenilir kayma mukavemeti parametreleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Katı Atıklar İçin Singh ve Murphy’nin Önerdiği Sürtünme Açısı-Kohezyon Diyagramı

Katı atıkların Mohr - Coulomb kırılma dairesine göre mukavemet parametreleri; laboratuvar deneyleri ve arazi deneylerinden elde edilecek sonuçlar ışığında, katı atık şevindeki statik ve deprem yüklerine göre geri hesap yöntemi ile bulunur.

Yapılan literatür araştırmasında elde edilen c ve ϕ parametreleri kaynakları ile birlikte Çizelge 2.1’de verilmiştir. Buna göre katı atıklarda kohezyon (c) değeri 0-70 kN/m^2 ; içsel sürtünme açısı (ϕ) değeri ise 0-50° arasında değiştiği gözlenmektedir.

Çizelge 2.1. Katı Atıkların Mukavemet Parametreleri (Sarsby 2000)

Kaynaklar	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Duplanic (1990)	0	3
Siegel (1990)	0-70	19-33
EMCON (1987)	18-35	14-20
Fang (1977)	60	18
Jessberger (1994)	0-30	17-42
Landva ve Clark (1990)	0-23	24-41
Saarela (1987)	0-70	19-33
Sanchez - Alciturri (1995)	0	28-35
Cowland (1993)	10	25
Eid (2000)	25	35
Gabr ve Valero (1995)	17	34
Grisolia (1995)	2-10	15-40
Houston (1995)	5	33-35
Jessberger (1995)	0	31-49
Kavazanjian (1995)	0-24	0-30
Landva ve Clark (1990)	0-23	24-41
Landva ve Clark (1986)	10-23	24-42
Pelkey (2001)	0	26-29
Siegel (1990)	0	39-53
Vilar ve Carvalho (2002)	39.2	29
Withiam (1995)	10	30

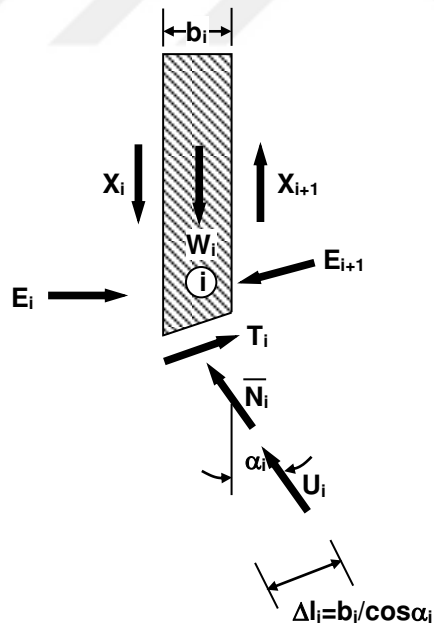
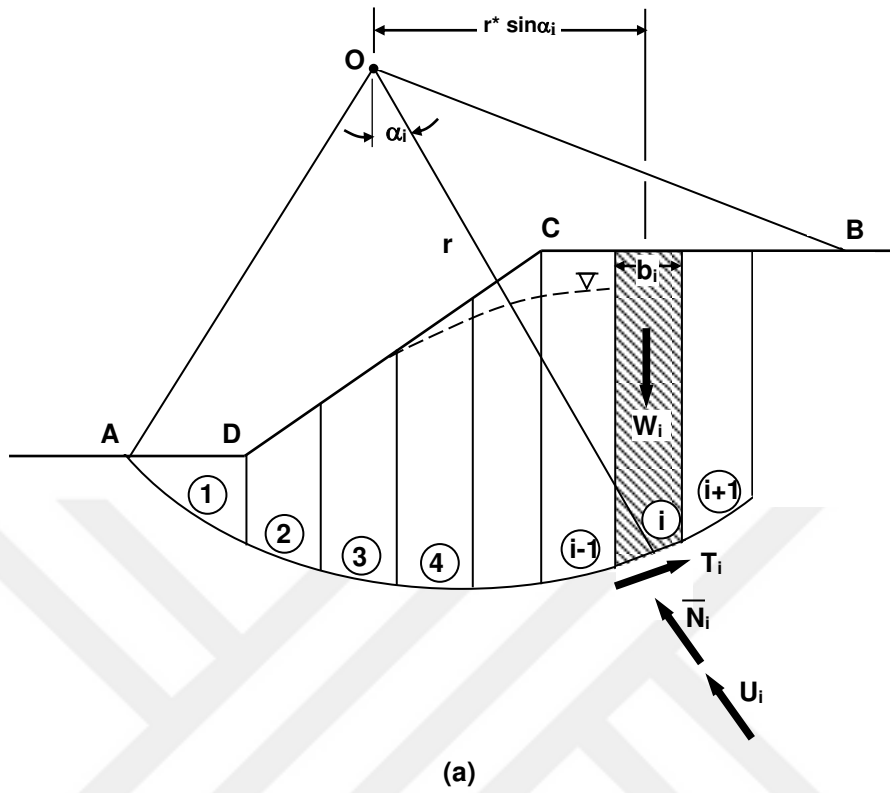
2.3. Katı Atık Sahalarında Şev Stabilitesi

Katı atık depolama sahalarındaki şev stabilite analizleri, gerek depolama esnasında oluşan şevlerin stabiliteleri gerekse de eski veya kullanılmayan katı atık depolama sahalarının yeniden kullanımı durumunda, tasarımı açısından önemlidir. Katı atık sahalarındaki şevlerde görülen stabilite problemleri, normal şevlerde gözlenen problemlerle genel olarak benzerlik gösterir. Katı atık içeriğindeki homojen olmayan maddeler ve üniform olmayan dağılım nedeniyle, şevlerde yüzeysel kopmalardan geniş heyelanlara kadar uzanan bir hareket gözlenebilir.

2.3.1. Şevlerin Stabilitesi

Şev, kot farkı bulunan iki yüzey arasındaki meyilli kısım şeklinde tanımlanabilir. Şevin durağanlığının sağlanması, Geoteknik biliminde önemli bir yer edinmektedir. Şev analizleri; deprem, sel, heyelan gibi doğal afetlerde şevin göçme durumunda ciddi can ve mal kaybına neden olduğu için stabilitenin sağlanması önemli mühendislik problemi haline gelmiştir.

Doğal veya sonradan oluşturulan bütün şevlerin çeşitli yükler altında (zati ağırlıkları, yatay ve dikey yükler) kaymaya ve göçmeye karşı stabiliteleri, İsveç Dilim, Bishop, Janbu, Morgenstern ve Price, Spencer vb. limit denge yöntemleriyle analiz edilmektedir. Bu yöntemler arasında farklı kabuller olmasına karşın, ortak özellik bilinen veya kabul edilen bir kritik kayma yüzeyinde, direnen ve kayan kuvvetler arasındaki dengenin sağlanmasıdır (Şekil 2.2). Dilim yöntemlerinin esas dayanağı kayma yüzeylerinin yeterli sayıda düşey dilimlere ayrılabilmesidir. Şev stabilitesi analizlerinde belirli bir güvenlik sayısı belirlenerek gerekli analizler yapılmaktadır. Bu analizler sonucu hesaplanan güvenlik sayısı, şevin göçmeye karşı stabil halde olup olmadığını ya da stabilitenin ne derece olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.2. Şevin Dilim Yöntemi ile Analiz Edilmesi (a) Dilimlere Ayrılmış Şev
(b) Dilimine Etkiyen Yatay ve Düşey Kuvvetler

Şekil 2.2'den

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (2.1)$$

$$S_i = c_d \Delta l_i + \bar{N}_i \tan \phi_d = c_d \Delta l_i + (W_i \cos \alpha_i - U_i) \tan \phi_d \quad (2.2)$$

olarak hesaplanır. Burada ϕ_d ve c_d değerleri, şevin drenajlı durumdaki kayma mukavemet parametreleridir.

Güvenlik sayısı ise aşağıda belirtilen eşitlik ile hesaplanır.

$$GS = \frac{\sum \text{Kaymaya karşı koyan kuvvetler}}{\sum \text{Kaymaya zorlayan kuvvetler}} = \frac{r \sum_{i=1}^{i=n} S_i}{r \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \quad (2.3)$$

Şekil 2.a' dan ve Denklem 2.2. efektif gerilme (şev içindeki zeminin taneler arasındaki kuvveller) $\bar{c}$ ve $\bar{\phi}$ parametreleri cinsinden yazılırsa,

$$GS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [\bar{c} \Delta l_i + (W_i \cos \alpha_i - U_i) \tan \bar{\phi}]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \quad (2.4)$$

ifadesi elde edilir.

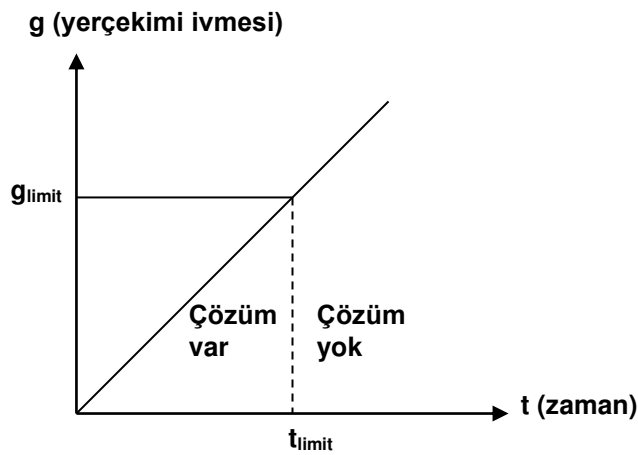
Burada;

- W_i : Dilimin toplam ağırlığı,
- E_i : Dilime etkiyen birincil efektif kuvvet,
- J_i : Dilimin sızma kuvveti,
- N_j : Dilimin kayma yüzeyine etkiyen normal efektif kuvvet,
- T_j : Kayma yüzeyi boyunca etkiyen dinamik kayma mukavemeti,
- X_j : Dilimler arası oluşan kayma kuvveti,
- U_j : Boşluk suyu basıncı tarafından oluşan kuvvet,
- r : Dilim taban merkezinin o noktasına olan uzaklığı,
- α : Dilim taban merkezinin yatayla yaptığı açı,
- b_i : Dilim genişliği,
- Δl_i : Dilim kayma yüzeyi uzunluğudur

Günümüz klasik yöntem ile yapılan şev stabilite analizleri, şev içerisindeki gerilmelerin yaklaşık olarak belirlenebilmesi, farklı yükleme koşulları ve geometrilerde hesabı zorlaştırmaktadır. Tüm mühendislik dallarında olduğu gibi Geoteknik dalında da bilgisayar kullanımının artmasıyla, şev stabilite analizlerinde sonlu elemanlar yönteminin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, şevin kayma yüzeyinin yeri ve şekline, dilimler arası kuvvetlerin büyüklüğü ve yönüne vb. kabullere gerek duyulmaması nedeniyle, sonlu elemanlar yöntemini, klasik limit denge yöntemlerine nazaran daha avantajlı kılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile her türlü şevli yapılar, farklı zemin koşullarında ve yük kombinasyonlarındaki şevler kolaylıkla analiz edilebilmektedir. Şevler iki veya üç boyutlu tasarlanıp uygun zemin modeli de kullanılarak, gerçeğe yakın gerilme ve deplasman değerleri elde edilebilmektedir. Ayrıca, zemin içerisinde farklı malzemeler ile güçlendirilmesi durumlarında da gerekli analizler yapılabilmektedir.

“Sonlu elemanlar yöntemi ile şev stabilitesi analizlerinde genel olarak iki yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşım ağırlık artırma yönteminde (Şekil 2.3)’de, yerçekimi ivmesi, g şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar artırılır. İkinci yaklaşım mukavemet azaltma yönteminde ise, kayma mukavemeti parametreleri, c ve ϕ şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar azaltılır” (Şekil 2.4) (Keskin ve Laman 2007).

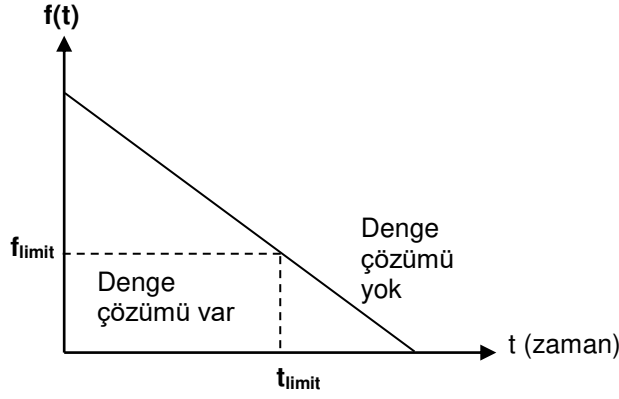


Şekil 2.3. Ağırlık Arttırma Yöntemi ile Denge Çözümü Elde Edilmesi

$$g(t) = g_{base} f(t)$$

$$GS = \frac{g_{limit}}{g_{true}} \quad (2.5)$$

Burada g_{true} gerçek yer çekim ivmesini belirtmektedir.



Şekil 2.4. Mukavemet Azaltma Yöntemi

$$Y(t) = Y_{base} f(t)$$

$$F_s = \frac{y_{true}}{Y(t_{limit})} = \frac{1}{f(t_{limit})} \quad (2.6)$$

Burada Y_{base} reel mukavemet parametrelerini belirtmektedir.

Mukavemet azaltma yönteminde,

$$c_f = \frac{c}{MAF} \quad (2.7)$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{MAF} \right) \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanırlar.

Denklemdaki MAF (mukavemet azaltma faktörü) tanımının kısaltmasıdır. Doğru MAF değerinin hesaplanabilmesi için, şevde kaymaya sebep olacak güvenlik sayısının bulunması gerekmektedir.

Güvenlik sayısı ise,

$$GS = \frac{c}{c_{azaltılmış}} = \frac{\phi}{\phi_f} \quad (2.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Yapılan sayısal çalışmalar, sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge yöntemi sonuçlarının birbirine oldukça yakın değerler verdiği ve sonlu elemanlar yönteminin şev stabilitesi analizlerinde rahatlıkla ve güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, deplasmanların ve gerilme konturlarının da hesaplanıyor olması bu tür şev stabilite problemlerinin daha rahat anlaşılabilmesine katkı sağlamaktadır (Keskin ve Laman 2007).

2.3.2. Önceki Çalışmalar

Bu bölümde katı atık sahalarında, şev stabilitesi ile ilgili yapılan önceki çalışmalar verilmiştir.

Gharabaghi vd. tarafından (2008), Brezilya’da bulunan mevcut iki katı atık depolama sahasında şev stabilitesi analizleri yapılmıştır. Limit denge yönteminin kullanıldığı bu analizlerde, geometrik saha ölçümleri yapılmış, katı atık sahasına ait birim hacim ağırlığı ve boşluk suyu basıncı değerleri sahadan alınan numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Kayma mukavemet parametreleri ise önceki literatür çalışmalarından alınmıştır. Katı atık sahalarından daha düzenli olan Recife’ deki Muribeca katı atık sahasında, yapılan analizlerde güvenlik sayıları 1.6-2.4 aralığında hesaplanmıştır. Diğer katı atık sahası olan Maceio’daki Cruz das Almas sahasında ise birkaç göçme ve kayma tespit edilmiş olup yapılan analizlerde güvenlik sayılarının 0.9-1.4 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, uygun kayma mukavemet parametrelerinin seçimi ve sahadaki katı atık bileşimi, dane çapı, bozulma derecesi ve nem içeriğinin, şev stabilite analizlerinde kilit rol oynadığı belirtilmiştir. Ayrıca şev stabilitesi analizleriyle, kritik eğimlerin, şev yüksekliklerinin ve sızıntı suyunun belirlenerek sahanın daha güvenilir bir şekilde işletilebileceği sonucuna varılmıştır.

Çapar vd. (2005) Zonguldak İlinde bulunan vahşi katı atık depolama sahasının stabilitesini araştırmak amacıyla nümerik olarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Öncelikle katı atık sahasının üç boyutlu topoğrafik haritası çıkarılarak, stabilite analizleri için iki boyutlu kritik en kesitler belirlenmiştir. Limit denge yöntemiyle çözüm yapan bilgisayar programı kullanılarak analizler yapılmıştır.

Analizlerde mukavemet parametreleri olarak önceki çalışmalardan elde edilen değerler kullanılmıştır. Analizler sonucunda güvenlik sayılarının 1.182-1.930 arasında olduğu görülmüştür.

Omari ve Boddula (2012) Obbola, Umea, İsveç’ de bulunan endüstriyel bir katı atık sahasında sonlu elemanlar ve limit denge yöntemlerini kullanarak sahanın stabilitesini araştırmışlardır. Saha 1970-2006 yılları arasında kullanılmıştır. Analizlerde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen parametreler kullanılmıştır. Katı atık sahası, (1 düşey/ 4 yatay) şev ile inşaa edilmiştir. Limit denge yöntemi ile yapılan analizlerde (1 düşey/ 4 yatay) şev açısı için güvenlik sayısı 1.62 olarak, sonlu eleman yönteminde ise güvenlik sayısı 1.14 olarak hesaplanmıştır. Limit denge yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları, sonlu elemanlar yöntemine göre % 15-30 daha yüksek olduğu tespit edilen çalışmada, sonlu elemanlar yönteminin daha doğru güvenlik sayıları verdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca her iki yöntemde farklı şev açıları ile analiz yapılarak, şev açısının güvenlik sayısındaki etkisi araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonucu, düşük şev açısından beklendiği gibi daha yüksek güvenlik sayıları elde edildiği saptanmıştır.

2.4. Donatılı Şevler

Bölüm 2.3’de de bahsedildiği gibi tüm şevlerin kendi zati ağırlıklarından dolayı ve dışarıdan gelen ilave yüklerin etkisi altında göçmeye karşı stabilite analizleri, İsveç Dilim (Fellenius, 1927), Bishop (1955), Janbu (1973), Morgenstern ve Price (1965), Spencer (1967) vb. limit denge yöntemleriyle yapılmaktadır Bu yöntemler arasında farklı kabuller olmasına karşın, ortak özellik bilinen veya kabul edilen bir kritik kayma yüzeyinde, direnen ve kayan kuvvetler arasındaki dengenin sağlanmasıdır. Şevli dolgularda stabiliteyi arttırmak amacıyla donatılandırılan şevlerde de, donatı kuvvetlerinin bilinen kuvvetler olarak limit denge analizinde yer almasıyla çözüm gerçekleştirilmektedir.

Zeminlerin çekme dayanımı çok düşük olduğu için, şev içerisine yerleştirilecek metal donatı, geotekstil veya geogrid gibi malzemeler ile şevler daha stabil hale getirilebilmektedir. Donatılı şev olarak tanımlanan bu yapılarda, yüksek mukavemetli elemanlar kullanılmaktadır. Yapılan ilk uygulamalarda, metal şeritler veya donatılar kullanılırken, günümüzde bu tür malzemelerin yerini geosentetik türü malzemeler almıştır.

2.4.1. Geosentetikler

ASTM, geosentetiği “bir inşaat projesi, yapı veya sistemin parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili bir malzeme ile beraber kullanılan, polimerik malzemelerden üretilen düzlemsel ürünlerdir” olarak tanımlamaktadır. Polimer esaslı bu malzemeler, istenilen mühendislik özelliklerine sahip, çevre koşullarına dayanıklı ve düşük maliyetli olarak üretilmektedir. Geosentetikler, sentetik teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak inşaat sektöründe geniş kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle 1980’li yıllardan sonra klasik inşaat malzemelerinin yerini almaya başlamıştır. Yaygın kullanım alanları ise baraj, karayolu, demiryolu, dolgu, şev, istinad yapıları vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Başlıca geosentetik türleri; Geogridler, Geotekstiller, Geomembranlar, Geonetler ve Geokompozitler olup inşaat mühendisliği uygulamalarındaki işlevleri Şekil 2.5’te sunulmuştur.

Geosentetikler	Ayrırma	Filtrasyon	Drenaj	Güçlendirme	Koruma	Yalıtım
Geotekstil	●	●	○	○	●	○
Geomembran	○			○		●
Geogrid				●		
Geonet			●		○	
Geokompozit			●		○	○

● Ana İşlev ○ İkincil İşlev

Şekil 2.5. Geosentetiklerin Çeşitlerine Göre Ana ve Yan İşlevleri

2.4.2. Geogridler

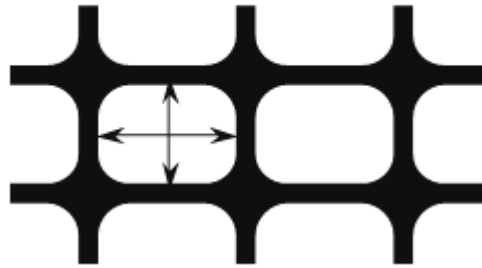
Geogrid; zemin ile kenetlenmeyi sağlayacak yeterli boşluğa ve farklı ağ yapısına sahip, yüksek mukavemetli, polimer yapılı geosentetik malzemelerdir. Kimyasal yapısında; polietilen, poliester veya polipropilen cinsi polimerler bulunmaktadır. Geogridler, sahip oldukları yüksek çekme dayanımları sayesinde zeminlerin güçlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Geogridler, yüksek çekme dayanımı, elastisite modülü ve sıyrılma direnci ile diğer geosentetik malzemelere göre üstün özelliklere sahiptir. Geogrid imalatında, polimerler soğuk çekme işlemine tabi tutulmak suretiyle daha rijit hale getirilirler.

Geogridler, uygulanan soğuk çekme işlemine göre iki farklı tipte üretilirler. Bunlar tek eksenli ve çift eksenli geogridlerdir (Şekil 2.5).



(a) Tek Eksenli Geogrid



(b) Çift Eksenli Geogrid

Şekil 2.6. Geogridler (a) Tek Eksenli Geogrid (b) Çift Eksenli Geogrid

2.4.2.1. Geogrid-Zemin Etkileşimi

Donatı ile güçlendirilmiş zemin yapıları, donatı ile zemin arasında oluşan kenetlenme etkisi nedeniyle kompozit bir yapı haline gelir. Böylece, zemin kayma mukavemeti ve kayma öncesi deformasyon dayanımı artar. Bu etkileşim sonucu oluşan çekme ve kayma dirençleri aşağıda özetlenmiştir:

a) Çekme direnci: Şev içerisine yerleştirilmiş geogrid donatı tabakası üzerinde meydana gelen çekme gerilmeleri sonucu oluşan dirençtir. Bu tür gerilmelerde oluşan iki unsur:

- Zemin daneleri ile donatı arasında donatı boyunca oluşan sürtünme dirençleri
- Geogrid donatı üstünde bulunan enine nervürler tarafından zemin ile donatı arasında oluşan kayma direnci şeklinde tanımlanabilir.

b) Kayma direnci: Bu direncin de iki bileşeni vardır :

- Geogrid boşlukların arasına yerleşen zemin taneleri ile donatı arasındaki etkileşim sonucu oluşan kayma direnci
- Yukarda belirtilen geogrid donatı arasındaki boşluklara giren zemin danelerinin kendi içinde oluşan kayma direnci

Geogrid Donatı ile zemin arasında oluşan bu dirençlerin ölçülmesi için laboratuvar ortamında çekme deneyi (pull-out test) ve kesme kutusu deneyi (direct shear test) yapılır. “Daneli bir yapıya ve daha yüksek içsel sürtünme açısına sahip kumlu zeminlerde geogrid-zemin etkileşimi killere göre daha efektif bir şekilde gerçekleşir” (Yıldız 2002).

2.4.2.2. Geogridlerin Kullanım Alanları

Geogridlerin güçlendirme özelliğinden dolayı inşaat mühendisliğindeki kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Yol uygulamalarında
- Havaalanlarında
- Seddelerde
- İstinat yapılarında
- Şevlerde
- Dolgularda
- Yapı temellerinin taşıma gücünün arttırılmasında kullanılmaktadır.



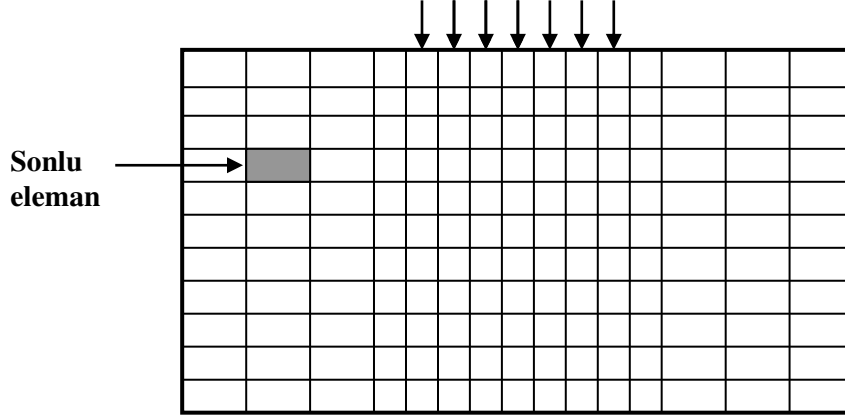
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Geoteknik biliminde, günümüz karmaşık problemlerin çözümünde farklı teorik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde zemin homojen bir yapı olarak kabul edilmekte ve buna göre çözümler üretilmektedir. Bu çözümler, sahadaki uygulamalarda yaklaşık sonuçlar vermesine rağmen zeminlerin karmaşık özelliklerinden dolayı kesin sonuçlar vermemektedir.

Teknolojideki hızlı gelişme ve ilerlemeler ile birlikte birçok alanda olduğu gibi, geoteknik problemlerinin çözümü paket bilgisayar programları ile mümkün olabilmektedir. Nitekim birçok farklı yöntem ile geoteknik problemleri nümerik olarak hızlı bir biçimde çözülebilmektedir. Bu yöntemlerin ortak özelliği, sürekli yapıda bulunan fiziksel sistemlerin analizi, diferansiyel denklemlerle ifade edilerek sayısal yöntemlerle analiz edilmesi şeklinde açıklanabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, verim, doğru analiz sonuçları ve algoritması bakımından belirtilen yöntemlere göre daha üstündür.

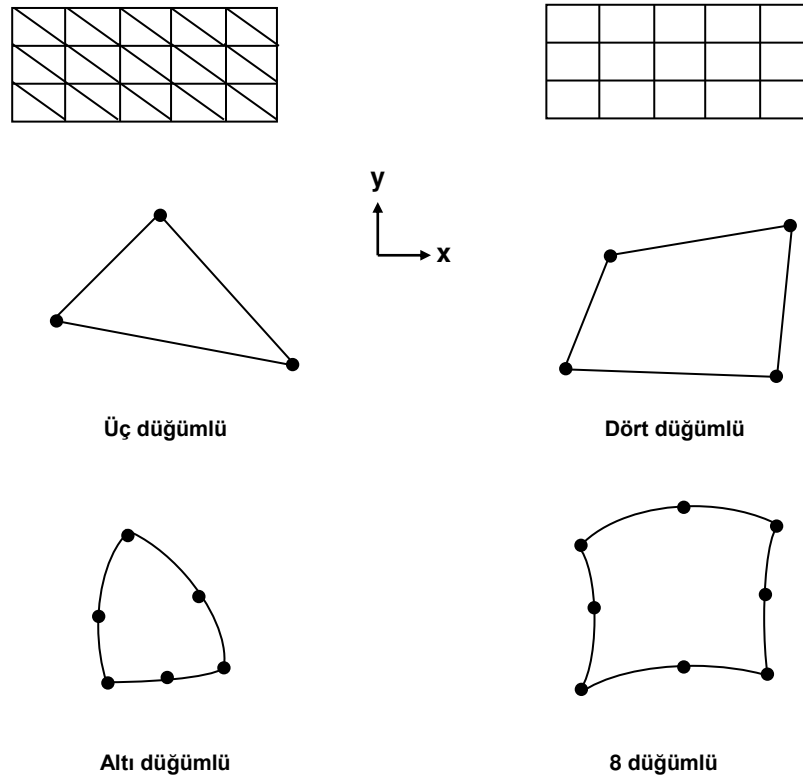
Sonlu elemanlar yöntemi, Zeinkiewicz (1977) tarafından, “matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli sistemlerin genel çözüm yöntemi olarak” tarif edilmiştir. Bu yöntem ile sürekli sistemler, paket programlarla kolayca modellenabilmektedir. Yöntemin temel mantığı, sürekli sistemler kendi içinde sonlu sayıda elemanlara bölünerek ve bu elemanlara tanımlanan düğüm noktaları yardımıyla ayırık bir sistem olarak modellenmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 3.1). Başka bir deyişle, sistem sonlu sayıdaki elemanlara bölünerek, denklemler bir eleman için yazılmakta ve integre edilerek sistem denklemleri elde edilmektedir. Sonuçta sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenmektedir.



Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanma Şekli

Sonlu elemanlar yönteminde, ilk aşamada sistem, eleman adı verilen alt bölümlere ayrılmakta ve bu elemanlarla oluşturulan eşdeğer sonlu elemanlar ağı şekline getirilmektedir. Daha sonra elemanlar, problemin türüne göre, iki veya üç boyutlu olarak tanımlanabilmektedir. Elemanların şekli, sistemin geometrisine göre eğrisel, dikdörtgen veya kare olarak seçilebilmektedir. İki boyutlu problemlerdeki sonlu elemanlar genellikle üçgen veya dörtgen şeklinde seçilmektedir (Şekil 3.2). Bu elemanlar “node” adı verilen düğüm noktaları tarafından birbirlerine bağlanmaktadır.

Gerçekte sürekli sistemdeki tüm elemanlar birbirleriyle sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen, sonlu elemanlar yönteminde sadece düğüm noktalarından bağlandığı varsayılmaktadır. Böylece, çözüm daha basite indirgenmekte, deplasmanların sadece bu noktalar tarafından aktarıldığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla, bilgisayar programları sayesinde büyük karmaşık problemler, kolaylıkla çözülebilmektedir.



Şekil 3.2. Sonlu Elemanlar ve Düğüm Noktaları

Sonraki aşamada, bilinmeyenlerin sistemdeki konumlarını veren bir şekil fonksiyonu oluşturulmaktadır. Elemanların düğüm noktaları, alt bölgedeki deplasman, gerilme gibi hesaplanacak değerlerin dağılım şeklini tanımlamak için bir fonksiyon sisteminin yazılmasını sağlamaktadır. Geoteknik biliminde bu tür problemlerin büyük bir kısmı, deplasman yöntemiyle formüle edilerek çözümler üretilmektedir.

3.1.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Geoteknik Mühendisliği'nde Kullanımı

Sonlu elemanlar yöntemi, tüm lineer-elastik sistemlerde kullanılabilir. Yöntem ile malzemenin davranışı, toplam gerilme ve deplasman arasındaki ilişkiler formüle edilmektedir. Ayrıca problemlerinde toplam gerilme vektörü, efektif gerilmeler ve boşluk suyu basınçlarının toplam şeklinde ifade edilmekte, çözümler genellikle efektif gerilmeler kullanılarak elde edilmektedir. Geoteknik mühendisliğinde ele alınan problemde yapı ile zemin etkileşim içerisinde olduğu için analizlerde, bu iki ortam arasında ara yüzey (interface) oluşturulması gerekmektedir.

Sonuç olarak, “sonlu elemanlar yönteminin geoteknik mühendisliğinde gerçekçi bir biçimde uygulanabilmesi için bazı değişiklikler yapmak zorunlu olmaktadır” (Poots ve Zdravković 1999).

Pratikte, sonlu elemanlar analizi, sahadaki durumunun modellenmesi amacıyla adım adım (aşamalı yükleme, aşamalı kazı) yapılması gerekmektedir. Analizin adımlar halinde yapılmasının avantajları :

- a) Analizlerde dolgu yapılması veya zemini kazılması durumunda, modelin geometrisi her bir aşamada değişecektir. Bu tür değişiklikler sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek veya kaldırarak sürekli sistem revize edilebilmektedir.
- b) Analizlerde, her yükleme aşamasında zeminin özellikleri değişeceğinden, sistemdeki gerilmelerde değişecektir.

“Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenmektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğundan analizlerde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin non-lineer gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ile yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir” (Kılıç 2000).

3.1.2. Donatılı Zemin Davranışının Modellenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi, donatılı zemin sistemlerinin analizi için yaygın ve efektif şekilde kullanılmaktadır. Bu tür zeminler, zemin ile donatı arasında meydana gelen etkileşimler iki farklı yaklaşım ile modellenebilmektedir. Bunlar kompozit ve ayrık yöntem olarak adlandırılır.

“Kompozit yöntemde, donatı ve onu çevreleyen zeminin homojen ve kompozit bir malzeme gibi davrandığı kabul edilir. Bu yöntemde, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi önemli bir sorun teşkil etmektedir. Donatılı zemin yapılarının analizinde bu yöntemin kullanılması durumunda, donatı, zemin ve donatı-zemin etkileşiminin ayrı olarak modellenmesine gerek olmadığı için önemli derecede işlem kolaylığı sağlar. Fakat donatı sıyrılması, donatı kopması veya donatılı zeminlerin göçme mekanizması gibi iç stabilite ile ilgili konularda bilgi sağlanamaz.

Ayrık yöntemde ise, donatı ile zeminin birbirinden ayrı iki malzeme gibi davrandığı kabul edilir. Yöntemde donatı, zemin ve donatı-zemin etkileşimi için üç farklı eleman tipi kullanılır. Analiz sonunda donatılarda oluşan çekme kuvvetleri gibi iç stabilite tahkikleri için gerekli bilgiler temin edilebilir. Fakat bu yöntemde, donatı ile zemin etkileşiminin ne şekilde modelleneceği önemli bir sorundur” (Yıldız 2002).

3.2. Plaxis Programı

PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) programı, her türlü geoteknik problemin çözümü için, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan bir bilgisayar programıdır. Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafında 1987 yılında geliştirilen söz konusu program, ilk olarak nehir dolgularının pratik bir şekilde ile analiz edilebilmesi için kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda program geliştirilerek diğer geoteknik problemlerin çözümünde de kullanılmaya başlanmıştır. Program, karmaşık geoteknik projelerinin tasarım aşamasında, gerekli görülen, zemin-yapı etkileşimi, gerilme – şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği, boşluk suyu basınçları, deprem analizleri kolayca yapılmakta ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

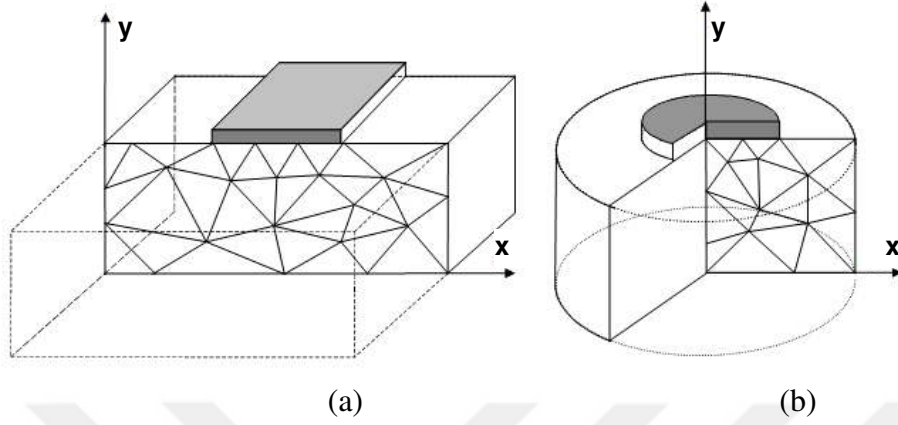
Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi analizleri PLAXIS 8.2 versiyonu ile yapılmıştır. Analizlerde, şevler 2 boyutlu olarak modellenmiştir. PLAXIS, karmaşık heterojen bir yapıya sahip olan zemin davranışlarının modellenmesi için gerekli donanım sahip olduğu için doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmektedir. Aşağıda bu özellikler özetlenmiştir.

3.2.1. Geometrik Modelin Oluşturulması

Geometrik modelin oluşturulmasında gerekli verilerin ve tanımlamaların yapılabilmesi için özel bir grafik ortamı (CAD) kullanılmaktadır. Zemin katmanları, yapılar, kazı aşamaları, yükler ve sınır koşulları vb. veriler bu sayede girilebilmektedir. Bu sayede model, gerçek durumuna göre oluşturulabilmektedir. Problem türüne göre düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetrik geometri koşulları kullanılabilmektedir.

Düzlem şekil değiştirme koşulu zemin modelinin yüzey boyutunun çok geniş alanları (z eksen) kapsadığı durumlarda kullanılmaktadır (Şekil 3.3.a).

Zeminin yüzeyi (z eksen) etrafında simetrik olması durumunda ise model iki boyutlu olarak çözülebilmektedir (Şekil 3.3.b.)

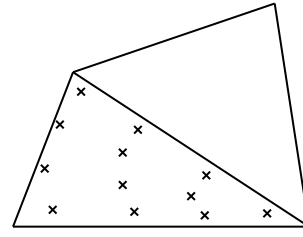
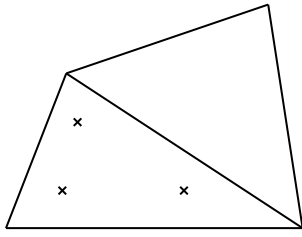


Şekil 3.3. (a) Düzlem Şekil Değiştirme Koşulu (b) Eksenel Simetri Koşulu (PLAXIS Manual 2002)

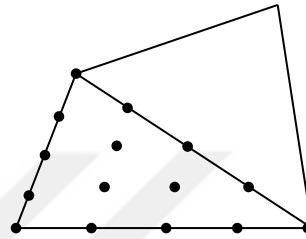
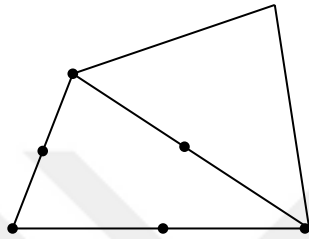
3.2.2. Elemanlar

3.2.2.1. Zemin Elemanları

Analizlerde, sonlu elemanlar ağı iki boyutlu üçgen elemanlara ayrılarak oluşturulur. Programda üçgen elemanlar, 6 ve 15 düğüm noktalı olmak üzere iki farklı seçenek bulunmaktadır (Şekil 3.4.). Düğüm nokta sayısı daha fazla olduğu için 15 düğüm noktalı elemanlar ile daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde, deplasmanların düğüm noktalarında, gerilmeler ise düğümler yerine gerilme noktasında (Gauss noktasında) olduğu kabulü yapılmaktadır.



Gerilme (Gauss) noktaları



Üçgen Elemanlar

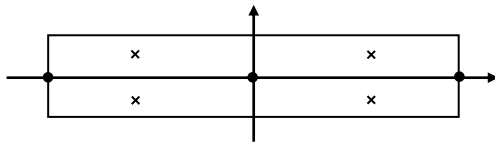
Altı Döğümlü

Onbeş Döğümlü

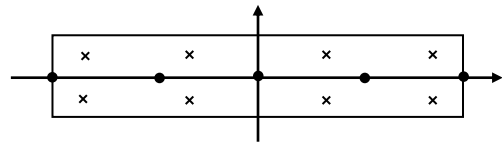
Şekil 3.4. Üçgen Elemanlarındaki Döğüm ve Gerilme Noktalarının Konumları

3.2.2.2. Kiriş Elemanlar

PLAXIS programında kiriş elemanları; duvar, plak ve temel gibi yapı elemanları olarak tanımlanmakta ve bu elemanlar Şekil 3.5.'de görüleceği üzere 3 ve 5 döğüm noktasına sahip iki farklı kiriş eleman olarak kullanılabilir. Analizlerde, 6 döğümlü zemin elemanında, 3 döğümlü kiriş eleman; 15 döğümlü zemin eleman kullanımında ise 5 döğümlü kiriş eleman seçilmektedir.



Üç Döğümlü

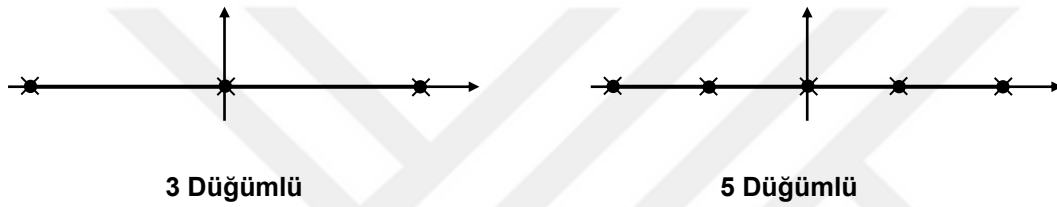


Beş Döğümlü

Şekil 3.5. Üç ve Beş Döğümlü Kiriş Elemanlar

3.2.2.3. Geogrid Elemanı

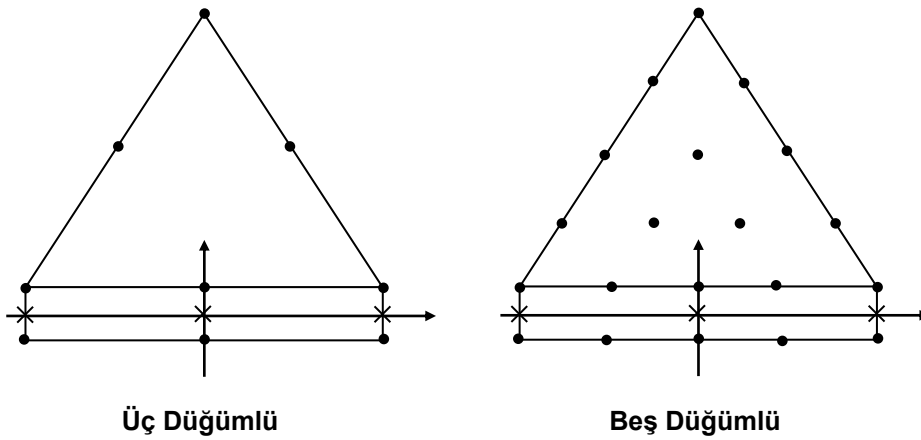
PLAXIS programında, geogrid malzeme ile güçlendirilen zeminlerin modellenmesi kolaylıkla yapılabilmektedir. Geogrid donatılar, yüksek aksel rijitlik değerlerine sahip olmasına karşın eğilme rijitliği oldukça düşük olan malzemelerdir. Dolayısıyla, hesaplamalarda bu malzemelerin basınç dayanımı yok sayılmaktadır. Geogrid malzemesi verisi olarak sadece aksel rijitlik (EA) değeri programa girilmektedir. Şekil 3.6.' da görüleceği üzere, analizlerde 6 düğümlü zemin elemanları kullanıldığında, geogrid elemanlar 3 düğümlü; 15 düğümlü elemanlarda ise 5 düğümlü malzemeler olarak tanımlanırlar.



Şekil 3.6. Üç ve Beş Düğümlü Geogrid Elemanları

3.2.2.4. Ara Yüzey Elemanı

Analizlerde, zemin ile donatı elemanları arasındaki etkileşimi sağlamak için için ara yüzey elemanlar (interface) tanımlanmaktadır. 6 düğüm noktalı zemin elemanlarında, 3 adet ara yüzey eleman; 15 düğüm noktalı zemin elemanlarında ise 5 adet yüzey eleman kullanılacak şekilde tanımlama yapılmaktadır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Ara Yüzey Elemanlarının Sisteme Bağlantı Şekli

3.3.3. Zemin Modelleri

PLAXIS programında altı farklı zemin modeli kullanılmaktadır. Bu zemin modelleri aşağıda özetlenmiştir.

3.3.3.1. Lineer Elastik Model (LE)

Bu modelde ele alınan zeminin Hooke yasasına uyduğu ve zeminin izotropik lineer elastik bir davranış sergilediği varsayılmıştır. Programda zemin parametrelerinden sadece Elastisite modülü, (E) ve Poisson oranı (ν) verileri girilerek analizler yapılır. LE modeli zeminin davranışı tam olarak tanımlayamadığı için doğru analiz sonuçları elde edilememektedir. Sadece zemin içindeki rijit yapıların modellenmesi için kullanılabilir.

3.3.3.2. Mohr-Coulomb Model (MC)

Zeminin elasto-plastik olarak davrandığını kabul eden modeldir. Programa giriş parametreleri ise beş adettir: Elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ)'dir. Analizlerde bu yöntem hızlı sonuçlar verdiği için dolayı, problem hakkında ön fikrin oluşması açısından bu yöntem tercih edilmektedir.

3.3.3.3. Jointed-Rock Model (JR)

Bu model, plastik göçmenin sadece belirli bir doğrultuda oluştuğunu kabul eden, anizotropik, elasto-plastik zemin davranışını esas alır. JR modeli, genellikle kayaların davranışının analizinde kullanılır. Programa beş adet giriş parametresi girilmektedir. Bunlar: Elastisite modülü, E, Poisson oranı, ν , kohezyon, c, içsel sürtünme açısı, ϕ ve dilatasyon açısı, ψ şeklinde sıralanabilir.

3.3.3.4. Soft Soil Model (SS)

Bu model, geoteknik mühendisliğinde yumuşak zemin sınıfına giren killi, killi siltler ve turba zeminler için kullanılmaktadır. Programa girilen parametreler ise: kohezyon, c, içsel sürtünme açısı, ϕ , dilatasyon açısı, ψ , modifiye sıkışma indeksi, λ^* , ve modifiye şişme indeksi, κ^* değerleri şeklinde sıralanmaktadır.

3.3.3.5. Soft Soil Creep Model (SSC)

SS modelinde belirtilen zeminlerin (konsolide killeri, killi siltler ve turba vb. yumuşak zeminler) zamana bağlı oturmalarını ve gerilmeleri SSC modelinde analiz edilmektedir. Özellikle tünel ve derin kazı yapılan yapılarda bu model doğru ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Modelde programa girilen değerler ise, kohezyon, c , içsel sürtünme açısı, ϕ , dilatasyon açısı, ψ , modifiye sıkışma indeksi, λ^* , modifiye şişme indeksi, κ^* ve modifiye sürtünme indeksi μ^* olarak belirtilebilir.

3.3.3.6. Hardening Soil Model (HS)

Farklı yumuşak ve sert zeminlerin analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan bu model, Mohr -Coulomb modeline göre üstünlükleri bulunmaktadır. MC modeline benzer şekilde gerilme ve deplasmanlar, kohezyon (c), sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) parametreleri etkili rol oynamaktadır. HS modelinde esas kabul zeminin rijitlik değerinin, basınçla birlikte arttığı varsayılarak analizler yapılmaktadır.

3.4. Limit Denge Yöntemleri

Limit denge yöntemi ile zeminlerin davranışları belirli kabullere dayalı ele alınarak modelleme yapılır ve geoteknik problemler bu varsayımlara göre çözümü mümkün olabilmektedir. Bu yöntemde kayma dairesinin belirli bir yüzeyde meydana geldiği kabul edilerek, bu yüzey boyunca kayan kuvvetler ile kaymaya direnen kuvvetler karşılaştırılarak güvenlik sayıları elde edilir. “Bu analiz yöntemleri ile temelde, Mohr-Coulomb gerilme kriterleri kullanılarak şevin üç ana statik denge eşitliği aranmaktadır” (Hammouri ve diğ. 2007).

Singh vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, limit denge yöntemleri her ne kadar belirli sınırlandırmalar içermesine rağmen güvenilir sonuçlar elde edildiği ortaya konulmaktadır.

Uygulamada kullanılan üç ana limit denge analizi tipi vardır.

Bunlar;

- Dilim yöntemi
- Kama yöntemi
- Sonsuz eğim yöntemi.

Bu üç yöntemden en güvenilir ve en çok kullanılan limit denge yöntemi dilim yöntemidir. Bundan dolayı analizlerde bu yöntem kullanılacaktır.

3.3.1. Dilim Yöntemi

Dilim yöntemi, şevlerin stabilite hesapları için kullanılan en yaygın limit denge yöntemidir. Geoteknik mühendisleri tarafından en çok kabul gören yöntem olduğu için bu yöntemle güvenilir sonuçlar veren çok sayıda bilgisayar programı bulunmaktadır. Bilgisayar programlarıyla kayma yüzeyi, zemin parametreleri ve boşluk suyu durumu değişkenleri kolayca değiştirilerek gerekli analizler yapılabilir.

İsveç Dilim, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern ve Price, vb. dilim yöntemi metodlarının farklı kabullerle çözüm yapılmaktadır. Bundan dolayı çözüm sonucu elde edilen güvenlik sayılarında yaklaşık olarak $\pm\%10$ fark çıkabilmektedir. Çizelge 3.1.'de farklı metodlarda yapılan bu kabuller listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Limit Denge Yöntemlerinde Yapılan Kabullerin Karşılaştırılması
(Meng 2006).

METOT	GÜVENLİK KATSAYISI (GS)		KESİT KUVVETLERİ (Y: YATAY, D:DÜŞEY)
	Kuvvet Dengesi	Moment Dengesi	
İsveç Dilim	-	+	Y ve D ihmal edilmiş
Bishop Metodu	-	+	Y dahil, D ihmal edilmiş
Basitleştirilmiş Janbu	+	-	Y dahil, D ihmal edilmiş
Genelleştirilmiş Janbu	+	-	Y ve D dahil edilmiş
Spencer Metodu	+	+	Y ve D dahil edilmiş
Morgenstern-Price	+	+	Y ve D dahil edilmiş
Lowe ve Karafiath	+	-	Y ve D dahil edilmiş
Corps of Engineers	+	+	Y ve D dahil edilmiş

3.3.1.1. İsveç Dilim (Fellenius) Yöntemi

Bu yöntem, kayma dairesinin düşey yönde küçük parçalara ayrılarak incelendiği dilim tekniğinin ilk olarak kullanıldığı yöntemdir. Fellenius yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde dilimler arası kuvvetler ihmal edildiğinden, herhangi bir bilgisayar programı kullanılmadan klasik el hesabı ile güvenlik sayıları elde edilebilmektedir. Belirlenen kritik kayma yüzeyini etkileyen kuvvetlerin, toplam momentleri hesaplanarak şevin güvenlik sayısı belirlenebilmektedir.

Fellenius (1927) tarafından oluşturulan metoda göre, dilimlerin her iki tarafında oluşan kuvvetlerin birbirini sönümlediği varsayılarak, dilimler arası normal ve kayma gerilmeleri ihmal edilerek analizlerin yapılması önerilmektedir. Bu metodoloji gerçeklik dışıdır ve bundan dolayı Fellenius yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları düşük olmaktadır.

3.3.1.2. Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

Bishop (1955) tarafından geliştirilen bu yöntem ile, dilimler arası oluşan normal kuvvet de dikkate alınmış, böylece daha gerçekçi güvenlik sayıları elde edilebilmiştir. Güvenlik sayılarını, uzun analitik çözümler sonucu elde edilmesinden dolayı bu yöntem yaygın kullanım alanı bulamamıştır. Bunun yerine Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi kullanılmaktadır (Önalp ve Arel 2004). Ancak, Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi de sadece düşey denge ve moment dengesini sağlamaktadır. Yatay denge şartı ihmal edildiği için, yani tüm kuvvetlerin hesaba katılmadığından dolayı, bu yöntem tam bir denge yöntemi olarak kabul edilmemelidir.

3.3.1.3. Janbu Yöntemi

Janbu (1957) tarafından geliştirilen yöntemde dilimler arası normal kuvvet de göz önünde bulundurulmuştur. Bu yöntem ile yatay ve düşey kuvvet dengesi sağlanmasına karşın moment dengesi dikkate alınmamıştır. Janbu (1976) tarafından yapılan revize çalışmada, momentin hesaplanması ilave zorluklar çıkaracağını tespit edilerek moment dengesi yerine yatay kuvvetlerin dengesini kullanılması önerilmiştir.

Bishop (1955) yönteminin daha kararlı ve güvenli sonuçlar elde edilmesinden dolayı Janbu (1957) orijinal çalışmasında bazı revize çalışmalar sonucu 1976 yılında yeniden yayınlamıştır. Bu düzenlemede, şevin yüksekliği ve genişliğine bağlı olarak elde edilen güvenlik katsayılarının düzeltme faktörü (f_0) ile şeklinde özetlenebilir. Düşük eğimli şevlerde bu düzeltme faktörünün kullanılması, doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

3.3.1.4. Spencer Yöntemi

Spencer (1967) tarafından moment ve yatay kuvvet dengesi kriterlerini sağlayan bir yöntem geliştirmiştir.

Bu yöntem ile; dilimler arası normal ve kayma kuvvetleri arasındaki sabit bir değer kabul edilerek, hem moment ve hem de yatay kuvvet dengesi sağlanabilmektedir.

3.3.1.5. Morgenstern-Price Yöntemi

Morgenstern- Price (1965) tarafında önerilen yöntemde, dilimler arası kuvvetlerin oranını sabit bir değer kabul edilerek Spencer yöntemine benzer kabuller yapılmıştır. Bu kuvvetler farklı kuvvet fonksiyonları şekline getirilmiş, gerekli çözümler yapılmıştır.

3.3.1.6. Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (GLE)

Fredlund ve Krahn (1977) diğer yöntemlerin tümünün kilit noktalarını kapsayan bir yöntem önermişlerdir.

Genelleştirilmiş Limit Denge Yöntemi (General Limit Equilibrium Theory - GLE) olarak bilinen bu yöntem, yukarıda bahsedilen diğer yöntemlerin en önemli bölümlerine içine alan, çerçeve bir yöntem olarak kabul edilebilir.

GLE yönteminde;

- Zeminlerin kayma mukavemet parametreleri (kohezyon ve sürtünme açısı) değerlerinin aynı güvenlik sayısına sahip olması
- Göçme dairesindeki tüm dilimlerinin güvenlik sayısının aynı olması kabulleri yapılarak analizler yapılır.

3.4. Geostudio Programı

SLOPE/W, şev geometrisinin doğrudan tanımlanabildiği ve şev stabilite analizlerinin yapıldığı bilgisayar paket programıdır. Basit ve kompleks şev stabilitesi hesaplarında çeşitli yöntemleri kullanarak şevin güvenlik sayıları elde edilebilir. Bu program ile heterojen zemin tipleri, karmaşık geometriye sahip şevler, değişken boşluk suyu basıncı olan zeminler kolayca modellenabilmektedir.

Ayrıca şev stabilite analizlerinde Sigma/W modülü ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen gerilmeler; limit denge yöntemi ile yapılacak analizlerde kullanılarak daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

SLOPE/W, limit denge yöntemi ile birçok farklı analiz yöntemi kullanarak şev stabilite analizleri yapılabilmektedir. Bu analiz yöntemleri: Ordinary, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer, Bishop , Genel Limit Denge yöntemi şeklinde sıralanabilir.

Geostudio programına veri girişi ve çözüm aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Öncelikle Geostudio programı giriş sayfasından SLOPE/W modülünden yeni bir proje açılır.
- KEYIN menüsünden yukarıda belirtilen Ordinary, Janbu, Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Genel Limit Denge analiz yöntemlerinden uygun olanı seçilir. Boşluk suyu basıncı var ise piyazometre çizgisi seçilir. Kritik kayma yüzeyini belirlemek için slip surface alt menüsünden entry and exit metodu seçilir. Yapılacak analize isim verilerek bu menüden çıkılır.
- Sonraki aşamada ölçek belirlenir. Ölçek analiz yapılacak geometrinin maksimum ve minimum x-y koordinatlarına göre 1:1 oranında olacak şekilde seçilmelidir. X ve Y eksenleri çizilerek analiz yapılacak geometri kolaylıkla oluşturulur.
- Daha sonra problemin geometrisi oluşturulmasına geçilir. Bu amaçla POINTS düğmesi ile noktasal elemanlar kullanılarak çalışma alanının koordinatları belirlenir. Çok katmanlı bir zemin modelinde çalışma yapılacağı zaman, yine bu noktasal elemanlar kullanılarak, model farklı bölümlere ayrılabilir.
- Geometrinin oluşturulmasından sonra programda KEYIN ana başlığı altında MATERIAL PROPERTIES komutuyla çalışma alanında bulunan zemine ait olan birim hacim ağırlık, içsel sürtünme açısı, kohezyon gibi zeminin indeks ve mukavemet parametreleri programa tanıtılır. Tanımlanan bu zemin özelliklerinin daha önce oluşturulan geometri içindeki bölgelere atanması gerekir. Bu işlem DRAW ana başlığı altında bulunan REGIONS komutuyla yapılmaktadır. Eğer arazide birden fazla zemin tabakası var ise her tabaka için REGIONS komutu ayrı ayrı kullanılır.
- Zemine ait profil oluşturulduktan sonra, DRAW ana başlığı altında varsa PORE WATER PRESSURE komutu ile çalışma alanındaki yeraltı suyu programda oluşturulan modele tanımlanır. Böylece boşluk suyu basınçları da hesaplara dahil edilmiş olur.
- Tanımlanan zemin üzerinde herhangi bir yapısal eleman mevcut ise DRAW ana başlığı altındaki LINE LOADS komutuyla yapısal yüke ait kesme kuvvetleri de yatay yük olarak tanımlanabilir.

- Tanımlanan zemin için analize başlamadan önce son adım olarak DRAW ana başlığı altındaki SLIP SURFACE Grid&Radius komutuyla zeminin durumuna göre olası kayma dairesi merkezi ve olası kayma yüzeyi yeri mühendislik önsezisine göre belirlenebilir. Modelin oluşturulmasına ait tüm aşamalar tanımlandıktan sonra TOOLS ana başlığı altında bulunan SOLVE komutuyla şev stabilitesi hesapları yapılır.
- Hesaplamalar tamamlandıktan sonra istenildiği takdirde DRAW ana başlığı altında bulunan GRAPH komutuyla birçok parametre için farklı grafikler elde edilebilir ve istenilen karşılaştırmalar yapılabilir. Ayrıca yukarıda tanımlanan şev stabilitesi analiz yöntemlerinden elde edilen olası kayma dairelerinin güvenlik sayıları da her kayma dairesi için ayrı ayrı verilmektedir. Bu sayede aynı kayma dairesi için farklı yöntemlerden elde edilen değerleri kıyaslamak da mümkün olabilmektedir (SLOPE/W Tutorial 2007) .



4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Analiz Yöntemi

Çalışmanın bu bölümünde, örnek bir katı atık sahasında şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge yöntemleriyle yapılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi için PLAXIS (Professional version 8, Brinkgreve ve Vermeer, 1998); limit denge yöntemleri için Geostudio 2012 (Slope/W Modülü, Geo-Slope İnternational Ltd.) bilgisayar paket programları kullanılmıştır.

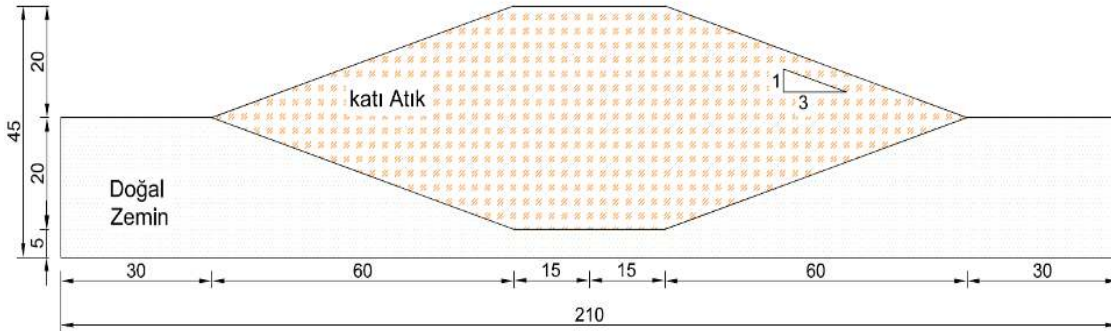
Analizlerde, farklı zemin parametrelerine ve açılara sahip katı atık dolgu şevlerinin davranışı incelenmiştir. Ayrıca, şev içerisine geogrid donatı tabakaları yerleştirilerek, geogrid donatının güvenlik sayısına etkisi analiz edilmiştir. Bu amaçla farklı geometri, yük kombinasyonları ve malzeme özellikleri kullanılarak yukarıda belirtilen paket programları yardımıyla sayısal analizler yapılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde, içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), elastisite modülü (E), dilatasyon açısı (ψ), poisson oranı (ν), birim hacim ağırlık (γ) ve şev açısı (β) değerlerinin katı atık sahasındaki şev stabilitesi üzerindeki etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca, geogrid donatıların şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Limit denge yöntemiyle yapılan analizlerde, içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), birim hacim ağırlık (γ) ve şev açısı (β) değerlerinin katı atık sahasındaki şev stabilitesi üzerindeki etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Bu yöntemde de geogrid donatıların şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

4.1.1. Geometrik Model

Analizlerde kullanılan katı atık sahasının genişliği 210 m. ve toplam yükseklik 45 m. dir (Şekil 4.1.). Analizlerde farklı şev açıları için geometri yeniden oluşturulmuştur. Analizlerde kolaylık sağlaması açısından geometrik modelin simetrisinden yararlanılmıştır.



Şekil 4.1. Analizlerde Kullanılan Katı Atık Sahası Geometrisi (ölçüler metre cinsindendir.)

4.1.2. Model Zemin

Analizlerde katı atık sahasını oluşturan doğal zemin ve katı atık malzemesi modellenirken Mohr-Coulomb (MC) malzeme modeli kullanılmıştır. Modelde giriş bilgileri olarak kullanılan parametreler (E , ν , c , ϕ , ψ) literatürde mevcut deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

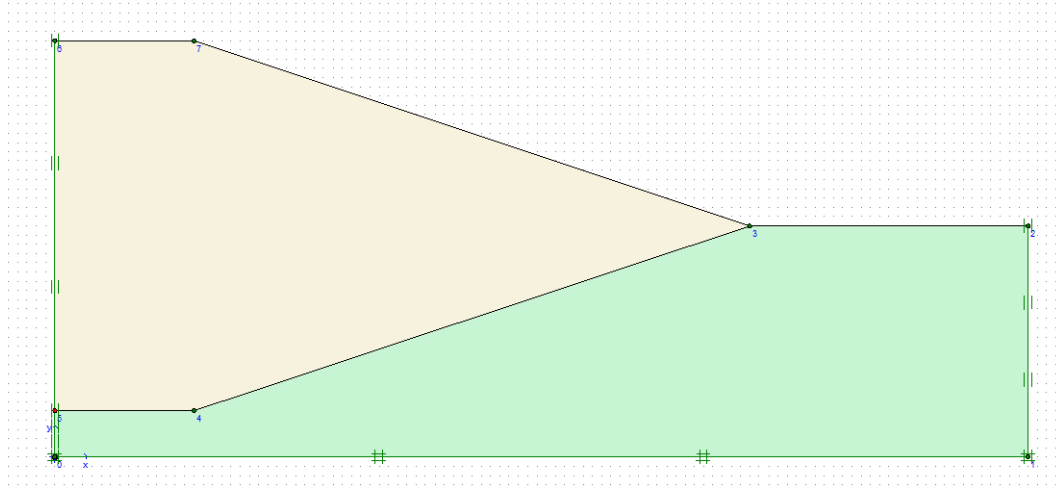
Analizlerde kullanılan doğal zemin ve katı atık dolgusu MC model zemin parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Katı Atık Sahası İçin MC Model Zemin Parametreleri

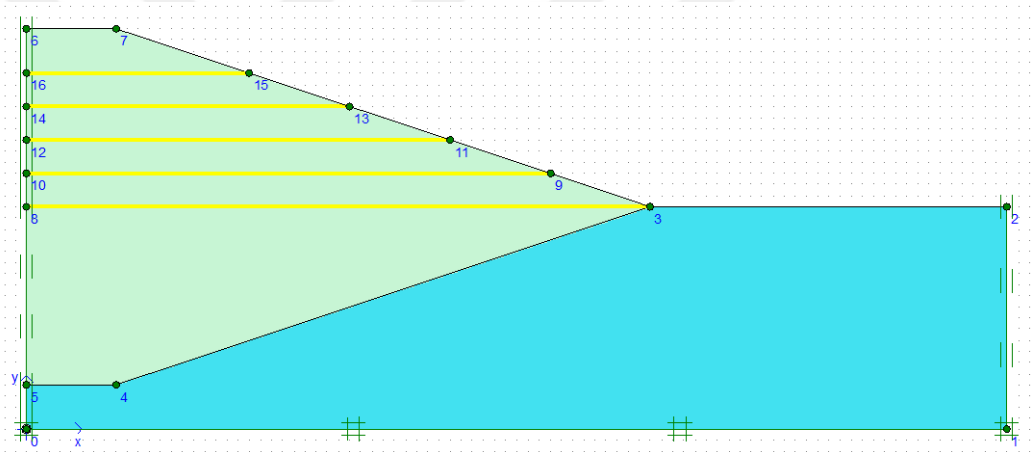
Parametre Adı	Simge	Birim	Doğal Zemin	Katı Atık Dolgu
Birim hacim ağırlığı	γ_n	kN/m ³	14.0	9.0
Elastisite Modülü	E	kN/m ²	14.000	6500
Kohezyon	c	kN/m ²	15.0	10.0
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	25.0	15.0
Dilatasyon açısı	ψ	(°)	0.0	0.0
Poisson oranı	ν	-	0.35	0.45

4.2. Sonlu Elemanlar Analizi

PLAXIS bilgisayar programında katı atık sahasının geometrik modeli, iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Şev analizleri, düzlem şekil değiştirme koşullarına göre gerçekleştirilmiştir. Zemin ortamının modellenmesinde, daha doğru ve hassas sonuçların elde edilmesi için 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar seçilmiştir. Şekil 4.2.'de, oluşturulan donatısız ve donatılı model geometrileri görülmektedir.



(a) Donatısız Model



(b) Donatılı Model

Şekil 4.2. (a) Donatısız ve (b) Donatılı Modeller

4.2.1. Sınır Koşulları

Analizlerde, PLAXIS programında mevcut standart sınır koşulları seçilmiştir. Geometrik modelin tabanındaki düşey ve yatay deplasmanlar ($u_x=0$, $u_y=0$) sıfır kabul edilmekte, şevin düşey kısmında ise, sadece düşey deplasmanlar dikkate alınmaktadır ($u_x=0$, $u_y=\text{serbest}$). Bu tür problemlerin çözümünde yukarıda belirtilen sınır koşulları kabul edilmektedir.

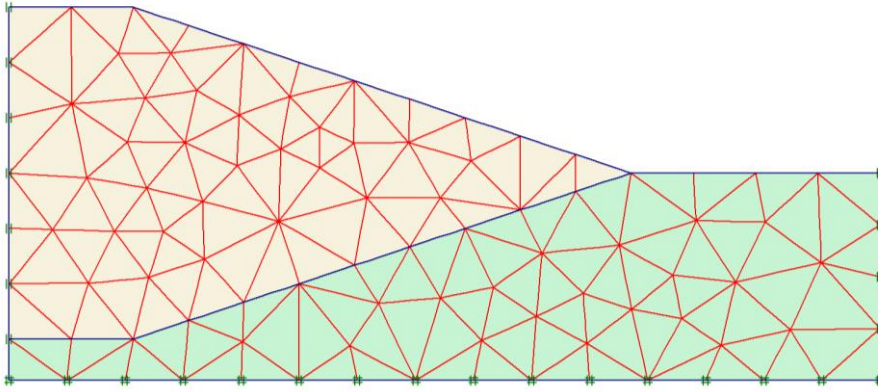
4.2.2. Geogrid Donatı Tabakaları

Analizlerde geogrid donatı tabakalarını modellemek için geogrid elemanı kullanılmıştır. Geogrid donatı tabakalarının malzeme özelliği olarak PLAXIS’de mevcut geogrid eleman parametreleri kullanılmıştır ($EA=100000 \text{ kN/m}$).

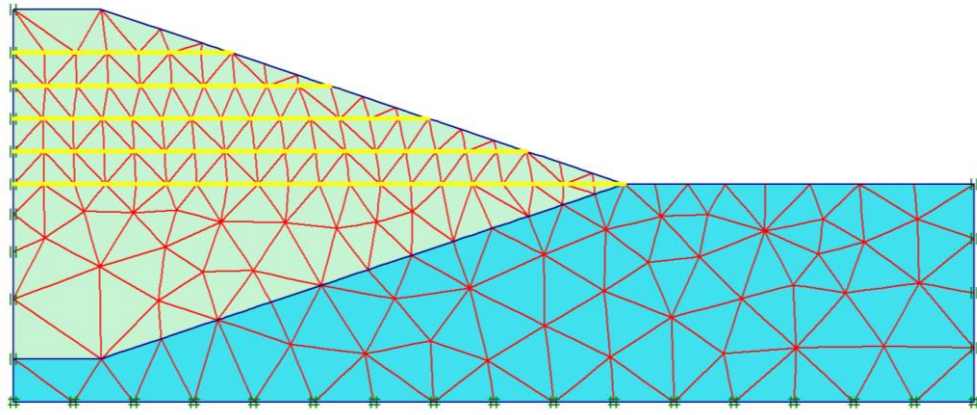
4.2.3. Sonlu Elemanlar Ağı

PLAXIS paket programında model zeminin sonlu elemanlara bölünmesi işlemi program menüsünden otomatik olarak yapılabilmektedir. Ayrıca kullanıcı tarafından kritik olabileceği tespit edilen bölgelere manuel olarak müdahale edilebilmektedir. Sonlu eleman ağı oluşturulmasında, analiz sonuçlarının çok fazla değişmediği, optimum sürede en doğru sonucu verecek, en uygun ağ yapısı (mesh) araştırılmıştır. Bu amaçla, orta, ince ve çok ince mesh durumları için analizler gerçekleştirilerek, bunun güvenlik sayısına olan etkisi araştırılmıştır. Yukarıda yapılan değerlendirmeler ışığında Medium (orta) mesh seçilerek analizler yapılmıştır.

Şekil 4.3.’de analizlerde kullanılan donatısız ve donatılı şev modellerinin geometrisi, sınır koşulları ve sonlu elemanlar ağları verilmiştir.



(a) Donatısız Model



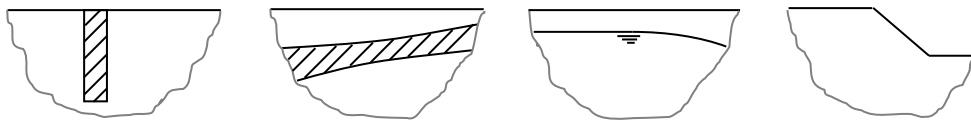
(b) Donatılı Model

Şekil 4.3. Analizlerde Kullanılan Sonlu Elemanlar Ağ Modelleri
(a) Donatısız Model (b) Donatılı Model

4.2.4. Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulması

Zemin problemlerinin çözümünde başlangıç gerilmelerinin oluşturulması, çözümün ilk aşaması olarak kabul edilmektedir. Zeminin zati ağırlığından dolayı meydana gelen bu gerilmeler, PLAXIS paket programında iki farklı yöntem ile analiz edilmektedir.

İlk yöntem olan K_0 (zemin basınç katsayısı olarak tanımlanır) prosedüründe, zemin yüzeyinin yatay olduğu durumlarda ve yer altı su seviyesinin zemin yüzeyine yakın olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bunun dışındaki tüm durumlarda, ağırlık yüklemesi yöntemi kullanılmalıdır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Ağırlık Yükleme Yönteminin Kullanıldığı Durumlar

Başlangıç gerilmelerinin oluşturulmasında, K_0 prosedürü uygulanması durumunda, zeminin ilk olarak zemin zati ağırlığından dolayı oluşan dikey gerilmeler hesaplanmaktadır. Yatay gerilmeler ise dikey gerilmelerin K_0 değeriyle çarpılması sonucu bulunur.

K_0 değeri yatay ve düşey gerilmelerin oranı şeklinde formüle edilmektedir:

$$K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (4.1)$$

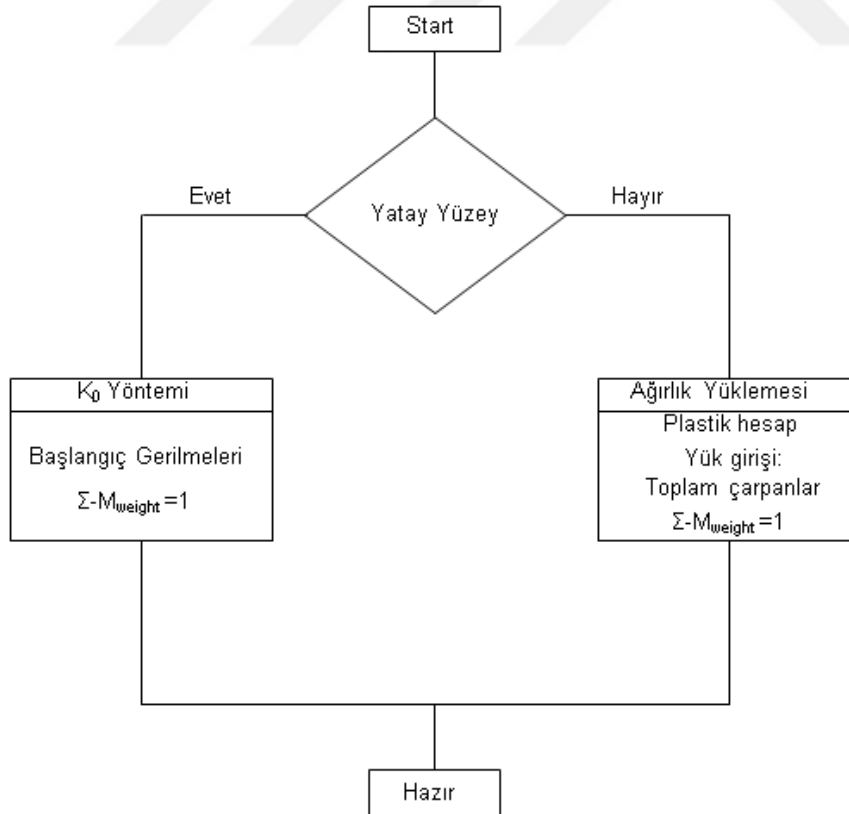
K_0 değeri ayrıca Jacky tarafından normal konsolide killi zeminlerde yapılan çalışmada aşağıda verilen ampirik formül ile de elde edilebileceğini ispatlamıştır.

$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (4.2)$$

Ağırlık yükleme yönteminde ise, başlangıç gerilmeleri sıfır olarak kabul edilir. Başlangıç gerilmeleri ise, zeminin kendi ağırlığının ilk hesap aşamasında uygulanmasıyla sonraki aşamada meydana geldiği kabul edilmektedir (Şekil 4.5.). K_0 değeri bu durumda, Poisson oranına bağlı olarak değişir. Bundan dolayı, poisson, v değerlerinin doğru seçilmesi büyük önem arz etmektedir. K_0 ve v değerleri aşağıdaki bağıntı ile bulunabilmektedir:

$$v = \frac{K_0}{(1 + K_0)} \quad (4.3)$$

Bu çalışmada model zemin şevli yüzey olduğundan dolayı, başlangıç gerilmelerinde ağırlık yükleme yöntemi ile belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Başlangıç Gerilmelerinin Oluşturulma Şeması

4.2.5. Hesaplamalar

Analizlerde donatısız durumda çözüm iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada zemin zati ağırlığından dolayı meydana gelen başlangıç gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada ise güvenlik sayısı analizi (ϕ -c reduction) gerçekleştirilmiştir.

Donatılı çözümlerde ise çözüm üç aşamada elde edilmiştir. İlk aşamada zemin zati ağırlığından dolayı meydana gelen başlangıç gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada geogrid donatı aktifleştirilmiş, son aşamada ise güvenlik sayısı analizi (ϕ -c reduction) gerçekleştirilmiştir.

4.2.6. Analiz Sonuçları

Bu bölümde, donatısız ve donatı ile güçlendirilmiş katı atık şev dolgularının sonlu elemanlar analiz sonuçları sunulmaktadır.

4.2.6.1. Donatısız Analizler

Bu bölümde, donatısız katı atık dolgularının sonlu elemanlar analiz sonuçları sunulmuştur. Analizlerde, PLAXIS bilgisayar programı kullanılarak, içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), dilatasyon açısı (ψ), elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), birim hacim ağırlık (γ) ve şev açısı (β) parametrelerinin şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

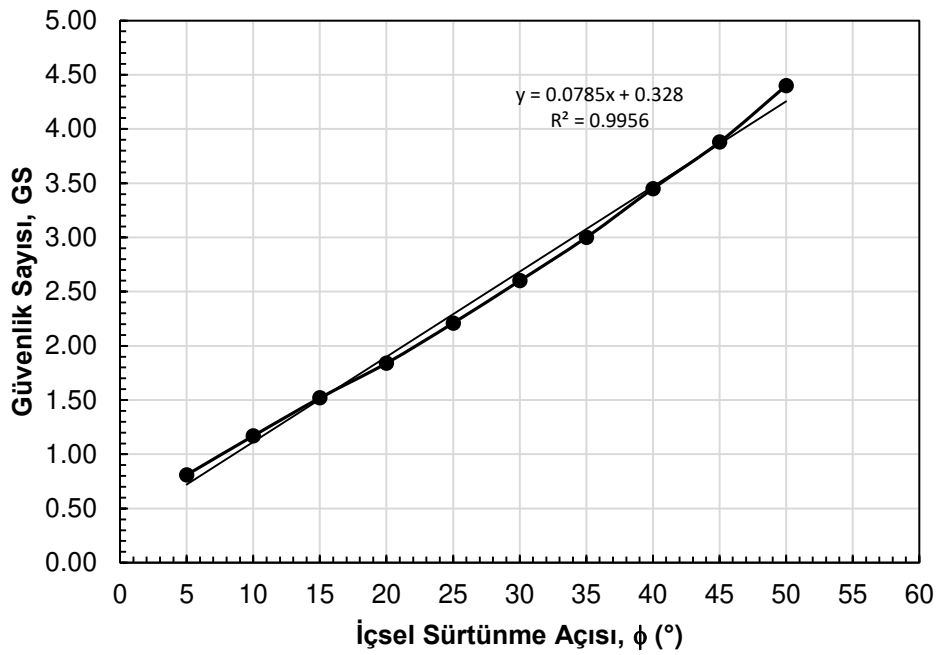
- İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) Etkisi

İçsel sürtünme açısının (ϕ)şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı içsel sürtünme açısı değerleri için ($\phi=5^\circ-10^\circ-15^\circ-20^\circ-25^\circ-30^\circ-35^\circ-40^\circ-45^\circ-50^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde diğer parametreler; kohezyon $c=10\text{kN/m}^2$, dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, elastisite modülü $E=6500\text{kN/m}^2$, poisson oranı $\nu=0.45$, birim hacim ağırlık $\gamma=9\text{kN/m}^3$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.6.'da, diğer değerler ise, Çizelge 4.2.'de özetlenmiştir.

İçsel sürtünme açısının (ϕ)şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının arttığı görülmüştür.

Şekil 4.6. incelendiğinde, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal artışın, ϕ açısının artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

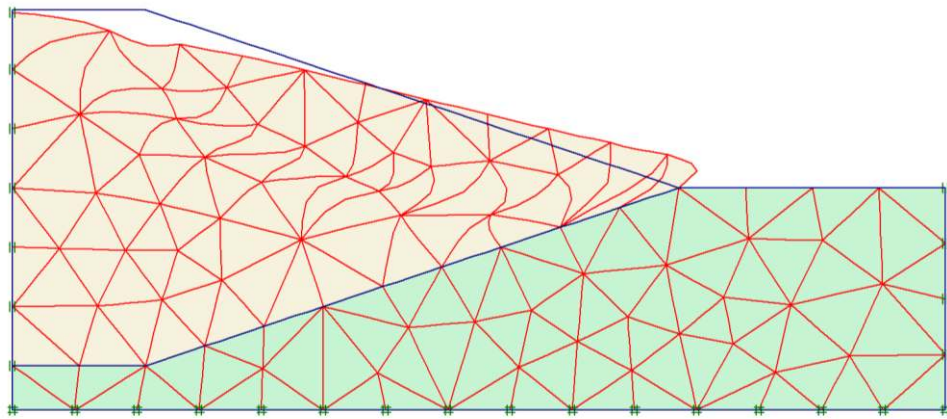
Şekil 4.7.'de analizler sonucu elde edilebilen Plaxis çıktılarına ait örnekler $\phi=15^\circ$ durumu için sunulmuştur. Şekil 4.8.'de ise farklı içsel sürtünme açıları için elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 4.6. İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

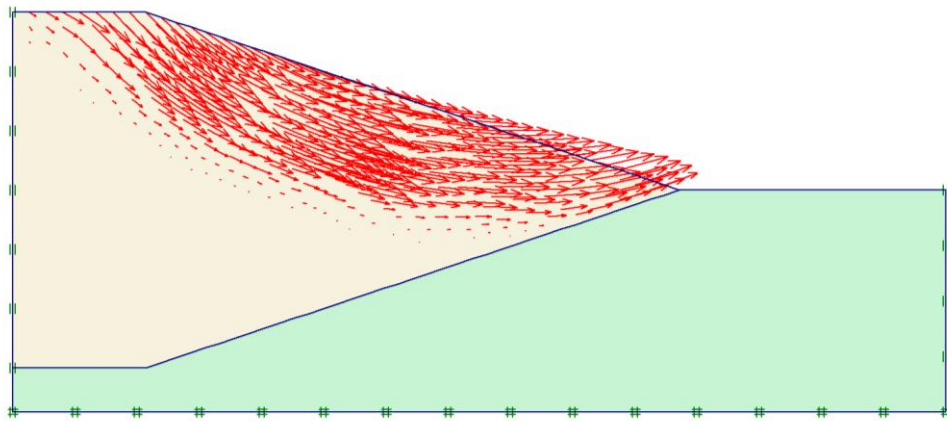
Çizelge 4.2. Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Analiz Sonuçları

ϕ (°)	G.S.
5	0.81
10	1.17
15	1.52
20	1.84
25	2.21
30	2.60
35	3.00
40	3.45
45	3.88
50	4.40



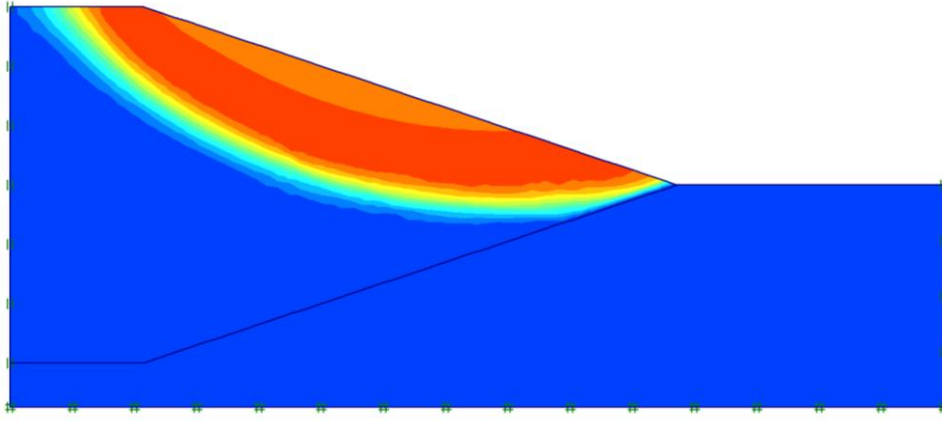
Deformed Mesh
Extreme total displacement $2.86 \cdot 10^6$ m
(displacements scaled up $2.00 \cdot 10^{-6}$ times)

a) Deformasyona Uğramış Sonlu Elemanlar Ağı ($\phi=15^\circ$)



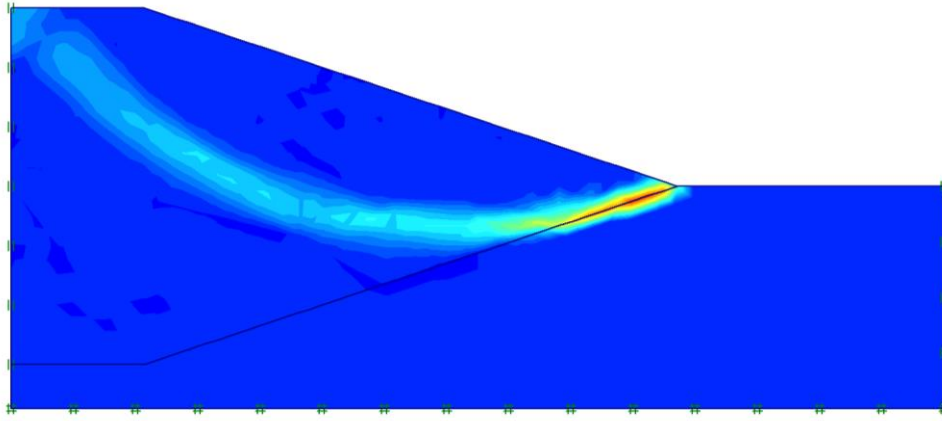
Total displacements (Utot)
Extreme Utot $2.86 \cdot 10^6$ m

b) Toplam deplasman vektörleri ($\phi=15^\circ$)

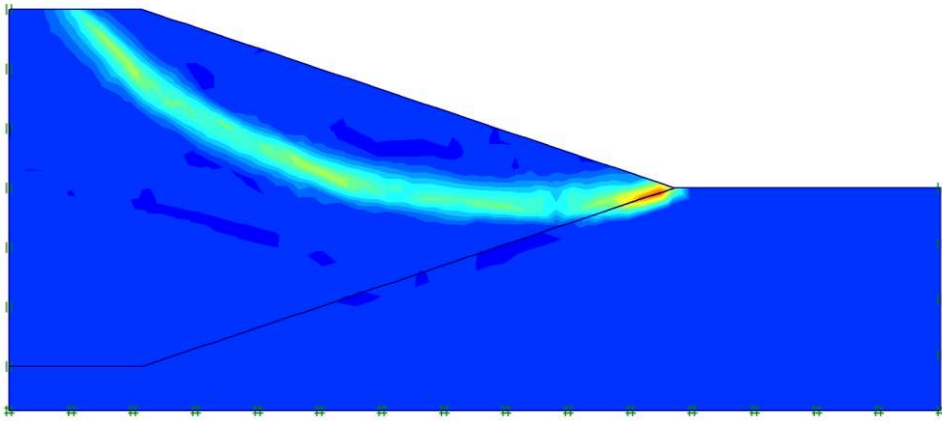


c) Toplam deplasman konturları ($\phi=15^\circ$)

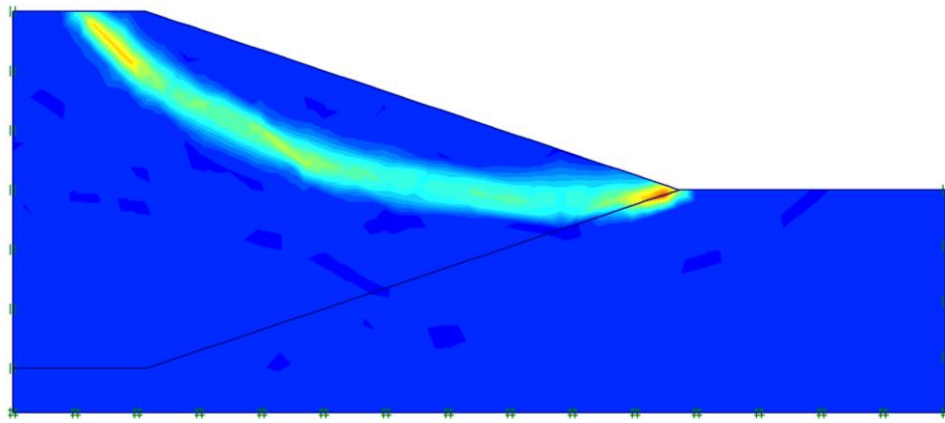
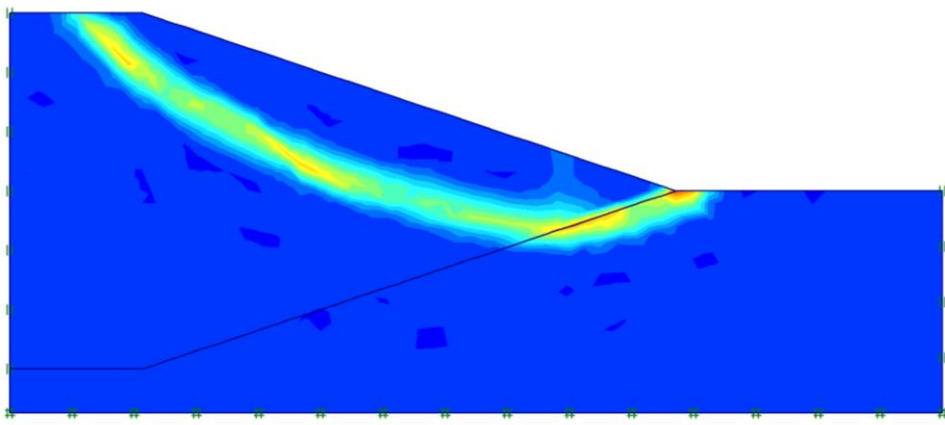
Şekil 4.7. Analizlerden elde edilen çıktılar (a) Deformasyona Uğramış Sonlu Elemanlar Ağı ($\phi=15^\circ$), b)Toplam deplasman vektörleri ($\phi=15^\circ$), c) Toplam deplasman konturları ($\phi=15^\circ$))



a) $\phi=5^\circ$



b) $\phi=20^\circ$

c) $\phi=35^\circ$ d) $\phi=50^\circ$

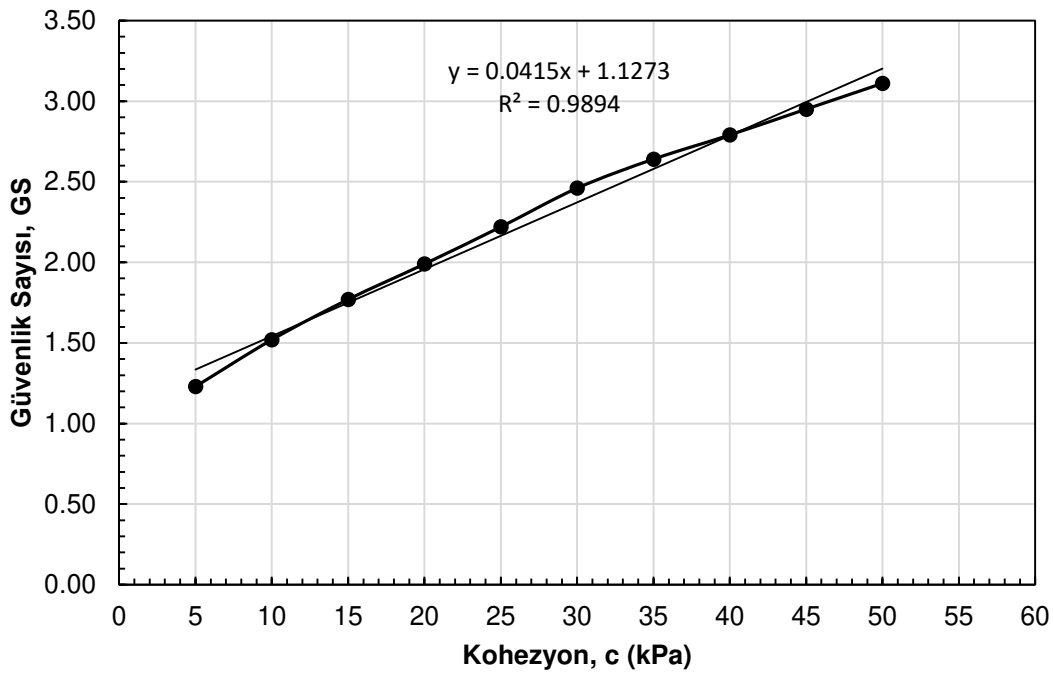
Şekil 4.8. İçsel Sürtünme Açılarının Farklı Değerleri İçin Hesaplanan Kayma Yüzeyleri ($\phi=5^\circ$ - 20° - 35° - 50°)

- Kohezyon (c) Etkisi

Kohezyonun (c),şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı kohezyon değerleri için ($c=5$ - 10 - 15 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 kN/m²) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, diğer parametreler, içsel sürtünme açısı, $\phi=15^\circ$; dilatasyon açısı, $\psi=0^\circ$; elastisitemodülü, $E=6500$ kN/m²; poisson oranı, $\nu=0.45$; birim hacim ağırlık $\gamma=9$ kN/m³ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1 düşey/3 yatay) olarak seçilmiştir. Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.9.'da; değerleri ise, Çizelge 4.3.'de özetlenmiştir.

Kohezyonun (c) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının arttığı görülmüştür.

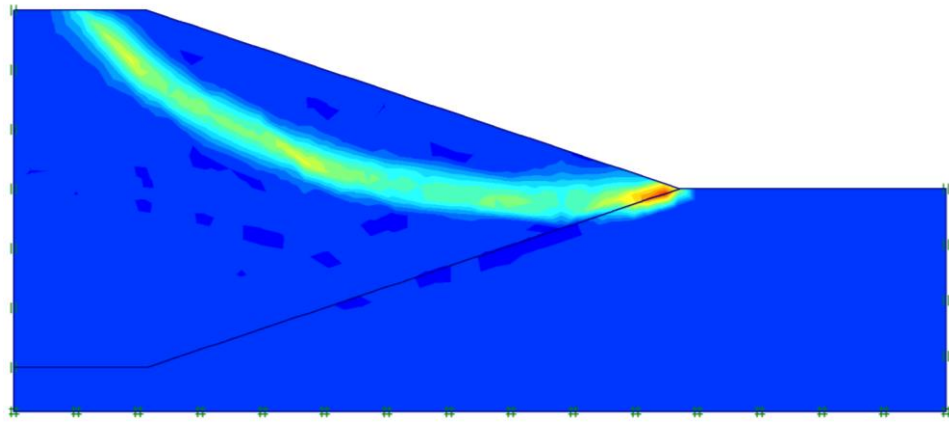
Şekil 4.9. incelendiğinde, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal artışın, içsel sürtünme açısının davranışına benzer şekilde, c değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.10.'da farklı kohezyon değerlerinde elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



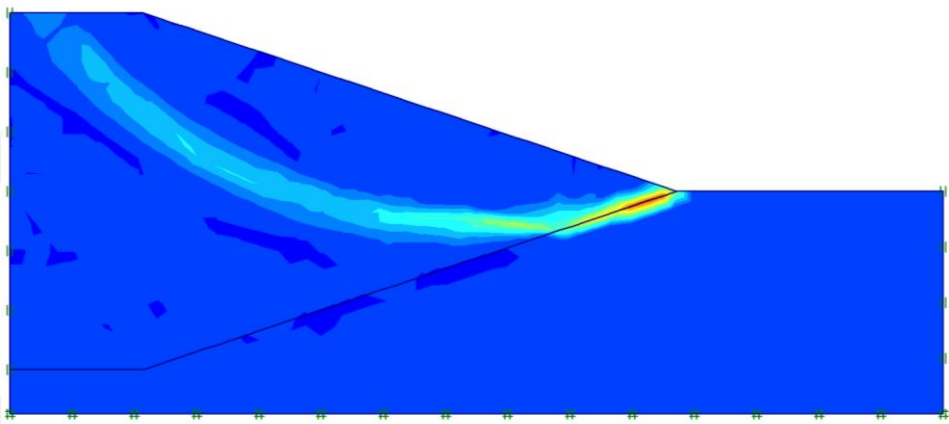
Şekil 4.9. Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.3. Farklı Kohezyon Değerleri İçin Analiz Sonuçları

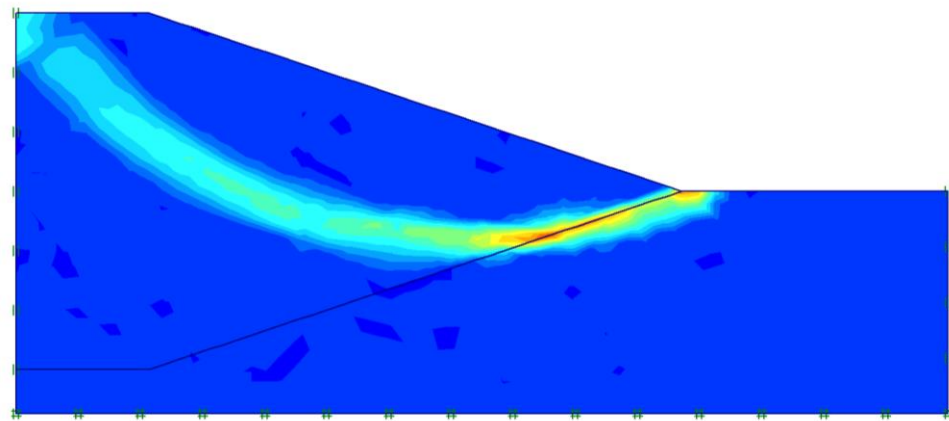
c (kPa)	GS
5	1.23
10	1.52
15	1.77
20	1.99
25	2.22
30	2.46
35	2.64
40	2.79
45	2.95
50	3.11



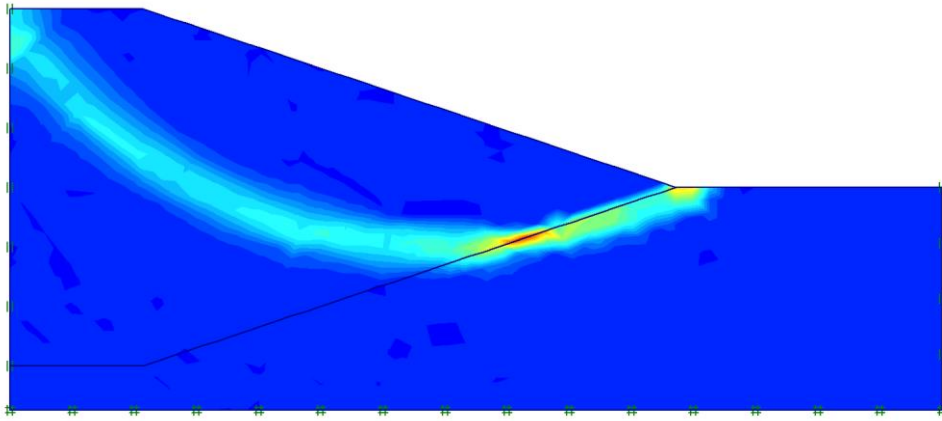
a) $c=5$ kPa



b) $c=20$ kPa



c) $c=35$ kPa



d) $c=50$ kPa

Şekil 4.10. Farklı Kohezyon (c) Değerlerinde Elde Edilen Kayma Yüzeyleri
($c= 5-20-35-50$ kPa)

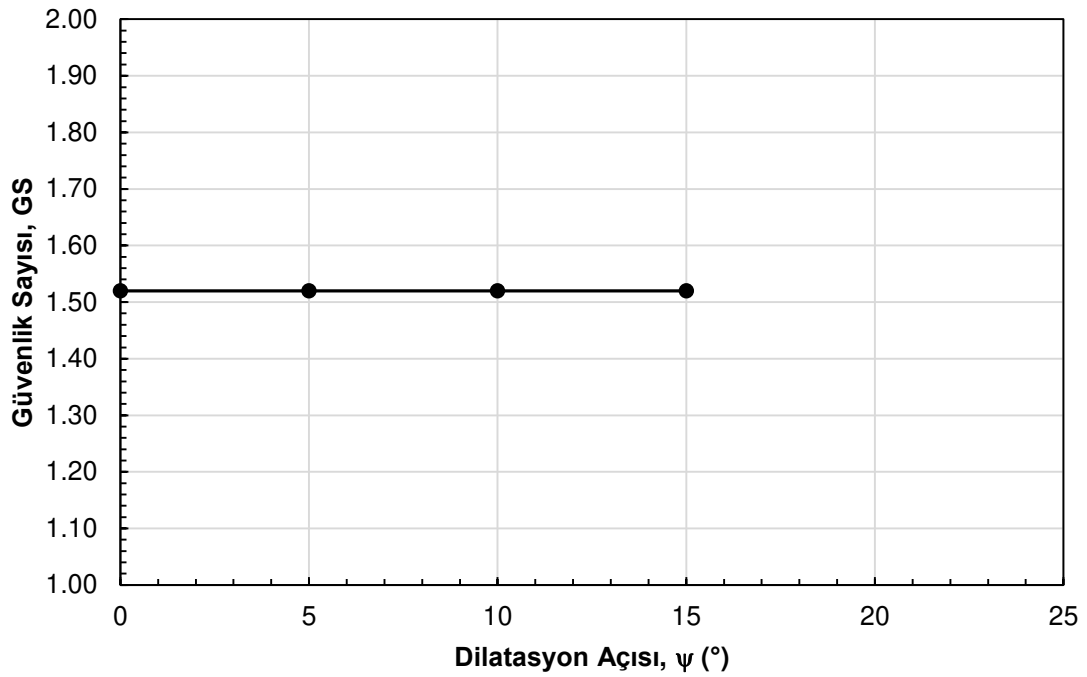
- Dilatasyon Açısı (ψ) Etkisi

Zeminlerde dilatasyon açısı değeri, içsel sürtünme açısının bir fonksiyonu olup $\psi=\phi-30^\circ$ eşitliğine göre hesaplanmaktadır. Eğer İçsel sürtünme açısı 30° 'den küçük ise dilatasyon açısı sıfır alınır.

Dilatasyon açısının (ψ), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı dilatasyon açısı değerleri için ($\psi=0^\circ-5^\circ-10^\circ-15^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10$ kN/m², elastisite modülü $E=6500$ kN/m², poisson oranı $\nu=0.45$ birim hacim ağırlık $\gamma=9$ kN/m³ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Dilatasyon açısı (ψ) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.11.'de, değerler ise, Çizelge 4.4.'de özetlenmiştir.

Dilatasyon açısının (ψ) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerde, şevin güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.11. Dilatasyon açısı (ψ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

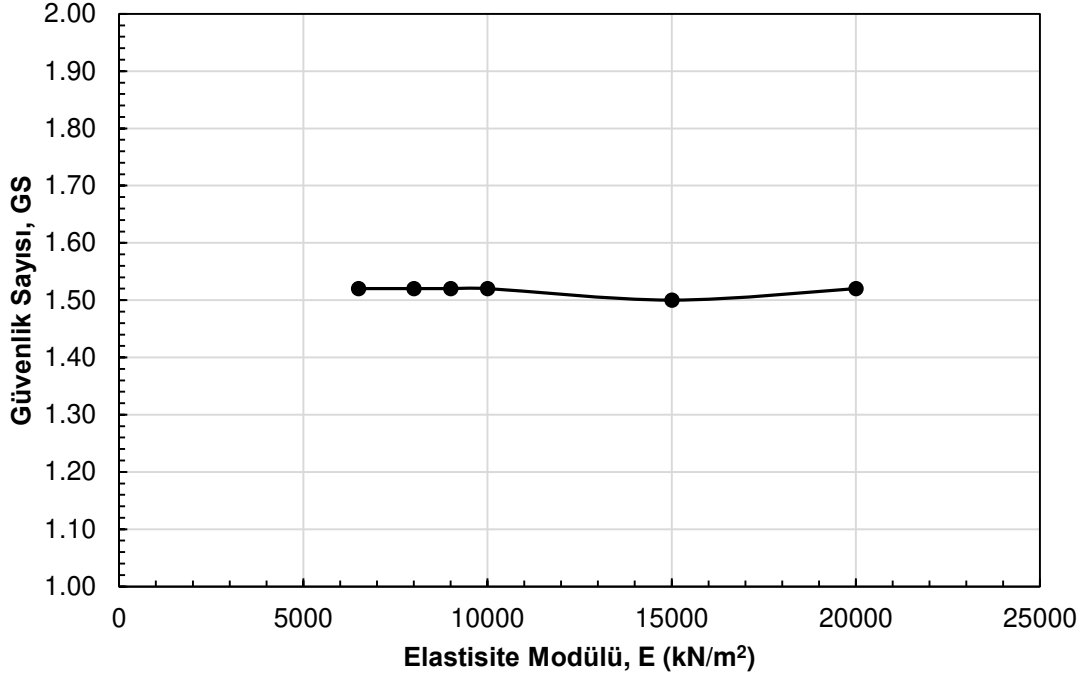
Çizelge 4.4. Farklı Dilatasyon Açıları
İçin Analiz Sonuçları

ψ (°)	GS
0	1.52
5	1.52
10	1.52
15	1.52

- Elastisite Modülü (E) Etkisi

Analizlerde, elastisite modülünün (E), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı elastisite modülü değerleri için ($E=6500-8000-9000-10000-15000-20000$ kN/m²) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10$ kN/m², dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, poisson oranı $\nu=0.45$, birim hacim ağırlık $\gamma=9$ kN/m³ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Elastisite Modülü (E) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.12.'de verilmiştir. Değerler ise, Çizelge 4.5.'de özetlenmiştir.

Elastisite Modülünün (E), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, E değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.12. Elastisite Modülü (E) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

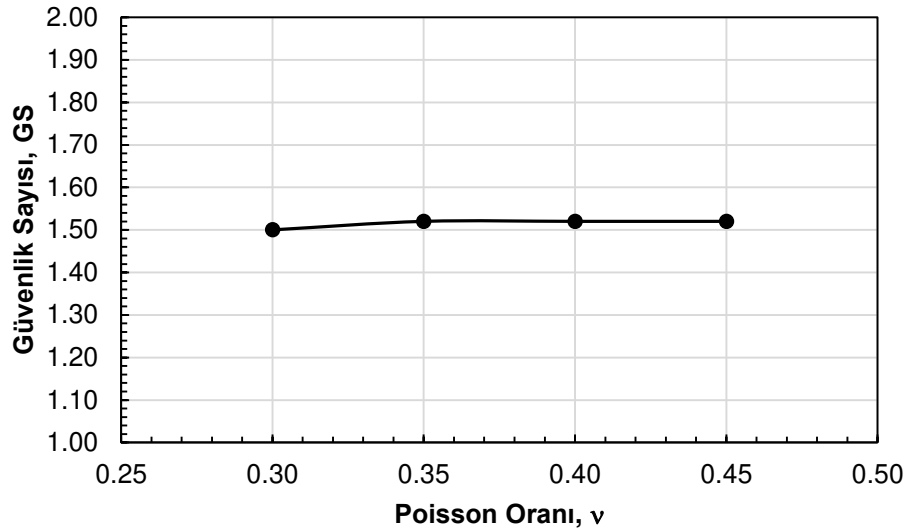
Çizelge 4.5. Farklı Elastisite Modülü Değerleri İçin Analiz Sonuçları

E (kN/m ²)	GS
6500	1.52
8000	1.52
9000	1.52
10000	1.52
15000	1.50
20000	1.52

- Poisson Oranı (v) Etkisi

Analizlerde, normal gerilme altında, enine şekil değiştirmenin eksenel şekil değiştirmeye oranı şeklinde tarif edilen Poisson Oranı'nın (v), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı Poisson Oranı değerleri için (v=0.30-

0.35-0.40-0.45) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10\text{kN/m}^2$, dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, Elastisite Modülü $E=6500\text{ kN/m}^2$, birim hacim ağırlık $\gamma=9\text{kN/m}^3$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Poisson Oranı (ν) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.13.'de, değerler ise, Çizelge 4.6.'de özetlenmiştir.



Şekil 4.13. Poisson Oranı (ν) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

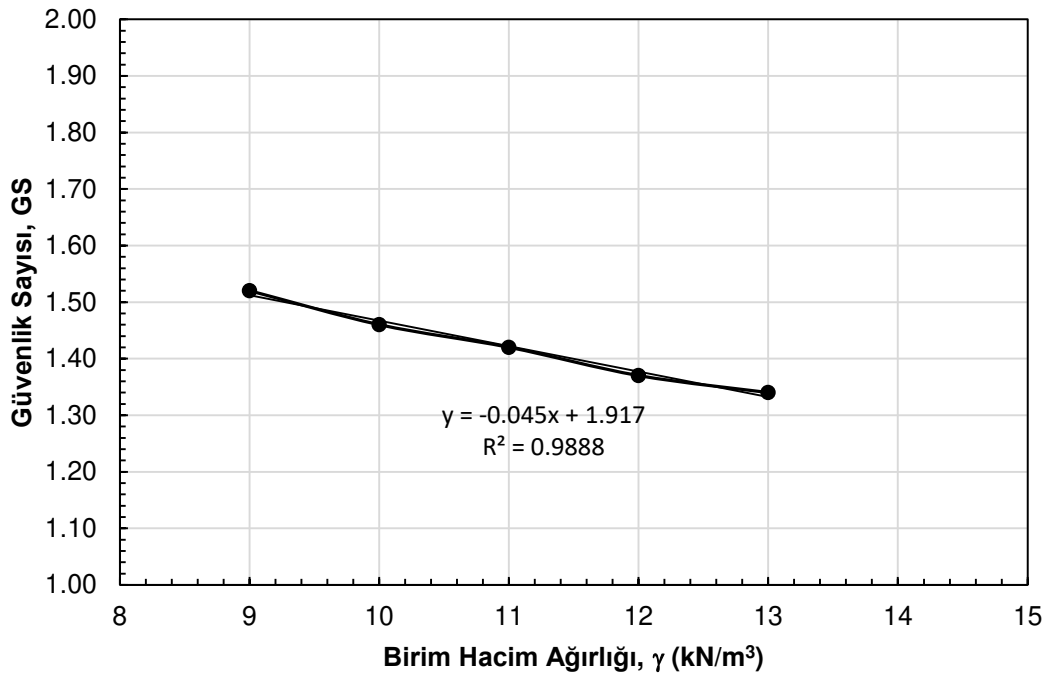
Çizelge 4.6. Farklı Poisson Oranı Değerleri İçin Analiz Sonuçları

ν	GS
0.30	1.50
0.35	1.52
0.40	1.52
0.45	1.52

Poisson Oranı' nın (ν), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ν değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.

- Birim Hacim Ağırlığı (γ) Etkisi

Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı birim hacim ağırlığı değerleri için ($\gamma=9-10-11-12-13\text{kN/m}^3$) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$; kohezyon $c=10\text{kN/m}^2$, dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, elastisite modülü $E=6500\text{ kN/m}^2$, poisson oranı $\nu=0.45$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.14.'de verilmiş; değerler ise, Çizelge 4.7.'de özetlenmiştir.



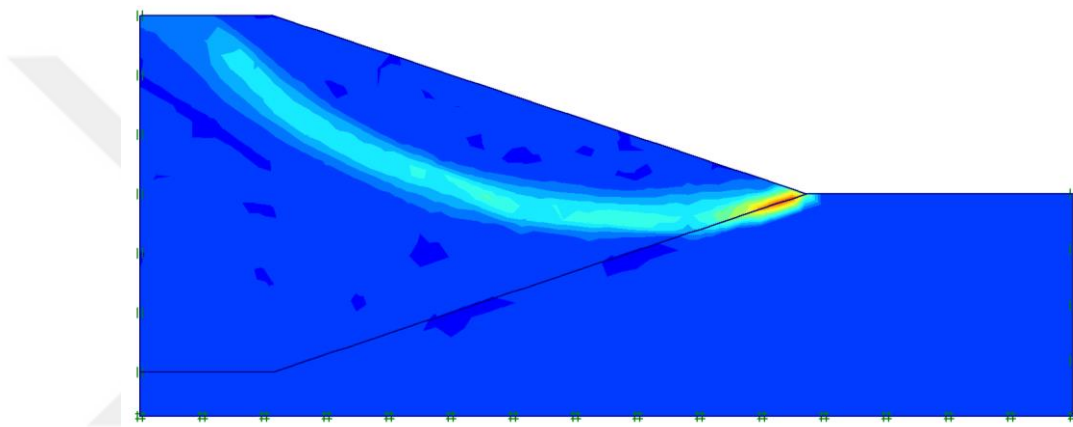
Şekil 4.14. Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.7. Farklı Birim Hacim Ağırlığı Değerleri İçin Analiz Sonuçları

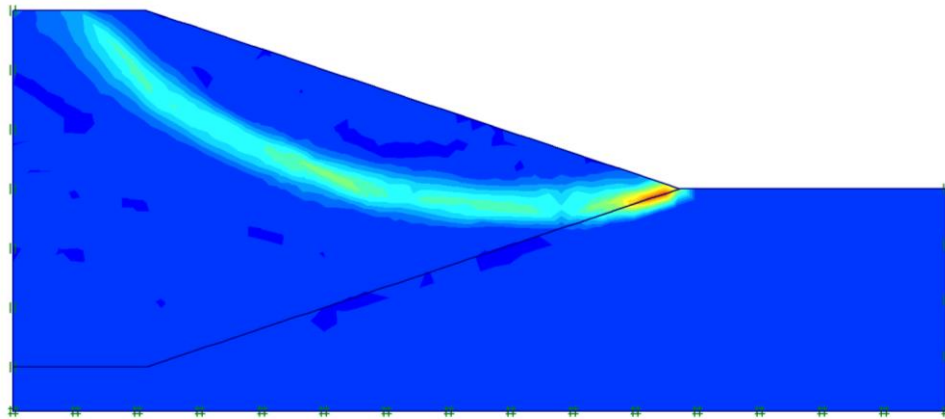
γ (kN/m³)	GS
9	1.52
10	1.46
11	1.42
12	1,37
13	1.34

Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür.

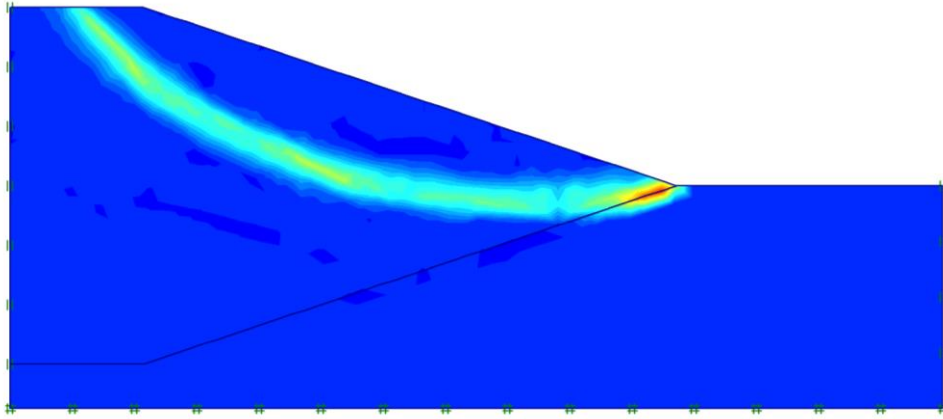
Şekil 4.14. incelendiğinde, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının lineer (doğrusal) olarak azaldığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal azalmanın, γ değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerinin de artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.15.'de farklı birim hacim ağırlık değerleri için analizler sonucunda elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



a) $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$



b) $\gamma = 11 \text{ kN/m}^3$

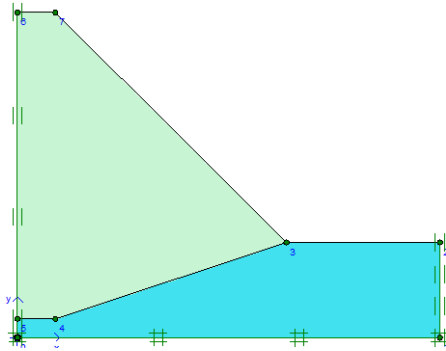


c) $\gamma=13 \text{ kN/m}^3$

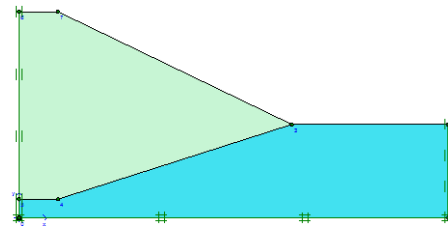
Şekil 4.15. Farklı Birim Hacim Ağırlık Değerleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\gamma=9\text{-}11\text{-}13\text{ kN/m}^3$)

- Şev Açısı (β) Etkisi

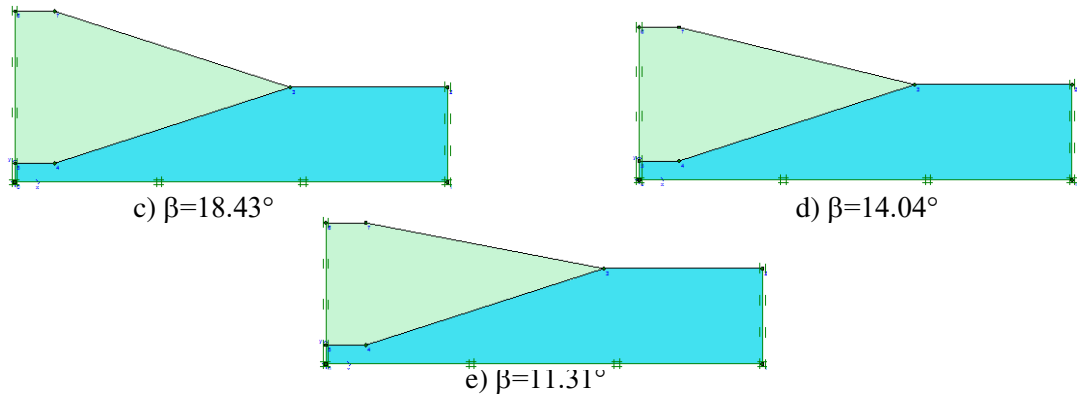
Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı şev açısı değerleri için ($\beta=45^\circ\text{-}26.56^\circ\text{-}18.43^\circ\text{-}14.04^\circ\text{-}11.31^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir. Şev açısı etkisinin analizi için, farklı geometriye sahip şev modelleri (1düşey/1yatay-1düşey/2yatay-1düşey/3yatay-1düşey/4yatay-1düşey/5yatay) oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller Şekil 4.16.'da görülmektedir. Analizlerde, diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10\text{ kN/m}^2$, dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, elastisite modülü $E=6500 \text{ kN/m}^2$, Poisson Oranı $\nu=0.45$ ve birim hacim ağırlık $\gamma=9\text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir. Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.17.'de verilmiş; değerler ise, Çizelge 4.8.'de özetlenmiştir.



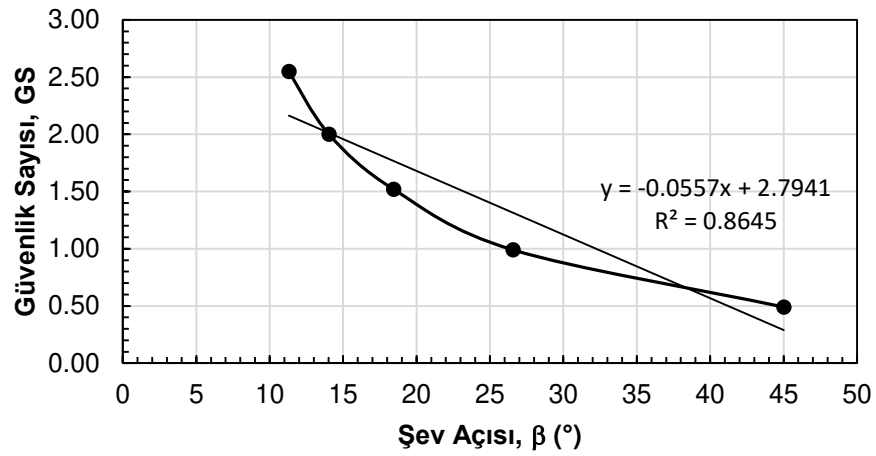
a) $\beta=45^\circ$



b) $\beta=26.56^\circ$



Şekil 4.16. Analizlerde Kullanılan Şev Modelleri



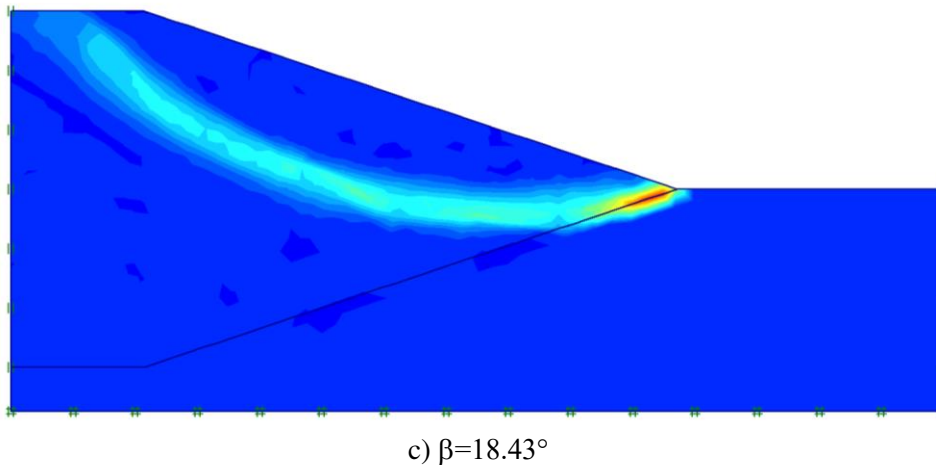
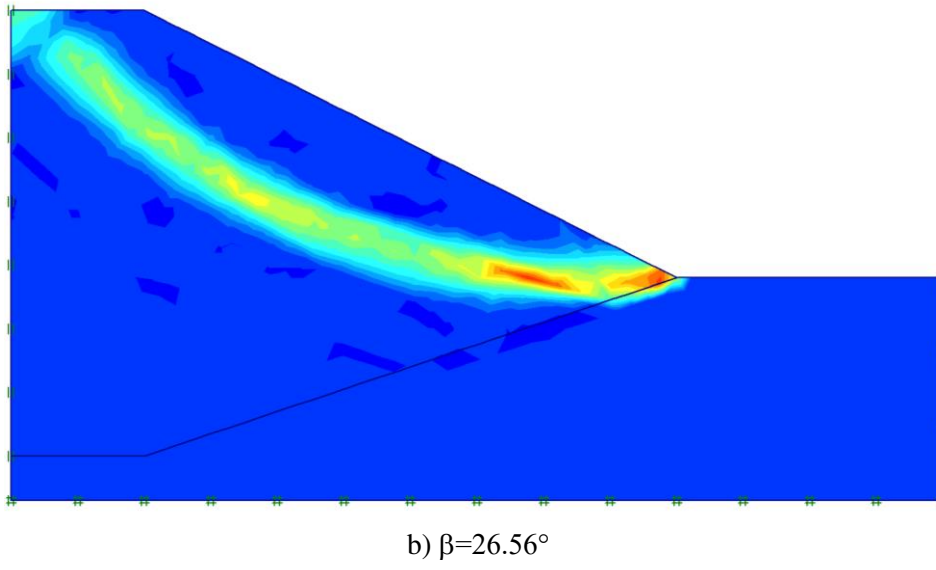
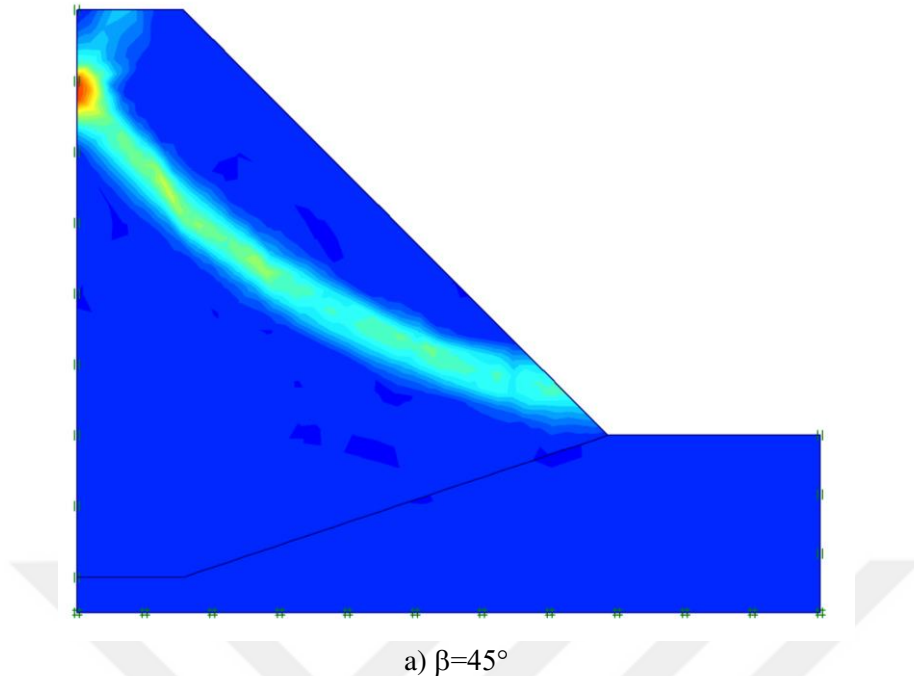
Şekil 4.17. Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

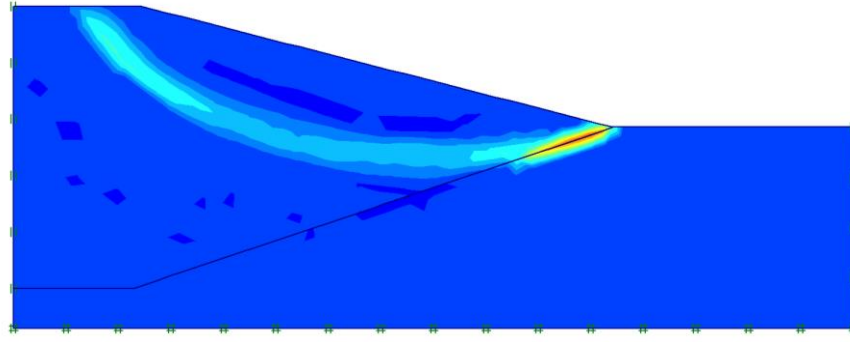
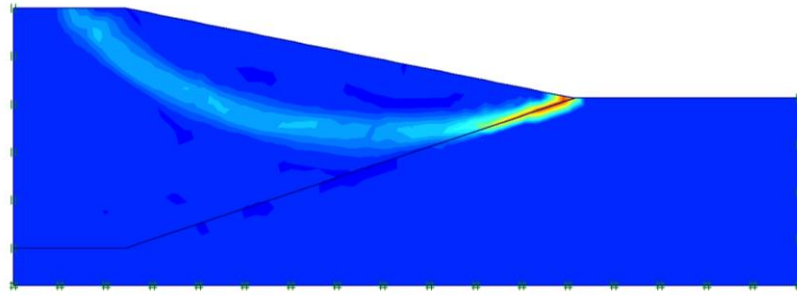
Çizelge 4.8. Farklı Şev Açısı Değerleri İçin Analiz Sonuçları

β (°)	GS
45	0.49
26.56	0.99
18.43	1.52
14.04	2.00
11.31	2.55

Şev açısının (β)şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.18.'de değişik şev açılarında elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.

Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür.



d) $\beta=14.04^\circ$ e) $\beta=11.31^\circ$

Şekil 4.18. Değişik Şev Açılarında Elde Edilen Kayma Yüzeyleri
($\beta=45^\circ-26.56^\circ-18.43^\circ-14.04^\circ-11.31^\circ$)

4.2.6.2. Donatılı Analizler

Bu bölümde, geogrid donatı ile güçlendirilmiş katı atık dolgularının davranışı ile ilgili gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonuçları sunulmuştur. Analizlerde, PLAXIS bilgisayar programı kullanılarak, şev içerisine farklı aralıklarla geogrid donatı yerleştirilmesi durumunun şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

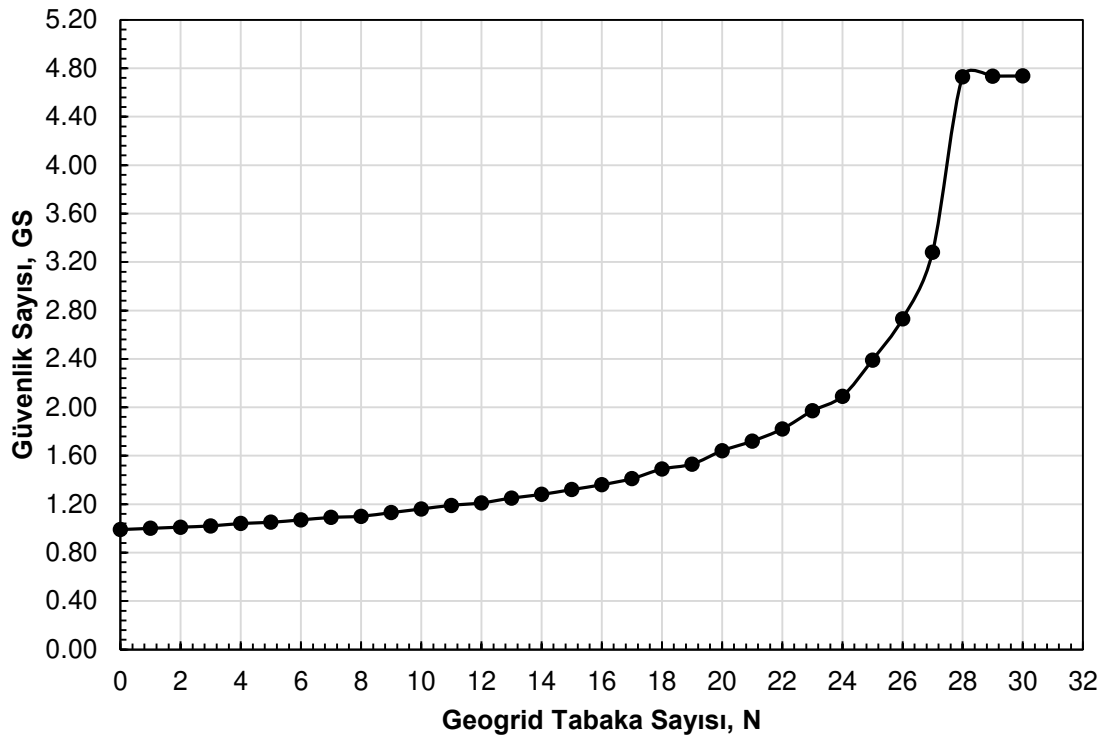
Bu amaçla, daha önceden donatısız durumda gerçekleştirilen analizler sonucunda güvenlik sayısı, $GS=0.99$ olan $\beta=26.56^\circ$ 'lik şev açısına sahip yani 1düşey/2yatay eğimli $H=30$ m. yüksekliğindeki katı atık dolgusu ele alınmış ve içerisine farklı mesafelerde geogrid donatı yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10\text{ kN/m}^2$, dilatasyon açısı $\psi=0^\circ$, elastisite modülü $E=6500\text{ kN/m}^2$, Poisson Oranı $\nu=0.45$ ve birim hacim ağırlık $\gamma=9\text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir. Geogrid aralıkları (h), şev yüksekliğinin (H) belli oranları şeklinde alınmış ve H/h cinsinden boyutsuz hale getirilmiştir.

- **H/h=30 Durumu (Geogrid Aralığı h=1 m.)**

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içerisinde h=1 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=30 adet (N=donatı tabaka sayısı) geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.9.'da, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.19.'da görülmektedir.

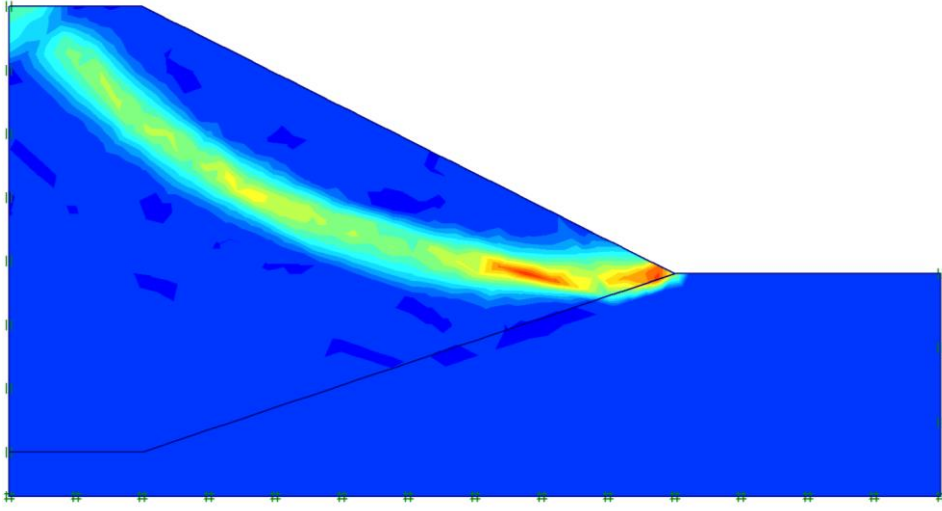
Çizelge 4.9. H/h=30, N=30 İçin Analiz Sonuçları

N	GS	N	GS
0 (donatısız)	0.99	16	1.36
1	1.00	17	1.41
2	1.01	18	1.49
3	1.02	19	1.53
4	1.04	20	1.64
5	1.05	21	1.72
6	1.07	22	1.82
7	1.09	23	1.97
8	1.10	24	2.09
9	1.13	25	2.39
10	1.16	26	2.73
11	1.19	27	3.28
12	1.21	28	4.73
13	1.25	29	4.74
14	1.28	30	4.74
15	1.32		

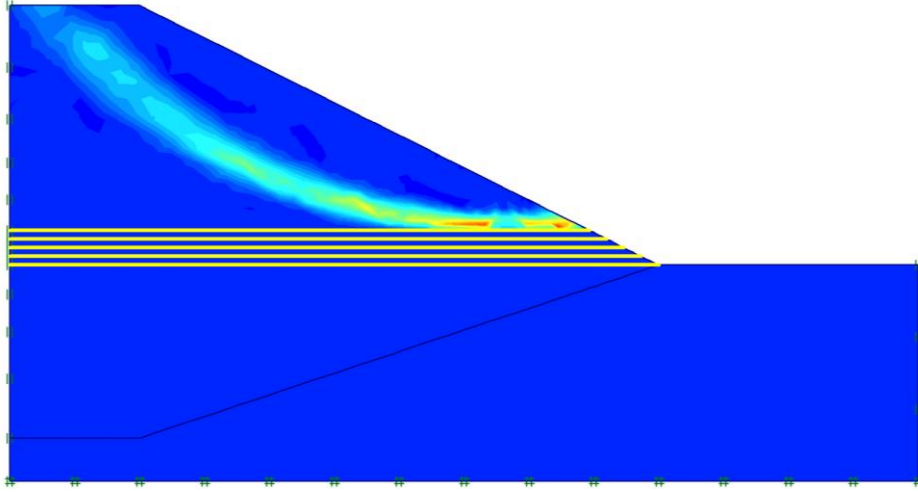


Şekil 4.19. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=1 m.)

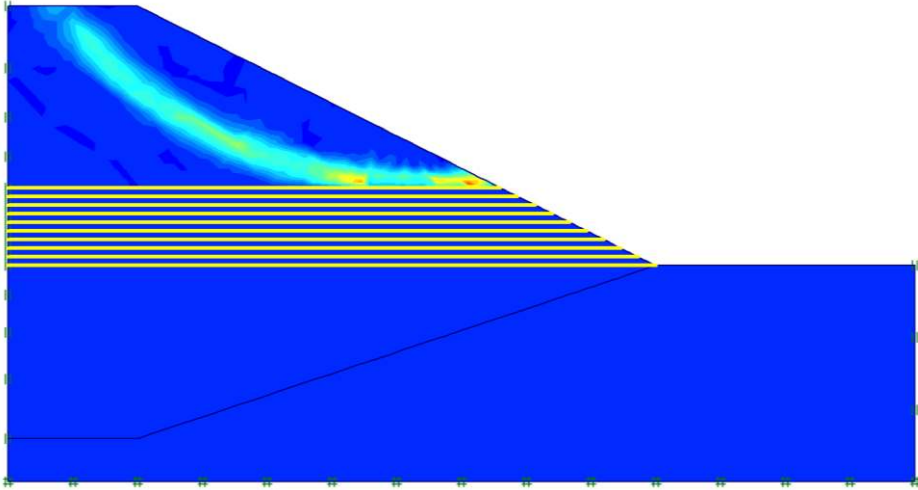
Çizelge 4.9. ve Şekil 4.19. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 1 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=4.74$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 4.78 kat artmaktadır. Şekil 4.19. incelendiğinde, $N=18$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır. Bu durum geogridlerin sahip olduğu yüksek çekme mukavemetinden kaynaklanmaktadır. Geogrid donatılar kayma yüzeyinin topuk bölgesine doğru hareket etmesini önlemekte ve donatısız duruma göre daha dar ve ince bir kayma yüzeyi oluşmakta ve bu durum güvenlik sayısının artmasını sağlamaktadır (Şekil 4.20.).



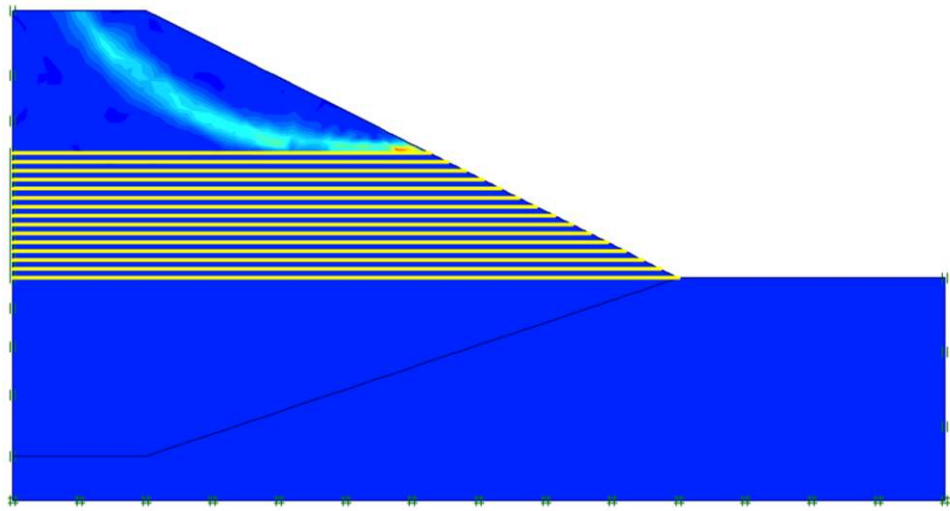
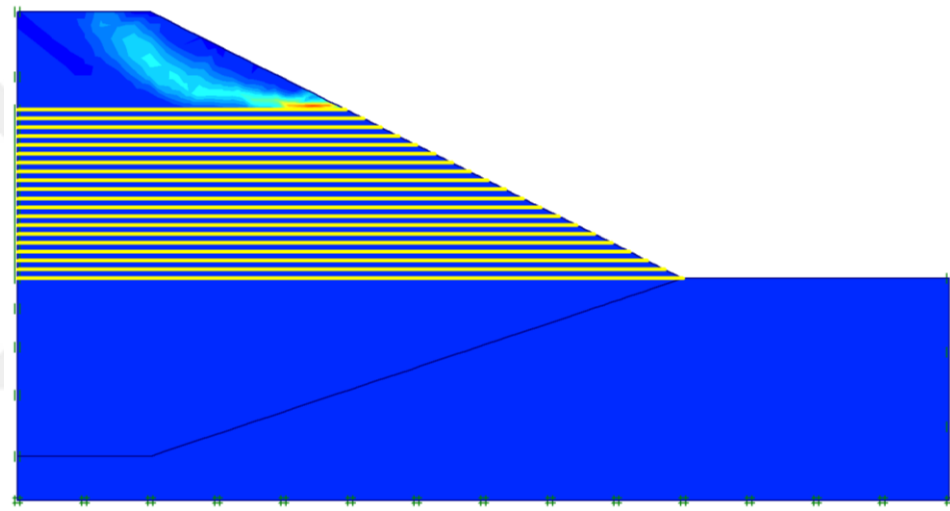
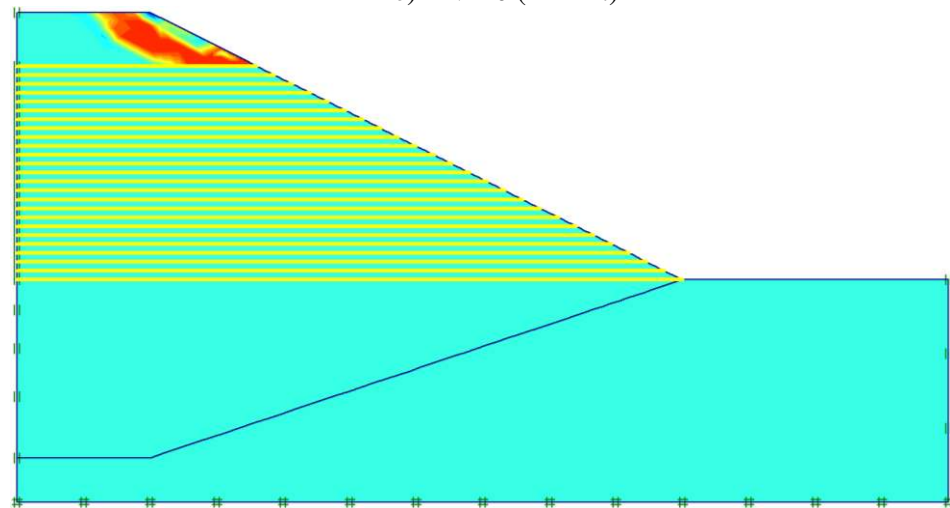
a) Donatısız

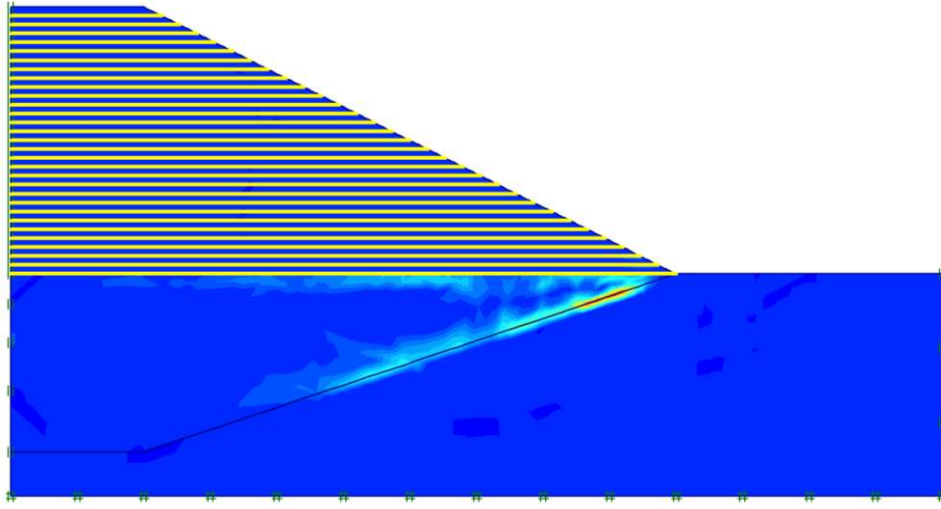


b) $N=5$ ($h=1$ m.)



c) $N=10$ ($h=1$ m.)

d) $N=15$ ($h=1$ m.)e) $N=20$ ($h=1$ m.)f) $N=25$ ($h=1$ m.)

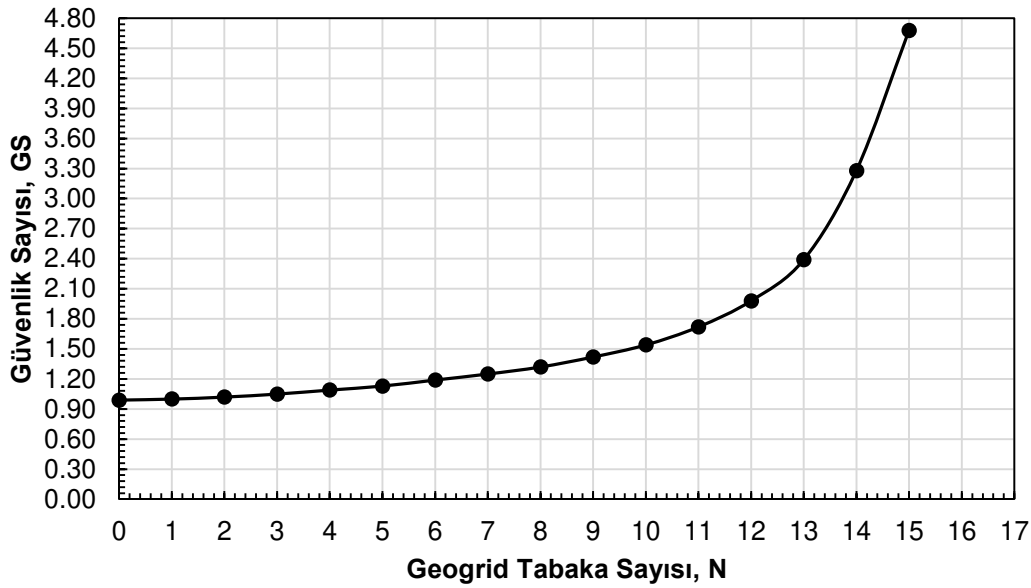


g) $N=30$ ($h=1$ m.)

Şekil 4.20. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre ($h=1$ m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($N=5,10,15,20,25,30$)

- $H/h=15$ Durumu (Geogrid Aralığı $h=2$ m.)

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu şevi içerisine $h=2$ m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam $N=15$ adet geogrid için elde edilen Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi Şekil 4.21.'de güvenlik sayısı değerleri ise Çizelge 4.10.'da görülmektedir.

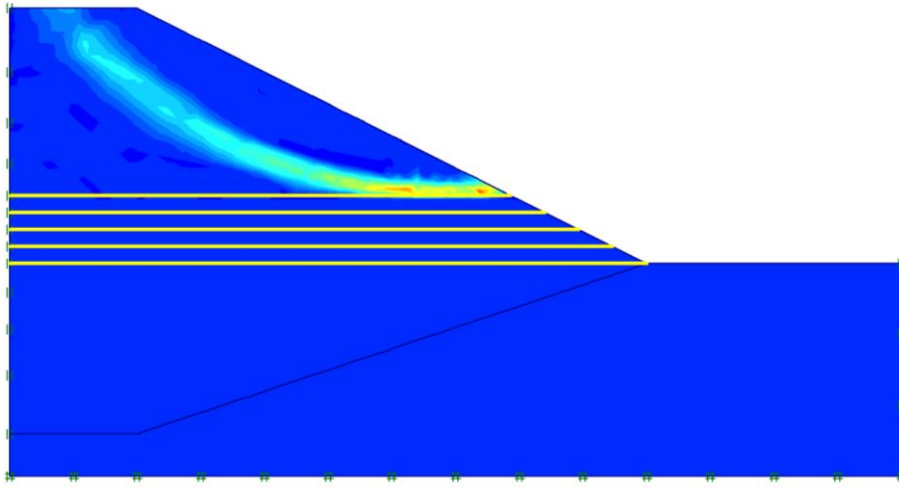


Şekil 4.21. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi ($h=2$ m.)

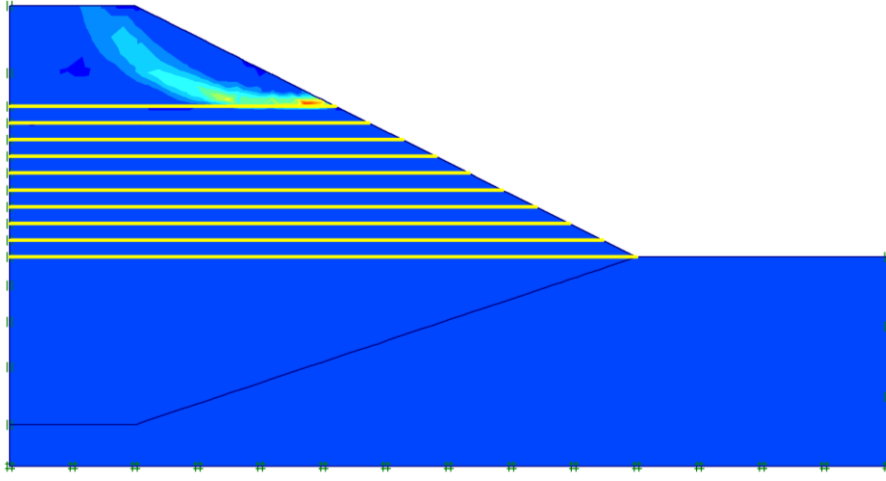
Çizelge 4.10. H/h=15, N=15
İçin Analiz Sonuçları

N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.02
3	1.05
4	1.09
5	1.13
6	1.19
7	1.25
8	1.32
9	1.42
10	1.54
11	1.72
12	1.98
13	2.39
14	3.28
15	4.68

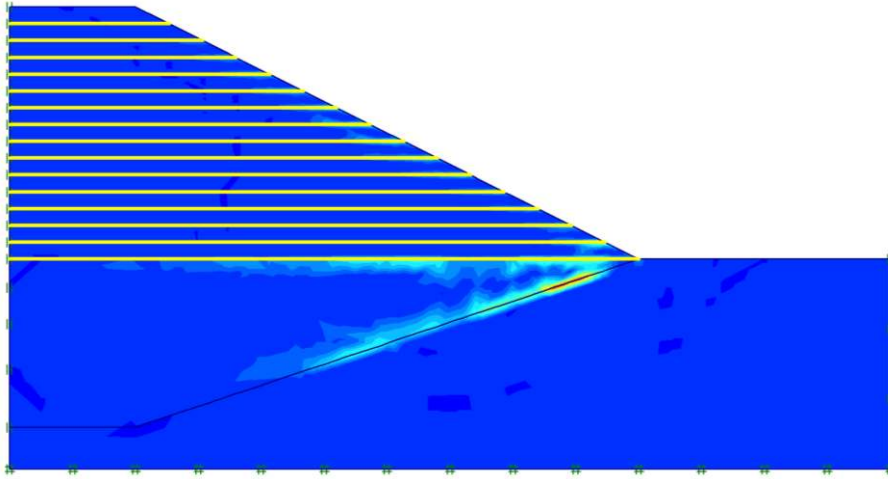
Şekil 4.21. ve Çizelge 4.10. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 2 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin GS=4.68 değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre (GS=0.99) yaklaşık 4.72 kat artmaktadır. Şekil 4.21. incelendiğinde, N=10 tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.22.).



a) $N=5$ ($h=2$ m.)



b) $N=10$ ($h=2$ m.)



c) $N=15$ ($h=2$ m.)

şekil 4.22. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre ($h=2$ m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($N=5,10,15$)

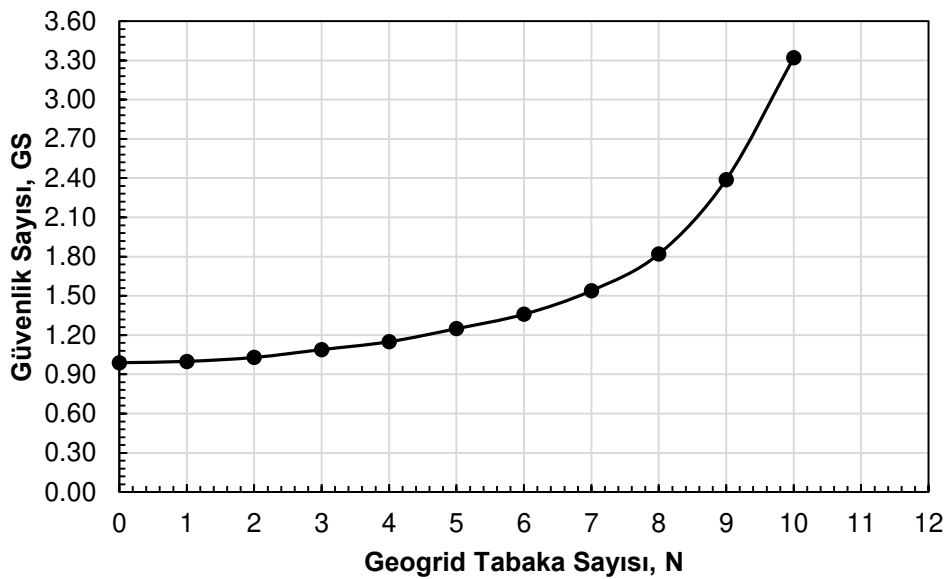
- **H/h=10 Durumu (Geogrid Aralığı h=3 m.)**

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu şevi içerisine h=3 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=10 adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.11.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.23.'de görülmektedir.

Çizelge 4.11. H/h=10, N=10

İçin Analiz Sonuçları

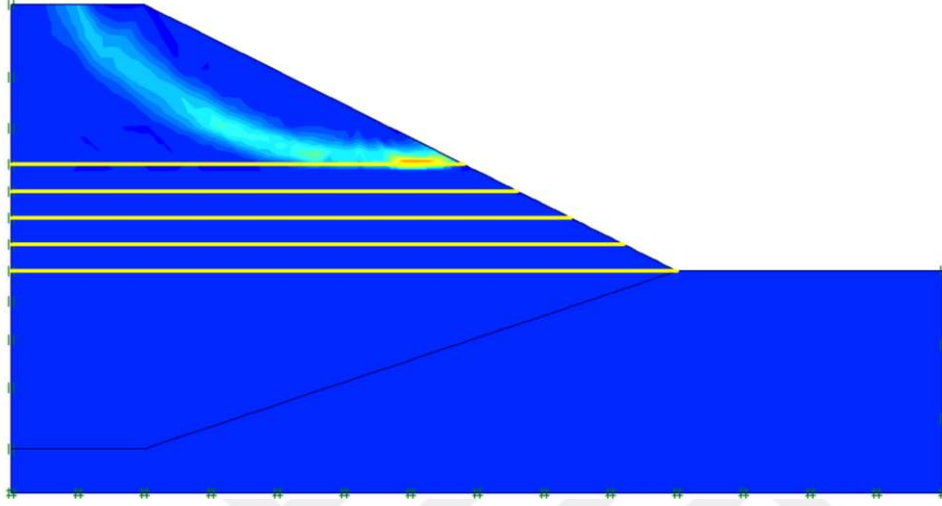
N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.03
3	1.09
4	1.15
5	1.25
6	1.36
7	1.54
8	1.82
9	2.39
10	3.32



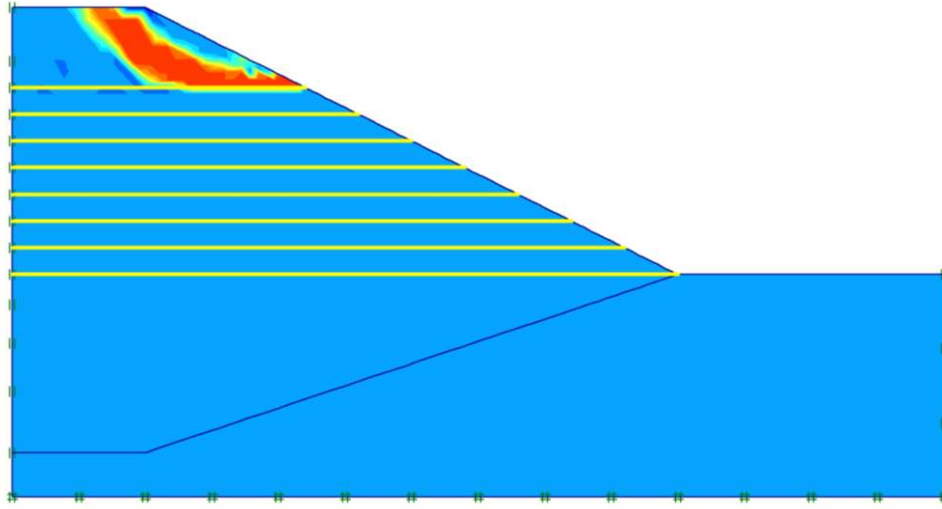
Şekil 4.23. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=3 m.)

Çizelge 4.11. ve Şekil 4.23. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 3 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin GS=3.32 değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre (GS=0.99) yaklaşık 3.35 kat artmaktadır.

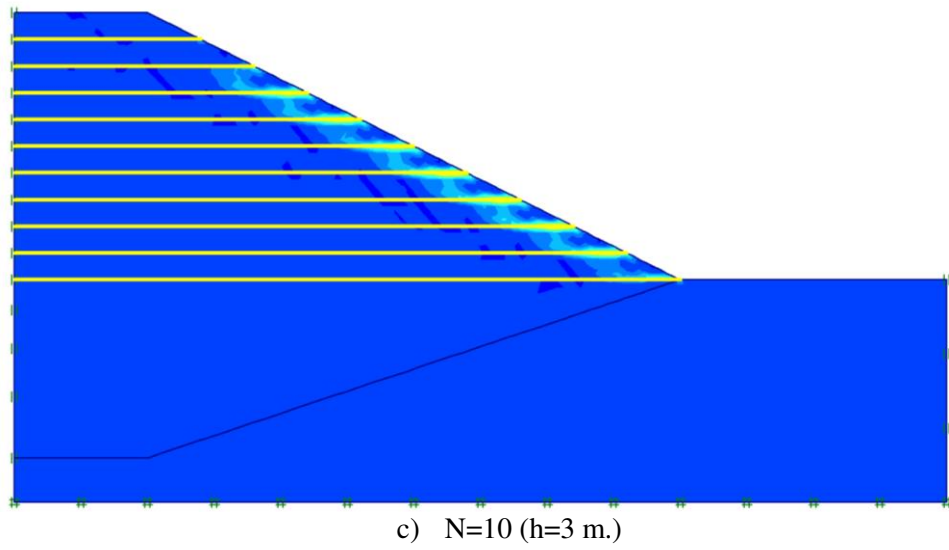
Şekil 4.23. incelendiğinde, $N=6$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.24.).



a) $N=5$ ($h=3$ m.)



b) $N=8$ ($h=3$ m.)



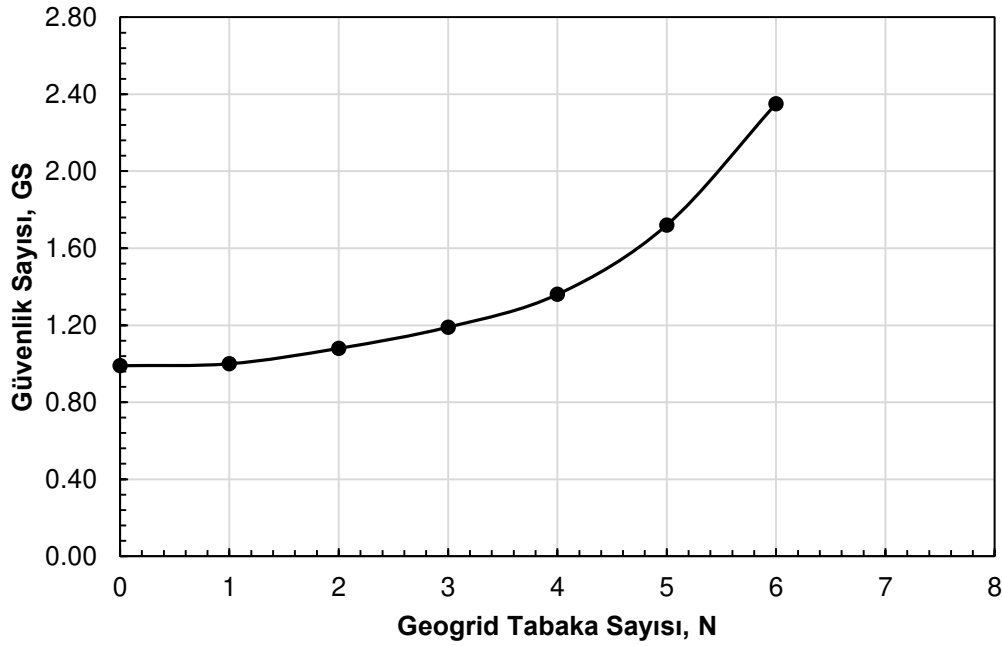
Şekil 4.24. Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre (h=3 m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=5,8,10)

- H/h=6 Durumu (Geogrid Aralığı h=5 m.)

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içerisinde h=5 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=6 adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.12.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.25.' de görülmektedir.

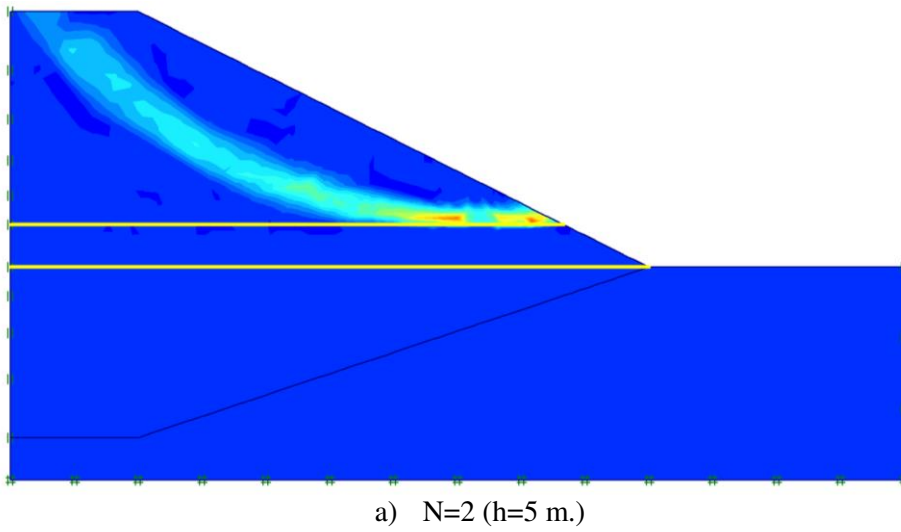
Çizelge 4.12. H/h=6, N=6 İçin Analiz Sonuçları

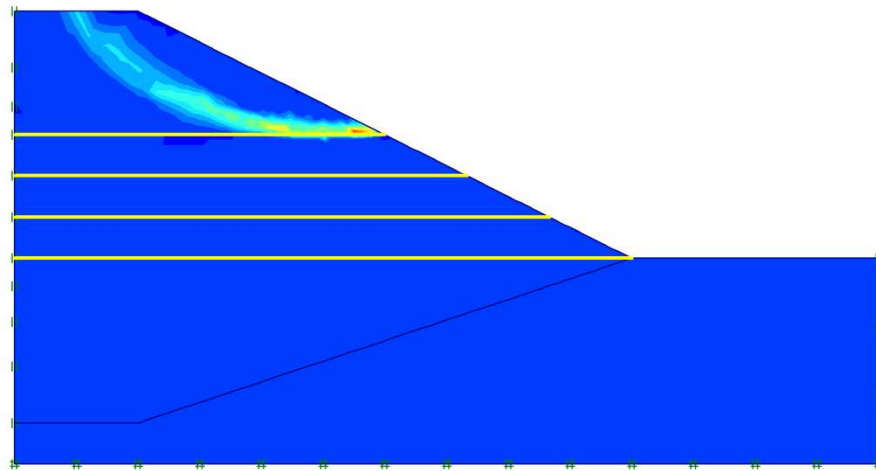
N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.08
3	1.19
4	1.36
5	1.72
6	2.35



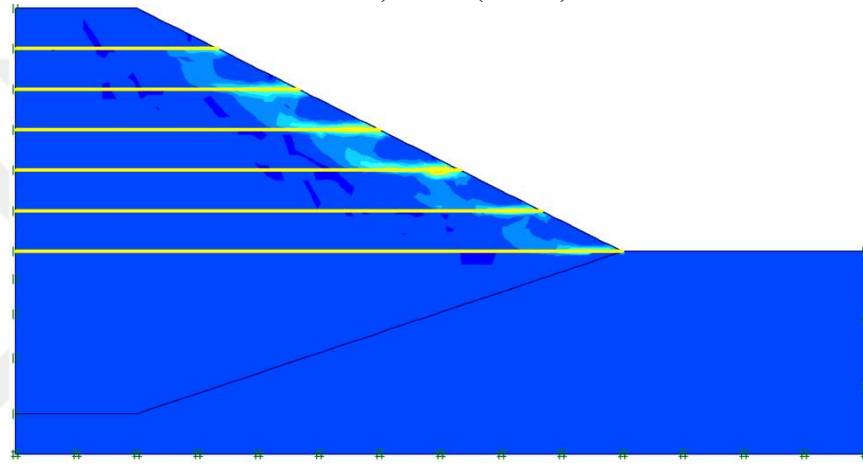
Şekil 4.25. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=5 m.)

Çizelge 4.12. ve Şekil 4.25. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 5 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=2.35$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 2.35 kat artmaktadır. Şekil 4.25. incelendiğinde, $N=2$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.26.)





b) N=4 (h=5m.)



c) N=6 (h=5m.)

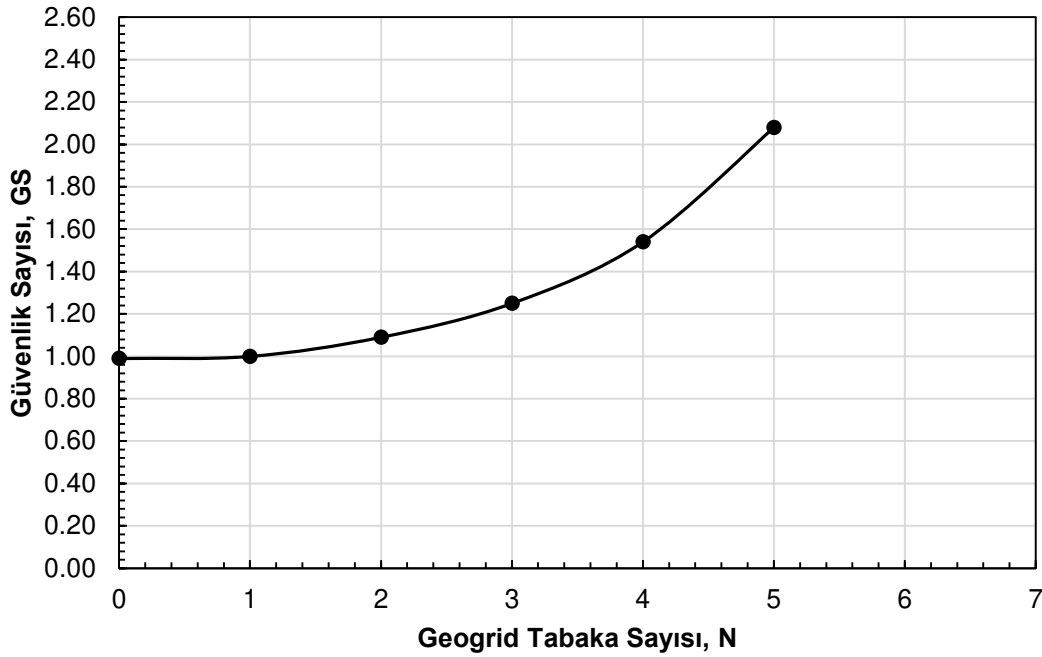
Şekil 4.26. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre (h=5 m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,4,6)

- H/h=5 Durumu (Geogrid Aralığı h=6 m.)

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içerisinde h=6 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=5 adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.13.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.27.'de görülmektedir.

Çizelge 4.13. H/h=5, N=5 İçin Analiz Sonuçları

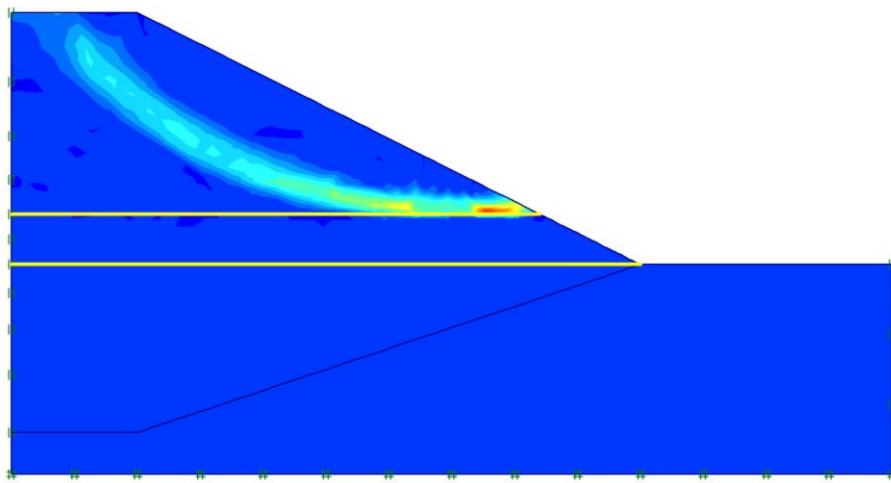
N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.09
3	1.25
4	1.54
5	2.08



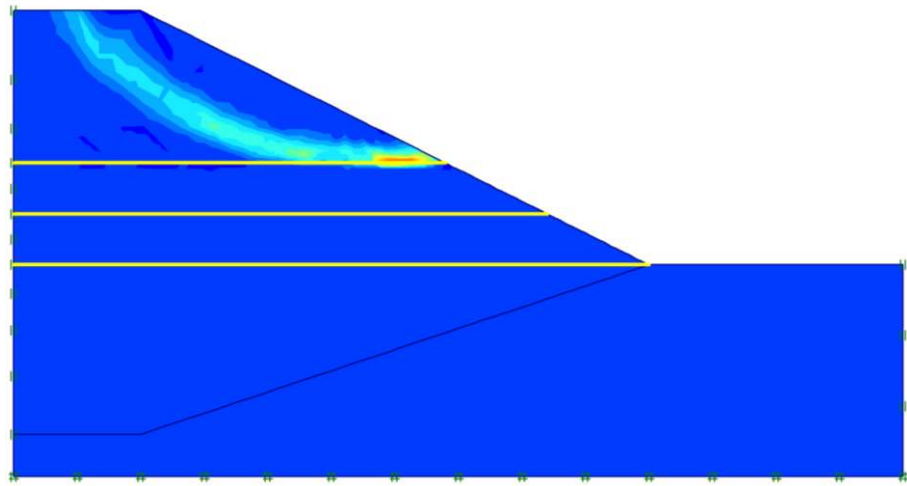
Şekil 4.27. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=6 m.)

Çizelge 4.13. ve Şekil 4.27. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 6 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=2.08$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 2.10 kat artmaktadır.

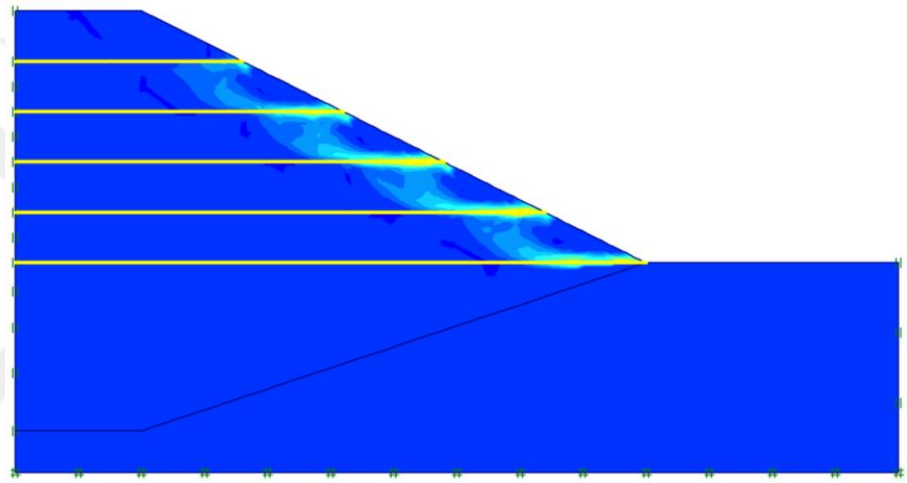
Şekil 4.27. incelendiğinde, ilk tabaka için güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.28.).



a) $N=2$ (h=6 m.)



b) N=3 (h=6 m.)



c) N=5 (h=6 m.)

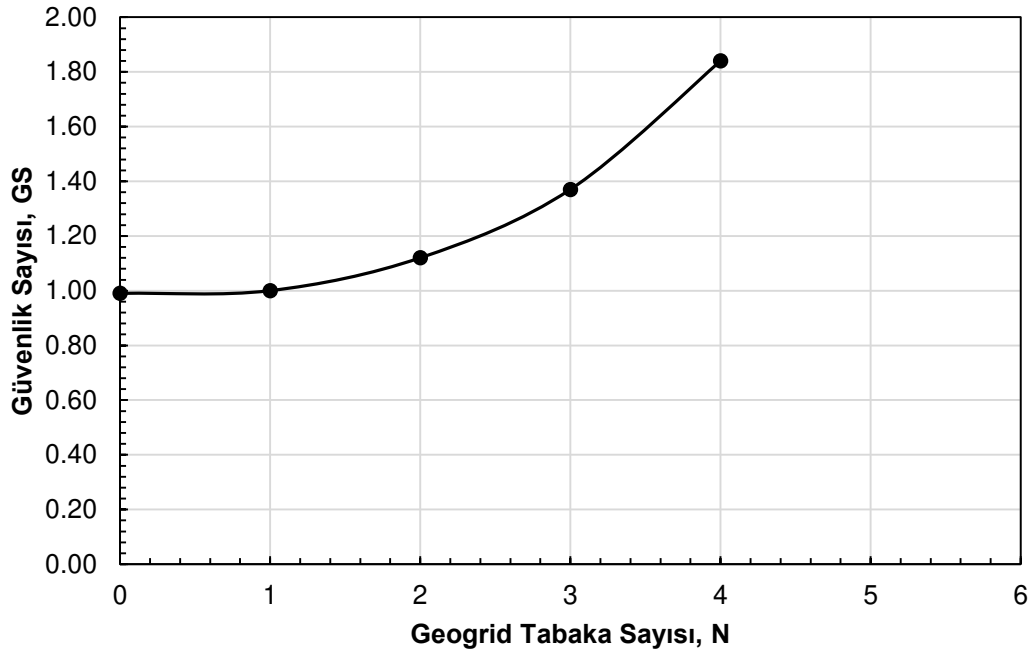
Şekil 4.28. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre (h=6 m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,3,4)

- **H/h=4 Durumu (Geogrid Aralığı h=7.5 m.)**

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içersine h=7.5 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=4 adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.14.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.29.'de görülmektedir.

Çizelge 4.14. H/h=4, N=4 İçin Analiz Sonuçları

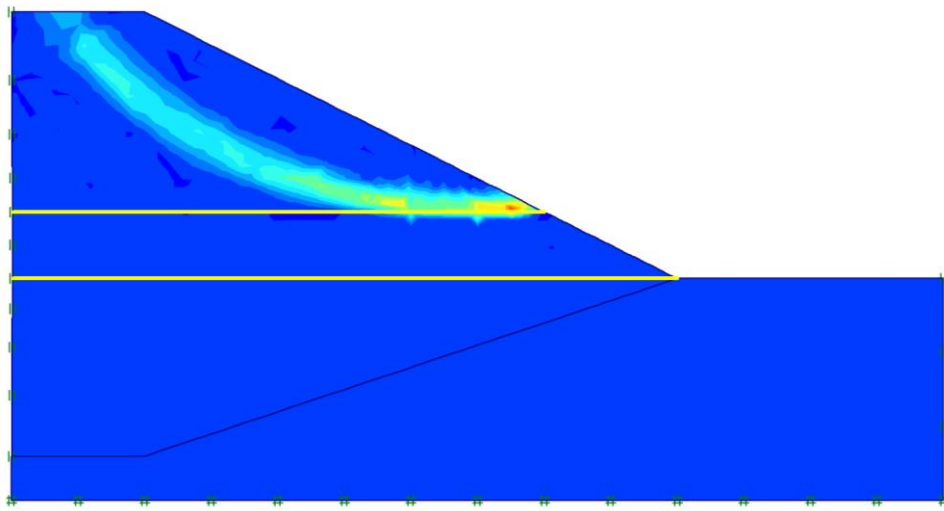
N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.12
3	1.37
4	1.84



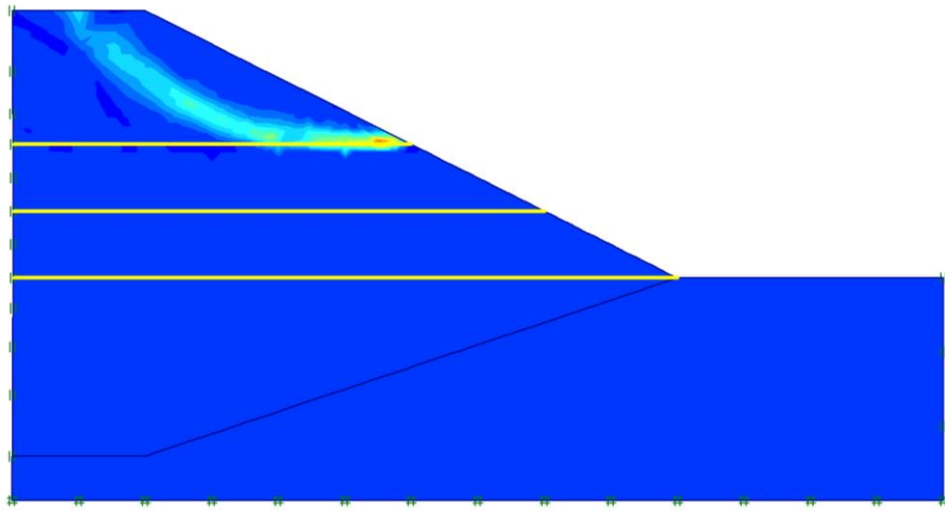
Şekil 4.29. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi (h=7.5 m.)

Çizelge 4.14. ve Şekil 4.29. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 7.5 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin GS=1.84 değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür.

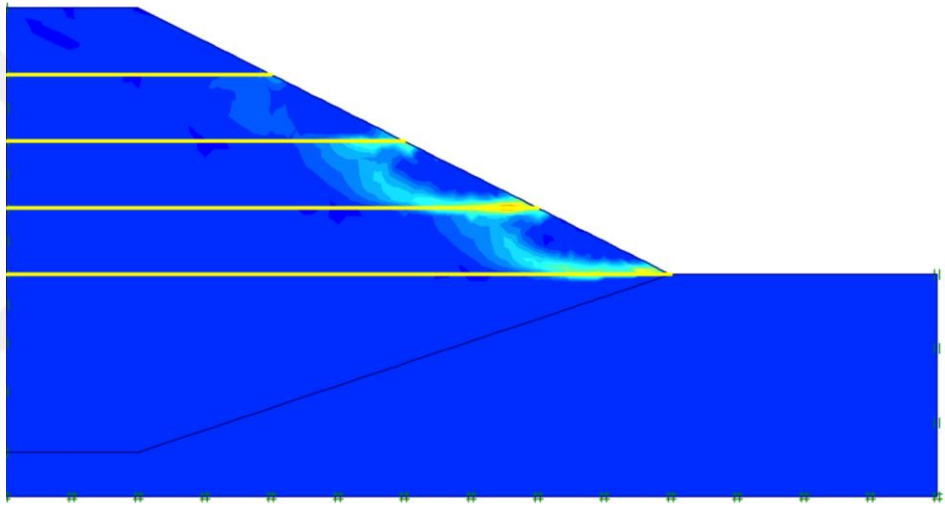
Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre (GS=0.99) yaklaşık 1.86 kat artmaktadır. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.30.).



a) N=2 (h=7.5 m.)



a) N=3 (h=7.5 m.)



b) N=4 (h=7.5 m.)

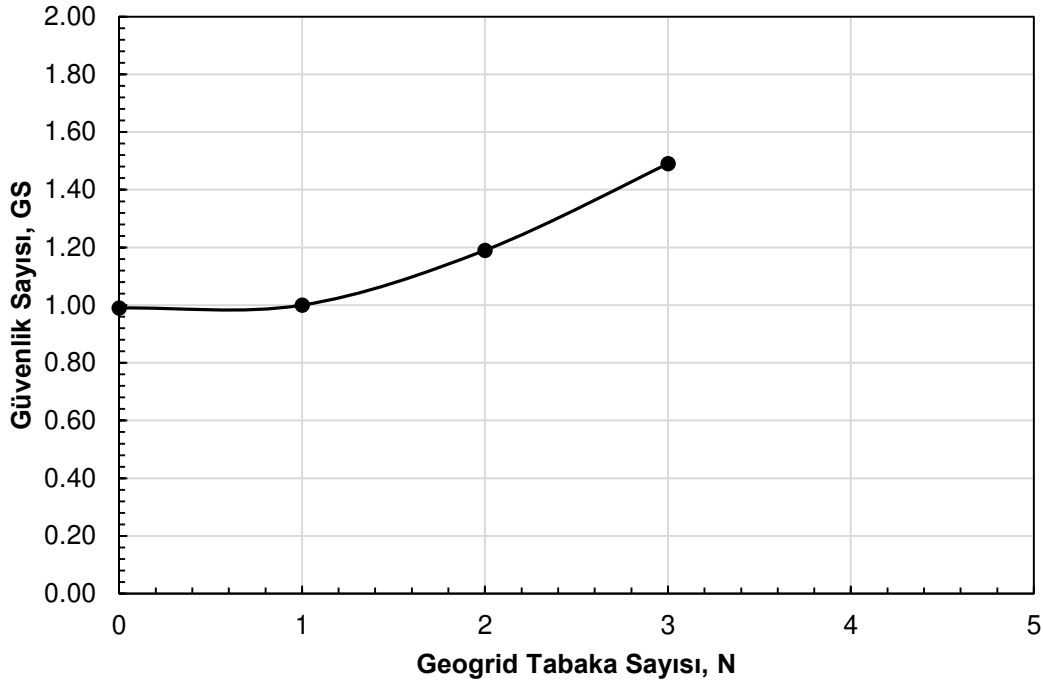
Şekil 4.30. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre (h=7.5 m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (N=2,3,4)

- H/h=3 Durumu (Geogrid Aralığı h=10 m.)

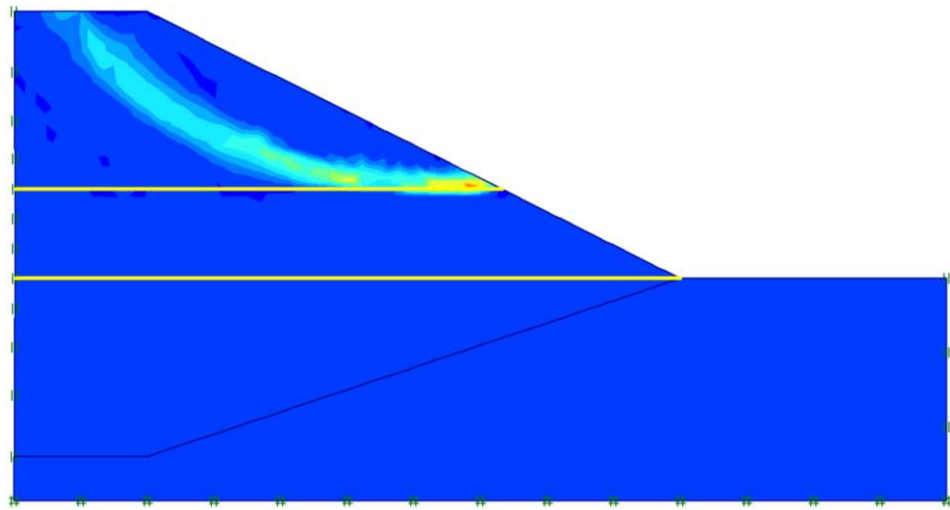
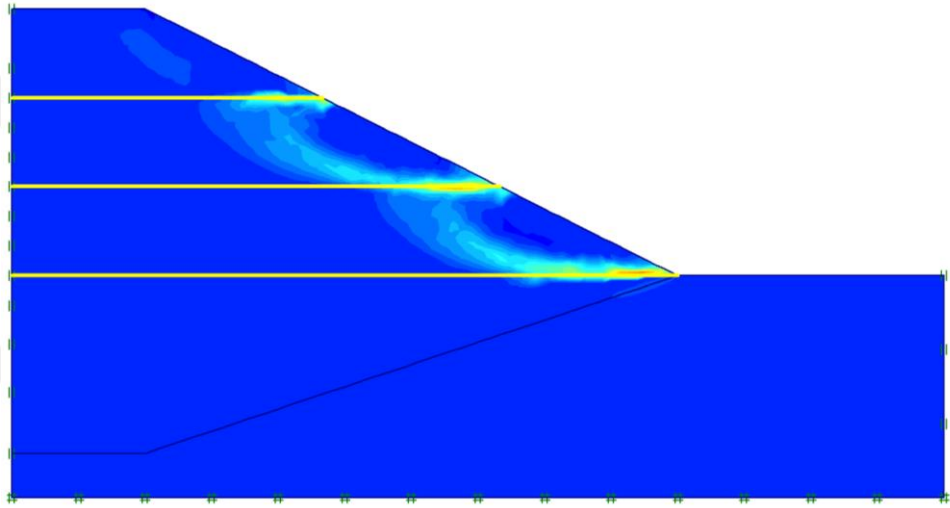
Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içersine h=10 m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam N=3 adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.15.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.31.'de görülmektedir.

Çizelge 4.15. $H/h=3$, $N=3$ İçin Analiz Sonuçları

N	GS
0 (donatısız)	0.99
1	1.00
2	1.19
3	1.49

**Şekil 4.31.** Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi ($h=10$ m.)

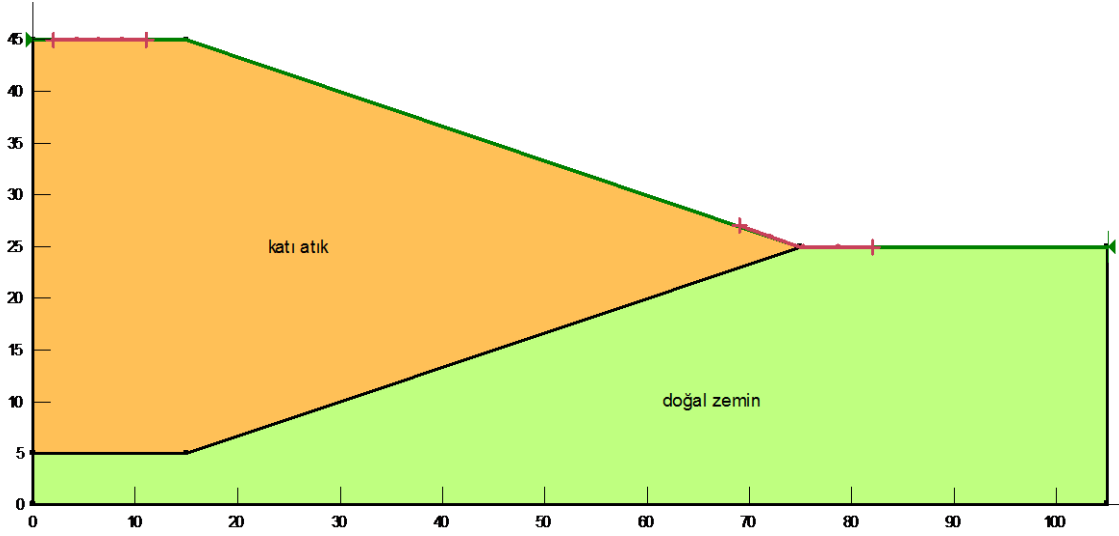
Çizelge 4.15. ve Şekil 4.31. incelendiğinde, şev içerisine, geogrid donatılarının 10 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=1.49$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 1.50 kat artmaktadır. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır (Şekil 4.32.).

b) $N=2$ ($h=10$ m.)c) $N=3$ ($h=10$ m.)

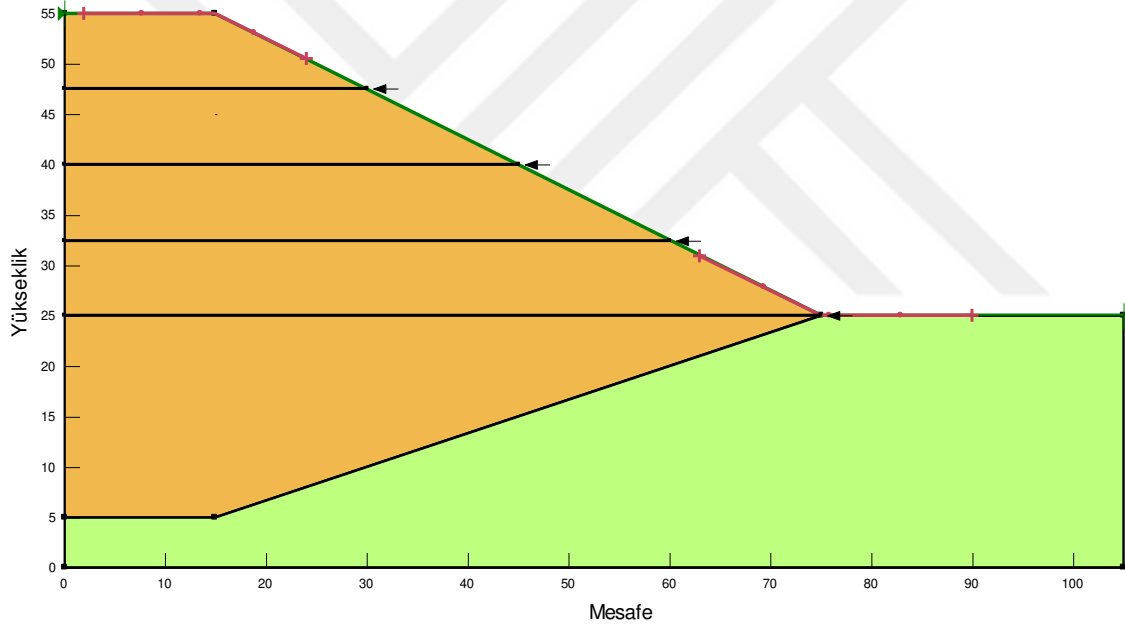
Şekil 4.32. Değişik Geogrid Donatılarının Tabaka Sayılarına Göre ($h=10$ m.)
Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($N=2,3$)

4.3. Limit Denge Yöntemi Analiz Sonuçları

Analizler, limit denge yöntemi ile çözüm yapan Geostudio-SLOPE/W bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Bölüm 4.1 deki geometrik model baz alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Analizlerde kolaylık sağlaması açısından geometrik modelin simetrisinden yararlanılmıştır. Hesaplamalarda Bishop ve half-sine function yöntemleri seçilmiştir. Ayrıca Ordinary, Spencer, Morgenstern-Price ve Janbu yöntemlerinden de birer analiz yapılarak güvenlik sayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.33.'de oluşturulan donatısız ve donatılı modelin geometrileri görülmektedir.



(a) Donatısız Model



(b) Donatılı Model

Şekil 4.33. Geometrik Modelin Oluşturulması (a) Donatısız (b) Donatılı Model

4.3.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Analizlerde Mohr-Coulomb yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile gerekli olan içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) ve birim hacim ağırlık (γ) parametreleri örnek modelden alınmıştır. Söz konusu değerler programa girilerek analizler yapılmıştır.

4.3.2. Dairesel Kayma Yüzeyi

Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra kayma yüzeyi modeli tanımlanmıştır. SLOPE/W programında daireysel ve blok kayma olmak üzere iki göçme tipi bulunmaktadır. Şev analizlerinde daireysel kayma yüzeyi modeli kullanılmıştır.

Dairesel kayma yüzeyini belirlemede birçok yöntem olmasına rağmen entry and exit method kullanılmıştır. Bu metodun kullanılma nedeni ise kayma yüzeylerinin başlangıç ve bitiş bölgelerinin net olarak belirlenebilmesidir. Ayrıca bu yöntemle kayma yüzeylerinin kapsamalarının veya aralıklarının belirlenmesinde daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

4.3.3. Analiz Sonuçları

Bu bölümde, donatısız ve donatı ile güçlendirilmiş katı atık dolgularının şev ile ilgili gerçekleştirilen limit denge yöntemi analizlerinin sonuçları sunulmaktadır.

4.3.3.1. Donatısız Analizler

Bu bölümde, ilk olarak donatısız katı atık dolgularının davranışı ile limit denge yöntemlerinden Ordinary, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu ve Bishop yöntemleriyle birer analiz yapılarak analiz yöntemi belirlenmiştir.

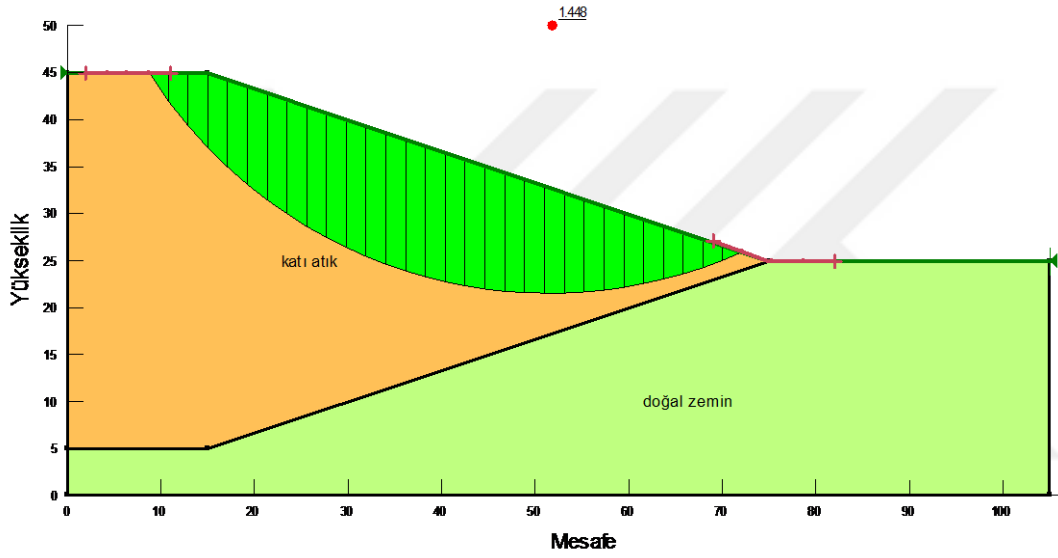
Daha sonraki aşamada yine aynı paket bilgisayar programı kullanılarak, içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), birim hacim ağırlık (γ) ve şev açısı (β) parametrelerinin şev stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

- Analiz Yöntemi

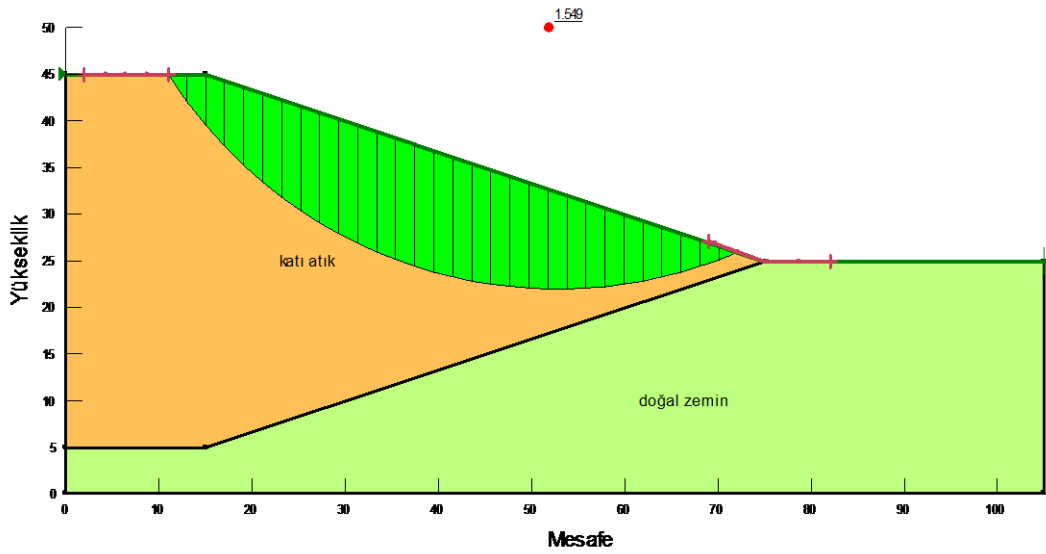
Analiz yönteminin belirlenmesi için Ordinary, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu ve Bishop yöntemlerinden birer analiz yapılmıştır. Analizlerde içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10$ kN/m², birim hacim ağırlık $\gamma=9$ kN/m³ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Analiz yöntemi – Güvenlik Sayısı (GS) değerleri Çizelge 4.16.'da, verilmiştir. Her bir yöntemde elde edilen kritik kayma yüzeyleri Şekil 4.34.'de verilmiştir. Daha sonraki analizler, daha güvenilir sonuçlar verdiğinden Bishop yöntemi ile yapılmıştır.

Çizelge 4.16. Farklı Analiz Yöntemi Sonucu Elde Edilen Güvenlik Sayıları

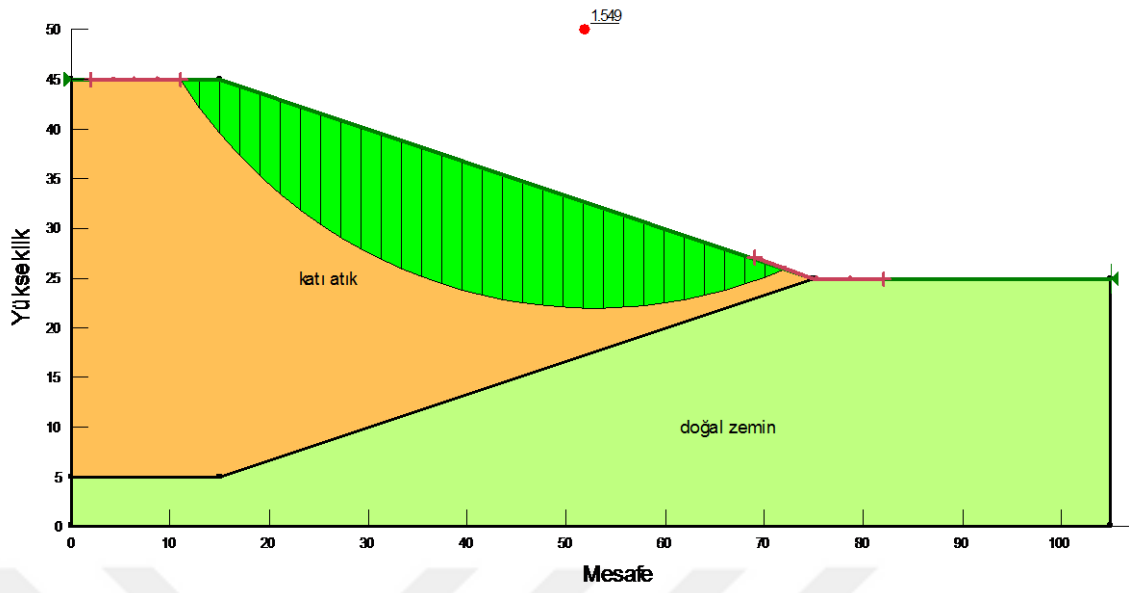
Analiz Yöntemi	GS
Ordinary	1.448
Spencer	1.549
Morgenstern-Price	1.549
Janbu	1.415
Bishop	1.552



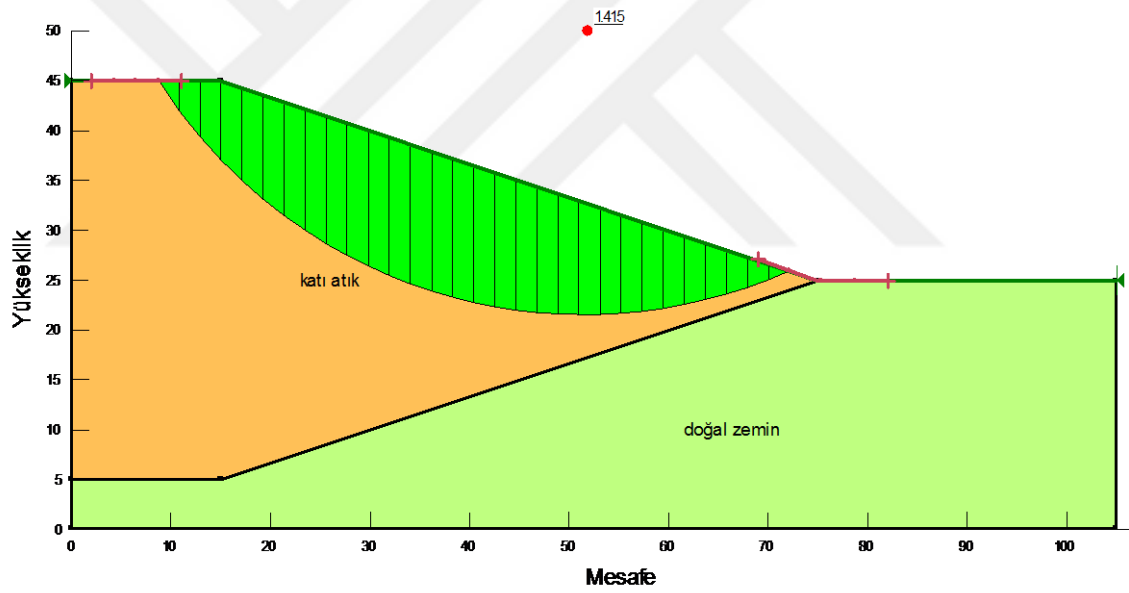
a) Ordinary



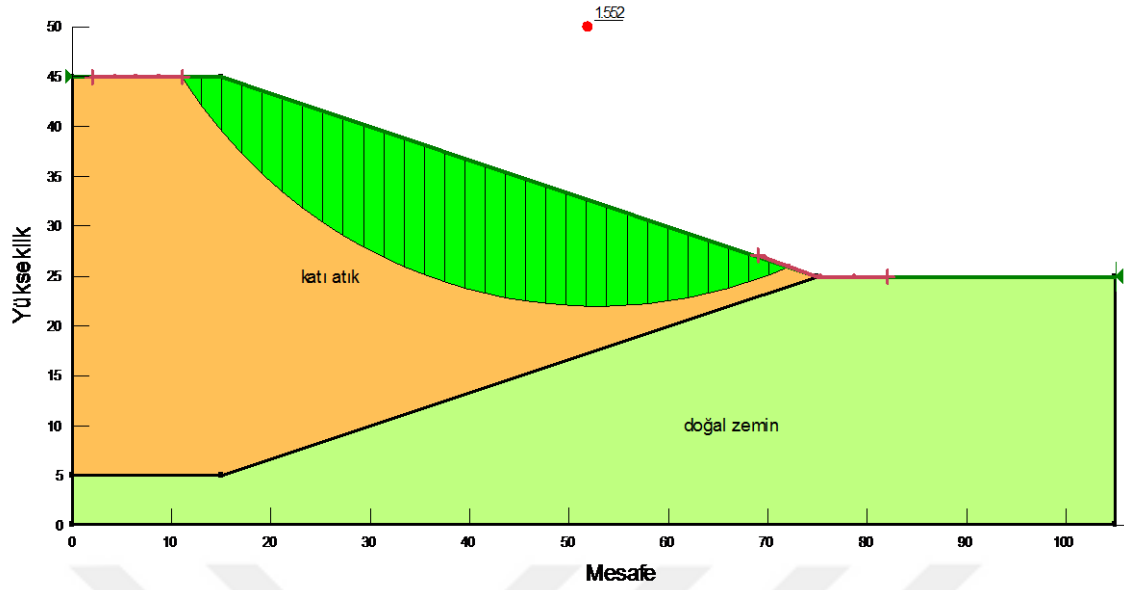
b) Spencer



c) Morgenstern-Price



d) Janbu



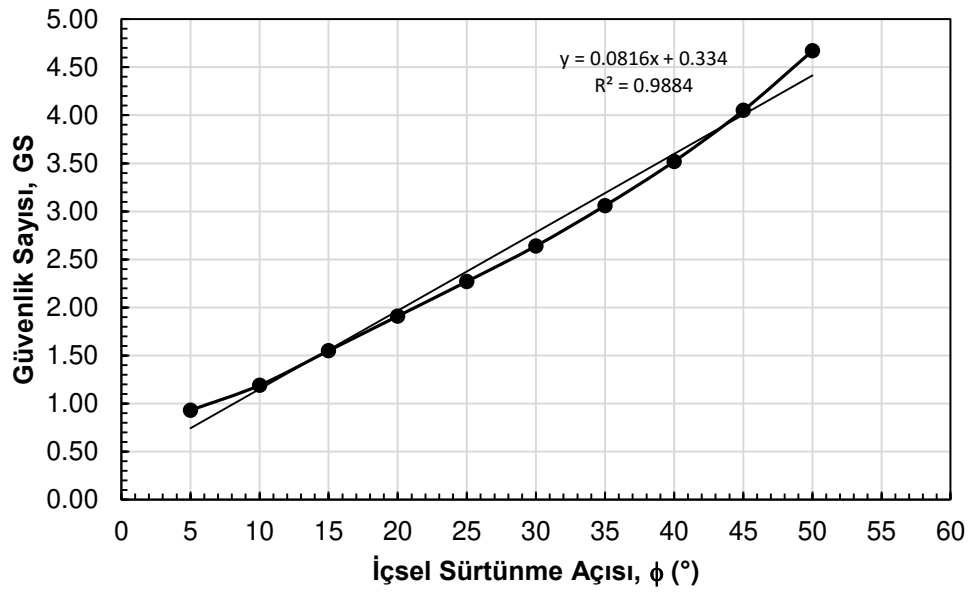
e) Bishop

Şekil 4.34. Farklı Analiz Yöntemleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri (Ordinary, Spencer, Morgenstern-Price, Janbu, Bishop)

- İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) Etkisi

İçsel sürtünme açısının (ϕ) şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı içsel sürtünme açısı değerleri için ($\phi=5^\circ-10^\circ-15^\circ-20^\circ-25^\circ-30^\circ-35^\circ-40^\circ-45^\circ-50^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, diğer parametreler kohezyon $c=10 \text{ kN/m}^2$, birim hacim ağırlık $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.35.'de, değerler ise, Çizelge 4.17.'de özetlenmiştir.

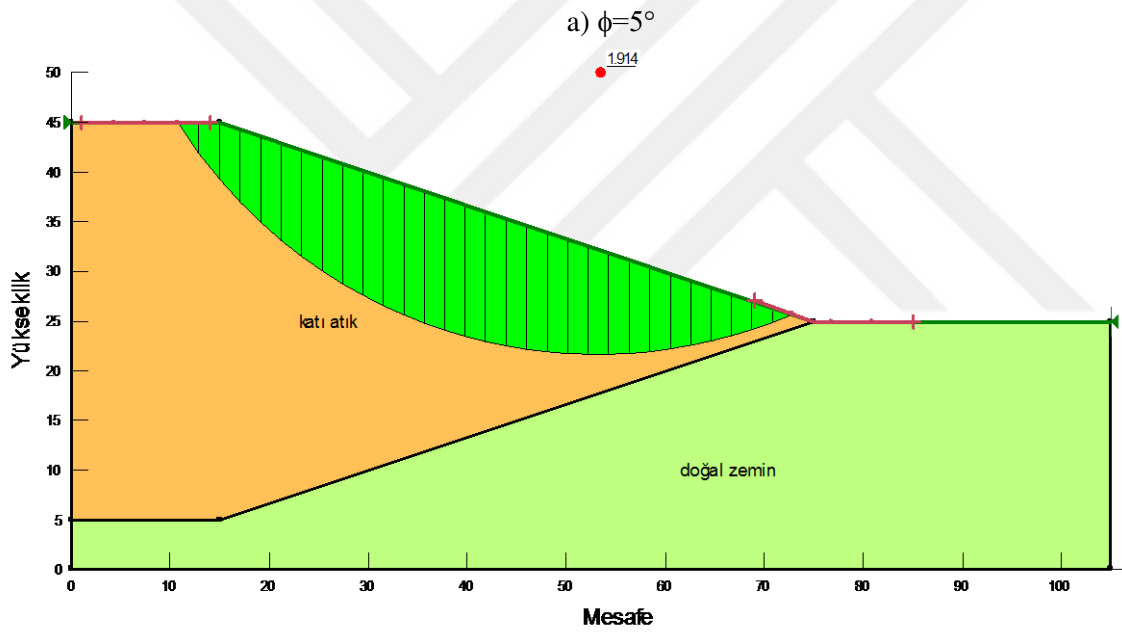
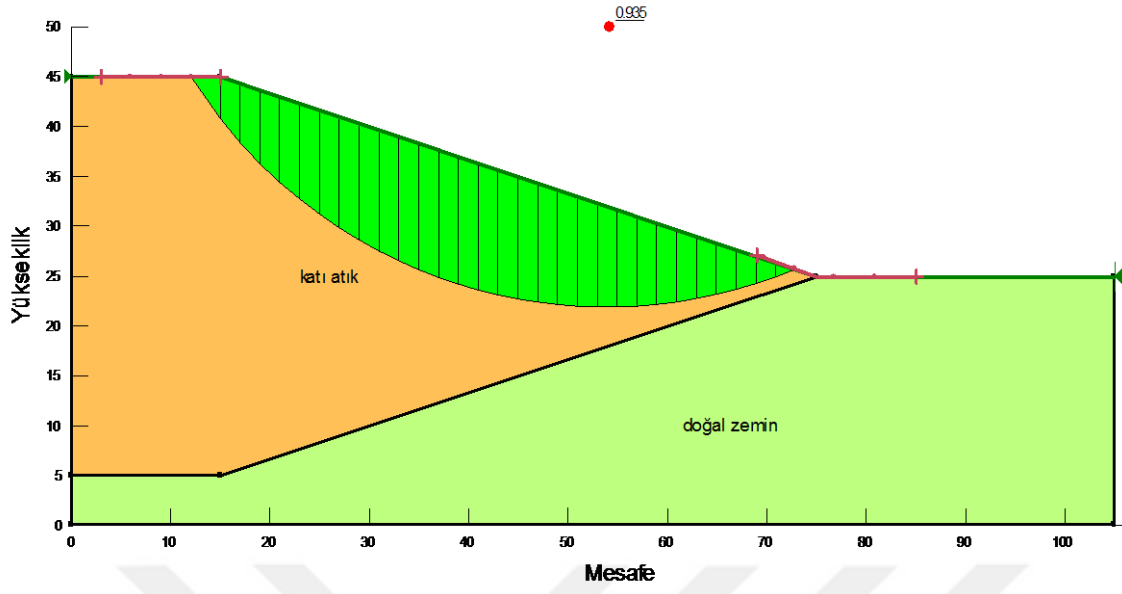
İçsel sürtünme açısının (ϕ) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının arttığı görülmüştür. Şekil 4.35 incelendiğinde, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal artışın, ϕ açısının artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.36.'da ise farklı içsel sürtünme açıları için elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



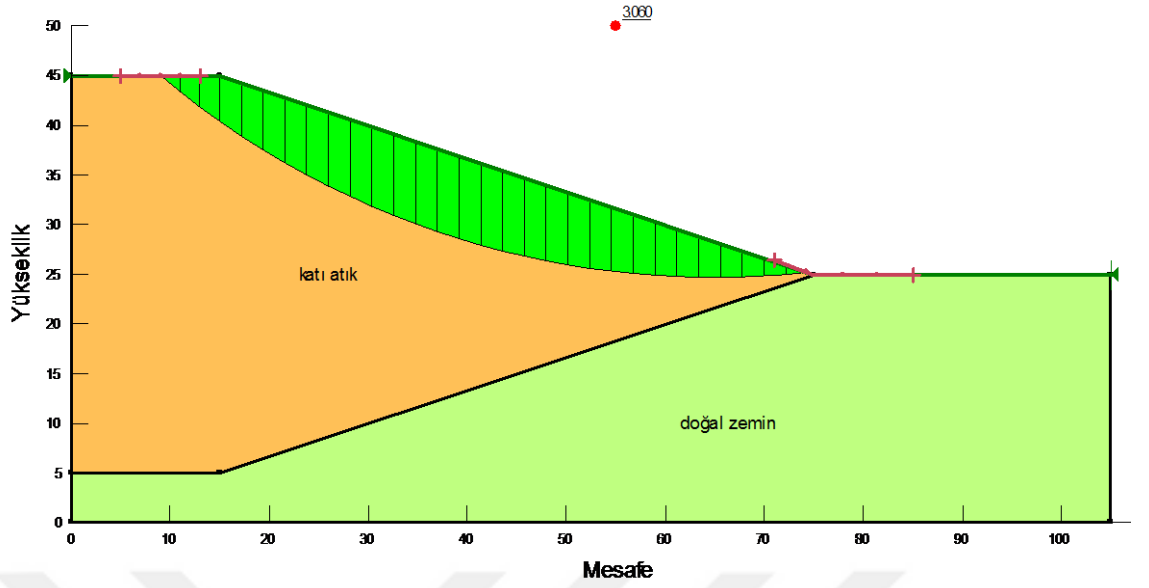
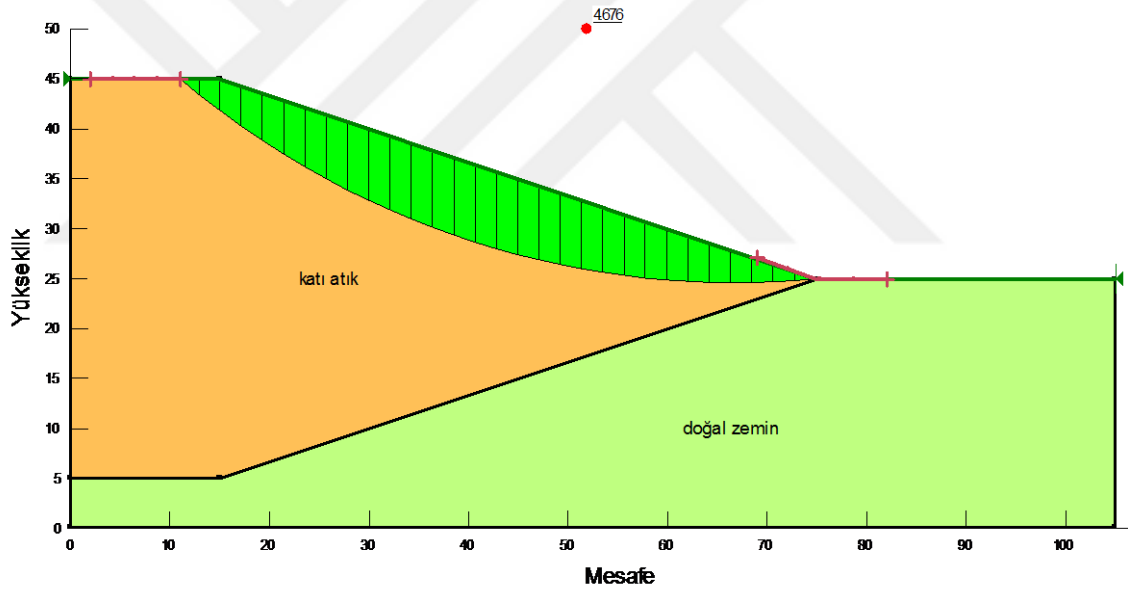
Şekil 4.35.İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.17. Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Analiz Sonuçları

ϕ (°)	GS
5	0.93
10	1.19
15	1.55
20	1.91
25	2.27
30	2.64
35	3.06
40	3.52
45	4.05
50	4.67



b) $\phi=20^\circ$

c) $\phi=35^\circ$ d) $\phi=50^\circ$

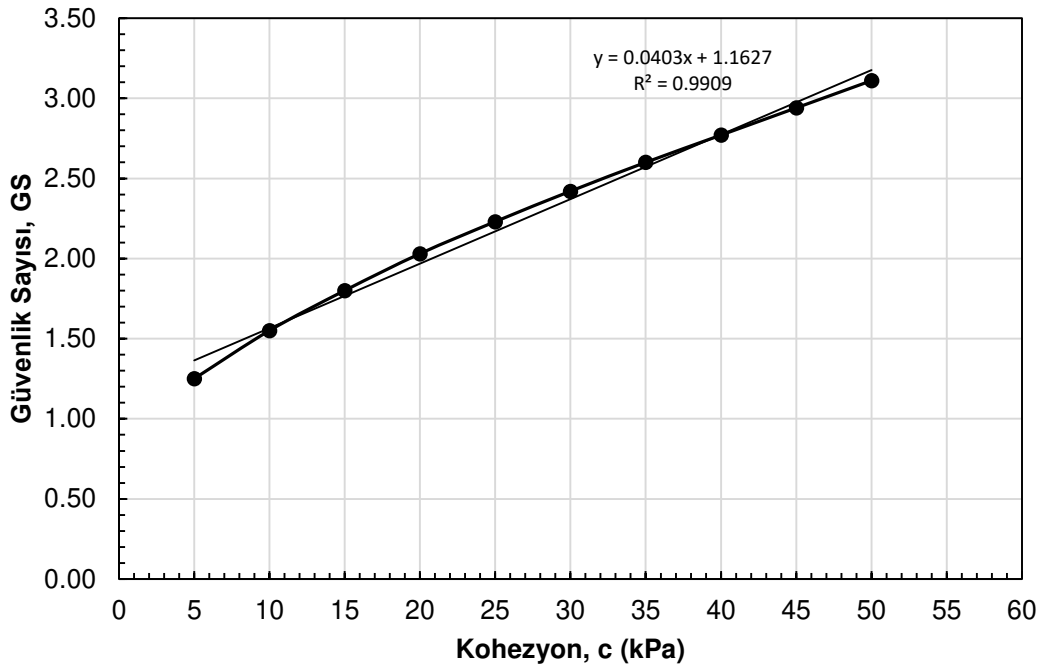
Şekil 4.36. Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri
($\phi=5^\circ-20^\circ-35^\circ-50^\circ$)

- Kohezyon (c) Etkisi

Kohezyonun (c), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı kohezyon değerleri için ($c=5-10-15-20-25-30-35-40-45-50$ kN/m²) analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, birim hacim ağırlık $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1 düşey/3 yatay) olarak seçilmiştir. Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.37.’de, değerler ise, Çizelge 4.18.’de özetlenmiştir.

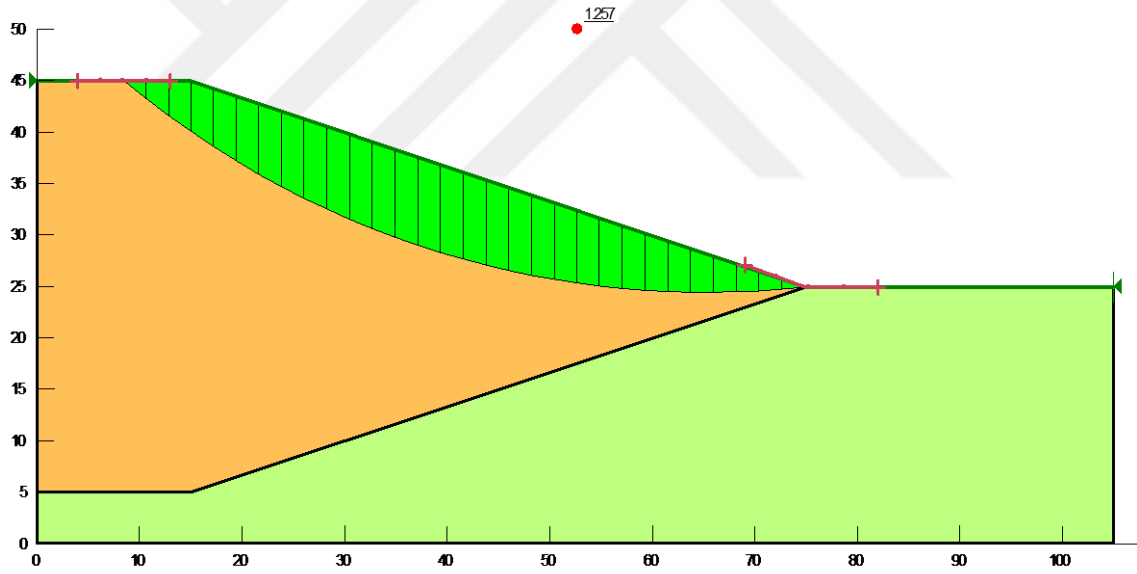
Kohezyonun (c) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının arttığı görülmüştür. Şekil 4.37 incelendiğinde, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal artışın, içsel sürtünme açısının davranışına benzer şekilde, c değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.38.’de farklı kohezyon değerlerinde elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



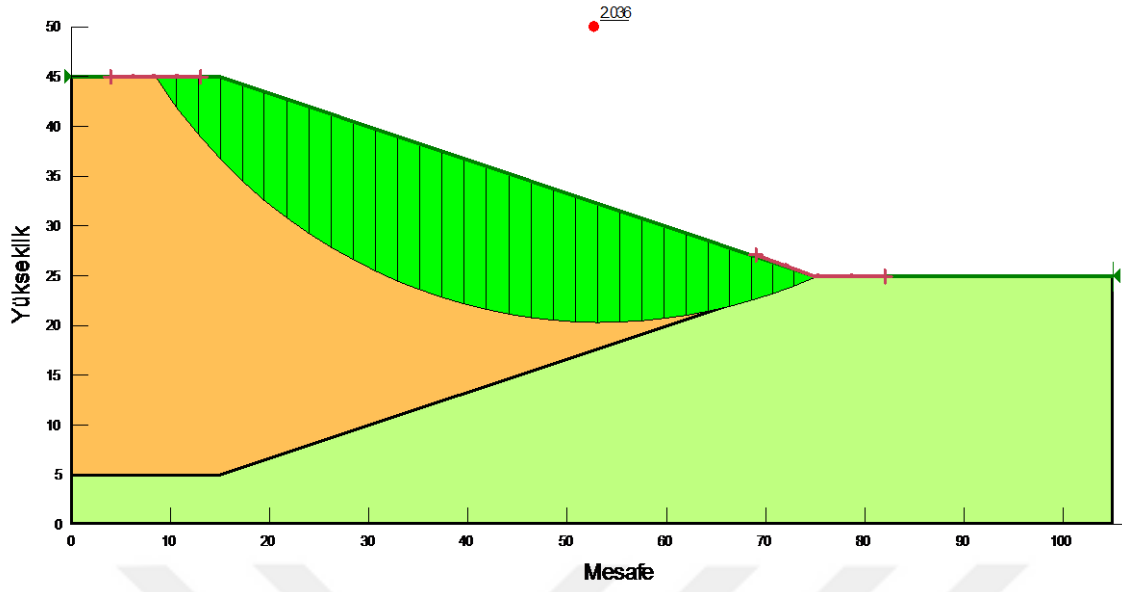
Şekil 4.37. Kohezyon (c) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.18. Farklı Kohezyon Değerleri İçin Analiz Sonuçları

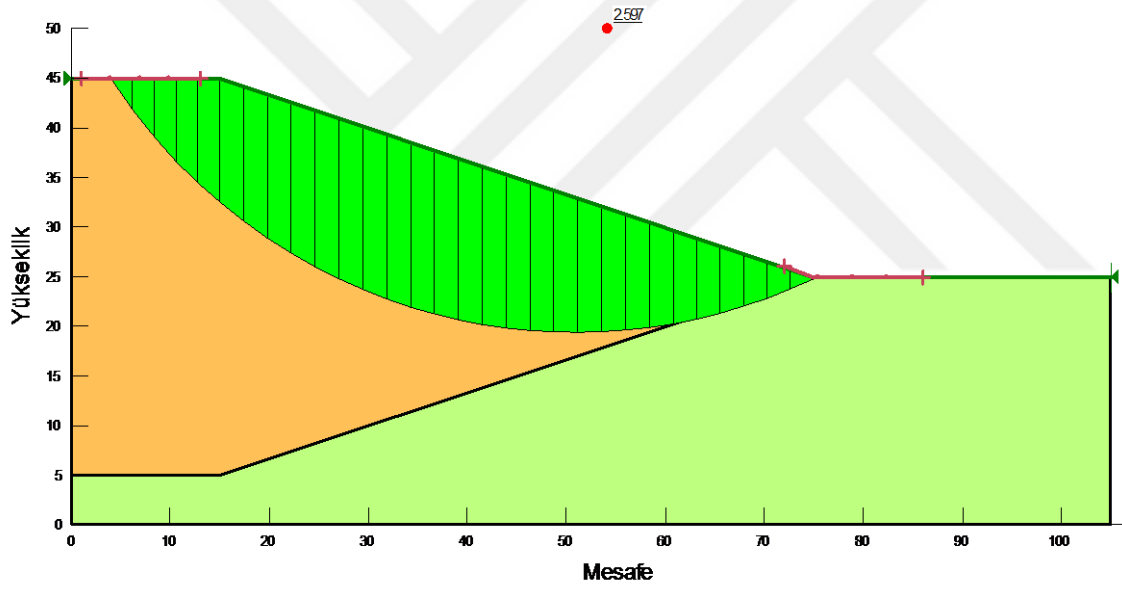
c (kPa)	GS
5	1,25
10	1.55
15	1.80
20	2.03
25	2.23
30	2.42
35	2.60
40	2.77
45	2.94
50	3.11



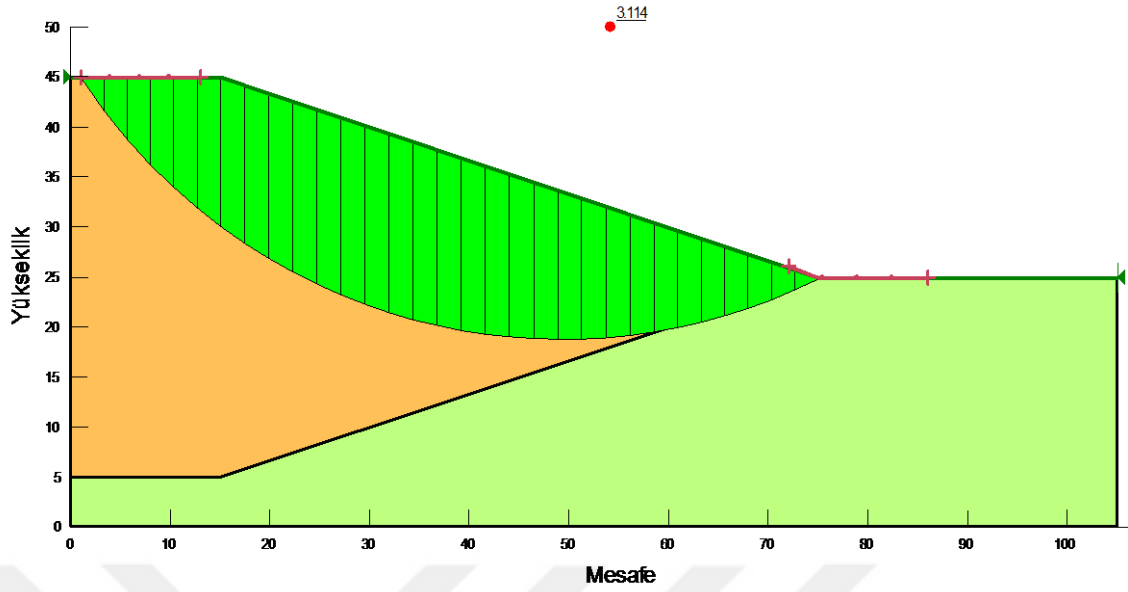
a) $c=5$ kPa



b) $c=20$ kPa



c) $c=35$ kPa



d) $c=50$ kPa

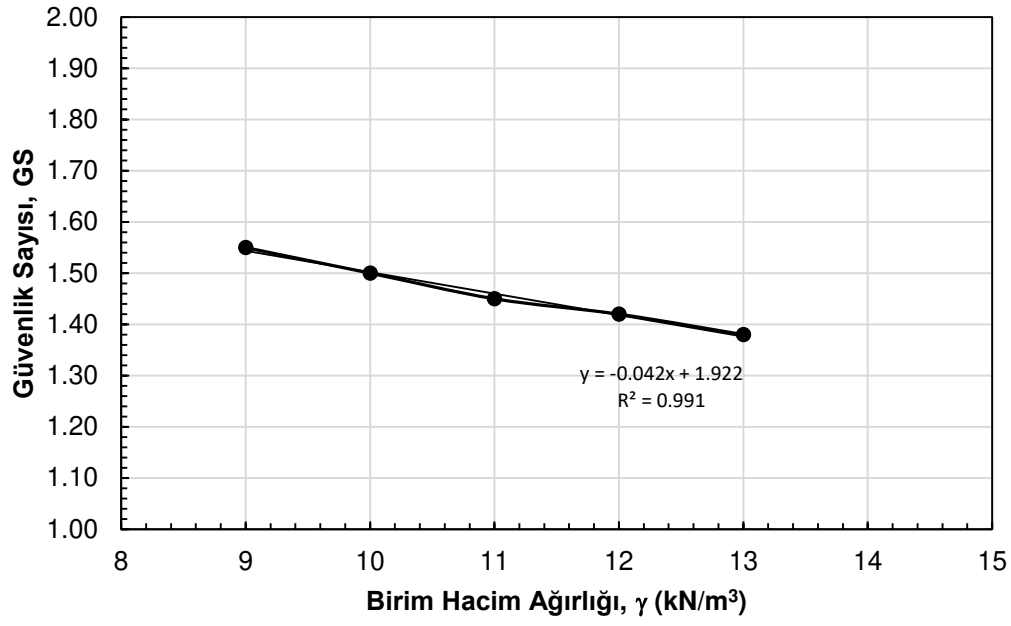
Şekil 4.38. Farklı Kohezyon (c) Değerlerinde Elde Edilen Kayma Yüzeyleri
($c=5-20-35-50$ kPa)

- Birim Hacim Ağırlığı (γ) Etkisi

Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı birim hacim ağırlığı değerleri için ($\gamma=9-10-11-12-13$ kN/m³) analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10$ kN/m² ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) olarak seçilmiştir. Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.39.’da, değerler ise, Çizelge 4.19’da özetlenmiştir.

Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.39. incelendiğinde, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının lineer (doğrusal) olarak azaldığı görülmektedir. Gözlenen bu doğrusal azalmanın, γ değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerinin de artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

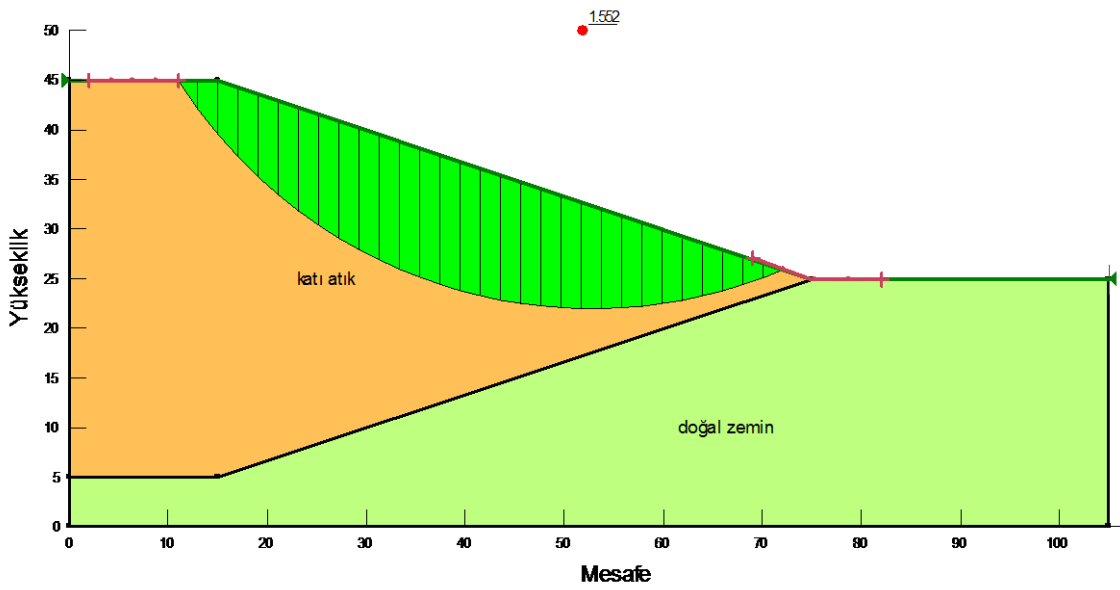
Şekil 4.40.’da farklı birim hacim ağırlık değerleri için analizler sonucunda elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.



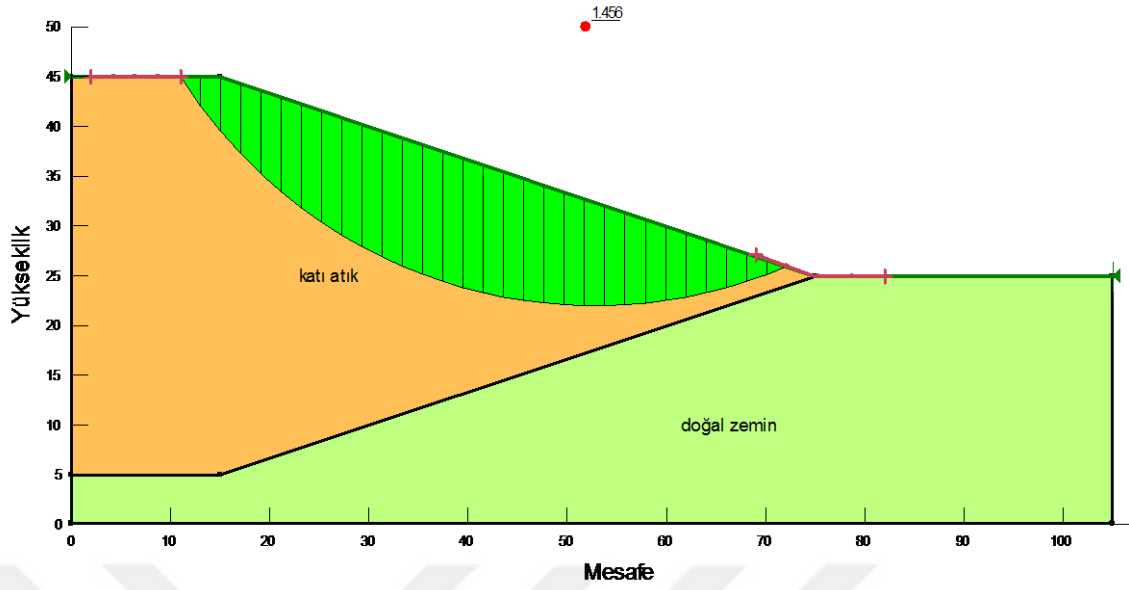
Şekil 4.39. Birim hacim ağırlık (γ) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.19. Farklı Birim Hacim Ağırlığı Değerleri İçin Analiz Sonuçları

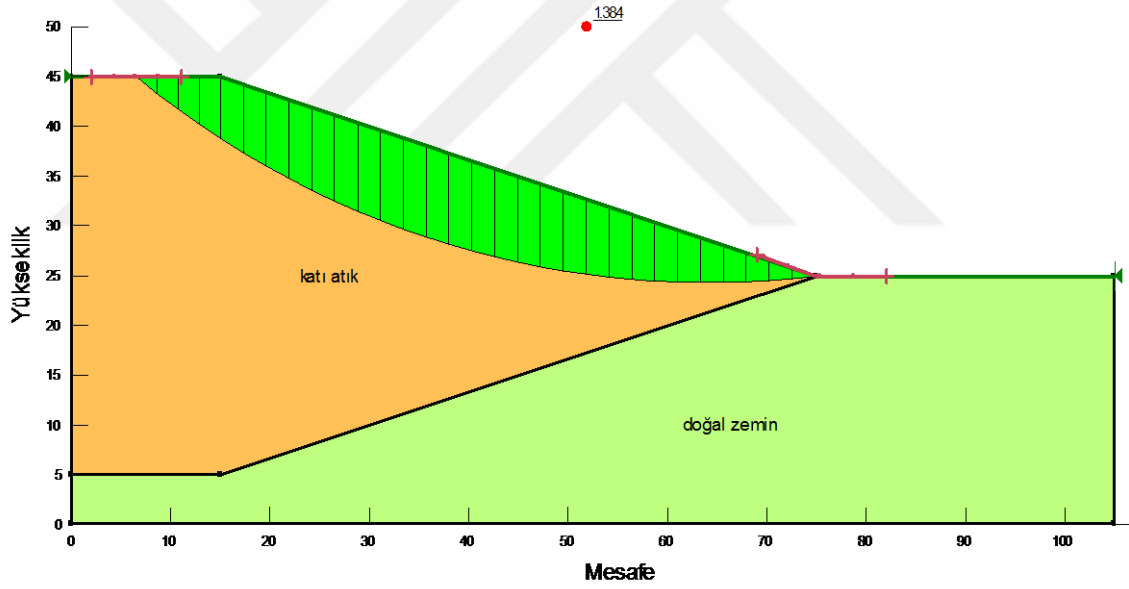
γ (kN/m³)	GS
9	1.55
10	1.50
11	1.45
12	1.42
13	1.38



a) $\gamma=9$ kN/m³



b) $\gamma=11 \text{ kN/m}^3$



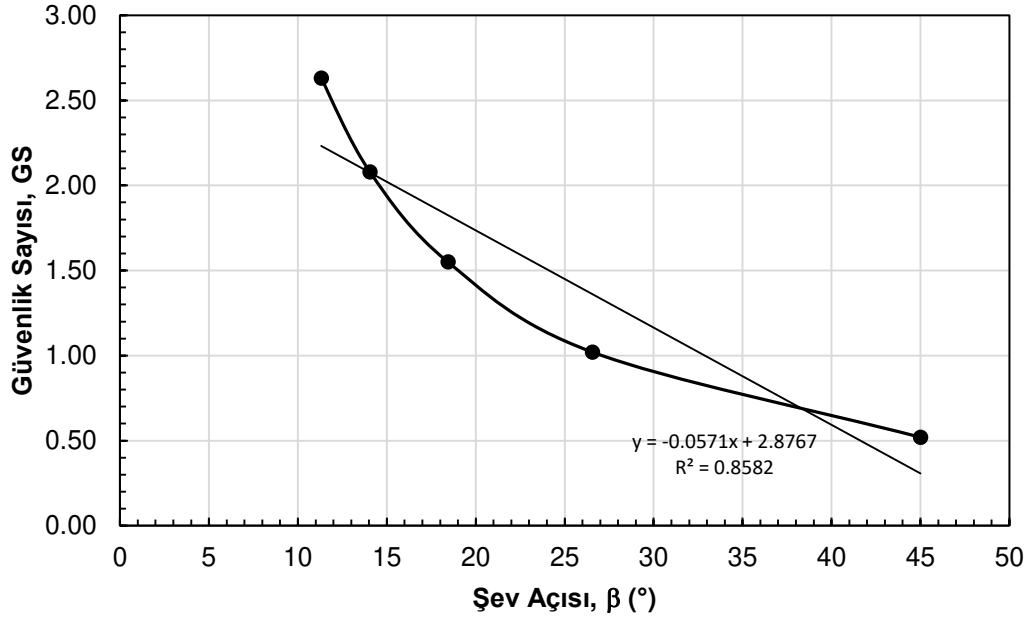
c) $\gamma=13 \text{ kN/m}^3$

Şekil 4.40. Farklı Birim Hacim Ağırlık Değerleri İçin Elde Edilen Kayma Yüzeyleri
($\gamma=9-11-13 \text{ kN/m}^3$)

- Şev Açısı (β) Etkisi

Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak amacıyla, katı atık dolgusunun farklı şev açısı değerleri için ($\beta=45^\circ-26.56^\circ-18.43^\circ-14.04^\circ-11.31^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir.

Şev açısı etkisinin analizi için, farklı geometriye sahip şev modelleri (1düşey/1yatay-1düşey/2yatay-1düşey/3yatay-1düşey/4yatay-1düşey/5yatay) oluşturulmuştur. Analizlerde diğer parametreler; içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon, $c=10 \text{ kN/m}^2$ ve birim hacim ağırlık $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir. Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) eğrisi Şekil 4.41.’de, değerler ise, Çizelge 4.20.’de özetlenmiştir.



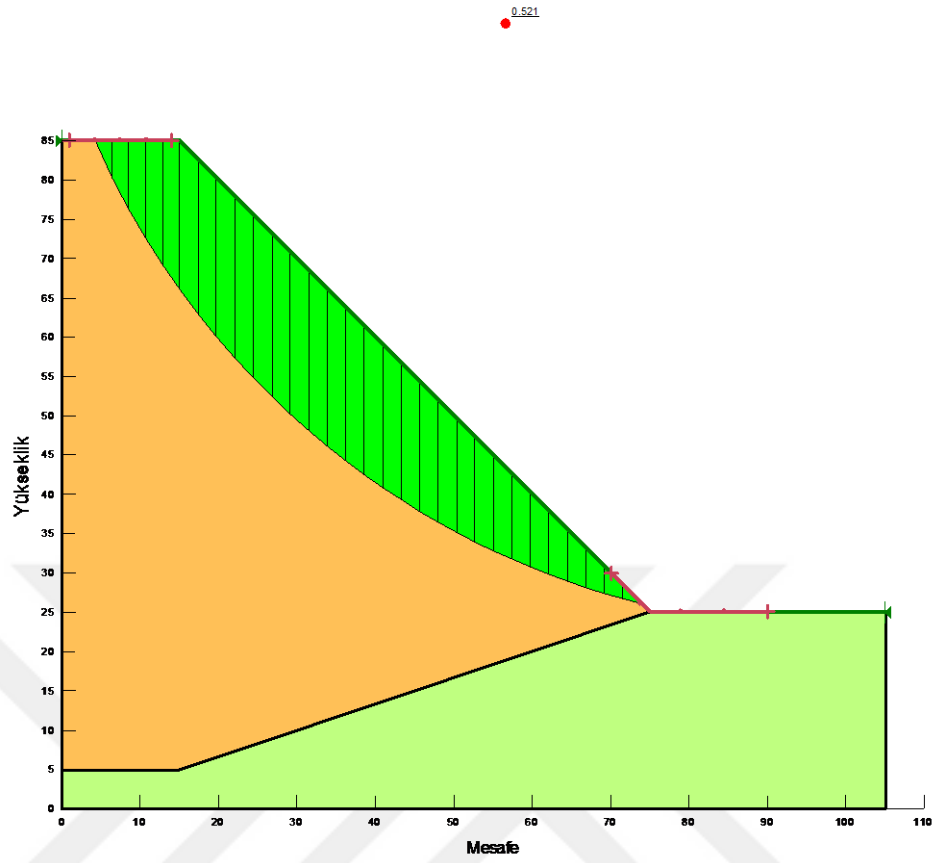
Şekil 4.41. Şev açısı (β) – Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi

Çizelge 4.20. Farklı Şev Açısı Değerleri İçin Analiz Sonuçları

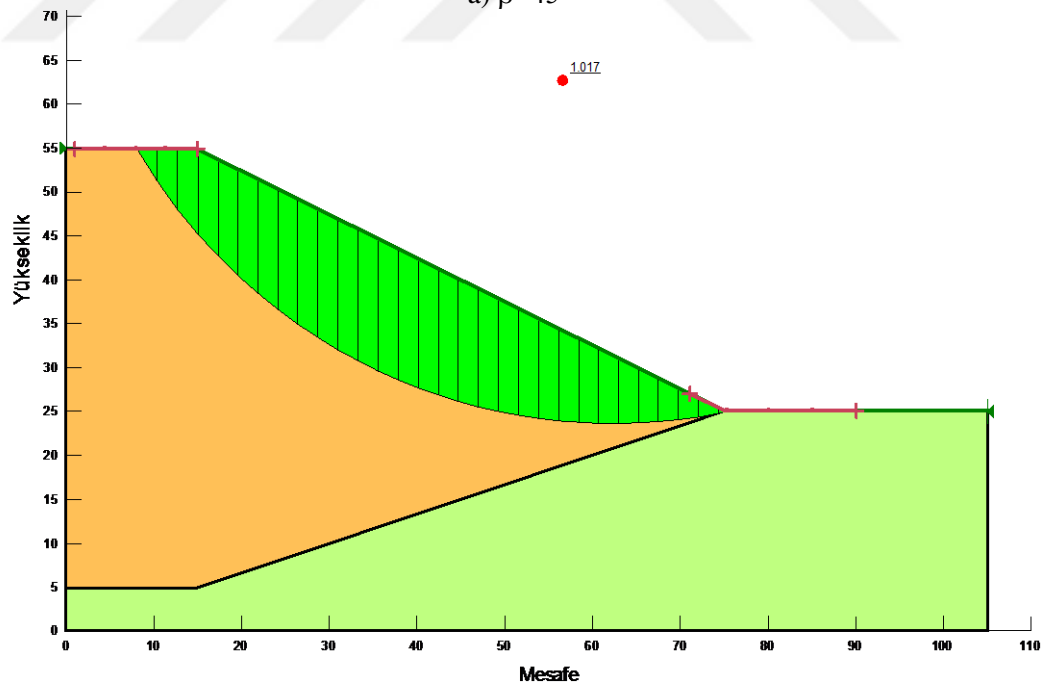
β (°)	GS
45 (1/1)	0.52
26.56 (1/2)	1.02
18.43 (1/3)	1.55
14.04 (1/4)	2.08
11.31 (1/5)	2.63

Şev açısının (β),şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.42.’de değişik şev açılarında elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.

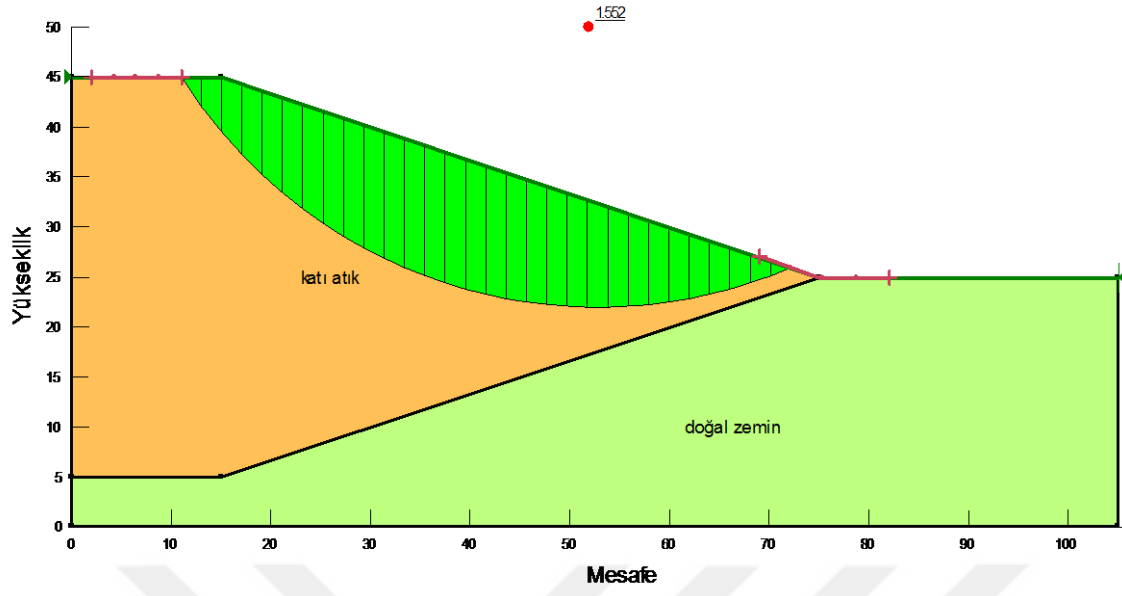
Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür.



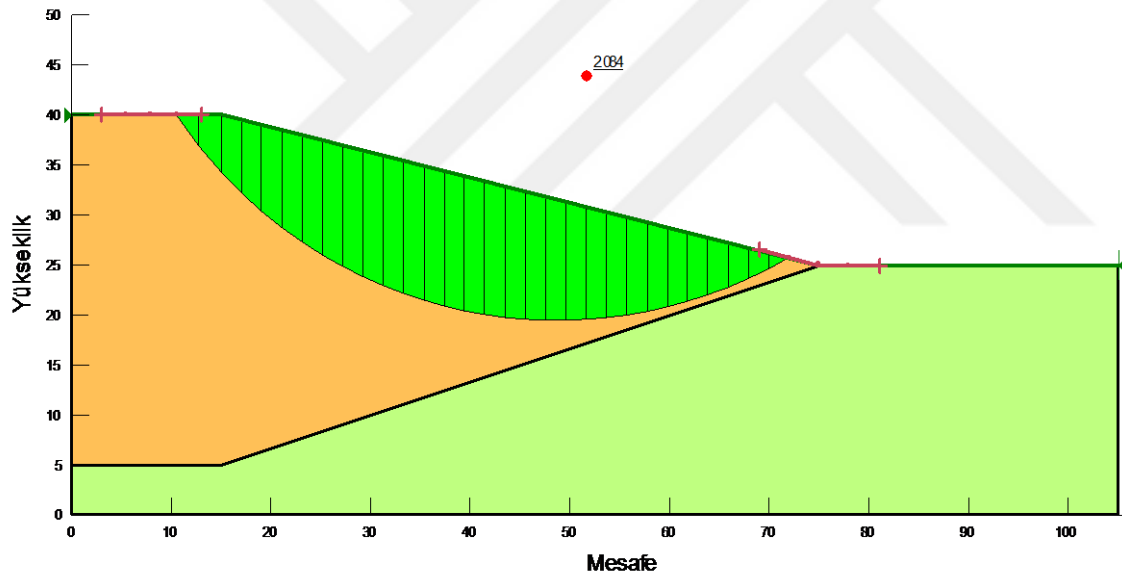
a) $\beta = 45^\circ$



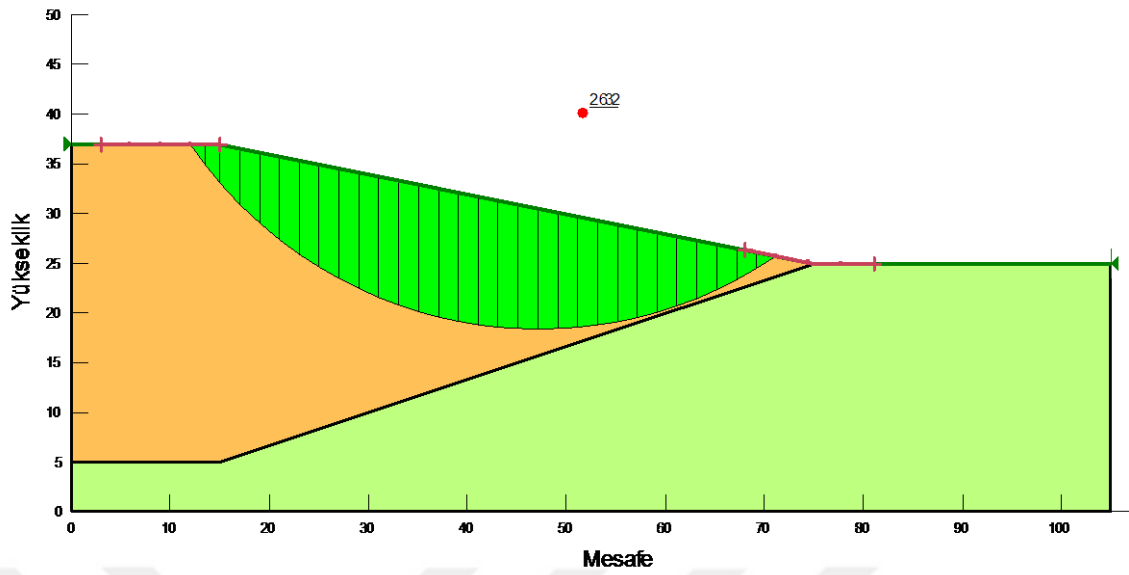
b) $\beta = 26.56^\circ$



c) $\beta = 18.43^\circ$



d) $\beta = 14.04^\circ$

e) $\beta=11.31^\circ$

Şekil 4.42. Değişik Şev Açılarından Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($\beta=45^\circ$ - 26.56° - 18.43° - 14.04° - 11.31°)

4.3.3.2. Donatılı Analizler

Bu bölümde, sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen optimum durum olan $H/h=4$ (Geogrid Aralığı $h=7.5$ m.) , $N=4$ adet geogird kullanılarak elde edilen durum için limit denge yöntemi ile de analiz yapılmıştır.

Analizlerde, içsel sürtünme açısı $\phi=15^\circ$, kohezyon $c=10$ kN/m², birim hacim ağırlık $\gamma=9$ kN/m³ ve şev açısı $\beta=26.56^\circ$ (1düşey/2yatay) olarak seçilmiştir. Analiz yöntemi olarak ilk bölümde olduğu gibi Bishop yöntemi seçilmiştir.

Analizlerde geogrid donatı tabakalarını modellemek için çift yönlü geogrid elemanı kullanılmıştır. Geogrid donatı tabakalarının malzeme özelliği olarak üretici firmadan temin edilen ve Çizelge 4.21.'de değerleri verilen malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 4.21. Geogrid Özellikleri

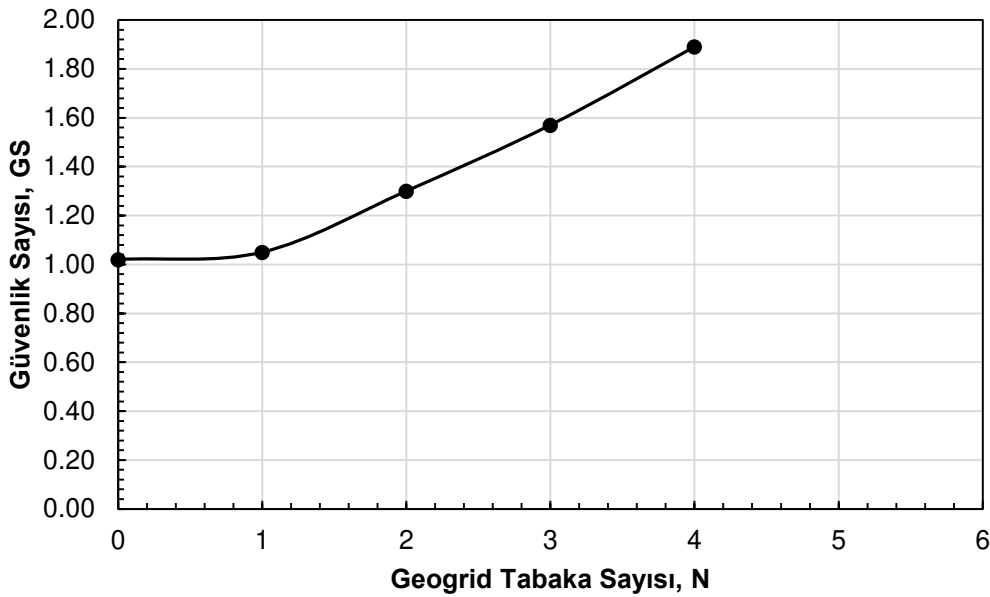
Özellik	Birimi	Ölçüsü
Malzeme	-	Yüksek mukavemetli, Bazalt, Polimer, PVC karışımı
Şekil	-	Çift Yönlü Kare
Açıklık	mm	25.4-25.4
Dayanım	Kn/m	300

Donatılı çözümlerde ise çözüm iki aşamada elde edilmiştir. İlk aşamada zemin ağırlığından dolayı oluşan başlangıç gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada ise geogrid donatı aktif hale getirilerek güvenlik sayısı analizi gerçekleştirilmiştir.

Geogrid donatı tabakalarının katı atık dolgu sevi içersine $h=7.5$ m. olacak şekilde yerleştirilmesi durumunda toplam $N=4$ adet geogrid için elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 4.22.'de, Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) ilişkisi ise Şekil 4.43.'de görülmektedir.

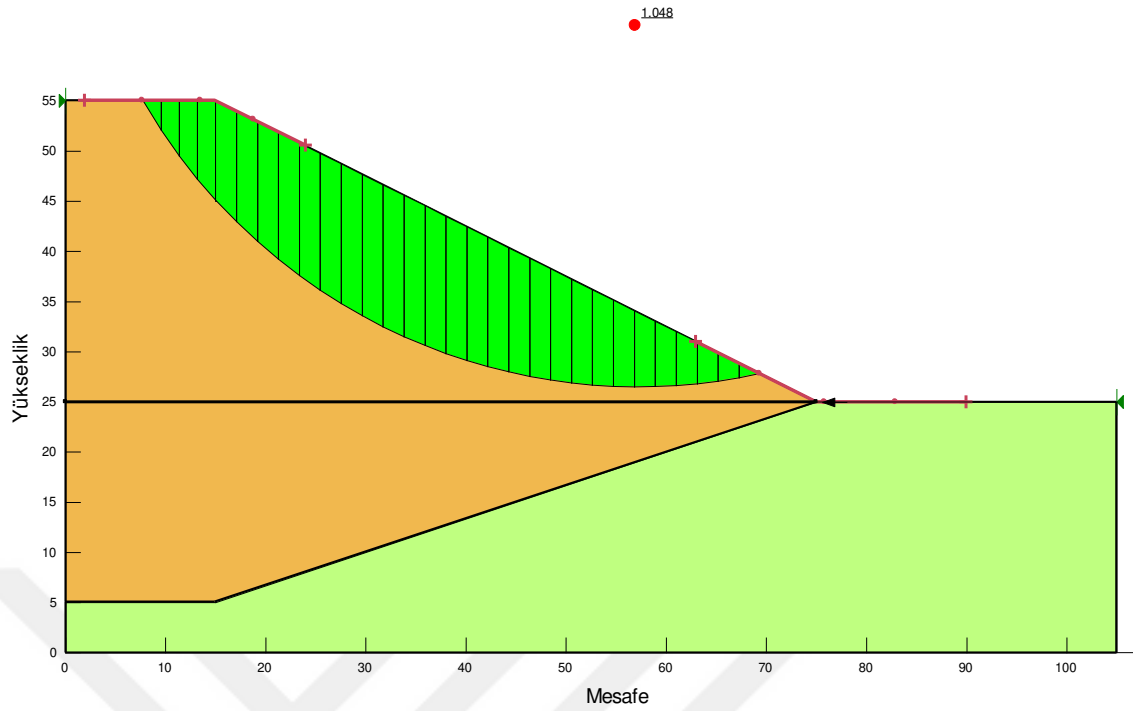
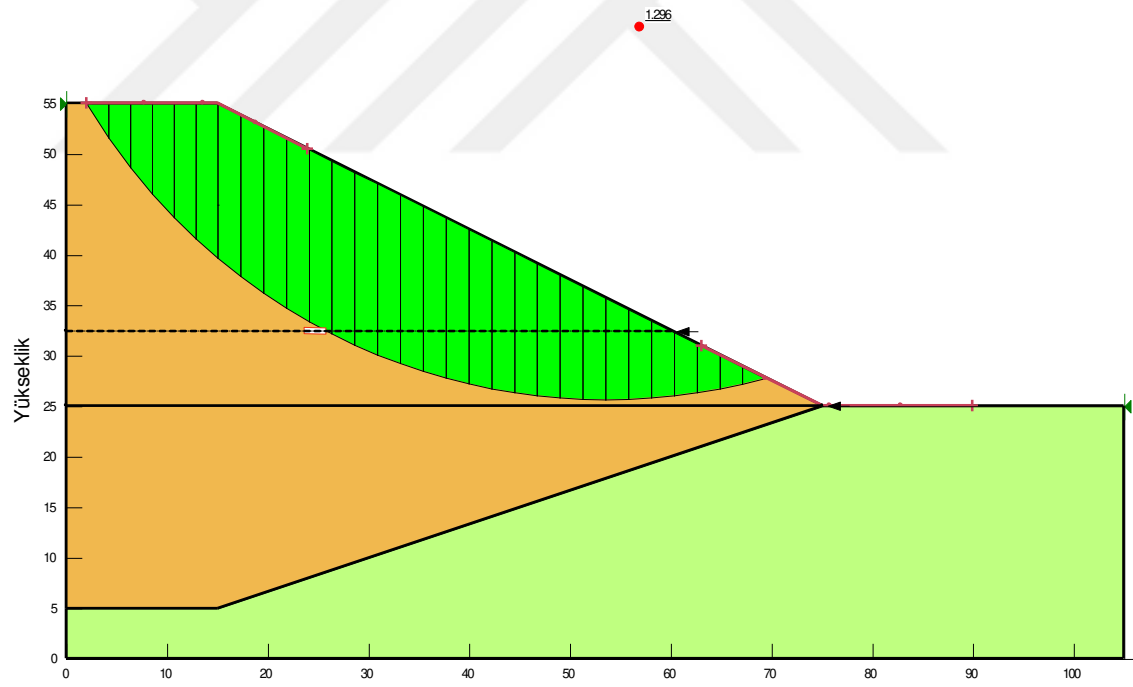
Çizelge 4.22. $H/h=4$, $N=4$ İçin Analiz Sonuçları

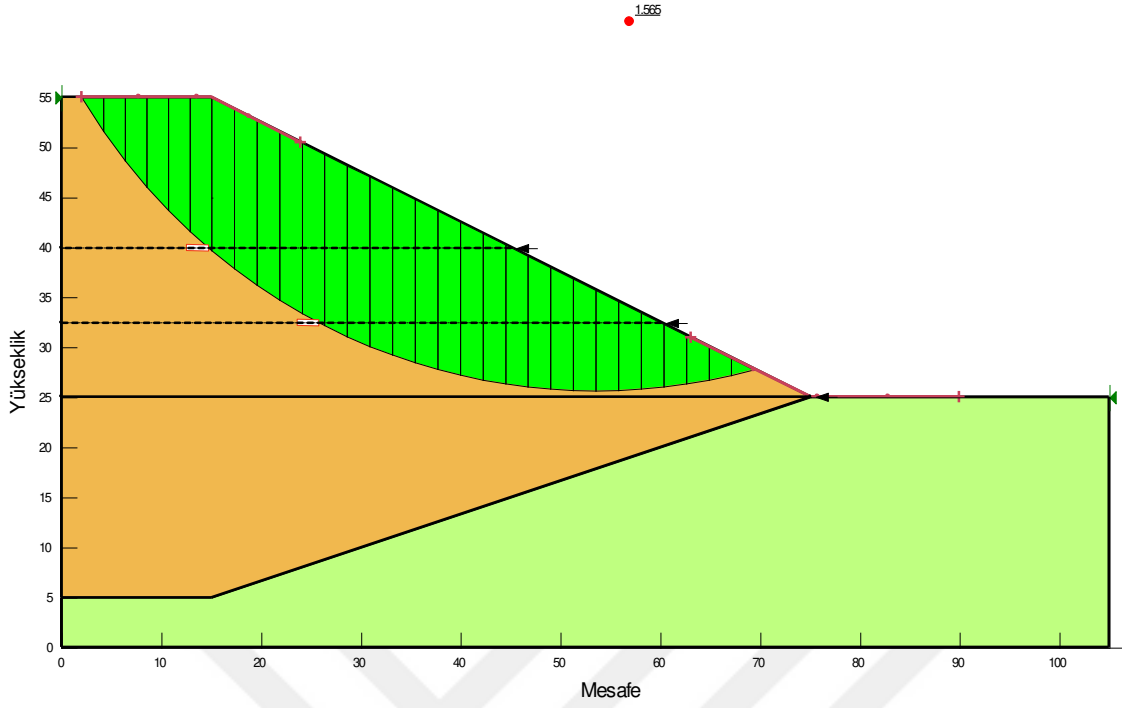
N	GS
0 (donatısız)	1.02
1	1.05
2	1.30
3	1.57
4	1.89



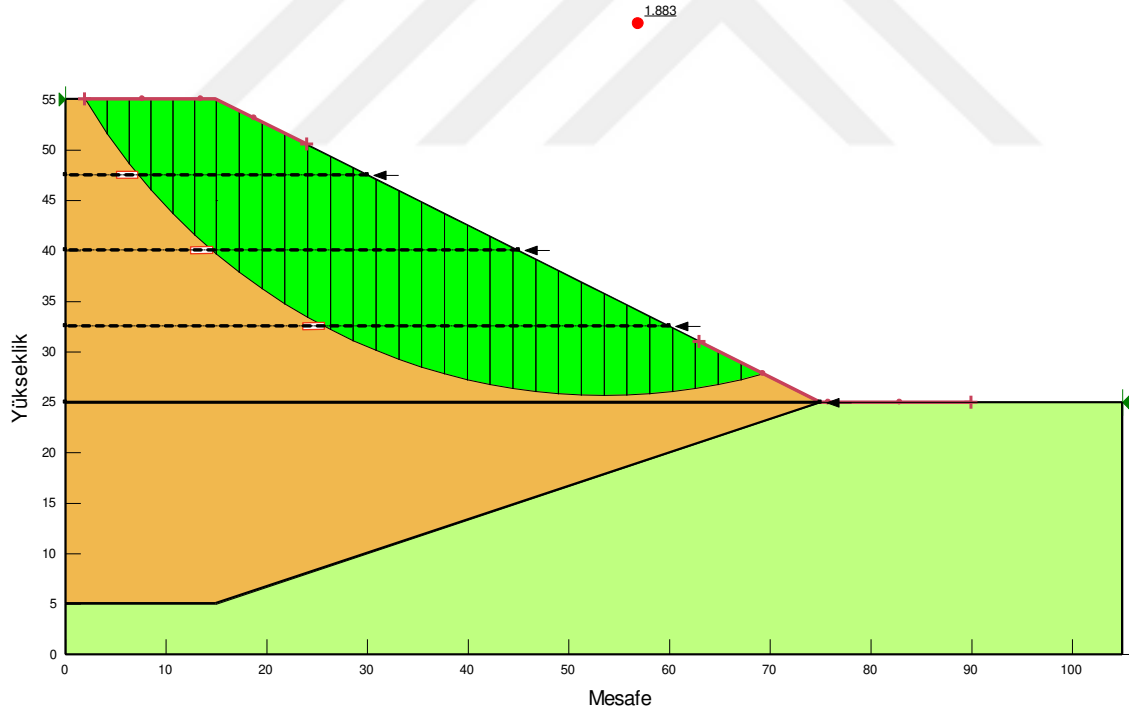
Şekil 4.43. Geogrid sayısı (N) - Güvenlik Sayısı (GS) Eğrisi ($h=7.5$ m.)

Çizelge 4.22 ve Şekil 4.43 incelendiğinde, şev içersine, geogrid donatılarının 7.5 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=1.89$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=1.02$) yaklaşık 1.85 kat artmaktadır. Donatı tabakalarının kayma yüzeyi içersine yerleştirilmesiyle, elde edilen kayma kayma yüzeyleri Şekil 4.44.' de görülmektedir.

a) $N=1$ ($h=7.5$ m.)b) $N=2$ ($h=7.5$ m.)



c) $N=3$ ($h=7.5$ m.)



d) $N=4$ ($h=7.5$ m.)

Şekil 4.44. Değişik Geogrid Donatıların Tabaka Sayılarına Göre ($h=7.5$ m.) Elde Edilen Kayma Yüzeyleri ($N=1,2,3,4$)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, katı atık hakkında gerekli tanımlamalar yapılarak fiziksel ve geoteknik özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra örnek bir katı atık depolama sahası modelinde şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, sonlu elemanlar yöntemi ile katı atık depolama sahalarında şev stabilitesini etkileyebilecek parametreler (içsel sürtünme açısı, kohezyon, dilatasyon açısı, elastisite modülü, poisson oranı, birim hacim ağırlık ve şev açısı) göz önüne alınmış ve bu parametrelerin farklı değerleri için Plaxis paket programı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada geogrid donatı ile güçlendirilmiş katı atık dolgularının davranışı ile ilgili sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise limit denge yöntemi ile şev stabilitesini etkileyebilecek parametreler (içsel sürtünme açısı, kohezyon, birim hacim ağırlık ve şev açısı) göz önüne alınmış ve bu parametrelerin farklı değerleri için analizler, Geostudio bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, birinci aşamada analizi yapılan optimum ($H/h=4$ Durumu, Geogrid Aralığı $h=7.5$ m.) geogrid donatılı durum için limit denge analizleri gerçekleştirilerek her iki yöntemin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Aşağıda, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

5.1. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

5.1.1. Donatısız Analizler

- İçsel sürtünme açısının (ϕ) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmüştür. Gözlenen bu doğrusal artışın, ϕ açısının artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Kohezyonun (c) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmüştür.

Gözlenen bu doğrusal artışın, içsel sürtünme açısının davranışına benzer şekilde, c değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Dilatasyon açısının (ψ) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ψ değerinin artmasıyla güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.

- Elastisite Modülünün (E), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, E değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.

- Poisson Oranı'nın (ν), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ν değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısında herhangi bir artışın olmadığı görülmüştür.

- Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının lineer (doğrusal) olarak azaldığı görülmüştür. Gözlenen bu doğrusal azalmanın, γ değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunun mukavemeti artmasına rağmen, bu artış oranının oluşan kayma gerilmelerine göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür.

5.1.2. Donatılı Analizler

- Geogrid donatı kullanılarak şevlerde güvenlik sayısı önemli derecede iyileştirilebilir. Donatılı şev sistemlerinde, donatı ile şev malzemesi arasında oluşan kenetlenme ve sürtünme dirençleri nedeniyle donatılı şevler kompozit bir malzeme gibi davranmaktadır. Geogrid donatı kullanımı ile şevlerde rijitlik artışı meydana gelirken güvenlik sayısı da önemli derecede artmaktadır.

- 1düşey/ 2yatay eğime sahip ($\beta=26.56^\circ$) şev içerisine, geogrid donatıların 1 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=4.74$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür.

Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 4.78 kat artmaktadır. $N=18$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır. Geogridlerin sahip olduğu yüksek çekme mukavemeti nedeniyle, donatı tabakalarının kayma yüzeyi içerisine yerleştirilmesiyle, kayma yüzeyi topuktan uzaklaşmaktadır. Geogrid donatılar, kayma yüzeyinin topuk bölgesine doğru hareket etmesini önlemekte ve donatısız duruma göre daha dar ve ince bir kayma yüzeyi oluşmakta ve bu durum güvenlik sayısının artmasını sağlamaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 2 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=4.68$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 4.72 kat artmaktadır. $N=10$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 3 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=3.32$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 3.35 kat artmaktadır. $N=6$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 5 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=2.35$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 2.35 kat artmaktadır. $N=2$ tabakaya kadar güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 6 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=2.08$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 2.10 kat artmaktadır. İlk tabaka için güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 7.5 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=1.84$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür.. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 1.85 kat artmaktadır.

İlk tabaka için güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

- Şev içerisine, geogrid donatıların 10 m. aralıklarla yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=1.49$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür. Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre ($GS=0.99$) yaklaşık 1.50 kat artmaktadır.

- Donatılı analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, geogrid donatı kullanılması durumunda katı atık dolgu şevinin geogrid donatı aralığı değerlerine bağlı olarak önemli ölçüde artırılabilirdiği görülmüştür. Donatı aralığı azaldıkça daha büyük güvenlik sayıları elde edilmektedir. Bununla birlikte, şev stabilitesi analizlerinde genellikle güvenlik sayısının $GS > 1.5$ olması istendiğinden, geogrid donatı aralığının $h=10$ m. ($H/h=3$) olması durumunda bu kriterin sağlanmadığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, donatısız durumda 1.5'den küçük olan güvenlik sayısı ($GS=0.99$), geogrid donatı aralığının $h=7.5$ m. ($H/h=4$) olması durumunda 1.5 değerinin üzerine çıkmaktadır ($GS=1.84$). Her ne kadar diğer donatı aralıklarında da ($h=1$ m., $h=2$ m., $h=5$ m. ve $h=6$ m.) $GS > 1.5$ kriteri sağlanıyorsa da ele alınan modelde ekonomik bir çözüm için $h=7.5$ m. ($H/h=4$) kombinasyonunun daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

- Katı atık depolama sahalarında genellikle dolgu şevleri 1düşey/3yatay ($\beta=18.43^\circ$) eğimle oluşturulmaktadır. Gerçekleştirilen analizlerden bu eğime sahip bir katı atık dolgu şevinin güvenlik sayısı $GS=1.52$ olarak elde edilmiştir. Katı atık dolgu şevinin daha dik oluşturulması durumunda daha fazla atık depolanabileceği açıktır. 1düşey/2yatay eğime sahip ($\beta=26.56^\circ$) daha dik bir şev için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre güvenlik sayısı $GS=0.99 < 1.5$ olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu eğime sahip şev içerisine $h=7.5$ m. ($H/h=4$) aralıklı 4 adet geogrid donatı konulması durumunda $GS=1.84 > 1.5$ değeri elde edilmiştir. Böylece, katı atı dolgu sahasında, birim alanda 1düşey/3yatay ($\beta=18.43^\circ$) eğimde katı atık dolgusu temelinden itibaren 40 m. yüksekliğinde atık depolanabilirken, $h=7.5$ m. ($H/h=4$) aralıklı 4 adet geogrid donatı konulması durumunda katı atık dolgu şevi 1düşey/2yatay eğimle ($\beta=26.56^\circ$) 50 m. yüksekliğine kadar doldurulabilecektir.

5.2. Limit Denge Analiz Sonuçları

5.2.1. Donatısız Analizler

▪ İçsel sürtünme açısının (ϕ) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, ϕ açısının artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmüştür. Gözlenen bu doğrusal artışın, ϕ açısının artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

▪ Kohezyonun (c) şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, c değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının yaklaşık lineer (doğrusal) arttığı görülmüştür. Gözlenen bu doğrusal artışın, içsel sürtünme açısının davranışına benzer şekilde, c değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerine karşı koyan kuvvetlerin doğrusal olarak artmasından, başka bir ifadeyle analizlerde kullanılan Mohr-Coulomb göçme kriterinin doğrusal karakteristiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

▪ Birim hacim ağırlığının (γ), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, γ değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının lineer (doğrusal) olarak azaldığı görülmüştür. Gözlenen bu doğrusal azalmanın, γ değerinin artmasına bağlı olarak katı atık dolgusunda oluşan kayma gerilmelerinin de artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

▪ Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak için gerçekleştirilen analizlerden, β değerinin artmasıyla şevin güvenlik sayısının azaldığı görülmüştür.

5.2.2. Donatılı Analizler

▪ Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen optimum durum olan $H/h=4$ (Geogrid Aralığı $h=7.5$ m.) , $N=4$ adet geogird kullanılarak elde edilen durum için limit denge yöntemi ile de analiz yapılmıştır. Şev içerisine, geogrid donatıların 7.5 m. aralıklı yerleştirilmesiyle, güvenlik sayısı değerinin $GS=1.89$ değerine kadar arttırılabileceği görülmüştür.

Bu durumda, GS değeri donatısız duruma göre (GS=1.02) yaklaşık 1.85 kat artmaktadır. İlk tabaka için güvenlik sayısındaki artış miktarı daha düşükken, bu tabakadan sonraki artış miktarı daha fazla olmaktadır.

5.3. Sonlu Elamanlar Yöntemi ile Limit Denge Yöntemlerinin Karşılaştırılması

5.3.1. Donatısız Analizlerin Karşılaştırılması

- İçsel sürtünme açısının (ϕ), Kohezyonun (c), Birim hacim ağırlığının (γ) ve Şev açısının (β), şev stabilitesine etkisini araştırmak için her iki yöntem ile gerçekleştirilen analizlerde birbirine yakın güvenlik sayıları elde edilmiştir.

- Dilatasyon açısının (ψ), Elastisite Modülünün (E) ve Poisson Oranı'nın (ν) şev stabilitesine etkisi sadece sonlu elemanlar yöntemiyle incelenebilmiştir.

- Limit denge yöntemi ile analiz yapan Geostudio programı ile sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis programına ait sonuçlar olarak aşağıda karşılaştırılmıştır:

İlk durumda, birim hacim ağırlık $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ ve şev açısı $\beta=18.43^\circ$ (1düşey/3yatay) değerleri sabit tutularak farklı içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerlerinde güvenlik sayılarına ait sonuçlar Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Farklı c ve ϕ Parametrelerine Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

Durum	C (kPa)	ϕ	G.S. (Plaxis)	G.S. (Geostudio)	G.S. Farkı (%)
1	10	15	1.52	1.55	1.97
2	10	30	2.60	2.64	1.53
3	10	45	3.88	4.05	4.38
4	15	15	1.77	1.80	1.70
5	30	15	2.46	2.42	-1.62
6	45	15	2.95	2.94	-0.34

İkinci durumda ise, içsel sürtünme açısı, $\phi=15^\circ$; kohezyon, $c=10 \text{ kN/m}^2$; birim hacim ağırlık $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ sabit tutularak farklı şev açılarındaki analiz sonuçları Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Farklı Şev Açılarına Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

Durum	β (Şev Açısı)	G.S. (Plaxis)	G.S. (Geostudio)	G.S. Farkı (%)
1	18.43 (1/3)	1.52	1.55	1.97
2	14.04 (1/4)	2.00	2.08	4
3	11.31 (1/5)	2.55	2.63	3.13

Çizelge 5.1. ve 5.2. incelendiğinde her iki yöntem ile elde edilen güvenlik sayılarının yakın olduğu görülmektedir. Ancak çizelgeler incelendiğinde limit denge yöntemi ile elde edilen güvenlik sayılarının genellikle yüksek çıktığı tespit edilmiştir.

5.3.2. Donatılı Analizlerin Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen optimum durum olan $H/h=4$ (Geogrid Aralığı $h=7.5$ m.) , $N=4$ adet geogird kullanılarak elde edilen durum için limit denge yöntemi ile de analizler sonucu elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 5.3.'de görülmektedir.

Çizelge 5.3. Geogird Donatı Sayısına Göre Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

Durum	Geogrid Donatı Sayısı (N)	G.S. (Plaxis)	G.S. (Geostudio)	G.S. Farkı (%)
0	N=0	0.99	1.02	3.03
1	N=1	1.00	1.05	5
2	N=2	1.12	1.30	16.37
3	N=3	1.37	1.57	14.59
4	N=4	1.84	1.89	2.72

Çizelge 5.3. incelendiğinde geogrid donatılı şevlerde limit denge yöntemiyle elde edilen güvenlik sayıları daha yüksek çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile $N=4$ donatılı durum optimum çözüm olurken, limit denge yönteminde $N=3$ adet donatılı durumda ($G.S.=1.57$) yeterli güvenlik sayısı elde edilebilmektedir.

Her iki yöntem ile elde edilen donatısız ve geogird donatılı şevlerde, limit denge yöntemindeki güvenlik sayıları daha yüksek çıkmaktadır. Bunun nedeni ise Aryal (2008) tarafından belirtildiği gibi, limit denge yöntemlerinde şevin tepe ve topuk kısmında oluşan bazı lokal gerilmelerde bir takım sınırlamalar getirmesinden olduğu düşünülmektedir.

Yine Aryal (2006) tarafından Çeşitli yük varyasyonları ile yürütülen çalışmalarda, Morgenstern-Price limit denge yöntemiyle elde edilen güvenlik sayılarının, sonlu elemanlar yönteminden % 10-15 daha yüksek değerlerin elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada ise limit denge yöntemiyle elde edilen güvenlik sayıları donatısız durum için ortalama %3 civarında; donatılı durum içinse %8 civarında daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen güvenlik sayılarının daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, katı atık sahalarında geogird malzemesinin kullanılması, şevlerin stabilitesini önemli derecede artırdığı; Düzenli katı atık depolama sahalarının ilk yatırım maliyetinin yüksek olduğu düşünüldüğünde, geogird kullanımı ile daha fazla miktarda (daha yüksek şevler ile) katı atık depolanabileceği ortaya konulmuş, bunun da ekonomik olarak önemli kazanımlar sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Akyol, K. 2008. Evsel Katı Atıkların Geoteknik Özelliklerinin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, S:19.
- Aryal, K., 2006 . Slope Stability Evaluation by LE and FE Methods, PhD Thesis. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, NTNU.
- Aryal, K., 2008 . Differences between LE and FEM Methods used in Slope Stability Evaluation. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) , S: 1-8 . Goa, India.
- American Society for Testing Materials (ASTM). 2003. Standarts Test Methods For Determination Of The Composition Of Unprocessed Municipal Solid Waste. :92.
- Bishop, A. 1955 . The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slope. Geotechnique, Yayın 5,(No. 1), S, 7-17.
- Çakır, E.T., Yılmaz, R.H., 1998. Katı Atıkları Oluşturan Muhtelif Malzemelerin Laboratuarda Saptanan Yüzeysel Sürtünme Açıları. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi.
- Çapar, Ö.F., Yıldırım, Y., Özölçer, İ.H. 2005. Zonguldak Vahşi Katı Atık Depolama Alanının Stabilitate Analizleri ve Değerlendirilmesi, TMMOB Geoteknik Sempozyumu, 26- 27 Eylül 2005, Zonguldak, Cilt: 1. S:381-394.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. 2015. Atık Yönetimi Yönetmeliği, R.G. 02.04.2015-29314
- Fang, H. 1983. Physical Properties of Compacted Disposal Materials. Yayınlanmamış tez.
- Fellenius, W. 1927. Erolstatische Berechnungen W.Ernst&Sohn, Berlin.
- Fredlund, D.G., Krahan, J. 1987. Comparison of Slope Stability Methods of Analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Sayı 14, No. 3, S: 429-439.
- Fungaroli, A., Steiner, R. 1979. Investigation of Sanitary Landfill Behavior. Cincinnati: CEPIS.
- GeoStudio, 2012. Geo-slope International Ltd., Canada.

- Gharabaghi, B., Singh, M.K., Inkratas, C., Fleming, I.R., McBean, E. 2008. Comparison of slope stability in two Brazilian municipal landfills. *Waste Management*, 28 (2008) :1509–1517.
- Hammouri, N. A., Malkawi, A. I. H., Yamin, M.M. A. 2007. Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bulletin Of Engineering Geology*. No. 67:471–478.
- Janbu, N. 1957. Stability Analysis of slopes with dimensionless parameters, D.Sc. Thesis, Harward University.
- Janbu, N. 1976. Slope stability computations Embank Dam Enginnering (Eds. Hirschfeld&Poulos) J. Wiley. NewYork.
- Kavazanjian, E., Jr., Matasovic, N. Bonaparte, R. ve Schmertmann, G.R. 1995. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis, *Geoenvironment 2000*, ASCE Geotechnical Special Publication S, 46.
- Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N. Bachus, R.C.1999. Large diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste. In: *Proceedings of the Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, Sardinia.
- Keskin, S., Laman, M. 2007. Sonlu Elemanlar Yönteminin Şev Stabilitesi Problemlerinin Analizinde Kullanılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. Adana. S:101-114.
- Kılıç, H. 2000. Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle Belirlenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Morgenstern, N.R., V.E. PRICE. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces *Geotechnique* 15:1: 79.
- Neyim, C. 2008. Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma Tematik Paneli. Türkiye'de Evsel Nitelikli Atıklar. Erisim:[http://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/csk/EK-4.pdf] Erisim Tarihi: 26.09.2018
- Omari, A., Boddula, R. 2012. Slope Stability Analysis of İndustrial Solid Waste Landfills. Yüksek Lisans Tezi, Luleå University of Technology, 4.

- Onalp, A., Arel, E. 2004. Birsen Yayınevi. Geoteknik Bilgisi II Yamac ve Sevlerin Muhendisliđi.
- Oweis, I.S., Khera, R.P. 1990. Geotechnology of Waste Management. Butterworths, Londra.
- Palabıyık, H. 2001. Belediyelerde Kentsel Katı Atık Yönetimi :İzmir Büyükşehir Belediyesi Örneđi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir s.30.
- Plaxis. 1998. A Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Brinkgreve, R. B. J., Broere, W. and Waterman, D. Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Ver.8 Plaxis , Hollanda.
- Poots, D.M., Zdravković, L.T. 1999. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Theory. Thomas Telford. Londra, UK.
- Sharma, H.D., Lewis, S.P. 1994. Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfill: Desing and Evaluation. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Singh, S., Murphy, B.J. 1990. Evaluation of the stability of sanitary landfills. Geotechnics of waste fills—theory and practice, ASTM STP 1070. In: Arvid L, David K (eds) American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pensilvanya, S, 240–258.
- Singh, T.N., Gulati, A., Dontha, L., Bhadrwaj, V. 2008. Evaluating cut slope failure by numerical analysis-a case study. Nat Hazards (2008) 47:263–279.
- SLOPE/W Tutorial 2007.Geo-Slope İnternatınaol Ltd.
- Spencer, E. 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces Geotechnique 17:1:11-26.
- Tan, O. 2001. Shear Strength of Municipal Solid Waste Laboratory Model Material. Jubilee Papers in honour of Professor Ergün Tođrol. İTÜ Pres Matbaası. İstanbul.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Eliossen, R. 1977. Solid Wastes: Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. 2009. Çevre Koruma ve Katı Atık Toplama. Sayfa:13. Ankara.

- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) . 1992. Türkiye’deki Katı Atık İstatistikleri. Ankara
- Uluatam, S., Yener, Ö., Yıldız, Wasti. 2008. Düzenli Katı Atık Depolanması ve Eski Alanların Düzenlenmesi ile İlgili Bir İnceleme. DİZAYN konstrüksiyon, s. 70.
- Yıldız, A. 2002. Donatılı Zeminler Üzerine Oturan Yüzeysel Temellerin Analizi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Zienkiewicz, O.C. 1977. The Finite-Element Method. 3rd ed. McGraw Hill Book Co. NewYork.



ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Siirt'in Gökçebağ Beldesi'nde doğdu. İlköğrenimini 2000 yılında Gökçebağ İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Siirt Atatürk Anadolu Lisesi'nden 2004 yılında mezun oldu. 2005 yılı Üniversite sınavında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Üniversite öğrenimini 2010 yılında tamamladı. 2011 yılında vatani görevini kısa dönem er olarak tamamladı. 2011 yılından itibaren çalışma hayatına İller Bankası A.Ş. Diyarbakır Bölge Müdürlüğü'nde Teknik Uzman olarak devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.



DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

ADI VE SOYADI	SEDAT KEZER
ÖĞRENCİ NO	11806001
EĞİTİM - ÖĞRETİM YILI	2018-2019
YARIYIL	☐ Güz ☒ Bahar
ANABİLİM DALI	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	KATI ATIK SAHALARINDA ŞEV STABİLİTESİ

İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ

RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	121
BENZERLİK ORANI	% 18
RAPORLAMA TARİHİ	11/07/ 2019

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 121 sayfalık kısmına ilişkin, 11/07/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *TURNİTİN* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 18. 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☒ Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐ Kaynakça hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(Öğrencinin Adı Soyadı)

Sedat KEZER

(İMZA/TARİH) 11/07/2019

Doç. Dr. M. Salih KESKİN

Tez Danışmanı 11/07/2019
(İMZA/TARİH)

Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK

Anabilim Dalı Başkanı
(İMZA/TARİH)

12.07.2019