



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DERİN KAZILAR NEDENİ İLE OLUŞAN
DEPLASMANLARIN İLERİYE VE GERİYE DOĞRU
ANALİZİ**

Halime Çağrı GÖKÇEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

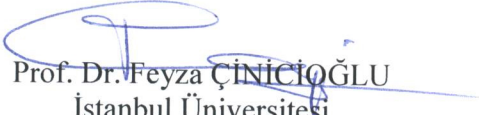
Ekim, 2014

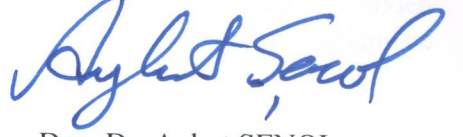
İSTANBUL

Bu çalışma 09/10/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

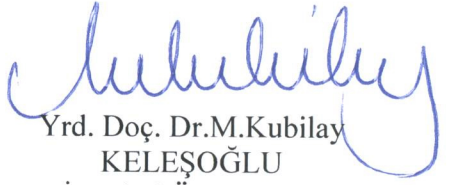
Tez Jürisi:


Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Feyza ÇINICIOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Aykut ŞENOL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi


Doç. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Yrd. Doç. Dr. M. Kubilay
KELEŞOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve yaptığım çalışmalar boyunca benden değerli yardımını ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım, değerli hocam Doç.Dr.Sadık ÖZTOPRAK'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda her türlü desteği sağlayan ve bu tez çalışması kapsamındaki vaka analizine altlık oluşturan projeleri benden esirgemeyen ZETAŞ' a ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince beni hiç yalnız bırakmayan, desteğini benden esirgemeyen Serhat Vanacha'ya ve en kıymetli varlıklarım annem, babam, ablam ve Emre ağabeyime teşekkürü borç bilirim.

Ekim, 2014

Halime Çağrı GÖKÇEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR-LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. TOPRAK BASINÇLARI	3
2.2 DERİN KAZILARIN ÇEVRESİNDEKİ DEPLASMANLARIN TAHMİNİ	10
2.2.1 Nümerik Yöntemler	11
2.2.2 Analitik Çalışmalar	14
2.2.3 Ampirik Çalışmalar	15
2.3 DERİN KAZI ÇEVRESİNDEKİ DEPLASMANLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	19
2.3.1 Kazı geometrisi	21
2.3.2 Zemin Parametreleri ve Zemin Modeli Etkisi.....	24
2.3.3 Dayanma Yapısı Özellikleri	32
2.3.4 İmalat.....	38
2.4. DERİN KAZILARIN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	39
2.4.1. Aletsel Gözleme İle Basit Geri Analiz.....	40
2.4.2. Aletsel Gözleme ile Gelişmiş Geri Analiz.....	40
2.5 DESTEKLİ DERİN KAZILARDA ALETSEL GÖZLEM	42
2.5.1 Genel Bilgiler	42
2.5.2 İnklinometre	45
2.5.3 Ekstansometre	46
2.5.4 Oturma Kolonu	47
2.5.5 Piyezometre.....	48

2.5.6 Yük Hücresi	48
3. MALZEME VE YÖNTEM	50
3.1 GENEL BİLGİLER.....	50
3.1.1 Derin Kazılar Nedeni İle Oluşan Deplasmanların İleriye Doğru Analizi.....	50
3.1.2 Derin Kazılar Nedeni İle Oluşan Deplasmanların Geriye Doğru Analizi	52
3.2 KULLANILAN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ.....	55
3.2.1 Programın Genel Özellikleri	55
3.2.2 Kullanılan Programda Yer Alan Zemin Bünye Modelleri.....	66
3.2.2.1 Kullanılan programda yer alan zemin parametrelerinin elde edilmesi ..	75
3.3. İNCELENEN ÖRNEK PROJE	79
3.3.1 İnşaat Alanı	82
3.3.2 İnceleme Alanında Gerçekleştirilen Zemin Etüd Çalışmaları	82
3.3.3 Zemin Profili	85
3.3.4 Jeofizik Ölçüm Sonuçları.....	95
3.3.6 Planlanan İksa Sistemi	96
3.3.7 Analiz Metodu.....	98
3.3.8 Aletsel Gözlem Çalışmaları	98
4. BULGULAR	99
4.1. DERİN KAZI SİSTEMİNDE DEFORMASYONLARI ETKİLEYEN PARAMETRELER ÜZERİNE NÜMERİK ANALİZ	101
4.1.1. Rf, vur, Etkisi	103
4.1.2. Zeminin Kohezyon (c) Değerinin Etkisi	104
4.1.3. Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ^0) Değerinin Etkisi	105
4.1.4. Sekant Elastisite Modülü Etkisi	106
4.1.5. Pref Etkisi.....	108
4.1.6. Tabakalanma Etkisi.....	109
4.1.7. Kazı Tabanında Jet Grout Kolonların Teşkilinin Etkisi.....	110
4.1.8. Kazı Tabanında Yeraltı suyu Seviyesinin Düşürülmesinin Etkisi	111
4.1.9. Ankraj Germe Kuvvetlerinin Etkisi	112
4.2. GERİ ANALİZ BULGULARI	113
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	126
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ.....	131

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Sükûnetteki toprak basıncı.	3
Şekil 2.2: Rankine aktif ve pasif toprak basıncı dağılımları.....	5
Şekil 2.3: Çekme çatlağı derinliği.	6
Şekil 2.4: Coulomb aktif toprak basıncı.	8
Şekil 2.5: Coulomb pasif toprak basıncı.....	8
Şekil 2.6: Terzaghi ve Peck tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.	9
Şekil 2.7: Tschebotarioff (1951) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.....	9
Şekil 2.8: Navfac (1988) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.....	10
Şekil 2.9: Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Bowles Yöntemi (1986).	18
Şekil 2.10: Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Peck Yöntemi (1969).....	18
Şekil 2.11: Farklı zemin tipleri için kazıdan kaynaklı zemin yüzeyi oturma zarfları (Clough ve O' Rourke, 1990).	19
Şekil 2.12: Maksimum duvar deplasmanı ve kazı derinliği arasındaki ilişki (Ou vd., 1993).....	21
Şekil 2.13: Derin kazılarda taban kabarması analizi (Terzaghi, 1943).....	22
Şekil 2.14: Farklı kazı genişliğinde meydana gelen duvar sehim (Gebreselassie, 2003).....	23
Şekil 2.15: Farklı kazı genişliğinde kazı tabanındaki kabarma(Gebreselassie, 2003).....	23
Şekil 2.16: Farklı kazı genişliğinde duvar arkasındaki zeminde meydana gelen zemin yüzey oturması (Gebreselassie, 2003).....	24
Şekil 2.17: Kazı profili ve zemin tabakaları (Ou vd., 2010).....	25
Şekil 2.18: Mohr Coloumb modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).....	26
Şekil 2.19: Modifiye Cam Kili modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).....	26
Şekil 2.20: Pekleşen zemin bünye modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).....	27
Şekil 2.21: Küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).....	27

Şekil 2.22: Drenajsız yumuşak kil zemin modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010)....	28
Şekil 2.23: Kazı profili ve zemin tabakaları (Schweiger, 2004).....	29
Şekil 2.24: Düşey elemanda meydana gelen eğilme momentleri.	30
Şekil 2.25: Duvar arkasında meydana gelen düşey deplasman.	30
Şekil 2.26: Düşey elemanda meydana gelen eğilme momentleri.	31
Şekil 2.27: Duvar arkasında meydana gelen düşey deplasman.	31
Şekil 2.28: Duvar rijitliğinin yanal deformasyonlar üzerindeki etkisi (Zapata, 2007).	33
Şekil 2.29: Duvar destek sistemi rijitliğinin yüksek olması durumunda duvar deformasyon şekli (a) birinci aşama kazı (b) ikinci aşama kazı (c) üçüncü aşama kazı.	34
Şekil 2.30: Duvar destek sistemi rijitliğinin düşük olması durumunda duvar deformasyon şekli (a) birinci aşama kazı (b) ikinci aşama kazı (c) üçüncü aşama kazı.	34
Şekil 2.31: Clough vd. (1989) tasarım kartı ile parametrik çalışmaların kıyaslanması (Zapata ve Bryson 2012).....	35
Şekil 2.32: Destek sistemi mesafesinin yanal deformasyonlara etkisi (Zapata, 2012).....	37
Şekil 2.33: Derin kazı sistemindeki deformasyon kontrol döngüsü.	39
Şekil 2.34: UCODE akış diyagramı.	41
Şekil 2.35: Ölçülen ve başlangıç ve best-fit parametreleri ile hesaplanan deplasmanların kıyaslanması UCODE yöntemi Calvello, ve Finno (2004).	42
Şekil 2.36: İnklinometre ölçüm seti elemanları.	47
Şekil 2.37: Ekstansometre ölçüm seti elemanları.	47
Şekil 2.38: Yük hücresi montaj gösterimi.	49
Şekil 3.1: Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların ileriye doğru analizi tipik akış şeması.	52
Şekil 3.2: Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların geriye doğru analizi tipik akış şeması.	54
Şekil 3.3: Plaxis programının başlatılması.	56
Şekil 3.4: Model başlangıç ekranı.	57
Şekil 3.5: Temel model ekranı.....	57
Şekil 3.6: Program ekranı genel görüntüsü.	58
Şekil 3.7: Plaxis programı araç çubuğu.	58
Şekil 3.8: Program ekranında çizgi eleman düğmesi.....	59

Şekil 3.9: Plakaların kullanım alanları.	60
Şekil 3.10: Program ekranında plaka eleman düğmesi.	60
Şekil 3.11: Geogridlerin kullanım alanları.	60
Şekil 3.12: Program ekranında geogrid eleman düğmesi.	61
Şekil 3.13: Program ekranında arayüzey tanımlama düğmesi.	61
Şekil 3.14: Program ekranında ankraj eleman seçimi.	62
Şekil 3.15: Program ekranında sınır tanımlama düğmesi.	62
Şekil 3.16: Program ekranında yük seçim düğmesi.	63
Şekil 3.17: Yük tanımlama penceresi.	63
Şekil 3.18: Malzeme parametreleri tanımlama düğmesi.	64
Şekil 3.19: Malzeme parametrelerinin tanımlandığı ana pencere.	64
Şekil 3.20: Zemin mühendislik parametrelerinin tanımlandığı pencere.	65
Şekil 3.21: Mohr Coulomb göçme kriteri.	68
Şekil 3.22: Drenajlı üç eksenli deneylerden E_0 ve E_{50} ' nin tanımlanması.	69
Şekil 3.23: E_{oed}^{ref} değerinin ödometre deneyinden elde edilmesi.	71
Şekil 3.24: Normalleştirilmiş kayma modülünün logaritmik kayma deformasyonu ile azalımı, deney yöntemleri ve mühendislik yapılarının projelendirildikleri kayma deformasyonu sınırları (Atkinson, 1991; Oztoprak & Bolton, 2011a)	73
Şekil 3.25: λ * ve κ *parametrelerinin belirlenmesi.	74
Şekil 3.26: Tanjant ve Sekant elastisite modülü.	75
Şekil 3.27: Gerilme bağımlı rijitlik parametresinin üç eksenli deneyden elde edilmesi	77
Şekil 3.28: Yapı vaziyet planı (ölçeksiz).	80
Şekil 3.29: Yapı tipik kesiti (ölçeksiz).	81
Şekil 3.30: Zemin etüdları yerleşim planı (ölçeksiz).	84
Şekil 3.31: Düzeltilmiş $SPT/(N_1)_{60}$ değerlerinin kot ile değişimi.	86
Şekil 3.32: CPT'den elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin kot ile değişimi.	87
Şekil 3.33: Zemin kayma mukavemeti açısının derinlik ile değişimi (Mayne, 1980).	88
Şekil 3.34: Atterberg limitleri ile likidite indisinin kot ile değişimi.	94
Şekil 3.35: Drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin kot ile değişimi.	95

Şekil 3.36: Kayma modülü ve Elastisite modülü değerlerinin derinlik ile değişimi.	97
Şekil 4.1: İksa ve aletsel gözlem ekipman yerleşim planı.	99
Şekil 4.2: Kesit 3-3 iksa kesiti model geometrisi.	100
Şekil 4.3: Kesit 3-3 bölgesinden ölçüm alan 1 no' lu inklinometre.	101
Şekil 4.4: R_f ve v_{ur} parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.	104
Şekil 4.5: Kohezyon (c) parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.	105
Şekil 4.6: Kayma mukavemeti açısı (ϕ°) parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.	106
Şekil 4.7: Sekant elastisite modülü parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.	107
Şekil 4.8: Pref ve Sekant rijitliği parametrelerinin derinlik ile değişimi.	108
Şekil 4.9: Pref parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.	109
Şekil 4.10: Tabakalanma durumunun yanal deformasyonlara etkisi.	110
Şekil 4.11: Kazı tabanındaki yüksek modüllü kolonların (jet grout) yanal deformasyonlara etkisi.....	111
Şekil 4.12: Yeraltı suyu seviyesi değişiminden kaynaklı deformasyonlar.	112
Şekil 4.13: Ankraj germe yüklerinden kaynaklı deformasyonlar.	113
Şekil 4.14: HS Model geri analiz grafikleri 1.....	114
Şekil 4.15: HS Model geri analiz grafikleri 2.....	115
Şekil 4.16: HS Model geri analiz grafikleri 3.....	116
Şekil 4.17: HS Model geri analiz grafikleri 4.....	117
Şekil 4.18: HS Model geri analiz grafikleri 5.....	118
Şekil 4.19: İsko 9 bölgesinde geri analiz çalışmaları.	119
Şekil 4.20: Arazi verilerinin karşılaştırılması.....	120
Şekil 4.21: HS-Small model geri analiz grafikleri 1.....	122
Şekil 4.22: HS-Small Model geri analiz grafikleri 2.	123
Şekil 4.23: Farklı zemin bünye modeli ile gerçekleştirilen analizlerin kıyaslanması.....	123

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Kullanılan sonlu elemanlar programında kullanılan temel zemin bünye modellerinin özeti.	67
Tablo 3.2: CPT özet tablosu.	82
Tablo 3.3: Sondaj özet tablosu.	83
Tablo 3.4: Jeofizik çalışmalar özet tablosu.	83
Tablo 3.5: Laboratuvar özet tablosu.	89
Tablo 3.6: Laboratuvar özet tablosu (devam).	90
Tablo 3.7: Laboratuvar özet tablosu (devam).	91
Tablo 3.8: Laboratuvar özet tablosu (devam).	92
Tablo 3.9: Laboratuvar özet tablosu (devam).	93
Tablo 3.10: Jeofizik sonuçları özet tablosu.	96
Tablo 3.11: Aletsel gözlem ekipmanları özet tablosu.	98
Tablo 4.1: Ankraj öngerme kuvvetleri.	102
Tablo 4.2: Plaka ve ankraj elemanlara ait parametreler.	102
Tablo 4.3: Jetgrout kolonlar için kullanılan parametreler.	102
Tablo 4.4: Referans zemin parametreleri.	103
Tablo 4.5: Best Fit parametreleri özet tablosu.	124
Tablo 4.6: Parametre önem tablosu.	125

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
B	: Kazı genişliği
c	: Kohezyon
c_c	: Sıkışma indeksi
c_r	: Yeniden sıkışma indeksi
c'_{ref}	: Referans kayma mukavemeti
c_s	: İkincil sıkışma indeksi
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
CL	: Düşük plastisiteli kil
D	: Etki oranı
E	: Young modülü
EA	: Normal rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
e_{init}	: Başlangıç boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E_{oed}^{ref}	: Sıkışma referans modülü
E_{ur}^{ref}	: Yükleme boşaltma referans modülü
E_{50}^{ref}	: Sekant referans modülü
E_0	: Başlangıç rijitlik modülü
FS	: Güvenlik katsayısı
G_0	: Kayma modülü
H	: Kazı derinliği
H_e	: Nihai kazı derinliği
H_p	: Pasif kazı derinliği
K_a	: Aktif toprak basınç katsayısı
K_{ae}	: Depremlili durumdaki aktif toprak basıncı katsayısı
K_p	: Pasif toprak basınç katsayısı
$K_{0,nc}$	: Normal konsolide killerde sükunetteki toprak basıncı
$K_{0,oc}$	: Aşırı konsolide killerde sükunetteki toprak basıncı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı
K^*	: Modifiye şişme indeksi
LL	: Likit limit
l_x	: Duvardan uzaklık
m	: Kütle
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
P_a	: Aktif toprak basıncı itkisi
p^{ref}	: Referans gerilme
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
q	: Sürşarj yükü

R	: Bileşke kuvvet
R_{inter}	: Azaltma katsayısı
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
ν	: Poisson oranı
ν_s	: Zeminin kayma dalgası hızı
ν_{ur}	: Yükleme boşaltma durumunda poisson oranı
W	: Düşey kuvvet
w_n	: Doğal su muhtevası
z_c	: Çekme çatlağı derinliği
δ_{hm}	: Maksimum deformasyon
δ_{inter}	: Ara yüzey azaltma katsayısı
δ_v	: Oturma değerinin duvardan uzaklığı
δ_{vm}	: Maksimum zemin yüzey oturması
θ'	: Sismik açı
θ_1	: Dönme açısı
λ^*	: Modifiye sıkışma indeksi
φ'	: Efektif kayma mukavemeti açısı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_{sat}	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_{unsat}	: Doygun olmayan birim hacim ağırlık
γ_{07}	: Kayma modülünün %70 oranında azaldığı durumdaki kayma deformasyonu
σ_a	: Aktif zemin basıncı
σ_h	: Yanal gerilme
σ_p	: Pasif zemin basıncı
σ_v	: Düşey gerilme
$\psi_{(psi)}$	: Dilatans açısı
α	: Duvar arkası dolgu yüzeyinin yatayla yaptığı açı
β	: Duvar sırtının düşeyle yaptığı açı
μ^*	: Modifiye sünme indeksi
ρ	: Yoğunluk
φ	: Kayma mukavemeti açısı
γ	: Kayma birim deformasyonu
σ_h'	: Efektif yanıl gerilme
σ_v'	: Efektif düşey gerilme

Kısaltmalar

Açıklama

CPT	: Konik Penetrasyon Deneyi
FHWA	: Amerika Birleşik Devletleri Otoyollar İdaresi
HS	: Pekleşen Zemin Bünye Modeli
HS-SS	: Küçük Deformasyonları Dikkate Alan Pekleşen Zemin Bünye Modeli
MC	: Mohr Coulomb Zemin Bünye Modeli
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
USC	: Drenajsız Yumuşak Kil Zemin Modeli
YASS	: Yer altı suyu seviyesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERİN KAZILAR NEDENİ İLE OLUŞAN DEPLASMANLARIN İLERİYE VE GERİYE DOĞRU ANALİZİ

Halime Çağrı GÖKÇEK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK

Son yıllarda yoğun kentleşme ile bodrumlu yapıların tasarımı önem kazanmıştır. Bodrumlu yapıların temellerinin kazısı esnasında destek sistemlerinin kullanılması da kaçınılmaz hale gelmiştir. Destek sistemlerinin tasarımı klasik limit denge yaklaşımı ile yapılsa da bu yeterli olmamakta, destek sistemi ve çevresindeki deformasyonların hesaplanmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda bu tez çalışmasında yumuşak alüvyon bir zeminde yapılan derin bir kazının aletsel gözlemleme verisi kullanılarak geriye doğru nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile yapılan bu geri analizlerde parametre ve model seçimi irdelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda derin kazı çevresindeki deplasmanları etkileyen faktörler belirlenmiş olup sahayı temsil edecek en uygun parametrelerin seçimi sağlanmıştır. Kazı çevresindeki deplasmanlar üzerinde elastisite ve deformasyon modülü değerlerinin büyük oranda etkili olduğu, zeminin kayma mukavemeti açısı ve kohezyon değerlerinin deformasyon modülüne nazaran daha az etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde deneme yanılma ile gerçekleştirilen geri analizlerde, kullanılan zemin bünye modelinin etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Ekim, 2014, 142 Sayfa

Anahtar kelimeler: Derin kazı, deformasyon, aletsel gözlemleme, geri analiz, nümerik analiz

SUMMARY

M.Sc. THESIS

FORWARD and BACK ANALYSES OF DISPLACEMENTS CAUSED BY DEEP EXCAVATIONS

Halime Çağrı GÖKÇEK

İstanbul University

Graduate School of Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor : Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK

Summary text Latest years due to the urbanization of the big cities the requirement of the structures with multi storey basement is increased. Considering the basement level of the structures and the foundation excavation depth, deep excavation and the retaining system design became inevitable. Even if the support system design is performed with conventional limit state approach, the calculation of the deformations of the retaining structure and around of it is also required. In this context, within this thesis, numerical back analyses are performed by using the monitoring data of a soft alluvium soil. The parameter and the constitutive soil model effect is studied by utilizing finite element method.

As a result of the analyses, the most effective parameters on the deformations around the retaining structure and the representative best-fit parameters are defined. The modulus of elasticity and the deformation is the most effective parameter comparing to the shear strength and the angle of shearing resistance. In the back analyses with trial and error method, it is also concluded that the selection of the constitutive soil model has a significant effect on the deformations.

October ,2014, 142 Pages

Keywords: Deep excavation, deformation, monitoring, numerical analyses

1. GİRİŞ

Günümüzde yoğun kentleşmeye bağlı olarak, özellikle büyük şehirlerde inşaat alanlarının yetersiz kalması ve mevcut alanların ekonomik değerlerinin artması söz konusu olmuştur. Yer tasarrufuna ve daha fazla alana duyulan ihtiyaç, yüksek yapıların sayısında artışa neden olmuş ve bu yapıların bodrumlu yapılar olarak inşasını zorunlu hale getirmiştir. Bu yapıların temel kazılarının derin olması ve kazı çevresindeki mevcut yapılar yapılacak kazıların iksa sistemleri ile desteklenmesini zorunlu kılmaktadır.

Derin kazılar esnasında yatay gerilme boşalması nedeniyle kazı çevresinde bir takım yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Derin kazı gerektiren yapıların inşası boyunca, kazı çevresinde meydana gelebilecek bu yer değiştirmeleri izin verilebilir sınırlar içerisinde tutmak ve kazı çevresinde yer alan bina, yol vb. yapılarda meydana gelebilecek hasar riskini en aza indirmek amacıyla yönelik bir destekleme sistemi seçilmelidir.

Derin kazı sistemlerinde zemin hareketleri; zemin profili, yeraltı suyu koşulları, inşaat süreci, destek sistemi özellikleri, kazı süreci gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Güvenlik kriterleri bakımından bu etkilerin incelenmesi ve derin kazı nedeniyle meydana gelen zemin hareketlerinin ve yer değiştirmelerin izin verilebilir sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir. Güvenlik ve ekonomi koşulları göz önünde bulundurulduğunda kazı destekleme sistemlerinin uzun vadeli olarak performansının değerlendirilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Günümüzde derin kazı sistemlerinin performansı aletsel gözlem yöntemleriyle incelenmektedir. Aletsel gözlem yöntemi ile derin kazılarda tasarımla uygulamanın uyumu, başlangıçta öngörülen kabullerin doğruluğu ve tasarım güvenlik kriterleri inşaat aşamasında ve sonrasında kolaylıkla denetlenebilmektedir. Bu amaca yönelik değerlendirmeler günümüzde geri analiz çalışmalarını gerekli kılmaktadır.

Bu doğrultuda, bu tez çalışması kapsamında, yumuşak alüvyon bir zeminde yapılan derin bir kazı sisteminin aletsel gözlem verisi kullanılarak geriye doğru nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının ikinci bölümünde derin kazıların çevresindeki

deplasmanların önceden tahmininde kullanılan metodlara kısaca yer verilmiş, derin kazılar etrafındaki deformasyonlara etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ve incelenen örnek projeye ilişkin detaylı bilgiler sunulmuştur. Bu bölümün devamında destekli derin kazı sistemlerinde meydana gelen deformasyonları etkileyen faktörler bir sonlu elemanlar programında nümerik analizlerle incelenmiştir. Daha sonra farklı zemin bünye modelleri kullanılarak aletsel gözlem verileri ile en uyumlu sonuçlara ulaşabilmek amacıyla deneme-yanılma yoluyla basit geri analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz bulguları tartışma ve sonuç bölümünde yorumlanmıştır

2. GENEL KISIMLAR-LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

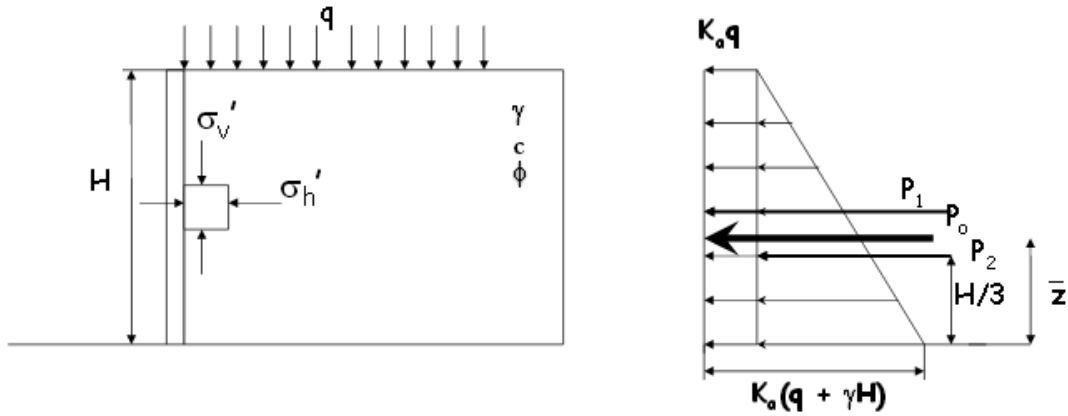
2.1. TOPRAK BASINÇLARI

Derin kazılarda deformasyon ve gerilme analizlerinde toprak basınçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Dayanma yapılarının güvenli ve ekonomik olarak çözümlenebilmesi için dayanma yapısı arkasında yer alan zeminden gelecek toprak basınçlarının doğru olarak belirlenmesi gerekir. Problemlerin çözümü esnasında öngörülen yanlış toprak basıncı dağılımları ekonomik olmayan ya da güvensiz sistem tasarımlarına neden olabilir. Bu bölümde literatürde sıklıkla kullanılan toprak basıncı teorilerine değinilecektir.

İstinat Duvarı ve Konsol Sistemdeki

Sükûnetteki Toprak Basıncı

Dayanma yapısının zemine ya da zeminin dayanma yapısına göre hiç hareket etmediği durumda oluşan toprak basıncına “Sükûnetteki Toprak Basıncı” denir.



Şekil 2.1: Sükûnetteki toprak basıncı.

Zemin yüzeyinden z derinlikteki yanal efektif gerilmeler,

$$\sigma_h' = \sigma_v' \cdot K_o \quad (2-1)$$

Toplam yanal gerilmeler ise,

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_o + u \quad (2-2)$$

Burada; σ_v z derinliğindeki efektif düşey gerilme, u su basıncı, K_o ise sükûnetteki toprak basıncı katsayısıdır.

K_o değeri aşağıdaki bağıntılardan belirlenebilir.

$$\text{Granüler zeminlerde} \quad K_o = 1 - \sin \phi' \quad \text{Jacky(1944)} \quad (2-3)$$

$$\text{Normal Konsolide Killerde} \quad K_{o,nc} = 0.95 - \sin \phi' \quad (2-4)$$

$$\text{Aşırı Konsolide Killerde} \quad K_{o,oc} = K_{o,nc} \sqrt{OCR} \quad (2-5)$$

Burada ϕ' killi zeminlerde efektif gerilmelere göre kayma direnci açısı, OCR aşırı konsolidasyon oranıdır.

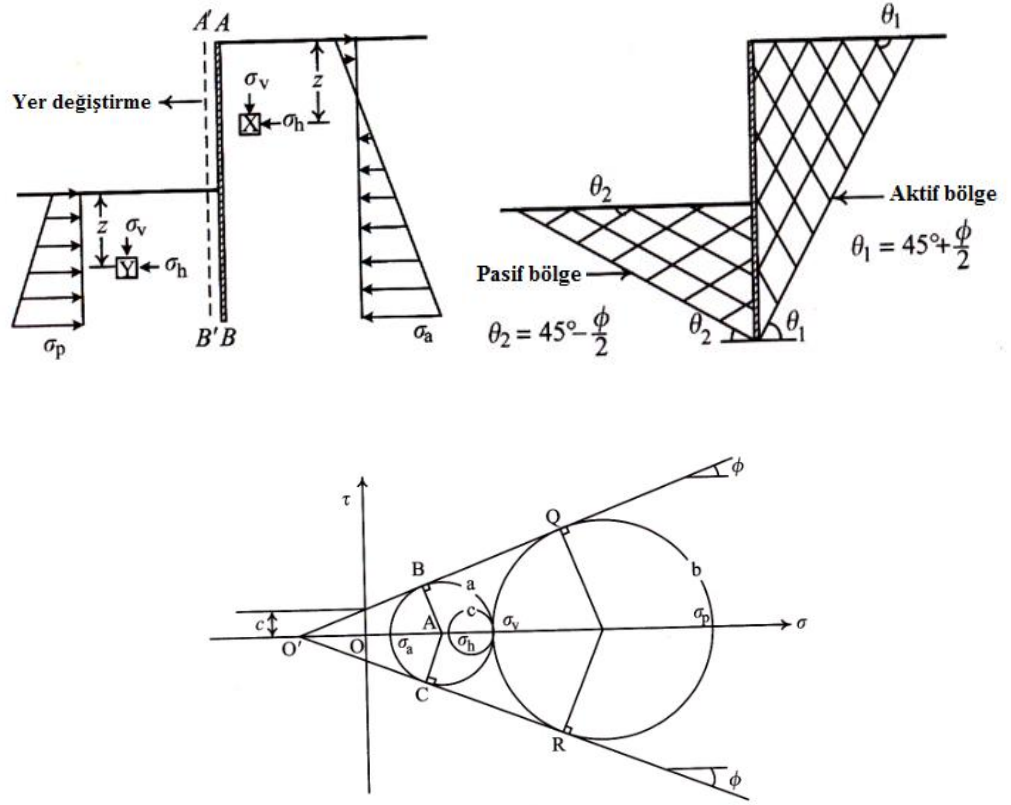
Ayrıca yine normal konsolide killer için Brooker ve Ireland (1965) tarafından plastisite indisine bağlı olarak aşağıdaki bağıntılar önerilmektedir.

$$0 < PI < 40 \quad K_o = 0.4 + 0.007(PI) \quad (2-6)$$

$$40 < PI < 80 \quad K_o = 0.64 + 0.001(PI) \quad (2-7)$$

Rankine Teorisine Göre Aktif ve Pasif Toprak Basıncı

Rankine (1857) tarafından plastik denge kavramı temel alınarak göçme koşullarında istinat duvarının önündeki ve arkasındaki yanal toprak basınçlarıyla ilgili bir toprak basınç teorisi geliştirilmiştir. Bu teoriye göre; Şekil 2.2' den görüldüğü üzere, duvarın önünde ve arkasındaki zeminin dayanım parametreleri c ve ϕ' dir. Duvar ve zemin arasında herhangi bir sürtünme olmadığı ve dayanma yapısı harekete geçmeden evvel duvarın önünde ve arkasındaki toprak basıncı koşullarının sükûnette olduğu varsayıldığında, bu durumdaki zemin yüzeyinden z (m) derinlikteki X ve Y noktalarındaki düşey gerilmeler aynı olup gerilme durumu Şekil 2.2' deki Mohr daireleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.2: Rankine aktif ve pasif toprak basıncı dağılımları.

Duvar arkasında meydana gelen toprak basınçlarından kaynaklı olarak duvar A'B' yönünde ötelenmektedir. Düşey gerilme koşulları sabit kalırken yatay gerilmeler azalır, Mohr daireleri genişler ve göçme anında X noktasında kırılma zarfı ile kesişir. Bu tip göçme aktif göçme ve bu durumdaki toprak basıncı da aktif toprak basıncı olarak tanımlanır ve aşağıdaki formüllerden elde edilir.

$$\sigma_a = \sigma_v \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-8)$$

Veya

$$\sigma_a = \sigma_v K_a - 2c \sqrt{K_a} \quad (2-9)$$

Burada K_a : Rankine yatay aktif toprak basıncı katsayısı, c ve ϕ toplam gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametreleridir. Kırılma düzlemi yatayla toplam gerilmeler için $\left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$, efektif gerilmeler için ise $\left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$ açısını yapacaktır.

Suya doymun killerde ise kısa süreli analizlerde drenajsız koşullar geçerli olup $\phi_u=0$ ve $K_a=1$ olup eşitlik,

$$\sigma_a = \sigma_v - 2c_u \quad (2-10)$$

Granüler zeminlerde ise $c=0$ olup,

$$\sigma_a = \sigma_v K_a \quad (2-11)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-12)$$

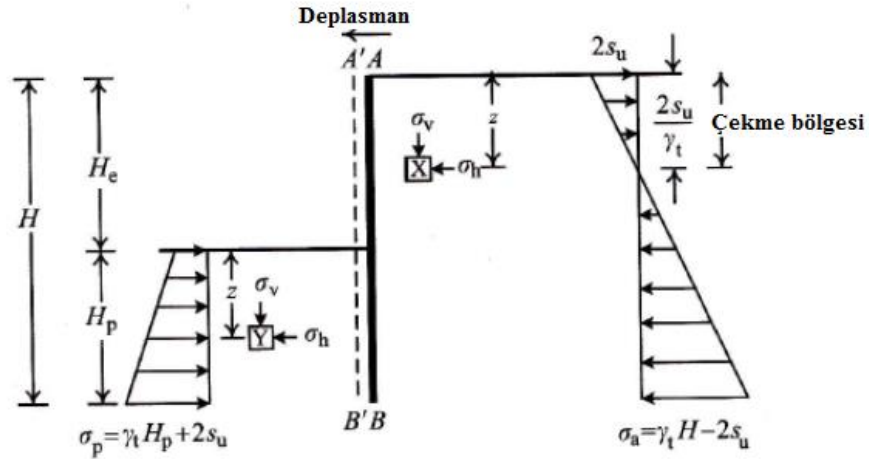
Duvar arkasındaki zeminin yatayla açısı yapması durumunda aktif toprak basıncı katsayısı aşağıdaki eşitlikten belirlenmektedir.

$$K_a = \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}} \quad (2-13)$$

Yanal gerilmelerin pozitif değere geçtiği nokta için $\sigma_a = 0$ yazılırsa;

$$z_c = \frac{2c}{\gamma + \sqrt{K_a}} \quad (2-14)$$

Burada z_c çekme çatlağı derinliğini göstermektedir (Bknz. Şekil 2.3)



Şekil 2.3: Çekme çatlağı derinliği.

Şekil 2.2' de duvar arkasındaki toprak basınçlarının duvarı öne doğru ötelediği görülüyor. Duvar önünde zemin yüzeyinden herhangi bir z derinliğinde, Y noktasındaki yatay gerilmeler artarken düşey gerilmeler sabit kalır. Yatay gerilmeler düşey

gerilmelere ulaştığında, Mohr daireleri genişlemeye başlar. Mohr dairesi kırılma zarfında herhangi bir nokta ile kesiştiğinde Y noktasındaki zeminde göçme yaşanır. Bu durumdaki toprak basınçlarına pasif toprak basıncı, bu durumda meydana gelen zemin göçmesine ise pasif göçme denir ve aşağıdaki formüllerden elde edilir;

$$\sigma_p = \sigma_v \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-15)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-16)$$

Burada K_p : Rankine yatay pasif toprak basıncı katsayısı, c ve ϕ toplam gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametreleridir. Kırılma düzlemi yatayla toplam gerilmeler için $\left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$, efektif gerilmeler için ise $\left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$ açısını yapacaktır.

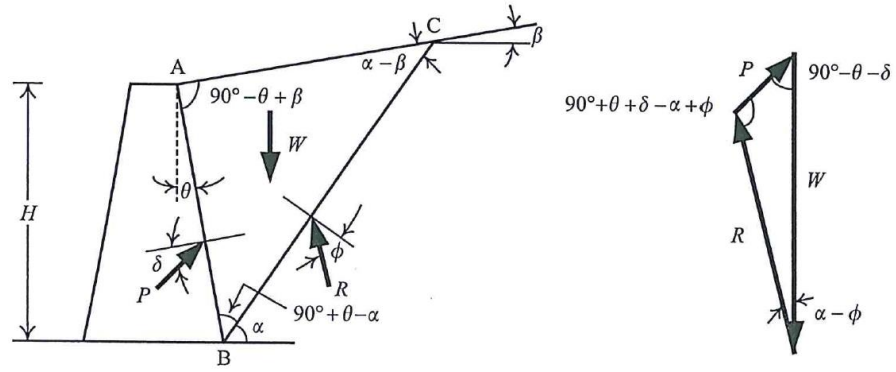
Coulomb Teorisine Göre Aktif ve Pasif Toprak Basınçları

Coulomb (1776) toprak basıncı teorisi, dayanma yapısı arkasındaki zeminin homojen ve kohezyonsuz, göçme yüzeyinin bir düzlem, duvar ve kayma düzlemi arasında kalan kamanın rijit bir materyal olduğu ve kama ağırlığı ve zemin ile duvar reaksiyonlarının birbirleri ile dengede olduğu kabulünü yapar.

Coulomb Aktif Toprak Basıncı

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (2-17)$$

$$K_a = \cos \alpha \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\delta + \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (2-18)$$

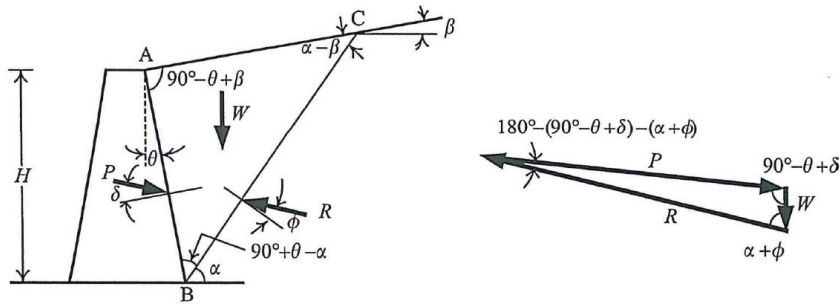


Şekil 2.4: Coulomb aktif toprak basıncı.

Coulomb Pasif Toprak Basıncı

$$\sigma_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p \quad (2-19)$$

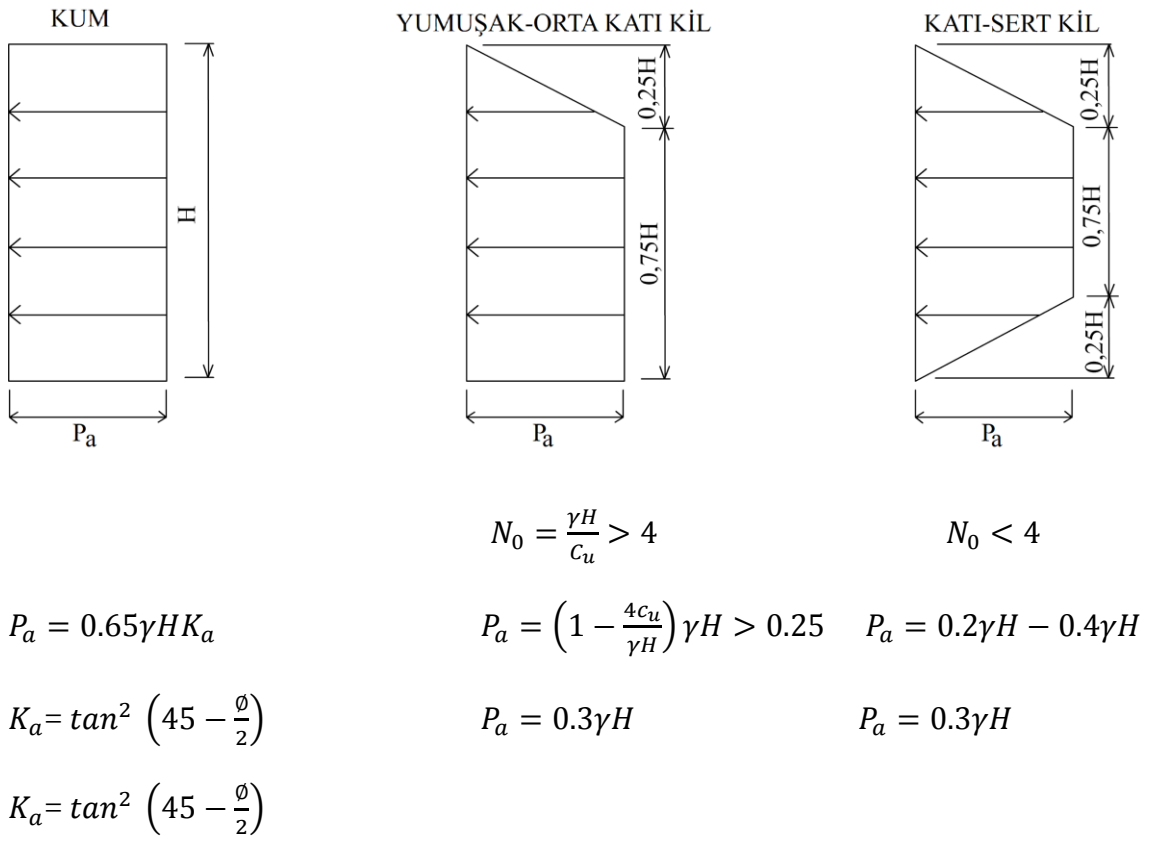
$$K_a = \cos \alpha \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\delta - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi + \beta)}{\cos(\delta - \phi) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (2-20)$$



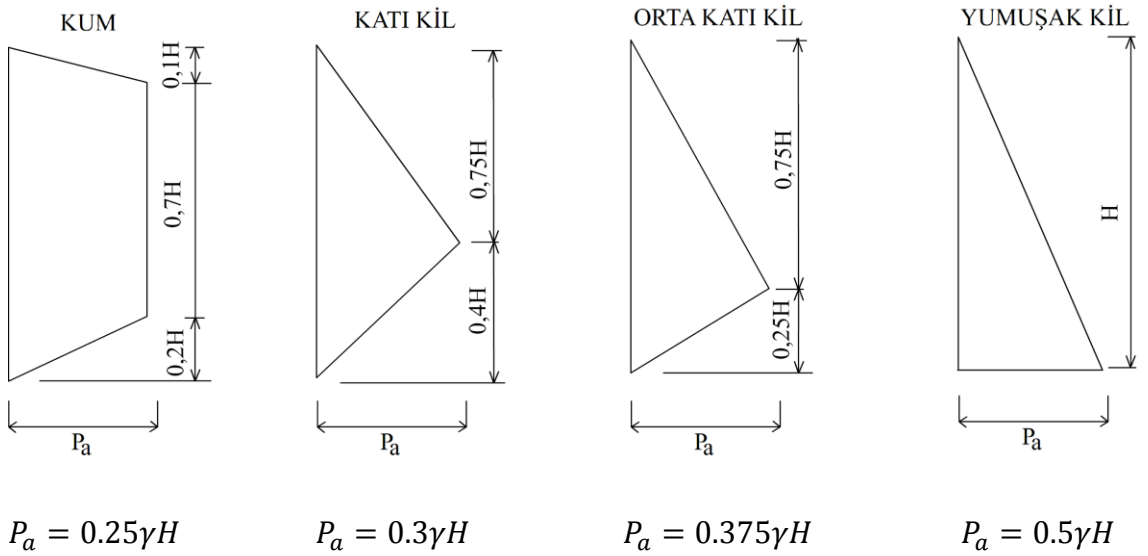
Şekil 2.5: Coulomb pasif toprak basıncı.

Çok Sıra Destekli Sistemlerdeki Toprak Basıncı

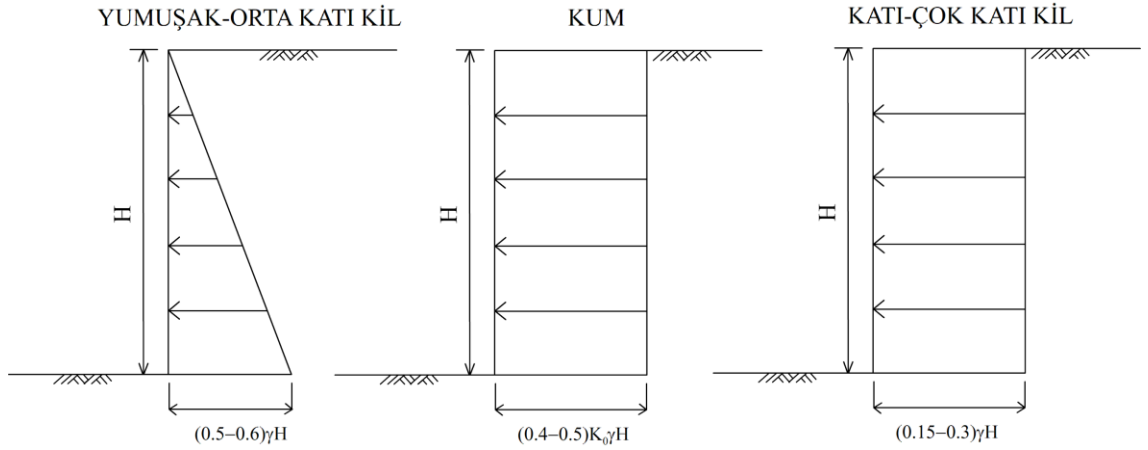
Kazı aşamalarında yerleştirilen destekler, zeminin yanal hareketlerini sınırlamakta olup desteklere aktarılan yükler aktif itki kuramı ile beklenenden daha fazla olmaktadır. Çeşitli araştırmacıların gözlemleri ve vaka analizleri doğrultusunda geliştirdiği toprak basıncı dağılımı yaklaşımları aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 2.6: Terzaghi ve Peck tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.



Şekil 2.7: Tschebotarioff (1951) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.



Şekil 2.8: Navfac (1988) tarafından önerilen toprak basıncı dağılımı.

Deprem Yükleri Altındaki Toprak Basıncıları

Coulomb aktif itki kuramı depremli durumda deprem etkisi de göz önüne alınarak Mononobe-Okabe (1929) tarafından geliştirilmiştir.

$$K_{ae} = \frac{\sin^2(\phi + \beta - \theta')}{\cos \theta' \sin^2 \beta \sin(\beta - \theta' - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta' - \alpha)}{\sin(\beta - \delta - \theta') \sin(\alpha + \beta)}} \right]} \quad (2-21)$$

K_{ae} depremli durumdaki aktif toprak basıncı katsayısı

ϕ =Zeminin kayma mukavemeti açısı,

β =Duvar sırtının düşeyle yaptığı açı

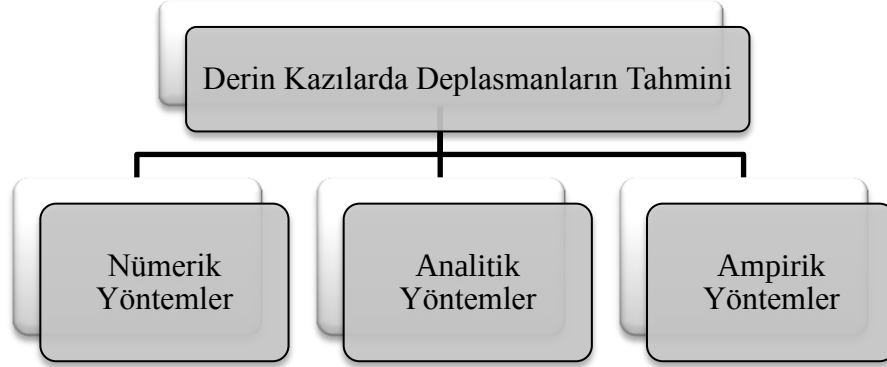
θ' =Sismik açı

α = Duvar arkası dolgu yüzeyinin yatayla yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır.

2.2 DERİN KAZILARIN ÇEVRESİNDEKİ DEPLASMANLARIN TAHMİNİ

Günümüz ihtiyaçlarından doğan derin kazıların uygulanması esnasında, derin kazılardan dolayı meydana gelen deplasmanlar, derin kazı performansı ve çevresindeki mevcut yapılara etkisinin irdelenmesi açısından önem arz etmektedir. Derin kazılardan kaynaklı meydana gelen deplasmanların tahmininde, genellikle sonlu elemanlar ya da sonlu farklar yöntemlerini benimseyen yazılımlarla gerçekleştirilen nümerik yöntemler,

ampirik bağıntılardan yola çıkılarak geliştirilmiş analitik yöntemler ve pratik çözümler sunan ampirik yöntemler kullanılmaktadır.



2.2.1 Nümerik Yöntemler

Derin kazılar nedeniyle meydana gelen deplasmanların tahmini için standart bir yöntem yoktur. Mevzut tahmin yöntemleri ampirik gözlem ya da sayısal modelleme (nümerik yöntem) metodlarına dayanmaktadır. Aşamalı olarak gerçekleştirilen derin kazıların karmaşıklığı ve birbirinden çok farklı özellikler taşıyan zemin koşulları için sınırlı verilerden yola çıkılarak oluşturulmuş ampirik bağıntıları kullanmak deplasmanların hassas bir şekilde tahmini için yeterli olmayabilir. Bu nedenlerden ötürü, ampirik tahmin yöntemlerine nazaran derin kazı sistemini daha iyi modelleyebilen nümerik yöntemler tercih edilmektedir. Geoteknik parametre tayini, zemin bünye modeli seçimi gibi hala birçok karmaşıklık bünyesinde barındırıyor olmasına rağmen derin kazı performansı en uygun şekilde nümerik olarak modellenabilmektedir.

Nümerik yöntemler, yaygın olarak sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerini benimseyen yazılımlarla uygulanabilmektedir. Bu tür yazılımlar bir ön tasarım gerektirmekte ve aşağıda belirtilen program girdilerine ihtiyaç duymaktadır;

- Kazı geometrisi
- Zemin bünye modeli ve seçilen zemin bünye modeline ilişkin zemin parametreleri
- Dayanma yapısı elemanlarının özellikleri (tür, boyut, rijitlik)
- Dayanma yapısına etkiyecek gerilmeler
- Saha koşullarının hâkim olduğu drenajlı ve drenajsız durum davranışı

Sonlu elemanlar ve sonlu farklar yöntemlerini benimseyen yazılımlar ile yapılacak nümerik analizlerde şu işlem adımları uygulanır. Güvenlik kriterlerini sağlayacak şekilde bir derin kazı destek sistemi seçilir ve şartnameler dikkate alınarak bir ön tasarım yapılır. Kazı geometrisi ve yapılan ön tasarım, saha koşullarını en iyi şekilde temsil edecek zemin bünye modeli ve ilgili zemin parametreleri ile programda modellenir. Analiz durumu drenajlı ve drenajsız koşullar için farklı durumları temsil edecek şekilde yapılabilir. Böylece öngörülen tasarımda meydana gelebilecek olası deformasyonlar önceden hesaplanabilmektedir. Analizler neticesinde elde edilen bulgular, şartnamelerde önerilen deformasyon ve güvenlik kriterlerini sağlayacak şekilde olmalıdır.

Nümerik yöntemler kullanılarak derin kazılarda deformasyonları etkileyen faktörler farklı araştırmacılar tarafından incelenmiş olup bu konuda yapılan çalışmalar aşağıda kısaca yer verilmektedir.

Mana ve Clough (1981) duvar rijitliği, yatay destek sistemi aralığı, yatay destek sistemi rijitliği, kazı geometrisi ve zemin rijitlik parametreleri gibi birçok faktörün derin kazılar nedeniyle meydana gelen deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Powrie ve Li (1991) tarafından tek destek sistemli dayanma yapıları kazıları için bir seri nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında zemin, duvar ve destek sistemi rijitliği ile kazı öncesi basınç katsayısı etkileri araştırılmıştır. İncelenen yapının çok rijit olması durumunda meydana gelen deformasyonların duvardan ziyade zemin tarafından karşılandığı belirtilmiştir. Zemin rijitliğinde meydana gelen bir azalmanın duvarda meydana gelen deformasyonu 2 kat arttırdığı ifade edilmiştir. Diğer taraftan, yatay toprak basınçlarının yatay destek sistemi yüklerinden ve eğilme momentlerinden büyük oranda etkilendiği ve bu nedenle zemin rijitliğindeki artışın deformasyonları fazla miktarda etkilemediği ifade edilmiştir.

Addenbrooke vd. (2000) tarafından sert kilde drenajsız koşullar altında toplam 30 adet sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucu Rowe fleksibilite numarasının bir uzantısı olarak yeni bir yer değiştirme flexibilite numarası yaklaşımı ortaya atılmıştır.

Wong ve Broms (1989) ve Goh (1994) tarafından kazı genişliği, kazı derinliği, duvar rijitliği, duvar penetrasyon derinliği gibi birçok faktörün derin kazı sistemlerindeki deformasyonlara etkisi sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Buna ek olarak non-lineer elasto-plastik modellerin yanısıra küçük deformasyon davranışları da bu nümerik analizlere dâhil edilerek mevcut vaka verileri ile kıyaslanmıştır.

Whittle vd. (1993) tarafından top-down yöntemiyle inşa edilen yedi katlı bir yer altı otopark yapısı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar, gerçek arazi verileri ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda arazi verileri ile uyumlu olacak şekilde sonuçlar elde edilmiş olup, sahayı temsil edecek zemin tanımlamalarının hassas bir şekilde yapılması gerektiğinin önemi vurgulanmıştır.

Hashash ve Whittle (1996) tarafından ileri düzey sonlu elemanlar programlarını kullanarak, duvar gömülü derinliği etkisi ve destek sistemi özellikleri üzerine bir seri nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde derin yumuşak kil tabakalarda duvar derinliğinin göçme öncesi deformasyonlarda çok bir etkisi olmadığı, ancak zemindeki göçmenin meydana geleceği lokasyon üzerinde büyük etkisi olduğu vurgulanmıştır.

Jen (1998) tarafından derin kazılardaki deformasyonları etkileyen anahtar parametrenin neler olduğunu belirleyebilmek adına bir seri parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Kaya derinliğinin deformasyonların dağılımını etkilediği, kazı genişliği, kazı derinliği, zeminin gerilme geçmişi ve destek sistemi rijitliğinin yer değiştirmelerin boyutları üzerinde büyük etkisi olduğu belirtilmiştir.

Lim, Ou ve Hsieh (2010) tarafından zemin bünye modellerinin derin kazılardaki deformasyonlara etkisini irdelemek amacıyla bir seri nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler esnasında Cam Kili, pekleşen zemin modeli ve küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin modeli ile Lim, Ou ve Hsieh (2010) tarafından geliştirilen USC zemin bünye modelleri kullanılarak arazi verileri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan nümerik çalışmalar doğrultusunda Drenajsız yumuşak zemin modeli ile yapılan analizlerin, diğer tüm zemin modellerine nazaran tüm kazı aşamaları için arazi verileriyle en uyumlu sonucu verdiği gözlenmiştir.

Schweiger (2004) tarafından benzer şekilde üç farklı zemin bünye modelinin, zemin koşullarının derin kazılardaki deplasmanlara etkisinin irdelenmesi amacıyla sonlu elemanlar programı ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Mohr Coulomb, pekleşen zemin ve küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modelleri irdelenmiştir. Analizler neticesinde elde edilen deformasyon değerlerinin saha verileriyle küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modelinde yakalandığı belirtilmiştir.

Gebreselassie (2003), zemin drenaj koşullarının derin kazılardaki deformasyonlara etkisini birçok nümerik analiz gerçekleştirerek detaylı olarak irdemiştir. Bunun yanı sıra zemin bünye modelleri, zemin parametreleri ve kazı geometrisinin derin kazılardaki deformasyonlar üzerine etkisini irdeleyen birçok nümerik analiz mevcuttur.

Bryson ve Zapata-Medina (2012) tarafından destekli sistemlerdeki sistem rijitliğinin etkisini irdelemek amacıyla 48 adet nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Sistem sonlu elemanlar programında üç boyutlu olarak tasarlanmış olup gerçekleştirilen analizler sonucu sistem rijitlik faktörü kavramı ortaya atılmıştır.

2.2.2 Analitik Çalışmalar

Derin kazılar nedeniyle meydana gelen deplasmanların önceden tahmininde Osman ve Bolton (2004) tarafından geliştirilen analitik bir hesap yöntemine değinilmiştir. Osman ve Bolton (2004) tarafından derin kazılar etrafında meydana gelen deplasmanların herhangi bir sonlu elemanlar programına ihtiyaç duyulmadan yalnızca sınırlı laboratuvar deney sonuçları kullanılarak belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda enerjinin korunumu prensibi ile deformasyonları meydana getiren enerji alanı belirlenerek deformasyonların önceden tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Mobilize Olan Kayma Mukavemetine Dayanan Tasarım

Mobilize olan kayma mukavemetine dayanan tasarım (MSD), Milligan ve Ransby, 1975, Bolton ve Powrie 1988, Bolton vd. 1989, 1990a, 1990b tarafından incelenen mobilize dayanım konseptinden ilham alarak ortaya çıkmış deplasman tahmininde kullanılan bir yöntemdir.

MSD yöntemi stabilite ve işlevsellik problemlerini ayrı ayrı inceleyen limit durum tasarım metoduna bir alternatif olarak, basit birkaç hesap adımı ile hem güvenlik hem de işlevsellik koşullarını sağlayacak şekilde birleştirilmiş bir hesap metodolojisi sunmaktadır. MSD yönteminde, deformasyonu limitleyen ve dengeyi sağlayan tasarım dayanım parametresi ampirik bağıntılar kullanılmaksızın gerçek bir gerilme-deformasyon datasına göre seçilmektedir. Sistemin iki temel yaklaşımı vardır. Bunlar;

- 1) Geoteknik problemin prensibini yansıtan basit deformasyon mekanizmaları kullanılmaktadır. Bu mekanizma özellikle yapı ve zemin birleşim noktalarında zemin kütlelerindeki denge ve deplasmanları temsil eder.
- 2) Çalışma koşulları altında gerilme ve deplasmanlar arasındaki ilişki, zeminden alınan örselenmemiş temsili zemin numunelerinin gerilme-deformasyon testlerinden elde edilen datalar ile kurulmaktadır.

Bu yöntem Osman ve Bolton (2004, 2006) tarafından sığ temellerde, konsol istinat yapılarında, destekli derin kazılar sistemlerinde başarı ile uygulanmıştır. Sistemin en büyük avantajı kompleks hesaplar gerektirmeksizin gerilme-deformasyon grafikleri sunan basit zemin deney dataları ile hem stabilite hem de deformasyon ile ilgili bir yaklaşımda bulunabilmesidir.

2.2.3 Ampirik Çalışmalar

Peck (1969) Yöntemi

Peck (1969), saha gözlemleri sonucu kazıdan kaynaklanabilecek zemin oturmalarının tahminini öneren ilk metottur. Genellikle Oslo ve Chicago’da gözlemlenen vaka analizleri sonucu farklı zemin tiplerinde zemin yüzeyinde meydana gelen oturmalar ve oturmaların duvara olan mesafesini incelenmiş olup ilgili grafik

Şekil 2.10’ de verilmektedir. Bu metot zemin karakteristik özelliklerine göre zemini üç ayrı türde sınıflandırır.

Tip 1: Kum, yumuşak-sert kil, ortalama işçilik

Tip 2: Çok yumuşak-yumuşak kil

- 1) Kazı tabanı altındaki kilin sınırlandırılmış derinliği

2) Kazı tabanı altındaki kilin belirli derinliği $N_b < N_{cb}$

Tip 3: Kazı tabanı altındaki çok yumuşak-yumuşak kilin belirli derinliği $N_b < N_{cb}$

Burada N_b stabilite faktörü olup;

$$N_b = \gamma \cdot H_e / s_u \quad (2-22)$$

N_b : Zemin stabilite faktörü

γ : Zemin doğal birim hacim ağırlığı

H_e : Nihai kazı derinliği

s_u : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

N_{cb} : Taban kabarmasına karşı kritik stabilite faktörüdür.

Peck (1969) yöntemi, 1969 yılı öncesinde, çelik palplanş uygulamalarının yer aldığı vaka analizleri verileri ışığında elde edilmiştir. Bu yöntemde maksimum zemin yüzeyi oturması değerinin, çok yumuşak-yumuşak killerde maksimum kazı derinliğinin %1' i mertebesinde olması amaçlanmaktadır. Yatay etki bölgesinin ise kazı derinliğinin iki katı uzunluktaki bir alana kadar etkimesi beklenir. Bu yöntemde kullanılan eğriler, çelik palplanş duvarlara nazaran daha gelişmiş tasarım ve inşaat teknikleri gerektiren yöntemler için uygulanabilir değildir ve genellikle daha düşük miktarlarda oturma değerleri elde edilmektedir. Zemin yüzey oturmalarının hesabında geliştirilen ilk metod olan Peck (1969) yöntemi, uygulama kolaylığı açısından günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bowles (1986)Yöntemi,

Bowles (1986) kazıdan kaynaklı zemin yüzey oturmasının tahmini için bir metod önermektedir. Bowles (1986) metoduna göre izlenebilecek işlem adımları aşağıdaki gibidir (**Şekil 2.9**);

- 1) Duvar yanal deplasmanları sonlu elemanlar ya da eşdeğer kiriş yöntemi ile tahmin edilir
- 2) Yanal deplasmana uğrayan zemin kütesinin hacmi hesaplanır (a_d).

- 3) Caspe (1969) tarafından önerilen yöntem kullanılarak aşağıdaki formülden etki oranı (D) belirlenir.

$$D = (H_e + H_d) \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (2-23)$$

Burada;

H_e : Nihai kazı derinliği

ϕ : Zemin kayma mukavemeti açısı

Kohezyonlu zeminlerde;

$H_d=B$ olup B: kazı genişliğidir.

Kohezyonsuz zeminlerde ise

$$H_d = 0.5B \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (2-24)$$

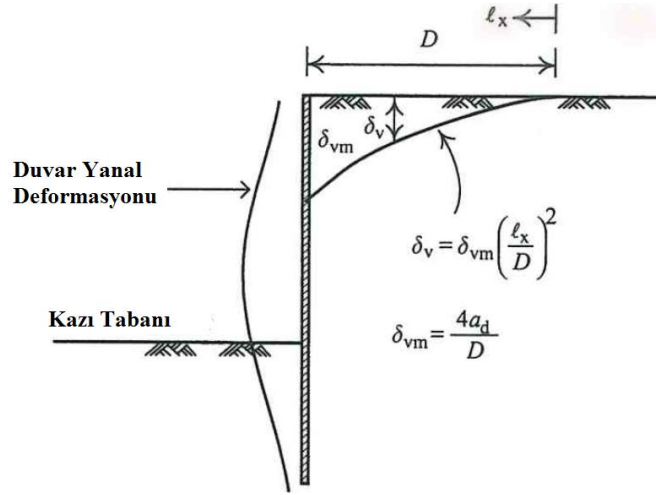
- 1) Maksimum yüzey oturmasının duvarda meydana geldiği kabul edilerek, maksimum zemin yüzey oturması aşağıdaki eşitlikten tahmin edilebilir.

$$\delta_{vm} = (\frac{4a_d}{D}) \quad (2-25)$$

- 2) Oturma eğrisinin parabolik olduğu varsayılır. Oturma değerinin, destekli duvardan uzaklığı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

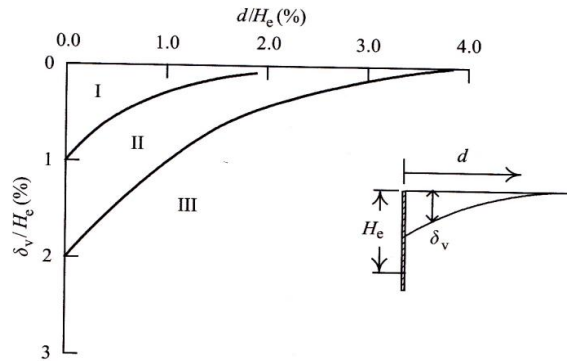
$$\delta_v = \delta_{vm} (\frac{l_x}{D})^2 \quad (2-26)$$

l_x = Duvar dan D noktası kadar uzaklıktaki bir noktadaki uzaklık $\delta_v = l_x$ uzaklıktaki oturma miktarı



Şekil 2.9: Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Bowles Yöntemi (1986).

Teorik olarak drenajsız koşullarda yumuşak zeminlerde yapılan kazılarda, yanal duvar deplasmanı hemen hemen zemin yüzey oturması kadar olmalıdır (Milligan, 1983). Dolayısıyla δ_{vm} değeri $4a_d/D$ yerine $3a_d/D$ olmalıdır. Buna göre Bowles' un metodu 1.33 kez daha büyük sonuçlar vermektedir.

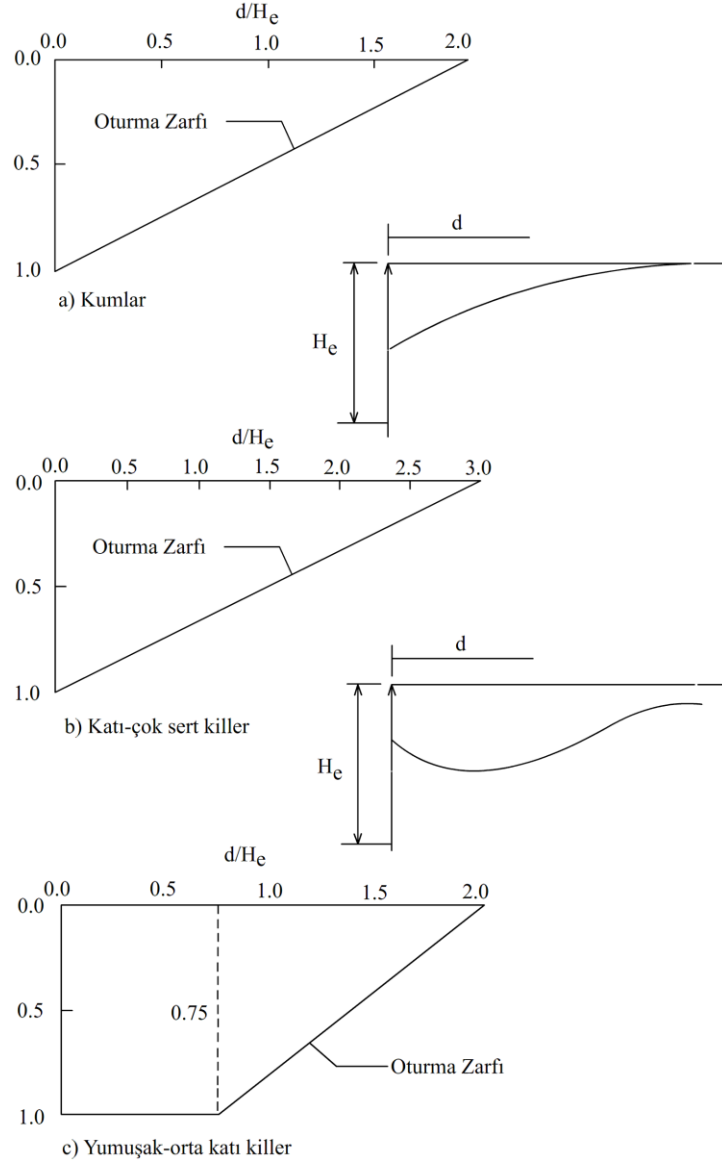


Şekil 2.10: Zemin yüzeyi oturmalarının tahmini için Peck Yöntemi (1969).

Clough ve O' Rourke Yöntemi (1990)

Clough ve O' Rourke bir çok vaka analizini baz alarak farklı zemin tipleri için kazıdan kaynaklı çeşitli zemin yüzey oturması zarfları önermişlerdir. Temel aldıkları vaka analizlerine göre kum yahut katı kilde yapılan kazılardaki deformasyonlar üçgensel bir

zemin yüzey oturma zarfı oluşturmakta ve maksimum oturma duvarın yakınında meydana gelmektedir. Yumuşak-orta katı killerde ise kazılar trapezoidal bir oturma zarfına neden olmaktadır. Zemin yüzeyi oturma zarfları ' de verilmektedir. δ_{vm} değeri bilindiği takdirde farklı noktalardaki deplasmanlar tahmin edilebilmektedir.



Şekil 2.11: Farklı zemin tipleri için kazıdan kaynaklı zemin yüzeyi oturma zarfları (Clough ve O' Rourke, 1990).

2.3 DERİN KAZI ÇEVRESİNDEKİ DEPLASMANLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Derin kazı sistemleri dayanma yapısı rijitliği, duvar uzunluğu, zemin koşulları, yer altısuyu durumu, kazı geometrisi, inşa aşamaları, destek sistemi rijitliği işçilik vb.

birçok unsurdan etkilenmektedir. Daha önceki çalışmalardan (Mana ve Clough, 1981, O'Rourke, 1981, Wong ve Broms, 1989, Hashash ve Whittle, 1996, Kung vd., 2009) yanal deformasyonlar ve zemin hareketleri aşağıda belirtilen üç ana başlık altında gruplanabilecek unsurlardan etkilenmektedir (Kung, 2009).

A. Doğal Faktörler

- Stratigrafi: Zemin dayanımı, zemin rijitliği, gerilme geçmişi, yeraltı suyu koşulları. Genelde yüksek yanal deformasyonlar düşük mukavemet ve düşük rijitlik parametrelerine sahip zeminlerde meydana gelmektedir.
- Saha koşulları: Komşu yapılar, trafik durumu. Yüksek katlı yapılara ve yoğun trafikli yollara komşu dayanma yapılarında normal koşullara göre daha fazla yanal deformasyon meydana gelmektedir.

B. Tasarım ile İlgili Faktörler

- Dayanma Yapısı Özellikleri: Dayanma yapısı rijitliği, destek sistemi rijitliği, dayanma yapısı uzunluğu. Düşük rijitliğe sahip dayanma yapılarında daha büyük deformasyonlar gözlenmiştir.
- Kazı Geometrisi: Kazı genişliği ve kazı geometrisi.
- Destek Sistemi Öngermesi: Destek sistemi amacı destek sistemi ve dayanma yapısı ile uyumlu bir bağlantı kurabilmektir. Destek sisteminin yanal deformasyonlar üzerinde azaltıcı bir etkisi vardır.
- Zemin Islahı: Jet-grout, derin karıştırma, kompaksiyon, enjeksiyon vb. ıslah yöntemleri. Islah ile rijitliği artan zeminde daha düşük deformasyonların oluşması beklenmektedir.

C. İmalat ile İlgili Faktörler:

- İnşaat Yöntemi: Aşağıdan yukarı doğru ve yukarıdan aşağı doğru inşaat yöntemi
- Fazla Kazı: Destek sistemi yerleştirilmesinden önce gerçekleştirilen fazla kazı ilave yanal deformasyona neden olmaktadır.
- Öncelikli İnşaat: Diyafram duvarın kazı çukuru açıldıktan sonra inşa edilmesi.
- İnşaat Süreci: Destek sistemi imalatının uzun sürmesi gibi faktörler yanal deformasyonların artmasına neden olmaktadır.
- İşçilik: Zayıf işçilik koşulları daha büyük yanal deformasyonların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Literatürde bu unsurların etkilerini irdeleyen birçok çalışma mevcut olup bu bölüm kapsamında bu çalışmalara yer verilmektedir.

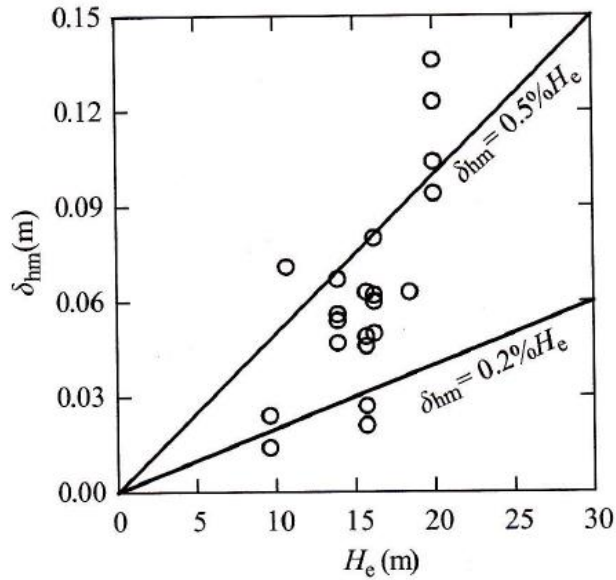
2.3.1 Kazı geometrisi

Kazı Derinliği Etkisi

Geçmişte incelenen tüm vaka analizlerinden duvarda meydana gelen sehîm ve eğilme momentleri ile duvar arkasındaki zemin yüzey oturmalarının kazı derinliği artışı ile arttığı gözlenmiştir. Taipei alanında gerçekleştirilen kazıda meydana gelen deformasyonların kazı derinliği ile değişimi Şekil 2.12’ de verilmektedir. Kil zeminlerde gerçekleştirilen dayanma yapılarında meydana gelen deformasyonlar kum zeminlere nazaran daha fazladır. Aşağıdaki formülden kazı derinliği ile değişmekte olan maksimum deformasyon miktarı hesaplanabilmektedir. Şekil 2.12’ de verilen maksimum deformasyon aşağıdaki formülden tahmin edilebilir:

$$\delta_{hm} = (0.2 - 0.5\%).H_e \quad (2-27)$$

H_e : Kazı Derinliği

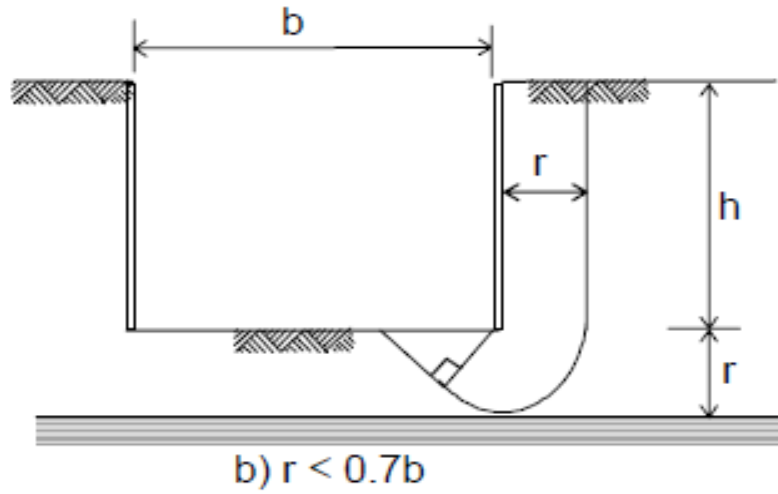


Şekil 2.12: Maksimum duvar deplasmanı ve kazı derinliği arasındaki ilişki (Ou vd., 1993).

δ_{hm} değerinin üst sınırı killere için önerilirken, kumlar için bu değer en alt sınırı olmalıdır. Kum kil ardalanması gözlenen tabakalı zeminler için ise ortalama bir değer önerilmektedir (Ou, 1993).

Kazı Genişliğinin Etkisi

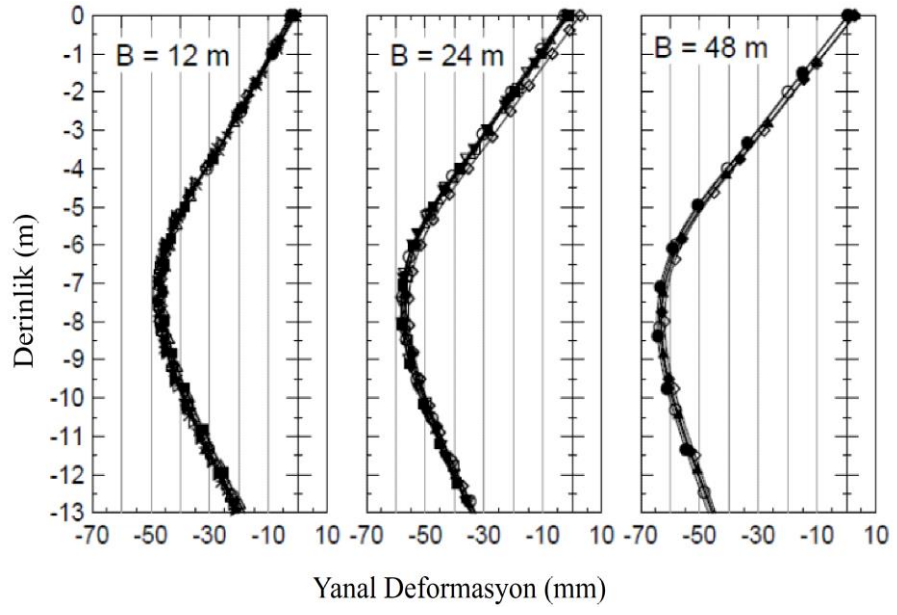
Mana (1978) kazı genişliği etkisi üzerine araştırmalar yapmış ve daha geniş kazılarda, daha büyük boyutlarda deformasyon ve akma zonlarının meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca Terzaghi (1943) tarafından öngörülen akma zonlarından daha geniş bir akma zonu oluştuğunu vurgulamıştır.



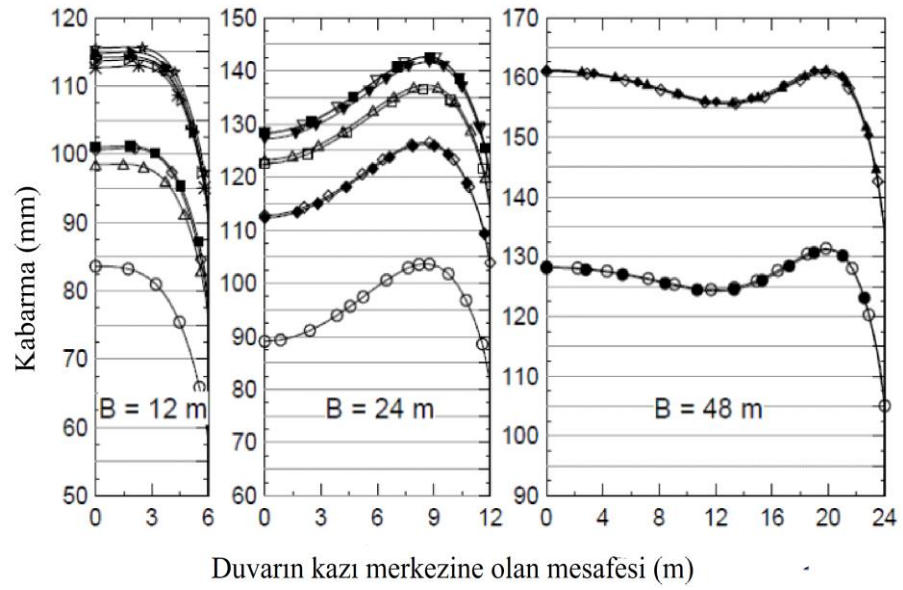
Şekil 2.13: Derin kazılarda taban kabarması analizi (Terzaghi, 1943).

Clough ve O' Rourke (1990) daha geniş kazılarda daha büyük dengelenmemiş kuvvetlerin var olduğunu ve bunun bir sonucu olarak daha büyük deformasyonların meydana geldiğini belirtmiştir.

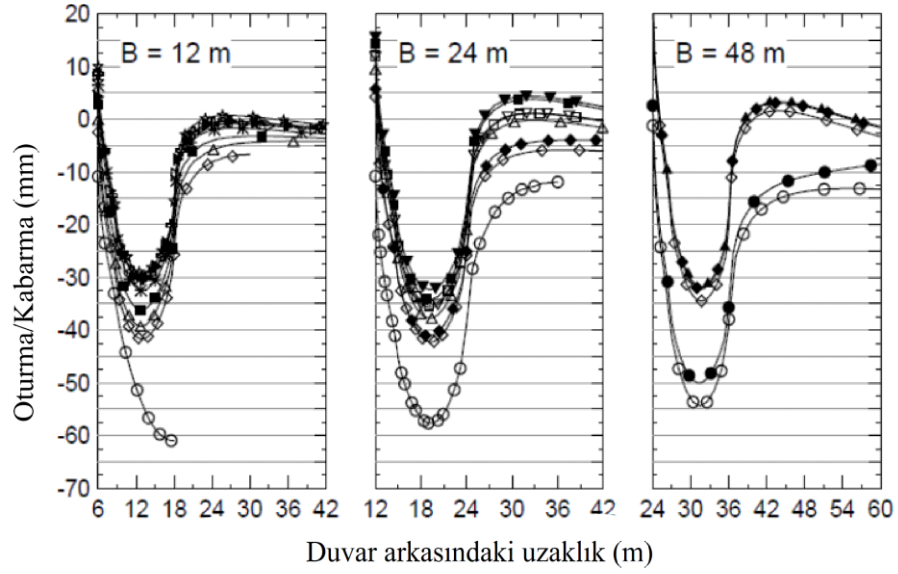
Farklı kazı genişliklerinde meydana gelen duvar sehim, taban kabarması ve yüzey oturması değerleri Gebreselassie (2003) tarafından incelenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde farklı kazı genişliği durumunda duvarda meydana gelen sehim miktarı, kazı tabanındaki kabarma ve duvar arkasında meydana gelen zemin yüzey oturması değerleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.14: Farklı kazı genişliğinde meydana gelen duvar sehim (Gebreselassie, 2003).



Şekil 2.15: Farklı kazı genişliğinde kazı tabanındaki kabarma (Gebreselassie, 2003).



Şekil 2.16: Farklı kazı genişliğinde duvar arkasındaki zeminde meydana gelen zemin yüzey oturması (Gebreselassie, 2003).

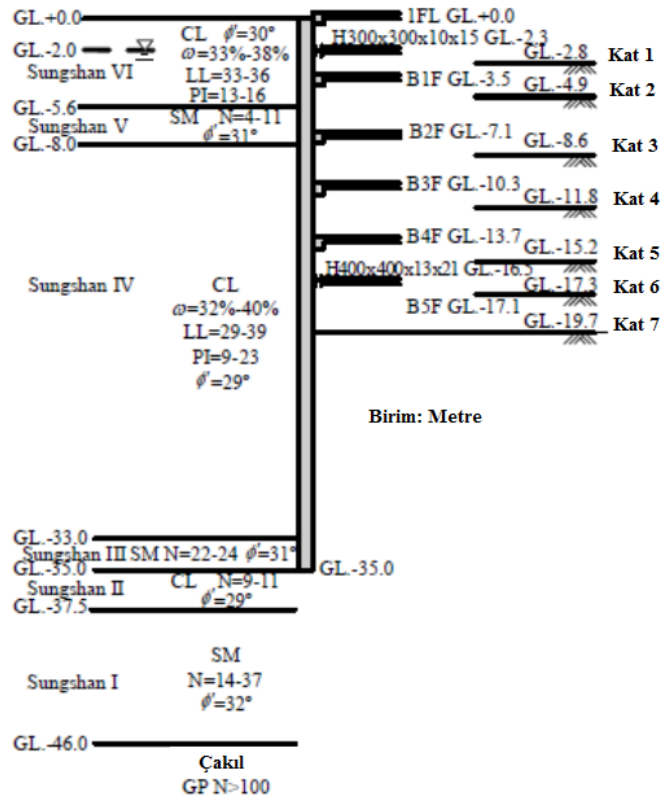
Görüldüğü üzere, kazı genişliği arttıkça duvarda meydana gelen sehim miktarı da artış göstermektedir. Kazı tabanında meydana gelen kabarma kazı genişliğinin artışıyla birlikte artmaktadır. Bunun yanında duvar arkasındaki zemin yüzey oturmaları kazı genişliği arttıkça azalmaktadır.

2.3.2 Zemin Parametreleri ve Zemin Modeli Etkisi

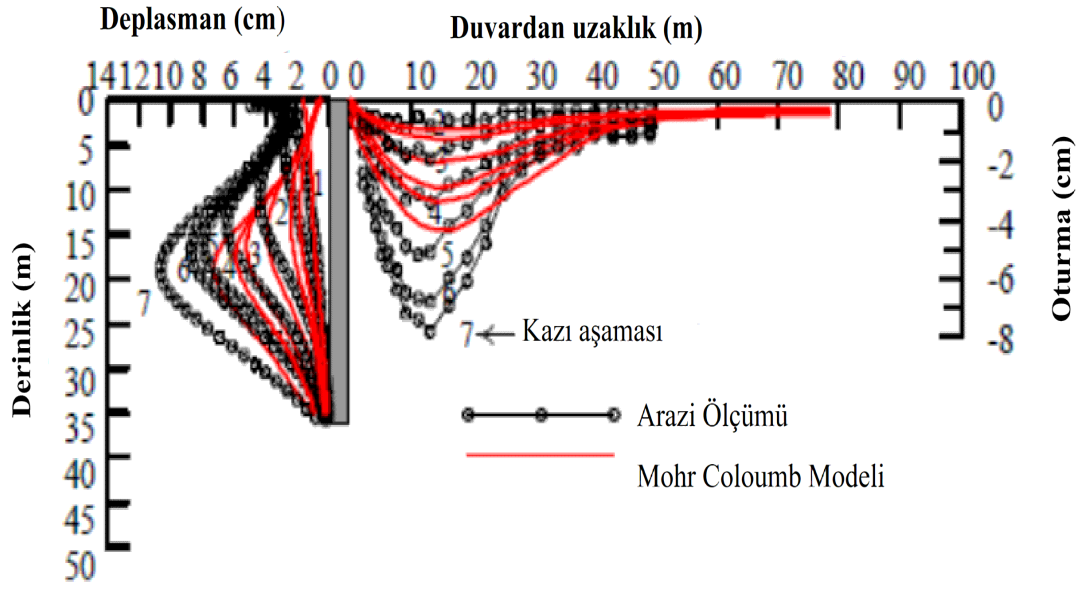
Derin kazılarda meydana gelen deformasyonların tahmininde günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem sonlu elemanlar yöntemini benimseyen yazılımlardır. Bu tip yazılımlarda kazı sistemi gerçeğe yakın bir şekilde modellenenmektedir. Bu yazılımlar Bölüm 2.2.1’ de belirtildiği üzere birtakım girdilere ihtiyaç duymaktadır. Bu girdilerden en önemlisi saha koşullarını temsil eden zemin parametreleri ve zemin bünye modelleridir. Bu yazılımlarda kullanılan zemin parametreleri ve zemin bünye modelleri derin kazıda meydana gelecek deformasyonların mertebesini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu konuyla ilgili olarak literatürde yapılmış birçok çalışma mevcut olup aşağıda bu çalışmalara yer verilmiştir.

Lim, Ou ve Hsieh (2010) drenajsız koşullarda yaygın olarak kullanılan zemin bünye modellerinin derin kazılardaki yanıl ve düşey deformasyonlara olan etkisini irdilemişlerdir. Çalışma kapsamında Plaxis sonlu elemanlar programında TNEC kazısı modellenmiş ve kazı esnasındaki gözlemsel veriler kullanılmıştır. Yapılan analizlerde

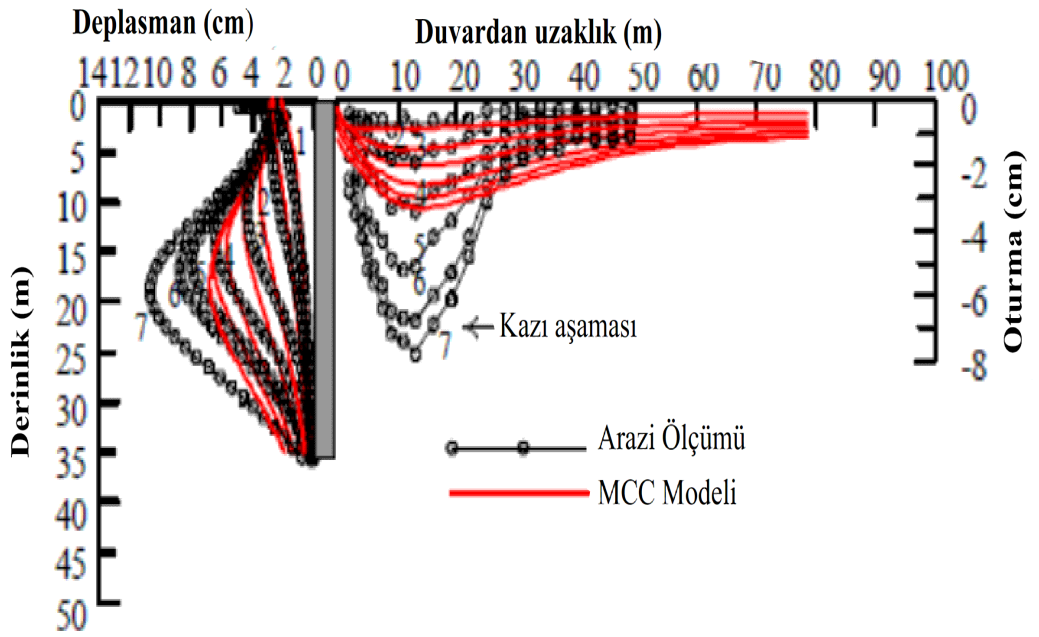
Mohr Coulomb (MC), Modifiye Cam Kili (MCC), pekleşen zemin modeli (HS), küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli (HSS) ve kendileri tarafından geliştirilen drenajsız yumuşak kil zemin modeli (USC) kullanılmıştır. Farklı zemin bünye modelleri ile yapılan analiz sonuçları, aletsel gözlem sonuçları ile kıyaslanmıştır. Analizlere esas kazı modeli ve zemin parametreleri Şekil 2.17’ de verilmiştir.



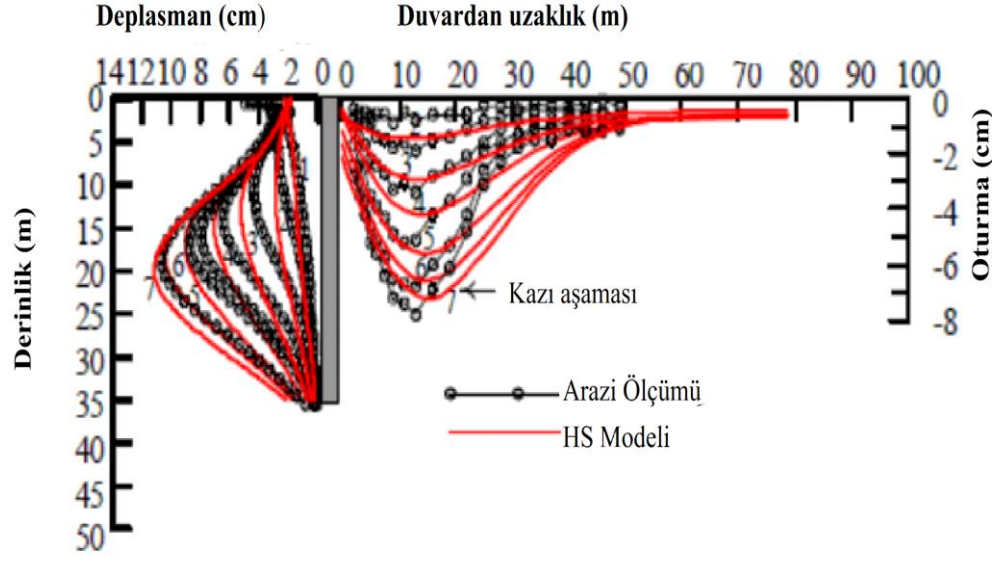
Şekil 2.17: Kazı profili ve zemin tabakaları (Ou vd., 2010).



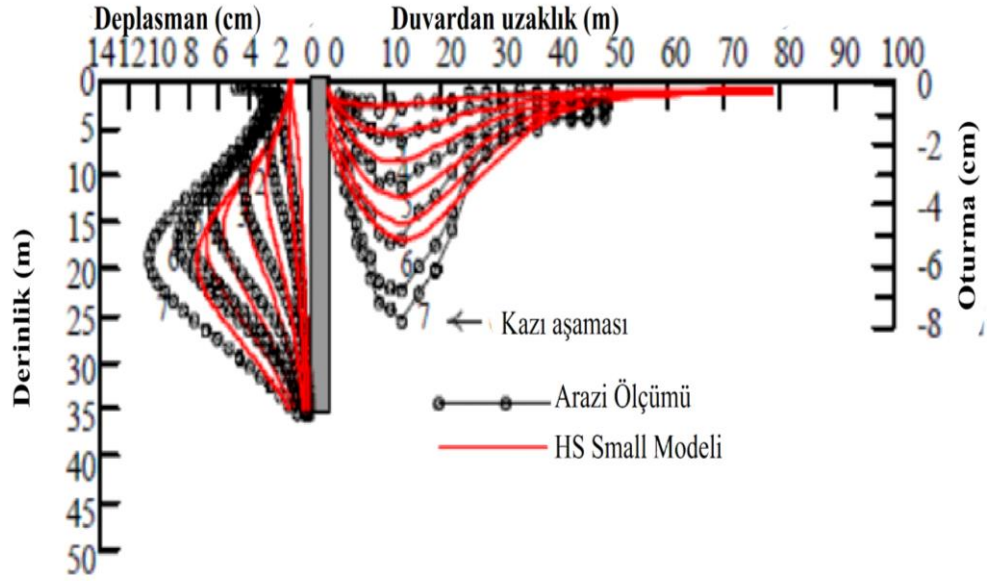
Şekil 2.18: Mohr Coloumb modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).



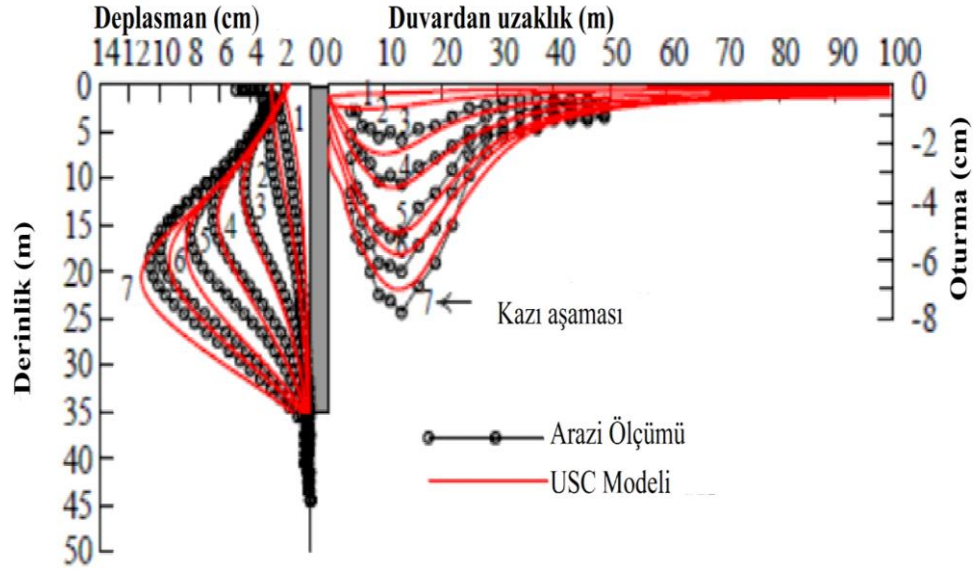
Şekil 2.19: Modifiye Cam Kili modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).



Şekil 2.20: Pekleşen zemin bünye modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).



Şekil 2.21: Küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).

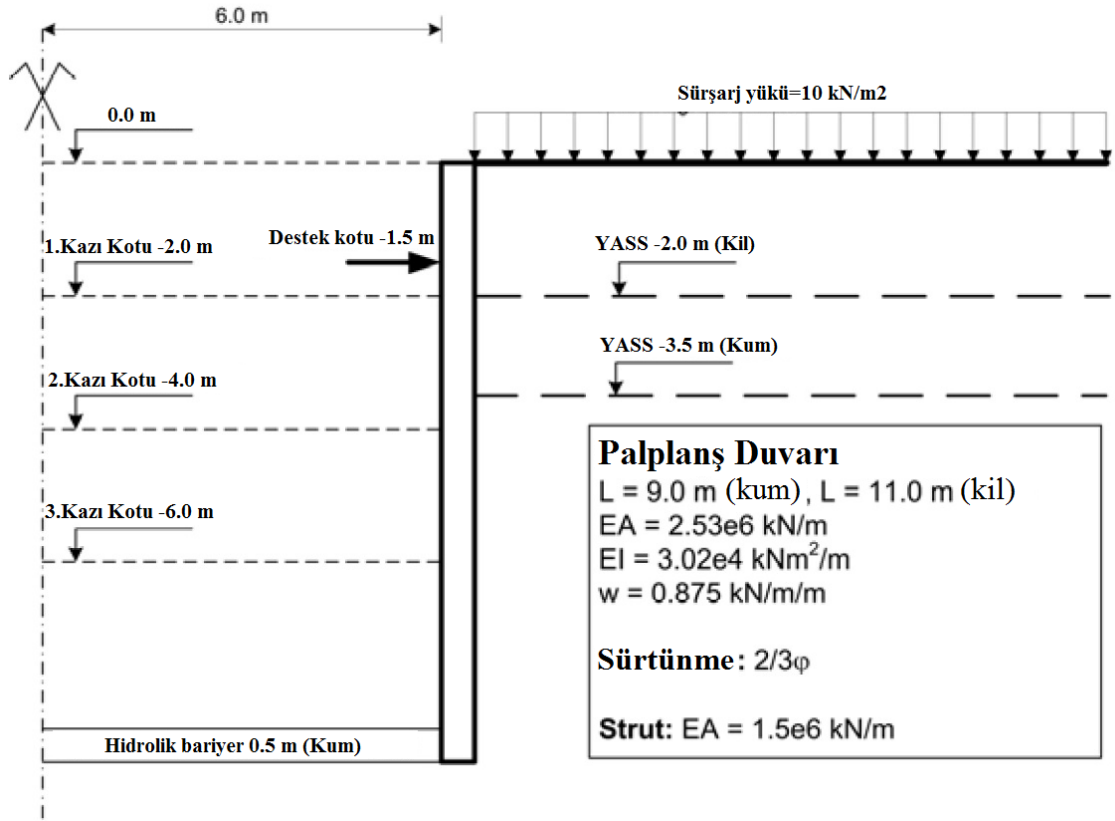


Şekil 2.22: Drenajsız yumuşak kil zemin modeli ile yapılan analiz sonuçları (Ou vd., 2010).

Modifiye Cam Kili zemin modeli ile bulunan deformasyonlar ile arazi verileri arasında büyük oranda bir farklılık mevcuttur. Pekleşen zemin modeli ile yapılan analizlerde kazının ilk aşamasında elde edilen deformasyonlar arazi verileriyle yakın olup, kazının diğer aşamalarından gerçek değerden daha uzaklaşmaktadır. Küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli analizlerinde duvar deformasyonları Pekleşen zemin modeli analizlerindeki duvar deformasyonları ile benzer olsa da zemin yüzey oturması değerlerinde farklılık olmaktadır. Mohr Coulomb modeli ile yapılan analizlerdeki deformasyonlar kazının son aşamalarında arazi verileri ile uyumluluk gösterse de, kazının ilk aşamalarında arazi verilerinden çok uzakta kalmaktadır.

Tüm zemin parametrelerini geleneksel zemin deneylerinden edinen Drenajsız Yumuşak Kil Zemin modeli ile yapılan analizler, diğer tüm zemin modellerine nazaran tüm kazı aşamaları için arazi verileriyle en uyumlu sonucu vermektedir.

Schweiger, benzer şekilde zemin modellerinin deformasyonlar üzerindeki etkisini irdelenmek amacıyla MC, HS ve HS-SS zemin modellerini karşılaştırmıştır. Analizlere esas kazı geometrisi aşağıda **Şekil 2.23'** de verilmektedir.

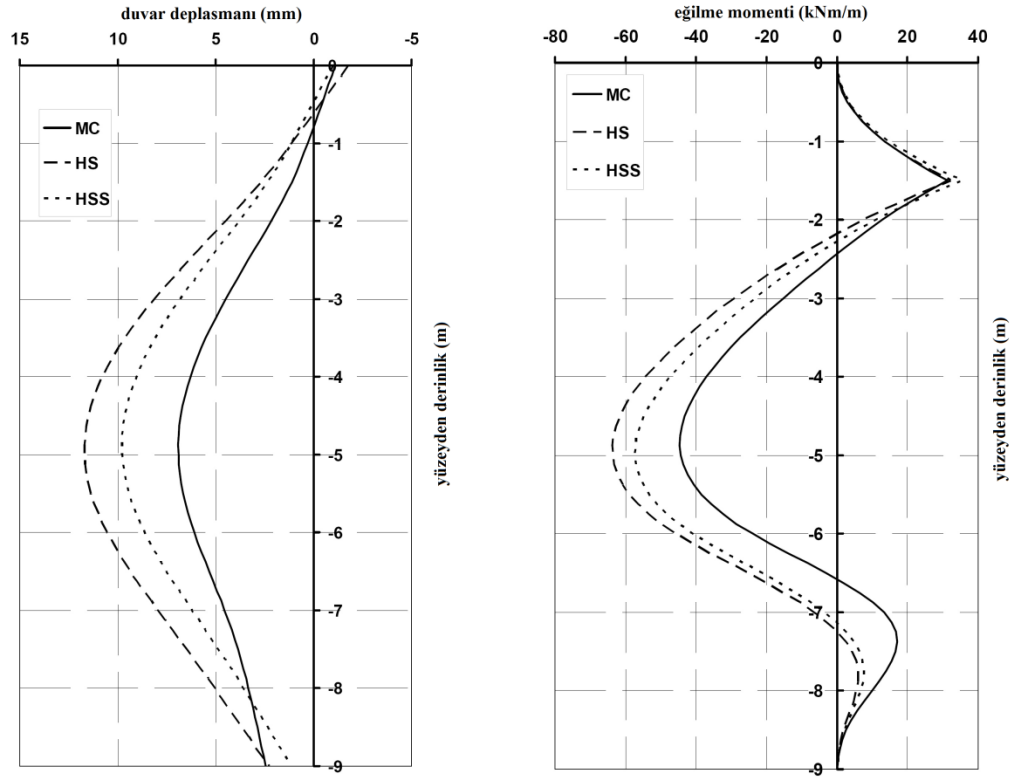


Şekil 2.23: Kazı profili ve zemin tabakaları (Schweiger, 2004).

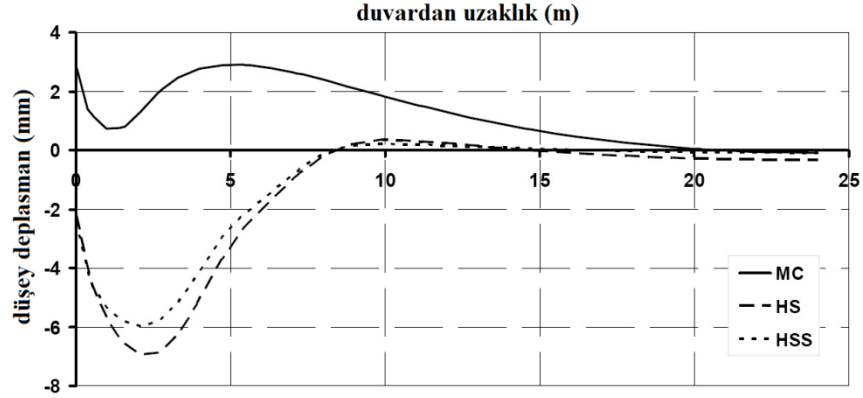
Analizler aynı kazı durumunun kil ve kum olması durumları için, zemin dayanım parametreleri her üç modelde de aynı yalnızca rijitlik parametreleri farklı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Kum birimler esas alınarak yapılan analizlere göre duvarda meydana gelen deplasman ve eğilme momenti değerlerinin derinlik ile değişimleri Şekil 2.24’ da, duvar arkasındaki zeminde meydana gelen yüzey oturma profili ise Şekil 2.25’ de verilmektedir.

Analiz sonuçlarından görüldüğü üzere, MC zemin modelinden elde edilen yatay duvar deplasmanı değerleri seçilen elastistite modülüne bağlı olarak çok düşüktür. HS ve HS-SS zemin modeli ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların ise birbirine yakın olduğu görülmüştür. Zemin yüzey oturmalarının ise MC zemin modeli analizlerinde gerçek davranıştan uzak bir davranış sergilediği görülmüştür.

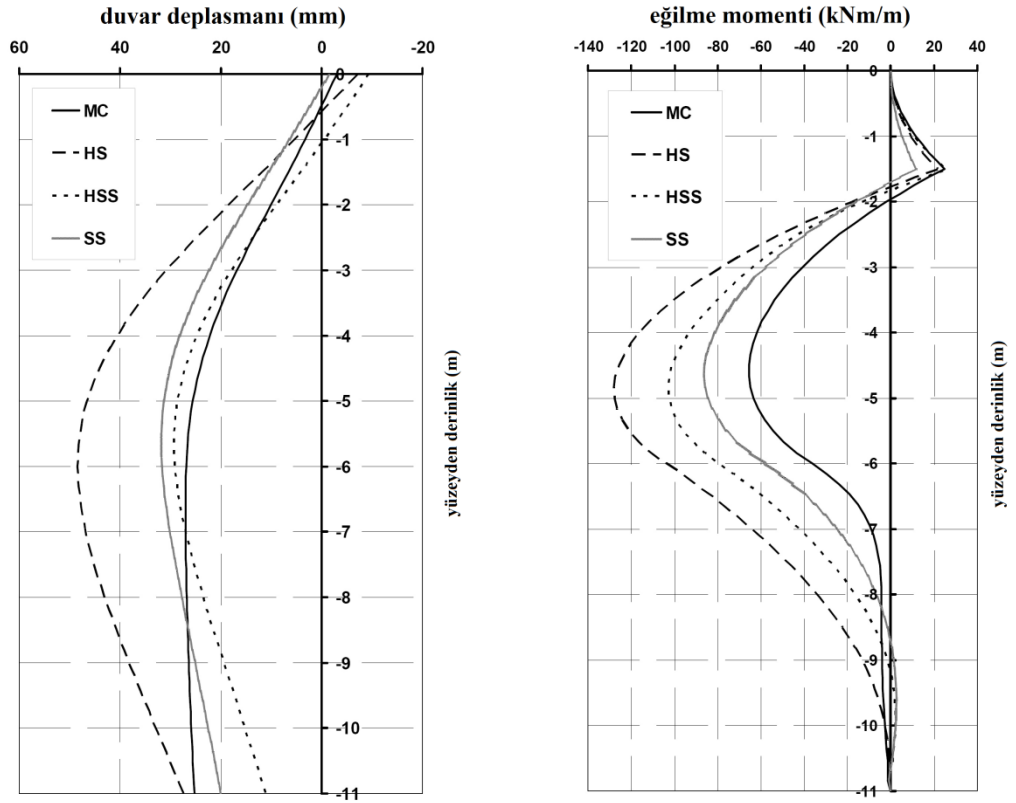


Şekil 2.24: Düşey elemanda meydana gelen eğilme momentleri.

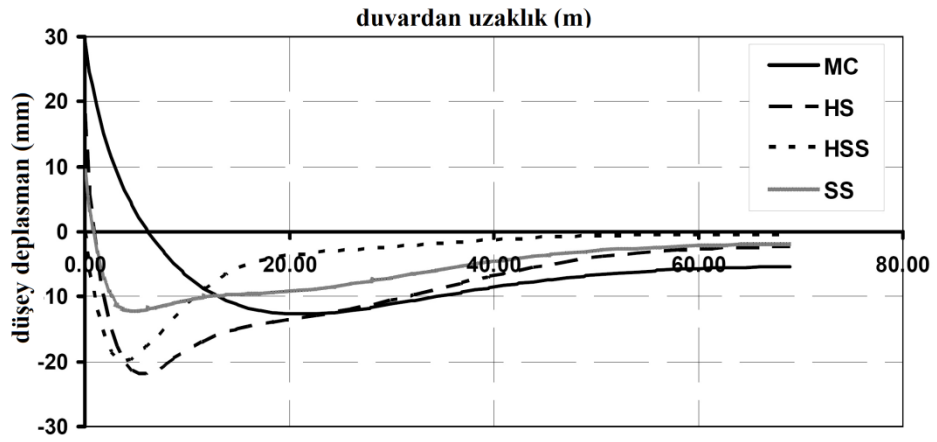


Şekil 2.25: Duvar arkasında meydana gelen düşey deplasman.

Kil birimler esas alınarak yapılan analizlere göre duvarda meydana gelen deformasyon ve eğilme momenti değerlerinin derinlik ile değişimleri Şekil 2.26' de, duvar arkasındaki zeminde meydana gelen yüzey oturma profili ise Şekil 2.27' de verilmektedir.



Şekil 2.26: Düşey elemanda meydana gelen eğilme momentleri.



Şekil 2.27: Duvar arkasında meydana gelen düşey deplasman.

Analiz sonuçlarından görüldüğü üzere, HS ve HS-SS zemin modeli birbirinden çok farklı mertebelerde deformasyonlar vermiştir. MC zemin modeli sonuçlarına göre ise, duvar deformasyon profili diğerlerinden tamamen farklıdır. Zemin yüzey oturmaları incelendiğinde ise MC zemin modelinde ilk etapta büyük bir miktarda kazı tabanı kabarması davranışı sergilediği gözlenmiştir.

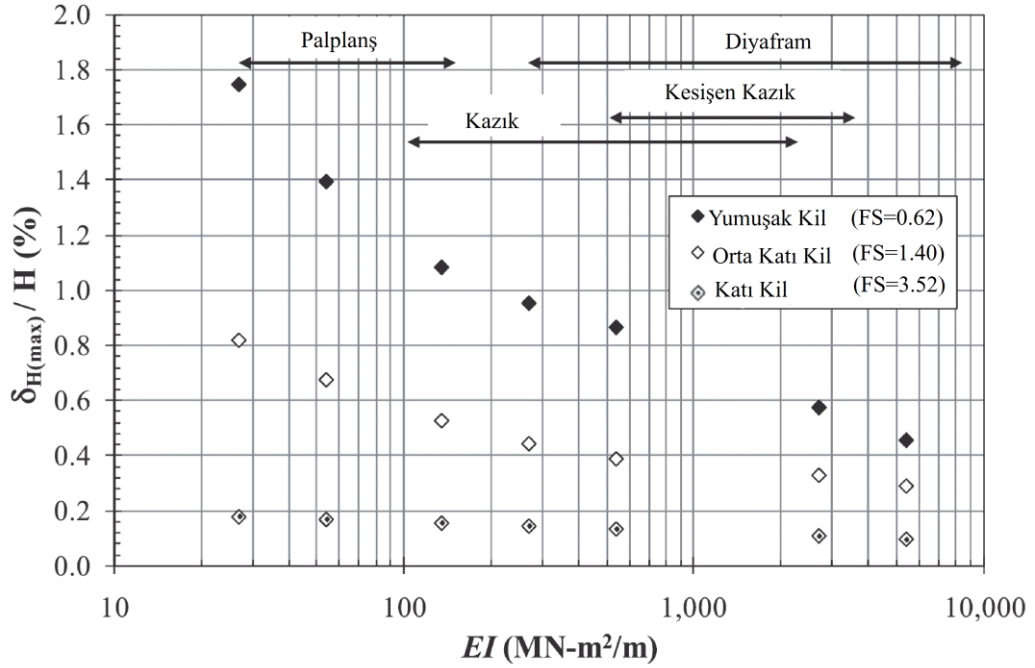
Yapılan değerlendirmelere göre, elastik-mkemmekel plastik zemin modellerinin, derin kazılara yönelik yapılan analizlere uygun olmadığı görülmüştür. HS-SS modeli kullanımında, arazi ile daha uyumlu sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir.

2.3.3 Dayanma Yapısı zellikleri

Duvar Sistemi Rijitliğinin Etkisi

Teorik olarak, dayanma yapısının rijitliğinin artmasıyla, dayanma yapısında meydana gelecek deformasyonların azalması beklenir. Bununla birlikte, duvar rijitliği artışıyla duvar deformasyonları azalımı arasında lineer bir bağlantı yoktur. Duvar kalınlığının ya da duvar rijitliğinin arttırılmasının duvar deformasyonuna bir miktar etkisi vardır ancak bu da bir mertebeye kadardır (Hsieh, 1999).

şekil 2.28’ de killerde farklı duvar rijitliklerinde meydana gelen yanal duvar deformasyonlarının değişimi verilmektedir. Katı killerde duvar rijitliğinin yanal hareketler üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Sonuç olarak bu tip killerde, çok aşırı deformasyonların oluşması beklenmediğinden, bu tip zeminlerde esnek dayanma yapıları kullanılabilir. Clough ve O’ Rourke (1990) tarafından da önerildiği üzere, duvar rijitliği ve destek aralıklarının yanal deformasyonlar üzerinde çok az bir etkisi vardır. Aksine yumuşak-orta katı killerde duvar rijitliği kazı performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Zapata, 2007). Bu husus tasarımcının zemin hareketlerini kontrolünde anahtar bir parametredir.

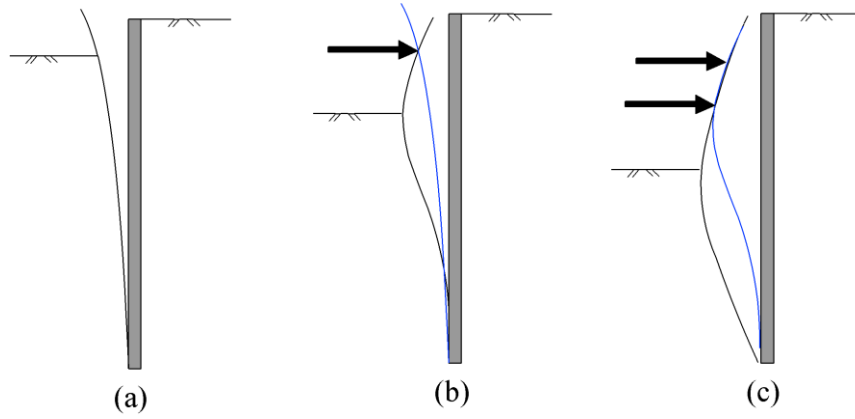


Şekil 2.28: Duvar rijitliğinin yanal deformasyonlar üzerindeki etkisi (Zapata, 2007).

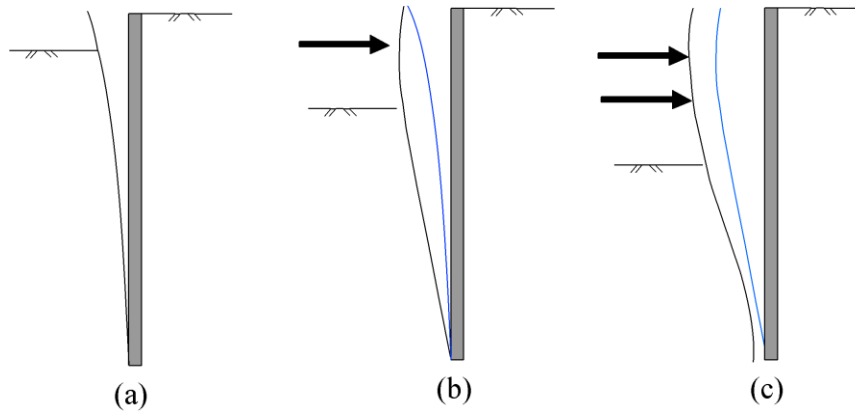
Palmer/Kenny(1972), Burland vd. (1979), Mana (1978), Zeng vd. (1986), Freiseder (1998), Clough ve Tsui (1974) duvar rijitliğinin 32 kat arttırılması durumunda zemin hareketlerinin yalnızca 2 kat azaldığını göstermişlerdir. Mana (1978), Zeng vd. (1986) ve Freiseder (1998) dayanma yapısı rijitliğinin arttırılmasının eğilme momentlerinde ve destek sistemi yüklerinde bir artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak dayanma yapısı rijitliğindeki değişimin zemin hareketleri üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır.

Yanal Destek Sistemi Rijitliğinin Etkisi

Rijit bir yanal destek sistemi, destek seviyelerinde meydana gelebilecek duvar eğilmelerini azaltır ve destek sistemi yüklerini ve eğilme momentlerini arttırır (Palmer, Kenny, 1992; Clough, Tsui, 1974; Burland vd., 1979; Mana, 1978; Zeng et al., 1986; Freiseder, 1998).



Şekil 2.29: Duvar destek sistemi rijitliğinin yüksek olması durumunda duvar deformasyon şekli (a) birinci aşama kazı (b) ikinci aşama kazı (c) üçüncü aşama kazı.



Şekil 2.30: Duvar destek sistemi rijitliğinin düşük olması durumunda duvar deformasyon şekli (a) birinci aşama kazı (b) ikinci aşama kazı (c) üçüncü aşama kazı.

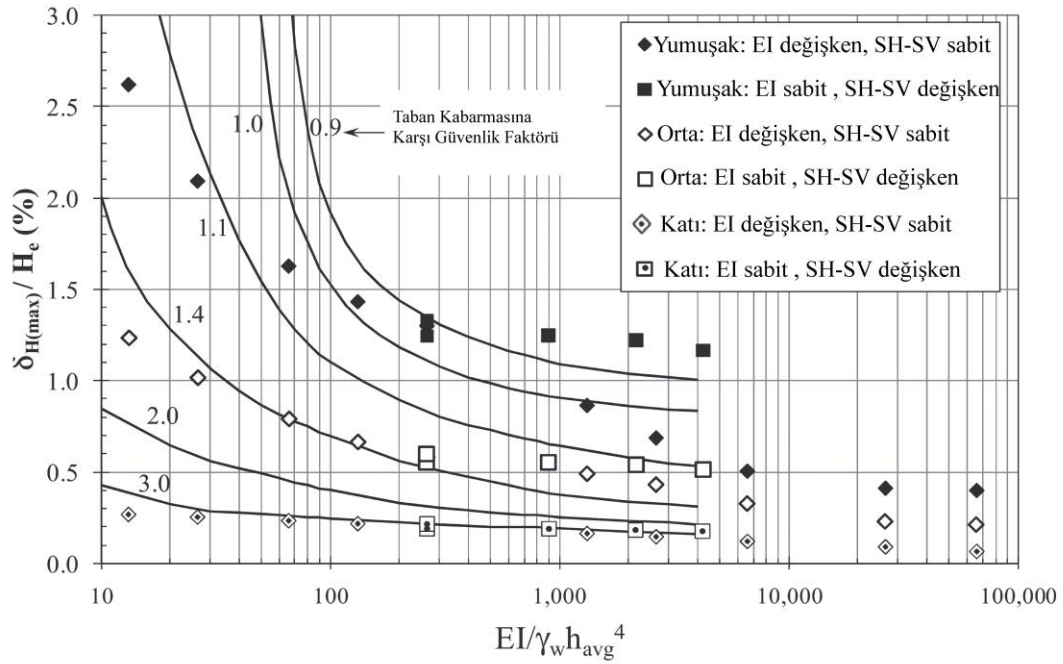
Yatay deformasyonlar ve zemin yüzey oturmaları birçok faktörden etkilenmekte olup bunlardan biri de destek sistemlerinin rijitliğidir. Destek sistemi rijitliği, duvar eğilme rijitliğinin (yatay ve düşey destek aralığı, destek elemanlarının yapısal rijitliği ve destek sistemleri ve duvar arasındaki bağlantıyı kuran elemanların tipi) bir fonksiyonudur (Zapata, 2007).

Bu konuda ilk çalışmalar Mana ve Clough (1981) tarafından yapılmış olup, sistem rijitlik parametreleri;

$$S = EI/h^4 * \gamma \quad (2-28)$$

Burada EI birim uzunluktaki duvarın eğilme rijitliği, I; duvar atalet moment, h; destek sistemi arasındaki düşey meseafe ve γ duvar arkasındaki zeminin birim hacim ağırlığıdır. Daha sonra Clough (1989) bu denkleme suyun birim hacim ağırlığını da ilave ederek modifiye etmiştir.

Clough vd.(1989), killer için efektif sistem rijitliği ve taban kabarmasına bağlı güvenlik faktörlerine (Terzaghi, 1943a) bağlı olarak meydana gelen yatay deformasyonların tahminine yönelik bir tasarım kartı önermiştir. Sistem rijitliği, duvar rijitliği ve yatay destek elemanları ortalama aralığı etkisini kombine etmektedir. Mana ve Clough (1981) tarafından yapılan parametrik sonlu elemanlar analizleri kullanılarak oluşturulan tasarım kartı aşağıda Şekil 2.31’ de verilmiştir.



Şekil 2.31: Clough vd. (1989) tasarım kartı ile parametrik çalışmaların kıyaslanması (Zapata ve Bryson 2012).

Clough ve O' Rourke, farklı vaka analizlerinden elde edilen bilgilere göre, taban kabarmasının çok kritik olmadığı katı killerde, duvar rijitliği ve destek sistemi aralığının tahmin edilen deformasyonlar üzerinden çok küçük bir etkisi olduğunu belirtmiştir. Zemin modülleri ve yanal toprak basınçlarının zemin deformasyonları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bulmuşlardır.

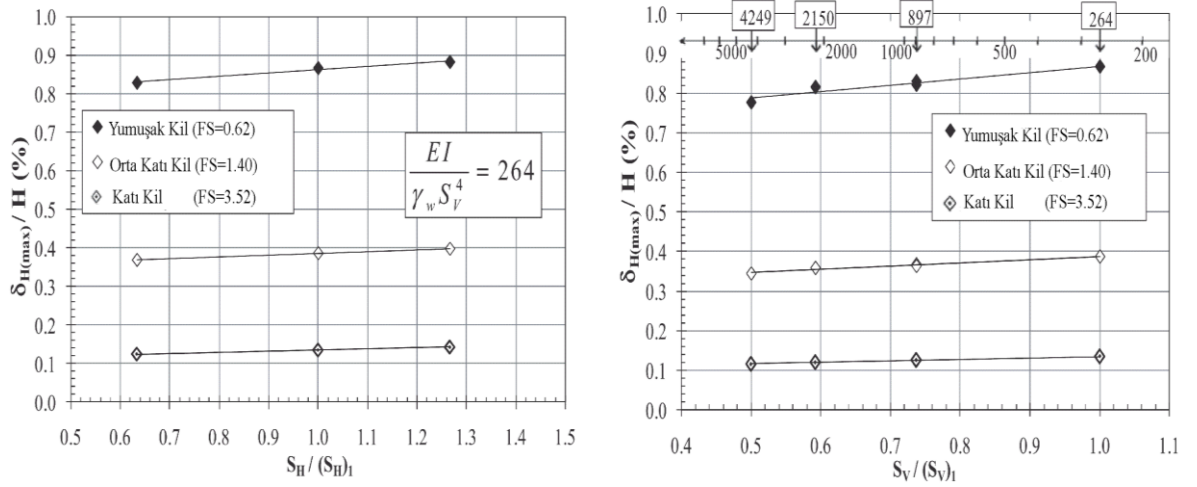
Taban kabarmasının kritik olduğu, yumuşak-orta katı killerde deformasyonların destek sistemi rijitliğinden büyük oranda etkilendiği belirtilmiştir (Clough ve O' Rourke 1990).

Destek Sistemi Düşey ve Yatay Mesafesinin Etkisi

Destek sisteminin yatay mesafesini daraltmak, birim genişlikte sistem rijitliğini arttırmaktadır. Destek sistemi rijitliğinin artışı deformasyonları da etkilemektedir. Destek sistemi rijitliğindeki artış dayanma yapısında meydana gelecek yanal deformasyonları da azaltır. Dayanma yapısının desteklenmeyen kısmında her aşamadaki kazıdan meydana gelen deformasyonlar destek sistemi aralığının azaltılması ile azalmaktadır. Desteklenmeyen kısım, dayanma yapısı en alt sıra destek sistemi ile kazı yüzeyi arasındaki kısım olarak tanımlanmaktadır.

Zapata (2012) tarafından gerçekleştirilen incelemeler sonucu yatay ve düşey destek sistemi aralığının yanal deformasyonlar üzerindeki etkisi aşağıda Şekil 2.32' de ayrı ayrı verilmektedir. Şekil 2.32' den görüldüğü üzere destek sistemi yatay ve düşey mesafesinin azaltılması katı zeminlere göre yumuşak zeminlerde daha etkin bir rol oynamaktadır.

Destek sistemi yatay mesafesinin etkisi, destek sistemi düşey mesafesine göre de incelenmiştir. Örnek olarak 20.0m uzunluğunda bir dayanma yapısının, dayanma yapısının yarı boyunun orta katı kil içerisinde teşkil edilmesi durumunda, destek sistemi yatay mesafesinin azaltılması dayanma yapısı yanal deformasyonlarında takribi 8mm' lik bir azalmaya neden olmuştur. Bu değer destek sistemi düşey mesafesine göre kıyaslandığında aynı sistem için takribi 9mm' lik bir deformasyon azalışı gözlenmiştir. Buna göre destek sistemi yatay mesafesinin, düşey mesafesi kadar önemli bir rolü olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma neticesinde Clough vd. (1989) tarafından belirtilen sistem rijitlik faktöründe yalnızca destek sistemi düşey mesafesinin dikkate alındığı 2 boyutlu sisteme göre daha gerçekçi olarak destek sistemi yatay mesafesinin de sistem rijitliğine katkısı 3 boyutlu olarak ele alınmıştır.



Şekil 2.32: Destek sistemi mesafesinin yanal deformasyonlara etkisi (Zapata, 2012).

Peck (1969) daha küçük aralıklı destek sisteminin yanal deformasyonları azalttığını belirtmiştir. Lambe (1970), Goldberg vd. (1976), O'Rourke (1981) ve Clough ve O'Rourke (1990) gözlemleri esnasında aynı sonuca ulaşmışlardır.

Kazı Tabanı ile Destek Sistemi Arasındaki Düşey Mesafenin Etkisi

Yatay hareketler en çok, desteklerin yerleştirildiği seviye ve kazı tabanı arasındaki gömülü kısımda meydana gelmektedir. Etkiyen yüklerin boyutu ve zemin tipi ve özellikleri gömülü kısımda meydana gelen yatay hareketleri büyük ölçüde etkilemektedir (Gebreselassie, 2003). Etkiyen yükün miktarını azaltmak için yerleştirilecek destek sistemlerinin aralıkları azaltılmalıdır. Bu miktar imalat imkanı sunabilecek şekilde mümkün olan en kısa mesafede tutulmalıdır (Fujita, 1994).

Duvar Penetrasyon Derinliğinin Etkisi

Bir kazıda duvar penetrasyon derinliği sistemin stabilitesi baz alınarak belirlenmiş ise penetrasyon derinliğinde sonradan yapılan artışların kazı performansı üzerinde önemli bir etkisi olmamaktadır (Zeng vd., 1986). Mana (1978) serbest ve sabitlenmiş uçlu duvar şartlarını kıyaslamış ve iki durum için de zemin deformasyon formu arasındaki farkın önemsiz miktarda az olduğunu ancak sabit uçlu duvar şartlarında bir miktar daha geniş bir akma bölgesi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca duvarın gömülü derinliğinin

arttırılmasının gömülü olan kısımdaki eğilme momentlerinde bir artış yarattığını göstermiştir.

2.3.4 İmalat

Duvar Yerleştirilmesinden Kaynaklı Zemin Oturması

Derin kazılarda kullanılan duvar tipleri yer değiştirenler ve yer değiştirmeyenler olarak gruplandırılabilirler. Yer değiştiren tipteki duvarlar genellikle zemine çakılarak yerleştirilen çelik ya da prekast beton palplanşlardır. Palplanşların çakılması esnasında zeminde yanal gerilmelerde değişiklikler oluşur. Bununla birlikte zemin oturmalarının bir kısmı da genellikle palplanşların çakılması ve vibrasyon işlemi esnasında gerçekleşir. Fujita (1994) tarafından, 14.65m yükseklikte bir kazıda meydana gelen toplam zemin oturmalarının %50'sinin palplanşların çakılması ve çıkarılması esnasında meydana geldiği belirtilmiştir.

Ankraj Yerleştirilmesinden Kaynaklı Zemin Oturması

Derin kazılarda duvar yerleştirilmesine benzer şekilde ankrajların yerleştirilmesi esnasında da bir delgiye ihtiyaç vardır. Zemin oturmasının miktarı delgi yöntemi ve delgi esnasında kullanılan geçici destek ekipmanlarına bağlıdır. Genellikle bu etki zemin suyu etkisi altındaki yumuşak kohezyonlu zeminlerde imalat yapıldığında önemli ölçüde etkili olmaktadır. Almanya, Constance' da yumuşak zeminde ankrajların yerleştirilmesi esnasında toplam oturmaların %70'inden fazlasının meydana geldiği kaydedilmiştir (Kempfert ve Gebreselassie, 1999).

Su Seviyesinin Düşürülmesinden Kaynaklı Zemin Oturması

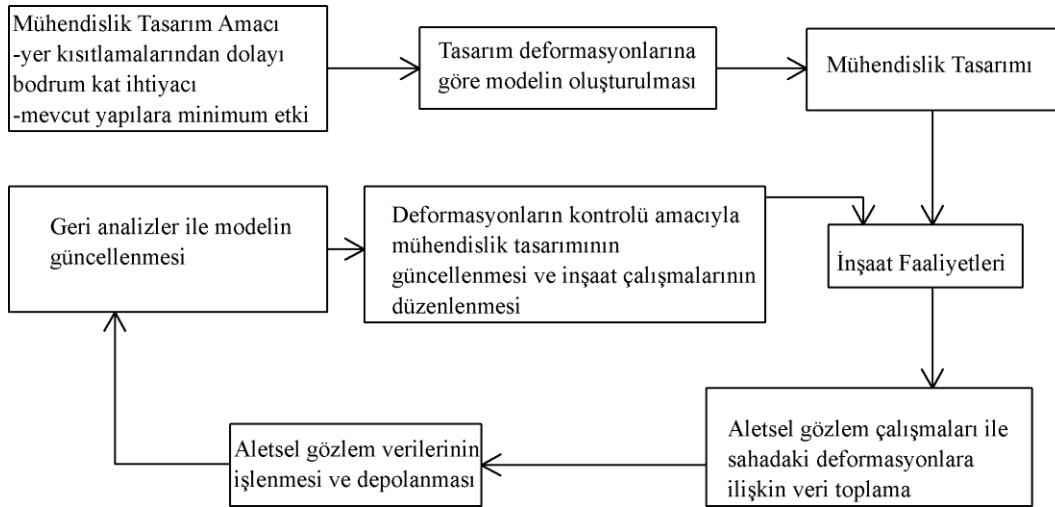
Su seviyesinin düşürülmesinin zemin oturmalarına katkısı gayet açıktır. Su seviyesinin düşürülmesi sonucu meydana gelecek oturmaların genellikle normal konsolide killerde, aşırı konsolide killere göre daha fazla olması beklenir. Salzburg nehri yumuşak zemininde yapılan destekli diyafram duvar kazısında meydana gelen zemin yüzey oturmalarının %75'inin, yer altı suyu seviyesinin düşürülmesi esnasında olduğu raporlanmıştır (Schweiger ve Breymann, 1994).

Destek Sistemi Öngerme İşleminin Etkisi

Gergi ve ankraj ön-germe işlemleri ile zemin hareketlerinin azaltılması istenirken, ön-germe yükleri yumuşak killerin akma özellikleri dikkate alınarak sınırlandırılmalıdır. Başlangıçta yapılacak bir miktar ön-germe işleminin destek sisteminin etkinliğinde önemli bir oynarken, büyük miktarda yapılacak ön-germenin önemli bir yararı yoktur (Palmer/Kenny, 1972; Clough/Tsui, 1974; Mana, 1978).

2.4. DERİN KAZILARIN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Proje kısıtlamalarına bağlı olarak, duvar ve zemin hareketlerinin kontrolüne ilişkin şartlar değişkendir. Örneğin kazı çevresinde herhangi bir yapı bulunmayan iksa sistemlerinde bu deplasmanların önemi komşu yapıların bulunduğu bir alanda meydana gelecek deplasmanlara göre daha önem arz etmektedir. Kent merkezlerinde, kazı çevresinde yapıların mevcut olduğu alanlarda iksa sistemi ve zemin hareketleri kazı destek sistemi için birincil tasarım sorunu olabilir. Derin kazılarda deformasyonların kontrolüne ilişkin tipik bir döngü aşağıda Şekil 2.33’ de verilmektedir.



Şekil 2.33: Derin kazı sistemindeki deformasyon kontrol döngüsü.

FHWA şartnamesine göre sert kum ve kil zeminlerde inşa edilen iksa sistemlerinde yatay deplasmanların yaklaşık $0.2H$ ve maksimum $0.5H$ olması gerektiği belirtilmiştir. Duvar arkasında meydana gelecek zemin oturmalarının ise yine sert kum ve kil zeminlerde ortalama $0.15H$ ve maksimum $0.5H$ olması gerektiği ifade edilmiştir.

Duvar ve zemin hareketlerinin tahminleri için ampirik, analitik ve nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Yukarıda verilen döngüden de görüldüğü üzere derin kazı sisteminin performansının değerlendirilmesi hem güvenlik hem de ekonomi açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle derin kazı sistemlerinde meydana gelen deplasmanlar iksa sistemi ve çevresine yerleştirilen aletsel gözlem ekipmanları ile gözlenmektedir. Öngörülen deplasman değerleri, aletsel gözlem verilerinden elde edilen değerler ile birlikte değerlendirilerek, başlangıçta öngörülen mühendislik tasarımı güncellenmektedir. Derin kazıların performansı aletsel gözlemlene verileri kullanılarak deneme-yanılma yöntemiyle basit geri analizler ile ya da kullanıcıya özel tanımlı gelişmiş geri analizlerle değerlendirilmektedir.

2.4.1. Aletsel Gözleme İle Basit Geri Analiz

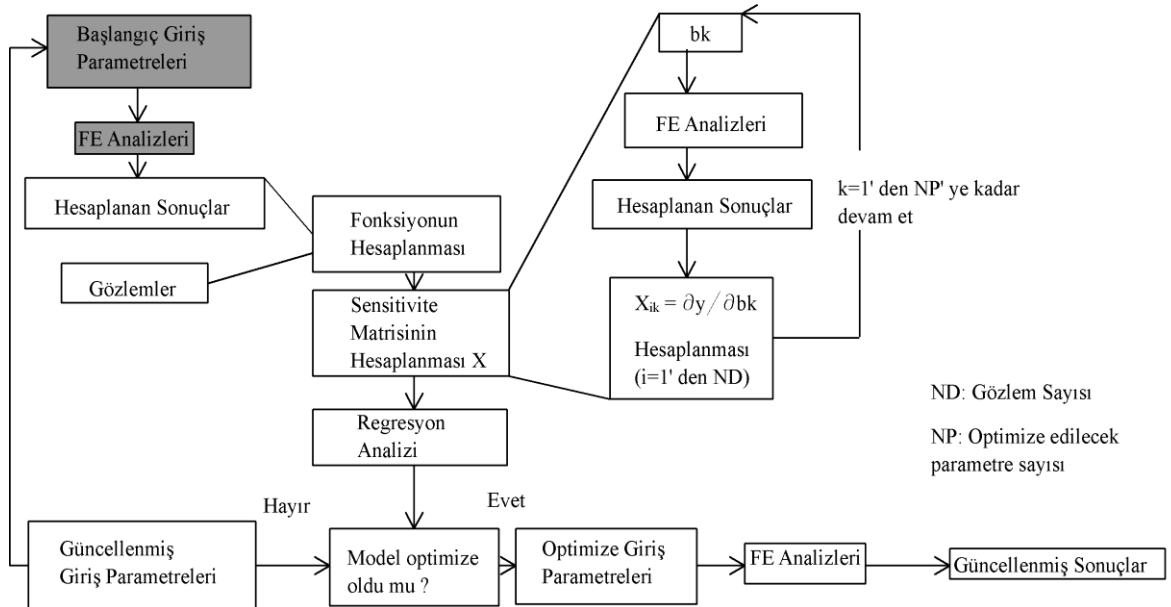
Derin kazılarda meydana gelen deformasyonların tasarım aşamasında öngörülen deplasmanlara kıyasla ne mertebede gerçekleştiğini ve inşaattan kaynaklı tehlikeli bir durum gelişip gelişmeyeceğini adım adım görebilmek amacıyla, derin kazılarda aletsel gözlem çalışmaları yapılmaktadır. Tasarım aşamasında öngörülen deplasmanlar aletsel gözlem verileri ile kıyaslanmakta ve deneme-yanılma yoluyla geri analiz çalışmaları yapılabilmektedir.

Geri analiz çalışmalarında deformasyonları etkileyecek birçok parametrenin etkisi irdelenmekte ve arazi bulguları ile uyumlu sonuçlar doğuran parametreler tespit edilmektedir. Saha çalışmaları süresince yapılacak bu tarz bir çalışma ile güvenliğin eksik kaldığı kısımlar önceden tespit edilebilmekte, ya da tam tersi olarak tasarımın aşırı güvenli kaldığı kısımlarda ilave çözümlerle sistem daha ekonomik bir hale getirilebilmektedir.

2.4.2. Aletsel Gözleme ile Gelişmiş Geri Analiz

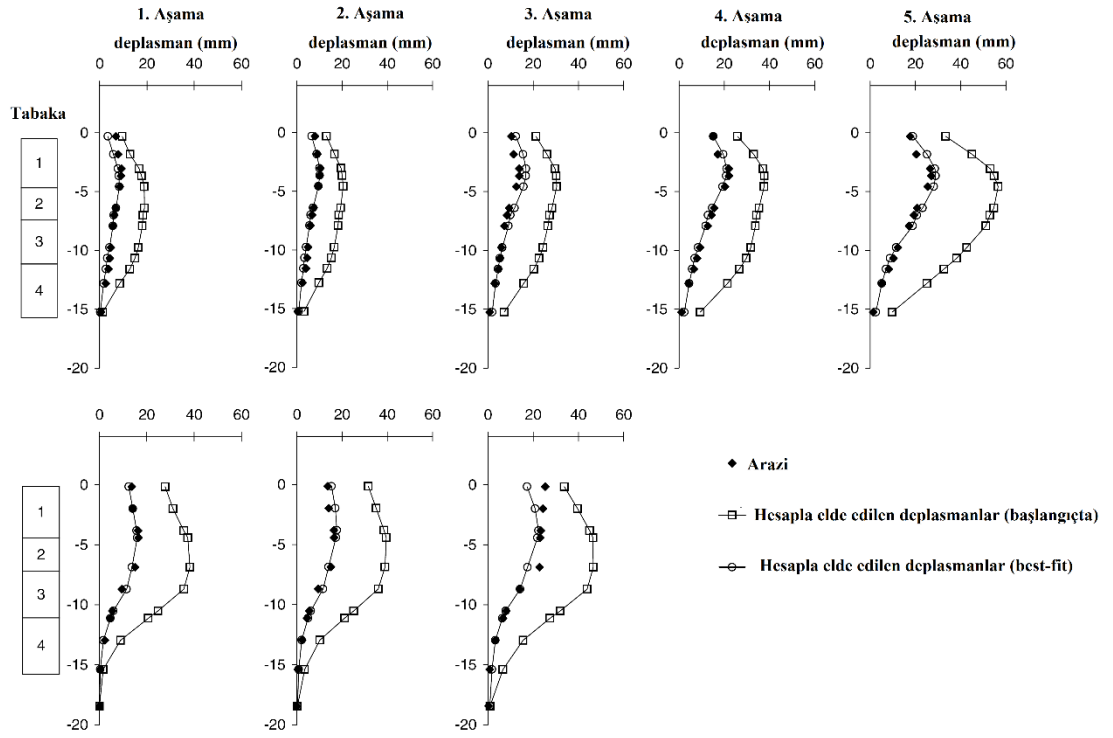
Geri analiz teknikleri 1980' li yıllardan bu yana geoteknik problemlerde kullanılmaktadır (Gioda ve Maier, 1980; Sakurai ve Takeuchi 1983) . Günümüzde deneme-yanılma yöntemiyle gerçekleştirilen basit geri analizler çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilerek çeşitli algoritmalar ortaya atılmıştır. Bu algoritmalar sinir ağıları kullanılarak, kullanıcıya özel yöntemlerle deformasyonların geri analizlerini gerçekleştirecek şekilde geliştirilmiştir. Bu gelişmiş geri analiz yöntemlerinden bir kaçına aşağıda yer verilmektedir.

Poeter ve Hill (1998) tarafından parametrelerin tahmininde kullanılmak üzere bilgisayar destekli UCODE adında bir kod sistemi geliştirilmiştir. Aşağıda **Şekil 2.34**’ de UCODE yöntemindeki parametre optimizasyonuna yönelik geliştirilen algoritma bir akış diyagramı halinde sunulmuştur. Çoklu işlem adımli sonlu elemanlar analizleri ile bir sensitivite matrisi oluşturulmakta ve hesap edilen ve gözlenen verilerin birbiri ile en uyumlu olmasını sağlayan parametrelerin tayini için regresyon analizleri yapılmaktadır. UCODE sisteminde bu işlem modifiye Gauss-Newton metodu ile sağlanmaktadır. Bu gelişmiş geri analiz yöntemiyle sürekli bir döngü halinde gerçekleştirilen analizlerle en uygun parametrelerin tahmini sağlanabilmektedir.



Şekil 2.34: UCODE akış diyagramı.

UCODE geri analiz tekniği Calvello, ve Finno (2004) tarafından da kullanılmış ve Chicago kenti killlerinde gerçekleştirilen bir kazının parametre optimizasyonu bu teknik ile sağlanmıştır. Sözkonusu analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 2.35’de verilmektedir.



Şekil 2.35: Ölçülen ve başlangıç ve best-fit parametreleri ile hesaplanan deplasmanların kıyaslanması UCODE yöntemi Calvello, ve Finno (2004).

Calvello, Finno (2004) Hashash, Marulanda, Ghaboussi, Jung (2006) tarafından sonlu elemanlar yöntemi ile bir kombinasyon oluşturan Self-Sim geri analiz tekniği geliştirilmiştir. Self-Sim geri analiz tekniği, duvar yatay deplasmanı ve kazı arkasında meydana gelen zemin yüzey oturması arazi ölçüm verilerinden, sonlu elemanlar yöntemi ve sinir ağlarını kullanarak ilgili zemin bilgilerini oluşturabilmektedir. Elde edilen bu zemin modeli nümerik analizlerle doğru zemin deformasyonlarını belirlemekte ve benzer özellikteki kazılarda meydana gelebilecek deplasmanların önceden tahmininde kullanılabilmektedir.

2.5 DESTEKLİ DERİN KAZILARDA ALETSEL GÖZLEM

2.5.1 Genel Bilgiler

Mühendislik yapılarının tasarım aşamasında zemin profili dikkate alınarak, bu profile ilişkin zemin parametreleri hakkında ön görülerde bulunulmakta ve tasarımın güvenlik ve servis limitlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmektedir. Mühendislik yapılarının

tasarım maliyetleri, inşa sürecinde meydana gelebilecek deformasyonların neden olabileceği olumsuzluklar vb. tasarım esnasındaki öngörüler ile doğrudan ilişkilidir. Tasarım esnasındaki öngörülerin ne mertebede gerçekleştiği ve güvenlik kriterlerinin esas mertebesinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla imalat sırasında aletsel gözlem sistemlerinin kurulması büyük önem arz etmektedir.

Aletsel gözlem, temel mühendisliği uygulamalarında, söz konusu yapının ve temel zemininin projelendirme, inşaat ve/veya servis safhalarında davranışını izlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Mühendislik uygulamalarında inşa esnasında yahut inşa sonrasında meydana çıkabilecek deformasyonların doğurduğu sonuçlar yapının güvenilirliği bakımında önem arz eder. Bu sebeple deformasyonların tasarım aşamasında gerçekçi olarak öngörülmesi ve öngörülen bu deplasmanların meydana gelip gelmediğinin izlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yapım safhasında güvenliği sağlamak inşaat maliyetinin en aza indirmek inşaat planlaması yapmak, inşaat bittikten sonra da yapının davranışını izlemek amacıyla aletsel gözlem çalışmalarının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Temel mühendisliğinde aletsel gözlemin önemi zemin davranışının projelendirme için öngörülen geoteknik modele uyup uymadığı veya ne derecede uyduğu konusunda karar verilebilmesi için kuvvetli bir araç olmasından kaynaklanır (Olgun, 1995). Temel mühendisliğinde gerek zemin gerek kaya olsun, malzemenin üretim sürecinin kontrol altında olmaması nedeniyle malzemenin davranış mekanizmasında belirsizliklerle karşılaşılır. Bu nedenle tasarım aşamasında zeminin doğal heterojen yapısından dolayı mühendislik özelliklerinin kesin sayısal değerinin bulunması pek mümkün değildir. Temsili zemin numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri ve sahada yerinde arazi ölçümleri yapılabilir ancak, bu test ve ölçümler sadece olası bir değer aralığını sağlar. Temel mühendisliğinde tasarım kesin bir analize dayalı olmayacağından, modern bir uygulamada proje yargıları inşaatın ilerleyişine paralel olarak gözden geçirilip değerlendirilmeli ve gerektiğinde gözlenen geoteknik durum ve izlenen davranış doğrultusunda revize edilmelidir.

Aletsel gözlem çalışmaları boşluk suyu basıncı, toplam zemin gerilmesi, yük deformasyon(oturma, deplasman, hacim değiştirme) gibi zemin davranışlarının ölçülmesi ve izlenmesini kapsar. Bu amaca yönelik olarak kullanılan aletlerin

başlıcaları inklinometre, piyezometre, basınç hücresi, ekstansometre, çatlak ölçer, oturma kolonu, inklinometre, yük hücresi, stresmetredir. Temel mühendisliği uygulamalarında son senelerde gerek diğer ülkelerde ve gerekse ülkemizde zemin ve yapı davranışının belirlenmesi, proje kriterlerinin tahkiki ve inşaatın yönlendirilmesinde aletsel ölçüm ve gözlemlleme büyük önem taşımaktadır (Olgun, 1995).

DiBiagio ve Myrvoll (1981)' a göre destekli derin kazı sisteminin yapımı esnasında ortaya çıkabilecek sorunlar ve yapılması gereken ölçümler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Hatipoğlu, 1992):

- 1) Bir derin kazıda, taban kabarmasına karşı güvenlik sayısı düşük olabilir. Bunun için gözlem düzeneği taban kabarmasının gözlemlenmesine izin verecek şekilde kurulmalıdır. Kazı seviyesi kritik derinliklere ulaştıkça oturma ve kabarmalar gözlemlenmeli ve özellikle yatay hareketlerin hızı göz önüne alınmalıdır. Oluşan kabarmaları ölçmek için, kazı tabanına yerleştirilen kabarma ölçerler kullanılmaktadır. Bunların en çok kullanılanları mekanik kabarma ölçerler, manyetik/çubuk anahtarlı ölçerler ve çubuk uzama ölçerlerdir. Yatay hareketlerin ölçümü, destekleme sistemi boyunca kaplamalı kuyulara yerleştirilen inklinometre aracılığıyla yapılmaktadır.
- 2) Yatay desteklerin (veya ankrajların) aşırı yüklenme tehlikesi vardır. Bunun yol açabileceği zararları ortadan kaldırmak için pratik ve ekonomik koşulların izin verdiği ölçüde çok yatay desteğin (veya ankrajın) yükü gözlenmelidir. Destek yüklerinin izin verilebilir sınırları aşması olasılığına karşı, zaman kaybetmeden yenilerini yerleştirmek için yedek destekler hazır bulundurulmalıdır.
- 3) Yer altı su seviyesinin izin verilebilir değerden fazla düşürülmesi, ciddi konsolidasyon oturmalarına neden olabilir. Bu sorunun izlenmesi ve karşı önlemlerin belirlenmesi için geçirgen tabakalarda boşluk suyu basınçlarının ölçülmesidir.
- 4) İksa sistemine gelen toplam yük ve bunun dağılımı belirsizdir. Bileşke kuvvetin etkiye noktasını belirleyebilmek için ya düşey kesitlerde yeterli sayıda yatay destek yükleri ölçülmeli ya da her yatay destek sırası seviyesinde perdeden kuşak kirişlerine aktarılan kuvvetler ölçülmelidir. Ankraj donatısı uyarılı yük

hücresi olarak çubuk kullanılmışsa, yüzeye yapıştırılan veya daha iyisi titreşen telli şekil değiştirme ölçerler, yük hücrelerine seçenek oluştururlar

- 5) Taban kabarması ve destekleme sistemlerinin deformasyon yapması sonucu oluşan zemin hareketleri, civardaki binalar ve yer altı yapılarına zarar verebilmektedir. Bunu için zemin yüzeyine ve civardaki yapılara ölçüm için referans noktaları yerleştirilmelidir. Eğer çevredeki binaların veya yer altı yapılarının zarar görme olasılığı varsa iksa sisteminde yeterli sayıda kesitte yatay hareket ölçümü yapılmalıdır.

Derin kazılarda en yaygın hasar ve problemler iksa sisteminde oluşan aşırı deformasyonlar olup deformasyonların belirlenmesi için en uygun ekipman, yüzeyden itibaren belirli derinliklerde oluşabilecek yatay ve düşey hareketlerin izlenmesinde kullanılan diğer ölçüm aletlerine göre daha yüksek incelikte ölçümler alabilen inklinometre aygıtları olmaktadır.

2.5.2 İnklinometre

Zeminde meydana gelen yatay deformasyonların ölçülmesi heyelanlı alanlarda ve kazı iksalarında sık sık başvurulanan bir aletsel gözlem yöntemidir. İnklinometrelerin tipik uygulamaları şunlardır:

- Heyelanlarda kayma bölgesinin belirlenmesi
- Baraj dolgusunda, zayıf zemin üzeri dolgularda, açık kazı ve tünellerde yanal deformasyonların miktarı ve hızının gözlenmesi
- Derin kazı sistemlerinde dayanma yapısında meydana gelen yanal deformasyonların gözlenmesi
- Sedde, kazık ve istinat duvarlarının düşeyden sapmasının gözlenmesi

İnklinometre bir borunun eksenine dik deformasyonları boru içinden geçirilen bir eğim sensörü aracılığıyla ölçmeye yarayan bir ekipmandır. Sensörde dikeye göre eğimi ölçen yerçekimi duyarlı bir güç çevirici bulunur. Boru sondaj deliğine veya dolguya, çoğu uygulamada yer altı yatay deformasyonları belirlemek için dikey bir şekilde yerleştirilmektedir. İnklinometre seti bu ölçümün elektronik ve sayısal olarak yapılmasını sağlayan alet takımıdır. İnklinometre ölçüm seti aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır.

- 1) İnklinometre borusu: ABS'den mamul dört tarafından yivli farklı çapları olan borudur. 3 m'lik parçalar halindedir. Orjinal kaplinleri ve perçinle eklenerek uzatılır. Yivler probunun yerleşmesi ve kaymadan aynı doğrultuda ilerlemesi içindir (Bkz Şekil 2.36 a).
- 2) Prob: İnklinometre borusu içine indirilen elektronik cihazdır. Kuyu başındaki okuma cihazına (logger) kabloyla bağlantılıdır. Bulunduğu derinlikteki pozisyonunun eğimine göre değişen ve mV mertebesindeki gerilim farkını okuma cihazına gönderir (Bkz Şekil 2.36 b).
- 3) Okuma cihazı (data-logger): Probun değişik derinliklerdeki pozisyonunda okunan gerilim farkının saklandığı ve ekranında okunduğu taşınabilir özel bilgisayardır. Değerlerin inklinometre derinliği, no.su, okuma tarihi gibi bilgilerle birlikte kaydedilmesini sağlar (Bkz Şekil 2.36 c).
- 4) Kablo sabitleyici: Kablo sabitleyici, probun istenen derinlikte durmasını sağlamak üzere kabloyu sıkıştırarak sabitleyen mekanik makaralı bir sistemdir.

2.5.3 Ekstansometre

Ekstansometre, sondaj kuyusu ekseninde bulunan iki veya daha fazla nokta arasında değişen mesafenin hareket edebilir bir ölçüm sensörü olmaksızın gözlenmesi için zemin veya kayaya yerleştirilen bir tip alettir. Yeraltı kazılarında ve kazılmış şevler arkasında oluşan deformasyonların gözlenmesi tipik uygulamalarıdır. Ekstansometreler ayrıca konsolidasyon oturmasının ve açık derin kazılarda taban kabarmasının gözlenmesinde de kullanılır. Ekstansometre seti bu ölçümün elektronik ve sayısal olarak yapılmasını sağlayan alet takımıdır. Set aşağıda belirtilen ekipmanlardan oluşmaktadır.

- Ekstansometre Cihazı: Üst ve alt ankraj birimlerinden, enjeksiyon tüpleri, rotların sürtünmesini engelleyecek yüksek rezistanslı naylon tüplerden, ekstansometre kafasından, kafa kapağından oluşan hazır cihaz
- Rotlar: Naylon tüpler içerisinden alt ankrajlara bağlanacak olan rotlar
- Rot Ortalama Halkaları
- ½ ‘‘ Kilitli Kapaklar

- İtme Rotu
- Ölçüm Cihazı: Ekstensometrenin deformasyon verilerinin ekranında okunduğu ve saklandığı taşınabilir özel cihazdır. Ekstensometre deformasyon verisi, no.su, okuma tarihi gibi bilgilerle birlikte kaydedilmesini sağlar.



Şekil 2.36: İnklinometre ölçüm seti elemanları.



Şekil 2.37: Ekstansometre ölçüm seti elemanları.

2.5.4 Oturma Kolonu

Oturma kolonu ortak eksen üzerindeki iki veya daha fazla noktanın arasındaki değişen uzaklığı ölçmeye yarar. Alet tek parça olan veya iç içe geçen plastik geçit borusu ve bunun üzerinden geçen bir dizi manyetik halkadan oluşur ve manyetik oturma kolonu olarak ta adlandırılır. Ön yükleme dolgusu altında düşey deplasmanın gözlenmesi ve

açık derin kazılarda taban kabarmasının gözlenmesi oturma kolonunun tipik uygulamalarıdır. Ayrıca kazı arkasındaki zeminde meydana gelen oturmaların incelenmesinde de ülkemizde nadir olarak kullanılmaktadır.

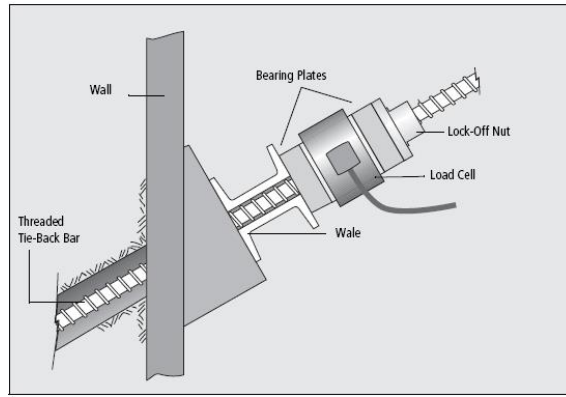
2.5.5 Piyezometre

Yeraltı suyu akımı ve zemindeki boşluk suyu basıncının belirlenmesi temel zeminin mukavemeti ve stabilitesini saptamak açısından önemlidir. Farklı su basıncı altında bulunabilen tabakalardaki basınçları ayrı ayrı ölçmek özellikle derin kazılar ve tünel kazılarında önemli olmaktadır (Yıldırım, 2004). Yeraltısu seviyesinin ve boşluk suyu basıncının tespit edilebilmesi amacıyla piyezometreler kullanılmaktadır. Piyezometre zemin içinde bir noktada alttan ve üstten tıplanmak yoluyla izole edilerek sadece bulunduğu derinlikteki boşluk suyu basıncını ölçmek için kullanılır. Piyezometrelerin standpipe, hidrolik, elektrikli ve hava basınçlı olmak üzere farklı türleri mevcuttur.

2.5.6 Yük Hücresi

Yük hücreleri, üzerine uygulanan kuvveti elektrik sinyaline çeviren dönüştürücülerdir. Bunlar, ankrajlardaki gerilme kuvvetlerinin değişimlerini gözlemek amacıyla ankraj kafalarına yerleştirilen, bir manometreye bağlı içi yağ dolu silindirik cihazlardır.

Kazı duvarının desteklenmesi amacıyla boyları 30 m'ye kadar ulaşan ankrajlara yerleştirilen yük hücreleri (Load cell) ile ankraj gergi yüklerinin zamana bağlı değişimleri ölçülecektir. Ankrajlar atıldıktan sonra, ankraj kafası montajı tamamlanmadan yük hücresi yerleştirilip ve ankraj kafası monte edilecektir. Ankraji germeden önce sıfır okuması alınıp ve manuel yöntemlerle kaydedilecektir. Ankraja germe uygulanır. Ve germe kuvveti yük hücresi aracılığıyla ölçülür ve ölçü değerleri data logger tarafından kaydedilecektir. Ölçülen verilen, bilgisayara kaydedilir ve uygun programlar ile işlem yapılacaktır.



Şekil 2.38: Yük hücresi montaj gösterimi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GENEL BİLGİLER

Derin kazılar esnasında yatay gerilme boşalması nedeniyle zeminlerde yatay ve düşey yer değiştirmeler meydana gelebilmektedir. Bu hareketlerin minimize edilebilmesi için derin kazı destekleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Derin kazı destekleme sistemlerinde zemin hareketleri, zemin profili, yeraltı suyu koşulları, inşaat süreci, destek sistemi özellikleri, kazı süreci gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Güvenlik kriterleri bakımından bu etkilerin incelenmesi ve sınırlı düzeyde tutulması gerekli bir zorunluluktur. Güvenlik ve ekonomi koşulları göz önünde bulundurulduğunda kazı destekleme sistemlerinin uzun vadeli olarak performansının değerlendirilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir.

Bu doğrultuda bu tez çalışmasında yumuşak alüvyon bir zeminde deformasyonların tasarım aşamasında ön görülmesine yönelik olarak sonlu elemanlar programında ileriye doğru analizler gerçekleştirilmiş, daha sonra elde edilen sonuçlar sistemin aletsel gözlemlene verileriyle karşılaştırılmıştır. Aletsel gözlem sonuçlarından elde edilen veriler ve tasarım aşamasında hesaplanan deformasyonlar birbirinden farklı olup, aletsel gözlem verilerine uyumlu sonuçları verecek zemin parametreleri ve zemin bünye modelleri geri analiz çalışmaları ile incelenmiştir. Bu bölümde derin kazılar nedeniyle oluşan deplasmanların ileriye ve geriye doğru analiz yöntemi ve kullanılan sonlu elemanlar programına ilişkin detaylı bilgilere yer verilmiştir.

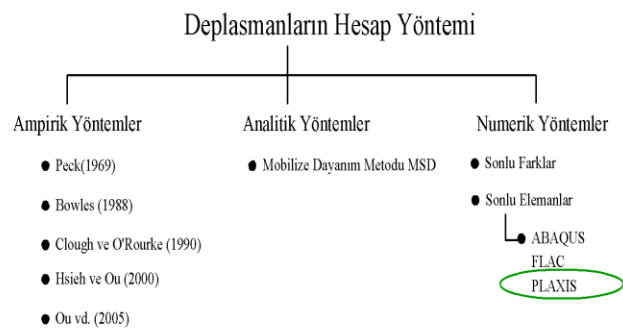
3.1.1 Derin Kazılar Nedeni İle Oluşan Deplasmanların İleriye Doğru Analizi

Derin kazı sistemleri dayanma yapısı rijitliği, duvar uzunluğu, zemin profili ve bu profile ilişkin zemin parametreleri, yeraltısuyu durumu, kazı geometrisi, inşa aşamaları, destek sistemi rijitliği, işçilik vb. birçok unsurdan etkilenmektedir. Destekli derin kazı sistemlerinin tasarımı aşamasında bu unsurlara ilişkin çeşitli varsayımlar yapılarak sistemin güvenlik faktörleri ve deformasyonlar önceden tahmin edilebilmektedir.

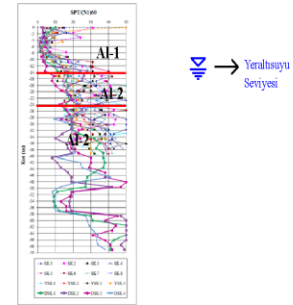
Mühendislik yapılarının inşası esnasında veya sonrasında meydana gelebilecek deformasyonların sonuçları güvenlik ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple deformasyonların tasarım aşamasında gerçeğe yakın olarak ön görülmesi büyük önem arz etmektedir. Deformasyonların tasarım aşamasında önceden tahmin edilmesine ilişkin farklı yöntemler mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında deformasyonların önceden tayinine yönelik olarak gerçekleştirilen ileriye doğru analizlerde bir sonlu elemanlar yazılımı tercih edilmiştir. Destekli derin kazı sistemlerinde deformasyonların öngörülmesine ilişkin gerçekleştirilecek ileriye doğru analizler için tipik bir akış şeması aşağıda Şekil 3.1’ de verilmektedir.

Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların ileriye doğru analizinde öncelikli olarak sistemin inşa edileceği proje alanının zemin profili ve bu zemin profiline ilişkin zemin parametreleri doğru tayin edilmelidir. Zemin etüdlerinin zemin parametrelerinin gerçeğe yakın olarak öngörülebilmesi için yeterli sayıda ve yeterli çeşitlilikte olması büyük önem arz etmektedir. Bir diğer husus inceleme alanındaki yer altı suyu seviyesinin doğru tahminidir. İleriye doğru analizlerde yeraltısuyu seviyesinin doğru tanımlanması analizler esnasında meydana gelecek boşluk suyu basıncı değişimleri nedeniyle deformasyonları etkilemektedir. Sonlu elemanlar yazılımları zemin davranışını kullanıcı tarafından seçimine izin verecek şekilde farklı zemin bünye modellerini kendi içerisinde barındırmaktadır. İnceleme alanından alınan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ve arazide yerinde yapılacak arazi ölçüm sonuçlarına göre, proje sahasının deformasyon davranışı öngörülmesi ve bu deformasyon davranışını temsil edecek uygun zemin bünye modeli seçilmelidir. Bu işlem adımları uygulanarak sonlu elemanlar yazılımı ile planlanan iksa sistemine ilişkin deformasyonlar ve güvenlik faktörleri tasarım aşamasında önceden tahmin edilebilmektedir.

DERİN KAZILAR NEDENİYLE OLUŞAN DEPLASMANLARIN İLERİYE DOĞRU ANALİZİ



1 Modellemeye esas zemin profilinin belirlenmesi

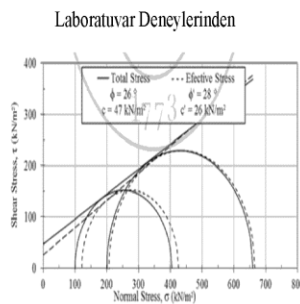


2 Zemin bünye modelinin belirlenmesi

- Mohr Coulomb
- Hardening Soil
- Hardening Soil-SS

3 Zemin parametrelerinin tayini

- Deformasyon Modülü
- Kayma Mukavemeti Açısı
- Kohezyon
- Gerilmeye bağıl rijitlik parametresi m
- Kayma Modülü

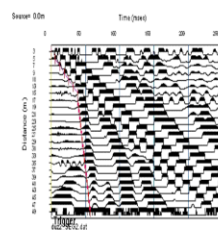


Literatürde Önerilen Bağlantılardan

$$G_0 = 49.4 \frac{q_t^{0.695}}{e^{1.13}} \text{ [MPa]}$$

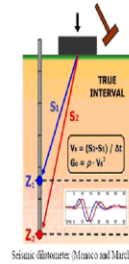
$$E_o = 2(1 + \nu)G_o$$

Jeofizik Ölçüm Sonuçlarından



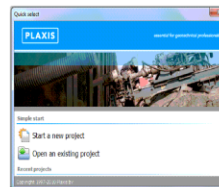
- MASW
- DOWNHOLE
- CROSSHOLE

Arazi Ölçüm Sonuçlarından

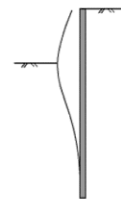


- SDMT
- SCPT
- CPT
- SPT

4 Sonlu Elemanlar Programı ile Analiz



5 Deformasyonların Belirlenmesi



Şekil 3.1: Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların ileriye doğru analizi tipik akış şeması.

3.1.2 Derin Kazılar Nedeni İle Oluşan Deplasmanların Geriye Doğru Analizi

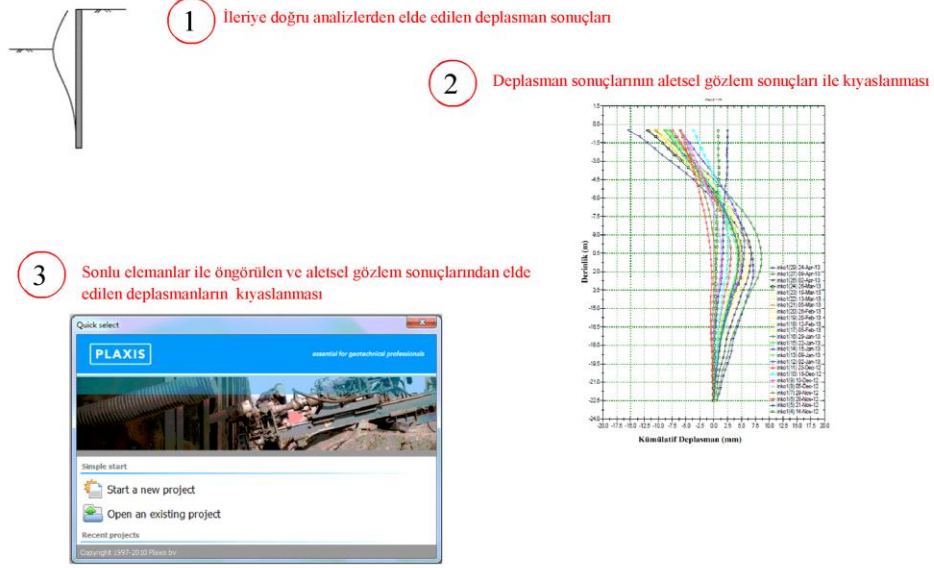
Mühendislik yapılarının tasarım aşamasında zemin profili ve bu profile ilişkin zemin parametreleri hakkında bir takım öngörülerde bulunulmakta ve tasarımın güvenlik kriterlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmektedir. Zemin parametrelerinin yanı sıra derin kazı sistemlerinde deformasyonlara etkisi olabilecek, işçilik kalitesi, destek

sisteminin rijitliği, yeraltı suyu koşulları vb. gibi farklı unsurlar da devreye girmektedir. Bünyesinde bu kadar çok karakteristiği barındıran derin kazı sistemlerinde tasarım aşamasında öngörölen deplasmanların ne mertebede meydana geldiğinin tespiti hem ekonomi hem de güvenlik açısından önemli bir kriterdir. İnşa aşamasında güvenliği sağlamak inşaat maliyetini en aza indirmek, inşaat planlaması yapmak, inşaat bittikten sonra da yapının davranışını izlemek amacıyla aletsel gözlem çalışmaları yapılmaktadır. Günümüzde tasarım esnasında öngörölen deformasyonların imalat ve sonraki süreçte ne mertebede gerçekleştiğinin tespiti amacıyla imalat sırasında iksa sistemi ve kazı çevresine aletsel gözlem ekipmanları yerleştirilmektedir.

Aletsel gözlem sonuçlarından elde edilen deformasyonlar ve tasarım esnasında ön görölen deformasyonlar karşılaştırılmakta, arazi verilerine uyumlu sonuçların elde edilmesi amacıyla da geri analiz çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Geri analiz çalışmalarında deformasyonları etkileyecek birçok parametrenin etkisi irdelenmekte ve arazi bulguları ile uyumlu sonuçlar doğuran parametreler tespit edilmektedir. Saha çalışmaları süresince yapılacak bu tarz bir çalışma ile güvenliğin eksik kaldığı kısımlar önceden tespit edilebilmekte, ya da tam tersi olarak tasarımın aşırı güvenli kaldığı kısımlarda ilave çözümlerle sistem daha ekonomik bir hale getirilebilmektedir.

Geri analiz esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar, tam olarak sistemde deformasyonlara neden olabilecek tüm unsurlardır. Modellemeden kaynaklı hatalardan kaçınmak adına sistem mümkün olabildiğince gerçekteki inşa adımlarına uygun olarak modellenmelidir. Zemin parametreleri, seçilen zemin bünye modeli, yeraltısu seviyesi, kazı esnasında alınan ilave tedbirler, sistem rijitliği, ankrajların germe kuvvetleri vb. gibi birçok faktör ayrı ayrı ele alınarak arazi verilerini sağlayan uygun geoteknik model elde edilir. Böylelikle sahayı temsil eden en uygun geoteknik model ile sistemde ekonomi sağlanabilmekte, sistemin güvenlik bakımından yetersiz kaldığı durumlarda da ilave önlemlerin önceden alınması sağlanabilmektedir. Destekli derin kazı sistemlerinde öngörölen deformasyonların arazi verileri ile uyumluluğunun tespitine yönelik olarak gerçekleştirilecek geriye doğru analizler için tipik bir akış şeması aşağıda Şekil 3.2’ de verilmektedir.

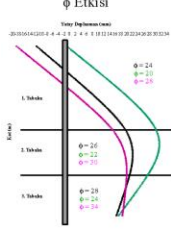
DERİN KAZILAR NEDENİYLE OLUŞAN DEPLASMANLARIN GERİYE DOĞRU ANALİZİ



4.1 Aleysel gözlemden elde edilen deformasyon formuna ulaşabilmek için deneme-yanılma yoluyla basit geri analiz

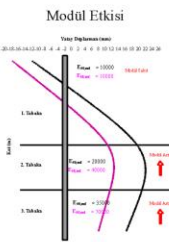
Zemin Parametrelerinin Değiştirilmesi

- Deformasyon Modülü
- Kayma Mukavemeti Açısı
- Kohezyon
- Gerilmeye bağımlı parametreler
- Kayma Modülü



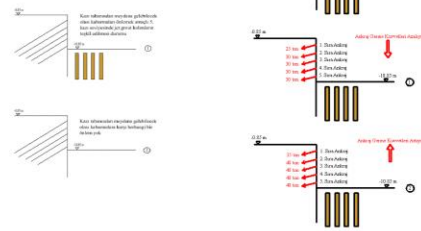
Farklı Zemin Bünye Modelleri İle Geri Analiz

- Mohr Coulomb
- Hardening Soil
- Hardening Soil-SS



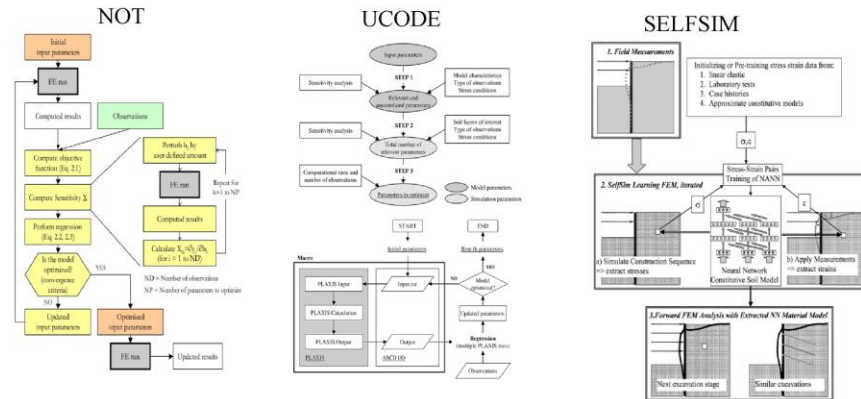
İnşaat Aşamalarının Modellenmesi

- Yeraltı suyu Koşulları
- Ankrajların az ya da çok gerilmesi
- Kazı tabanındaki zemin ıslanma ne mertebede etkin olduğunun tespiti



4.2 Aleysel gözlemden elde edilen deformasyon formuna ulaşabilmek için gelişmiş geri analiz

Kullanıcıya Özel Sinir Ağları ile Kurulan Geri Analiz Algoritmaları



Şekil 3.2: Derin kazılar nedeni ile oluşan deplasmanların geriye doğru analizi tipik akış şeması.

3.2 KULLANILAN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Geoteknik mühendisliği analizlerinde, zemin koşullarının karmaşık olması ve bir çok etkeni bünyesinde barındırması nedeniyle bir çok parametre göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde önerilen ampirik yöntemler karmaşık zemin yapısına ilişkin sonuçlar vermede yer yer belirsizlik ve yetersizlik içermekte ve bu nedenlerle gerçeğe uzak sonuçlar verebilmektedir. Geoteknik problemlerin çözümünde bir çok karakteristiğin bir arada göz önünde bulundurulması gerekliliği, hesap yöntemlerini bu ampirik yöntemlerden daha kapsamlı olan farklı yöntem arayışlarına yöneltmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte tüm bu faktörleri bir arada inceleyebilen sayısal yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu anlamda geliştirilen yöntemler içerisinde Sonlu Elemanlar Yöntemi geoteknik problemlerin çözümünde en yaygın olarak kullanılan sayısal analiz yöntemidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin temeli sistemin sonlu sayıda düğümlere, farklı gerilme deformasyon durumlarında olan parçalara ayırarak, sistemin rijitlik matrisini oluşturan elemanların ayrı ayrı düzenlenmiş rijitlik matrislerinin toplamı şeklinde kurmaktır. Sonlu Elemanlar Yöntemi karmaşık yapıdaki, değişik gerilme-deformasyon durumlarına uygun gelebilecek çok sayıda sonlu eleman türlerini içerisinde barındırır. Bu nedenle geoteknik mühendisliği analizlerinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri olmuştur.

Tez çalışması kapsamında sonlu elemanlar yöntemini benimseyen Plaxis programı kullanılmıştır. Söz konusu programa ilişkin detaylı bilgiler aşağıda ilgili bölümlerde verilmektedir.

3.2.1 Programın Genel Özellikleri

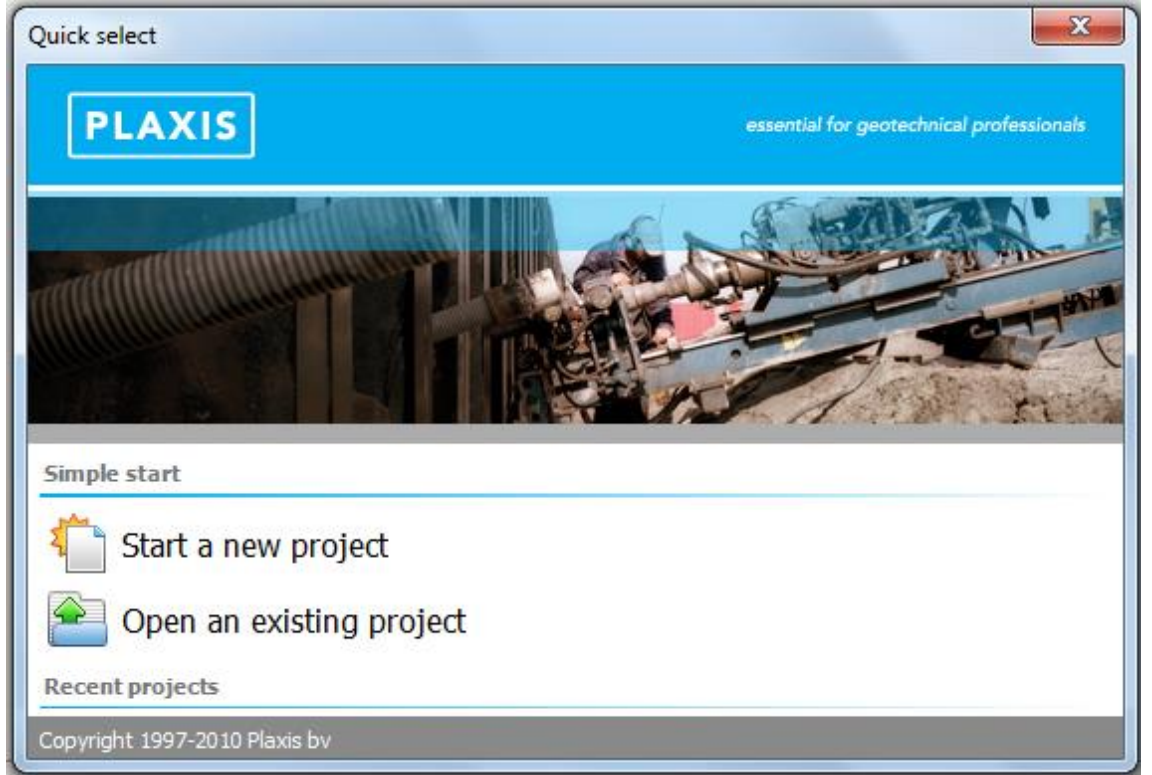
Programın Yapısı

Plaxis Input – Bu bölümde sonlu elemanlar ağında çözümlenmek istenen problemin tanımı, problem sınırlarının tanımlanması, geometrinin oluşturulması, yapısal elemanlar ve zeminlerin özelliklerinin tanımlanması işlemleri yapılmaktadır.

Plaxis Calculation – Bu bölümde gerçeğe yakın bir şekilde sahada gerçekleşen inşaat aşamalarının tanımlanması, yeraltı suyu seviyesinin tanımlanması işlemleri yapılmaktadır.

Plaxis Output – Hesap aşamasında tanımlanmış her bir safha için edinilen sonuçları ayrı ayrı görüntüler.

Plaxis Curves – Seçilen herhangi bir noktada tüm inşaat safhalarından oluşmuş sonuçların grafiksel olarak görüntülediği kısımdır.



Şekil 3.3: Plaxis programının başlatılması.

Project properties

Project **Model**

Project

Title

Directory

File name

Comments

General options

Model **Plane strain**

Elements **15-Node**

Acceleration

Gravity angle **-90°** **1.0 G**

x-acceleration **0.000** **G**

y-acceleration **0.000** **G**

Earth gravity **9.800** **m/s²**

☐ Set as default

Next OK Cancel

Şekil 3.4: Model başlangıç ekranı.

Project properties

Project **Model**

Units

Length **m**

Force **kN**

Time **day**

Stress **kN/m²**

Weights **kN/m³**

Geometry dimensions

X_{min} **0.000** **m**

X_{max} **50.00** **m**

Y_{min} **0.000** **m**

Y_{max} **20.00** **m**

Grid

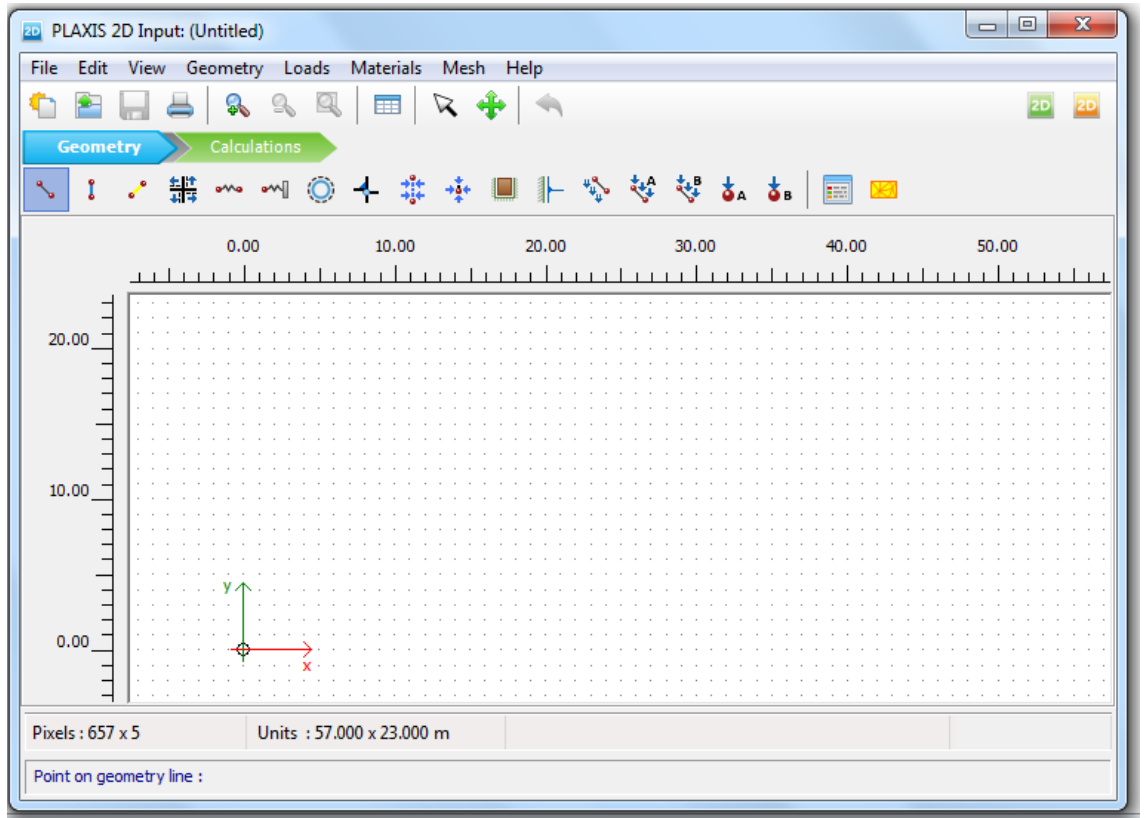
Spacing **1.000** **m**

Number of snap intervals **1**

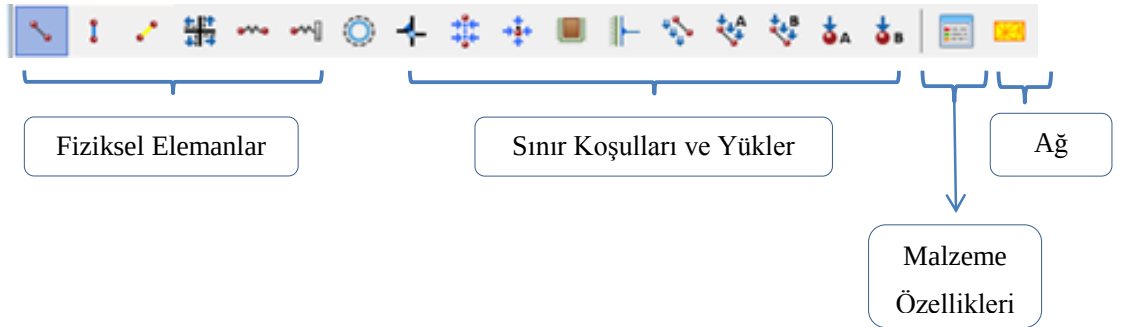
☐ Set as default

Next OK Cancel

Şekil 3.5: Temel model ekranı.



Şekil 3.6: Program ekranı genel görüntüsü.

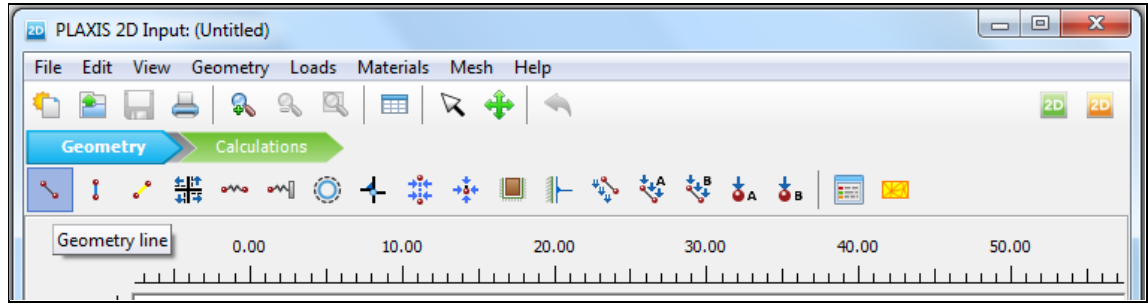


Şekil 3.7: Plaxis programı araç çubuğu.

Noktalar ve Çizgiler

Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak geometri çizgilerinin başlangıç ve bitişini noktalar oluşturur. Noktalar yapısal elemanların sınırlarını, geometride kesişen noktaları, yük başlangıç ve bitişlerini gösteren elemanlardır.

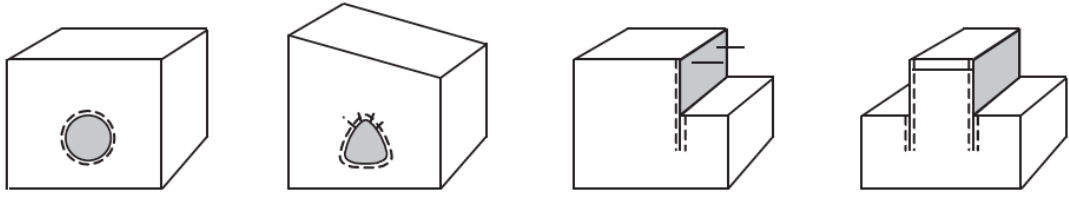
Çizgiler, sonlu elemanlar analizinin model sınırlarının, farklı zemin tabakalarının, inşa aşamasındaki kazı seviyelerinin belirlenmesi gibi amaçlarla kullanılırlar. Plaxis 2010 VIP sürümünde Autocad üzerinde çizgilerden oluşturulmuş model geometrisi kolay bir şekilde Plaxis programına aktarılabilir. Ayrıca yine model geometrisini oluşturan noktalara ait koordinatların *.csv ya *.txt uzantılı dosyalar ile model geometrisi Plaxis'e kolaylıklar aktarılabilir. Program ekranında çizgi seçimini sağlayan düğme aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Program ekranında çizgi eleman düğmesi.

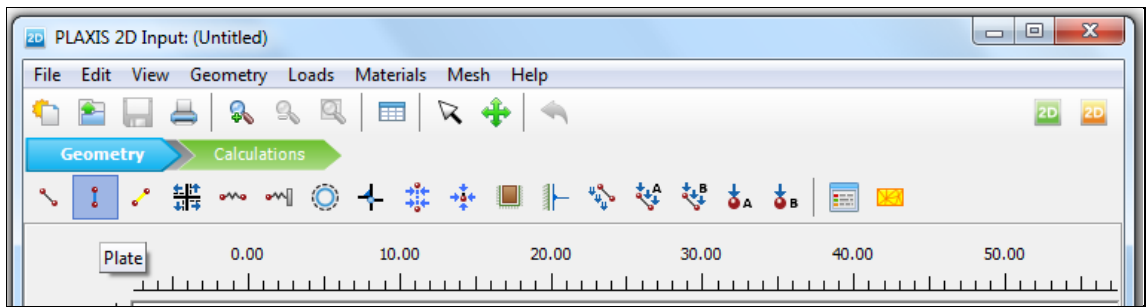
Perde ve Kabuklar

Plakalar bir eğilme ve normal rijitliği olan ince elemanların tanımlanmasında kullanılırlar. Programda tanımlanmış plakalar aktif değilken açık mavi olarak gözüktürler. Aşağıdaki şekilde plakaların kullanım alanları verilmektedir. Bu kapsamda plakalar, temeller, tüneller, iksa duvarları, kazıklar gibi yapıların eşdeğer dikdörtgen kesit olarak modellenmesi için kullanılırlar. Plaka elemanların davranışının modellenmesinde bir eğilme rijitliği (EI) ve bir normal rijitliği (EA), poisson oranı parametreleri kullanılmaktadır. Bu elemanların davranışı elastik veya elastoplastik olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 3.9: Plakaların kullanım alanları.

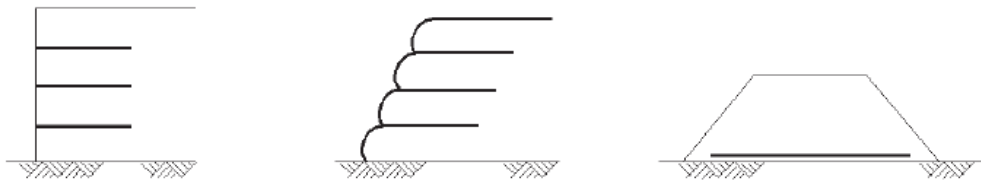
Plakalar aşağıda verilen Şekil 3.10’ dan seçilebileceği gibi ayrıca *Geometry* menüsünden de seçilebilir.



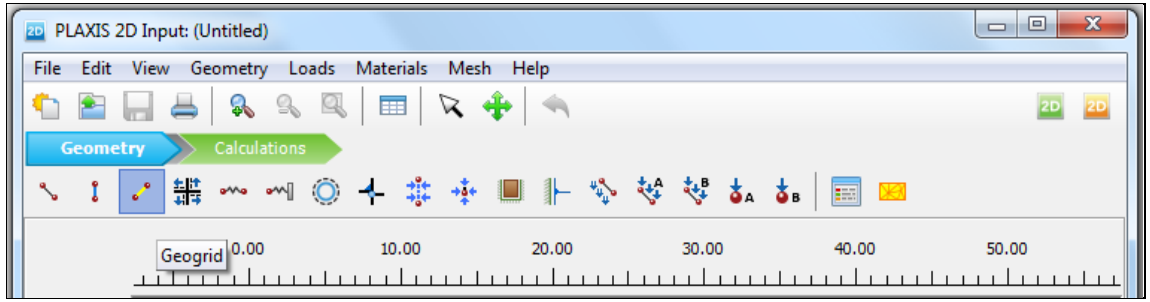
Şekil 3.10: Program ekranında plaka eleman düğmesi.

Geogridler

Geotekstiller veya geogridler genellikle donatılı zemin duvarlarında ve zemin iyileştirme projelerinde tercih edilen elemanlardır. Geogrid elemanlar herhangi bir eğilme rijitliği olmayan yalnızca normal rijitliğe sahip çekme elemanları olarak tanımlanırlar. Programda tanımlanmış geogridler aktif değilken açık sarı olarak gözüktürler. Aşağıda Şekil 3.11’ de geogridlerin kullanım alanları verilmektedir. Plaxis analizlerinde geogridler en yaygın olarak enjeksiyonlanmış ankraj kök bölgesinin tanımlanmasında kullanılmakta olup bu elemanlar çevresindeki zeminle etkileşim içerisindedir.



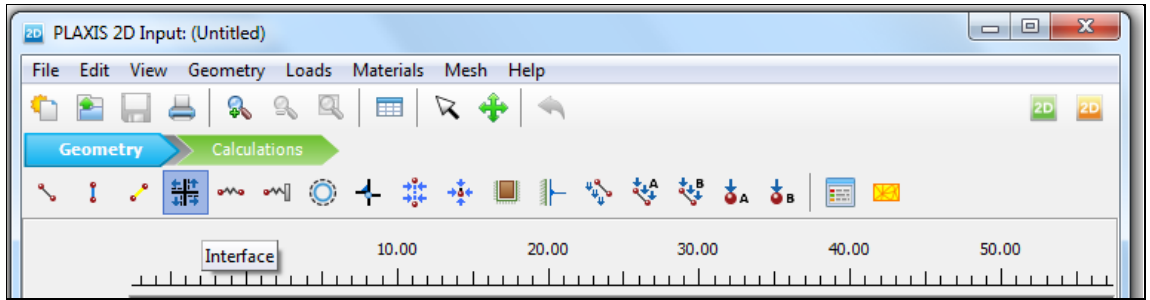
Şekil 3.11: Geogridlerin kullanım alanları.



Şekil 3.12: Program ekranında geogrid eleman düğmesi.

Arayüzeyler

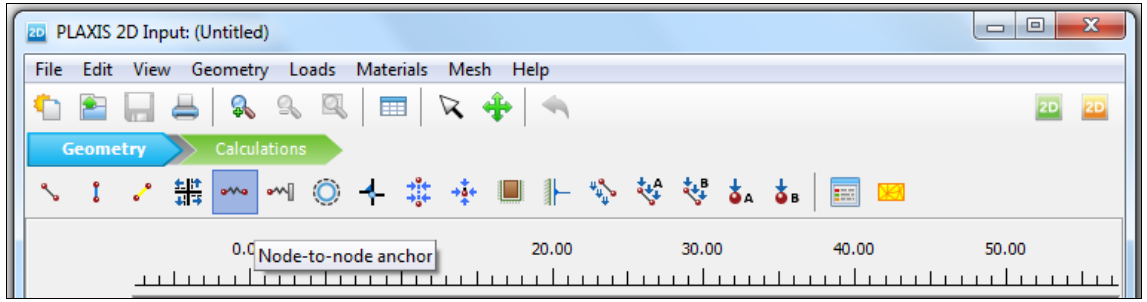
Zemin-yapı etkileşimini modellemek için kullanılmaktadır. Arayüzleri kullanmaktaki amaç kuvvet ve şekil değiştirme etkileşiminin farklı rijitlikteki elemanlarda transferinin daha iyi modellenebilmesidir. Böylelikle yapısal eleman ve zemin arasında tam bir etkileşim sağlanmaktadır. Farklı malzemelerin zemin ile etkileşimini tanımlamak amacıyla zemine bir azaltma faktörü R_{inter} uygulanmaktadır.



Şekil 3.13: Program ekranında arayüzey tanımlama düğmesi.

Ankrajlar

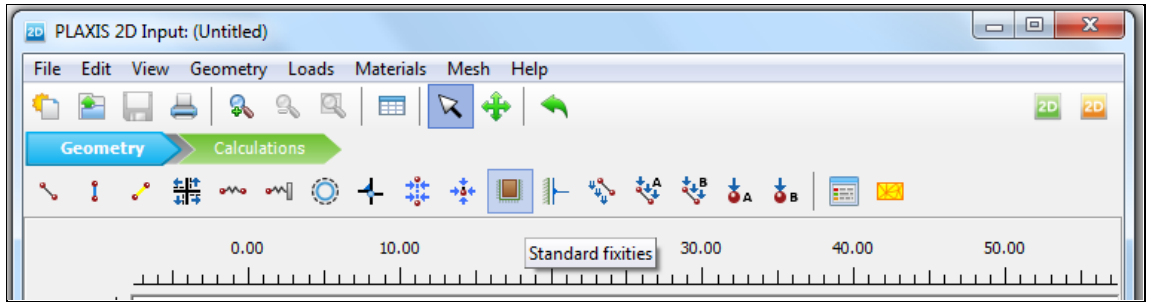
Node-to-node anchor elemanlar ankraj, kolon ve çubuk elemanları modellemek amacıyla kullanılır. Plaxis analizlerinde en yaygın olarak ankrajların serbest bölgesinin tanımlanmasında kullanılmakta olup bu elemanların çevresindeki zeminle herhangi bir etkileşimi yoktur.



Şekil 3.14: Program ekranında ankraj eleman seçimi.

Standart Sınır Koşulları

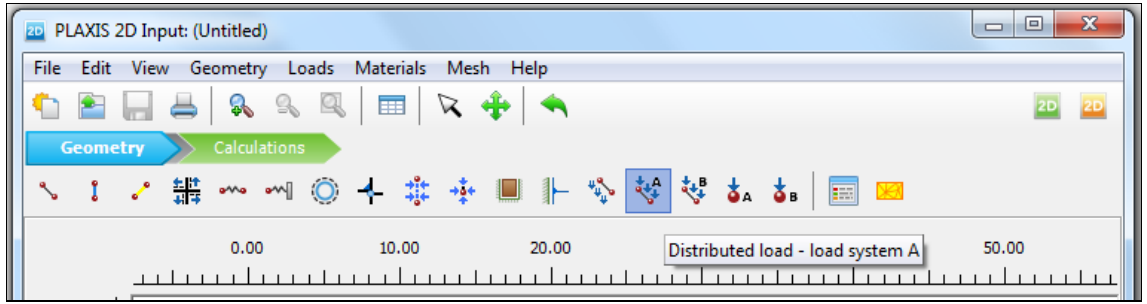
Sabitlemeler şekil değiştirmelerin ve yüklerin sabitlenmesi veya serbest bırakılmasını sağlayan çözümün sınırlarını tanımlanmasını sağlamaktadır. Programda genel olarak 3 farklı sabitleme seçeneği vardır. Bunlar yatay hareketin sabitlemesi ($dx=0$), düşey hareketin sabitlemesi ($dy=0$), toplam hareketin sabitlenmesi ($dx = dy = 0$).



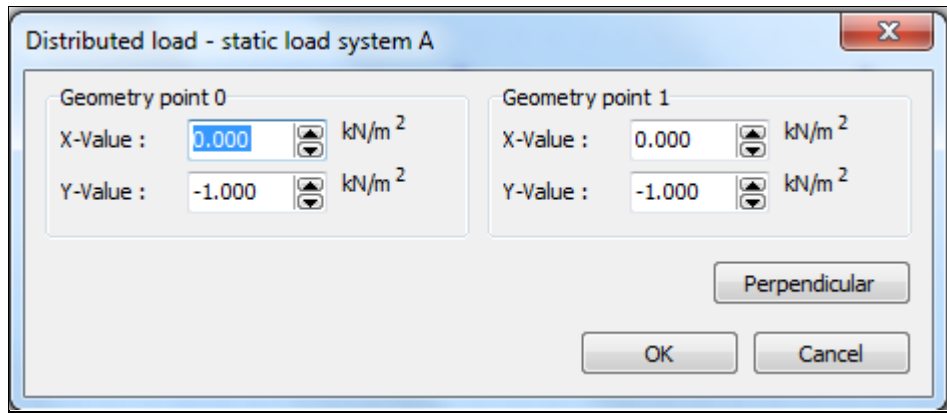
Şekil 3.15: Program ekranında sınır tanımlama düğmesi.

Kuvvetler

Programda noktasal ve yayılı yüklerin uygulanabilmesi için bağımsız yük sistemleri mevcuttur. Noktasal yükler geometri noktalarına, yayılı kuvvetler ise çizgi elemanlar üzerinde uygulanabilmektedir. Bu yükleri yatay ve düşey olarak tanımlamak mümkündür.



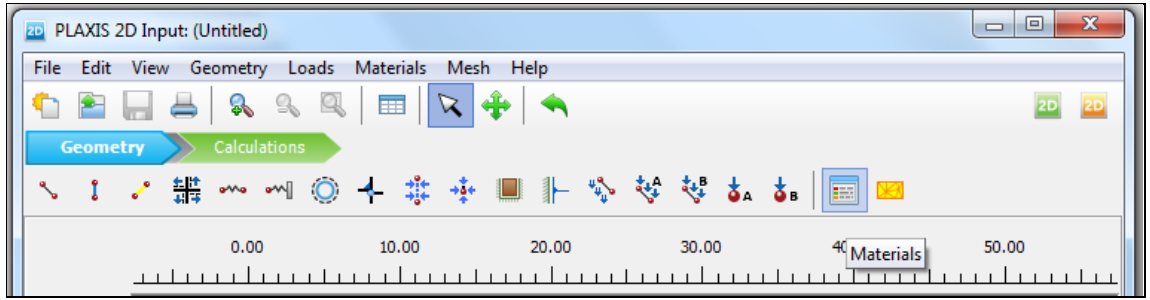
Şekil 3.16: Program ekranında yük seçim düğmesi.



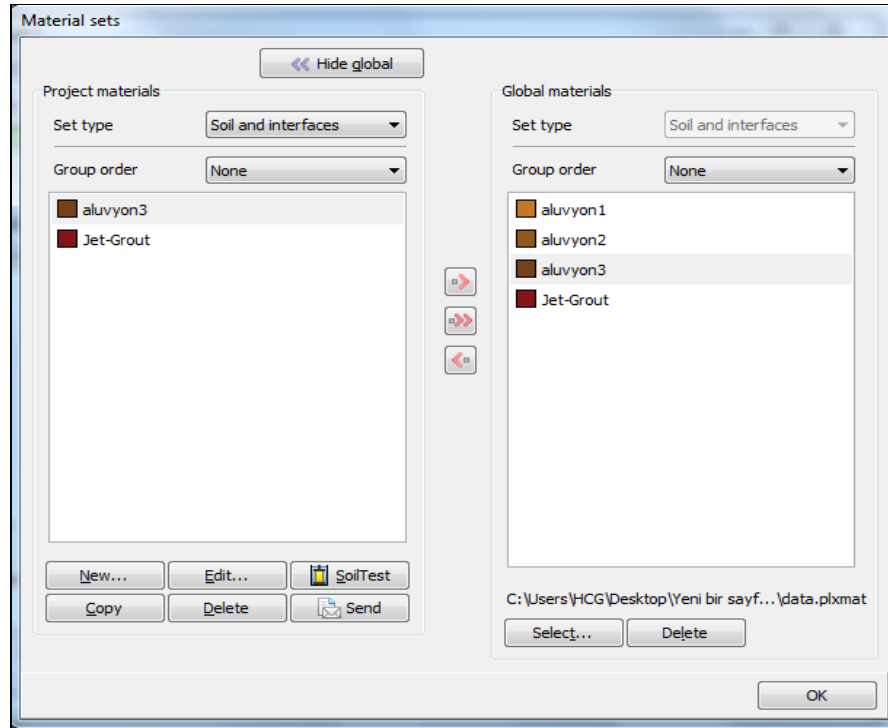
Şekil 3.17: Yük tanımlama penceresi.

Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Programda modellenen geometride yer alan hem zemin hem de yapısal elemanların malzeme özelliklerinin tayin edilmesi gerekmektedir. Bu menüde zemin ve ara yüzler, perde ve kabuk elemanlar, geotekstiller ve ankrajlar için malzeme özellikleri tanımlanabilmektedir. Malzeme özellikleri için program kütüphanesinde mevcut olan özellikler kullanılabileceği gibi malzeme özelliklerinin kullanıcı tarafından da tanımlanması mümkündür.



Şekil 3.18: Malzeme parametreleri tanımlama düğmesi.



Şekil 3.19: Malzeme parametrelerinin tanımlandığı ana pencere.

Soil - Hardening soil - aluvyon3

General Parameters Flow parameters Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		aluvyon3
Material model		Hardening soil
Drainage type		Drained
Colour		RGB 117, 65, 26
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	18.00
γ_{sat}	kN/m ³	19.00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e_{init}		0.5000
e_{min}		0.000

Next OK Cancel

Şekil 3.20: Zemin mühendislik parametrelerinin tanımlandığı pencere.

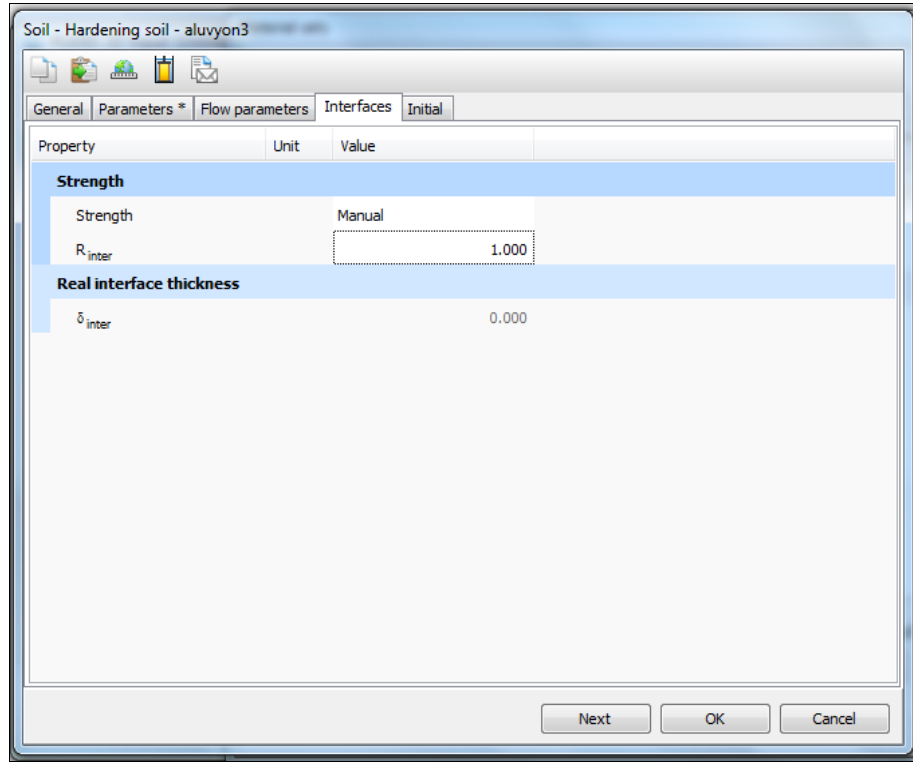
Soil - Hardening soil - aluvyon3

General Parameters Flow parameters Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	70.00E3
E_{ped}^{ref}	kN/m ²	70.00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	210.00E3
power (m)		0.7000
Alternatives		
Use alternatives		☐
C_c		4.929E-3
C_s		1.479E-3
e_{init}		0.5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	15.00
$\phi' (phi)$	°	30.00
$\psi (psi)$	°	0.000
Advanced		

Next OK Cancel

Şekil 3.14: Zemin mühendislik parametrelerinin tanımlandığı pencere.



Şekil 3.14: Zemin-yapı etkileşiminin tanımlandığı arayüz penceresi.

3.2.2 Kullanılan Programda Yer Alan Zemin Bünye Modelleri

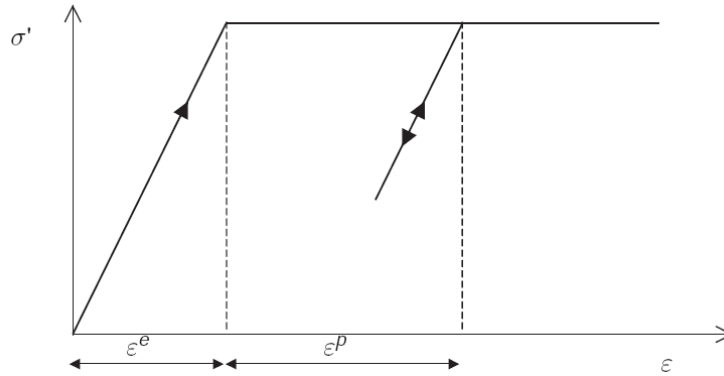
Bölüm 3.1’ de bahsedildiği üzere geri analiz çalışmalarında Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Plaxis sonlu elemanlar programı basit lineer elastik modellerden ileri düzey elasto-plastik başlık modelleri içermektedir. Plaxis’ te kullanılan bünye modellerine ilişkin detaylar aşağıdaki bölümlerde verilmektedir. Plaxis’ te sıklıkla kullanılan zemin bünye modellerine ilişkin temel özellikler, gerekli zemin parametreleri ve göçme kriterlerini içeren özet tablo ise aşağıda Tablo 3.1’ de sunulmaktadır.

Tablo 3.1: Kullanılan sonlu elemanlar programında kullanılan temel zemin bünye modellerinin özeti.

	Mohr Coulomb Zemin Bünye Modeli (MC)	Pekleşen Zemin Bünye Modeli (HS)	Küçük Deformasyonları Dikkate Alan Pekleşen Zemin Bünye Modeli (HS-SS)
Model Tipi	Elastik mükemmel plastik	Elasto-plastik	Elasto-plastik
Temel Özellikler	-Derinlikle artan rijitlik tanımlama olanağı -Dilatans	- Kuvvet kuramına göre gerilme bağımlı rijitlik -Birincil yüklemekten ötürü plastik pekleşme -Birincil sıkışmadan ötürü plastik pekleşme -Elastik yükleme-geri boşaltma -Hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi -Dilatans	- Kuvvet kuramına göre gerilme bağımlı rijitlik -Birincil yüklemekten ötürü plastik pekleşme -Birincil sıkışmadan ötürü plastik pekleşme -Elastik yükleme-geri boşaltma -Hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi -Dilatans
Göçme Kriteri		Mohr Coloumb göçme kriteri	
Gerilme Durumu		İzotropik	
Pekleşme	Yok	İzotropik; kesme ve sıkışma	İzotropik; kesme ve sıkışma
Gerekli Zemin Parametreleri	c', ϕ' , dilatans açısı Ψ ve Young Modülü E , poisson oranı ν	c', ϕ' , dilatans açısı Ψ , drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen sekant rijitliği E_{50}^{ref} , yükleme-boşaltma rijitliği E_{ur}^{ref} , ödometre yüklemesinden elde edilen E_{oed}^{ref} , m kuvvet, yükleme-boşaltma durumunda poisson oranı ν_{ur} ve sükunetteki toprak basıncı katsayısı K_0	c', ϕ' , dilatans açısı Ψ , drenajlı üç eksenli deneyden elde edilen sekant rijitliği E_{50}^{ref} , yükleme-boşaltma rijitliği E_{ur}^{ref} , ödometre yüklemesinden elde edilen E_{oed}^{ref} , $\gamma_{0,7}$ Kayma modülü G_0 , m kuvvet, yükleme-boşaltma durumunda poisson oranı ν_{ur} ve sükunetteki toprak basıncı katsayısı K_0
Uygulama Alanları	Tüm zemin tiplerinde	Tüm zemin tiplerinde	Tüm zemin tiplerinde

Mohr Coulomb Zemin Bünye Modeli (MC)

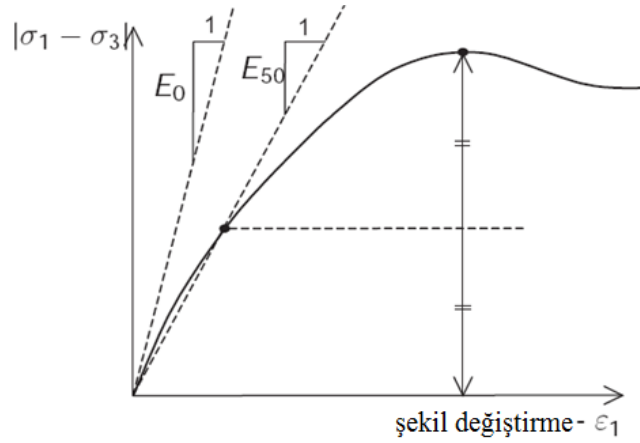
Mohr-Coulomb (MC) zemin bünye modeli lineer-elastik mükemmel plastik bir modeldir. Elastoplastik zemin davranışının temel prensibine göre deformasyonlar ve deformasyon oranları elastik ve plastik kısımların ayrılmış halinden oluşurlar. Mohr Coulomb zemin bünye modelinde, beş esas parametre vardır ve bu parametrelerden elastik davranışı modellemek amacıyla E (Elastisite Modülü ve ν (Poisson oranı); plastik durumu modellemek amacıyla c (kohezyon), ϕ (kayma mukavemeti açısı) ve Ψ (dilatans açısı) kullanılmaktadır.



Şekil 3.21: Mohr Coulomb göçme kriteri.

Plaxis çözümlerinde temel olarak Young modülünü kullanır, ancak programda alternatif rijitlikler de mevcuttur. Geleneksel üç eksenli basınç deneylerinde gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin başlangıç eğimi (tanjant modülü) başlangıç rijitlik modülü E_0 ve deviator gerilmenin %50'sine denk gelen bölgenin eğimi (sekant modülü) rijitlik modülü ise E_{50} ile gösterilmektedir.

Lineer elastik davranış aralığı geniş olan zeminlerde E_0 kullanmak mantıklıdır, ancak yükleme altındaki zeminlerde E_{50} rijitliğini kullanmak daha doğrudur. Yani kumlar ve normal konsolide killerde Sekant modülünü kullanmak daha uygun olacaktır.



Şekil 3.22: Drenajlı üç eksenli deneylerden E_0 ve E_{50} 'nin tanımlanması.

Elastik-mükemmel plastik zemin bünye modellerinin başlıca uygulaması; bir temelin nihai taşıma gücü veya bir istinat yapısındaki sınırlayıcı gerilmeler gibi geoteknik yapılar için göçme yüklerinin hesaplanmasıdır (Wood, 2006).

Pekleşen Zemin Bünye Modeli (HS)

Pekleşen zemin bünye modeli, yumuşak ve katı özellikteki birçok zeminin modellenmesinde kullanılabilecek gelişmiş bir zemin bünye modelidir (Schanz, 1998).

Zemine öncül bir yükleme uygulandığında, zemin rijitliğinde bir azalma meydana gelmekte ve hemen peşi sıra kalıcı şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Drenajlı üç eksenli deneylerde eksenel şekil değiştirme ve deviatorik gerilme arasındaki ilişki bir hiperbol ile modellenmektedir. Benzer bir çalışma Kondner (1963) ve daha sonra hiperbolik modellemede tanınan Duncan-Chang, 1970 tarafından formülize edilmiştir. Pekleşen zemin modeli, hiperbolik zemin bünye modelinin yerini almıştır. İlk olarak elastisite teorisi yerine plastisite teorisi dikkate alınmış, ikinci olarak zemine bir dilatans (genleşme) açısı tanımlanmış ve üçüncü olarak ise akma davranışı akma başlığı ile tanımlanmıştır. Pekleşen zemin bünye modelinde, elastik mükemmel plastik zemin modelinden farklı olarak pekleşen bir plastik modelin akma yüzeyi asal gerilme düzlemine sabit değildir. İki tür pekleşme mevcut olup bunlardan biri kayma pekleşmesi bir diğeri ise sıkışma pekleşmesidir. Kayma pekleşmesi genellikle öncül deviatorik yüklemelerden meydana gelen kalıcı şekil değiştirmelerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Sıkışma pekleşmesi ise ödometre yüklemesi ya da izotropik

yüklemelerden kaynaklı meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin modellenmesinde kullanılmaktadır.

Pekleşen zemin bünye modeli kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için kullanılabilir. Zemin modelinin bazı temel özellikleri aşağıda özetlenmektedir (Schanz ve Vermeer, 1996)

m üstel sayısına göre gerilme bağımlı rijitlik	Giriş parametresi, m
Deviatorik gerilme-şekil değiştirme arasında hiperbolik ilişki	Giriş parametresi, E_{50}
Deviatorik yükleme ve boşaltma/tekrar yükleme arasında uyum	Giriş parametresi, E_{oed}
Mohr-Coulomb modeline göre göçme davranışı	Giriş parametresi, c, ϕ , Ψ

Pekleşen zemin bünye modelinin temellerinden biri zemin rijitliğinin gerilmeye bağımlı olmasıdır. Gerilme-şekil değiştirmelerinin ödometre koşullarında belirlendiği rijitlik aşağıdaki bağıntıdan belirlenmektedir. Burada p^{ref} referans gerilmedir.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma}{p^{ref}} \right)^m \quad (3-1)$$

Benzer şekilde modifiye sıkışma indeksine bağlı olarak hesaplanan yükleme-boşaltma rijitliği ise aşağıdaki bağıntıdan belirlenmektedir.

$$E_{oed}^{ref} = \frac{p^{ref}}{\lambda^*} \quad (3-2)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1+eo)} \quad (3-3)$$

İlk yükleme için rijitlik;

İlk yükleme için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi non-lineerdir. İlk yüklemeyle ilgili rijitlik modülü E_{50} aşağıdaki belirtilen formülasyondan belirlenmektedir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (3-4)$$

E_{50}^{ref} , p^{ref} referans gerilme altındaki rijitlik olup Plaxis'te $p^{ref} = 100$ olarak alınmaktadır. Gerçek rijitlik değeri ise normalde küçük asal gerilmeye bağlıdır, bu asal gerilme üç eksenli basınç deneylerindeki hücre basıncına eşittir.

Yükleme boşaltma için rijitlik;

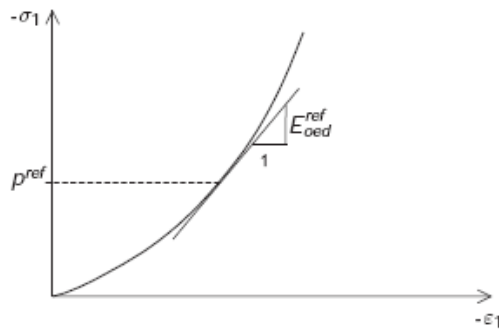
$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (3-5)$$

Olarak verilmektedir. Burada E_{ur} p^{ref} referans gerilmeye karşılık gelen Young modülüdür. Plaxis $E_{ur} = 3E_{50}$ bağıntısını önermektedir.

Pekleşen zemin bünye modelinin, Mohr- Coulomb zemin modeline göre avantajları mevcuttur. Zemin modeli, Mohr Coulomb Zemin Bünye Modelindeki gibi lineer bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi yerine hiperbolik bir eğri kullanmasının yanında gerilme bağımlı rijitlik kullanmaktadır. Doğal koşullarda zeminlerin rijitliği gerilme seviyelerine bağlıdır, bu bakımda pekleşen zemin modeli daha gerçekçi zemin koşullarını temsil etmektedir.

Pekleşen zemin bünye modeli elastik zemin davranışını benimseyen diğer modellere göre daha farklı olup, üç eksenli rijitlik değeri ve ödometre rijitlik değeri arasında sabitlenmiş bir bağıntı kurmaz, bu iki değeri ayrı ayrı tanımlamak mümkündür. Buradan E_{oed} ödometrik modül aşağıdaki bağıntıdan belirlenebilmektedir.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (3-6)$$



Şekil 3.23: E_{oed}^{ref} değerinin ödometre deneyinden elde edilmesi.

Alternatif rijitlik parametreleri;

Analizlerde yumuşak özellikteki zeminler söz konusu olduğunda, alternatif rijitlik parametreleri sıkışma indeksi, şişme indeksi ve başlangıç boşluk oranından da hesaplanabilmektedir. İlgili formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

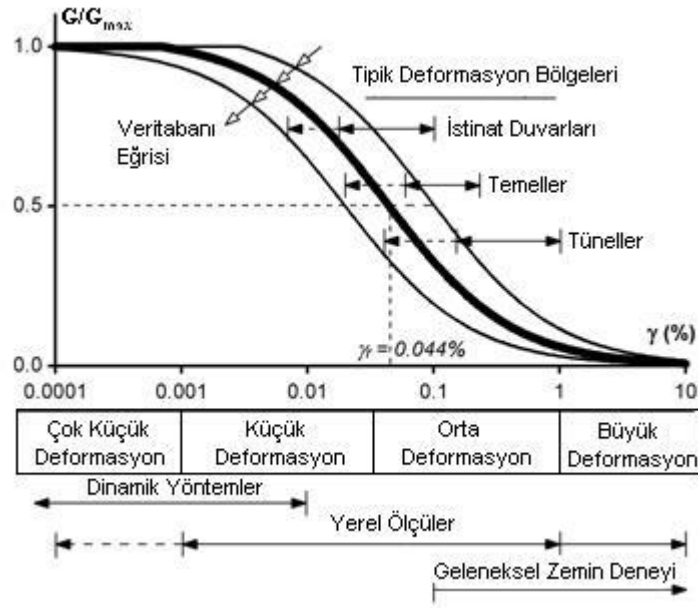
$$C_c = \frac{2.3(1+e_{init})p^{ref}}{E_{oed}^{ref}} \quad (3-7)$$

$$C_s = \frac{2.3(1+e_{init})(1+\nu)(1-2\nu)p^{ref}}{(1-\nu)E_{ur}^{ref}} \quad (3-8)$$

Küçük Deformasyonları Dikkate Alan Pekleşen Zemin Bünye Modeli (HS-SS)

Küçük şekil değiştirmelerde genelde zeminler daha yüksek rijitlik özelliği sergilerler ve bu rijitlik değeri şekil değiştirmelere bağlı olarak non-lineer bir davranış göstermektedir. Bu durum küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modelinde, pekleşen zemin bünye modeli parametrelerine ilave edilen G_o ve γ_{07} parametrelerinin ilave edilmesiyle ifade edilmiştir. Burada G_o : küçük gerilmelerdeki kayma modülü, γ_{07} ise kayma modülünün %70 oranında azaldığı durumdaki şekil değiştirme oranıdır.

Şekil değiştirme genliğinin artırılmasıyla, zemin rijitliği non-lineer olarak azalmaktadır. Şekil 3.24 geoteknik yapıların yakınında ölçülebilecek şekil değiştirme limitlerini özetlemekte ve bu şekil değiştirmelerden hangi aralığın laboratuvar deneyleri ile tespit edilebildiğini göstermektedir. Klasik laboratuvar deneyleri ile (üç eksenli basınç deneyi, ödometre deneyi vb.) ancak zemin rijitliğinin başlangıçtaki değerinin yarısından fazla bir azalma gösterdiği bölgedeki şekil değiştirmelerin belirlenebildiği görülmektedir.



Şekil 3.24: Normalleştirilmiş kayma modülünün logaritmik kayma deformasyonu ile azalımı, deney yöntemleri ve mühendislik yapılarının projelendirildikleri kayma deformasyonu sınırları (Atkinson, 1991; Oztoprak & Bolton, 2011a)

Yumuşak Zemin Modeli (SS)

Zemin mekaniğinde normal konsolide killeri, killi siltler ve turba zeminler yumuşak zeminler olarak tanımlanmaktadır. Bu tür zeminler yüksek sıkışma özelliğine sahiptir. Bu durum ödometre test datalarından en iyi Janbu' nun Rankine (1985) konferansında ifade edilmiştir. Referans bir ödometre basıncında bir tanjant modülü kabul edilerek normal konsolide killeri için $E_{oed} = 1$ ve 4 Mpa arasında değiştiğini belirtmiştir. Bu değer kumlarda ise $E_{oed} = 10$ ila 50 Mpa arasında değişmektedir. Ödometre test sonuçlarına göre normal konsolide killerin normal konsolide kumlara göre 10 kat daha yumuşak davrandığını göstermektedir. Yumuşak Zemin Modeli' nin bazı temel özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Gerilmeye bağlı rijitlik (logaritmik sıkışma davranışı)
- Birincil yükleme ve yükleme-boşaltma durumu ayrımı
- Ön konsolidasyon gerilmesini dikkate alma
- Mohr Coloumb modeline göre göçme davranışı

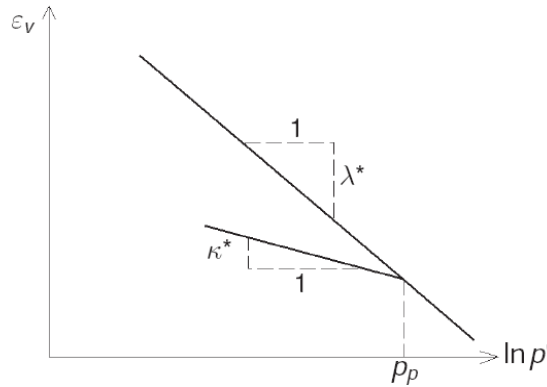
Yumuşak zemin modeli parametreleri, kohezyon (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ), dilatans açısı (ψ), modifiye sıkışma indeksi (λ^*) ve modifiye şişme indeksi (κ^*) değerleridir.

Modifiye sıkışma indeksi ve modifiye şişme indeksi değerleri izotropik boşaltma aşaması da içeren izotropik sıkışma deneylerinden belirlenebilir. Aşağıdaki şekilden de görüldüğü üzere, birincil yükleme çizgisinin eğimi modifiye sıkışma indeksini, geri boşaltma eğrisinin eğimi ise modifiye şişme indeksi parametresini vermektedir.

Modifiye sıkışma indeksi ve modifiye şişme indeksi parametreleri sıkışma ve yeniden sıkışma katsayıları korelasyonu ile aşağıdaki formüllerden hesaplanabilmektedir.

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \quad (3-9)$$

$$\kappa^* = \frac{2C_s}{2.3(1+e)} \quad (3-10)$$



Şekil 3.25: λ^* ve κ^* parametrelerinin belirlenmesi.

Yumuşak Zemin Sünme Modeli (SSC)

Yumuşak zemin sünme modeli normal konsolide killer, killi siltler ve turba zeminlerin zamana bağlı davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır. Bu model genel olarak temel ve dolgulardaki zamana bağlı oturma problemleri ile tünel ve derin kazı çalışmaları esnasındaki zemin boşalmasının modellenmesinde kullanılmaktadır. Yumuşak Zemin Sünme Modeli' nin bazı temel özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Gerilmeye bağlı rijitlik (logaritmik sıkışma davranışı)
- Birincil yükleme ve yükleme-boşaltma durumu ayrımı
- İkincil (zamana bağlı) sıkışma
- Ön konsolidasyon gerilmesini dikkate alma
- Mohr Coloumb modeline göre göçme davranışı

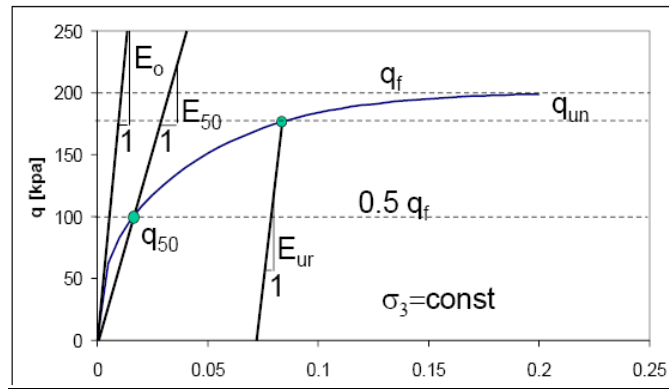
Yumuşak zemin sünme modeli parametreleri, kohezyon (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ), dilatans açısı (ψ), modifiye sıkışma indeksi (λ^*), modifiye şişme indeksi (κ^*) ve modifiye sünme indeksi (μ^*) değerleridir.

3.2.2.1 Kullanılan programda yer alan zemin parametrelerinin elde edilmesi

Tez çalışmaları kapsamında Plaxis sonlu elemanlar programında yer alan zemin bünye modellerinden pekleşen zemin bünye modeli, küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli ve Mohr Coulomb zemin bünye modeli kullanılacaktır. Bu zemin modellerinde yer alan parametrelerin tayini ve literatürde önerilen geçiş bağıntılarına aşağıda ayrıca yer verilmektedir.

Tanjant (E_o) ve Sekant Rijitlik (E_{50}) Modülü

Sekant rijitlik modülü drenajlı üç eksenli yükleme deney grafiklerinden elde edilebilecek bir değerdir.



Şekil 3.26: Tanjant ve Sekant elastisite modülü.

Ayrıca Plaxis programında $3E_{50}=E_o$ bağıntısı önerilmektedir.

$$E_o = E_o^{ref} \left(\frac{\sigma_3^* + c \cot \phi}{\sigma_{ref} + c \cot \phi} \right)^m \quad (3-11)$$

Arazide gerçekleştirilecek jeofizik ölçümler ile de E_o ve G_o modülleri arasında aşağıda verilen korelasyon mevcuttur.

$$E_o = 2(1 + \nu)G_o \quad (3-12)$$

Arazide jeofizik yöntemler ile elde edilen kayma modülü değerlerinden yukarıda verilen bağıntı ile başlangıç elastisite modülüne oradan da E_{50} sekant rijitlik modülüne geçiş yapmak mümkündür.

Ayrıca CPT' den elde edilen veriler G_o değeri oradan da E_o değerine geçiş yapmak mümkündür. Mayne ve Rix tarafından önerilen bu ampirik bağıntı şu şekildedir;

$$G_o = 49.4 \frac{q_t^{0.695}}{e^{1.13}} \quad (3-13)$$

Sıkışmazlık Modülü (E_{oed})

Tek yönlü ödometre deneyinden elde edilen E_{oed} modülü elastisite modülü ile aşağıdaki formülizasyon da belirtildiği şekilde bağlantılıdır.

$$E = E_{oed} = (1 + \nu) \times (1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad (3-14)$$

Poisson oranı değeri genellikle 0.12 ila 0.35 arasında değişmekte olup;

$E/E_{oed} = 0.623$ ila 0.967 arasında değişmektedir.

Vermeer ve Meier (1998) aşırı konsolide killerde $E_{50} < E_{oed}$, yumuşak zeminlerde $E_{50} > E_{oed}$ ve kumlu zeminlerde bu iki değerlerin hemen hemen birbirine yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Sıkışmazlık modülünün ödometre deneyinden elde edilen mv katsayısı ile aşağıdaki gibi bağıntılıdır.

$$M(E_{oed}) = 1 / \left(\frac{1}{mv} \right) \quad (3-15)$$

Gerilme bağımlı rijitlik parametresi : m

Farklı σ_3 çevre basınçları altında her bir çevre basıncına tekabül eden E_{50} değerleri belirlenerek bir $y = ax + b$ doğrusu elde edilir. Bu doğruda;

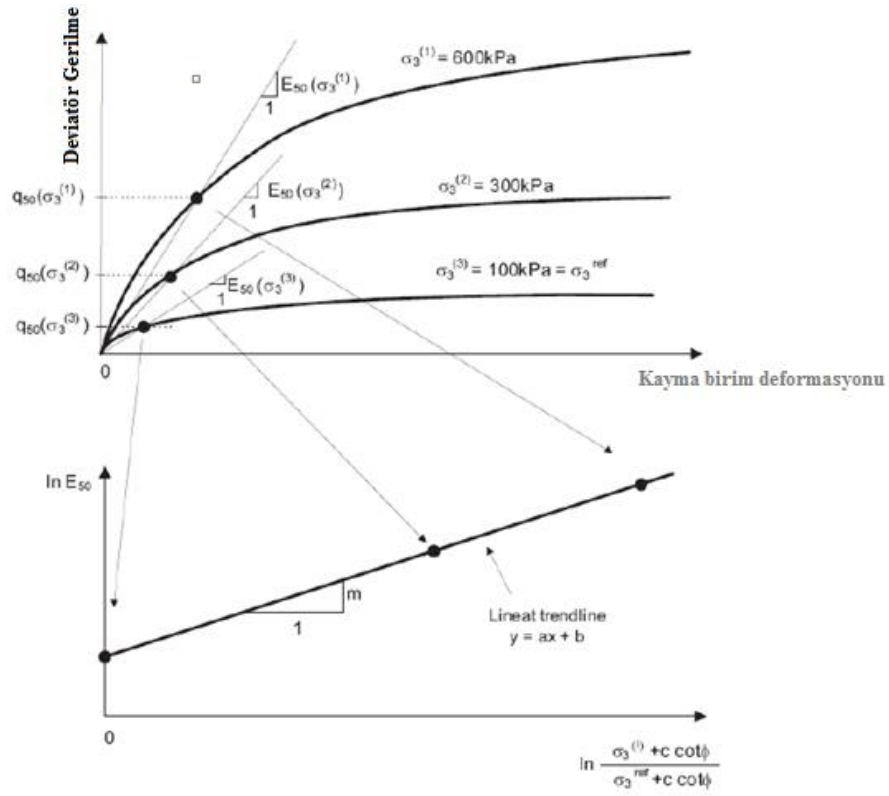
$$y = \ln E_{50}(i) \quad (3-16)$$

olup bu denklemin eğimi m parametresini vermektedir.

Doğal zeminlerde m değeri $m=0.3$ ila 1.0 arasında değişmektedir.

Kum ve siltlerde $m=0.5$ (Janbu, 1963)

Yumuşak killerde ise $m=0.38-0.84$ olarak önerilmektedir. (Kempfert, 2006)



Şekil 3.27: Gerilme bağımlı rijitlik parametresinin üç eksenli deneyden elde edilmesi

Kayma Mukavemeti Açısı

Literatürde kayma mukavemeti açısının belirlenmesinde ince daneli zeminlerde plastisite özelliklerini dikkate alan aşağıdaki formül önerilmektedir.

$$\sin^{-1} \phi = 0.656 - 0.409 \left(\frac{PI}{LL} \right) \quad (\text{Mayne, 1980}) \quad (3-17)$$

Tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerde bu formülasyon ile belirlenen kayma mukavemeti açısı dikkate alınmıştır.

Kayma Modülü (G_0) ve $\gamma_{0.7}$

G_0 ve $\gamma_{0.7}$ değerleri arazide ve laboratuvarda yapılan deneylerle belirlenebilmektedir. Arazi ve laboratuvar deneyleri ile zeminin kayma dalgası hızı belirlenmekte ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak $G_{\max}$ değeri elde edilmektedir.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (3-18)$$

ρ = Zeminin kütle yoğunluğu (kg/cm^3) ve V_s = Zeminin kayma dalgası hızıdır (m/s).

Kayma modülü, örselenmemiş numunelerle laboratuvarda odometre, üç eksenli basınç ve rezonant kolon deneyleri ile arazide ise pressiyometre, Marchetti dilatometresi, sismik CPT ve jeofizik ölçümler ile elde edilebilir. Bunun yanında ampirik korelasyonlar kullanılarak CPT ya da SPT deneylerinden de elde edilebilir ancak bu yöntemler çok önerilmez.

Kayma dalgası hızını belirleme amacı ile uygulanan bazı arazi ve laboratuvar deneyleri aşağıda verilmektedir (Demirci, 2012)

Arazi Deneyleri ($10^{-5} < \gamma < 10^{-3}$)

- Sismik Yansıma Yöntemi
- Sismik Kırılma Yöntemi
- Sismik Kuyu Yöntemi
- Karşı Sismik Kuyu Yöntemi
- Karalı Yüzey Dalgası Yöntemi
- Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
- Sismik CPT
- PS – Loglama Yöntemi

Laboratuvar Deneyleri ($10^{-4} < \gamma < 10^{-2}$)

- Düşük deformasyonlu deneyler
- Rezonant kolon deneyi

- Piyezometrik Eğilen Elemanlar Deneyi
- Ultrasonik Sinyal Deneyi

dalgası hızı ile G_o değerleri hesaplanıp, başlangıç Elastisite modülüne geçiş yapılabilir.

G_o ve γ_{07} değerlerinin belirlenebilmesi için literatürde önerilen birçok bağıntı mevcuttur. Hardin ve Black(1969) tarafından aşağıdaki formülasyon önerilmektedir.

$$G_o = \frac{(2.97-e)^2}{1+e} 33 \quad p^{\text{ref}} = 100\text{kPa} \quad (3-19)$$

Ayrıca Öztoprak ve Bolton (2012) tarafından aşağıdaki bağıntı önerilmektedir.

$$G_o = \frac{5760 \cdot p_a}{(1+e)^3} \cdot \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.5} \quad (3-20)$$

Plaxis program manuelinde γ_{07} değerinin aşağıdaki formülasyondan belirlenebileceğini belirtmiştir.

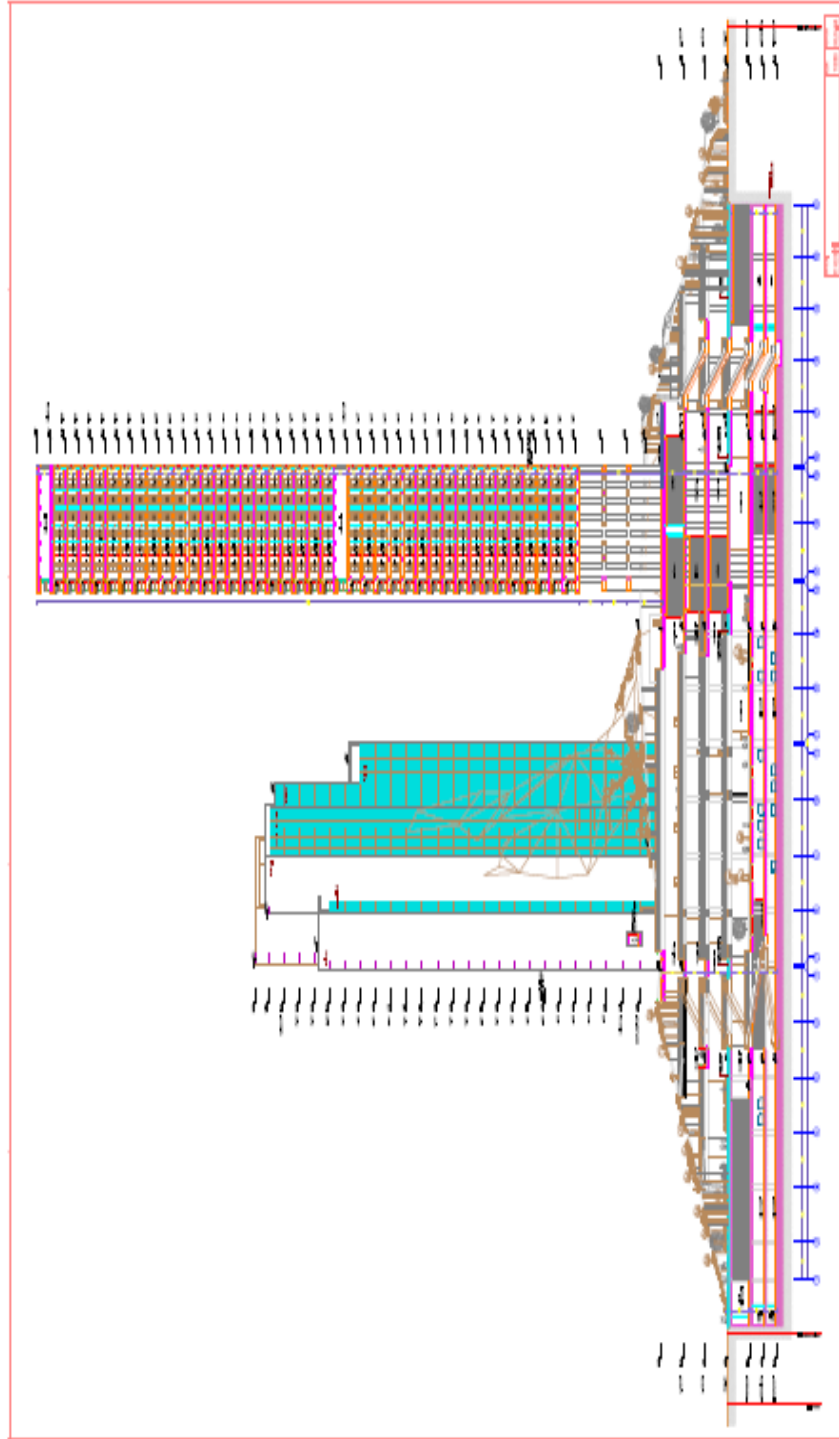
$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_o} [2c'(1 + \cos 2\theta) - \sigma_1'(1 + K_o) \sin 2\theta'] \quad (3-21)$$

3.3. İNCELENEN ÖRNEK PROJE

İzmir İli, Konak İlçesi, Mersinli Mahallesi, 296 Pafta, 3324 Ada, 106 Parsel’de inşası planlanan yapı kompleksi kapsamında inşa edilecek diyafram duvar ve ankraj destekli iksa sistemi örnek olarak incelenmektedir.

İnceleme alanında mevcut yapıların yıkılarak konut, ofis ve alışveriş merkezinden oluşan bir kompleks yapılması planlanmaktadır. İnşası planlanan yapı, 3 bodrum kat(1. bodrum kat çarşı) + zemin kat + 3 çarşı katı + çarşı üstü 3 konut otopark katı + 1 tesisat katı ve bu yapı üzerinde yükselen 22 katlı ve 39 katlı 2 adet ofis/konut bloğundan oluşmaktadır. Söz konusu proje birbirinden ayrılmış bloklar halinde alışveriş merkezi ve kule olarak tasarlanmıştır. Yapı 3 bodrumlu olarak tasarlanmış olup, takribi 10.0m ile 13.0m değişken derinlikte temel kazısı yapılabilmesi amacıyla, destekli bir derin kazı sistemi planlanmıştır. İnceleme alanında karşılaşılan zemin profili ve yer altı suyu seviyesi dikkate alınarak iksa sistemi olarak diyafram duvar ve ön germeli ankrajlı bir sistem tasarlanmıştır.

Şekil 3.28: Yapı vaziyet planı (ölçeksiz).



Şekil 3.29: Yapı tipik kesiti (ölçeksiz).

3.3.1 İnşaat Alanı

Proje alanı İzmir İli, Konak İlçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Ankara asfaltı üzerinde bulunan araziye yılın her mevsiminde ulaşmak mümkündür. İnceleme alanı genel olarak düz olup eğim %0-5'dir. Proje sahasının kuzeyinde Rodkar Binası ve sahaya paralel olarak akan Manda Çayı, doğu cephesinde Ankara Caddesi, güney cephesinde Yeni Asır-Sabah Binası ve güneybatı cephesinde Ozan Abay Caddesi yer almaktadır.

3.3.2 İnceleme Alanında Gerçekleştirilen Zemin Etüd Çalışmaları

Zemin etüd çalışmaları kapsamında derinlikleri 40.0m ile 200.0m arasında değişen toplam onaltı (16) adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj çalışmaları esnasında alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sahada jeolojik çalışmalara ilaveten MASW, DES ve Mikrotremör jeofizik çalışmaları da gerçekleştirilmiş olup, bu ölçüm sonuçları tez kapsamındaki araştırmalarda kullanılmıştır.

2012 yılında söz konusu inceleme alanında sondaj çalışmalarına ilave olarak CPT çalışmaları da gerçekleştirilmiş olup, proje sahasında gerçekleştirilen tüm zemin etüd çalışmaları aşağıdaki tablolarda özetlenmektedir.

Tablo 3.2: CPT özet tablosu.

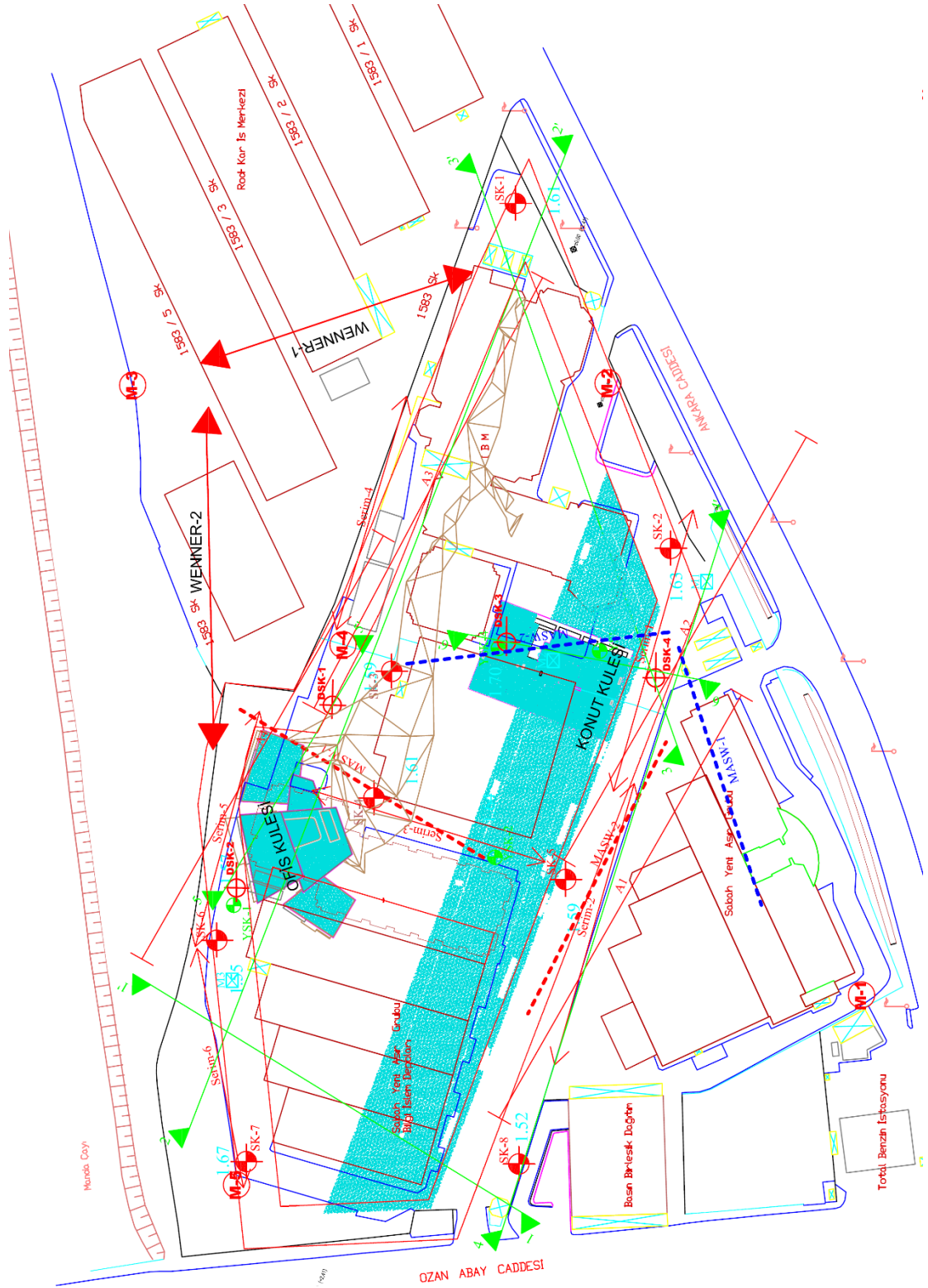
CPT No	Derinlik (m)	Kot (m)	YASS (2012)
CPT-1	20.6	-0.63	3.1
CPT-2	30.5	-0.76	2.9
CPT-3	21.6	-0.44	2.6
CPT-4	20.8	-0.68	2.9
CPT-5	31.0	-0.43	2.6
CPT-6	32.0	-0.86	3.0

Tablo 3.3: Sondaj özet tablosu.

Sondaj No	Derinlik (m)	Kot (m)	YASS (2007)	YASS (2008)	YASS (2010)	YASS (2012)
SK-1	40.0	1.61	6.5	7.2	-	-
SK-2	40.0	1.63	5.2	7.4	-	-
SK-3	40.0	1.59	5.9	4.3	-	-
SK-4	40	1.61	5.8	1.8	-	-
SK-5	41.0	1.59	6.1	7.5	-	-
SK-6	40.0	1.55	6.0	4.6	-	-
SK-7	41.0	1.67	6.1	7.0	-	-
SK-8	40.0	1.52	6.1	7.4	-	-
YSK-1	42.5	1.57	-	5.7	-	-
YSK-2	41.0	1.64	-	6.0	-	-
YSK-3	41.0	1.61	-	7.3	-	-
YSK-4	41.0	1.70	-	2.5	-	-
DSK-1	150.0	1.63	-	-	7.6	-
DSK-2	150.0	1.49	-	-	7.8	-
DSK-3	201.0	1.60	-	-	7.7	-
DSK-4	153.0	1.65	-	-	7.3	-
KSK-1	35.0	-0.61	-	-	-	3.0
KSK-2	35.0	-0.78	-	-	-	2.9
KSK-3	35.0	-0.78	-	-	-	3.0

Tablo 3.4: Jeofizik çalışmalar özet tablosu.

Jeofizik Ölçüm	Adet
Sismik Kırılma	10
Elektrik Rezistivite	6
Mikrotremör	8



Şekil 3.30: Zemin etüdləri yerleşim planı (ölçeksiz).

3.3.3 Zemin Profili

KontROLSÜZ DOLGU

İnceleme alanında yapılan sondajlarda zemin yüzeyinden itibaren 2.5m ila 4.5m arasında değişen derinlikte kahverengi, gri, köşeli-yarı köşeli-yarı yuvarlak, ince-orta-iri taneli çakıllı, ince-orta taneli kumlu, az oranda killi, asfalt, tuğla, beton parçaları içeren kontROLSÜZ dolgu ile karşılaşmıştır.

Kuvaterner Alüvyon

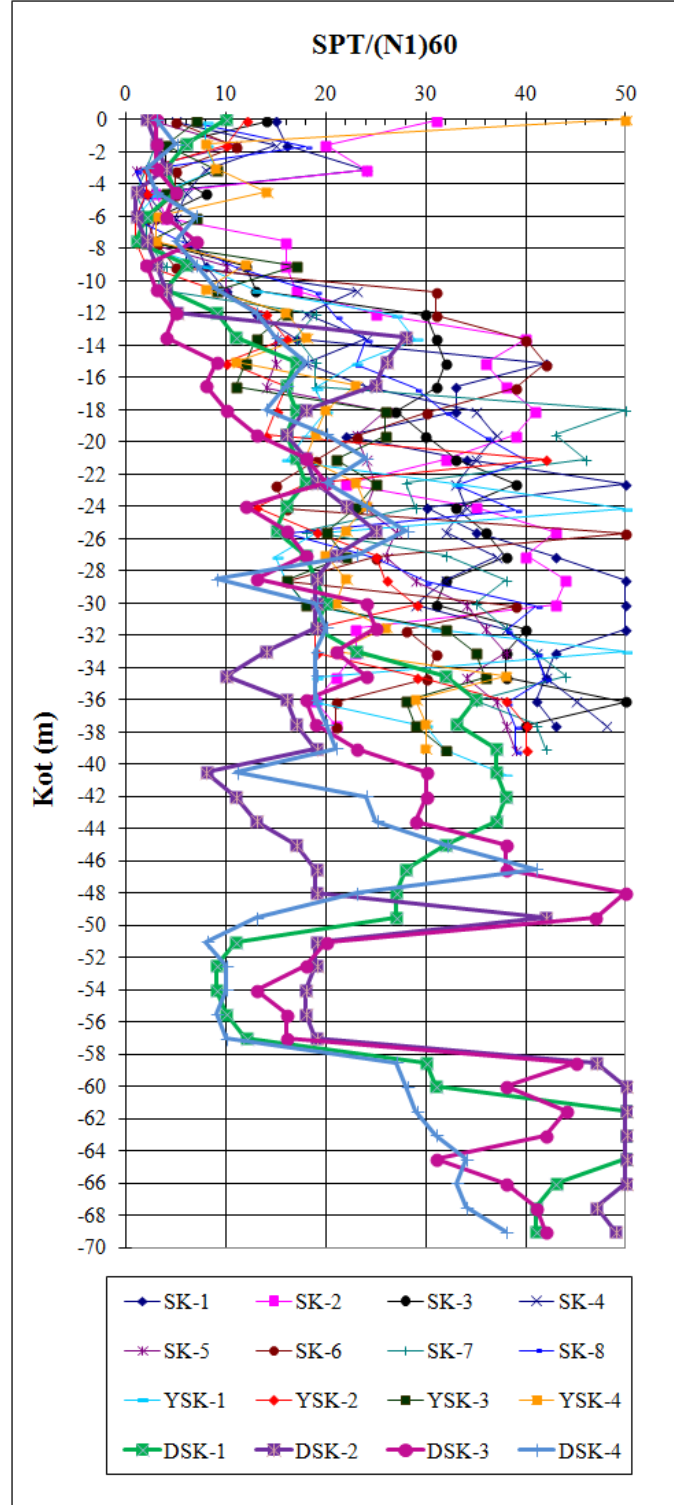
KontROLSÜZ dolgunun hemen altında ise çakıl, kum, silt ve killi ile temsil edilen Kuvaterner yaşlı Alüvyon bulunmaktadır. Kum birimler, gri-kahverengi, ince-orta taneli, yuvarlak-yarı yuvarlak-yarı köşeli, nemli-ıslak, çakıllı, siltli, killi üst seviyelerde çok gevşek-orta sıkı, alt seviyelerde (20.0m'den derinde) sıkı-çok sıkıdır. Silt birimler, gri, nemli-ıslak, orta plastisiteli, çok yumuşak killi, kokusuz, ince taneli kum içeriklidir. Kil birimler ise koyu yeşil-gri-kahverengi, kuru-nemli, kokusuz, ince-iri taneli, yarı yuvarlak çakıllı, ince taneli kumlu, orta-yüksek plastisiteli, üst seviyelerde yumuşak-katı, alt seviyelerde (12.0m'den derinde) çok katı-sert özellik göstermektedirler.

Söz konusu alüvyon birimler içerisinde elde edilen düzeltilmiş $SPT/(N_1)_{60}$ değerlerinin derinlikle değişim grafiği **Şekil 3.31**'de verilmektedir.

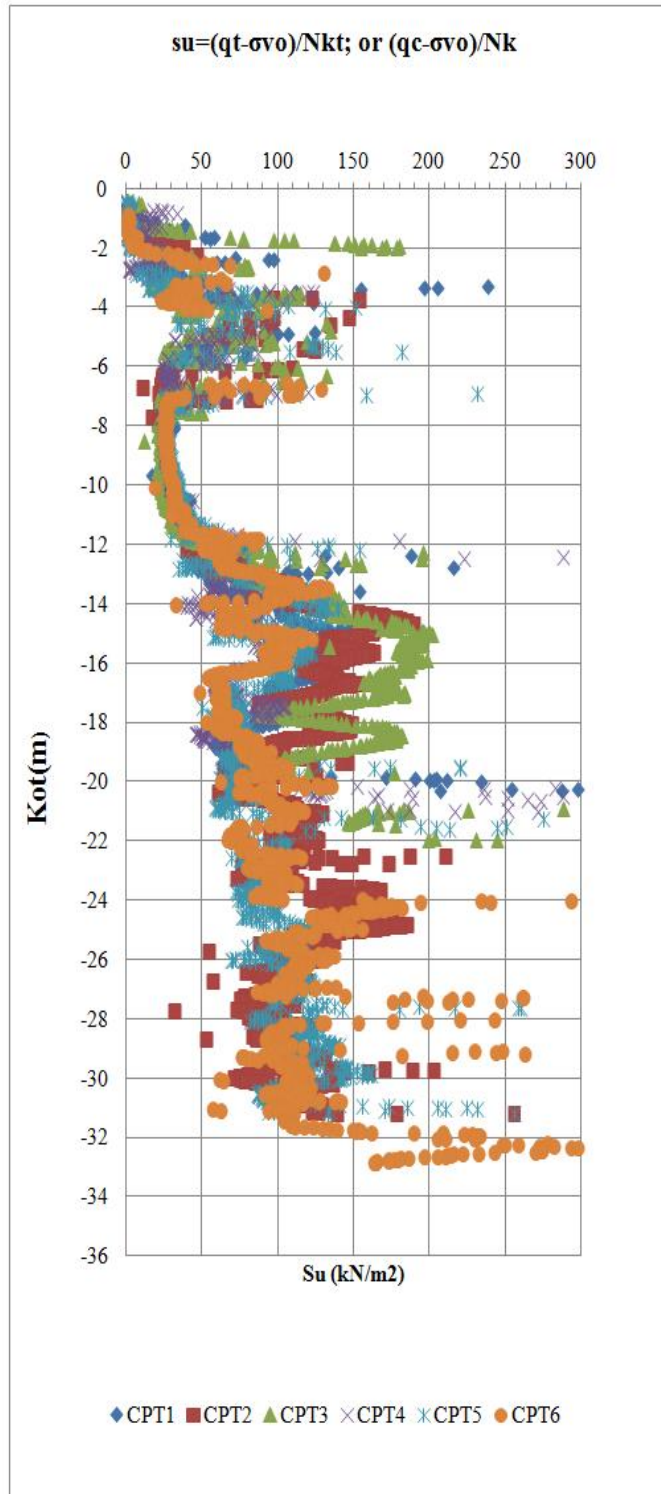
İnceleme alanında farklı dönemlerde zemin etüd çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, yeraltı suyu değişken derinliklerde tespit edilmiştir. Güncel zemin etüd çalışmalarına göre yeraltı suyu seviyesi takribi 3.0m derinlikte yer almaktadır.

Etüdlere esnasında karşılaşılan zeminlerin $SPT/(N_1)_{60}$ değerleri minimum $N=1$ ila maksimum $N=50+$ arasında değişmektedir.

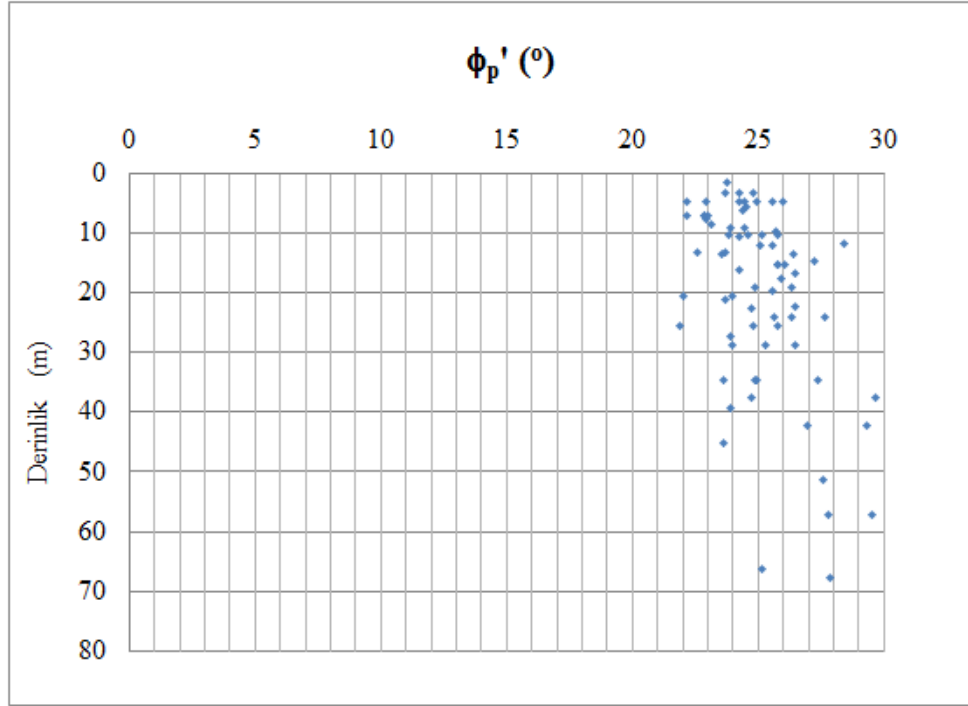
Killi, siltli ve kumlu seviyeler için yapılan laboratuvar deneylerine göre karşılaşılan zeminlerin tabii su muhtevası, plastisite indisleri aşağıda verilen aralıkta değişken olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.31: Düzeltilmiş SPT/(N₁)₆₀ değerlerinin kot ile değişimi.



Şekil 3.32: CPT’den elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin kot ile değişimi.



Şekil 3.33: Zemin kayma mukavemeti açısının derinlik ile değişimi (Mayne, 1980).

İnceleme alanında karşılaşılan ince daneli zeminlerin uzun vadeli kayma mukavemeti parametresi Mayne (1980) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntı yardımıyla belirlenmiş olup derinlik ile değişimi yukarıda verilmektedir.

$$\sin^{-1} \phi = 0.656 - 0.409 \left(\frac{PI}{LL} \right) \quad (\text{Mayne, 1980}) (3-22)$$

Deney sonuçlarına göre elde edilen aralık değerleri aşağıda özetlenmektedir.

Doğal su muhtevası,	wn (%)	= 9-57 (ortalama 31)
Likit Limit,	LL (%)	= 29-81 (ortalama 48)
Plastik Limit,	PL(%)	=14-28(ortalama 20)
Plastisite İndisi,	PI (%)	10-55 (ortalama 28)

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması (USCS) : GP-GM, SP-SM, SW, SM, SC, ML, CL, CI,

Tablo 3.5: Laboratuvar özet tablosu.

Sondaj No	Numune No	Derinlik Depth(m-m)	Su muhtevası W _n (%)	Likit Limit LL (%)	Plastik Limit PL (%)	Plastisite İndisi PI(%)	Üç Eksenli Basınç Deneyi (su)	Sınıflandırma
SK- 1	SPT-1	1.5-1.95	8	NP	NP	NP		GP-GM
SK- 1	SPT-3	3.00-3.45	16	NP	NP	NP		SM
SK- 1	SPT-5	7.50-7.95	48	60	25	35		-
SK- 1	UD-2	10.00-10.50	41	70	24	46		CH
SK- 1	SPT-8	12.00-12.45	33	38	16	22		SC
SK- 1	SPT-10	15.00-15.45	21	31	14	17		CL
SK- 1	SPT-14	21.00-21.45	35	34	16	18		CL
SK- 1	SPT-19	28.50-28.95	14	37	14	23		SC
SK- 1	SPT-23	34.50-34.95	30	49	19	30		CI
SK- 2	SPT-2	3.00-3.45	28	53	20	33		CH
SK- 2	SPT-4	6.00-6.45	52	58	22	36		CH
SK- 2	SPT-9	13.50-13.95	22	41	17	24		CI
SK- 2	SPT-17	25.50-25.95	24	43	16	27		CI
SK- 2	SPT-20	30.00-30.45	28	64	20	44		CH
SK- 2	SPT-26	39.00-39.45	18	NP	NP	NP		SM
SK- 3	SPT-3	4.50-4.95	18	NP	NP	NP		SW
SK- 3	SPT-6	9.00-9.45	55	62	28	34		CH
SK- 3	UD-2	9.50-10.00	28	NP	NP	NP		SM

Tablo 3.6: Laboratuvar özet tablosu (devam).

Sondaj No	Numune No	Derinlik Depth(m-m)	Su muhtevası W _n (%)	Likit Limit LL (%)	Plastik Limit PL (%)	Plastisite İndisi PI(%)	Üç Eksenli Basınç Deneyi (su)	Sınıflandırma
SK- 3	SPT-17	25.50-25.95	24	34	15	19		CL
SK- 3	SPT-21	31.50-31.95	27	40	18	22		CI
SK- 4	SPT-3	4.50-4.95	16	NP	NP	NP		SP-SM
SK- 4	SPT-7	10.50-10.95	37	49	20	29		SC
SK- 4	SPT-11	16.50-16.95	26	50	20	30		CH
SK- 4	SPT-21	31.50-31.95	20	33	16	17		CL
SK- 4	SPT-23	34.50-34.95	25	32	21	11		SC
SK-5	SPT-3	4.50-4.95	47	42	18	24		CI
SK-5	UD-1	5.50-6.00	39	35	15	20		CI
SK-5	SPT-6	9.00-9.45	53	68	28	40		CH
SK-5	UD-2	14.50-15.00	24	44	18	26		CI
SK-5	SPT-15	22.50-22.95	23	35	18	17		CI
SK-5	SPT-19	28.50-28.95	31	55	23	32		CH
SK-5	SPT-24	36.00-36.45	30	37	18	19		CI
SK- 6	SPT-1	1.50-1.95	12	NP	NP	NP		GP-GM
SK- 6	SPT-3	4.50-4.95	23	NP	NP	NP		SM
SK- 6	SPT-7	6.00-6.45	51	66	23	43		CH
SK- 6	UD-2	22.00-22.50	15	29	19	10	26	CL

Tablo 3.7: Laboratuvar özet tablosu (devam).

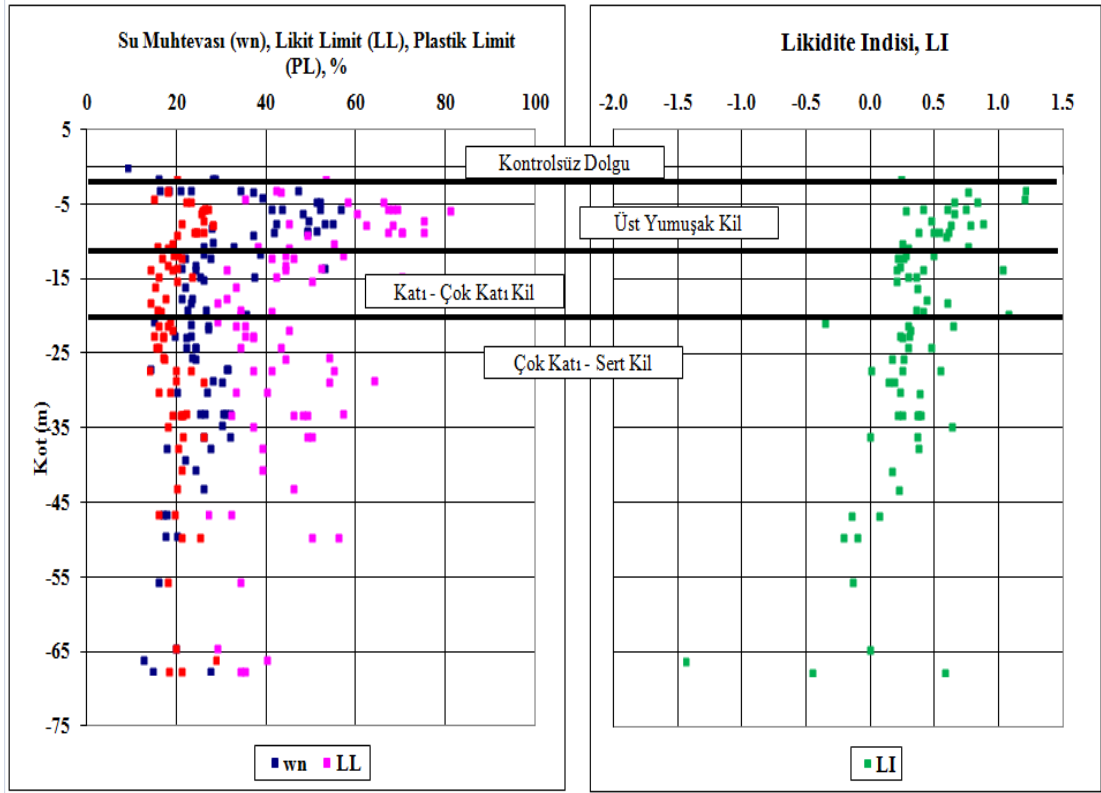
Sondaj No	Numune No	Derinlik Depth(m-m)	Su muhtevası W _n (%)	Likit Limit LL (%)	Plastik Limit PL (%)	Plastisite İndisi PI(%)	Üç Eksenli Basınç Deneyi (su)	Sınıflandırma
SK- 6	SPT-22	33.00-33.45	27	45	19	26		CI
SK- 7	SPT-3	4.50-4.95	34	NP	NP	NP		ML
SK- 7	SPT-6	9.00-9.45	42	45	21	24		CI
SK- 7	UD-2	10.00-10.50	51	67	26	41	28	CH
SK- 7	SPT-10	15.00-15.45	53	52	20	32		CH
SK- 7	SPT-16	24.00-24.45	23	37	17	20		CI
SK- 7	SPT-25	37.50-37.95	26	49	26	23		CI
SK- 8	SPT-3	4.50-4.95	37	43	18	25		CI
SK- 8	SPT-8	12.00-12.45	26	45	18	27		CI
SK- 8	SPT-10	15.00-15.45	24	44	19	25		CI
SK- 8	SPT-16	24.00-24.45	22	37	17	20		CI
SK- 8	SPT-20	30.00-30.45	30	54	26	28		CH
YSK- 1	SPT-3	4.50-4.95	21	NP	NP	NP		SM
YSK- 1	UD-1	7.00-7.50	41	81	26	55	15	CH
YSK- 1	UD-2	8.50-9.00	49	75	26	49	15	CH
YSK- 1	UD-3	13.00-13.50	38	57	20	37	79	CH
YSK- 1	UD-4	16.00-16.50	37	70	23	47	115	CH
YSK- 1	UD-5	20.50-21.00	26	41	16	25	67	CI

Tablo 3.8: Laboratuvar özet tablosu (devam).

Sondaj No	Numune No	Derinlik Depth(m-m)	Su muhtevası W _n (%)	Likit Limit LL (%)	Plastik Limit PL (%)	Plastisite İndisi PI(%)	Üç Eksenli Basınç Deneyi (su)	Sınıflandırma
YSK- 2	SPT-2	3.00-3.45	28	NP	NP	NP		SM
YSK- 2	UD-1	7.00-7.50	57	67	27	40	13	CH
YSK- 2	UD-2	11.50-12.00	28	55	19	36	75	CH
YSK- 2	UD-3	19.00-19.50	23	31	17	14	50	CL
YSK- 2	SPT-16	24.00-24.45	20	35	15	20		CI
YSK- 2	SPT-23	34.50-34.95	26	46	21	25		SC
YSK- 3	SPT-1	1.50-1.95	9	NP	NP	NP		GP-GM
YSK- 3	UD-1	7.00-7.50	52	69	26	43	32	CH
YSK- 3	UD-2	10.00-10.50	49	70	25	45	47	CH
YSK- 3	UD-3	13.00-13.50	26	44	19	25	91	CI
YSK- 3	UD-4	16.00-16.50	25	42	16	26	100	CI
YSK- 3	UD-5	19.00-19.50	21	NP	NP	NP	48	ML
YSK- 3	SPT-19	28.50-28.95	31	41	20	21		CI
YSK- 3	SPT-23	34.50-34.95	32	48	21	27		CI
YSK- 3	SPT-26	39.00-39.45	27	39	20	19		CI
YSK- 4	UD-1	7.00-7.50	43	68	26	42	31	CH
YSK- 4	UD-2	10.00-10.50	49	75	24	51	30	CH
YSK- 4	UD-3	17.50-18.00	22	33	15	18	70	CL

Tablo 3.9: Laboratuvar özet tablosu (devam).

Sondaj No	Numune No	Derinlik Depth(m-m)	Su muhtevası W _n (%)	Likit Limit LL (%)	Plastik Limit PL (%)	Plastisite İndisi PI(%)	Üç Eksenli Basınç Deneyi (su)	Sınıflandırma
DSK- 1	SPT-23	34.50-34.95	31	57	22	35		CH
DSK- 1	SPT-25	37.50-37.95	32	50	21	29		CH
DSK- 1	SPT-32	48.00 - 48.45	18	32	19	13		CL
DSK- 1	SPT-38	57.00 - 57.45	20	NP	NP	NP		SM
DSK- 1	SPT-46	69.00 - 69.45	27	34	18	16		CL
DSK- 2	SPT-28	42.00 - 42.45	14	NP	NP	NP		SM
DSK- 2	SPT-34	51.00 - 51.45	20	50	25	25		CH
DSK- 2	SPT-44	67.50 - 67.95	13	40	29	11		MI
DSK- 3	SPT-28	42.00 - 42.45	24	39	21	18		CI
DSK- 3	SPT-32	48.00 - 48.45	17	27	16	11		CL
DSK- 3	SPT-44	66.00 - 66.45	20	29	20	9		SC
DSK- 3	UD-2	44.50 - 45.00	26	46	20	26		CI
DSK- 4	SPT-28	42.00 - 42.45	17	NP	NP	NP		SM
DSK- 4	SPT-30	45.00 - 45.45	18	NP	NP	NP		SM
DSK- 4	SPT-34	51.00 - 51.45	17	56	21	35		CH
DSK- 4	SPT-38	57.00 - 57.45	16	34	18	16		CL
DSK- 4	SPT-46	69.00 - 69.45	15	35	21	14		CI



Şekil 3.34: Atterberg limitleri ile likidite indisinin kot ile değişimi.

Mekanik Özellikler:

Drenajsız Kayma Mukavemeti, su

c_u (kN/m²)=13-115 (ortalama 54)

Doğal Birim Hacim Ağırlık,

γ_n (t/m³)=1.68-2.27 (ortalama 1.97)

Konsolidasyon

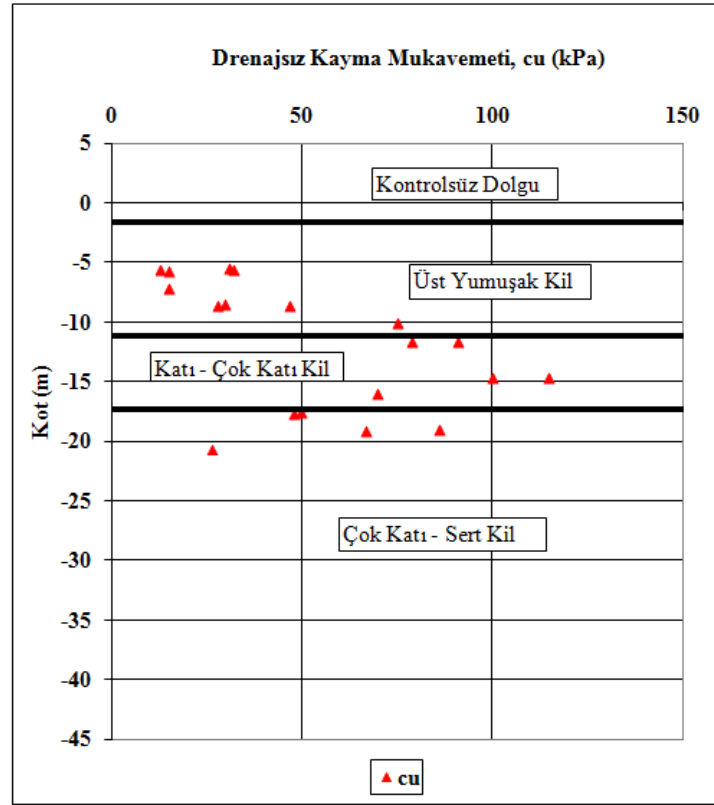
$C_c = 0.028-0.454$

$C_r = 0.009-0.097$

P_0 (kN/m²) = 65-100

$e_o = 0.43-1.51$

OCR=0.3-0.9



Şekil 3.35: Drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin kot ile değişimi.

3.3.4 Jeofizik Ölçüm Sonuçları

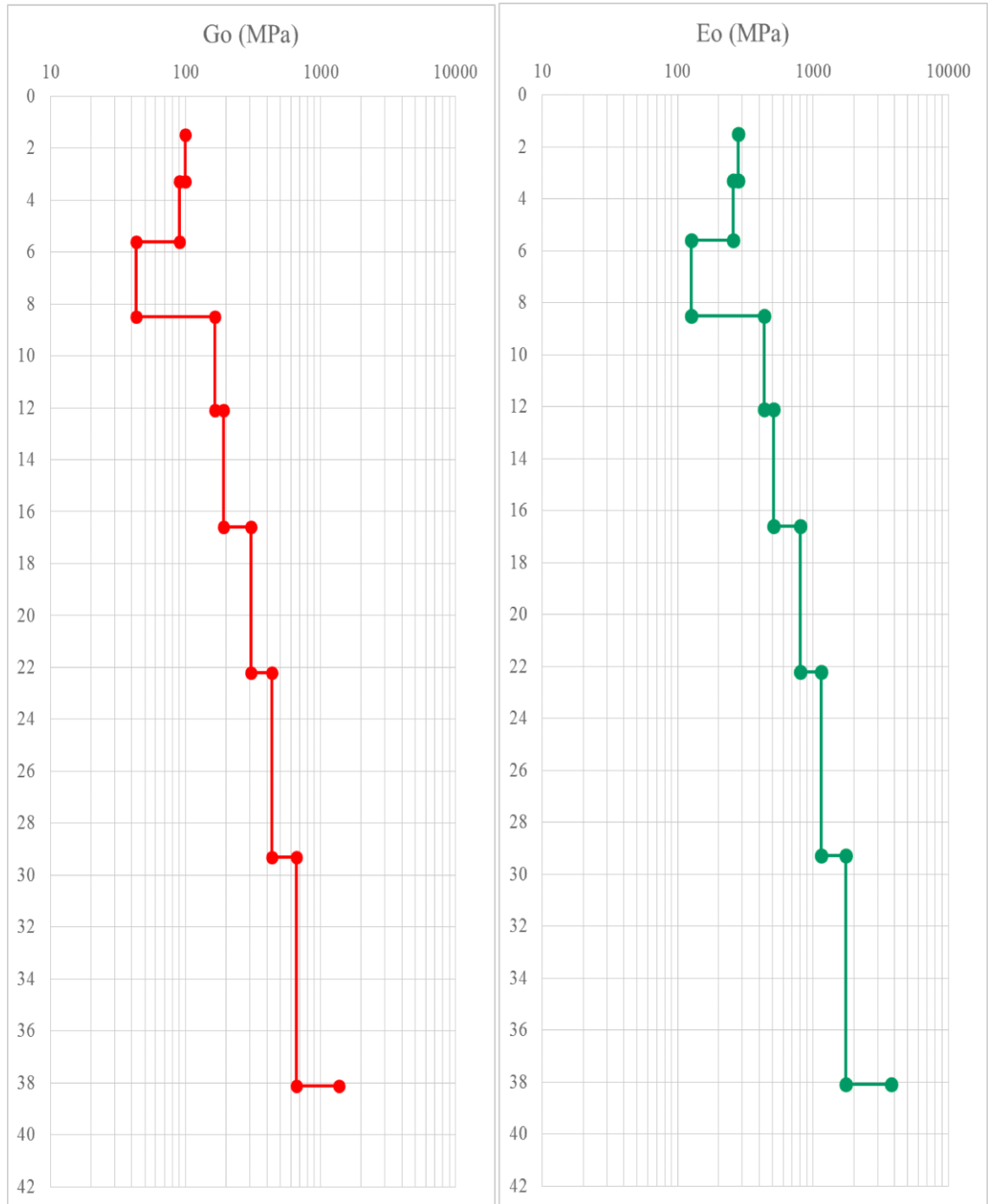
İnceleme alanındaki sismik dalga hızlarını ve bu hızlara bağlı dinamik parametreleri belirlemek amacıyla 10 farklı noktada aktif kaynak MASW etütleri yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında dikkate alınan kesitin yer aldığı bölgeye yakın olarak gerçekleştirilen MASW ölçüm sonuçları aşağıda Tablo 3.10' da ve Şekil 3.36' de verilmiştir.

Tablo 3.10: Jeofizik sonuçları özet tablosu.

Katman No	V _p (m/sn)	V _s (m/sn)	Katman Kalınlığı (m)	İnceleme Derinliği (m)	Yoğunluk (kN/m ³)	Poisson Oranı Birimsiz	Kayma Modülü (mPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Bulk Modülü (MPa)
1	634	253	1,5	1,5	15,6	0,41	99,9	281	492
2	634	241	1,8	3,3	15,6	0,42	90,2	255	505
3	634	166	2,3	5,6	15,6	0,46	42,9	126	568
4	634	166	2,9	8,5	15,6	0,46	42,9	126	568
5	634	326	3,6	12,1	15,6	0,32	165,3	436	404
6	683	348	4,5	16,6	15,8	0,32	191,9	509	483
7	830	427	5,6	22,2	16,6	0,32	303,4	801	741
8	975	501	7,0	29,3	17,3	0,32	434,8	1149	1067
9	1175	605	8,8	38,1	18,1	0,32	664,3	1754	1620
10	1927	816	-	-	20,5	0,39	1367,6	3805	5803

3.3.6 Planlanan İksa Sistemi

Arazinin şehir içerisindeki konumu ve inceleme alanı zemin profili ile yer altı suyu seviyesi dikkate alındığında temel kazılarının iksa tedbiri ile yapılması söz konusu olmuştur. İnşa edilecek iksa sistemi saha/yol kotları ile mevcut yapı yerleşimleri dikkate alındığında, çevrede mevcut binaların ve altyapının (yol, su kanalizasyon, doğalgaz, PTT vb.) konuma göre projelendirilmiştir. Yeraltı suyu seviyesinin çok yüksek olması ve takribi ilk 12.0m derinlik içerisinde karşılaşılan zeminlerin yumuşak-orta katı kil, gevşek kum olması sebebiyle iksa sistemi geçirimsiz perde sağlayacak diyafram duvar şeklinde teşkil edilmiştir. İksa sisteminin yatay stabilitesini sağlamak üzere sistem öngermeli ankrajlarla desteklenmiştir. Ayrıca kazı nedeniyle meydana gelecek taban kabarmasını önleme amaçlı kazının takribi 10.5m seviyelerine geldiği aşamada 1.5m ara mesafelerle 4 adet jet-grout kolon uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3.36: Kayma modülü ve Elastisite modülü değerlerinin derinlik ile değişimi.

3.3.7 Analiz Metodu

Derin kazı çevresinde meydana gelen deplasmanların ileriye ve geriye doğru analizlerinin incelendiği bu çalışmada Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Geri analiz çalışmaları esnasında temel olarak pekleşen zemin bünye modeli kullanılmış, bunun yanı sıra küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli ve Mohr Coulomb zemin bünye modeli ile de deformasyonlar ayrıca irdelenmiştir. Kazı tabanında meydana gelen kabarmayı önlemek amacıyla teşkil edilen jet grout kolonlar için ise Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Geri analiz çalışmaları, sahadaki kazı çalışmalarının uzun sürede gerçekleşmesi sebebiyle efektif parametrelerle drenajlı olarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.8 Aletsel Gözlem Çalışmaları

Söz konusu proje kapsamında, yapının önemi ve çevre koşulları göz önünde bulundurularak, yapıların gerçek davranışını izlemek, mevcut yönetmelikleri iyileştirmek, deprem kayıtlarını tutmak ve büyük bir deprem sonrasında yapıda hasar olup olmadığını kısa sürede tahmin edebilmek amacı ile planlanan yapı, komşu yapı ve yollara yerleştirilen aletsel gözlem ekipmanları ile yapı izleme programı doğrultusunda uzun süreli performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Aletsel gözlem çalışmaları kapsamında yerleştirilen ekipmanlar aşağıda Tablo 3.11’ de özetlenmektedir.

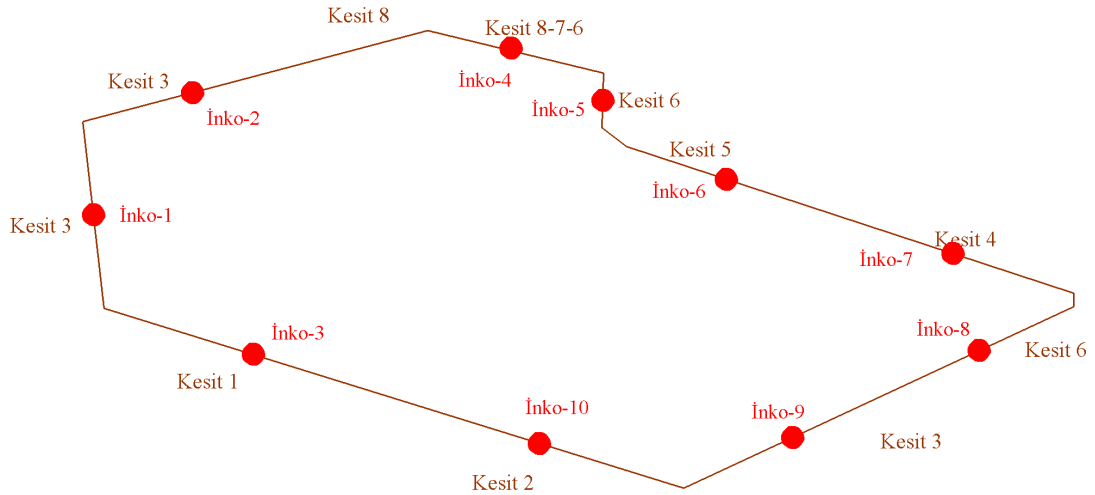
Tablo 3.11: Aletsel gözlem ekipmanları özet tablosu.

Aletsel Gözlem Enstrümanı	Gözlem Türü	Adet
İnclinometre	İksa Yatay Deplasmanları	10
Reflektör	İksa plan doğrultusunda (x-y eksenleri) deplasmanları	16
Yük Hücresi	Ankraj Yükleri Değişimi	5
Tiltmetre	Komşu Yapılarda Oluşan Dönmeler	6
Ekstansometre	İksa zemin hareketi-genel stabilite	4
Oturma Plakası	İksa düşey doğrultuda (z eksen) deplasmanı	25

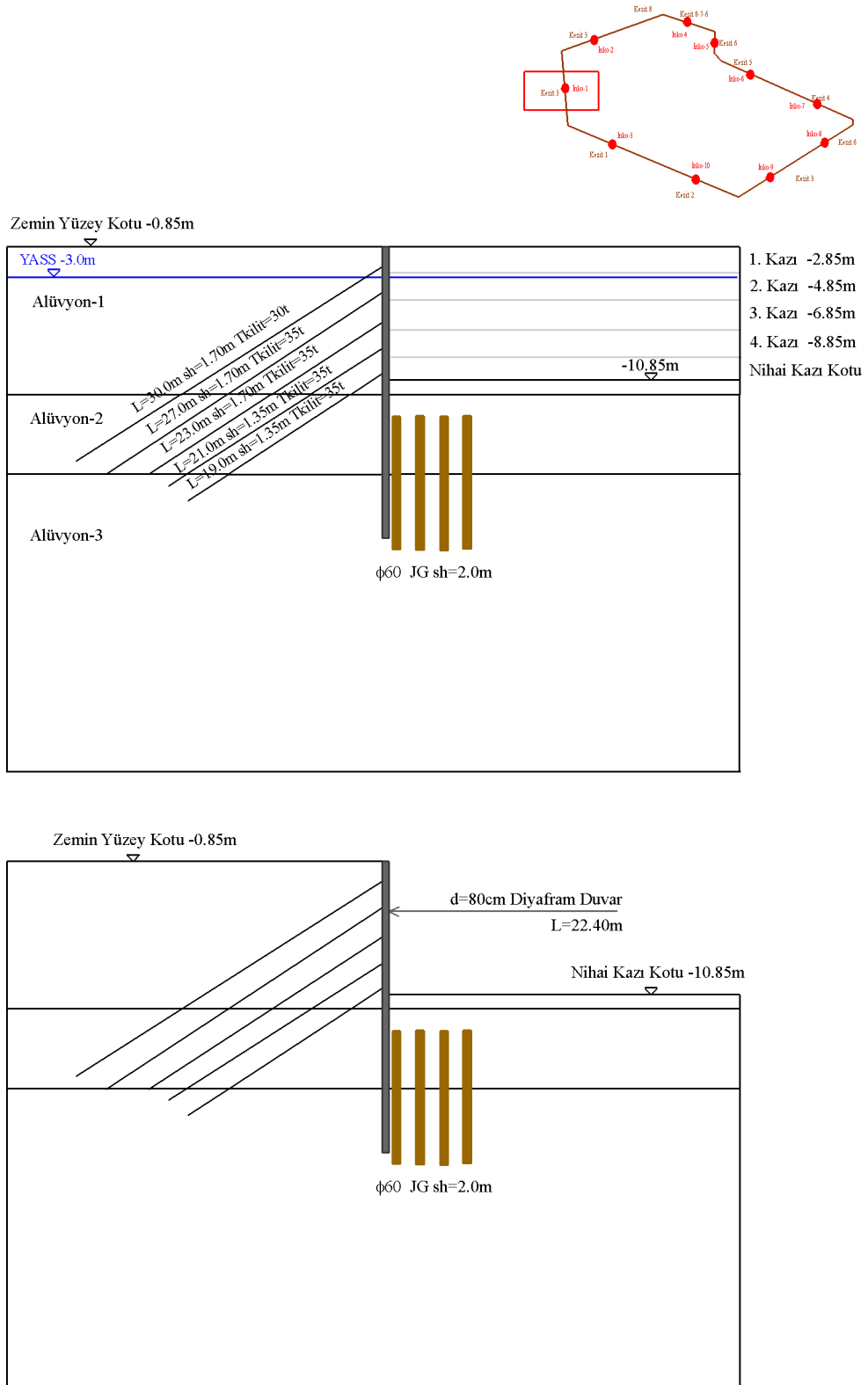
4. BULGULAR

Bölüm 3.3’ te tanımlanan proje alanında yer alan iksa sistemi deformasyonları ileriye ve geriye dönük analizlerle incelenmiştir. Bu incelemeler kapsamında proje dâhilindeki Kesit-3 incelenmiştir. Bu kesit Ozan Abay Caddesi, Ankara Caddesi ve Manda Çayının bulunduğu cephelerden alınmıştır. İksa üst kotu -0.85m (mimari), nihai kazı kotu -10.85m (mimari) olup, iksa yüksekliği 22.40m’ dir. Su seviyesinin -3.0m’ de olduğu olduğu dikkate alınmış olup sistem 80 cm kalınlığında diyafram duvar ve 5 sıra öngermeli ankraj ile desteklenmiştir. Ankraj ara mesafeleri yatayda 1.70m ila 1.35m arasında değişmekte olup, düşeyde 2.50m ara mesafelidir (Bknz Şekil 4.2) .

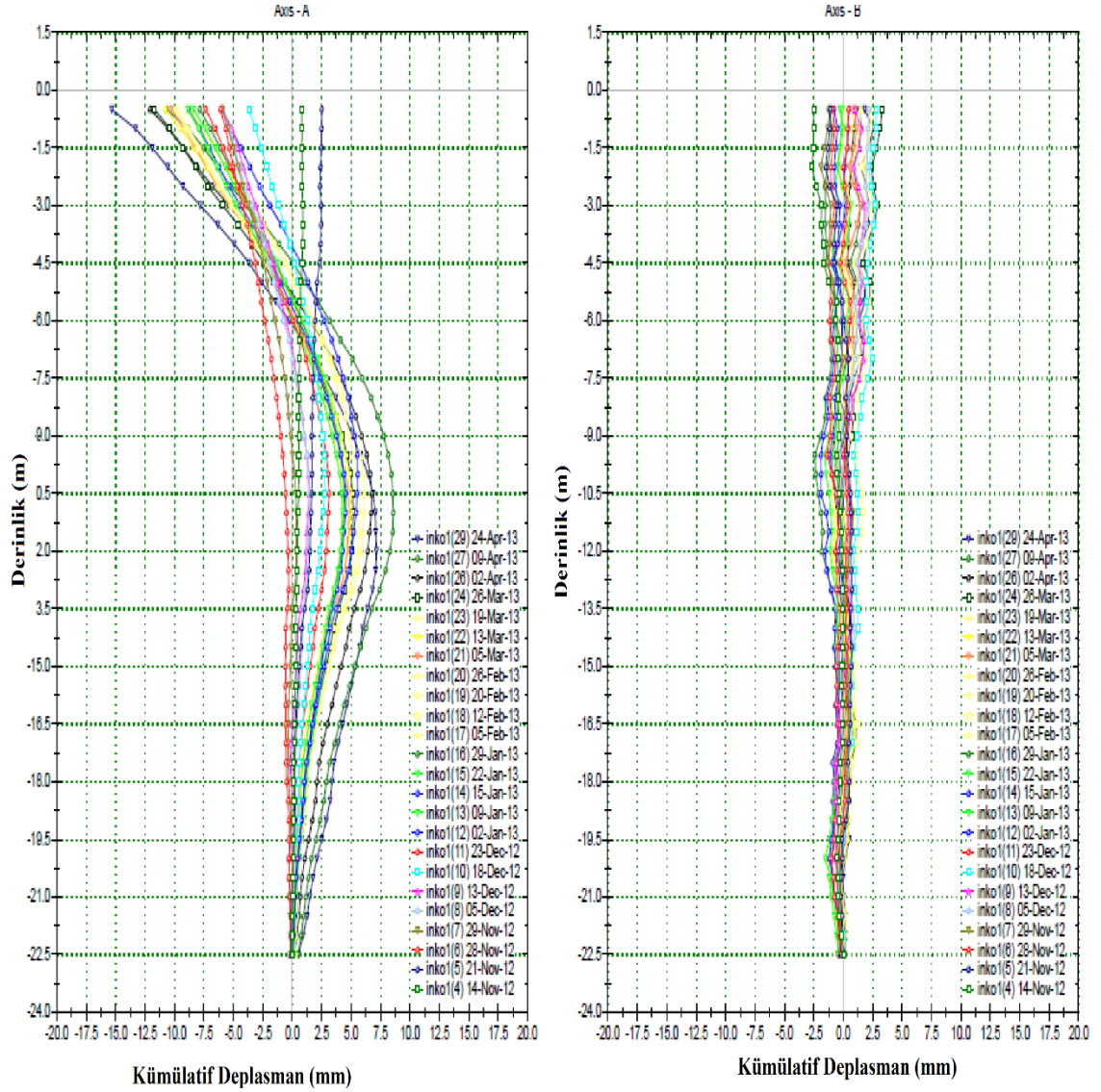
İnceleme kesitinin bulunduğu bölgede İsko-1 nolu aletsel gözlem ekipmanı yer almaktadır. İsko-1 aletsel gözlem ekipmanından kazı çalışmaları süresince edinilen deformasyon verileri Şekil 4.3’ de verilmektedir.



Şekil 4.1: İksa ve aletsel gözlem ekipman yerleşim planı.



Şekil 4.2: Kesit 3-3 iksa kesiti model geometrisi.



Şekil 4.3: Kesit 3-3 bölgesinden ölçüm alan 1 no' lu inklinometre.

4.1. Derin Kazı Sisteminde Deformasyonları Etkileyen Parametreler Üzerine Nümerik Analiz

Kesit-3 geometrisi hassas bir şekilde Plaxis programında modellenmiştir. Gerçekleştirilen analizler esnasında Bölüm 3.3.3' te sunulan zemin verileri ışığında zemin parametreleri tayin edilmiş ve bu parametreler iksa sistemindeki deformasyonları elde etmek amacıyla referans parametre olarak kabul edilmiştir. Bölüm 3.3' te verilen bilgiler arasında görüldüğü zeminin rijitlik ya da mukavemet özelliklerine ilişkin değerler yer almamaktadır. Parametrelerin tayininde zemin kayma mukavemeti açısı, Bölüm 3.2.2.1' de önerilen bağıntılardan belirlenmiş, zeminin rijitliği ise SPT verileri dikkate alınarak öngörülmüştür.

Tablo 4.1: Ankraj öngerme kuvvetleri.

Ankraj No	Yatay Ara Mesafe (m)	Ankraj Öngerme Kuvveri (ton)
1	1.70	30
2	1.70	35
3	1.70	35
4	1.35	35
5	1.35	35

Tablo 4.2: Plaka ve ankraj elemanlara ait parametreler.

Parametre	Diyafram duvar (D=0.8 m; s=1.2m)	6/3 ankraj kablosu (a=1.35 – 1.70 m)	Ankraj kökü a=1.35 m	Ankraj kökü a=1.70 m
EA (kN/m)	24,000,000	109,400	196,500	156,100
EI (kN/m ² /m)	128,000	-	-	-
w (kN/m/m)	6.0	-	-	-
v	0.2	-	-	-

Tablo 4.3: Jetgrout kolonlar için kullanılan parametreler.

Parametre	Jet-grout kolonu
Malzeme modeli	MC
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	19,5
Başlangıç boşluk oranı, eini	0.4
Permeabilite katsayısı, k (m/gün)	-
Elastisite modülü, E (kPa)	2,500,000
Poisson oranı, ν	0.2
Kohezyon, c (kPa)	2,000
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	10

Tablo 4.4: Referans zemin parametreleri.

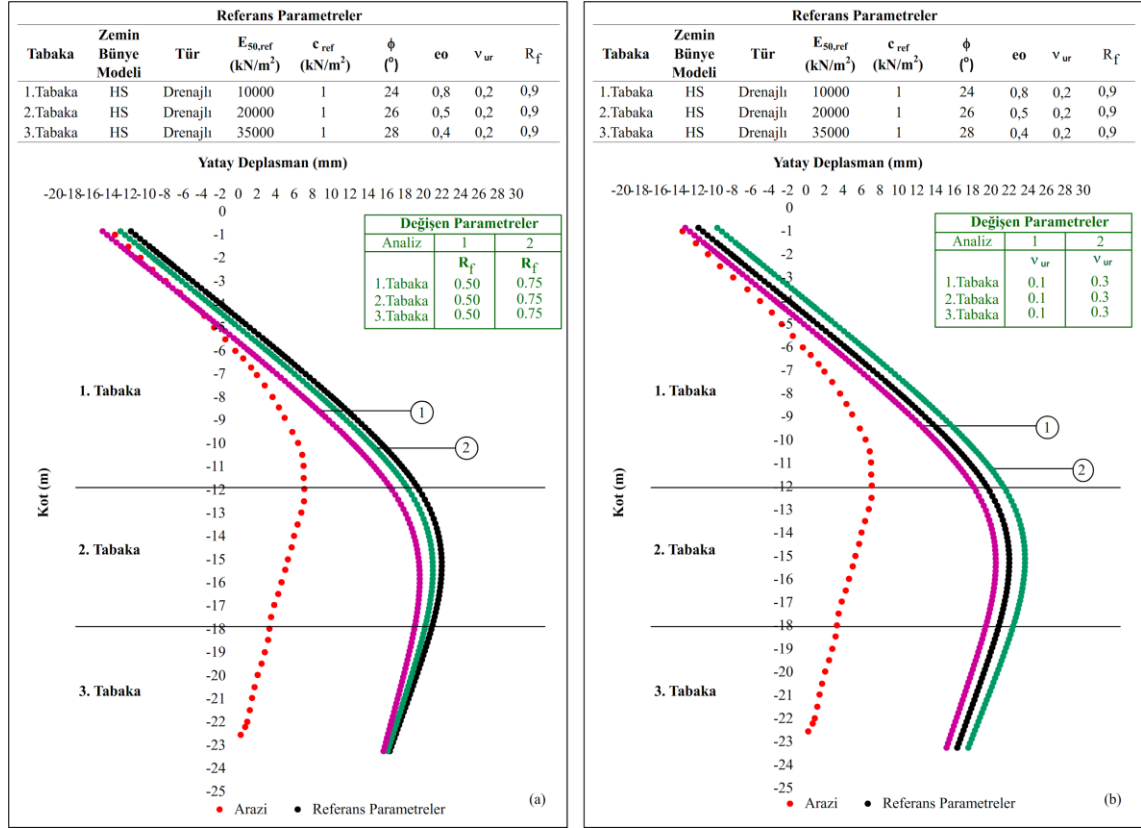
Parametre	Alüvyon-1	Alüvyon-2	Alüvyon-3
Malzeme modeli	HS	HS	HS
Malzeme tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Birim hacim ağırlık, γ_n / γ_{sat} (kN/m ³)	18 / 19.5	17 / 19	21 / 22
Başlangıç boşluk oranı, e_{ini}	0.8	0.5	0.4
Permeabilite katsayısı, k (m/gün)	0.1	0.1	0.05
Arayüzey (interface) yük azaltma oranı	0.9	0.9	0.9
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	10,000	20,000	35,000
Sıkışma referans modülü, E_{oed}^{ref} (kPa)	10,000	20,000	35,000
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	30,000	60,000	105,000
Kohezyon, c (kPa)	1	1	1
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	24	26	28

Geri analiz çalışmalarında model geometrisi, kazı aşamaları, yeraltı suyu durumu gibi birçok faktörün deformasyonları etkilediği bilinmektedir. Bu aşamada gerçekteki uygulamaya uygun şekilde yapılan modellemeler sonucu deformasyonları etkileyen diğer faktörler ayrı ayrı ele alınmıştır. Geri analiz çalışmaları öncesinde her bir parametrenin deformasyon eğrisi formuna ve deformasyon miktarı üzerine etkisi ayrı ayrı irdelenmiş daha sonra geri analiz çalışmaları tamamlanmıştır. Zemin etüd çalışmaları verilerine dayanarak, zeminin üç farklı zemin tabakasından oluştuğu kabulü ile yola çıkılmıştır. Analizlerde Pekleşmeli Zemin Bünye Modeli parametreleri kullanılmıştır.

4.1.1. Rf, vur, Etkisi

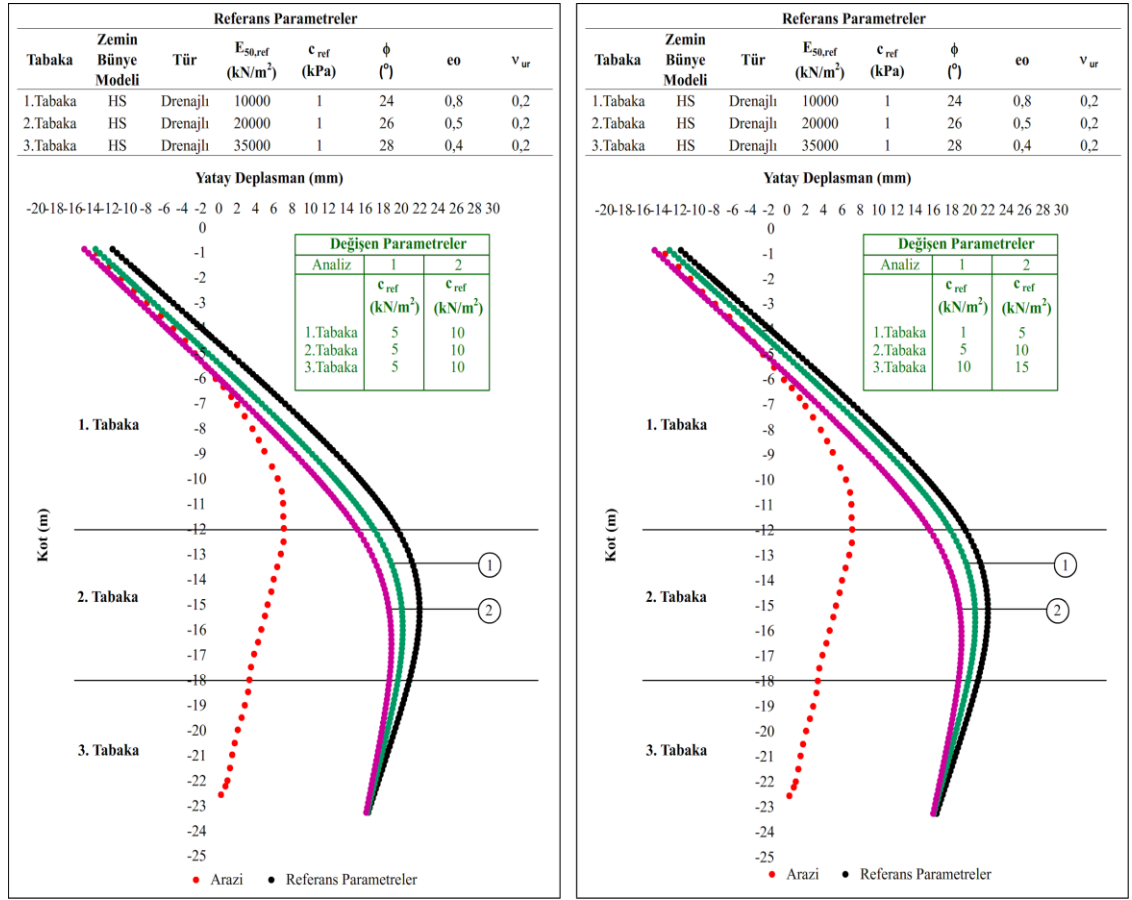
İksa sisteminde meydana gelen yanal deformasyonlar üzerinde poisson oranı ve Rf parametresinin etkileri ayrı ayrı irdelenmiş olup ilgili grafikler Şekil 4.4.a ve Şekil

4.4.b’de sunulmaktadır. Söz konusu grafiklerden görüldüğü üzere bu iki parametrenin deformasyonlar üzerinde yok denecek kadar az bir etkisi vardır.



4.1.2. Zeminin Kohezyon (c) Değerinin Etkisi

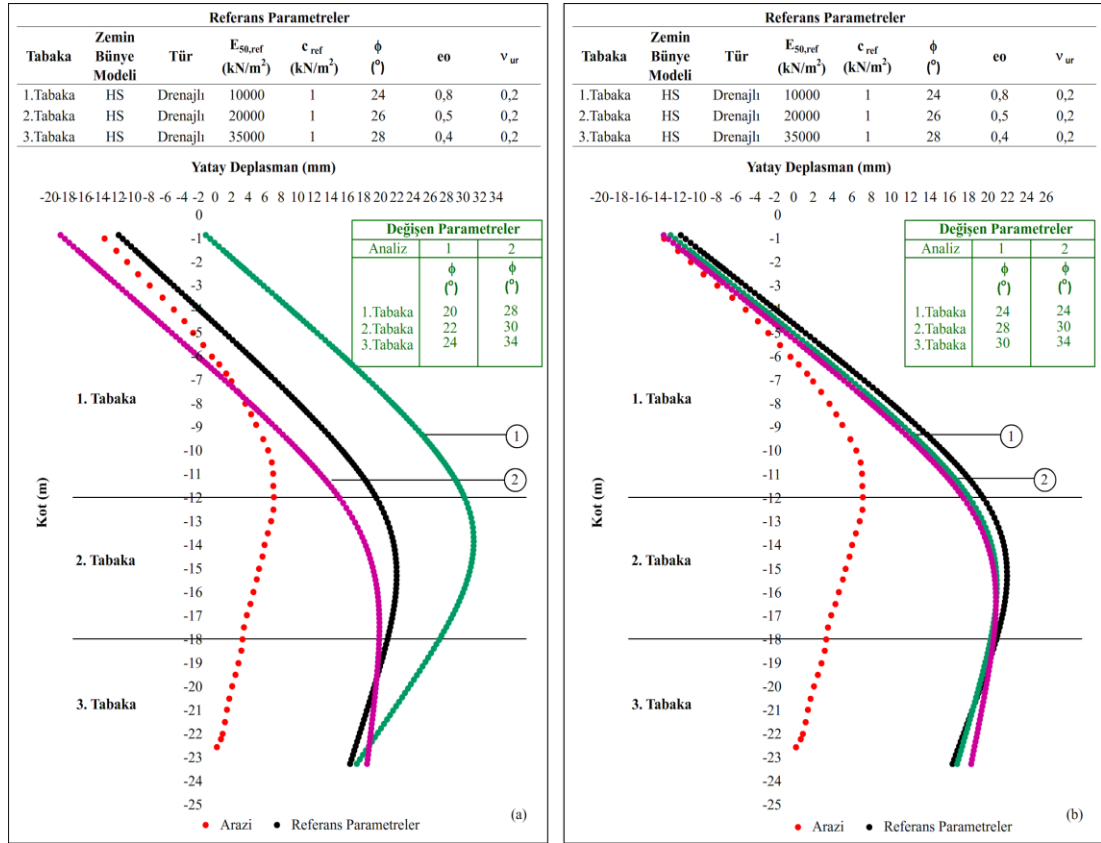
İksa sisteminde meydana gelen yanıl deformasyonlar üzerinde zemin kohezyon parametresinin irdelenmesi amacıyla farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlere göre kohezyon parametresinin iksa sisteminde meydana gelen yanıl deformasyonlar üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.5: Kohezyon (c) parametresinin yanıl deformasyonlara etkisi.

4.1.3. Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ°) Değerinin Etkisi

İksa sisteminde meydana gelen yanıl deformasyonlar üzerinde zemin kayma mukavemeti açısı parametresinin irdelenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6.a grafiği, kayma mukavemeti açısının referans parametrelere göre arttırılmış ve azaltılmış halinin kullanılmasıyla elde edilen deformasyon eğrilerini vermektedir. Şekil 4.6.b ise ilk tabakaya ait kayma mukavemeti açısı değerinin sabit tutulup, diğer iki tabakada farklı kayma mukavemeti açılarının olması durumunda elde edilen deformasyon eğrilerini göstermektedir.

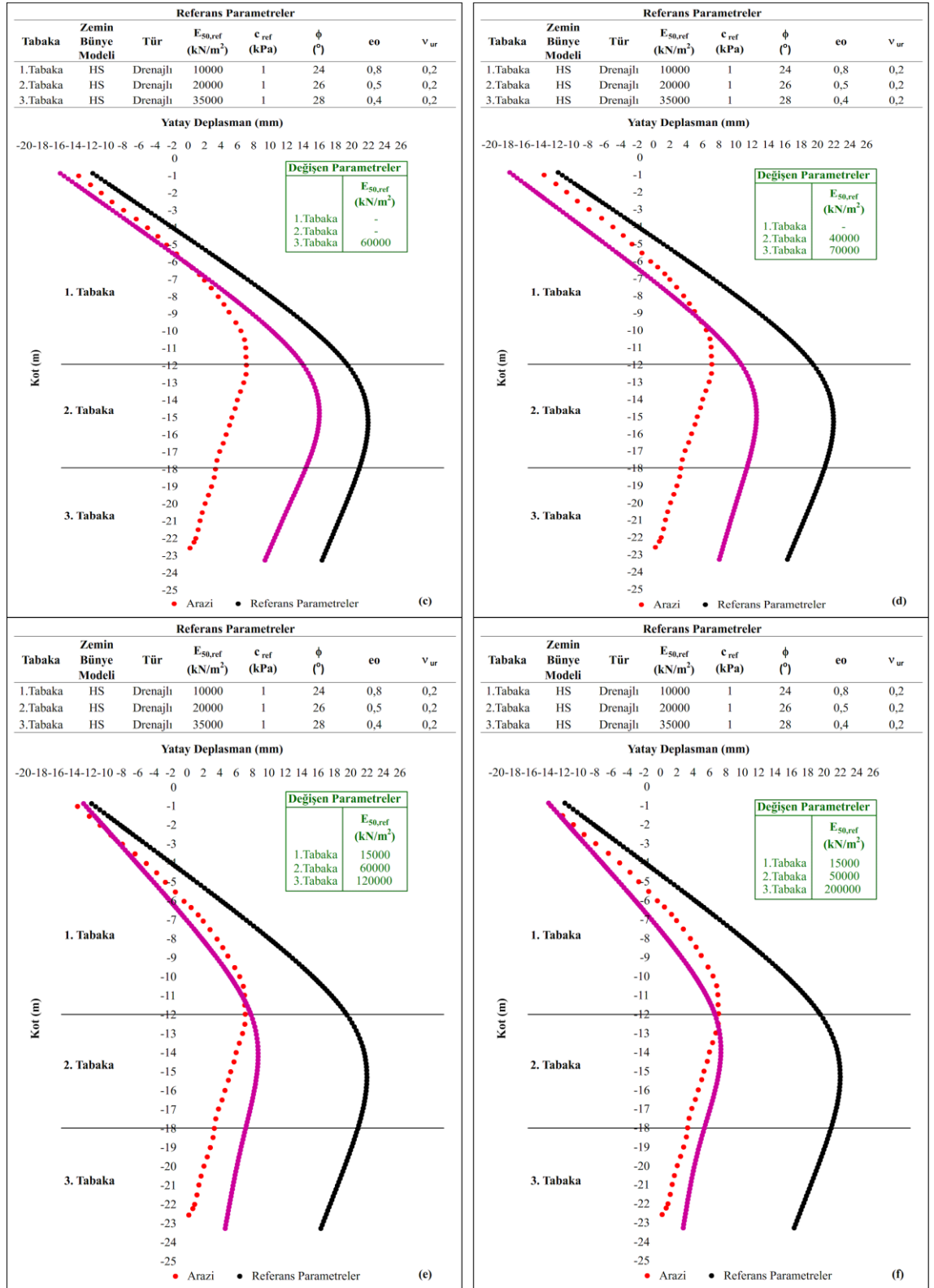


Şekil 4.6: Kayma mukavemeti açısı (ϕ°) parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.

Şekilden görüldüğü üzere zemin kayma mukavemeti açısının arttırılması ve azaltılmasının iksa sisteminde meydana gelecek yanal deformasyonlar üzerinde etkisi yüksektir. Zemin kayma mukavemeti açısının artışı ile deformasyonlar azalmakta, azalışı ile ise deformasyonlar artmaktadır.

4.1.4. Sekant Elastisite Modülü Etkisi

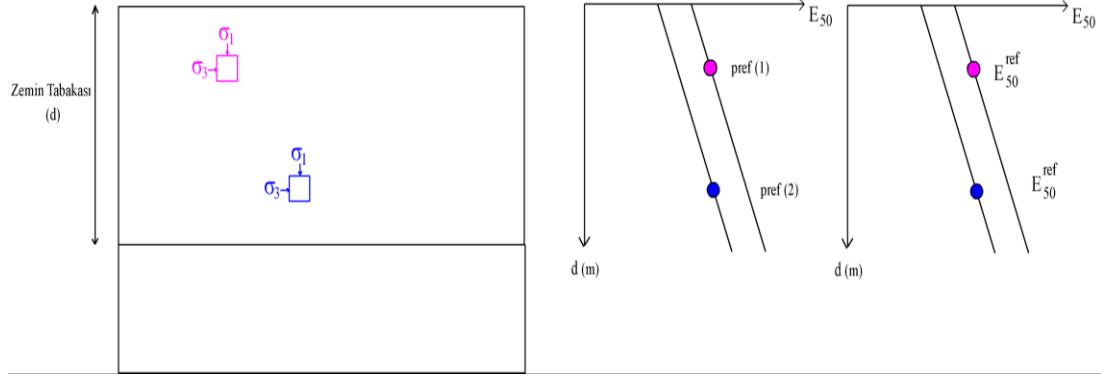
İksa sisteminde meydana gelen yanal deformasyonlar üzerinde deformasyon modüllerinin etkisinin irdelenmesi amacıyla birbirinden farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde modül etkisinin fazla olduğu görülmüş ve bu nedenler farklı alternatiflerle incelenmiştir. Grafik gösterimlerinde arazi eğrisi, referans parametreler baz alınarak elde edilen deformasyon eğrisi ve yalnızca modül değerleri değiştirilerek elde edilen deformasyon eğrisine yer verilmiştir. Takip eden grafiklerde tabakalara göre değişen modül durumunda deformasyon eğrisinin değişimi verilmektedir.



Şekil 4.7: Sekant elastisite modülü parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.

4.1.5. Pref Etkisi

Pref plaxis program manuelinde default olarak 100kpa önerilen basınç değeridir. Manuelde çok fazla detay bulunmayan P_{ref} parametresinin pekleşen zemin bünye modeli ile yapılan analizlerdeki deformasyonlara etkisi irdelenmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmektedir.

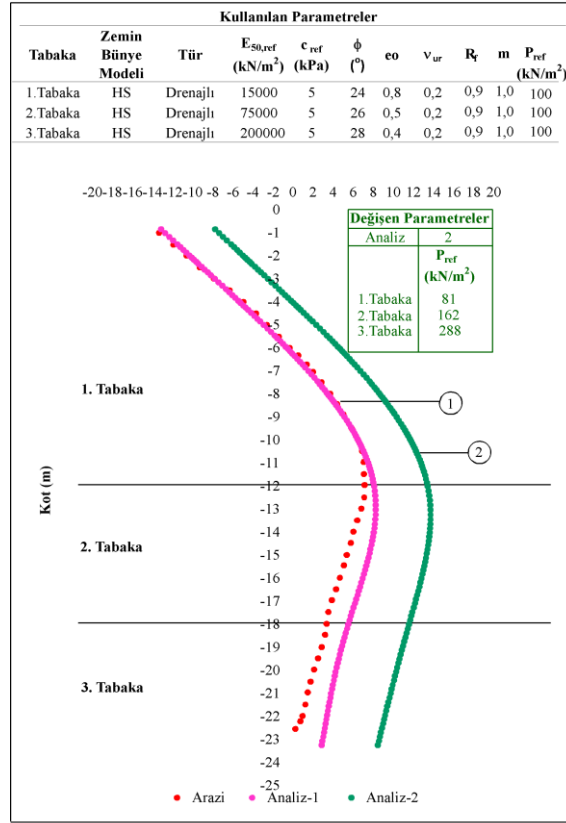


Şekil 4.8: Pref ve Sekant rijitliği parametrelerinin derinlik ile değişimi.

P_{ref} parametresi Plaxis programında bir referans basınç parametresi olup, programda default $P_{ref} = 100 \text{ kPa}$ olarak önerilmektedir. Programda rijitlik parametreleri bu referans basınç değerine göre belirlenmekte olup aşağıdaki eşitlikler önerilmektedir. Program tarafından önerilen bu default değer ile analiz yapılmış olup, P_{ref} değerlerinin her bir zemin tabakasının orta noktasındaki efektif gerilmeye eşit olması durumundaki deformasyonlar ayrıca irdelenmiştir. Analizler sonucu P_{ref} parametresinin de deformasyonlar üzerinde bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (4-1)$$

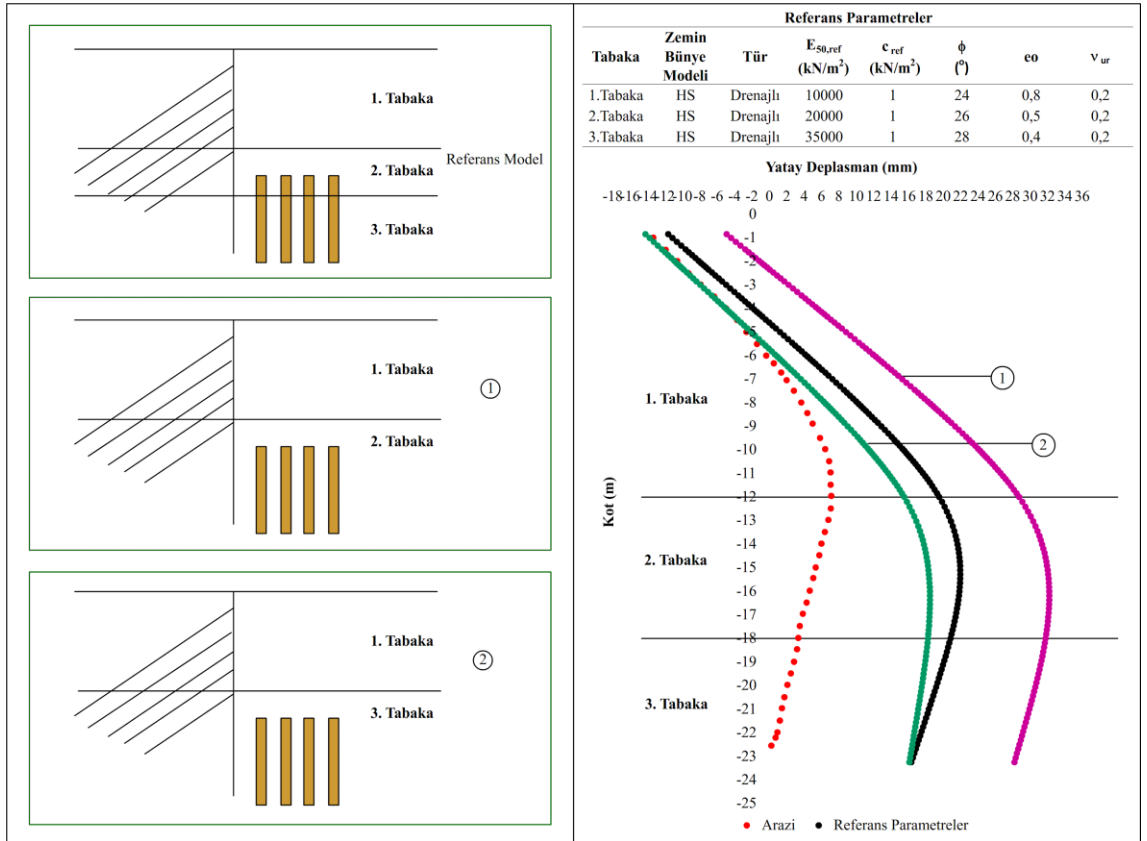
$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \frac{\sigma'_3}{K_0} \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (4-2)$$



Şekil 4.9: Pref parametresinin yanal deformasyonlara etkisi.

4.1.6. Tabakalanma Etkisi

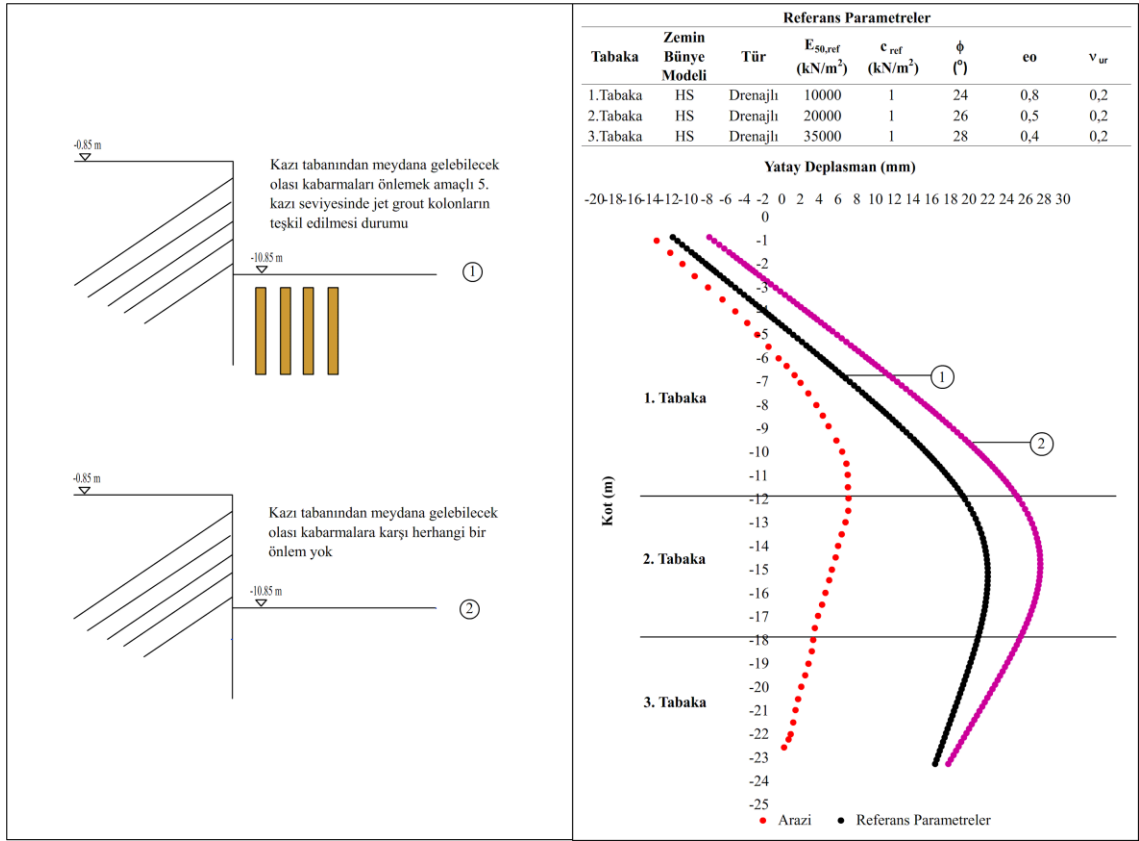
İnceleme alanında farklı dönemlerde farklı arazi etüdları gerçekleştirilmiştir. Zemin etüdları ve sismik çalışmalar doğrultusunda inceleme alanında 3 ayrı tabakalanma olduğu düşünülmektedir. Ancak 2012 yılında kontrol amaçlı gerçekleştirilen CPT sonuçlarına göre ise 2 ayrı tabakalanma mevcut gibi gözükmemektedir. Bu durum göz önünde tutularak, tabakalanma durumunun yanal deformasyonlara etkisi irdelenmiştir. Referans analiz 3 tabakalı olup referans parametreler ile gerçekleştirilmiştir. 1 ve 2 numaralı analizler ise 2 tabaka durumunu temsil etmektedir. Bu analizlerden 1 numaralı analiz referans parametrelerden ilk iki tabakanın parametreleri ile; 2 numaralı analiz ise birinci ve üçüncü tabakanın parametreleri ile çözümlenmiştir. Analizlerden görüldüğü üzere zeminin 2 tabakalı olarak modellenmesi durumunda elde edilen deformasyonlar arazi verilerinden daha uzaktır. Bu nedenle ileride yapılacak analizlerde zemin profili 3 tabakalı olarak modellenmiştir.



Şekil 4.10: Tabakalanma durumunun yanıl deformasyonlara etkisi.

4.1.7. Kazı Tabanında Jet Grout Kolonların Teşkilinin Etkisi

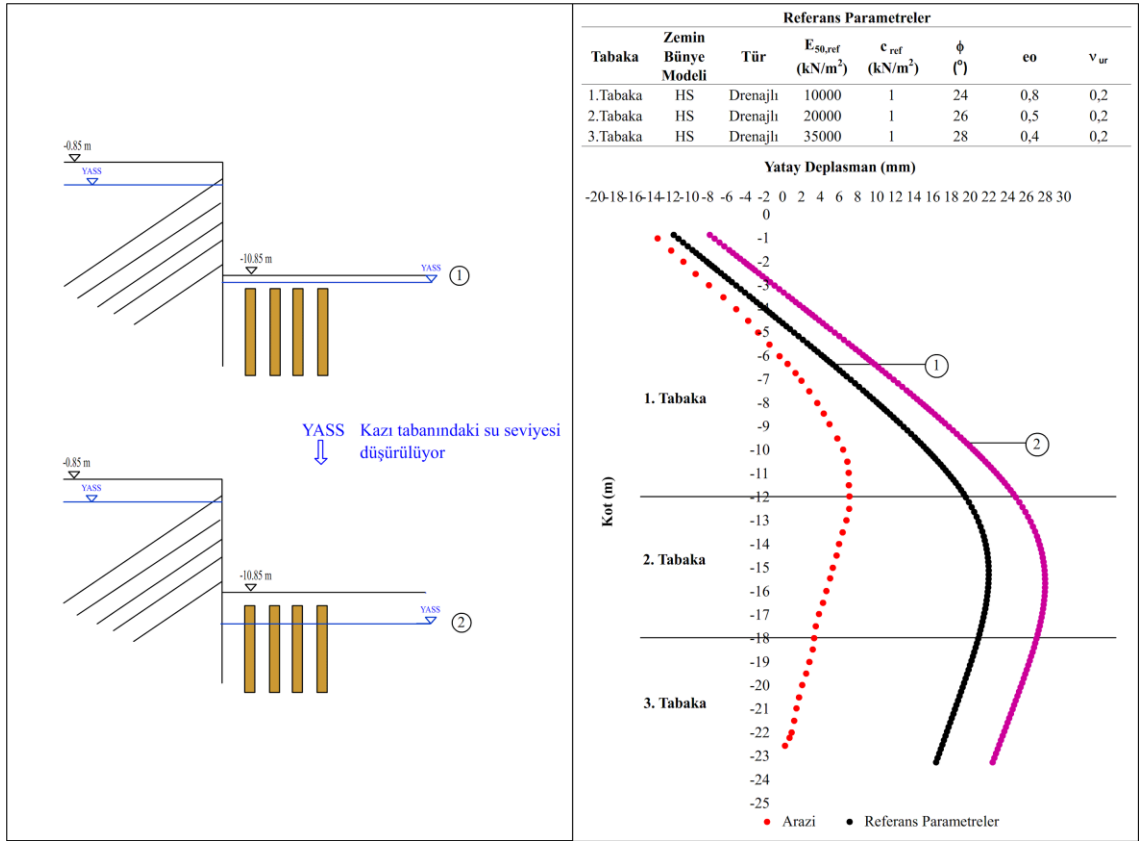
Yumuşak özellikteki alüvyon zeminlerde literatürde de belirtildiği üzere gerçekleştirilen kazılardan ötürü bir miktar taban kabarması meydana gelmektedir. Proje sahasında kazı tabanında meydana gelebilecek olası kabarmalara karşın 5. kazı seviyesinde iken 0.6m çaplı 2.0mx2.0m karelajlı dört sıra jet grout kolon teşkil edilmiştir. Teşkil edilen yüksek modüllü bu kolonların yanıl deformasyonlara katkısı ve deformasyon eğrisi formuna etkisini irdelemek amacıyla ilgili kesit kazı tabanındaki jet grout kolonlar olmadan da çözümlenmiştir. Analiz sonuçları aşağıdaki grafiklerde sunulmaktadır. Grafiklerden görüldüğü üzere jet grout kolonlar teşkil edildikleri kot itibariyle hem deformasyonlara hem de deformasyon eğrisi formuna bir etki yapmaktadır. Taban kabarmasına karşı teşkil edilen jet grout kolonların deformasyonları da azaltıcı yönde bir etkisi söz konusudur.



Şekil 4.11: Kazı tabanındaki yüksek modüllü kolonların (jet grout) yanal deformasyonlara etkisi.

4.1.8. Kazı Tabanında Yeraltı suyu Seviyesinin Düşürülmesinin Etkisi

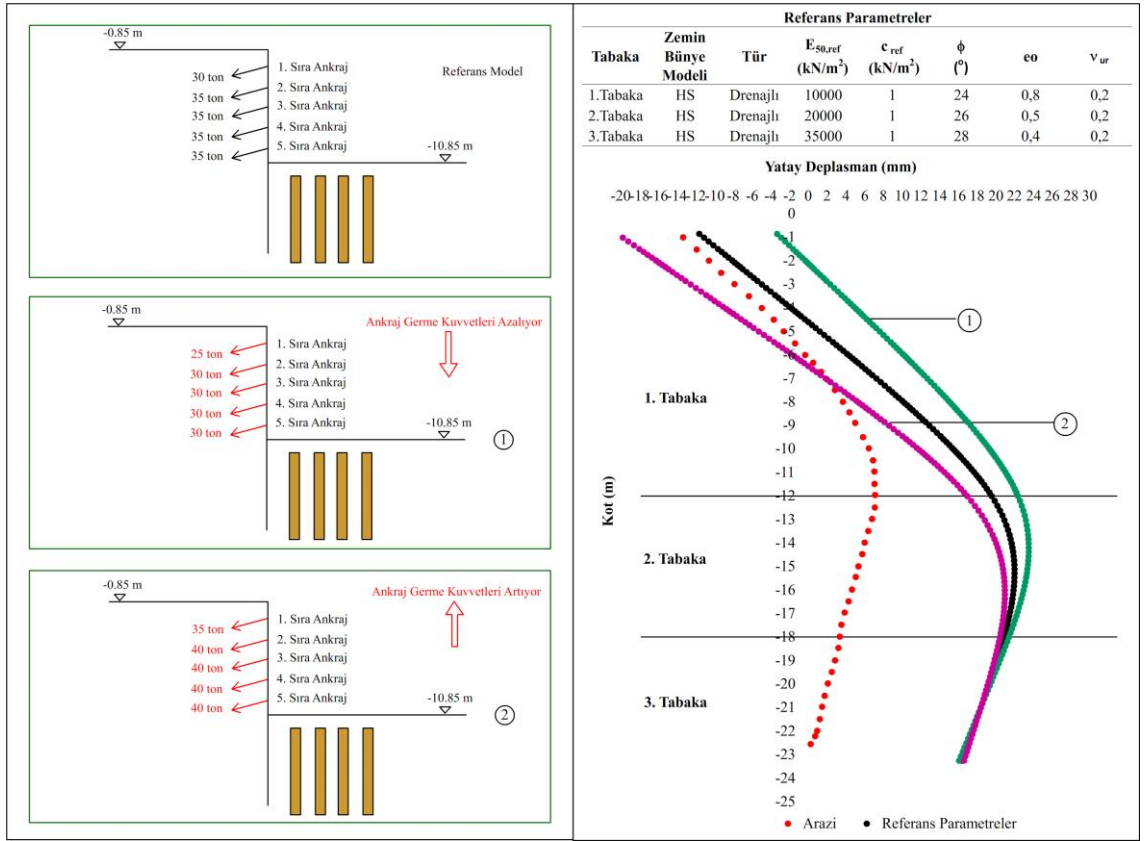
Derin kazı çalışmaları esnasında kazının kuru koşullarda gerçekleştirilebilmesi için kazı çukuruna dolan su uygun yöntemlerle deşarj edilmektedir. Proje alanında 5.kazı seviyesinde iken taban kabarmasına yönelik olarak jetgrout kolonlar teşkil edilmiştir. Bu kolonların teşkili ve su deşarjından kaynaklı kazı tabanında meydana gelecek yeraltısuyu seviyesi değişiminin yanal deformasyonlara etkisi incelenmiştir. Aşağıda ilgili şekillerde yeraltısuyu seviyesinin kazı tabanında olması (referans durum) ve jetgrout kolon başlangıç kotunun altında olması durumu modellenmiştir. Bu durumda elde edilen grafikler yine aynı şekil üzerinde gösterilmektedir. İlgili grafikler incelendiğinde kazı tabanındaki mevcut su seviyesinin düşürülmesi beklendiği üzere ilave deformasyonlara neden olmaktadır.



Şekil 4.12: Yeraltı suyu seviyesi değişiminden kaynaklı deformasyonlar.

4.1.9. Ankraj Germe Kuvvetlerinin Etkisi

İnceleme kesiti 5 sıra ankrajlı modellenmiş olup ankraj germe kuvvetleri 30ton ila 35ton arasında değişmektedir. Bilindiği üzere ülkemizde ankraj germe çalışmaları esnasında birçok aksilikler meydana gelebilmektedir. Bunlardan biri kalibrasyon problemi olan krikolar ile ankrajların az ya da çok gerilmiş olmasıdır. Ayrıca zemin koşullarına bağlı olarak proje kilit yüküne göre gerilmiş ankrajlarda zamana bağlı olarak bir miktar boşalma durumu söz konusu olabilmektedir. Ankraj germe kuvvetlerinin boşalma durumu ya da proje yükünden daha büyük bir yüke gerilmiş olma durumu temsili olarak modellenmiş ve ilgili grafiklerde sunulmuştur.

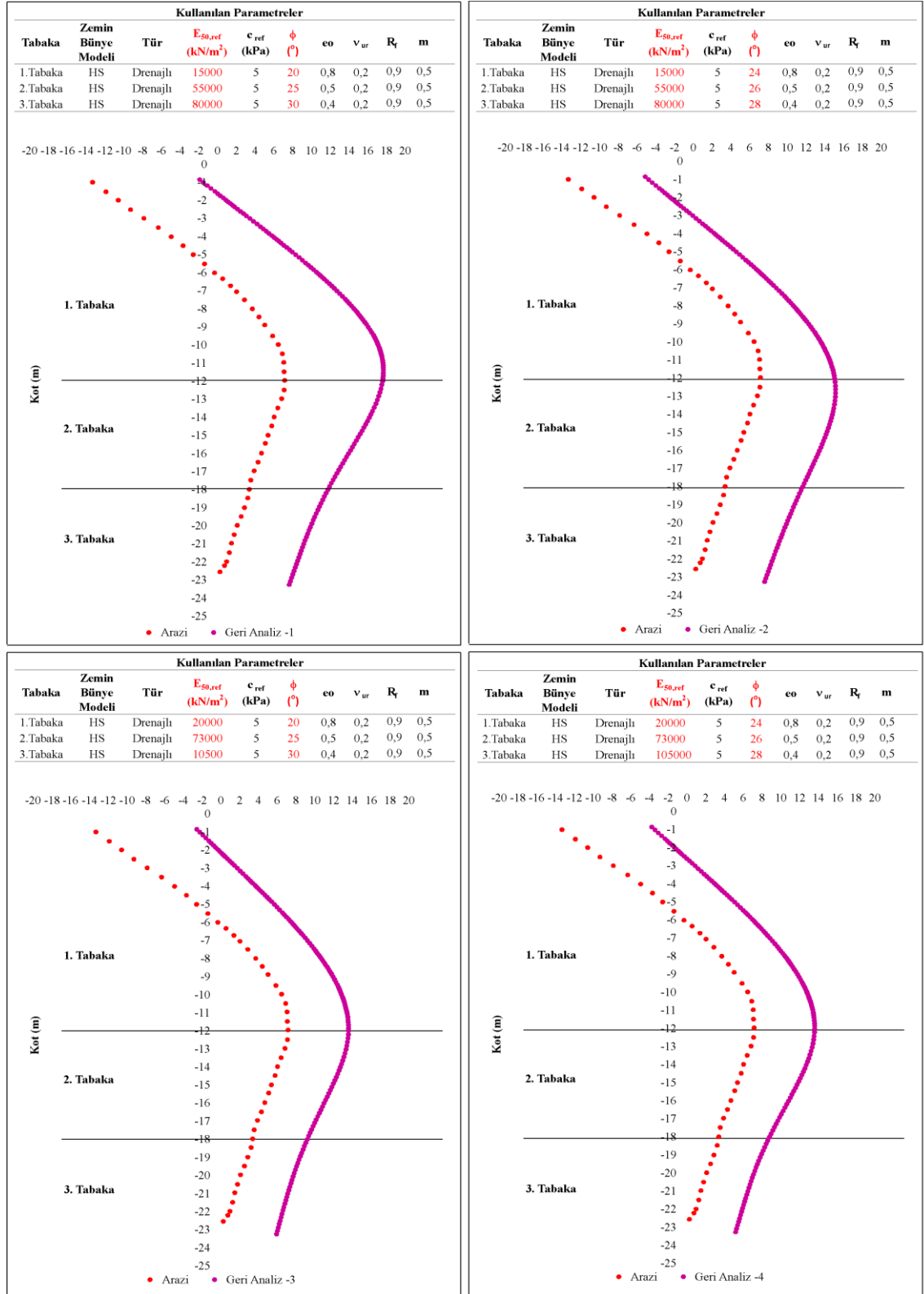


Şekil 4.13: Ankraj germe yüklerinden kaynaklı deformasyonlar.

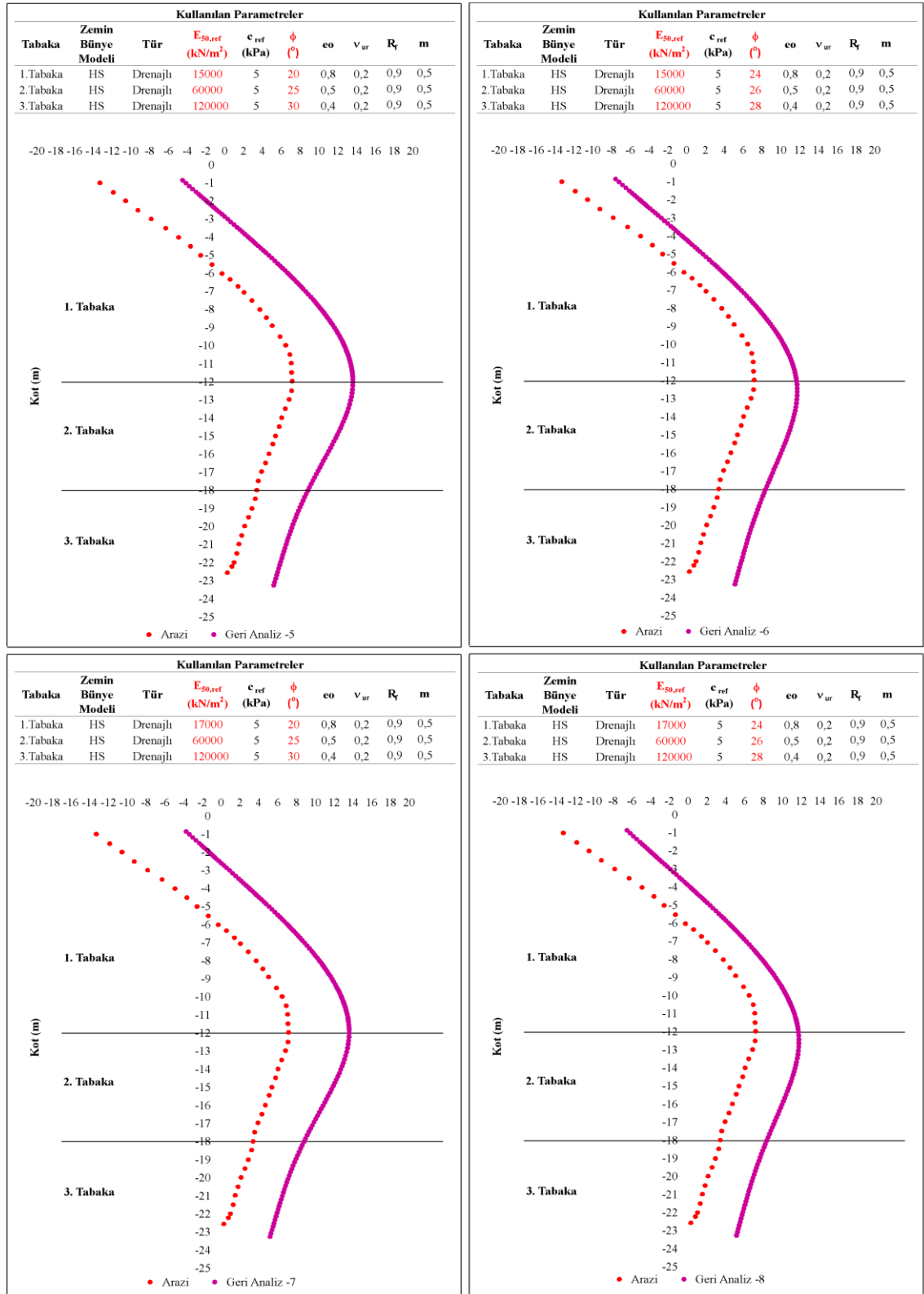
4.2. GERİ ANALİZ BULGULARI

Yukarıda ilgili bölümlerde derin kazılardaki deplasmanları etkileyen faktörlerden bir kısmı irdelenmiştir. Geri analiz çalışmaları kapsamında farklı zemin parametreleri değiştirilerek, iksa sisteminde meydana gelen deplasmanların arazi verileri ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Aşağıda ilgili grafiklerde farklı parametreler kullanılarak elde edilen analiz bulguları verilmektedir. Geri analiz çalışmalarında izlenmesi gereken adımlar tipik bir akış şeması halinde Bölüm 3.1.2’ de sunulmuştur.

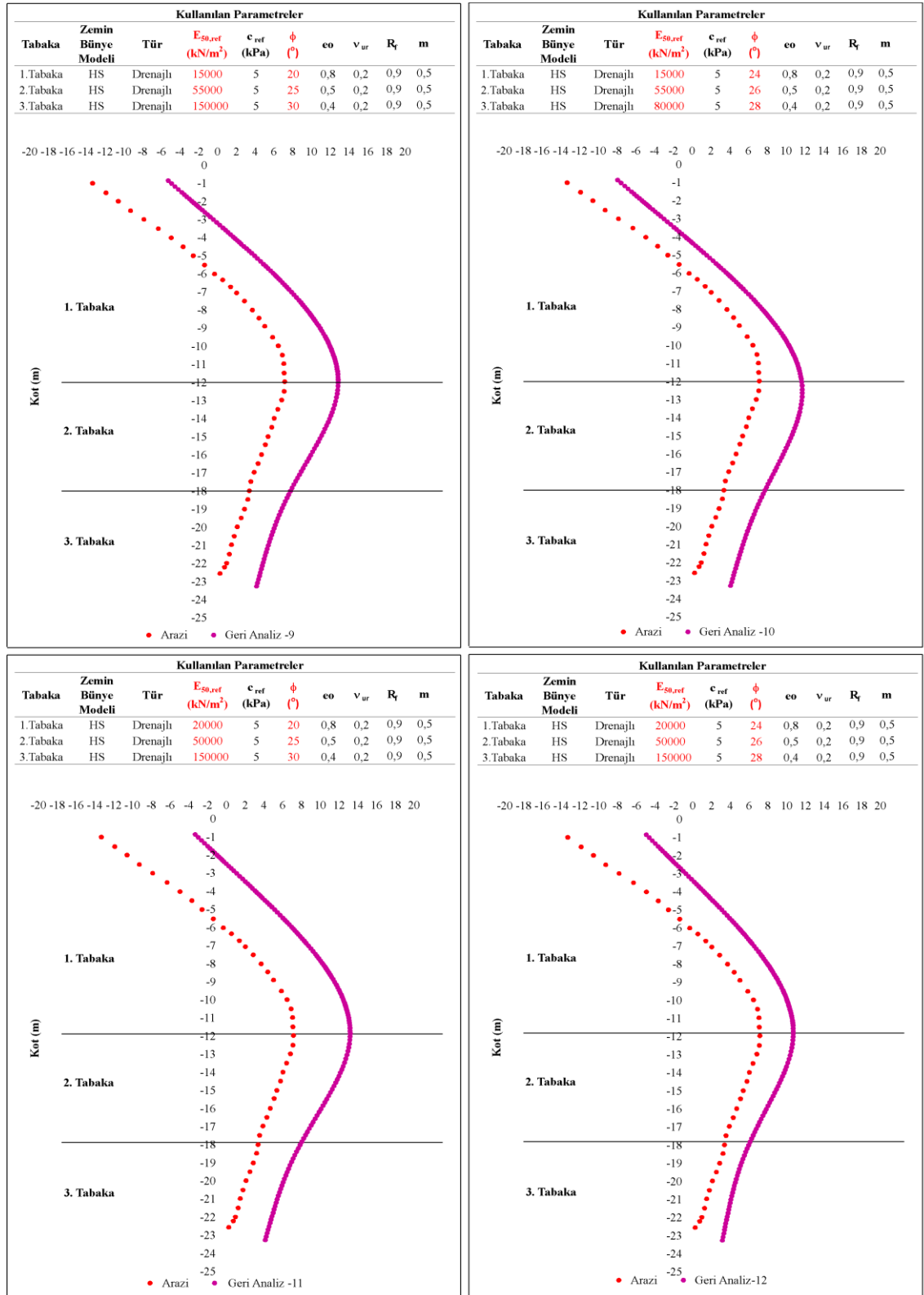
Analizlerde Bölüm 3.3.3’ te verilen zemin profili dikkate alınarak modelleme 3 tabakalı olarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde her bir tabakanın ayrı ayrı Sekant elastisite modülü, kayma mukavemeti açısı, gerilmeye bağlı rijitlik parametreleri değiştirilerek arazi verilerine en yakın sonucu veren zemin parametrelerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Analiz grafiklerinden görüleceği üzere zemindeki deformasyonları büyük ölçüde etkileyen faktör zeminin Sekant elastisite modülü değeridir.



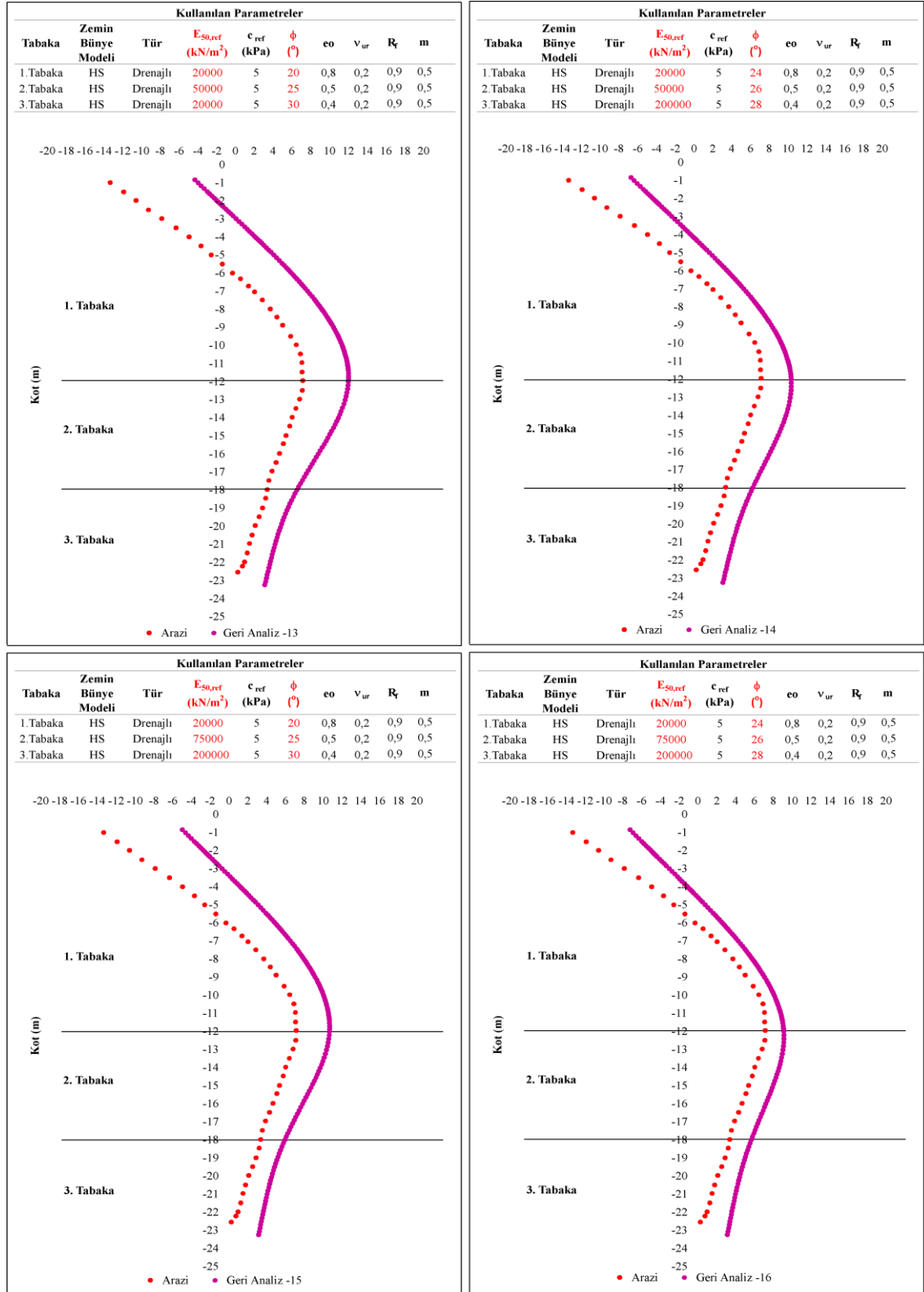
Şekil 4.14: HS Model geri analiz grafikleri 1.



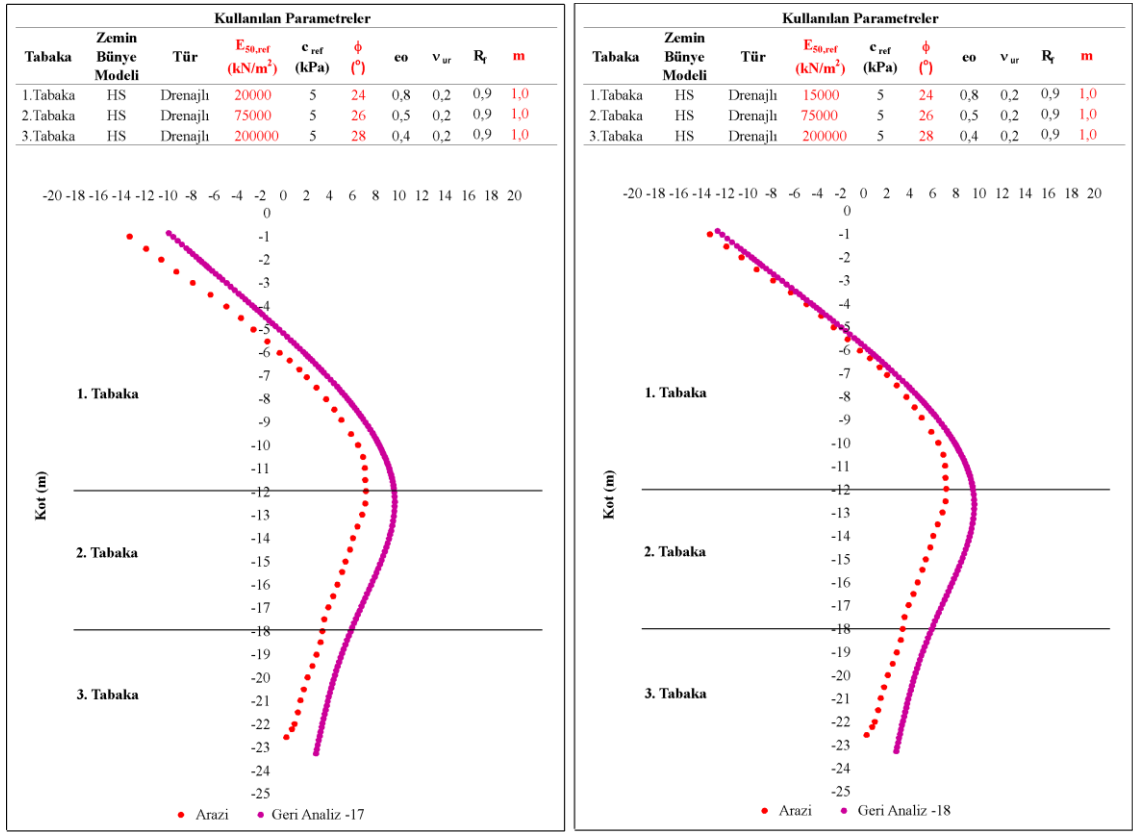
Şekil 4.15: HS Model geri analiz grafikleri 2.



Şekil 4.16: HS Model geri analiz grafikleri 3.



Şekil 4.17: HS Model geri analiz grafikleri 4.

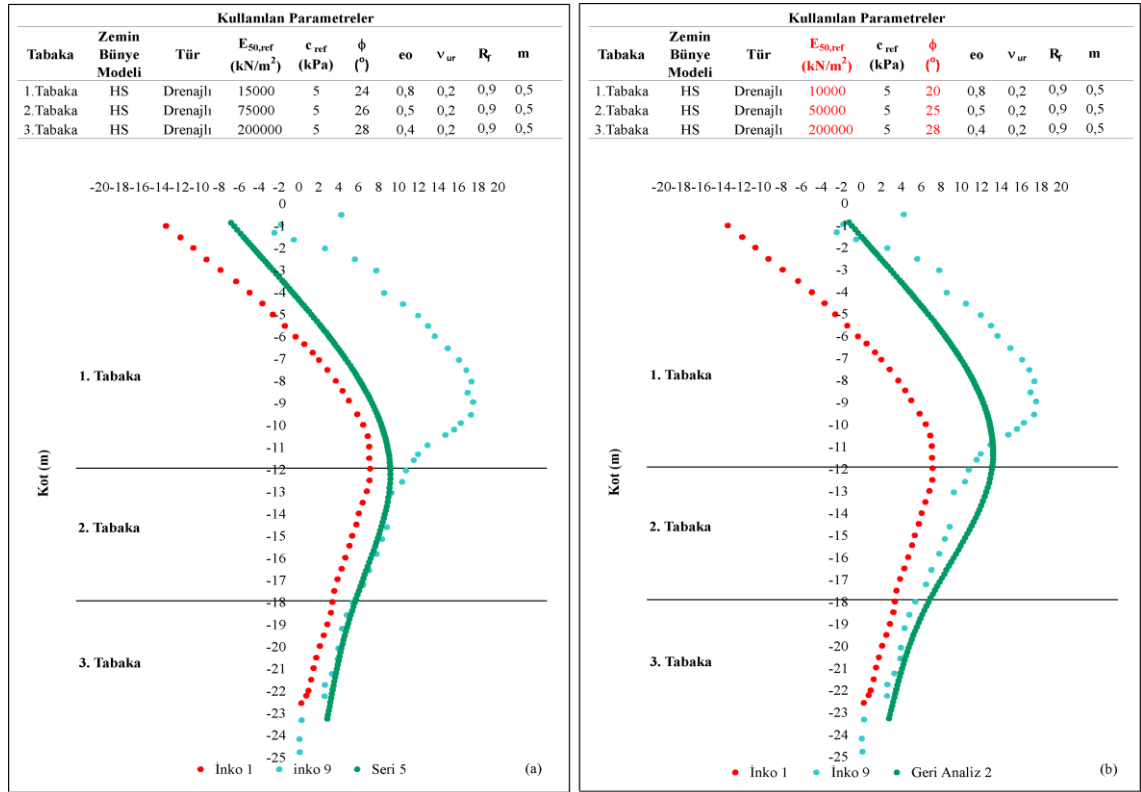


Şekil 4.18: HS Model geri analiz grafikleri 5.

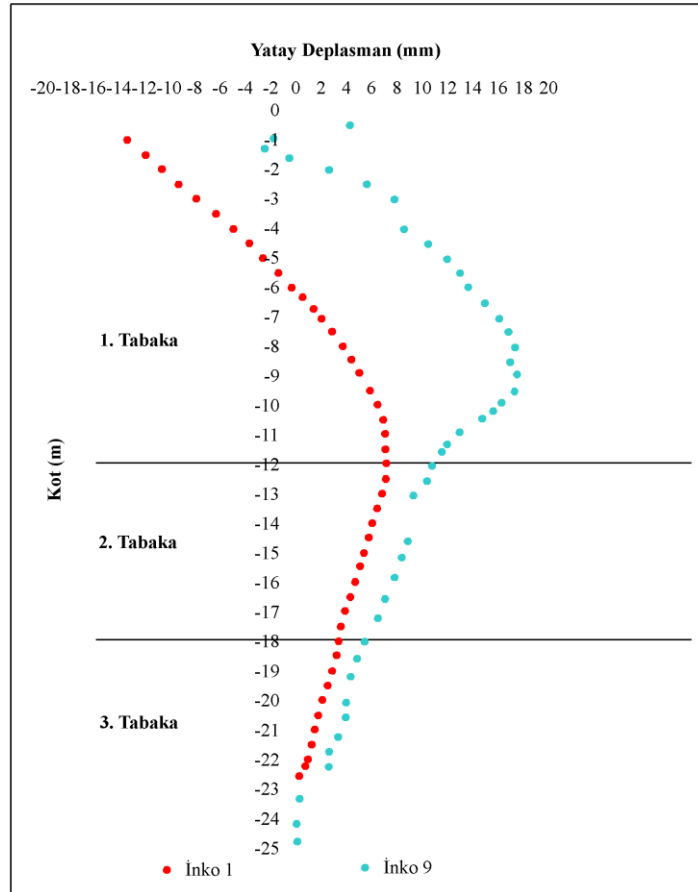
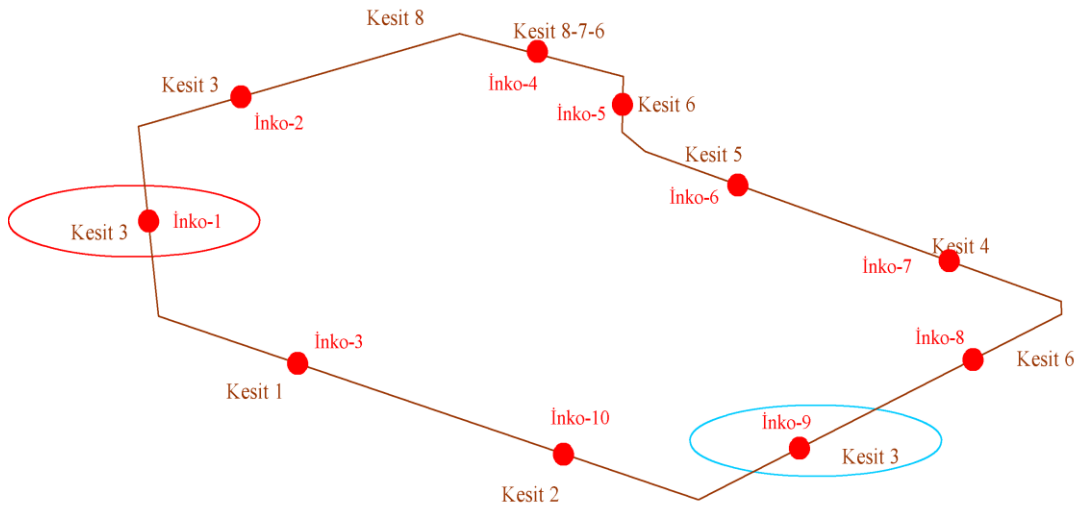
Elde edilen best-fit parametrelerinin başlangıçta öngörülen zemin parametrelerinden daha uzak sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak elde edilen sonuçlar Kesit-3 lokasyonuna yakın bir noktadan alınan jeofizik ölçüm sonuçları ile bir uyumluluk arz etmektedir. Jeofizik ölçümlerden sahadaki zeminin bakır koşullarında elde edilen modüller bir degradasyon yöntemi ve bir güvenlik parametresi ile azaltıldığında geri analiz best-fit parametreleri ile uyumlu olmaktadır.

Kesit-3 İnko-1 verileri dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen geri analiz best-fit parametreleri sahanın farklı bir kesiminde yer alan İnko-9 bölgesi ile kıyaslanmıştır. Birbiri ile tamamen aynı olan iksa sistemleri sahanın farklı noktalarında uygulanmış ancak aletsel gözlem sisteminden birbirinden farklı deformasyon davranışı elde edilmiştir. İlgili grafikler Şekil 4.20’ de verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere Kesit-3 için sağlanan uyumluluk bu kesitin üst kazı kademelerinde aynı ölçüde geçerli olmamıştır. Şekilden de görüldüğü üzere İnko-9’dan elde edilen arazi verileri kazının üst kademelerinde İnko-1’den elde edilen arazi verilerinden uzaklaşmaktadır. Bunun nedeninin üst seviyelerdeki ankrajlardaki yük boşalmasından kaynaklı olabileceği ya da

bu bölgede daha zayıf zemin koşullarının geçerli olabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir (Bknz :Şekil 4.19). Analizlerde yalnızca ankraj germe kuvvetlerinin takribi 5ton mertebesinde azalması durumu modellenmiştir. Görüldüğü üzere ankraj germe kuvvetlerinin boşalması İnko-9 arazi verilerine ulaşmaya yeterli olmamış zemin parametreleri ile de birtakım değişiklikler yapılarak analizler yinelenmiştir. Bilindiği üzere denizel alüvyonların bulunduğu bu tip sahalarda, alüvyon özelliğinden kaynaklı olarak zeminin noktadan noktaya mukavemet ve rijitlik özellikleri farklılık gösterebilmektedir. Analiz bulguları da birbiri ile tamamen aynı geometriye sahip iki iksa kesitinin farklı yerleşimlerdeki deformasyonlarının alüvyon özellikteki zemin koşullarına bağlı olarak birbirinden farklı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.19: İnko 9 bölgesinde geri analiz çalışmaları.



Şekil 4.20: Arazi verilerinin karşılaştırılması.

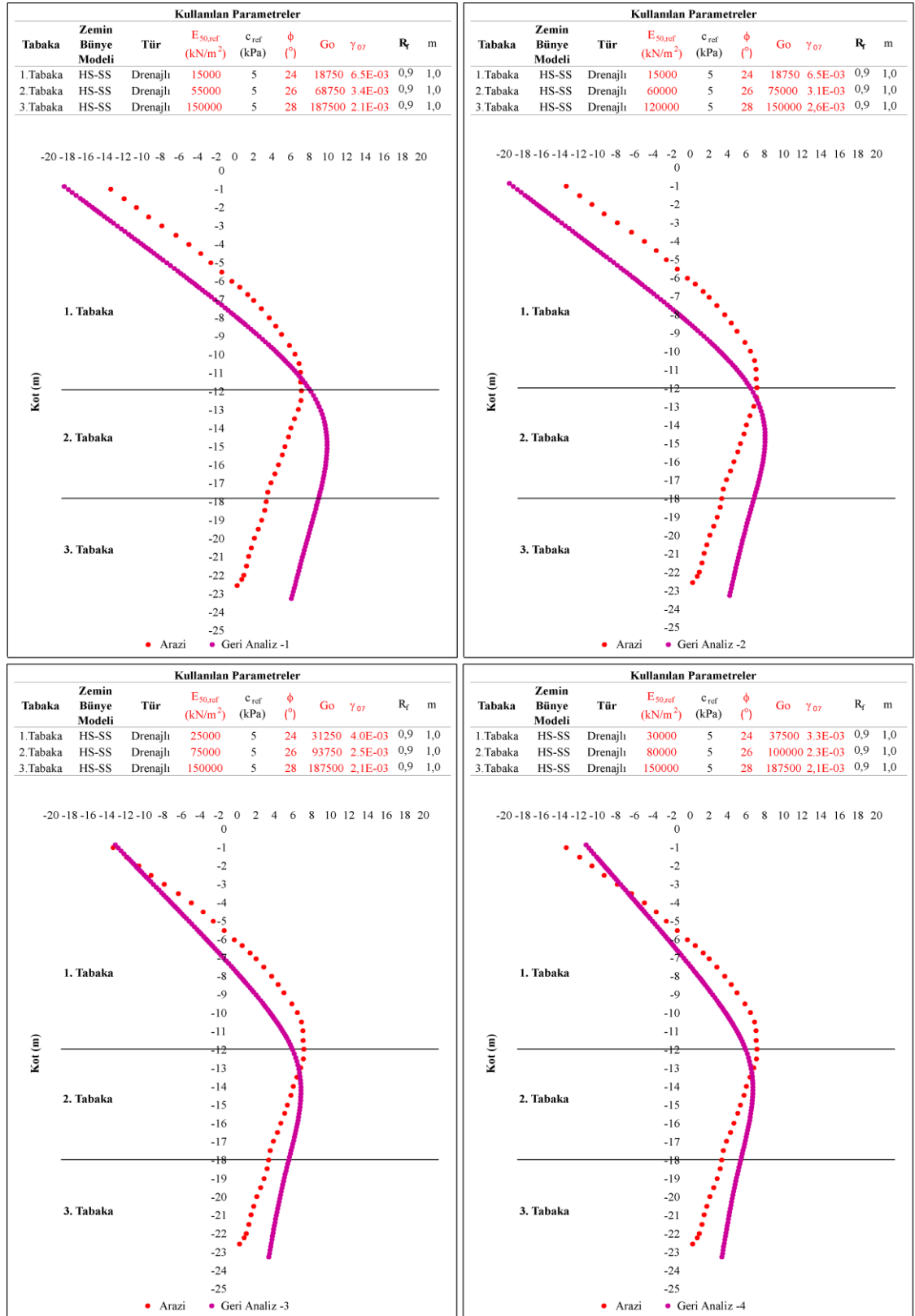
Farklı Zemin Bünye Modeli ile Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Yukarıdaki bölümlerde detayları verildiği üzere geri analiz çalışmaları pekleşen zemin bünye modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. zemin bünye modeli seçiminin deformasyonlar üzerindeki etkisinin irdelenmesi amacıyla benzer çalışmalar küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli ve Mohr Coulomb zemin bünye modeli kullanılarak ta yinelenmiştir.

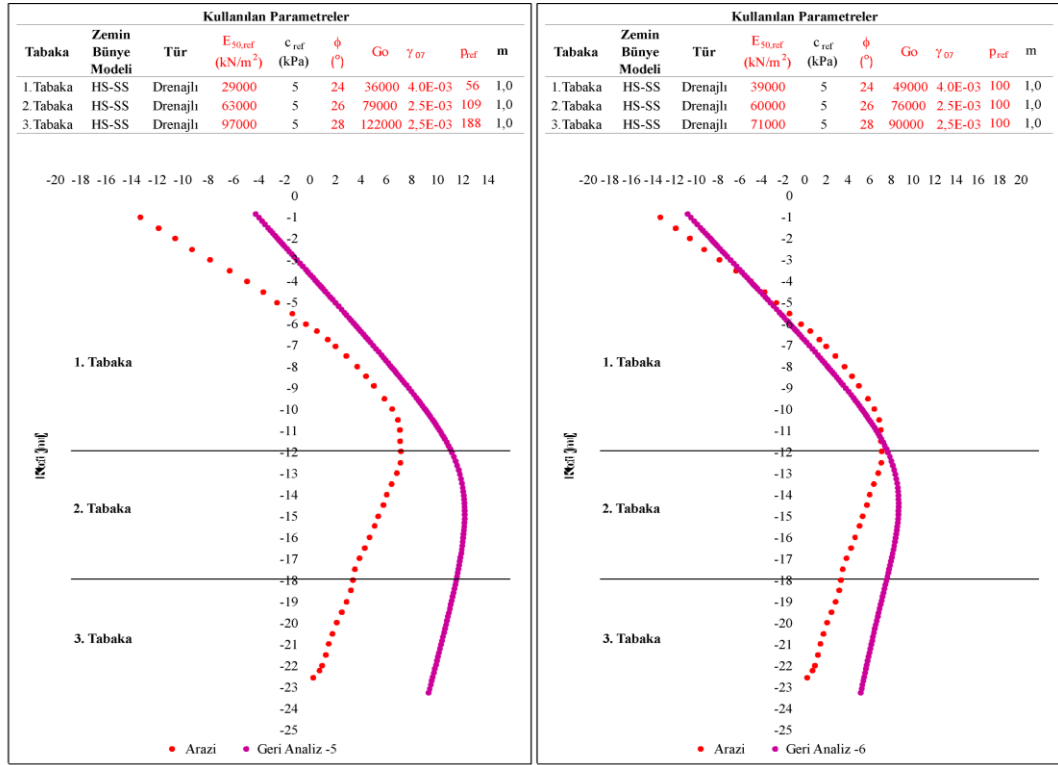
Küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli, pekleşen zemin modeli parametrelerine ilaveten iki yeni parametreye ihtiyaç duymaktadır. Bu parametreler G_0 ve $\gamma_{0,7}$ olup birçok farklı hesap yöntemi ve deneysel yollarla bulunabilmektedir. Bu parametrelerin tayinine yönelik tüm detaylar Bölüm 3.2.2.1’ de verilmiştir. Bu yöntemler dikkate alınarak farklı parametre varyasyonları ile arazi verileri ile en uyumlu deformasyon eğrisi elde edilmeye çalışılmıştır. İlgili tüm analiz sonuçları takip eden grafiklerde detaylı olarak verilmektedir.

Analizler esnasında farklı yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Yukarıdaki bölümlerde de belirtildiği üzere jeofizik ölçümlerden zeminin sükûnet halindeki kayma ve deformasyon modüllerini elde etmek mümkündür. HS model ile gerçekleştirilen geri analizlerde kullanılan $E_{50, \text{ref}}$ parametrelerinden yola çıkarak kayma modülü değerleri belirlenmiştir. $\gamma_{0,7}$ parametresi ise bu parametreye bağlı olarak Plaxis programında önerilen formül yardımı ile elde edilmiştir. İlgili analiz bulguları takip eden şekillerde verilmektedir.

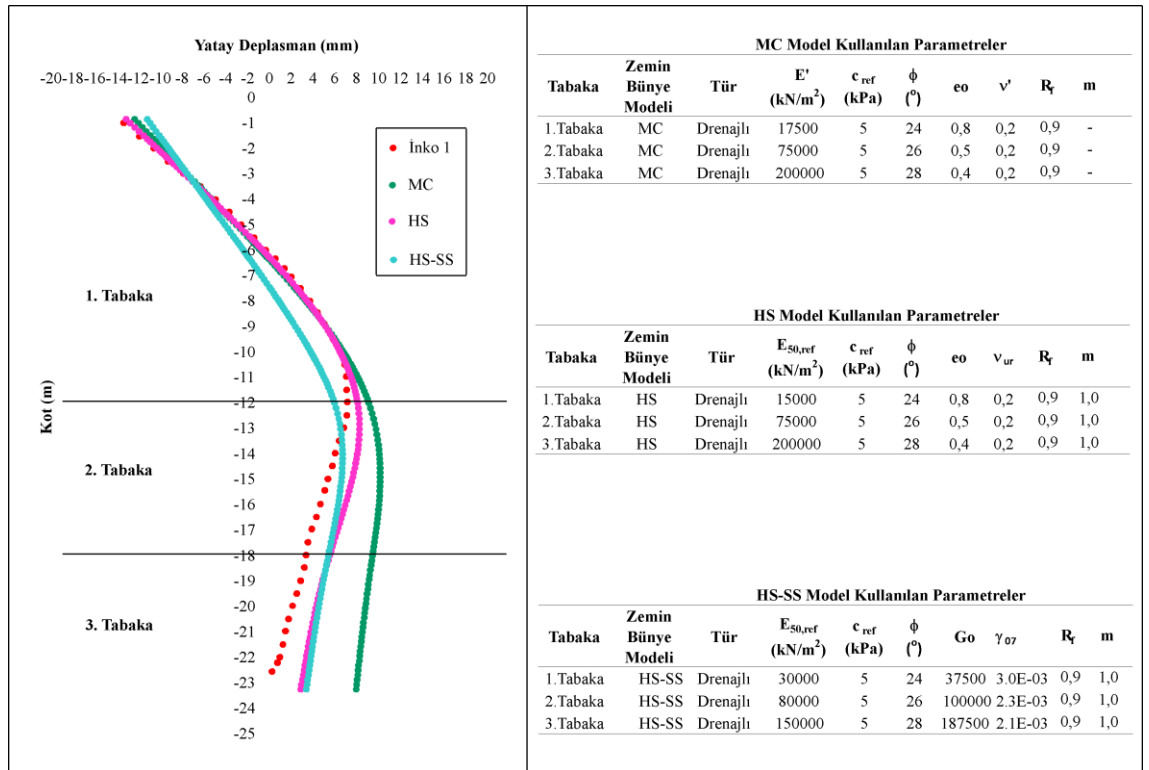
Ayrıca literatürde Öztoprak-Bolton-Vardenega tarafından önerilen G_0 ve $\gamma_{0,7}$ parametrelerinin tayinine yönelik olarak önerilen Öztoprak-Bolton (2012) yöntemiyle de G_0 ve $\gamma_{0,7}$ parametreleri hesaplanmış ve bu parametrelerle de analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu analizler Şekil 4.22’ de verilmektedir.



Şekil 4.21: HS-Small model geri analiz grafikleri 1.



Şekil 4.22: HS-Small Model geri analiz grafikleri 2.



Şekil 4.23: Farklı zemin bünnye modeli ile gerçekleştirilen analizlerin kıyaslanması.

Tablo 4.5: Best Fit parametreleri özet tablosu.

Başlangıçta Öngörülen Parametre	Alüvyon-1	Alüvyon-2	Alüvyon-3
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} (kPa)	10,000	20,000	35,000
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	30,000	60,000	105,000
Kohezyon, c (kPa)	1	1	1
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	24	26	28
HS Model Best Fit Parametreleri	Alüvyon-1	Alüvyon-2	Alüvyon-3
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} (kPa)	15,000	75,000	200,000
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	45,000	225,000	600,000
Kohezyon, c (kPa)	5	5	5
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	24	26	28
HS-SS Model Best Fit Parametreleri	Alüvyon-1	Alüvyon-2	Alüvyon-3
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} (kPa)	30,000	80,000	150,000
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	90,000	240,000	450,000
Kayma modülü, G_o^{ref} (kPa)	37,500	100,000	187,500
$\gamma_{0,7}$	3.3E-03	2.3E-03	2.2E-03
Kohezyon, c (kPa)	5	5	5
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	24	26	28
MC Model Best-Fit Parametreleri	Alüvyon-1	Alüvyon-2	Alüvyon-3
Young Modülü E	18,750	75,000	200,000
Kohezyon, c (kPa)	5	5	5
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	24	26	28

Tablo 4.6: Parametre önem tablosu.

Parametre	Az Etkili	Orta Etkili	Çok Etkili
Malzeme modeli		*	
Poisson oranı v_{ur}	*		
Arayüzey (interface) yük azaltma oranı R_f	*		
Gerilme bağımlı rijitlik parametresi m	*		
P_{ref}		*	
Kohezyon, c (kPa)	*		
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)		*	
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} (kPa)			*
Tabakalanma		*	
Yeraltısuyu seviyesi		*	
Kazı tabanında ıslah		*	
Ankraj kuvvetlerinin etkisi			*

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Derin kazılarda meydana gelen deplasmanlar birçok faktöre bağlıdır. Yapılan çalışmada derin kazılarda meydana gelen deplasmanları etkileyen çeşitli parametreler detaylı olarak incelenmiştir.

Destek sistemlerinin tasarımında ve öngörülen deplasmanların sayısal çözümlerle öngörülebilmesinde, seçilen parametrelerin arazi koşullarını gerçeğe yakın temsil etmesi ve inşaat adımlarının doğru seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Öngörülen deplasmanların gerçek modelde de gerçekleştiğinin tespit edilmesi için arazide aletsel gözlem sistemlerinin teşkil edilmesi önemli bir faktördür. Bu çalışma kapsamında elde olan veriler yalnızca yatay deplasmanların tespitine yönelik olup iksa sistemi arkasına yerleştirilecek ilave aletsel gözlem ekipmanları ile iksa arkasında meydana gelen zemin düşey hareketlerinin gözlenmesi de geri analiz çalışmaları kapsamında incelenmesi gereken önemli bir konudur.

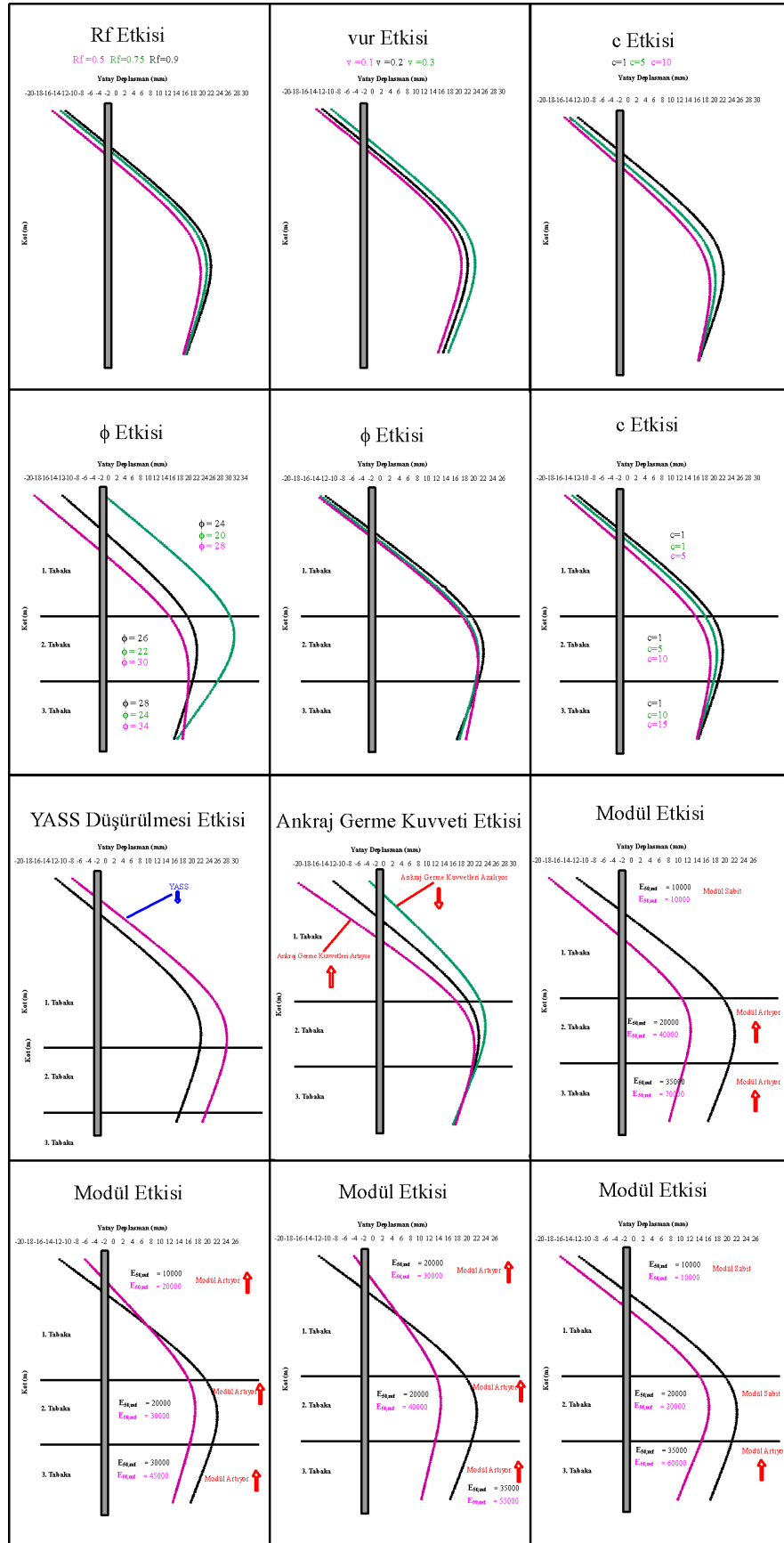
Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre ankraj germe kuvvetlerinin meydana gelen deformasyonlar üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu belirlenmiştir. Ankrajların proje yükünden daha az bir yükte gerilmesi ilave deplasmanların oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle arazide ankraj germe işlemlerinde kalibrasyonu düzgün krikolar kullanılmalıdır. Ayrıca ankrajlarda zamanla yük boşalması meydana gelmektedir. Bu nedenle ankrajlardaki germe kuvvetlerinin gözlenmesine yönelik olarak aletsel gözlem ekipmanlarının yerleştirilmesi de diğer önemli bir husustur.

Tez çalışması kapsamında farklı zemin bünye modellerinin deplasmanlar üzerindeki etkisi irdelenmiş ve arazi ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Analizlerde pekleşen zemin bünye modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarının arazi verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Küçük deformasyonları dikkate alan pekleşen zemin bünye modeli parametrelerinin geleneksel laboratuvar deney yöntemleri ile elde edilmesi güç olup, parametrelerin seçimi zordur. Bu bakımdan yanal deplasmanların tayininde bu kadar kapsamlı parametre gerektiren bir zemin bünye modeli kullanmak yerine pekleşen zemin bünye modeli kullanmak da yeterli olmaktadır. Bu iki zemin

bünye modeline ilave olarak bünyesinde daha basit parametreleri barındıran Mohr Coulomb zemin bünye modeli ile de analizler gerçekleştirilmiş olup, arazi verilerini temsil edecek parametreler tayin edilmiştir. Mohr Coulomb ile gerçekleştirilen analizlerden elde edilen yatay deplasmanlar araziden elde edilen deformasyon eğrisi formu ile birebir örtüşmemiştir. Parametre tayininin diğer zemin bünye modellerine nazaran daha basit olduğu Mohr Coulomb zemin bünye modeli basit iksa hesaplarında tercih edilebilecektir.

Alüvyon zeminler mukavemet özellikleri bakımında noktadan noktaya farklılık gösterebilecek zeminlerdir. Tez çalışması kapsamında incelenen alüvyon zeminler de bu ifadeyi doğrular niteliktedir. Dayanma yapısı sistemi olarak birbiri ile tamamen aynı olan iki iksa bölgesinden elde edilen deformasyon grafikleri birbiri ile birebir örtüşmemektedir. Bu özellikteki zeminlerde, zemin parametrelerinin doğru tayin edilebilmesi amacıyla çeşitli zemin etüd çalışmalarının kombinasyonu ve jeofizik ölçümlerin bir arada yapılması gerekliliği belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında farklı zemin parametrelerinin derin kazı nedeniyle oluşan deformasyonlar üzerindeki etkileri irdelenmiştir. İlgili parametrelerin deformasyonlar üzerindeki etkisi aşağıda özetlenmektedir. Söz konusu çalışmalar inceleme alanını temsil eden gevşek alüvyon birimler için geçerlidir. Çalışma kapsamında irdelenen parametrelerin, kayaya soketli iksa sistemlerinde ya da katı-çok katı özellikteki kil birimler için de incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca tez çalışması kapsamında incelenen parametrelerin yatay deplasmanlar üzerindeki etkisi bir parametre önem tablosu ile özetlenmiş olup yukarıda Tablo 4.5’de verilmektedir.



KAYNAKLAR

- Becker P., Gebreselassie B., Kempfert H.G., 2008, Back Analysis of a Deep Excavation In Soft Lacustrine Clays, 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, August 11-16,2008, Arlington, 128-135
- Bryson L.S., Zapata-Medina D., 2012, Method for Estimating System Stiffness for Excavation SupportWalls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 2012.138:1104-1115
- Calvello M., 2002, *Inverse Analysis of a Supported Excavation through Chicago Glacial Clays*, Doctor of Philosophy Thesis, Northwestern University
- Duncliff J., 1988, *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley and Sons Inc., New York
- Engin E., 2008, *Destekli Derin Kazılarda Yapılan İnklinometrik Ölçümler İle Sonlu Elemanlar Analizlerinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Finno R.J., Bryson S., Calvello M., 2002, *Performance of a Stiff Support System in Soft Clay*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 1090-0241(2002), pp 660-671
- Finno R.J., 2007, *Use of Monitoring Data to Update Performance Predictions of Supported Excavations* FMGM 2007: Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics
- Gebreselassie B., 2003,*Experimental, Analytical and Numerical Investigations of Excavations in Normally Consolidated Soft Soils*, Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel
- Jozsa V., 2010, *Effects Of Rarely Analyzed Soil Parametersfor Fem Analysis Of Embedded Retaining Structures*, Budapest University of Technology and Economics, Geotechnical Department, Budapest, Hungary
- Kempfert H.G., Gebreselassie B.,2006, *Excavations and Foundations in Soft Soils*, Springer, Berlin
- Lim A., Ou C.Y., Hsieh P.G., 2010, Evaluation Of Clay Cconstitutive Models For Analysis Of Deep Excavation Under Undrained Conditions, *Journal of GeoEngineering. Vol5.No. 1*, pp 9-20

- Lam S.S.Y., 2010, Ground Movement Due To Excavation In Clay: Physical and Analytical Models, PhD. Thesis, Cambridge University
- Durgunoğlu H.T., Olgun C.G., Temel Mühendisliğinde Aletsel Ölçüm ve Gözlemleme, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler II. Teknik Kongre, 18-20 Eylül 1995, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul
- Osman A.S., 2004, *Predicting Ground Displacements In Clay During Construction*, PhD. Thesis, Cambridge University
- Osman A.S., Bolton M.D., 2004, A New Design Method For Retaining Walls In Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 41, pp 451-466
- Osman A.S., Bolton M.D., 2006, Ground Movement Predictions for Braced Excavations in Undrained Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 1090-0241/2006/4, pp 465-477
- Ou C.Y., 2006, *Deep Excavation Theory and Practice*, Taylor&Francis, London
- Sevencan O., 2009, *Açık Derin Kazılarda Zemin Deformasyonlarının Nümerik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Schweiger H.F., 2010, Influence of Constitutive Model and EC7 Design Approach in FE Analysis of Deep Excavations, Graz University of Technology, Austria
- Tunca M., 2010, *Derin Kazılardan Kaynaklanan Zemin Oturmalarının Sayısal Analizlerle İncelenmesi*, Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü
- US Department of Transportation Federal Highway Administration 1999, "Geotechnical Engineering Circular No.4 Ground Anchors and Anchored Systems", Federal Highway Administration, Washington.
- Yıldırım S., 2002, *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsan Yayınevi, İstanbul

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Halime Çağrı GÖKÇEK
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	12.01.1986 / Kahramanmaraş
Telefon	
E-mail	gokcekh lime@gmail.com
Web adres	

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Yüksek Lisans	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı/ Geoteknik Programı	2014
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/İnşaat Mühendisliği	2009
Lise	Kadriye Çalık Anadolu Lisesi	2004