



KATI ATIK SAHALARINDA DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ

GÖKÇE BUSE GÜNER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU

2022

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KATI ATIK SAHALARINDA DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ

GÖKÇE BUSE GÜNER

ORCID: 0000-0002-5182-6123

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU

TEMMUZ-2022

Her hakkı saklıdır

ÖZET

KATI ATIK SAHALARINDA DURAYLILIĞIN İNCELENMESİ

Gökçe Buse GÜNER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU

Günümüzde çevre problemlerinin en önemlilerinden biri atıkların depolanmasıdır. Yanlış depolama yöntemi yüzünden yeraltı sularının kalitesinde büyük tehlikeler oluşmuştur. Vahşi depolama sahalarında halk sağlığı ve çevre kirliliğiyle ilgili problemler çoğunlukla daha yaygındır. Bu açık çöplükler birçok dezavantaja ve ciddi sağlık problemlerine de sebep olmaktadır. Bu sebeple daha önce depolama sahalarında oluşmuş yüzeysel kopmalara neden olan vakalar incelenmiştir. Bu depolama sahaları; Hekimbaşı depolama sahası (Türkiye), Dona Juana depolama sahası (Kolombiya), Gnojna Grora depolama sahası (Polonya), Hiriya depolama sahası (İsrail), Payatas depolama sahası (Filipinler) ve Xerolakka depolama sahası (Yunanistan). Bu çalışmada, kayma mukavemetini tahmin edebilmek için geri analiz yöntemi tercih edilmiştir. Analizler Plaxis 2D ve Plaxis 3D, Slide programlarında gerçekleştirilmiştir. Analiz verileri değerlendirilip düzenli depolama sahalarının nasıl olması gerektiği konusunda önerilerde bulunulmuştur. Depolama sahalarındaki şev göçmelerinin sebebi mühendislik kontrollerinin olmaması ve tasarım eksikliğidir. Özellikle günlük örtü serimi yapılmayan, sıkıştırmanın olmadığı, yanıcı ve zehirli gazların kontrol altında tutulmadığı sahalarda duraysızlıklar yaşanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık, Depolama Sahası, Duraylılık, Şev Stabilitesi, Geri Analiz, Sonlu Elemanlar Metodu

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SLOPE STABILITY OF WASTE DUMPS AND LANDFILLS

Gökçe Buse GÜNER

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ertuğrul ORDU

One of the most important environmental problems today is the storage of waste. The quality of groundwater has been seriously compromised due to the wrong storage method. Problems related to public health and environmental pollution are often more common in landfills. These open dumps cause many disadvantages and serious health problems as well. For this reason, case events that caused slope failures that occurred in landfills before were examined. These landfills; Hekimbaşı Landfill (Turkey), Dona Juana Landfill (Colombia), Gnojna Grola Landfill (Poland), Hiriya Landfill (Israel), Payatas Landfill (Philippines) and Xerolakka Landfill (Greece). In this study, the back analysis method was preferred to predict shear strength. The analysis data were evaluated and suggestions were made about how the landfills should be. The reason for the slope failures in the landfills is the lack of engineering controls and the lack of design. Instability has been experienced especially in areas where daily cover is not laid, where there is no compression, where flammable and toxic gases are not kept under control.

Keywords: Waste, Landfill, Stability, Slope Stability, Reverse Analysis, Finite Elements Method

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
TEŞEKKÜR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
2. KATI ATIK	6
2.1 Katı Atıkların Sınıflandırılması	6
2.2 Katı Atıklarda Bertaraf Yöntemleri	6
2.2.1 Düzensiz (Vahşi) Depolama	7
2.2.2 Düzenli Depolama (DD).....	7
2.2.3 Kompostlama	8
2.2.4 Tekrar Kullanım.....	9
2.2.5 Geri Dönüşüm.....	9
2.2.6 Geri Kazanım.....	10
2.2.7 Kontrollü Yakma.....	10
2.3 Katı Atık Düzenli Depolama Tesisleri.....	11
2.3.1 Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinin Sınıflandırılması	11
2.3.2 Katı Atıkların Düzenli Depolanma Aşamaları.....	11
2.3.2.1 Atık depoları için yer tespit edilmesi.....	12
2.3.2.2 Geçirimsiz malzeme serilmesi.....	13
2.3.2.3 Düzenli depolama tesislerinde toprak ve suların korunması için sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sistemleri	14
2.3.2.4 Düzenli depolama tesislerinde depo gazı kontrolü	14
2.3.2.5 Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi.....	15
2.4 Katı Atıkların Mühendislik Özellikleri	17
2.4.1 Porozite.....	18
2.4.2 Su Muhtevası (Su İçeriği).....	19
2.4.3 Birim Hacim Ağırlık	20
2.4.4 Hacimsel Alan Kapasitesi.....	22

2.4.5 Mukavemet Özellikleri.....	23
2.4.6 Katı Atıkların Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri.....	26
2.4.7 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri	29
2.4.8 Kentsel Katı Atıkların Hidrolik İletkenliği.....	30
2.4.9 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı.....	32
3. ŞEV DURAYLILIĞI	33
3.1 Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması.....	35
3.2 Şev Kayması Analizlerinin Tarihi	36
3.3 Şev Stabilite Analizleri ve Hesap Yöntemleri.....	36
3.3.1 Limit Denge Metodu, LDM.....	37
3.3.1.1 Dilim yöntemi.....	38
3.3.1.2 İsveç dilim (Fellenius, 1936) yöntemi	41
3.3.1.3 Basitleştirilmiş Bishop yöntemi (Bishop,1955).....	41
3.3.1.4 Janbu yöntemi (1976).....	42
3.3.1.5 Spencer yöntemi (1967).....	43
3.3.1.6 Sarma yöntemi (1973)	43
3.3.1.7 Bishop-Morgenstern yöntemi (1960)	44
3.3.1.8 Cullmann yöntemi	44
3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodu, SEM	45
3.3.3 Sismik Analizler.....	46
3.3.4 Geri Analiz.....	47
4. ANALİZİ YAPILAN KATI ATIK DEPOLAMA SAHALARI	49
4.1 İstanbul, Ümraniye – Hekimbaşı Depolama Sahası	49
4.2 Bogoto, Kolombiya – Dona Juana Depolama Sahası	50
4.3 Polonya – Gnojna Gropa Depolama Sahası.....	52
4.4 İsrail – Hiriya Depolama Sahası.....	53
4.5 Manila, Filipinler – Payatas Depolama Sahası.....	54
4.6 Yunanistan – Xerolakka Depolama Sahası	55
5. ANALİZDE KULLANILAN PROGRAMLAR.....	57
5.1 Plaxis Programı.....	57
5.1.1 Geometrik Modelin Oluşturulması	57
5.1.2 Başlangıç Koşulları	58
5.1.3 Sınır Koşulları.....	59
5.1.4 Zemin Elemanları.....	59
5.1.5 Zemin Modelleri	60

5.2 Slide Programı	60
6. ANALİZ	62
6.1 İstanbul, Ümraniye – Hekimbaşı Depolama Sahası’ nda Analiz	65
6.2 Bogoto, Kolombiya – Dona Juana Depolama Sahası’ nda Analiz	68
6.3 Polonya – Gnojna Grola Depolama Sahası’ da Analiz.....	72
6.4 İsrail – Hiriya Depolama Sahası’ nda Analiz	76
6.5 Manila, Filipinler – Payatas Depolama Sahası’ nda Analiz.....	79
6.5.1 Payatas Depolama Sahası’ nın Plaxis (2D) ile Analizi	80
6.5.2 Payatas Depolama Sahası’ nın Plaxis (3D) ile Analizi	83
6.5.3 Payatas Depolama Sahası’ nın Slide ile Analizi	86
6.6 Yunanistan – Xerolakka Depolama Sahası’ nda Analiz	88
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR.....	95
EK-1. PAYATAS DEPOLAMA SAHASINDA SLIDE PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZ DETAYLARI.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kompostlama için uygun organik katı atıklar [1]	8
Çizelge 2.2. Katı atıkların indeks özellikleri [22].....	19
Çizelge 2.3. Çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilen su muhtevası değerleri [2].....	20
Çizelge 2.4. Kentsel katı atıkların ortalama birim hacim ağırlığı [22]	21
Çizelge 2.5. Kentsel katı atık sahalarının hacimsel alan kapasitesi değerleri [22].....	22
Çizelge 2.6. Katı atıkların mukavemet parametreleri [16].....	25
Çizelge 2.7. Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları [2,14]	28
Çizelge 2.8. Çeşitli ortamlardaki KKA' ların birim hacim ağırlığı değerleri [2]	30
Çizelge 2.9. Kentsel katı atık sahalarında hidrolik iletkenlik değerleri [22].....	31
Çizelge 3.1. Şev hareketi sınıflandırması [12]	35
Çizelge 3.2. Şev göçmeleri için sınıflandırma [24]	36
Çizelge 3.3. Şev duraysızlıklarının nedenleri [24]	37
Çizelge 3.4. Limit denge yöntemlerinde yapılan kabullerin karşılaştırılması [16]	39
Çizelge 3.5. Dilim yönteminde bilinen ve bilinmeyen sayıları [12].....	40
Çizelge 3.6. Şev stabilitesi için F_s , güvenlik katsayıları [14]	46
Çizelge 6.1. Analizleri yapılan depolama sahalarının özellikleri	62
Çizelge 6.2. Zeminin mühendislik özellikleri	63
Çizelge 6.3. Katı atıkların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b parametreleri [14].....	64
Çizelge 6.4. Hekimbaşı depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	65
Çizelge 6.5. Dona Juana depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	69
Çizelge 6.6. Gnojna Grora depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	72
Çizelge 6.7. Hiriya depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	76
Çizelge 6.8. Payatas depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	80
Çizelge 6.9. Xerolakka depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Düzenli katı atık depolama sahası kesiti [16]	8
Şekil 2.2. Atıkların kaynakta ayrıştırılması ile etkin bir geri kazanım [1].....	10
Şekil 2.3. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması [18,20]	11
Şekil 2.4. Düzenli depolama sahasının hazırlanması [18]	12
Şekil 2.5. Geomembran serimi [18,21]	13
Şekil 2.6. Geotekstil serilmesi [21].....	13
Şekil 2.7. Drenaj tabakasının oluşturulması [18].....	14
Şekil 2.8. Gaz depolama tankları [18].....	15
Şekil 2.9. Tipik gaz yakma ünitesi [21]	15
Şekil 2.10. Düzenli depolama alanının kesiti [18].....	16
Şekil 2.11. Yüzey geçirimsizliği kesiti [18].....	17
Şekil 2.12. Düzenli depolama tesisinin sosyal saha haline getirilmesi [18]	17
Şekil 2.13. Toplam birim hacim ağırlık değerlerinin derinlik ile değişimi [2, 22]	22
Şekil 2.14. Atıklar için Singh ve Murphy' nin önerdiği içsel sürtünme açısı ve kohezyon [22]	23
Şekil 2.15. Rapor edilmiş kayma mukavemeti değerleri [2].....	25
Şekil 2.16. Katı atıkların zaman içerisindeki oturma evreleri [2].....	27
Şekil 2.17. Geçiş sayısına göre birim hacim ağırlık grafiği değişimi [14]	29
Şekil 2.18. Hidrolik iletkenliğin derinlikle değişimi [2]	31
Şekil 3.1. Şevleri tanımlamaları [24]	33
Şekil 3.2. Kazı esnasındaki potansiyel kayma düzlemleri [14].....	34
Şekil 3.3. Katı atık gövdesinde oluşması muhtemel kayma düzlemleri [2, 14]	34
Şekil 3.4. Bir şevde göçen kütleyle etkileyen kuvvetler [12]	39
Şekil 3.5. Göçen kütlede tek dilime etkileyen kuvvetler [12].....	40
Şekil 3.6. İsveç dilim yönteminde bir dilime etkileyen kuvvetler ve kuvvet poligonu [25].....	41
Şekil 3.7. Janbu düzeltme sayıları [12]	43

Şekil 3.8. Cullmann kırılma yüzeyi [25].....	44
Şekil 3.9. Plaxis programında sonlu elemanlara ayrılmış şev kesiti [26]	45
Şekil 4.1.Şev göçmesi olduktan sonra İstanbul - Hekimbaşı depolama sahası [8].....	50
Şekil 4.2. Dona Juana depolama sahasının genel görünümü [5]	50
Şekil 4.3. Şev göçmesinin krokisi [5]	51
Şekil 4.4. 1997’ de Hiriya depolama sahasında oluşan şev göçmesi [4]	53
Şekil 4.5. Hiriya depolama alanının kesiti [4]	54
Şekil 4.6. 2000 yılında Payatas depolama sahasında şev göçmesi [4].....	54
Şekil 4.7. Payatas depolama alanının kesiti [4]	55
Şekil 5.1. Düzlem şekil değiştirme [31].....	58
Şekil 5.2. Eksenel simetrik problem [31].....	58
Şekil 5.3. Şev stabilite analizlerinde sınırlarının konumunu oluşturmak için örnek [33].....	59
Şekil 6.1. İstanbul, Ümraniye - Hekimbaşı depolama sahasının şev geometrisi.....	66
Şekil 6.2 Plaxis’ de modellenen Hekimbaşı depolama sahası.....	66
Şekil 6.3. Hekimbaşı depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	67
Şekil 6.4. Hekimbaşı depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi.....	67
Şekil 6.5. Hekimbaşı depolama sahasına ait güvenlik sayıları.....	68
Şekil 6.6. Plaxis’ de güvenlik sayısı grafiği	68
Şekil 6.7. Bogota- Dona Juana depolama sahasının şev geometrisi.....	69
Şekil 6.8. Plaxis’ de modellenen Dona Juana depolama sahası	70
Şekil 6.9. Dona Juana depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	70
Şekil 6.10. Dona Juana depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi	71
Şekil 6.11. Dona Juana depolama sahasına ait güvenlik sayıları	71
Şekil 6.12. Plaxis’ de güvenlik sayısı grafiği	72
Şekil 6.13. Gnojna Grora depolama sahasının şev geometrisi	73
Şekil 6.14. Plaxis’ de modellenen Gnojna Grora depolama sahası	73
Şekil 6.15. Gnojna Grora depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli....	74

Şekil 6.16. Gnajna Grora depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi	75
Şekil 6.17. Gnojna Grora depolama sahasına ait güvenlik sayıları	75
Şekil 6.18. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği	76
Şekil 6.19. Hiriya depolama sahasının şev geometrisi.....	77
Şekil 6.20. Plaxis' de modellenen Hiriya depolama sahası.....	77
Şekil 6.21. Hiriya depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	78
Şekil 6.22. Hiriya depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi.....	78
Şekil 6.23. Hiriya depolama sahasına ait güvenlik sayıları.....	79
Şekil 6.24. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği	79
Şekil 6.25. Payatas depolama sahasının şev geometrisi.....	80
Şekil 6.26. Plaxis 2D' de modellenen Payatas depolama sahası	81
Şekil 6.27. Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	81
Şekil 6.28. Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi.....	82
Şekil 6.29. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları.....	82
Şekil 6.30. Plaxis 2D' de güvenlik sayısı grafiği.....	83
Şekil 6.31. Payatas depolama sahasının şev geometrisi.....	83
Şekil 6.32. Plaxis 3D' de modellenen Payatas depolama sahası	84
Şekil 6.33. Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	84
Şekil 6.34. Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi.....	85
Şekil 6.35. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları.....	85
Şekil 6.36. Plaxis 3D' de güvenlik sayısı grafiği.....	86
Şekil 6.37. Slide programında modellenen Payatas depolama sahası	86
Şekil 6.38. Slide programında yapılan analiz.....	87
Şekil 6.39. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları.....	88
Şekil 6.40. Xerolakka depolama sahasının şev geometrisi	89
Şekil 6.41. Plaxis' de modellenen Xerolakka depolama sahası	89
Şekil 6.42. Xerolakka depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli	90

Şekil 6.43. Xerolakka depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi	90
Şekil 6.44. Xerolakka depolama sahasına ait güvenlik sayıları	90
Şekil 6.45. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği	91



KISALTMALAR DİZİNİ

KKA	Kentsel Katı Atık
DD	Düzenli Depolama
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen Folye
FS	Güvenlik Sayısı
LDM	Limit Denge Metodu
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
USEPA	ABD Çevre Koruma Kurumu (United States Environmental Protection Agency)
MSW	Municipal Solid Waste
PVC	Polivinil Klorür
LE	Lineer Elastik Model
MC	Mohr – Coulomb Model
JR	Jointed Rock Model
SS	Soft Soil Model
SSC	Soft Soil Creep Model
HS	Hardening Soil Model

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımda gerek teknik donanım, gerekse teknik bilgi açısından bilgisini esirgemeyen saygı değer hocam Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul ORDU' ya teőekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve canım eőime teşekkür ediyorum.

Gökçe Buse GÜNER

İnşaat Mühendisi



1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ve sanayileşme ile birlikte yaşanan hızlı kentleşme ve nüfus artışı, hem ülkemizde hem de tüm dünyada insan faaliyetlerinin çevre üzerindeki baskısını hızla artırmaktadır. Bu süreçte sürekli artan tüketim eğilimi ile birlikte oluşan atıklar da, hem miktar hem de zararlı içerikleri nedeniyle çevre ve insan sağlığını tehdit eder boyutlara ulaşmıştır [1].

Katı atıklar, gelişen dünyaya paralel olarak sistemli bir şekilde muhafaza edilmeye çalışılmaktadır. Bu tür atıkların tam olarak ortadan kaldırılması mümkün olmadığından, hacimlerinin en aza indirilmesi, düzenli bir şekilde depolanması ve teknolojinin elverdiği ölçüde geri dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir. Kentsel katı atıkların (KKA) bertaraf edilmesi amacıyla dünya genelinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Düzenli depolama, kompostlaştırma ve yakma gibi diğer uygulanan yöntemlere kıyasla daha ekonomik olup, dünya genelinde en yaygın kullanılan katı atık bertaraf metodudur [2].

Atıkların çöp sahasına atılması, her katı atık yönetim sisteminin kaçınılmaz bir bileşenidir. Bazı ülkelerde ucuz bertaraf yöntemleri tercih edilmektedir ve bu nedenle açık çöplüklerin sayısı artmaktadır [3]. Bu açık çöplükler birçok dezavantaja ve ciddi sağlık problemlerine de sebep olmaktadır. Bu depolama yöntemine vahşi depolama denmektedir.

Bu tez çalışmasında katı atık depolama sahalarında stabilite problemleri incelenip atıkların duraylılığı ile ilgili incelemeler amaçlanmaktadır. Düzenli depolama sahası şev göçmesinin geri analizi, kentsel katı atıklarının drenajlı kayma dayanımını anlamak için önemlidir [4]. Bu çalışmada da geri analiz yöntemi kayma mukavemeti tahmin etmek için tercih edilmiştir. Analiz verileri değerlendirilip düzenli depolama sahalarının nasıl olması gerektiği konusunda önerilerde bulunulmuştur.

Tezin 1. Bölümü' nde konuya giriş yapılarak literatür özetlerinden ve çalışmanın amacından kısaca bahsedilmiştir. Tezin 2. Bölümü' nün başlığı ise "KATI ATIK" dır. Bu bölümde; tanımlamalar yapılmış, bertaraf yöntemlerinden bahsedilmiş, depolama tesislerine ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca; katı atığa ait mühendislik özellikleri tek tek ele alınmıştır. 3. Bölüm ise "ŞEV DURAYLILIĞI" dır. Bu bölümde şev stabilite analizleri ve geri analiz metodu incelenmiştir. 4. Bölüm "ANALİZİ YAPILAN KATI ATIK DEPOLAMA SAHALARI" dır. Bu bölümde incelen depolama sahalarına ait bilgiler verilmiştir. 5. Bölüm "ANALİZDE KULLANILAN PROGRAMLAR" başlığı altında Plaxis ve Slide programlarına ait bilgiler verilmiştir. 6. Bölüm olan "ANALİZ" bölümünde ise depolama sahalarındaki analizler ayrıntılı

olarak ele alınmıştır. Son bölüm olan 7. Bölüm yani “SONUÇ VE ÖNERİLER” kısmında; depolama sahalarındaki şev göçmelerindeki sorunlar ele alınarak depolama sahasının tasarımı hakkında önerilerde bulunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Caicedo ve arkadaşları [5], Dona Juana Sahası’ nda (Zone 2) 800.000 ton katı atığın göçtüğünü bildirmektedir. 27 Eylül 1997’ de olayın gerçekleştiği gün eğim 3:1, yüksekliği ise 40 m’dir. Başlangıçta 2. Bölge’ nin ön kısmında göçme gerçekleşmiştir, ancak bu durum tüm atık kütlelerini etkilemiştir. Çalışmanın sonunda atığın yüksek su muhtevasına (%40) sahip olması nedeniyle göçmenin başladığı söylenmektedir. Ayrıca atıkların bir çığ gibi göçmesine neden olan birkaç etkenin bir araya gelmesidir. Caicedo çalışmalarında göçmenin nedeninin başlıca sorumlusu olarak yüksek boşluk suyu basıncı olduğunu belirtmiştir. Bir diğer neden ise dikey yöndeki gaz drenajlarının içinde sızıntı suyunun varlığı ve gazın bir çıkış yolu bulmasını zorlaştırmasıdır.

Fernandez ve arkadaşları çalışmalarında [6], Dona Juana Sahası’ nda 1,5 milyon ton göçmenin olduğunu ve eğimi 4,7:1 olarak belirtmişlerdir. Bölge 2’ deki katı atık malzemelerinin mühendislik özellikleri arasında 10,6- 13,0 kN/m³ arasında değişen birim hacim ağırlık ve yaklaşık 10⁻³ cm/sn’ lik bir permeabilite bulunmaktadır. Değerlerden de anlayabileceğimiz gibi permeabilite değeri yüksektir. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’ ne göre permeabilite 10⁻⁷ cm/sn olması gereklidir. Sunulan analizlere dayanarak, Dona Juana Sahası’ nın, katı atık kütleindeki yüksek boşluk basınçlarının, atığın oldukça organik doğasıyla artış göstermesi nedeniyle ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. Bu durum, yetersiz tasarlanmış sızıntı suyu drenajı ve gaz tahliye sistemleri tarafından daha da kötüleştirilmiştir.

Sarihan ve arkadaşları çalışmalarında [4], Gnojna Grora, İstanbul, Hiriya ve Payatas depolama sahalarının vaka analizlerini incelemişlerdir. İncelemelere göre; şev göçmelerinin geri analizi yapılarak kayma mukavemeti parametrelerine ulaşılmıştır. Düzenli depolama sahası şev göçmeleri her biri gözden geçirilmiş ve geri analizlerin sonuçları sunulmuştur. Son olarak, depolama sahası eğimlerinin tasarımı için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen kayma mukavemeti zarfının karşılaştırılması sunulmuştur. Depolama sahasının yeri, atığın yaşı ve bileşimi, kayma mukavemeti özellikleri, şev geometrisi, zemin özellikleri, depolama sahası vaka geçmişinin raporlanmasında boşluk basıncı koşulları tanımlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Parametreler iyi bir geri analiz yapmak için mümkün olduğunca doğru bir şekilde

tanımlanmalıdır. Bu nedenle, kaymadan hemen sonra, görgü tanığı hesaplarının kaydedilmesi ve son dolgu yerleşimi, yağış vb. geçmişinin kayıtları da dahil olmak üzere kapsamlı bir saha keşif araştırması yapmak çok önemlidir. Böylece daha doğru veriler elde edilebilir.

Kocasoy ve Curi çalışmalarında [7], Ümraniye - Hekimbaşı Depolama Sahası'nda 1976 yılından beri depolama yapıldığını belirtilmiştir. Sahada günlük ortalama 1.500 – 2.000 ton katı atık bertaraf edilmiştir. Çalışmalarında atıkların serilmesinde hiçbir atığın sıkıştırılmasının yapılmadığına yer vermişlerdir. 28 Nisan 1993' de bir "patlama" meydana geldiği, ardından büyük bir katı atık kütlesi yer değiştirerek 11 evi yutarak 39 kişinin ölümüne neden olduğu belirtmiştir. Kocasoy ve Curi çalışmalarında şu sonuçlara varmıştır. Başlangıçta katı atıklar, uygun olmayan şev stabilitesi ve üst üste binen yük nedeniyle kaymaya başladı ve şiddetli yağışlarla daha da kötüleşti. Bu hareket sırasında, depolama sahası içinden çıkan gaz, patlayıcı bileşime ulaşmak için hava ile karışır ve daha sonra, ya mevcut bir yangın kaynağı nedeniyle veya hareketli atık bileşenler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısının etkisiyle tutuşur. Patlama, atıkların hareketini hızlandırarak şev göçmesine neden olmuştur.

Blight çalışmasında [8], 1977 ve 2005 yılları arasında şev göçmeleri oluşan altı depolama sahasını incelemiştir. Bunlar; 1977 Saraybosna, 1993 İstanbul, 2000 Filipinler, 2005 Endonezya, 1997 Kolombiya ve 1997 Güney Afrika. Yaklaşık 300 kişinin ölümüne neden olan Filipinler' deki şev göçmesinde 10 - 12.000 ton atık yer değiştirmiştir. Kolombiya' daki Bogota Depolama Sahası'nda 1,5 milyon ton atık yer değiştirmesine rağmen ölüm veya yaralanma olmamıştır. Altı şev göçmesinde dördü bilindiği kadarıyla önceden herhangi bir teknik incelemeye tabi tutulmamıştır. Tüm göçmelerdeki birincil faktörler, mühendislik kontrolünün eksikliği, depolama sahaları için tasarım eksikliği ve tasarım ve çalışma ilkelerinin anlaşılmasındadır. Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olduğuna varılmıştır.

Lavigne ve arkadaşları çalışmalarında [9], 21 Şubat 2005 tarihinde Leuwigajah çöp sahası Bandung (Java, Endonezya) şiddetli yağışların ardından meydana gelen şev göçmesini incelemiştir. Tarihteki ikinci en ölümcül atık göçmesi, olan bu felakette 71 ev gömülmüş ve 143 kişi ölmüştür. Bu felakete neden olan göçme ön koşullarını ve göçmeyi tetikleyici nedenleri bu çalışmada araştırılmıştır. Sahada dört saha araştırması yapılmış. Topografik ölçümlerle bir dizi hava fotoğrafı alınmış ve tamamlanmıştır. Göçmenin morfolojisi ve yörüngesi yeniden yapılandırılmış ve hareket koşullarını sınırlandırmak için, kaynak alanın içyapısı incelenmiştir. 2,7 milyon ton atık, ortalama kalınlığı 10 m olan bir kaynağından 1000 m uzağa yayılmıştır.

Sahadaki metan varlığı, göçmeden önceki patlamalardan ve tüm kayan kütleyle etkileyen yangından sorumludur. Göçme, bu sebeplerden dolayı tahmin edilebilirdi. Bunlar; göçmeden önce depolama sahasının yaklaşık %100 ön eğimi ve yetersiz bir depolama sahası yönetimidir. Ayrıca; depolama sahasının yakınlarında risk altındaki çöp toplayıcıların yaşaması, şev göçmesinden dolayı ölüm sayısını arttırmıştır.

Athanasopoulos ve arkadaşları çalışmalarında [10], 29 Aralık 2010 tarihinde meydana gelen şev göçmesi 27 m yüksekliğinde ve 30 m genişliğinde ve 12.000 ton atık kütlesi içerdiğini belirtmiştir. Keşif çalışmaları, saha ölçümleri ve stabilite analizleri ışığında, şev göçmesi, yetersiz depolama uygulamaları (sıkıştırmanın olmaması ve günlük toprak örtü serimi yapılmaması), atık kütlelerinin dik eğimi ve artan yağışlarla sızıntı suyunun artmasına bağlanmaktadır. Analizler ayrıca kuru koşullarda göçmenin başlangıçta olmayacağını ancak yağışın artmasının durumu tetiklediğini göstermiştir.

Xu ve arkadaşları çalışmalarında [11], 20 Aralık 2015 tarihinde Çin' in Shenzhen' in Guangming Yeni Bölgesi' ndeki Hongao çöp sahasında yıkıcı şev göçmesi meydana geldiğini belirtmiştir. Göçen hacmin 2,32 milyon ton olduğunu ve göçmenin gerçekleşmeden önceki hacminin ise yaklaşık 6,27 milyon ton olduğuna yer verilmiştir. Yer değiştiren atığın %17,3 - 42,4 su muhtevasına sahip siltli toprak ile inşaat ve yıkım atığının bir karışımı olduğu makalede verilmiştir. Şev göçmesinin başlıca nedenlerinin şunlar olduğu sonucuna varılmıştır. Drenaj sistemi arızası ve altında yatan geçirimsiz tabaka nedeniyle çöp sahasında yeraltı suyunun durması, depolanan atığın toplam hacmi tasarım kapasitesinin üzerinde oluşu ve yüksek boşluk suyu basıncıdır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde çevre problemlerin en önemlilerinden biri atıkların depolanmasıdır. Yanlış depolama yöntemi, yeraltı ve yerüstü su kalitesini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Uygulama tekniği ve ekonomik olmasıyla ilgili en çok tercih edilen yöntem ise Düzenli Katı Atık Depolama Yöntemi' dir.

Depolama sahalarındaki faciaların sebebi mühendislik kontrollerinin olmaması ve tasarım eksikliğidir. Facialar özellikle günlük örtü serimi yapılmayan, sıkıştırmanın olmadığı, yanıcı ve zehirli gazların kontrol altında tutulmadığı sahalarda yaşanmış ve olaydan önceki yağışlar faciayı tetiklemiştir. Bu çalışmada katı atık depolama sahalarının yer seçimi, taban geçirimsizliği, stabilite sorunları ve tahkikleri (şev stabilitesi) incelenmiştir. Geri analiz

yöntemi ile kayma mukavemeti elde edilip katı atık depolama sahasının sayısal verileri değerlendirilip önerilerde bulunulmuştur.



2. KATI ATIK

İnsanların; sanayi, tarım ve ticaretteki faaliyetleri ile birlikte, yaşamsal faaliyetleri, yeni yapılar sonrasında işe yaramayan her türlü malzemeyi su ve atık su arıtılması gibi değişik işlemler sonucu işe yaramayacak halde olan her türlü madde için “katı atık” diyebiliriz [12]. Katı atıkla ilgili diğer tanımlara değinecek olursak; Curi, katı atıkları yok edilmesi gereken maddelerden çok geri kazanılması gereken zenginlik olarak gören anlayışla çöpü, arzu edilmeyen yerlerde bulunan kıymetli maddeler; Bartone ise benzer bir anlatımla atıkları yanlış yerde bulunan kaynaklar biçiminde tanımlamaktadır [13].

2.1 Katı Atıkların Sınıflandırılması

Katı atıklar sınıflandırılırken, ele alınan özelliğe göre birçok sınıflandırma şekline rastlanılmıştır. Aykol’ un çalışmalarına göre, katı atıklar ortam ve içerik bakımından 5 ana başlıkta incelenebilir [14]:

- Evsel Katı Atık
- Mineral Atık
- Endüstriyel Atık
- Deniz Dibiindeki Tortular
- Zararlı ve Tehlikeli Atık

Diğer bir sınıflandırmaya göre, Curi tarafından katı atıkların özelliklerine bakarak sekiz ayrı grupta incelenmiştir [15];

- Evsel katı atık
- Ticari atık
- Endüstriyel atık
- Yol ve park atıkları
- Hafriyat ve yıkım atıkları
- Atıksu arıtma tesisi atıkları
- Zirai atıklar
- Diğer atıklar.

2.2 Katı Atıklarda Bertaraf Yöntemleri

Bertaraf yöntemlerinin seçimi, uygulanan planlama ve idare metotlarına göre değişiklik göstermektedir. Ekonomi, mühendislik, arazi kullanımı, çevre düzenlemesi, coğrafi ve sosyal faktörler şeklinde sıralayabiliriz [1]. Kezer [16]’ in yaptığı çalışmaya göre, katı atık bertaraf yöntemleri; düzensiz depolama, düzenli depolama, kompostlama, tekrar kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve yakmadır.

2.2.1 Düzensiz (Vahşi) Depolama

Düzensiz depolamayı Kamer [1]' e göre tanımlayacak olursak atıkların rahatsız edici görüntü ve kokulara, su, toprak ve hava kirliliğine yol açacak biçimde açık alanlara, deniz ya da ırmaklara hiçbir tedbir alınmaksızın gelişigüzel verilerek uzaklaştırılmasıdır. Bu yöntem genellikle gelişmemiş veya gelişmekte olan ülkelerde kullanılan en ilkel yöntemdir [16].

Katı atıklardan kaynaklanan sızıntı sularının yer altı ve yer üstü su kaynaklarını kirletmesi, böcek ve haşerelerin kolaylıkla üremesi, oluşturduğu kötü koku ve görüntü kirliliği gibi nedenlerle insan ve çevre sağlığı açısından düzensiz depolama yöntemi uygun değildir. Vahşi depolama alanlarında oluşan metan gazlarıyla patlamalar da oluşabilir [1].

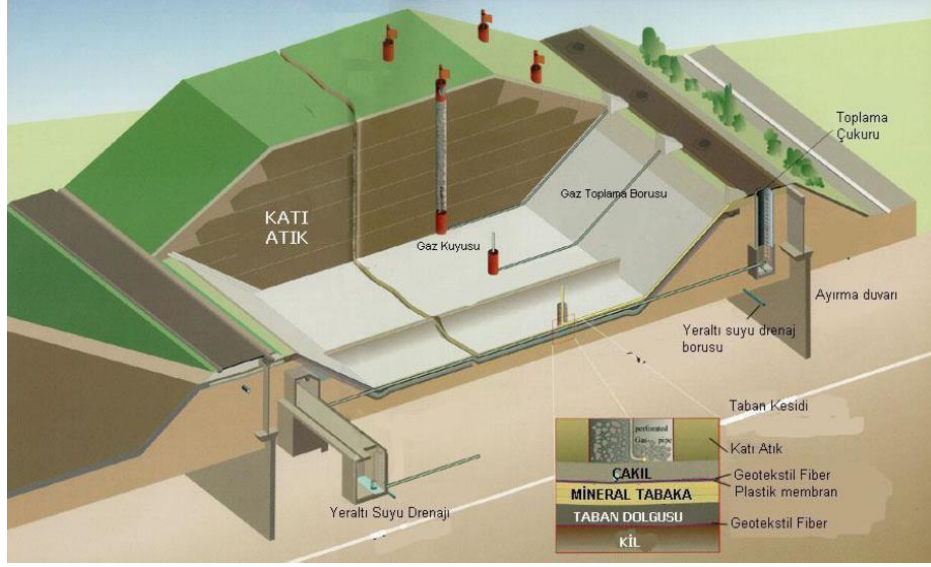
2016- 2023 Atık Eylem Planı' na göre Türkiye' de 59 ilde 82 adet düzenli depolama tesisi bulunmaktadır. Ancak; 22 ilde ise düzensiz döküm gerçekleştirilmektedir [17].

2.2.2 Düzenli Depolama (DD)

Kamer [1]' in yaptığı çalışmaya göre; atık yönetimi hiyerarşisinde, atıkların insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek uygun metotlarla bertarafı son aşama olarak kabul edilebilir. Geri kazanılamayan ve geri dönüştürülemeyen atıkların depolanması suretiyle bertarafı günümüzde halen yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Ülkemizin şartlarına göre en uygun bertaraf yöntemi olmasının nedenleri; en ekonomik yatırım ve işletme maliyetine sahip olması, katı atık miktarına göre kapasitesinin artırılabilir olması ve kapatılan arazinin nihai imha metodu olmasıdır [1].

Şekil 2.1' de ise düzenli depolama sahasına ait kesite yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Düzenli katı atık depolama sahası kesiti [16]

2.2.3 Kompostlama

Kompostlama, mikroorganizma adı verilen ve çoğunluğu gözle görülmeyen canlıların, ortamın oksijenini kullanarak çöp içerisindeki organik maddeleri biyokimyasal yollarla ayrıştırması olarak Kamer [1]' in çalışmasında tanımlanmıştır. Bu olayın gerçekleşebilmesi için çöp kütleindeki su içeriğinin %45-60 dolaylarında olması gerekmektedir [1]. Çizelge 2.1' de kompostlama ile ilgili uygun organik atıklar için örnekler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kompostlama için uygun organik katı atıklar [1]

Atık Kategorisi	Atıklar
Yemek Atıkları	Süt, ekmek ve diğer unlu mamüller, kahve, bozulmuş kuru yemekler, meyve ve sebze parçaları, yumurta kabukları, hazır yemek atıkları, çürümüş meyve ve sebzeler, deniz ürünü atıkları, çay atıkları ve poşetleri, kalan ve dökülen yemekler
Kağıt	Buruşturulmuş kutular, hazır yemek paketleri, kağıt mendil, ilaç kutuları, ofis kağıtları, meyve suyu ve süt kutuları, kağıt havlu ve peçete, kağıt bardak ve tabaklar, kirli yemek kağıtları, gazete ve diğer kağıt türleri

Çizelge 2.1. Kompostlama için uygun organik katı atıklar (devamı)[1]

Atık Kategorisi	Özel Atıklar
Kalın Karton/Mukavva	Karton yemek paketleri (pizza kutuları), giyim ve ticari mal kartonları
Park/Bahçe Atıkları	Su bitkileri, çalılar, çamların iğne yaprakları, bahçe atıkları, çim kırıntıları, yapraklar, küçük dallar, budama atıkları, yabancı otlar
Odun	Kereste parçaları, talaş, yonga ve odun parçaları
Çeşitli Organikler	Biyolojik olarak parçalanabilen zemin süprüntüleri, mısır kabukları ve mısır koçanı, pamuk yumakları, kesilmiş çiçekler, ev bitkileri, hayvanların altına konulan saman ve ot atıkları, hayvan atıkları, çimen parçaları, saman, tekstil ürünleri (pamuklu)

Kompostlama aşamaları; ayırma, öğütme ve fermantasyon şeklinde 3 aşamada ilerler.

Bu yöntemin; “toprağa besleyici maddeler kazandırması, faydalı toprak organizmalarını artırması, organik atıkların geri kazanılması, belli bitkisel hastalıkları önlemesi, gübre ve pestisitlere olan ihtiyacı azaltması, toprak erozyonunu engellemesi, kirlilik probleminin çözümlenmesi ve doğal kaynakların korunması” gibi birçok faydası vardır [16].

2.2.4 Tekrar Kullanım

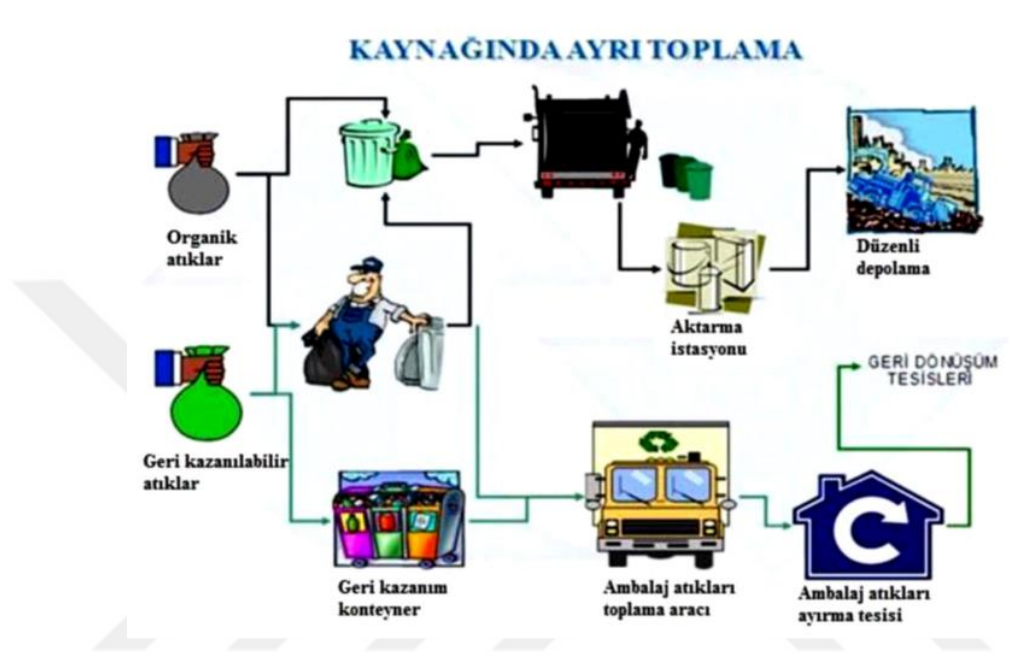
Katı atıkların toplama ve temizleme dışında herhangi bir kimyasal veya biyolojik işleme tabi tutulmadan aynı şekli ile ekonomik ömrünü tamamlayıncaya kadar defalarca kullanılmalıdır. Katı atık içindeki; kağıt, cam, plastik, değerli metal vb. malzemeler tekrar kullanılarak ekonomiye ciddi katma değer katabilir. Ayrıca, bu şekilde çevreye de verilecek zararları en aza indirilebilir [16].

2.2.5 Geri Dönüşüm

2015 Atık Yönetimi Yönetmeliği’ 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 geri dönüşüm tanımlanmaktadır [16].

2.2.6 Geri Kazanım

2015 Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde geri kazanım; "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 [16]. Şekil 2.2' de de geri kazanıma ait şema verilmiştir.



Şekil 2.2. Atıkların kaynakta ayrıştırılması ile etkin bir geri kazanım [1]

2.2.7 Kontrollü Yakma

Atıkları çevre ve insan sağlığı açısından zararsız hale getirmek, hacimlerini azaltmak ve değerlendirme sonucuna göre ekonomik olarak avantajlı olduğu tespit edilen katı atık depolama sahalarında enerji elde etmek amacıyla uygulanan yönteme kontrollü yakma denir [16]. Nüfusun fazla olduğu şehirlerde ve katı atık depolama alanı zor bulunduğu bölgelerde, atıkların imha edilmesi için kullanılabilir [1]. Bu yöntemin faydalı olabilmesi için, atık birleşimindeki maddelerin yanma bakımından içeriğinin zengin olması gerekmektedir. Ayrıca; yakma işlemi sırasında oluşabilecek zehirli gazlar ve tehlikelerle ilgili gerekli önlemler alınmalıdır [16].

Genel olarak tüm katı atık bertaraf yöntemlerinin dağılımına bakacak olursak; 2020 yılı Belediye Katı Atık Temel Göstergelerine göre, 2020 yılında atık hizmeti verilen belediyelerde toplanan 32,3 milyon ton atığın %69,4' ü düzenli depolama tesislerine, %17' si belediye

çöplüklerine ve %13,2' si geri kazanım tesislerine gönderilirken, %0,4' ü ise açıkta yakılarak, gömülerek, dereye veya araziye dökülerek bertaraf edilmiştir.

2.3 Katı Atık Düzenli Depolama Tesisleri

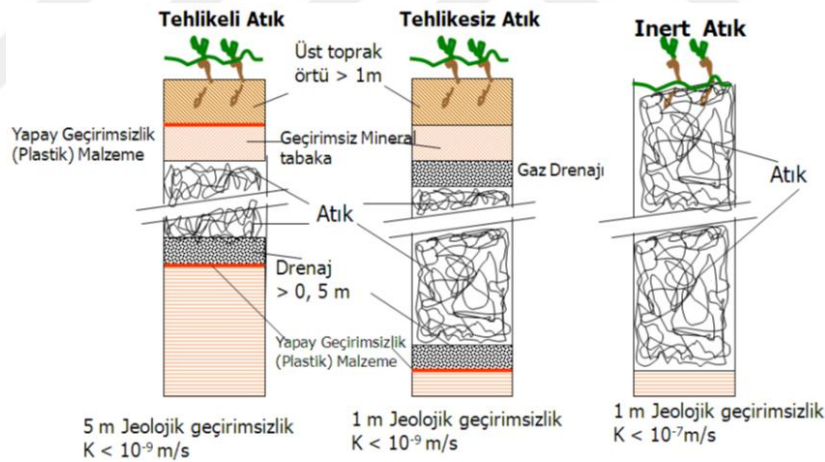
Düzenli depolama, katı atıkların sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlara dökülmesi, sıkıştırılması ve üzerinin örtülerek doğal biyolojik reaktör hâline getirilmesi olarak tanımlanabilir [18].

2.3.1 Katı Atık Düzenli Depolama Tesislerinin Sınıflandırılması

Katı atık düzenli depolama tesisleri 3 ana başlık altında toplanmaktadır [19];

- I. Sınıf düzenli depolama sahaları (Tehlikeli atıklar)
- II. Sınıf düzenli depolama sahaları (Evsel atıklar)
- III. Sınıf düzenli depolama sahaları (Tehlikesiz atıklar)

Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği' ne göre atıkların sınıflarına göre taban sisteminin geçirimsizlik özelliklerine Şekil 2.3' de yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Düzenli depolama tesislerinin sınıflandırılması [18,20]

2.3.2 Katı Atıkların Düzenli Depolanma Aşamaları

Katı atıkların düzenli depolanma aşamaları 6 başlık altında incelenmiştir. Bunlar;

1. Atık depoları için yer tespit edilmesi
2. Tasarım öncesi yapılacak çalışmalar
3. Geçirimsiz malzeme serilmesi
4. Depolama tesislerinde su ile toprağın muhafaza edilmesi için sızıntı suyu yönetimi ve su kontrolü

5. Düzenli depolama tesislerinde depo gazı yönetimi
6. Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi

2.3.2.1 Atık depoları için yer tespit edilmesi

Katı atık depolama tesisinin kurulmasında yer seçimi dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Depolama sahası yönetmeliklere uygun bir şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 2.4' de de düzenli depolama sahalarının hazırlık aşaması ile ilgili görsele yer verilmiştir.



Şekil 2.4. Düzenli depolama sahasının hazırlanması [18]

Düzenli katı atık depolama yerinin planlanması için yönetmelik ve kılavuzlara göre [19];

- Depolama sahaların yeri en yakın yerleşim birimine en az 1 km. mesafede olmalıdır.
- Havaalanına en az 3 km. mesafede olmalıdır.
- İçme suyu, kullanma veya sulama suyu temin edilen yeraltı ve yerüstü sularını koruma bölgelerinde inşa edilmemelidir.
- Deprem bölgelerinde fay hattı üzerine depolama sahası inşası yapılmamalıdır.
- Taşkın riskinin yüksek olduğu yerlerde (çığ, heyelan ve erozyon gibi bölgelerde) inşa edilmemelidir.
- Sulak alanlarda kesinlikle inşa edilmemelidir.
- Şehircilik açısından, hakim rüzgar yönünde depolama sahalarının yeri seçilmemelidir.
- Depolama sahasının yeri imar planında belirtilerek, işletmeye kapatıldıktan sonra en az 40 yıl yerleşime açılmamalıdır. Ayrıca; tasarımı planlanan depolama sahası en az 10 yıl kullanılacak kapasitede olmalıdır.

2.3.2.2 Geçirimsiz malzeme serilmesi

Sızıntı sularının yeraltına sızıp zarar vermesini önlemek, depolama sahasının tabakasının geçirimsiz tabakalardan oluşması ile mümkündür. Bu sayede sızıntı suyu miktarının artması engellenir. Katı atıklardan oluşan sızıntı sularının yeraltı sularına sızmasını ve toprakla temasını önlemek için tabanın geçirimsizliği geomembran (Şekil2.5) ile sağlanmaktadır [18].



Şekil 2.5. Geomembran serimi [18,21]

Ayrıca geomembranların nakliyesi, serimi kaynak edilmesi işlemleri sızıntı suyunun artmaması açısından önemlidir ve uygulama aşamasında her detay dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.6. Geotekstil serilmesi [21]

Geotekstillere özel yapısı gereği, filtrelerin tıkanmasını önler ve geomembranın zarar görmesini engeller. Gözenek yapıları suyun geçişine izin verirken ince danelerin geçişini engeller. Ayrıca yüksek bölgesel yüklere dayanıklı olma özelliği ile geomembranı korur. Şekil 2.6' da geotekstilin serilmiş hali verilmiştir.

2.3.2.3 Düzenli depolama tesislerinde toprak ve suların korunması için sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sistemleri

Düzenli depolama tesislerinde toprak ve suların korunması, oluşabilecek sızıntı suyunun toplanmasına ve uygun şekilde dağıtacak ya da uzaklaştıracak sistemin bulunmasına ve çalışmasına bağlıdır [18]. Ayrıca kapatma sonrasında bu korumanın sağlanması için üst örtü yapılır. I. ve II. sınıf düzenli depolama tesisleri için sahanın özellikleri ve hava şartları dikkate alınarak; depolama sahasına yağıştan kaynaklanan yüzeysel suların girmesini önlemek ve çöp suyu toplama sistemine yağış suyu girmesini en az seviyeye düşürmek gerekir [18].



Şekil 2.7. Drenaj tabakasının oluşturulması [18]

Sızıntı suyu drenaj borularının yerleştirilmesi önemli bir detaydır (Şekil 2. 7). Dikkat edilmesi gerekenleri sıralayacak olursak [21];

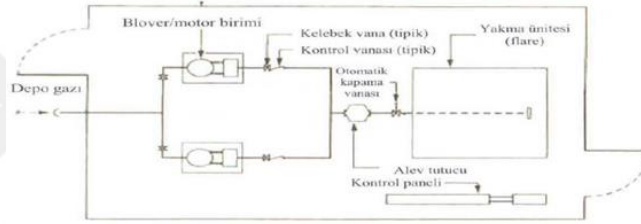
- Hidrolik ve statik olarak hesaplanması gereken drenaj borularının çapı minimum 100 mm ve minimum eğimi %1 olmalıdır.
- Drenaj boruları, münferit borular şeklinde yatayda ve düşeyde kıvrım yapmadan doğrusal olarak depo sahası dışına çıkarılmalıdır.
- Depo tesisi çıkışında kontrol bacaları bulunmalı ayrıca drenaj boruları çevresine kum ve çakıl filtre yerleştirilmelidir.
- Filtrenin boru sırtından itibaren yüksekliği, minimum 30 cm düzeyinde olması en idealidir.

2.3.2.4 Düzenli depolama tesislerinde depo gazı kontrolü

Depo gazının atmosfere atılması ve atık içerisinde hareketini kontrol etmek amacıyla tasarlanır. Oluşan gaz zarar veren bileşimlerin tehlikesini en aza düşürmek için kontrol edilerek yakılır veya enerji üretimi gayesiyle kullanılır [18]. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9' da gaz depolama tanklarına ve gaz yakma ünitesine yer verilmiştir.



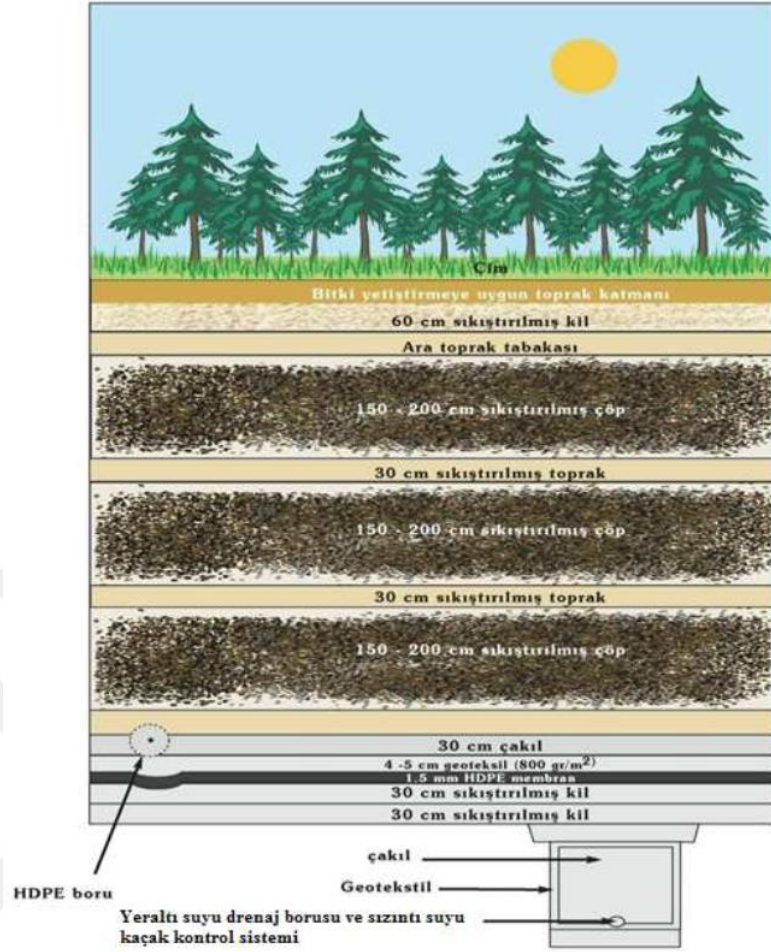
Şekil 2.8. Gaz depolama tankları [18]



Şekil 2.9. Tipik gaz yakma ünitesi [21]

2.3.2.5 Depo sahasının kapatılması ve sosyal saha haline getirilmesi

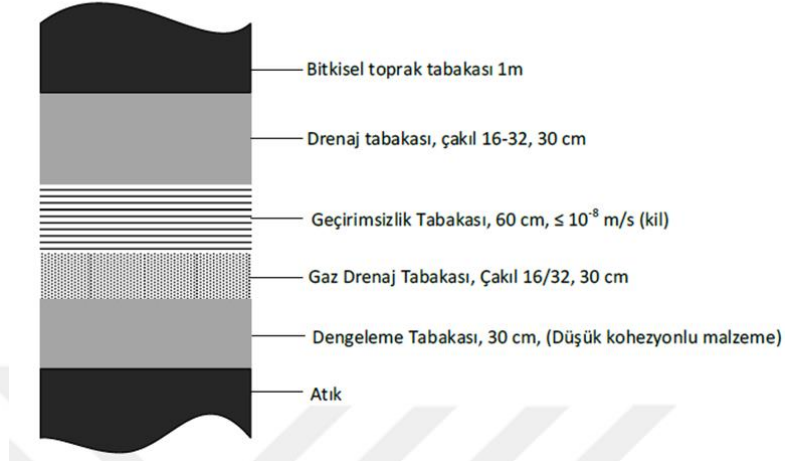
Depolama işleminin tamamlanmasından sonra, çöp dökümüne kapatılacak sahaları, atmosfer, yağış ve yüzey sularından ayırmak amacıyla tekniğine uygun olarak kapatmak gerekir [18]. Şekil 2.10' da düzenli depolama sahası kapatıldıktan sonra toprak yapısına göre bitki örtüsü ile yeşillendirildiği verilmiştir.



Şekil 2.10. Düzenli depolama alanının kesiti [18]

Şekil 2.10' da da görüldüğü gibi depolama işlemi tamamlandıktan sonra üstü kapatılarak, yağmur sularının atıklar ile bulaşması engellenmelidir. Katı atıklardan sızan sızıntı sularının oluşmaması için 60 cm' lik permeabilitesi 1×10^{-8} m/sn olan sıkıştırılmış mineral (kil) geçirimsizlik tabakası oluşturulmalıdır [18,21]. Ayrıca kil tabakası ile beraber ya da sadece 2 mm kalınlığında HDPE folye de kullanılır [21]. Geçirimsiz tabakanın üzerine 30 cm kalınlığında ve permeabilitesi 1×10^{-3} m/sn olan genellikle kireç oranı düşük çakıl kullanılarak drenaj tabakası oluşturulur. Bu tabakayla yağış ve sulama suları çöp gövdesine ulaşmadan tahliye edilir. Daha sonra Şekil 2.11' de de görüldüğü gibi tabakanın üzerine, ekilecek ve dikilecek bitkilerin kök derinliğine göre en az 1 metre kalınlığında bitkisel toprak serilir [18]. Düzenli depolama sahasının üzerine düşen yağmur suyunun kısa sürede sahayı terk edebilmesi için eğimine dikkat edilmelidir. Bu eğim, minimum %3 civarında olmalıdır [21]. Saha proje ömrünü tamamladıktan sonra son örtü olarak adlandırılan geçirimsiz tabaka yapılarak kapatılır. Deponun görünüşü doğal çevre şartlarına uygun, üzerinde bitkilerin yetişebileceği ve kamunun

kullanabileceği sosyal alan haline getirilerek tasarlanmalıdır (Şekil 2.12). Önemli hususlardan biri, depolama alanlarının yanına veya üzerine asla bina ya da tesis kurulmaması gerektiğidir [18].



Şekil 2.11. Yüze geçirimsizliği kesiti [18]



Şekil 2.12. Düzenli depolama tesisinin sosyal saha haline getirilmesi [18]

2.4 Katı Atıkların Mühendislik Özellikleri

Katı atıklar çok farklı özelliklere sahip birçok bileşenden meydana gelmektedir. Bu nedenle KKA mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde çeşitli zorluklar yaşanmaktadır [2]. Pulat' ın yaptığı çalışmada [2]; KKA' ların mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde karşılaşılan zorlukları şu maddeler ile özetlemiştir:

- Tutarsız ve heterojen bileşime sahip olan KKA' ların yapısı mühendislik parametre değerlerinin geniş bir aralıkta değişim göstermesine neden olmaktadır.
- KKA' ların arazi ortamındaki doğal durumunu temsil eden yeterli boyutlarda numunelerin elde edilmesi çok zor olmaktadır.
- KKA parçacıklarının tutarsız ve kararsız hali numune alma ve deney yapma sürecini zorlaştırır. Ayrıca KKA' lar için belirlenmiş bir örnek alma, numuneyi deneye hazırlama ve deney aşamalarını tanımlayan özelleşmiş bir standartları bulunmamaktadır.
- KKA özellikleri zamana, derinliğe ve bulunduğu lokasyona göre değişiklik göstermektedir.

Karşılaşılan zorluklar göz önüne alındığında KKA' ların mühendislik özelliklerinin detaylı ve titiz çalışmalarla belirlenmesi sonucuna varılmaktadır.

Katı atıkların mühendislik özellikleri [14];

- porozite,
- su muhtevası,
- birim hacim ağırlık,
- alan kapasitesi,
- mukavemet ve sıkışabilirlik,
- permeabilite.

2.4.1 Porozite

Porozite (%100 doygunlukta); dane içerisindeki su hacminin, toplam dane hacmine oranı şeklinde tanımlanabilir [14]. Katı atıkta zamanla oluşan basınç ve oturmalarla porozite değeri düşer. Porozitenin düşmesiyle birim hacim ağırlığı değerinde değişim gözlemlenir [16].

$$n = e/(e+1) \quad (2.1)$$

n = porozite; ve e = boşluk oranı parametrelerini belirtir.

Boşluk oranı; boşluk hacminin, katı partikül hacmine oranıdır. Birimsizdir ve yüzde olarak ifade edilir.

Katı atıkların porozitesi, atığın sıkıştırılmasına ve birleşimine bağlı olarak 0,40 ila 0,67 oranları arasında değişir [22].

Çizelge 2.2' katı atıkların indeks özellikleri (birim hacim ağırlığı, su muhtevası, prozite ve boşluk oranı vb.) sayısal verilerle açıklanmıştır.

Çizelge 2.2. Katı atıkların indeks özellikleri [22]

Kaynak	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Su Muhtevası	Porozite	Boşluk Oranı
Rovers ve Farquhar (1973)	9,3	0,16	-	-
Fungaroli (1979)	9,9	0,05	-	-
Wigh (1979)	11,5	0,08	-	-
Walsh ve Kinman (1979)	14,1	0,17	-	-
Walsh ve Kinman (1981)	14,0	0,17	-	-
Schroeder ve diğ. (1984a, b)	-	0,28	0,52	1,08
Oweis ve diğ. (1990)	6,3 – 14,1		0,40 – 0,50	0,67 – 1,0
Schroeder ve diğ. (1994a, b)	-		0,67	2,03
Zornberg ve diğ. (1999)	10 - 15		0,49 – 0,62	1,02 – 1,65

2.4.2 Su Muhtevası (Su İçeriği)

Su muhtevası, atığın içindeki su içeriğinin başlangıçtaki kuru ağırlığına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Katı atıktaki su muhtevası, depolama sahalarındaki ayrışmayı etkileyen en önemli faktördür [16].

Evsel atıkların su muhtevası değerinin belirlenmesine dair literatürde; üç farklı metot olduğunu Pulat [2] belirtmiştir. Bunlardan birincisi kuru ağırlık ölçümüne dayalı su muhtevası, ikincisi ıslak ağırlık ölçümüne dayalı su muhtevası ve son olarak üçüncüsü de su muhtevasının hacimsel olarak belirlendiği metotlardır [2].

Depolama sahalarındaki su muhtevası; atık türü ve özellikleri, atık bileşimi, bölgenin sıcaklık durumu, atıktaki birincil sıkıştırma, depolama tesisinin işletme yöntemi, sızıntı suyu toplama ve uzaklaştırma sisteminin etkinliği değerlerine bağlı olarak değişmektedir [16]. Ayrıca atıkların su muhtevasının; derinlikle değişimini inceleyen sınırlı sayıda çalışma olduğunu Pulat çalışmasında belirtmiştir [2].

Gomes ve diğerleri; Portekiz'in Santo Tirso adlı katı atık depolama sahasında yaptıkları çalışmada; yeni depolanmış atıkların su içeriğini %61- %96 aralığında belirlerken, 2- 3 yıllık

depolanmış atıklardaki su içeriği değerinin %117' ye ulaştığını belirlemişlerdir. Çeşitli araştırmacılar tarafından farklı bölgelerde belirlenen KKA su içeriği değerleri Çizelge 2.3' de gösterilmiştir [2].

Çizelge 2.3. Çeşitli araştırmacılar tarafından rapor edilen su muhtevası değerleri [2]

Kaynak	Su içeriği (%)
Sowers (1973)	10 - 50
Gifford (1990)	14 - 68
Landva ve Clark (1990)	15 - 125
Blight ve diğ. (1992)	10 - 100
Huitritic (1981)	15 - 40
Tchobanoglous ve diğ. (1993)	15 - 45
Coumoulos ve diğ. (1999)	20 - 125
Gabr ve Valero (1995)	30 - 130

Çizelge 2.3' de de görüldüğü gibi su muhtevasının değeri %10 ile %130 arasında çok geniş bir aralığa sahiptir. Bu durum da atık bileşimi, yörenin sıcaklık durumu vb. etkenlerle büyük değişiklik gösterdiğini gözler önüne sunmuştur.

Su muhtevası deneyinde; katı atıkta herhangi bir ayrışma olmaması için, 105°C yerine 55° C sıcaklıkta atıklar etüvde saklanmalıdır [14].

2.4.3 Birim Hacim Ağırlık

Heterojen özellikteki çok farklı materyalleri içerisinde bulunduran KKA' ların birim hacim ağırlık değerleri (Çizelge 2.4); bileşim, su içeriği, yılanma, sıkıştırma (kompaksiyon), ayrışma miktarı, depolama yüksekliği (örtü yükü) ve örneğin alındığı derinliğe bağlı olarak farklılık gösterir [2].

Evsel atıkların çöp sahası analizlerinde; birim hacim ağırlığının bilinmesi depolama kapasitesinin tahminleri açısından önemlidir. Bunlar [14];

- statik ve dinamik şev stabilitesi hesapları,
- geomembranlara gelen zımbalama kuvvetleri,

- drenaj borularına gelen kuvvetler ve çatlatma etkileri,
- çöp sahasının belli bir süre sonra oturmasıyla birlikte saha depolama kapasitesi.

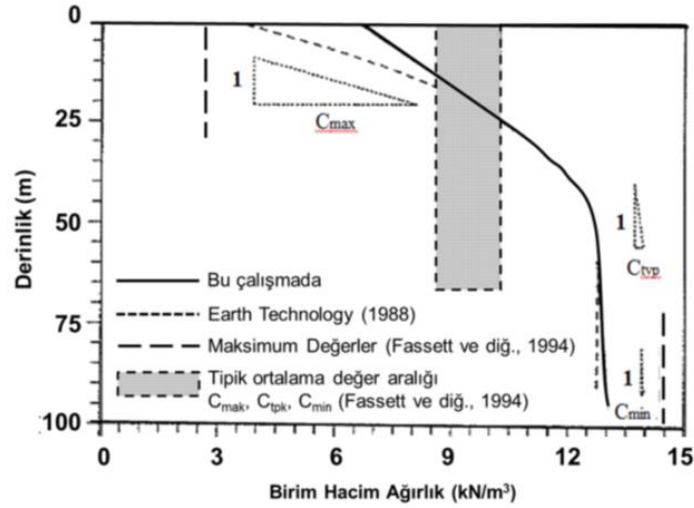
Birim hacim ağırlığı sismik analizler için önemlidir. Ayrıca; kayma dalgası hızı ve kayma modülünün belirlenmesinde etkilidir [14].

Çizelge 2.4. Kentsel katı atıkların ortalama birim hacim ağırlığı [22]

Kaynak	Atık Yerleştirme Koşulları	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	
Sowers (1968)	Sıkıştırılmaya bağlı olarak	4,7 – 9,4	
NAVFAC (1983)	(a) Parçacıklara ayrılmamış	• Az sıkışmış	3,1
		• İyi sıkışmış	6,3
		• Çok iyi sıkışmış	9,4
		(b) Parçacıklara ayrılmış	8,6
		NSWMA (1985)	Ayrışmadan önce
	Ayrışmadan sonra	9,9 - 11	
Landva and Clark (1986)	Depolama sahasında	9 – 13,2	
EMCON Associates (1989)	Depolama sahasında	7,2	

Literatürde genel olarak sıkıştırılmamış ya da çok az sıkıştırılmış KKA' ların birim hacim ağırlık değerleri minimum 3 kN/m³, iyi sıkışmış birim hacim ağırlık değeri ise maksimum 17 kN/m³ olarak verilmektedir [2].

Kavazanjian ve diğerleri; derinlikle birim hacim ağırlığın değişimini Şekil 2.13' de incelemiştir. Yüzeğe yakın bölgedeki birim hacim ağırlık değeri ortalaması 3,3 kN/m³ seviyesindeyken 60 m derinlikten daha büyük derinliklerde birim hacim ağırlık 12,8 kN/m³ olarak hesaplanmıştır [22].



Şekil 2.13. Toplam birim hacim ağırlık değerlerinin derinlik ile değişimi [2, 22]

Yaklaşık olarak 12- 15 yıllık atıklarda yüksekliklerinin %30 - 40' ı kadar oturma gerçekleşir. Birim hacim ağırlıkları oturma ile %67 oranında artmış olur [14].

2.4.4 Hacimsel Alan Kapasitesi

Hacimsel alan kapasitesi, uzun süreli bir yerçekimi drenajından sonra kalan hacimsel su içeriği veya su tutma kapasitesi olarak tanımlanır. Hacimsel alan kapasitesi; katı atık depolama sahalarındaki sızıntı suyunun formülasyonunun hesaplanmasında önemli bir faktördür ve atığın bileşimi, uygulanan basınç derecesiyle değişir [22].

Çizelge 2.5. Kentsel katı atık sahalarının hacimsel alan kapasitesi değerleri [22]

Kaynak	Hacimsel Alan Kapasitesi (%)
Rovers and Farquhar (1973)	30,2
Fungaroli and Steiner (1979)	34,2
Walsh and Kinman (1979)	31,8
Wigh (1979)	36,7
Walsh and Kinman (1981)	40,4
Blight et al. (1992)	36,2 (eski atık) 70,6 (yeni atık)

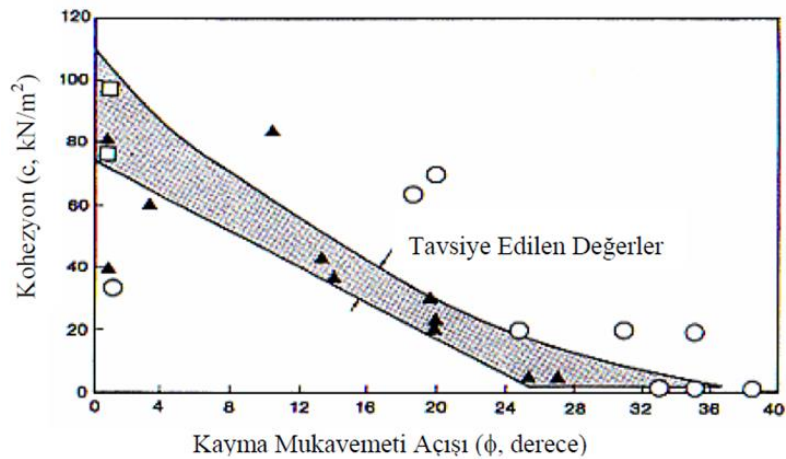
Çizelge 2.5. Kentsel katı atık sahalarının hacimsel alan kapasitesi değerleri (devamı) [22]

Kaynak	Hacimsel Alan Kapasitesi (%)
Schroder, et al. (1994a & b)	29,2
Sharma and Lewis (1994)	22,4
McBean et al. (1995)	55,0
Zornberg et al. (1999)	47,4 - 53,0

Kentsel katı atıklarının hacimsel alan kapasitesi yaklaşık %22 ile %55 arasında değişirken sıkıştırılmış kil tabakalarında yaklaşık %35,6' dır. Tipik bir kentsel katı atık sahalarında Sharma ve Lewis [22]; alan kapasitesinin %22,4 alınmasını önermiştir. Çizelge 2.5' de hacimsel alan kapasitesi değerleri % 22,4 ~ 70,6 arasında değişmiştir.

2.4.5 Mukavemet Özellikleri

Stabilite analizleri için katı atık sahalarında mukavemet parametreleri çok önemlidir. Mohr Coulomb dairesindeki kohezyon ve kayma mukavemeti açısı için önerilen değerler Şekil 2.14' de verilmiştir [14,22].



O Laboratuvarda mukavemet deneyleri; □ Arazi deneyleri; Δ Geri analiz

Şekil 2.14. Atıklar için Singh ve Murphy' nin önerdiği içsel sürtünme açısı ve kohezyon [22]

Katı atıkların, Mohr - Coulomb kırılma dairesine göre; mukavemet parametrelerinin hesaplanmasında (2.2) denklemi kullanılır.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.2)$$

Bu formülde;

τ : kayma mukavemeti, c : kohezyon , ϕ : içsel sürtünme açısı ve

σ_n : Normal gerilme parametrelerini belirtir.

Kayma mukavemeti; doğal ya da yapay olarak oluşan bir şev yapısının duraylılığını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Evsel atıkların kayma mukavemeti parametrelerinin değerleri geniş bir aralığa sahiptir [23].

Mukavemet özelliklerine etki eden başlıca faktörler [22];

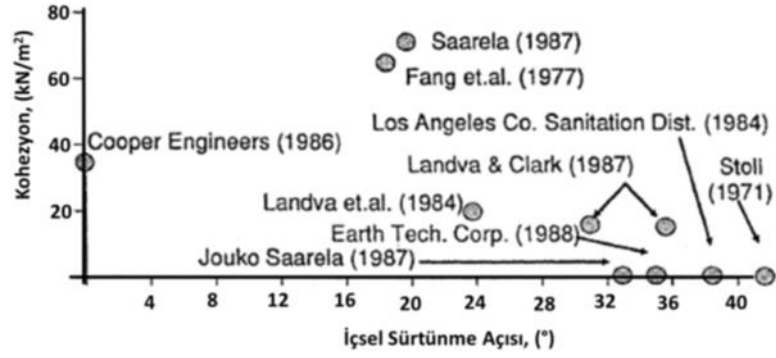
- Atıktaki organik ve lif içeriği,
- Kentsel katı atık sahalarına yerleştirilen atığın yaşı,
- Yerleştirme şeklidir.

Mohr - Coulomb kırılma dairesine göre; kayma mukavemet parametreleri, laboratuvar ve arazi deney sonuçlarının katı atık şevindeki statik ve deprem yüklerine göre geri analiz yöntemiyle elde edilir. [16].

Hesaplarda güvenli tarafta kalabilmek için; kayma mukavemeti açısını 20° ve kohezyonu 19 kN/m^2 kullanılmasını önerilmektedir[14].

Depolama sahalarında muhafaza edilen atıklar; yıllanma sonucu fiziksel değişikliklere uğrarlar. Lifli ve şerit halindeki atıkların yapısındaki bozunmalarla taşıma kapasitesinin bildirmiştir [23]. Yeni atıkların içsel sürtünme açısı yıllanmış atıklara göre daha düşük değere sahiptir. Zamanla katı atıkların dayanımındaki artış birim hacim ağırlığına bağlı olarak değişmektedir. KKA numunelerinin 3, 5 ve 15 yıllık numunelerinin kayma dayanımlarını incelediğinde, içsel sürtünme açısı değerlerinin sırasıyla $40^\circ - 38^\circ$ den $35^\circ - 32^\circ$ seviyelerine daha sonra 26° ye kadar azaldığı gözlemlenmiştir [23]. Kohezyon değeri ise $50 - 40 \text{ kPa}$ dan sırasıyla $15 - 12 \text{ kPa}$ ve son olarak 10 kPa a kadar azalmıştır [23].

Şekil 2.15' de evsel atıkların kayma mukavemeti parametrelerinin küçük ölçekli laboratuvar çalışmalarındaki verileri gösterilmektedir [2, 23].



Şekil 2.15. Rapor edilmiş kayma mukavemeti değerleri [2]

c ve ϕ parametreleri kaynakları ile birlikte Çizelge 2.6' da verilmiştir. Buna göre katı atıklarda kohezyon (c) değeri 0-70 kN/m²; içsel sürtünme açısı (ϕ) değeri ise 0-50° arasında değiştiği gözlenmektedir [16].

Çizelge 2.6. Katı atıkların mukavemet parametreleri [16]

Kaynaklar	Kohezyon, c (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı, 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

Çizelge 2.6. Katı atıkların mukavemet parametreleri (devamı) [16]

Kaynaklar	Kohezyon, c (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)
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

2.4.6 Katı Atıkların Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri

Atıkların sıkışma özelliği katı atık depolama sahalarının tasarlanmasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerdendir [2]. Depolama sahalarındaki oturmalar bu faktörlerden dolayı önemlidir [14]. Bunlar;

- Atık sahasının kapasite tahmini ve çöpün en yoğun şekilde depolanabilmesi,
- Depolama tesisi kapatıldıktan sonra ileride üzerine yapılacak olan yapıların güvenilir olması,
- Saha içerisindeki sızıntı suyu toplama sistemi ve diğer katı sahası işletim binalarının güvenliğinin sağlanması için önemlidir.

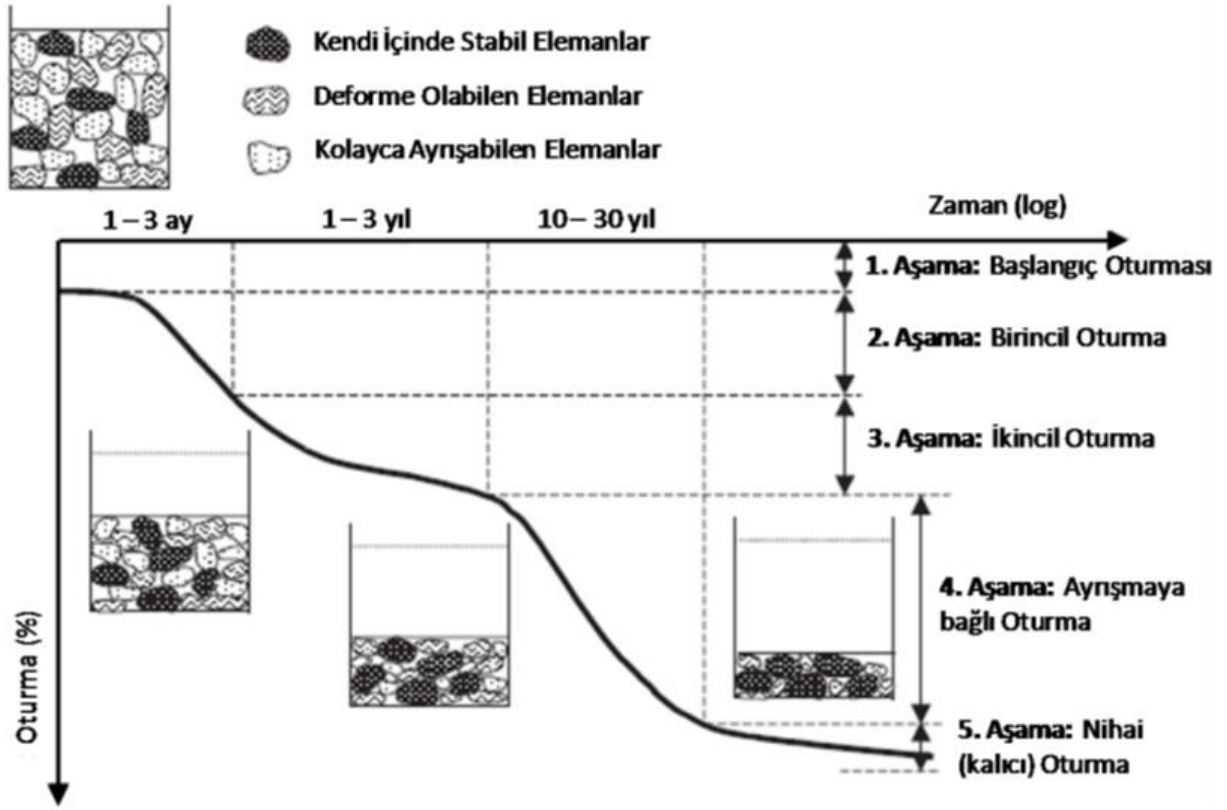
Katı atık depolama sahasında oluşacak aşırı oturmalar gaz ve atık suyu tahliye sistemlerinde hasarlara neden olmaktadır. Zarar gören atık su tahliye sisteminden sızan sular geçirimsiz tabaka üzerinde birikerek depolama koşullarını tehlikeye atmaktadır [2]. Bu nedenle katı atık depolama sahalarında çöp suyu toplanması önemlidir.

Aykol [14] çalışmasında; katı atıkların kendi ağırlıklarının altında yüksekliklerinin ortalama %5 ila %30 arası oturma yaptığını belirtmiştir. Oturma oranı; atıkların başlangıçtaki sıkıştırılmalarına, atık bileşim oranına ve diğer çevresel etkilere bağlı olarak değişmektedir.

Birincil oturma 1 ay ile 5 yıl arasında oluşur. İkincil oturma ise; ayrışmaya ve yorulmaya bağlı olarak 50 yıl' da gerçekleşebilir.

Grisolia ve Napoleoni yaptıkları çalışmaya göre kentsel katı atıkların oturma evrelerini Şekil 2.16' da 5 aşamada incelemiştir. Oturma evreleri [14];

- Başlangıç oturması; mekanik bükülme, eğilme, ezilme ve yeni düzene geçmenin (reorientation) neden olduğu fiziksel sıkışmadır ve ani olarak meydana gelmektedir.
- Birincil oturma; küçük parçacıkların boşluklara ya da büyük parçacıkların arasına girmesiyle gerçekleşen çözülme oturmasıdır.
- Konsolidasyon mekanizmasının neden olduğu tüm atık iskeletinde ya da bölgesel meydana gelen sıkışmalar ikincil oturmadır.
- Ayrışmaya bağlı oturma ise; organik maddelerin biyolojik bozunması sonucu meydana gelmektedir.
- Nihai (kalıcı) oturma ise; fizikokimyasal olayların bir sonucu olarak bileşenlerde meydana gelen yıkılma ve çökmelerin neden olduğu sıkışmalardır.



Şekil 2.16. Katı atıkların zaman içerisindeki oturma evreleri [2]

Pulat [2] çalışmasında, KKA' ların; atık kompozisyonuna, ortam sıcaklığına, çevresel ve düşey yöndeki gerilmelere, sıkıştırma ekipmanı ve tekrar sayısına, sıkıştırılan tabaka sayısı ve kalınlığına, ayrışmaya uğrayabilecek madde miktarına, su muhtevasına bağlı olarak farklı oranlarda oturmaları sahip olduğunu belirtmiştir. Çizelge 2.7' de farklı atık sahalarına ait en

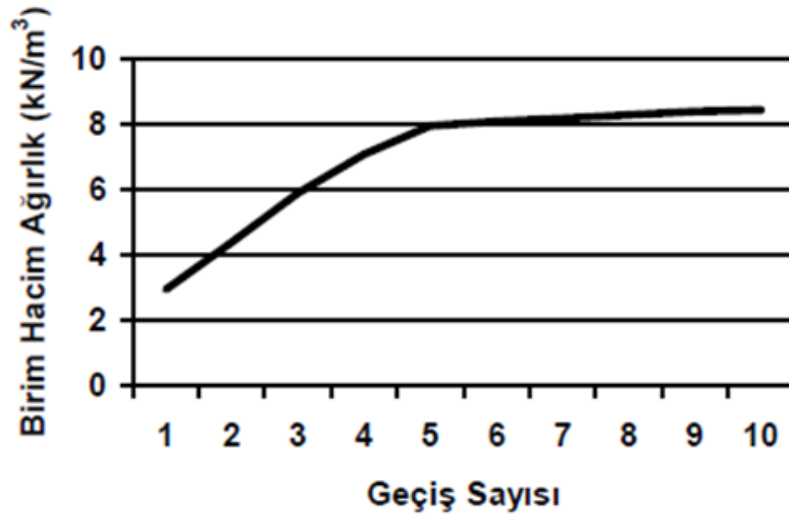
büyük oturma yüzdeleri verilmiş ve yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde en büyük oturma değerlerinin %1 ile % 47 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Çizelge 2.7. Katı atıkların sahalarındaki oturma oranları [2,14]

Yükseklik (m)	Dolgu Yaşı	En Büyük Oturma (m)	En Büyük Oturma (%)	Atık Sahası	Kaynak
15	3	0,50	3	İspanya	Sanchez (1995)
6,70	0	0,10	1	Kaliforniya	Merz ve Stone (1962)
36	2	1,90	5	Kaliforniya	Edil (1990)
15	0	2,20	15	San Jose, Kaliforniya	El-Fadel ve Al- Rashed (1998)
18,60	2	2,50	13	İngiltere	Cheney (1983)
3	0	1,40	47	A.B.D	Gandolla (1992)
1,50	0	0,20	1	A.B.D	Rao (1977)
2	0	0,60	30	Kore	Kang (1997)
2	0	0,30	15	Kore	Lee (1995)
27	3	9,78	36	Santa Monica	Hutric (1981)
3	2	0,60	20	A.B.D	Bjamgard ve Edgers (1990)
1,90	8	0,20	11	Naji Adası	Env. Sci. aEng.(1994)
24	23	1,43	6	Connecticut	Kene (1977)
50	8	3,20	6	Michigan	Dodt (1987)
9	25	1,10	12	Massachusetts	Stulgis (1995)

Katı atıkta iyi bir sıkıştırma edebilmek için (lastik, ev aletleri, çamaşır makinesi, buzdolabı vb.) dane boyutu büyük olan malzemeler çıkartılmalıdır. İyi bir sıkışma elde edebilmek için katı atık, yüksekliği 2 m' yi geçmeyecek şekilde serilmelidir. Sıkıştırma sonrasında %2 ila %17 arasında hacimsel değişiklikler gerçekleşmektedir [14].

Katı atıkların sıkışmasına dair grafiğe Şekil 2.17' de yer verilmiştir [14].



Şekil 2.17. Geçiş sayısına göre birim hacim ağırlık grafiği değişimi [14]

2.4.7 Kentsel Katı Atıkların Kompaksiyon Özellikleri

Katı atık sahalarında daha fazla atığın depolanabilmesi için sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. İyi bir sıkıştırma sağlanabilmesi için katı atıkların maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin belirlenmesi gerekir. Pulat' ın yaptığı literatür çalışmasında bu değerlerin zeminlerde olduğu gibi kompaksiyon deneyi ile belirlendiği söylenmiştir [2].

Itih ve diğerleri atıkların üzerinde Standart ve Modifiye Proctor kompaksiyon deneyleri yapmıştır. 550 kJ/m^3 ile 600 kJ/m^3 arasında sıkıştırma enerjisi üreten Standart Proctor kompaksiyon deneyleri sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlığı $5,9 \text{ kN/m}^3$, optimum su muhtevası %20 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık 2500 kJ/m^3 ile 2700 kJ/m^3 arasında enerji üreten Modifiye Proctor kompaksiyon testlerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri $7,8 \text{ kN/m}^3$ e yükselirken, optimum su içeriği %10' a düşmüştür [2].

KKA' ların kompaksiyon davranışları üzerinde dane boyutu dağılımının da etkisi bulunmaktadır [2]. Oweis ve Khera (1998) değişik enerji seviyelerinde, çeşitli ortamlarda değişik dane boyutlarındaki KKA' ların birim hacim ağırlıklarını Çizelge 2.8' de özetlemiştir. Birim hacim aralık değerleri $2,8 - 14,0 \text{ kN/m}^3$ gibi geniş bir aralıkta değişim göstermektedir.

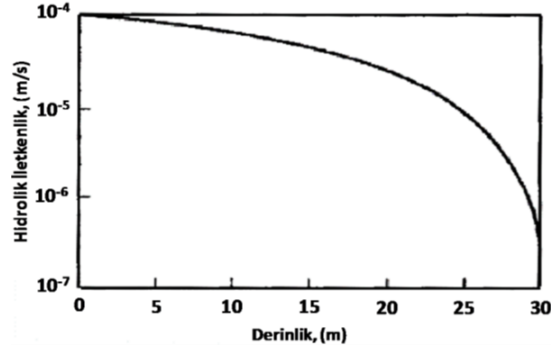
Çizelge 2.8. Çeşitli ortamlardaki KKA' ların birim hacim ağırlığı değerleri [2]

KKA durumu ve türü	Toplam birim hacim ağırlığı (kN/m ³)
Zayıf sıkıştırılmış	2,80- 4,70
Ortadan iyi düzeye sıkıştırılmış	4,70- 7,10
İyiden mükemmel düzeye sıkıştırılmış	7,10- 9,40
Balya şeklinde	5,50- 10,50
Parçalanmış (doğranmış) şekilde	6,40- 10,50
Doğal ortamındaki yoğunluk	5,50- 6,90
Kanada' ya ait KKA numuneleri	6,80- 14,00
Aktif durumdaki sızıntı suyu içeren atık	6,60
ABD'nin kuzeyindeki aktif sahadan alınmış KKA numuneleri	4,60- 6,30

2.4.8 Kentsel Katı Atıkların Hidrolik İletkenliği

Katı atık sahalarındaki sıvı akışını etkileyen önemli parametrelerden biri permeabilitedir [16]. Permeabilite hesaplanırken laboratuvar deneyleri yerine arazi deneyleri tercih edilir. Pompalama deneyleri sonucunda daha doğru değerler elde edilir [14]. Oweis ve diğerlerinin yaptığı pompalama testine göre; birim hacim ağırlığı 6,4 kN/m³, hidrolik iletkenlik yani permeabilite $1,0 \times 10^{-5}$ m/sn ölçülmüştür [22].

Kentsel katı atıkların hidrolik iletkenliği, depolama sahasındaki atıkların fizikokimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Depo gövdesinde oluşan sızma suyu basınçlarının, kayma dayanımı ve sıkışabilirlik üzerinde oluşturacağı muhtemel tehlikelerin tasarım aşamalarında hesaba katılması açısından hidrolik iletkenliğin belirlenmesi önemlidir [2]. Pulat' ın [2] yaptığı literatür çalışmasında; Powrie ve Beaven hidrolik iletkenlikle ilgili yaptıkları çalışmalarda bir çok şev kaymasının nedeninin sızma sıvısının yüksek boşluk basınçlarının, efektif gerilmeleri ve kayma dayanımını azaltması olarak belirlendiğine yer vermiştir.



Şekil 2.18. Hidrolik iletkenliğin derinlikle değişimi [2]

Bir depolama sahasında derinlikle atıklar üzerine etki eden efektif gerilmeler artar. Efektif gerilmelerin artmasına paralel olarak atıkların yoğunlukları da artmış olur. Şekil 2.18’ de görüldüğü üzere; yoğunluk değişimine bağlı olarak KKA’ ların hidrolik iletkenlikleri derinlikle değişim göstermektedir [2].

Çizelge 2.9. Kentsel katı atık sahalarında hidrolik iletkenlik değerleri [22]

Kaynak	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Hidrolik İletkenlik (m/sn)	Metot
Fungaroli et al. (1979)	1,1 – 4,1	$1,0 \times 10^{-5} - 2,0 \times 10^{-4}$	Lizimetre tespiti
Schroder et al. (1984a, b)	-	$2,0 \times 10^{-6}$	Özete dayalı tahmin
Oweis and Khera (1986)	6,4	$1,0 \times 10^{-5}$	Saha verilerine dayalı tahmin
Landva and Clark (1990)	10,1 – 14,5	$1,0 \times 10^{-5} - 4,0 \times 10^{-4}$	Test çukuru
Oweis et al. (1990)	6,4	$1,0 \times 10^{-5}$	Pompalama testi
Oweis et al. (1990)	9,4 – 14,1	$1,5 \times 10^{-6}$	Düşen seviyeli permeabilite deneyi
Oweis et al. (1990)	6,3 – 9,4	$1,1 \times 10^{-5}$	Test çukuru
Qian (1994)	-	$9,2 \times 10^{-6} - 1,1 \times 10^{-5}$	Saha verilerine dayalı tahmin
Schroder et al. (1994a, b)	-	$1,0 \times 10^{-5}$	Özete dayalı tahmin

Çizelge 2.9’ da farklı metotlarla elde edilmiş hidrolik iletkenlik değerleri verilmiştir. Yapılan çalışmalar özetlenirse; γ birim hacim ağırlığı değeri 7 - 8 kN/m³, ortalama k permeabilite değeri ise 5×10^{-5} m/s önerilmektedir. Atıkların permeabilite değerini 1×10^{-5} m/s olması hesaplamalar için uygundur [14].

2.4.9 Kentsel Katı Atıkların Şev Duraylılığı

Atık sahalarının maksimum depolama yüksekliklerinin ve şev açılarının belirlenmesi, katı atıkların kayma mukavemeti açısından çok önemlidir. Dünya genelinde atık sahalarında kapasitesinden fazla atık depolama, aşırı yağış, patlamalarla meydana gelen yangınlar, sızıntı suyu veya gaz tahliye sistemlerinin bulunmaması, atık sahalarında sıkıştırmanın doğru yapılmaması, depolama sahasındaki şev açısının olması gerekenden daha dik olması gibi nedenlerden dolayı şev göçmeleri meydana gelmektedir. Şev göçmesiyle çok sayıda can kaybı ve maddi kayıplar oluşmaktadır [23].

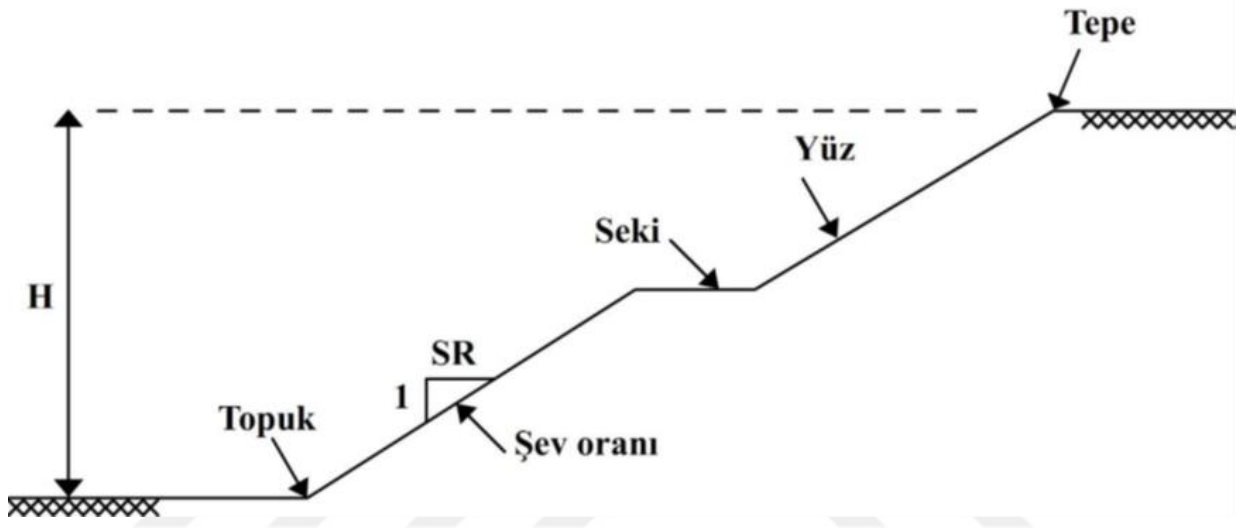
Depolama tesisinin duraylılığı için saha tasarımı çok önemlidir. Şev duraylılığı analizleri stabilitesini kaybetmiş sahalara ait mühendislik özellikleri kullanılarak da yapılabilir [23].

Depolama sahalarındaki şevlerde görülen duraylılık sorunları normal şevlerde görülen hareketlerle benzerlik gösterdiğinden bahsedilmiştir. Atık içeriğinde heterojen maddelerin olması ve üniform olmayan dağılımıyla şevlerde yüzeysel kopmalar ve sonrasında geniş heyelanlara kadar uzanan bir hareket gözlenebilir [12]. Bu çalışmada da depolama sahalarında daha önce oluşmuş yüzeysel kopmalara neden olan vaka olayları incelenmiştir.

Kentsel katı atık sahalarında duraylılık sorunlarının özelliklerini; katı atığın homojen olmaması, üniform bir kompaksiyon işlemi yapılamaması durumu, sahada farklı oturumların oluşması, çöpün kendisinin stabil olmayışı ve boşluk suyu basınçlarının oluşması şeklinde sıralayabiliriz [12].

3. ŞEV DURAYLILIĞI

Geoteknik mühendisliğinde zemin/kaya yüzeylerinin oluşturdukları eğimli şekillere şev adı verilmektedir. Genelde mühendislik uygulamaları sonucunda oluşturulan şevler, kazı veya dolgu şevi olarak adlandırılır [24]. Eğer şev, insanın katkısı olmaksızın doğal olarak oluşmuş ise doğal şev ya da yamaç, insan eliyle kazı ya da dolgu sonucu oluşmuşsa yapay şev adını almaktadır [12]. Yamaç hareketleri için heyelan, şev hareketleri için ise göçme veya kayma terimleri kullanılmaktadır [24].

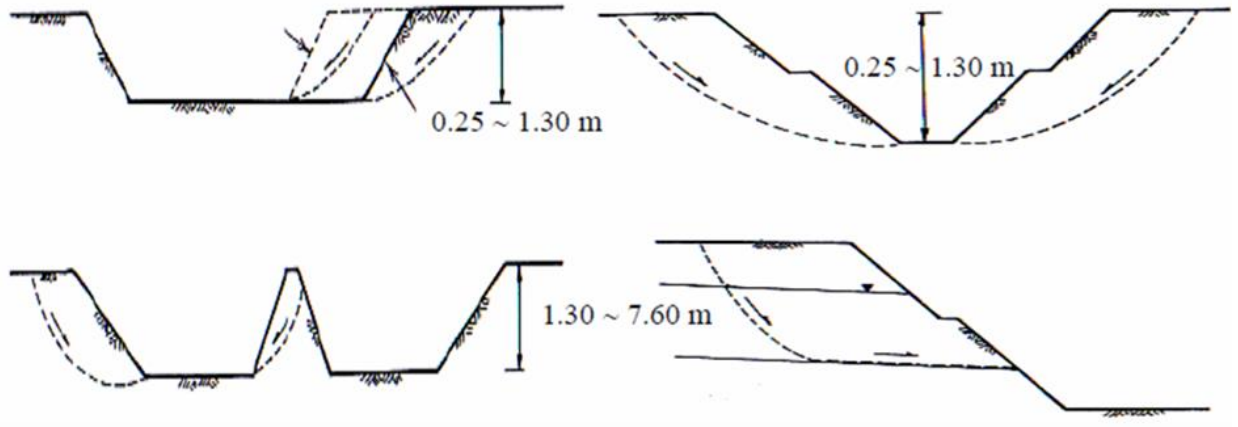


Şekil 3.1. Şevleri tanımlamaları [24]

Coduto göre şevler tanımlanırken özel terim kullanmıştır [24]. Bunlar Şekil 3.1' de de gösterilmiştir.

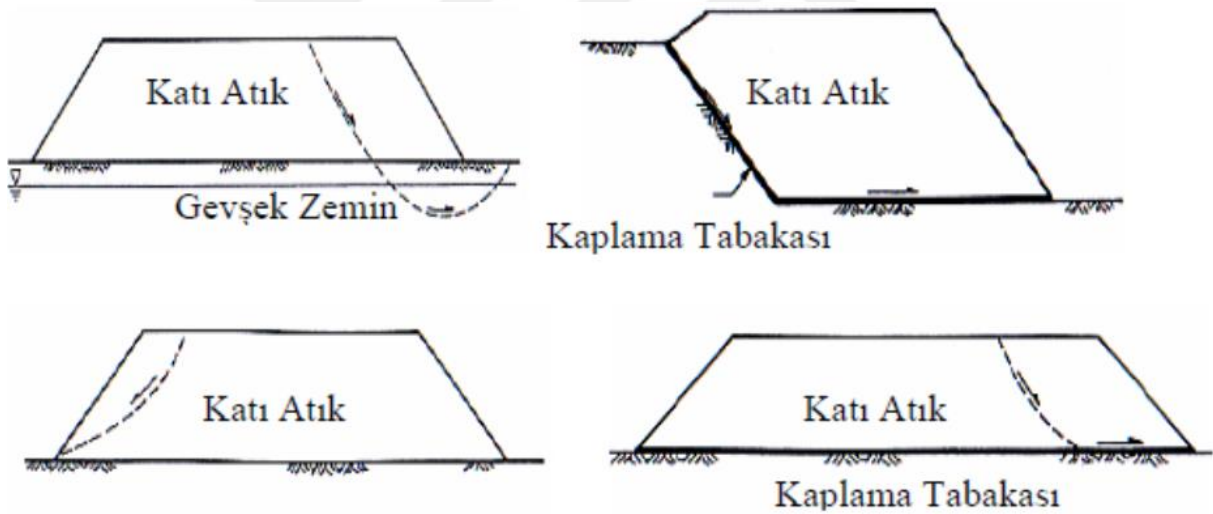
- Şev oranı şevin dikliğini tanımlar ve daima yatay : düşey olarak ifade edilirler. Örnek olarak, 3 : 1' lik bir şev üç yataya bir düşeyi anlatır ve 1 : 3' lük bir şev ondan daha diktir.
- Şevin tepesi ve şevin topuğu şevin düz yüzeyi kestiği noktalardır.
- Şevin yüzeyi, şevin tepesi ve topuğu arasında kalan yüzeydir.
- Şev yüksekliği, şevin tepesi ile topuğu arasındaki kot farkıdır.
- Palye (seki) yüzey drenajını sağlamak için yarma ve dolgu şevlerinde oluşturulan şev yüzeyinin ortasına denk gelen düzlük alanıdır.

Katı atık sahalarında karşılaşılabilecek stabilite problemlerinin başında kazılan zeminin duraylılığı gelmektedir. İstiflenen katı atıkların kendi içerisindeki duraylılığı, atık sahasının duraylılığını direkt olarak etkilemektedir [2, 14]. Göçme genellikle yanal ötelenme veya dönel göçme olarak tanımlanmıştır [14] (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kazı esnasındaki potansiyel kayma düzlemleri [14]

Depolanan atıklar arasında oluşacak bir kayma yüzeyi yüksekliğe bağlı olarak atık gövdesinin ve tesisin duraylılığını tehlikeye atar. Katı atık gövdesinde oluşabilecek muhtemel kayma düzlemleri Şekil 3.3’ de belirtilmiştir [2].



Şekil 3.3. Katı atık gövdesinde oluşması muhtemel kayma düzlemleri [2, 14]

Katı atıkların kendi bünyesinde bulunan ya da yağışların etkisiyle daha sonraları oluşan ve sızarak alttaki tabakalara ilerleyen atık suların çevre zemin tabakalarını ve yeraltı suyunu kirletmesini önlemek gerekir. Bu amaçla tasarım aşamasında belirlenmesi gereken malzemeler belli kalınlık ve açıda atık sahasında kaplama tabakası olarak inşa edilir. Bu tabakanın mühendislik özellikleri detaylı şekilde belirlenmeli, malzemenin muhtemel bir kayma yüzeyi oluşturmayacak özellikte olmasına ve duraylılığını koruyacak açıda inşa edilmesine dikkat edilmelidir [2].

3.1 Şev Hareketlerinin Sınıflandırılması

Şev hareketlerine neden olan etkenlerin ve ortaya çıkan durumun çok karmaşık olması nedeniyle bu hareketlerin sınıflandırılmasında birçok seçenek vardır. Geoteknik mühendisleri bir şev hareketini düzeltme, önleme veya tanıma amacına göre değişik sınıflandırma çeşitlerinin olduğunu belirtmişlerdir [12].

Harekete geçen malzeme cinsi, hareket biçimi, hızı, harekete katılan kütlelerin boyutu, hareketin yaşı veya gelişme aşaması ve diğer etkilere dayalı birçok sınıflandırma vardır. Örneğin; Skempton ve Hutchinson göre, kayma yüzeyinin derinliği (D) ile boyu (L) arasındaki orana göre bir basit sınıflandırma önermişlerdir (Çizelge 3.1) [12].

Çizelge 3.1. Şev hareketi sınıflandırması [12]

D/L (%)	Tanım
5 - 10	Kayma (ötelenme)
0,5 - 3	Akma
15 - 30	Dönel Göçme

Hareketin etkinlik durumuna göre; etkin duraklamış, uyanmış, etkin olmayan, gizli (ilk etkenlerle yeniden harekete geçebilecek olan), bitmiş (ilk etkenler egemen değil), denetin altında, kalıntı (şu andaki etkenlerden tümüyle farklı koşullarda oluşmuş) gibi sınıflandırılmaktadır [12].

Hareketin etkinlik gelişme biçimine göre; ileriye gelişen, geriye gelişen, büyüyen, tükenen, sınırlı, yayılan ve genişleyen şev hareketleri adı verilmektedir [12].

Şev hareketleriyle ilgili birçok sınıflandırma bulunmakla birlikte en çok kullanılan Varnes' in yapmış olduğu sınıflandırmadır [24]. Çizelge 3.2' de şev göçmesine ait sınıflandırma görülmektedir [24].

Çizelge 3.2. Şev göçmeleri için sınıflandırma [24]

HAREKET TÜRÜ	MALZEMENİN TÜRÜ			
	KAYAÇLAR	ZEMİNLER		
		İri Daneli	İnce Daneli	
DÜŞME	Kaya Düşmesi	Moloz Düşmesi	Zemin Düşmesi	
DEVİRİLME	Kaya Devrilmesi	Molozda devrilme	Zeminde devrilme	
AKMA	Yavaş	Kaya Akması	Moloz Akması	Zemin Akması
	Hızlı	Çok Parçalı Kayaç Akması	Moloz Akması	Zemin Akması
KAYMA	Ötelenmeli	Kayada blok türü ötelenme	Zeminde ve molozda blok tülü ötelenme	
	Dönel (Dairesel)	Sıkı Çatlaklı Kayada dönel kayma	Zeminde ve molozda dönel kayma	
YANAL YAYILMA	Kaya yayılması	Zemin veya moloz yayılması		
KARMAŞIK	Hareket Tülü ve Malzeme Karışık			

3.2 Şev Kayması Analizlerinin Tarihi

Şev kayması analizleri ilk olarak 1800' lü yılların ortalarında Fransız mühendis Alexandre Collin tarafından nicel yöntemlerle yapılmıştır. Zamanında bu çalışmalara fazla önem verilmemiş ve daha sonra İsveç' te bir grup bilim adamı çalışmalara tekrar başlamıştır. Limit denge yöntemini; 1866 yılında Culmann kullanarak bir stabilite analizi geliştirmiştir. Bugün yapılan çalışmaların temeli Cullman' ın yapmış olduğu analizlere dayanır [25].

3.3 Şev Stabilite Analizleri ve Hesap Yöntemleri

Geoteknik mühendisliğinde şevin duraylılığı önemlidir. Deprem, sel, heyelan gibi doğal afetlerde şevin göçme durumunda ciddi can ve mal kaybı oluşmuştur. Şev analizleri bu nedenle stabilitenin sağlanması için önemli mühendislik problemi haline gelmiştir [16]. Ülkemizde ise en tehlikeli afet türleri için deprem ve heyelandır [24].

Heyelanlar ya da şev duraysızlıklarının nedeni, zemin kütlesi içindeki denge durumunun bozulmasıdır. Bu şekilde kuvvet dengesi kaybolarak heyelanlar oluşur. Stabiliteyi azaltan uzun dönem etkileri ve dengenin kaybolmasına neden olan kısa dönem etkileri olmak üzere iki tür

etkiden bahsedilebilir [24]. Şev duraysızlıklarının nedenleri Springman tarafından gruplandırılmıştır [24]. Çizelge 3.3’ de de şev duraysızlıklarının nedenleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Şev duraysızlıklarının nedenleri [24]

1. Stabilitayı azaltan uzun dönem etkileri	2. Dengenin kaybolmasına neden olan kısa dönem etkileri
<ul style="list-style-type: none">• Doğal ya da yapay şevin kullanımında ya da şeklinde değişiklik,• Zeminin jeolojisi (kil ya da marn türü zeminlerin varlığı),<ul style="list-style-type: none">• Zeminin gerilme geçmişi,• Zeminde daha önce heyelanlanmış eski bir kaymaların oluşması ve günümüzde fark edilememiş olması,• Çok eski tektonik hareketler nedeniyle zemin içinde oluşan kayma yüzeyleri,• Ayrışma nedeniyle ana malzemeden farklı minerallerin ve daha yumuşak zeminlerin oluşmasına neden olan mekanizma,• Erozyon nedeniyle şev geometrisinin değişmesi ya da zemin içine su sızması ve malzeme yıkanması nedeniyle iç yapının değişmesi,• Yüzey ve yeraltı suları nedeniyle zemin mukavemetinin düşmesi,<ul style="list-style-type: none">• Şişen zeminlerin varlığı.	<ul style="list-style-type: none">• Aşırı yağış nedeniyle zeminin suya doygun hale gelmesi kar erimesi, yüzeysel drenlerin çalışamaz hale gelmesi,• Sızıntı suyu basıncı, yeraltı suyunun mevsimsel dalgalanması,<ul style="list-style-type: none">• Deprem yükleri ya da dışarıdan uygulanan titreşimler,• Yükleme durumunda geometri ya da yeni bir yapı nedeniyle değişiklik,<ul style="list-style-type: none">• Şev geometrisinde değişiklik.

Stabilite hesap yöntemleri üçe ayrılır. Bunlar [14];

- Limit Denge Metodu, LDM
- Sonlu Elemanlar Metodu, SEM ve
- Sismik Analiz.

3.3.1 Limit Denge Metodu, LDM

Şevin kaymaya karşı güvenlik katsayısı FS;

$$FS = \frac{\sum Mr, (Fr)}{\sum Md, (Fd)} \quad (3.1)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu formüldeki M_r veya F_r harekete karşı koyan momentler veya kuvvetlerdir. M_d veya F_d hareketi tetikleyici momentler veya kuvvetlerdir [14].

Geoteknik mühendisliği problemleri çözümlenirken, limit denge analizleri yıllardır kullanılmaktadır. Limit denge analizlerinde kaymanın belli bir yüzey boyunca olduğu kabulü yapılır ve kayan kütle bir bütün olarak veya dilimlere ayrılarak, kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilmeler ile kayma mukavemeti karşılaştırılır [25]. Bu analiz yöntemlerinde, Mohr-Coulomb gerilme kriterleri ile şev üç ana statik denge eşitliği aranır [16, 25].

Üç ana limit denge analizi mevcuttur. Bunlar; dilim, kama ve sonsuz eğim yöntemi şeklinde sıralanabilir [16]. Sonsuz eğim metodu, kayan kütle hareketi tek yönde ve şev eğimine paralel olduğunda tercih edilir [14]. Hareketi başlatan kuvvetler kayan kütle etkisiyle oluşan kuvvetlerdir. Harekete karşı koyan kuvvetler ise yüzeysel sürtünmelerden kaynaklı sürtünme kuvvetleridir. Kama metodu ise; kayan kütle geometrisi basit ve iki kamaya ayrılabilir. Kama metodu, sonsuz eğim metoduna göre daha güvenilirdir. Bir diğer limit denge analizlerinden biri olan dilim yöntemi ise; şev stabilitesi için tercih edilip en çok kullanılan yöntemdir. Kayma yüzeylerinin dairesel veya kama olması durumunda kullanılır [14].

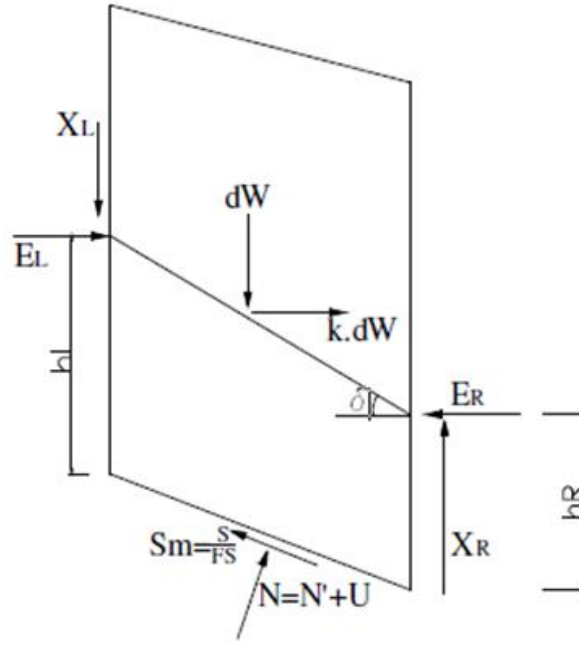
3.3.1.1 Dilim yöntemi

Dilim yöntemi; şev stabilize analizleri için en çok kullanılan limit denge yöntemlerindedir. Bu yüzden dilim yöntemiyle güvenilir sonuçlar veren çok sayıda bilgisayar programı bulunmaktadır. Şev stabilize analiz programlarıyla; kayma yüzeyi, zemin parametreleri ve boşluk suyu gibi değişkenler programda değiştirilerek gerekli analizler gerçekleştirilmektedir [16].

Dilim yöntemlerinde farklı kabullerle çözüm yapılmaktadır. Bunlar;

- İsveç Dilim,
- Bishop,
- Janbu,
- Spencer,
- Morgenstern ve Price, vb.

Bu farklı çözümlerin sonuçları karşılaştırıldığında güvenlik sayılarında yaklaşık $\pm 10\%$ fark çıkabilmektedir. Çizelge 3.4' de farklı yöntemlerle yapılan bu kabuller verilmiştir [16].



Şekil 3.5. Göçen kütlede tek dilime etkiyen kuvvetler [12]

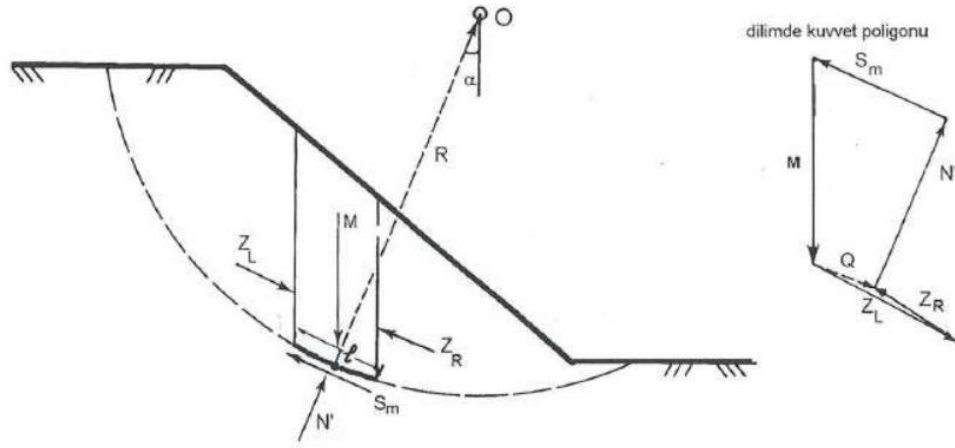
n adet dilim oluşturulduğunda $n-1$ adet dilim sınırı kuvveti (bir dilim solundaki kuvvet, bitişiğindeki dilimin sağındaki kuvvete eşit olmak zorundadır.) ortaya çıkmaktadır. Buna göre; Çizelge 3.5’ de dilim yöntemiyle bilinen veya bilinmeyen sayıları verilmiştir [12].

Çizelge 3.5. Dilim yönteminde bilinen ve bilinmeyen sayıları [12]

Kısaltma	Bilinmeyen	Bilinmeyen Sayısı
FS	Genel güvenlik sayısı	1
N	Dilim tabanı normal kuvveti	n
X	Dilim sınırı kesme kuvveti	$n-1$
E	Dilim sınırı normal kuvveti	$n-1$
h	İç kuvvet bileşkesi etkime yeri	$n-1$
	Bilinmeyen Toplamı	$4n-2$

3.3.1.2 İsveç dilim (Fellenius, 1936) yöntemi

İsveç dilim yönteminde; dairesel kayma yüzeyi dilimlere bölünür ve her bir dilime etkiyen kuvvetler incelenir. Varsayım olarak kabul edilen, dilimler arası kuvvetlerin bileşkesinin tabana paralel olmasıdır [25]. İsveç dilim yönteminde bir dilime etkiyen kuvvetler Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.6. İsveç dilim yönteminde bir dilime etkiyen kuvvetler ve kuvvet poligonu [25]

Güvenlik Sayısı (GS), aşağıdaki denklem (3.2)' de bulunmaktadır [25].

$$GS = \frac{\sum c'l + (M \cos \alpha - u_w l) \tan \phi'}{\sum M \sin \alpha} \quad (3.2)$$

Fellenius metodu yani İsveç dilim yöntemi, dilimlerin her iki tarafında oluşan kuvvetlerin birbirini söndürmediği varsayılır. Dilimler arası normal ve kayma gerilmeleri ihmal edilerek analizlerin yapılması gerektiği söylenir. Bu varsayım gerçeklik dışıdır ve bundan dolayı İsveç dilim yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları düşük çıkmaktadır [16].

3.3.1.3 Basitleştirilmiş Bishop yöntemi (Bishop, 1955)

Bishop tarafından geliştirilen bu yöntemde; dilimler arasında oluşan normal kuvvet ihmal edilmemiştir. Bu şekilde daha gerçekçi güvenlik sayıları bulunmuştur. Güvenlik sayılarını, uzun analitik çözümlerle elde ettiğinden bu yöntem yaygın kullanım alanı bulamamıştır. Bunun yerine yöntem geliştirilerek Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi kullanılmaktadır [16].

Bishop, varsayımında dilim kütle vektörünün dilimin tam ortasından etkiğini söylemiştir. Dilimler altındaki normal kuvvetin etki noktası hesaba katılmamaktadır. Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi ile elde edilen güvenlik sayısı denklem (3.3)' de verilmiştir [25].

$$G_s = \frac{\sum[c'b + (M * ub) + \tan \phi'] / m_a}{\sum M \sin \alpha} \quad (3.3)$$

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{G_s} \right) \quad (3.4)$$

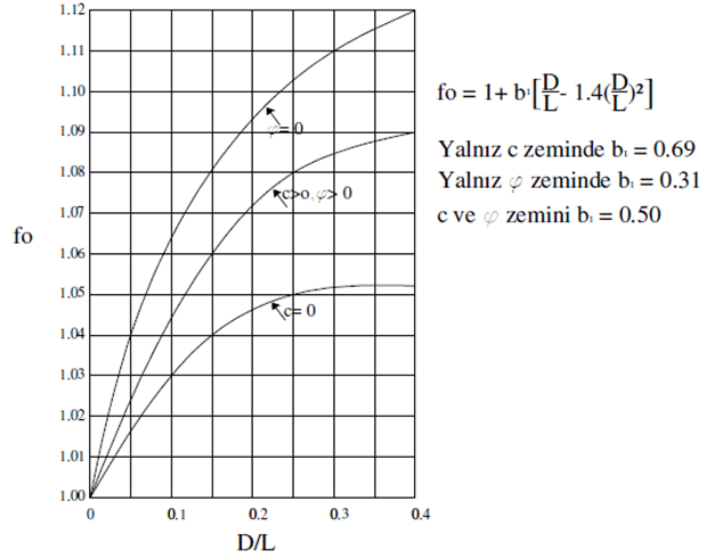
Bu bağıntılarda; b : dilim genişliği, M : dilim toplam ağırlığı, c' : kohezyon, ϕ' : efektif kayma mukavemeti açısı, u : dilim tabanına etkiyen boşluk suyu basıncı, α : dilimin tabanıyla yatay arasındaki açı.

Bu yöntemde X kuvvetindeki değişimin (ΔX) hesabı karmaşıktırmasından dolayı birçok durumda ihmal edilmemiştir. Bu şekilde analiz yeterli doğruluğu sağlamıştır [25].

3.3.1.4 Janbu yöntemi (1976)

Dilimler arası normal kuvvet ihmal edilmemiştir. Janbu yöntemiyle; yatay ve düşey kuvvet dengesi sağlanmasına karşın moment dengesi göz ardı edilmiştir. Janbu tarafından yapılan revize çalışmada, momentin hesaplanmasıyla zorluklar çıkabileceğini söylemiştir. Daha sonra moment dengesi yerine yatay kuvvetlerin dengesinin kullanılması önerilmiştir [16].

Kezer [16] çalışmasında; Janbu yönteminin Bishop yöntemine göre daha kararlı ve güvenli sonuçlar elde edildiğine yer vermiştir. Şevnin yüksekliğine ve genişliğine göre güvenlik sayılarının düzeltme faktörü (f_0) oluşturulmuştur. Şevlerin az eğimli olması düzeltme faktörünün kullanılmasında, doğru sonuçlar vermiştir [16]. Janbu elde edilen güvenlik sayısının bir f_0 düzeltme sayısı ile düzeltilmesini önermektedir. Sonuçta $FS = f_0 \cdot FS_0$ olacaktır. Düzeltme sayıları Şekil 3.7' deki grafikten alınabilir [12].



Şekil 3.7. Janbu düzeltme sayıları [12]

3.3.1.5 Spencer yöntemi (1967)

Spencer hem moment hem de yatay kuvvet dengesini ayrı ayrı sağlayan bir sistem önermiştir. Geliştirmiş olduğu yöntem; dilimler arası normal ve dilimler arası kayma kuvvetleri arasındaki ilişkiyi sabit kabul ederek, moment ve yatay kuvvet dengelerini aynı anda sağlayan oranı bulan iteratif bir yaklaşımdır [24].

Spencer tarafından önerilen yöntem, maddeler halinde bu şekilde özetlenebilir [24];

- Dilimler arası normal ve dilimler arası kayma kuvvetlerini dikkate alır,
- Hem moment hem de yatay kuvvet dengesini hesaba katar,
- Dilimler arasındaki kayma kuvveti (X) ve normal kuvvetin (E) oranını (X/E) sabit kabul eder.

3.3.1.6 Sarma yöntemi (1973)

Sarma tarafından geliştirilen yöntemle bu zamana kadar geliştirilmiş dilim yöntemleri ile kıyaslanırsa oldukça farklı bir görüş ortaya atılmıştır. Sarma yönteminin ana prensibi; şevin stabilitesini kaybettirecek yatay ivmenin kritik değerini bulmaktır. Bu yöntem hesaplamalara büyük kolaylık getirmiştir. Bunun nedeni; dilim kenarlarının düşey ve hatta birbirine paralel olma gereğinin bulunmamasıdır [25].

3.3.1.7 Bishop-Morgenstern yöntemi (1960)

Bishop ve Morgenstern tarafından ortaya atılan bu yöntemle birlikte şevlerin uzun süreli (yani drenajlı yükleme koşullarında) güvenlik sayılarını elde etmek amaçlanmıştır [25]. Güvenlik sayısı aşağıdaki denklem (3.5)' deki gibi tanımlanmaktadır.

$$GS = m - n \cdot r_u \quad (3.5)$$

Bu denklemdeki “m ve n” şev stabilite katsayılarıdır. Bu katsayılar; şev açısı, “c'/ γH ”, derinlik faktörü ve “ ϕ ” nin fonksiyonudur. “ r_u ” da boşluk suyu basıncı oranıdır [25].

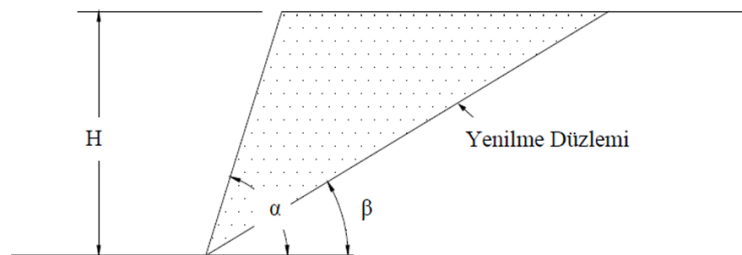
3.3.1.8 Cullmann yöntemi

Cullmann yöntemi; kaymanın düz bir yüzey boyunca gerçekleşmiş olması kabulüne dayanmaktadır. Kayma yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmeleri ile oluşan kayma direncinin dengesinden kritik kayma açısı ve maksimum kazı yüksekliği hesaplanır (Şekil 3.8) [25].

Kritik kayma açısı β_K ve maksimum kazı yüksekliği H_K için formülasyonlar denklem (3.6) ve denklem (3.7)' de verilmiştir [25];

$$\beta_K = \frac{1}{2} (\alpha + \phi_g) \quad (3.6)$$

$$H_K = \frac{4c}{\gamma} \left[\frac{\sin \alpha * \cos \alpha}{1 - \cos \alpha (\alpha - \phi)} \right] \quad (3.7)$$



Şekil 3.8. Cullmann kırılma yüzeyi [25]

3.3.2 Sonlu Elemanlar Metodu, SEM

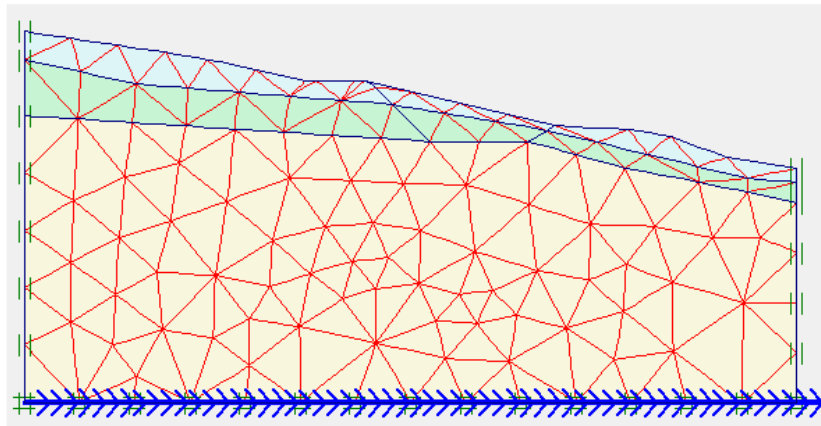
Sonlu elemanlar yönteminin ilkesinde; kütle eşit parçacıklara ayrılır ve bütün parçacıklar birbiriyle ilişkilidir. Her bir parçacık bir diğerine belli kuvvetler uygular ve onu hareket etmeye zorlar [14].

Geoteknik problemleri belli paket bilgisayar programlarıyla çözüme kavuşturulur. Teknolojideki gelişmeler bilgisayar programlarında çözümü kolaylaştırmıştır. Bu şekilde; birçok farklı yöntemle geoteknik problemleri nümerik olarak daha hızlı bir biçimde çözümlenmiş oldu. Sonlu elemanlar yöntemi; doğru analiz sonuçları ve algoritması bakımından, ayrıca verimli olması açısından birçok yönetime göre üstündür [16].

SEM nümerik analiz olarak Zeinkiewicz' e göre; matematiksel olarak sürekli problemlerin çözümünün yapıldığı bir yöntemdir. Burada matematiksel ifadeler [26];

- zemin problemleri için denge eşitliklerini,
- boşluk suyu basıncı olan durumlar,
- sınır durumlarının ve deformasyonların uyumu ile
- şekil değiştirme ve gerilme arasındaki durumları tanımlar.

Gerçekte sürekli sistemdeki tüm elemanlar birbirleriyle sonsuz sayıda nokta ile bağlıdır. Ancak; sonlu elemanlar yöntemindeki varsayım; sadece düğüm noktalarından bağlanmış olmasıdır. Bu şekilde, çözüm daha basitleşmiş olur. Diğer bir varsayımda; deplasmanların sadece bu noktalar tarafından aktarılmış olmasıdır. Bu şekilde, bilgisayar programlarında karmaşık problemler kolaylıkla çözüme kavuşmuştur. Şekil 3.9' da da Plaxis programı ile sonlu elemanlara ayrılmış şev kesitine yer verilmiştir.



Şekil 3.9. Plaxis programında sonlu elemanlara ayrılmış şev kesiti [26]

Bilgisayar yazılımları sayesinde günümüzde sonlu elemanlar analizleri yapılmaktadır. Örneğin; “PLAXIS” programı bir sonlu analizlerin yapıldığı paket programdır. Ayrıca yüksek lisans tezinde de bu program tercih edilmiştir ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar yazılımlarıyla yapılan çözümlerde zemin elemanlara ayrılır ve sonrasında sonlu elemanlar arasındaki ilişki hesaplanır [26].

3.3.3 Sismik Analizler

Statik analiz denildiğinde; şev hareketine neden olan temel kuvvet olan yerçekimi kuvveti anlaşılmalıdır. Depremde oluşan düşey ve yatay ivmeler ise içsel kuvvetlerin oluşmasına sebep olur. Şev stabilitesinde sismik analiz yapılırken hesaplarda yatay deprem ivmesinin, düşey deprem ivmesi göre daha kritik durumlar oluşturduğu görülür. Bu yüzden; analizler yatay deprem ivmesine göre yapılır. Yerçekimi kuvvetleri ise genellikle düşey deprem ivmesini sönümler [14]. Katı atık depolama sahalarında; dinamik yüklerle birlikte katı atık kendi içinde harekete geçer. Bu durumun dışında da endişe verici diğer durumlar ise; temeldeki kaplama tabakasına ve katı atığın üzerindeki kaplama tabakasına zarar verebilecek olmasıdır. Bu sebeple üst kaplama tabakasında, kopmalar, çatlaklar ve yarıklar meydana gelebilir. Ayrıca; sızıntı suyu ve gaz toplama sistemleri de dinamik yüklerin etkisi ile zarar görmüş olabilir [14].

Teknik şartnameye göre (USEPA) şev stabilitesi güvenlik katsayısı 1,2 ila 1,7 arasında seçilmelidir. Çizelge 3.6’ da şev stabilitesi için güvenlik katsayıları verilmiştir. Parantezin dışındakiler statik analizlerde, parantezin içindekiler ise deprem yükleri altında yani sismik analizlerde kullanılması içindir [14]. Şev analizlerinde; eğer depremin oluşturduğu ivme, hesaplanan şevin akma ivmesini geçiyorsa bir düzlem boyunca şev hareketi oluşur [14].

Çizelge 3.6. Şev stabilitesi için F_s , güvenlik katsayıları [14]

Şev Göçmesindeki Tehlikelerin Boyutları	Mukavemet Parametlerinde Belirsizlik Durumları	
	Az	Çok
İnsan hayatı veya çevresel tehlikelerin yaşanmaması	1,25 (1,20)	1,50 (1,30)
İnsan hayatının tehlikeye girmesi veya çevresel tehlikelerin yaşanması	1,50(1,30)	>2.0(1,70)

Seed ve Bonaparte çalışmalarında en büyük sismik yer değiştirmenin 0,15- 0,30 m arası olması durumunda, tasarımı iyi yapılmış depolama sahası olduğunu söylemiştir [14]. Depolama sahaslarında yapılan sismik analizde; tek doğrultudaki dalga yayılımı, katı atığın dinamik özelliklerine ve ayrıca şev yüksekliğine bağlıdır.

Sharm' ın (Kaliforniya) Richmond depolama sahasında "aşağı kuyu yöntemi" ile yaptığı çalışmalarda V_s kayma dalgası hızı 200 m/s bulmuştur. Anderson ise "sismik yansıma deneyi" nde V_s kayma dalgası hızını 244 m/s olarak bulmuştur. Singh ve Murphy ise; aynı depolama sahasında çalışma yaptığında; "aşağı kuyu ve çapraz kuyu yöntemi" ile V_s kayma dalgası hızını 30 m/s ile 275 m/s arasında elde etmiştir [14].

Yerba Buena Adasında oluşan El Centro Depremi' nde M_w yani deprem şiddeti 6,9 için, en büyük yatay ivme 0,067 g ve T_p periyot 0,64 s olarak gözlemlenmiştir.

Taft Depolama Sahası' nda ise (Kern şehri Depremi, M_w yani deprem şiddeti 7,4), en büyük yatay ivme 0,178 g ve T_p periyot 0,33 s olarak kayda geçmiştir [14].

Katı atığın temel periyodu yani T_s denklem (3.8)' de verilmiştir;

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (3.8)$$

Bu denklemde; T_s katı atık dolgusunun temel periyodu, H katı atık dolgusunun yüksekliği, V_s katı atıktaki kayma dalgası hızıdır [14].

3.3.4 Geri Analiz

şev göçmesi yaşandığında, göçme anındaki şev koşulları hakkında geriye dönük bilgi edinebilmek için geri analiz yapılır. şev duraylılığını kaybettiğinde, şevde güvenlik sayısı bir 1,0 olarak kabul edilir. Buna göre; uygun analiz yöntemi seçilerek göçme anındaki şev modeli gerçeğe en yakın şekilde modellenir [27].

Başarılı bir geri analiz için şu hususlar önemli olmaktadır [28]:

- Yenilen şevin kayma öncesi ve sonrasına ilişkin şev geometrisi eksiksiz şekilde bilinmelidir.

- Yeraltı su seviyesinin değişimine ilişkin bilgiler bilinmelidir. Şev kütlesi kendi ağırlığının dışında ek yüklemeye maruz kalmış ise bu yüklemeye ait bilgiler (dağılımı, büyüklüğü) mevcut olmalıdır.
- Şevin yenilme mekanizmasına ilişkin arazi değerlendirmeleri bilinmelidir.
- $G_s = 1$ koşulunu gerçekleştirecek stabilite analiz yöntemi, şevde gözlenen yenilme mekanizmasına uygun olmalıdır.

Geri analizde; şev göçmesinin olduğu anda güvenlik sayısının yaklaşık olarak 1,0 alınır. Analiz sonucunda elde edilen zemin parametreleri, şev yüzeyinde oluşun kaymanın ağırlıklı ortalama kayma dayanımı parametreleridir. Şev modelinde kaymanın gerçekleştiği bölgede, güvenlik sayısı 1,0 koşulunu sağlayan “c-φ” yani kohezyon ve içsel sürtünme açısı deneme yanılmayla belirlenir. Şevin birçok yüzeyinde yenilmeler oluştuysa, farklı kesitler için birçok Mohr-Coulomb kırılma zarfı oluşturulur. “c ve φ” grafik üzerinde bir araya getirilir ve kesiştiği noktadan kırılma yüzeyine ait kayma dayanımı parametreleri belirlenir [27].

Analizlerde sonlu elemanlar metodunu baz alan Plaxis 2D ve 3D programları kullanılmıştır. Limit denge metodu için ise Slide programı yardımı ile analiz yapıp değerlendirilmiştir. Slide programıyla, farklı geometriye sahip kırılma yüzeylerinde, güvenlik sayısı hesaplanır ve şevin duraylılığı değerlendirilir [27]. Homojen dağılımı olmayan ve düzensiz dizilime sahip şevler için limit denge analizinin ve sonlu elemanlar analizinin benzer güvenlik sayısı verdiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada; limit denge analiziyle elde edilen kritik göçme dairesinin sonlu elemanlar metodu ile bulunan göçme dairesi konumuna yakın olduğu ortaya konulmuştur [29].

4. ANALİZİ YAPILAN KATI ATIK DEPOLAMA SAHALARI

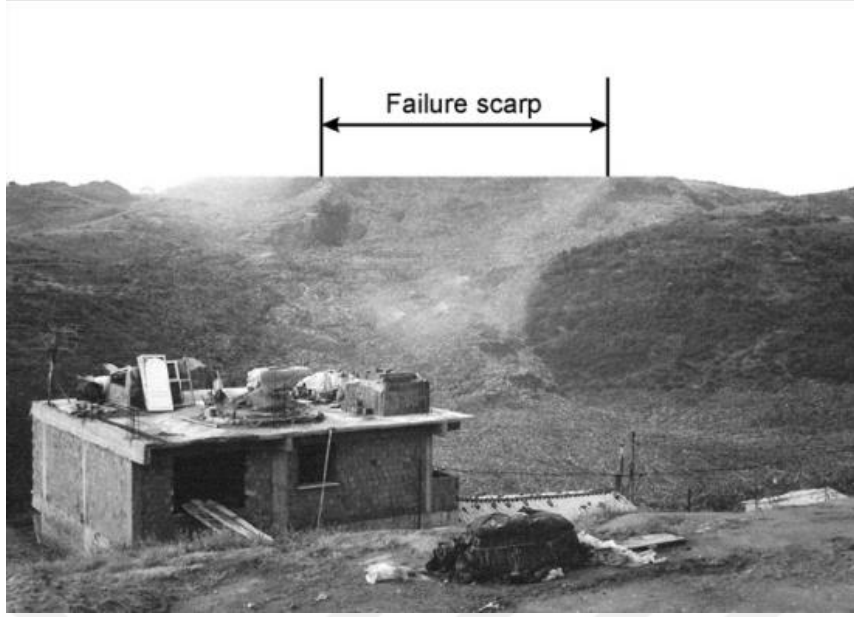
Analizlerde katı atık depolama sahalarında 6 adet depolama sahası irdelenmiştir. Bunlar;

- İstanbul, Ümraniye – Hekimbaşı Depolama Sahası,
- Bogoto, Kolombiya – Dona Juana Depolama Sahası,
- Polonya – Gnojna Grora Depolama Sahası,
- İsrail – Hiriya Depolama Sahası,
- Manila, Filipinler – Payatas Depolama Sahası,
- Yunanistan – Xerolakka Depolama Sahası.

4.1 İstanbul, Ümraniye – Hekimbaşı Depolama Sahası

Halk sağlığı ve çevre kirliliğiyle ilgili problemler çoğunlukla vahşi depolama sahalarında yaygındır [7]. Hekimbaşı depolama sahası da vahşi depolama yöntemi kullanılan bir çöp sahasıdır. Atıklar ne sıkıştırılmış ne de atıkların üstü günlük örtü ile kapatılmıştır. Bu depolama sahası, İstanbul, Türkiye’deki şehir merkezine yaklaşık 30 km uzaklıktadır. Depolama sahası 1976’ dan bu yana faal haldeydi [4]. 28 Nisan 1993’ de saat 10.00’ da Hekimbaşı depolama sahasında metan gazından kaynaklı bir patlama gerçekleşmiştir. Vadinin tepesinde bertaraf edilen katı atıklar, aniden 11 evi kapsayan vadinin dibine yaklaşık 500 m uzaklıkta bir mesafeye kadar ulaşarak çoğunlukla kadın ve çocukların olduğu 39 kişinin ölümüne neden olmuştur [7].

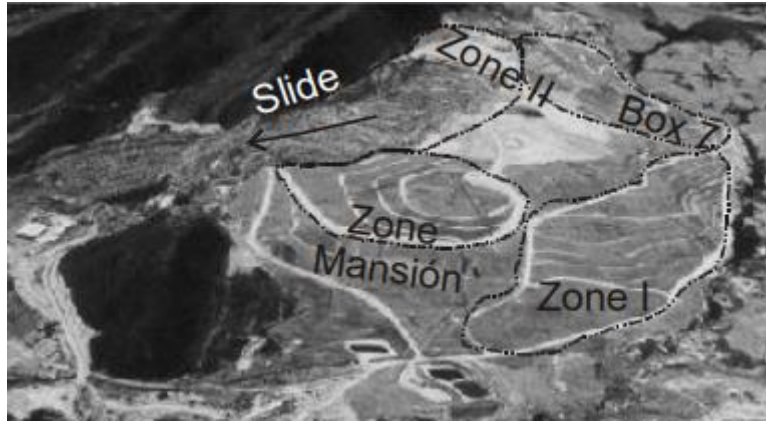
Atık malzemenin bileşimi, geri dönüştürülebilir malzemenin çöpçüler tarafından çıkarıldıktan sonra, yaklaşık %70’ i gıda kalıntıları/ organik, %10’ u kağıt, %6’ sı tekstil, %3’ ü plastik ve %3’ ü metal olduğu tahmin edilmiştir [4]. Ayrıca, katı atıklar yüksek nem içeriğine sahipti. Depolama sahasının maksimum şev yüksekliği 45 m, şev açısı ise 45 derecedir. Depolama sahasında akan katı atıkların toplamı yaklaşık olarak 12.000 m³ tür [8]. Tipik bir katı atık depolama sahasının birim hacim ağırlığı 11 kN/m³ olduğu varsayılmıştır [4]. Kocasoy ve Curi [7] çalışmalarında, en büyük olasılıkla göçmenin nedeninin uygunsuz şev açısı ve üst üste bindirilmiş yük olduğunu söylemiştir.



Şekil 4.1.Şev göçmesi olduktan sonra İstanbul - Hekimbaşı depolama sahası [8]

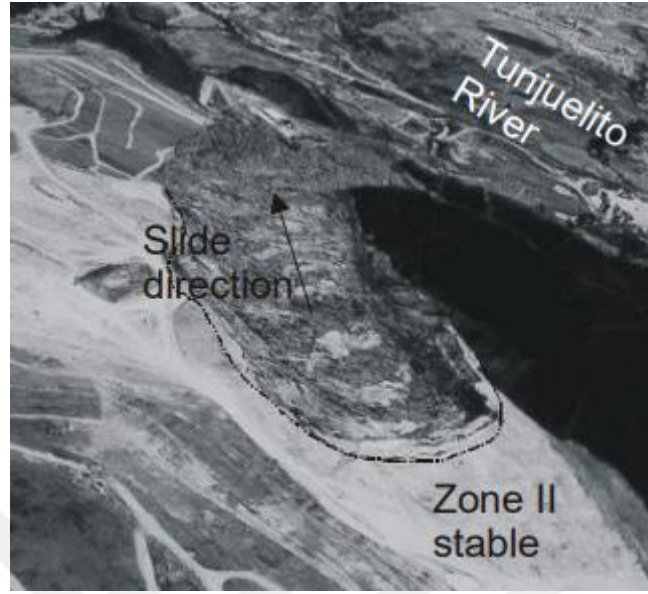
4.2 Bogoto, Kolombiya – Dona Juana Depolama Sahası

Dona Juana Depolama Sahası, 1989’ dan beri Bogota şehrinde atık bertarafı için tasarlanmış depolama alanıdır. Bogota’ nın merkezine 20 km uzaklıkta yer alan depolama alanına günde 5000 ton kentsel katı atık depolanmaktadır. Depolama sahası tasarlanırken PVC (polivinil klorür) geomembran ile alt astarından doğal kil tabakası yer almaktadır [8]. 1997 yılında Dona Juana Düzenli Depolama Sahası’ nın iki ana alana bulunmaktadır, Şekil 4.2. Zon I, 1989’ dan 1995’ e kadar katı atıkların biriktirildiği en eski alandır. Zon II, 1995 ortasından katı atıkların biriktirildiği daha yeni bir alandır [5].



Şekil 4.2. Dona Juana depolama sahasının genel görünümü [5]

27 Eylül 1997’ de Zon II’ de biriken 800.000 ton katı atık göçmüştür. Şev göçmesi daha da ağırlaştırır bir tıkanıklık yaratarak Tunjuelito Nehri yatağına ulaşmıştır, Şekil 4.3.



Şekil 4.3. Şev göçmesinin krokisi [5]

Zon II, Andes Dağları tepeleri arasında eski bir kanyonda inşa edilmiştir. Kanyon, en dik kısımlarda bulunan kumtaşı ve geri kalanında şeyl tarafından oluşturulmuştur. Zon II, iki 20 cm’ lik kompakt kil katmanı ve 1 mm HDPE geomembran ile kaplanmıştır. Astarın üstüne 30 cm’ lik bir kum drenaj tabakası kurulmuştur, ardından bir geotekstil ve son olarak bir koruma tabakası olarak 20 cm doğal toprak serilmiştir. Sızıntı suyu, drenaj tabakasına gömülü bir PVC boru ağını çevreleyen çakıl ve geotekstil keçe ile toplanmıştır [5].

Bogota’ nın atığı, tipik ABD atıklarına kıyasla çok yüksek bir organik ve su içeriği içermektedir. Sonuç olarak, Bogota’ dan gelen atık çok daha fazla sızıntı suyu ve gaz basıncı üretmektedir. Atık, 0,25 ila 0,3 metre kalınlığında bir ara toprak örtüsü ile iç içe 2,5 metre kalınlığında tabakalara yerleştirilmiştir. Yapılan toplam atık eğimi ortalama eğim sadece 4.7H: 1V’ dir. Göçmeden önce Zon II hücrelerine yirmi atık seviyesi yerleştirilmiştir. Atık birikintisinin maksimum kalınlığı şev göçmesi sırasında yaklaşık 40 metredir [6]. Zon II’ deki katı atık malzemelerin ilgili mühendislik özellikleri 10.6 kN/m^3 ile 13.0 kN/m^3 arasında değişen bir birim ağırlık ve permeabilite ise yaklaşık 10^{-3} cm/sn [6]. Atıkların birleşimi; %4 kül ve toz, %14 kağıt, %24 plastik, %3 metal, %4 cam ve %51 yiyecek ve bahçe atıkları şeklindedir [8].

Fernandez ve arkadaşları [6], 27 Eylül 1997’ deki Dona Juana depolama sahasındaki şev göçmesinin nedenini, atıkların yüksek organik içerikten kaynaklanan, katı atık kütleindeki

yüksek boşluk suyu basıncından kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Bu durum, yetersiz tasarlanmış sızıntı suyu drenajı ve gaz tahliye sistemleri tarafından daha da kötüleşmiştir.

4.3 Polonya – Gnojna Grora Depolama Sahası

Depolama alanının bir bölümünde yapılan arkeolojik çalışmalar, depolama alanının 14. yüzyıla tarihlendiğini ortaya koymuştur. Bu, sakinlerin çöplerini attığı kontrolsüz bir depolama sahasıydı. Bu nedenle, örtü veya örtü sistemi katmanları olmayan eski bir depolama sahasıdır [4].

Eski kentin 1965 yılında yeniden yapılanma ve yenileme çalışmaları tamamlandıktan hemen sonra, çöp sahasındaki hareketler nedeniyle yakındaki binalarda çatlaklar gözlemlendi. Saha araştırmaları yapılmış, sondajlar açılmış, basınçölçer testleri yapılmış ve atıkların kalınlığını ve bazı özelliklerini belirlemek için test çukurları açılmıştır. Atık derinliği 5 ila 30 m arasında değişmektedir [4].

Depolanan atık için dört tip malzemeden bahsedilmektedir. Bu malzemeler, zemin yüzeyinin yakınındaki Atık Dolgusu (WF), Üst Atık (UW), Ara Atık (IW) ve Alt Atık (LW) altındadır. Atık Dolgusu, eski evsel MSW ile birlikte büyük miktarlarda yıkım enkazından oluşur ve çok heterojendir. Diğer tüm MSW katmanları nispeten homojendir. Daha dik yamaçlara sahip olan depolama sahasının 1. bölgesi için şev stabilite analizleri yapılmıştır.

WF tabakasının özelliklerinin, heterojenliği nedeniyle laboratuvar veya saha testleri ile ölçülmesi zordur. Atık malzemenin birim ağırlığının 17 kN/m^3 olduğu (atıkların yıkım enkazıyla karıştırıldığı için) ve altta yatan atığın MSW yüzdesi ve yıkım enkazından daha az olan doğal su muhtevasının %28 ila 80 arasında olduğu tahmin edilmiştir [4].

Depolama alanının 300 yaşında olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle, WF atık katmanlarının en yenisi olmasına rağmen, MSW' nin geri hesaplanan kayma mukavemetinin kohezyonlu zemin kayma mukavemetine yakın olması beklenir [4].

Sarihan ve arkadaşlarının [4] yaptığı araştırmalara göre; MSW' nin kayma mukavemetinin yaşla, yani ayrışma ile azaldığını göstermektedir. Hem kohezyonun hem de sürtünme açısının zamanla azalması veya sadece kohezyonun azalması konusunda sürekli bir tartışma vardır. Bu nedenle, 300 yıllık bir MSW enkaz karışımı için kohezyon kesişimi 0' a eşit olduğunu varsaymak ve sürtünme açısını geri hesaplamak mantıklı olduğunu önermiştir.

4.4 İsrail – Hiriya Depolama Sahası

Hiriya depolama sahası, Shappirim Nehri ve Ayalon Nehri' nin birleştiği açık bir alanda İsrail' in Tel-Aviv' in hemen doğusunda yer almaktadır. Tel-Aviv bölgesi için kentsel katı atıklarının bertaraf edilmesinin yanı sıra bina atığı ve bazı endüstriyel atıkların boşaltılması için kullanılmaktadır. 16 milyon m³' den fazla atık içeren atığın kapladığı alan ile muazzam boyutlara ulaştı. Hiriya depolama sahasının şekli 45 derece veya daha fazla eğim açlarına sahip, çevredeki zemin seviyesinden 60 m yüksekliğindedir [4].

Depolama sahası 1952-1998 yılları arasında kullanılıyordu ve İsrail' in en büyük depolama alanıydı. Depolama sahasında özel olarak tasarlanmış bir alt tabaka, günlük örtü veya sızıntı suyu ve gaz kontrol sistemleri yoktur [4].

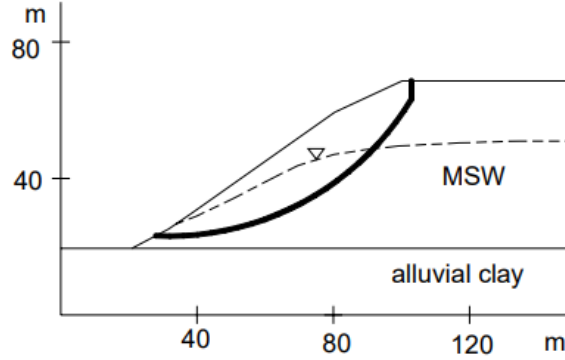


Şekil 4.4. 1997' de Hiriya depolama sahasında oluşan şev göçmesi [4]

Şev yükseklikleri, çevre seviyesindeki arazinin üzerinde ölçüldüğünde ortalama 56 metre olan 43 ila 64 metre arasında değişmektedir. Dik yamaçlar, bitki örtüsü, drenaj ve erozyon kontrollerinin olmaması nedeniyle, depolama sahası küçük ve büyük stabilite sorunları yaşamıştır. 1997-98 kışında, şiddetli bir yağmur döneminden sonra çöplüğün kuzey yüzünde büyük bir şev kayması meydana gelmiş ve Ayalon Nehri' ne ulaşmıştır, Şekil 4.4 [4].

Şev göçmesi oluşmadan önce, depolama sahasının üst kısmına, yağmur suyunun sızmasını azaltmak için değişen miktarlarda kil, kumlu kil ve killi kumdan oluşan bir zemin tabakası ile kaplanmıştır. Gaz üretimi ve sızıntı suyu seviyelerinin izlenmesi için 10-47 metre derinliğinde 20' den fazla sondaj kuyusu açılmıştır. Sondaj, doymuş sızıntı suyu seviyesinin altında sonlandırıldı. MSW ile zeminler sondaj açılmasıyla karışmıştır. Sığ derinliklerde atık kısmen ayrılmış ve ayrışma derecesi ve su muhtevası derinlikle birlikte artmıştır. Su muhtevası

%13- 67 arasında değişerek ortalama %38 olmuştur. Sızıntı suyu seviyelerine plato yüzeyinin 7 ila 23 metre derinliklerinde rastlanmıştır [4]. Şekil 4.5’ de ise depolama sahasının kesitine yer verilmiştir.



Şekil 4.5. Hiriya depolama alanının kesiti [4]

4.5 Manila, Filipinler – Payatas Depolama Sahası

Payatas depolama sahası, Filipinler’ deki Luzon adasında bulunan Quezon City'nin kuzeydoğu köşesinde yer almaktadır [30]. Depolama alanı, kontrolsüz küçük bir atık depolama sahasına dönüşmüştür [8]. 1973’ den beri faaliyette olup 1996’ dan beri yaklaşık 1500 ton MSW yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin ardından atık, üst eğime bağlı sıkıştırılmıştır, böylece üst kısımda daha fazla atık için daha fazla alan oluşturulmuştur. Depolama alanının yüksekliği, göçmeden önce yaklaşık 30 m olmuştur [4].

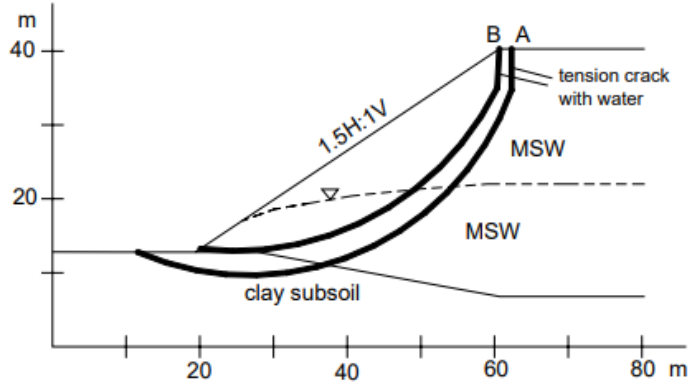


Şekil 4.6. 2000 yılında Payatas depolama sahasında şev göçmesi [4]

Şev göçmesi 10 Temmuz 2000’ de meydana gelmiştir, (Şekil 4.6) Yaklaşık 1.2 milyon m³ kentsel atık kaymıştır ve 250’ den fazla kişi ölmüştür. Atıklar ve enkazlar yamaç önünde

30.000 m² lik bir alanı kaplamıştı. Atıklar, leş yiyen hayvanların geri dönüşümü nedeniyle yüksek oranda plastik ve organik madde ve daha az metal, kağıt ve cam içermekteydi. Atığın çok az sıkıştırılması ya da hiç sıkıştırma yapılmaması, düşük yoğunluklu bir atığın oluşmasına yol açmıştı [4].

Şev göçmesinin nedeni net değildir, ancak kaymaya muhtemel birkaç faktör Üzerinde durulmuştur [4]. Bunlar, tüm atık kütleinin muhtemel doygunluğuna neden olan şiddetli yağmurlar (bölgede iki hafta içinde meydana gelen iki tayfundan kaynaklanan 68 cm yağış); şevlerin tavsiye edilenden daha dik olmasına neden olan atıkların birikmesi (1.5H:1V kayma anında); şevin üstünde su birikintisi; bu suyu boşaltmak için şevin üst kısmındaki drenaj hendeğinin inşası; şevin ucunda 2 ila 3 m derinliğinde drenaj hendeğinin inşası; ve düzenli depolama sahası gazının birikmesi.



Şekil 4.7. Payatas depolama alanının kesiti [4]

4.6 Yunanistan – Xerolakka Depolama Sahası

Halk sağlığını ve çevreyi korumak için kentsel katı atık (MSW) depolama alanlarında şevler stabil olmalıdır. 29 Aralık 2010 Xerolakka depolama sahasında şev göçmesi yaşanmıştır [10].

Xerolakka depolama sahası, Patras şehrinin 5 km doğusunda yer alan Batı Yunanistan bölgesindeki dokuz MSW depolama alanından biridir. Panachaikon Dağı' nın eteklerinde bir kanyon depolama alanıdır. Eylül 1993' de atık almaya başladı ve günde 300 ton atık almaktadır. Düzenli depolama sahası olarak tasarlanmış ancak son dönemde atıklar sıkıştırılmamış ve günlük örtü serimi gerçekleştirilmemiştir [10].

Depolama sahasının plan boyutları 50 m x 30 m ve yüksekliği 27 m' ye ulaşmıştır. Göçen atık kütlesinin hacminin yaklaşık 12.000 m³ olduğu tahmin edilmiştir. Depolanan atığın birim hacim ağırlığının seçimi, atık kütlesinin stabilitesi üzerinde bir etkiye sahiptir. Vlachakis ve arkadaşları [10]; 30 m kalınlığında atık kütlesi için, ortalama 12 kN/m³ birim hacim ağırlık değerini kullanılmıştır. Bu değer aynı zamanda düzenli depolama tesisinin tasarımı için kullanılan birim ağırlık değerini ile de tutarlıdır [10].

Vlachakis ve arkadaşları [10] çalışmalarında şev göçmesinin nedenlerini; uygunsuz atık bertaraf uygulamaları, yetersiz sıkıştırma, sızıntı suyu ve gaz basıncı üretimi ve düzenli depolama sahasının şevlerinin yanlış depolama ile daha çok dikleşmiş olması olarak tanımlamıştır.



5. ANALİZDE KULLANILAN PROGRAMLAR

Sonlu elemanlar yöntemi için PLAXIS (Professional version 2D CE V20 ve 3D CE V20); limit denge yöntemleri için SLIDE (version 6.0) bilgisayar paket programları kullanılmıştır.

5.1 Plaxis Programı

PLAXIS sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan geoteknik problemlerine çözüm bulan bilgisayar programıdır. 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi' nde nehir dolgularının pratik bir şekilde analizi için kullanılmıştır [16]. Program, geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan, zemin-yapı etkileşimi, gerilme – şekil değiştirme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme farklılığı olan durumlarda kullanılabilir [31].

Input, Output, Calculation ve Curves olmak üzere 4 ana başlığa sahiptir. Input yani giriş bölümünde bilgiler girilir, Output komutuyla zemin davranışı ile ilgili sonuçlar görülür, Calculation bölümünde ise analiz hesaplamaları yapılır ve Curves komutuyla da istenilen grafikler, örneğin güvenlik sayılarını veren grafikler, çizilerek ve analiz detayları incelenir [24].

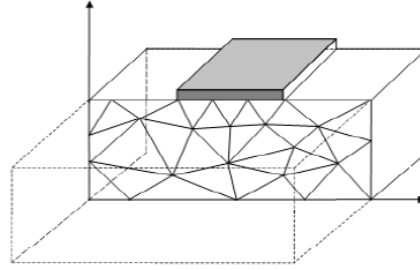
Plaxis programında, şev stabilitesi analizleri için ilk aşama şev kesiti çizilmektir. Şev kesiti ve katmanları oluşturulduktan sonra gerekli durumlar için yapısal materyaller girilmektedir. Şev modellendikten sonra ve gerekli verileri girildikten sonraki aşamada analizler yapılır ve gerekli incelemeler gerçekleştirilir [26].

5.1.1 Geometrik Modelin Oluşturulması

Plaxis programında ilk aşamada geometri oluşturulmalıdır. Lines komutunun da yardımıyla çizgisel elemanlar çizilir ve çalışma alanının sınırları belirlenir [24]. Plaxis sonlu elemanlar paket programında; zeminin katmanları, yapılar, kazı aşamaları, yükler ve sınır şartlarının girişi için özel bir grafik ortamı kullanılmaktadır. Bu şekilde; programda geometrik model, gerçeğe en uygun ve detaylı şekilde modellenebilmektedir [31].

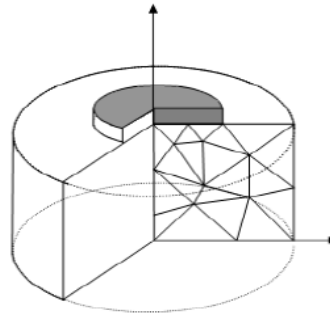
Plaxis programı yardımıyla, geoteknik problemlere göre düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetrik geometri koşulları kullanılmaktadır [31].

Düzlem şekil değiştirme durumu, cismin bir doğrultudaki boyutunun (z ekseni), bu boyuta dik diğer iki doğrultudaki boyutundan çok büyük olması durumunda kullanılır (Şekil 5.1) [31].



Şekil 5.1. Düzlem şekil değiştirme [31]

Problemin z ekseni etrafında çepçevre simetrik olması durumunda, deformasyonlar ve gerilmeler dönme açısından bağımsız olmaktadır. Bu sebeple; problem Şekil 5.2’ de görülen alan üzerinde iki boyutlu problem olarak çözümlenebilmektedir [31].



Şekil 5.2. Eksenel simetrik problem [31]

PLAXIS programında mevcut şevin geometrik modeli; şev stabilite problemine göre, düzlem şekil değiştirme koşullarında modellenmiştir.

Oluşan problemin geometrisi modellendikten sonra; eğer yapısal elemanlar kullanılacaksa yani temel, palplanş, geotekstil, yatay destek, ankraj vb. gibi yapılar için beam, geotextile, anchor vb. gibi komutlar kullanılır [24].

5.1.2 Başlangıç Koşulları

Şev davranışı, ana yapıların yönelimi, kaya kütlesi dayanımı ve su koşullarına bağlı olduğundan, genelde başlangıç gerilme durumunun herhangi bir problemde ne tür etkilerinin

5.1.5 Zemin Modelleri

PLAXIS' de zemin veya kaya gibi ortamların davranışını modellemek için 6 farklı model kullanılmaktadır. Bunlar;

- Lineer Elastik Model (LE)
- Mohr – Coulomb Model (MC)
- Jointed Rock Model (JR)
- Soft Soil Model (SS)
- Soft Soil Creep Model (SSC)
- Hardening Soil Model (HS)

Analiz yapılırken zemin davranışı olarak Mohr-Coulomb tercih edilmiştir.

Mohr-Coulomb (MC); elasto-plastik olarak davranış gösteren zemin modelidir. Veri girişi sağlanırken 5 ayrı parametre için giriş sağlanır. Girilecek 5 parametre; Elastisite modülü, E, Poisson oranı, ν , kohezyon, c, içsel sürtünme açısı, ϕ ve dilatasyon açısı, ψ ' dir. Bu geometrik modelde, analizlerin hızlı ve kısa sürede yapılabilmesinden dolayı çoğunlukla zeminde oluşacak deformasyonlar için ilk izlenim sağlanır [31].

5.2 Slide Programı

Filipinler – Payatas Depolama Sahası' nın geometrisi ayrıca Rocscience Paket Programının içerisinde bulunan Slide (version 6.0) programı ile oluşturulmuştur. Plaxis ve Slide programında modelleme yapılarına analizler kıyaslanmıştır.

Slide, kaya veya zemin şevlerindeki dairesel veya dairesel olmayan kırılma yüzeylerinin güvenlik sayısını veya göçme olasılığını değerlendirmek için 2 boyutlu bir limit denge şev stabilite programıdır [34]. Slide programında Spencer, Morgenstern-Price gibi titiz yöntemlerin yanında, basitleştirilmiş Bishop, düzeltilmiş/basitleştirilmiş Janbu, Fellenius, Lowe-Karafiath gibi metotlarla da analizler gerçekleştirilir. Kaya kütlelerinde; deformasyon ve dayanım özelliklerinin belirlenmesinde çoğunlukla Hoek-Brown yenilme kriteriyle şevlerde güvenlik sayısı analizleri yapılır. Slide' da en kritik göçme daireleri, kullanıcı tarafından noktasal olarak tanımlanabilir. Tercih edilen bir bölgedeki veya tanımlanan aralık için tüm sistemdeki kritik göçme daireleri ve güvenlik sayıları görülebilir [31].

Slide sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir programdır. Ayrıca; çözümlene koşulları ve açıklamaları ile ilgili bilgiler programın içerisinde bulunan Help bölümündeki Slide Tutorials bölümünde örneklendirilerek verilmiştir [34].

Slide programında; problem modellenirken şev problemine uygun olarak 2 boyutlu koşullarda oluşturulmuştur. Basitleştirilmiş Janbu yöntemi tercih edilerek güvenlik sayısı elde edilmiştir.

Analizler yapılırken; 2 ayrı programdan faydalanılarak avantajlı yönleri görülmüştür.



6. ANALİZ

Analizi yapılan depolama sahalarına ait bilgiler Çizelge 6.1’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Analizleri yapılan depolama sahalarının özellikleri

Depolama Sahaları	Depolama Sahalarının Özellikleri						
	Katı Atık Bertaraf Yöntemi	Depolama Başlangıç Tarihi	Facia Tarihi	Göçme Sonrası Sonuçlar	Şev Yüksekliği ve Açısı	Akan Atık Hacmi	Birim Hacim Ağırlığı
İstanbul, Ümraniye/ Hekimbaşı Depolama Sahası	Vahşi Depolama	1976	28 Nisan 1993	11 evi yutarak 39 kişinin ölümüne neden oldu.	45 m 45°	12.000 – 15.000 m ³	11 kN/m ³
Bogoto, Kolombiya/ Dona Juana Depolama Sahası	Düzenli Depolama	1989	27 Eylül 1997 (Zona II)	Atıklar Tunjuelito Nehri’ ne ulaştı. Ölüm ve yaralanma yoktur.	40 m 18°	800.000 m ³	10.6 – 13 kN/m ³
Polonya/ Gnojna Grora Depolama Sahası	Vahşi Depolama	14. yy (WF tabakası yaklaşık 300 yıllık)	-	1965 yılında eski kasabanın yeniden yapılanması için çalışma yapılmıştır.	26 m 30°	-	17 kN/m ³
İsrail/ Hiriya Depolama Sahası	Vahşi Depolama	1952	1997	Ayalon Nehri’ ne ulaştı	60 m 56°	Bilinmiyor.	8 – 9 kN/m ³
Manila, Filipinler/ Payatas Depolama Sahası	Vahşi Depolama	1973	10 Temmuz 2000	250’ den fazla ölüme neden oldu. Atıklar ve enkazlar yamaç önünde 30.000 m ² ’ lik bir alanı kaplamıştı.	33 m 40°	1.2 milyon m ³	10 – 14 kN/m ³
Yunanistan/ Xerolakka Depolama Sahası	Düzenli depolama sahası olarak tasarlanmış ancak son dönemlerde atıklar sıkıştırılmamış.	Eylül 1993	29 Aralık 2010	Depolama sahasına giden erişim yollarını kapladı.	27 m 42°	12.000 m ³	12 kN/m ³

Çizelge 6.1’ deki bilgiler de göz önüne alınarak Plaxis 2D, 3D ve Slide programlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Katı atıkların altındaki zemine ait mühendislik özelliklerine Çizelge 6.2’ de yer verilmiştir.

Çizelge 6.2. Zeminin mühendislik özellikleri

Katı Atığın Altındaki Zeminin Mühendislik Özellikleri	
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	20
Kohezyon, c (kN/m ²)	25
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30
Elastisite Modülü, (kN/m ²)	30.000
Poisson Oranı, ν	0,35

Plaxis programında; modellemeye başlamadan önce model tipi olarak “plane strain” yani düzlem şekil değiştirme seçilmiştir. Böylece şev geometrisine uygun analiz yapılacaktır. Detaylı bir analiz yapabilmek için 15-Noded tercih edilmiştir. Bu şekilde daha fazla düğüm noktası elde edilmiştir. Sınırlar oluşturulacak geometriye göre belirlenmiştir. Geometri oluşturulduktan sonra, malzemeler atanmış ve mesh komutu ile ağlar oluşturulmuştur. “Staged Construction” bölümünde ise analiz için aşamalı şekilde girdiler oluşturulmuş ve güvenli analiz gerçekleştirilmiştir. “Curve” bölümünde güvenlik sayısı elde edebilmek için grafikler oluşturulmuştur.

Slide (version 6.0) programında modelleme yapılırken; öncelikle geometrinin oluşturulması için sınırlar belirlenmiştir. Sınırların belirlenmesinin ardından şev geometrisini oluşturmak için “draw polyline” komutu kullanılarak geometri oluşturulmuştur. “Add external boundary” komutu ile dış sınırlar atanmıştır. “Define Material” bölümünde tanımlanan malzemeler, şev geometrisine atanmıştır. Analize geçmeden önce programın otomatik olarak belirlediği auto grid ile kayma merkezi (20x20) gridleri belirlenmiştir. Analiz bölümünde şev göçmesinin yönü işaretlendikten sonra, limit denge yöntemlerinden “Basitleştirilmiş/ Düzeltilmiş Janbu” seçilerek analiz yapılmıştır.

Akyol’ un [14] çalışmasındaki; konsolidasyon deneyinde atık madde modellenirken kullanılan plastik malzemenin elastisite modülü gerilme değerleri altında 3.000 - 25.000 kN/m² arasında bulunmuştur. Bu deney de göz önünde bulundurularak analizlerde elastisite modülü

katı atıklar için ortalama olarak 10.000 kN/m² alınmıştır. Ayrıca analizler gerçekleştirilirken farklı elastisite modülü değerleri verilmiştir ve güvenlik sayısına etkisinin az olduğu gözlenmiştir.

Poisson oranı; aksenal ve yanal gerilimlerin oranı olarak tanımlanmaktadır. Her iki gerilim değeri birimsiz olduğu için Poisson oranı da birimsizdir. poisson oranının değerleri yapılan incelemelere göre 0,29 ile 0,32 arasında bulunmuştur [35]. Analizlerde katı atıklar için poisson oranı 0,29 alınmıştır. Elastisite modülünde yapıldığı gibi analizlerde poisson oranına farklı değerler verilmiştir. Ancak güvenlik sayısına etkisinin az olduğu görülmüştür.

Akyol' un [14] çalışmasında, yıllara göre birim hacim ağırlığında değişimlerin olduğuna yer verilmiştir. Bu çalışmaya göre; 50 yıllık çöpler için birim hacim ağırlığında, ilk değerine göre %10 dan az artış olmuştur.

$$\frac{\gamma_t(t)}{\gamma_t(t = 1 \text{ gün})} = 0,0173 \log(t) + 1,006 \quad (6.1)$$

Burada; $\gamma_t(t)$ istenen zamandaki birim hacim ağırlık, $\gamma_t(t=1)$ ise ilk günkü birim hacim ağırlıktır [14]. Ayrıca atığın birim hacim ağırlığı derinliğe bağlı olarak da değişim göstermektedir. Derinliğe bağlı olarak değişimi ise denklem (6.2)' de verilmiştir.

$$\gamma = \gamma_i + \frac{z}{a + b \cdot z} \quad (6.2)$$

Burada; γ_i yüzeydeki birim hacim ağırlıktır. z derinlik; a ve b parametreleri ise Çizelge 6.3' de atıkların sıkıştırılma derecelerine göre belirlenen parametredir [14].

Çizelge 6.3. Katı atıkların sıkıştırılma derecelerine göre a ve b parametreleri [14]

Sıkıştırılma Derecesi	γ_i (kN/m ³)	b (m ³ /kN)	a (m ⁴ /kN)
Yetersiz	5	0,1	2
Orta	10	0,2	3
İyi	15,5	0,9	6

Ayrıca ayrışmaya bağlı olarak zaman içerisinde mukavemet değerleri de değişmektedir. Örneğin; Akyol' un çalışmasında kayma mukavemeti açısı yani içsel sürtünme açısı 38° ile 42° arasında, kohezyon ise 16 kN/m^2 ile 19 kN/m^2 arasında hesaplanmış olduğuna yer verilmiş. Ancak 1 yıl sonra ayrışmayla beraber bu değerlerin kayma mukavemeti açısı 33° ye, kohezyon değeri ise 16 kN/m^2 değerine indiğini çalışmasında söylemiştir [14]. Akyol' un yaptığı çalışma göz önünde bulundurulduğunda zamana bağlı olarak depolama sahalarının mühendislik özellikleri değiştiği söylenebilir. Depolama sahalarındaki atıkların yaşı da dikkate alınmalıdır.

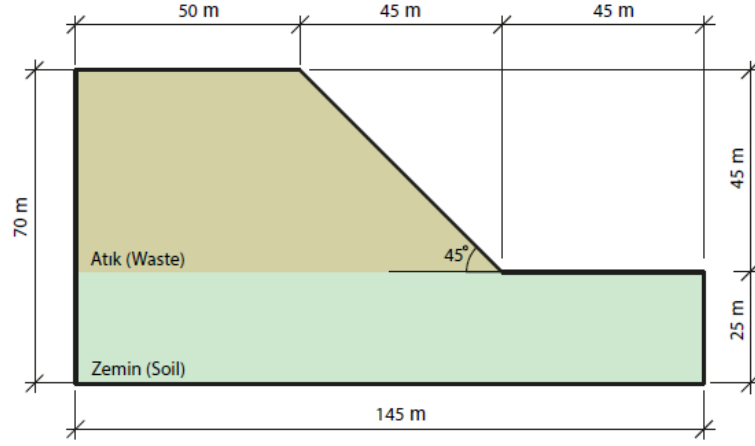
6.1 İstanbul, Ümraniye – Hekimbaşı Depolama Sahası' nda Analiz

Hekimbaşı depolama sahasına ait katı atığın mühendislik özellikleri Çizelge 6.4' de verilmiştir. Plaxis (2D CE V20) programı ile depolama sahasının şev geometrisi modellenmiş ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.4. Hekimbaşı depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

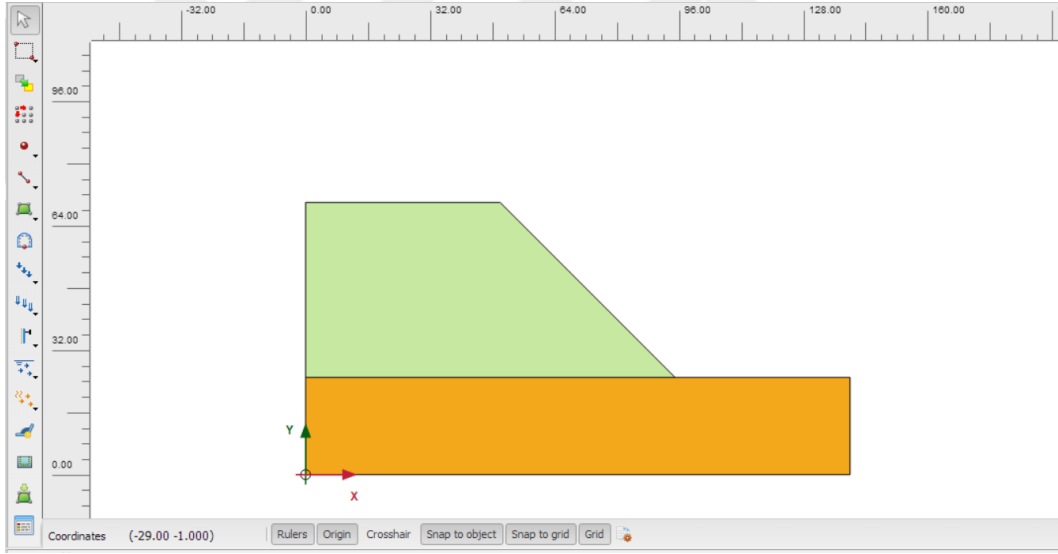
Katı Atığın Mühendislik Özellikleri			
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m^3)	11		
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m^2)	10.000		
Poisson Oranı, ν	0,29		
Kohezyon, c (kN/m^2)	10	5	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ ($^{\circ}$)	30	30	30

Programda modellenmiş olan şev geometrisi Şekil 6.1' de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.1' de de Hekimbaşı depolama sahasına ait bilgiler oluşturulmuştur. Depolama sahasında felaketin yaşandığı zamana kadar katı atığın yaşı yaklaşık olarak 17 yıldır. Depolama sahasının şev yüksekliği 45 m ve şev açısı 45° dir.



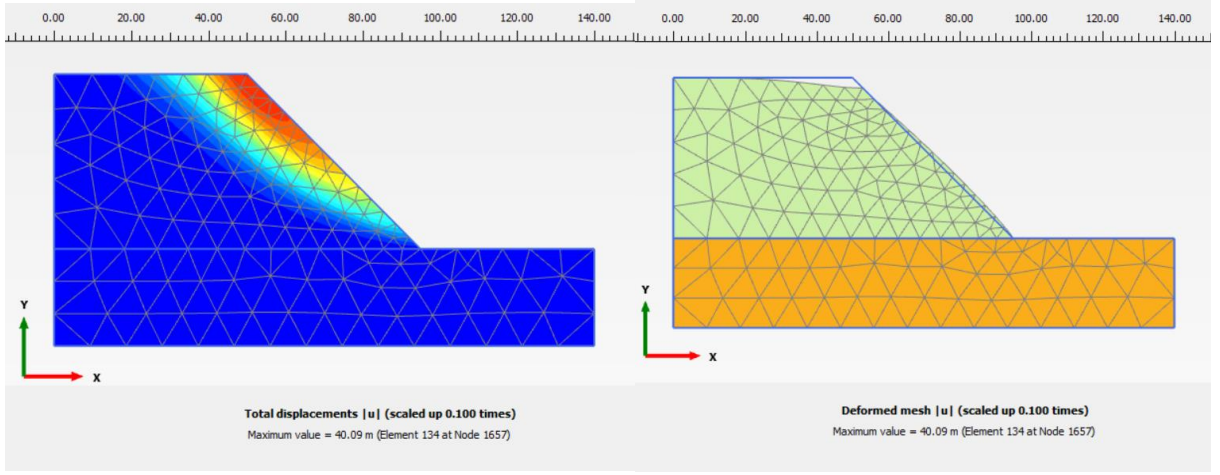
Şekil 6.1. İstanbul, Ümraniye - Hekimbaşı depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis' de modellenen depolama sahası Şekil 6.2' de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 262 element, 2263 düğüm elde edilmiştir. Analiz aşaması gerçekleştirilmiş ve deformasyonlar incelenmiştir.



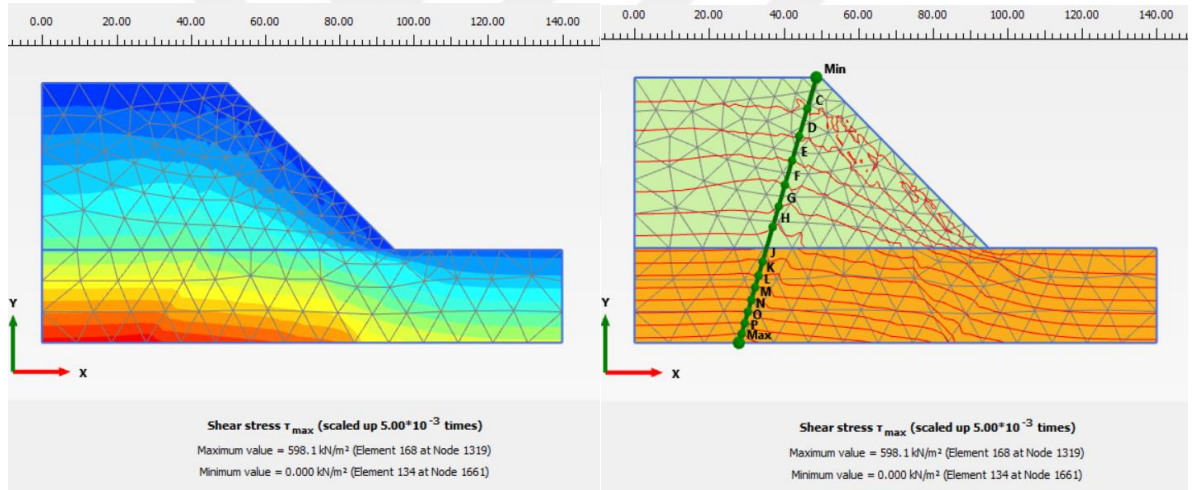
Şekil 6.2 Plaxis' de modellenen Hekimbaşı depolama sahası

Toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş depolama sahası Şekil 6.3' de görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 30° ($c=0$, $\phi= 30^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 40,09 m elde edilmiştir.



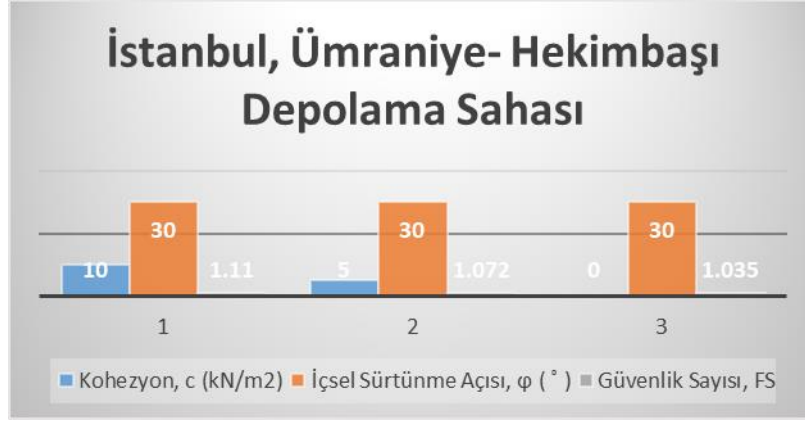
Şekil 6.3. Hekimbaşı depolama sahasında toplam yer değıştirme ve deforme ağ şekli

Depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi 1319 düğüm noktasında 598,1 kN/m² elde edilmiştir (Şekil 6.4).

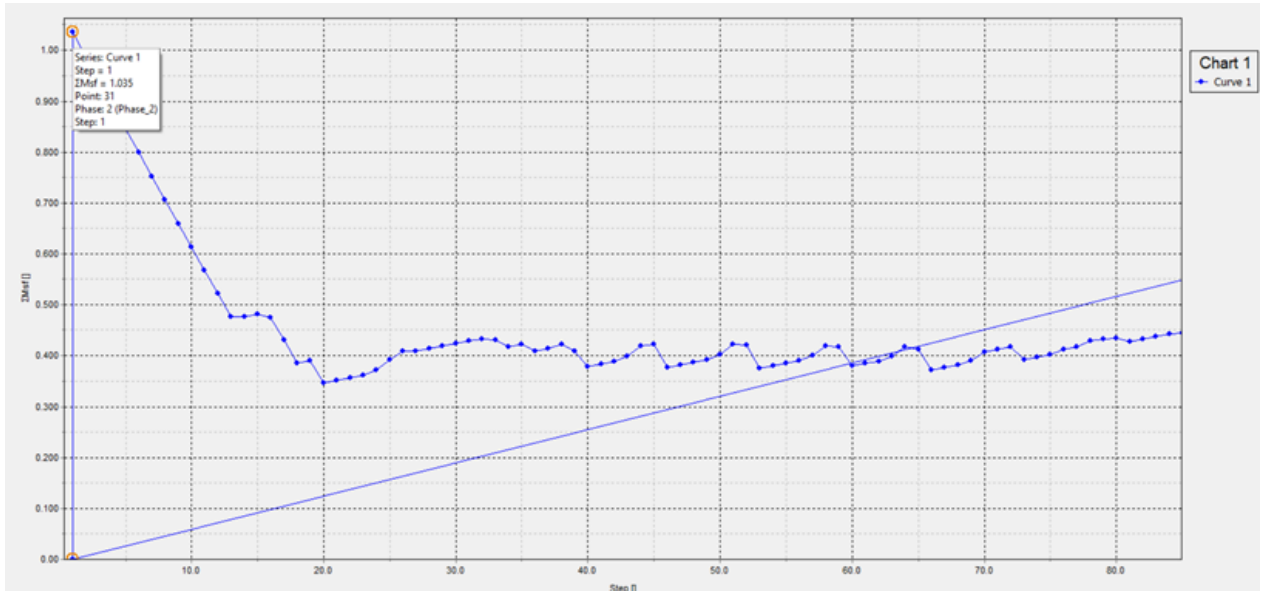


Şekil 6.4. Hekimbaşı depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

Şev göçmesi yaşandığında, göçme anındaki şev koşulları hakkında geriye dönük bilgi edinebilmek için geri analiz yapılır. Şev göçmesinin yaşandığı anda güvenlik sayısı 1,0 kabul edilir. Böylece geriye dönük şev koşulları hakkında veri elde edilir ve şevin göçme anındaki modeli oluşturulur. Şekil 6.5' de depolama sahasına ait güvenlik sayıları grafik halinde verilmiştir. Katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir (Şekil 6.6). Bu durumda göçme anındaki gerçeğe en yakın şev koşulları elde edilmiştir.



Şekil 6.5. Hekimbaşı depolama sahasına ait güvenlik sayıları



Şekil 6.6. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği

6.2 Bogoto, Kolombiya – Dona Juana Depolama Sahası' nda Analiz

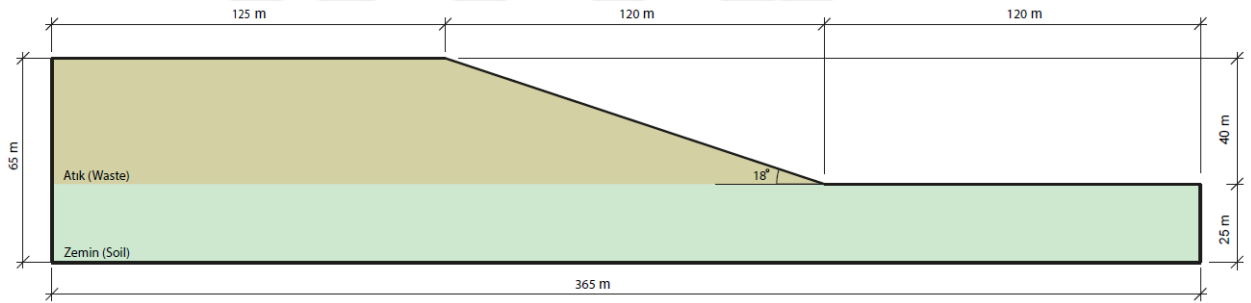
Dona Juana Depolama Sahası' nda, Plaxis (2D CE V20) programı ile analiz yapılmıştır. Çizelge 6.5' de bu depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri ile ilgili bilgi verilmiştir.

Dona Juana Depolama Sahası, 1989' dan beri Bogota şehrinde atık bertarafı için tasarlanmış düzenli depolama sahasıdır. İncelenen depolama sahasları göz önünde bulundurulduğunda, Doana Juana depolama sahası geomembran ile alt astarından doğal kil tabakasına sahiptir. Ayrıca sızıntı suyu, drenaj tabakasına gömülü bir PVC boru ağını çevreleyen çakıl ve geotekstil keçe ile toplanmıştır. Depolama sahası Zon I ve Zon II olmak

üzere 2' ye ayrılmıştır. Zon II alanında,1995 yılının ortalarında daha çok depolanmaya başlanmıştır. Ancak; Zon II alanında, 27 Eylül 1997' de şev göçmesi yaşanmıştır ve 800.000 m³ atık göçmüştür. Şev yüksekliği 40 m, şev açısı ise 18° dir. Şekil 6.7' de de depolama sahasına ait şev geometrisinin görünümü verilmiştir.

Çizelge 6.5. Dona Juana depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri				
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	11			
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m ²)	10.000			
Poisson Oranı, ν	0,29			
Kohezyon, c (kN/m ²)	10	5	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28



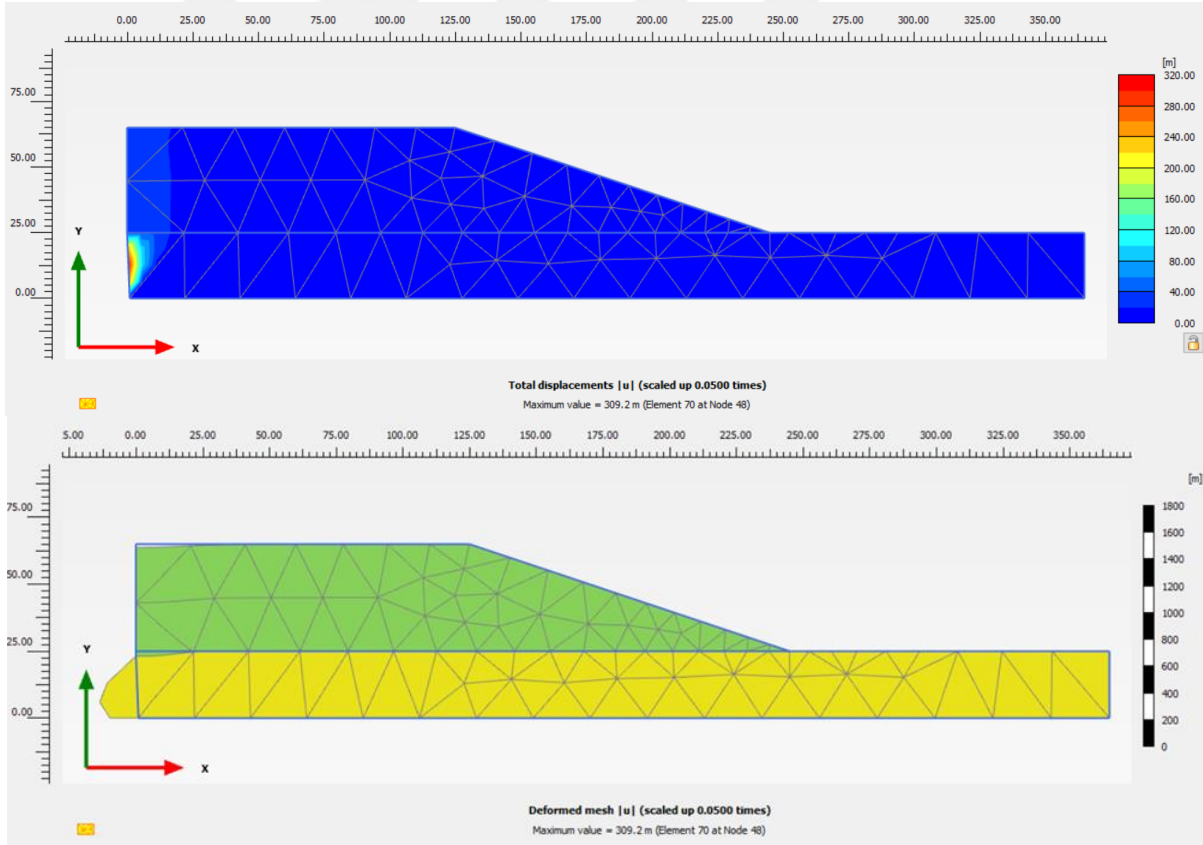
Şekil 6.7. Bogota- Dona Juana depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis' de modellenen olduğum, Dona Juana depolama sahası Şekil 6.8' de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 130 element, 1137 düğüm elde edilmiştir. Analiz yapıldıktan sonra deformasyonlar incelenmiştir.

Analizi yapılmış depolama sahasının da görüntüsü ağ şeklinde ve toplam yer değiştirmeleri Şekil 6.9' da görmekteyiz. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 28° (c=0, $\phi=28^\circ$) olduğu durumda analiz sonucunda toplam yer değiştirme 309,2 m elde edilmiştir.

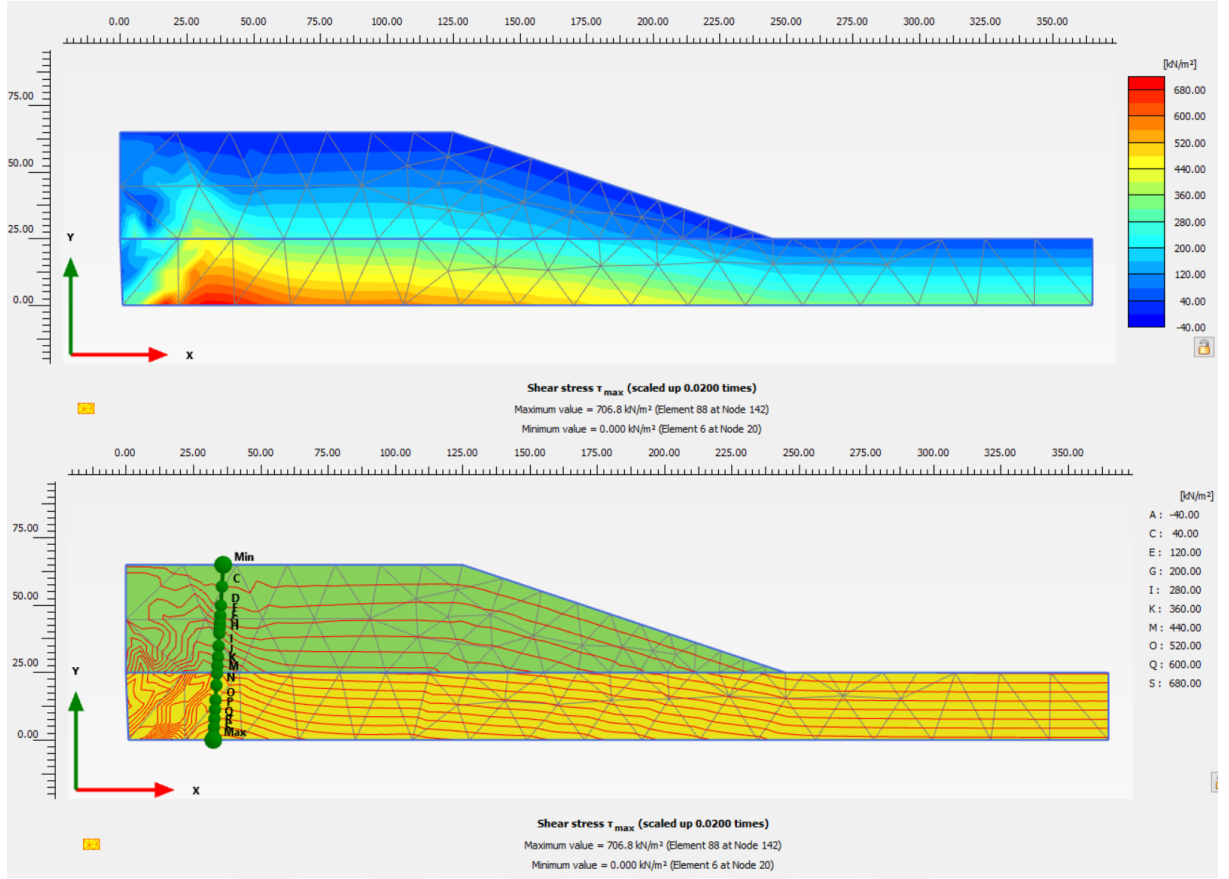


Şekil 6.8. Plaxis' de modellenen Dona Juana depolama sahası



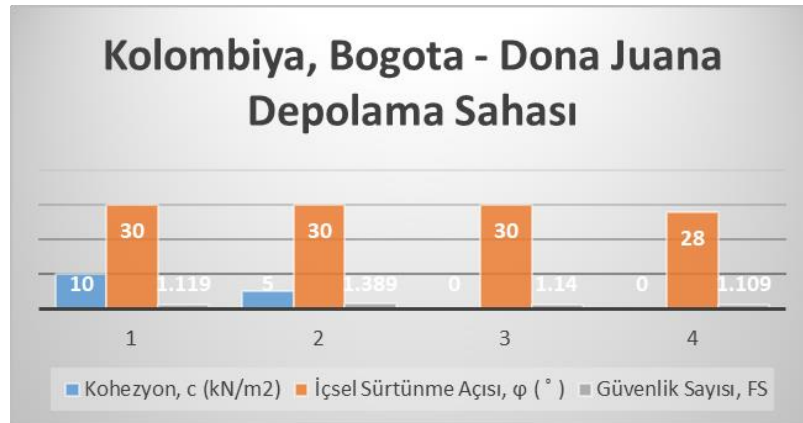
Şekil 6.9. Dona Juana depolama sahasında toplam yer değıştirme ve deforme ağ şekli

Dona Juana depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 142 düğüm noktasında $706,8 \text{ kN/m}^2$ elde edilmiştir (Şekil 6.10).



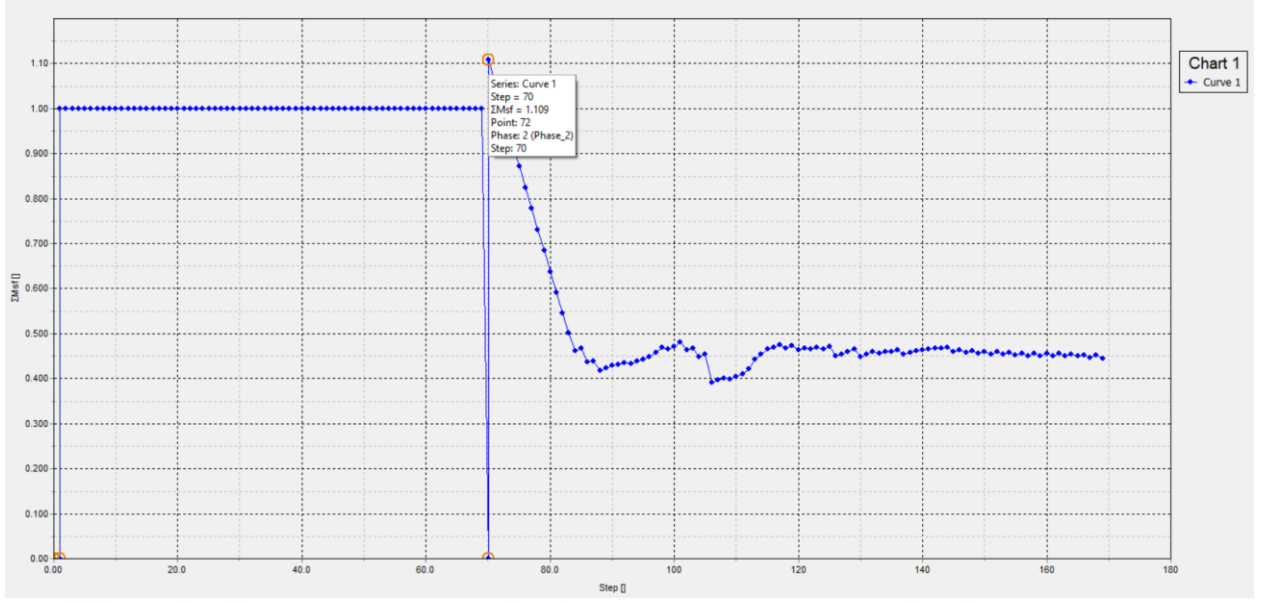
Şekil 6.10. Dona Juana depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

Güvenlik sayısı 1,0 olduğu durumda geriye dönük şev koşulları hakkında bilgi elde edilir. Şekil 6.11’ de depolama sahasına ait güvenlik sayıları grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.11. Dona Juana depolama sahasına ait güvenlik sayıları

Plaxis’ de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,109 elde edilmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Plaxis’ de güvenlik sayısı grafiği

6.3 Polonya – Gnojna Grora Depolama Sahası’ da Analiz

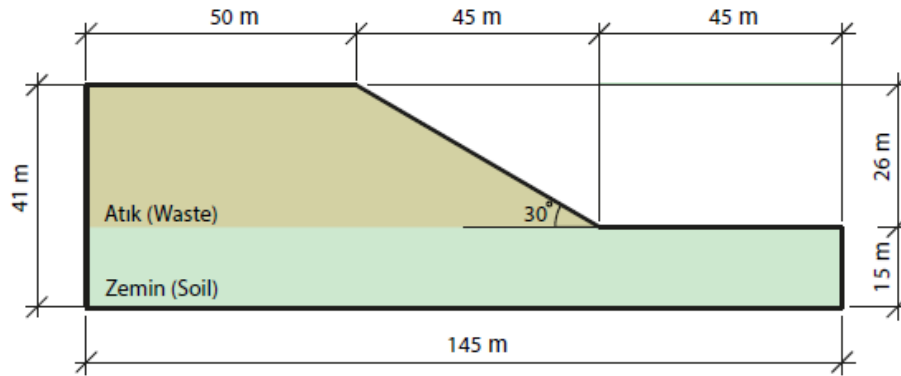
Gnojna Grora depolama sahası, Plaxis (2D CE V20) programı ile analiz yapılmıştır. Çizelge 6.6’ da bu depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Çizelge 6.6. Gnojna Grora depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri					
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	17				
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m ²)	10.000				
Poisson Oranı, ν	0,29				
Kohezyon, c (kN/m ²)	10	5	0	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28	21

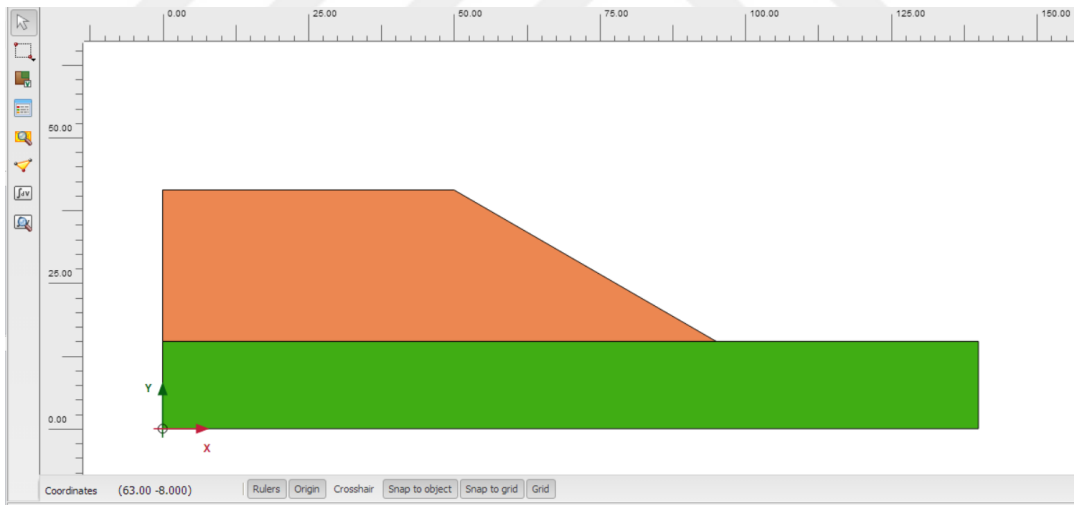
Eski kentin 1965 yılında yeniden yapılanma ve yenileme çalışmaları tamamlandıktan sonra, çöp sahasındaki hareketler nedeniyle yakındaki binalarda çatlaklar gözlenmesiyle saha çalışmaları yapılmıştır. Atık derinliği 5 ila 30 m arasında değiştiği çalışmalarda görülmüştür. Depolama alanınının 300 yaşında olduğu tahmin edilmiştir. Şev yüksekliği 26 m, şev açısı 30° dir. Daha dik yamaçlara sahip olan depolama sahasınının 1. bölgesi için şev stabilite analizleri

yapılmıştır. Şekil 6.13’ de Gnojna Grora depolama sahasına ait şev geometrisinin görünümü verilmiştir.



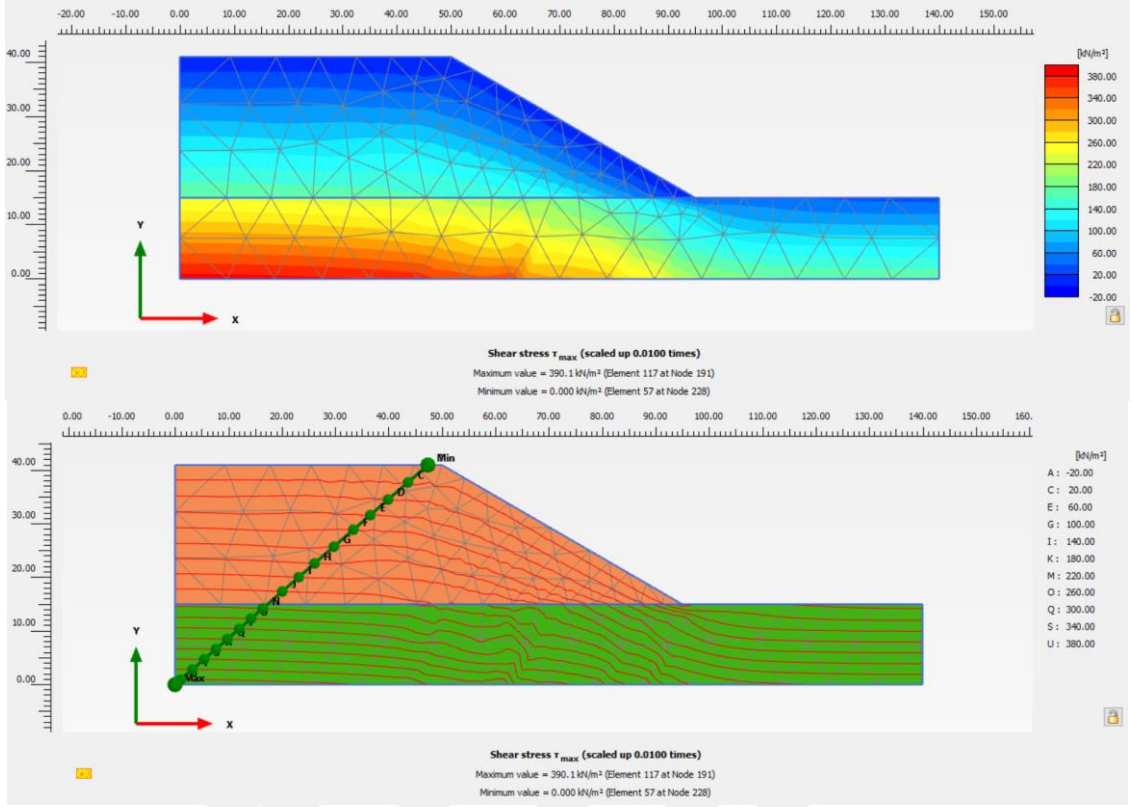
Şekil 6.13. Gnojna Grora depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis programı ile modellediğim Gnojna Grora depolama sahası Şekil 6.14’ de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 175 element, 1499 düğüm elde edilmiştir. Analizi yapılan depolama sahasında deformasyonlar incelenmiştir.

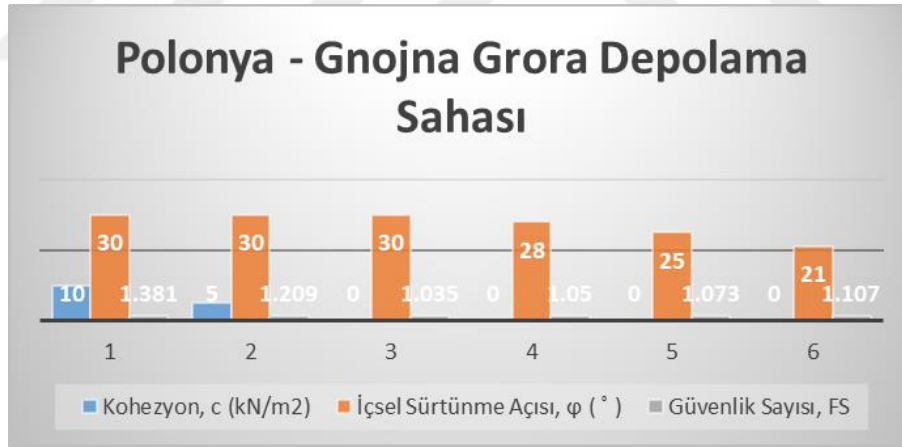


Şekil 6.14. Plaxis’ de modellenen Gnojna Grora depolama sahası

Plaxis’ de analizi yapılan depolama sahasının ağ şeklinde görünümü ve toplam yer değiştirmeleri Şekil 6.15’ de verilmiştir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 21° ($c=0$, $\phi= 21^\circ$) olduğu durumda analiz sonucunda toplam yer değiştirme (66 element, 239. düğüm noktasında) 23,09 m elde edilmiştir.

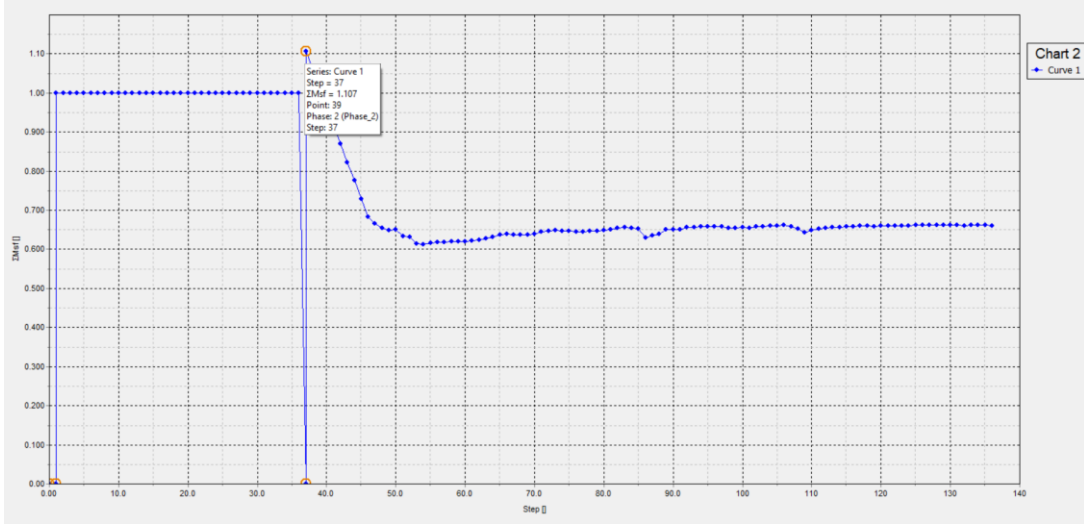


Şekil 6.16. Gnajna Grora depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi



Şekil 6.17. Gnojna Grora depolama sahasına ait güvenlik sayıları

Plaxis' de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 21° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,107 bulunmuştur. Şekil 6.18' de bu değeri veren grafik verilmiştir.



Şekil 6.18. Plaxis’ de güvenlik sayısı grafiği

6.4 İsrail – Hiriya Depolama Sahası’ nda Analiz

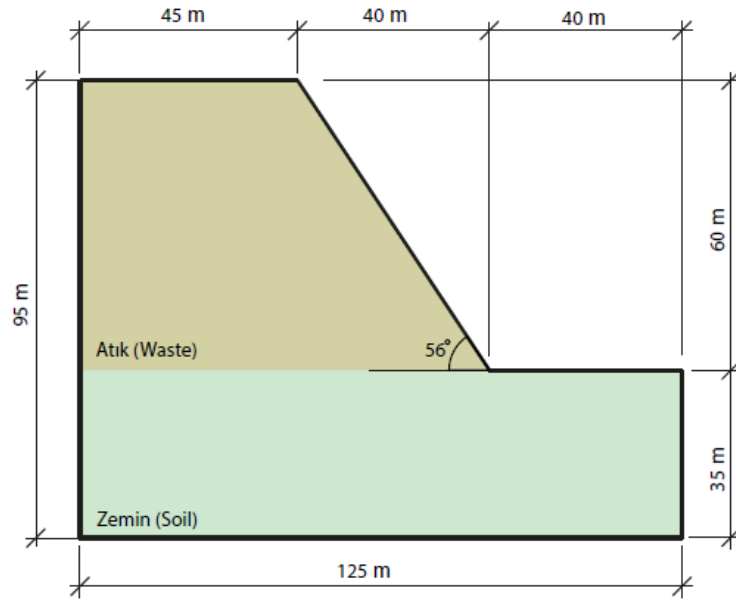
Plaxis (2D CE V20) programı ile Hiriya depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.7’ de Hiriya depolama sahasına ait katı atığın mühendislik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.7. Hiriya depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri				
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	9			
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m ²)	10.000			
Poisson Oranı, ν	0,29			
Kohezyon, c (kN/m ²)	10	5	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28

Depolama sahası 1952-1998 yılları arasında kullanılıyordu ve İsrail’ in en büyük depolama sahasıydı. Depolama sahasında özel olarak tasarlanmış bir alt tabaka, günlük örtü veya sızıntı suyu ve gaz kontrol sistemleri yoktu. Dik yamaçlar, bitki örtüsü, drenaj ve erozyon kontrollerinin olmaması nedeniyle, depolama sahası küçük ve büyük stabilite sorunları yaşamıştır. 1997-98 kışında, şiddetli bir yağmur döneminden sonra çöplüğün kuzey yüzünde büyük bir şev kayması meydana gelmiştir. Hiriya depolama sahasının şevi 45° veya daha fazla eğim açalarına sahip olduğu ve çevredeki zemin seviyesinden 60 m yüksekliğinde olduğu

söylenmiştir. Şev geometrisi oluşturulurken şev yüksekliği 60 m, şev açısı ise 56° olarak alınmıştır. Şev geometrisi Şekil 6.19’ da verilmiştir.



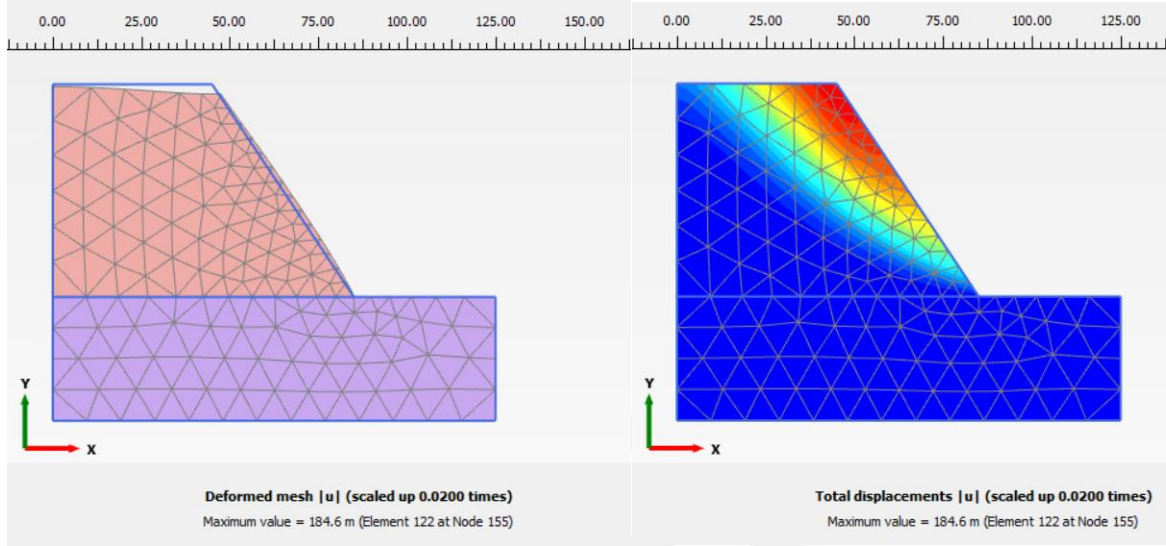
Şekil 6.19. Hiriya depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis sonlu elemanlar programında, modellenen depolama sahası Şekil 6.20’ de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 265 element, 2227 düğüm elde edilmiştir. Analiz aşaması gerçekleştirilmiş ve deformasyonlar incelenmiştir.



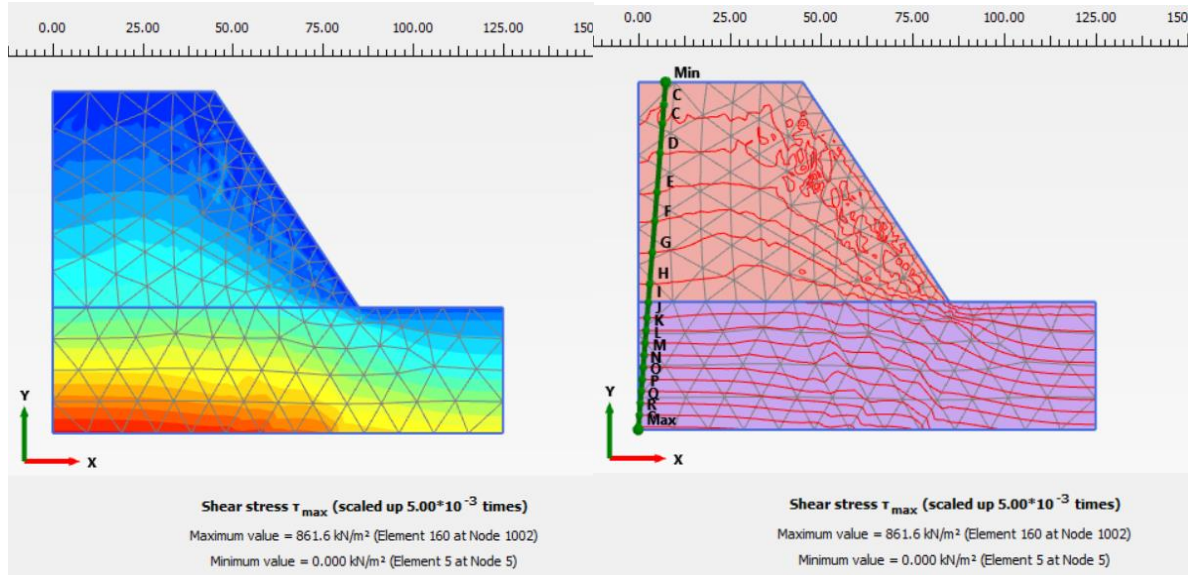
Şekil 6.20. Plaxis’ de modellenen Hiriya depolama sahası

Toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş depolama sahası Şekil 6.21' de görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 28° ($c=0$, $\phi= 28^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 184,6 m elde edilmiştir.



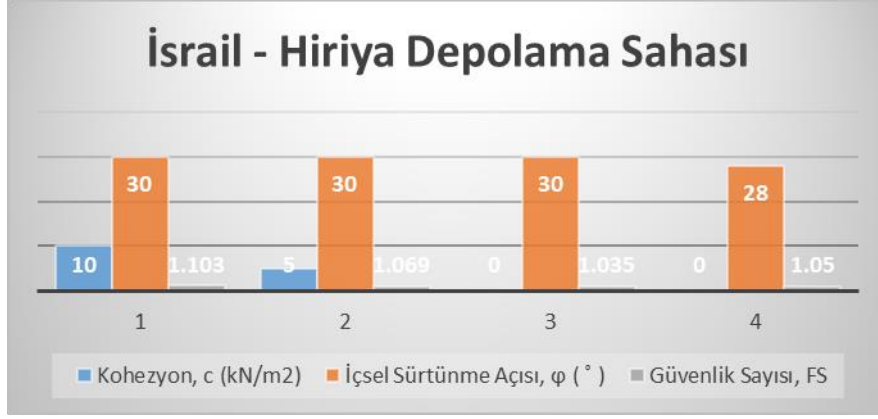
Şekil 6.21. Hiriya depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ Şekli

Hiriya depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 1002 düğüm noktasında $861,6 \text{ kN/m}^2$ bulunmuştur. Şekil 6.22' de maksimum kayma gerilmesi verilmiştir.



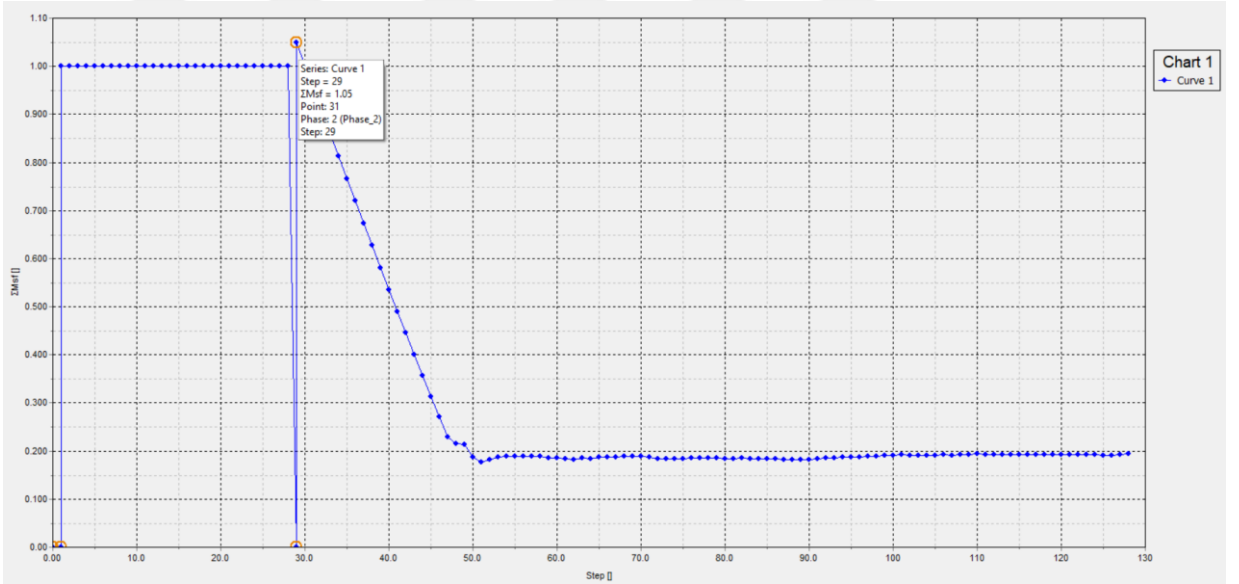
Şekil 6.22. Hiriya depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

Şev göçmesinin yaşandığı anın incelenmesi için güvenlik sayısı 1,0 kabul edilir. Şekil 6.23' de depolama sahasına ait güvenlik sayıları grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.23. Hiriya depolama sahasına ait güvenlik sayıları

Katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda analiz gerçekleştirildiğinde güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir (Şekil 6.24).



Şekil 6.24. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği

6.5 Manila, Filipinler – Payatas Depolama Sahası' nda Analiz

Payatas depolama sahasında 3 ayrı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde farklı programlarda yapılan analizler ve güvenlik sayıları karşılaştırılmıştır. Analizlerde; Plaxis (2D CE V20), Plaxis (3D CE V20) ve Slide (version 6.0) programları kullanılmıştır.

6.5.1 Payatas Depolama Sahası' nın Plaxis (2D) ile Analizi

Payatas depolama sahasına ait katı atığın mühendislik özellikleri Çizelge 6.4' de verilmiştir.

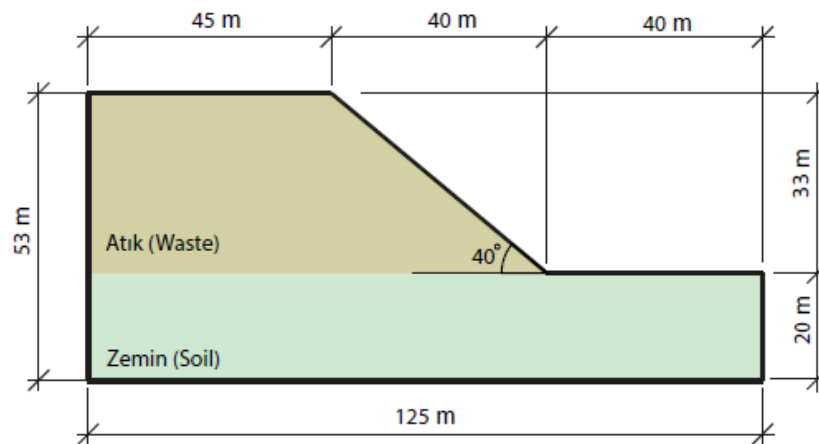
Çizelge 6.8. Payatas depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri				
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	12			
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m ²)	10.000			
Poisson Oranı, ν	0,29			
Kohezyon, c (kN/m ²)	10	5	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28

Depolama alanı, kontrolsüz yani vahşi depolama sahasıdır. 1973' den beri faaliyette olup 1996' dan beri yaklaşık 1500 ton katı atık yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin ardından atık, üst eğim sıkıştırılarak, üst bölümde daha fazla atık için daha çok alan oluşturulmuştur. Bu da depolama sahasının göçmesinin nedenlerinden biridir.

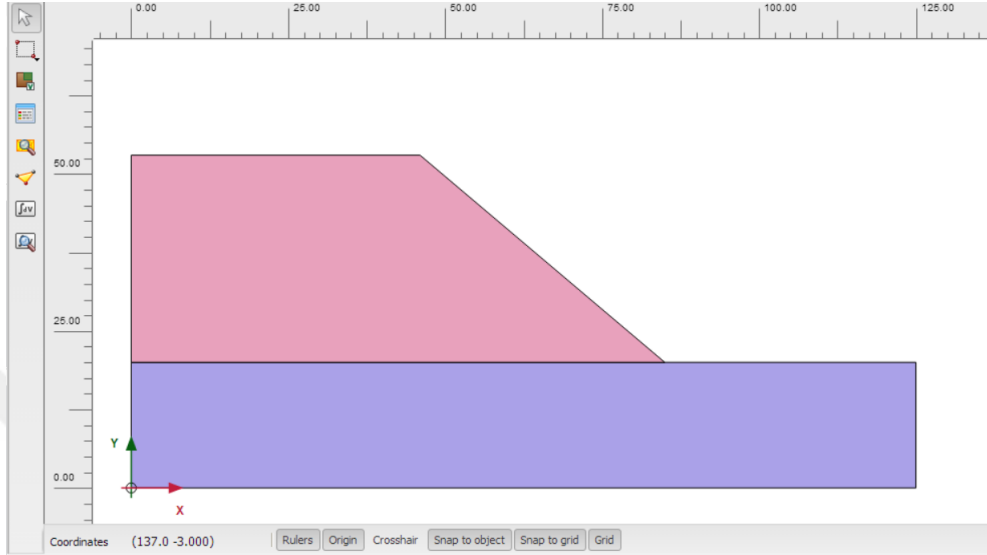
Şev göçmesi 10 Temmuz 2000' de meydana gelmiştir. Yaklaşık 1,2 milyon m³ atık kayarak 250' den fazla ölüme neden olmuştur. Şev yüksekliği 33 m, şev açısı ise 40° dir.

Plaxis 2D programı yardımıyla şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şev geometrisi ise Şekil 6.25' de verilmiştir.



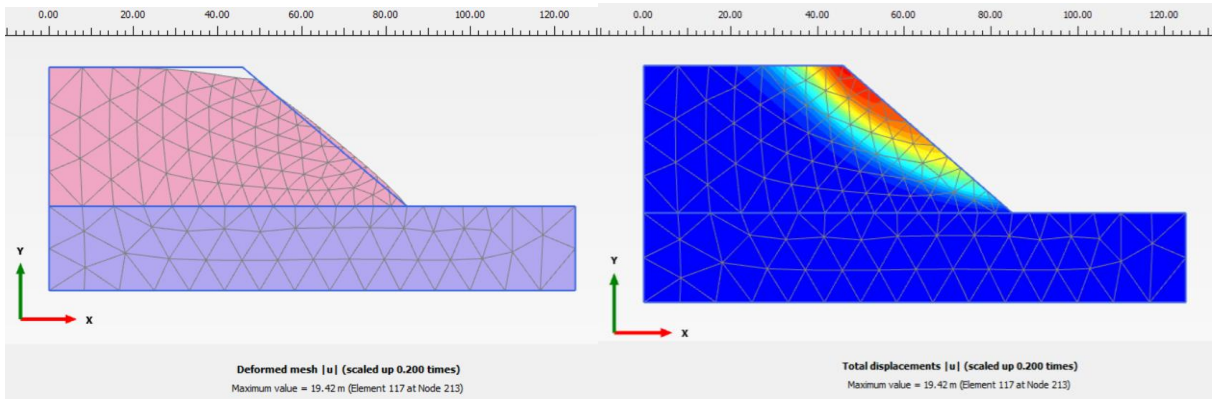
Şekil 6.25. Payatas depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis 2D programı ile modellenen Payatas depolama sahası Şekil 6.26’ da verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 225 element, 1903 düğüm elde edilmiştir. Plaxis 2D’ de analizi gerçekleştirilen Payatas depolama sahasında deformasyonlar incelenmiştir.



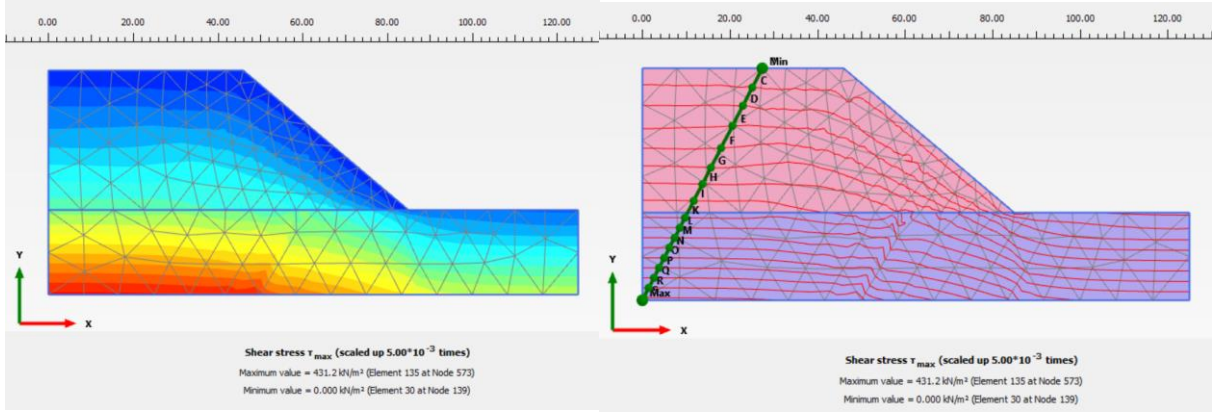
Şekil 6.26. Plaxis 2D’ de modellenen Payatas depolama sahası

Analizi yapılan depolama sahasına ait toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş görünümü Şekil 6.27’ de görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 28° ($c=0$, $\phi=28^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 19.42 m elde edilmiştir.



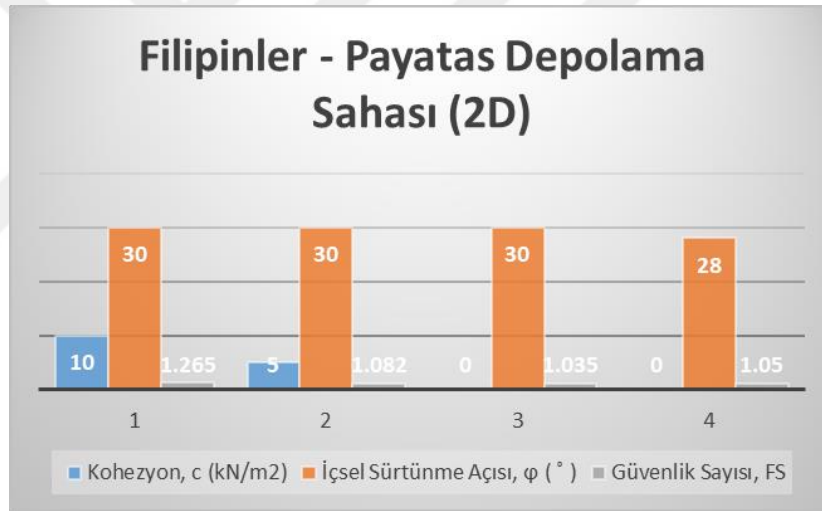
Şekil 6.27. Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli

Toplam yer değiştirmelere bakıldıktan sonra analizlerde kayma gerilmesi incelenmiştir. Payatas depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 573 düğüm noktasında $431,2 \text{ kN/m}^2$ elde edilmiştir (Şekil 6.28).



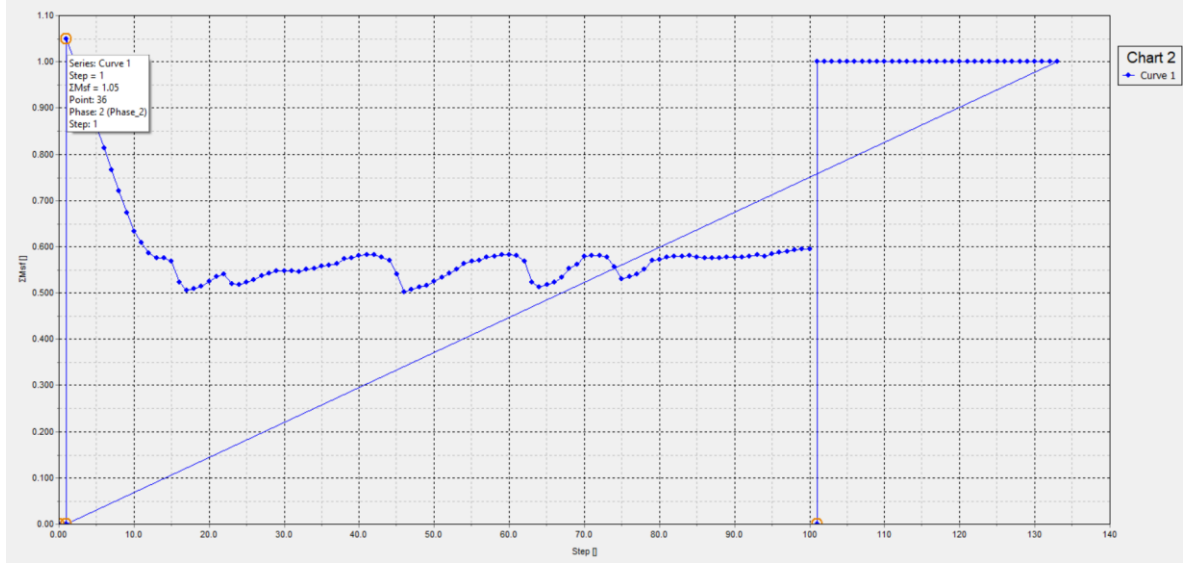
Şekil 6.28. Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

Güvenlik sayısı 1,0 olduğu durumda geriye dönük şev koşulları hakkında bilgi elde edilir. Payatas depolama sahasında yapılan analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 6.29’ da grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.29. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları

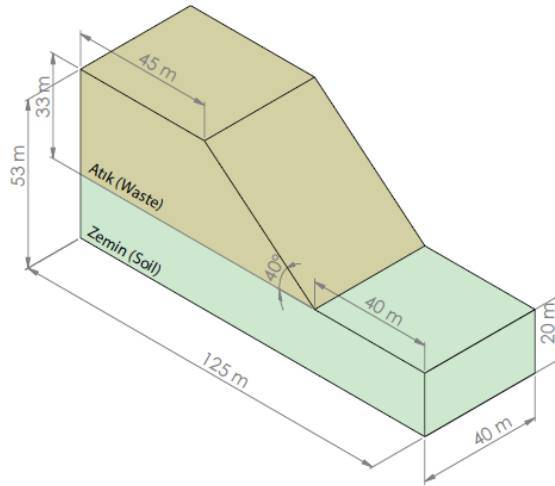
Plaxis 2D’ de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir (Şekil 6.30).



Şekil 6.30. Plaxis 2D' de güvenlik sayısı grafiği

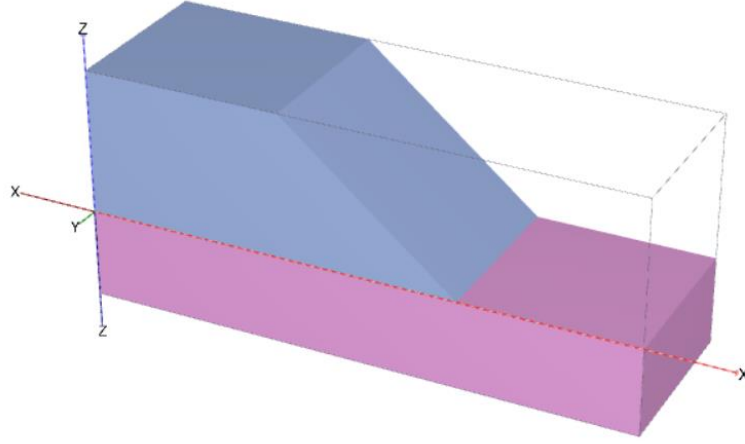
6.5.2 Payatas Depolama Sahası' nın Plaxis (3D) ile Analizi

Plaxis 3D programında şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şev geometrisi ise Şekil 6.31' de verilmiştir.



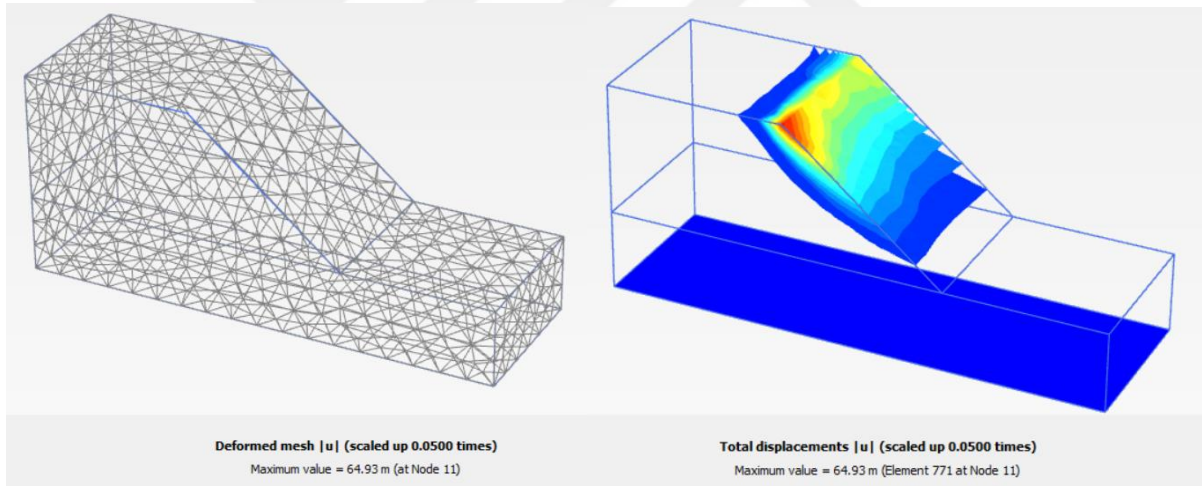
Şekil 6.31. Payatas depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis 3D programıyla modellenen Payatas depolama sahası Şekil 6.32' de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken "Mesh- Orta" seçilmiştir. 2978 element, 5267 düğüm elde edilmiştir.



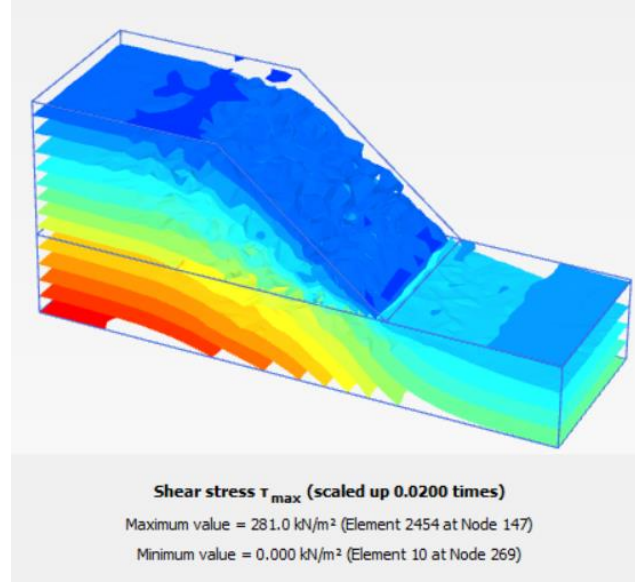
Şekil 6.32. Plaxis 3D' de modellenen Payatas depolama sahası

Toplam yer değiştirmeler ve deforme olmuş görünümü Şekil 6.33' de görülmektedir. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 30° ($c=0$, $\phi= 30^\circ$) olduğu durumda toplam yer değiştirme 64,93 m elde edilmiştir.



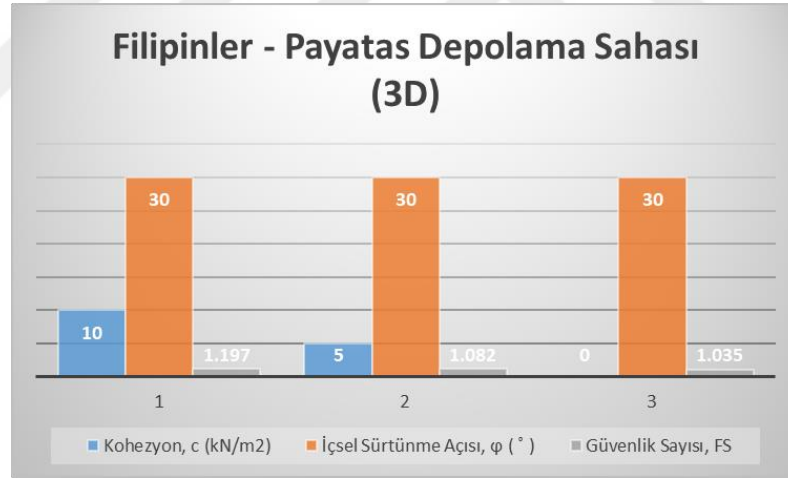
Şekil 6.33. Payatas depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli

Toplam yer değiştirmelere bakıldıktan sonra analizlerde kayma gerilmesi incelenmiştir. Payatas depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 147 düğüm noktasında 281 kN/m^2 elde edilmiştir (Şekil 6.34).



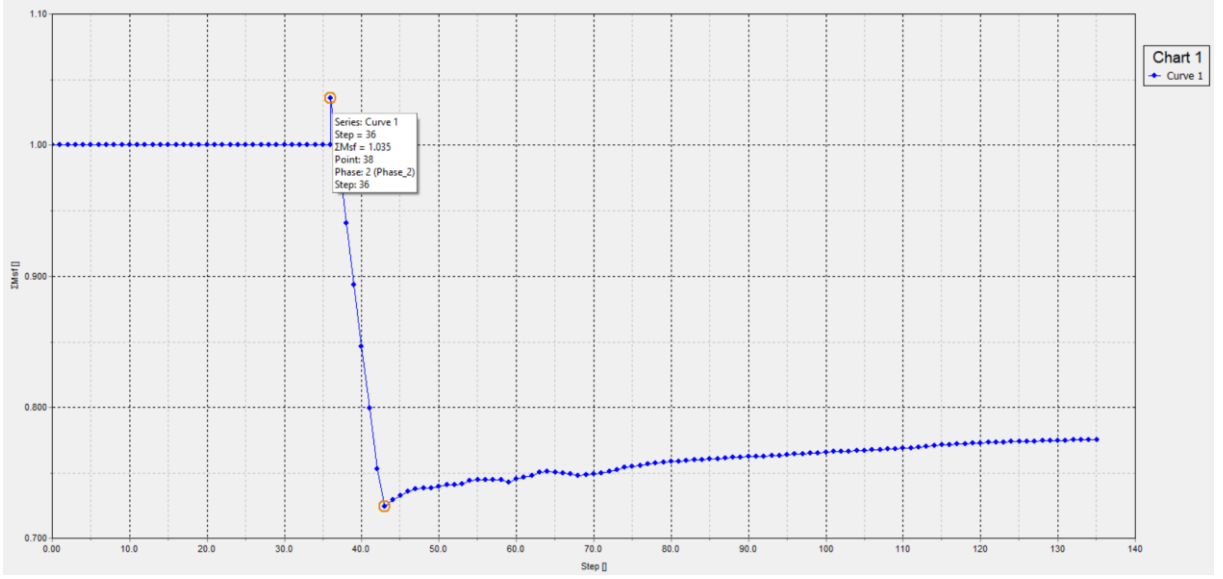
Şekil 6.34. Payatas depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

Payatas depolama sahasında yapılan 3D analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 6.35’ de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.35. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları

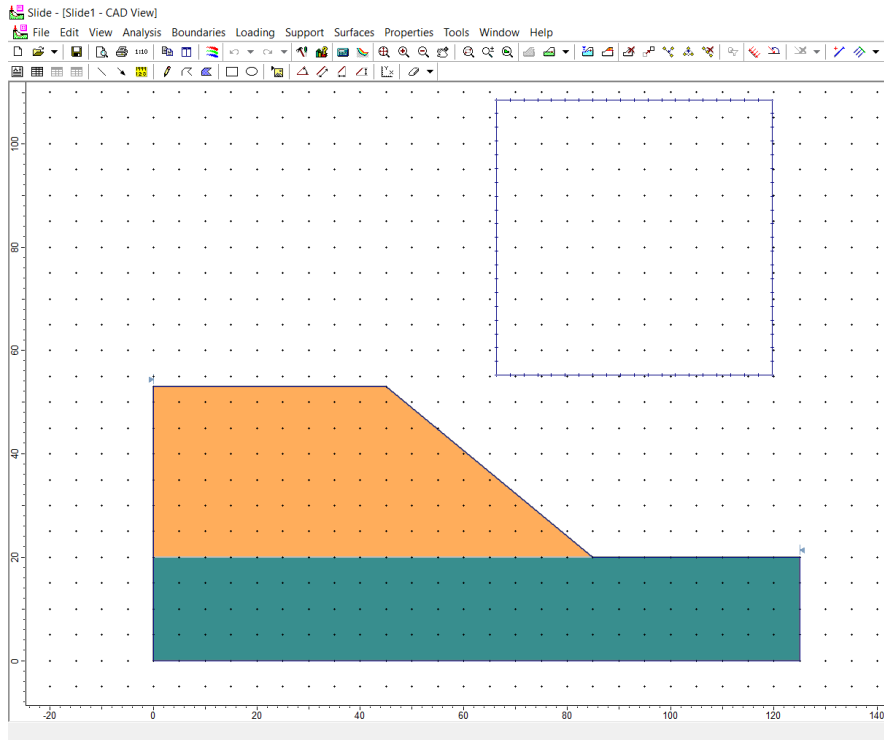
Plaxis 3D’ de modellenen depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir (Şekil 6.36).



Şekil 6.36. Plaxis 3D' de güvenlik sayısı grafiği

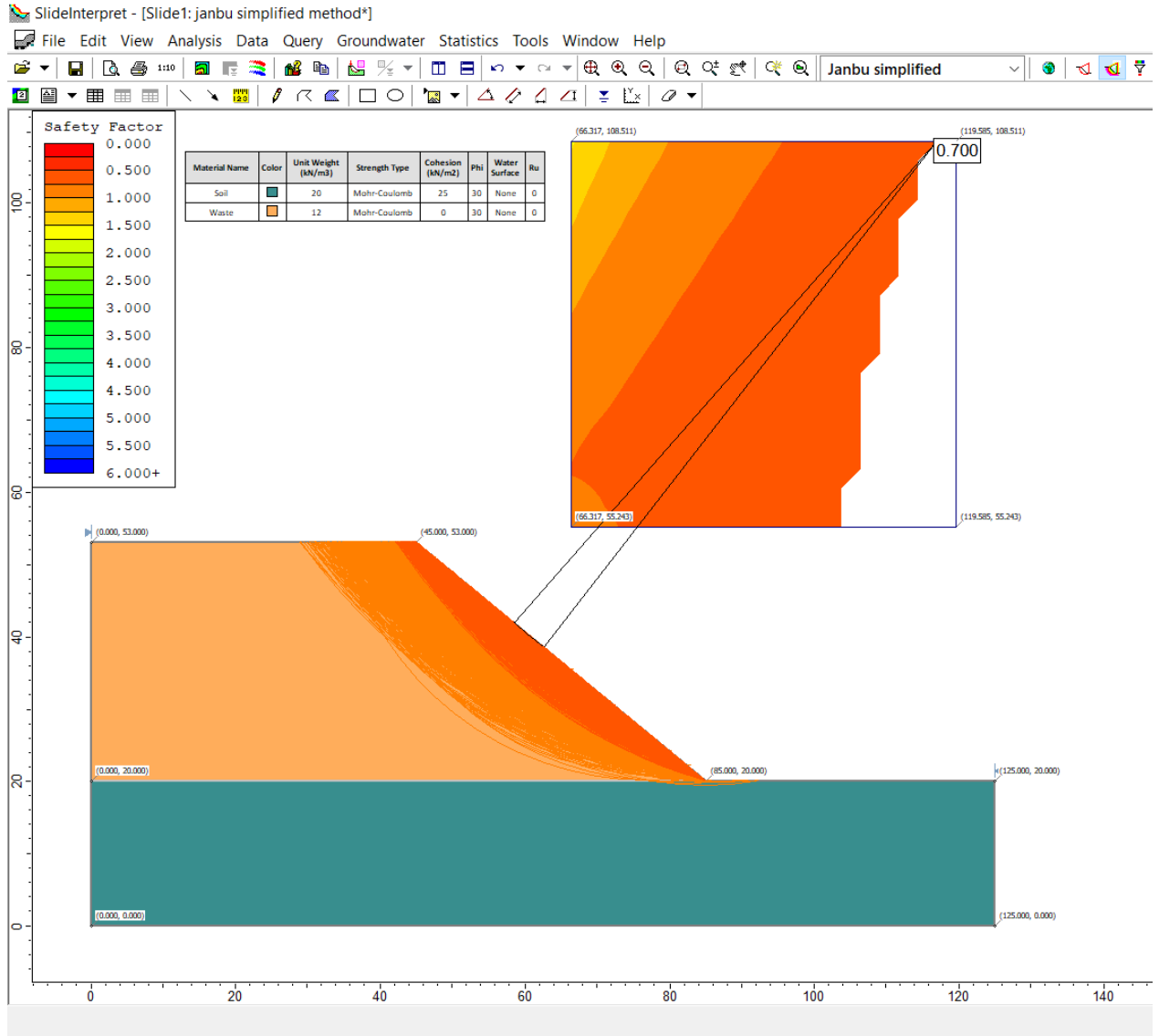
6.5.3 Payatas Depolama Sahası' nın Slide ile Analizi

Slide (version 6.0) programında şev geometrisi modellendikten sonra depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.37' de Slide programında modellenen depolama sahası verilmiştir.



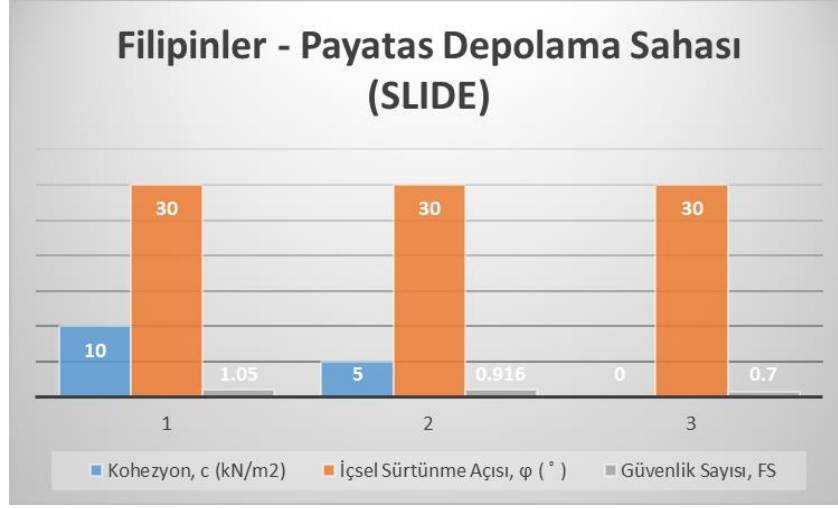
Şekil 6.37. Slide programında modellenen Payatas depolama sahası

Programda analiz gerçekleştirilirken daha detaylı analiz yapabilmek için Basitleştirilmiş/ Düzeltilmiş Janbu yöntemi tercih edilerek güvenlik sayısı elde edilmiştir. Şekil 6.38’ de de Basitleştirilmiş Janbu yöntemiyle yapılmış analiz sonucu güvenlik sayısını gözlemleyebiliriz. Güvenlik sayısı; katı atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısının 30° ($c=0$, $\phi= 30^\circ$) olduğu durumda 0,702 bulunmuştur. Bu da güvenlik sayısının 1’ den küçük olduğu için dengesiz bir durum olduğunu gösterir.



Şekil 6.38. Slide programında yapılan analiz

Payatas depolama sahasında Slide programıyla yapılan analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 6.39’ da grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.39. Payatas depolama sahasına ait güvenlik sayıları

6.6 Yunanistan – Xerolakka Depolama Sahası’ nda Analiz

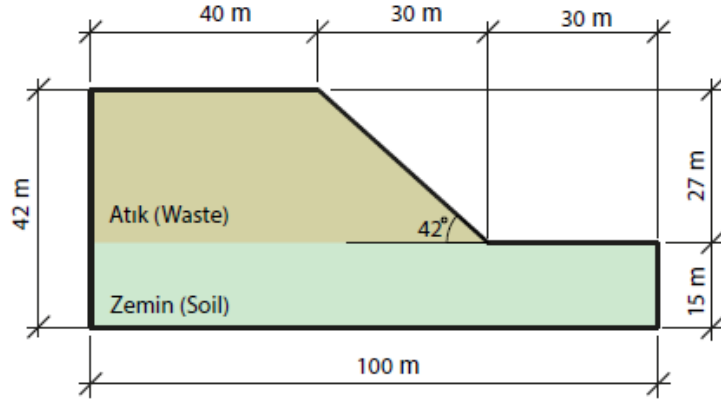
Plaxis (2D CE V20) programı ile Xerolakka depolama sahasında analiz gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.9’ da Xerolakka depolama sahasına ait katı atığın mühendislik özellikleri tablosu verilmiştir.

Çizelge 6.9. Xerolakka depolama sahasındaki katı atığın mühendislik özellikleri

Katı Atığın Mühendislik Özellikleri				
Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m ³)	12			
Young (Elastisite) Modülü, E (kN/m ²)	10.000			
Poisson Oranı, ν	0,29			
Kohezyon, c (kN/m ²)	10	5	0	0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	30	30	30	28

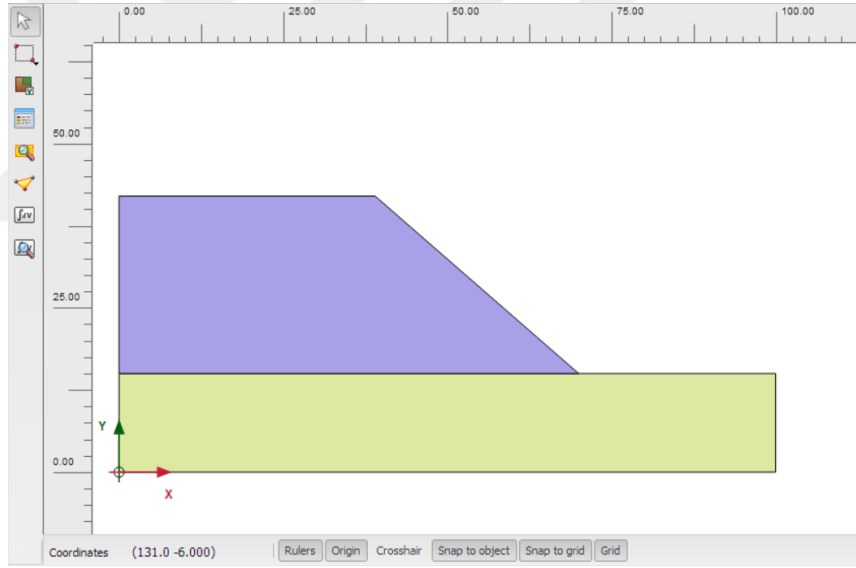
Eylül 1993’ de depolama sahasında atıklar depolanmaya başlanmış, 29 Aralık 2010 Xerolakka depolama sahasında şev göçmesi yaşanmıştır. Katı atığın yaşı yaklaşık olarak 17 yıldır. Xerolakka depolama sahası; düzenli depolama sahası olarak tasarlanmış ancak son dönemde atıklar sıkıştırılmamış ve günlük örtü serimi gerçekleştirilmemiştir.

Depolama sahasının şev yüksekliği 42 m, şev açısı ise 42° idi. Şev geometrisini ise Şekil 6.40’ da verilmiştir.



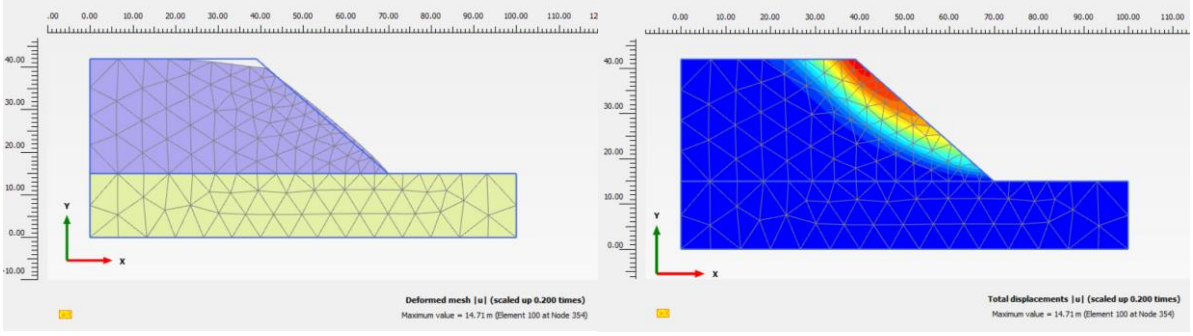
Şekil 6.40. Xerolakka depolama sahasının şev geometrisi

Plaxis programı ile modellenen Xerolakka depolama sahası Şekil 6.41’ de verilmiştir. Modellenen depolama sahasında ağ oluştururken “Mesh- Orta” seçilmiştir. 216 element, 1829 düğüm elde edilmiştir. Analizi yapılan depolama sahasında deformasyonlar incelenmiştir.

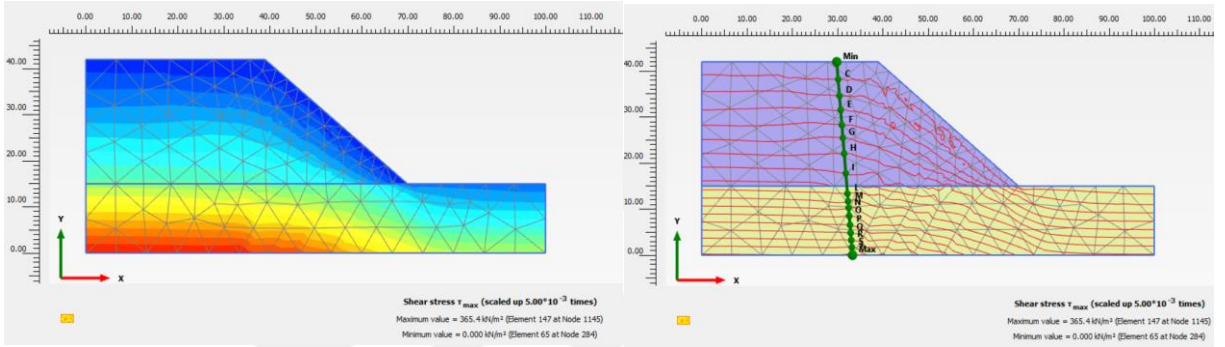


Şekil 6.41. Plaxis’ de modellenen Xerolakka depolama sahası

Analizi yapılmış depolama sahasının da görüntüsü ağ şeklinde ve toplam yer değiştirmeleri Şekil 6.42’ de inceleyebiliriz. Atığın kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı 28° ($c=0$, $\phi=28^\circ$) olduğu durumda analiz sonucunda toplam yer değiştirme 14,71 m elde edilmiştir.



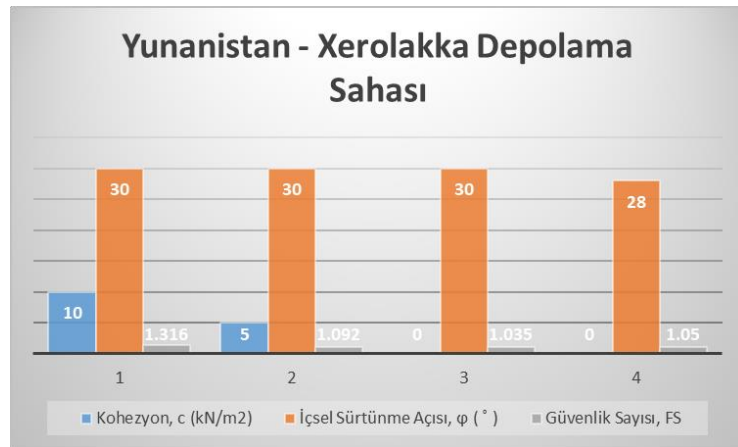
Şekil 6.42. Xerolakka depolama sahasında toplam yer değiştirme ve deforme ağ şekli



Şekil 6.43. Xerolakka depolama sahasında maksimum kayma gerilmesi

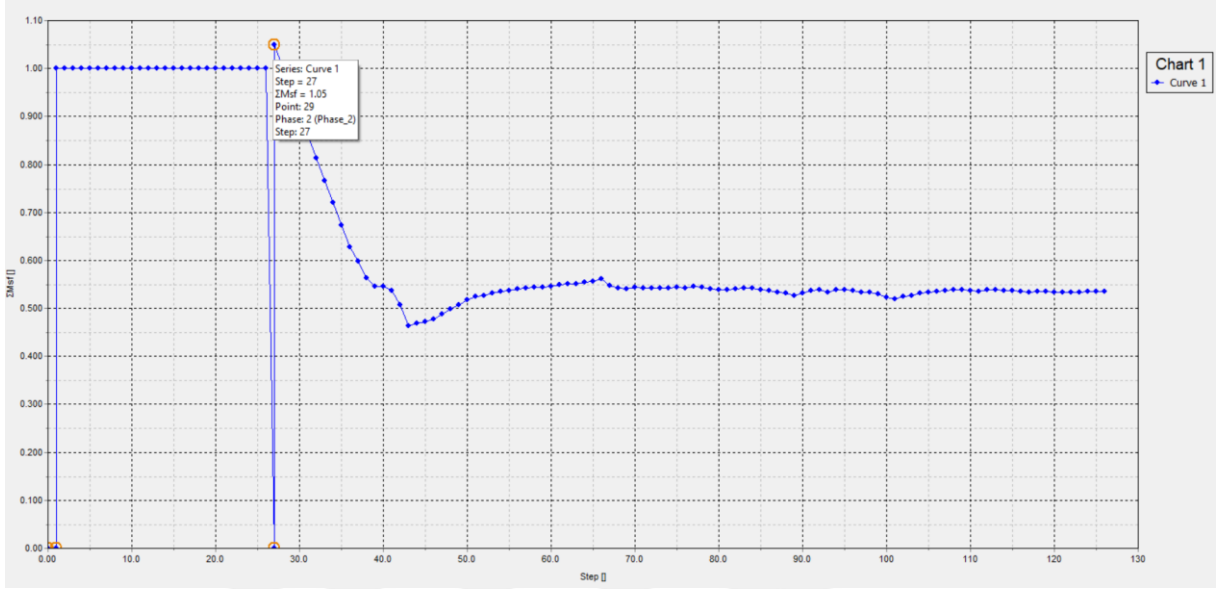
Toplam yer değiştirmelere bakıldıktan sonra analizlerde kayma gerilmesi incelenmiştir. Xerolakka depolama sahasında; maksimum kayma gerilmesi 1145 düğüm noktasında 365,4 kN/m² elde edilmiştir (Şekil 6.43).

Xerolakka depolama sahasında yapılan Plaxis 2D' deki analizlerin güvenlik sayıları ise Şekil 6.44' de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.44. Xerolakka depolama sahasına ait güvenlik sayıları

Plaxis 2D' de modellenen Xerolakka depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir (Şekil 6.45).



Şekil 6.45. Plaxis' de güvenlik sayısı grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Vahşi depolama sahalarında halk sağlığı ve çevre kirliliğiyle ilgili problemler çoğunlukla daha yaygındır. Bu açık çöplükler birçok dezavantaja ve ciddi sağlık problemlerine de sebep olmaktadır. Vahşi depolama ile kötü kokular oluşmakta, özellikle yeraltı suları kirlenmekte, sinek ve kuşların bu atıklarla teması ile bulaşıcı hastalıkların taşınması ve oluşan metan gazının kontrollü bir şekilde toplanmamasından ileri gelen patlama riskleri en büyük sorunları oluşturmaktadır. Bu yüzden ki depolama sahalarının tasarımı halk sağlığı açısından çok önemlidir.

Katı atık depolama tesisinin kurulmasında yer seçimi çok önemlidir. İlgili yönetmelik ve kılavuzlara uyulması şartları ile tesis kurulmalıdır. Şev göçmelerindeki birincil faktörler, mühendislik kontrolünün eksikliği, depolama sahaları için tasarım eksikliği ve tasarım ve çalışma ilkelerinin anlaşılmasızdır. Mühendislik kontrolleri eksiksiz ve depolama sahası standartlara uygun tasarım yapılmalıdır.

Depolama sahalarında ayrıca, yeraltı suyunun yüksekliğinin ve şev açısının stabilitesi üzerindeki etkilerinin dikkate alınmadığı gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olmuştur. Atık depolama sahası içinde oluşabilecek sızıntı suyunun toplanması ve uzaklaştırılması gereklidir.

Depolama sahası içinden çıkan gaz, patlayıcı bileşime ulaşmak için hava ile karışır ve daha sonra, ya mevcut bir yangın kaynağı nedeniyle veya hareketli atık bileşenler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısının etkisiyle tutuşur. Patlama, atıkların hareketini hızlandırarak şev göçmesine neden olur.

Hekimbaşı depolama sahasının göçme nedeni öncelikle kontrolsüz bir depolama sahası olmasıdır. Uygun olmayan şev koşulları, üst üste fazla yük nedeniyle depolama sahası daha fazla stabil kalamamıştır ve şev göçmesi gerçekleşmiştir.

Dona Juana depolama sahasındaki şev göçmesinin nedenlerinden biri; atıkların yüksek organik içerikten kaynaklanan, katı atık kütlesindeki yüksek boşluk suyu basıncına sahip olmasıdır. Bu durum, yetersiz tasarlanmış sızıntı suyu drenajı ve gaz tahliye sistemleri tarafından daha da kötüleşmiştir.

Gnojna Grola depolama sahasında ise göçme oluşmamıştır. Ancak; 1965 yılında yeniden yapılanma ve yenileme çalışmaları tamamlandıktan sonra, çöp sahasındaki hareketler nedeniyle yakındaki binalarda çatlaklar gözlemlendiği için depolama sahasında arazi çalışmaları yapılmıştır. Bir depolama sahasında, sadece faal haldeyken değil işlevini tamamladıktan sonra da kontrollerin yapılması gereklidir. Depolama sahasının üzeri toprak yapısına göre bitki örtüsü ile yeşillendirilmelidir.

Hiriya depolama sahasında özel olarak tasarlanmış bir alt tabaka, günlük örtü veya sızıntı suyu ve gaz kontrol sistemlerinin olmaması durumu şev göçmesine sebep olan faktörlerdendir. Ayrıca; 1997-98 kışında, şiddetli bir yağmur döneminden sonra çöplüğün kuzey yüzünde büyük bir şev kayması meydana gelmiştir. Şiddetli yağmurlarla birlikte şev göçmesi tetiklenmiştir. Yüksek su muhtevası ve boşluk suyu basıncı da göçmeye neden olmuştur. Şev yüksekliğinin ve açısının fazla olması da yanlış tasarlanmış depolama sahasını gözler önüne sermiştir.

Payatas depolama sahasındaki atıkların yerleştirilmesinin ardından, atıklar üst eğime sıkıştırılarak üst kısımda daha fazla atık için daha fazla alan oluşturulmuştur. Bu da depolama sahasının şev koşullarını etkilemiştir. Ayrıca; atığın çok az sıkıştırılması ya da hiç sıkıştırma yapılmaması, düşük yoğunluklu bir atığın oluşmasına yol açmıştır. Bu da atığın birim hacim ağırlığı için etkilidir. Göçmenin oluşmasından önce atığın doygunluğunun artmasına neden olan şiddetli yağmurlar meydana gelmiştir. Şevin üzerinde oluşan su birikintisi, suyu boşaltmak için drenaj hendeğinin inşası ve depolama sahasındaki gaz birikimi şev göçmesini tetikleyen nedenlerden birkaçıdır.

Xerolakka depolama sahası; düzenli depolama sahası olarak tasarlanmış ancak son dönemde atıklar sıkıştırılmamış ve günlük örtü serimi gerçekleştirilmemiştir. Şev göçmesini; uygunsuz atık bertaraf uygulamaları, yetersiz sıkıştırma, sızıntı suyu ve gaz basıncı üretimi ve düzenli depolama sahasının şevlerinin yanlış depolama ile daha çok dikleşmiş olması tetiklemiştir.

Bahsi geçen 6 depolama sahasında Plaxis 2D programıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Göçme anındaki gerçeğe en yakın şev koşulları elde edilmiştir. Hekimbaşı depolama sahasında katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir. Plaxis' de modellenen Dona Juana depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,109

bulunmuştur. Gnojna Grora depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 21° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,107 bulunmuştur. Hiriya depolama sahasında katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda analiz gerçekleştirildiğinde güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir. Plaxis 2D' de modellenen Payatas depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir. Xerolakka depolama sahasındaki katı atığın kohezyon değerinin 0, içsel sürtünme açısının 28° olduğu durumda güvenlik sayısı 1,05 elde edilmiştir.

Filipinler, Payatas depolama sahasında analiz yapılırken; Plaxis (2D CE V20), Plaxis (3D CE V20) ve Slide (version 6.0) programları kullanılmıştır ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Plaxis 2D' de modellenen Payatas depolama sahasında güvenlik sayısı 1,05 ve Plaxis 3D' de ise güvenlik sayısı 1,035 elde edilmiştir. Plaxis 2D ve 3D programlarında analiz gerçekleştirildiğinde güvenlik sayıları birbirine yakın elde edilmiştir. Slide programında ise kohezyonun 0 kN/m², içsel sürtünme açısının 30° olduğu durumda güvenlik sayısı 0,700 bulunmuştur. Plaxis ve Slide programlarında kullanılan metotların farklı olması nedeniyle Slide programında daha küçük güvenlik sayısı elde edilmiştir.

Uygunsuz depolama sahası tasarımı, depolama sahalarında günlük örtü seriminin yapılmaması ve atığın sıkıştırılmaması, atıkların ayrıştırılmaması, sızıntı suyu drenajının ve gaz tahliyesinin yetersiz oluşu, şev açısının ve yüksekliğinin fazla oluşu sahadaki duraylılığın bozulması şev göçmesinin nedenleridir.

Bazı durumlarda, yeraltı suyu koşulları aşırı hava koşulları nedeniyle daha da kötüleşerek şev göçmelerine neden olduğuna varılmıştır. Hiriya ve Payatas depolama sahalarında da bu durum gözlemlenmiştir. Ayrıca; göçmeden sonra son dolgu yerleşimi, yağış vb. geçmişinin kayıtları da dahil olmak üzere kapsamlı bir saha keşif araştırması yapmak çok önemlidir. Böylece daha doğru veriler elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler sayesinde katı atık düzenli depolama sahası tasarımında; iş gücü, zaman ve maliyetler açısından kazanımlar sağlanacaktır. Bu çeşit analizler depolama sahalarında şev duraysızlıklarının önlenmesi bakımından önemlidir. Depolama sahalarındaki şev göçmelerinin nedeni olan mühendislik kontrollerinin olmaması ve tasarım eksikliğini ortadan kaldırmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Kamer, “Katı atıkların en uygun toplama tekniklerinin araştırılması ve toplanan katı maddelerden en uygun geri kazanımın belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [2] H. F. Pulat, “Kentsel katı atıkların geoteknik karakterizasyonu ve duraylılığının incelenmesi,” Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 2014.
- [3] U. Polat, “Solid waste management case studies in İstanbul – Kemerburgaz and Bursa – Geçit,” Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [4] N. H. Sarihan, T. D. Stark, “Back- analyses of landfill slope failures,” 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA, August 11-16, 2008.
- [5] B. Caicedo, E. Giraldo, L. Yamin ve N. Soler, “The landslide of Dona Juana Landfill in Bogota. A case study,” 4. ICEG, Rio de Janeiro, Brezilya, Ocak 2002.
- [6] G. Fernandez, D. Hendron ve A. Castro, “Pore pressure induced slide in municipal solid waste Doña Juana Landfill- Bogota, Colombia,” Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005-2006.
- [7] G. Kocasoy ve K. Curi, “The Umraniye-Hekimbasi open dump accident,” Waste Management & Research, c. 13, ss. 305-314, 1995.
- [8] G. Blight, “Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review,” Waste Management & Research, c. 26, ss. 448-463, 2008.
- [9] F. Lavigne et al., “The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia,” Geoenvironmental Disasters, ss. 1-10, 2014.
- [10] G. Athanasopoulos, V. Vlachakis, D. Zekkos ve G. Spiliotopoulos, “The December 29th 2010 Xerolakka Municipal Solid Waste landfill failure,” Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- [11] Q. Xu, D. Peng, W. Li, X. Dong, W. Hu, M. Tang ve F. Liu, “The catastrophic landfill flowslide at Hongao dumpsite on 20 December 2015 in Shenzhen, China,” Natural Hazards and Earth System Sciences, c. 17, ss. 277-290, 2017.
- [12] İ. Kır, “Katı Atık Sahalarında görülen stabilite sorunları,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.
- [13] S. Kesen, “Katı atık düzenli depolama sahalarında oluşan çöp sızıntı suları ve arıtılması üzerine incelemeler,” Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, Eylül 2008.
- [14] K. Aykol, “Evsel katı atıkların geoteknik özelliklerinin modellenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Ocak 2008.
- [15] U. Gürdal, “Düzenli depolama sahalarının işletilmesi atık karakterizasyonu ve LFG gazından enerji üretimi,” Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Aksaray

Üniversitesi, Aksaray, Türkiye, Mayıs 2019.

- [16] S. Kezer, “Katı atık sahalarında şev stabilitesi,” Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Haziran 2019.
- [17] M. C. Ertürk ve E. Görgün, “Türkiye’deki Düzensiz Çöp Döküm Sahalarının İslahında Güncel Bir Örnek: Mersin Çavuşlu Çöp Depolama Sahasının Rehabilitasyonu,” Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, c.3, ss. 200-208, 2011.
- [18] M. Şimşek, “Modifiye edilmiş uçucu külden elde edilen sıkıştırılmış şiltelerin katı atık depolama alanlarında kullanılabilirliğinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2017.
- [19] S. Doğan, “Katı atık düzenli depolama sahalarının yamaç şevlerinin duraylılığı ve sahaların geçirimsizliği,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Temmuz 2018.
- [20] Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği 14.03.1991 Tarih ve 208814 Sayılı Resmi Gazetesi.
- [21] M. H. Akyıldız, “Katı atık düzenli depolama alanlarında taban geçirimsizliğine etki eden parametrelerin araştırılması,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Ağustos 2011.
- [22] X. Qian, R. M. Koerner ve D. H. Gray, Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2002.
- [23] H. F. Pulat ve Y. Yükselen Aksoy, “Türkiye Kentsel Katı Atık Kompozisyonunun Kayma Mukavemeti Özellikleri ve Şev Duraylılığının İncelenmesi,” İMO Teknik Dergi, Yazı 468, 7703-7724, 2017.
- [24] A. Tekin, “Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, Ağustos 2011.
- [25] Ö. Akçakal, “Şev stabilite analizinde geri hesap yöntemi ve bir vaka analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ekim 2009.
- [26] A. Polat, “Şev stabilitesinde sonlu elemanlar yöntemi uygulaması ve karşılaştırmalı analiz,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 2019.
- [27] B. Ün ve A. Yıldız, “Şev Stabilitesi Probleminin Geri Analizle Çözümü: Örnek Bir Vaka,” Academic Platform Journal of Engineering and Science, c. 9-1, ss. 174-181, 2021.
- [28] E. Arıoğlu ve N. Tokgöz, “Bilgi Föyü: Şev Stabilitesine Toplu Bakış,” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyaları/430c0073-8602-44d0-94b0-58aeb4a5e717-c58b51df-f08a-4123-bd45-8a1c3be816da.pdf> [Erişim tarihi 22 Mart 2022].
- [29] Ö. Akçakal, T. Durgunoğlu, A. Şenol ve S. Öztoprak, “Şev Stabilitesi Analizinde Geri Hesap Yöntemi Kullanılarak Bir Vaka Analizi: Göktürk Kayması,” İstanbul Kültür Üniversitesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi, 30 Eylül - 1 Ekim 2010, İstanbul.

- [30] S. M. Merry, E. Kavazanjian ve W. U. Fritz, "Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas Landfill Failure," Journal Of Performance Of Constructed Facilities, c. 19-2, ss. 100-107, Mayıs 2005.
- [31] O. Natur, "Şev stabilitesi analiz yöntemleri ve bir vaka analizi," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Mayıs 2018.
- [32] M. Ö. Keskin, "Çukurova yöresi kuvarsit işletmelerinde bilgisayar destekli şev dizaynı ve şev stabilite analizleri," Doktora Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2008.
- [33] D. V. Griffiths ve P. A. Lane, "Slope stability analysis by finite elements," Geotechnique 49, c. 3, ss. 387-403.
- [34] H. Coşkun, "Dolgu barajlarda gövde stabilitesi ve Çukurca barajı örneği," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi, Karabük, Haziran 2021.
- [35] G. Akıncı, T. Onargan, M. A. Danışman, K. Küçük, D. Güven, G. Gök ve M. Bilgin, "Uşak belediyesi katı atık yönetimi," Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Nisan 2010.

EK-1. PAYATAS DEPOLAMA SAHASINDA SLIDE PROGRAMI İLE YAPILAN ANALİZ DETAYLARI

