

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL KATI ATIK DEPO SAHASI ATIK DOLGUSU ŞEV
STABİLİTESİNİN SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Yağmur BORA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK

Mart, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTSEL KATI ATIK DEPO SAHASI ATIK DOLGUSU ŞEV
STABİLİTESİNİN SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Yağmur BORA tarafından hazırlanan tez çalışması 07.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon
SELÇUK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Suat AKBULUT, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Recep İYİSAN, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN ve eş-danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kentsel Katı Atık Depo Sahası Atık Dolgusu Şev Stabilitesinin Sayısal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yağmur BORA

İmza



Biricik aileme;

TEŞEKKÜR

Başta bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki destek ve katkılarından dolayı danışman hocalarım Doç.Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN ve Dr.Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK'a, sonrasında önemli yorum ve değerlendirmeleri ile tezime katkıda bulunan jüri üyelerim Prof.Dr. Recep İYİSAN ve Prof. Dr. Suat AKBULUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans hayatım boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof.Dr. Mustafa YILDIRIM ve Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN'e ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak manevi desteğini her an yanımda hissettiğim canım aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Yağmur BORA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.1.1 Kentsel Katı Atık Fiziksel Özellikleri	4
1.1.2 Kentsel Katı Atık Mekanik Özellikleri	8
1.1.3 Kentsel Katı Atık Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri	12
1.1.4 Kentsel Katı Atık Düzenli Depolama Yöntemi.....	16
1.1.5 Kentsel Katı Atık Düzenli Depo Sahaları Stabilite Problemleri	23
1.1.6 Şev Stabilite Analiz Yöntemleri.....	26
1.2 Tezin Amacı	32
1.3 Hipotez	33
2 KULLANILAN SAHA KESİTİ VE ANALİZ YÖNTEM ÖZELLİKLERİ	34
2.1 Analizlerde Kullanılan Kesit ve Özellikleri	34
2.2 Sayısal Analizlerde Kullanılan Atık Parametre Seçimi.....	37
2.3 Sayısal Analizlerde Kullanılan Sonlu Eleman Yazılımı.....	38
2.3.1 Sonlu Elemanlar Analizlerinin Gerçekleştirildiği Plaxis 2D Yazılım Programı	39
2.3.2 Limit Denge Analizlerinin Gerçekleştirildiği Plaxis 2D LE Yazılım Programı	40
3 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YAPILAN ANALİZLER	43
3.1 Materyal Method Seçimi	43
3.2 Sonlu Eleman Ağı ve Sınır Koşulları	43
3.3 Analiz Yöntemi.....	44
3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Konsolidasyonlu Şev Stabilite Analizleri.....	46
3.4.1 Drenajlı Koşullar Altında Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.....	46
3.4.2 Drenajsız Koşullar Altında Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.....	61
3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Kısa Süreli Şev Stabilite Analizleri ...	76

4 LİMİT DENGİ YÖNTEMİ İLE YAPILAN ANALİZLER	83
4.1 Materyal Model Seçimi	83
4.2 Analiz Yöntemi.....	83
4.3 Limit Denge Yöntemi ile Yapılan Kısa Süreli Şev Stabilite Analizleri	84
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	100
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerçekleştirilen Konsolidasyonlu Analiz Sonuçları	100
5.1.1 Drenajlı Analizler.....	100
5.1.2 Drenajsız Analizler	102
5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerçekleştirilen Kısa Süreli Şev Stabilite Analiz Sonuçları	102
5.3 Limit Denge Yöntemi ile Gerçekleştirilen Kısa Süreli Şev Stabilite Analiz Sonuçları	103
5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Limit Denge Yöntemi Kullanılarak Bulunan Sonuçların Karşılaştırması	103
KAYNAKÇA	105
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	111

SİMGE LİSTESİ

τ	Atık kayma mukavemeti
S_b	Başlangıç sıkışma miktarı
u	Boşluk basıncı
b	Dilim kalınlığı
w	Dilim statik ağırlığı
E_1, E_2	Dilimin her iki yanına etkiyen dik kuvvetler
X_1, X_2	Dilimin her iki yanına etkiyen kesme kuvveti
T	Dilim tabanına etkiyen kesme kuvveti
h	Dilim üst-alt orta noktaları arasındaki düşey mesafe
l	Dilim yay uzunluğu
γ_s	Doygun birim hacim ağırlık
u_y	Düşey sınır
f_o	Düzeltilme faktörü
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı
c'	Efektif kohezyon
N'	Efektif normal kuvvet
E	Elastisite modülü
Ψ	Genleşme açısı
GS	Güvenlik sayısı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
c	Kohezyon
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık
S_{ma}	Mekanik sünme sonucu sıkışma
σ_n'	Normal efektif stres
k	Permeabilite katsayısı
v	Poisson oranı
W	Sızıntı su seviyesi
H	Şev yüksekliği
N	Toplam normal kuvvet
S_t	Toplam oturma miktarı

KISALTIMA LİSTESİ

CPT	Cone Penetration Test
CH ₄	Methane
CO ₂	Carbon Dioxide
EPA	United States Environmental Protection Agency
FEM	Finite Element Method
GLE	General Limit Equilibrium
LE	Limit Equilibrium Method
HC	Hardening Soil Method
HDPE	High Density Polyethylene
İSTAÇ	İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
KKA	Kentsel Katı Atık
MC	Mohr-Coulomb Method
MSW	Municipal Solid Waste
SPT	Standart Penetration Test
SPREP	Pacific Regional Environment Programme
SS	Soft Soil Method
SSC	Soft Soil Creep Method
2D	Two Dimensional

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Dünya genelinde oluşan kentsel katı atık miktarları	3
Şekil 1.2	Geleneksel depo sahaları için birim ağırlık profilleri (Zekkos vd., 2006)	5
Şekil 1.3	Farklı test yöntemleri ile tahmin edilen kentsel katı atık kayma mukavemet parametreleri	10
Şekil 1.4	Temel atık hacmi içinde bulunan parçacık içi boşluklar (Hudson vd., 2004)	13
Şekil 1.5	Atıkların kavramsal yerleşim davranışı (Esteban-Altabella, J., Mcdougall, J. Colomer-Mendoza, F.J., Gallardo, A., Edo-Alcon, N., 2017)	16
Şekil 1.6	Kentsel katı atık depo sahası şematik gösterimi (Millis, 2017)	18
Şekil 1.7	Depo tabanı sızdırmazlık sistemi (İSTAÇ, 2012)	19
Şekil 1.8	Depo alanı kesiti (Tchobanoglous, Theisen ve Vigil, 1993)	19
Şekil 1.9	Atık sahalarda dikey ve yatay yönlü atık yerleşimi (Cox, 2013)	20
Şekil 1.10	Kentsel katı atık depo sahası tipik son örtü sistemi (Chetri ve Reddy, 2021)	22
Şekil 1.11	Atık sahalardaki tipik kayma modları (Krase, 2008)	25
Şekil 1.12	Potansiyel kayma yüzeyi ve tek bir dilime etkileyen kuvvetler	28
Şekil 2.1	Este belediye katı atık sahası planimetrisi	34
Şekil 2.2	Este belediye katı atık depo sahası alt astar sistemi (Trivellato, 2014)	36
Şekil 2.3	Çalışmada kullanılan atık saha kesiti	37
Şekil 2.4	Plaxis Sonlu Elemanlar Yazılım Programı gerilme ve düğüm noktaları (PLAXIS, 2020)	40
Şekil 2.5	Plaxis 2D LE mesh oluşturma (Bentley Geotechnical Engineering, 2022)	41
Şekil 3.1	Çalışmada kullanılan sonlu eleman ağı	43
Şekil 3.2	Farklı atık katman kalınlıklarında yüklenmiş 2-2 no'lu Este KKA depo sahası kesiti (a) 3 metre atık kalınlığı (b) 5 metre atık kalınlığı (c) 7 metre atık kalınlığı (d) 18 metre atık (tek tabaka) kalınlığı	45
Şekil 3.3	Atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=10$ kN/m ²)	47
Şekil 3.4	Atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=20$ kN/m ²)	47
Şekil 3.5	Atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=30$ kN/m ²)	48

Şekil 3.6	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=10$ kN/m^2)	50
Şekil 3.7	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=20$ kN/m^2)	50
Şekil 3.8	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=30$ kN/m^2)	50
Şekil 3.9	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=10$ kN/m^2)	52
Şekil 3.10	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=20$ kN/m^2)	52
Şekil 3.11	Atık tabaka kalınlığının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=30$ kN/m^2)	53
Şekil 3.12	Atık mukavemet parametrelerinin farklı konfigürasyonları için bulunan temsili şev göçme yüzeyleri. Atık tabaka kalınlıkları; (a) 3 metre (b) 5 metre (c) 7 metre.....	55
Şekil 3.13	Atık mukavemet parametreleri $c=30$ kN/m^3 , $\phi=15^\circ$ iken bulunan temsili şev göçme yüzeyleri. Atık tabaka kalınlıkları; (a) 3 metre (b) 5 metre (c) 7 metre.....	56
Şekil 3.14	Atık mukavemet parametrelerinin farklı konfigürasyonları için tek tabakalı atık yüklemesi durumunda bulunan temsili şev göçme yüzeyi	57
Şekil 3.15	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W= H/4$).....	58
Şekil 3.16	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W= H/2$).....	58
Şekil 3.17	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W= 3H/4$).....	59
Şekil 3.18	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=10$ kN/m^2)62	
Şekil 3.19	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=20$ kN/m^2)62	
Şekil 3.20	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/4$, $c=30$ kN/m^2)63	
Şekil 3.21	Drenajsız analizlerde, atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=10$ kN/m^2)64	
Şekil 3.22	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=20$ kN/m^2)65	
Şekil 3.23	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=H/2$, $c=30$ kN/m^2)65	
Şekil 3.24	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=10$ kN/m^2)	67

Şekil 3.25	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=20 \text{ kN/m}^2$)	67
Şekil 3.26	Drenajsız analizlerde atık tabaka kalınlığı ile atık mukavemet değerlerinin güvenlik sayısı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$, $c=30 \text{ kN/m}^2$)	68
Şekil 3.27	Drenajsız analizlerde 3 metre kalınlığında atık tabaka yüklemesi sonucu bulunan temsili şev göçme yüzeyleri (a) $\phi=15^\circ$ (b) $\phi=25^\circ-35^\circ$	71
Şekil 3.28	Atık mukavemet parametrelerinin farklı konfigürasyonları için bulunan temsili şev göçme yüzeyleri. Atık tabaka kalınlıkları; (a) 5 metre, (b) 7 metre, (c) 18 metre	72
Şekil 3.29	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/4$)	72
Şekil 3.30	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/2$)	73
Şekil 3.31	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$)	73
Şekil 3.32	Konsolidasyonlu ve kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=3 \text{ m}$, $c=10 \text{ kN/m}^2$)	77
Şekil 3.33	Konsolidasyonlu ve kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=5 \text{ m}$, $c=10 \text{ kN/m}^2$)	79
Şekil 3.34	Konsolidasyonlu ve kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=7 \text{ m}$, $c=10 \text{ kN/m}^2$)	79
Şekil 3.35	Konsolidasyonlu ve kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=18 \text{ m}$, $c=10 \text{ kN/m}^2$)	82
Şekil 4.1	Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemi analiz sonuçları ve karşılaştırmaları ($H=3\text{m}$) (a) $c=10 \text{ kPa}$, (b) $c=20 \text{ kPa}$, (c) $c=30 \text{ kPa}$	85
Şekil 4.2	Temsili şev göçme yüzeyleri ($H=3 \text{ m}$) (a) $c=30 \text{ kPa}$ $\phi=15^\circ$, (b) Diğer tüm mukavemet değerleri	87
Şekil 4.3	Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemi analiz sonuçları ve karşılaştırmaları ($H=5\text{m}$) (a) $c=10 \text{ kPa}$, (b) $c=20 \text{ kPa}$, (c) $c=30 \text{ kPa}$...	89
Şekil 4.4	Temsili şev göçme yüzeyleri ($H=5 \text{ m}$) (a) $c=30 \text{ kPa}$, $\phi=15^\circ$, (b) Diğer tüm mukavemet değerleri	91
Şekil 4.5	Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemi analiz sonuçları ve karşılaştırmaları ($H=7\text{m}$) (a) $c=10 \text{ kPa}$, (b) $c=20 \text{ kPa}$, (c) $c=30 \text{ kPa}$	93
Şekil 4.6	Temsili şev göçme yüzeyleri ($H=3 \text{ m}$) (a) $c=30$, $\phi=15^\circ$, (b) Diğer tüm mukavemet değerleri	95
Şekil 4.7	Limit Denge ve Sonlu Elemanlar Yöntemi analiz sonuçları ve karşılaştırmaları ($H=18 \text{ m}$) (a) $c=10 \text{ kPa}$, (b) $c=20 \text{ kPa}$, (c) $c=30 \text{ kPa}$	97

Şekil 4.8 Temsili şev göçme yüzeyleri (H=18 m)..... 99



TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Limit denge yöntem ve kabulleri	32
Tablo 2.1	Este düzenli depolama sahası malzeme parametre özellikleri (Trivellato, 2014).....	35
Tablo 2.2	Çalışmada kullanılan atık parametre değerleri.....	38
Tablo 3.1	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/4$)	48
Tablo 3.2	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/2$)	51
Tablo 3.3	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=3H/4$).....	54
Tablo 3.4	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/4$).....	59
Tablo 3.5	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/2$).....	60
Tablo 3.6	Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$)	60
Tablo 3.7	Drenajsız analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/4$)	63
Tablo 3.8	Drenajsız analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/2$)	66
Tablo 3.9	Drenajsız analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=3H/4$)... ..	68
Tablo 3.10	Drenajlı ve drenajsız analizlerde bulunan en yüksek güvenlik sayıları	70
Tablo 3.11	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/4$).....	74
Tablo 3.12	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/2$).....	74
Tablo 3.13	Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$)	75
Tablo 3.14	Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri	76
Tablo 3.15	Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri	78
Tablo 3.16	Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri	80
Tablo 3.17	Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri	81
Tablo 4.1	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=3$ m).....	86
Tablo 4.2	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=5$ m).....	90
Tablo 4.3	Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($H=7$ m).....	94

Tablo 4.4 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri (H=18 m) 98



KENTSEL KATI ATIK DEPO SAHASI ATIK DOLGUSU ŞEV STABİLİTESİNİN SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Yağmur BORA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK

Atıkların çevreye ve insan sağlığına en az zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Düzenli depolama yöntemi, kentsel katı atıklarının (KKA) ana bertaraf yöntemidir. Bu yöntemde, depo sahasına bertaraf edilmek üzere getirilen katı atıklar çevreye minimum zarar verecek şekilde depo sahasına yerleştirilip, sıkıştırılmakta ve üzerleri örtü (toprak) tabakası ile örtülmektedir. Depo sahasına yerleştirilen atıklar, kontrollü şartlar altında ayrışarak inert ve kararlı maddelere dönüşür.

Kentsel katı atıkların heterojen yapısı ve karmaşık mühendislik özellikleri nedeni ile depo sahası stabilitesi, depolama sahası operasyonundaki en önemli mühendislik sorunudur. Atık gövdeleri, atığın mühendislik özellikleri (fiziksel özellikler, kayma mukavemeti vb.) ile atık gövdesinin yapısal özelliklerini içeren iç ve dış faktörlerin etkisi altında kolayca kararsız hale gelebilmektedir.

Bu çalışmada, farklı atık katman kalınlıkları ve atık katmanlarında birikmiş olan sızıntı suyu seviyeleri ile atık mukavemet parametrelerinin (kohezyon, içsel

sürtünme açısı) atık saha şev stabilitesi üzerindeki nicel etkileri, sayısal analiz yöntemleri ile araştırılmıştır. Plaxis 2D programında sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmiş olan analizlerde hem drenajlı hem drenajsız koşullar altında çözümler yapılmış ve sonuçlar güvenlik sayıları, kayma düzlemleri ve atık oturma miktarlarına göre değerlendirilmiştir. Konsolidasyon etkisini gözetmek için hem konsolidasyonlu hem kısa süreli analizler gerçekleştirilmiştir. Son olarak Plaxis 2D LE programında Limit denge yöntemi ile kısa süreli analizler tekrarlanmıştır. Sonuçlar şunları göstermiştir: Ana sızıntı su seviyesi, depolama sahası stabilitesi için en önemli faktörlerden biridir. Atık gövdesinde artan su seviyeleri nedeniyle aşırı boşluk basınçlarının meydana gelmesi stabilite üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Atık tabakası kalınlığının azaltılması, atık gövdesinin daha kararlı bir yapıda olmasını sağlayacaktır. Atık kohezyon ve içsel sürtünme açısı parameter değerlerindeki artış, güvenlik faktörü değerini arttırmaktadır. Elastisite modülünün güvenlik faktörü üzerinde etkisi yokken oturma miktarı üzerindeki etkisi ihmal edilemez seviyededir.

Anahtar Kelimeler: Kentsel katı atık (KKA), şev stabilitesi, depo sahası, Plaxis 2D, nümerik analiz.

INVESTIGATION of SLOPE STABILITY of WASTE FILL in MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL by NUMERICAL ANALYSIS

Yağmur BORA

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Co-supervisor: Asst. Prof. Murat Ergenekon SELÇUK

Waste must be disposed of in a way that causes the least harm to the environment and human health. The landfill method is the main disposal method of municipal solid waste (MSW). In this method, solid wastes brought to the storage area for disposal are placed in the storage area, compacted in a way that causes minimum damage to the environment, and covered with a cover layer. Wastes in the storage area decompose under controlled conditions and turn into inert and stable substances.

Landfill stability is the most important engineering problem in landfill operation due to municipal solid waste's heterogeneous nature and complex engineering properties. Waste bodies can easily become unstable under the influence of internal and external factors, including the engineering properties of the waste (physical properties, shear strength, etc.) and the structural characteristics of the waste body.

In this study, the quantitative effects of different waste layer thicknesses, leachate levels accumulated in the waste layers, and the waste strength parameters

(cohesion, internal friction angle) on the landfill slope stability were investigated by numerical analysis methods.

The analyzes were performed under both drained and undrained conditions with the finite element method in the Plaxis 2D program, and the results were evaluated according to safety factors, slip planes, and the amount of settlements. Analyses were performed under both consolidated (long-term) and short-term conditions to observe consolidation's effect on safety factors. Finally, short-term analyses were repeated with the Limit balance method of Plaxis 2D LE software.

The results showed that: the main water level is important to landfill stability. The development of excess pore pressures due to increased water levels in the waste body negatively impacts stability. Reducing the waste layer thickness will provide a more stable waste body. The increase in waste cohesion and internal friction angle parameter values increases the safety factor value. While the modulus of elasticity does not affect the safety factor, it's effect on the settlement amount cannot be neglected.

Key words: Municipal solid waste (MSW), slope stability, landfill, Plaxis 2D, numerical analysis.

Kentsel katı atıkların içeriği genel olarak yemek artığı, kağıt, plastik, ahşap, lastik, tekstil, kül, bahçe atığı ve topraktan oluşmaktadır. Kentsel katı atıkların mühendislik özellikleri ve davranışları hakkında güvenilir bilgi elde edilmesi ve değerlendirilmesi, içerdikleri malzemenin çeşitliliği, heterojen yapıya sahip olmaları, sahadan bozunmamış numune alımının zorluğu, zaman içerisinde bozunmaya uğrayan atığın mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler vb. etkenler nedeniyle zordur. Bu nedenle, kentsel katı atıklar doğal jeolojik yapılara (toprak vb.) göre çevresel etkilere karşı daha hassastır.

Atık miktar ve kompozisyonu; iklim, gelişmişlik düzeyi, gelir düzeyi, şehirleşme ve endüstriyellemeye göre ülkeden ülkeye farklılıklar gösterir (Aykol, 2008). Son yıllarda, nüfus ve mal tüketimindeki artış gibi faktörler nedeniyle, sanayileşmiş ülkelerde atık üretiminde artışlar yaşanmıştır. Katı atıklar kullanıldıktan veya tüketildikten sonra, toplumun tekrar yararlanabilmesi için toplanarak uzaklaştırılmalı veya yok edilmelidir. Atıkların, çevreye ve insan sağlığına en az zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Kentsel atıkların bertarafı için; kompostlaştırma, kontrollü yakma ve katı atık sahasında depolama olmak üzere 3 ana yöntem bulunmaktadır. Atıklar için bertaraf yöntemi seçiminde ülkenin ana ekonomik kaynağı, nüfus, arazi alanı vb. faktörler doğrudan etkilidir. Yakma ve kompostlaştırma yöntemleri yüksek maliyet ve teknik içeriğe sahip olmaları nedeniyle genellikle gelişmiş ülkelerde kullanılırken; düzenli depolama yöntemi, düşük teknik içerik ve ekonomik olması nedeniyle dünyada en çok kullanılan bertaraf yöntemidir (Yang, Xu ve Chai, 2018).

Depo sahası stabilitesi, düzenli depolama operasyonlarında en önemli mühendislik konularından biridir. Atık sahalarda yeterli sıkıştırma işleminin yapılmaması, aşırı yağış, kontrolsüz yükleme, yangın, depolanan atık yüksekliği ve şev eğiminin olması gerekenden daha yüksek ve dik olması gibi nedenlerden dolayı şev stabilite problemleri yaşanmakta ve şev stabilitesinde meydana gelebilecek bozukluklar ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilmektedir.

Doğal ve yapay tüm şevlerin kendi ağırlıkları ve/veya uygulanan yüklerin etkisi altında göçmeye karşı stabiliteleri, çeşitli sayısal analiz yöntemleri ile tespit edilmektedir (Mısır, 2017). Literatürde önceden yapılmış olan çalışmalar sonucunda, şev stabilite analizleri ile kritik eğim, şev yükseklikleri ve sızıntı suyu miktarının belirlenerek atık sahaların daha güvenli bir şekilde işletilebileceği, atık için uygun kayma mukavemet parametrelerinin (içsel sürtünme açısı, kohezyon) seçiminin ise şev stabilite analizlerinde önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır (Kezer, 2019). Elastisite modülünün ise şev göçmesi öncesi hesaplanan deformasyonlar üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Bu çalışmada, depo sahasında inşaa edilen atık katman kalınlıkları, atık katmanlarında bulunan su seviyeleri ve atık mühendislik parametrelerinin (kohezyon, içsel sürtünme açısı, elastisite modülü) farklı değerlerinin depo sahası stabilitesi ve atık oturma miktarı üzerindeki etkileri Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile araştırılmıştır. Tüm analizler drenajlı ve drenajsız olmak üzere iki koşulda da gerçekleştirilmiş ve analizlerde atığın konsolide olmasına izin verilmiştir. Ek olarak konsolidasyonun güvenlik sayısı değeri üzerindeki etkisinin tespit edilebilmesi için analizler konsolidasyona izin verilmeyecek şekilde tekrarlanmıştır.

Son olarak Plaxis 2D LE programında limit denge methodu kullanılarak kısa süreli analizler yapılmış ve bulunan sonuçlar, sonlu elemanlar methodu kullanılarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, Padua Eyaleti'nin güneybatı kesiminde yer alan ve atık işletme şirketi S.E.S.A. tarafından kontrol edilen Este belediye katı atık depolama sahası ile önceki çalışmalardan elde edilen literatür verilerinden yararlanılmıştır.

1.1 Literatür Özeti

Kentsel katı atık (KKA), belediye, kurumsal, eğlence, topluluk ve ticari faaliyetler sonucu; ev, okul, ofis, otel vb. kurumlar tarafından üretilen atıklardır. Kentsel katı atıkların içeriği genel olarak yemek artığı, kağıt, plastik, ahşap, kül, lastik, tekstil, bahçe atığı ve topraktan oluşmaktadır.

Bunun yanı sıra belediye atıkları genellikle az miktarlarda, pil, elektrik ampülleri, otomotiv parçaları gibi tehlikeli atıklar ile yıkım ve inşaat atıklarını da içermektedir (Speight, 2015). Dünya genelinde oluşan kentsel katı atık miktar ve bileşenleri Şekil 1.1'deki diyagramda sunulmaktadır (Gülmez, 2016).

vb. etkenler nedeniyle zordur (W.F. Van Impe ve P.O Van Impe, 1999; Dixon ve Jones, 2005).

Atık malzemeler için uluslararası kabul görmüş standart numune alma ve test prosedürleri olmaması nedeniyle tasarımda mühendislik parametrelerinin uygun değerleri ve kararlaştırılmış yaklaşımlar kullanılmaktadır (Dixon ve Jones, 2005).

1.1.1 Kentsel Katı Atık Fiziksel Özellikleri

Atık dolgusu genellikle çok gözenekli ve tamamen doymuş olmayan birçok farklı bileşen türünden oluşmaktadır. Gözenekler sızıntı suyu ve gaz ile doludur.

Genel olarak KKA'nın fiziksel özellikleri arasında toplam birim hacim ağırlık, yerinde nem içeriği, hidrolik iletkenlik vb. faktörler yer almaktadır.

1.1.1.1 Birim Hacim Ağırlık

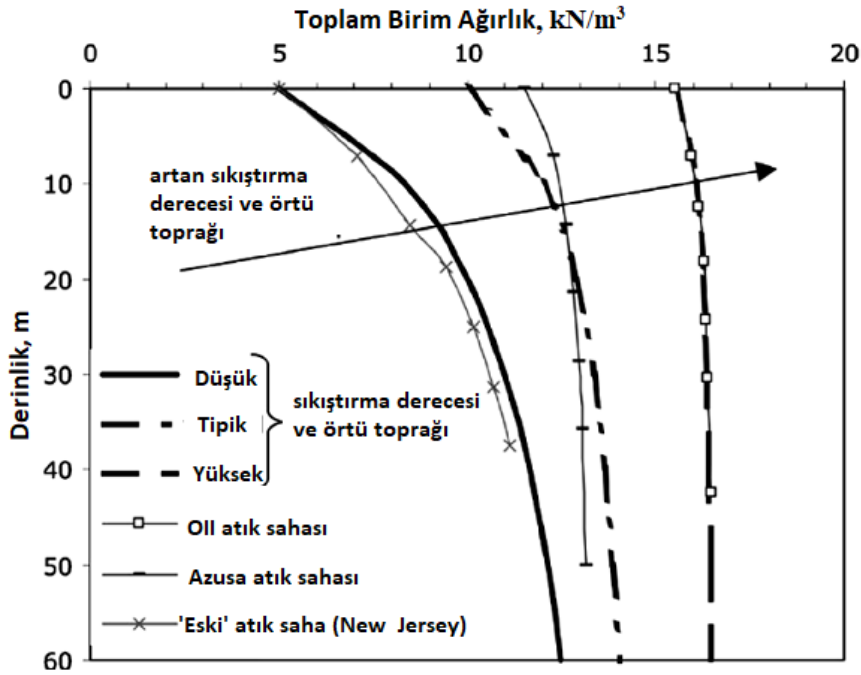
Atık birim hacim ağırlığı, projelendirilecek olan depolama tesisleri ile mevcut tesislerin şev stabilite analizlerini, depo sahası zemininin maruz kaldığı gerilmeler, sızıntı suyu ve drenaj borularına gelen zımbalama kuvvetleri ile depo sahası kapasitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Kezer, 2019).

Genel olarak, başlangıçta atığın birim ağırlığının büyük ölçüde atık bileşimi, atık üzerine serilen günlük örtü ve yerleştirme sırasındaki sıkıştırma derecesine bağlı olduğuna; atık yaşlandıkça ise birim ağırlık değerinin gömme derinliği, ayrışma derecesi ve iklim koşulları gibi etkenlere daha bağımlı hale geldiğine inanılmaktadır (Dixon ve Jones, 2005).

Literatürde eski atıkların, atık bozunma prosesi sonucu daha küçük parçacıklara ayrılması nedeniyle yeni atılan atıklardan daha yüksek birim ağırlığa sahip olduğu bildirilmektedir (Omari ve Boddula, 2012). Yüksekliklerinin %30-%40'ı kadar oturma yapan eski kabul edilen atıkların birim ağırlıklarında %67 oranında bir artış olmaktadır (Aykol, 2008).

Mevcut veriler, KKA birim ağırlığının, atık bileşimi ve atığa ilk yerleştiğinde uygulanan sıkıştırma miktarı (başlangıç birim hacim ağırlık) ile atığa uygulanan etkin sınırlayıcı stres (derinlik) tarafından yönetildiğini göstermektedir (Zekkos, 2016). Artan gömme derinliği nedeniyle efektif gerilmedeki artış, atık bileşenlerin sıkışması ve boşluk oranındaki değişim birim ağırlıkta artışa neden olabilmektedir (Wong, 2009).

Zekkos vd. (2006), arazi kapasitesinden daha az nem içeriğine sahip geleneksel depolama alanları için makul kabul edilen bir grup birim ağırlık profili (Şekil 1.2) geliştirmiştir.



Şekil 1.2 Geleneksel depo sahaları için birim ağırlık profilleri (Zekkos vd., 2006)

Başlangıçta atığa uygulanan düşük dereceli sırtıştırma, atıkta daha düşük başlangıç birim hacim ağırlığına neden olur. Sırtıştırma miktarı arttıkça (atığın üzerine ek atık veya toprak tabakalarının yerleştirilmesi) atık birim ağırlık değeri önemli ölçüde artmaya devam eder. Yüksek dereceli ilk sırtıştırma ise, atıkta yüksek başlangıç birim ağırlığına neden olmakta ve sınırlama gerilim artışı ile birlikte birim ağırlıkta daha doğrusal bir artış meydana gelmektedir (Zekkos vd., 2006).

Literatürde yapılan bazı araştırmalar sonucunda atık bozunma süresi boyunca gömülü derinliğin artması ile birlikte atık içerisindeki organik madde miktarı ve katı atık geçirgenlik katsayısında azalmalar gözlenirken atığın birim hacim ağırlık değerinde artış olmuştur. Fakat belirli bir derinlik değerinden sonra, atığın organik içerik, geçirgenlik ve birim ağırlık değerlerinde derinliğe bağlı gerçekleşen değişim miktarı azalmaktadır (Yang, Xu ve Chai, 2018).

KKA kendisiyle benzer eğilimler gösteren jeomateryallere (kum, kil vb.) göre tipik mühendislik uygulamalarında daha geniş başlangıç birim ağırlık değer aralığına sahiptir (Zekkos vd., 2006).

Literatürde KKA için bildirilen birim ağırlık değerleri, sıkıştırılmamış veya az sıkıştırılmış atık için 3 kN/m^3 'ten, yüksek derecede sıkıştırılmış atık için 20 kN/m^3 'e kadar geniş bir aralıkta değişmektedir (Zekkos, 2005). Atıktan kağıt, cam ve plastik gibi maddelerin çıkarılarak yerine yemek artıkları konulmasının birim hacim ağırlığı %30 oranında arttırdığı görülmüştür.

Genel olarak katı atıklar için içerisindeki su içeriğine ve bileşimlerine bağlı olarak 7-14 kN/m^3 aralığında değişen birim hacim ağırlık değerleri önerilmiştir (W.F. Van Impe ve P.O Van Impe, 1999).

1.1.1.2 Permeabilite

Atık permeabilitesi, atık kütlesi içindeki nemin hareketini etkilemesi nedeniyle önemli bir depo sahası tasarım parametresidir. Depo sahalarında sızıntı suyu dağılımı permabilite katsayısı ile belirlenmektedir.

Atık içerisindeki plastik, cam, toz vb. maddelerin miktarındaki artış, atık geçirgenliğini azaltırken; yiyecek, ahşap, kağıt içeriğinin artışı geçirgenliği arttırmaktadır. Ayrıca derinlikle birlikte atık geçirgenlik miktarı azalır (Yang, Xu ve Chai, 2018).

KKA'nın bazı bileşenleri granüler zeminlerin hidrolik iletkenlik davranışına benzer davranış gösterirken, diğer bileşenler killi zeminlerinki gibi davranabilir (Wong, 2009).

Ek olarak, Penmethsa (2007)'nin bozunma ile geçirgenlik değerindeki değişimi belirlemek için farklı ayrışma aşamalarında temsili KKA numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş olduğu sabit yük testleri sonucunda; numune yoğunluğunun, KKA geçirgenliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Yoğunluk ve örtü toprağı yüzdesindeki artışla birlikte geçirgenlik değerinde genel bir azalma vardır.

Literatür verilerine göre, atık sahalardaki geçirgenlik katsayısı 1×10^{-8} - $2 \times 10^{-3} \text{ cm/sn}$ gibi geniş bir aralığa sahip olup, farklı derinlik değerlerinde de yüksek farklılıklar göstermektedir (Yang, Xu ve Chai, 2018). Yapılan çalışmalar ve araştırmalar sonucunda, genel olarak permeabilite değerinin atıklar için 10^{-5} m/sn olarak kabul edilmesinin hesaplamalarda uygun sonuçlar vereceği düşünülmektedir (Aykol, 2008).

1.1.1.3 Katı Atık Su Muhtevası

Katı atık su muhtevası, dane içerisindeki suyun ağırlığı ile dane ağırlığının birbirine oranıdır. Katı atıkların su muhtevası; atık türü ve özellikleri, atıktaki sıkıştırma miktarı,

sızıntı suyu depolama ve uzaklaştırma sisteminin etkinliği, atığın bileşimi, ortam sıcaklığı vb. değerlere bağlıdır. Yapılan deney ve araştırmalar sonucunda, depo alanlarında ayrışmayı etkileyen en önemli faktörün atığın su muhtevası olduğu tespit edilmiştir (Kezer, 2019).

Nem muhtevası ve nemin depolama sahasındaki akışının arttırılması, sahayı mikrobiyolojik faaliyetler için daha uygun hale getirmekte ve stabilizasyon için gerekli olan süreyi azaltmaktadır. Yeterli nem oranının sağlanması (%40-60), depolama sahaslarında KKA'nın bozunma hızını artırırken, yetersiz nem (<%20) koşulları atık bozunmasını geciktirmektedir (Boda, 2002). Atığın nem içeriği, sahaya yerleştirilmesinden ve sıkıştırılmasından sonra içerisindeki kağıt, karton vb. bazı bileşenler tarafından ortamdaki ek nemin (yağış, sızıntı suyu devridaimi) emilmesi veya önceden tıkanmış boşluklardan salınması sonucunda, nemin atık kütlesi içinde yeniden dağılması yoluyla artabilmektedir (Cox, 2013).

Bunun yanı sıra, KKA gibi kayda değer miktarlarda bozunma gazı (metan) üreten atık dolgular, depo sahası ekstraksiyon kuyuları ile havalandırma katmanlarında yeterli gaz akışı oranlarına izin verecek doyuma seviyelerinde tutulmalıdır. Bu doygunluk derecesinin kentsel katı atık depo alanları için %50-60'dan daha düşük değerlerde olması gerekmektedir (Bonaparte, Bachus ve Gross, 2020).

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, atık düzenli depolama prosesi öncesi atık ayrıştırması yapılmadığı için KKA başlangıçta yüksek su içeriğine ve yüksek doygunluk derecesine sahip olabilir. Sızıntı suyu toplama sistemi ve final örtü tabakası olmayan depo alanları için, ani yükleme ve kısa süreli stabilite durumlarında suyun hızlı bir şekilde drene olamamasından dolayı aşırı boşluk suyu basıncı hesaplamalarına dikkat edilmelidir (Shariatmadari vd., 2009).

1.1.1.4 Porozite

Porozite, katı atık içindeki boşluk hacminin toplam hacme oranıdır. KKA'nın geçirgenliği, gözeneklilik (porozite) tarafından belirlenmektedir. Zeng vd., (2017)'nin farklı nem oranları, bozunma derecesi ve sıkıştırma stresleri altında kentsel katı atıklar üzerinde gerçekleştirmiş oldukları laboratuvar testleri sonucunda, kentsel katı atık porozite değeri 0.11-0.65 aralığında bulunmuştur. Testlerde gözeneklilik, bozunma ve stres artışıyla

birlikte önemli derecede azalma göstermiştir. Ayrıca nem oranındaki artış, porozite değerinde azalmaya yol açmaktadır.

1.1.2 Kentsel Katı Atık Mekanik Özellikleri

Atık mekanik özellikleri; rijitlik, sıkıştırılabilirlik, kesme mukavemeti vb. özellikleri içermektedir (Castelli ve Maugeri, 2014).

KKA'nın heterojenliği ve bazı atık bileşenlerinin büyük boyutu nedeniyle, çoğu zaman sahadan temsili atık numunelerinin alınması ve test edilmesi zor olmaktadır. Ek olarak, ince taneli toprak benzeri atıkların mekanik özellikleri geleneksel geoteknik test yöntemleri ile belirlenebilirken; karışık veya kalın-granüler atıklar için test ekipmanlarında bazı değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Diğer atıklar için ise yerinde (arazi) testlerin yapılması önerilmektedir. Büyük ölçekli kesme ve üç eksenli ekipmanların kullanıldığı testler de atık mekanik özelliklerinin belirlenmesi için fayda sağlayabilir (W.F. Van Impe ve P.O Van Impe, 1999).

1.1.2.1 Kayma Mukavemet Parametreleri

Kentsel katı atıkların kayma mukavemeti; atık tipi, bileşimi, sıkıştırma miktarı, günlük örtü, nem koşulları, yaş, ayrışma derecesi, aşırı yük basıncı vb. birçok faktörün bir fonksiyonudur (Stark, Huvaj-Sarihan ve Li, 2009). KKA kesme mukavemetini etkileyen faktörlerin anlaşılması, depolama sahası şevlerinin ve depo sahalarının kapatılması sonrası yapılacak olan mühendislik yapılarının daha verimli tasarlanmasına olanak sağlayacaktır (Wong, 2009).

Pelkey (1997), katı atıklar üzerinde dikkate değer laboratuvar testlerinin yapılabileceğini göstermek ve literatürdeki laboratuvar test sonuçlarına dayanan atık özellikleri hakkındaki sınırlı miktardaki veriye katkıda bulunmak için testler gerçekleştirmiştir. Çalışmalar sırasında standart test ve ekipmanların yetersiz olduğu görülmüş ve test ekipmanları üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Yapay atık numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda, doğrudan kesme testinin, atık kesme mukavemet değerinin tahmininde uygun sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Atıkların kayma mukavemetini karakterize etmek için genel olarak Mohr-Coulomb mukavemet zarfı kullanılmaktadır;

$$\tau = c' + \sigma_n' \tan(\phi') \quad (1.1)$$

τ = Atık kayma mukavemeti

σ_n' = Normal efektif stres

c' = Kohezyon

ϕ' = İçsel Sürtünme Açısı

Bray, Zekkos ve Merry (2009)'un, KKA'nın kesme mukavemet değeri üzerindeki çalışmaları, katı atığın kesme mukavemet değerinin; özellikle daha yüksek sınırlayıcı gerilmelerde öncelikle strese bağlı olduğunu (sürtünme), fakat düşük sınırlayıcı gerilmelerde de (kohezyon) önemli bir mukavemete sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Kentsel katı atıkların içeriğinde bulunan lifli atık malzemelerin (plastik, kağıt vb.) miktarı ve yönü atık kayma dayanımı üzerinde önemli bir rol sahiptir. Lifli malzemeler, kayma yüzeyine paralel olarak yönlendirildiğinde, kayma mukavemeti üzerinde önemli etkilere sahip olmazken; lifli malzemelerin kayma yüzeyine dik olarak yönlendirilmesi KKA'nın dayanımını arttırmaktadır. Yapılan testlerde, KKA içerisindeki lifli malzemelerin genellikle kayma düzlemine paralel olduğu bulunmuştur (Zekkos, Athanasopoulos, Bray, Grizi ve Theodoratos, 2010).

Atık içerisindeki organik maddelerinin bozunmasının, atığın bileşimini değiştirdiğine inanılmaktadır. Ayrışma sonucunda, atık içerisindeki lifli ve şerit halindeki malzemelerin yapısı bozulmakta ve malzemeler takviye etkilerini yitirmektedir.

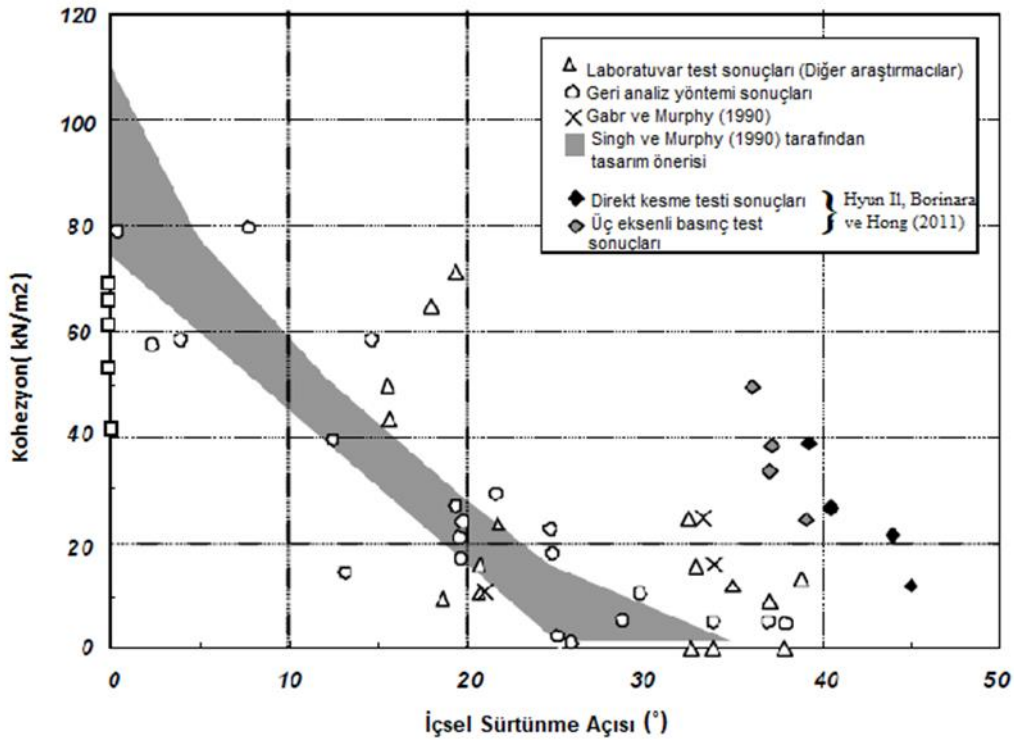
Kağıtlar, atık kesme mukavemeti üzerinde yüksek takviye edici etkiye sahiptir. Kentsel katı atığın zamanla bozunması sonucu, atık içerisinde yüzdelik kâğıt içeriği azalır ve plastik içeriğin yüzdesi önemli miktarlarda artış göstererek daha fazla potansiyel kayma yüzeyi meydana getirir. Bu etkiler nedeniyle, atığın kayma mukavemetinin, zamanla ve bozunma nedeniyle azalması beklenir (Hossain ve Haque, 2009).

Bozunma sonrasında katı atık bileşimindeki önemli değişiklikler ve nem içeriğindeki artış nedeni ile bozunmuş (eski) atık ile bozunmamış (yeni) atık mekanik davranış ve mukavemet özelliklerinin birbirinden farklı olması beklenir (Reddy, Hettiarachchi, Gangathulasi ve Bogner, 2011). Organik madde parçalandıkça atık kohezyon değeri azalmakta, sürtünme açısı değeri artmaktadır. Literatürde, normal şartlar altında yüksek organik içeriğe sahip olan kentsel katı atığın parçalanması sonucu, sürtünmeli bir ortamın oluşacağı bilgisi yer almaktadır. Atık içerisinde bulunan çim, kağıt gibi maddelerin de sürtünmeyi artırıcı etkileri bulunmaktadır (Reddy vd., 2011).

Pulat ve Aksoy (2015) laboratuvar ortamında gerçekleştirdikleri testler sonucunda, atık içeriğindeki lifli malzeme miktarındaki artışın atıkların içsel sürtünme açısı değerinde, organik madde içeriğindeki artışın ise kohezyon değerinde artışa neden olduğunu göstermişlerdir.

Genel olarak, literatürde bildirilen kesme dayanımı değerlerinde büyük değişkenlik bulunmaktadır (Şekil 1.3). Atık kohezyon değerleri 0 ile 80 kPa; sürtünme değerleri ise 0 ile 60 derece arasında değişmektedir (Zekkos, 2005).

Stark, Huvaj-Sarihan ve Li (2009) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalar sonucunda, 200 kPa'dan düşük normal gerilmelerde atık için, $c = 6$ kPa ve $\phi = 35^\circ$; 200 kPa'ya eşit veya daha büyük normal gerilmelerde ise $c = 30$ kPa ve $\phi = 30^\circ$ kayma mukavemeti değerlerinin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.



Şekil 1.3 Farklı test yöntemleri ile tahmin edilen kentsel katı atık kayma mukavemet parametreleri (Hung II, Borinara ve Hong, 2011)

Manassero vd. (aktaran; Dixon ve Jones, 2005) 1996 ise yapmış oldukları çalışmalarda, atığın sadece kohezif özellikler göstereceğini belirttikleri düşük stres değerleri (< 20 kPa) için, $c = 20$ kPa; düşük-orta stres değerleri (20-60 kPa) için, $c = 0$ kPa, $\phi = 38^\circ$; yüksek stress değerleri (> 69 kPa) için ise $c \geq 20$ kPa, $\phi = 30^\circ$ değerlerinin dizayn parametresi olarak kullanılmasını önermiştir.

Zekkos vd. (2010), atık bileşimi, sınırlayıcı stres, birim ağırlık ve yükleme hızının KKA'nın gerilme-yer değiştirme tepkisi ve kesme mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla KKA üzerinde 109 adet büyük ölçekli direkt kesme testi gerçekleştirmiş, test sonuçlarına dayanarak düşük nem içeriği ve 1 atmosferlik normal gerilimde atık kesme mukavemetinin $c=15$ kPa, $\phi=36^\circ$ olduğunu ve normal gerilimdeki her log-döngü artışı için sürtünme açısında 5 derecelik bir azalma ile en iyi şekilde karakterize edilebileceğini gözlemlemişlerdir. Sıkıştırma miktarı ve birim ağırlık değerindeki artışlar, atık kayma direncini arttırmaktadır.

Edinçliler, Benson ve Edil (1996) yapmış oldukları literatür taraması sonucu, atığın sürtünme açısı değerinin tipik olarak 28° ile 42° arasında ve kohezyon aralığının ise 0 ile 40 kPa arasında olduğunu ve bu aralığın ortasındaki parametrelerin (örneğin; $\phi=35^\circ$ ve $c=20$ kPa) tasarım için uygun olabileceğini belirtmiştir. Ek olarak, literatürde bildirilen değerlerin çoğunun küçük ölçekli testlerde ve atığın içerisinden takviye elamanlarının çıkarılarak gerçekleştirilmesi nedeniyle, sahadaki atığın daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olabileceği ihtimali üzerinde durmuşlardır.

Ayrıca Zekkos vd. (2009) doğrudan kesme, üç eksenli basınç ve basit kesme testlerinin kullandıkları kapsamlı büyük ölçekli laboratuvar test sonuçlarına dayanarak, KKA'nın dinamik kesme mukavemetinin, statik mukavemetinden en az %20 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

1.1.2.2 Poisson Oranı

Atık poisson oranı, esas olarak drenaj koşullarına bağlıdır ve doğrudan kesme testinden elde edilen deneysel kayma gerilim-gerinim ilişkilerinden tahmin edilmektedir (Naveen, 2018).

Gomes, Lopes ve Olivera (2014)'ün kentsel katı atıkları üzerinde yapmış oldukları laboratuvar (ödometre ve üç eksenli basınç) ve arazi (CPT, SPT) testleri; inşaat sonrası 2 yıllık süreçte ortalama efektif sınırlayıcı stres artışı ile poisson oranında artış gösterdiği, maksimum değeri 0.4'e ulaştıktan sonra azalarak 0,19-0,32 değer aralığında sabitlendiğini göstermiştir.

Zekkos (2005) ise gerçekleştirmiş olduğu üç eksenli basınç deneyleri sonucunda, içerisinde fiber (lifli) malzemeler bulunan kentsel katı atıkların poisson oranınının 0.3-0.35

aralığında olduğunu; fiber malzemelerin miktarındaki artışın poisson oranında 0.3'ten 0'a kadar yüksek değerlerde düşüşe neden olduğunu tespit etmiştir.

1.1.2.3 Elastisite (Young) Modülü

Elastisite modülü, deformasyon davranışını yöneten önemli bir atık parametresidir. Literatürde atık statik elastisite modülüne ilişkin veriler azdır. Kentsel katı atıklar için elastisite modülünün zeminlere benzer davranış gösterdiği ve sınırlayıcı gerilme ve derinlikle artması gerektiği düşünülmektedir (McDonald, 2018).

Tan (2001) kentsel katı atıkların laboratuvarında modellenmesi adı altında, birim hacim ağırlıkları 6~7 kN/m³ aralığında değişen plastik malzemeler üzerinde yapmış olduğu ödometre ve kesme kutusu testleri sonucunda, farklı gerilmeler altındaki plastik malzemenin elastisite modülünün 3000~25000 kN/m² aralığında değiştiğini bulmuştur.

Elastisite modülü ve poisson oranının şev göçmesi öncesi hesaplanan deformasyonlar üzerinde önemli bir etkisi olmasına rağmen güvenlik faktörü üzerinde etkisi azdır. Bu nedenle gerekli verilerin yokluğunda elastisite modülü ve poisson oranı için nominal değerler verilebilir (Griffiths ve Lane, 2001).

1.1.3 Kentsel Katı Atık Sıkışma ve Deformasyon Özellikleri

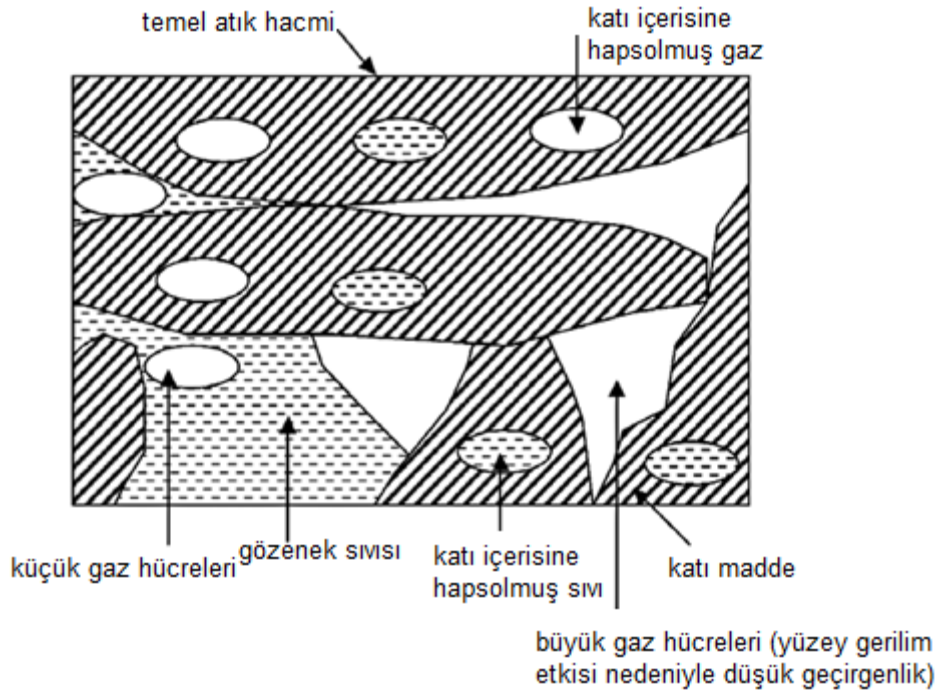
Atık dolgusu genellikle çok gözenekli ve tamamen doymuş olmayan birçok farklı bileşen türünden oluşur. Kentsel katı atıkların sıkıştırma davranışları; sıvı, katı ve gaz olmak üzere üç farklı fazdan oluşmaları nedeniyle çoğu toprağa göre daha komplekstir. Küçük gözeneklerde bulunan katı fraksiyona emilme veya başka bir yolla bağlanan sıvı ile büyük boşaltılabilir gözeneklerdeki sıvı arasında ayırım yapılması gerekebilmektedir (Hudson, White, Beaven ve Powrie, 2004).

Hudson vd. (2004) temel atık hacmi içerisinde mevcut olan parçacık içi boşluk türlerini vurgulamak için Şekil 1.4'te gösterilen şemayı geliştirmiştir.

Atıklarda oturma miktarı, atığın başlangıç sıkıştırılma miktarına, atık bileşimine ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir. Depolama hacmi hesaplamaları, son kapak tasarımı, sızıntı suyu devridaim sistemleri ve gaz toplama sistemlerinin tasarımı için atık yerleşim miktarının tahmin edilmesi gerekmektedir.

Atık depo sahası üzerine gelecekte inşaa edilecek her türlü yapının performansı büyük ölçüde atık sahalarda gerçekleşmesi beklenen oturma miktarının doğru tahminine bağlıdır (El-Fadel ve Khoury, 2000).

Düzenli depolama alanlarındaki yerleşimi tahmin etmek için kullanılan mevcut modellerden biri, genellikle toprak yerleşimini tahmin etmede kullanılan Terzaghi konsolidasyon teorisidir (Aykol, 2008). Fakat, KKA düzenli depolama sahası ile toprak yerleşim mekanizmaları arasında bir takım temel farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 1.4 Temel atık hacmi içinde bulunan parçacık içi boşluklar (Hudson vd., 2004)

Tek boyutlu konsolidasyon teorisinde toprağın doymuş olduğu varsayılır ve yerleşim, aşırı gözenek suyunun dağılmasına atfedilir. Bu nedenle, ikincil sıkıştırma, toplam yerleşiminin yalnızca küçük bir kısmına katkıda bulunur. Düzenli depolama sahasındaki atıklar ise genellikle doymuş değildir ve organik materyalin ayrışması önemli miktarda gaz üreterek uzun vadeli yerleşimlere neden olur. Bu özellikler, kentsel katı atık düzenli depolama yerleşimini tipik konsolidasyon davranışından ayırmaktadır (Liu, K.S. Chen ve R.S. Chen, 2006). Atıklar için deformasyon konsolidasyondan ziyade bir sıkıştırma mekanizmasıdır (McDonald, 2018).

Ek olarak, depo sahalarında bulunan heterojen malzemelerin (farklı tipteki atıklar, astarlar, örtüler, katmanlar vb.) deformasyon davranışı ve aralarındaki etkileşim

nedeniyle atık sahalarda meydana gelen oturmalar, geleneksel toprak yapılarından farklı bir şekilde gerçekleşmektedir (Beakawi Al-Hashemi, 2016).

Düzenli depolama alanlarındaki yerleşim mekanizmalarını simüle etmek için kullanılan birçok model, bozunma süreçlerinin depo sahası oturmaları üzerindeki önemini kabul etsede, depo sahalarında gerçekleşen karmaşık biyolojik süreçleri yeterince iyi tanımlayacak model parametrelerini tahmin etmedeki zorluklar ve belirsizlikler nedeniyle, modellerden çok azı atık yerleşiminin genel zaman davranışını tahmin etmede başarılı olmuştur. Modeller, belirli alanlardaki oturmaları simüle etmede sınırlı bir ölçüde başarı sağlamaktadır (El-Fadel ve Khoury, 2000).

Hudson vd. (2004)'ün, dikey yönde gerilme artışlarının, atığın, yoğunluk, hidrolik iletkenlik ve boşaltılabilir gözenekliliği üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla doymuş atık numuneleri üzerinde farklı gerilmeler altında gerçekleştirmiş olduğu testler, tipik kentsel katı atıklar için yükteki artışlar sonucu gerçekleşen sıkıştırma mekanizmalarının daha fazla dikkate alınması gerektiğini göstermiştir.

Atık yerleşiminde yer alan ana mekanizmalar: 1.Mekanik (bozulma, eğilme, ezilme ve yeniden yönlendirme); 2.Ravelling (ince tanelerin büyük boşluklara hareketi); 3.Fiziksel-kimyasal değişim (korozyon, oksidasyon ve yanma); 4. Biyokimyasal ayrışma (fermantasyon ve bozunma) (Edil, Ranguette ve Wuellner, 1990; El-Fadel ve Khoury, 2000) ile 5. Bu mekanizmalar arasındaki etkileşimler olarak tanımlanmıştır. Mekanizmalar arasındaki etkileşimler (konsolidasyonun dağılmayı tetiklemesi, bozunma sonucu salınan metan ve ısının yanmayı desteklemesi vb.) atıkta daha fazla çökmeye neden olabilmektedir (El-Fadel ve Khoury, 2000).

Atık partiküller, yük uygulamasından sonra mekanik deformasyona neden olan yeni stres durumuna uyum sağlamak için bükülür, ezilir ve yer değiştirir. Atık içerisindeki küçük partiküllerin daha büyük partiküllerin boşluklarına doğru hareket etme (ravelling) eğiliminde olması, özellikle sıkıştırma sırasında ek oturmalara neden olur. Bu mekanizmayı diğer mekanizmalardan ayırt etmek genellikle zordur. Fizikokimyasal değişiklikler (korozyon, oksidasyon ve yanma) ile biyokimyasal bozunma, atık kütlelerinde azalmaya neden olarak dikey yönde ek deformasyonlara yol açar (Sowers, 1975).

Sıkıştırma sonucu atık içerisinde meydana gelen parçacık kaymaları, boşluk oranında azalmaya neden olmaktadır. Parçacık kayması sonucu gerçekleşen hacim değişiklikleri kalıcıdır. Boşaltma sonrası geri kazanılmaz. Geleneksel zemin mekaniğinde bu durum ilk

boşluk oranı ve ilk sıkıştırmadaki efektif gerilme arasındaki ilişki ile karakterize edilmektedir. Partikül bozunması sonucu oluşan hacim değışikliklerinin, boşaltma sırasında geri kazanılabileceği varsayılmaktadır (Hudson vd., 2004).

Yıllar içerisinde yapılan çalışmalar sonucu, kısa ve uzun vadeli atık yerleşimine en fazla katkıyı mekanik süreçler ile biyolojik ayrışma mekanizmalarının sağladığı yaygın olarak kabul edilmiştir (McDonald, 2018).

Belediye katı atıklarının toplam yerleşimi, üç sıkıştırılabilirlik mekanizmasının toplamı yoluyla ölçülebilir (Denklem 1.1).

$$S_t = S_b + S_{ms} + S_{mb} \quad (1.2)$$

S_t =Toplam Oturma

S_b =Başlangıç Sıkışması

S_{ms} = Mekanik Sünme (Akma) Sonucu Sıkışma

S_{mb} = Mekanik+Biyolojik Bozunma Sonucu Sıkışma

Bir atık numunesi için zamana karşı tipik bir yerleşim grafiği, genellikle en az üç farklı aşama gösterir. Bu aşamalar;

- Atık içerisinde bulunan sıkışabilir parçacıkların sıkıştırılması/ezilmesi veya başlangıçta boşluklarda bulunan havanın sıkıştırılması sonucu gerçekleşen ani (ilk) oturma,
- Sıkışma miktarını etkileyen genel yapının sertliği ile atığın hidrolik iletkenliği tarafından yönetilen, atığın konsolidasyonundan kaynaklanan birincil oturma,
- Konsolidasyon durduktan ve boşluk basınçları hidrolik dengeye ulaştıktan sonra sabit efektif gerilmede bozunma ve akma nedeniyle devam eden ikincil oturmadır (Powrie, Richards, Velkushanova ve Xu, 2009).

Atık yerleşimi karakteristik olarak düzensizdir (Christensen, 2011). Farklı oturmalar, örtü ve drenaj sisteminde su birikmesine yol açarak, atık içerisine su sızma oranı ve dolayısıyla sızıntı suyu oluşumunu arttırır. Atıkların kavramsal yerleşim davranışı Şekil 1.5'te verilmiştir.

Katı atıklarda birincil oturma 1 ay ile 5 yıl arasında gerçekleşirken, ikincil oturmalar ayrışma hızına bağlı olarak 50 yıl içerisinde gerçekleşmektedir (Aykol, 2008).

Katı atık bertaraf yöntemleri; kompostlaştırma, kontrollü yakma, kaynağında azaltma, yeniden kullanma ile katı atık sahasında depolamadır. Atıklar için bertaraf yöntemi seçiminde, ülkenin ana ekonomik kaynağı, nüfus, arazi alanı vb. faktörlerin doğrudan etkisi bulunmaktadır.

Yakma ve kompostlama yöntemlerinin yüksek teknik içerik ve yüksek maliyet gibi bazı zorlukları bulunması nedeniyle, bu yöntemler çoğunlukla gelişmiş ülkelerde kullanılmaktadır. Düzenli depolama yöntemi ise yüksek elleçleme kapasitesi, düşük teknik içerik ve daha ekonomik bir yöntem olması nedeniyle, dünyada en çok kullanılan bertaraf yöntemidir (Yang, Xu ve Chai, 2018).

Düzenli depolama sahasının faydalı ömrü önemli bir konudur. Bertaraf alanlarının ömrünün erken tükenmesi ve katı atık bertaraf işlemi için ek arazi alternatiflerinin bulunamaması, belediyelerin yaşadığı en yaygın zorluklardan biridir.

Belirli jeolojik koşullar altında, katı atıkların gömülmesi, yüzey ve yeraltı sularının kimyasal ve bakteriyolojik kirliliğine neden olabilir. Kirlilik tehlikesi, bertaraf işlemi yeraltı suyunun nüfuz ettiği ve yakınlarda kuyuların bulunduğu kum veya çakıllı toprak alanlarda gerçekleştirildiğinde artmaktadır. Bu nedenle, depo sahası için arazi seçilirken su kirliliği olasılığı araştırılmalıdır (Bell, 1973).

Düzenli depolama yönteminde, depo sahasına bertaraf edilmek üzere getirilen katı atıklar çevreye minimum zarar verecek şekilde depo sahasına yerleştirilip sıkıştırılmakta ve üzerleri son örtü ile örtülmektedir. Ayrıca depo sahalarında depolamadan kaynaklı oluşan sızıntı suları ve gaz toplanarak çeşitli yöntemler ile bertaraf edilmektedir (Kezer, 2019). Bu yöntem ile atıklar kontrollü şartlar altında ayrışarak inert ve kararlı maddelere dönüşmektedir.

Düzenli depolama işlemi, uygun arazi seçildikten sonra depo tabanının hazırlanması, atıkların serilmesi ve sıkıştırılması, oluşacak sızıntı sularının toplanması, dolan sahanın örtülmesi, oluşan gazın uzaklaştırılması gibi işlemleri kapsamaktadır.

Kentsel katı atık depo sahaları; atık, günlük örtü, ara örtü, astar tabakası, sızıntı suyu toplama sistemi, gaz kontrol sistemi ile bütün bu tabakaların üzerinde yer alan son örtüyü içermektedir (Şekil 1.6).

Düzenli depolama alanlarında, genellikle günlük örtü malzemesi olarak; toprak, kaya ve çakıl ile inşaat ve yıkım atıkları (tuğla, kırma beton vb.) kullanılmaktadır (Medne, Serzane ve Berzina-Cimdina, 2015).

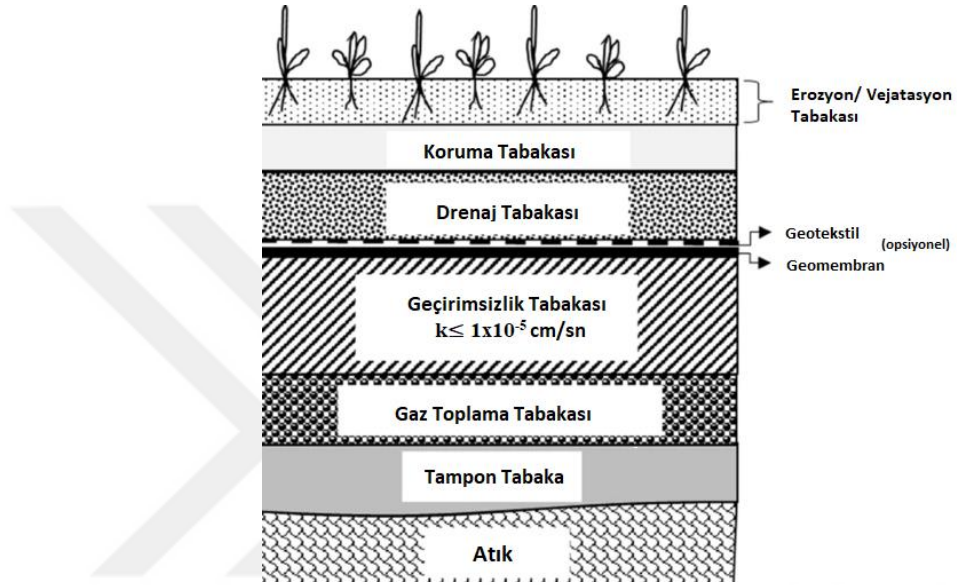
Atık sıkıştırıldıktan sonra, atığın üzerine serilen günlük örtü ile uzun süre düzenli depolama yapılmayacak olan alanlarda günlük örtü üzerine yerleştirilen ara örtü tabakası, yayılma ve sıkıştırma kolaylığı sağlamak ve yarı aerobik depo sahalarında oksijen girişi ile atık ayrışmasına yardımcı olmak amacıyla geçirgen ve gözenekli kumlu topraklardan oluşmalıdır. Son (final) örtü tabakası ise, atık depolama işlemi tamamlandıktan sonra, atığın üzerine serilen ve tercihen düşük geçirgenliğe sahip kilden oluşan örtüdür. Fakat, killer gibi ince dokulu topraklar genellikle verimli olmalarına rağmen yüzeyde su birikintisi oluşması, kolayca kuruyup çatlama gibi yönetim sorunlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, bu tabaka için düşük su tutma kapasitesine sahip kumlu topraklar veya killi topraklar yerine, kuraklık dönemlerinde bile nemi muhafaza etmek için yeterli silt ve kil içeriğine sahip tınlı topraklar kullanılması daha verimli olacaktır (Koerner ve Daniel, 1997).

Atık sahalarda, atıkların günlük olarak 15 cm'ye kadar sıkıştırılmış toprakla kaplanması gerekmektedir (Medne vd., 2015). Günlük örtü toprakları genellikle depolama sahasındaki toplam katı atık hacminin %20-30'u kadar alan kaplamaktadır. Son örtü için ise en az 2 ft (60 cm) yüksekliğinde sıkıştırılmış toprak kullanılması önerilir. Tamamlanan depolama sahalarının ağaçlandırılacak bölgelerinde ise 3 ft veya daha fazla yükseklikte sıkıştırılmış toprak kullanılması gerektiği bulunmuştur (Sorg ve Hickman, 1970).

Nihai (son) örtü sisteminin birincil işlevi, kemirgenlerin ve sineklerin üremesini, yağışın atıklara girişini ve zararlı gazların çöp sahasından atmosfere geçişini önlemektir. Çoğu atık depolama sahasında üst örtü sistemi, saha yerleşimi hesaba katıldıktan sonra, yüzey suyu akışını teşvik etmek için minimum %2 ila %5 eğime sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. %2'den daha düz olan eğimlerde, yerel yerleşimlerin meydana gelmesi, yüzeyde su birikimine (göllenme) neden olabilir (U.S. EPA, 2004).

Depolama sahası final örtüsü için asgari şartlar, örtünün bir infiltrasyon tabakasına ve bir erozyon tabakasına sahip olmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte, örtü, saha ve iklim koşullarına, atık bileşimine bağlı olarak birkaç farklı katmana sahip olabilir (Chetri ve Reddy, 2021). Kentsel katı atık depolama alanları için tipik bir son örtü sistemi Şekil 1.10'da gösterildiği gibidir.

Sızıntı suyu toplama sistemleri, depo tabanı geçirimsizlik katmanı üzerinde biriken sızıntı suyunun borular yardımı ile toplanarak depo sahasından uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Tipik bir sızıntı suyu sistemi; drenaj tabakası (kum ve çakıl gibi yüksek geçirgenliğe sahip agrega malzemeler), drenaj tabakası içine yerleştirilen delikli boru ağı, boru tıkanmasını engellemek için kullanılan agrega veya jeotekstil filtre katmanı ile toplanan sızıntı suyunu depo sahasından uzaklaştıran bir ana iletim hattından oluşur (Öztemur, 2007).



Şekil 1.10 Kentsel katı atık depo sahası tipik son örtü sistemi (Chetri ve Reddy, 2021)

Kentsel atığın anaerobik bozunması sonucu, metan (CH₄) ve karbon dioksit (CO₂) gazları ile çok daha küçük miktarlarda başka gazlar üretilir. Metan gazı, genel olarak depolama sahasının çevresine yakın yerlerde, bazı durumlarda ise depo çevresinden önemli mesafede uzak yerlerde, kokulu, toksik, aşındırıcı, yanıcı ve hatta patlayıcı konsantrasyonlarda birikebilmektedir (EPA, 2004). Depolama sahasının üzeri örtülmeden önce, atık sahasına yerleştirilen havalandırma ve gaz toplama sistemleri, sahada ürelen gazın etkin bir şekilde toplanması ve tesisten uzaklaştırılmasını sağlamaktadır.

Tamamlanan düzenli depolama sahalarının, kapatıldıktan sonra kanunen 30 yıl boyunca izlenmeleri gerekmektedir (Boda, 2002).

1.1.5 Kentsel Katı Atık Düzenli Depo Sahaları Stabilite Problemleri

Atık depolama sahalarındaki dengesizlik fenomeni, sahaların eğimli yapıları ve atığın gevşek ve düşük mukavemetli bir malzeme olması nedeni ile sıkça görülen bir durumdur.

Depo sahası stabilitesini etkileyen faktörler iç ve dış faktörler olmak üzere ikiye ayrılabilir. İç faktörler, atığın mühendislik özellikleri (atık kompozisyonu, fiziksel özellikler, atık kayma mukavemeti) ile atık gövdesinin yapısal özelliklerini (atık gövdesindeki yapısal düzlemler, sızıntı suyu ve gaz toplama sistemleri) kapsar. Dış faktörler ise mühendislik faaliyetleri kaynaklı topuk kazı işlemleri, sızıntı suyu devridaimi, deprem, yağış gibi dinamik etkilerdir (Huang ve Fan, 2016).

Depo sahalarında meydana gelen istikrarsızlık problemleri, çoğunlukla drenaj eksikliğinden dolayı oluşan yüksek sızıntı suyu seviyesiyle ilişkilidir (Batali, Carastoian, Popa ve Pantel, 2017)

Atık sahalarda aşırı yağış, yeterli sıkıştırma işleminin yapılmaması, kontrolsüz yükleme, yangın, depolanan atık yüksekliği ve şev eğiminin olması gerekenden daha yüksek ve dik olması gibi nedenlerden dolayı şev göçmeleri yaşanmakta, bu durum can kaybı ve maddi kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca, tabanı düz olmayan düzenli depolama sahaları, depo sahasındaki stresi arttırarak son kaplama sisteminde (final örtüsü) kırılma ve/veya çatlaklara, dolayısıyla da stabilite problemlerine yol açmaktadır.

Depolama sahası stabilite problemleri, depolama sahasının inşaatı sırasında, doldurma sırasında veya depolama sahasının kapatılmasından sonra meydana gelebilmektedir. Atık şevlerinde stabilite problemleri meydana gelmeden, atık dolgularının hangi yüksekliğe kadar yapılabileceğinin hesaplanması, atık sahaların tekrardan inşaat sahası olarak kullanılacak olmaları durumunda ise, yeniden oluşturulacak olan şev eğimlerinin belirlenmesi açısından şev stabilite analizleri büyük önem taşımaktadır (Kezer, 2019).

Literatürde yapılan bazı çalışmalar sonucunda, şev stabilite analizleri ile kritik eğim, şev yükseklikleri ve sızıntı suyu miktarının belirlenerek atık sahaların daha güvenli bir şekilde işletilebileceği, ayrıca atık için uygun kayma mukavemet parametrelerinin seçiminin şev stabilite analizlerinde kilit bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır (Kezer, 2019).

Güvenli bir depo sahası inşaatı için, sızdırmazlık ve drenaj sistemi işlevlerinde kullanılan kaplama sistemleri ile atık gövdesinin stabilitesinin sağlanması gerekmektedir. İlgili

gerilmelerin ve streslerin dikkatli bir şekilde tahmin edilmesi, güvenli bir depolama sahası inşaatı için bir temel teşkil eder.

Atık hareketleri, jeotekstil koruma katmanlarında delinmelere, jeokompozit drenaj sistemlerinde hasar ve süreksizliklere dolayısıyla da atık gövdesi ile gövdenin sınırlandırdığı kaplama sisteminde büyük ölçekli stabilite problemlerine neden olabilir (Dixon ve Jones, 2005).

Atık katmanları ve düşük geçirgenlikli örtü topraklarının yerleşiminin, atık dolgusu içerisindeki sızıntı suyu akışının engellenmemesi için dikkatlice değerlendirmesi gerekmektedir. Atık dolgularının dikey yönde genişlemesi ve sıkıştırma ağırlığı nedeniyle atık dolgudaki gaz ve sıvı akışı azalabilmektedir (Bonaparte, Bachus ve Gross, 2020).

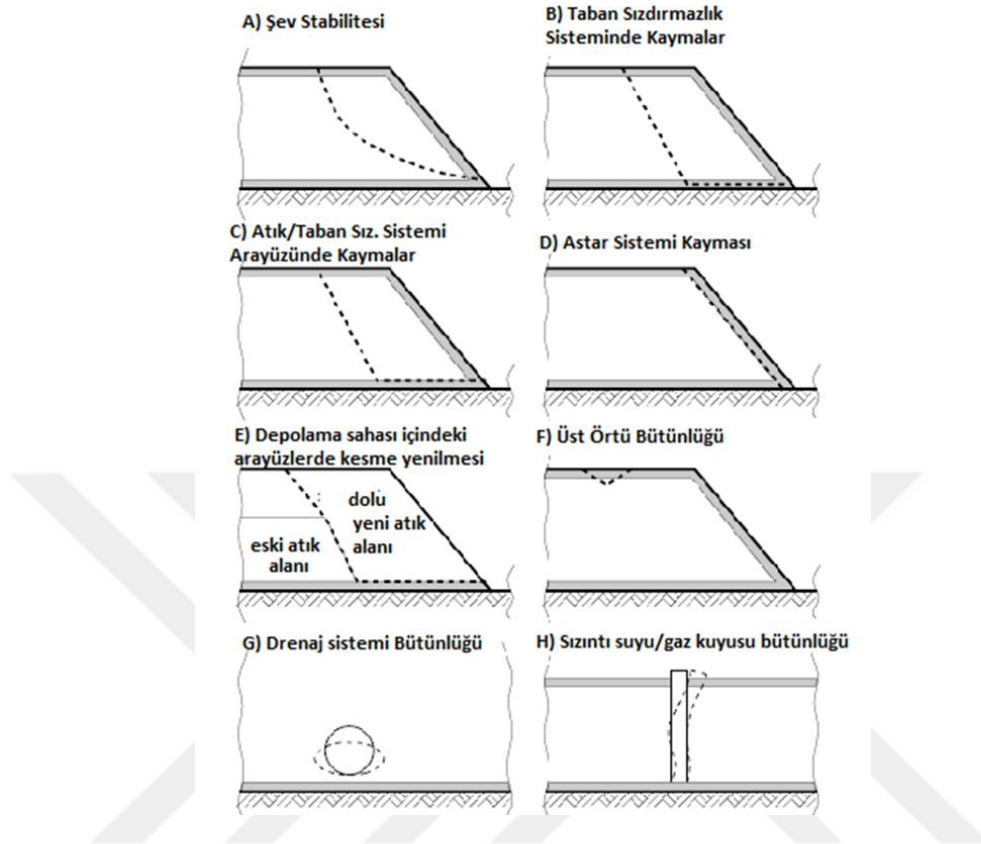
Sıcaklık ve nem oranının belirleyici rol oynadığı atık ayrışma prosesi 15 ila 25 yıl arasında tamamlanmakta, atık ayrışması sonucu oluşan sızıntı suyu ve gaz miktarı özellikle ilk 2 yıl içerisinde en yüksek değere ulaşmaktadır (Aykol, 2008). Ek olarak, atık biyolojik bozunmasını hızlandırmak için atık sahalarda yapılan sızıntı suyu devridaiminin uygun şekilde yönetilmemesi; atığın doygunluğa ulaşması, atık dolgusunda su birikintileri oluşması, atık geçirgenliğinin azalması, gaz basınçlarının birikmesi vb. durumlar stabiliteyi olumsuz etkileyecek durumlar yaratabilir. Atıkları doyurmamak ve yüksek piezometrik seviyeler oluşmasına engel olmak için devridaim oranlarının iyi ayarlanması gerekmektedir (Bonaparte, Bachus ve Gross, 2020).

Depo sahalarında meydana gelen stabilite hataları temel olarak, sadece atıkları içeren kayma mekanizmaları ile ek olarak astar sistemini içeren kayma mekanizmaları olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Depolama sahasının mühendislik yapısı sebebiyle, özellikle kaplama sistemini içeren kayma mekanizmalarından kaçınmaya özen gösterilmelidir.

Halihazırda depo sahalarında meydana gelen başlıca eğim problemleri;

- İç astar sistemi boyunca hareket nedeniyle öteleme hatası,
- Son kapak sistemi göçmesi,
- Atık yığınının dönel göçmesi,
- Depolama sahası, astar ve temel tabakası boyunca dönel göçmeler,
- Astar sistemi bileşenlerinin ankraj hendeklerinden çıkması,
- Yan duvar eğimi ve taban göçmesidir (Omari ve Boddula, 2012).

Şekil 1.11'de atık sahalarda meydana gelen bazı potansiyel kayma modları gösterilmektedir.



Şekil 1.11 Atık sahalardaki tipik kayma modları (Krase, 2008)

KontROLSÜZ düzenli depo sahalarda (açık çöplükler), esas olarak atık gövdesinde akma tipi kaymalar meydana gelmektedir. Kontrollü (sıhhi) depolama sahalarda ise göçme genellikle yüksek su muhtevası nedeni ile örtü tabakası boyunca oluşan statik sıvılaşma nedeni ile gerçekleşir (Huang ve Fan, 2016).

Kölsch (aktaran Pulat ve Aksoy, 2017) 1995'te kentsel katı atıklar için kayma mekanizmasını 4 aşamada özetlemiştir. İlk aşamada sadece sürtünme kuvvetlerinde artış olurken; ikinci aşamada artan gerilme ve deformasyonlar, atık içerisindeki lifli malzemeler üzerinde gerilmelere neden olmakta ve bu durum çekme kuvvetlerini ortaya çıkarmaktadır. Üçüncü aşamada lifli malzemelerin çekme dayanımlarının aşılması sonucunda malzemelerin yapılarında kayma ve kopmalar meydana gelmektedir. Dördüncü ve son aşamada ise kayma gerilmesi azalmakta ve sadece sürtünme kuvvetlerinden oluşmaktadır.

1.1.6 Şev Stabilite Analiz Yöntemleri

Hızlı kentleşme sonucu çevre dostu bir şekilde bertaraf edilmesi gereken kentsel katı atık üretimindeki artış ve atık bertarafı için yasal düzenlemeleri karşılayan uygun araziyi temin etmenin zorluğu nedeniyle, atıklar, mevcut depolama sahalarında öngörülen depo sahası alan ve yüksekliğinin üzerinde depolanmaya başlanmıştır. Depo sahası şev yüksekliği ve eğimindeki artışlar, beraberinde şev stabilitesi ile ilgili endişeleri de arttırmaktadır.

Şev stabilitesinde meydana gelebilecek bozuklukların ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilmesi nedeniyle, şev stabilitesi analizleri geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularından biridir.

Doğal ve yapay tüm şevlerin kendi ağırlıkları ve/veya uygulanan yüklerin etkisi altında göçmeye karşı stabiliteleri, çeşitli sayısal analiz yöntemleri ile analiz edilmektedir. Uygulamada bazı farklılıklar bulunmasına rağmen bu yöntemler arasındaki ortak özellik, bilinen veya kabul edilen bir kritik kayma yüzeyinde kayma kütesinin dengesinin araştırılmasıdır. Geleneksel stabilite analizi, kritik kayma düzlemleri boyunca depo sahalarının stabilitesini ve deformasyonlarını tahmin edebilmesine rağmen, kentsel katı atıklarda meydana gelen zamana bağlı gerçekleşen sürünme (akma) ve biyolojik bozunma gibi mekanizmaların etkileri nedeniyle, zamana bağlı stres ve deformasyon tepkisini hesaplama kabiliyetinden yoksundur (Babu ve Ering, 2017).

Barajların eğimleri dışındaki şevler için tipik minimum kabul edilebilir güvenlik faktörü değerleri, inşaat sonu ve çok kademeli yükleme için yaklaşık 1,3; normal uzun vadeli yükleme koşulları için ise 1,5 olarak öngörülmüştür (U.S Army Corps of Engineers, 2003).

1.1.6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, inşaat mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi, gerilme-şekil değiştirme, yükleme, konsolidasyon, taşıma gücü, akım ağı, zemin dinamiği konularında ve malzeme çeşitliliği olan durumlarda kullanılan, gerçeğe yakın sonuçlar veren bir sayısal analiz yöntemidir. Ayrıca herhangi bir mühendislik projesi için tasarım aşamasında çeşitli alternatiflerin kullanılmasına olanak tanıyarak en uygun ve ekonomik çözümü elde etmeyi sağlar (Töremiş, 2003).

Analizlerde, eğim kararsız hale gelene kadar mukavemet parametrelerinin kademeli olarak azaltıldığı yinelemeli bir yaklaşım (Mukavemet Azaltma Yönetimi Prosedürü)

kullanır. Güvenlik değeri, taban mukavemetinin, eğimin kararlı olduğu en düşük mukavemete bölünmesiyle elde edilir. Eğimlerin minimum stabilite faktörünü belirlemek için, elastisite modülü (E) ve poisson oranının (ν) sabit olduğu varsayılır. Kohezyon (c) ve sürtünme açısı (ϕ) değerleri aynı anda azaltılarak, güvenlik faktörü ıraksama noktasında belirlenir (Batali vd., 2017). Bu yaklaşımda eğimin tüm kütlesi, oluşturulan ağ yardımıyla sınırlı sayıda elemana aktarılır.

Sonlu elemanlar yaklaşımı, homojen olmayan topraklara, düzensiz geometriye ve keyfi su akış modeline sahip eğimleri analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Bu yöntemin sahip olduğu avantajlar arasında, analizlerde dilimler arasındaki kuvvetlerin büyüklüğü ve yönü ile şev kayma yüzeyi konumu ve şekli için ilgili kabuller yapılmasına gerek duyulmaması bulunmaktadır (Kezer, 2019). Bu yöntem başarısızlığa ulaşıncaya kadar küresel dengeyi korur. Göçme, zeminin kesme dayanımının kesme gerilmelerine karşı koyamadığı bölgelerinde doğal olarak meydana gelir (Griffiths ve Lane, 2001).

Sonlu elemanlar yöntemi gerçekçi bir göçme mekanizması simüle ederek en düşük güvenlik sayısını ve göçme davranışını bulmayı sağlar. Birçok farklı methodla karşılaştırıldığında bu yöntem saha koşullarını daha gerçekçi sunabilir (Batali vd., 2017).

Sahadaki aşamalı yükleme ve kazı durumlarının modellenmesi için analizlerin adım adım yapılması gerekmektedir. Analizlerdeki dolgu yapımı ve zemin kazı durumlarında her aşamada değişim gösteren model geometrisi ve her yükleme aşamasında değişen gerilmeler sonlu elemanlar ağına eleman eklenmesi veya kaldırılması ile sürekli olarak revize edilebilmektedir (Kezer, 2019). Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile zemin ortamının başlangıç gerilme durumunu gerçekçi bir biçimde tanımlamak mümkündür. Gerçekçi sıkışabilirlik verilerinin kullanılması durumunda, uygulanan farklı gerilim seviyelerinde her kademe oluşacak olan deformasyonlar hakkında da bilgi edinilebilir (Griffiths ve Lane, 2001).

Fakat sonlu elemanlar analizi sonucunda, limit denge yönteminde olduğu gibi belirgin bir kayma yüzeyi elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır (Keleşoğlu, 2016). Ek olarak, analizi gerçekleştirmek için gerekli olan atık gerilim-gerinim parametrelerini elde etmek, limit denge analizinde ihtiyaç duyulan dayanım parametrelerinin elde edilmesinden daha zordur (Omari ve Boddula, 2012).

1.1.6.2 Limit Denge Yöntemi

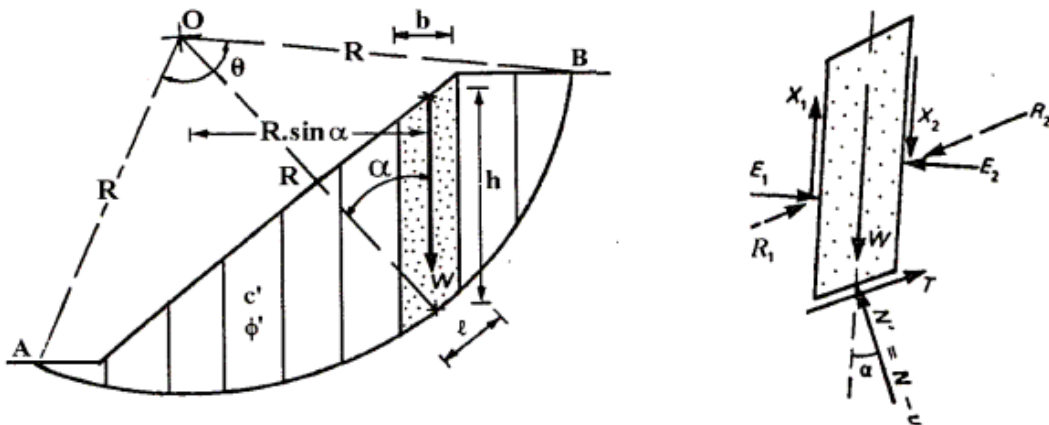
Limit denge yöntemi, itici kuvvetlerin ve/veya momentlerin, toprak kütlesi içinde hareket eden malzeme kuvvetinden gelen direnç kuvvetleri ve/veya momentlerle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

Yöntemde, kayma yüzeyi tanımlandıktan sonra yüzey içerisindeki zemin kütlesine etkiyen kuvvet ve/veya momentlerin statik denge durumu baz alınarak zemin kayma mukavemeti hesaplanır. Hesaplamalar bütün potansiyel kayma yüzeyleri için tekrarlanarak kritik kayma yüzeyi belirlenir. Şev güvenlik sayısı kritik kayma yüzeyi baz alınarak hesaplanır.

Mevcut limit denge yöntemleri, zeminin gerilme dağılımı yolu ile eğim modelini analiz eden sonlu elemanlar analizinin aksine kırılma yüzeyi boyunca kesme mukavemetini belirlemek için dilim arası kuvvetler ve Mohr-Coulomb prensibi dahil olmak üzere çeşitli faktörleri hesaba katar.

Bu yöntemde, potansiyel bir kayma yüzeyi boyunca mevcut kesme dayanımı, bir güvenlik faktörü ile azaltılır, bu sayede kayan yüzey ve serbest yüzeyde bulunan kütle bir denge durumundadır (Omari ve Boddula, 2012).

Limit denge yöntemlerinin birçoğu kayma dairesinin dilimlere ayrılması esasına dayanmaktadır. Bazı yöntemler ise hem dilim yöntemini hem de sonlu elemanlar yöntemini birlikte kullanmaktadır. Şekil 1.12'de potansiyel kayma yüzeyi üzerinde yer alan zemin kütlesinin bir dilimine etki eden kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 1.12 Potansiyel kayma yüzeyi ve tek bir dilime etkiyen kuvvetler

Şekil 1.12'de gösterilen dilimin statik ağırlığı W;

$$W=\gamma.h.b \quad (1.3)$$

Normal kuvvet, N;

$$N= W. \text{Cosa} \quad (1.4)$$

Dilimin alt yüzeyine etki eden efektif normal kuvvet N',

$$N'= N-u. \text{Ł} \quad (1.5)$$

Dilim taban yüzeyinde kayma kuvveti T,

$$T=W.\text{cosa} \quad (1.6)$$

denklemleri ile elde edilmiştir. Bu denklemlerde bulunan γ =birim hacim ağırlığı, h=dilim üst orta noktası ile alt orta noktası arasındaki düşey yönlü mesafeyi, b= seçilmiş olan dilimin kalınlığını, a=dilimin alt yüzeyinin orta noktası 'O' ile kayma merkezini birleştiren hattın düşeyden itibaren tanımladığı açıyı, u=boşluk basıncını, Ł ise dilim yayının uzunluğunu ifade etmektedir.

Ek olarak, Şekil 1.12'deki dilime etkiyen kuvvetlerden R1, R2, incelenen dilimin yanındaki dilimlerden etkiyen bileşke kuvvetleri; E1, E2, dilimin her iki yanına etkiyen dik kuvvetleri; X1, X2 ise dilimin her iki yanına etkiyen kesme kuvvetlerini temsil etmektedir.

Güvenlik sayısı Denklem 1.6'da ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$GS=\frac{\sum(C'+\sigma'.\tan\phi).\text{Ł}}{\sum Wsina} \quad (1.7)$$

En sık kullanılan limit denge yöntemleri;

- Fellenius (İsveç Dilim Metodu) yöntemi,
- Basitleştirilmiş Bishop yöntemi (BSM),
- Spencer yöntemi,
- Basitleştirilmiş Janbu ve Genelleştirilmiş Janbu yöntemleri,
- Lowe ve Karafiat, Düzeltilmiş İsveç Yöntemi gibi kuvvet dengesi yöntemleri ile,
- Morgenstern-Price yöntemidir (Fredlund, Krahn ve Pufahl, 1981).

Güvenlik faktörünü elde etmek için kullanılacak statik elemanlar, iki yöndeki kuvvetlerin ve seçilen bir dönme noktası etrafındaki momentlerin toplamıdır. Statiğin bu

unsurları, göçme kriterleri ile birlikte şev stabilite probleminin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bunun için ya ek fizik unsurları ya da bazı kuvvetlerin yön veya büyüklüğü ile ilgili varsayım yapılması gerekmektedir (Fredlund, Krahn ve Pufahl, 1981).

Bu çalışmada açıklanan tüm limit denge yöntemleri, ikinci prosedürü kullanarak, dilimler arası kuvvetlerle ilgili varsayımda bulunmaktadır.

Fellenius Yöntemi

Fellenius (1936) tarafından geliştirilen bu yöntem, kayma dairesinin düşey yönde küçük parçalara ayrılarak incelendiği dilim tekniğinin kullanıldığı ilk yöntemdir. Dilim yönteminde potansiyel kayma kütlesi birkaç dikey dilime bölünür ve her dilimin dengesi, kuvvetler ve momentler açısından belirlenerek kayma kütlesi için minimum güvenlik faktörü belirlenir. Fellenius yönteminde, her dilimin sağ ve solundaki dilimler arası normal ve kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir. Bu basitleştirilmiş varsayımlar sayesinde, el hesaplamaları kullanarak bir güvenlik faktörünün hesaplanmasını mümkün kılınmıştır. Fakat, yapılan bu varsayımlar nedeniyle bu yöntemin kullanıldığı analizlerde güvenlik sayıları daha düşük değerlerde bulunabilir.

Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi

Bishop (1955) dilimler arası normal kuvveti de hesaplara dahil ederek, daha gerçekçi güvenlik sayıları hesaplayan Basitleştirilmiş Bishop yöntemini geliştirmiştir. Basitleştirilmiş Bishop yöntemi, dikey dilimler arası kesme kuvvetinin olmadığını, bu nedenle, dilimler arası kuvvetin yatay olduğunu varsayar. Moment dengesini sağlar, ancak kuvvetlerin dengesini sağlamaz (Omari ve Boddula, 2012). Bu yöntem Fellenius yönteminin aksine dilimler arası normal kuvveti dikkate alır ve çoğunlukla dairesel kesme yüzeyleri için geçerlidir (Aryal, 2006).

Spencer Yöntemi

Spencer yöntemi tüm denge denklemlerinin sağlandığı bir yöntemdir. Spencer (1967)'nin önerdiği, düşey-yatay kuvvet ve moment dengelerinin üçünü de sağlayan bu yaklaşım sayesinde daha gerçekçi güvenlik sayıları hesaplanabilmektedir. Bu yöntemin bir diğer özelliği, dilimler arası normal ve kesme kuvvetlerinin sabit bir oran kullanılarak hesaplara dahil edilebilmesi ve dairesel olmayan kayma yüzeylerine de uygulanabiliyor oluşudur.

Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi

Bu yöntemde, yatay kuvvetler denge denklemi kullanılarak güvenlik faktörü elde edilmektedir. Yöntem, analizlere dilimler arası kuvvetleri dahil etmez, fakat fazla tahmin edilen güvenlik sayısının nihai değerini elde etmek için kohezyon, içsel sürtünme açısı ve kırılma yüzeyinin fonksiyonu olan bir $f_0 > 1$ düzeltme faktörü kullanılır. Nihai güvenlik sayısı önceden hesaplanmış olan güvenlik sayısının bu değer ile çarpılması sonucu bulunur. Bu düzeltme faktörünün daha çok, az eğimli şevler için kullanılması gerekmektedir (Tekin, 2011).

Genelleştirilmiş Janbu Yöntemi

Genelleştirilmiş Janbu yöntemi, her dilime bir gerilim dağılımı uygular. Yöntem, hem dilimler arası kuvvetleri dikkate alır, hem de dilimler arası kuvvetler arasında bir ilişki belirlemek için bir itme hattını varsayar. Yöntemde bir itme çizgisinin (dilimin her iki tarafındaki dilimler arası kuvvet bileşkelerinden geçen çizgi) varsayılması ve her dilimin tabanı etrafında momentlerin alınması, dilimler arası kuvvetin büyüklüğünü belirlemeye olanak sağlar. Bu yaklaşım, potansiyel kayan kütle önemli stres konsantrasyonlarına sahip olmadığında iyi çalışmaktadır. Bu yöntem, diğer limit denge yöntemlerine kıyasla gelişmiş bir yöntemdir.

Morgenstern-Price Yöntemi

Morgenstern-Price (1965), Spencer yöntemindeki gibi dilimler arası kuvvetlerin oranını sabit kabul eden benzer bir yöntem geliştirmiş ve dilimler arası normal ve kayma kuvvetlerini farklı kuvvet fonksiyonları ile tanımlamıştır (Keleşoğlu, 2016). Ayrıca bu oran, dilimin geometrik konumuna göre değiştirilebilmektedir (Tekin, 2011). Morgenstern-Price gibi hem dilimler arası kayma hem de dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alan bir yöntem daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 1.12'de Morgenstern-Price yönteminde dilimlere etki eden kuvvetler ve etki yönleri gösterilmektedir. Tablo 1.1, sıklıkla kullanılan limit denge yöntemlerini ve varsayımlarını sunmaktadır (Canarak ve Yanmaz, 2014; Johari ve Kalantari, 2016; Omari ve Boddula, 2012).

Tablo 1.1 Limit denge yöntem ve kabulleri

Yöntem adı	Kayma yüzeyinin şekli	Sağlanan denge koşulları	Dikkate alınan dilimler arası kuvvetler	Dilimler arası kuvvet varsayımı
Fellenius	Dairesel	Moment	-	-
Bishop	Dairesel	Moment	Dilimler arası normal kuvvet	Yatay
Basitleştirilmiş Janbu	Dairesel olmayan	Kuvvet	Dilimler arası normal kuvvet	Yatay
Genelleştirilmiş Janbu	Dairesel olmayan	Moment ve kuvvet	Dilimler arası normal kuvvet	Yatay ve düşey
Spencer	Dairesel ve daireysel olmayan	Moment ve kuvvet	Dilimler arası normal kuvvet ve kesme kuvveti	Yatay ve düşey
Morgenstren-Price	Dairesel ve daireysel olmayan	Moment ve kuvvet	Dilimler arası normal kuvvet ve kesme kuvveti	Yatay ve düşey

Limit denge yöntemlerinin zayıf yanı Mohr-Coulomb gibi ortamdaki ötelenmeleri hiç göz önüne almayan elasto-plastik yenilme kriterlerinden yola çıkmasıdır. Birçok tip yamaç ve şevde duraylılık kaybı, hareket mertebesi bazen metrelere varan önemli hareketlerden sonra belirlenebilmektedir (Tek ve Arel, 2017). Ayrıca yöntem, gerinim veya yer değiştirmeleri dikkate almaması nedeniyle, gerinim yumuşatıcı malzemeleri hesaba katmaz ve aşamalı göçme mekanizmalarını modelleyemez (Zekkos, Vlachakis ve Athanasopoulos, 2014).

1.2 Tezin Amacı

Kentsel katı atık depo sahaları, kentsel katı atıkların karmaşık mühendislik özellikleri ve dış faktörlerin etkisi altında kolayca kararsız hale gelebilmektedir. Bu yüksek lisans tezinin temel amacı, farklı atık katman kalınlıkları ve atık katmanlarında birikmiş olan sızıntı suyu seviyeleri ile atık mukavemet parametrelerinin (kohezyon, içsel sürtünme açısı) atık depo şev stabilitesi üzerindeki nicel etkilerini araştırmaktır.

Katı atık depo sahalarında depo alanının efektif bir şekilde kullanılarak, atığın en yoğun şekilde depolanabilmesi, saha kapatıldıktan sonra üzerine inşaa edilecek yapılar ile saha içerisindeki sistemlerin güvenliğinin sağlanabilmesi için atık oturma miktarlarının bilinmesi önemlidir. Bu nedenle, ek olarak çalışmada atık elastisite modulünün atık oturma miktarına olan etkisi de incelenmiştir.

Literatürdeki çalışmaların çoğu, kentsel katı atığın drenajlı koşullar altındaki davranışını incelemiştir. Dünyanın bazı bölgelerinde atığın yüksek başlangıç doygunluk derecesine sahip olması, atığın drenajsız koşullar altında da davranışının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Plaxis 2D programında sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiş olan analizlerde hem drenajlı hem drenajsız koşullar altında çözümler yapılmış ve sonuçlar güvenlik sayıları, kayma düzlemleri ve oturma miktarlarına göre değerlendirilmiştir. Analizler ayrıca konsolidasyona izin verilen ve izin verilmeyen durumlar için yinelenmiştir. Son olarak, Plaxis LE programında limit denge analiz yöntemi ile benzer analizler gerçekleştirilerek analiz sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışma, yalnızca kısa vadede şev stabilite ve atık davranışı ile ilgilidir. Katı kütlenin biyolojik bozunması bu nedenle hesaba katılmamış; katı atığın diğer fiziksel ve mekanik parametrelerinin sabit olduğu zaman ve derinlikle değişmediği varsayılmıştır. Kullanılan analiz programları temelde toprak için tasarlanmış olsa da bu çalışmanın amacına da uygun bulunmuştur.

1.3 Hipotez

Kentsel katı atıkların düzenli depolama tesislerine yerleştirilme yöntemi ile atıkların mukavemet özelliklerinin, atık saha stabilitesi üzerindeki etkisi büyüktür. Atıkların sahaya kademeli şekilde yerleştirilmesi ve atık sahalarda depolanan kentsel katı atıkların yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları atık sahalarda şev stabilitesini olumlu yönde etkilemektedir. Atık saha operasyonu ile sahalarda sızıntı suyu drenajına izin verilip verilmemesi durumu, şev güvenlik faktörünü etkileyen en önemli etmenlerdendir. Elastisite modulünün şev güvenlik faktörü üzerinde etkisi olmamasına rağmen depo sahalalarında oturma miktarı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Sahalarda atıkları kademeli olarak üzerleri günlük örtü tabakası ile örtülecek şekilde yerleştirmenin, doğru operasyonel faaliyetler uygulayarak katmanlardaki su seviyesini düşük seviyelerde tutmanın ve atık mukavemet değerlerini arttırmanın güvenlik faktörünü yükselterek, göçmelerin önüne geçileceği, bu sayede sahalarda can ve mal güvenliğinin sağlanmasına katkıda bulunabileceği düşünülmüştür.

Atık sahasının güney-batı kesiminde yer alan 4-4 no'lu kesit ise, 60'lı yıllardan 1995 yılına kadar aktif olan ve herhangi bir geosentetik material ve özel koruma tabakası içermeyen en eski çöp sahasını temsil etmektedir.

Çalışmada; alt örtü koruma katmanına sahip olması, 1-1 kesiti ile karşılaştırıldığında daha dik bir eğim sunması nedeniyle 90'lı yıllardan beri aktif olan ve yeni sayılabilecek 2-2 no'lu kesit kullanılmıştır.

Saha kesiti ve saha stratigrafisi hakkındaki bilgiler Trivellato (2014)'e ait tez çalışmasından elde edilmiştir. Depo sahası genişletme projesi için gerçekleştirilmiş olan jeolojik araştırmalar ve mevcut bilgilerin dökümantasyonu ile elde edilen Este belediye katı atık tesisinin saha stratigrafisine göre, zemin seviyesinden itibaren sırasıyla; yaklaşık 3,60-4,50 metre derinliğe kadar silt ve kil katmanları; 3,60-4,50 metreden 6,90 metreye kadar değişen kalınlıkta ince siltli kum tabakası; bu tabakanın altından başlayarak yaklaşık 14 metre derinliğe kadar turba katmanları (5,00-8,60 m) ile birlikte yoğun kil ve silt tabakası; 14-20 metre aralığında ise gri ince siltli kil tabakası bulunmaktadır. Sahada numune almanın zorluğu nedeniyle literatür verilerinden yararlanılarak oluşturulmuş olan malzeme parametre özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Este düzenli depolama sahası malzeme parametre özellikleri (Trivellato, 2014)

Materyal	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Doygun Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Kohezyon (kPa)	Elastisite Modülü (kPa)	Poisson Oranı
Sıkıştırılmış kil	16	18	29,2	24	20000	0,4
Çakıl	18	20	28,3	0	75000	0,3
Kumlu silt+ kil ve siltli katmanlar	17	18	20,4	4	12000	0,4
İnce siltli kum	16	19	24,7	0	15000	0,3
Turba katmanları+ kil ve siltli katmanlar	16	18	20,4	4	12000	0,35
Gri ince siltli kum	16	20	33,8	0	20000	0,3

2-2 no'lu kesitin alt astar sistemi (Şekil 2.2) doğal kil tabakası, geotekstil astarlar ile drenaj tabakasından oluşmaktadır. Temel zeminin üzerinde bulunan iki adet minimum 50 cm kalınlığındaki sıkıştırılmış doğal kil tabakaları birbirlerinden 2 mm kalınlığında HDPE geomembran astar sistemi ile ayrılmaktadır. Geomembran üzerinde bulunan ikinci kil

Tablo 2.2’de Plaxis 2D programında sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile gerçekleştirilen analizlerde kullanılan atık parametreleri listelenmiştir. Atık kuru birim hacim ağırlığı (γ_d), atık doymun birim hacim ağırlığı (γ_s) ile poisson oranı (ν) değerleri için Trivellato (2014) tez çalışmasındaki değerler kullanılmıştır. İçsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), elastisite modülü (E) ile permeabilite (k) değerleri ise literatür çalışması sonucu elde edilmiş değerlerdir.

Tablo 2.2 Çalışmada kullanılan atık parametre değerleri

Malzeme	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E (kPa)	ν	k (m/sn)
Atık	9	10	15 25 35	10 20 30	300 600 1200	0,33	10 ⁻⁵

2.3 Sayısal Analizlerde Kullanılan Sonlu Eleman Yazılımı Özellikleri

Geoteknik problemlerinin analizi aynı anda birçok karakteristik özelliğin göz önünde bulundurulması gerektiği için zordur. Yıllar içerisinde problemlerin çözümü için genelde diferansiyel denklemlerden oluşan ve çözüme ulaşmak için bazı kabuller yapılmasını gerektiren teoriler üretilmiştir (Töremiş, 2003). Bu yaklaşımların çoğunda pratik durumlar için yeterli çözüm sağlanmasına karşın, geoteknik uygulamalarda, zeminlerin ve/veya kayaların doğrusal olmayan, zamana bağlı ve anizotropik davranışları, geometrileri içerisindeki süreksizlikler, malzeme özelliklerinin zaman ve ortama göre değişimi vb. karmaşık özellikler nedeniyle problemler için gerçekçi çözümler sağlanamamıştır. Bu nedenle, bilgisayarların da gelişmesiyle birlikte problemlerin analizinde karakteristik faktörlerin birçoğunu aynı anda göz önüne alan nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler sonlu elemanlar yöntemi ile limit denge yöntemidir. Son yıllarda şev stabilitesi analizi için yukarıda bahsi geçen analiz yöntemlerinin kullanıldığı bir dizi tasarım yazılım paketi geliştirilmiştir. Bu yazılım

programlarından biri de geoteknik mühendisleri tarafından sıklıkla kullanılan Plaxis programıdır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler için Plaxis 2D V21 versiyonu; limit denge yöntemi ile gerçekleştirilen analizler için ise Plaxis 2D LE V21 versiyonu kullanılmıştır.

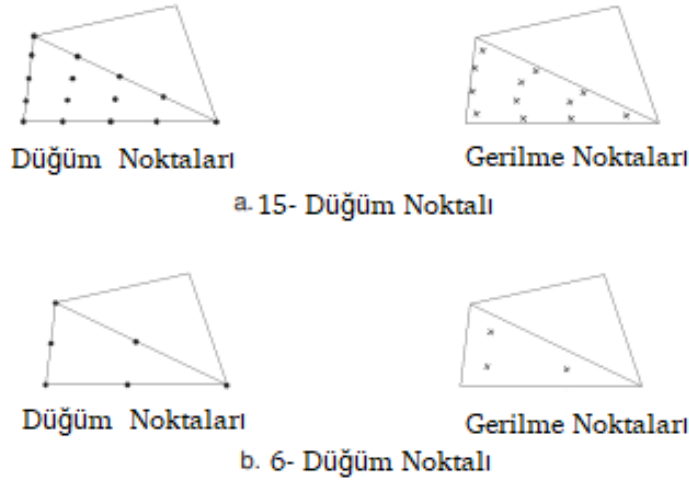
2.3.1 Sonlu Elemanlar Analizlerinin Gerçekleştirildiği Plaxis 2D Yazılım Programı

Plaxis programı ilk olarak 1987 yılında Hollanda Delf Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerinde bulunan nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi sayesinde kolay bir şekilde analiz edilmesi için tasarlanmış olup, zamanla geoteknik mühendisliği uygulamalarında ihtiyaç duyulan zemin-yapı etkileşimi, taşıma gücü, zemin dinamiği, gerilme-şekil değiştirme, konsolidasyon vb. konularda da kullanılabilir ve pratikte uygulanabilir sonuçlar verecek şekilde geliştirilmiştir (Natur, 2018).

Programın kullanımı sırasında öncelikle model geometrisinin oluşturulması gerekmektedir. Plaxis profesyonel çizim modülü sayesinde başka bir çizim programına gerek duyulmadan modellemeye imkan verebilmektedir. Programda kullanılan özel grafik ortamı sayesinde; zemin katmanları, yükler, kazı aşamaları, sınır koşulları vb. veriler girilebilmektedir. Ayrıca problemin türüne bağlı olarak düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetrik geometri koşulları kullanılabilir. Geometri oluşturulduktan sonra malzeme özellikleri ve sınır koşulları tanımlanır.

Programda sistem düğüm noktaları ile birbirine bağlanan sonlu sayıda elemana ayrılır. Bu elemanların sayıları ve boyutları sistemi en iyi temsil edecek şekilde olmalıdır. Elemanlara ayırma işleminin doğru biçimde yapılması doğru çözüme ulaşabilmek için önemlidir.

Plaxis'de sonlu elemanlar ağının oluşturulması sırasında hücreler 15 düğüm noktalı veya 6 düğüm noktalı olacak şekilde üçgen elemanlara ayrılır. 15 düğüm noktalı elemanların kullanılması daha detaylı çözüm yapılmasına olanak tanımaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde deplasmanlar düğüm noktalarında hesaplanırken; gerilmeler Gauss noktasında (gerilme noktaları) hesaplanır. 15 düğüm noktalı üçgen eleman 12; 6 düğüm noktalı üçgen elemanda ise 3 adet gerilme noktasına sahiptir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Plaxis Sonlu Elemanlar Yazılım Programı gerilme ve düğüm noktaları (PLAXIS, 2020)

Programda, projede ihtiyaç duyulması halinde kullanılacak olan yatay destek, ankraj, geotekstil vb. yapısal elemanlar da modellenenbilmektedir. Plaxis programı, önceden belirlenmiş yer değiştirmeler, çizgisel ve yayılı yüklerin kullanımına da olanak sağlar.

Analizlerde, eğim kararsız hale gelene kadar mukavemet parametrelerinin kademeli olarak azaltıldığı yinelemeli bir yaklaşım (Mukavemet Azaltma Yönetimi Prosedürü) kullanılmaktadır. Güvenlik faktörü değeri, taban mukavemetinin eğimin kararlı olduğu en düşük mukavemete bölünmesiyle elde edilir.

Plaxis sonlu elemanlar programında en çok kullanılan modellerden bazıları; zeminin izotropik lineer elastik davranış sergilediğini varsayan lineer elastik modeli (LE); zeminin elasto-plastik davranış sergilediğini kabul eden Mohr-Coloumb (MC); kil, killi silt ve turba gibi yumuşak zeminler için kullanılan Soft Soil (SS); farklı yumuşak ve sert zeminlerin analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan, analizlerde zeminin rijitlik değerinin basınçla birlikte arttığını varsayan Hardening-Soil (HC) modeli ile; kil, killi silt, turba vb. yumuşak zeminlerin zamana bağlı oturma ve gerilmelerinin tahmininde kullanılan, özellikle derin kazı ve tünel inşaatı yapılan durumlarda güvenilir sonuçlar veren Soft Soil Creep (SSC) modelidir (Kezer, 2019).

2.3.2 Limit Denge Analizlerinin Gerçekleştirildiği Plaxis 2D LE Yazılım Programı

Limit denge yöntemi, geoteknik mühendisliği problemlerinin oz m nde en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biridir.

dilim yöntemlerinin her biri farklı varsayımlarda bulunmaktadır. Bu varsayımlardan daha önce çalışmanın 1.1.6.2 Limit denge yöntemleri bölümünde bahsedilmiştir.



Analizlerde başlangıç zemin gerilmelerini oluşturmak için gravity loading (yer çekimi) hesaplama metodu kullanılmıştır. Her atık ve günlük örtü (siltli kil) tabakasının inşaa aşamasından sonra (plastik analiz), konsolidasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon süresi 90 gün (3 ay) olarak belirlenmiştir. Analizlerde tasarım yüksekliğine ulaşıldıktan sonra son örtü sistemini temsilen yayılı yüklerin yükleme yapılmış ve sahadaki aşırı boşluk su basıncı 1 kPa değerine ulaşana kadar suyun konsolide olmasına izin verilmiştir. Gerçekleştirilen her analiz için son aşamada güvenlik faktörü değeri Φ -c indirgeme yöntemi ile bulunmuştur.

Bütün analizler drenajlı ve drenajsız olmak üzere iki koşulda da gerçekleştirilerek analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Konsolidasyonlu Şev Stabilite Analizleri

3.4.1 Drenajlı Koşullar Altında Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Şev stabilitesini etkileyen etkenlerden biri de analizlerin drenajlı veya drenajsız koşullarda gerçekleştirilmesi durumudur. Zeminlerin toplam ve efektif gerilme türünden belirlenen kayma direnci değerleri birbirlerinden farklı olabilmektedir.

Atık kütlesi boyunca artan geçirgen drenaj oranı, daha düşük boşluk suyu basınçlarının oluşmasına ve dolayısıyla daha yüksek efektif gerilmelere neden olarak şev stabilitesini olumlu yönde etkileyecektir.

Plaxis programında gerçekleştirilmiş olan bu analizlerde atığın drene olmasına izin verilmiştir. Analizler bütün kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin farklı kombinasyonları için tekrarlanmıştır.

3.4.1.1 Tabaka Kalınlıkları, Sızıntı Su Seviyeleri ve Mukavemet Değerlerinin Güvenlik Sayısı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, Este belediye katı atık depo sahasının 2-2 no'lu kesitinde gerçekleştirilen analizlerde, atığın sahaya farklı katman kalınlıkları (H), sızıntı su seviyeleri (W) ve mukavemet değerlerinde depolanmasının, şev stabilitesi üzerindeki nicel etkilerini içeren analiz sonuçları sunulmuştur.

değerinin ise 15° kabul edildiği analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri 3-5-7 metre kalınlıklı atık tabaka yüklemeleri için benzer sonuçlar vermesine rağmen, atığın diğer mukavemet parametre değerlerinde gerçekleştirilen analizlerde katman kalınlığının 3-5 metreden 7 metreye artmasıyla birlikte güvenlik sayısı değerinde düşüş yaşanmıştır. Analiz sonuçları, düşük sızıntı su seviyesine sahip sahada yüksek içsel sürtünme açısı değerine sahip atığın tek tabaka halinde yüklenmesinin, 7 metrelik 2 tabaka halinde yüklenme durumuna göre daha yüksek güvenlik sayıları vererek stabiliteyi arttıracığını göstermiştir.

Atığın 3 metre kalınlığında tabakalar halinde yüklemesi durumunda, c değeri sabit ve $c=10 \text{ kN/m}^2$ iken, içsel sürtünme açısının 15° 'den 35° 'ye artışı güvenlik sayısını yaklaşık %73 oranında; $\phi=15^\circ$ ve sabitken, kohezyon değerinin 10 kN/m^2 'ten 30 kN/m^2 'e artışı ise güvenlik sayısını yaklaşık olarak %83 oranında arttırmıştır. Aynı kabuller için 5 metrelik atık tabaka yüklemesi durumunda içsel sürtünme açısındaki 15° 'den 35° 'ye artış güvenlik sayısını %69 oranında arttırırken, kohezyon değerinin 10 kN/m^2 'ten 30 kN/m^2 değerine arttırılması güvenlik sayısını %81 oranında arttırmıştır. 7 metre kalınlığında yüklenen atık tabakaları için içsel sürtünme açısı artışının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi %62; kohezyon değeri artışının etkisi %107; tek tabaka halinde gerçekleştirilen atık yüklemesi içinse bu etkiler her iki mukavemet değeri artışı içinde yaklaşık %88 oranında olmuştur.

Sızıntı suyu seviyesinin tabaka yüksekliğinin 1/2'sine eşit olduğu durum ($W=H/2$);

Atık katmanlarının 1/2'sinin sızıntı suyu ile dolu olması durumunda bulunan sonuçlar; Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de özetlenmiştir. Tablo 3.2'de analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri gösterilmektedir.

Her tabakanın 1/4'ünün ve 1/2'sinin sızıntı suyu ile dolu olması durumunda bulunun sonuçlar karşılaştırıldığında, tabakalardaki sızıntı suyu miktarının artışıyla birlikte tabaka kalınlıklarının güvenlik sayısı değeri üzerinde etkisi belirginleşmiştir. Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de; 3 ve 5 metre kalınlıklı atık tabaka yüklemelerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri ile 7 metre ve tek tabaka halinde atık yükleme durumunda bulunan güvenlik sayıları arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Özellikle düşük kohezyon değerine sahip atığın düşük tabaka kalınlıklarında yüklenmesi güvenlik sayısını arttırarak sahadaki stabilitenin korunmasına yardımcı olacaktır.

Tablo 3.2 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/2$)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı			
		H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek Tabaka)
10	15	1,30	1,27	0,82	0,82
10	25	1,73	1,58	1,30	1,21
10	35	2,19	1,89	1,55	1,72
20	15	1,90	1,89	1,76	1,59
20	25	2,39	2,35	2,00	1,98
20	35	2,87	2,83	2,29	2,41
30	15	2,47	2,41	2,29	2,10
30	25	3,19	3,03	2,55	2,50
30	35	3,27	3,15	2,91	2,95

En yüksek güvenlik sayısı değerleri, atık tabakalarının sahaya 3 metre yükseklikte katmanlar halinde yüklendiği analizlerde bulunmuştur. Tabaka kalınlığının artışıyla birlikte güvenlik sayılarında düşüş yaşanmıştır. Tabakalardaki sızıntı su seviyesi H/2 iken, atıkların 3 metre kalınlığında tabakalar halinde yüklenmesi durumunda, c değeri sabit ve $c=10$ kN/m² iken, içsel sürtünme açısının 15°'den 35°'ye artışı güvenlik sayısını

güvenlik sayısı (GS)=0,82'dir. Analizlerde bulunan en yüksek güvenlik sayısı değeri ise, GS=3,5'tir. Bu değere, 1/4'üne kadar sızıntı suyu ile dolu 3 metrelik katmanlar halinde atık yükleme analizlerinde, atık mukavemet parametreleri sırasıyla; $c=30 \text{ kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$ iken ulaşılmıştır.

Tablo 3.3 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=3H/4$)

Kohezyon (kN/m^2)	İçsel Sürtünme Açısı ($^\circ$)	Güvenlik Sayısı			
		H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek Tabaka)
10	15	1,20	1,19	0,94	0,82
10	25	1,58	1,50	1,20	1,22
10	35	1,99	1,73	1,42	1,54
20	15	1,78	1,79	1,65	1,42
20	25	2,22	2,19	1,81	1,72
20	35	2,65	2,58	2,03	2,06
30	15	2,32	2,26	2,12	1,90
30	25	2,78	2,62	2,47	2,22
30	35	3,19	2,92	2,70	2,58

Atıkların sahaya 3-5-7 metre tabaka kalınlıklarında yüklenmesi ile oluşturulan şevlerde $c=30 \text{ kN/m}^2$, $\phi=15^\circ$ haricindeki atığın bütün farklı mukavemet değerleri için şev kayma yüzeyleri aynıdır ve farklı yüksekliklerdeki atık tabaka yüklemeleri sonucu bulunan temsili şev göçme yüzeyleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

Tablo 3.5 Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/2$)

Elastisite Modülü (kN/m ²)	Atık Oturma Miktarı (m)			
	H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek tabaka)
300	2,57	2,60	2,45	1,66
600	1,33	1,33	1,37	0,89
1200	0,74	0,73	0,68	0,49

Tablo 3.6 Değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$)

Elastisite Modülü (kN/m ²)	Atık Oturma Miktarı (m)			
	H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek tabaka)
300	2,65	2,43	2,15	1,02
600	1,42	1,27	1,18	0,57
1200	0,74	0,70	0,65	0,35

5-7 metre ve tek tabaka halinde atık yüklemeleri için tabakalardaki sızıntı suyu seviyesinin artması ile birlikte oturma miktarında azalma meydana gelmiştir. Elastisite modülünün 300 kN/m³'e eşit kabul edildiği analizlerde, sızıntı suyu ve tabaka kalınlıklarının oturma miktarı üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Yüklenen atık tabaka kalınlığının artışıyla birlikte atık oturma miktarları azalmıştır. Analizlerde kayma mukavemet parametre değişimlerinin oturma miktarı üzerinde herhangi bir etkisi gözlenmemiştir.

3.4.2 Drenajsız Koşullar Altında Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Literatürdeki çalışmaların çoğu KKA'nın drenajlı koşullar altındaki davranışını incelemiştir. Dünyanın bazı bölgelerinde atığın yüksek başlangıç doygunluk derecesine sahip olması drenajsız koşullar altında da davranışlarının değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle programda analizler drenajsız koşullar için yinelenmiştir.

3.4.2.1 Drenajsız Analizlerde Tabaka Kalınlıkları, Sızıntı Su Seviyeleri ve Mukavemet Değerlerinin Güvenlik Sayısı Üzerindeki Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, atığın drenajsız koşullar altında sahaya farklı katman kalınlıkları (H), sızıntı su seviyeleri (W) ve mukavemet değerlerinde yerleştirilmesinin, şev stabilitesi üzerindeki etkilerini içeren analiz sonuçları sunulmuştur.

Analizlerde, drenajlı koşullar altında gerçekleştirilen analizlerde kullanılan atık parametreleri ile aynı parameter değerleri kullanılmıştır.

Sızıntı suyu seviyesinin tabaka kalınlığının 1/4'üne eşit olduğu durum (W=H/4);

Tabakaların, kalınlıklarının 1/4'üne kadar sızıntı suyu ile dolu olduğu kabulü ile, değişen atık tabaka kalınlıkları ve atık mukavemet değerlerinde gerçekleştirilen analizlerde bulunan sonuçlar sırasıyla; Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Bulunan tüm güvenlik sayısı değerleri Tablo 3.7'de listelenmiştir.

Tablo 3.8 Drenajsız analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri ($W=H/2$)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı			
		H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek Tabaka)
10	15	0,97	0,91	0,83	0,82
10	25	1,46	1,31	1,18	1,02
10	35	1,83	1,65	1,47	1,25
20	15	1,73	1,51	1,46	1,34
20	25	2,12	1,83	1,75	1,59
20	35	2,53	2,18	2,06	1,90
30	15	2,20	1,99	1,96	1,84
30	25	2,69	2,32	2,25	2,13
30	35	3,12	2,7	2,58	2,44

Sızıntı suyu seviyesinin tabaka kalınlığının 3/4'üne eşit olduğu durum ($W=3H/4$);

Tabakalardaki sızıntı suyu yüksekliğinin atık tabaka kalınlığının 3/4'üne eşit olduğu durumlarda; farklı tabaka kalınlıklarında ve farklı mukavemet değerlerinde gerçekleştirilen analizlerde bulunan sonuçlar; Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterilmektedir. Ek olarak, bulunan güvenlik sayısı değerleri Tablo 3.9'da özetlenmiştir.

Drenajsız koşullar altında gerçekleştirilen ve sızıntı su yüksekliğinin $3H/4$ 'e eşit olduğu analizlerde, atık içsel sürtünme açısı değeri $\phi=15^\circ$ iken, farklı tabaka kalınlıklarındaki gerçekleştirilen atık yerleştirme analizlerinde bulunan γ güvenlik sayısı değerleri benzerdir. İçsel sürtünme açısının $\phi=25^\circ-35^\circ$ olduğu analizlerde ise sahaya yerleştirilen atığın tabaka kalınlığının 5 metre kalınlıktan 3 metre kalınlığa düşürülmesiyle birlikte güvenlik sayısı değeri artış göstermiştir.

Aynı varsayımlar altında drenajlı ve drenajsız koşullarda gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre drenajlı analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri, drenajsız analizlerde bulunan değerlere göre daha yüksektir. Bu durum Zekkos, Bray ve Riemer (2012)'nin belediye katı atık numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş olduğu drenajlı ve drenajsız üç eksenli basınç testleri sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Drenajsız analizlerde en yüksek güvenlik sayısı; tabaka kalınlığının $1/4$ 'üne kadar sızıntı suyu ile dolu 3 metre atık tabaka yükleme analizlerinde, atık mukavemet parametrelerinin $c=30 \text{ kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$ kabul edildiği koşullarda $GS=3,38$ olarak bulunmuştur. En düşük güvenlik sayısı ise, atık mukavemet parametrelerinin $c=10 \text{ kN/m}^2$, $\phi=15^\circ$ kabul edildiği ve atığın tabaka kalınlığının $3/4$ 'üne kadar suyla doluyken 18 metrelik tek tabaka halinde yüklendiği analiz koşullarında $GS=0,71$ olarak bulunmuştur.

Tablo 3.10'da farklı tabaka kalınlıklarında drenajlı ve drenajsız koşullar altında gerçekleştirilen analizlerde bulunan en yüksek güvenlik sayısı değerleri ile bu değerler arasındaki %'lik fark oranları verilmiştir.

Tablo 3.11 Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/4$)

Elastisite Modülü (kN/m ²)	Atık Oturma Miktarı (m)			
	H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek tabaka)
300	2,58	2,69	2,7	2,3
600	1,36	1,36	1,41	1,2
1200	0,74	0,74	0,77	0,65

Tablo 3.12 Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=H/2$)

Elastisite Modülü (kN/m ²)	Atık Oturma Miktarı (m)			
	H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek tabaka)
300	2,3	1,75	1,73	0,81
600	1,27	1	1	0,47
1200	0,68	0,57	0,56	0,3

Tablo 3.13 Drenajsız analizlerde değişen atık tabaka kalınlıkları ile elastisite modülü değerlerinin atık oturma miktarı üzerindeki etkisi ($W=3H/4$)

Elastisite Modülü (kN/m ²)	Atık Oturma Miktarı (m)			
	H=3 m	H=5 m	H=7 m	H=18 m (Tek tabaka)
300	2,47	1,33	1	0,74
600	1,32	0,85	0,8	0,47
1200	0,73	0,53	0,43	0,28

Drenajsız koşullarda gerçekleştirilen analizlerde, drenajlı analizlerde olduğu gibi elastisite modülünün artmasıyla birlikte atık oturma miktarı azalmaktadır. Tabakalardaki sızıntı su seviyelerinin artırılması, atık oturma miktarında azalmalara neden olmuştur. Sızıntı suyu seviye değişiminin oturma miktarı üzerindeki etkisinin en az olduğu durum 3 metre kalınlıklı atık yükleme analizlerinde gözlemlenmiştir.

Boşluklardaki suyun kısa sürede sönmelenememesi nedeniyle drenajsız analizlerde bulunan oturma miktarları drenajlı analizlerde bulunan atık oturma miktarlarında göre daha düşüktür. Drenajlı ve drenajsız analizlerde bulunan oturma miktarı arasındaki en yüksek fark; elastisite modülünün 300 kN/m²'ye eşit kabul edildiği, 3/4'üne kadar sızıntı suyu ile dolu 5 ve 7 metre kalınlıklı atık yükleme analizleri ile tabaka kalınlığının yarısı kadar sızıntı su seviyesine sahip tek tabaka atık yükleme analizlerinde elde edilmiştir.

3.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Kısa Süreli Şev Stabilite Analizleri

Bu bölümde, analizler ek olarak kısa süreli şev duraylılığını incelemek için ani yükleme koşulları altında da tekrarlanmış, bulunan değerle konsolidasyonlu koşullar altında bulunan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde, her atık tabaka yüklemesinden sonra atığın konsolide olmasına izin verilmeden diğer atık tabakasının inşası gerçekleştirilmiştir.

Depo alanına, atık tabakalarının 3 metrelik katmanlar halinde yüklenmesi durumunda, sızıntı su seviyelerinin sırasıyla atık tabaka kalınlığının 1/4, 1/2 ve 3/4'üne eşit olduğu kabulü ile gerçekleştirilen kısa süreli analizlerde bulunun şev güvenlik sayısı değerleri Tablo 3.14'te gösterilmektedir.

Tablo 3.14 Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri
(H=3 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,36	1,29	1,2
10	25	1,83	1,72	1,59
10	35	2,33	2,21	1,98
20	15	1,99	1,88	1,76
20	25	2,47	2,38	2,21
20	35	3,05	2,88	2,65
30	15	2,52	2,42	2,29
30	25	3,12	3,00	2,75
30	35	3,39	3,29	3,1

Tablo 3.15 Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri

(H=5 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,40	1,27	1,19
10	25	1,86	1,6	1,51
10	35	2,32	1,9	1,75
20	15	2,04	1,84	1,79
20	25	2,57	2,34	2,2
20	35	3,08	2,87	2,7
30	15	2,55	2,45	2,27
30	25	3,08	2,85	2,65
30	35	3,47	3,27	3,08

Tablo 3.16 Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri

(H=7 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,22	1,13	0,94
10	25	1,57	1,36	1,21
10	35	1,96	1,66	1,42
20	15	1,93	1,81	1,68
20	25	2,29	2,09	1,93
20	35	2,86	2,42	2,17
30	15	2,57	2,34	2,12
30	25	2,87	2,61	2,47
30	35	3,32	3,05	2,88

3 ve 5 metre kalınlıklı atık yükleme analizlerinde olduğu gibi 7 metre kalınlıklı atık yükleme analizlerinde de benzer sonuçlar gözlenmiştir. Aynı mukavemet değerleri ve sızıntı suyu seviyelerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları, konsolidasyonlu ve kısa süreli analizler içinde birbirlerine yakın değerler olarak bulunmuştur.

Son olarak atığın tek katman olarak yerleştirilmesi sonucu bulunan değerler Tablo 3.17'de özetlenmiştir. Analizler sonucu bulunan değerlerin karşılaştırılmaları ise Şekil 3.35'te gösterilmektedir.

Tablo 3.17 Kısa süreli şev stabilite analizlerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri

(H=18 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,28	0,98	0,80
10	25	1,79	1,26	1,02
10	35	2,38	1,58	1,25
20	15	1,83	1,52	1,20
20	25	2,37	1,82	1,47
20	35	2,97	2,18	1,77
30	15	2,35	2,04	1,62
30	25	2,90	2,37	1,90
30	35	3,53	2,72	2,18

LİMİT DENGE YÖNTEMİ İLE YAPILAN ANALİZLER

4.1 Materyal Model Seçimi

Limit denge yöntemlerinin sağladığı avantajlar arasında çok sayıda bilimsel araştırmada kullanılmış olmaları ve kanıtlanmış statik denge metodolijilerine sahip olmaları bulunmaktadır (Ayob, Kasa, Sulaiman, Miniandi ve Yusoff, 2019).

Plaxis 2D LE programında gerçekleştirilen analizlerde; tüm zemin profilleri ve eğim geometrilerine uygulanabilirliği ve hem kuvvet hem moment dengesini sağlaması nedeniyle kullanımı en yaygın olan limit denge dilim yöntemlerinden Morgenstern Price yöntemi kullanılmıştır.

Malzeme özellikleri kısmından Mohr- Coloumb yöntemi seçilerek analizler için gerekli olan içsel sürtünme açısı, kohezyon ve birim hacim ağırlık değerleri programa girilmiştir. Analizlerde kullanılan parametreler sonlu elemanlar yönteminde kullanılan parametrelerle aynıdır.

4.2 Analiz Yöntemi

Analizler, programın konsolidasyon modulünde her tabaka için farklı piezometrik su seviyelerinin tanımlanamaması nedeniyle programın şev stabilite modulünde gerçekleştirilmiş, bu nedenle sadece kısa süreli şev stabilitesi incelenmiştir. Limit Denge methodu ile gerçekleştirilen analizlerde Plaxis 2D sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerdeki kesit ve parametreler kullanılmıştır. Analizlerde sonlu elemanlar analizlerinde olduğu gibi atığın sahaya 4 farklı atık katman kalınlığında yerleştirildiği varsayılmış, atık kesitleri bu varsayıma göre 4 farklı şekilde oluşturulmuştur. Farklı atık katman kalınlıklarında gerçekleştirilen tüm analizler atığın farklı mukavemet değerleri ile katmanlardaki su seviyelerinin farklı konfigürasyonları için tekrarlanmıştır.

Katmanlardaki piezometrik çizgiler, Plaxis 2D programında oluşturulmuş olan piezometrik çizgilerin koordinatları kullanılarak oluşturulmuştur. Şev hareket yönü sağdan sola, kayma şekli ise dairesel (circular) olarak seçilmiştir. Analizler kayma yüzeyi

Tablo 4.1 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri (H=3 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,40	1,37	1,32
10	25	1,86	1,82	1,73
10	35	2,38	2,32	2,18
20	15	2,04	1,98	1,93
20	25	2,54	2,49	2,30
20	35	3,08	3,02	2,78
30	15	2,68	2,68	2,41
30	25	3,14	3,06	2,99
30	35	3,71	3,59	3,49

Şekil 4.2’de, 3 metrelik katmanlar halinde kademeli şekilde sahaya yerleştirilen atık için entry-exit methodu ile bulunan temsili şev göçme yüzeyleri gösterilmektedir. Programda girilen entry ve exit koordinatları Plaxis 2D programında yapılan analizlerde bulunan şev göçme yüzeyinin koordinatlarıdır.

Tablo 4.3 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri (H=7 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,24	1,15	1,01
10	25	1,65	1,40	1,26
10	35	2,08	1,69	1,55
20	15	1,91	1,82	1,66
20	25	2,32	2,18	1,93
20	35	2,81	2,59	2,23
30	15	2,59	2,38	2,18
30	25	2,93	2,77	2,50
30	35	3,44	3,20	2,80

Analizlerde şev göçme yüzeyi $c=30$ kPa, $\phi=15^\circ$ mukavemet değerleri için topuk bölgesinde sonlanırken; diğer tüm mukavemet değeri konfigürasyonları için şev göçme yüzeyi sedde üzerinde bulunan eğimin ucunda sonlanmıştır (Şekil 4.6).

Tablo 4.4 Analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri (H=18 m)

Kohezyon (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Güvenlik Sayısı		
		W=H/4	W=H/2	W=3H/4
10	15	1,24	1,05	0,89
10	25	1,79	1,38	1,12
10	35	2,36	1,55	1,39
20	15	1,75	1,49	1,28
20	25	2,30	1,88	1,54
20	35	2,90	2,35	1,86
30	15	2,33	1,95	1,68
30	25	2,84	2,39	1,94
30	35	3,37	2,75	2,25

Bütün sızıntı su seviye ve değişken mukavemet değerlerinde yapılan analizlerde benzer kayma yüzeyleri bulunmuştur. Şekil 4.8’de analizler sonucu bulunan temsili kayma yüzeyi gösterilmektedir.

Çalışmanın ilk bölümünde belediye katı atığının fiziksel ve mekanik özellikleri ile belediye katı atık depo tesisleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise şev stabilitesi analizlerinin gerçekleştirileceği örnek katı atık depo saha stratigrafisi ve kullanılacak atık kesiti detaylandırılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde Plaxis 2D programında sonlu elemanlar yöntemi ile drenajlı ve drenajsız koşullar altında konsolidasyonlu analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar şev güvenlik sayıları, oturma miktarları ve şev göçme yüzeyleri cinsinden değerlendirilmiştir. Ek olarak, bu bölümde kısa süreli analizler de gerçekleştirilerek, konsolidasyonlu ve kısa süreli analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde ise Plaxis 2D programında gerçekleştirilen kısa süreli analizler, Plaxis 2D LE programında limit denge yöntemi ile yinelenmiştir. Programın konsolidasyon modülünde sızıntı su seviyesinin tabaka tabaka arttırılamaması nedeniyle limit denge yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde sadece kısa süreli şev stabilite durumu değerlendirilmiştir.

Bu bölümde, Plaxis 2D ve Plaxis 2D LE programlarında sırasıyla sonlu elemanlar ve limit denge methodu ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları ve karşılaştırılmaları detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerçekleştirilen Konsolidasyonlu Analiz Sonuçları

5.1.1 Drenajlı Analizler

Drenajlı şartlar altında gerçekleştirilen analizlerde, atık tabakalarında bulunan sızıntı suyu yüksekliklerinin artması şev güvenlik sayı değerlerinde azalmalara neden olmuştur. 3 metrelik tabakalar halinde sahaya yüklenen atık için, sızıntı su seviyesinin atık tabakasının 1/4'ü yüksekliğinden 3/4'üne kadar arttırılması güvenlik sayısını ortalama

%15 oranında azaltmıştır. Bu oran, 5 metrelik tabaka yükleme analizlerinde %19, 7 metrelik atık tabaka yükleme analizlerinde %26, tek tabaka atık yükleme analizlerinde ise %42 olarak bulunmuştur. Atık tabaka kalınlıklarında artışlar ile birlikte tabakalarda bulunan sızıntı su miktarının artışının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi artmaktadır. Özellikle atık kohezyon değeri $c=10$ kPa, içsel sürtünme açısı değeri $\phi=35^\circ$ iken bu etki en yüksek seviyeye ulaşmıştır.

Tabakalardaki sızıntı suyu seviyesinin tabaka kalınlığının $1/4$ 'üne eşit olduğu durumda, 3 ve 5 metre kalınlıklı atık tabaka yüklemelerinde bulunan güvenlik sayısı değerleri birbirleri ile benzerlik gösterirken, tabaka kalınlıklarının 5 metre yükseklikten 7 metre yüksekliğe çıkartılması, güvenlik sayısı değerinde yaklaşık %15 oranında azalmaya neden olmuştur. Atık içsel sürtünme açısı değeri $\phi=15^\circ$ iken, atığın sahaya 7 metre kalınlıklı tabakalar halinde yüklendiği varsayımı ile gerçekleştirilen analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri, 18 metre kalınlığında tek tabaka halinde gerçekleştirilen atık yükleme analizlerinde bulunan değerlerden daha yüksekken; içsel sürtünme açısının $\phi=35^\circ$ olduğu analizlerde bu değer daha düşüktür. Yüksek sızıntı su seviyelerinde ($W=H/2$, $W=3H/4$) gerçekleştirilen analizlerin hepsinde, atık tabaka kalınlığındaki artışlarla birlikte güvenlik sayıları azalmıştır.

Analizlerde kullanılan katı atığın mukavemet parametre değerlerinin arttırılması şev stabilitesini olumlu yönde etkilemiştir. Bu parametrik değişimlerden elde edilen sonuçlar 3.4.1.1 alt başlığında paylaşılmıştır. Bütün farklı tabaka kalınlık değerlerinde bulunan analiz sonuçları için atık kohezyon değerindeki artışların güvenlik sayısı değeri üzerindeki etkisi, içsel sürtünme açısı değerinin etkisinden daha yüksektir.

Elastisite modülündeki değişimler, güvenlik sayısı değerinde ve şev kayma yüzeyinin yeri ve şeklinde değişikliğe neden olmazken; elastisite modülündeki artışlarla birlikte atık oturma miktarı azalmıştır. Sızıntı su seviyesi $H/4$ iken bütün elastisite modül değerlerinde, 3-5-7 metre kalınlığında atık yüklemeleri sonucu oluşan atık oturma miktarları birbirleri ile benzer değerler bulunmuştur. Tabakalardaki sızıntı su seviyesinin, $H/2$ ve $3H/4$ kabul edildiği analizlerde ise atık tabaka kalınlığındaki artışlarla birlikte atık oturma miktarı azalmıştır.

5.1.2 Drenajsız Analizler

Drenajsız analizlerde, tabakalardaki sızıntı suyu seviye ve tabaka kalınlıklarındaki artışlar güvenlik sayısı değerinde azalmalara neden olmuştur. Drenajsız analizlerdeki sızıntı suyu miktarındaki artışların şev güvenlik sayısı değeri üzerindeki etkisi 3 ve 5 metre kalınlıklı atık yüklemeleri için drenajlı analizlere göre daha yüksekken, 7 ve 18 metre kalınlıklı atık yüklemelerinde bu etki daha azdır.

Drenajsız analizlerde bulunan güvenlik sayısı değerleri drenajlı analizlerde bulunan değerlerden daha düşüktür. Tabaka kalınlığı $H=3$ metre, sızıntı su seviyesi $W=H/4$ iken drenajsız koşullar altında bulunan güvenlik sayısı değerleri, drenajlı koşullar altında bulunan değerlerden yaklaşık %10 daha azdır. Bu oran, $H=5$ metre için, %20; $H=7$ metre için, %16; $H=18$ metre içinse %46'dır.

Yüksek sızıntı su seviyelerinde, $H=18$ metre için yapılan drenajlı ve drenajsız analiz sonuçları arasındaki fark azalmıştır. Sızıntı su seviyesinin $H/4$ 'ten $3H/4$ 'e yükselmesi ile iki analiz tipinde bulunan güvenlik sayısı değerleri arasındaki fark %46'dan, %0,09 seviyesine inmiştir. Diğer atık tabaka kalınlıkları için drenajlı-drenajsız analiz sonuçları her farklı sızıntı su seviyesinde benzer oranlarda olmuştur.

5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gerçekleştirilen Kısa Süreli Şev Stabilite Analiz Sonuçları

Konsolidasyonun analizlerde güvenlik sayısı değeri üzerindeki etkisini tespit edebilmek amacıyla, analizler kısa süreli (ani yükleme) koşulları altında da tekrarlanmıştır. Bu kapsamda sadece plastik analizler ve en son adımda güvenlik sayısı değerini bulmak için 'safety factor' analizi yapılmıştır. Her atık katman yüklemesinden sonra atığın konsolide olmasına izin verilmeden diğer atık tabakası yüklenmiştir.

Atık tabaka kalınlığının 3-5-7 metre kabul edildiği analizlerde kısa süreli analiz sonuçları bütün farklı sızıntı su seviye ve mukavemet değerlerinde gerçekleştirilen analizler için konsolidasyonlu analiz sonuçlarına benzer değerler olarak bulunmuştur.

18 metre kalınlıklı atık yükleme analizlerinde de atık tabakasının $H/4$ ve $H/2$ 'sine kadar sızıntı suyu ile dolu kabul edildiği durumlarda konsolidasyonlu ve kısa süreli analizlerde bulunan güvenlik sayıları birbirleri ile benzer değerlerken; sızıntı su seviyesinin $3H/4$ 'e

yükselmesi ile birlikte kısa süreli analizlerde bulunan şev güvenlik sayısında azalmalar olmuştur.

5.3 Limit Denge Yöntemi ile Gerçekleştirilen Kısa Süreli Şev Stabilité Analiz Sonuçları

Plaxis 2D LE programında gerçekleştirilen analizlerde, sızıntı su seviyesinin atık tabakasının 1/4'ü yüksekliğinden 3/4'üne kadar arttırılması güvenlik sayısı değerini, atık tabaka kalınlığının 3 metre kabul edildiği analizlerde ortalama %0,07; atık tabaka kalınlığının 5 metre olduğu analizlerde %10; 7 metrelik atık tabaka yükleme analizlerinde %21; tek tabaka atık yükleme analizlerinde ise %37 oranında azaltmıştır.

Sızıntı su seviyesi tabaka kalınlığının 1/4'üne eşitken, 3 ve 5 metre kalınlığında atık yüklemeleri sonucu bulunan güvenlik sayısı değerleri bütün farklı mukavemet değer konfigürasyonlarında benzerken; bunun dışında kalan tüm analizlerde sızıntı su seviyesi ve atık tabaka kalınlığındaki artışlar güvenlik sayısında azalma ile sonuçlanmıştır. Sızıntı su seviyesi $W=H/4$ ve $W=H/2$ iken, atık tabaka kalınlığının 5 metreden 7 metreye yükseltilmesi, atığın en düşük mukavemet ve en yüksek mukavemet değerlerinde bulunan güvenlik sayısı değerlerini yaklaşık %12 oranında azaltmıştır. Sızıntı suyu yüksekliğinin $3H/4$ 'e eşit olduğu durumlarda ise azalma oranı, $c=10$ kPa, $\phi=15^\circ$ atık mukavemet değerlerinde gerçekleştirilen analizler için %20; atığın mukavemet değerlerinin $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ olduğu durumlarda ise %21'dir.

Atık tabaka kalınlığını 7 metreden 18 metreye çıkarılması güvenlik sayısı değerlerinde yüksek oranda değişikliğe neden olmazken, tabakalardaki su seviyesinin yükselmesi ile birlikte güvenlik sayısı değerleri arasındaki fark artmıştır.

5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Limit Denge Yöntemi Kullanılarak Bulunan Sonuçların Karşılaştırması

Her iki analiz yönteminde de atık tabaka ve sızıntı su seviyelerindeki artışlar güvenlik sayılarında azalmalara; atık mukavemet değerindeki artışlar ise güvenlik sayı değerlerinde artışa neden olmuştur.

Tüm tabaka kalınlıkları için $H/2$ ve $3H/4$ sızıntı su seviyelerinde Plaxis LE programında bulunan güvenlik sayısı değerleri, Plaxis 2D programında sonlu elemanlar metodu ile bulunan güvenlik sayısı değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. İki analiz methodu sonucu

bulunan değerler arasındaki farklar, özellikle sızıntı suyu seviyesinin 3H/4 olduğu analizlerde daha belirgindir. Genel olarak sızıntı su seviyesindeki artışın güvenlik sayısı üzerindeki etkisi limit denge methodu ile gerçekleştirilen analizlerde daha azdır.

Aynı kabullerle, sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan en yüksek güvenlik sayısı değeri $GS=3,49$ iken bu değer limit denge yönteminde $GS=3,71$ 'dir.

Özellikle düşük mukavemet değerlerine sahip olan atığın depo sahasına düşük tabaka kalınlıklarında yüklenmesi güvenlik sayısı değerini arttırmaktadır. Atığın sahaya yüksek tabaka kalınlıklarında ve yüksek sızıntı su seviyelerinde yüklendiği durumlarda atığın konsolide olabilmesi için gerekli sürenin tanınması saha stabilitesinin korunmasına yardımcı olacaktır. Analizlerde limit denge yöntemi sonucu bulunan güvenlik sayısı değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan değerlere göre daha yüksek çıkmıştır. Sonuçlarda güvenli tarafta kalınabilmesi için, daha fazla vakit alması ve parametre girdisi gerektirmesine rağmen analizlerin sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Gerçekleştirilmiş analizlerde kullanılan atık parametreleri literatür çalışmalarından elde edilmiştir. Depo sahası atık dolgu şev stabilite analizlerinde mevcut sahalardan elde edilen arazi ve laboratuvar deneyleri ile desteklenmiş uygun verilerin kullanılması önerilmektedir. Depo sahalarının projelendirilme aşamalarında eski sahalardan elde edilen parametrelerin kullanılarak sahaların boyutlandırılması uygun olacaktır.

Ek olarak, güvenli şev tasarımının yapılabilmesi için şevlerin davranışı statik yüklerin yanı sıra sismik yükler altında da değerlendirilmelidir. Bu nedenle, özellikle deprem riski bulunan düzenli depolama yapılacak alanlarda şeve etki edebilecek olası deprem kuvvetlerinin de şev stabilitesi üzerindeki etkileri incelenmelidir.

- Al-Hashemi, H.M.B. (2016). *Landfill settlement analysis*. (Term Project). King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran.
- Aryal, K. P. (2006). *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods* (Doctoral Thesis). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Aykol, K. (2008). *Evsel katı atıkların geoteknik özelliklerinin modellenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ayob M., Kasa A., Sulaiman M.S., Miniandi N. D., Yusoff A. H. (2019). Slope stability evaluations using limit equilibrium and finite element methods. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 28(18), 27–43. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/338144899>
- Batali, L., Carastioian, A., Popa, H., Pantel, G. (2017). Instability phenomena in municipal waste landfill. Numerical modeling in saturated and unsaturated conditions. *Energy Procedia*, 112, 481–488. doi: 1016/j.egypro.2017.03.1123
- Bell, J. M. (Ed.) (1973). *Sanitary landfill method of solid waste disposal*. Retrieved from <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3292&context=roadschool>
- Bentley Geotechnical Engineering. (2022, April 1). *Mesh density - 2D/3D Seepage analysis with PLAXIS LE (5/11)*. [Video file]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=F90j9Cm7Fr8>
- Bentley Geotechnical Engineering. (2021, June 9). *Better Slope Stability Analysis with PLAXIS LE: Slope Stability | Session 1*. [Video file]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=yppdXGXtYtY&t=159s>
- Bishop, A. W. (1955). The use of slip circles in stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Boda, B. (2002). *Evaluation of stability parameters for landfills* (Master's Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Bonaparte, R., Bachus, R. C., & Gross, B. A. (2020). Geotechnical Stability of Waste Fills: Lessons Learned and Continuing Challenges. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(11), 5020010.
- Bray, J. D., Zekkos, D., Merry, S. M. (2008, March). Shear strength of municipal solid waste. *Proceeding of International Symposium on Waste Mechanics, USA*. doi:10.1061/41146(395)2
- Calamak, M., Yanmaz, A.M. (2014, June). Probabilistic Assessment of Slope Stability for Earth-fill Dams Having Random Soil Parameters. *Proceeding of 5th International Symposium on Hydraulic Structures Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes International Symposium on Waste Mechanics*, Risbane, Australia. doi: 10.14264/uql.2014.16
- Castelli, F., Maugeri, M. (2014). Mechanical properties of municipal solid waste by SDMT. *Waste Management*, 34(2), 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.026>

- Chetri, J. K., & Reddy, K. R. (2021). Advancements in municipal solid waste landfill cover system: A review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101(4), 557–588. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00229-1>
- Christensen, T. H. (Ed.) (2011). *Solid waste technology & management* (Vol. 2). Chichester West Sussex U.K., Hoboken N.J.: Wiley.
- Cox, J. T. (2013). *Effects of waste placement practices on the engineering response of municipal solid waste* (Master's Thesis). California Polytechnic State University, San Luis Obispo. <https://doi.org/10.15368/theses.2013.2177>
- Dixon, N., & Jones, D. R. V. (2005). Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(3), 205–233. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2004.11.002>
- Edil, T. B., Ranguette, V. J., & Wuellner, W. W. (1990). Settlement of municipal refuse. In A. Landva & G. D. Knowles (Eds.), *Geotechnics of waste fills—Theory and practice* (225-225-15). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP25309S>
- Durmusoglu, E., Corapcioglu, M. Y., & Tuncay, K. (2006). Modeling of settlement in saturated and unsaturated municipal landfills. *International Journal of Geomechanics*, 6(4), 269–278. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2006\)6:4\(269\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:4(269))
- Edinçiler, A., Benson, C.H., Edil, T.B. (1996). *Shear strenght of municipal solid waste: Interm report- Year 1: Environmental geotechnics research report 96-2*. Retrieved from University of Wisconsin - Madison website: https://www.researchgate.net/publication/306154719_Shear_Strength_of_Municipal_Solid_Waste
- El-Fadel, M., & Khoury, R. (2000). Modeling settlement in MSW landfills: a Critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 30(3), 327–361. <https://doi.org/10.1080/10643380091184200>
- Esteban-Altabella, J., Mcdougall, J., Colomer-Mendoza, F.J., Gallardo, A., Edo-Alcon, N. (2017, October). Review and application of a settlement model for landfills. *Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italy.
- Gomes, C. C., Lopes, M. L., & Oliveira, P. J. V. (2014). Stiffness parameters of municipal solid waste. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(4), 1073–1087. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0621-9>
- Gökçe, G.F., Kırkık Aydemir, K.P., Hasanoğlu, P., Özbay, M. (2015). Katı atık düzenli depolama sahalarının ve vahşi depolama alanlarının ıslahı ve bitkilendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 3, 258–271. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/56349>
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (2001). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 51(7), 653–654. <https://doi.org/10.1680/geot.51.7.653.51390>
- Gülmez, M. (2016). *Yerel yönetimlerde kentsel katı atık yönetimi- Derince belediyesi örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Gebze Teknik Üniversitesi.
- Hossain, M.D.S., & Haque, M. A. (2009). The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(5), 1568–1576. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.017>

- Huang, Y., & Fan, G. (2016). Engineering geological analysis of municipal solid waste landfill stability. *Natural Hazards*, 84(1), 93–107. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2408-8>
- Hudson, A. P., White, J. K., Beaven, R. P., Powrie, W. (2004). Modelling the compression behaviour of landfilled domestic waste. *Waste Management*, 24(3), 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.12.003>
- Khabbaz, H., Fatahi, B., Nucifora, C. (Ed.) (2012). *Finite element methods against limit equilibrium approaches for slope stability analysis*. Retrieved from <https://www.issmge.org/publications/publication/finite-element-methods-against-limit-equilibrium-approaches-for-slope-stability-analysis>
- Johari, A., Kalantari, A.R. (2016, November). Probabilistic analysis of slope stability of embankment reinforced with discrete fiber. *Proceeding of 5th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*. Iran. https://www.researchgate.net/publication/311544876_Probabilistic_analysis_of_slope_stability_of_embankment_reinforced_with_discrete_fiber
- Kan, Ç., ve Şengörür, B. (2002). Düzenli depolama. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6-3. Erişim adresi: <https://oaji.net/articles/2014/1084-1416574196.pdf>
- Keleşoğlu, M.K. (2016). *Şevlerin stabilitesi* [PowerPoint slayt]. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Geoteknik Eğitim Kursu. <http://imoistanbul.org/imoarsiv/geoteknik-kurs-notlari-2016/1.hafta/kubilay-hoca.pdf>
- Kezer, S. (2019). *Katı atık sahalarında şev stabilitesi* (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye.
- Koerner, R. M., Daniel, D.E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. Reston, Virginia: Thomas Telford Ltd.
- Krase, V. (2007). *Stability of municipal solid waste landfills* (Doctoral Thesis). University of Florence, Braunschweig.
- Landva, A.O., Valsangkar, A.J., Pelkey, S.G. (2000). Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 1157–1165. <https://doi.org/10.1139/t00-05>
- Liu, C.-N., Chen, R.-H. Chen, K.-S. (2006). Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 24(1), 80–91. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062579>
- Medne, O., Serzane, R., Berzina-Cimdina, Liga (2015). Composition of alternative daily cover materials with a perspective of use of Latvian local resources. *Materials Science and Applied Chemistry*, 32(1). <https://doi.org/10.1515/msac-2015-0008>
- Mısır, G. (2018). Şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılması çözümü. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1), 429–438.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 77–93.
- Natur, O. (2018). *Şev stabilitesi analiz yöntemleri ve bir vaka analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.

- Omari, A., Boddula, R.K. (2012). *Slope stability analysis of industrial solid waste landfills* (Master's thesis). Luleå University of Technology, Luleå.
- Öztemur, A. (2007). *Modular landfill design* (Master's Thesis). Boğaziçi University, İstanbul.
- Panagiotakopoulos, D., & Dokas, I. (2001). Design of landfill daily cells. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 19(6), 613–622. <https://doi.org/10.1177/0734242X0101900617>
- Pelkey, S. G. (1997). *Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste*. Brunswick: National Library of Canada.
- Penmethsa, K. K. (2007). *Permeability of municipal solid waste (MSW) in bioreactor landfill with degradation* (Master's Thesis). The University of Texas at Arlington.
- PLAXIS 2D-Reference manual: CONNECT Edition V20.02, 2020.
- Powrie, W., Richards, D., Velkushanova, K. (2009, March). Mechanisms of Settlement in Biodegradable Wastes. *Third International Workshop "Hydro-physico-mechanics of Landfills*. Braunschweig, Germany.
- Pulat H.F, Yükselen Aksoy, Y. (2015, Kasım). Sentetik ve doğal kentsel katı atıkların kayma mukavemetinin büyük ölçekli direk kesme deneyleriyle incelenmesi. *6. Geoteknik Sempozyumu*. Adana, Türkiye.
- Pulat, H. F., & Yükselen Aksoy, Y. (2017). Türkiye kentsel katı atık kompozisyonunun kayma mukavemeti özellikleri ve çevre dayanıklılığının incelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 28(1), 7703–7724. <https://doi.org/10.18400/tekderg.299128>
- Ramaiah, B. J., Ramana, G. V., & Kavazanjian, E. (05052014). Undrained Response of Municipal Solid Waste Collected from a Waste Site in Delhi, India. In K. R. Reddy & S. Shen (Eds.), *Geoenvironmental Engineering* (pp.130–139). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784413432.014>
- Reddy, K. R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J. E. (2011). Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 31(11), 2275–2286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.002>
- Shariatmadari, N., Machado, S. L., Noorzad, A., Karimpour-Fard, M. (2009). Municipal solid waste effective stress analysis. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 29(12), 2918–2930. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.009>
- Sivakumar Babu, G. L., Ering, P. (2017). Role of stress deformation behavior of municipal solid waste in landfill design. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul.
- Sivapullaiah, P. V., & Naveen, B. P. (2016). Municipal solid waste landfills construction and management-A few concerns. *International Journal of Waste Resources*, 6(2). <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000214>
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments, Assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17, 11-26.
- Sorg, T. J., Hickman, L.H., Jr. (1970). *Sanitary landfill facts* (2nd ed.). Public Health Service Publication No.1792: Washington, U.S. Government Printing Office.

- Sowers, G. F. (1973). Settlement of waste disposal landfills. *Proceeding of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, 207-210. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Speight, J. G. (2015). Waste gasification for synthetic liquid fuel production. In *Gasification for Synthetic Fuel Production* (pp. 277–301). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-802-3.00012-6>
- Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme. (2010). *A Practical guide to landfill management in Pacific Island Countries and Territories*. <https://www.sprep.org/attachments/WMPC/chapter1.pdf>
- United States Environmental Protection Agency. (2004). *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers*. (EPA/540-R-04-007)
- Stark, T. D., Huvaj-Sarihan, N., & Li, G. (2009). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. *Environmental Geology*, 57(8), 1911–1923. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1480-0>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering Principles and Management Issues*, New York: McGraw-Hill Companies, Incorporated,
- Tek H., Arel, E. (2017, Kasım). Şev duraylılığında deterministik analizlerin olasılıksal yöntemlerle değerlendirilmesi. *7. Geoteknik Sempozyumu*. İstanbul, Türkiye.
- Tekin, A. (2011). *Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Töremiş, E. İ. (2003). *Geotekstiller ve Plaxis sonlu elemanlar programı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Trivellato, M. (2014). *Geotechnical slope stability of the Este MSW landfill* (Master's Thesis). Università' Degli Studi Di Padova, Padova, Italy.
- Van Impe, W.F., Van Impe, P.O. (1999). Mechanical properties of MSW and considerations on consolidation of dredged materials. *Conferenze di Geotecnica di Torino*, Torino.
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). Municipal solid waste and the environment: A global perspective. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 277–309. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532>
- Walsh P., O'Leary P. (2002, July 01). Lesson 7: Preparing Landfill Designs & Specifications. Retrived October 13, 2022 from https://www.waste360.com/mag/waste_preparing_landfill_designs
- Wong, W. W. Y. (2009). *Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement conditions* (Master's Thesis). California Polytechnic State University, San Luis Obispo. <https://doi.org/10.15368/theses.2009.130>
- Yang, R., Xu, Z., Chai, J. (2018). A Review of Characteristics of Landfilled Municipal Solid Waste in Several Countries: Physical Composition, Unit Weight, and Permeability Coefficient. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(6), 2425–2435. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81089>

- Zeccos D.P (2005). *Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid waste* (Doctoral Thesis). University of California, California, Berkeley. Retrieved from <https://www.proquest.com/docview/305033786/previewPDF/CC7CBA25A1AD4B3EPQ/1?accountid=17384>
- Zeng, G., Liu, L., Xue, Q., Wan, Y., Ma, J., Zhao, Y. (2017). Experimental study of the porosity and permeability of municipal solid waste. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1694–1699. <https://doi.org/10.1002/ep.12632>
- Zekkos, D., Bray, J.D., Kavazanjian Jr. E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., Stokoe II, K.H. (2006). Unit weight of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(10), 1250–1261. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:101250>
- Zekkos, D., Athanasopoulos, G. A., Bray, J. D., Grizi, A., Theodoratos, A. (2010). Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 30(8-9), 1544–1555. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.024>
- Zekkos, D., Bray, J. D., Riemer, M. F. (2012). Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing. *Waste Management*, 32(10), 1873–1885. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.004>
- Zekkos, D., Vlachakis, V. S., Athanasopoulos, G. A. (2014). The 2010 Xerolakka landfill slope instability. *Environmental Geotechnics*, 1(1), 56–65. <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00003>

Konferans Bildirileri:

1. Bora, Y. (2020, September). Investigation of Slope Stability of Waste Body in Municipal Solid Waste Landfills by Numerical Analysis. *ACE 2020-21 14th International Congress On Advances in Civil Engineering*, İstanbul.

