İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERMELİ ANKRAJLI KESİŞEN KAZIKLI İKSA SİSTEMİ: BİR VAKA ANALİZİ VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem UÇAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERMELİ ANKRAJLI KESİŞEN KAZIKLI İKSA SİSTEMİ: BİR VAKA ANALİZİ VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem UÇAR
(501161315)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Musaffa Ayşen LAV

TEMMUZ 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501161315 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gizem UÇAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÖNGERMELİ ANKRAJLI KESİŞEN KAZIKLI İKSA SİSTEMİ: BİR VAKA ANALİZİ VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Musaffa Ayşen LAV** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Müge BALKAYA** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Ayşe Edinçliler BAYKAL Boğaziçi Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 11 Haziran 2020
Savunma Tarihi : 27 Temmuz 2020

Aileme,

ÖNSÖZ

Derin kazılar, hızla artan nüfus ve kalabalık şehirlerde kısıtlı alanların etkin şekilde kullanılma ihtiyacından dolayı geoteknik mühendisliğinde önemli bir yere sahip olan konulardan biridir. Derin kazı modellemesi ve inşaat aşamalarının tanımlanmasında büyük öneme sahip olan etüt çalışmaları ve seçilecek parametrelerin doğruluğu, sistemde daha gerçek sonuçlar elde edilmesi ile güvenli ve ekonomik kazının yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında seçilen vaka analizinde çalışmalar sırasında karşılaşılan sorunlara değinilerek projedeki revizyonlar anlatılmış, aletsel gözlem çalışmalarının önemine değinilmiş ve devamında derin destekli kazı sistemlerinde meydana gelebilecek deplasmanlar nümerik analizlerle incelenmiştir.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarım boyunca sunduğu değerli bilgiler ve yardımları için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Musaffa Ayşen LAV'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım kapsamındaki vaka analizine yönelik kıymetli verileri kullanmamı sağlayan, değerli tecrübe ve kaynaklarını esirgemeyerek her türlü desteği gösteren Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. ailesine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili annem, babam, kardeşim başta olmak üzere, tez çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen tüm dostlarıma en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Haziran 2020

Gizem UÇAR
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xxi**
ÖZET ..... **xxv**
SUMMARY ..... **xxvii**
1. GİRİŞ **1**
2. DERİN KAZILAR **3**
2.1 Derin Kazı Destek Sistemi Tasarlanırken Dikkat Edilmesi Gereken Durumlar 3
2.1.1 Stabilite problemleri 3
2.1.2 Taban kabarması 4
2.1.3 Deplasmanlar 4
2.1.3.1 Zeminde meydana gelecek farklı gerilmelerin etkisi 5
2.1.3.2 Kazı büyüklüğü 5
2.1.3.3 Zemin cinsi 5
2.1.3.4 Yeraltı suyu seviyesi 7
2.1.3.5 İksa sisteminin rijitliği 7
2.1.3.6 İmalat yöntemleri ve işçilik 8
2.2 Derin Kazıların Tasarımından Önce Yapılması Gereken Çalışmalar 8
2.2.1 Kazı alanı ve topografyası 8
2.2.2 Geoteknik incelemeler 8
2.2.3 Yeraltı su seviyesi 9
2.2.4 Komşu yapılar ve yeraltı yapıları 9
2.2.5 Yapıya etkiyecek ilave yükler 9
3. YANAL TOPRAK BASINÇLARI **11**
3.1 Rankine Teorisi 11
3.1.1 Sükunetteki toprak basıncı 13
3.1.2 Aktif toprak basıncı 14
3.1.3 Pasif toprak basıncı 15
3.2 Coulomb Teorisi 17
3.2.1 Aktif toprak basıncı 18
3.2.2 Pasif toprak basıncı 19
3.3 Terzaghi ve Peck Toprak Basınçları 20
4. DERİN KAZI DESTEK SİSTEMLERİ **21**
4.1 Düşey Destek Elemanları 21
4.1.1 Mini kazıklar 21
4.1.2 Palplanşlar 25
4.1.3 Diyafram duvarlar 27

4.1.4 Kazıklı duvarlar 30
4.1.4.1 Kesişen kazıklar 31
4.1.4.2 Teğet (bitişik) kazıklar 32
4.1.4.3 Aralıklı kazıklar 32
4.1.4.4 Fore kazık yapım yöntemi 32
4.2 Yatay Destek Elemanları 38
4.2.1 Destek kirişleri (strut) 38
4.2.2 Zemin çivileri 39
4.2.3 Öngermeli zemin ankrajları 41
4.2.3.1 Ankrajların sınıflandırılması 42
4.2.3.2 Ankraj elemanları 44
4.2.3.3 Ankraj serbest ve kök boylarının hesabı 46
4.2.3.4 Ankraj yatay mesafesi 49
5. İKSA SİSTEMLERİNDE ALETSEL GÖZLEM 51
5.1 Aletsel Gözlemin Amacı 51
5.2 İnklinometre 52
5.2.1 Yapım yöntemi 53
5.2.2 Delgi 53
5.2.3 İnklinometre borusunun yerleştirilmesi 54
5.2.4 Enjeksiyon 55
5.2.5 Okuma alınması 56
6. SONLU ELEMANLAR METODU VE PLAXIS 2D BİLGİSAYAR PROGRAMI 59
6.1 Sonlu Elemanlar Metodu 59
6.2 Plaxis 2D Bilgisayar Programı 60
6.3 Zemin Modelleri 63
6.3.1 Mohr-Coulomb model (MC) 63
6.3.2 Hardening soil model (pekleşen zemin modeli) (HS) 65
7. BİR DERİN KAZIYA AİT İKSA SİSTEMİNİN GEOTEKNİK DEĞERLENDİRMESİ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ 69
7.1 Proje Alanının Tanıtılması ve İnşa Edilen Yapı Hakkında Bilgiler 69
7.2 İnceleme Alanı Jeolojisi 70
7.2.1 Genel jeoloji 70
7.2.2 Yerel jeoloji 71
7.3 Zemin Etüdü Çalışmaları 72
7.3.1 Proje alanında gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar çalışmaları 72
7.3.2 Sondaj kuyuları 73
7.3.3 Arazi deneyleri 73
7.3.3.1 Standart penetrasyon deneyleri (SPT) 73
7.3.3.2 Packer (Lugeon) geçirimlilik deneyleri 75
7.3.3.3 Jeofizik çalışmalar 76
7.3.4 Laboratuvar deneyleri 81
7.3.4.1 Zemin mekaniği deneyleri 81
7.3.4.2 Kaya mekaniği deneyleri 84
7.3.5 Zemin profili 85
7.3.5.1 Proje alanındaki zemin ve kaya birimlerin değerlendirilmesi 85
7.4 İksa Sistemi Tasarımı 85
7.4.1 Kazı ve imalat öncesi tasarım ile hesap kabulleri 88
7.4.2 İnşaat aşaması ve karşılaşılan sorunlar 92
7.4.3 Proje revizyonu 93

7.4.4 Proje sahasında gerçekleştirilen inklinometre okumaları 95
7.5 İksa Sisteminde Nümerik Analiz Çalışmaları 101
7.5.1 Zemin özelliklerinin duvar deplasmanlarına etkisi 101
7.5.1.1 Elastisite modülü etkisi 101
7.5.1.2 İçsel sürtünme açısı etkisi 103
7.5.1.3 Kohezyon değerinin etkisi 105
7.5.2 Ankraj özelliklerinin duvar deplasmanlarına etkisi 107
7.5.2.1 Ankraj kök boyunun etkisi 107
7.5.2.2 Ankraj açısının etkisi 108
7.5.2.3 Ankrajlar arası yatay mesafenin etkisi 109
7.5.2.4 Ankraj öngerme kuvvetlerinin etkisi 111
7.5.2.5 Ankraj halat çapının etkisi 112
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 117
KAYNAKLAR 121
EKLER 123
ÖZGEÇMİŞ 169

KISALTMALAR

AKO : Aşırı Konsolidasyon Oranı
ASTM : American Society for Testing and Materials
BH : Borehole
BS : British Standards
EI : Eğilme Rijitliği
EA : Normal Rijitlik/Eksenel Rijitlik
FHWA : Federal Highway Administration
HS : Hardening Soil
NP : Non-Plastic
MC : Mohr Coulomb
MT : Mikrotremör
MASW : Multichannel Analysis of Surface Waves
RQD : Rock Quality Designation
SCR : Solid Core Recovery
SPT : Standart Penetrasyon Testi
TCR : Total Core Recovery
TS : Türk Standartları
UD : Undisturbed Sample
USCS : Unified Soil Classification System
UU : Unconsolidated Undrained

SEMBOLLER

a : İki kazığın merkezleri arasındaki mesafe

Ak : Zemin büyütmesi

c : Kohezyon

C_c : Sıkışma indeksi

C_E : Enerji düzeltme faktörü

C_N : Jeolojik yük düzeltme faktörü

C_r : Yeniden sıkışma indeksi

c'_{ref} : Efektif kohezyon

C_R : Tij boyu düzeltme faktörü

C_S : Numune alıcısı için düzeltme faktörü

c_u : Drenajsız kayma mukavemeti

D : Kazık çapı

E : Elastisite modülü

e_{ini} : Başlangıç boşluk oranı

E_w : Duvarın elastisite modülü

E_0 : Başlangıç rijitlik modülü

E_{50} : Sekant rijitlik modülü

E_{50}^{ref} : Drenajlı üç eksenli deneyde gerilmelerin %50 seviyesindeki referans sekant rijitliği

E_{oed}^{ref} : Başlangıç ödometre yüklemesi için referans tanjant rijitliği

E_{ur}^{ref} : Yükleme/boşaltma rijitliği

G : Dinamik kesme modülü

Gs : Özgül ağırlık

h : Destekler arası düşey mesafe

H : Duvar yüksekliği

H_e : Kazı derinliği

I_w : Birim uzunluktaki duvarın atalet momenti

k : Permeabilite katsayısı

K_a : Aktif toprak basıncı katsayısı

K_p : Pasif toprak basıncı katsayısı

K_0 : Sükunetteki toprak basıncı katsayısı

K_0^{nc} : Normal konsolide zemin için sükunetteki toprak basıncı katsayısı

L : Ankraj kök boyu uzunluğu

LL : Likit limit

L_V : Lugeon katsayısı

m : Rijitliği gerilme seviyesine bağlayan katsayı

N_b : Zemin stabilite sayısı

N_{cb} : Taban kabarması için kritik stabilite sayısı

P_a : Aktif toprak basıncı

PI : Plastisite indisi

PL : Plastik limit

P_p : Pasif toprak basıncı

p^{ref} : Rijitlikler için referans gerilme

P_0 : Sükunetteki toprak basıncı

R : Bileşke kuvvet

R_f : Göçme oranı

R_{inter} : Arayüzey yük azaltma faktörü

s_h : İki ankraj arasındaki yatay mesafe

S_u : Drenajsız kayma mukavemeti

T_f : Maksimum yük kapasitesi

T_0 : Zemin hâkim titreşim periyodu

u : Boşluk suyu basıncı

U_x : Yatay deplasman

ν : Poisson oranı

V_s : Kayma dalgası hızı

V_{s30} : 30 metrenin ortalama kayma dalgası hızı

W : Kama ağırlığı

w_n : Su muhtevası

α : İksa sistemine gelen toprak basıncının duvarla yaptığı açı

β : İksa sisteminin arkasında kalan zeminin duvarla yaptığı açı

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

δ : Duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı

σ_h : Toplam yanal gerilme

σ'_h : Yatay efektif gerilme

σ'_v : Düşey efektif gerilme

ψ	: Dilatansi açısı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı (Kayma mukavemeti açısı)
ϕ'	: Efektif içsel sürtünme açısı
Ø	: Çap
υ_{ur}	: Yükleme boşaltma için poisson oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Zemin cinslerine göre tipik K_0 değerleri (Uzuner, 1990). **14**
Çizelge 4.1 : Bentonit özellikleri (TS EN 1538). **29**
Çizelge 4.2 : Öngermeli çelik halat özellikleri. **47**
Çizelge 4.3 : Zemin türlerine göre ankraj kök bölgesindeki tahmini sürtünme direnci (FHWA-IF-99-015, 1999). **49**
Çizelge 4.4 : Kaya türlerine göre ankraj kök bölgesindeki tahmini sürtünme direnci (FHWA-IF-99-015, 1999). **49**
Çizelge 7.1 : Sondaj özet bilgileri. **73**
Çizelge 7.2 : Düzeltme faktörleri. **74**
Çizelge 7.3 : Packer (Lugeon) deney sonuçları özet bilgileri. **76**
Çizelge 7.4 : Jeofizik çalışmalara ait özet bilgiler. **77**
Çizelge 7.5 : Dinamik/elastik parametrelerin mühendislik anlamları. **77**
Çizelge 7.6 : Vs hızlarına göre kohezyonlu ise kıvam durumu (Özaydın, 1982). **78**
Çizelge 7.7 : Vs hızlarına göre kohezyonsuz ise kıvam durumu (Özaydın, 1982). **78**
Çizelge 7.8 : MASW-1 etüdünden hesaplanan hızlar ve diğer parametreler. **78**
Çizelge 7.9 : MASW-2 etüdünden hesaplanan hızlar ve diğer parametreler. **78**
Çizelge 7.10 : Spektral büyütmelere göre mikro bölgeleme ölçütleri **79**
Çizelge 7.11 : Eurocode 8'de Vs_{30}'a göre belirlenen zemin sınıflaması. **79**
Çizelge 7.12 : Mikrotremör ölçümü değerlendirme sonucu elde edilen değerler. **80**
Çizelge 7.13 : BH-4 Vp, Vs hızları ve dinamik zemin parametreleri. **81**
Çizelge 7.14 : BH-5 Vp, Vs hızları ve dinamik zemin parametreleri. **81**
Çizelge 7.15 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri özeti. **83**
Çizelge 7.16 : Kesit özet tablosu. **87**
Çizelge 7.17 : Ankraj bilgileri. **87**
Çizelge 7.18 : İksa sistemi hesapları için önerilen geoteknik parametreler. **89**
Çizelge 7.19 : Tasarımda kullanılan zemin parametreleri. **90**
Çizelge 7.20 : Tasarımda plaka elemanlar için kullanılan parametreler. **90**
Çizelge 7.21 : Tasarımda ankraj elemanlar için kullanılan parametreler. **90**
Çizelge 7.22 : Tasarımda geogrid elemanlar için kullanılan parametreler. **91**
Çizelge 7.23 : Tasarım ve inşaat aşamalarındaki yanal deplasmanlar. **98**
Çizelge 7.24 : Farklı elastisite modülleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS). **102**
Çizelge 7.25 : Farklı elastisite modülleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC). **103**
Çizelge 7.26 : Farklı içsel sürtünme açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS). **104**
Çizelge 7.27 : Farklı içsel sürtünme açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC). **105**
Çizelge 7.28 : Farklı kohezyon değerleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS). **106**
Çizelge 7.29 : Farklı kohezyon değerleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC). **107**

Çizelge 7.30 : Farklı ankraj kök boyları için hesaplanan yanal deplasmanlar. **108**
Çizelge 7.31 : Farklı ankraj açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar. **109**
Çizelge 7.32 : Farklı ankraj yatay mesafeleri için hesaplanan yanal deplasmanlar. **110**
Çizelge 7.33 : Farklı ankraj halat çapları için hesaplanan yanal deplasmanlar. **111**
Çizelge 7.34 : Ankraj serbest boyu için kullanılan parametreler. **113**
Çizelge 7.35 : Ankraj kök boyu için kullanılan parametreler. **113**
Çizelge 7.36 : Farklı ankraj halat çapları için hesaplanan yanal deplasmanlar. **113**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Derin kazılarda stabilite problemleri. **4**
Şekil 2.2 : Peck (1969)'e göre zemin yüzeyindeki oturmaların tahmini (Ou, 2006)... **6**
Şekil 2.3 : Zeminin kayma dayanımı, kazı derinliği ve istinat duvarının rijitliğine göre zemindeki deplasmanlar (Puller, 2003) **7**
Şekil 2.4 : Derin kazı projesi uygulama adımları (Ekici, 2011). **10**
Şekil 3.1 : Destek sistemine belirli bir derinlikte etkiyen yanal toprak basınçları (Das, 2007). **12**
Şekil 3.2 : Duvara etkiyen yanal toprak basınçları (Das, 2007). **13**
Şekil 3.3 : Rankine aktif toprak basınçları (Kumbasar ve Kip, 1992). **15**
Şekil 3.4 : Rankine pasif toprak basınçları (Kumbasar ve Kip, 1992). **16**
Şekil 3.5 : Rankine aktif ve pasif toprak basınç bölgeleri (FHWA-IF-99-015, 1999). **17**
Şekil 3.6 : Sükunette, aktif ve pasif durumlardaki toprak basıncı değerlerinin Mohr dairesi ile gösterimi (Budhu, 2007). **17**
Şekil 3.7 : Coulomb kama teorisi aktif durum (Uzuner, 1990). **18**
Şekil 3.8 : Coulomb kama teorisi pasif durum (Uzuner, 1990). **19**
Şekil 3.9 : Terzaghi ve Peck yanal toprak basıncı diyagramları (FHWA-IF-99-015, 1999). **20**
Şekil 4.1 : Mini kazık uygulaması. **22**
Şekil 4.2 : Mini kazık şematik gösterimi. **23**
Şekil 4.3 : Dayanma yapısı olarak mini kazık. **24**
Şekil 4.4 : Mini kazık uygulaması. **24**
Şekil 4.5 : Palplanş önden görünüşü. **25**
Şekil 4.6 : Palplanş kesitleri. **25**
Şekil 4.7 : Palplanş imalatı. **26**
Şekil 4.8 : Diyafram duvar donatı yerleştirilmesi. **29**
Şekil 4.9 : Diyafram duvar imalatı. **30**
Şekil 4.10 : Kesişen kazık şematik gösterimi (a<D). **31**
Şekil 4.11 : Teğet kazık şematik gösterimi (a≈D). **31**
Şekil 4.12 : Aralıklı kazık şematik gösterimi (a>D). **31**
Şekil 4.13 : Fore kazık delgi makinesi. **34**
Şekil 4.14 : Donatı kafesinin kazık deliğine yerleştirilmesi. **36**
Şekil 4.15 : Fore kazık betonlama işlemi. **37**
Şekil 4.16 : Destek kirişleri (strut). **39**
Şekil 4.17 : Zemin çivileri. **40**
Şekil 4.18 : Ankrajı oluşturan bölümler. **41**
Şekil 4.19 : Yapım yöntemine göre ankrajlar. **43**
Şekil 4.20 : Ankrajlar elemanları. **44**
Şekil 4.21 : Öngermeli geçici ankraj detayı (ölçeksiz). **45**
Şekil 4.22 : Ankraj imalatı. **46**

Şekil 4.23 : İksa sisteminin kritik kayma düzleminin belirlenmesi (FHWA-IF-99-015, 1999). **48**
Şekil 4.24 : Ankrajlar arasındaki minimum yatay mesafe (FHWA-IF-99-015, 1999). **50**
Şekil 5.1 : İnklinometre cihazı parçaları. **53**
Şekil 5.2 : İnklinometre delgisinin yapılması. **54**
Şekil 5.3 : İnklinometre borularının birbirine eklenmesi. **55**
Şekil 5.4 : İnklinometre yerleştirme adımlarının şematik görünümü. **56**
Şekil 5.5 : Tamamlanmış inklinometre kuyusu ve okuma alınması. **57**
Şekil 6.1 : Zemin ortamında oluşan düğüm ve gerilme noktaları (PLAXIS 2D Reference Manual, 2019). **61**
Şekil 6.2 : Mohr-Coulomb göçme kriteri. **64**
Şekil 6.3 : Tanjant (E_0) ve sekant (E_{50}) modüllerinin tanımlanması. **64**
Şekil 6.4 : Drenajlı üç eksenli deneyde eksenel yüklemedeki hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi. **67**
Şekil 7.1 : Planlanan yapı tipik kesiti (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014). **70**
Şekil 7.2 : Proje sahasının genel jeoloji haritası (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014). **71**
Şekil 7.3 : Alüvyon birimlerin düzeltilmiş SPT/$(N_1)_{60}$ değerleri. **75**
Şekil 7.4 : Packer (Lugeon) deney sonuçlarının kot ile değişim grafiği. **76**
Şekil 7.5 : Zeminlerin indeks özelliklerinin kot ile değişimi. **82**
Şekil 7.6 : Tek eksenli basınç dayanımının kot ile değişimi. **84**
Şekil 7.7 : Poisson oranı ve deformasyon modülünün kot ile değişimi. **84**
Şekil 7.8 : Zemin modeli. **86**
Şekil 7.9 : İksa sistemi plan görünüşü. **88**
Şekil 7.10 : İksa sistemi kesit görünüşü. **88**
Şekil 7.11 : Plaxis analiz modeli. **91**
Şekil 7.12 : Zemindeki toplam deplasman grafiği. **91**
Şekil 7.13 : Kazıktaki yanal deplasman grafiği. **92**
Şekil 7.14 : Karşılaşılan diabaz birimleri (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014). **93**
Şekil 7.15 : Revize edilen iksa sisteminin kesit görünüşü. **93**
Şekil 7.16 : Plaxis analiz modeli (revize edilen tasarım). **94**
Şekil 7.17 : Zemindeki toplam deplasman grafiği (revize edilen tasarım). **94**
Şekil 7.18 : Kazıktaki yanal deplasman grafiği (revize edilen tasarım). **95**
Şekil 7.19 : Kesit 3'te karşılaşılan aşırı deplasmanlar. **96**
Şekil 7.20 : Kesit 3'teki ek ankrajların imalatı (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014). **97**
Şekil 7.21 : Kesit 3'teki yanal deplasmanlar. **97**
Şekil 7.22 : Proje sahasının havadan görünümü (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014). **98**
Şekil 7.23 : İnklinometre okumaları. **99**
Şekil 7.24 : İlk tasarımda öngörülen yanal deplasman değerlerinin inklinometre okumaları ile karşılaştırılması. **100**
Şekil 7.25 : Alüvyon birimlerde elastisite modülüne göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **102**
Şekil 7.26 : Kaya birimlerde elastisite modülüne göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **103**
Şekil 7.27 : Alüvyon birimlerde içsel sürtünme açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **104**

Şekil 7.28 : Kaya birimlerde içsel sürtünme açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **105**
Şekil 7.29 : Alüvyon birimlerde kohezyon değerlerine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **106**
Şekil 7.30 : Kaya birimlerde kohezyon değerlerine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **107**
Şekil 7.31 : Ankraj açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **109**
Şekil 7.32 : Ankraj yatay mesafesine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği. **110**
Şekil 7.33 : 40-85ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **111**
Şekil 7.34 : 45-90ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **112**
Şekil 7.35 : 50-95ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **112**
Şekil 7.36 : 0.5” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **114**
Şekil 7.37 : 0.6” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **114**
Şekil 7.38 : 0.7” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri. **115**
Şekil A.1 : Zemin etütleri yerleşim planı (ölçeksiz). **124**
Şekil A.2 : BH-01 sondaj logu, sayfa 1. ..... **125**
Şekil A.3 : BH-01 sondaj logu, sayfa 2. ..... **126**
Şekil A.4 : BH-01 sondaj logu, sayfa 3. ..... **127**
Şekil A.5 : BH-01 sondaj logu, sayfa 4. ..... **128**
Şekil A.6 : BH-02 sondaj logu, sayfa 1. ..... **129**
Şekil A.7 : BH-02 sondaj logu, sayfa 2. ..... **130**
Şekil A.8 : BH-02 sondaj logu, sayfa 3. ..... **131**
Şekil A.9 : BH-02 sondaj logu, sayfa 4. ..... **132**
Şekil A.10 : BH-02 sondaj logu, sayfa 5. ..... **133**
Şekil A.11 : BH-03 sondaj logu, sayfa 1. ..... **134**
Şekil A.12 : BH-03 sondaj logu, sayfa 2. ..... **135**
Şekil A.13 : BH-03 sondaj logu, sayfa 3. ..... **136**
Şekil A.14 : BH-03 sondaj logu, sayfa 4. ..... **137**
Şekil A.15 : BH-03 sondaj logu, sayfa 5. ..... **138**
Şekil A.16 : BH-04 sondaj logu, sayfa 1. ..... **139**
Şekil A.17 : BH-04 sondaj logu, sayfa 2. ..... **140**
Şekil A.18 : BH-04 sondaj logu, sayfa 3. ..... **141**
Şekil A.19 : BH-04 sondaj logu, sayfa 4. ..... **142**
Şekil A.20 : BH-04 sondaj logu, sayfa 5. ..... **143**
Şekil A.21 : BH-05 sondaj logu, sayfa 1. ..... **144**
Şekil A.22 : BH-05 sondaj logu, sayfa 2. ..... **145**
Şekil A.23 : BH-05 sondaj logu, sayfa 3. ..... **146**
Şekil A.24 : BH-05 sondaj logu, sayfa 4. ..... **147**
Şekil A.25 : BH-05 sondaj logu, sayfa 5. ..... **148**
Şekil B.1 : Kesit 1-1’. **149**
Şekil B.2 : Kesit 2-2’. **150**
Şekil B.3 : Kesit 3-3’. **151**
Şekil C.1 : Başlık kirişi kırımı. **152**
Şekil C.2 : Başlık kirişi donatı imalatı. **152**
Şekil C.3 : Kazık imalatları. **153**
Şekil C.4 : Ankraj imalatları ve kazı. **153**
Şekil D.1 : E=50MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **154**

Şekil D.2 : E=100MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **154**
Şekil D.3 : E=150MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **155**
Şekil D.4 : E=200MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **155**
Şekil D.5 : E=250MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **156**
Şekil D.6 : E=300MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **156**
Şekil D.7 : E=350MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **157**
Şekil D.8 : E=400MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **157**
Şekil D.9 : E=450MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **158**
Şekil D.10 : E=500MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar. **158**
Şekil E.1 : ϕ=27° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **159**
Şekil E.2 : ϕ=29° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **159**
Şekil E.3 : ϕ=31° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **160**
Şekil E.4 : ϕ=33° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **160**
Şekil E.5 : ϕ=35° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **161**
Şekil E.6 : ϕ=37° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **161**
Şekil E.7 : ϕ=39° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **162**
Şekil E.8 : ϕ=41° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **162**
Şekil E.9 : ϕ=43° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **163**
Şekil E.10 : ϕ=45° için kazıktaki yanal deplasmanlar. **163**
Şekil F.1 : 10° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar. **164**
Şekil F.2 : 10° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü. **164**
Şekil F.3 : 15° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar. **165**
Şekil F.4 : 15° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü. **165**
Şekil F.5 : 20° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar. **166**
Şekil F.6 : 20° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü. **166**
Şekil F.7 : 25° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar. **167**
Şekil F.8 : 25° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü. **167**
Şekil F.9 : 30° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar. **168**
Şekil F.10 : 30° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü. **168**

ÖNGERMELİ ANKRAJLI KESİŞEN KAZIKLI İKSA SİSTEMİ: BİR VAKA ANALİZİ VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Derin kazılar geoteknik mühendisliğinin en önemli inceleme alanlarından biridir. Yatay ve düşey destek elemanlardan oluşan derin kazı sistemleri çok bodrumlu ve çok katlı yapıların inşası sırasında hem yapılacak yapılar hem de çevredeki yapılar için güvenli bir çalışma alanı yaratabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Sisteme etkiyen toprak ve su basınçları ile sürşarj yüklerinin yatay ve düşey destek elemanları ile zemine güvenli bir şekilde aktarılması sağlanmaktadır. Bu tez kapsamında, kesişen kazıklı öngermeli ankrajlı destek sistemi incelenmiştir. Tezin konusu çok bodrumlu ve çok katlı bir yapının inşası için gereken derin kazı destek sisteminin tasarlanması, kazı sırasında karşılaşılan problemler sonucu projede yapılan revizyonlar ve iksa sistemindeki yanal deplasmanlara etki eden parametrelerin araştırılmasıdır.

Bu tez kapsamında Plaxis 2D 2020 sonlu elemanlar programı kullanılarak bir vaka analizi yapılmıştır. Geçirimsiz bir perde yaratmak amacıyla kesişen kazıklı iksa sistemi tercih edilmiştir. Bu derin kazının zemin etütleri, parametrelerin seçilmesi ve inşaat aşaması da dahil tüm bölümleri detaylıca incelenmiştir. Daha sonra Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak sistemin son revizyonu modellenmiş ve çeşitli parametrelerin iksa sisteminde meydana gelen yanal deplasmanlara olan etkileri yapılan analizler ile araştırılmıştır.

Tezin ilk bölümünde derin kazılara duyulan gereksinim ve geoteknik mühendisliğindeki yerine değinilmiş, ayrıca teze konu edilen proje ve yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde derin kazı destek sistemleri tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususlar ve derin kazı tasarımı yapılmadan önce gerçekleştirilmesi gereken çalışmalara değinilmiştir. Derin kazılar getirdiği avantajların yanı sıra bazı problemlere de sebep olabilmektedir. Planlanan kazı gerçekleştirilmeden önce çalışılacak saha hakkında doğru ve yeterli bilgiye sahip olmak, güvenli ve ekonomik bir kazının olmazsa olmaz şartlarından birisidir. Derin kazı sırasında karşılaşılabilecek sorunlar ve çözümleri ile kazı öncesi yapılması gereken çalışmalardan bu bölümde bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde geoteknik mühendisliği problemlerinde oldukça önemli bir tasarım unsuru olan yanal toprak basınçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Destek sistemine etkiyen yanal toprak basınçlarının hesaplanmasına yönelik geliştirilen teorilere ve başlıca toprak basıncı diyagramlarına bu bölümde yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde uygulamada ve literatürde başlıca bilinen ve uygulanan düşey ve yatay destek elemanları hakkında bilgiler verilmiştir. Teze konu olan kazıklı duvarlar ile öngermeli ankrajlara daha detaylı olarak değinilmiştir. Kazıkların tipleri, yapım yöntemleri ile öngermeli ankrajların sınıflandırılması, ankraj elemanlarının detaylı

açıklamaları, kritik kayma düzleminin belirlenmesi, serbest ve kök boylarının hesabı hakkında kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır.

Beşinci bölümde iksa sistemlerinde aletsel gözlemin önemi ve amacı üzerinde durulmuştur. Derin kazının her aşamasında belirli aralıklarla oluşan deformasyonların takip edilmesi, kazıdan kaynaklanan deformasyonlar sonucu inşa edilen yapının, çevre yapıların veya civardaki altyapıların zarar görüp görmediğinin hızlı şekilde tespit edilmesi oldukça önemlidir. Aletsel gözlem ile kazı boyunca oluşabilecek herhangi bir sorunun önceden tespit edilip gerekli önlemlerin alınması hızlı ve ekonomik şekilde sağlanır. Tez kapsamında incelenen kazı alanındaki deplasmanların takibi yaygın olarak kullanılan inklinometrelerle gerçekleştirildiği için bu bölümde inklinometrelere detaylı olarak yer verilmiştir.

Altıncı bölümde Plaxis 2D 2020 sonlu elemanlar programı tanıtılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık birçok mühendislik problemini daha basite indirgeyerek çözmeyi sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında ele alınan derin kazı Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. Vaka analizinin modellenmesinde kullanılan hardening soil ve Mohr-Coulomb modelleri hakkında detaylı bilgiler verilerek sisteme tanıtılan zemin ve yapı elemanlarından detaylı olarak bahsedilmiştir.

Yedinci bölümde teze konu olan proje tanıtılmış ve kazı öncesi yapılan zemin etüt çalışmalarından bahsedilmiştir. İmalat öncesi tasarım ve hesap kabülleri verilmiş, daha sonra proje aşamasında karşılaşılan sorunlar sonucu projede gerçekleştirilen revizyonlar anlatılmıştır. Kazı aşamalarının tamamında alınan inklinometre okumalarından da yine bu bölümde bahsedilmiştir. Daha sonra bu modelde iksa sistemindeki deplasmanların incelenmesi amacıyla farklı parametreler ile nümerik çalışmalar yapılmıştır. Hem hardening soil hem de Mohr-Coulomb bünye modelinde ortak olan elastisite modülü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametrelerinin yanal deplasmanlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca ankraj kök boyu, ankraj açısı, ankraj yatay mesafesi, germe kuvveti ve halat çapının da yanal deplasmanlar üzerindeki etkisi sistem geometrisindeki diğer özellikler sabit tutularak araştırılmış, elde edilen sonuçlar grafikler ile sunulmuştur.

Tezin son bölümünde tez kapsamında yapılan çalışmalar özetlenerek yapılacak başka çalışmalarda yararlanılması amacıyla sonuç ve önerilere yer verilmektedir. Kazı öncesi çalışmaların önemi ile kazı boyunca gerçekleştirilen aletsel gözlemlerin tasarımın kalite kontrolü ve gerekmesi durumunda hızlı ve güvenli olarak revizyon yapılmasına imkân sağladığından bahsedilmiştir. Farklı zemin parametrelerinin ve ankraj özelliklerinin iksa sisteminde oluşan yanal deplasmanlar üzerindeki etkileri yapılan analizler sonucu irdelenmiştir.

PRESTRESSED ANCHORED SECANT PILE WALL: A CASE STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS

SUMMARY

Deep excavations are one of the most important investigation area of geotechnical engineering. Deep excavation systems which consisted by lateral and vertical support elements are using in order to create a safe working area for construction site and neighbor structures during the construction period of high-rise buildings or the structures that has more basement floors. Transmitting of earth and water pressures and surcharge loads that effecting on the support system are carried out by lateral and vertical support elements from support system to ground safely. Lateral earth pressures are vital element of many deep excavation design as well as being part of geotechnical engineering. The earth pressures that stem from behind of the retaining wall need to be calculated accurately in order to provide safety and affordable construction of deep excavations. Hence, comprehensive informations must be taken, adequate proportion of geotechnical investigations have to be done, underground water level must be defined. The safe and affordable support system ought to be chosen through considering all these requirements described above. Secant pile with prestressed ground anchor support system is investigated in this thesis. The subjects of this thesis are requirements of the design of the deep excavation support system, encountered problems during the construction period and the investigation of parameters which effected to the lateral displacements on the support system for the construction of high-rise building or the structures has more basement. Moreover, the significance of to using instrumental monitoring regularly during the construction period is also included to scope of this thesis. In addition, the inclinometer readings compared with the design limits during the investigated construction of deep excavation.

In this thesis, one of case study has investigated by using Plaxis 2D 2020 finite elements program. Secant pile support system has preferred in order to create an impermeable wall. Soil investigation of this deep excavation, selection of parameters and also all sections including construction period of this deep excavation are investigated detailed. Then, the last revision of the system has been modelled by using Plaxis finite elements program and various parameters that could be effect to the lateral displacements existing on the support system are investigated with analyses.

In the first section of this thesis, necessity of the deep excavation and importance for geotechnical engineering are explained. Also, information given regarding the background studies and the subject matter project.

In the second section of this thesis, points to take into consideration during the design of deep excavation support system and the studies which need to be completed before deep excavation design period are mentioned. Deep excavations could be caused such problems as well as to have the edge over. The negative consequences such as stability problems, land upheavel and some the problems caused by displacements has been investigated through making a broader literature review and the measurements given

in this section. Before the planned excavation carried out, to taking correct and adequate information regarding the working site is the one of indispensable thing of the safe and economic excavation. Therefore, being well-versed in excavation area and it's topography, doing enough geotechnical investigations are vitally required for the design of deep excavations. Encountered problems during the construction period and solutions for them and the studies which need to be carried out before the excavation are mentioned in this section.

In the third section of this thesis, the lateral earth pressure which being very important design element on geotechnical engineering problems is investigated detailed. Earth pressure stemming from behind of the retaining wall need to be defined accurately in order to safe and affordable design of retaining walls. Developed theories for the calculating of lateral earth pressure to effecting vertical support system and main earth pressure diagrams are figured in this section.

In the fourth section of this thesis, information regarding the lateral and vertical support system elements that mainly known in practices and literature are given. The method of statement of vertical support elements such as micropiles, sheet piles, diaphragm walls and bored piles are discussed. In addition, behaviour of lateral support system elements such as struts, soil nails and prestressed anchors are researched. Hereby, subject matter secant pile and prestressed ground anchors are defined much detailed. A comprehensive literature study has performed regarding the types of piles, method of statements and classification of prestressed ground anchors, detailed explanation of anchor elements, determination of potential failure surface and free and bonded length calculations.

In the fifth section of this thesis, importance and purposes of instrumental monitoring discoursed. It's important that to realizing constructed structure or neighbor structures or infrastructures around the site are been effected or not from the sum of displacements due to the excavation. In addition, monitoring to displacements that occurred at certain intervals for every period of deep excavation is very important. By the instrumental monitoring, the problems which could be encountered at during the construction period can determine and the corrective actions and solutions could be taken earlier as quickly and economic. Monitoring of displacements has performed by inclinometer (as a common usage) on the investigated subject matter area in this thesis. Therefore, inclinometers mentioned as comprehensive is in this section.

In the sixth section of this thesis, Plaxis 2D 2020 finite elements program is presented. The finite elements method is providing the solution of many complicated engineering problems by popularizing. The subject matter deep excavation is modelled by Plaxis 2D finite elements program. Unidimensional models are usually enough for much simple structures, while two or three-dimensional models are using to solve much complicated problems such as retaining walls and deep excavations. Soil and structure elements are been explained in detail with giving information regarding the hardening soil and Mohr-Coulomb models to forming of case study.

In the seventh section of this thesis, subject matter project presented and soil investigation studies mentioned. Supported excavation system in which constructed for foundation of the structure that contained seven basement, one ground floor and seven-story is investigated in this chosen project as a case study. In this section of this thesis, firstly, investigated project has been introduced and drilling data's, site and laboratory test results are given. Secondly, it is decided that prestressed ground anchor with secant piles are suitable for support system with concerning all these

informations. Finally, Hardening Soil and Mohr-Coulomb models which offered in geotechnical report are chosen as design parameters. Pre-construction design and calculation assumptions are given, then revisions which obtained from encountered problems during the design phase are explained. The all inclinometer readings that taken from every period of excavation are also mentioned in this section. Furthermore, numerical studies are performed with different parameters in order to investigation of displacements on the support system in this model. The effect of common elasticity module between hardening soil and Mohr-Coulomb models, internal friction angle and cohesion parameter on lateral displacements are investigated. Moreover, anchor bonded length, anchor angle, horizontal anchor spacing, prestressing load and tendon diameter effects on lateral displacements are investigated by taking all different properties of system as constant and the results were given with graphs.

In the last section of this thesis, all studies are summarized and conclusions and recommendations are given in order to be sample on another studies. It's mentioned that how pre-excavation studies and instrumental monitoring during the construction period are important for providing the quality control of the design and giving chance to making revision quickly and safely in case of any requirement. Effect of the chosen parameters on the lateral displacements existing on support system are investigated accordingly the results taken from analyses.

1. GİRİŞ

Hızlı nüfus artışından dolayı şehirlerde artan yapılaşma, yapı kullanım alanlarının etkin bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Yapılaşma alanlarındaki ciddi azalma, çok katlı ve çok bodrumlu yapıların inşasına olan yönelim derin kazıların yapılmasını gerektirmektedir. Derin kazılar geoteknik mühendisliğinin önemli inceleme alanlarından biridir.

Kentsel bölgelerde yer üstündeki katlar kadar yer altındaki katlar da önemli bir konuma gelmiştir. Konut projelerinde bodrum katlar depo, kalorifer veya otopark olarak ilave kullanım alanı sağlarken, alışveriş merkezi, hastane, havalimanı, otogar gibi kalabalık kitleleri aynı anda bulundurabilen yapılarda öncelikli olarak otopark sorununa bir çözüm getirmektedir. Ancak derin kazılar, özellikle sıkışık yapılaşmanın olduğu kentlerde komşu yapıların varlığı, altyapı gibi kamuya ait alanların bulunması gibi nedenlerle sınırlanmaktadır. Bu nedenle önce güvenli bir kazı yapabilmek, sonra çevredeki yapılara zarar vermemek için derin kazıların çeşitli destek elemanları ile yapılması gerekmektedir. Doğru ve ekonomik destek elemanlarının seçimi, boyutlandırılması ve tasarımı yapılırken, derin kazıların performansını etkileyecek olan destekleme sistemi ve komşu yapılarda oluşabilecek oturmalar, deplasmanlar ve ortamın geoteknik koşulları gibi birçok önemli faktör birlikte değerlendirilmelidir.

Derin kazıların tasarımındaki en önemli hususlardan biri ortamın geoteknik koşullarının çok iyi belirlenmesidir. Ortam koşullarında öngörülemeyen durumlardan dolayı planlanan imalattaki değişiklikler, oluşabilecek güvenlik problemleri neticesinde doğabilecek maliyetler gibi istenmeyen sonuçlar meydana gelebilir. Yeterli ve doğru arazi etütlerinin yapılması ve aletsel gözlem sistemi ile tasarım kabullerinin doğruluğunun kontrolü kritik önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında incelenen derin kazı inşaatında, inşaat aşamalarında inklinometre ölçümleri alınarak, yanal deplasmanlar belirlenen tasarım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Dikdörtgen şeklinde bir plana sahip olan kazının dört tarafında istinat sistemi tasarımı yapılmıştır. İstinat sisteminin üç tarafında deplasman değerleri

hesaplanan değerlere yakın çıkarken, bir tarafta kazı sırasında aşırı deplasman değerleri ölçülmüştür. Bu durumun yanı sıra fore kazık delgileri sırasında sahada karşılaşılan ve çok sert olan diabaz blokları nedeniyle kazıklar tasarlanan derinlikte yapılamamış ve bu da projede revizyonu gerekli kılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında aşırı deplasmanın ölçüldüğü ve kaya dalımının görüldüğü kritik kesit-3 incelenmiştir. Kazı süresince aletsel gözlem okumalarının düzenli olarak alınması, sahada karşılaşılan problemler ve oluşabilecek başka problemleri önlemek amacıyla projede bazı revizyonlar yapılmıştır. Ayrıca iksa sisteminde meydana gelen yanal deplasmanları etkileyen faktörler sonlu elemanlar programı kullanılarak nümerik olarak incelenmiştir. Programa girilen bazı zemin parametreleri ile öngermeli ankrajların özellikleri değiştirilerek, aynı geometri modeli üzerinde sistem parametreleri değiştirilmeden analizler yapılmış ve bunların iksa sisteminin rijitliğine olan etkileri araştırılmıştır.

2. DERİN KAZILAR

Derin kazılar, her ne kadar birçok avantajlı durumu beraberinde getirse de bazı sorunların çözümünü de gerektirmektedir. Derin kazılar neticesinde karşılaşılacak problemler şöyledir:

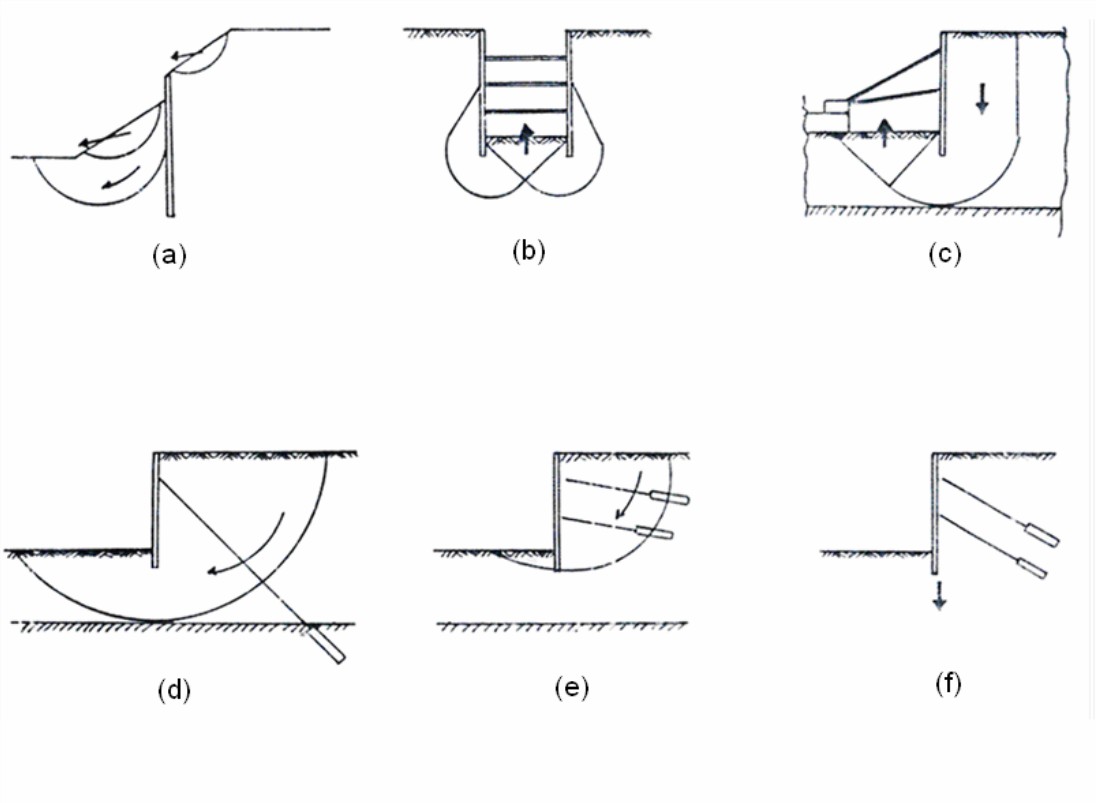
- Stabilite problemleri
- Zemin kabarması
- Deplasmanlar

2.1 Derin Kazı Destek Sistemi Tasarlanırken Dikkat Edilmesi Gereken Durumlar

2.1.1 Stabilite problemleri

Tasarlanan derin kazı iksa sistemi ister geçici ister kalıcı olsun, göçmeye karşı yeterli güvenlik sayılarını sağlamak zorundadır. Zeminin mühendislik parametrelerinin hesabında yapılacak yanlışlıklar, mevcut yapıların ve inşaat sahasının topografyası belirlenirken yapılan eksiklikler, inşaat süresi boyunca iksaya gelebilecek ve hesaplara dahil edilmeyen yakın yerlerde depo, ağır araç bulundurma, hafriyat gibi durumlardan kaynaklanabilecek sürşarj yükleri, yeraltı suyu seviyesinde meydana gelebilecek değişiklikler, kazıklar arasında kemerlenmenin oluşmamasıyla kazık aralarından malzeme akması gibi nedenlerden dolayı derin kazılarda aşağıdaki stabilite problemleri ortaya çıkabilir (Dumlu, 1988):

- İksa sisteminin önündeki veya arkasındaki şevin kayması (Şekil 2.1.a)
- Toptan göçme (Şekil 2.1.c, Şekil 2.1.d, Şekil 2.1.e)
- Taban kabarması (Şekil 2.1.b)
- Oturmalar (Şekil 2.1.f)



Şekil 2.1 : Derin kazılarda stabilite problemleri.

2.1.2 Taban kabarması

Kazı sırasında kaldırılan zemin ile birlikte jeolojik yükün de kaldırılması nedeniyle kazı tabanındaki kayma gerilmeleri artmaktadır. Yanal destek elamanlarının yeterince sağlam olduğu kabul edilirse kazı tabanındaki kayma gerilmesinin zemindeki kayma direncini aşması durumunda oluşacak durum taban kabarması olarak isimlendirilmektedir (Şekil 2.1.b). Taban kabarması genellikle yumuşak kohezyonsuz zeminlerde görülür ve taşıma kapasitesi yüksek olan grovak birimlerde rastlanmaz.

2.1.3 Deplasmanlar

Kentleşme ve artan nüfus ile birlikte yapılaşma alanlarında yaşanan kısıtlama, mevcut araziyi en etkili şekilde kullanmayı gerekli kılmıştır. Bu kısıtlama ile birlikte komşu yapılara daha fazla yaklaşılmış ve bunun sonucu olarak kazı sistemi ile birlikte civardaki yapıların da güvenliğinin sağlanması zorunluluğu doğmuştur. Böylelikle yapılacak olan derin kazılarda meydana gelecek deplasmanlara sınırlama getirilmesi gerekmiştir.

Derin kazıların yapılması srasında meydana gelebilecek deplasmanların derecesini etkileyen en önemli etkenler aşağıdaki gibidir:

- Zeminde meydana gelecek farklı gerilmelerin etkisi
- Kazı büyüklüğü
- Zemin cinsi
- Yeraltı suyu seviyesi
- İksa sisteminin rijitliği
- İmalat yöntemi ve işçilik

2.1.3.1 Zeminde meydana gelecek farklı gerilmelerin etkisi

Kazının ilerleyen aşamalarında jeolojik yükün kaldırılmasıyla birlikte yanal ve düşey yönde meydana gelecek gerilme düşüşüyle, zemin gerilmelerindeki ve boşluk suyu basıncındaki değişiklikler zemindeki şekil değiştirmelere neden olan etkenlerin başında gelmektedir. Konsolidasyon olurken boşluk suyu basıncında yaşanan azalmanın hızı zeminin permeabilitesi ile alakalıdır.

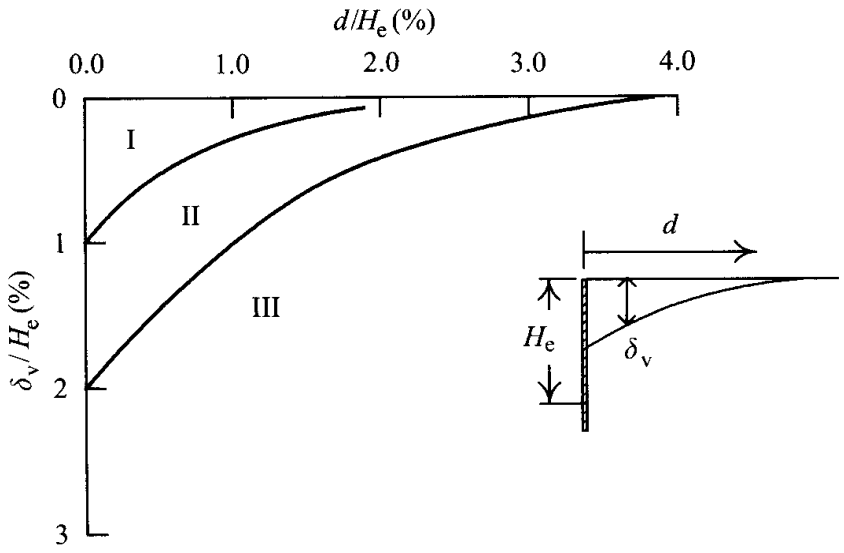
2.1.3.2 Kazı büyüklüğü

Kazı planı, şekli, alanı, kazı derinliği gibi faktörler kazı çevresindeki ve kazının tabanındaki deplasmanların büyüklüğünü etkilemektedir. Tomlinson (1980)'a göre çelik destekli veya ankraj destekli derin kazılarda, kazı içine doğru, kazı derinliğinin yumuşak killer için %25, sıkı kaba daneli ya da sert killer için %0.05 mertebesinde bir hareket olması kaçınılmazdır (Puller, 2003).

2.1.3.3 Zemin cinsi

Derin kazıya komşu alanda gerçekleşen yanal hareketlerin ve oturmaların sert/sıkı zeminlerde yumuşak/gevşek zeminlere oranla daha az olduğu Peck (1969) tarafından Şekil 2.2'de gösterildiği gibi özetlenmektedir (Puller, 2003).

Bunun yanı sıra yüksek su muhtevasına sahip kohezyonsuz gevşek zeminlerde, su ile beraber kazık aralarından malzeme akması da meydana gelerek çökmeye neden olabilir.



Şekil 2.2 : Peck (1969)'e göre zemin yüzeyindeki oturmaların tahmini (Ou, 2006).

Bu yöntemde, zemin özelliklerine göre üç tipte sınıflandırılmaktadır (Ou, 2006):

Tip I: Kum ve yumuşak-sert kil, ortalama işçilik

Tip II: Çok yumuşak-yumuşak kil

1. Kazı tabanı altındaki sınırlı kil derinliği
2. Kazı tabanı altındaki önemli miktarda kil derinliği, $N_b<N_{cb}$

Tip III: Kazı tabanı altında önemli bir derinliğe sahip çok yumuşak-yumuşak kil, $N_b \geq N_{cb.}$

$$N_b = \frac{\gamma . H_e}{S_u} \qquad (2.1)$$

Burada;

N_b: Zemin stabilite sayısı

γ: Zeminin doğal birim hacim ağırlığı

H_e: Kazı derinliği

S_u: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

N_{cb}: Taban kabarması için kritik stabilite sayısıdır.

2.1.3.4 Yeraltı suyu seviyesi

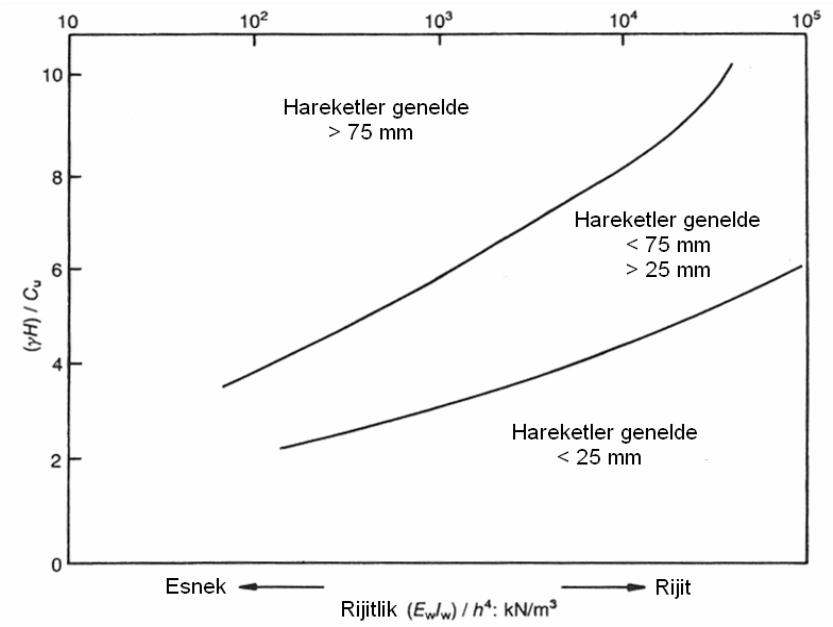
Yeraltı suyu iksa sistemlerinde önlem alınmaması durumunda stabilite problemlerine neden olabilecek büyük yatay deplasmanları ortaya çıkarabilecek ciddi bir problemdir.

Kazıklı sistemlerde suyun tahliye edilmemesi durumunda kazık aralarından kazı içine akması durumu söz konusu olabilir. Palplanş duvarlarda ise geçirimli tabakanın geçilememesi durumunda su akışı palplanş duvarın altından kazı tabanına doğru olabilir. Bu sebeple yeraltı suyu seviyesi azalarak zeminin efektif gerilmesi artacak ve bunun sonucunda oturmalar oluşacaktır. Ayrıca, kazı tabanına ilerleyen yeraltı suyu nedeniyle buradaki su muhtevası artacak, bunun sonucunda palplanş önündeki pasif direnç azalarak kazı içine doğru daha fazla yanal deplasman meydana gelecektir.

2.1.3.5 İksa sisteminin rijitliği

Winkler yay modelinin sonucu olarak sonlu elemanlar programları ve sahada yapılan gözlemler sonucu iksa sistemindeki kazık veya palplanş duvar ile bunları destekleyen yanal desteklerin rijitliği, zemindeki şekil değiştirmelerin büyüklüğüyle doğrudan ilişkilidir.

Goldberg ve diğerleri, iksa duvarı ve yanal desteklerin rijitliği ile yanal destekler arası düşey mesafenin zeminde meydana gelen deformasyonla bağlantılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu bağlantı Şekil 2.3'te görülmektedir (Ük, 2009).



Şekil 2.3 : Zeminin kayma dayanımı, kazı derinliği ve istinat duvarının rijitliğine göre zemindeki deplasmanlar (Puller, 2003)

Burada;

h: Destekler arası düşey mesafe

E_w: Duvarın elastisite modülü

I_w: Birim uzunluktaki duvarın atalet momenti

$\gamma.H$: Jeolojik yük

c_u: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

2.1.3.6 İmalat yöntemleri ve işçilik

Deformasyonları etkileyen bir diğer etken de seçilen imalat yöntemleridir. Bunun yanı sıra yapılan işçiliğin kalitesi de deformasyonları doğrudan etkiler. Kalitesiz işçilik ve imalatlar sırasında standartlara uyulmaması, stabilite problemlerine yol açmaya ve iksa sisteminde göçmeye bile neden olabilmektedir. Hafriyatların bir anda çok fazla yapılması, yanal destek imalatlarında yaşanan gecikmeler, kazık boylarının ve kazık açıklıklarının projeye uygun imal edilmemesi gibi faktörler iksa güvenliğini riske atacaktır.

2.2 Derin Kazıların Tasarımından Önce Yapılması Gereken Çalışmalar

2.2.1 Kazı alanı ve topografyası

Kazı alanının boyutları ile kazı ve çevresinin topografik durumunun bilinmesi, güvenli ve ekonomik bir tasarım yapabilmek için kritiktir. Tasarlanan sisteme gelecek olan yükleri belirlemek için alanın topografyası çok iyi bilinmelidir.

2.2.2 Geoteknik incelemeler

Sadece derin kazılar için değil, tüm yapıların temellerinin oturacağı zeminin geoteknik özelliklerinin bilinmesi, sistemin tasarımının doğru şekilde yapılabilmesi için çok önemlidir. Tasarımda kullanılacak olan zemin parametrelerinin seçilmesinde, doğru ve yeterli zemin etüdü çalışması önemli bir rol oynamaktadır.

Geoteknik incelemeler; kazı alanının boyutlarına göre yeterli sayıda sondaj, arazi deneyleri (presiyometre, permeabilite gibi), gerekmesi durumunda jeofizik ölçümler, aletsel gözlem ve laboratuvar çalışmalarından oluşmaktadır. Sondaj loglarından idealize zemin profillerinin çıkarılması ve kazı sırasında karşılaşılacak zemin

tabakaları hakkında yeterli bilgi edinilmesi, doğru kazı destek sisteminin seçilmesinde büyük önem arz etmektedir.

2.2.3 Yeraltı su seviyesi

Yeraltı suyu iksa sistemine ve kazı davranışına etki eden kritik bir faktördür. Yapılacak arazi etütleri ile alandaki yeraltı su seviyesi belirlenmeli ve iksa sistemi buna göre seçilmelidir. Çalışma alanının kuru tutulması için pompalar kullanılabilir ya da geçirimsizliği sağlamak için kesişen kazık, palplanş veya diyafram duvar gibi destek sistemleri seçilebilir.

2.2.4 Komşu yapılar ve yeraltı yapıları

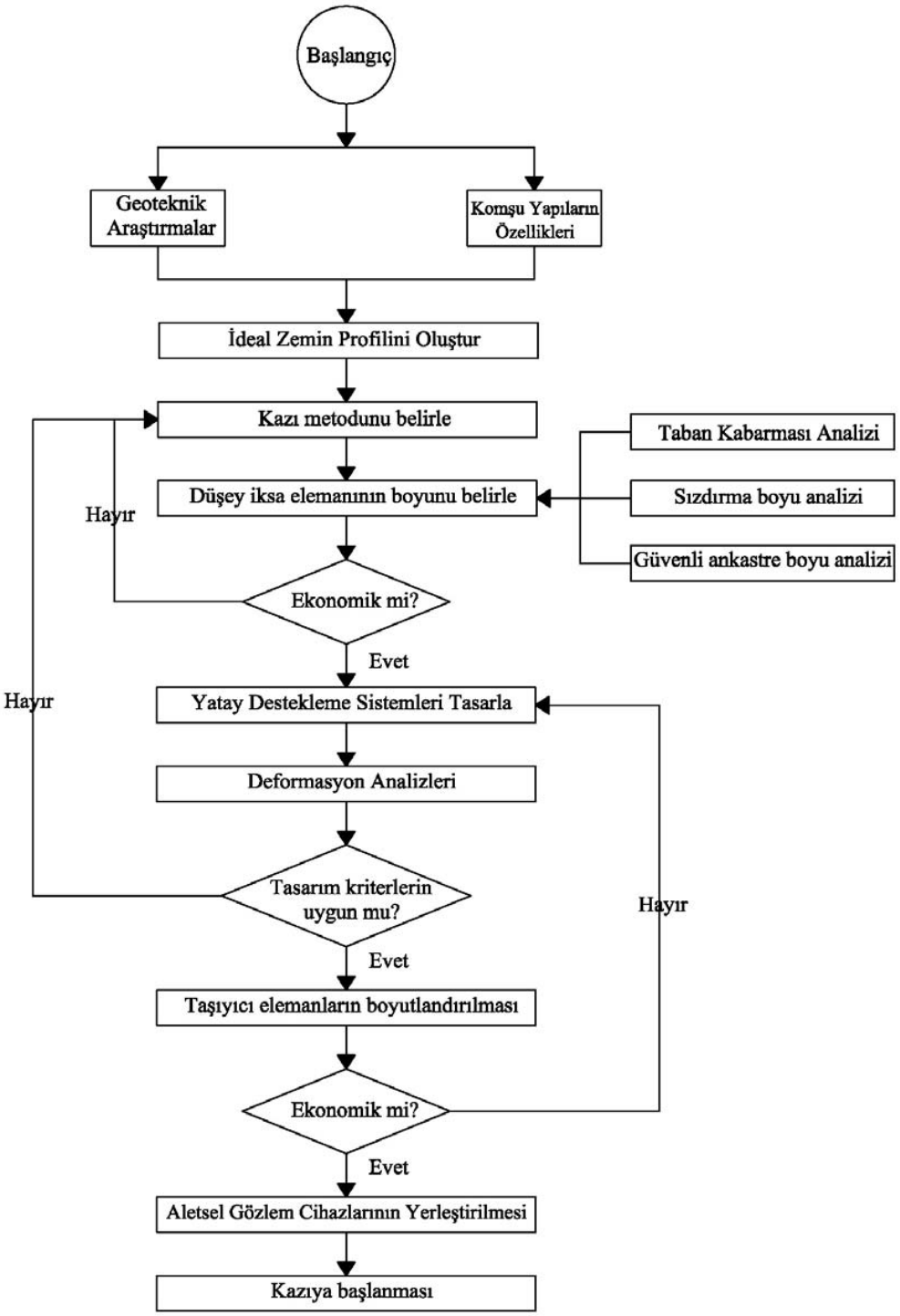
Derin kazılar genellikle sıkışık kentsel bölgelerde tercih edildikleri için çevrelerinde yapılar bulunmakta ve bu yapıların temelleri, temel derinlikleri ve bodrum kat sayıları, kazı için önemli duruma gelmektedir. Yapılacak iksada meydana gelebilecek deplasman ve oturmalar civardaki yapıları etkilemektedir. Bu sebeple komşu yapıların iksa kaynaklı deplasman ve oturmalara karşı güvenliği hakkında da bilgi sahibi olunması gerekmektedir.

Ayrıca kazı alanı çevresinde bulunabilecek su hattı, kanalizasyon hattı, elektrik hattı, metro tünelleri ve diğer yeraltı yapılarının konumları çok iyi belirlenmeli, tasarım aşamasında bu yapıların zarar görmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

2.2.5 Yapıya etkiyecek ilave yükler

Kazıdan çıkan hafriyat ve molozların kazı etrafına dökülmesi veya kazı civarında depo, ağır araç ve makinelerin varlığı ilave yüklere neden olabilir. Bu yükler sebebiyle oluşacak yanal deplasmanlar ile sürşarj yükleri hesaplara dahil edilmelidir (Ük, 2009).

Bir derin kazı projesinde kazı projesi öncesinde yapılması gereken, tasarım ve hesaplama aşamalarında uygulanabilecek genel adımlar Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Derin kazı projesi uygulama adımları (Ekici, 2011).

3. YANAL TOPRAK BASINÇLARI

Zeminin yatay yönde uyguladığı gerilmeden dolayı oluşan basınca, yanal toprak basıncı denir. Yanal toprak basınçları, birçok geoteknik mühendisliği probleminde oldukça önemli bir tasarım unsurudur. Destekli ve desteksiz kazılarda, istinat yapılarında, palplanş duvarlarda, bodrum perdelerinde, tünel ve diğer yeraltı yapılarının tasarımında önemli bir rol oynamaktadır (Bowles, 1997).

Bu yapıların uygun tasarımı; duvar deplasmanının tipi ve miktarı, zeminin kayma mukavemeti parametreleri, zeminin birim hacim ağırlığı, drenaj koşulları gibi çeşitli etkenlerin bir sonucu olan yanal toprak basınçlarının tahmin edilmesini gerektirir (Das, 2007).

Coduto (2001) yanal toprak basıncı katsayısını, zemindeki herhangi bir noktada yatay efektif gerilmenin düşey efektif gerilmeye oranı olarak tanımlamaktadır.

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \tag{3.1}$$

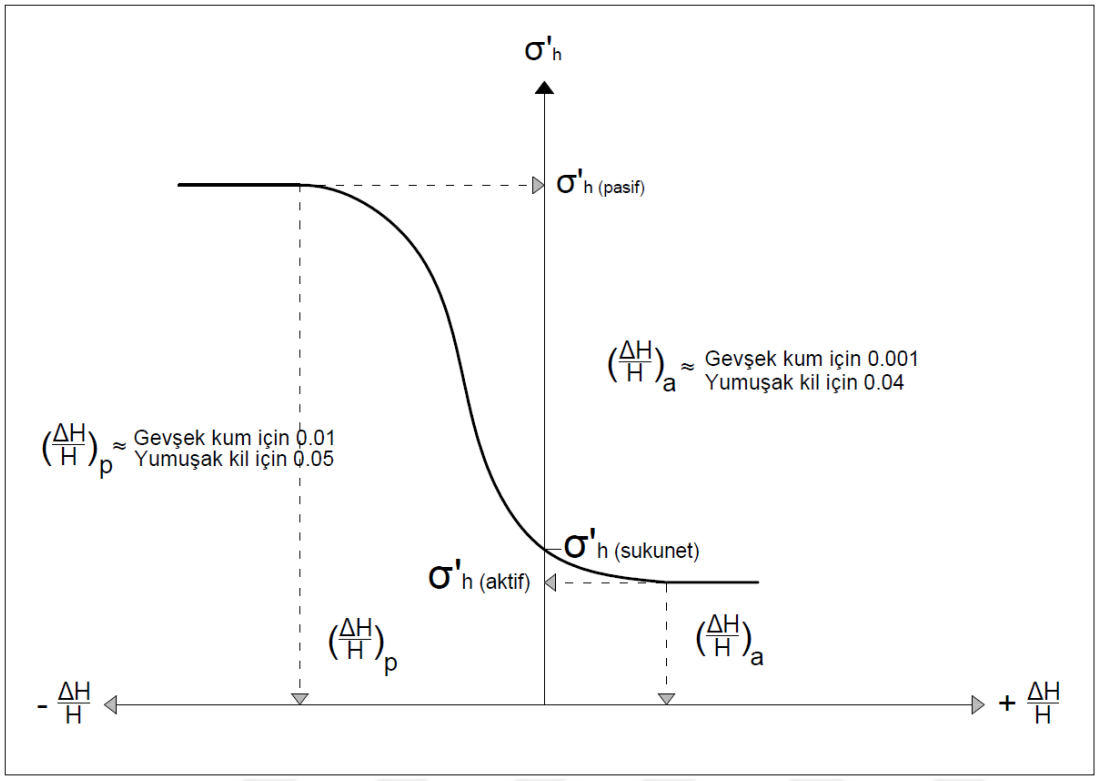
Bu formülde; K yanal toprak basıncı katsayısı, σ'_h yatay efektif gerilme ve σ'_v düşey efektif gerilmedir. Yanal toprak basıncı katsayısının belirlenmesine yönelik ilk çalışmalar Coulomb (1776) ve Rankine (1857) tarafından gerçekleştirilmiştir. Coulomb kama teorisini kullanırken, Rankine hesaplarında plastisite teorisini kullanmıştır.

3.1 Rankine Teorisi

Rankine teorisi; zemin ortamının plastik denge durumuna ulaştığı andaki gerilmeleri dikkate alır. Zemin ortamının her noktasında kırılma varsa, bu duruma plastik denge denilmektedir. Zeminin sükunetteki durumu ise elastik denge durumu olarak adlandırılmaktadır (Uzuner, 1990).

Rankine (1875) teorisinde; duvar ile zemin arasının dik olduğu, duvar ile zemin arasındaki sürtünme kuvveti ihmal edildiği ve zeminin homojen ve izotropik olduğu

kabul edilmektedir. Destek sistemine belirli bir derinlikte etkiyen yanal toprak basınçları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



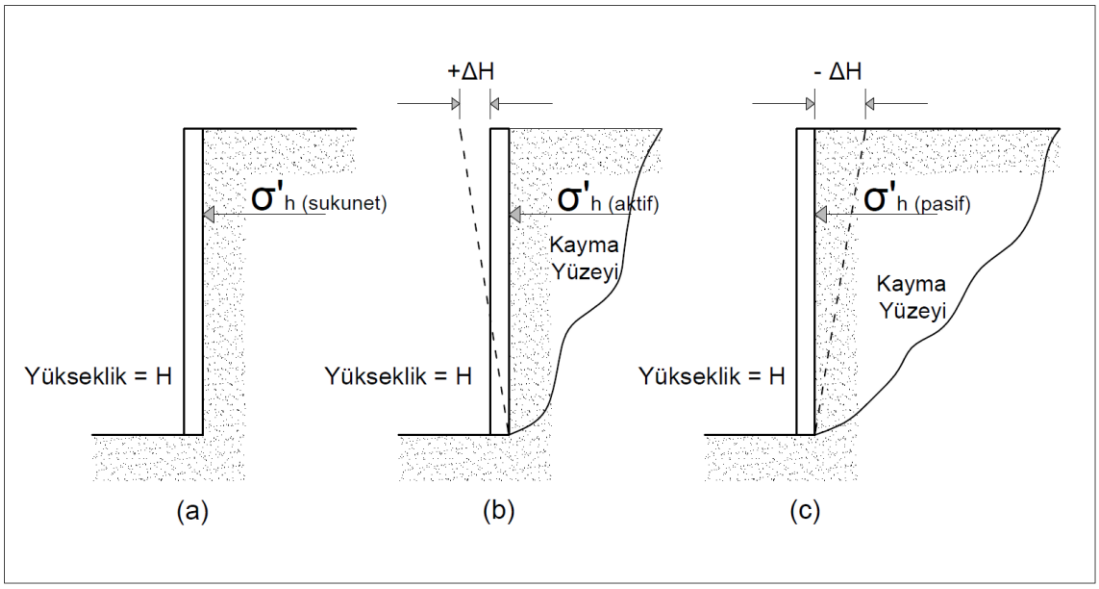
Şekil 3.1 : Destek sistemine belirli bir derinlikte etkiyen yanal toprak basınçları (Das, 2007).

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi destek sisteminde;

a. Duvar, hareket edemeyecek kadar rijit tasarlanmış olabilir (Şekil 3.2.a). Bu koşulda oluşacak yanal toprak basıncı sükunetteki toprak basıncı (P_0) olarak tanımlanmaktadır.

b. Duvar, tutulan zeminden dışarı doğru hareket ederek zemini genişletebilir (Şekil 3.2.b.). Duvar eğimi ile duvar arkasındaki üçgen zemin kamasının yenildiği (göçtüğü) bu durumda oluşacak yanal toprak basıncı, aktif toprak basıncı (P_a) olarak tanımlanmaktadır.

c. Duvar, tutulan zeminin içine doğru hareket ederek zemini sıkıştırabilir (Şekil 3.2.c.). Duvar hareketi ile zemin kamasının yenildiği (göçtüğü) bu durumda oluşacak yanal toprak basıncı, pasif toprak basıncı (P_p) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.2 : Duvara etkiyen yanal toprak basınçları (Das, 2007).

3.1.1 Sükunetteki toprak basıncı

Zemini tutan destek yapısının hareket etmemesini sağlayacak kadar olan basınca, sükunetteki toprak basıncı adı verilir. Bu durumda zemin ortamında herhangi bir deformasyon yoktur. Efektif düşey gerilmenin, efektif yatay gerilmeye oranı sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısını (K_0) verir.

$$\sigma'_h = K_0 . \sigma'_v \tag{3.2}$$

Toplam yanal gerilme;

$$\sigma_h = \sigma'_h + u \tag{3.3}$$

Burada; u boşluk suyu basıncıdır (Ou, 2006).

Normalde konsolide zeminlerdeki sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısı (K_0) aşağıdaki ampirik formülle hesaplanabilmektedir.

$$K_0 \approx 1 - sin\phi' \tag{3.4}$$

Burada; ϕ, kayma mukavemeti açısıdır.

Aşırı konsolide killerde, K_0 aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Mayne ve Kulhawy, 1982).

$$K_0 = (1 - sin\phi')AKO^{sin\phi'} \tag{3.5}$$

Burada; AKO = aşırı kondolidasyon oranıdır.

İdeal ortamlarda K_0 katsayısı, elastik analizlerden aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \tag{3.6}$$

Burada; ν poisson oranıdır. Çizelge 3.1'de zemin cinslerine göre K_0 değerleri verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Zemin cinslerine göre tipik K_0 değerleri (Uzuner, 1990).

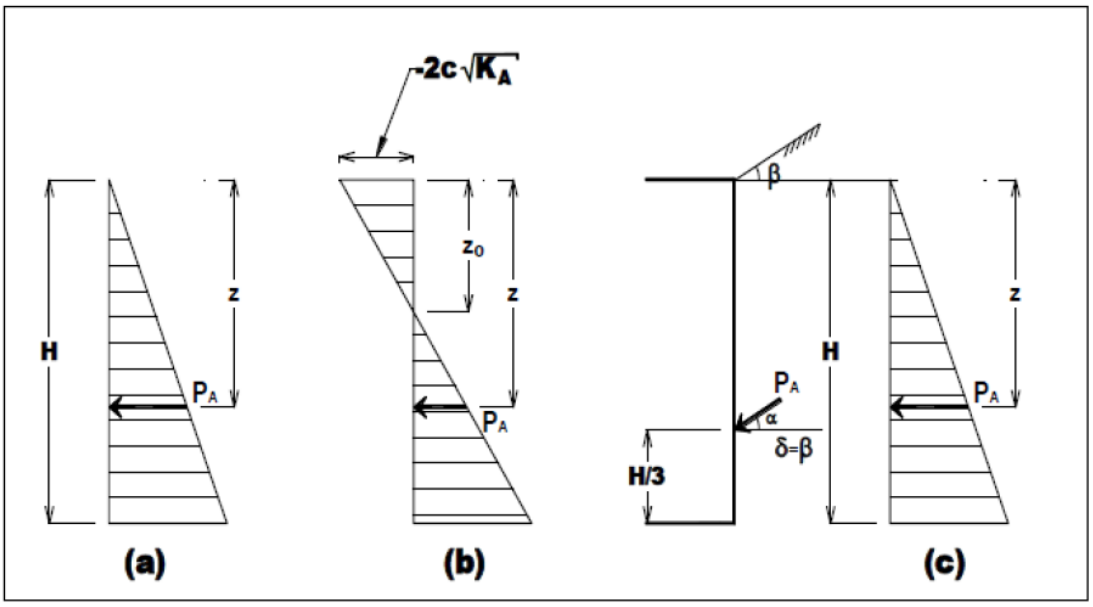
Zemin Cinsi	K_0
Gevşek Kum	0.4
Sıkı Kum	0.6
Yumuşak Kil	0.6
Sert Kil	0.5

3.1.2 Aktif toprak basıncı

Yarı sonsuz ortamda plastik durumun elde edilebilmesi için zeminin yanal deformasyona maruz kalması gerekir. Bu deformasyon genişlemeyle, bir diğer ifadeyle duvardan dışarı yönde gerçekleşirse bu durumdaki basınca aktif toprak basıncı denir. Aktif durumda zemin, yatayla yaptığı 45°+ϕ/2'lik düzlemler doğrultusunda kırılır. Aktif durumda düşey gerilmeler sabit kalırken herhangi bir derinlikte duvardaki toprak basınçları azalır. Minimum gerilme değerine ulaştığı noktada zeminde göçme meydana gelir.

Bir başka deyişle zeminin kayma mukavemetine bağlı olan minimum yanal toprak basıncı aktif toprak basıncı olarak tanımlanmaktadır (McCarthy, 2007).

Rankine'e göre aktif durumda, duvarın arka yüzü zemine dik (α=0) ve yapı arkasındaki zemin yataydır (β=0). Diğer bir deyişle, Rankine teorisinde duvarın arka yüzünün pürüzsüz olduğu ve duvar arkası ile zemin arasındaki sürtünmenin olmadığı (δ=0) kabul edilir (Kumbasar ve Kip, 1992). Zemin yüzeyinden herhangi bir z derinliğinde meydana gelen Rankine aktif toprak basınç dağılımı Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3 : Rankine aktif toprak basınçları (Kumbasar ve Kip, 1992).

Yanal toprak basıncı dağılımlarının üçgensel olmasından dolayı, z derinliği H yüksekliğindeki bir duvarın 2/3'ü kadar bir derinliktir. Aktif toprak basıncının oluşabilmesi için gerekli olan deplasman oranları kumlarda 0.002H, sıkı kumlarda 0.0005H, normal killerde 0.02H ve katı killerde 0.01H olması gerekmektedir (Yıldırım, 2009).

Aktif toprak basıncı katsayısı (K_a), kohezyonlu zeminler için denklem 3.7, kohezyonsuz zeminler için denklem 3.8 ile hesaplanır.

$$\frac{\sigma'_{h(min)}}{\sigma'_v} = K_a = \frac{1-sin\phi'}{1+sin\phi'} = tan^2(45 - \frac{\phi'}{2}) \tag{3.7}$$

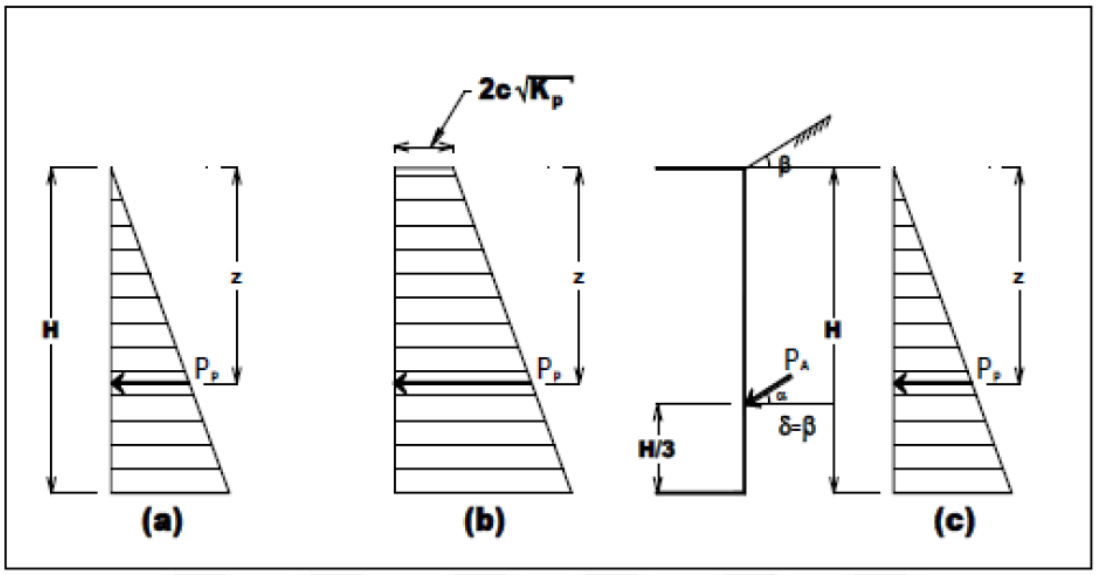
$$K_a = tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) - \frac{2c'}{\sigma'_v}\, tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \tag{3.8}$$

Bu eşitlikte, c kohezyon değeridir.

3.1.3 Pasif toprak basıncı

Yarı sonsuz ortamda plastik durumun elde edilebilmesi için zeminde meydana gelecek yanal deformasyon sıkışmayla, bir diğer deyişle duvardan içeri yönde gerçekleşirse bu durumdaki basınca pasif toprak basıncı denir. Pasif durumda zemin yatayla yaptığı 45°-ϕ/2'lik düzlemler doğrultusunda kırılır. Pasif durumda düşey gerilmeler sabit kalırken herhangi bir derinlikte duvardaki toprak basınçları artar. Maksimum gerilme değerine ulaştığı noktada zeminde göçme meydana gelir.

Zemin yüzeyinden herhangi bir z derinliğinde meydana gelen Rankine pasif toprak basınç dağılımı Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4 : Rankine pasif toprak basınçları (Kumbasar ve Kip, 1992).

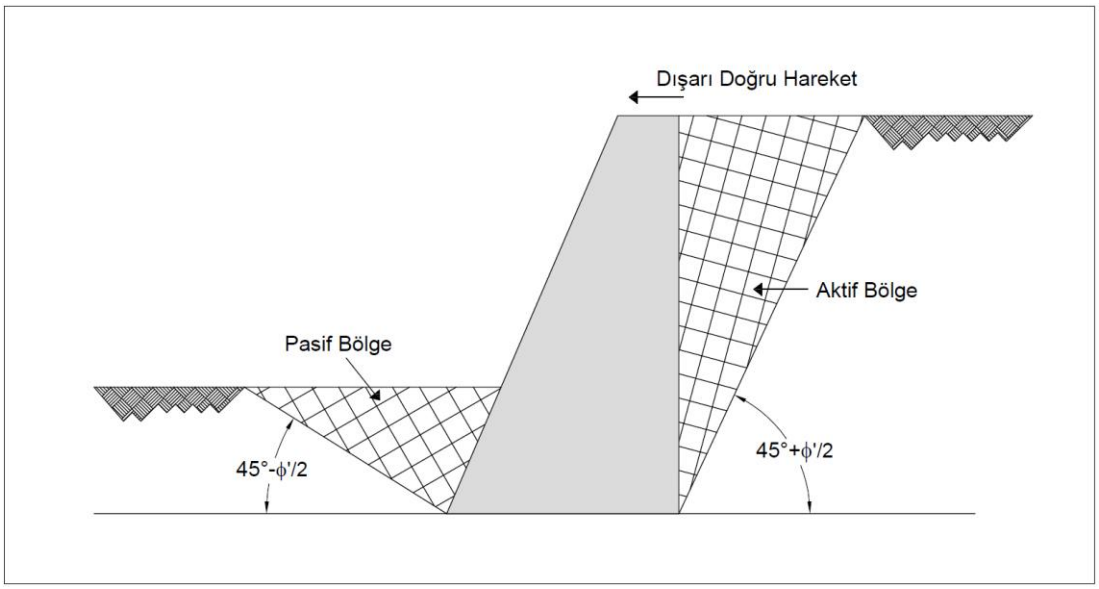
Pasif toprak basıncının oluşabilmesi için gerekli olan deplasman oranları kumlarda 0.006H, sıkı kumlarda 0.002H, normal killerde 0.04H ve katı siltli killerde 0.02H olması gerekmektedir (Yıldırım, 2009).

Pasif toprak basıncı katsayısı (K_p), kohezyonlu zeminler için denklem 3.9, kohezyonsuz zeminler için denklem 3.10 ile hesaplanır.

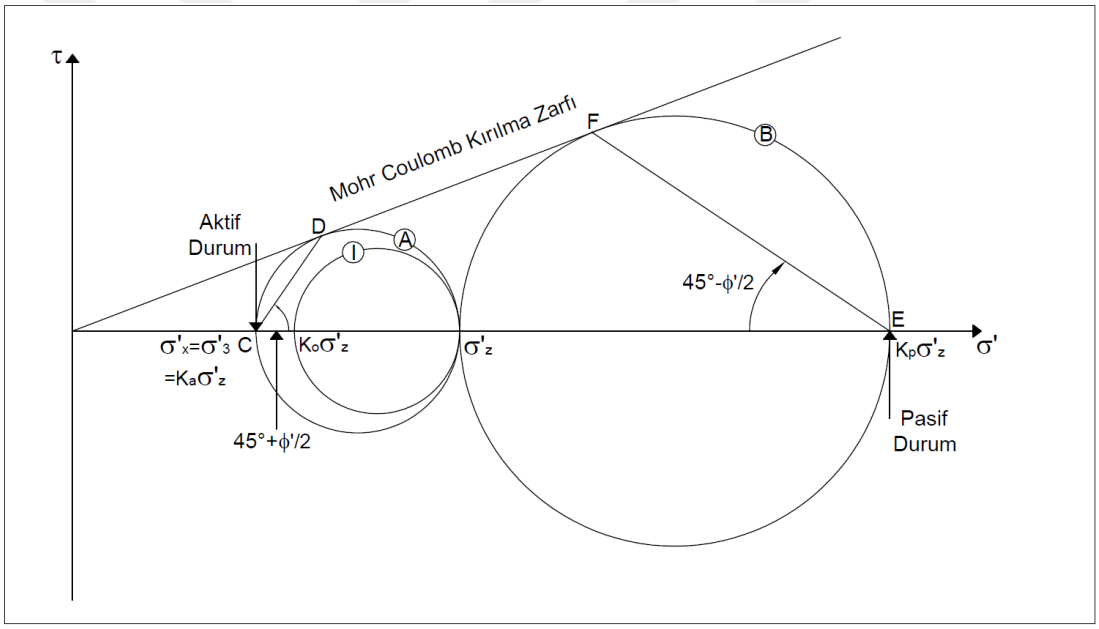
$$\frac{\sigma'_{h(maks)}}{\sigma'_v} = K_p = \frac{1+sin\phi'}{1-sin\phi'} = tan^2(45 + \frac{\phi'}{2}) \quad (3.9)$$

$$K_p = tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) + \frac{2c'}{\sigma'_v}\, tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (3.10)$$

Şekil 3.5'te Rankine aktif ve pasif toprak basıncı bölgeleri, Şekil 3.6'da Mohr dairesinde sükunetteki durum, aktif durum ve pasif durum gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Rankine aktif ve pasif toprak basınç bölgeleri (FHWA-IF-99-015, 1999).



Şekil 3.6 : Sükunette, aktif ve pasif durumlardaki toprak basıncı değerlerinin Mohr dairesi ile gösterimi (Budhu, 2007).

3.2 Coulomb Teorisi

Yanal toprak basınçlarını hesaplamak için kama teorisinden yararlanan Coulomb (1776), Rankine teorisinden farklı olarak duvar ile zemin arasında sürtünme olduğu ve duvarın arkasının eğimli olduğu kabullerini yapmıştır. Coulomb toprak basıncı teorisi aşağıdaki varsayımlarda bulunmuştur.

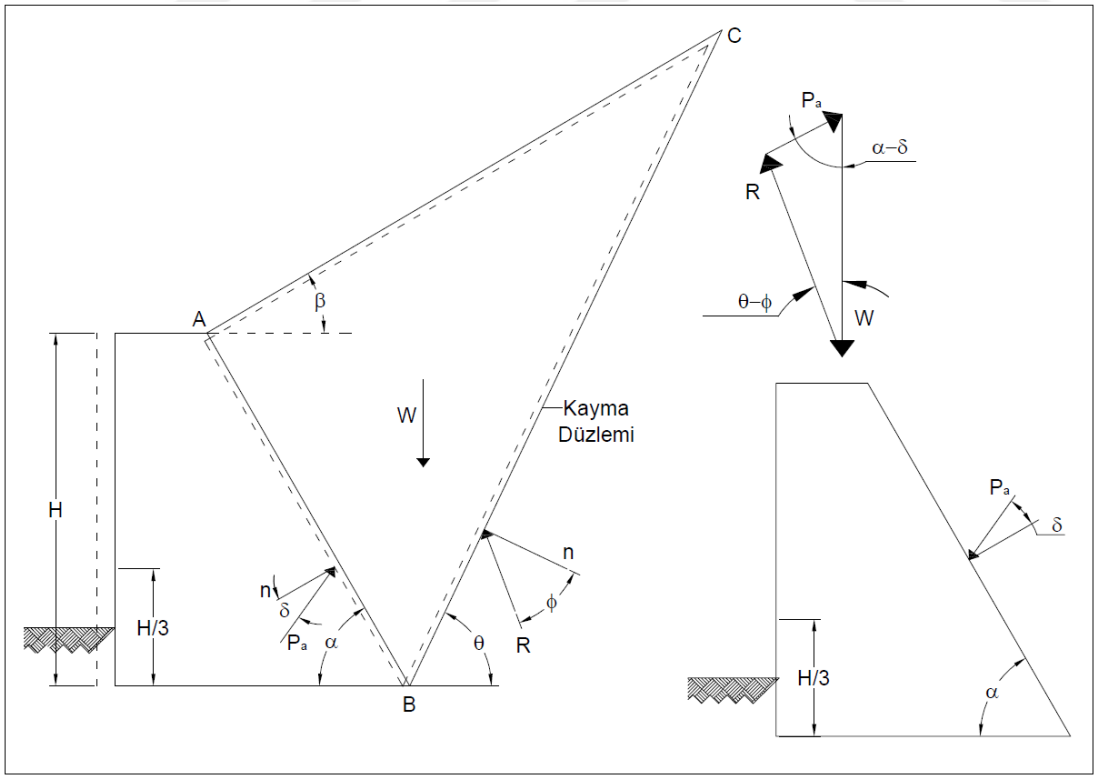
- Zemin izotrop, homojen ve kohezyonsuzdur.

- Kayma yüzeyi düzlemseldir.
- Duvar ile zemin yüzeyi eğimli olup buradaki sürtünme hesaplara dahil edilir.
- Duvar deplasman yaptığında dolguda kayma yüzeyi oluşturur.
- Kayma kaması rijittir ve kayma yüzeyi boyunca üniform dağılan sürtünme kuvvetlerini oluşturur.

3.2.1 Aktif toprak basıncı

Şekil 3.7'de gösterilen kayma kamasına etkiyen kuvvetler, kamanın kendi ağırlığı (W), kayma düzlemi boyunca etkiyen bileşke kuvvet (R) ve aktif toprak basıncıdır (P_a).

Duvar arkasında kohezyonsuz zeminlerde duvar öne doğru hareket ederken, arkada oluşan kama aşağı doğru kayar. Kama aşağı doğru hareket ettiği için, P_a ve R kuvvetleri, sürtünmelerden dolayı yüzey normalleri ile hareket yönünün tersi tarafta, sırasıyla δ ve ϕ açıları yaparlar. δ, duvar ile zemin arasındaki sürtünme açısı ve ϕ ise zemin içsel sürtünme açısıdır. Bu kuvvetlerin yatay ve düşey yönlerde dengelerinin sağlanması ile en büyük aktif toprak basıncı (P_a) denklem 3.11 ile, aktif toprak basıncı katsayısı (K_a) ise denklem 3.12 ile hesaplanır (Uzuner, 1990).



Şekil 3.7 : Coulomb kama teorisi aktif durum (Uzuner, 1990).

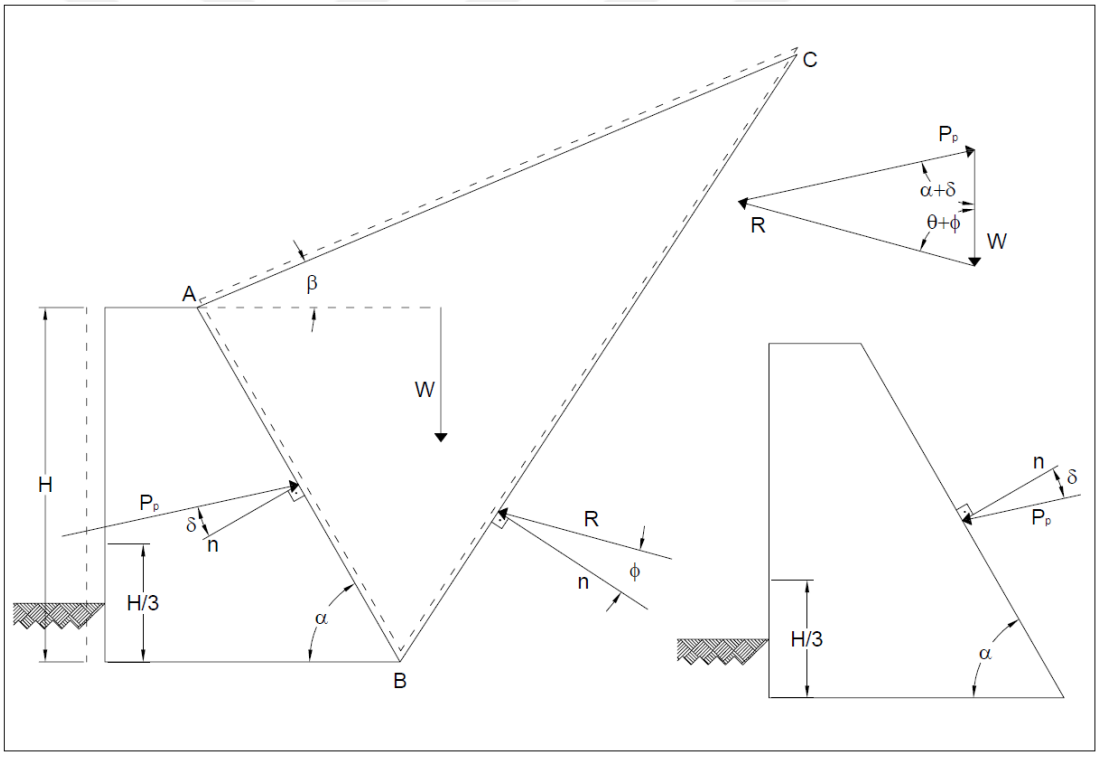
$$P_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_a \tag{3.11}$$

$$K_a = \frac{sin^2(\alpha+\phi)}{sin^2\alpha.sin(\alpha-\delta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta).\sin(\phi-\beta)}{\sin(\alpha-\delta).\sin(\alpha+\beta)}}\right]^2} \tag{3.12}$$

olarak hesaplanmaktadır.

3.2.2 Pasif toprak basıncı

Pasif durumda, duvar arkaya doğru hareket ederken, arkada oluşan kama yukarı doğru hareket eder (Şekil 3.8). Kamaya etki eden kuvvetlerin dengesi hesaplandığında, en küçük pasif toprak basıncının oluşması koşulu sağlanırsa, pasif toprak basıncı (P_p) denklem 2.13 ile, pasif toprak basıncı katsayısı (K_p) ise denklem 2.14 ile hesaplanır (Uzuner, 1990).



Şekil 3.8 : Coulomb kama teorisi pasif durum (Uzuner, 1990).

$$P_p = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_p \tag{3.13}$$

$$K_p = \frac{sin^2(\alpha-\phi)}{sin^2\alpha.sin(\alpha+\delta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta).\sin(\phi+\beta)}{\sin(\alpha+\delta).\sin(\alpha+\beta)}}\right]^2} \tag{3.14}$$

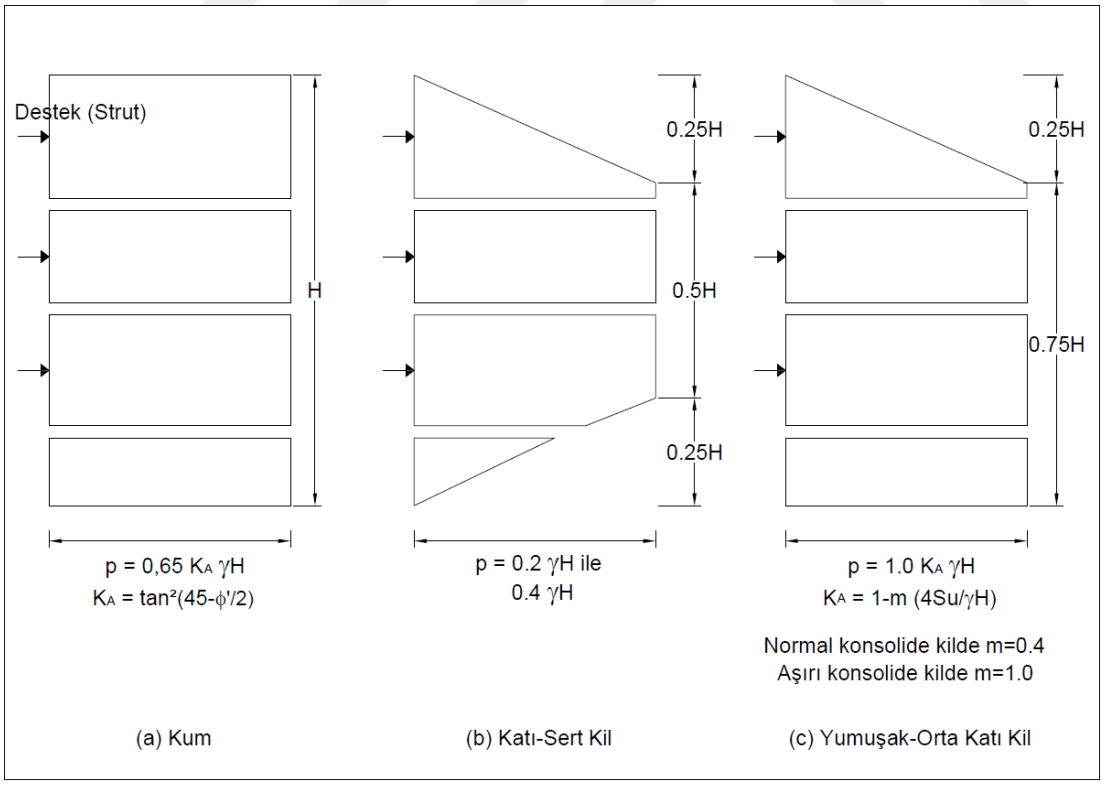
olarak hesaplanmaktadır.

3.3 Terzaghi ve Peck Toprak Basınçları

Terzaghi ve Peck (1967) ve Peck (1969) tarafından geliştirilen yanal toprak basıncı diyagramları, destekli kazılarda, destek sistemine etkiyen yükleri karşılaması amacıyla geliştirilmiştir. Bu diyagramlar, dikdörtgen ve trapez şeklinde olup, kum, yumuşak-sert kil birimler için hazırlanmıştır. Terzaghi ve Peck yanal toprak basıncı diyagramları aşağıdaki faktörlere göre geliştirilmiştir (FHWA-IF-99-015, 1999).

- Kazı derinliğinin 6m'den fazla ve nispeten geniş olduğu varsayılmıştır.
- Yeraltı suyunun yapılan kazı tabanının altında olduğu varsayılmıştır. Su basıncı, yanal toprak basıncı hesaplarına dahil edilmemiştir.
- Zemin kütlesi homojendir ve kısa dönem yüklemeler göz önüne alınmamıştır.
- Yükleme diyagramları duvarın açıkta kalan kısmına etki eder, kazı altındaki gömülü kısımda geçerli değildir.

Terzaghi ve Peck'e göre kumlu ve killi zeminlerde yapılacak olan kazılarda duvar yüzeyine etkiyecek olan yanal toprak basınçları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Terzaghi ve Peck yanal toprak basıncı diyagramları (FHWA-IF-99-015, 1999).

4. DERİN KAZI DESTEK SİSTEMLERİ

4.1 Düşey Destek Elemanları

Bu bölümde; uygulamada ve literatürde başlıca bilinen ve kullanılan mini kazık, palplanş, diyafram duvar ve kazıklı duvarların davranışları ve yapım yöntemleri ele alınmıştır. Genel olarak yatay ve düşey destek sistemleri, derin kazı sırasında yanal toprak basıncı nedeniyle oluşabilecek deplasmanları ve zemin hareketlerini sınırlandırmak, bunun neticesinde kazı alanının, çevredeki yapıların ve altyapının emniyetini sağlamak amacıyla yapılırlar.

Derin kazılar ya da derin yapıların imalatı; istinat duvarı yapımı, kazı, destek kirişlerinin montajı, temel ve kat döşemelerinin inşasını kapsamaktadır. Kazı yöntemleri ve düşey destek sistemlerinin çok çeşitliliği sayesinde en uygun tasarım tercih edilir. Arazinin jeolojik koşulları, çevre şartları, izin verilebilen imalat süresi, imalat bütçesi ve mevcut olan inşaat ekipmanları göz önünde bulundurularak bunların hepsini kapsayacak bir genel plan yapılmalıdır (Ou, 2006).

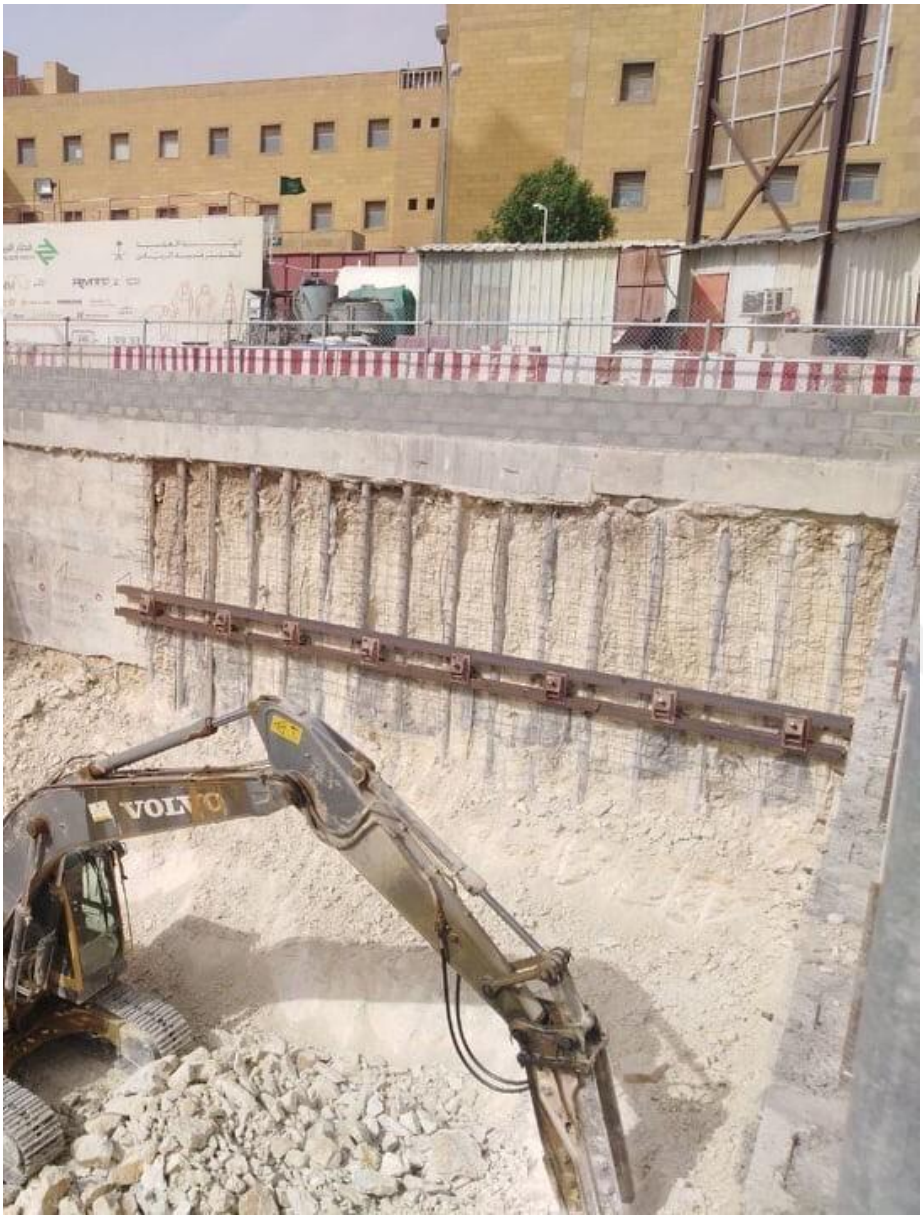
4.1.1 Mini kazıklar

İlk olarak Avrupa'da mevcut yapıların desteklenmesi veya güçlendirilmesinde kullanılan mini kazıklar, 1970'li yıllardan beri kullanılmaktadırlar. Günümüzde ise düşey destek elemanları olarak genellikle derin kazılarda imal edilmektedirler. Mini kazık imalatı ile ilgili sahadan alınan bir görsel Şekil 4.1'de verilmektedir.

Uygulamada, mini kazık çapları 10 ile 30cm arası değişmektedir. Takviye elemanı olarak çelik çubuk, çelik boru, H profil veya çelik kafes kullanılmaktadır. Yaygın olarak çelik boru (mini kazık borusu) tercih edilir. Mini kazıkların imalat adımları aşağıdaki gibidir:

1. Başlangıçta muhafaza borulu veya diğer delgi yöntemleriyle tasarımda belirtilen derinliğe kadar delgi yapılır ve takviye elemanı olarak nitelenen mini kazık borusu veya bir başka takviye elemanı delgiye yerleştirilir.

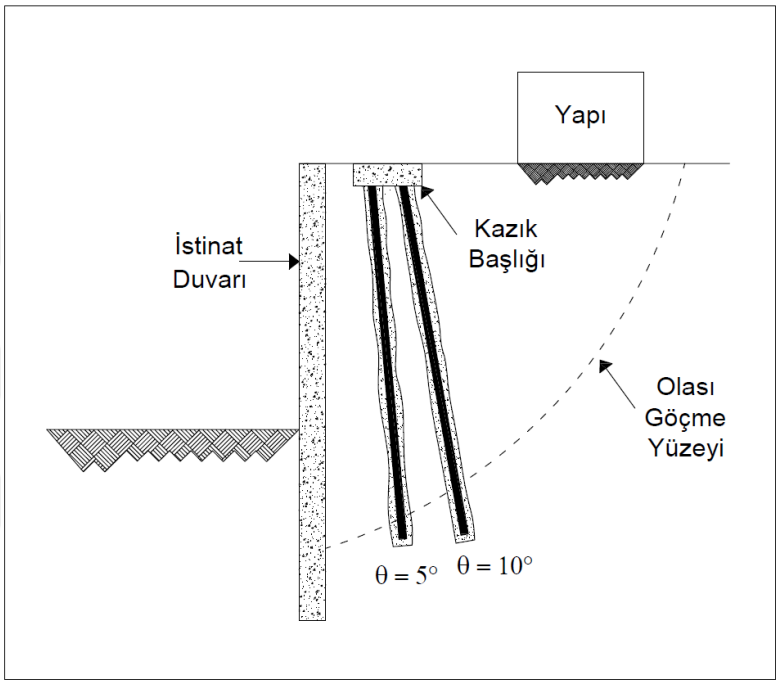
2. Belirli bir basınç altında enjeksiyon yapılır. Enjeksiyon için çimento şerbeti (çimento-su karışımı) ve ihtiyaca göre çeşitli kimyasal katkılar kullanılır.
3. Eğer delgi muhafaza borusu ile yapılmışsa enjeksiyon tamamlandıktan hemen sonra muhafaza borusu yavaşça yukarı çekilir ve bir miktar daha enjeksiyon yapılır.



Şekil 4.1 : Mini kazık uygulaması.

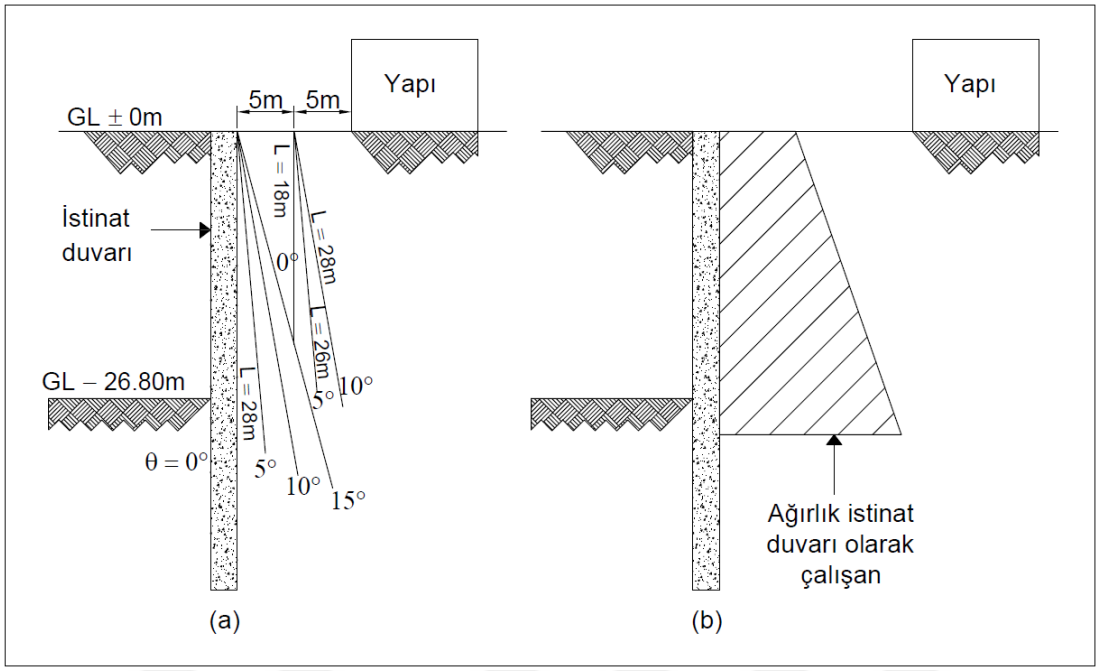
Mini kazıklar genellikle tek sıralı ya da çoklu dizilişe sahiptirler. Zemin yapısına bağlı olarak, mini kazıklar arasındaki mesafe kazık çapının 3 ila 5 katı arasında olacak şekilde değişir.

Başlıca iki adet mini kazık tasarımı vardır. Bunlardan ilki kritik kayma düzleminden geçer. Böylece mini kazıkların kesme dayanımı ve çekme mukavemeti, zeminin çökmesini ve zeminde oturma meydana gelme olasılığını Şekil 4.2'de gösterildiği gibi düşürür. Ancak kritik kayma düzlemi oldukça büyüktür ve kritik kayma düzleminden geçen mini kazıkların sayısı sınırlıdır. Mini kazıkların kesme dayanımı ve çekme mukavemeti ise çok büyük değildir. Bu nedenle, tasarımın kullanılabilir olup olmadığı değerlendirmelere açık olacaktır.



Şekil 4.2 : Mini kazık şematik gösterimi.

Bir diğer yöntem ise çelik takviye elemanlar ve onların enjeksiyonlanması yoluyla, kazı yüzeyindeki zemini tutmak için çok sayıda mini kazığın duvarı kuşatacak şekilde tasarımıdır. Özellikle, kumlu zeminlerde enjeksiyon zeminin içine kapsamlı olarak temas eder ve zeminin büyük alanına etki eder. Mini kazıklar, ağırlık dayanma yapısı (istinat duvarı) olarak da kullanılabilirler. Şekil 4.3'te istinat duvarı olarak çalışan mini kazıklar gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde kazı yüzeyinin stabilitesi sağlanır, kazı yüzeyine etkiyen aktif toprak basıncı düşer ve kayma düzleminin dayanımı artar. Bu nedenle, zeminde oluşan oturmalar azalır.



Şekil 4.3 : Dayanma yapısı olarak mini kazık.

Yine de literatürde her iki mini kazık tasarım yönteminin de kullanışlı olduğu ispatlanmamıştır. Teorik olarak mini kazıklar kumlu ve killi zeminlerde imal edilirler. Kumun yüksek dayanımı ve enjeksiyonun boşluklara önemli ölçüde etki etmesiyle kumlu zeminlerde yapılan enjeksiyon etkili olacaktır. Fakat killi zeminlerde tam tersine, düşük zemin dayanımı ve zemindeki küçük boşluklar nedeniyle enjeksiyonun etkisi engellenecek, imalat şüpheli bir hale gelecektir (Ou, 2006). Şekil 4.4'te mini kazık imalatı gösterilmektedir.

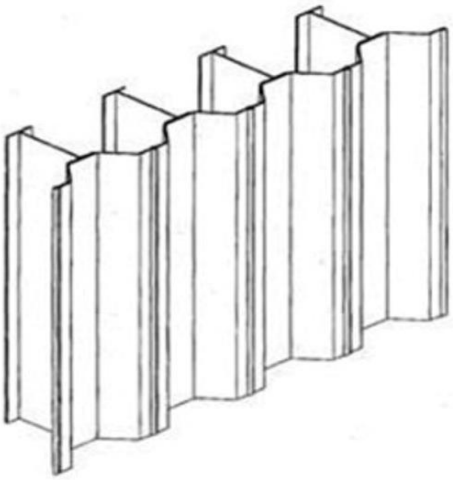


Şekil 4.4 : Mini kazık uygulaması.

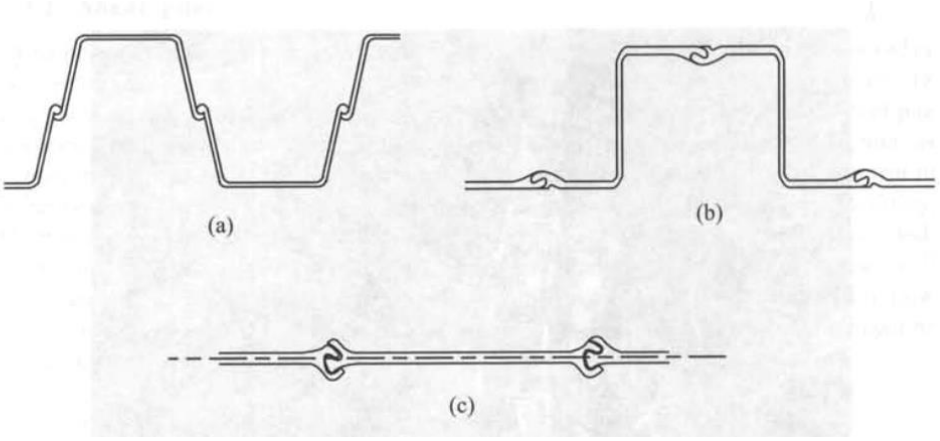
4.1.2 Palplanşlar

Palplanşlar, zemine durağan ya da darbeli vibrasyon ile çakılıp birbirlerine eklenerek imal edilen düşey destek elemanlarıdır. Kullanım alanı oldukça geniş olan palplanşlar; limanlar, köprü ayakları, nehir kontrol yapıları, derin kazılar, yer altı otoparkları, yük altındaki temellerde ve altyapı imalatlarında geçici iksa uygulamalarında kullanılmaktadır.

Şekil 4.5'te palplanşların önden görünüşü ve Şekil 4.7'de yapım esnasındaki görünüşü verilmiştir. Birkaç farklı palplanş kesiti bulunmaktadır. Bunlardan yaygın olarak kullanılanları U kesitli, Z kesitli ve çizgisel kesitli palplanşlardır (Şekil 4.6). Eğer bağlantıları iyi kalitede yapılmışsa palplanşlar su yalıtımı (sızdırmazlık) konusunda oldukça iyidir. Aksi durumda bağlantı noktalarından su sızdığı gözlemlenecektir.



Şekil 4.5 : Palplanş önden görünüşü.



Şekil 4.6 : Palplanş kesitleri.



Şekil 4.7 : Palplanş imalatı.

Palplanşların bağlantı noktaları kil zeminlerde, kum zeminlere kıyasla geçirimsizlik açısından daha emniyetli olmaktadır. Ancak, zemin tipi kumlu ve yüksek permeabiliteye sahipse, palplanşların bağlantısındaki herhangi bir uygunsuzluk geçirimsizliği olumsuz yönde etkileyecektir. Herhangi bir sızıntı durumunda kazı yüzeyinin arkasındaki kumlu zemin kaymaya çok elverişli hale gelir ve bununla birlikte oturmalar oluşur. Eğer sızıntı çok fazlaysa kazı alanı tehlikeye girer (Ou, 2006).

Palplanşlarla ilgili yapım yönteminde aşağıdaki adımlar izlenir:

1. Palplanşların zemine vibrasyon ile çakılması
2. İlk kademe kazının yapılması
3. Düşey yönlü elemanların uygun alana yerleştirilmesi ve yatay yönlü destek kirişlerinin atılması
4. Bir sonraki kademe kazının yapılması
5. 3. ve 4. adımların tasarım derinliğine kadar devam etmesi
6. Kazının tamamlanmasıyla yapının imalatına başlanması

7. Tabandaki imalatın tamamlanması
8. Palplanşların kademeli olarak sökülmesi

Palplanşların avantajları şunlardır:

1. Su sızdırmazlık oranı oldukça yüksektir.
2. İmalat süreklidir.
3. Prekast kazıklara gore eğilme momentleri yüksektir.

Palplanşların dezavantajları şunlardır:

1. Fore kazık ya da diyafram duvara kıyasla eğilme momentleri düşüktür.
2. İmalat esnasında ya da sökülürken kumlu zeminlerde oturma olmasını tetikleyebilir.
3. Sert zeminlerde imalatı oldukça zordur.
4. Vibrasyonla çakılması sırasında çok fazla gürültü meydana gelir.
5. Sızdırmazlık tamamen sağlanamaz ise herhangi bir yalıtım yöntemi ya da enjeksiyon yapılması zorunlu hale gelir.

4.1.3 Diyafram duvarlar

Diyafram duvar, bir başka deyişle geçirimsizlik perdesi, ilk olarak 1950'lerde İtalya'da imal edilmeye başlanmış ve dünya genelinde kullanılmaya devam etmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yeni yapım yöntemleri ve inşaat ekipmanları tasarlanmıştır (Ou, 2006).

Diyafram duvar imalatı derin kazıya ihtiyaç duyulan, yer altı suyunun olduğu alanlarda yapılır. Düşey destek elemanı olmasının yanı sıra geçirimsizlik özelliği de vardır. Genellikle çok katlı otoparklar, baraj yapıları, nehir veya deniz kenarındaki derin kazı gerektiren yapılar ve çok katlı binalarda tercih edilirler.

Diyafram duvarlar diğer düşey destek elemanlarına göre oldukça mukavemetlidir. Etkiyen yüklere göre tasarım boyutları değişmektedir. Fakat imalatı için diğer düşey destek elemanlarına oranla daha büyük bir makine parkı gereklidir. Maliyeti düşürmek amacıyla tasarım boyutlarını düşürmek için proje değerlerine göre ankrajlar ile birlikte imal edilebilir.

Diyafram duvarların yapımında izlenecek ilk adım arazi koşullarına göre toplam duvar uzunluğunu ayrı panellere bölmektir. Panellerin yapımında izlenecek adımlar aşağıdaki gibidir:

1. Kılavuz duvarın yapımı (diyafram duvar kazı makinesinin (freze ya da grab) kazıya doğru lokasyondan başlaması, sapmaması ve kazıya ilk girişinde zeminin göçmemesi amacıyla yapılan geçici yapı)
2. Panel kazısının yapılması
3. Uç tüplerin yerleştirilmesi
4. Diyafram duvar donatısının yerleştirilmesi
5. Betonlama

Panel kazısının tamamlanmasıyla panel içerisindeki çamur temizlenmek zorundadır. İmalatın son aşaması için tremi boruları birbirlerine eklenerek panel tabanından itibaren betonlama yapılır. Böylelikle panele şekli (formu) verilmiş olur.

Diyafram duvar imalatında dikkat edilmesi gereken önemli iki husus vardır. Bunlardan ilki, iki panel arasında sızdırmazlığın sağlanması ve eğilme momenti ile kesme kuvvetlerinin aktarılmasıdır. Panel bağlantıları için pek çok yöntem bulunur. Fakat, uygulamada yaygın olarak uç tüpleri kullanılmaktadır. Kazının tamamlanmasının ardından donatı yerleştirilmeden uç tüpleri iki panel arasına yerleştirilmelidir. Donatı yerleştirilmesine yönelik saha çalışması Şekil 4.8'de, diyafram duvar imalatına ait bir saha fotoğrafı Şekil 4.9'da verilmektedir.

Bir diğer önemli nokta ise kazı esnasında bentonit bulamacı (çamuru) kullanılmasıdır. Bentonit bulamacı, kazı iç yüzeylerine hidrostatik basınç uygulayarak iç yüzeyleri adeta sıvayarak kazının iç yüzeylerini kaplamaya gerek kalmaksızın tutar. Bentonit bulamacının özellikleri TS EN 1538'de Çizelge 4.1'deki gibi tanımlanmıştır:



Şekil 4.8 : Diyafram duvar donatı yerleştirilmesi.

Çizelge 4.1 : Bentonit özellikleri (TS EN 1538).

Özellik	Kullanım safhaları		
	Taze	Tekrar kullanım için hazır	Betonlamadan önce
Birim hacim kütlesi (g/ml)	<1.10	<1.25	<1.15
Marsh değeri (s)	32-50	32-60	32-50
Akışkan kaybı (ml)	<30	<50	-
pH	7-11	7-12	-
Kum muhtevası (%)	-	-	<4
Filtre keki (mm)	<3	<6	-



Şekil 4.9 : Diyafram duvar imalatı.

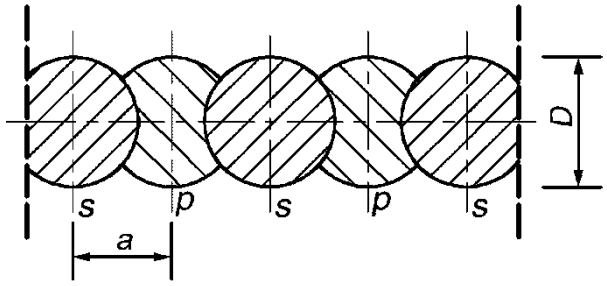
4.1.4 Kazıklı duvarlar

Düşey ve yatay yükleri taşıyabilen, iksa perdesi oluşturmaya yarayan bir diğer düşey iksa sistemi elemanı da kazıklardır. Kazıklar, yapım yöntemlerine göre fore kazık ve prekast kazık olarak ikiye ayrılırlar.

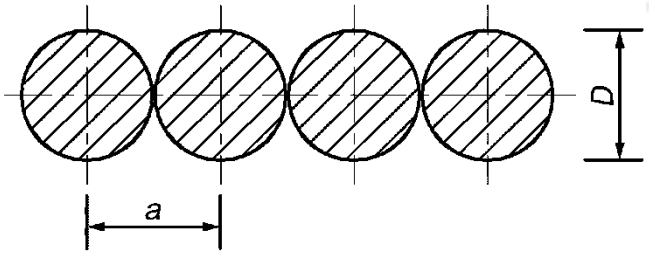
Prekast kazıklar (çakma kazık), önceden imalatı yapılmış profillerin veya betonarme elemanların vibrasyon ile zemine sürülmesi veya çakılması ile yapılan kazıklardır. Zeminde kazı ya da sondaj ile açılan kazık yuvasının donatısız veya donatılı betonla doldurulması ile muhafaza borulu (kılıflı) ya da muhafaza borusuz imalatı yapılan kazıklar ise fore kazık (delme kazık) olarak adlandırılırlar (TS EN 1536+A1).

Fore kazıklar, projedeki tasarıma göre kesişen kazıklar, teğet (bitişik) kazıklar ve aralıklı kazıklar olarak üçe ayrılırlar. Kesişen kazıklarda Şekil 4.10'dan görüleceği üzere iki kazığın merkezleri arasındaki mesafe (a) bir kazık çapından (D) küçük olmaktadır. Yine Şekil 4.10'da p olarak isimlendirilen kazıklar birincil kazık, s olarak isimlendirilen kazıklar ise ikincil kazık olarak literatüre geçmiştir. Bu isimler imalat sırasına göre verilmiştir. Şekil 4.11'de teğet kazıkların şematik gösterimi verilmiş olup bu tür kazıklarda iki kazığın merkezleri arasındaki mesafe (a) yaklaşık olarak bir kazık çapına (D) eşittir. Aralıklı kazıkların şematik gösterimi Şekil 4.12'de verilmekte olup,

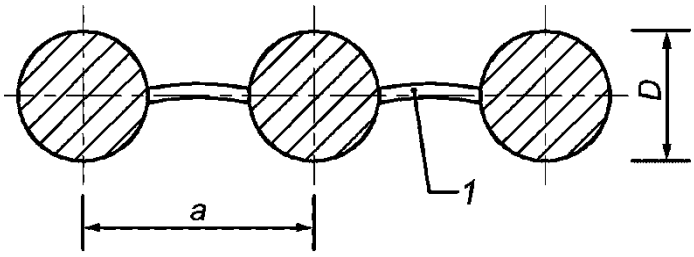
bu tür kazıklarda iki kazığın merkezleri arasındaki mesafe (a) bir kazık çapından (D) büyüktür.



Şekil 4.10 : Kesişen kazık şematik gösterimi (a<D).



Şekil 4.11 : Teğet kazık şematik gösterimi (a≈D).



Şekil 4.12: Aralıklı kazık şematik gösterimi (a>D).

4.1.4.1 Kesişen kazıklar

Bu tip kazıklar, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerde özellikle geçirimsizlik amacıyla yapılırlar. Kesişen kazıkların yapımından önce kazıkların yapılacağı aksa kılavuz (gidaj) duvarın yapılması oldukça önemlidir. Kılavuz duvar sayesinde kazık aksı ortaya çıkacak, imalat esnasında yatay ya da düşey yönde herhangi bir sapmanın meydana gelmesi engellenecek, dolayısıyla iksanın geçirimsizliği sağlanmış olacaktır.

Kesişen kazıklar kendi içlerinde birincil (primer) ve ikincil (sekonder) olarak ikiye ayrılırlar. Birincil kazıklar donatısızdır ve geçirimsizlik amaçlı çalışırlar. İkincil

kazıklar ise donatılıdır ve iksaya gelen yükleri karşılarlar. İmalat esnasında ilk olarak donatısız olmaları nedeniyle birincil kazıklar imal edilirler. Daha sonra ise yapımı tamamlanan birincil kazıklar arasına iki kazık merkezi arası mesafe, kazık çapından küçük olacak şekilde ikincil kazıkların imalatı yapılır (TS EN 1536+A1). İkincil kazıkların imalatı ne kadar gecikirse birincil kazıkların beton dayanımları artacağından ve buna bağlı betonun kesilmesi güçleşeceğinden imalatın yapılması zorlaşacaktır.

4.1.4.2 Teğet (bitişik) kazıklar

Genellikle kumlu ve çakıllı zeminlerde, yeraltı su seviyesinin düşük olduğu durumlarda tercih edilirler. Kazıklar birbirlerine teğet olacak şekilde imal edilirler. Teğet kazıklar yapım yöntemi olarak kesişen kazıklara benzemektedir. İlk olarak birincil kazıklar, daha sonrasında onların aralarına gelecek şekilde ikincil kazıklar imal edilirler. Fakat teğet kazıklarda, kesişen kazıklardan farklı olarak tüm kazıklar donatı olarak aynı standarttadır. Kazıklar yapıldıktan sonra aralarına enjeksiyon yapılarak geçirimsizlik perdesi olarak da kullanılabilirler. Teğet kazıkların yapımında düşey sapmaların oluşmamasına özen gösterilmelidir.

4.1.4.3 Aralıklı kazıklar

Aralıklı kazıklar, stabilite sorunu olmayan ve yeraltı su seviyesinin çok düşük ya da hiç olmadığı zeminlerde tercih edilirler. Bu kazıklarla oluşturulacak destek sisteminde kazıklar arası mesafenin boyutlandırılmasında iksa sistemine etkiyen yükler ve zemin yapısı belirleyici olur.

4.1.4.4 Fore kazık yapım yöntemi

Fore kazıkların uygulaması ile ilgili aşağıdaki durumlar dikkate alınmalıdır:

- Herhangi noktadaki zemin seviyesinde araştırma ve deney, koordinat sistemi veya sabit bir nokta referans alınarak yapılmalıdır.
- Yeraltı sularının piezometrik seviyeleri ve zeminlerin geçirgenliği.
- Ani su kaçışına veya bulunduğu yerde çimentonun ani düşmesine sebep olan boşluklar veya kanal yapılara sahip (yüksek geçirimli) zemin ve iri taneli zeminlerin varlığı,

- Kazık veya beton dökümü sırasında zorluklara (deformasyon veya duraysızlık) sebep olabilen yumuşak kil ya da turba gibi yumuşak zeminlerin dayanım ve deformasyon özellikleri.
- Uygulanabilir olan durumlarda, kazık sırasında problemlere sebep olan iri kaya parçaları ya da engellerin varlığı ile bunların boyutlarının ve sıklıklarının değerlendirilmesi.
- Kazık sırasında problemlere sebep olan sert kayacın ya da diğer sert malzemelerin varlığı, yeri ve sertliği özel aletlerin kullanımını gerektirebilir.
- Su sızmalarına ya da kazık aletleri tarafından oluşan gerilmelere (örneğin; darbe, vuruş veya titreşim) karşı hassas olan tüm tabakaların varlığı, yayılımı ve kalınlığı.
- Gerekli ise, yeraltı suyunun, zeminin ve kayacın zararlı kimyasal içeriği ve su sıcaklıkları.
- Atık maddelerin zararlı kimyasal içeriği.
- Kazı sırasında olumsuz etki yapan tabi olmayan zeminin mevcudiyeti.
- Saha altındaki maden çalışmaları.
- Saha stabilite (duraylılık) problemleri (örneğin; şev stabilitesi) (TS EN 1536+A1).

Foraj (delgi)

Gerekli aplikasyonlar yapıldıktan sonra kazık makinesi ile foraj (delgi) yapılır. Projede belirtilen derinlikten bir miktar fazla delgi yapılması kazık tabanının temizliği için önemlidir. Farklı zemin tipleri için çeşitli foraj ekipmanları kullanılmaktadır (auger, karotiyer, bucket vb.) Bu ekipmanlar da yine farklı zemin tiplerinde kendi içlerinde ayrılmaktadırlar. Foraj için uygun ekipmanın seçilmesi hem imalat süresi hem de forajın stabilitesi açısından oldukça önemlidir.

Değişen foraj ekipmanlarının yanında foraj stabilitesinin olmadığı ya da şüphelenilen durumlarda, muhafaza borusu veya foraj çeperlerinde stabilite sağlayabilecek bentonit ya da polimer kimyasalların kullanılması gereklidir. Bazı özel durumlarda, muhafaza borusu ve stabilite sağlayıcı kimyasalların birlikte kullanılması da söz konusu olabilmektedir.

Foraj sırasında yatay ya da düşey sapmaların önüne geçilmelidir. Yatayda oluşabilecek sapma sonucu yatay destek elemanlarının imalatı için gerekli çalışma alanı kalmayabilir. Düşeyde oluşabilecek sapmalarda ise göğüsleme (kuşak) kirişinin yapımı zorlaşır. İki tip sapma durumunda da iksaya gelen yüklerin doğrusal dağılması engellenir. Fore kazık imalatında kullanılacak kazık makineleri EN 791 ve EN 996 standartlarına uygun olmalıdır (TS EN 1536+A1). Şekil 4.13'te fore kazık makinesi gösterilmektedir.



Şekil 4.13 : Fore kazık delgi makinesi.

Donatı ve montajı

Foraj tamamlandıktan sonra kafes donatı foraja indirilir. Bu işlem yapılmadan önce aşağıdaki şartlar yerine getirilmelidir:

- Çelik donatı temiz şartlarda depolanmalı, montaj ve betonlama esnasında temiz, passız ve pullanma şeklinde pas tabakası olmamalıdır.
- Donatı kafesi betonlama esnasında doğru durumda kalacak şekilde, askıda veya destekli tutulmalıdır.

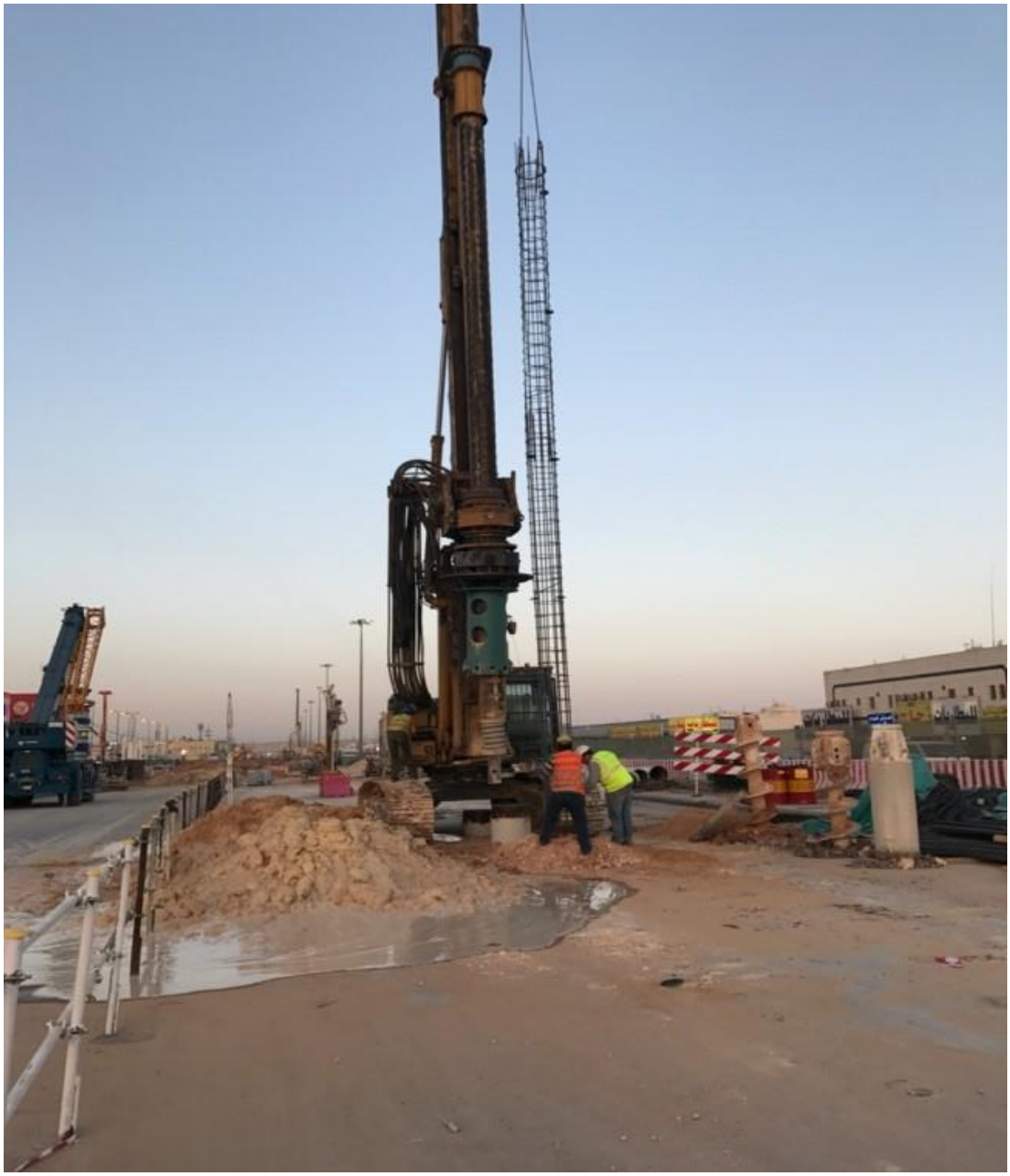
- Muhafaza borusuz eğik kazıklar yapıldığında, donatının durumu kontrol edilmelidir ve montaj için uygun desteklemeler kullanılmalıdır.
- Donatı kafesinin bölümleri arasındaki ek yerleri ilave bağlantı malzemeleri gerektirebilir (örneğin kelepçe veya nokta kaynağı).
- Donatı çubuklarının bükülme noktalarında veya yakınında kaynak yapılmamalıdır.
- Kullanılan çeliğin özelliğine göre, belirli şartlar içerisinde, nokta kaynağa izin verilebilir.
- Hiçbir donatı önceden onaylanmaksızın, 5º C'den aşağı sıcaklıkta bükülmemelidir.
- Bükmeden önce donatı 100º C'yi geçmeyen sıcaklığa kadar ısıtılabilir (TS EN 1536+A1).

Yukarıdaki şartlar ve projedeki tasarım doğrultusunda sahada donatı kafeslerinin montajı yapılır. Bağlar ve tutturmalar için tel, kelepçe veya gerektiği zaman kaynak kullanılır. Kafesi indirmeden önce pas payı elemanları simetrik olarak kafes etrafında düzenlenmelidir. Her seviyede en az 3 adet, her seviye için 3 metreden fazla olmayacak aralıklarla, güvenli yerleştirmeyi ve delik duvarlarındaki zararı önleyecek şekilde, muhafaza borusunun iç duvarına veya kazık deliğinin duvarına yeterli tolerans verilecek şekilde yerleştirilmelidir. Eğik kazıklarda pas payı sayısı arttırılmalıdır.

Montajı tamamlanan donatı kafesi foraj temizlendikten hemen sonra yerleştirilmelidir. Donatının yerleştirilmesi işlemi, kazık ekseninin doğru konumda ve donatı, kazığın tüm uzunluğu boyunca uygun beton örtüsü sağlayacak şekilde olmalıdır. Donatı kafesinin kazık deliğine indirilmesi Şekil 4.14'te gösterilmektedir.

Betonlama

Betonlama işlemi başlamadan önce forajın temizliği kontrol edilir. Foraj boydan boya istenen kesite sahip, sürekli tek parçalı bir beton kuyu oluşturacak şekilde kısmen veya tamamen beton ile doldurulur. Kazık betonunun performansını olumsuz yönde etkileyecek hiçbir zemin, sıvı veya diğer yabancı malzemenin betonu kirletmesine izin verilmemelidir.



Şekil 4.14 : Donatı kafesinin kazık deliğine yerleştirilmesi.

Fore kazıklarda betonlama işlemi için tremi borusu kullanılır. Tremi borusunun asıl amacı beton yerleştirilmesi sırasında betonun segregasyonunu engellemek ve foraj içindeki sıvıdan dolayı kirlenmesini engellemektir. Tremi borularının betonlamadan önce kabuklaşan betondan ve harçtan temizlendiğinden emin olunmalıdır. Tremi borusu harcın serbest olarak akması için düzgün olmalı ve büyük olanı alınmak kaydıyla en büyük agrega tane büyüklüğünün 6 katı veya 150mm düzgün dağılımlı iç çapa sahip olmalıdır. Ek yerleri ile birlikte, tremi borusunun dış çapı muhafaza borusunun iç çapı veya kazık çapının 0.35 katı, dairesel kazıklar için donatı kafesinin iç genişliğinin 0.6 katından büyük olmamalıdır (TS EN 1536+A1).

Tremi borusu betonlama başlamadan önce kazığın tabanına kadar indirilir ve ilk betonun tremi borusundan ayrılmasına izin vermek için boru bir miktar (iç çapını geçmeyecek kadar) yukarı kaldırılır. Betonlamanın devam etmesiyle birlikte tremi borusu da kademeli olarak yukarı kaldırılır. Tremi borusunun parçaları ayrılırken veya yukarı çekilirken beton içerisine en az 1.5m daldırılmış olmalıdır. Betonlama esnasında beton dökümüne ait gerekli numuneler alınır. Kullanılan beton EN 206:2013 hükümlerine uygun olmalıdır. Betonlama işlemine ait bir saha fotoğrafı Şekil 4.15'te verilmektedir.



Şekil 4.15 : Fore kazık betonlama işlemi.

4.2 Yatay Destek Elemanları

Bir derin kazının desteklenmesinde kullanılan iksa sisteminde yalnızca düşey destek elemanlarının kullanılması yeterli değildir. Düşey destek elemanları, yanal toprak basıncı etkisiyle kazıya doğru hareket etmek isteyecektir. İmalatı sadece düşey destek elemanlarıyla tamamlamak için ise tasarımda oldukça büyük kesitli düşey destek elemanlarının tercih edilmesi gerekecek ve yapılan tasarım ekonomik olmayacaktır. Bu nedenle oluşacak yanal yükleri karşılamak ve deplasmanları sınırlandırmak için yatay destek elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

İksa sisteminde kullanılacak yatay destek elemanının tasarımında yanal toprak basıncı ve bunun neticesinde oluşacak moment etkisinin yanında; çevre koşulları, civardaki yapılar, altyapı, imalatın yapım süresi ve maliyet göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bölümde başlıca yatay destek elemanlarından öngermeli ankrajlar, destek kirişleri (strut) ve zemin çivilerinin davranışları ve yapım yöntemleri anlatılacaktır.

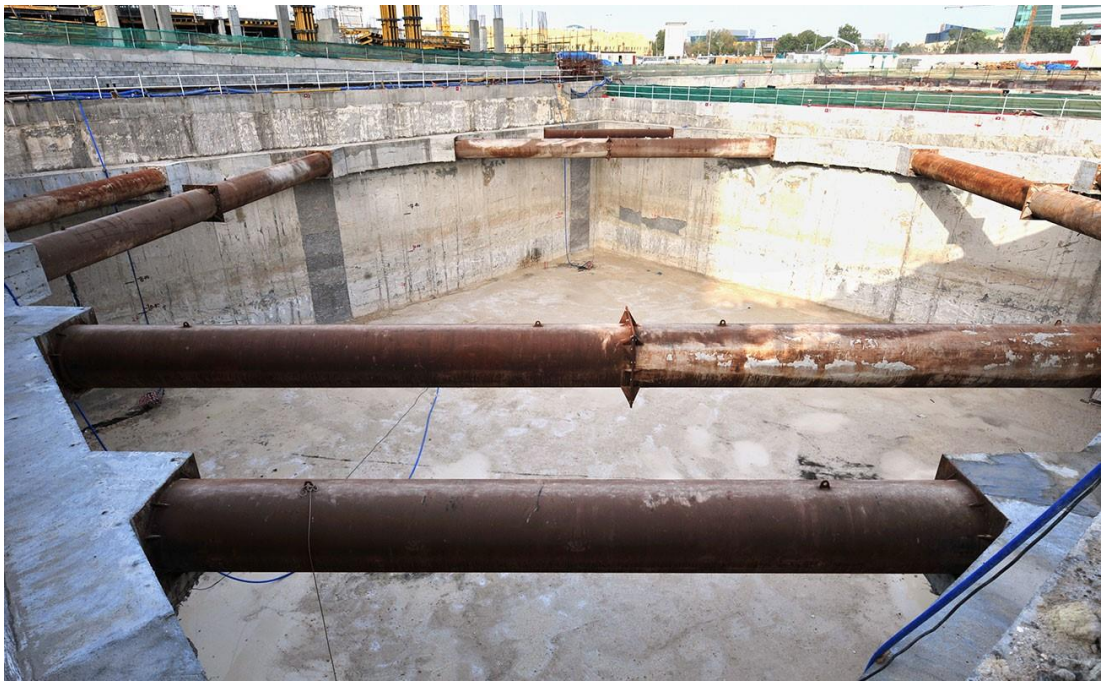
4.2.1 Destek kirişleri (strut)

Ankrajlar ve zemin çivisi gibi yatay destek elemanları kullanılarak oluşturulan iksa sistemleri, kazıyı sağlam tabakalardan aldıkları kuvvetle ayakta tutarlar. Bu tip elemanlar dıştan destek elemanları olarak tanımlanmaktadır. Destek kirişleri ya da İngilizce olarak “strut” ise iksa sistemine etkiyen kuvvetleri iksa sistemi içerisindeki karşı ya da komşu düşey elemanlardan alarak birbirlerine aktarırlar. Bu nedenle destek kirişleri (strut), içten destek elemanları olarak nitelendirilirler (Şekil 4.16).

İçten destekli iksa sistemleri, ankraj veya zemin çivisi imalatına müsaade etmeyen, yumuşak, yüksek yer altı suyu seviyesine sahip zeminler gibi elverişsiz zemin koşullarında tercih edilirler. Bunun bir nedeni de çevredeki komşu yapılar veya altyapı da olabilir.

İçten destekli iksa sistemleri çelik ya da betonarme olabilir. Uygulamalarda yaygın olarak çelik profil ya da borular kullanılır. Ahşap üretiminin yüksek seviyede olduğu bazı ülkelerde, maliyeti düşürmek amacıyla dar ve derin olmayan kazılarda ahşap destek kirişleri de kullanılmaktadır. Ahşap kirişler düşük maliyetlidir fakat basınç dayanımları, çatlakları ve aşınmaya müsait yapıları onları oldukça zayıf kılmaktadır (Ou, 2006).

Çelik destek kiriş sisteminin kolay şekilde montajlanması ve sökülmesi, hızlı imal edilmesi, düşük maliyetli olması ve tekrar kullanılabilmesi gibi pek çok avantajı vardır. Çelik elemanların montajında tasarım esasına göre bulon ya da kaynak kullanılmaktadır. Destek kiriş sisteminin tasarlanmasında iksa sisteminde kullanılan düşey destek elemanlarının karakteristikleri belirleyicidir. Dolayısıyla destek kirişleri tasarlanırken her zaman projelerde kullanılan düşey destek elemanlarıyla birlikte göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.16 : Destek kirişleri (strut).

4.2.2 Zemin çivileri

Zemin çivileri, gevşek ya da sert zeminlerde kazıyı desteklemek için kullanılan yatayla açılı delinmiş ve enjeksiyonlanmış, pasif yatay destek elemanlarıdır (Şekil 4.17). Zeminde oluşan çekme kuvvetlerini karşılayarak kazının stabilitesini sağlarlar. Kayma gerilmesinin enjeksiyon etrafında dağılmasıyla çekme kuvveti zemine aktarılır. Zemin çivisi imalatında çelik veya fiber donatı kullanılır.

İmalat tekniği olarak ankrajlarla benzerlik göstermesine rağmen, çalışma prensibi olarak farklılık gösterir. Ankrajlı sistemler gibi aktif olarak yüklenmedikleri için pasif ankraj olarak da isimlendirilirler (Dayıoğlu, 2010).

Sırasıyla kazı, zemin çivisi delgisi, çivinin yerleştirilmesi ve enjeksiyonun yapılması, drenaj, geçici kaplama ve kalıcı kaplama bir zemin çivisi imalatının başlıca adımlarıdır.

Uygun delgi ekipmanıyla delgi tamamlandıktan sonra zemin çivisi, merkezleyici kullanılarak delginin içine yerleştirilir. Bu işlemin ardından delginin stabilitesinin bozulmaması için en kısa sürede enjeksiyon yapılır. Geçici iksa yapıları için hava darbeli veya hidrolik çekiçlerle çakılan zemin çivileri de mevcuttur. Fakat bu uygulamada çivi uzunluğu sınırlı olduğu için kullanımları yaygın değildir.

Enjeksiyonu tamamlanan zemin çivisi imalatını yüzey kaplaması takip eder. Yüzey kaplaması için püskürtme beton, yerinde döküm ya da prekast betonarme perde kullanılır. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan püskürtme beton (shotcrete) donatılı ya da donatısız imal edilebilir. Püskürtme beton donatısı için hasır çelikler kullanılır. İmalat tekniğine bağlı olarak kaynakla ya da teller yardımıyla montajı yapılır.

Yüzey kaplaması yapılmadan önce kazı yüzeyinin drenajının sağlanması için ilave delgiler ve borulama ile yer altı suyu kontrol altına alınır ve geokompozit drenaj malzemeleri kullanılarak izolasyon sağlanır.



Şekil 4.17 : Zemin çivileri.

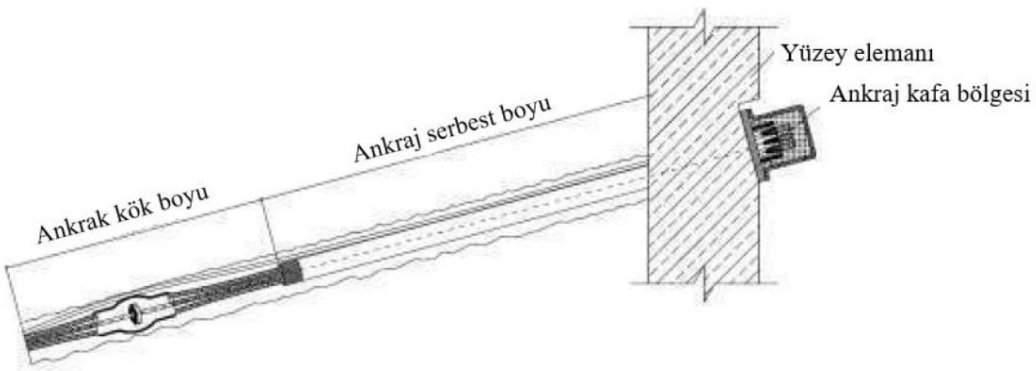
4.2.3 Öngermeli zemin ankrajları

Zemin ankrajları, yumuşak ya da sert zeminlere yerleştirilen yapısal elemanlardır. Ankrajlar sayesinde uygulanan çekme yükü zemine aktarılır. Enjeksiyonlanmış zemin ankrajları ya da kolay tanımla zemin ankrajları, delgisi yapılmış bir kuyuya ankrajın yerleştirilmesi ve akabinde enjeksiyonlanması ile imal edilirler (FHWA-IF-99-015, 1999).

Kazı şevlerinin stabilitesinin geçici veya sürekli olarak sağlanması, deprem kuvvetlerine karşı temellerin derindeki tabakalara tutturulması, suyun kaldırma kuvvetine karşı temellerin tespiti, tabii şevlerin güvenliğinin arttırılması gibi çeşitli zemin problemleri, ankrajlardan faydalanılarak çözülmektedir. Böylece zemin yüzeyinde ihtiyaç duyulan pasif kuvvet, geride veya derinde bulunan sağlam tabakalardan sağlanmaktadır.

Büyük yükler taşıyabilen ankrajlar, yapıldıktan sonra dahi suyun kaldırma kuvvetine karşı yapının ağırlığının arttırılması veya ağırlık istinat yapıları inşası gibi alışılmış inşaat metotlarından faydalanılmaya devam edilmiştir. Bununla beraber, zemin ankrajlarının alışılmış metotlara, sade ve çeşitli kullanılış imkânları bulunan bir alternatif olduğu muhakkaktır. Bu yüzden de gittikçe büyüyen bir uygulama alanı bulunmaktadır (Toğrol, 1972).

Ankrajların ana elemanları ankraj kafası, kök bölgesi ve serbest bölgedir (Şekil 4.18). Ankraj, elemanlarıyla birlikte uygulanan öngerme yükünü, tendonlarından zemin yüzeyine ya da desteklenmiş bir yapıya aktarma kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.18 : Ankrajı oluşturan bölümler.

Öngermeli tendonun elastik olarak uzayabildiği ve uygulanan kuvveti kök bölgesine ileten ankraj bölümü serbest bölge olarak tanımlanır. Ankraja yapılan enjeksiyondan etkilenmemesi için serbest bölge, geçirimsiz plastik bir malzeme ile koruma altına alınır. Bu sayede öngerme esnasında yapılan testlerde tendonların herhangi bir sorun olmadan uzaması sağlanır.

Ankrajın enjeksiyonlanan ve uygulanan yükü zemine aktaran bölümü kök bölgesi olarak tanımlanır. Ankraj kök bölgesi kritik kayma düzleminin arkasında kalmalıdır. Öngerme sebebiyle oluşacak yükleri yüzeye dağıtan, germe kafası, sıkıştırıcı (kama-krip) ve plakadan oluşan bölüme ankraj kafası denir. Yapılan öngerme testlerinin ardından ankraj servis yüküne kilitlenir (FHWA-IF-99-015, 1999).

4.2.3.1 Ankrajların sınıflandırılması

Çalışma ömürlerine göre ankrajlar

Çalışma ömürlerine göre ankrajlar; kalıcı ve geçici olarak sınıflandırılırlar. Kalıcı ankrajlar, imalatı tamamlanan bir ankrajın, yapının ya da derin kazının servis ömrü boyunca yanal yükleri karşılaması hedeflenen ankrajlardır. Bu nedenle imalatı esnasında geçici ankrajlara nazaran korozyon oluşmaması için ilave önlemler alınmalıdır. Geçici ankrajlar, herhangi bir derin kazıda ortaya çıkabilecek yanal yükleri karşılamak ve dolayısıyla kazı alanının ve çevresindeki yapıların emniyetini sağlamak amacıyla yapılan ankrajlardır.

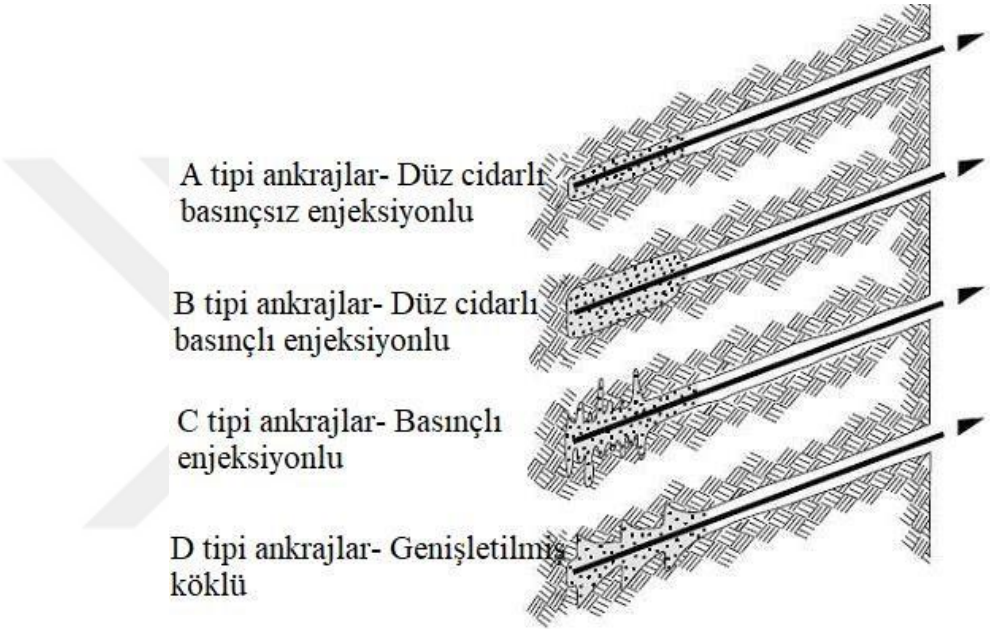
Yapım yöntemlerine göre ankrajlar

Ankrajlar yapım yöntemlerine göre; düz cidarlı basınçsız enjeksiyonlu, düz cidarlı basınçlı enjeksiyonlu, basınçlı enjeksiyonlu olarak üçe ayrılırlar. Bu tip ankrajların dışında çok yaygın olarak kullanılmamasına rağmen genişletilmiş köklü ankrajlar da farklı bir ankraj tipi olarak tanımlanmıştır. Yapım yöntemlerine göre ankrajlar Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Her bir yapım yöntemine göre rotari (dönüşlü), darbeli, darbe dönüşlü ya da auger (burgu) delgisi metotlarından birisi seçilir. Ankrajlar için delgi prosedürü ve yöntemi proje yönetimi tarafından seçilir. Delgi yöntemi seçilirken sahadaki koşullar kapsamlı bir şekilde göz önüne alınmalı ve delgi metoduna karar verecek kişiler delgi metodunun sınırlarını belirlemelidir.

Delgi yöntemi seçilirken ankraj delgisi boyunca uzanan zemin çeperine ya da zemin yüzeyini olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir durumdan kaçınılmalıdır. Delgi

esnasında yanlış delgi yöntemi yüzünden delik hacminden daha fazla bir malzeme boşalabilir ve bunun neticesinde yüzeydeki yapılar ve delgi çeperi önemli ölçüde hasar alır. Stabil olmayan zeminlerde delgi esnasında muhafaza borusu kullanılmalı ve delgiden çıkan malzemenin tahliyesi için delgiye su veya hava verilmelidir. Tamamlanan delginin temizliği için hava verilmesi durumunda ise ilave önlem alınmalıdır. Bunun sebebi hava ile temizlenen delgilerde hava basıncının yüksek olup yeraltı suyunun delgiden tahliyesi esnasında delgi çeperine temasıyla birlikte istenmeyerek delgi çeperinde göçmeler oluşabilmesidir.



Şekil 4.19 : Yapım yöntemine göre ankrajlar.

- A tipi ankrajlar (düz cidarlı basınçsız enjeksiyonlu) genellikle kaya veya çok katı kohezyonlu zeminler için tercih edilirler. Bu tarz zeminlerde rotari ya da auger ile delgi yapılması oldukça güçtür. Delginin stabilite durumuna göre muhafaza borusu kullanılmalıdır. Ankrajın çekmeye karşı dayanımı, yapılan enjeksiyonunun delgideki çeper yüzeylerine etkisiyle zeminin çekme mukavemetine bağlıdır.
- B tipi ankrajlar (düz cidarlı basınçlı enjeksiyonlu) iri taneli granüler zeminler ve zayıf çatlaklı kayalarda kullanılırlar. Ayrıca ince taneli kohezyonsuz zeminlerde de B tip ankrajlar kullanılır. Bu ankraj yönteminde, enjeksiyon ankrajın kök bölgesine 0.35 MPa'dan daha büyük bir basınçla etki eder. Delgi yöntemi olarak burgulu auger ya da muhafaza borulu çeşitli rotari delgi yöntemleri tercih edilir.

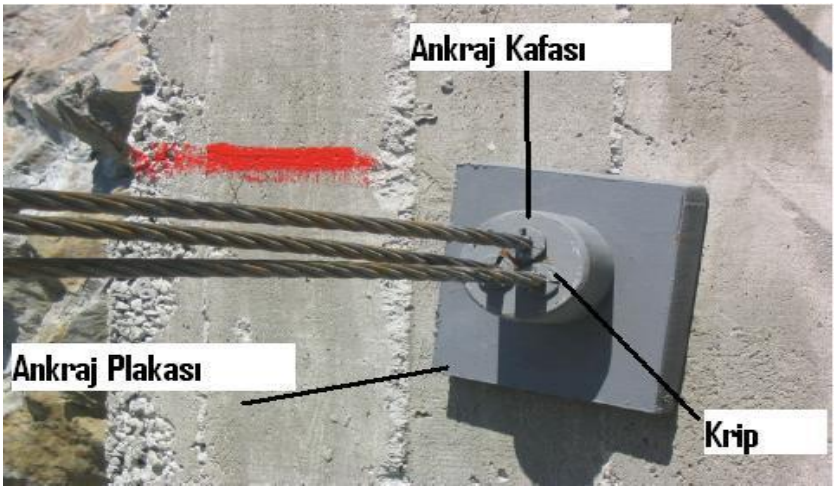
- C tipi ankrajlar (basınçlı enjeksiyonlu) patlatmalı enjeksiyonlu ya da bir başka tabirle ikincil enjeksiyonlu ankraj olarak tanımlanırlar. Ankrajlar delgilere yerleştirilmeden iki kez enjeksiyon yapılmasına müsaade edecek şekilde enjeksiyon tüpleri ile donanırlar. Bu tip ankrajlarda birinci enjeksiyon tamamlandıktan birkaç saat sonra ikinci enjeksiyon (patlatma) yapılır. Yapılan ikinci enjeksiyon ile zemin çeperi olabildiğince genişler ve enjeksiyonun etkilediği alan artar.
- D tipi ankrajlar (genişletilmiş köklü) katı ve sert kohezyonlu zeminlerde kullanılabilir. Kök bölgelerinin genişletilmesi için patlayıcılar ya da mekanik yöntemler kullanılır. Bu yöntemle zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünmeye ek olarak, genişletilmiş köklerin uç direnci de hesaplara dahil olmaktadır.

Gerilme durumuna göre ankrajlar

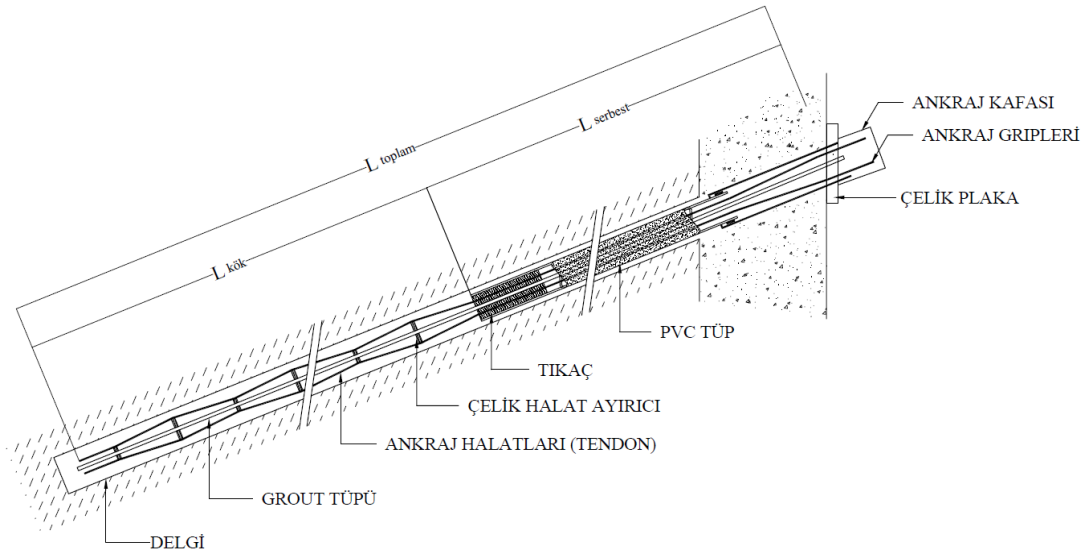
Gerilme durumuna göre ankrajlar; pasif ve aktif olarak sınıflandırılırlar. Pasif ankrajlar ilk imal edildiklerinde herhangi bir yük etkisi altında değillerdir. Zaman içerisinde basınç etkisi sonucu zemin hareketi ile gerilerek yük taşımaya başlarlar. Aktif ankrajlar imalatı yapılan ankraja uygulanan öngerme işlemi ile çalışmaya başlarlar. Zemin hareketlerinin sınırlandırılmasında etkin rol oynarlar.

4.2.3.2 Ankraj elemanları

Çelik halatlar (tendon), pas payı, merkezleyici, ankraj plakası, ankraj kafası ve enjeksiyon ankrajın temel elemanlarıdır (Şekil 4.20). Öngermeli geçici ankraj detayına ait şematik gösterim Şekil 4.21'de verilmektedir.



Şekil 4.20 : Ankrajlar elemanları.



Şekil 4.21 : Öngermeli geçici ankraj detayı (ölçeksiz).

Halat (tendon)

Kullanılacak halat standartları ASTM A886'da belirtilmiştir. Zemin ankrajlarının yaklaşık 18m'ye kadar manşonsuz olarak 26mm, 32mm, 36mm, 45mm ve 64mm çaplı çelik halatlarla imal edilmeleri mümkündür. Yaklaşık olarak 2,077 kN'a kadar olan ankraj tasarım yükleri 64mm çaplı bir çelik halat tarafından karşılanabilir. Ankraj uzunluğu 18 metreden fazla olduğunda ve alan çelik tendon uzunluğunu sınırladığında tendonları uzatmak için manşon kullanılabilir. Çelik tendonlar 7 adet çelik telden oluşur. Uygulamada yaygın olarak 15mm çaplı halatlar kullanılır.

Pas payı ve merkezleyici

Pas payı ve merkezleyiciler ankraj kök bölgesinde belirli aralıklarla (genellikle 3m) yerleştirilmiş elemanlardır. Çelik tendonlar arası pas payları çoğunlukla 6 ile 13mm arasındadır. Ankraj halatı ve delgi çeperi arasında minimum enjeksiyon örtüsü 13mm olacak şekilde boşluk sağlarlar.

Ankraj plakası

Ankraj plakası, ankraja gelen yükleri düşey destek elemanlarına aktaran ankraj elemanlarıdır. Bu plakalar kaynatılırken ankrajın açısına uygun kaynakların yapılması oldukça önemlidir. Aksi halde işlevlerini önemli ölçüde yitirirler.

Ankraj kafası

Çelik halatlar ankraj kafası üzerindeki deliklerden geçerek kripler yardımıyla öngerme işleminde sıkıştırılırlar. Bu işlem sonrasında ankraja gelen yükler ankraj kafası yardımıyla plakaya aktarılmış olur. Öngerme işlemi ankraj kafasında yapılır.

Enjeksiyon

Enjeksiyon, ankraj kök bölgesinde halatlardan aldığı yükü zemine aktaran elemandır. Su, çimento ve ihtiyaca göre katkı kullanılarak elde edilirler. Su/çimento oranı 0.4 ile 0.55 aralığında olmalıdır.

Sahada imalatı tamamlanmış ankrajlar ile ankraj halatları Şekil 4.22'de verilmektedir.

4.2.3.3 Ankraj serbest ve kök boylarının hesabı

Serbest boy hesabı

Ankraj kök bölgesi ile kazı (duvar) yüzeyi arasında kalan bölüm ankraj serbest bölgesi olarak tanımlanmıştır. Çelik tendonlardaki yük, serbest boydan ankrajın enjeksiyonlu bölümüne aktarılır. Ankraj kök bölgesinin kritik kayma düzleminin arkasında kalması gereklidir. Ankraj serbest boyu da kritik kayma bölgesinin yerinin ve ankraj kök boyu uzunluğunun tespiti sonrasında hesaplanmış olur. Çelik tendonlar için minimum ankraj serbest boyu 4.5m alınır.



Şekil 4.22 : Ankraj imalatı.

Çelik tendonlar için malzeme özellikleri ASTM A416'da belirtilmiştir. 15mm çaplı, 1860 (270) sınıfı bir öngermeli çelik halat özellikleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Bu tablo yardımıyla ankraj tasarımında kullanılmak üzere halat sayısı belirlenir.

Çizelge 4.2 : Öngermeli çelik halat özellikleri.

Halat sayısı (Ø15)	Kesit alanı (mm^2)	Maksimum Kuvvet (kN)	Öngerme Kuvveti (kN)		
			Maksimum Test Yükü 0.8 fpu x Aps	Kilit Yükü 0.7 fpu x Aps	Tasarım Yükü 0.6 fpu x Aps
1	140	260.7	209	182	156
2	280	521.4	417	365	313
3	420	782.1	626	548	469
4	560	1042.8	834	730	626

Kök boyu hesabı

Kök boyu çelik tendon ve enjeksiyondan oluşur. Enjeksiyonlu bölüm ile zemin arasında oluşan sürtünme ile ankajdaki yük zemine aktarılır. Enjeksiyon, çimento, su ve katkıdan oluşur. Ankraj enjeksiyonlarında agrega bulunmaz (ASTM C150). Enjeksiyondaki su/çimento oranı 0.4 ile 0.55 arasında olmalıdır. 1.tip çimentonun öngerme anındaki 28 günlük minimum basınç dayanamı 21MPa'dır. Kök bölgesinin maksimum yük kapasitesi T_f, kN cinsinden denklem 4.1 ile hesaplanabilir (BS 8081, 1989).

$$T_f = \pi . D . L . \alpha . c_u \tag{4.1}$$

Burada:

c_u: Ankraj kök boyuna etkiyen ortalama drenajsız kayma mukavemeti (kN/m^2)

α: Adezyon katsayısı

D: Delgi çapı (m)

L: Ankraj kök boyu uzunluğu (m)

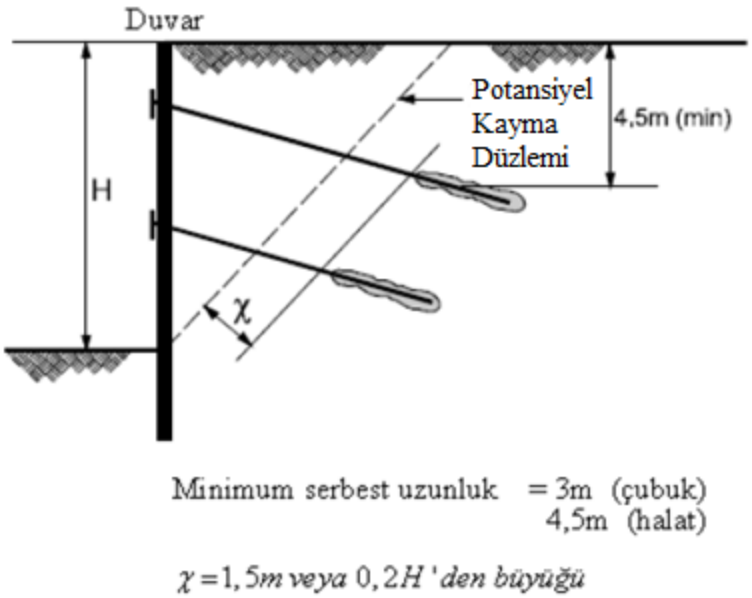
Uzunluğu 10 metreyi aşan kök boyu, yük transferinde verimli olmaz. Bu nedenle optimum kök bölgesi uzunluğu 10m alınır (BS 8081, 1989). Eğer halat boyunun uzaması isteniyorsa halat çapının arttırılması veya enjeksiyon yönteminin değiştirilmesi önerilir.

Ankraj kök boyu hesabı araziye ait değerleri içerdiğinden dolayı en doğru yapılacak hesaplamayı sahada yapılan yükleme deneyleri verecektir.

Kritik kayma düzleminin belirlenmesi

İksa sistemine ait kritik kayma düzlemi, kök ve serbest boyların hesaplanmasında önemlidir. Kök bölgesinin kritik kayma kamasının dışında kalması gerekmektedir. FHWA-IF-99-015'da duvar dibinden yatayla α kadar bir düzlem oluşturularak kritik kayma düzleminin belirlenmesi önerilmektedir.

Burada α açısı 45 + ϕ′/2 şeklinde tanımlanmaktadır. Oluşturulan bu kayma düzleminin, kök bölgesinde meydana gelecek öngerme kuvvetinden minimum etkilenmesi için H duvar yüksekliği olmak üzere 0.2H veya 1.5m değerlerinden büyük olanı kadar ötelenmelidir. Ötelenerek oluşturulan bu düzlem serbest bölgenin sonu kök bölgesinin ise başlangıcı olarak tanımlanmaktadır. Buna ek olarak, Şekil 4.23'te görüldüğü gibi yüzey ile kök bölgesinin orta noktası arasında minimum 4.5m mesafe bulunmalıdır. Bunun nedeni basınçlı enjeksiyonlu ankrajlarda enjeksiyon kaçağının önlenmesi ve enjeksiyon basıncı nedeniyle zemin kabarmasının önlenmesidir. Basınçsız enjeksiyonlu ankrajlarda ise bu mesafe, ankraj kapasitesinin zemin jeolojik yükü ile sağlanmasıdır (FHWA-IF-99-015, 1999).



Şekil 4.23 : İksa sisteminin kritik kayma düzleminin belirlenmesi (FHWA-IF-99-015, 1999).

Kök bölgesinde enjeksiyon ile zemin arasındaki sürtünme direnci, ankrajın deney yüklerini ve servis ömrü boyunca etkiyecek yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Enjeksiyon ile zemin veya kaya arasındaki sürtünme direnci doğru

şekilde hesaplanmalıdır. Söz konusu sürtünme direncinin hesabı için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'ten faydalanılabilir.

Çizelge 4.3 : Zemin türlerine göre ankraj kök bölgesindeki tahmini sürtünme direnci (FHWA-IF-99-015, 1999).

Zemin Türü	Rölatif Sıkılık/Kıvam/ SPT Aralığı	Tahmini Sürtünme Direnci (kN/m)
Kum ve Çakıl	Gevşek (4-10)	145
	Orta Sıkı (11-30)	220
	Sıkı (31-50)	290
Kum	Gevşek (4-10)	100
	Orta Sıkı (11-30)	145
	Sıkı (31-50)	190
Kum ve Silt	Gevşek (4-10)	70
	Orta Sıkı (11-30)	100
	Sıkı (31-50)	130
Düşük plastisiteli silt-kil veya çok daneli kum-silt karışımları	Katı (10-20)	30
	Sert (21-40)	60

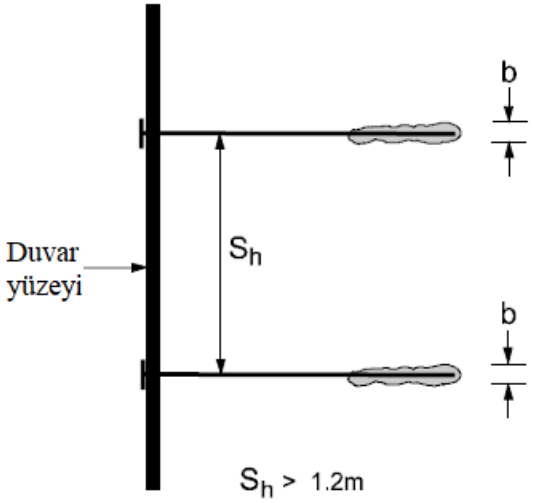
Çizelge 4.4 : Kaya türlerine göre ankraj kök bölgesindeki tahmini sürtünme direnci (FHWA-IF-99-015, 1999).

Kaya Türü	Tahmini Sürtünme Direnci (kN/m)
Granit Bazalt	730
Dolomatik Kireçtaşı	580
Yumuşak Kireçtaşı	440
Kumtaşı	440
Arduvaz ve Sert Şeyl	360
Yumusak Şeyl	150

4.2.3.4 Ankraj yatay mesafesi

Literatürde çeşitli kaynaklara göre ankrajlar arası yatay mesafenin sınırlandırılmasıyla ilgili ölçüler verilmektedir. Örneğin, FHWA-IF-99-015'da bu mesafenin 1.2m'den daha az olamayacağı belirtilmiştir (Şekil 4.24). Bunun nedeni ise delgi esnasında ya da delgi sonrasında birbirine çok yakın olan ankraj delgileri arasında herhangi bir temasın olabileceğidir. Çeşitli zemin tiplerine göre delgi esnasında kılcal boşluklar

aracılığıyla delgiler birbirlerine temas edebilir. Bunun sonucunda yapılan enjeksiyon ve dolayısıyla ankraj imalatı işlevsiz hale gelebilir. Delgilerin birbirine temas etmesi durumunda, ankrajlar yerleştirilmeden önce temas eden kuyular tamamen enjeksiyon ile doldurulur. Prizini alan enjeksiyon üzerinden yeniden ankraj delgileri yapılır ya da ankraj lokasyonları mühendis kontrolü ile revize edilir.



Şekil 4.24 : Ankrajlar arasındaki minimum yatay mesafe (FHWA-IF-99-015, 1999).

5. İKSA SİSTEMLERİNDE ALETSEL GÖZLEM

Günümüz şartlarında çok katlı ve derin yapılara ihtiyaç duyulması doğrultusunda derin kazılar yapılmaktadır. Derin kazıların imalatı sırasında veya sonrasında ortaya çıkabilecek planlanmayan bir deformasyon çok büyük sorunlara neden olabilir. Bu nedenle deformasyonların tasarım sırasında realist olarak ele alınması ve imalat esnasında aletsel gözlem sistemi ile kontrol edilip, takibinin yapılması oldukça önemlidir.

Çok kapsamlı jeolojik araştırmaların varlığına rağmen; zemin testleri, hassas analiz ve tasarımlar, kazı teorileri pek çok hipoteze dayanmaktadır ve beklenmeyen zemin şartlarına göre bu değişkenlerin üstesinden gelmek oldukça zordur. Bu nedenle kazı imalatı, kazıdan kaynaklanan deplasman ve gerilmeleri ivedilikle bildiren bir aletsel gözlem ile birlikte yapılmalıdır. Projeden sorumlu mühendisler bu sayede kazı alanının güvenilirliğini herhangi bir zamanda test edebilmektedirler. Büyük çaplı kazılarda jeolojik belirsizlikler artacak ve aletsel gözlem ihtiyacı daha hızlı bir şekilde doğacaktır (Ou, 2006).

Hayati önemine rağmen, aletsel gözlem (enstrümantasyon) tek başına iyi dizayn ve problemsiz uygulamayı garanti etmez. Yanlış yere yerleştirilen yanlış enstrüman en iyi koşulda kafa karıştırır, kötü koşulda ise problemi gölgelemesi nedeniyle amaçtan uzaklaştırır ve tehlikelidir. Aşırı miktarda enstrüman yerleştirmek para ziyanına neden olurken buna karşılık tasarruf etmek amacıyla gereğinden az enstrüman yerleştirmek ise yanlış tasarruftan fazlasına neden olabilir. Bazı durumlarda problemi gizleyerek tehlikeli dahi olabilir. Geoteknik davranışı kontrol eden mekanizmanın belirlenmesini müteakip, projelendirme aşamasında takip edilebilecek parametreler, kıyaslama yapılabilecek şekilde gözlemlenmelidir (İnanir, 2015).

5.1 Aletsel Gözlemin Amacı

Aletsel gözlem ile yapılan derin kazının stabilitesinin değerlendirilmesi, kazıdan kaynaklı deformasyonlar sonucu çevre yapıların veya civardaki altyapının bir zarar

görüp görmediği hızlı ve en önemlisi ekonomik bir şekilde tespit edilir. Aletsel gözlemin en önemli amaçlarından birisi; kazının stabilitesinin değerlendirilmesi sonucu kazı alanının güvenli olup olmadığının tespitine olanak sağlanmasıdır.

Bununla birlikte aletsel gözlem ile, tasarımda öngörülen değerlerin imalat ile karşılaştırılması sonucunda, imalatın kalite kontrolü de yapılmış olur. Bu kontrol sonucunda, arazideki değerlerin, tasarımdaki değerler ile uyumsuz olması, projenin revizyonuna karar verilme olanağı sağlar.

Geoteknik koşulların karmaşık olduğu durumlarda yapılan tasarımlar veya öngörüler sonucu, zemin ile iksa sistemini arasındaki etkileşim tam olarak ortaya çıkmayabilir. Aletsel gözlemin bir diğer amacı da böyle durumlarda seçilen iksa sistemine göre zemin davranışını kesin olarak ortaya çıkarmasıdır.

Genel olarak derin kazılarda meydana gelebilecek deformasyonlar iksa sisteminden kaynaklı olduğu için, yatay ve düşey hareketlerin izlenmesinde yüksek hassasiyete sahip inklinometre cihazları aletsel gözlem yöntemi olarak tercih edilir.

5.2 İnklinometre

İksa sistemindeki yatay ve düşey deformasyonları gözlemlemek ve verileri toplamak için kullanılan en yaygın cihazlar inklinometrelerdir. İnklinometre aleti algılayıcı (prob), kayıt cihazı ve bunlar arasındaki bağlantıyı sağlayan kablodan oluşur (Şekil 5.1).

Gövdesi paslanmaz çelikten yapılmış olan algılayıcının ucunda iki adet tekerlek bulunur. Prob, genellikle 90º'lik arayla yerleştirilmiş 4 adet kanalı bulunan esnek ve dairesel borular içinde hareket eder. Prob, yapılan ölçümleri görsel verilere ve grafiklere dönüştürür.



Şekil 5.1 : İnklinometre cihazı parçaları.

5.2.1 Yapım yöntemi

İnklinometrenin hassasiyeti, kayıt cihazı ve algılayıcının (prob) ölçüm kapasitesine bağlı olduğu kadar inklinometre borusunun yerleştirilme kalitesine de bağlıdır. Eğer tasarım, yerleştirme veya alınan okumalardan herhangi biri doğru değilse ya da arazi koşulları ve ölçüm objeleri ile uyuşmuyorsa alınan sonuçlar doğru olmayacaktır.

5.2.2 Delgi

Deformasyonların ölçümü için ilk olarak delgi yapılır. Delgi yöntemi, göçmeleri engelleyecek şekilde seçilmelidir. İnklinometre borusunun etrafının doğrusal bir şekilde enjeksiyonlandığından ve boru etrafında herhangi bir göçme ya da gevşek malzemenin boru etrafını tıkamadığından emin olmak adına delgi çapı yeterli büyüklüğe sahip olmalıdır. Ayrıca, inklinometre boruları yerleştirilmeden önce delgilerin temiz olduğu kontrol edilmelidir. Delgiler için dikey yönde çalışabilen sondaj ya da ankraj delgi makineleri kullanılabilir. İnklinometre delgisine ait bir görsel Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.2 : İnklinometre delgisinin yapılması.

5.2.3 İnklinometre borusunun yerleştirilmesi

Yapılan delgilere, olukları aynı yöne bakacak şekilde (muhtemel hareketin referans yönü olması amacıyla) 3.0m boyundaki inklinometre boruları birbirlerine özel bağlantılarla eklenerek projede belirtilen derinliğe kadar indirilir (Şekil 5.3). İlk borunun tabanından itibaren zemin yüzeyine kadar enjeksiyon hortumu uzatılır.

İnklinometre boruları delgiye indirilirken, yapılacak enjeksiyonun boru etrafına olabildiğince eşit dağılması için borular delginin merkezine indirilmelidir. Herhangi bir yöne kaçıklık olmamalıdır. Ayrıca ileride alınacak okumalardaki hataları minimize etmek amacıyla borular olabildiğince dik açıyla indirilmelidir. Yeraltı suyunun olduğu lokasyonlarda inklinometre boruları indirilmeden önce içleri su ile doldurulur. Aksi halde borular sabit bir şekilde indirilemez.



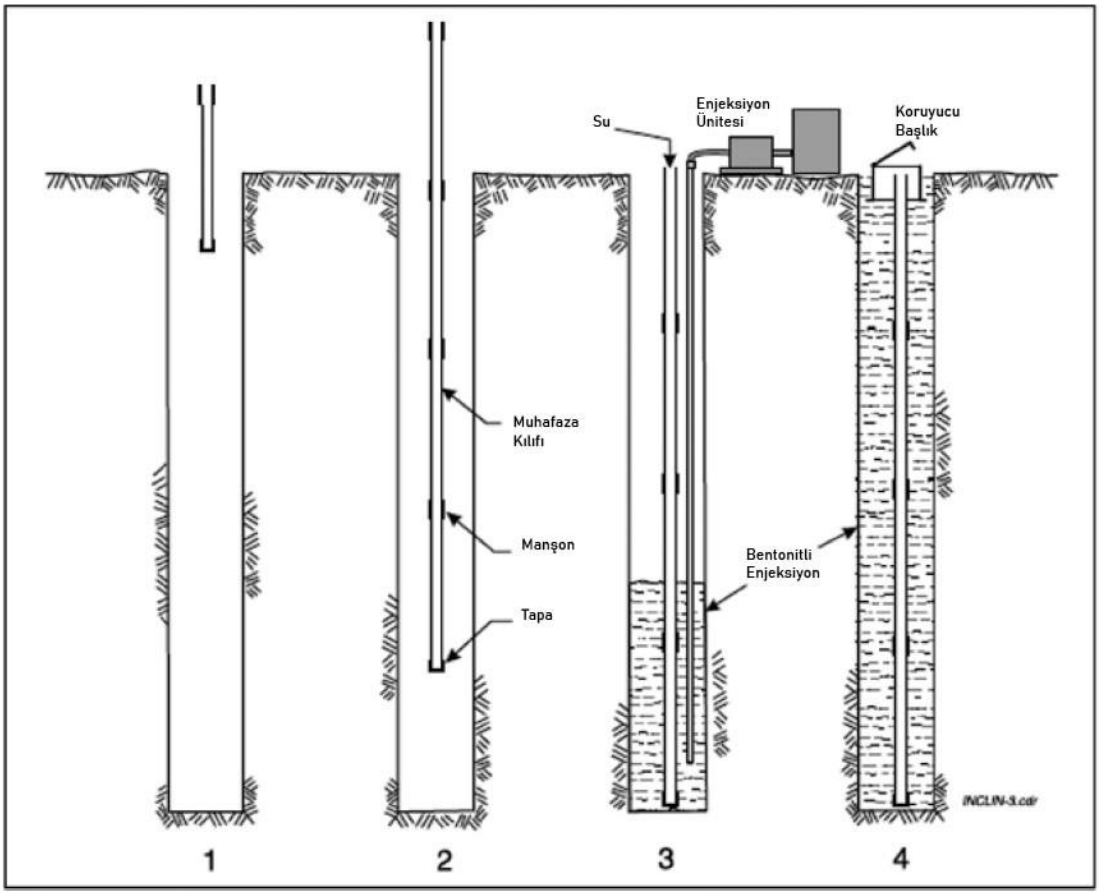
Şekil 5.3 : İnklinometre borularının birbirine eklenmesi.

5.2.4 Enjeksiyon

İnklinometre borusunun etrafına enjeksiyon yapılacağı için boru birleşim yerlerinin herhangi bir sızıntıya karşı güvenli olduğundan emin olunmalıdır. İndirme işlemi tamamlandıktan sonra boru etrafına çimento ve su (ihtiyaca göre katkı ya da bentonit) kullanılarak enjeksiyon yapılır. İnklinometre yerleştirme adımlarının şematik görünümü Şekil 5.4'te verilmektedir. Okuma yapılabilmesi için enjeksiyonun priz alması beklenir. Priz süresi takriben 3 gündür.

Tanecikli malzeme ile geri dolgu yöntemi de inklinometre borusunun etrafının geri dolgusu için bir yöntemdir. Fakat yapılan delgide oluşacak serbest boşlukları ve gevşek malzemenin göçmesini engelleyemeyeceği için tercih edilmez. Ayrıca bu

yöntem, enjeksiyon yöntemine göre aynı hassasiyette ölçüm alma imkânı vermeyecektir.



Şekil 5.4 : İnklinometre yerleştirme adımlarının şematik görünümü.

5.2.5 Okuma alınması

Birbirine 90º açı yapan oluk çiftleri A+A- ve B+B- olarak adlandırılırlar. Okuma yapılmadan önce prob üst tekerleği muhtemel zemin hareketinin referans yönüne (A+) getirilerek kuyu tabanına kadar yavaş bir şekilde indirilir. Cihaz kuyu tabanına indirildikten sonra tabandan yukarıda ilk okumanın alınacağı mesafeye kadar bağlı olduğu kablo yardımıyla yukarı çekilir ve askıya alınır. Kayıt cihazında okunan değerler cihaza kaydedilir. Okumalar zemin yüzeyine kadar 0.5m aralıklarla devam ettirilir ve A+B+ ölçümleri kaydedilir. Bu işlemden sonra prob tekerlik yönü tam 180º döndürülerek aynı şekilde A-B- ölçümleri alınır.

Sahada herhangi bir inklinometre kuyusunda yapılan ilk okuma, sıfır okuması ya da bir diğer deyişle baz okuması olarak adlandırılır. Sıfır okumalarından birkaç gün sonra ilk okuma yapılır ve periyodik olarak projenin gerekliliklerine göre 1 ya da 2 haftalık periyotlarla okuma almaya devam edilir. Alınan okumalar neticesinde imalattan

sorumlu kişilerin görüşlerine göre okuma alım sıklığı farklılık gösterebilir. İnklinometre okumasına yönelik bir görsel Şekil 5.5'te paylaşılmaktadır.



Şekil 5.5 : Tamamlanmış inklinometre kuyusu ve okuma alınması.

6. SONLU ELEMANLAR METODU VE PLAXIS 2D BİLGİSAYAR PROGRAMI

6.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Hızla gelişen teknoloji ile birlikte karmaşık problemlerin çözümünde bilgisayar programları yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu programların temelini oluşturan yöntemlerden birisi de sonlu elemanlar metodudur. Sonlu elemanlar metodu ilk olarak 1956 yılında, uçak endüstrisi ile ilgili gerilme analizlerinin çözümünde kullanılmış, daha sonraki yıllarda geoteknik mühendisliği de dahil olmak üzere mühendisliğin birçok alanında kabul görerek yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanlar metodu, karmaşık bir problemi basit bir hale indirgeyerek çözme mantığına dayanmaktadır. Bir başka deyişle, metodun esası sonsuz sayıda serbestlik derecesi olan bir sistemi, düğüm noktalarında birbiriyle bağlantılı olan sonlu sayıda basit sonlu elemanlarla tahmin etmeye dayanmaktadır (Kasımzade, 1995).

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık, düzensiz geometriye ve karışık malzeme özelliklerine sahip sistemlerin incelenmesinde, süreksiz ve karışık sınır koşullarına sahip sistemlerde ve üniform olmayan yüklemelere sahip sistemleri modellemede kullanılabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu geoteknik mühendisliğinde de yaygın bir kullanıma sahip olmaya başlamıştır. Zemin anizotrop ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu için, zemin davranışı kesin olarak bilinemez. Bu nedenle geoteknik mühendisliğinde, zemin ve kaya birimlerin davranışlarına yönelik gerçekçi sonuçlar elde edebilmek ve doğru tasarımı yapabilmek amacıyla sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemindeki sonuçların gerçekçiliği ise, yapılacak zemin etütlerinden elde edilecek saha ve laboratuvar sonuçlarına göre belirlenecek zemin özelliklerini doğru yansıtmasına bağlıdır.

Bu tez kapsamında analizler yapılırken, geoteknik mühendisliğinde yaygın şekilde kullanılmakta olan ve sonlu elemanlar metodu ile çalışan Plaxis 2D yazılımı

kullanılmıştır. Analizler yapılmadan önce ilk olarak geoteknik problem tanımlanarak analiz tipine karar verilir. Daha sonra zemin profili oluşturulur ve zeminin gerçek davranışını yansıtacak olan en uygun bünye modeli seçilir. Model geometrisi ve sınır koşulları oluşturulur ve başlangıç koşulları belirlenir. Son olarak inşaat aşamaları programa girilerek sonlu elemanlar ağı oluşturulur ve analiz başlatılıp sonuçları yorumlanır. Gerçek durumu yansıtabilmek için yapılacak analizler kademeli kazı ve kademeli yükleme şeklinde olmalıdır. Her kademe için yapılan analiz sonucunda yatay ve düşey deplasmanlar, gerilmeler, boşluk suyu basınçları vb. belirlenir. Zeminlerdeki gerilme ve şekil değiştirme davranışı non-lineer olduğu için sonlu elemanlar metodu kullanılırken bu davranış modellenmelidir.

6.2 Plaxis 2D Bilgisayar Programı

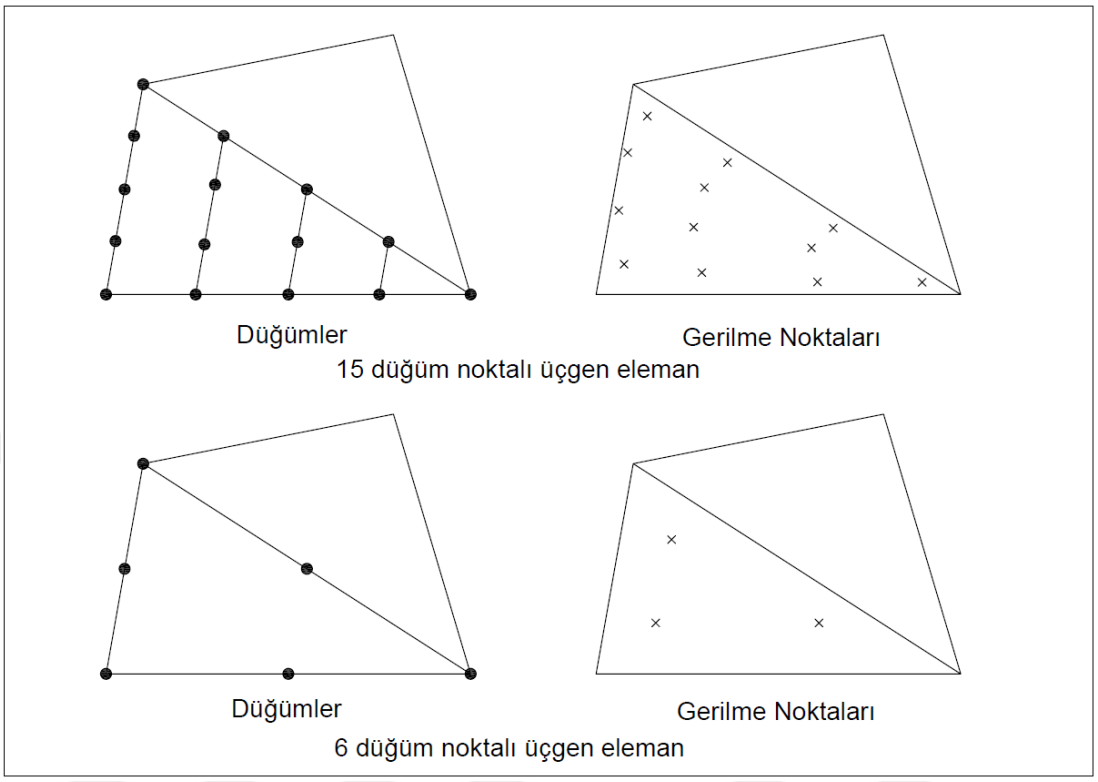
Plaxis, dünya çapında kazı, tünel ve temel gibi birçok geoteknik mühendisliği uygulamaları için kullanılan ve sonlu elemanlar metodu ile çalışan bir yazılımdır. Plaxis yazılımı ile geoteknik uygulamalarda pratik bir şekilde deformasyon ve stabilite analizleri yapılabilmektedir.

Plaxis 2D iki farklı analiz yapılmasına olanak sağlar. Bunlar; üniform kesit alınabilen iksa vb. geometriler için kullanılan “plane strain” ve tünel, şaft gibi dairesel kesitlere sahip geometriler için kullanılan “axisymmetric” analizlerdir.

Sonlu elemanlar metodu kullanılırken en önemli noktalardan biri kurulan geometrik modelin ağ (mesh) olarak isimlendirilen küçük parçalara bölünmesidir. Sonlu elemanlar ağı eleman, düğüm noktası ve gerilme noktası olarak isimlendirilen üç bileşenden oluşur. Plaxis, 6 düğüm noktalı ve 15 düğüm noktalı olmak üzere iki farklı tipteki üçgen elemanlar ağını yapısal elemanlar programa girildikten sonra otomatik olarak oluşturur. 15 düğüm noktalı üçgenlerin kullanıldığı durumda 15 düğüm noktası ve 12 gerilme noktası bulunurken, 6 düğüm noktalı üçgenlerin kullanıldığı durumda 6 düğüm noktası ve 3 gerilme noktası bulunur. 15 düğüm noktalı üçgenlerin kullanılması ile daha detaylı analiz yapılırken, hesaplama süresi 6 düğüm noktalı çözümlere göre çok daha fazla zaman alır.

Yük-deplasman eğrilerini oluşturmak için düğüm noktaları önceden seçilebilir. Deplasmanlar, düğüm noktalarında hesaplanırken, gerilme ve şekil değiştirmeler

gerilme noktalarında hesaplanır. Bu tez kapsamında yapılan analizlerde 15 düğüm noktalı sonlu elemanlar ağı seçilmiştir. Düğüm ve gerilme noktalarının gösterildiği üçgen elemanlar Şekil 6.1'de verilmektedir.



Şekil 6.1 : Zemin ortamında oluşan düğüm ve gerilme noktaları (PLAXIS 2D Reference Manual, 2019).

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan ağın sıkılığı önemli bir faktördür. Ağ sıkılığı, programda çok sıkı, sıkı, orta sıkı, gevşek ve çok gevşek olarak seçilebilir. Bu çalışma kapsamındaki analizlerde sıkı sonlu elemanlar ağı kullanılmıştır.

Plaxis programında zemin ve ara yüzey elemanı, ankraj, kazık, diyafram duvar gibi yapısal elemanlar ile farklı geometrileri modellemek mümkündür. Modelleme modunda sistem geometrisi oluşturulur. Zemin modunda, zemin tabakaları ve kalınlıkları, zeminin başlangıçtaki gerilme durumu, yeraltı suyu seviyesi gibi bilgiler programa tanıtılır. Farklı zemin bünye modellerinden yapılacak olan projeye en uygun olanı seçilir. Bünye modelleri, zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını modellemek ve zemin-yapı etkileşiminden kaynaklanan problemleri çözmek için kullanılır. Bu metotların hepsi zemin mekaniği teorilerine dayandırılarak oluşturulmuştur.

Zeminin mekanik davranışı efektif gerilmelerin etkisi altında değerlendirilir. Efektif gerilmeleri hesaplayabilmek için boşluk suyu basıncı ve toplam gerilmeyi bilmemiz gerekir. Eğer zemin suya doygun ve geçirimsiz özellikte ise, boşluk suyu basıncı hızlı yüklemelerden etkilenir ve bunun sonucunda aşırı boşluk suyu basıncı oluşur. Bu durum drenajsız davranış olarak açıklanmaktadır. Yükleme durumu aynı kalacak şekilde boşluk suyu basıncında değişim meydana gelirse, örneğin boşluk suyu basıncının zamanla azalması sonucu konsolidasyonun oluşması durumunda efektif gerilmeler değişir ve deformasyonlar oluşur (Brinkgreve, 2005).

Sonlu elemanlar metodu ile elemanlara ayrılan zemin ortamı ile karışık zemin-yapı etkileşimi analiz edilebilir. Böylece yapının ve zeminin deformasyonları ile yükleme süresi boyunca yapıdaki gerilmeler hesaplanabilir. Bu çözümler sınır değerleri ele alan kapalı çözümlerden elde edilemez (Lade, 2005). Bu çalışma kapsamında, zemin bünye modeli olarak "Mohr-Coulomb Model" ve "Hardening Soil Model" kullanılmıştır.

Yapısal elemanlar ve yükler yapı modunda programa tanıtılır. Farklı türde birçok yapısal elemanlar programda yer almaktadır. Kazık, diyafram duvar, palplanş gibi yapısal elemanlar perde ve kabuklar (plates) olarak tanımlanır. Perde elemanlar kesme ve eğilmeden kaynaklı deplasmanlara izin verir. Eksenel kuvvet uygulanması durumunda yapısal elemanın boyunda değişiklik meydana gelebilir. Perde elemanlar önceden tanımlanan maksimum eğilme momenti ve eksenel yüklere ulaştığında plastik deformasyon yapabilir.

Ankraj, strut, çubuk elemanlar gibi elemanları modellemede gergi (node-to-node anchor) kullanılmaktadır. Bu tezde ankraj serbest bölgelerini modellemekte "node-to-node anchor" kullanılmıştır. Ayrıca bu elemanlara öngerme de uygulanmıştır. "Embedded beam row" elemanı ise kaya bulonu, ankraj kökü gibi elemanlar tanımlanırken kullanılabilir.

Geogridler ise sistemde geotekstil malzeme oluşturmak için kullanılırlar. Zemin ile tam etkileşim halindedirler. Geogrid ile oluşturulan enjeksiyonlanmış bölge etrafında arayüzey bulunmaz, çünkü arayüzey gerçekçi olmayan kayma düzlemi oluşturabilir. Elastik ya da elastoplastik davranış sağlayabilirler ve sadece çekmeye çalışırlar. Geogridler ayrıca ankraj kök bölgesi oluşturulurken de kullanılabilirler. Bu tez kapsamında ankraj kök bölgesi tanımlanırken geogrid kullanılmıştır.

Zemin ile tasarımda seçilen yapısal elemanlar arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için ise arayüzey elemanları (interfaces) kullanılır. Bu elemanın kalınlığı yoktur ve zemin ile yapısal elemanı birbirinden ayırmayı sağlar. Arayüzey elemanı, yapısal elemanın her iki tarafına da uygulanır. Zemin ve yapı arasındaki etkileşim, arayüzey yük azaltma faktörü (R_{inter}) ile modellenir. R_{inter} genellikle 1'den küçüktür.

Zemin profilinin oluşturulması ve yapısal elemanların programa tanıtılmasından sonra sonlu elemanlar ağı (mesh) program tarafından otomatik olarak oluşturulur ve inşaat aşamaları kademeli olarak programa tanıtılarak hesap moduna geçilir.

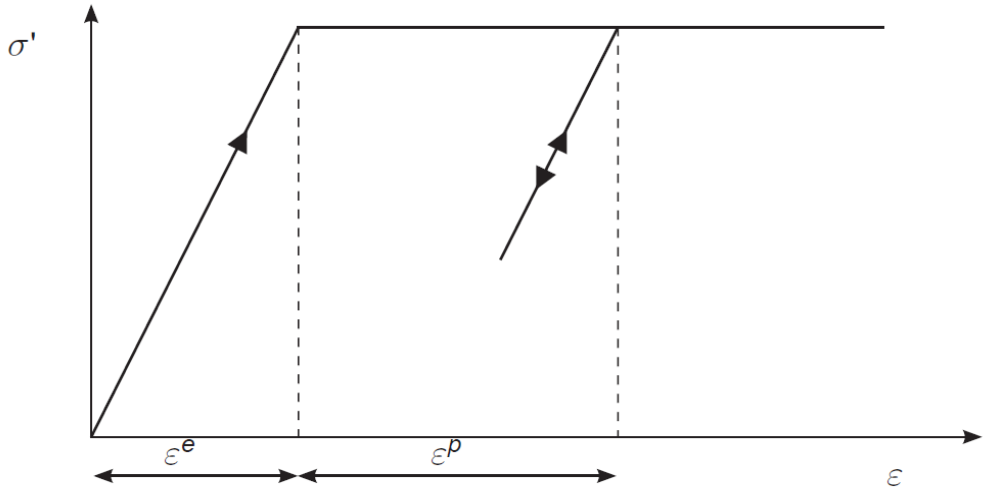
6.3 Zemin Modelleri

Mohr-Coulomb modeli en çok bilinen ve tavsiye edilen, lineer elastik ve tamamen plastik modeldir. Sabit ve ortalama bir rijitlik ele alınır.

Hardening soil model ise yaygın olarak kullanılan pekleşen zemin bünye modelidir. Bu model zemin davranışını simule eder, elastoplastik hiperbolik bir modeldir ve kayma pekleşmeli plastisiteyi kullanır. Ayrıca model geri döndürülemez sıkışmaları simule etmek amacıyla sıkışma pekleşmesini kullanır. Bu model ile ikinci derece model kum ve çakıl gibi zeminler yanında kil ve silt zeminleri de modellemek için kullanılabilir (PLAXIS Reference Manual, 2019).

6.3.1 Mohr-Coulomb model (MC)

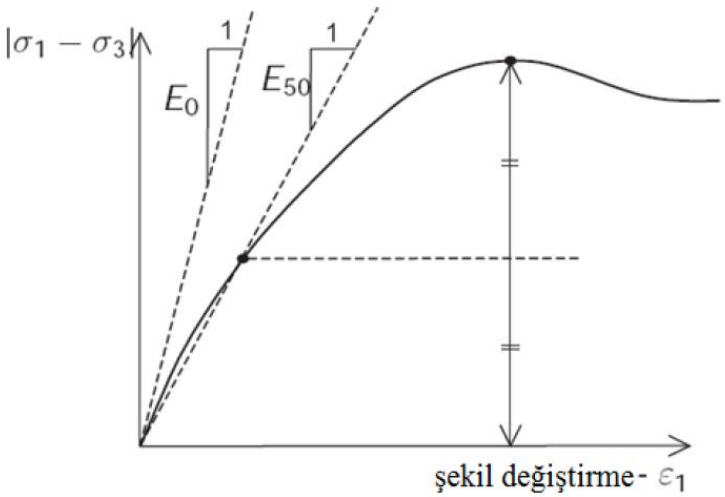
Mohr-Coulomb modeli, zeminin temel davranış prensibine göre gerilme-şekil değiştirme eğrisinin ilk bölgesinde elastik, ikinci bölgesinde mükemmel plastik bir malzeme olduğu kabulüne dayanmaktadır. Mohr-Coulomb zemin bünye modeli beş parametreyi esas alır. E (Elastisite modülü) ve ν (Poisson oranı) zeminin elastik davranışını modellemek amacıyla; c (kohezyon), ϕ (kayma mukavemeti açısı) ve ψ (dilatansi açısı) zeminin plastik davranışını modellemek amacıyla kullanılır. Mohr-Coulomb göçme kriteri Şekil 6.2'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2 : Mohr-Coulomb göçme kriteri.

Rijitlik olarak program içinde alternatif çözümler bulunsa da temel olarak program Young modülünü kullanır. Bu modelde zemin katmanlarının rijitliklerinin derinlik ile değişmediği kabul edilerek ortalama bir rijitlik parametresi kullanılır. Bu da deformasyon değerlerinin tam anlamıyla gerçekçi olmamasına neden olur ancak diğer modellere göre daha hızlı analiz yapabilmeyi sağlar.

Gerilme-şekil değiştirme eğiminin başlangıç eğimi (tanjant modülü), başlangıç rijitlik modülü E_0 ve deviatör gerilmenin %50'sine karşılık gelen bölgenin eğimi (sekant modülü) rijitlik modülü E_{50} ile ifade edilmektedir. E_0, daha geniş lineer elastik davranış aralığına sahip olan zeminlerde kullanımı mantıklı iken, yükleme altında kalan kum ve normal konsolide kil gibi zeminlerde E_{50} rijitliğini kullanmak daha uygun olacaktır. Tanjant modülü ve sekant modülü Şekil 6.3'te gösterilmektedir.



Şekil 6.3 : Tanjant (E_0) ve sekant (E_{50}) modüllerinin tanımlanması.

6.3.2 Hardening soil model (pekleşen zemin modeli) (HS)

Hardening soil model (pekleşen zemin modeli), plastisite teorisi çerçevesinde oluşturulan, yumuşak ve katı özellikteki birçok zeminin modellenmesinde kullanılabilecek gelişmiş bir zemin modelidir (Schanz vd., 1999). Hardening soil model, Kondner (1963) ve daha sonra (Duncan ve Chang, 1970) tarafından geliştirilmiş ve hiperbolik zemin modelin yerini alan gelişmiş bir versiyondur. Hiperbolik modelden farkları; plastisite teorisini kullanması, zeminin dilatansi açısını dikkate alması ve son olarak akma davranışının bir akma başlığı ile tanımlanmasıdır. Ayrıca hardening soil modelde gerilmeye bağlı rijitlikler de dikkate alınır. Bu durum basıncın artmasıyla beraber tüm rijitliklerin de artması anlamına gelmektedir.

Hardening soil zemin bünye modelinin Mohr-Coulomb zemin modelinden farkı, pekleşen bir plastik modelin akma yüzeyinin asal gerilme düzlemine sabit olmamasıdır. İki tür pekleşme vardır. Bunlardan biri kayma pekleşmesi, diğeri de sıkışma pekleşmesidir. Öncül deviatorik yüklemelerden meydana gelen kalıcı şekil değiştirmelerin modellenmesinde kayma pekleşmesi kullanılmaktadır. Sıkışma pekleşmesi ise ödometre yüklemesi ya da izotropik yüklemelerden kaynaklı meydana gelen plastik şekil değiştirmelerin modellenmesinde kullanılmaktadır.

Pekleşen zemin modelinin temeli, zeminin rijitliği ve gerilme arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Üç farklı rijitlik kullanılması da zeminin gerçek davranışına daha yakın bir şekilde modellenebilmesini sağlamaktadır. Modelde kullanılan giriş parametreleri aşağıda özetlenmektedir:

- m: gerilme bağımlı rijitlik
- E_{50}^{ref}: deviatorik yükleme sebebiyle oluşan plastik deformasyonlar
- E_{oed}^{ref}: sıkışma sebebiyle oluşan plastik deformasyonlar
- E_{ur}^{ref} : elastik boşaltma/yükleme

E_{50}^{ref}, drenajlı üç eksenli deneylerden elde edilen sekant rijitliği denklem 6.1'de verilmiştir.

$$E_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{c.cos\phi - \sigma_3'.sin\phi}{c.cos\phi + p^{ref}.sin\phi}\right)^m \quad (6.1)$$

E_{oed}^{ref}, drenajlı ödometre deneylerinden elde edilen tanjant rijitliği denklem 6.2'de verilmiştir.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}\left(\frac{c.cos\phi.\frac{\sigma_3'}{K_0^{nc}}.sin\phi}{c.cos\phi+p^{ref}.sin\phi}\right)^m \quad (6.2)$$

E_{ur}^{ref}, elastik yükleme/boşaltma rijitliği denklem 6.3'te verilmiştir.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}\left(\frac{c.cos\phi-\sigma_3'.sin\phi}{c.cos\phi+p^{ref}.sin\phi}\right)^m \quad (6.3)$$

Bu denklemlerdeki parametreler şöyledir:

$c_{ref}^{'}$: Efektif kohezyon

ϕ': Efektif içsel sürtünme açısı

ψ: Dilatansi açısı

E_{50}^{ref}: Drenajlı üç eksenli deneyde gerilmelerin %50 seviyesindeki referans sekant rijitliği

E_{oed}^{ref}: Başlangıç ödometre yüklemesi için referans tanjant rijitliği

E_{ur}^{ref}: Yükleme/boşaltma rijitliği

m: Rijitliği gerilme seviyesine bağlayan katsayı

υ_{ur}: Yükleme boşaltma için poisson oranı (program sabiti 0.2)

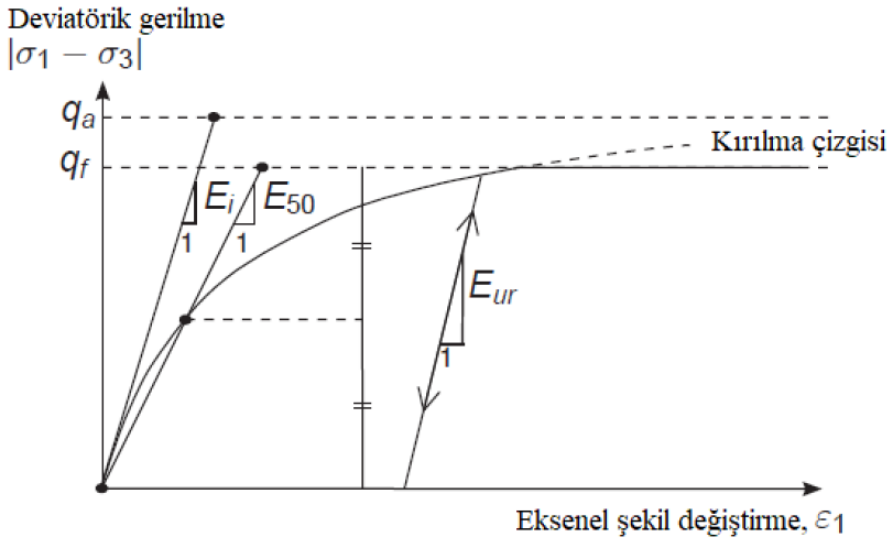
p^{ref}: Rijitlikler için referans gerilme (program sabiti 100kPa)

K_0^{nc}: Normal konsolide zemin için sükunetteki toprak basıncı katsayısı = 1-sinϕ'

R_f: Göçme oranı (program sabiti 0.9)

Plaxis 2D material models manual "m" değerinin yumuşak zeminler için 1 alınabileceğini ve diğer zeminler için 0.5-1.0 arasında seçilebileceğini ifade etmiştir. Schanz ve diğ. (1999), Plaxis 2D (2009) ve Khoiri ve Ou (2013) tarafından tavsiye edildiği gibi kumlar için "m" ve "υur" değerleri sırasıyla 0.5 ve 0.2 alınabilir (Hsiung ve Dao, 2014). Plaxis 2D Material models manual (2019) E_{ur}^{ref} değerinin ise E_{50}^{ref} değerinin 3 katı olarak alınmasını önermektedir.

Şekil 6.4'te standart drenajlı üç eksenli deneyde eksenel yüklemedeki hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.4 : Drenajlı üç eksenli deneyde eksenel yüklemedeki hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.

7. BİR DERİN KAZIYA AİT İKSA SİSTEMİNİN GEOTEKNİK DEĞERLENDİRMESİ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

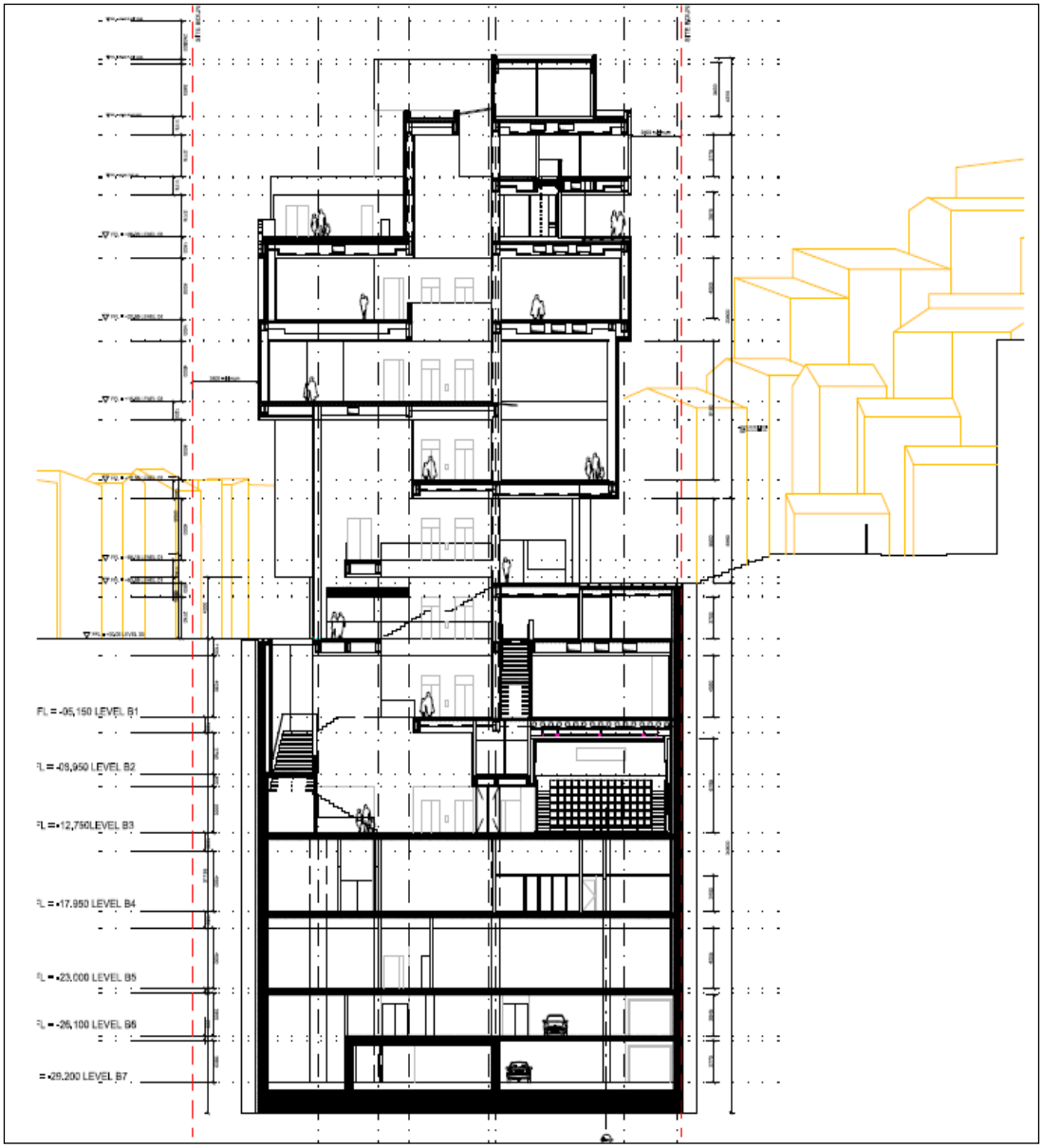
7.1 Proje Alanının Tanıtılması ve İnşa Edilen Yapı Hakkında Bilgiler

İstanbul İli, Avrupa yakasında yapımı tamamlanan bir yapı kompleksi kapsamında inşa edilen kesişen kazıklı ve öngermeli ankraj destekli iksa sistemi bu tez kapsamında incelenmiştir.

Proje alanında eskiden 1 bodrum ve 4 normal kattan oluşan bir bina mevcuttur. Sözkonusu mevcut binanın döşeme üst kotu +21.9 ile +22.5 kotları arasında değişmektedir. Genel anlamda kotlar güney-kuzey doğrultusunda artmaktadır. İnceleme alanının eğimi %0-15 mertebelerindedir.

İnceleme alanında bulunan mevcut bina yıkılarak yerine 7 bodrum, 1 zemin, 7 normal kattan oluşan bir yapı inşa edilmiştir. İnşa edilen yapının toplam oturum alanı yaklaşık 1620m^2, toplam inşaat alanı ise 18621m^2'dir. Çok bodrumlu ve çok katlı olarak inşa edilen yapı destekli bir derin kazı sisteminin tasarlanmasını gerektirmiştir. İnceleme alanınındaki zemin profili ve yeraltı suyu durumu göz önünde bulundurularak kesişen kazıklı ve öngermeli ankrajlı geçici iksa sistemi tasarlanmıştır.

Yapılan yapının kotu ±0.0m kotu etüt çalışmaları sırasında +9.95m, temel taban kotu ise -9.15m olarak bildirilmiştir. Yapıdan temel tabanına etkimesi beklenen gerilme değeri 220kPa-22t/m^2 olarak verilmiştir. Yapı tipik kesiti ise aşağıdaki Şekil 7.1'de verilmiştir.

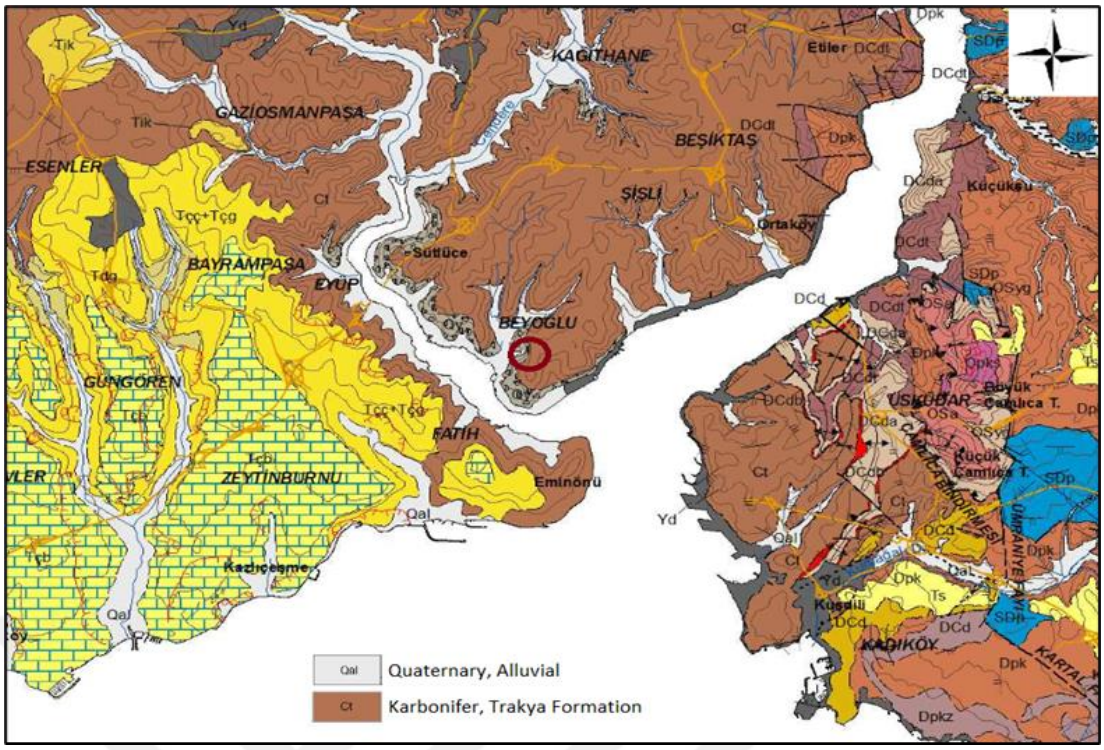


Şekil 7.1 : Planlanan yapı tipik kesiti (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014).

7.2 İnceleme Alanı Jeolojisi

7.2.1 Genel jeoloji

İnceleme alanı 1/500 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası İstanbul Paftası içinde yer almaktadır. İstanbul yarımadasında bulunur. İstanbul yarımadasındaki jeolojik birimler Erken Paleozoyik ile başlar ve Silüryen'den Alt Karbonifer'e kadar formasyonu uyumlu olarak örter. Bu dizilim, Triyas tortul kayaçları tarafından uyumsuz olarak kaplanmaktadır. Paleozoik yaşlı birimler genellikle Dolayoba, Kartal, Baltalimanı ve Trakya Formasyonlarının ufalanmış karbon içerikli kayalarını içerir. Genel jeoloji haritası Şekil 7.2'de verilmektedir.



Şekil 7.2 : Proje sahasının genel jeoloji haritası (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014).

Trakya formasyonu, İstanbul Paleozoyik arazinin üst birimini oluşturmakta ve genellikle İstanbul Boğazı'nın batı yakasında (Trakya'da) yer almaktadır. Trakya serisinin alt seviyeleri, fosfat yumruları içeren radiolerit tabakalarıyla başlamakta, bunun üzerine münavebeli olarak sıralanmış şeyl, kiltaşı, kumtaşı, grovak, türbiditik kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı gibi klastik bir istif gelmekte ve bu istif dar anlamda asıl "Trakya Formasyonu"nu oluşturmaktadır. Paleozoik dizinin erozyonuna bölgesel tektonizm ve bununla ilgili çekilme eşlik eder. Geç Paleozoyik'in Hersinya orojenisi, Paleozoik kayaçların bölgesel yükselmesi ve erozyonu ile sonuçlanmıştır.

7.2.2 Yerel jeoloji

Mevcut yapı döşeme kotundan itibaren gerçekleştirilen sondajlarda yaklaşık 3.5m yüksekliğinde yapı bodrum kat boşluğu ve 0.6m kalınlığında döşeme betonu geçilmiştir. Bodrum katın altında genel olarak Kuvaterner yaşlı, çakıllı, killi, siltli ve kumlu birimlerinden oluşan Alüvyon (Qal) birimi ile derinlerde Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu (Ct) Kiltaşı-Çamurtaşı ve Kumtaşı birimler ile karşılaşılmıştır.

BH-4 sondajı haricindeki tüm sondaj noktalarında 3.7m ile 8.9m aralığında değişken kalınlıkta çakıllı, killi, siltli ve kumlu birimlerinden oluşan Kuvaterner yaşlı Alüvyon birimleri ile karşılaşılmıştır. Birim genel olarak açık kahverengi, nemli, ince-orta taneli

yarı köşeli-yarı yuvarlak çakıllı, çakıllar üzerinde yer yer MnO ve FeO izleri ile karbonat sıvamaları içeren, genel olarak orta plastisiteli, katı-çok katı killi, siltli, ince orta taneli, orta sıkı-sıkı kumlu birimlerden oluşmaktadır.

Tüm sondajlarda alüvyon tabakaların altında Karbonifer yaşlı Trakya formasyonu kaya birimleri ile karşılaşılmıştır. Bu birimler mevcut yapı döşeme üst kotundan itibaren tüm sondajlarda takribi 4.5m ila 13.0m derinliklerden sonra görülmektedir. Genel olarak çalışma alanında Trakya formasyonuna ait Kiltaşı-Çamurtaşı birimi hâkim durumda olmakla beraber yer yer Kumtaşı birimini de içerisinde bulundurmaktadır. Kiltaşı-Çamurtaşı birimleri, kahverengi-koyu gri renkli, az-orta derecede ayrışmış, dayanımlı, genel olarak birimle karşılaşılan ilk seviyelerde çok zayıf (%0-%7) RQD yüzdesine sahip, ilerleyen derinliklerde ise zayıf (%0-%22, %3-%38) RQD yüzdesine sahip, sık-çok sık kırıklıdır. Kırıklar arasında kuvars damarları ve yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları ile karşılaşılmıştır. Kumtaşı birimi ise, açık gri renkli, orta-orta zayıf dayanımlı, az-orta ayrışmış, birimle karşılaşılan ilk seviyelerde çok zayıf (%0-%6) RQD yüzdesine sahip, ilerleyen derinliklerde ise zayıf (%0-%18, %24-%36) RQD yüzdesine sahip, çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları içermektedir.

7.3 Zemin Etüdü Çalışmaları

7.3.1 Proje alanında gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar çalışmaları

Proje kapsamında, 5 adet noktada sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj çalışmaları rotari delgi yöntemi kullanılarak Nenzi Gelma model paletli delgi makinası ile mevcut yapının içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sondajlarda, zemin koşullarında sistematik olarak her 1.5m'de bir SPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaya ile karşılaşılması durumunda ise sürekli karot alınarak ilerlenmiştir. Zemin koşullarına göre örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. 2 adet sondajda kayaçların geçirgenlik özelliklerinin tayinine yönelik olarak Packer geçirgenlik deneyleri (Lugeon-Packer permabilite deneyi) gerçekleştirilmiştir.

Yürütülen proje kapsamında 3 farklı jeofizik ölçüm yöntemi gerçekleştirilmiştir. Bunlar; aktif kaynak MASW ölçümü, mikrotremör (titreşimcik) ölçümü ve kuyu içi sismik (PS-Logging) ölçümleridir.

Laboratuvar deneyleri kapsamında ise doğal su muhtevası, elek analizi, Atterberg limitleri, hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri, sondajlardan alınan örselenmiş zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde ise üç eksenli basınç (UU) ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sondajlar esnasında alınan karot numuneler üzerinde nokta yükleme, tek eksenli basınç dayanımı (deformasyon modülü ölçümlü ve ölçümsüz) ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

7.3.2 Sondaj kuyuları

Proje kapsamında, 5 adet noktada mevcut yapı döşeme kotundan itibaren 40.0m ile 52.5m değişken derinlikte olmak üzere toplam 224.0m uzunluğunda sondaj çalışması gerçekleştirilmiştir. Sondaj çalışmalarına ait özet bilgiler Çizelge 7.1'de verilmektedir.

Çizelge 7.1 : Sondaj özet bilgileri.

Sondaj Numarası	Sondaj Derinliği (m)	Sondaj Kotu (m)	Yer altı Su Seviyesi (m)
BH-1	40.50	21.86	5.20
BH-2	40.00	21.89	4.77
BH-3	41.00	22.21	4.20
BH-4	50.00	22.45	4.12
BH-5	52.50	22.08	4.20

7.3.3 Arazi deneyleri

7.3.3.1 Standart penetrasyon deneyleri (SPT)

Sondajlar esnasında kuvaterner yaşlı alüvyon birimler ve ayrışmış Trakya formasyonu birimler içerisinde sistematik olarak her 1.5m'de bir SPT deneyleri gerçekleştirilerek SPT/N darbe sayıları belirlenmiştir. SPT deneyi otomatik sistem kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan yarık tüplü numune alıcısının ilk 15cm'lik (6 inch) ilerleyişini sağlayan darbe sayısı numune alıcısının örselenmemiş zemin içerisinde olmasını sağlamak amacıyla ihmal edilmiştir. Refü kriteri ise her 15cm'lik ilerleme için 50 darbe sayısının gerçekleşmesi ya da toplam 45cm ilerleme için 100 darbenin gerçekleşmesi durumu için tariflenmiştir.

Sondajlarda sistematik olarak gerçekleştirilen SPT esnasında, deney sonuçlarını etkileyen en önemli faktör SPT numune alıcısına aktarılan enerjidir. Enerji oranı (ER)

literatürde referans değer olarak genelde %60 mertebesinde kabul edilmektedir. Ancak bu oran deney düzeneğine ve yöntemine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca farklı düzeltme faktörleri, tij boyuna, delik çapına ve numune alıcısı tipine göre göz önünde bulundurulmalıdır. SPT/N değerinin %60 enerji seviyesine göre düzeltilmiş $(N)_{60}$ darbe sayısı ile aynı zamanda jeolojik yük altındaki efektif gerilme değerine bağlı olduğu da dikkate alındığında %60 enerji seviyesine göre düzeltilmiş $(N_1)_{60}$ darbe sayısı aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir:

$$N_{60} = N.\ C_E.C_B.C_R.C_S \tag{7.1}$$

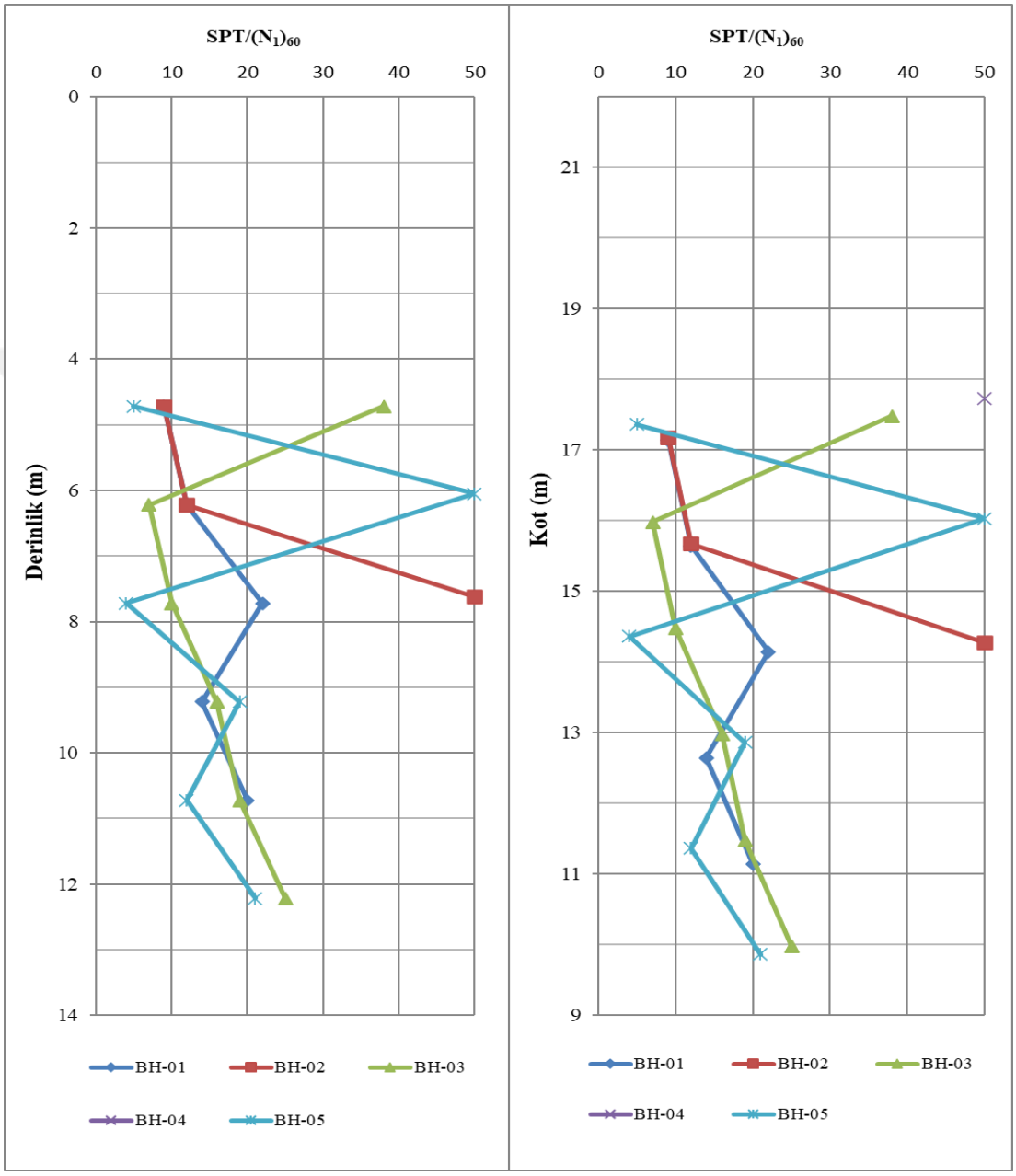
$$(N_1)_{60} = N_{60}.C_N \tag{7.2}$$

İlgili düzeltme faktörleri aşağıda verilen Çizelge 7.2'de özetlenmektedir. Sahada karşılaşılan birimler içerisinde elde edilen düzeltilmiş SPT/$(N_1)_{60}$ değerlerinin kot ve derinlik ile değişim grafiği Şekil 7.3'te verilmektedir.

Çizelge 7.2 : Düzeltme faktörleri.

Düzeltme Faktörü	İndis	Açıklama	Önerilen Düzeltme Değeri
Jeolojik yük	C_N		$(P_a/\sigma'_{vo})^{0.5}$ $C_N \leq 1.7$ (C_N=1 kil zeminlerde)
Enerji oranı	C_E	Klasik sistem (donut)	0.5 ila 1.0
		Emniyetli sistem	0.7 ila 1.2
		Otomatik system	0.8 ila 1.3
Delik çapı	C_B	65 mm'den 115 mm'e kadar	1.0
		150mm	1.05
		200mm	1.15
Tij boyu	C_R	3 m'den 4 m'ye kadar	0.75
		4 m'den 6 m'ye kadar	0.85
		6 m'den 10 m'ye kadar	0.95
		10 m'den 30 m'ye kadar	1.0
		> 30 m	<1.0
Numune alıcısı tipi	C_S	Standart numune alıcısı (kaplamalı tipte)	1.0
		Kaplamasız standart numune alıcısı	1.1 ila 1.3

Bu bağıntılarda, N değeri sahada ölçülen SPT darbe sayısı, C_E deney yöntemine bağlı olarak aktarılan enerji düzeltme faktörü, C_B delik çapı düzeltme faktörü, C_R tij boyu düzeltme faktörü, C_S numune alıcısı için düzeltme faktörü ve C_N jeolojik yük düzeltme faktörüdür.



Şekil 7.3 : Alüvyon birimlerin düzeltilmiş SPT/$(N_1)_{60}$ değerleri.

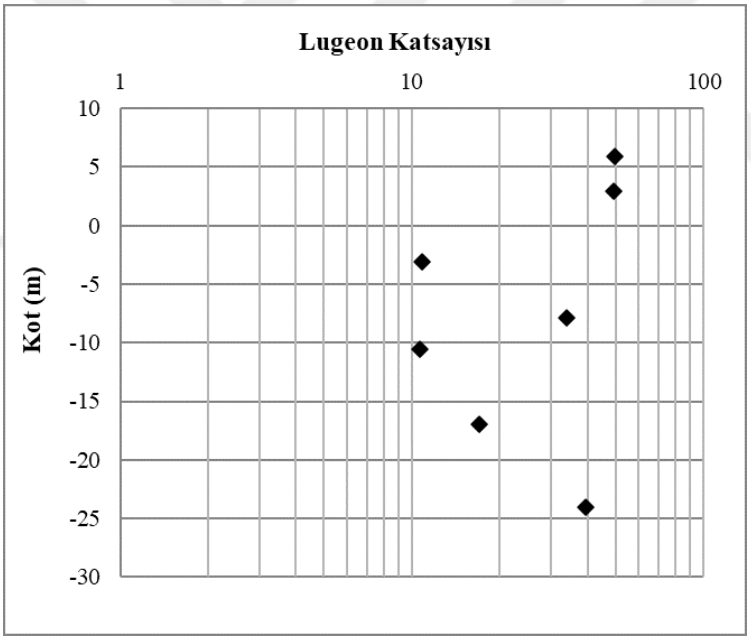
7.3.3.2 Packer (Lugeon) geçirimlilik deneyleri

BH-4 ve BH-5 sondajlarında karşılaşılan Trakya formasyonu kaya birimlerin geçirimliliğinin belirlenmesi amacıyla farklı derinliklerde Packer (Lugeon) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Packer (Lugeon) deney sonuçlarının özet bilgileri Çizelge 7.3'te,

deney sonuçlarının kot ile değişim grafiği ise Şekil 7.4'te verilmektedir. Elde edilen Lugeon sayısına göre Trakya formasyonu birimler geçirimli (5<Lv<25) ile yüksek geçirimli (Lv>25) olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 7.3 : Packer (Lugeon) deney sonuçları özet bilgileri.

Sondaj Numarası	Derinlik (m)	Lugeon Katsayısı	Permeabilite
BH-4	16.50	50	Yüksek geçirimli
BH-4	19.50	49	Yüksek geçirimli
BH-4	25.50	11	Geçirimli
BH-4	33.00	11	Geçirimli
BH-4	46.50	39	Yüksek geçirimli
BH-5	30.00	34	Yüksek geçirimli
BH-5	39.00	17	Geçirimli



Şekil 7.4 : Packer (Lugeon) deney sonuçlarının kot ile değişim grafiği.

7.3.3.3 Jeofizik çalışmalar

İnceleme alanında veri çeşitliliğini sağlayabilmek ve elde edilen bütün verilerin birbirleriyle uyumunu denetleyerek doğru ve güvenilir mühendislik yapılarının inşasına ışık tutabilmek için, temel sondaj çalışmalarının yanı sıra MASW, mikrotremör (titreşimcik) ve kuyu içi yöntem olan PS-Logging ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 7.4'te jeofizik çalışmalara ait özet bilgiler verilmektedir.

Çizelge 7.4 : Jeofizik çalışmalara ait özet bilgiler.

Jeofizik Ölçüm	Adet
Sismik Kırılma	2
Mikrotremör	2
PS Logging	2

Sismik kırılma yüzey dalgalarının çok kanallı analiz yöntemi (MASW metodu)

İnceleme alanında yapılan temel sondaj çalışmalarıyla birlikte temel zemini oluşturan birimlerin sismik hızlarını (P ve S), kalınlıklarını ve dinamik mühendislik parametrelerini belirleyebilmek amacıyla 2 profil boyunca MASW sismik etüt (aktif kaynak yüzey dalgası) çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen parametrelerin açıklamaları Çizelge 7.5'te verilmektedir.

Çizelge 7.5 : Dinamik/elastik parametrelerin mühendislik anlamları.

Dinamik ve Elastik Parametreler	Tanım
P dalgası hızı (m/s)	P dalgası (primary wave, birincil), dalganın yayıldığı ortamın rijidite, yoğunluk ve elastik özelliklerine göre değişiklik gösterir.
S dalgası hızı (m/s)	S dalgası (secondary-wave, ikincil), hızı içinde yayıldıkları cisimlerin rijidite ve yoğunluğuna bağlıdır. Sıvı maddeler içinde oluşmaz.
Vs_{30} (m/s)	30 metre derinliğe kadar olan birimlerin ortalama S dalgası hızını verir.
Kalınlık (m)	Sismik tabaka kalınlığını gösterir.
Zemin hâkim titreşim periyodu (s)	Dinamik durumda zeminin baskın periyodunu gösterir.
Göreceli zemin büyütmesi	Yerel zemin koşullarının deprem dalgalarını büyütme özelliğidir.

Sismik dalga hızları ile dinamik parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak temel zemini oluşturan sismik tabakalar için Çizelge 7.6 ve Çizelge 7.7'ye göre sınıflama yapılabilir. Bu çalışma kapsamındaki yüzey dalgası analizinde 5 tabakalı çözümleme yapılmış olup parametreler hesaplanmıştır. İnceleme alanında gerçekleştirilen aktif kaynak MASW etüdü sonucu hesaplanan büyüklükler Çizelge 7.8ve Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.6 : Vs hızlarına göre kohezyonlu ise kıvam durumu (Özaydın, 1982).

S Dalga Hızı (m/s)	Zemin Durumu
<200	Yumuşak-Orta Katı
200 – 300	Katı
300 – 500	Çok Katı
500 – 750	Sert

Çizelge 7.7 : Vs hızlarına göre kohezyonsuz ise kıvam durumu (Özaydın, 1982).

S Dalga Hızı (m/s)	Zemin Durumu
<300	Gevşek
300 – 600	Orta Sıkı
600 – 800	Sıkı
800 – 1000	Çok Sıkı

Çizelge 7.8 : MASW-1 etüdünden hesaplanan hızlar ve diğer parametreler.

Açıklama	1.Tabaka	2.Tabaka	3.Tabaka	4.Tabaka	5.Tabaka
V_p (m/s)	553	1162	1162	1162	2250
V_s (m/s)	238	272	339	399	510
Tabaka Kalınlığı (m)	3.7	3.3	6.2	2.4	-
İnceleme Derinliği (m)	3.7	7.0	13.2	15.6	-
Zemin Büyütmesi			1.94		
Vs_{30} (m/s)			374		
Hâkim Titreşim Periyodu (s)			0.32		

Çizelge 7.9 : MASW-2 etüdünden hesaplanan hızlar ve diğer parametreler.

Açıklama	1.Tabaka	2.Tabaka	3.Tabaka	4.Tabaka	5.Tabaka
V_p (m/s)	556	1016	1016	1016	2316
V_s (m/s)	230	263	345	453	549
Tabaka Kalınlığı (m)	5.3	1.7	4.0	2.2	-
İnceleme Derinliği (m)	5.3	7.0	11.0	13.2	-
Zemin Büyütmesi			1.89		
Vs_{30} (m/s)			392		
Hâkim Titreşim Periyodu (s)			0.31		

Proje alanında 2 profil boyunca uygulanan aktif kaynak MASW etütlerinden elde edilen sonuçlara göre Vs_{30} hızı 374-392m/s aralığında hesaplanmıştır. MASW etüdünden elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu (T_0) değerleri 0.31-0.32s aralığında, zemin büyütmesi (Ak) değerleri ise 1.89-1.94 aralığında hesaplanmıştır. Ansal ve diğerleri tarafından verilen mikro bölgeleme ölçütlerine göre (Çizelge 7.10) bu değerler A (düşük) risk grubuna girmektedir.

Çizelge 7.10 : Spektral büyütmelere göre mikro bölgeleme ölçütleri

Spektral Büyütme	Tehlike Düzeyi
0.0 – 2.5	A (Düşük)
2.5 – 4.0	B (Orta)
4.0 – 6.5	C (Yüksek)

İnceleme alanından elde edilen Vs_{30} hızı için Çizelge 7.11'de verilen ve Eurocode 8'e göre belirlenen zemin sınıflamasına göre, yerel zemin sınıfı B (çok sıkı kum, çakıl ya da çok sert killer) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.11 : Eurocode 8'de Vs_{30}'a göre belirlenen zemin sınıflaması.

Zemin Sınıfı	Tanım	Özellikler
A	Kaya ya da diğer benzeri formasyonlar	$Vs_{30}>800$
B	Çok sıkı kum, çakıl ya da çok sert killer	$360<Vs_{30}\leq800$
C	Sıkı ya da orta sıkı kum, çakıl veya sert kil	$180<Vs_{30}\leq360$
D	Gevşekten orta sıkıya kadar kohezyonsuz zeminler	$180>Vs_{30}$

Mikrotremör (titreşimcik) etütleri

İnceleme alanında tek nokta mikrotremör (titreşimcik) etütleri yapılmıştır. Yer yüzeyinde kayıt edilebilen; aynı zamanda, zayıf ve düşük genlikli titreşimler mikrotremör olarak isimlendirilir. Mikrotremörlerin genliği genel olarak çok küçüktür ve yer değiştirmeleri 10^{-4} ve 10^{-2}mm düzeyinde olup insanların algılayabileceği sınırın altındadır. Bu şekliyle mikrotremör ölçümleri, doğal kaynaklı bir yöntemdir. Bu pasif kaynak kullanılarak "doğanın sesini dinleyerek" bir dizilim veya ölçü noktası altında kalan yeraltı yapısını ortaya çıkarabilir. Ayrıca mikrotremörler, geleneksel sismik metotların aksine uygulanabilirliği, ucuzluğu ve sinyal/gürültü oranının düzeyi gibi güçlüklerin üstesinden gelmesinden dolayı tercih sebebidir. Çizelge 7.12'de mikrotremör ölçümlerinden elde edilen sonuçları verilmektedir.

Çizelge 7.12 : Mikrotremör ölçümü değerlendirme sonucu elde edilen değerler.

Ölçü Noktası	Periyot		Büyütme (Göreceli) (%)
MT-1	3.9Hz	0.26s	1.62
MT-2	4.1Hz	0.24s	1.55

Alanda alınan ölçümlerde hâkim titreşim periyodları 0.24–0.26s aralığında bulunmuştur. Zemine ait spektral büyütme değerleri ise 1.55–1.62 aralığında belirlenmiştir.

PS-Logging etütleri

Japonya ve ABD'de kabul gören ve 1990'lı yıllardan beri kullanılan kuyu içi jeofizik yöntem olan PS-Logging, sismik hızların belirlenmesi için kullanımı her geçen gün daha fazla yaygınlaşan bir yöntemdir. Yöntem kısaca, açılan sondaj kuyusu içine askıda bir sistem kaynağı indirilerek meydana getirilen iki ayrı seviyedeki üç bileşenli algılayıcılarca kayıt edilen dalgaların sismik P ve S dalga hızlarının belirlenmesi prensibine dayanmaktadır.

Sistemde bulunan özel tasarım olan kuvvetli bir çekiç ve iki ayrı kayıtçı mekanizması veri toplarken sonda (prob) istenen derinliğe indirilir ve kaynak bir kumanda yardımıyla harekete geçirilir. Kuyu çeperinde kaynağa vurulması ile meydana gelen yayılım 3 boyutlu alıcılar ile kayıt edilir. Sistem yazılımı, farklı veri işlem teknikleri ve birden fazla vuruşu kayıt edilebilme özelliğine sahiptir. Bunun sonucunda dalga hızı doğrudan elde edilir.

Sonda (prob) bölümleri; kabloya bağlı olan bir kaynak, sürücü, 1m aralıklı iki adet jeofon ve filtre tüpten oluşmaktadır. Prob kuyu içinde istenen derinliğe bir tambur yardımı ile indirilerek, o seviyede kuyu sıvısı içinde kaynaktan basınç dalgaları oluşturulur. Oluşan dalgalar kuyu duvarında sismik P ve S dalgasına dönüşür ve ortama geçer. Jeofon konumlarında tekrar bu sismik dalgalar basınç dalgasına dönüşüp kuyu sıvasında ilerleyerek kuyuiçi jeofonlarca kayıt edilir. Bu veri kuyu başına kurulan sayısal bir kayıtçı yardımıyla saklanır. Bu şekilde istenilen derinliklerde P ve S dalga ölçüleri kayıt edilir ve bu kayıtlar özel yazılımlar kullanılarak değerlendirilir. Alınan her seviyeye ait hızlar hesaplanır.

Proje kapsamında 2 kuyuda PS-Logging ölçümü gerçekleştirilmiştir. BH-4 ve BH-5 kuyularında ilk 30 metre derinliğe kadar 0.5m aralıklarla, 30 metreden sonra 1.0m

aralıklarla sırasıyla 43.0m ve 30.5m derinliğe kadar ölçüler alınmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14'te verilmektedir.

Çizelge 7.13 : BH-4 Vp, Vs hızları ve dinamik zemin parametreleri.

Derinlik (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson Oranı (birimsiz)	Bulk Modülü (MPa)	Kesme Modülü (MPa)	Young Modülü (MPa)
3.5	2247	272	0.49	10145	152	453
8.0	2098	452	0.48	8339	413	1218
14.0	2333	669	0.46	10015	925	2692
17.0	2893	1220	0.39	13910	3243	9026
23.5	4370	1945	0.38	34767	9359	25766
-	4540	2224	0.34	35154	12405	33298

Çizelge 7.14 : BH-5 Vp, Vs hızları ve dinamik zemin parametreleri.

Derinlik (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Poisson Oranı (birimsiz)	Bulk Modülü (MPa)	Kesme Modülü (MPa)	Young Modülü (MPa)
10.0	1718	301	0.48	5502	176	523
14.0	1427	405	0.46	3427	309	901
18.5	2065	657	0.44	7425	869	2509
23.0	3354	1063	0.44	22124	2566	7411
-	4691	1973	0.39	42680	9881	27518

Dinamik elastisite modülleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

Poisson Oranı $\mu = [Vp^2-2Vs^2)]/[2(Vp^2-Vs^2)]$ (7.3)

Dinamik Kesme Modülü $G = Vs^2\, d$ (7.4)

Young Modülü $E = 2G(1+\mu)$ (7.5)

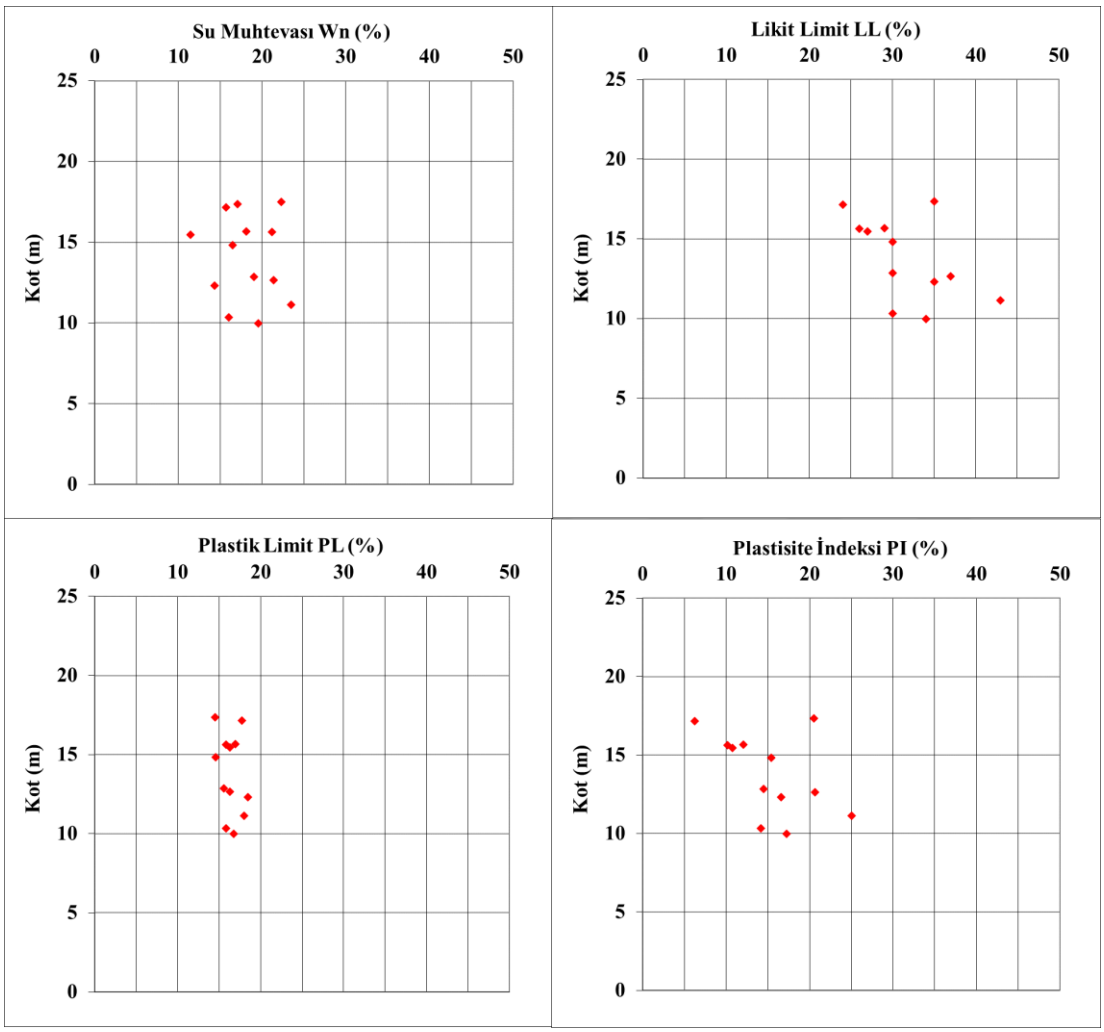
Bulk Modülü $K = E/(3\,(1-2\mu))$ (7.6)

7.3.4 Laboratuvar deneyleri

7.3.4.1 Zemin mekaniği deneyleri

İnceleme sahasından alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde doğal su muhtevası, Atterberg limitleri, elek analizi, hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zemin mekaniği deney sonuçları Çizelge 7.15'te

özetlenmekte olup zeminlerin indeks özelliklerinin kota göre değişimi Şekil 7.5'te verilmektedir.



Şekil 7.5 : Zeminlerin indeks özelliklerinin kot ile değişimi.

Bütün deney sonuçları ışığında elde edilen değer aralıkları aşağıda özetlenmektedir:

Doğal su muhtevası, wn (%) = 11-23 (ortalama 18)

Likit Limit, LL (%) = NP-43 (ortalama 32)

Plastik Limit, PL (%) = NP-18 (ortalama 16)

Plastisite İndisi, PI (%) = NP-25 (ortalama 15)

Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması (USCS) = CI, SC, GM, GC

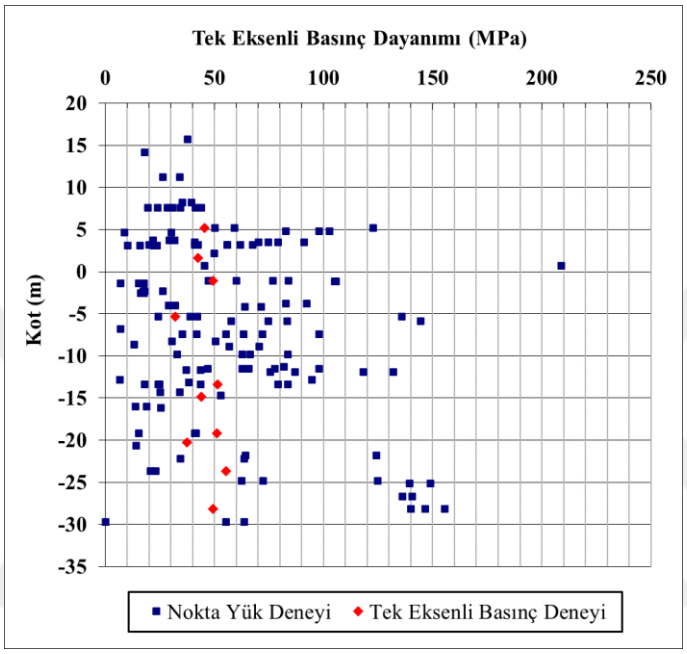
*NP: Plastik özellik göstermeyen zeminler

Çizelge 7.15 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri özeti.

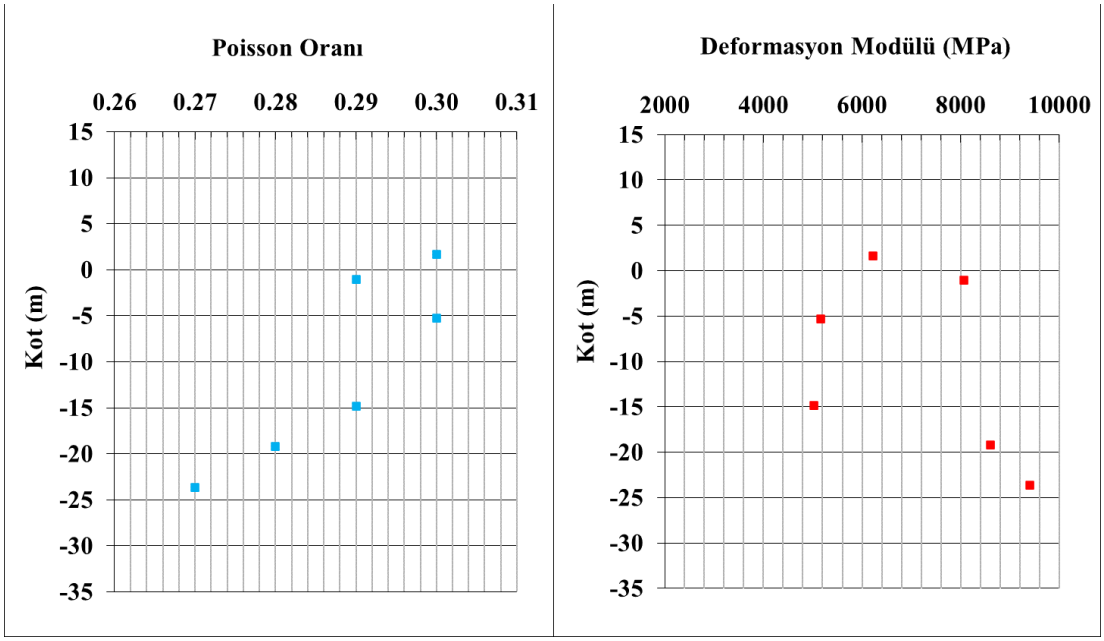
Sondaj No	Numune No	Derinlik (m-m)	Su Muhtevası Wn (%)	Atterberg Limitleri			Elek Analizi		Hidrometre	UU	Konsolidasyon Deneyi			Özgül Ağırlık	Sınıflandırma
				LL	PL	PI	+No.10 (%)	-No.200 (%)	-2µm (%)	c_u (kPa)	σ_P (kPa)	C_c	C_r	Gs	USCS
BH-1	SPT-2	6.00-6.45	21	26	16	10	18	45	-	-	-	-	-	-	SC
BH-1	SPT-4	9.00-9.45	21	37	16	21	4	74	33	-	-	-	-	-	CI
BH-1	SPT-5	10.50-10.95	23	43	18	25	3	75	-	-	-	-	-	-	CI
BH-2	SPT-1	4.50-4.95	16	24	18	6	42	23	-	-	-	-	-	-	GM
BH-2	SPT-2	6.00-6.45	18	29	17	12	26	34	-	-	-	-	-	-	SC
BH-3	SPT-1	4.50-4.95	22	NP	NP	NP	55	13	-	-	-	-	-	-	GM
BH-3	UD-1	6.50-7.00	11	27	16	11	43	38	-	-	270	0.1171	0.0074	2.69	GC
BH-3	UD-2	9.70-10.10	14	35	18	17	29	37	17	25	-	-	-	2.71	SC
BH-3	SPT-6	12.00-12.45	20	34	17	17	24	43	-	-	-	-	-	-	SC
BH-5	SPT-1	4.50-4.95	17	35	15	20	51	28	-	-	-	-	-	-	GC
BH-5	UD-1	7.00-7.50	16	30	15	15	25	46	-	50	-	-	-	-	SC
BH-5	SPT-4	9.00-9.45	19	30	16	14	31	31	-	-	-	-	-	-	SC
BH-5	UD-3	11.50-12.00	16	30	16	14	49	21	-	-	-	-	-	-	GC

7.3.4.2 Kaya mekaniği deneyleri

Sondajlar esnasında alınan karot numuneler üzerinde nokta yükleme ve tek eksenli basınç dayanımı (deformasyon modülü ölçümlü ve ölçümsüz) deneyleri yapılmıştır. Nokta yükleme ve tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin kot ile değişimi Şekil 7.6'da, poisson oranı ve deformasyon modülü değerlerinin kot ile değişimi ise Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.6 : Tek eksenli basınç dayanımının kot ile değişimi.



Şekil 7.7 : Poisson oranı ve deformasyon modülünün kot ile değişimi.

7.3.5 Zemin profili

Sahada zemin koşullarının belirlenmesi için gerçekleştirilen arazi deneyleri ve laboratuvar çalışmaları ile jeolojik birimlere ait sınırları belirlenmiştir. Zemin ve kaya birimlere yönelik değerlendirmeler bu başlık altında açıklanmaktadır.

7.3.5.1 Proje alanındaki zemin ve kaya birimlerin değerlendirilmesi

Kuvaterner alüvyon birimlerde SPT/N darbe sayıları 4 ila >50 arasında belirlenmiştir. Buna göre; ince daneli (killi, siltli) zeminlerin kıvamı genel itibariyle orta katı-sert arasında, drenajsız kayma mukavemeti S_u ise 30kPa ila 350kPa (Tschebotarioff (1973), Parcher&Means (1968)) arasında belirlenmiştir (McGregor&Duncan, 1998). Karşılaşılan kaba daneli (kumlu, çakıllı) zemin özelliği gösteren kesimlerin ise sıkılığı gevşek-çok sıkı arasında, içsel sürtünme açısı N=4 için ϕ=28°, N=50+ için ϕ=41° olarak belirlenmiştir (Lambe & Whitman, 1969).

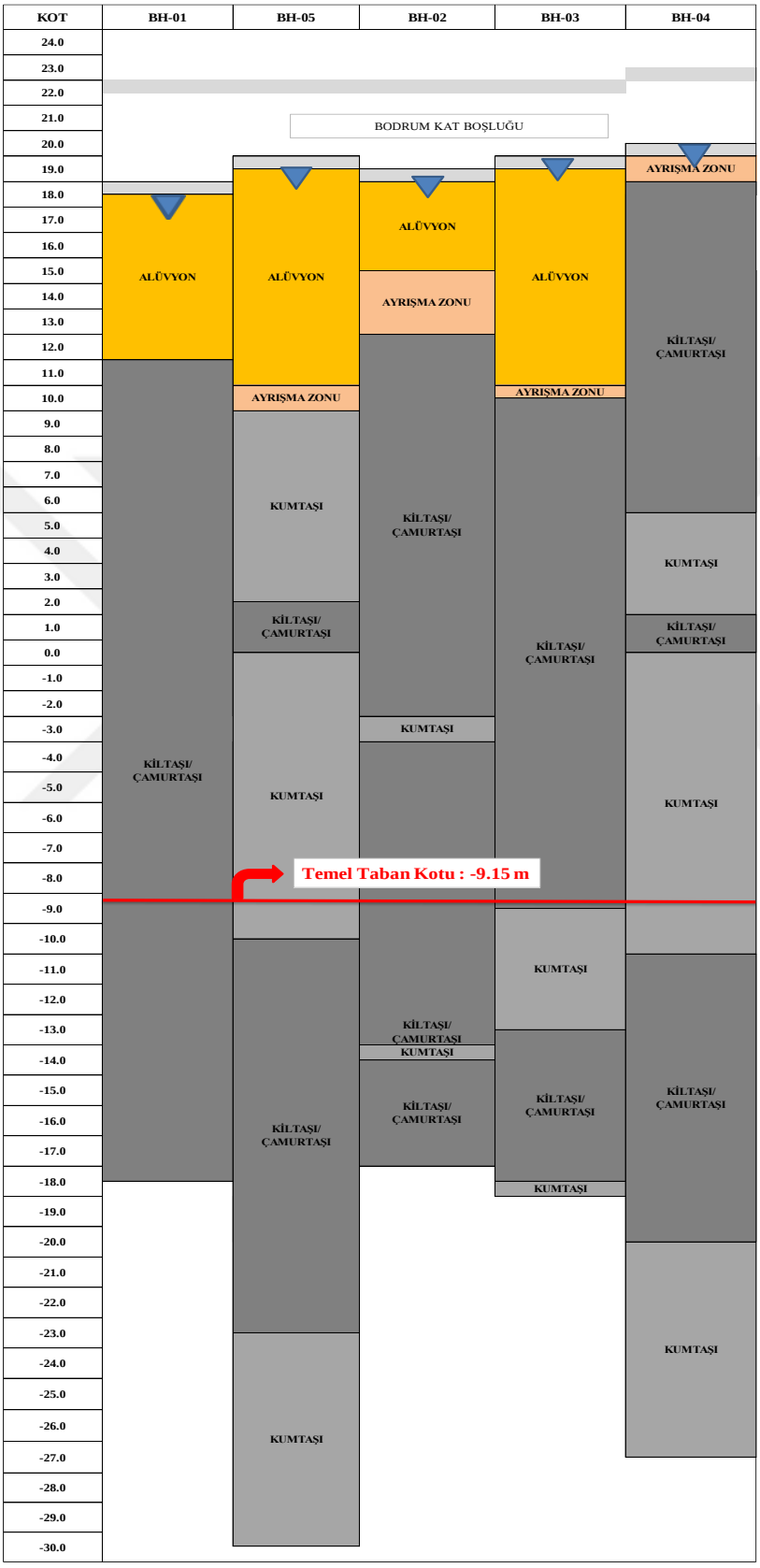
Sondajlardan alınan karot numunelerinin TCR, RQD ve SCR değerleri sırası ile; TCR(%)=0-100, SCR(%)=0-80, RQD(%)=0-38 arasında değişmektedir. Tek eksenli basınç mukavemeti değerleri ışığında teste tabii tutulan Trakya formasyonu birimler genel itibariyle "orta zayıf-çok dayanımlı" mukavemet özelliklerine sahiptir (BSI 5930, 1999). Belirlenen zemin modeli Şekil 7.8'de verilmektedir.

7.4 İksa Sistemi Tasarımı

Bütün cephelerde kazı iksası için öngermeli ankrajlı Ø100cm çapında s_h=80.0cm aralıklı kesişen kazık destek sistemi tasarlanmıştır. Kazıkların uzunlukları 34.7m'dir. Bununla birlikte, yeterli inşaat alanının olmaması nedeniyle, kesişen kazıkların çapı, trafonun bulunduğu yerde s_h=60.0-70.0cm olarak tasarlanmıştır.

Hesaplarda kullanılan üç tip ankraj vardır. Deplasmanları asgari düzeye çekmek için kazık sistemi alüvyon birimlerde teşkil edilecek ankrajlar için (Tip 1), 3.20m aralıkla yerleştirilmiş olup ankraj serbest uzunluğu 4.0-20.0m ve kök bölgesi 8.0m uzunluğa sahiptir. Trakya formasyonu birimler içerisinde gerçekleştirilecek ankrajlar (Tip 2 ve Tip 3) için ise 1.60m aralıkla teşkil edilmiştir. Tip 2 ankrajların serbest uzunluğu 20.0m ve kök bölgesi 8.0m uzunluğa sahip iken Tip 3 ankrajların serbest uzunluğu 17.0-20.0m ve kök bölgesi 10.0m uzunluğa sahiptir. Tüm ankrajlar yatay ile 15° açı

yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Kazı derinliği dikkate alındığında kesişen kazık sisteminin 10 sıra ankrajla desteklenmesi gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 7.8 : Zemin modeli.

İksa sistemi, konum ve gelen sürşarj yüklerine göre üç ayrı kesitte incelenmiştir. Sahada kaya dalımının yol cephesinden saha içine doğru olması ve fazla deplasmanların meydana gelmesi nedeniyle yol cephesinin (kesit-3) en kritik kesit olduğunu görülmüştür.

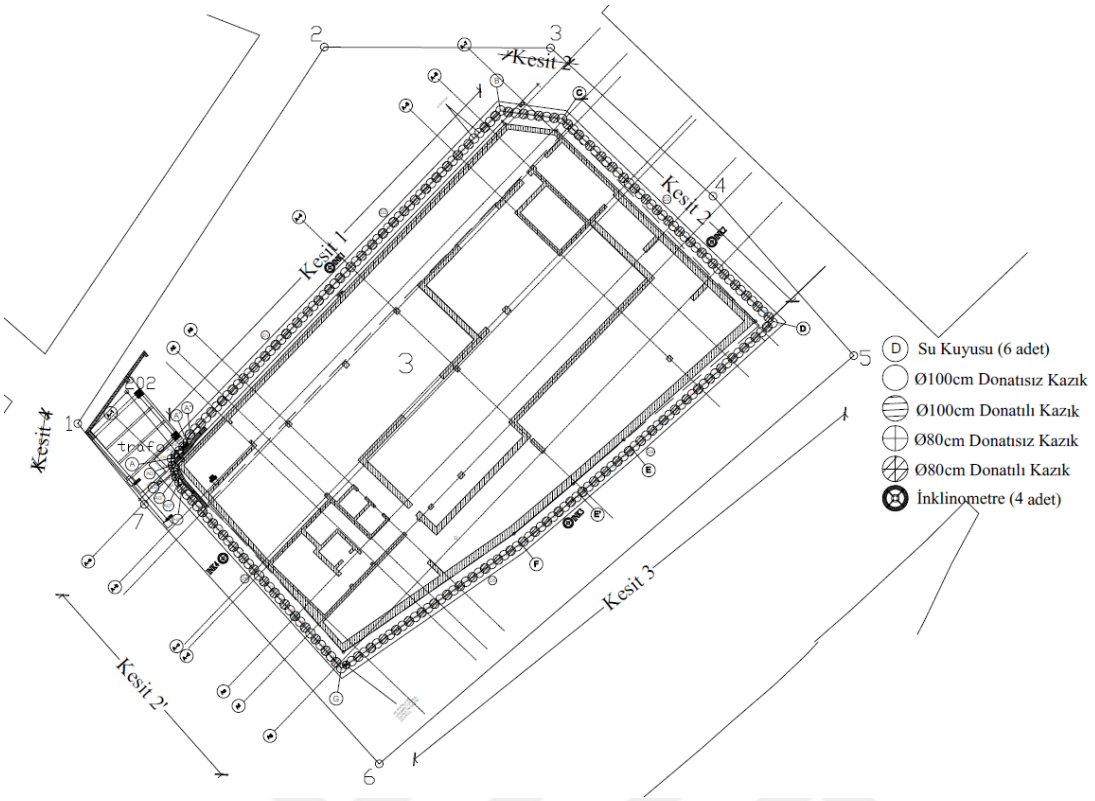
Kesitlere yönelik bilgiler Çizelge 7.16'da verilmektedir. İksa sistemindeki ankrajlara ilişkin bilgiler Çizelge 7.17'de, iksa sistemi plan görünüşü Şekil 7.9'da, iksa sistemi kesit görünüşü Şekil 7.10'da verilmektedir.

Çizelge 7.16 : Kesit özet tablosu.

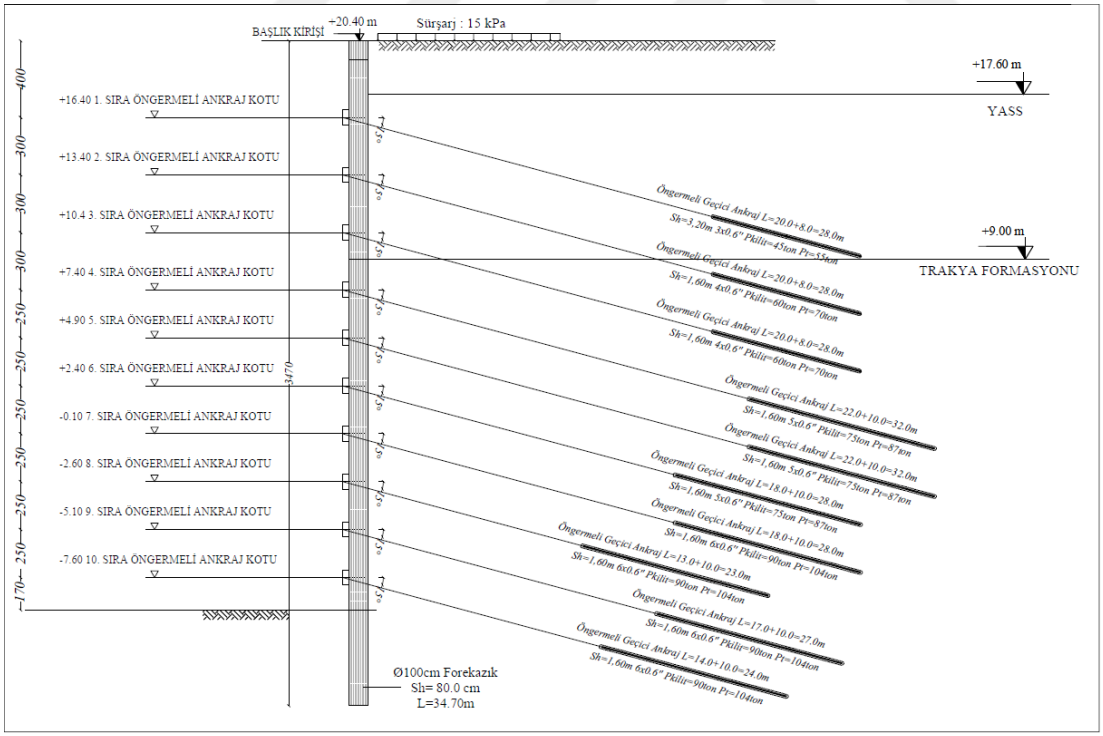
Kesit	Üst Kot	Kazı Taban Kotu	Azami Derinlik (m)	Sürşarj (kPa)
Kesit 1	+20.40	-9.30	29.70	80
Kesit 2	+20.40	-9.30	29.70	60
Kesit 3	+20.40	-9.30	29.70	15

Çizelge 7.17 : Ankraj bilgileri.

Ankraj No	Ankraj Kot (m)	Ankraj Boyu L(m)	Halat Sayısı	Ankraj Öngerme Yükü (ton)
1	16.4	12-28	3x0.6"	45
2	13.4	28	4x0.6"	60
3	10.4	28	4x0.6"	60
4	7.4	32	5x0.6"	75
5	4.9	32	5x0.6"	75
6	2.4	28	5x0.6"	75
7	-0.1	28	6x0.6"	90
8	-2.6	23	6x0.6"	90
9	-5.1	27-29	6x0.6"	90
10	-7.6	24	6x0.6"	90



Şekil 7.9 : İksa sistemi plan görünüşü.



Şekil 7.10 : İksa sistemi kesit görünüşü.

7.4.1 Kazı ve imalat öncesi tasarım ile hesap kabulleri

Söz konusu proje alanında seçilen kritik kesitler için hesaplar Plaxis programında yapılmıştır. Tasarlanan iksa sistemi hesaplarında, sahaya yönelik hazırlanan zemin etüt

raporunda önerilen parametreler (Çizelge 7.18) esas alınarak Çizelge 7.19, Çizelge 7.20, Çizelge 7.21 ve Çizelge 7.22'de özetlenen parametreler kullanılmıştır. Tasarlanan sisteme ait Plaxis analiz modeli Şekil 7.11'de, zemindeki toplam deplasmanlar Şekil 7.12'de ve kazıkta meydana genel yanal deplasmanlar Şekil 7.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.18 : İksa sistemi hesapları için önerilen geoteknik parametreler.

Zemin Tabakaları	Parametre	Sembol	Önerilen Değer
Alüvyon	İçsel sürtünme açısı	ϕ'	28°
	Kohezyon	c'	0 kPa
	Birim ağırlık	γ	19 kN/m^3
	Aktif toprak basıncı katsayısı	K_a	0.361
	Sükunette toprak basıncı katsayısı	K_0	0.530
Trakya formasyonu ayrışma zonu	İçsel sürtünme açısı	ϕ'	33-35°
	Kohezyon	c'	0 kPa
	Birim ağırlık	γ	19 kN/m^3
	Aktif toprak basıncı katsayısı	K_a	0.295-0.271
	Sükunette toprak basıncı katsayısı	K_0	0.455-0.426
Trakya formasyonu kiltaşı/çamurtaşı-kumtaşı	İçsel sürtünme açısı	ϕ'	33-35°
	Kohezyon	c'	0-10 kPa
	Birim ağırlık	γ	20 kN/m^3
	Aktif toprak basıncı katsayısı	K_a	0.295-0.271
	Sükunette toprak basıncı katsayısı	K_0	0.455-0.426

Çizelge 7.19 : Tasarımda kullanılan zemin parametreleri.

Parametre	Alüvyon	Kiltaşı/Çamurtaşı Kumtaşı	Diyabaz
Malzeme modeli	HS	MC	MC
Malzeme tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Birim hacim ağırlık, γ_n / γ_{sat} (kN/m^3)	18 / 19	22 / 23	23 / 24
Başlangıç boşluk oranı, e_{ini}	0.5	0.5	0.5
Permeabilite katsayısı, k (m/gün)	0.12	0.25	0.25
Arayüzey (interface) yük azaltma oranı	0.9	0.9	0.9
Deviatorik referans modülü, E_{50}^{ref} (kPa)	15,000	-	-
Sıkışma referans modülü, E_{oed}^{ref} (kPa)	15,000	-	-
Yükleme-boşaltma modülü, E_{ur}^{ref} (kPa)	45,000	-	-
Elastisite modülü, E (kPa)	-	250,000	500,000
Poisson oranı, ν	-	0.3	0.3
Kohezyon, c (kPa)	1	20	40
Kayma mukavemeti açısı, ϕ' (°)	28	35	40

Çizelge 7.20 : Tasarımda plaka elemanlar için kullanılan parametreler.

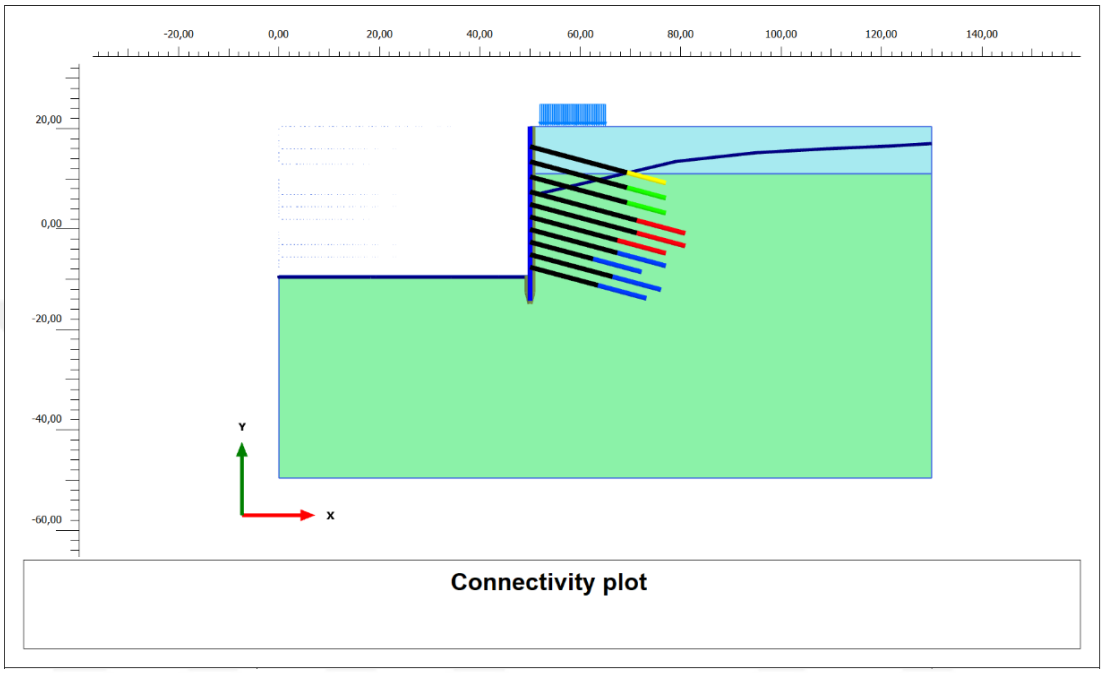
Parametre	Ø100Kesişen Kazık (D=1.0m; s=0.8m)
EA (kN/m)	2.89E+07
EI (kN/m^2)	1.96E+06
w (kN/m/m)	7.2
ν	0.15

Çizelge 7.21 : Tasarımda ankraj elemanlar için kullanılan parametreler.

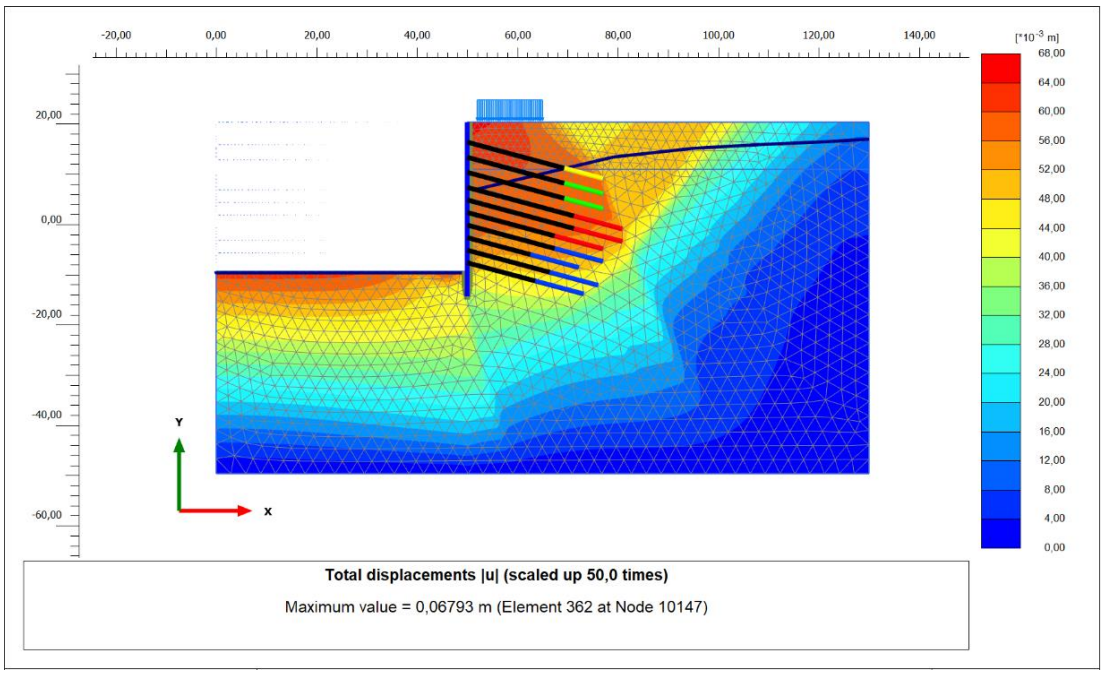
Parametre	3*0.6" ankraj (sh=3.2 m)	4*0.6" ankraj (sh=1.6 m)	5*0.6" ankraj (sh=1.6 m)	6*0.6" ankraj (sh=1.6 m)
EA (kN/m)	109,400	145,931	182,414	218,897

Çizelge 7.22 : Tasarımda geogrid elemanlar için kullanılan parametreler.

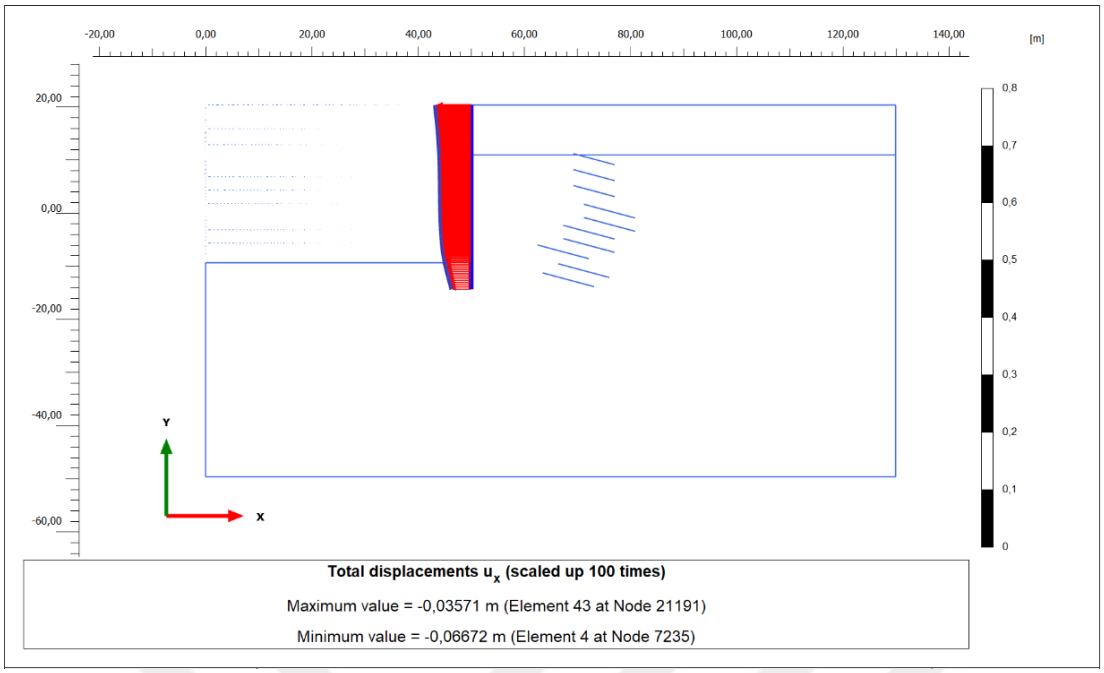
Parametre	3*0.6” ankraj (sh=3.2 m)	4*0.6” ankraj (sh=1.6 m)	5*0.6” ankraj (sh=1.6 m)	6*0.6” ankraj (sh=1.6 m)
EA (kN/m)	173,389	366,160	385,541	404,923



Şekil 7.11: Plaxis analiz modeli.



Şekil 7.12: Zemindeki toplam deplasman grafiği.



Şekil 7.13: Kazıktaki yanal deplasman grafiği.

7.4.2 İnşaat aşaması ve karşılaşılan sorunlar

Kazıkların imalatı esnasında Trakya formasyonu kaya biriminin dayanımının özellikle 25.0m ve altı derinliklerde beklenenden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Delgi biriminin verimlilik oranı her kazık için düzenli olarak kontrol edilmiş ve 25.0m üzeri derinliklerde 1m/saat'ten daha az ilerleme kaydedildiği gözlenmiştir. Buna ek olarak, belirli bir derinlikten sonra magmatik kökenli diyabaz bloklarla karşılaşılmıştır (Şekil 7.14).

Dolerit olarak da adlandırılan diyabaz, ince-orta taneli, koyu gri ile siyah arası magmatik bir sokulum kayaçtır. Son derece sıkı, sert ve bileşimsel olarak gabro ve bazalt ile eşdeğer olan diyabaz teorik olarak aralarında dokusaldır. Genellikle bazaltik yapıların sığ yüzeylerinde oluşur. Hızlı katılaştığında bazalta, kristellerin büyümesi için daha fazla zaman verildiğinde ise gabroya dönüştüğü bilinmektedir.

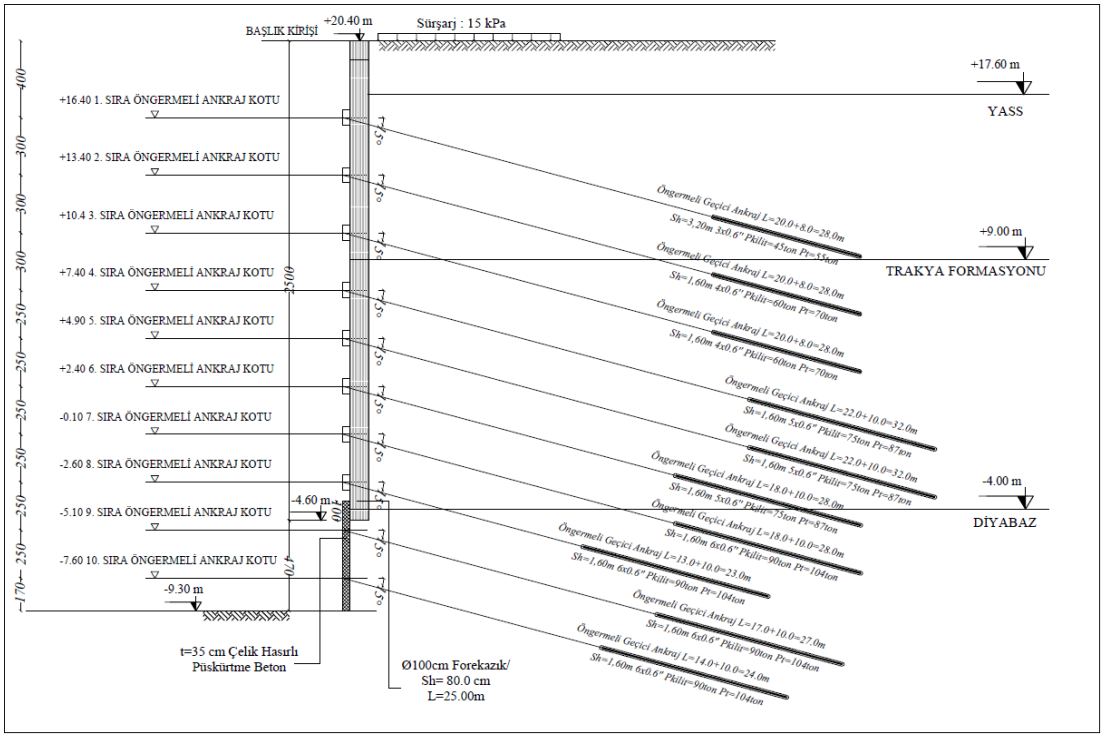


Şekil 7.14 : Karşılaşılan diabaz birimleri (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014).

7.4.3 Proje revizyonu

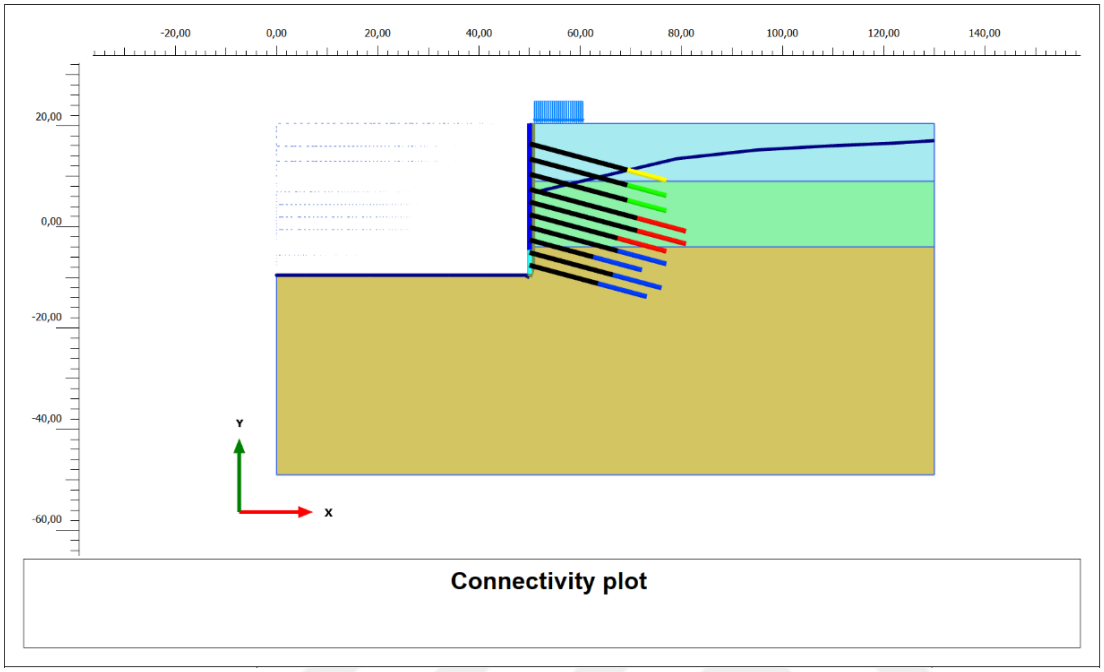
Yukarıda belirtilen nedenler göz önüne alındığında, bu tür sert birimlerde karşılaşılan sorunlar nedeniyle, iksa sisteminin tasarımı revize edilmiştir.

Kesişen kazıkların boyları 25.0m'ye düşürülmüş ve kazının kalan bölümü hasır çelikli 35cm kalınlıklı shotcrete (püskürtme beton) ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır. Revize edilen iksa sisteminin kesit görünüşü Şekil 7.15'te verilmektedir.

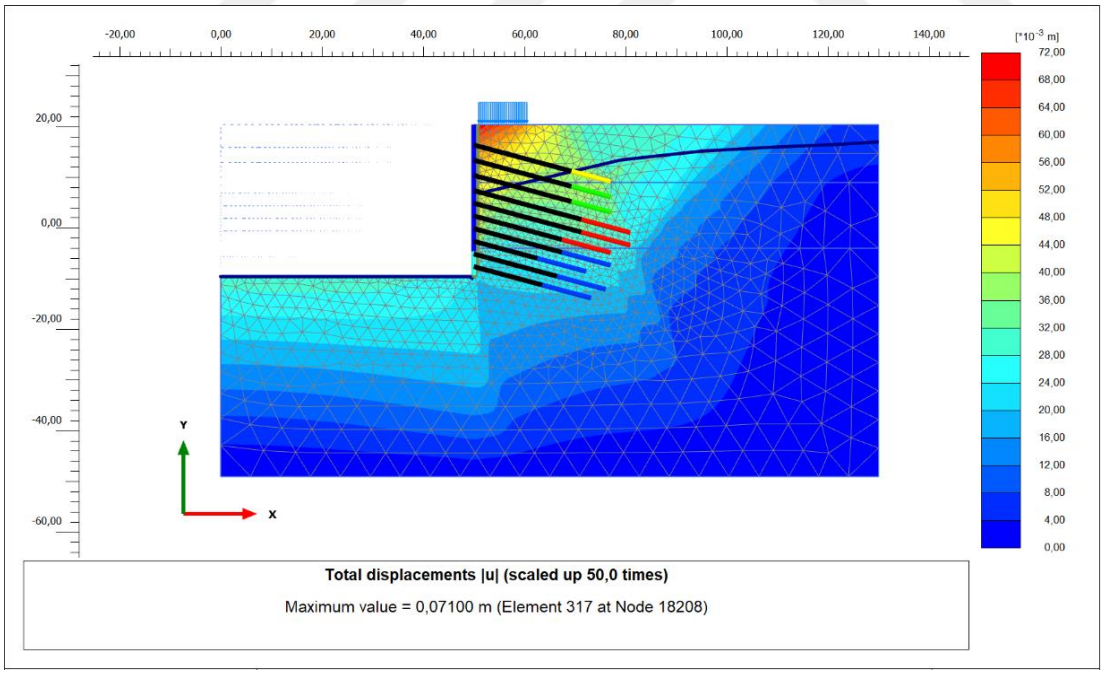


Şekil 7.15 : Revize edilen iksa sisteminin kesit görünüşü.

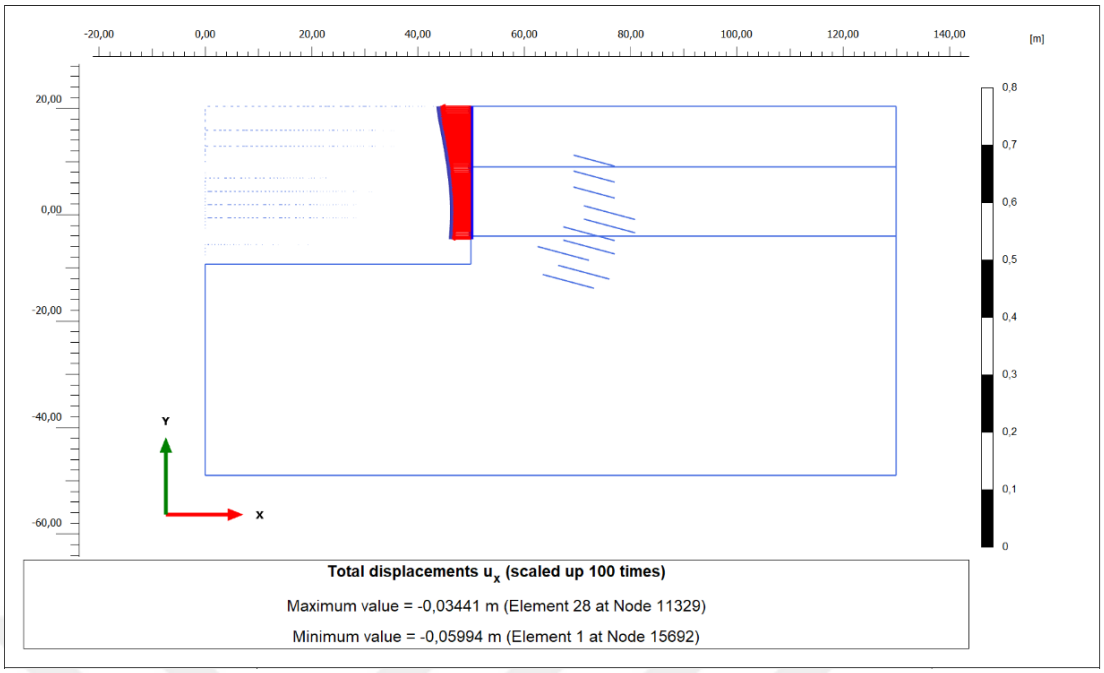
Revize edilen iksa sisteme ait Plaxis analiz modeli Şekil 7.16'da, zemindeki toplam deplasmanlar Şekil 7.17'de ve kazıkta meydana genel yanal deplasmanlar Şekil 7.18'de gösterilmiştir.



Şekil 7.16 : Plaxis analiz modeli (revize edilen tasarım).



Şekil 7.17 : Zemindeki toplam deplasman grafiği (revize edilen tasarım).



Şekil 7.18 : Kazıktaki yanal deplasman grafiği (revize edilen tasarım).

7.4.4 Proje sahasında gerçekleştirilen inklinometre okumaları

Şekil 7.9'da görüldüğü üzere, proje alanına 4 adet inklinometre kuyusu açılmış ve kesişen kazıklı duvar arkasındaki gevşek/sert zemindeki yanal deplasmanlar ölçülmüştür. İnklinometre ölçümleri, inşaat alanının belli bölümlerinde ve sık aralıklarla inşaat süresince alınmıştır.

Proje sahasında imalat çalışmalarının başlamasıyla, haftalık sıklıkla inklinometre ölçümleri alınmıştır. Tasarım aşamasında yanal deplasmanların limit değerleri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

- Sarı uyarı sınırı: H_e x 0.0015 (H_e: Kazı derinliği)

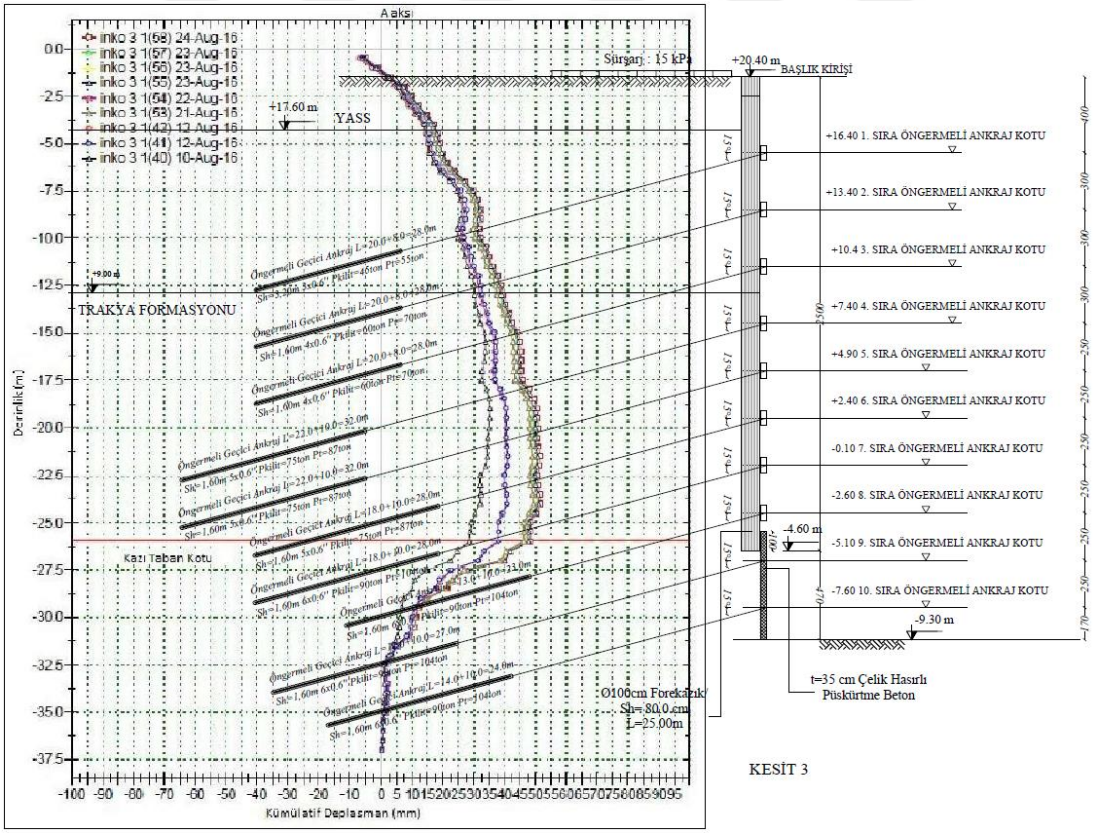
  Sarı uyarı sınırı olarak belirlenen deplasman miktarı toplam kazı derinliği dikkate alındığında yaklaşık 45mm'dir. Deplasmanların bu sınırı geçmesi halinde, okuma sıklığı arttırılacak, hareket mekanizması gözlenecek ve kritik kayma dairesi belirlenecektir. Deplasman artışının kazı kademeleri arasında sabit kalmadığının gözlenmesi durumunda geçici geri dolgu ve ilave öngermeli ankraj uygulanması gibi tedbirler tartışılacaktır.

- Kırmızı uyarı sınırı: H_e x 0.003 (H_e: Kazı derinliği)

  Kırmızı uyarı sınırı olarak belirlenen deplasman miktarı toplam kazı derinliği dikkate alındığında yaklaşık 90mm'dir. Deplasmanların bu sınırı geçmesi

halinde veya deplasman artışının kazı kademeleri arasında sabit kalmadığının gözlenmesi durumunda geçici geri dolgu ve ilave öngermeli ankraj uygulanması gibi tedbirler tartışılacaktır.

Kesit-3'teki kazı aşamasında, Ağustos 2016'da yanal deplasmanlar sarı sınır olan 45mm mertebesini geçmiştir (Şekil 7.19). Bu durum işveren, yüklenici ve proje mühendisleri ile değerlendirilerek çözüm yöntemleri belirlenmiştir. Sonuç olarak iksa topuğunda 6 ve 7.sıra ankraj kademelerinin ortasına kadar geçici dolgu yapılmış ve 6 ve 7.sıra ankraj kademelerinin arasına 32.0m uzunluğunda 6 adet ilave öngermeli ankraj yapılmıştır. Eylül 2016'nın başında, yanal deplasman okumalarında tekrar artış gözlenmiştir. 7. ve 8.sıra ankraj kademelerinin arasına 32.0m uzunluğunda 10 adet ilave öngermeli ankraj yapılmıştır. Kesit-3 cephe görünüşü Şekil 7.20'de verilmektedir.

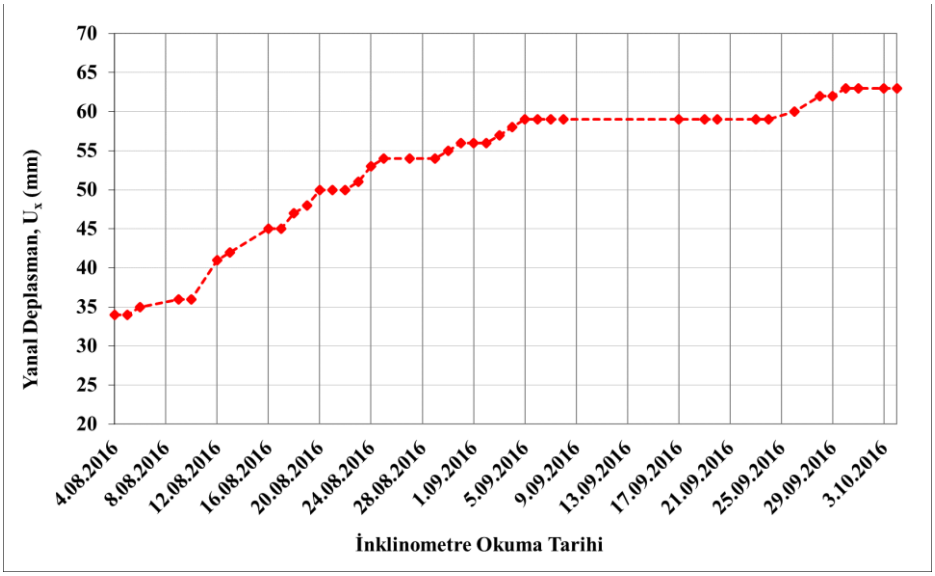


Şekil 7.19 : Kesit 3'te karşılaşılan aşırı deplasmanlar.



Şekil 7.20 : Kesit 3'teki ek ankrajların imalatı (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014).

17 Eylül'de ilave ankrajların öngermesi esnasında yanal deplasman 58.0mm olarak ölçülmüştür. 9.kademe ankrajların kazısı nedeniyle yanal deplasman 26 Eylül'de 62.0mm'ye yükselmiştir. 4 Ekim 2016 tarihinde kazının tamamlanmasına kadar inklinometre okumaları düzenli olarak alınmış ve yanal deplasman artışının durduğu gözlemlenmiştir. Kesit-3'teki yanal deplasman okumalarına ait grafik Şekil 7.21'de verilmiştir.

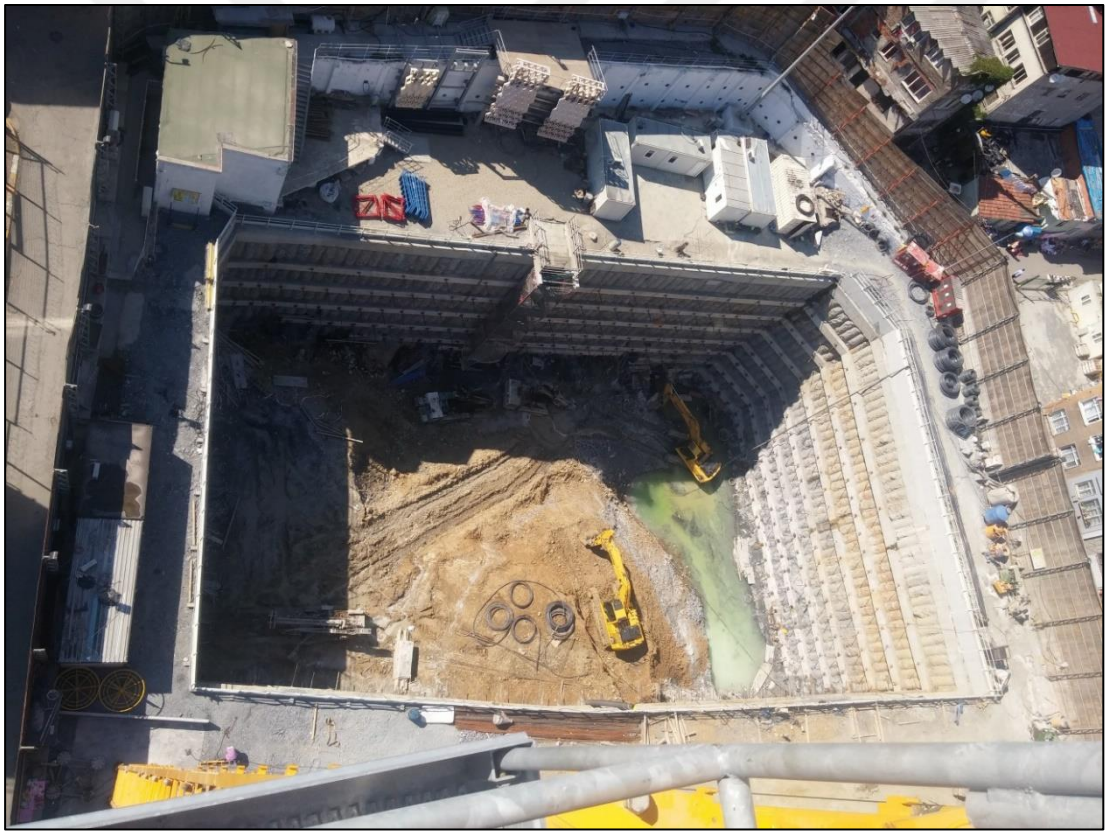


Şekil 7.21 : Kesit 3'teki yanal deplasmanlar.

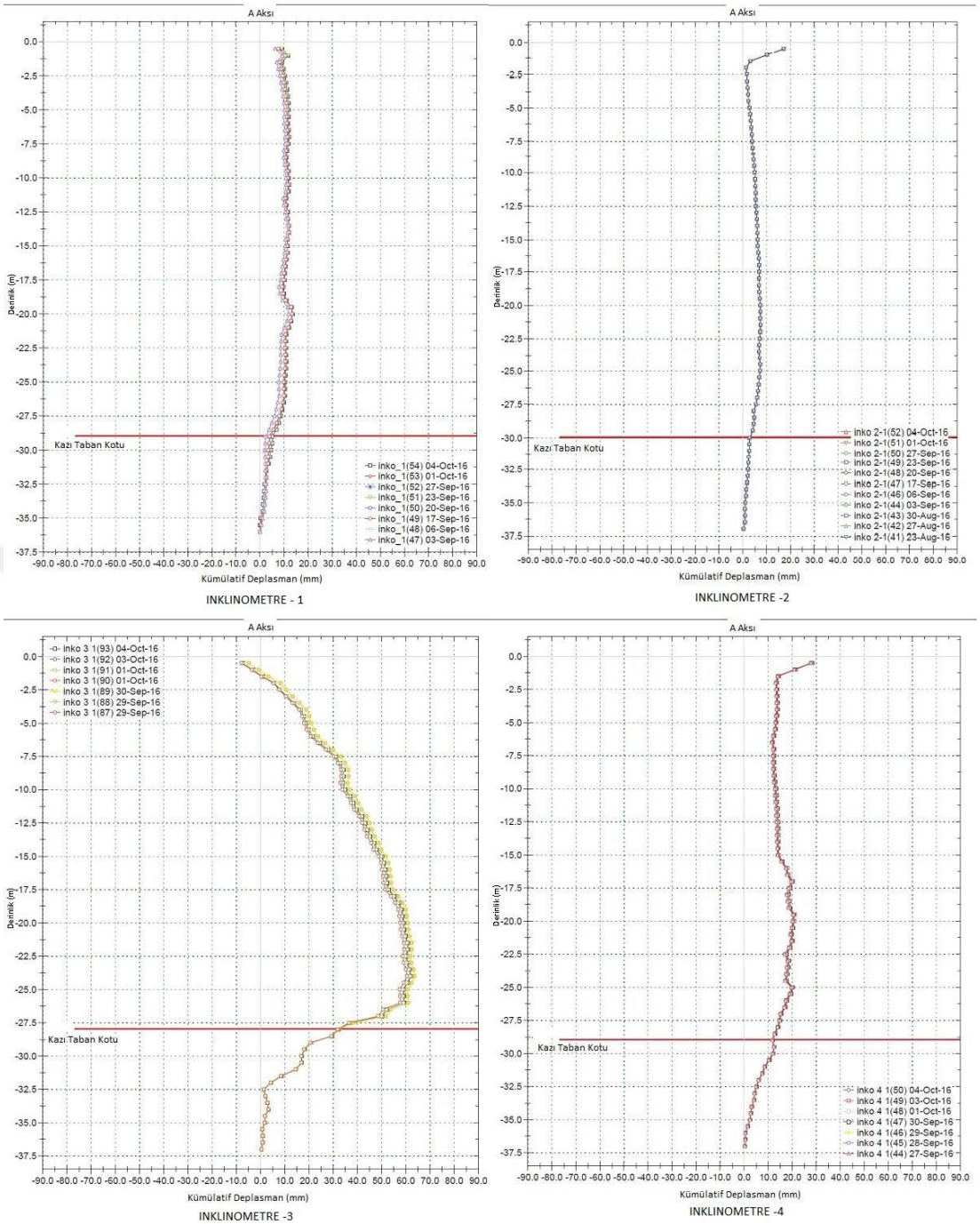
Genel olarak, inklinometre okumaları düzenli olarak tüm imalat süreci esnasında alınmıştır ve yanal deplasmanların tasarım değerlerinden az olduğu ortaya çıkmıştır. Tasarım ve inşaat aşamalarındaki deplasman değerleri Çizelge 7.23'te verilmektedir. İnşaat alanına ait havadan çekilen görüntü Şekil 7.22'de, farklı cephelerdeki inklinometre okumalarına ait grafikler Şekil 7.23'te verilmektedir.

Çizelge 7.23 : Tasarım ve inşaat aşamalarındaki yanal deplasmanlar.

Kesitler	Kesit 1 İnko 1	Kesit 2 İnko 2	Kesit 3 İnko 3	Kesit 4 İnko 4
Hesaplanan yanal deplasman (mm)	90	80	65	80
Ölçülen yanal deplasman (mm)	15	8	62	20

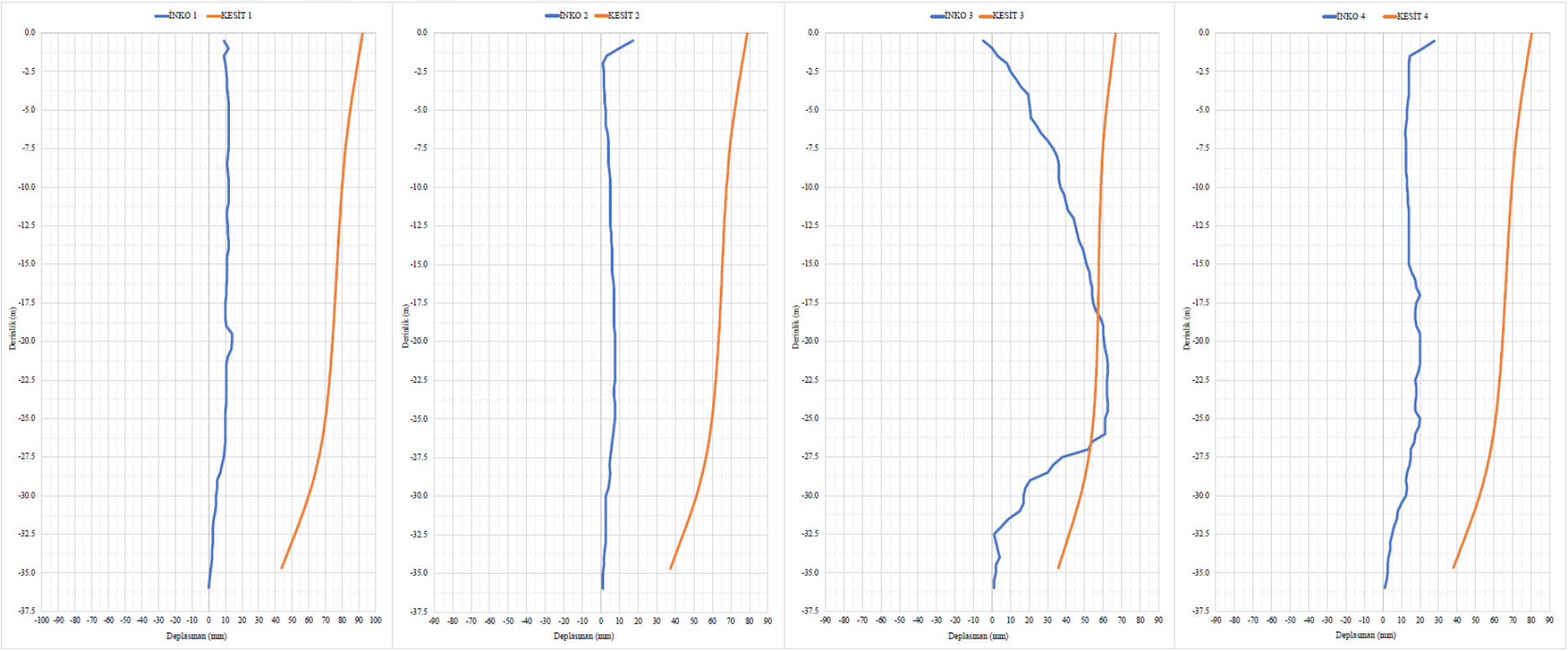


Şekil 7.22 : Proje sahasının havadan görünümü (Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş., 2014).



Şekil 7.23 : İnklinometre okumaları.

İlk tasarımda öngörülen yanal deplasman değerlerinin inklinometre okumaları ile karşılaştırılması Şekil 7.24'te verilmektedir.



Şekil 7.24 : İlk tasarımda öngörülen yanal deplasman değerlerinin inklinometre okumaları ile karşılaştırılması.

7.5 İksa Sisteminde Nümerik Analiz Çalışmaları

Tez kapsamında tanıtılan proje alanında kritik olan kesit-3 üzerinde nümerik analizler yapılarak iksa sisteminde meydana gelen yanal deplasmanlara etkisi incelenmiştir. Kesit-3 geometrisi Plaxis programında hardening soil ve Mohr-Coulomb zemin bünye modelleri ile oluşturulmuştur.

7.5.1 Zemin özelliklerinin duvar deplasmanlarına etkisi

Bu bölümde, iki farklı zemin bünye modelindeki farklı elastisite modülleri, farklı içsel sürtünme açıları, farklı kohezyon değerleri ile iksa sisteminde meydana gelen yanal deplasmanlar incelenmiştir.

7.5.1.1 Elastisite modülü etkisi

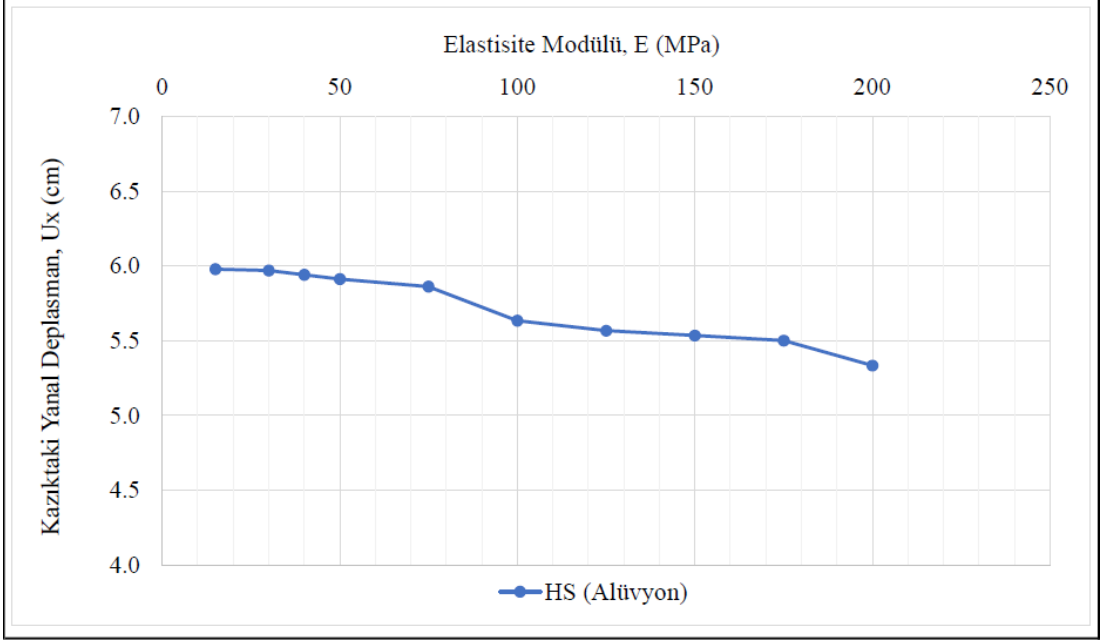
Malzemenin basınç veya genleşmeye karşı direnci olarak tanımlanan elastisite modülü, zeminin kıvamının tayin edilmesinde önemli bir parametredir. Elastisite modülü zeminler için karakteristik bir özelliktir. İksa sisteminde meydana gelebilecek deformasyonlarda elastisite modülü etkisi fazladır. Bu nedenle hem Mohr-Coulomb bünye modelinde kullanılan E değerinin, hem de hardening soil bünye modelinde kullanılan E_{50}^{ref} değerinin iksa sistemi üzerindeki etkileri diğer parametreler sabit tutularak incelenmiştir. Çizelge 7.24 ve Çizelge 7.25'te hardening soil ve Mohr-Coulomb zemin modeli için seçilen elastisite değerleri verilmektedir. Analizler iki zemin bünye modeli için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş olup, alüvyon ve kaya birimlerdeki elastisite modülüne göre yanal deplasmanların değişimi grafiği Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da verilmektedir. Farklı elastisite modülleri ile hesaplanan kazıktaki yanal deplasman değerleri Ek D'de verilmiştir.

Analizlerinde elastisite modülünün artışı ile zeminin mukavemetinin arttığı ve bununla birlikte deplasmanların azaldığı görülmektedir. Özellikle kaya birimlerde elastisite modülündeki artış, yanal deplasmanlarda ciddi bir azalma sağlamıştır.

Çizelge 7.24 : Farklı elastisite modülleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS).

E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	U_x (cm)
15	15	45	5.98
30	30	90	5.97
40	40	120	5.94
50	50	150	5.91
75	75	225	5.86
100	100	300	5.64
125	125	375	5.57
150	150	450	5.54
175	175	525	5.50
200	200	600	5.34

Kullanılan Parametreler									
Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m^3)	k (m/gün)	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12		değişken		-	1	28
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	250	20	35
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	40	40



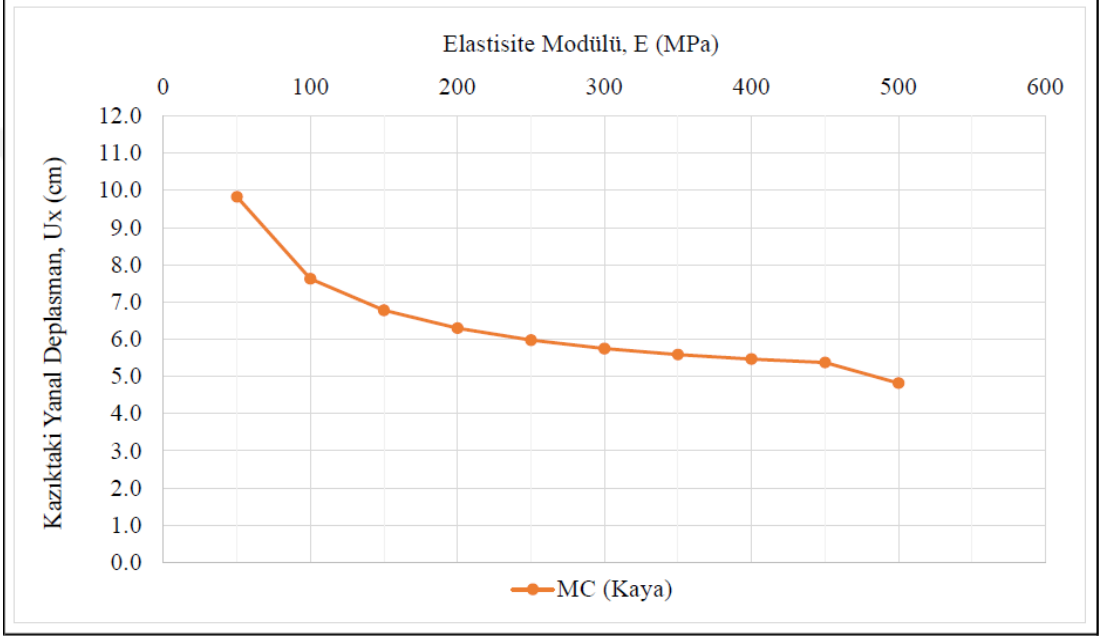
Şekil 7.25 : Alüvyon birimlerde elastisite modülüne göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

Çizelge 7.25 : Farklı elastisite modülleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC).

Elastisite modülü, E (MPa)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Yanal deplasman, U_x (cm)	9.83	7.63	6.78	6.30	5.98	5.75	5.59	5.47	5.38

Kullanılan Parametreler

Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m³)	k (m/gün)	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12	15	15	45	-	1	28
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	değişken	20	35
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	40	40



Şekil 7.26 : Kaya birimlerde elastisite modülüne göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

7.5.1.2 İçsel sürtünme açısı etkisi

Taneler arası sürtünmeden kaynaklanan direnç ve aynı zamanda tanelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil eden içsel sürtünme açısı Mohr-Coulomb göçme zarfının eğimi olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle zeminin ya da kaya birimlerin kayma gerilme sınırıdır. Kohezyonsuz zeminler yüksek içsel sürtünme açısına sahiptir ve zeminin mukavemeti içsel sürtünme açısına bağlıdır. Kohezyonsuz zeminler ise düşük içsel sürtünme açısına sahiptir.

Zeminin içsel sürtünme açısının iksa sisteminde meydana gelen deformasyonlar üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla sistemdeki diğer parametreler sabit tutularak farklı içsel sürtünme açıları ile analizler yapılmıştır. Plaxis, kayma mukavemeti açısının 30°'den büyük olması durumunda dilatansi açısının ϕ-30° olarak

alınmasını önermektedir. İçsel sürtünme açısı ve dilatansi açısı, hardening soil ve Mohr-Coulomb modelleri için ayrı seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. İki modelde elde edilen yanal deplasman değerleri Çizelge 7.26 ve Çizelge 7.27'de, elde edilen yanal deformasyonlara ait grafikler Şekil 7.27 ve Şekil 7.28'de verilmektedir. Farklı içsel sürtünme açıları ile hesaplanan kazıktaki yanal deplasman değerleri Ek E'de verilmiştir.

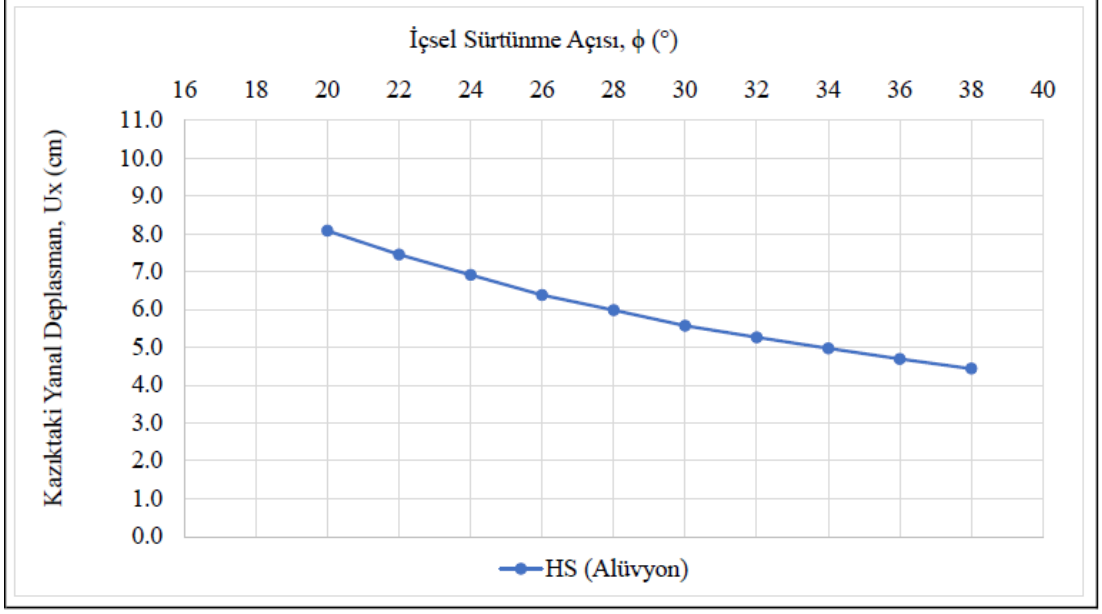
İçsel sürtünme açısının deformasyonlar üzerindeki etkisi yüksektir. Açının artması ile yanal deplasmanlar azalmaktadır. Başka bir deyişle zeminin mukavemeti genel olarak içsel sürtünme açısının artması ile artmaktadır.

Çizelge 7.26 : Farklı içsel sürtünme açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS).

İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Dilatansi açısı, ψ (°)	0	0	0	0	0	0	2	4	6	8
Yanal deplasman, U_x (cm)	8.08	7.45	6.91	6.38	5.98	5.57	5.26	4.97	4.69	4.44

Kullanılan Parametreler

Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m³)	k (m/gün)	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12	15	15	45	-	1	değişken
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	250	20	35
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	40	40



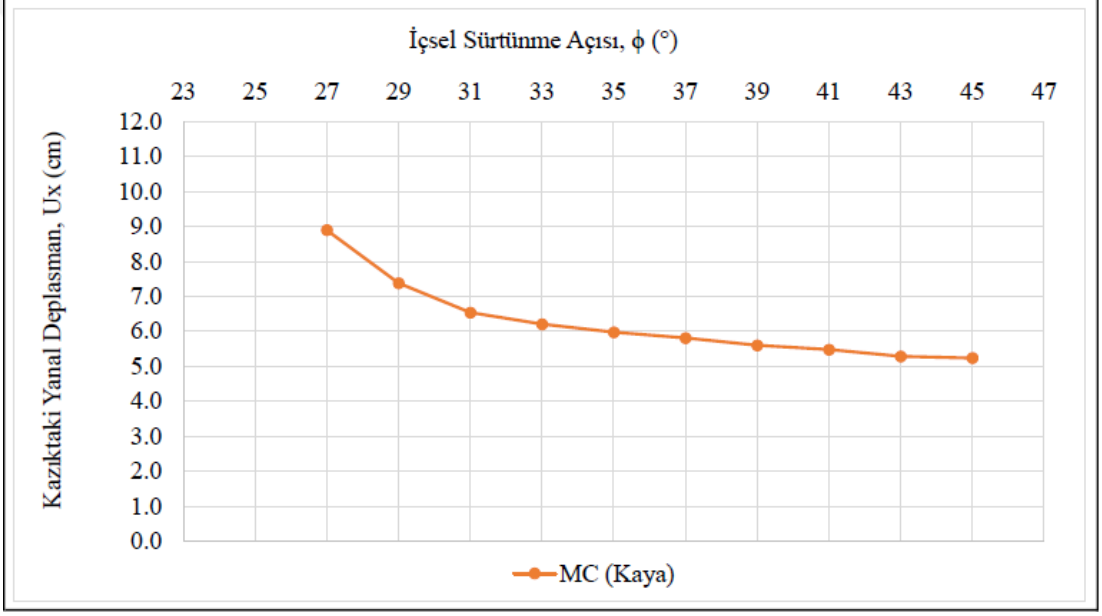
Şekil 7.27 : Alüvyon birimlerde içsel sürtünme açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

Çizelge 7.27 : Farklı içsel sürtünme açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC).

İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45
Dilatansi açısı, ψ (°)	0	0	1	3	5	7	9	11	13	15
Yanal deplasman, U_x (cm)	8.91	7.39	6.54	6.22	5.98	5.82	5.61	5.48	5.29	5.24

Kullanılan Parametreler

Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m³)	k (m/gün)	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12	15	15	45	-	1	28
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	250	20	değişken
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	40	40



Şekil 7.28 : Kaya birimlerde içsel sürtünme açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

7.5.1.3 Kohezyon değerinin etkisi

Kohezyon ve içsel sürtünme açısı, kayma mukavemeti parametreleri olarak tanımlanmaktadır. Kohezyon, zemin tanelerinin birbirini çekmesi veya birbirine yapışması olarak da tanımlanabilir. Kohezyon, aynı zemin içerisinde farklı drenaj koşulları sebebiyle farklı değerler alabilir. Kayma mukavemeti parametreleri laboratuvarda serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deneyleri ile belirlenmektedir. Kum, çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde kohezyon değeri c=0, kil gibi kohezyonlu zeminlerde ise c≠0'dır.

Deplasmanlar üzerinde zeminin kohezyon değerinin irdelenmesi amacıyla farklı kohezyon değerleriyle, sistemdeki diğer parametreler sabit tutularak analizler yapılmıştır. İki modelde seçilen kohezyon değerleri Çizelge 7.28 ve Çizelge 7.29'da, elde edilen yanal deformasyonlara ait grafikler Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da verilmektedir.

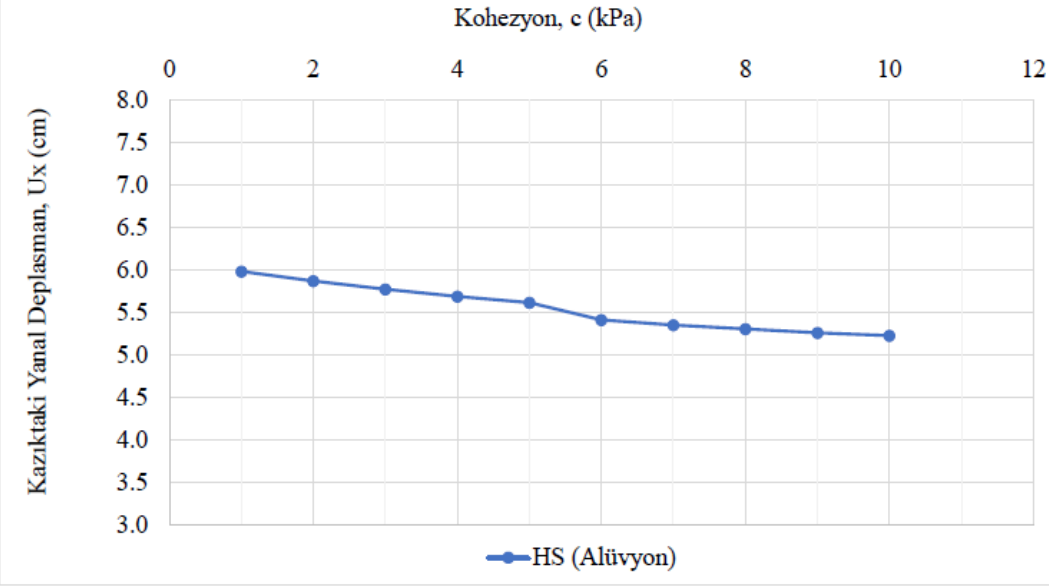
Analizler ışığında alüvyon birimlerde kohezyon parametresinin artması yanal deplasmanları çok etkilememiştir. Ancak kaya birimlerdeki kohezyon değerinin artması iksa üzerindeki yanal deplasmanların azalmasını sağlamıştır.

Çizelge 7.28 : Farklı kohezyon değerleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (HS).

Kohezyon, c (kPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Yanal deplasman, U_x (cm)	5.98	5.87	5.77	5.69	5.61	5.41	5.35	5.30	5.26	5.23

Kullanılan Parametreler

Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m³)	k (m/gün)	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12	15	15	45	-	değişken	28
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	250	20	35
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	40	40



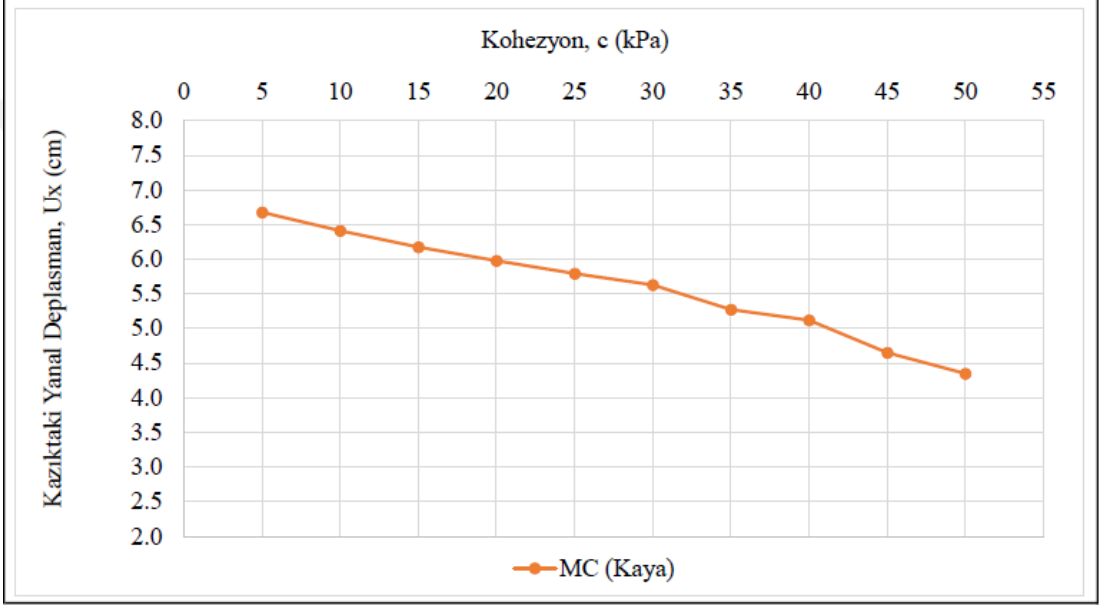
Şekil 7.29 : Alüvyon birimlerde kohezyon değerlerine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

Çizelge 7.29 : Farklı kohezyon değerleri için hesaplanan yanal deplasmanlar (MC).

Kohezyon, c (kPa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Yanal deplasman, U_x (cm)	6.68	6.41	6.18	5.98	5.79	5.63	5.28	5.12	4.65	4.35

Kullanılan Parametreler

Tabaka	Bünye Modeli	γn / γsat (kN/m³)	k (m/gün)	E 50,ref (MPa)	E oed,ref (MPa)	E ur,ref (MPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ' (°)
Alüvyon	HS	18/19	0.12	15	15	45	-	1	28
Kiltaşı / Çamurtaşı - Kumtaşı	MC	22/23	0.25	-	-	-	250	değişken	35
Diyabaz	MC	23/24	0.25	-	-	-	500	değişken	40



Şekil 7.30 : Kaya birimlerde kohezyon değerlerine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

7.5.2 Ankraj özelliklerinin duvar deplasmanlarına etkisi

Bu bölümde, istinat duvarının rijitliğini doğrudan etkileyen iksa sistemi yatay destek elemanı olan ankrajların kök boyu, açıları, aralarındaki yatay mesafe, ankraj öngerme kuvveti ve halat çapının iksa sistemindeki deplasmanları ne kadar etkilediği incelenmiştir.

7.5.2.1 Ankraj kök boyunun etkisi

Öngermeli ankrajlar serbest bölge ve kök bölgesinden oluşur. Potansiyel göçmeleri engellemek için öngerme yükü zemine uygulanır. Uygulanan yük serbest bölgeden kök bölgesine, oradan da zemine aktarılır. Kök bölgesi zeminlerde genellikle 4.5-12m arası seçilir ve kayalarda ise minimum 7.5m olarak alınır. Zeminlerde kök bölgesi

3m'den daha kısa olamaz (FHWA-IF-99-015, 1999). Uygulamada ise kök boyu genellikle 8-10m arasında tercih edilmektedir.

Seçilen sistemde ilk 3 sıra ankraj kök boyu 8m, diğer 7 ankrajın kök boyu ise 10m olarak seçilmiştir. İlk 3 sıra ankrajlar alüvyon zeminler içerisinde, diğer ankrajlar ise kaya birimler içerisinde teşkil edilmiştir. Ankraj kök boyunun iksa sistemindeki deplasmanlara etkisinin irdelenmesi amacıyla kök boyları hariç tüm parametreler sabit tutularak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, ankraj kök boyları 4m ve 12m arasında seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizlere göre 7m-9m ve 8m-10m olarak seçilen ankraj kök boyları birbirine yakın deplasman sonucu vermiştir. Daha küçük kök boyları ile analiz yapıldığında ise deplasmanlar artmaktadır (Çizelge 7.30). Kök boyunun 8m-10m'den büyük olması durumunda ise deplasmanlarda kayda değer bir azalma görülmemiştir.

Çizelge 7.30 : Farklı ankraj kök boyları için hesaplanan yanal deplasmanlar.

Ankraj kök boyu L_b (m)	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12
Yanal deplasman U_x (cm)	6.74	6.70	6.43	6.01	5.98	5.90	5.90

Literatüre göre ankraj kök boyu kayalarda minimum 7.5m alınmalıdır. Ancak nümerik çalışmalar kapsamında yanal deplasmanlara etkisinin incelenmesi açısından kayalarda 6.0 ve 7.0m kök boyu için de hesaplar gerçekleştirilmiştir.

7.5.2.2 Ankraj açısının etkisi

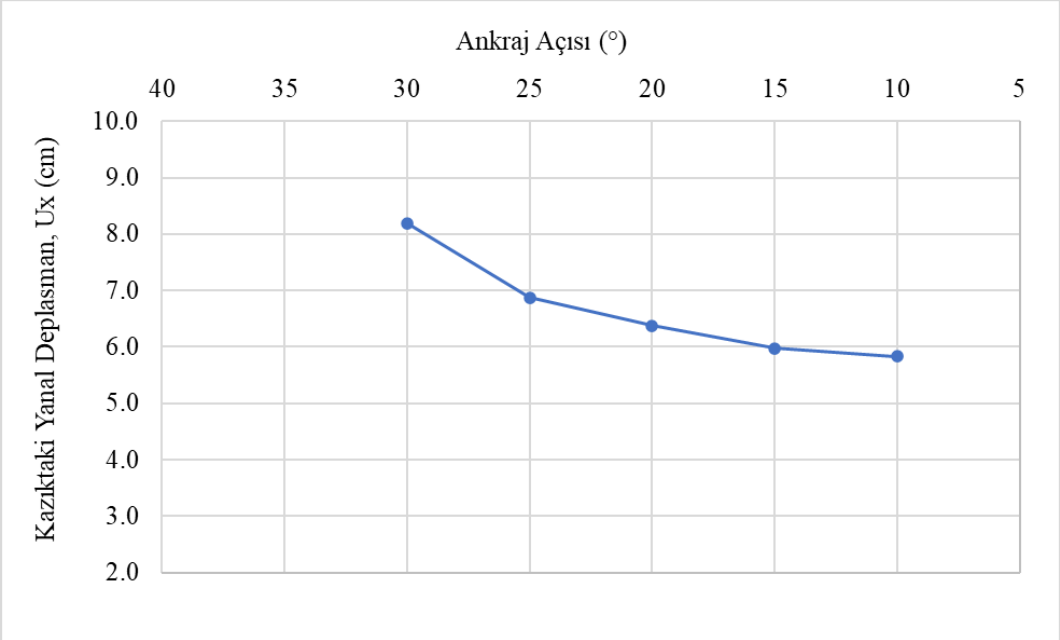
İksa sistemine doğrudan etki eden bir diğer parametre de ankraj açısıdır. Ankrajların gelen kuvvetleri karşılayabilmesi için kök bölgelerinin kayma düzleminin arkasında olması gerekir. Ankrajlar kayma düzlemine dik yerleştirilirse sürtünme kuvvetlerinde ciddi artış meydana gelebilir. 45°'den daha büyük açılarda sistemde göçme, 10°'den küçük açılarda ise enjeksiyon uygulaması sırasında problem yaşanabilir. Ankrajlar için izin verilen açılar 10°-45° arasındadır, ancak uygulamalarda genellikle yatayla 15°-30° açılar tercih edilir. Bunun sebebi delgi ve enjeksiyon uygulamasının daha kolay olmasıdır.

Ankraj açısı ile deplasmanların ne kadar değiştiğini görebilmek için deplasmanların kritik olduğu son dört sıra ankrajın açıları değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

Seçilen ankraj açıları ve gerçekleştirilen analiz sonuçları Çizelge 7.31'de, elde edilen deplasmanlara ait grafik Şekil 7.31'de verilmiştir. Farklı ankraj açıları ile hesaplanan kazıktaki yanal deplasman değerleri ve toplam yanal deplasmanların görüntüleri Ek F'de verilmiştir.

Çizelge 7.31 : Farklı ankraj açıları için hesaplanan yanal deplasmanlar.

Ankraj açısı (°)	10	15	20	25	30
Yanal deplasman U_x (cm)	5.83	5.98	6.37	6.88	8.19



Şekil 7.31 : Ankraj açılarına göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

Analiz sonuçlarından da görüleceği gibi ankraj açısı arttıkça meydana gelen yanal deplasmanlar da artmaktadır. Her ne kadar 10° açı ile hesaplanan deplasman değeri seçilen sistemdeki 15° açı ile hesaplanan değerden daha az olsa da uygulama sırasında enjeksiyondan kaynaklanabilecek problemler ile proje tipi ve altyapı konumları sebebiyle tercih edilmemiştir.

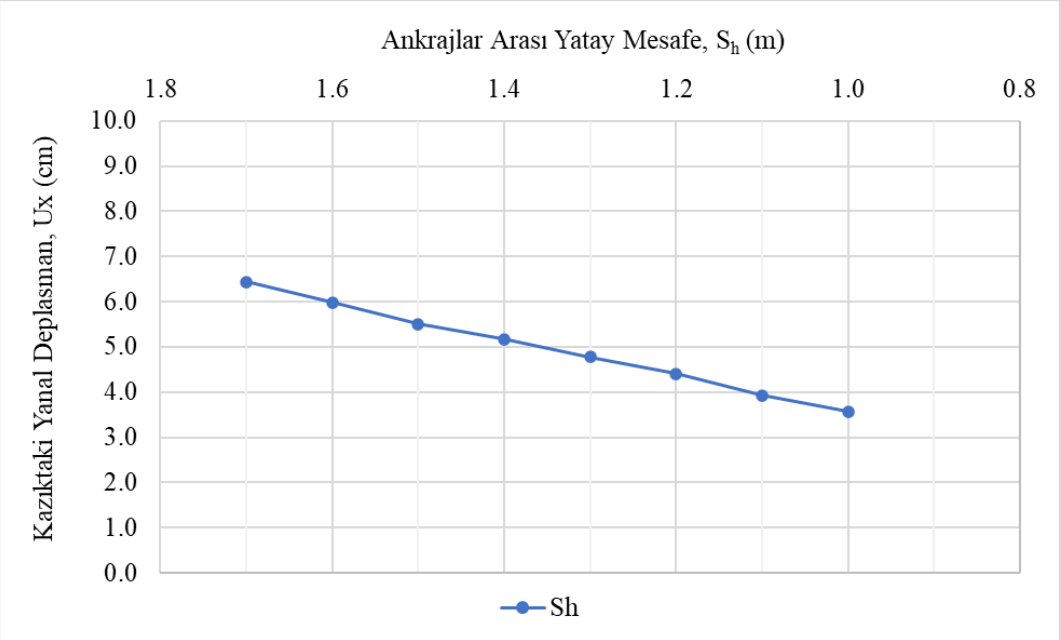
7.5.2.3 Ankrajlar arası yatay mesafenin etkisi

İksa sistemindeki deplasmanların, ankrajlar arasındaki yatay mesafeden nasıl etkilediğinin incelenmesi amacıyla tüm parametreler ve geometri modeli sabit tutularak ankrajlar arası yatay mesafeler değiştirilmiştir. Seçilen sisteminde ilk sıra ankraj yatay mesafesi 3.2m, diğer ankrajlarda seçilen yatay mesafesi ise 1.6m'dir.

Seçilen farklı ankraj mesafeleri ve hesaplanan yanal deplasman değerleri Çizelge 7.32'de, deplasmanların mesafeye göre değişimi grafiği Şekil 7.32'de verilmiştir.

Çizelge 7.32 : Farklı ankraj yatay mesafeleri için hesaplanan yanal deplasmanlar.

Ankraj Yatay Mesafesi S_h, (m)	Yanal deplasmanlar U_x, (cm)
2.0-1.0	3.57
2.2-1.1	3.93
2.4-1.2	4.40
2.6-1.3	4.78
2.8-1.4	5.17
3.0-1.5	5.51
3.2-1.6	5.98
3.4-1.7	6.44
3.6-1.8	Göçme



Şekil 7.32 : Ankraj yatay mesafesine göre yanal deplasmanların değişimi grafiği.

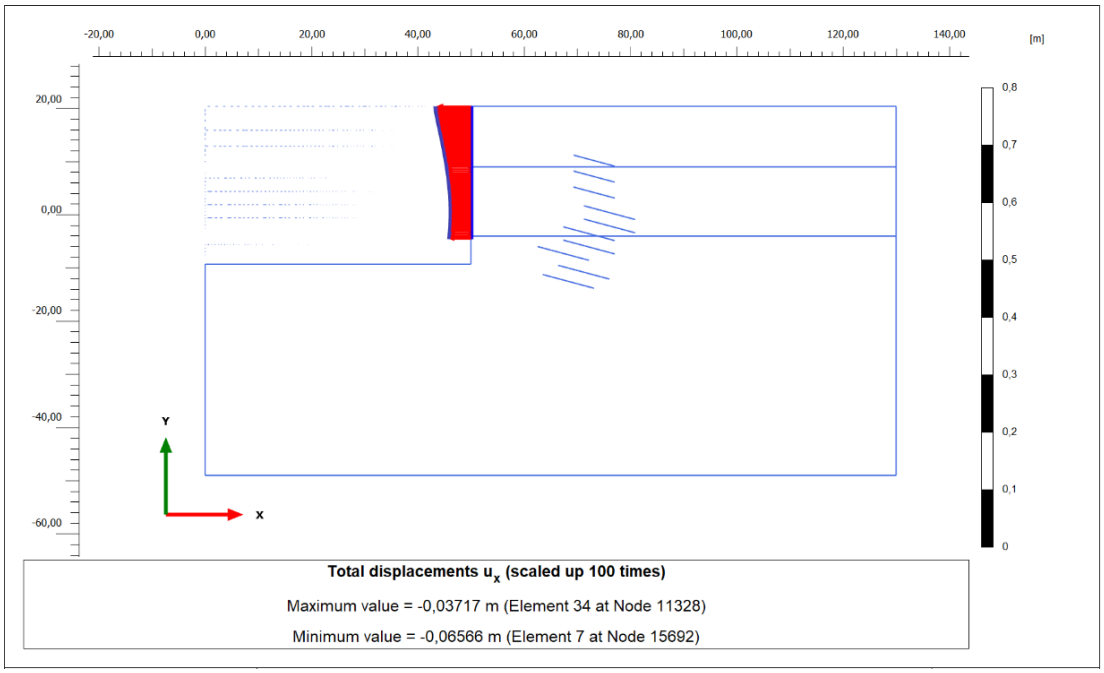
Elde edilen sonuçlara göre ankrajlar arası yatay mesafenin azalması ile yanal deplasmanlar da azalmıştır. Ancak iki ankraj arasındaki yatay mesafenin azalmasıyla birlikte yapılan ankraj delgilerinin birbirine temas etme ihtimali artar. FHWA-IF-99-015'ya göre izin verilebilen en düşük ankraj yatay mesafesi 1.2m'dir.

7.5.2.4 Ankraj öngerme kuvvetlerinin etkisi

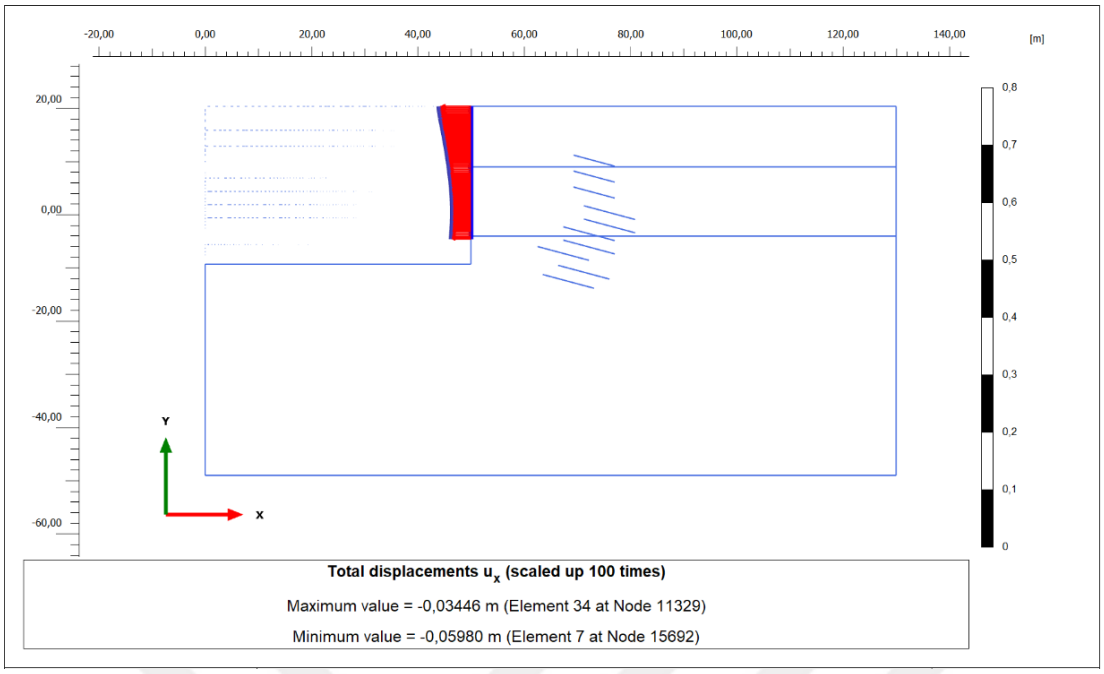
Ankraj öngerme çalışmaları sırasında birçok problem ile karşılaşılabilmektedir. En sık yaşanan sorun ise kalibrasyon problemi olan krikolar sebebiyle ankrajların germe yükünden az ya da çok gerilmiş olmasıdır. Projedeki kilit yüküne göre gerilmiş ankrajlarda, zamanla zemin koşullarından dolayı boşalma durumu meydana gelebilmektedir. İncelenen kesit, 10 sıra ankrajlı modellenmiş olup ankraj öngerme kuvvetleri 45ton ila 90ton arasında değişmektedir. Sistem geometrisi ve parametreler sabit tutularak proje kilit yüklerinden daha az ve daha fazla yüklerle analizler gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Çizelge 7.33'te, kazıkta hesaplanan deplasman değerine ait grafikler Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35'te sunulmaktadır. Gerçekleştirilen analizlere göre öngerme kuvvetinin azalması deplasmanlarda artışa neden olmuştur.

Çizelge 7.33 : Farklı ankraj halat çapları için hesaplanan yanal deplasmanlar.

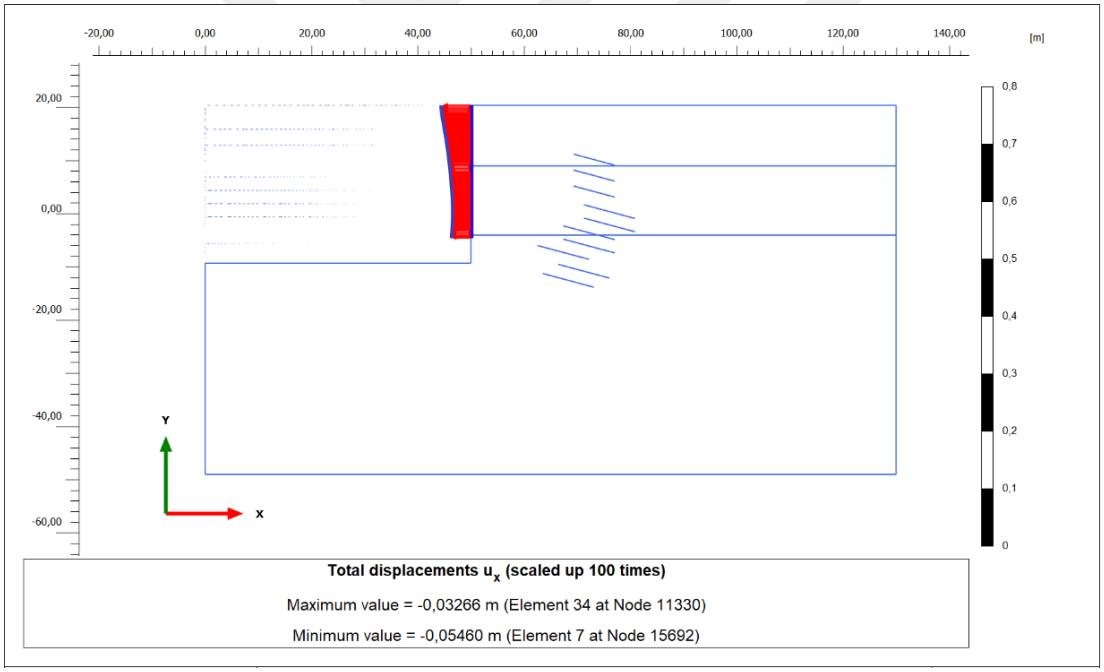
Öngerme kuvveti (ton)	Yanal deplasmanlar U_x, (cm)
40-85 arası	6.57
45-90 arası	5.98
50-95 arası	5.46



Şekil 7.33 : 40-85ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.



Şekil 7.34 : 45-90ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.



Şekil 7.35 : 50-95ton arası germe kuvveti ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.

7.5.2.5 Ankraj halat çapının etkisi

Sistem geometrisi ve parametreler sabit tutularak farklı ankraj halat çapları ile analizler yapılmıştır. 0.5”, 0.6” ve 0.7” halat çapları için kullanılan ankraj serbest boyu ve kök boyu parametreleri Çizelge 7.34 ve Çizelge 7.35’te, hesaplanan yanal deplasman değerleri ise Çizelge 7.36’da sunulmaktadır.

Çizelge 7.34 : Ankraj serbest boyu için kullanılan parametreler.

Parametre	3 halatlı (sh=3.2 m)	4 halatlı (sh=1.6 m)	5 halatlı (sh=1.6 m)	6 halatlı (sh=1.6 m)
0.5” için EA (kN/m)	76,006	101,342	126,677	152,012
0.6” için EA (kN/m)	109,400	145,931	182,414	218,897
0.7” için EA (kN/m)	148,972	198,629	248,287	297,944

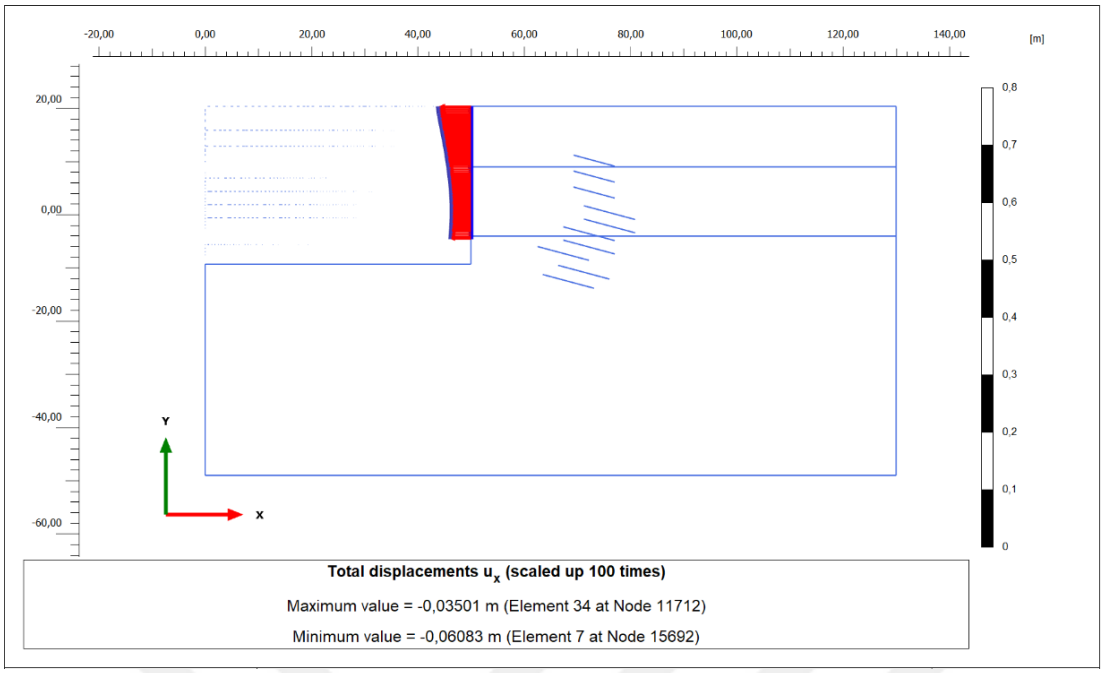
Çizelge 7.35 : Ankraj kök boyu için kullanılan parametreler.

Parametre	3 halatlı (sh=3.2 m)	4 halatlı (sh=1.6 m)	5 halatlı (sh=1.6 m)	6 halatlı (sh=1.6 m)
0.5” için EA (kN/m)	164,506	342,472	355,931	369,390
0.6” için EA (kN/m)	173,389	366,160	385,541	404,923
0.7” için EA (kN/m)	183,888	394,156	420,536	446,917

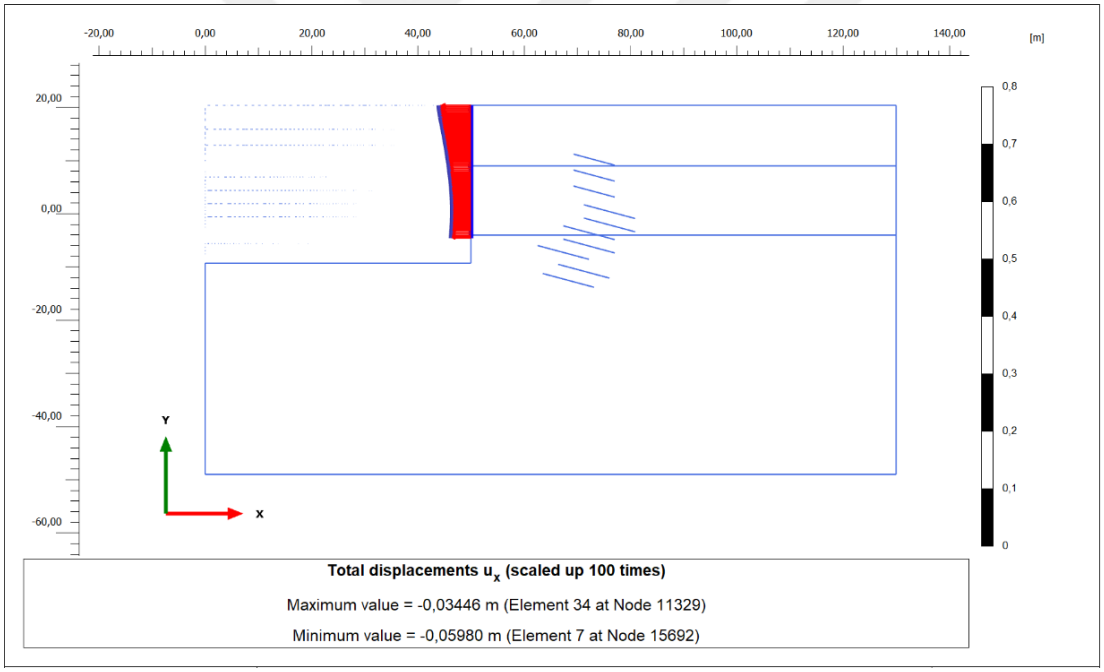
Çizelge 7.36 : Farklı ankraj halat çapları için hesaplanan yanal deplasmanlar.

Ankraj Halat Çapı (inç)	Yanal deplasmanlar $U_{x,}$ (cm)
0.5”	6.08
0.6”	5.98
0.7”	5.88

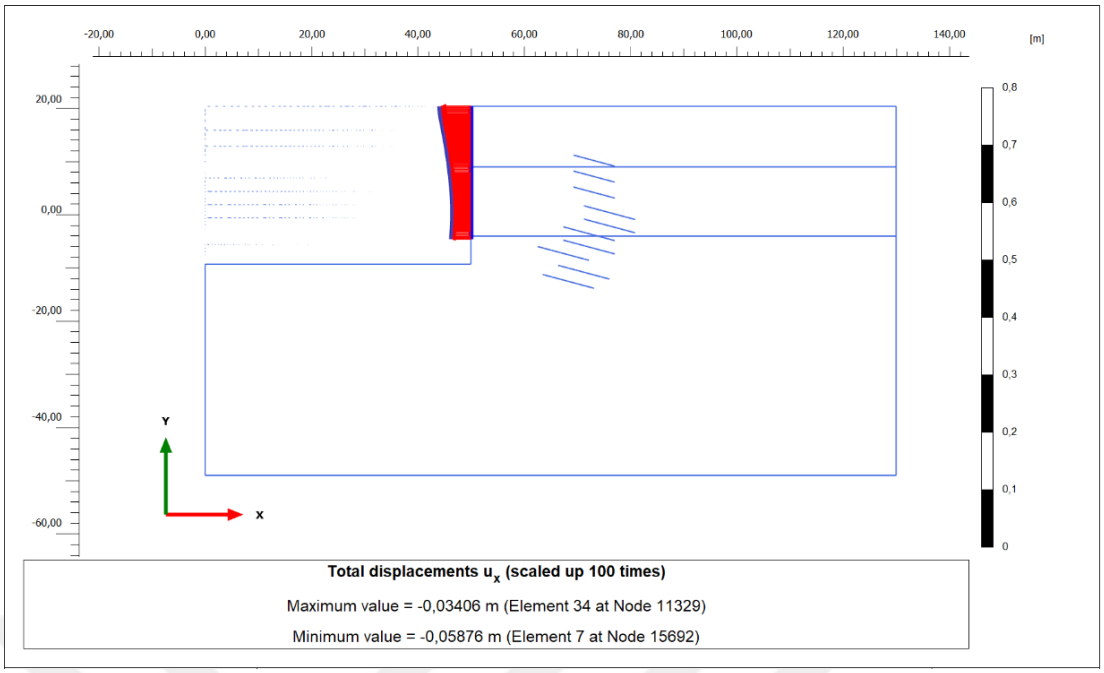
0.5”, 0.6” ve 0.7” halat çapları için hesaplanan yanal deplasmanlara ait program çıktıları Şekil 7.36, Şekil 7.37 ve Şekil 7.38’de sunulmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre, sistemdeki yanal deplasmanlar, ankraj halat çapının artmasıyla azalmıştır. Halat çapının iksa sisteminin rijitliğinde doğrudan etkisi vardır ve sistemi farklı çaplı halatlarla oluşturmak mümkündür. Ancak bir projede farklı özelliklerde malzeme temini hem zordur hem de imalat açısından uygun olması açısından tek tip halat çapı kullanılması önerilmektedir.



Şekil 7.36 : 0.5” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.



Şekil 7.37 : 0.6” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.



Şekil 7.38 : 0.7” halat çapı ile hesaplanan kazıktaki deplasman değeri.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Derin kazılarda, zeminde meydana gelebilecek hareketleri belirli sınırlar içinde tutabilmek, yapı ve çevresindeki yapılar için güvenli bir çalışma alanı oluşturmak amacıyla derin kazı destek sistemleri kullanılmaktadır. Derin kazılarda meydana gelen deplasmanlar birçok farklı faktöre bağlıdır. Yapılan bu çalışmada, derin kazı destek sistemlerinde yaygın şekilde kullanılan, düşey destek elemanı olarak kazıklar ile yatay destek elemanı olarak öngermeli ankrajlar kullanılarak yaklaşık 29.7m kazı yapılmıştır. Geçirimsizliği sağlamak amacıyla kazık tipi olarak kesişen kazık seçilmiştir. Ele alınan sistemde meydana gelen yanal deplasmanları etkileyen çeşitli parametreler incelenmiştir.

Destek sistemlerinin tasarımında seçilen parametrelerin gerçeğe mümkün olduğunca yakın olması çok önemlidir. Doğru ve gerçekçi parametrelerin seçilmesi, doğru deplasmanların öngörülmesini sağlayacaktır. Bu nedenle kazı öncesinde zemin etüdü çalışmalarının yapılması, kazı alanı hakkında yeterli ve doğru bilgiye ulaşılması çok önemli bir husustur. Parametre seçiminin yanı sıra inşaat adımlarının da doğru seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılacak kazı için öngörülen deplasmanların kazı sırasında düzenli olarak alınan aletsel gözlem ölçümleriyle de uyumlu olduğu tespit edilmelidir. Aletsel gözlem ölçümleri hem kalite kontrolü hem de kazı sırasında bir sorun oluşması durumunda hızlı ve ekonomik olarak çözüm üretilmesini sağlamaktadır.

Tez kapsamında incelenen iksa projesinde, kazı öncesinde zemin etüdü çalışmaları gerçekleştirilerek kazı sahası iyice tanınmış, yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda iksa sistemi parametreleri belirlenmiş ve iksa sistemi projelendirilmiştir. İksa sisteminde meydana gelen deplasmanlar kazı sonuna kadar belirli aralıklarla izlenmiştir. Kazıkların imalatı sırasında belirli bir derinlikten sonra magmatik kökenli diyabaz bloklarla karşılaşılmıştır. Bu sebeple iksa sisteminin tasarımı revize edilerek kesişen kazıkların boyları 25.0m'ye düşürülmüş ve kazının kalan bölümü hasır çelikli 35cm kalınlıklı shotcrete ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır. Tezin beşinci bölümünde detaylı olarak anlatılan aletsel gözlemin önemi birçok projede olduğu gibi

bu projede de çok açıktır. Kazı sonuna kadar düzenli olarak alınan okumalarda 7.sıra ankrajların tamamlanmasıyla birlikte meydana gelen artışın kritik sınırı geçmesi sebebiyle 6. ve 7.sıra ankraj kademelerinin arasına 6 adet ilave öngermeli ankraj yapılmıştır. Daha sonra 8. kademe tamamlanınca aletsel gözlem okumalarında tekrar artış gözlenmesi üzerine 7. ve 8.sıra ankraj kademelerinin arasına da 10 adet öngermeli ankraj yapılmıştır. İlave öngermeli ankrajların tamamlanmasını takiben 9. kademe kazı yapılması nedeniyle inklinometre okumalarında tekrar artış meydana gelmiştir. Bunu takiben inklinometre okumaları sıklaştırılmış olup 9.kademe kazının tamamlanması ile yanal deplasmanların sabitlendiği tespit edilmiştir. Kazı sırasında gerçekleştirilen aletsel gözlem okumaları sayesinde daha sonra oluşabilecek ciddi hasarlar hızlı ve ekonomik şekilde bertaraf edilmiştir.

İncelenen çalışmadaki iksa sistemi modellenirken alüvyon olarak tanımlanan zeminler hardening soil model ile kaya olarak tanımlanan birimler ise Mohr-Coulomb modeli ile oluşturulmuştur. Tez kapsamındaki nümerik çalışmalara yönelik olarak iki zemin bünye modelinde ortak olan elastisite modülü, içsel sürtünme açısı ve kohezyon parametrelerinin yanal deplasmanlara olan etkisi araştırılmıştır. Bunun yanı sıra ankrajların kök boyu, açısı, yatay mesafesi, ankraj öngerme kuvveti ve halat çapı özelliklerinin de yanal deplasmanlara olan etkisi araştırılmıştır.

Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre elastisite modülünün yanal deplasmanlara olan etkisinin özellikle kaya birimlerde fazla olduğu görülmüştür. Elastisite modülü artışı ile zeminin mukavemeti artmakta ve bunun sonucu olarak deplasmanlar azalmaktadır. Özellikle kaya birimlerdeki yüksek elastisite modülü değeri kayanın daha rijit olması anlamına gelmektedir. Çalışma kapsamında alüvyon birimlerdeki yüksek elastisite modülü ile hesaplanan yanal deplasmanlarda çok fazla azalma meydana gelmemiştir. Bunun nedeni ise alüvyon zeminlerin kendi içerisinde farklı noktalarda farklı mukavemet özelliği gösterebilen zeminler olması, modelde üst katmanda sınırlı olarak alüvyon birimlerin bulunması ve bunun kazı sonundaki deplasmanlara etkisinin kazı derinliği göz önüne alındığında azalması olarak açıklanabilir.

Çalışma kapsamında incelenen bir diğer parametre ise içsel sürtünme açısıdır. İçsel sürtünme açısı zeminin mukavemetini doğrudan etkileyen bir parametredir. Analiz sonuçlarına göre içsel sürtünme açısının artması ile yanal deplasmanlarda azalma meydana gelmiştir.

Aynı zemin içerisinde farklı drenaj koşulları sebebiyle farklı kohezyon değerleri elde etmek olasıdır. İçsel sürtünme açısı parametrelerinden biri olan kohezyon değerinin alüvyon birimlerde artması yanal deplasmanları çok etkilememiştir. Ancak kaya birimlerdeki kohezyon değerinin artması iksa üzerindeki yanal deplasmanların azalmasını sağlamıştır.

Zemin parametrelerinin yanı sıra ankraj özelliklerinin de iksa sisteminde meydana gelen yanal deplasmanlara olan etkisi araştırılmıştır. Öngermeli ankrajlı bir iksa sistemi tasarlanırken güvenlik ve ekonomik şartlar mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Pek çok tasarımda sistemin güvenli olması açısından abartılı tasarımlar yapılabilmektedir. Bazen bu sistemler tekrar gözden geçirildiğinde uygulamada gerekli olmayan bazı tercihler yapıldığı görülmüştür. Bu sebeple pek çok faktör bir arada değerlendirilerek güvenli ve ekonomik olan en uygun sistemin seçilmesi sağlanmalıdır. Bu amaçla ankraj kök boyu, ankraj açısı, ankrajlar arasındaki yatay mesafe, ankraj öngerme kuvveti ve ankraj halat çapının iksa sistemindeki deplasmanları ne kadar etkilediği analizlerle incelenmiştir.

Ankraj kök boyu ile ilgili yapılan literatür araştırmaları ve uygulamada sık kullanılan boylar dikkate alındığında en uygun kök boyu 8m ve 10m arası olduğu görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda da 10m'den fazla yapılan kök boyunun deplasmanların azalmasına ciddi katkı sağlamadığını göstermektedir. Kaya birimlerde standartlarda önerilen tasarım değerleri mutlaka dikkate alınmalı, özellikle ayrışmış kaya gibi tanımlanan kayalarda emniyetli tasarım yapılması açısından minimum 7.5m kök boyu seçilmelidir ve maliyeti de düşünülerek gereksiz uzunluklardan kaçınılmalıdır.

Bir diğer incelenen özellik ise ankraj açısıdır. İksa sisteminde yaşanacak göçme, çevre yapılarda da büyük deformasyonlara neden olabilir. Bu sebeple ankraj açısının ve iksa sistemi kesitlerinin doğru seçilmesi sadece kazı alanının emniyeti için değil, civardaki yapıların emniyeti için de büyük önem teşkil etmektedir. Her ne kadar standartta 10º ile 45º arasında ankraj açısı yapılabileceği belirtilse de uygulama sırasında yaşanabilecek birçok problem düşünülerek en uygun açı seçilmelidir. Yapılan çalışmalar sonucunda uygulamada en uygun ankraj açısı 15º olarak kabul edilmektedir. Tasarlanan sistemde ankraj açıları 15º olarak seçilmiştir ve deplasmanların kritik olduğu son 4 sıra ankraj açıları değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ankraj açısının artmasının daha büyük deplasmanlara neden olduğunu göstermektedir.

Ankrajlar arası yatay mesafenin azalması yanal deplasmanlarda azalmayı sağlamıştır. Ancak uygulama sırasında çok yakın yapılan ankrajlar sorun oluşturabilmektedir. Yapılan ankraj delgileri birbirine temas edebilir ve ankrajlar tasarlandığı gibi çalışmayabilir. Yaşanabilecek bu durumlar dikkate alınarak en uygun ankraj yatay mesafesi seçilmelidir.

Ankrajlar projede hesaplanan kilit yüküne göre imal edildikten sonra gerilirler. Ancak uygulama sırasında ya da daha sonra zemin koşullarından dolayı ankrajlarda boşalma meydana gelebilir. Projedeki kilit yüküne göre gerilmeyen ankrajlar kazı alanının güvenliğini tehlikeye düşürebilir. Bu sebeple doğru öngerme uygulanıp uygulanmadığı konrol edilmelidir.

Farklı ankraj halat çapları ile yapılan analizler sonucunda halat çapının yanal deplasmanları azalttığı görülmüştür. Halat çapı iksa sistemine doğrudan etki eder. Ekonomi sağlanması açısından farklı çaplı halatları aynı projede kullanmak mümkündür; ancak bir projede farklı özelliklerde malzeme temininin zorluğu ve imalat açısından uygun olması nedeniyle tek tip halat çapı tercih edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design, 5th Edition*. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.

Brinkgreve, R. B. (2005). Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application. *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration*. (pp.69-98). American Society of Civil Engineers. doi:https://doi.org/10.1061/40771(169)4

Budhu, M. (2007). *Soil Mechanics and Foundations, 2nd Edition.* John Wiley & Sons, Inc., USA.

BS 8081. (1989). *British Standard Code of Practice for Ground Anchorages*. British Standards Institution.

BSI 5930. (1999). *Code of Practice for Site Investigations.* British Standards Institution.

Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices, 2nd Edition.* Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Das, B. M. (2007). *Principles of Foundation Engineering, SI, 7th Edition.* Cengage Learning, Stamford, USA.

Dayıoğlu, M. (2010). *Derin kazıların incelenmesi ve derin kazı uygulaması üzerine bir örnek: Harbiye kongre merkezi derin temel kazısı*. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dumlu, M. (1988). *Derin kazılar ve destekleme yöntemleri.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Duncan, J. M., Chang, C. Y. (1970). *Nonlinear analysis of stress and strain in soils.* Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. (pp.1629-1653). ASCE, 96 (SM5).

Ekici, H. (2011). *Derin kazı sistemleri ve derin kazılara bir örnek: Akasya Acıbadem projesi.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

FHWA-IF-99-015. (1999). *Geotechnical Engineering Circular No.4: Ground Anchors and Anchored Systems.* U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Washington DC.

Hsiung, B.-C. B., Dao, S.-D. D. (2014). *Evaluation of Constitutive Soil Models for Predicting Movements Caused by a Deep Excavation in Sands.* The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, vol 19, Bund.Z5. http://www.ejge.com/2014/Ppr2014.943ma.pdf

İnanır, O. E. (2015). *Geoteknik mühendisliğinde aletsel gözlem ve uygulama teknikleri.* Türkiye Mühendislik Haberleri, Geoteknik-1, TMH-484-2015/1, (s.20-30).

Kasımzade, A. A. (1995). *Sonlu Elemanlar Metodu: Temelleri ve Yapı Mekaniğinde Uygulamaları, 2.Baskı.* Birsen Yayınevi, İstanbul.

Kumbasar, V. ve Kip, F. (1992). *Zemin Mekaniği Problemleri*. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Lade, P. V. (2005). Overview of Constitutive Models for Soils. *Calibration of Constitutive Models* (pp.1-34). American Society of Civil Engineers. doi: https://doi.org/10.1061/40786(165)1

Lambe W. T., Whitman R. V. (1969). *Soil Mechanics.* John Wiley & Sons.

McCarthy, D.F. (2007)**.** *Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics, 7th Edition.* Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

McGregor J.A., Duncan J.M. (1998)**.** *Performance and Use of the Standard Penetration Test in Geotechnical Engineering Practice,* Virginia Tech.

Ou, C. Y. (2006). *Deep Excavation: Theory and Practice.* Taylor & Francis Group, London, UK.

PLAXIS 2D Reference Manual. (2019).

PLAXIS 2D Materials Models. (2019).

Puller, M. (2003). *Deep Excavations: A Practical Manual, 2nd Edition.* Thomas Telford, London.

Schanz, T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. (1999). *The Hardening Soil Model: Formulation and Verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, (pp.281–296).* Rotterdam, Holland: Balkema.

Terzaghi, K., Peck R. B., Mesri G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd Edition*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Toğrol, E. (1972). *Zemin Ankrajları.* Temel Araştırma A.Ş. Yayınları No:2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

Tschebotarioff, G. P. (1973). *Foundation, Retaining and Earth Structures, 2nd Edition.* McGraw-Hill, New York.

TS EN 1536+A1. (2015). *Özel Jeoteknik Uygulamalar: Delme Kazıklar.* Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1538. (2001). *Özel Jeoteknik Uygulamalar: Diyafram Duvarlar*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uzuner, B. A. (1990). *Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği.* Teknik Yayınevi, Trabzon.

Ük, M. (2009). *Derin kazılar ve derin kazılara bir örnek: Flame Towers projesi iksa sistemi.* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

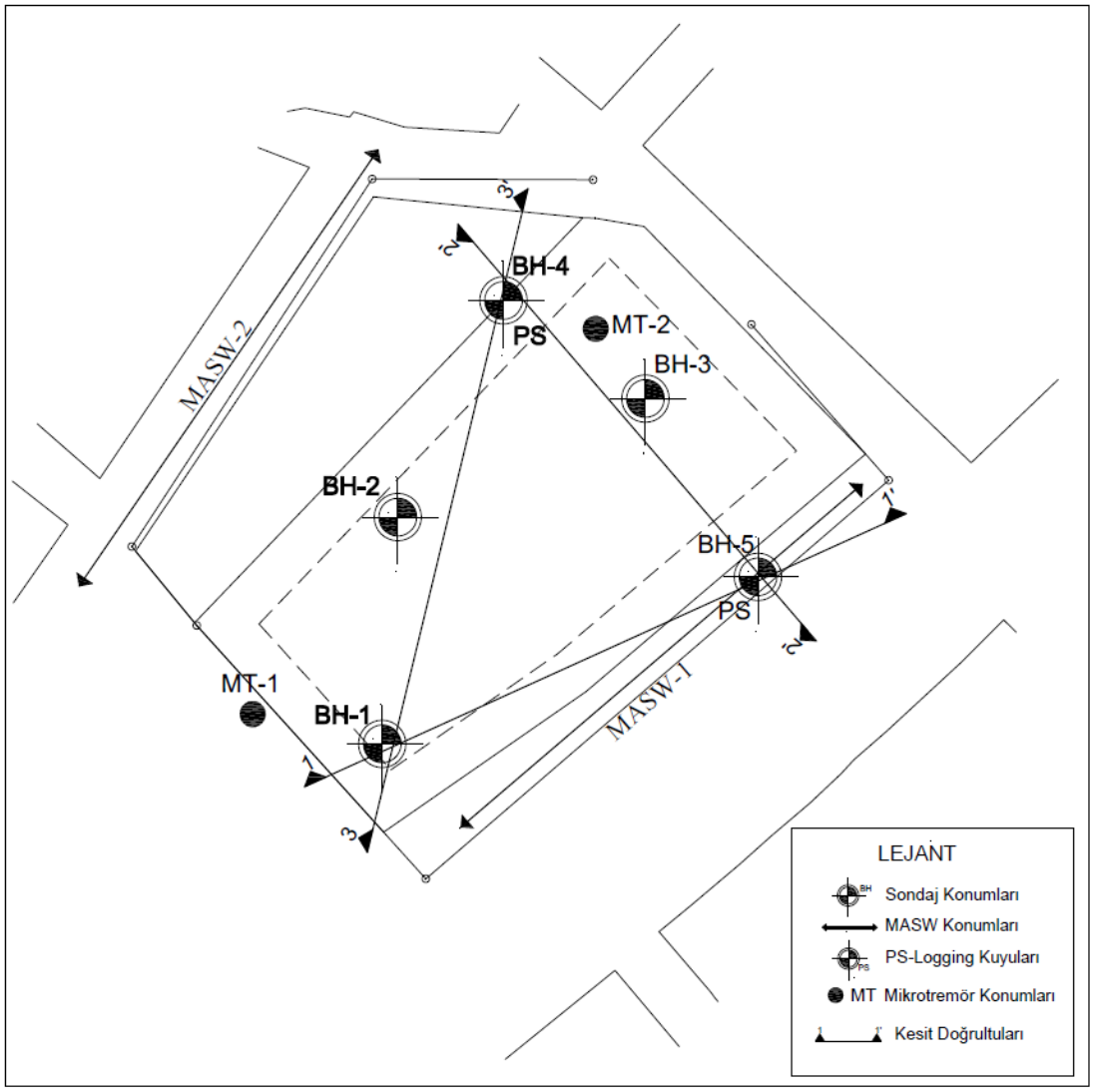
Yıldırım, S. (2009). *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı.* Birsen Yayınevi, İstanbul.

Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. (2014). *Sondaja Dayalı Temel ve Zemin Etüd Raporu*, İstanbul.

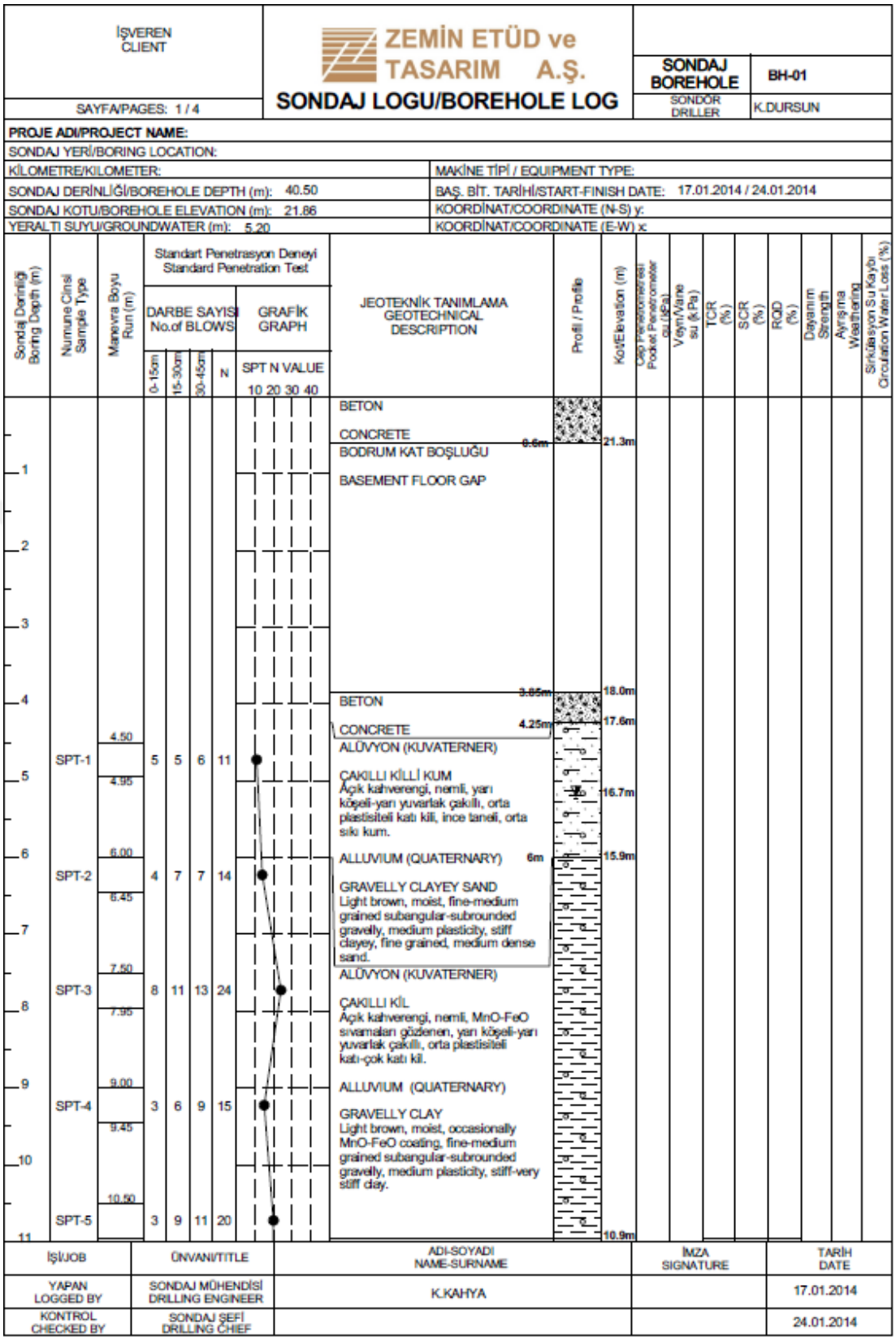
EKLER

EK A: Zemin Etütleri Yerleşim Planı ve Sondaj Logları
EK B: Kesitler
EK C: Fotoğraflar
EK D: Farklı Elastisite Modülleri İçin Kazıktaki Yanal Deplasmanlar
EK E: Farklı İçsel Sürtünme Açıları İçin Kazıktaki Yanal Deplasmanlar
EK F: Farklı Ankraj Açıları İçin Kazıktaki Yanal Deplasmanlar ve Toplam Yanal Deplasmanların Görüntüsü

EK A



Şekil A.1 : Zemin etütleri yerleşim planı (ölçeksiz).



Şekil A.2 : BH-01 sondaj logu, sayfa 1.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 2 / 4

SONDAJ BOREHOLE: BH-01

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.50

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 17.01.2014 / 24.01.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.86

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 5.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
12	C-1	10.95 12.00		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) 10.95m KİLTAŞI-ÇAMURTAŞI Kahverengi-koyu gri, orta derecede ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%7), sık-çok sık kırıklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı-çamurtaşı. *İkincil kuvars-kalsit damarları görülmektedir. *13.50-13.90m; orta derecede çatlaklı. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Brown-dark gray, moderately-highly weathered, strong, very poor RQD (0-7%), closely-very closely, fractured claystone-mudstone. FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins are observed. *13.50m-13.90m; medium fractured zone.*(continued)*					28	0	0			
13	C-2	12.00 13.50							66	0	0			
14	C-3								66	16	7			
15	C-4	15.00							56	0	0			
16	C-5	15.80 16.50							78	0	0			
17	C-6			16.5m		5.4m			86	10	10			
18	C-7	18.00							93	8	8			
19		19.50												
20	C-8								86	0	0			
21	C-9	21.00							93	0	0			
22														

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		17.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			24.01.2014

Şekil A.3 : BH-01 sondaj logu, sayfa 2.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 3 / 4

SONDAJ BOREHOLE	BH-01
SONDÖR DRILLER	K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:	MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:
SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.50	BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 17.01.2014 / 24.01.2014
SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.86	KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:
YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 5.20	KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vein/Mame su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
23	C-10	22.50						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%22), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *16.70-16.90, 18.00-18.20, 22.50-23.00, 28.50-28.90m sağlam zon olarak görülmektedir. *22.50-23.00 m arasında kuvars damarı yoğundur. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0-22%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone mudstone. FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones. *16.7m-16.9m, 18.0m-18.2m, 22.5m-23.0m, 28.5m-28.9m; medium fractured, very strong zone. *22.5m-23.0m; more quartz veins are observed.*(continued)*								
24		24.00											60	22	22			
25	C-11												93	5	0			
26		25.50																
27	C-12												93	0	0			
28		27.00																
29	C-13												80	0	0			
30		28.50																
31	C-14												93	16	16			
32		30.00																
33	C-15												66	0	0			
		31.50																
	C-16												20	8	8			

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		17.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			24.01.2014

Şekil A.4 : BH-01 sondaj logu, sayfa 3.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 4 / 4

SONDAJ BOREHOLE: BH-01

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.50

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 17.01.2014 / 24.01.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.86

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 5.20

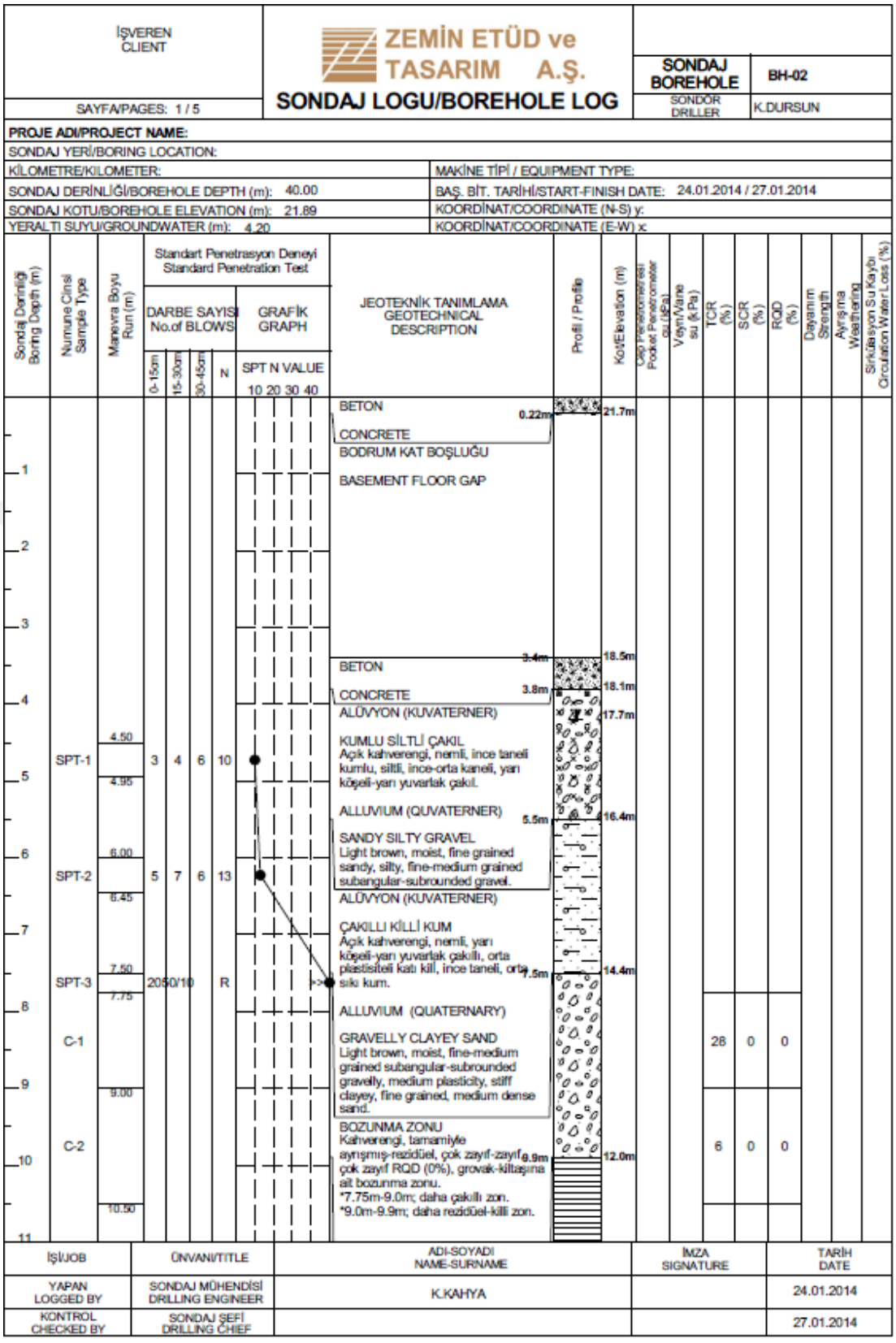
KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi/ Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Vane su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
34	C-17	33.00 – 34.50		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%22), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *16.70-16.90, 18.00-18.20, 22.50-23.00, 28.50-28.90m sağlam zon olarak görülmektedir. *22.50-23.00 m arasında kuvars damarı yoğundur. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0-22%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone mudstone. FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones. *16.7m-16.9m, 18.0m-18.2m, 22.5m-23.0m, 28.5m-28.9m; medium fractured, very strong zone. *22.5m-23.0m; more quartz veins are observed.*(continued)*				80	0	0			
35	C-18	34.50 – 36.00							83	0	0			
36														
37	C-19	36.00 – 37.50							40	0	0			
38	C-20	37.50 – 39.00							73	0	0			
39														
40	C-21	39.00 – 40.50							23	0	0			
		40.50		40.5m		18.6m								

KUYU SONU/BOREHOLE DEPTH (m): 40.50

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		17.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			24.01.2014

Şekil A.5 : BH-01 sondaj logu, sayfa 4.



Şekil A.6 : BH-02 sondaj logu, sayfa 1.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ BOREHOLE: BH-02

SAYFA/PAGES: 2 / 5

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 24.01.2014 / 27.01.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.89

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

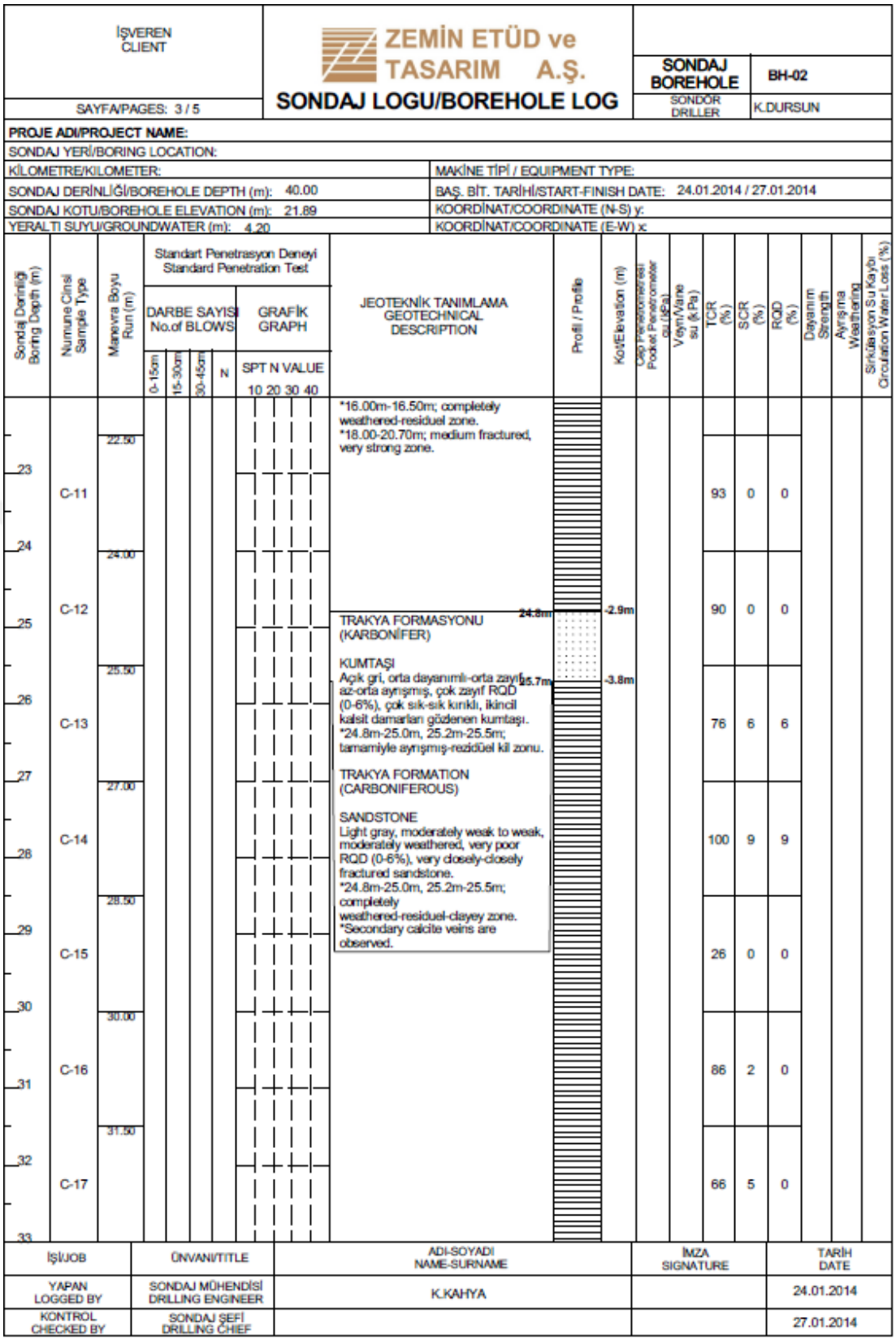
YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

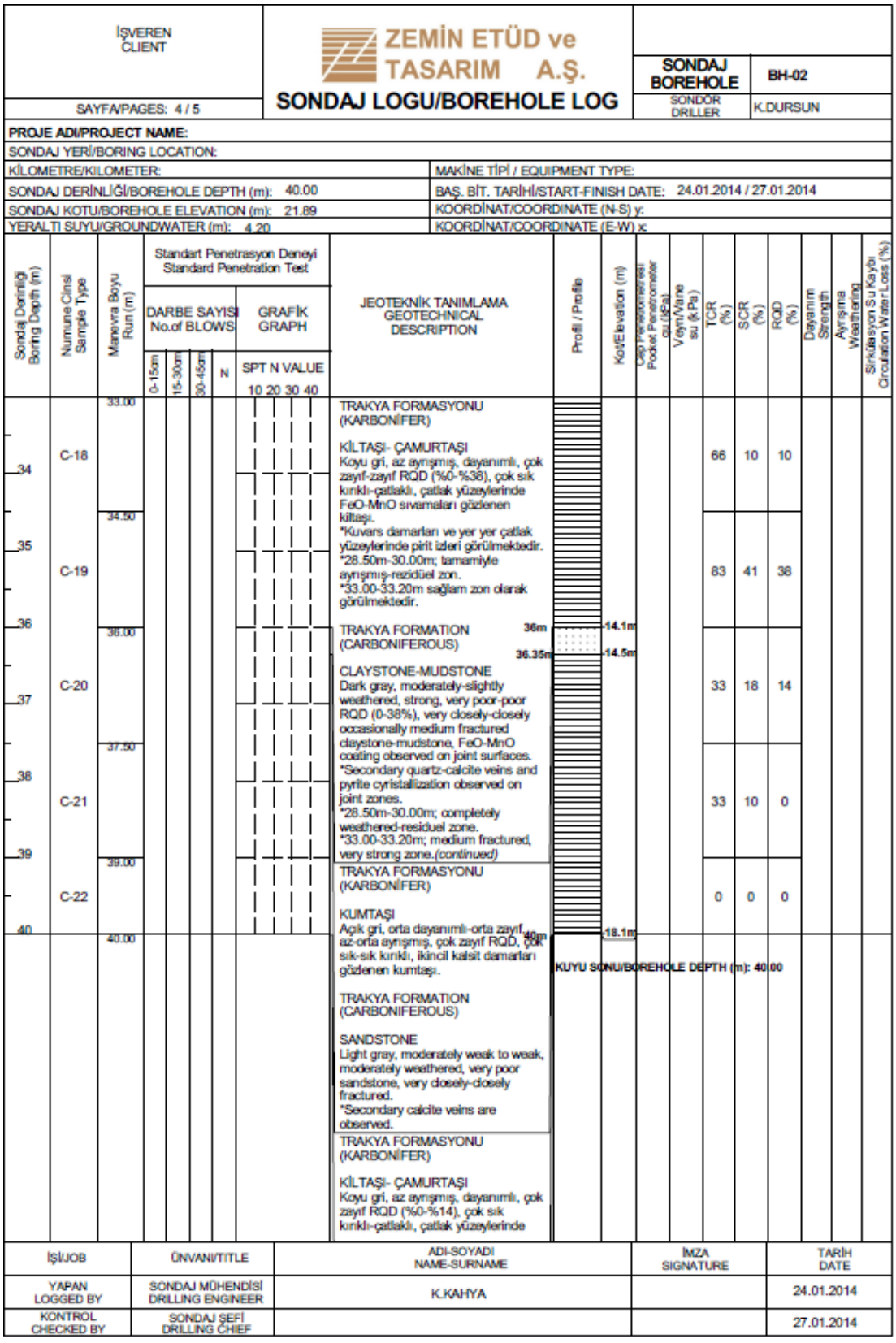
Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
12	C-3	12.00						WEATHERING ZONE Brown, completely weathered-residuel, very poor RQD (0%), weathering zone of grayvacke-claystone. *7.75m-9.0m; more gravelly zone. *9.0m-9.9m; more residuel-clayey zone.					100	10	10			
13	C-4	13.50						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI-ÇAMURTAŞI Kahverengi-koyu gri, orta derecede ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%7), sık-çok sık kırıklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen, kiltaşı-çamurtaşı. *İkincil kuvars-kalsit damarları görülmektedir. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS)					100	4	0			
14	C-5												90	7	0			
15		15.00																
16	C-6							CLAYSTONE-MUDSTONE Brown-dark gray, moderately-highly weathered, strong, very poor RQD (0-7%), closely-very closely, fractured claystone mudstone. 16m FeO-MnO coating observed on joint surfaces claystone-mudstone. *Secondary quartz-calcite veins are observed.*(continued)*		5.9m			60	0	0			
17	C-7	16.50						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%22), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *16.00m-16.50m; tamamiyle ayrışmış-rezidüel zon. *18.00-20.70m sağlam zon olarak görülmektedir.					66	0	0			
18		18.00																
19	C-8												93	80	22			
20		19.50																
21	C-9							TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0-22%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone mudstone. FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones.					100	20	13			
22	C-10	21.00											53	4	0			

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		24.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			27.01.2014

Şekil A.7 : BH-02 sondaj logu, sayfa 2.



Şekil A.8 : BH-02 sondaj logu, sayfa 3.



İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ BOREHOLE: BH-02

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

SAYFA/PAGES: 4 / 5

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 24.01.2014 / 27.01.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.89

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
34	C-18	33.00 – 34.50		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf-zayıf RQD (%0-%38), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *28.50m-30.00m; tamamiyle ayrışmış-rezidüel zon. *33.00-33.20m sağlam zon olarak görülmektedir.					66	10	10			
35	C-19	34.50 – 36.00							83	41	38			
36				TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) 36m CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor-poor RQD (0-38%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone, FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization observed on joint zones. *28.50m-30.00m; completely weathered-residuel zone. *33.00-33.20m; medium fractured, very strong zone.*(continued)*		14.1m								
37	C-20	36.00 – 37.50				14.5m			33	18	14			
38	C-21	37.50 – 39.00							33	10	0			
39				TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KUMTAŞI Açık gri, orta dayanımlı-orta zayıf, az-orta ayrışmış, çok zayıf RQD, çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları gözlenen kumtaşı. 40m TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) SANDSTONE Light gray, moderately weak to weak, moderately weathered, very poor sandstone, very closely-closely fractured. *Secondary calcite veins are observed.										
40	C-22	39.00 – 40.00				18.1m			0	0	0			
				KUYU SONU/BOREHOLE DEPTH (m): 40.00										

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		24.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			27.01.2014

Şekil A.9 : BH-02 sondaj logu, sayfa 4.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 5 / 5

SONDAJ BOREHOLE	BH-02
SONDÖR DRILLER	K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 40.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 24.01.2014 / 27.01.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 21.89

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
								FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (%0-%14), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone. FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones.									

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		24.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			27.01.2014

Şekil A.10 : BH-02 sondaj logu, sayfa 5.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 1 / 5

SONDAJ BOREHOLE: BH-03

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 41.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 29.01.2014 / 05.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.21

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

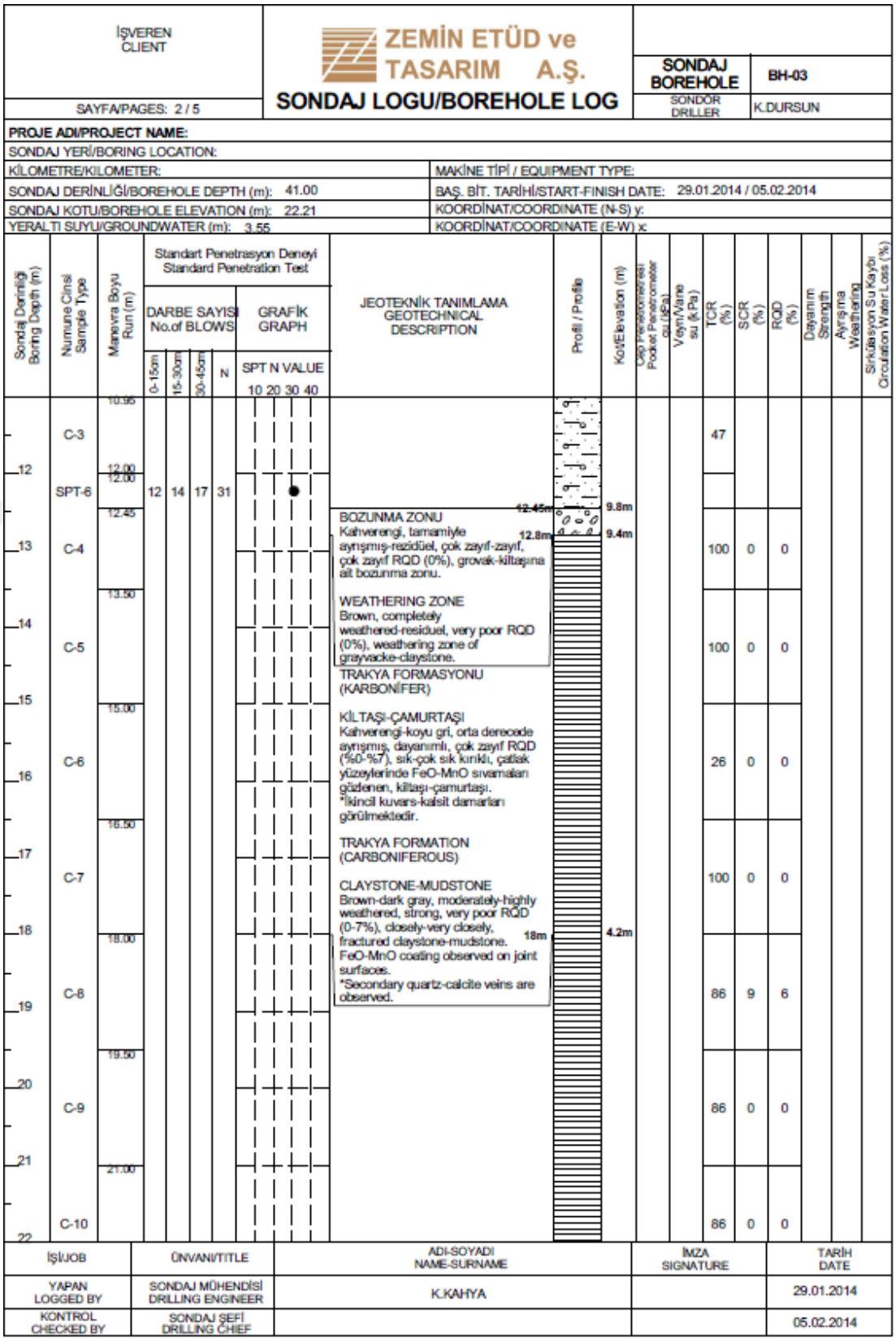
YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 3.55

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

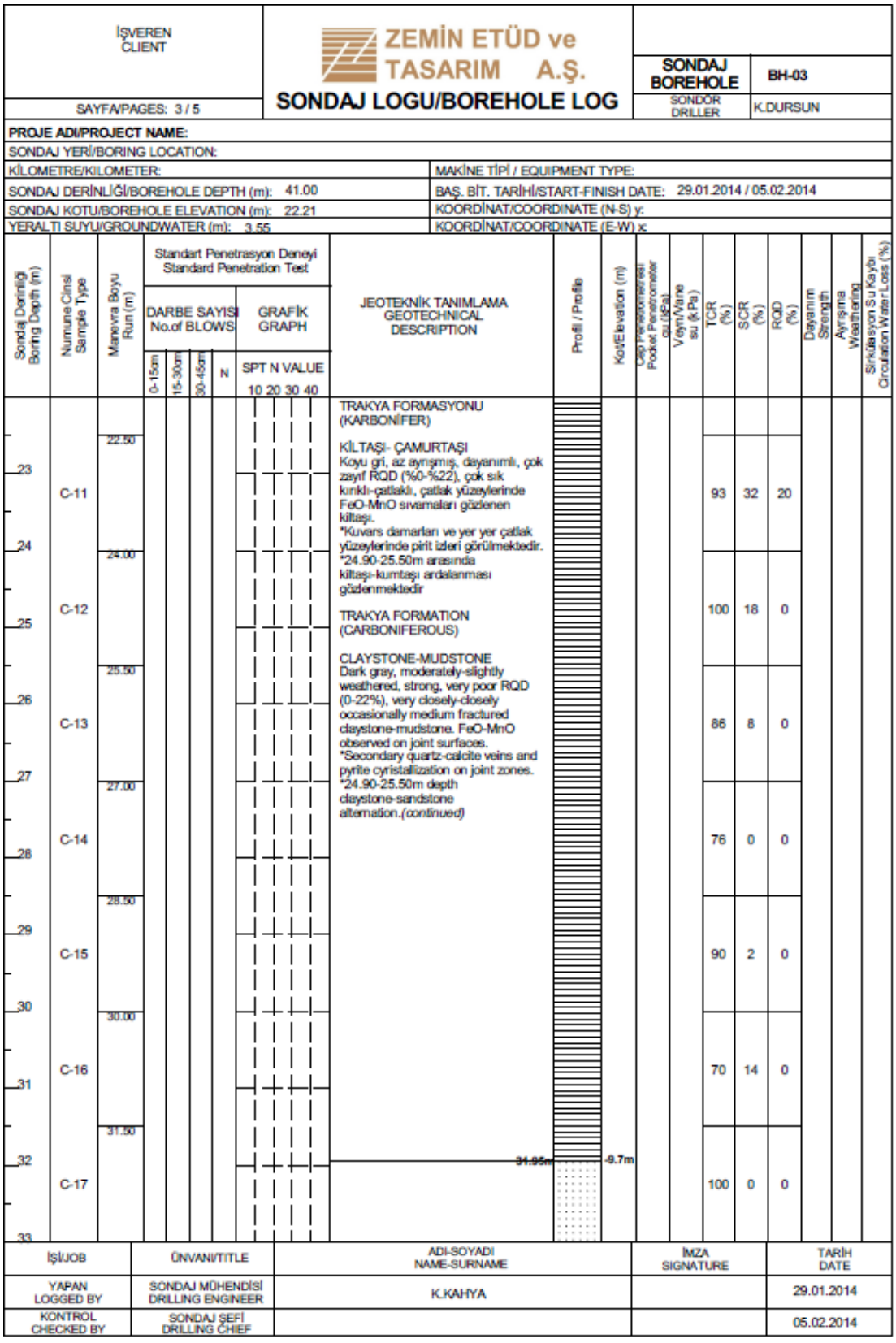
Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
0								BETON		22.0m								
								0.25m										
								CONCRETE										
								BODRUM KAT BOŞLUĞU										
1								BASEMENT FLOOR GAP										
2																		
3																		
								3.25m		19.0m								
								BETON		18.7m								
								3.55m										
4								CONCRETE										
								ALÜVYON (KUVATERNER)										
		4.50																
	SPT-1	4.95	9	17	23	40		KİLLİ SİLTLİ ÇAKIL Açık kahverengi, nemli, killi, siltli, ince-orta taneli, yarı köşeli-yarı yuvarlak çakıl.										
5								ALLUVIUM (QUATERNARY)										
								CLAYEY SILTY GRAVEL Light brown, moist, clayey, silty, fine-medium grained subangular-subrounded gravel.										
		6.00																
6	SPT-2	6.45	2	3	5	8												
	UD-1																	
		7.00																
7	C-1	7.50						7m		15.2m								
	SPT-3	7.95	3	5	6	11		ALÜVYON (KUVATERNER) ÇAKILLI KİLLİ KUM Açık kahverengi, nemli, yarı köşeli-yarı yuvarlak çakıllı, orta plastisiteli katı kil, ince taneli, orta sıkı kum.					30					
8	C-2							ALLUVIUM (QUATERNARY)					47					
		9.00																
9	SPT-4	9.45	7	8	11	19		GRAVELLY CLAYEY SAND Light brown, moist, fine-medium grained subangular-subrounded gravelly, medium plasticity, stiff clayey, fine grained, medium dense sand.										
		9.70																
10	UD-2	10.10																
		10.50																
11	SPT-5		7	9	13	22												

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		29.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			05.02.2014

Şekil A.11 : BH-03 sondaj logu, sayfa 1.



Şekil A.12 : BH-03 sondaj logu, sayfa 2.



İŞVEREN / CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ / BOREHOLE: BH-03

SONDÖR / DRILLER: K.DURSUN

SAYFA/PAGES: 3 / 5

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 41.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 29.01.2014 / 05.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.21

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

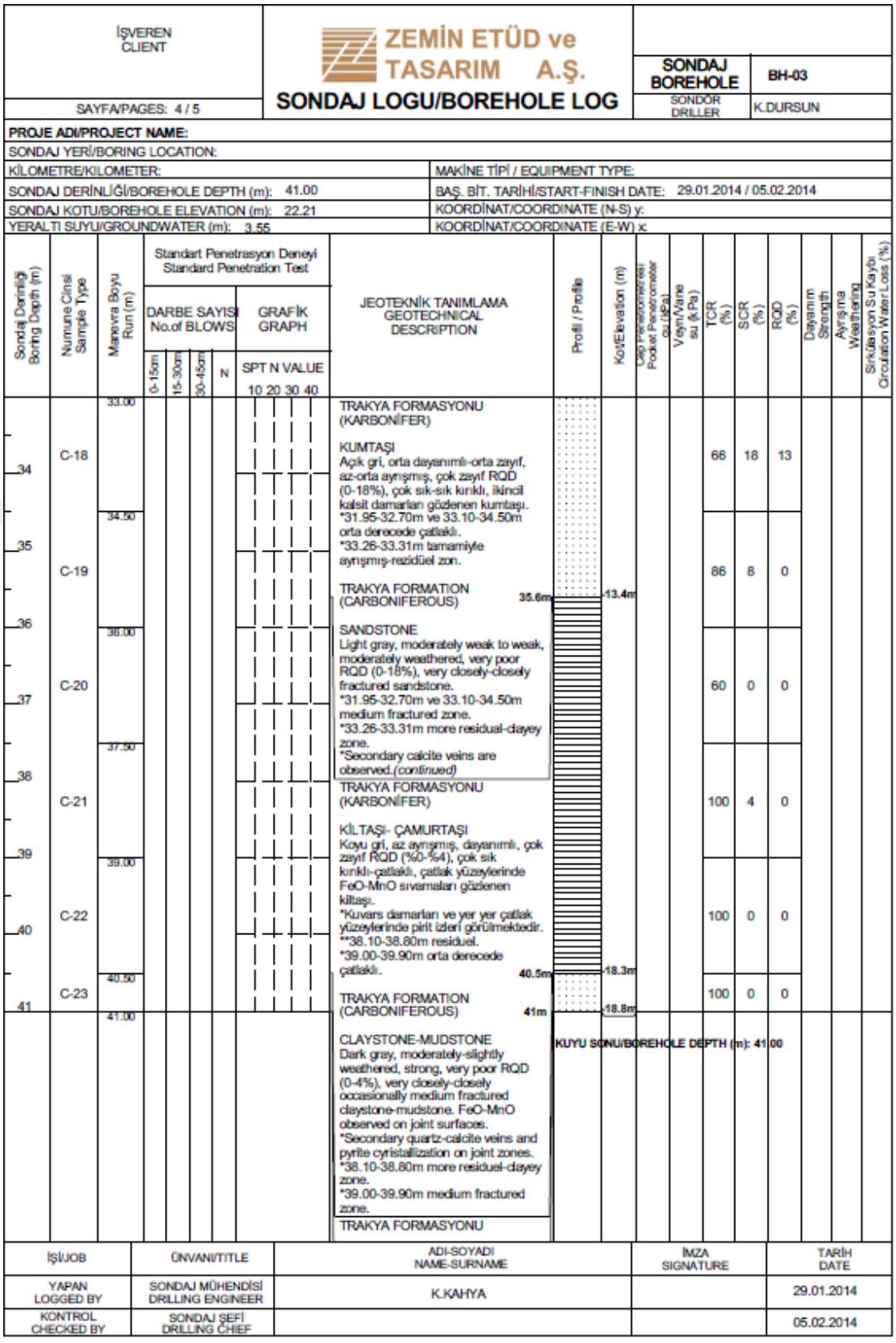
YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 3.55

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
23	C-11	22.50		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%22), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *24.90-25.50m arasında kiltaşı-kumtaşı ardalanması gözlenmektedir TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0-22%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone. FeO-MnO observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones. *24.90-25.50m depth claystone-sandstone alternation.*(continued)*					93	32	20			
24	C-12	24.00							100	18	0			
25	C-13	25.50							86	8	0			
26	C-14	27.00							76	0	0			
27	C-15	28.50							90	2	0			
28	C-16	30.00							70	14	0			
29	C-17	31.50		31.95m		-9.7m			100	0	0			
30														
31														
32														
33														

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		29.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			05.02.2014

Şekil A.13 : BH-03 sondaj logu, sayfa 3.



Şekil A.14 : BH-03 sondaj logu, sayfa 4.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 5 / 5

SONDAJ BOREHOLE	BH-03
SONDÖR DRILLER	K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 41.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 29.01.2014 / 05.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.21

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

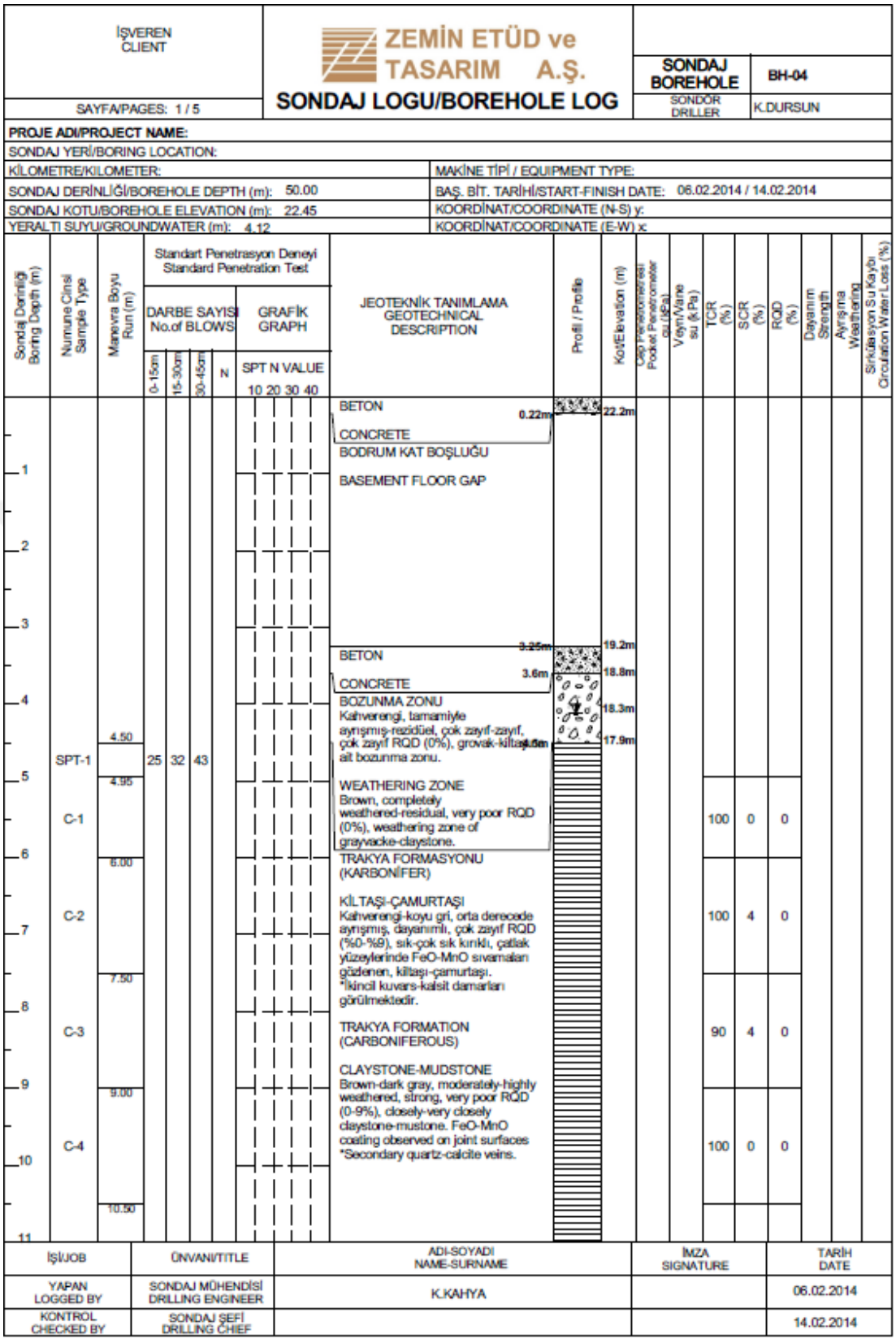
YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 3.55

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

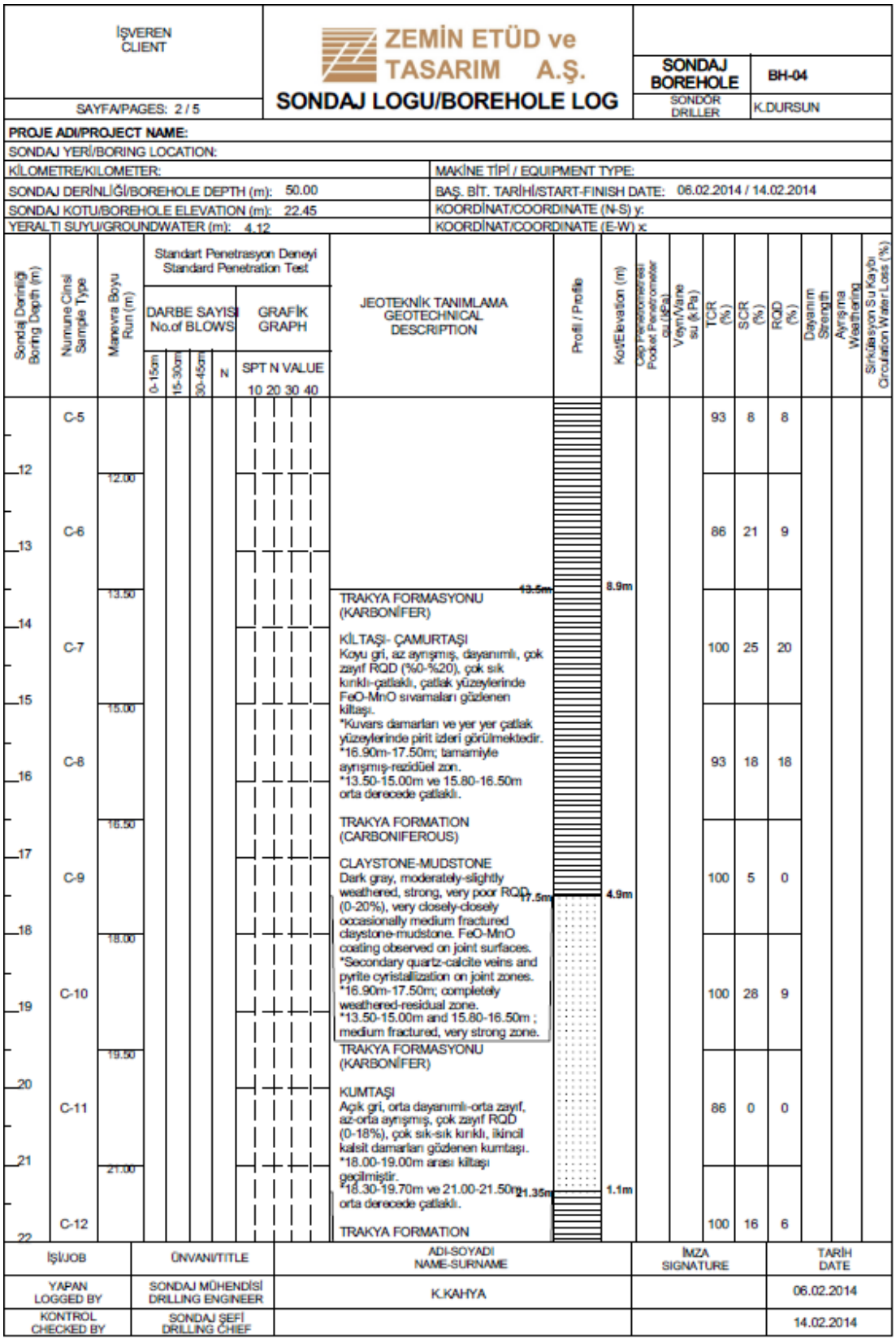
Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi/ Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
								(KARBONİFER) KUMTAŞI Açık gri, orta dayanımlı-orta zayıf, az-orta ayrışmış, çok zayıf RQD (0%), çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları gözlenen kumtaşı. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) SANDSTONE Light gray, moderately weak to weak, moderately weathered, very poor RQD (0%), very closely-closely fractured sandstone. *Secondary calcite veins are onserved.										

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		29.01.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			05.02.2014

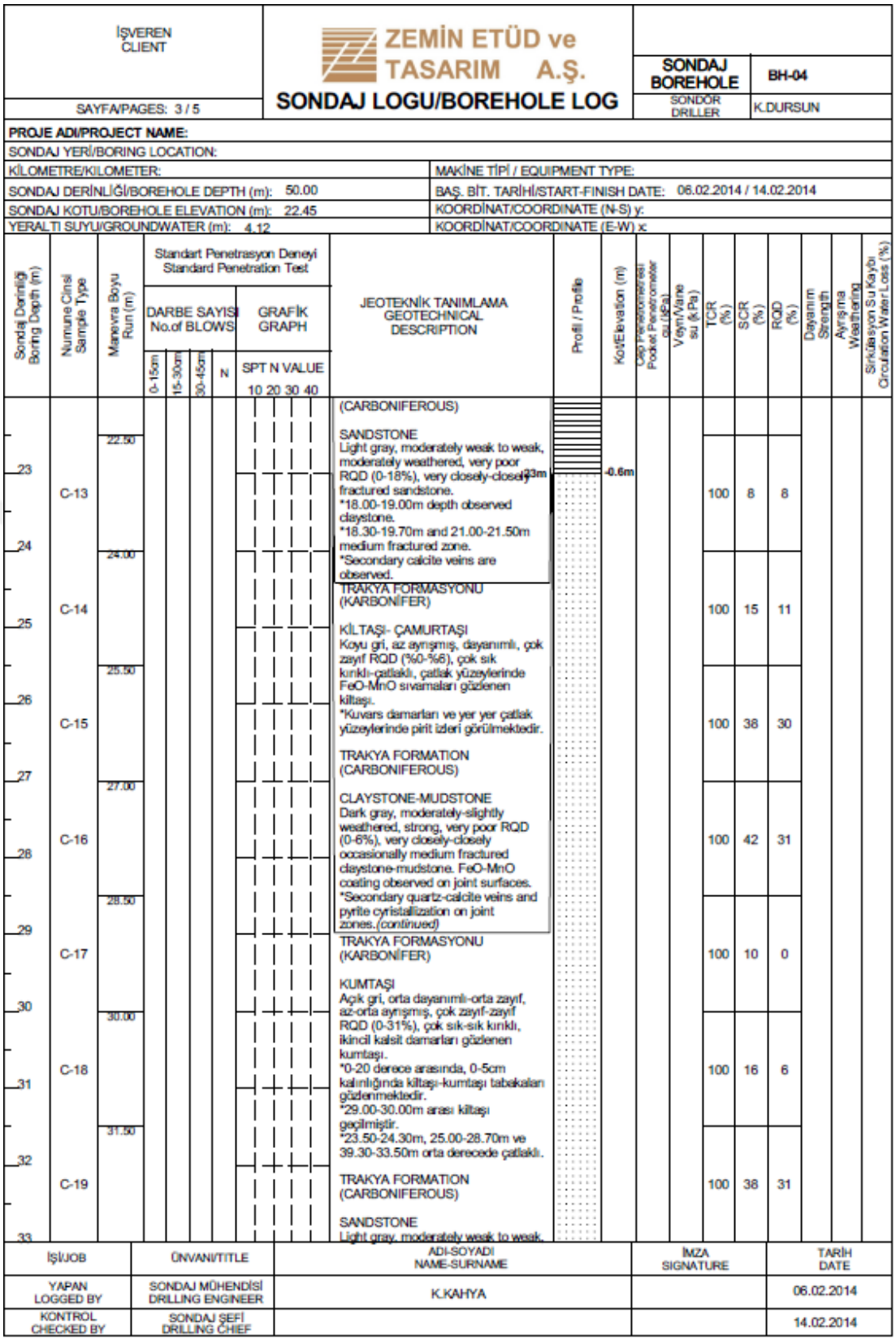
Şekil A.15 : BH-03 sondaj logu, sayfa 5.



Şekil A.16 : BH-04 sondaj logu, sayfa 1.



Şekil A.17 : BH-04 sondaj logu, sayfa 2.



Şekil A.18 : BH-04 sondaj logu, sayfa 3.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ BOREHOLE: BH-04

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

SAYFA/PAGES: 4 / 5

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 50.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 06.02.2014 / 14.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.45

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.12

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi/ Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
34	C-20	33.00–34.50		moderately weathered, very poor-poor RQD (0-31%), very closely-closely fractured sandstone 33.5m *29.00-30.00m depth observed claystone. *23.50-24.30m, 25.00-28.70m and 39.30-33.50m medium fractured zone. *Secondary calcite veins are observed.		11.1m			100	21	21			
35	C-21	34.50–36.00		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI- ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%0-%24), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *0-20 derece arasında, 0-5cm kalınlığında kiltaşı-kumtaşı tabekaları gözlenmektedir. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. *35.50-36.60m sağlam zon olarak görülmektedir.					100	37	24			
36	C-22	36.00–37.50							100	26	18			
37	C-23	37.50–39.00							100	0	0			
38	C-24	39.00–40.50		TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0-24%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone. FeO-MnO coating onserved on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones. *35.50-36.60m; medium fractured, very strong zone.					53	0	0			
39	C-25	40.50–42.00							53	0	0			
40	C-26	42.00–43.50							93	19	12			
41				43.2m		20.8m								
42														
43														
44														

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		06.02.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			14.02.2014

Şekil A.19 : BH-04 sondaj logu, sayfa 4.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 5 / 5

SONDAJ BOREHOLE BH-04

SONDÖR DRILLER K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 50.00

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 06.02.2014 / 14.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.45

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.12

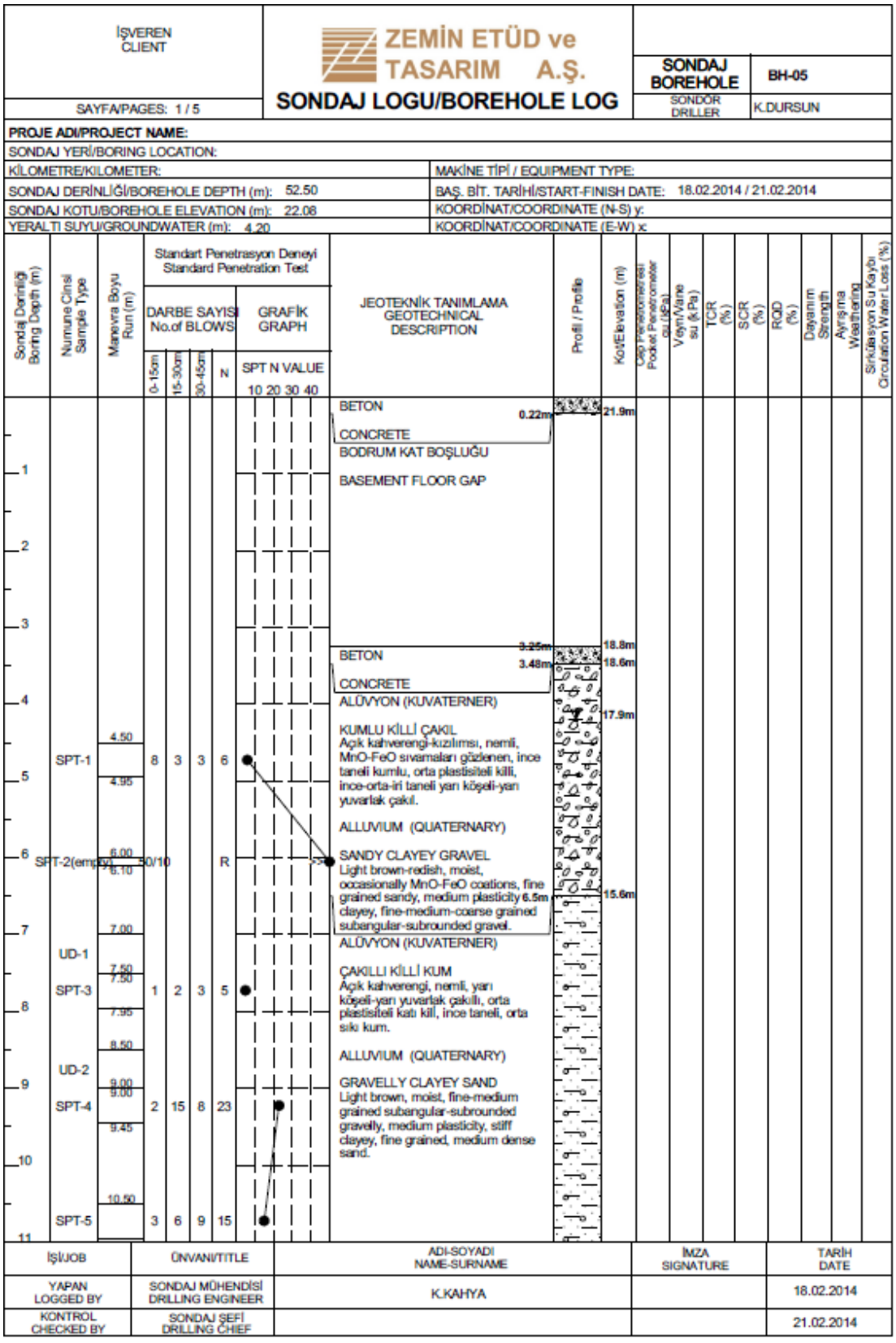
KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer su (kPa)	Vişm/Marne su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
45	C-27	45.00		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KUMTAŞI Açık gri, orta dayanımlı-orta zayıf, az-orta ayrışmış, çok zayıf RQD (0-12%), çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları gözlenen kumtaşı. *42.60-45.00m ve 47.10-47.50m orta derecede çatlaklı. *46.50-47.60m tamamiyle ayrışmış-rezidüel zon.					40	8	8			
46	C-28	46.50							70	0	0			
47	C-29	48.00		TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) SANDSTONE Light gray, moderately weak to weak, moderately weathered, very poor RQD (0-12%), very closely-closely fractured sandstone. *42.60-45.00m and 47.10-47.50m medium fractured zone. *46.50-47.60m more residual-dayey zone. *Secondary calcite veins are observed.*(continued)*					86	8	8			
48														
49														
50				50m		27.6m								

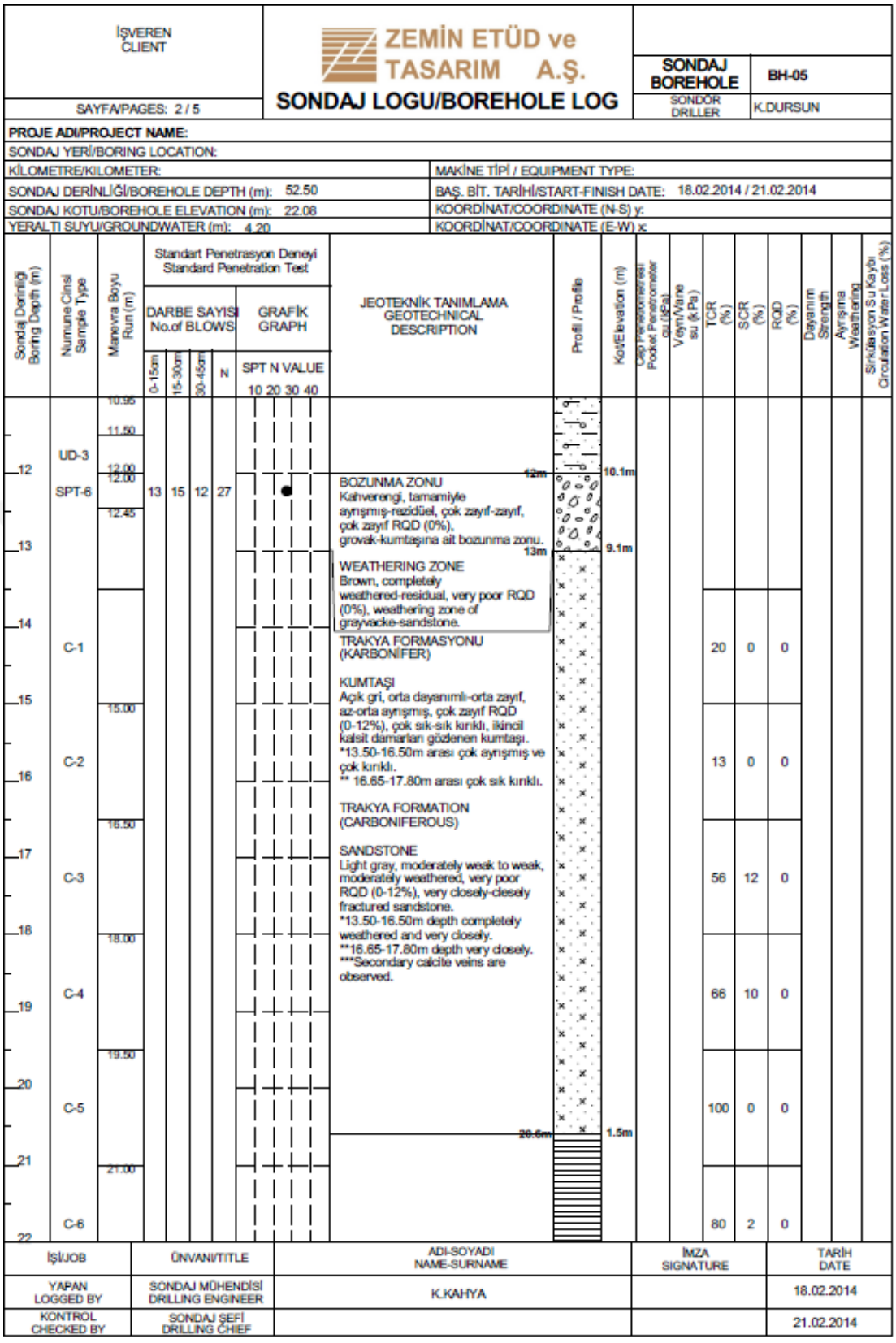
KUYU SONU/BOREHOLE DEPTH (m): 50.00

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		06.02.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			14.02.2014

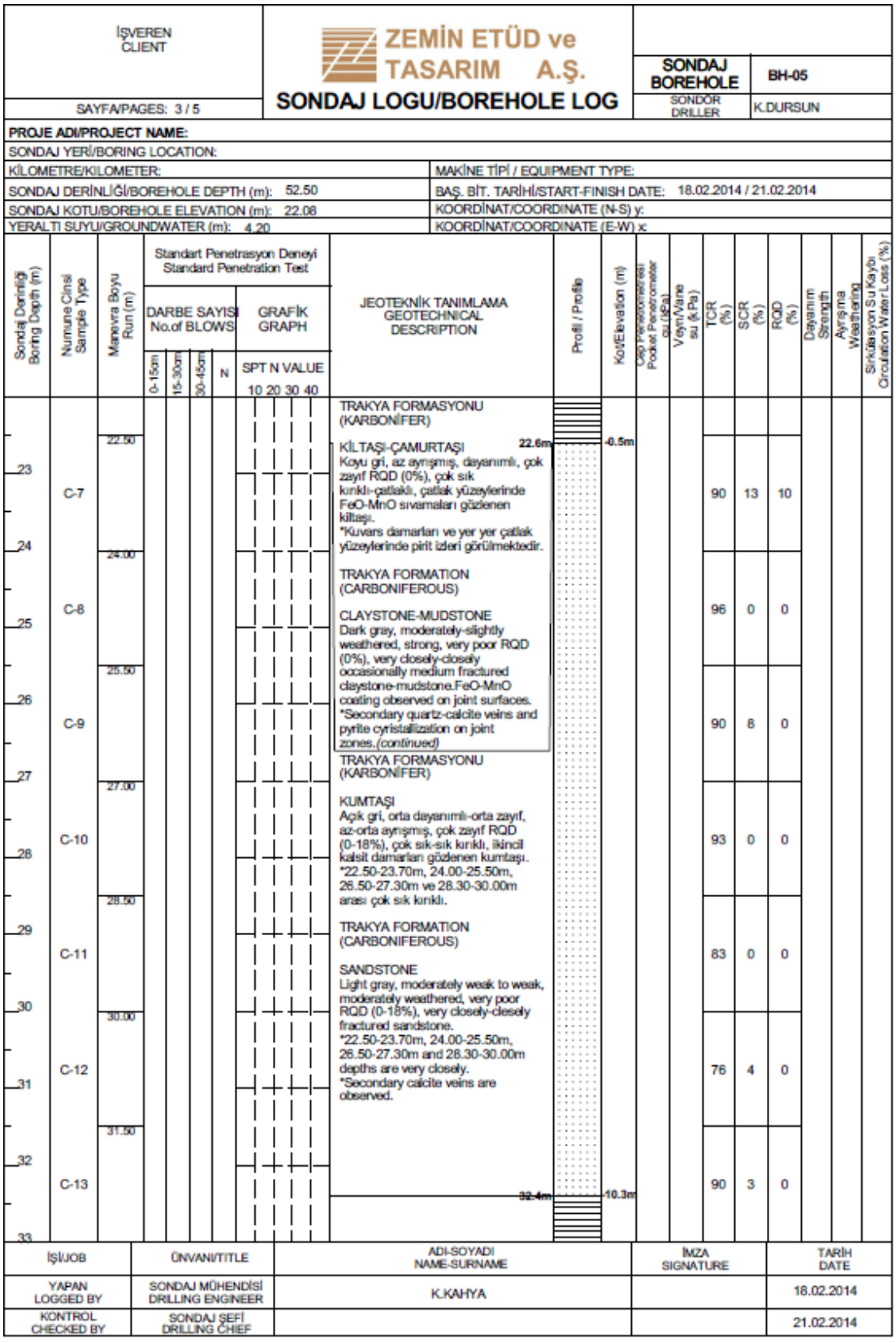
Şekil A.20 : BH-04 sondaj logu, sayfa 5.



Şekil A.21 : BH-05 sondaj logu, sayfa 1.



Şekil A.22 : BH-05 sondaj logu, sayfa 2.



İŞVEREN / CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ / BOREHOLE: BH-05

SONDÖR / DRILLER: K.DURSUN

SAYFA/PAGES: 3 / 5

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 52.50

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 18.02.2014 / 21.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.08

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm / 15-30cm / 30-45cm / N; GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi Pocket Penetrometer qu (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
23	C-7	22.50 – 24.00		TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI-ÇAMURTAŞI (22.6m) Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (0%), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (0%), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone.FeO-MnO coating observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones.*(continued)*		-0.5m			90	13	10			
24	C-8	24.00 – 25.50							96	0	0			
25														
26	C-9	25.50 – 27.00							90	8	0			
27				TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KUMTAŞI Açık gri, orta dayanımlı-orta zayıf, az-orta ayrışmış, çok zayıf RQD (0-18%), çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları gözlenen kumtaşı. *22.50-23.70m, 24.00-25.50m, 26.50-27.30m ve 28.30-30.00m arası çok sık kırıklı. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) SANDSTONE Light gray, moderately weak to weak, moderately weathered, very poor RQD (0-18%), very closely-closely fractured sandstone. *22.50-23.70m, 24.00-25.50m, 26.50-27.30m and 28.30-30.00m depths are very closely. *Secondary calcite veins are observed.									
28	C-10	27.00 – 28.50							93	0	0			
29														
30	C-11	28.50 – 30.00							83	0	0			
31	C-12	30.00 – 31.50							76	4	0			
32														
33	C-13	31.50 –		(32.4m)		-10.3m			90	3	0			

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		18.02.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			21.02.2014

Şekil A.23 : BH-05 sondaj logu, sayfa 3.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SONDAJ BOREHOLE: BH-05

SAYFA/PAGES: 4 / 5

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 52.50

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 18.02.2014 / 21.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.08

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi/ Pocket Penetrometer su (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
34	C-14	33.00						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI-ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%3-%38), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (%3-%38), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone. FeO-MnO observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones.*(continued)*					100	7	7			
35	C-15	34.50											100	3	0			
36	C-16	36.00											100	7	0			
37	C-17	37.50											100	16	10			
38	C-18	39.00											100	38	12			
39	C-19	40.50											100	8	0			
40	C-20	42.00											100	3	0			
41		43.50																
42																		
43																		
44																		

İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		18.02.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			21.02.2014

Şekil A.24 : BH-05 sondaj logu, sayfa 4.

İŞVEREN
CLIENT

ZEMİN ETÜD ve TASARIM A.Ş.

SONDAJ LOGU/BOREHOLE LOG

SAYFA/PAGES: 5 / 5

SONDAJ BOREHOLE: BH-05

SONDÖR DRILLER: K.DURSUN

PROJE ADI/PROJECT NAME:

SONDAJ YERİ/BORING LOCATION:

KİLOMETRE/KILOMETER:

MAKİNE TİPİ / EQUIPMENT TYPE:

SONDAJ DERİNLİĞİ/BOREHOLE DEPTH (m): 52.50

BAŞ. BİT. TARİHİ/START-FINISH DATE: 18.02.2014 / 21.02.2014

SONDAJ KOTU/BOREHOLE ELEVATION (m): 22.08

KOORDİNAT/COORDINATE (N-S) y:

YERALTI SUYU/GROUNDWATER (m): 4.20

KOORDİNAT/COORDINATE (E-W) x:

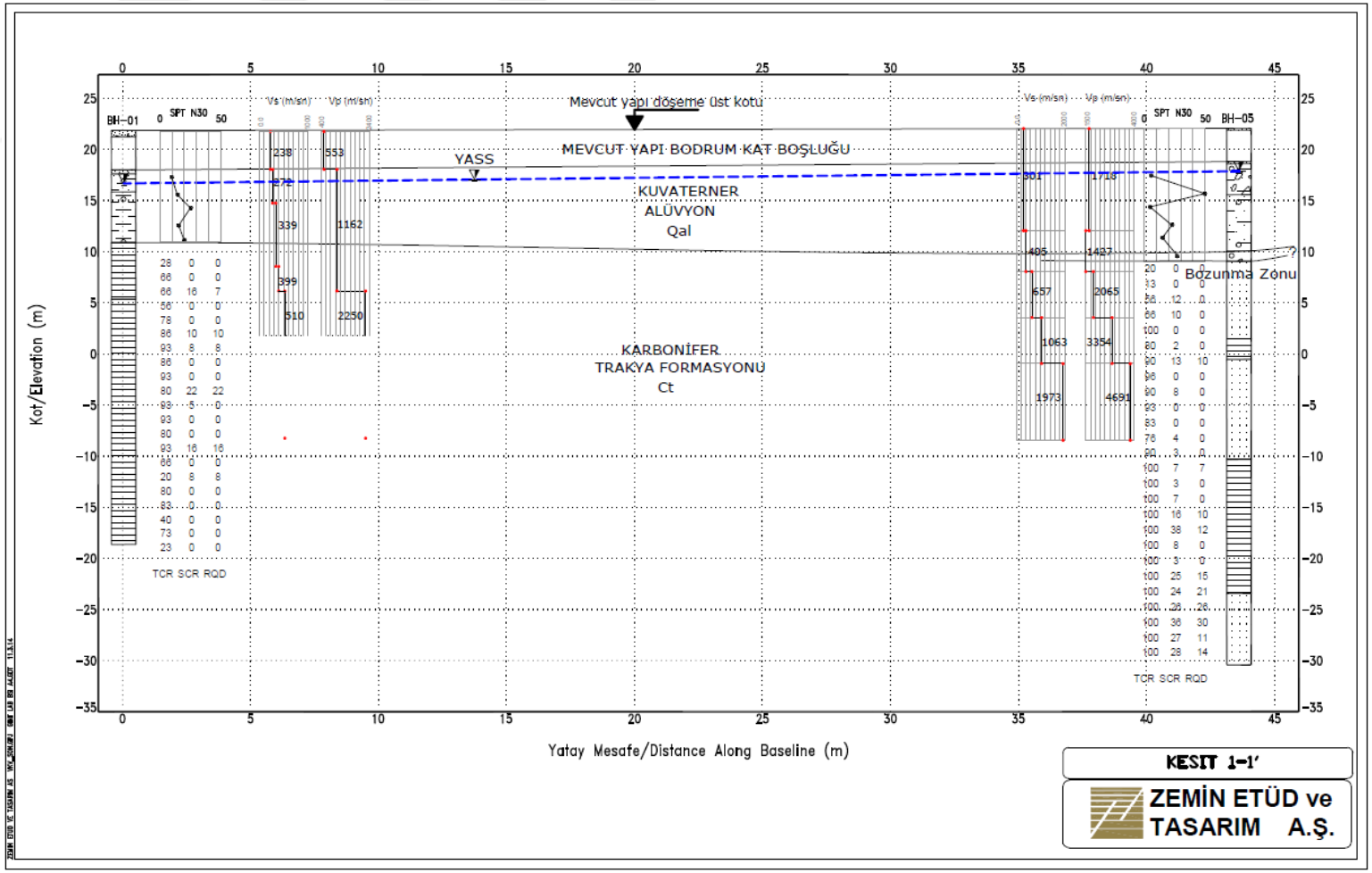
Sondaj Derinliği Boring Depth (m)	Numune Cinsi Sample Type	Manevra Boyu Run (m)	Standart Penetrasyon Deneyi Standard Penetration Test: DARBE SAYISI No.of BLOWS 0-15cm	15-30cm	30-45cm	N	GRAFİK GRAPH SPT N VALUE 10 20 30 40	JEOTEKNİK TANIMLAMA GEOTECHNICAL DESCRIPTION	Profil / Profile	Kot/Elevation (m)	Cep Penetrometresi/ Pocket Penetrometer qu (kPa)	Vane/Kanat su (kPa)	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Dayanım Strength	Ayrışma Weathering	Sirkülasyon Su Kaybı Circulation Water Loss (%)
45	C-21	45.00						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KİLTAŞI-ÇAMURTAŞI Koyu gri, az ayrışmış, dayanımlı, çok zayıf RQD (%3-%38), çok sık kırıklı-çatlaklı, çatlak yüzeylerinde FeO-MnO sıvamaları gözlenen kiltaşı. 45.5m *Kuvars damarları ve yer yer çatlak yüzeylerinde pirit izleri görülmektedir. TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) CLAYSTONE-MUDSTONE Dark gray, moderately-slightly weathered, strong, very poor RQD (%3-%38), very closely-closely occasionally medium fractured claystone-mudstone. FeO-MnO observed on joint surfaces. *Secondary quartz-calcite veins and pyrite cyristallization on joint zones.*(continued)*		-23.4m			100	25	15			
46	C-22	46.50											100	24	21			
47	C-23	48.00											100	26	26			
48	C-24	49.50						TRAKYA FORMASYONU (KARBONİFER) KUMTAŞI Açık gri, orta dayanımlı-orta zayıf, az-orta ayrışmış, çok zayıf-zayıf RQD (24-36%), çok sık-sık kırıklı, ikincil kalsit damarları gözlenen kumtaşı. *0-20 derece arasında, 0-5cm kalınlığında kiltaşı-kumtaşı tabakaları özdenmektedir. *45.50-46.50m, 48.10-49.00 ve 51.50-52.50m arası orta derecede çatlaklı.					100	36	30			
49																		
50	C-25	51.00											100	27	11			
51																		
52	C-26	52.50						TRAKYA FORMATION (CARBONIFEROUS) SANDSTONE Light gray, moderately weak to weak, moderately weathered, very poor-poor RQD (24-36%), very closely-closely fractured sandstone. 52.5m *45.50-46.50m, 48.10-49.00 and 51.50-52.50m medium fractured zone. *Secondary calcite veins are observed.		-30.4m			100	28	14			

KUYU SONU/BOREHOLE DEPTH (m): 52.50

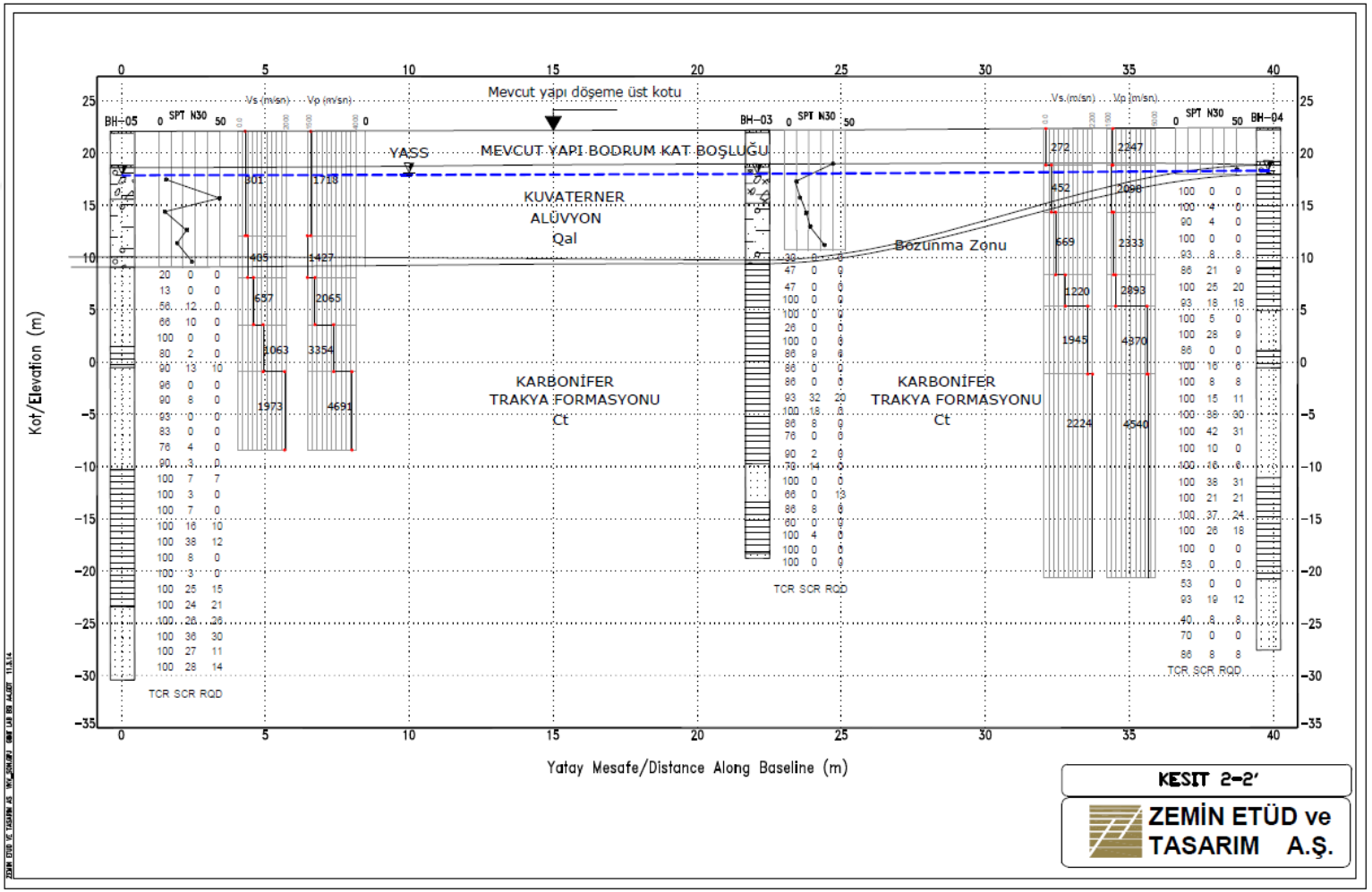
İŞ/JOB	ÜNVANI/TITLE	ADI-SOYADI NAME-SURNAME	İMZA SIGNATURE	TARİH DATE
YAPAN LOGGED BY	SONDAJ MÜHENDİSİ DRILLING ENGINEER	K.KAHYA		18.02.2014
KONTROL CHECKED BY	SONDAJ ŞEFİ DRILLING CHIEF			21.02.2014

Şekil A.25 : BH-05 sondaj logu, sayfa 5.

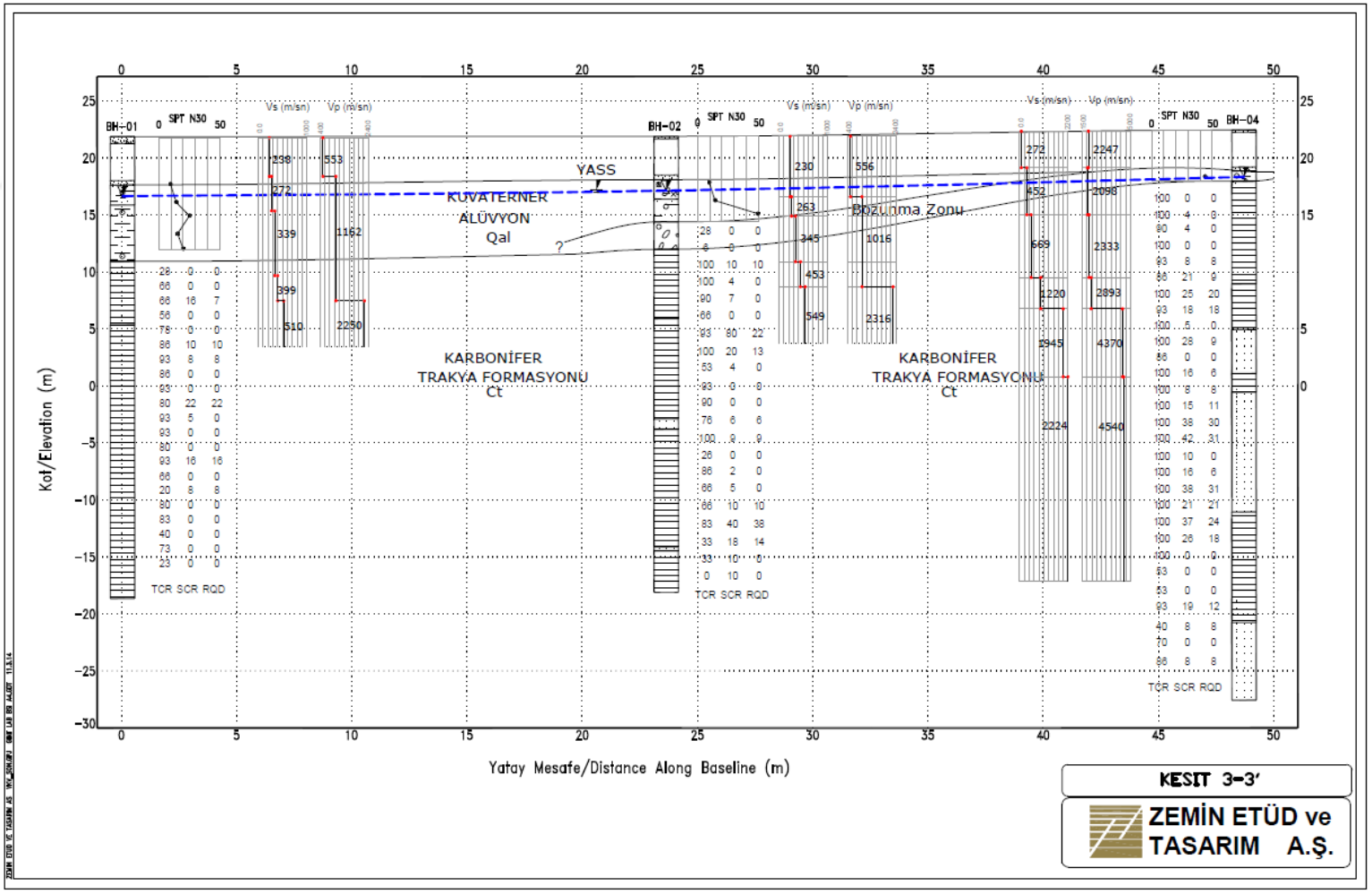
EK B



Şekil B.1 : Kesit 1-1'.



Şekil B.2 : Kesit 2-2'.



Şekil B.3 : Kesit 3-3'.

EK C



Şekil C.1 : Başlık kirişi kırımı.



Şekil C.2 : Başlık kirişi donatı imalatı.

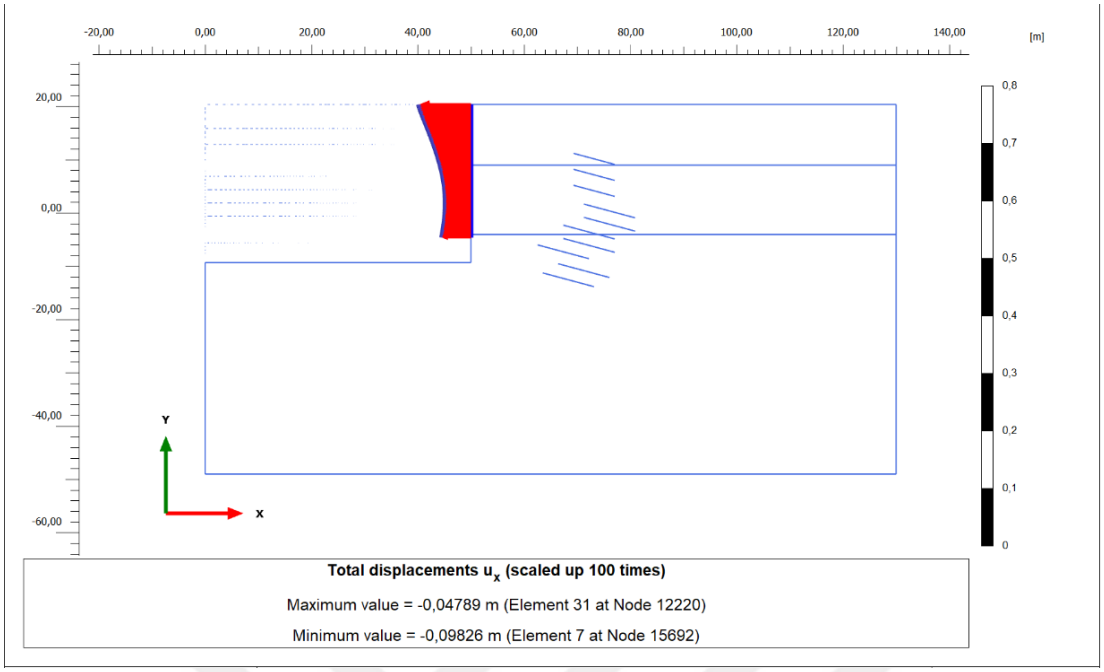


Şekil C.3 : Kazık imalatları.

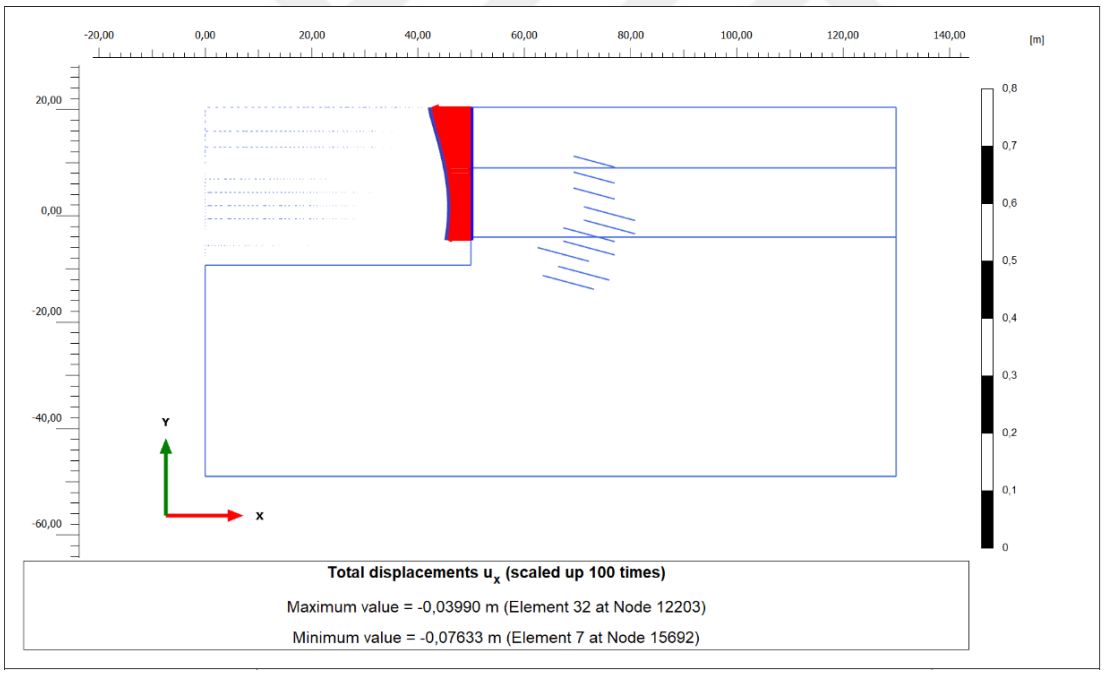


Şekil C.4 : Ankraj imalatları ve kazı.

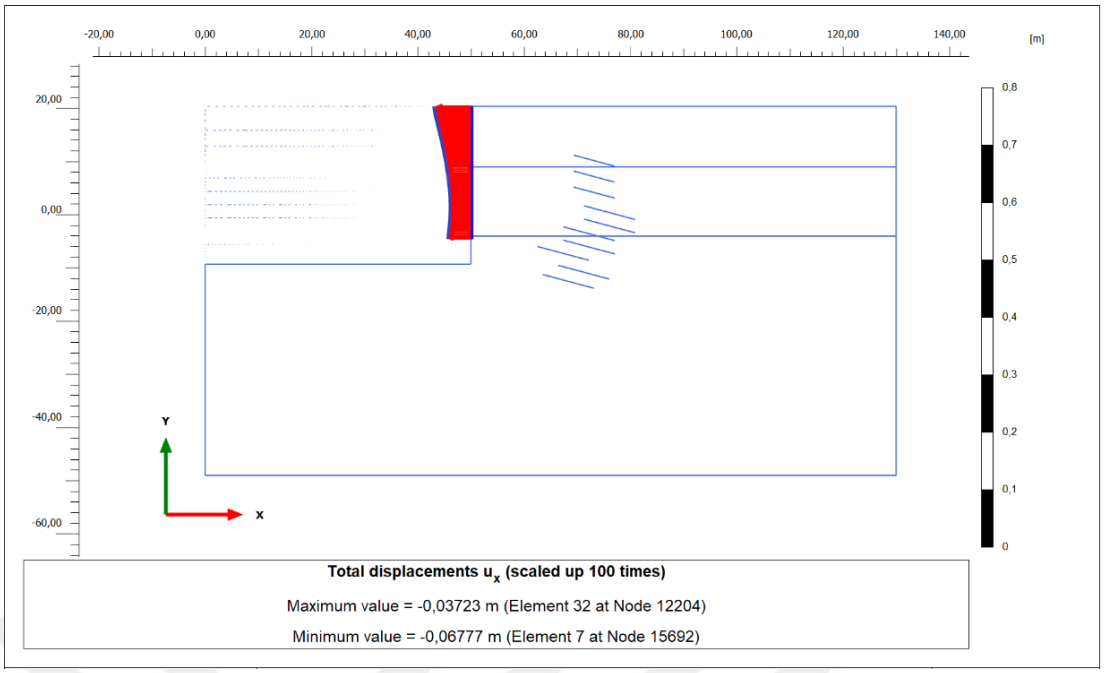
EK D



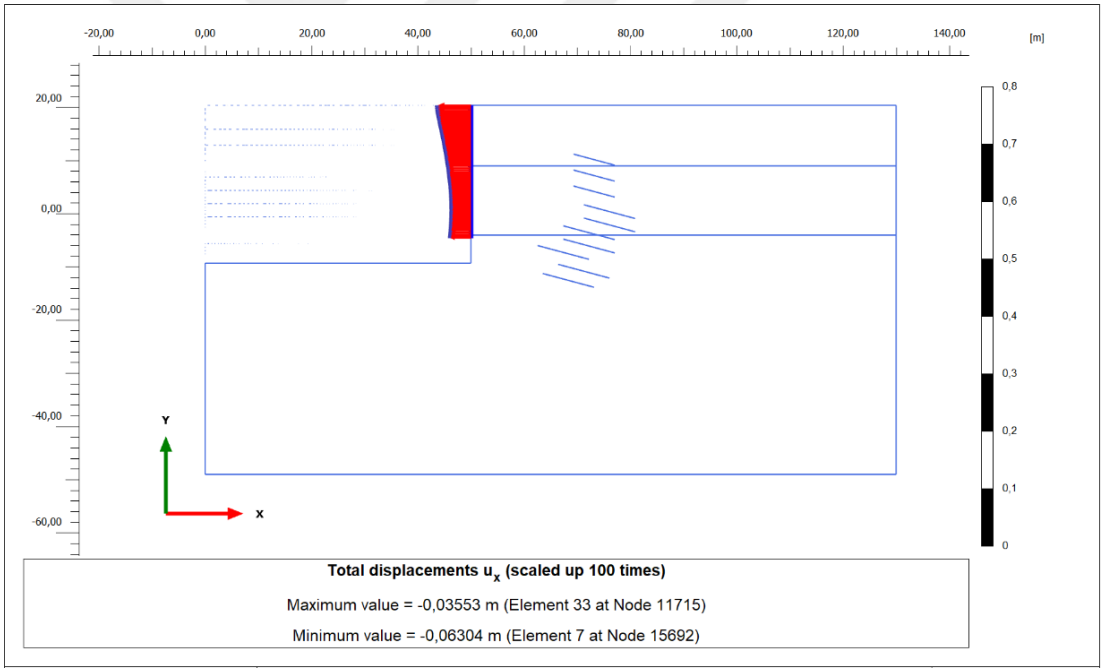
Şekil D.1 : E=50MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



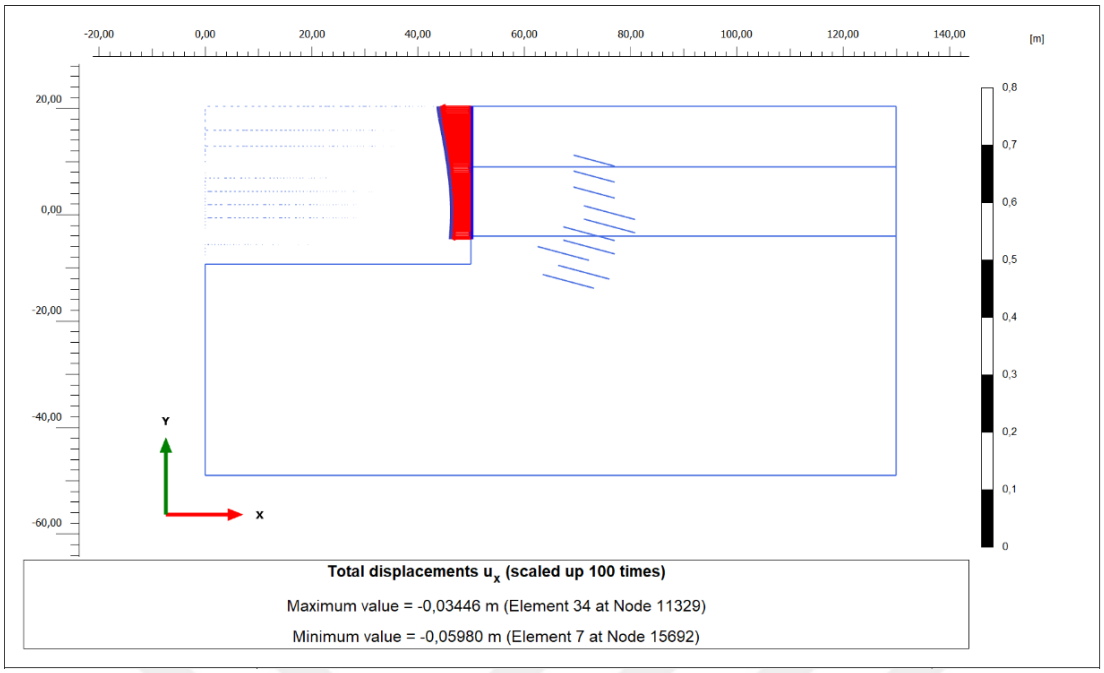
Şekil D.2 : E=100MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



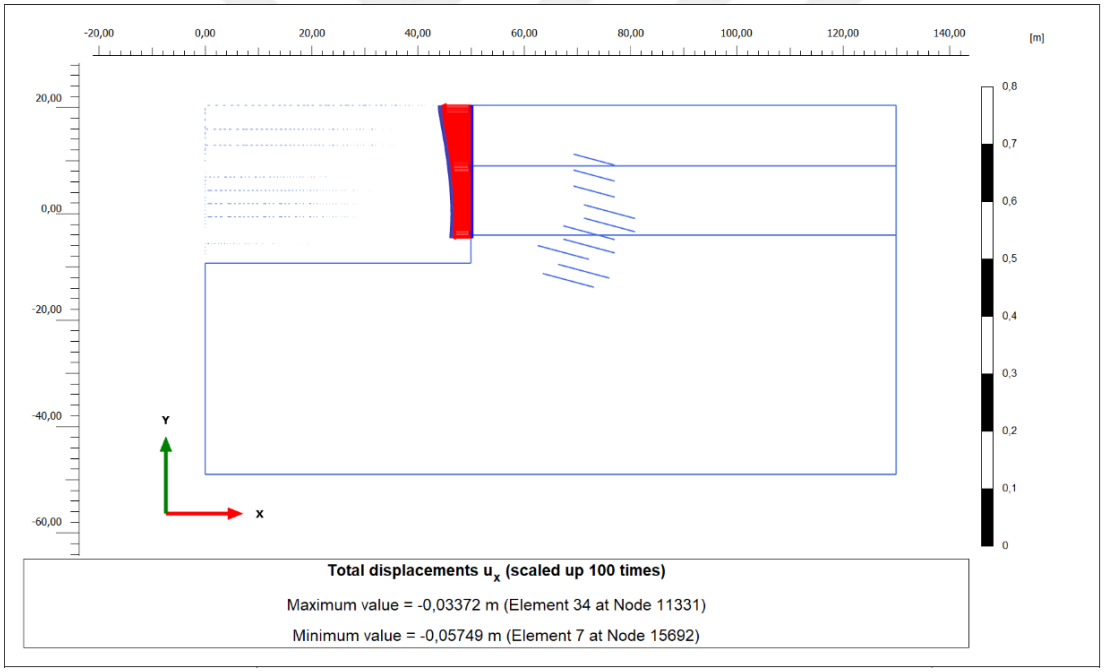
Şekil D.3 : E=150MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



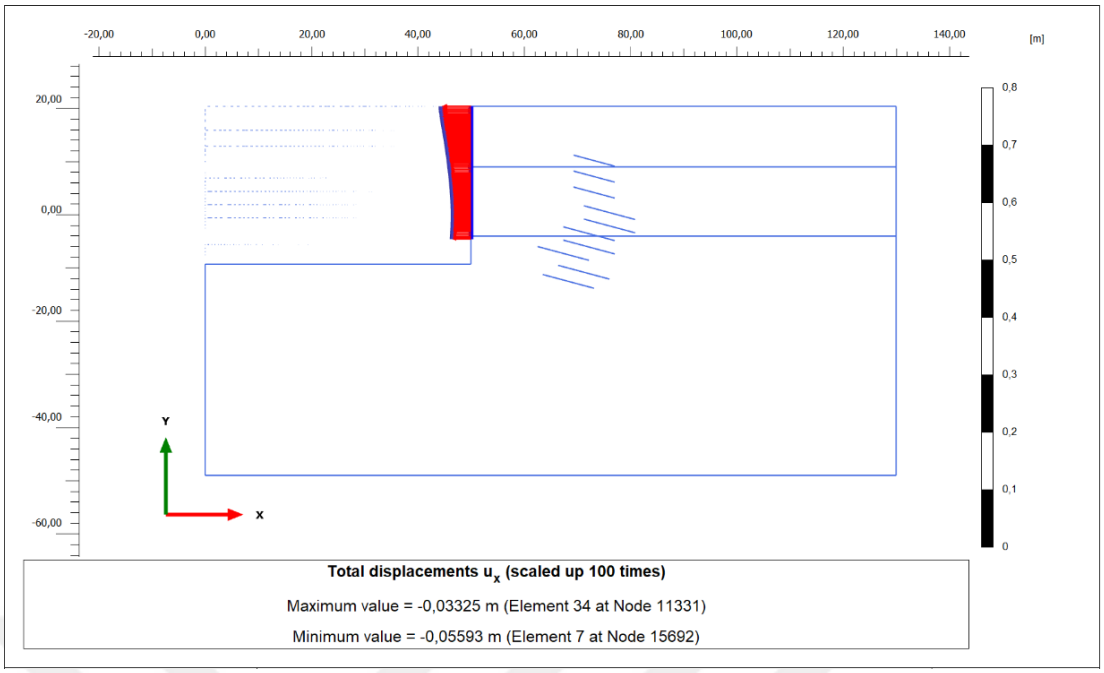
Şekil D.4 : E=200MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



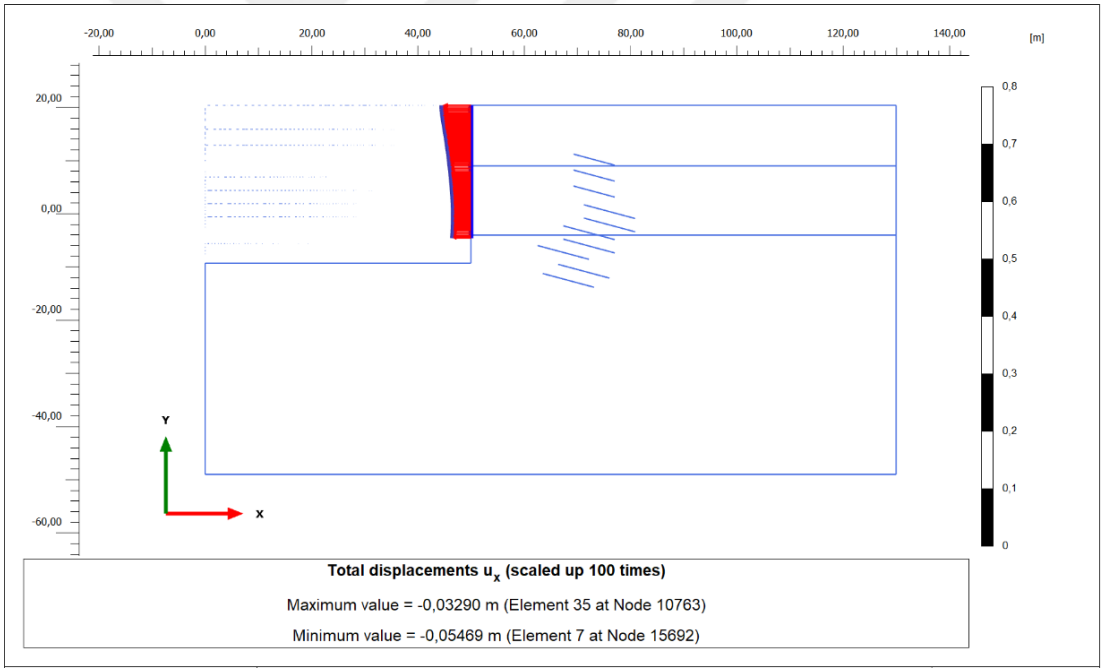
Şekil D.5 : E=250MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



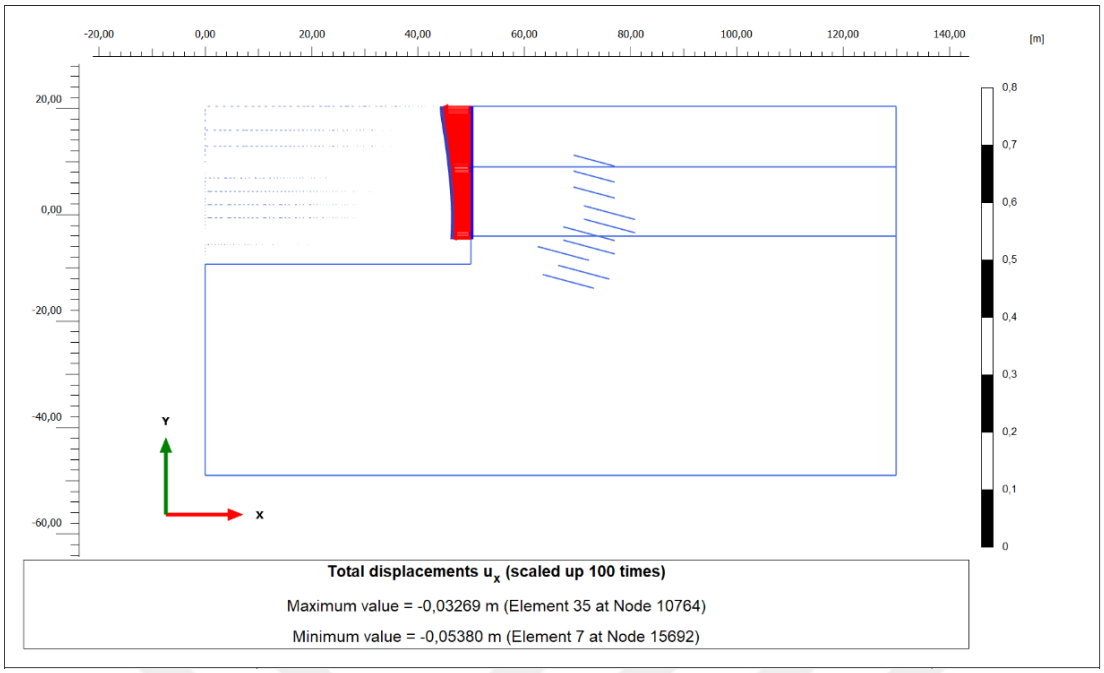
Şekil D.6 : E=300MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



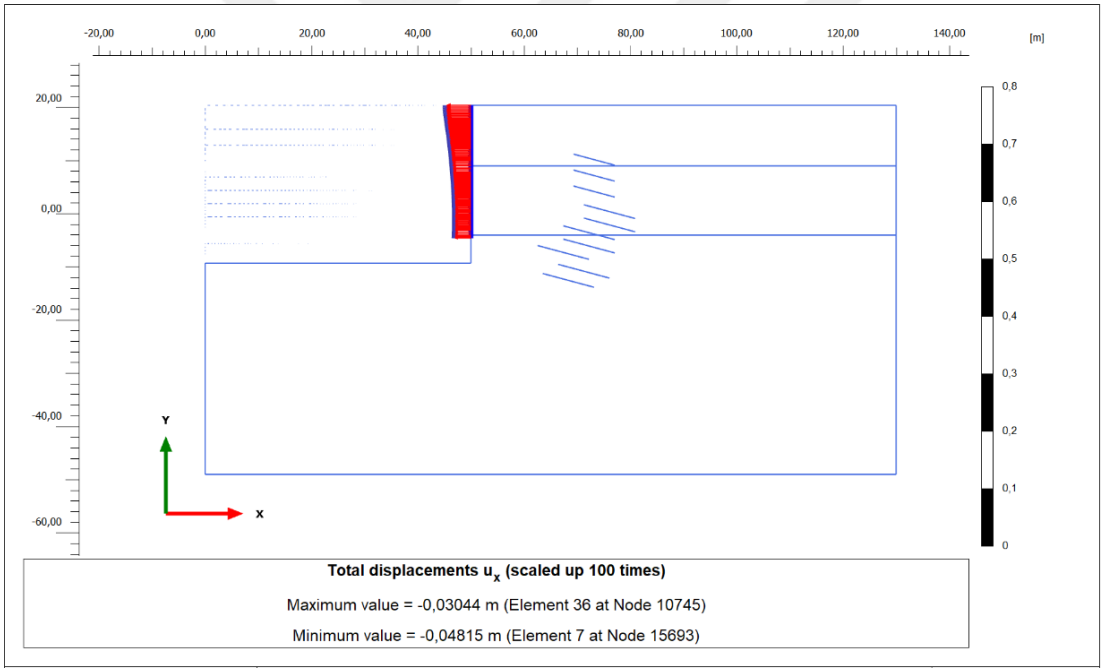
Şekil D.7 : E=350MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.



Şekil D.8 : E=400MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.

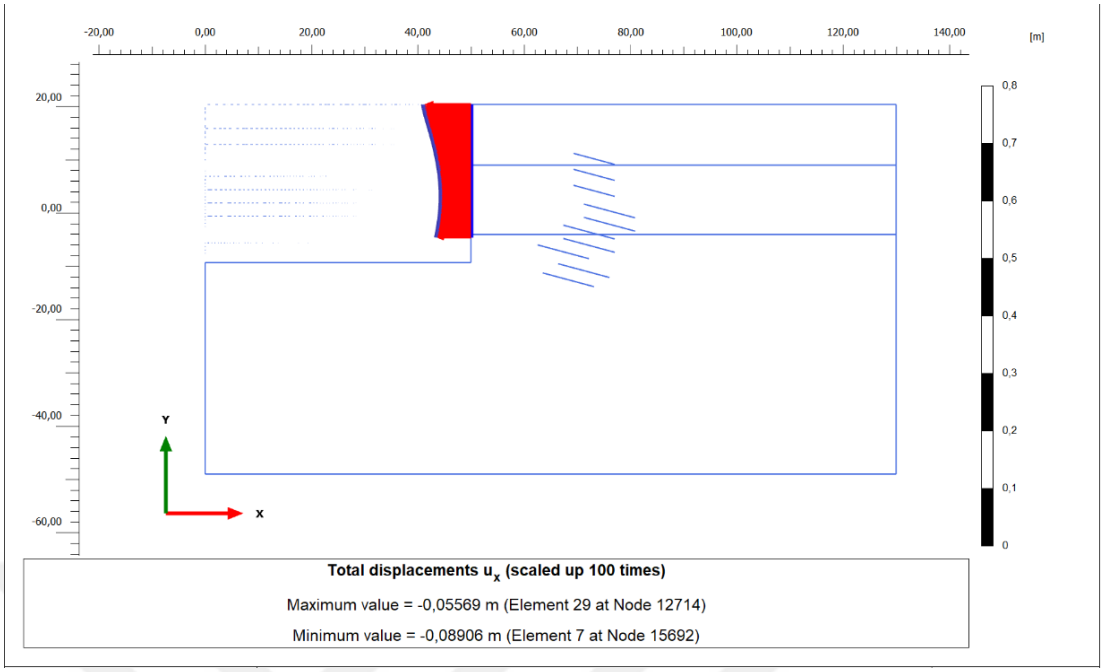


Şekil D.9 : E=450MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.

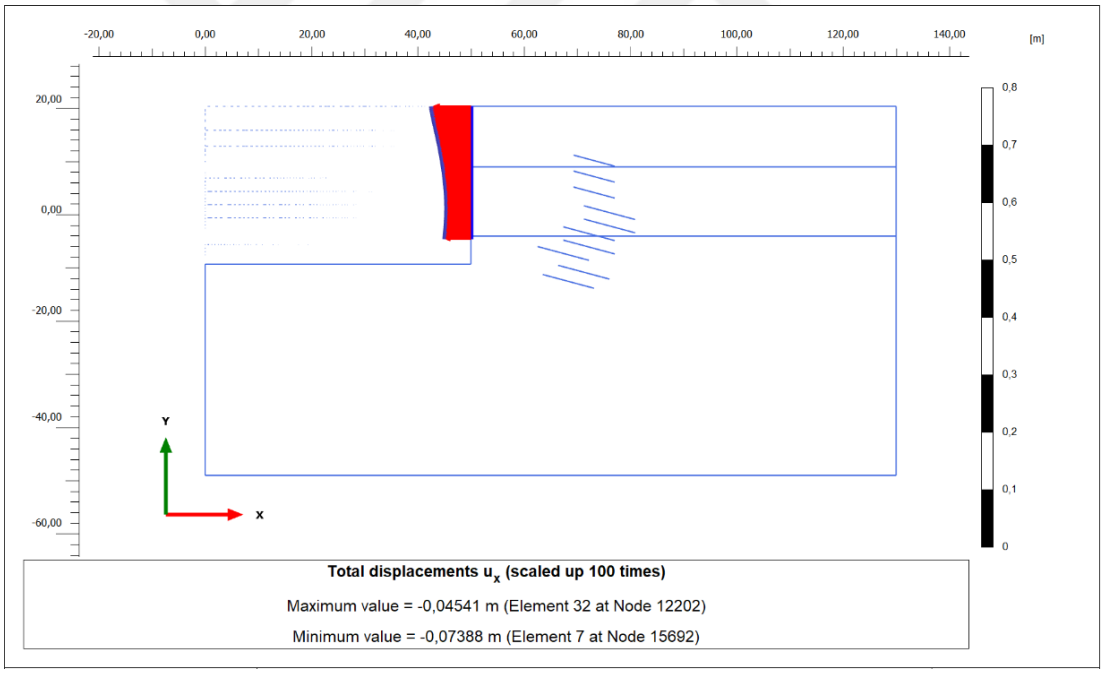


Şekil D.10 : E=500MPa için kazıktaki yanal deplasmanlar.

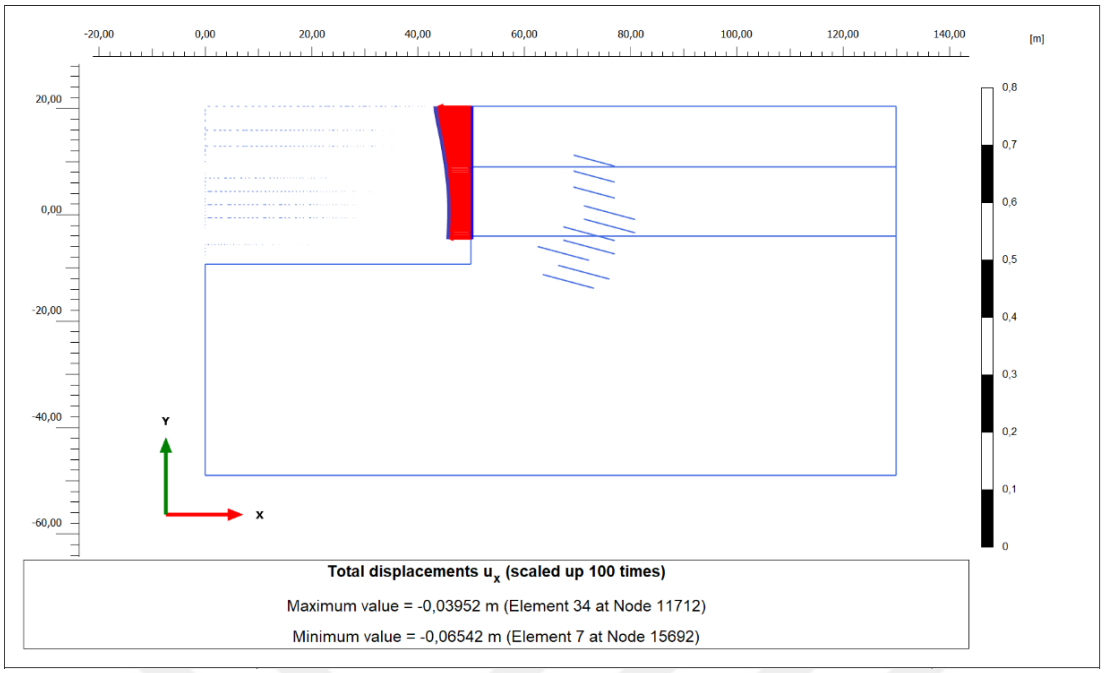
EK E



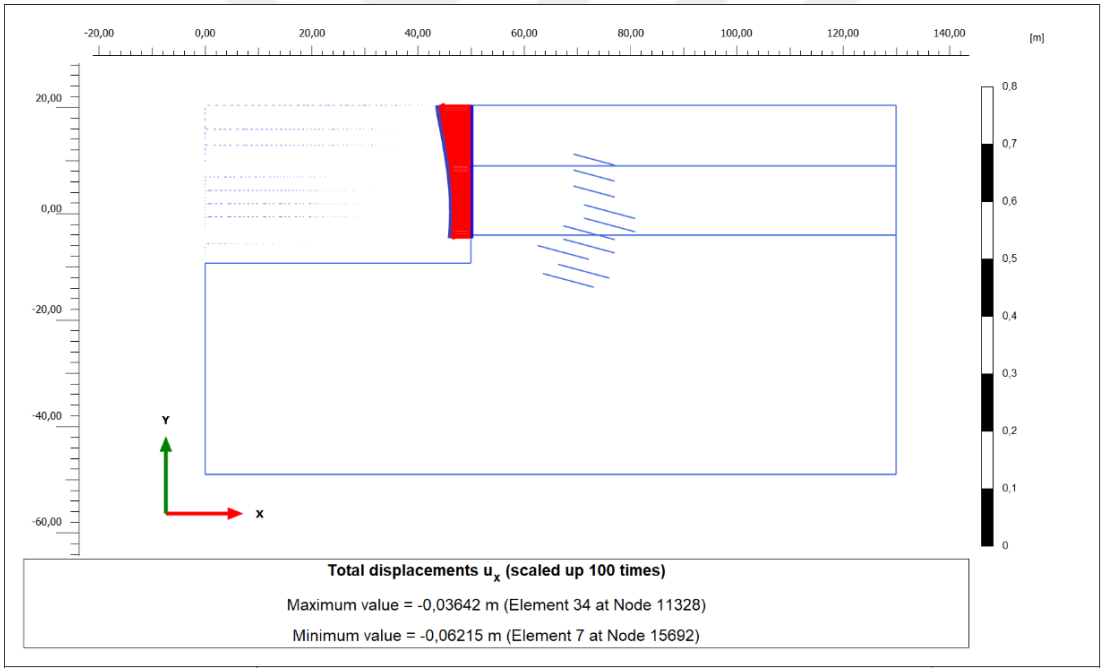
Şekil E.1 : ϕ=27° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



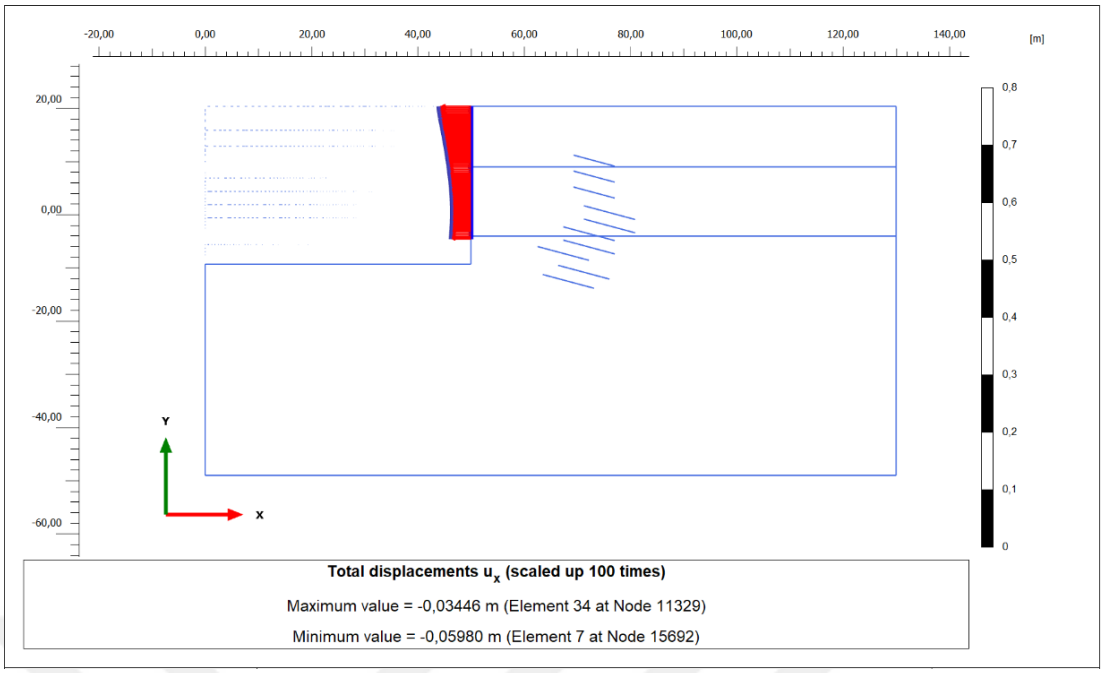
Şekil E.2 : ϕ=29° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



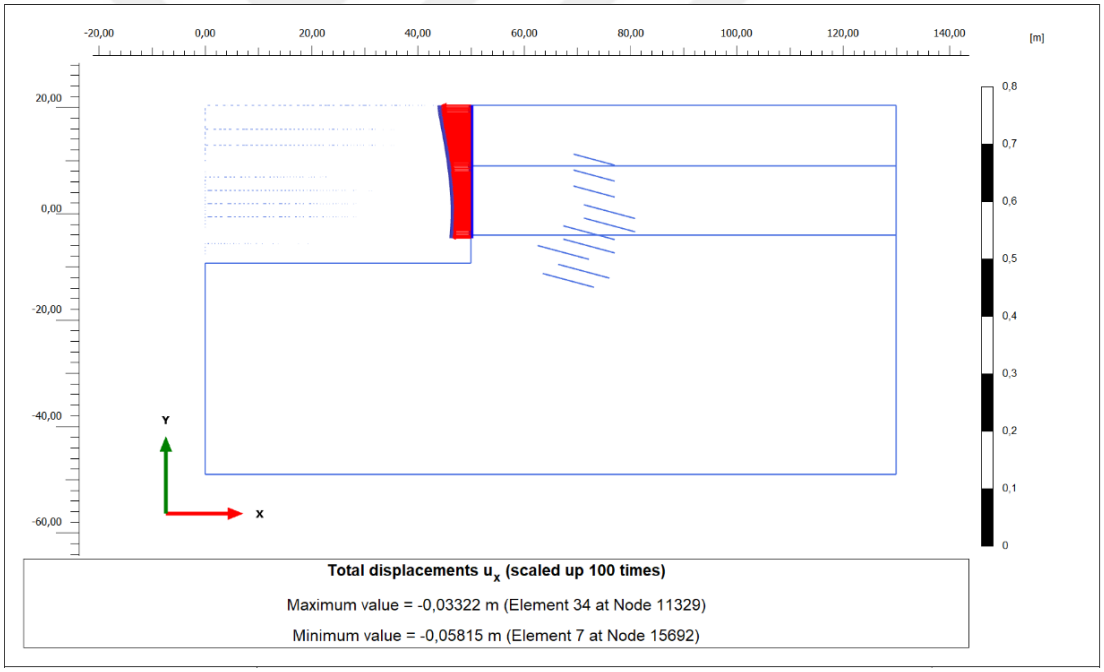
Şekil E.3 : ϕ=31° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



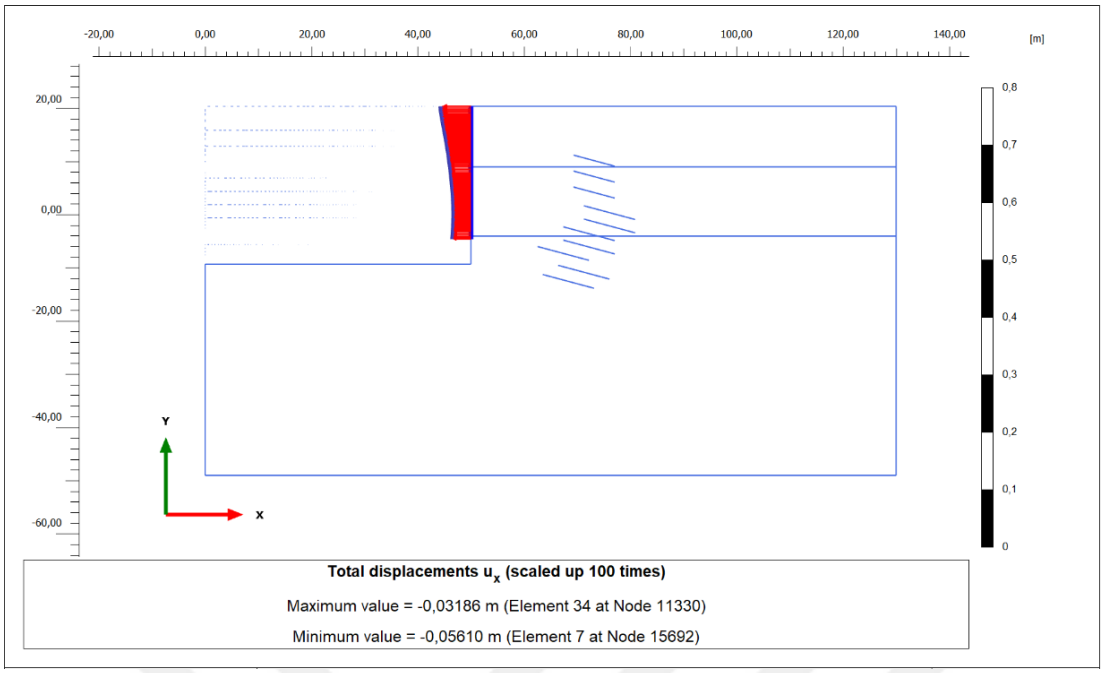
Şekil E.4 : ϕ=33° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



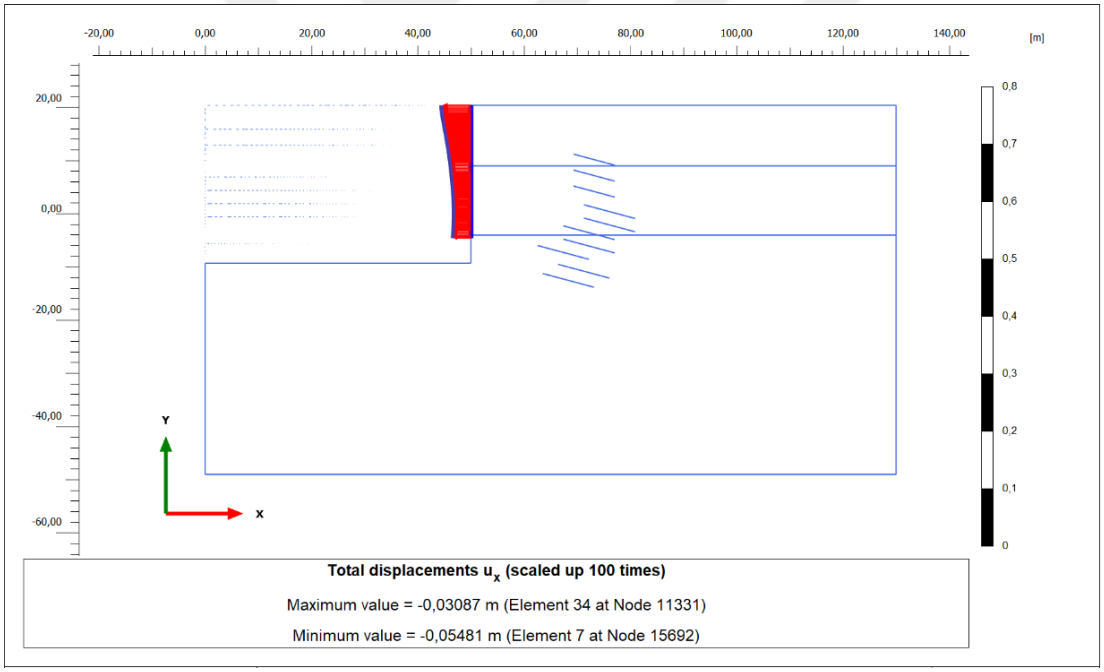
Şekil E.5 : ϕ=35° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



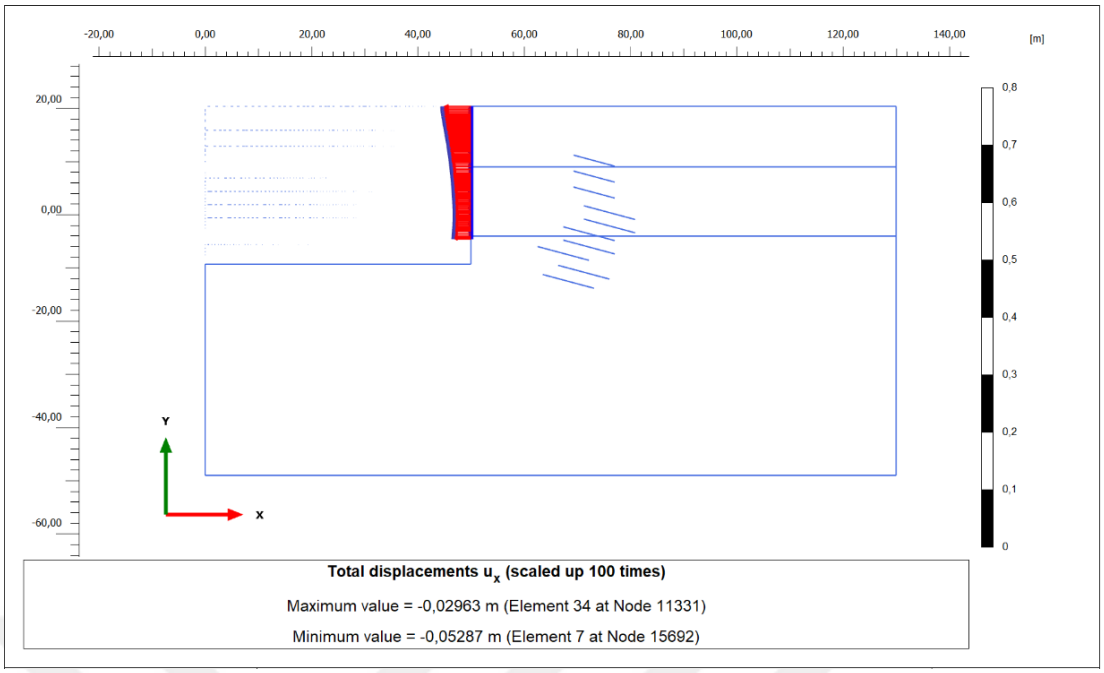
Şekil E.6 : ϕ=37° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



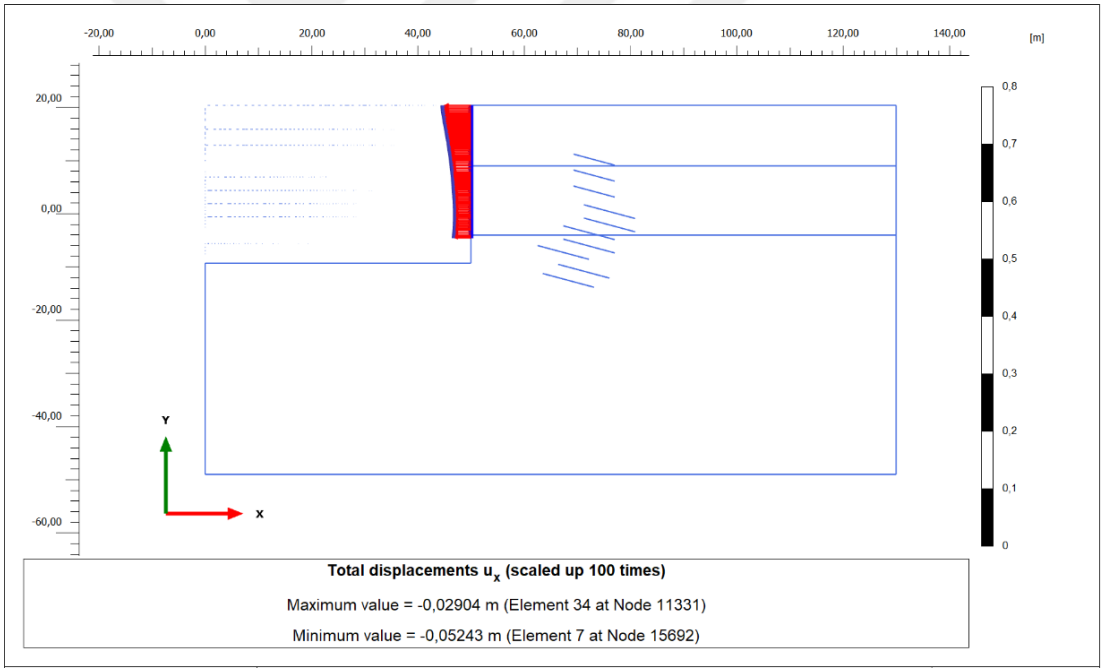
Şekil E.7 : ϕ=39° için kazıktaki yanal deplasmanlar.



Şekil E.8 : ϕ=41° için kazıktaki yanal deplasmanlar.

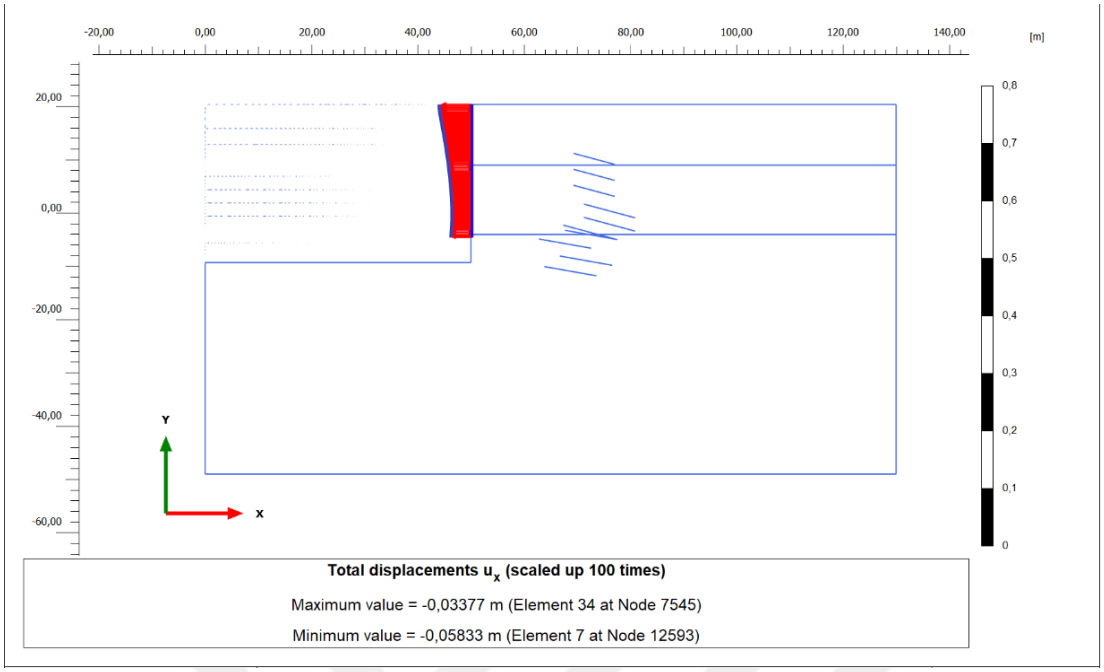


Şekil E.9 : ϕ=43° için kazıktaki yanal deplasmanlar.

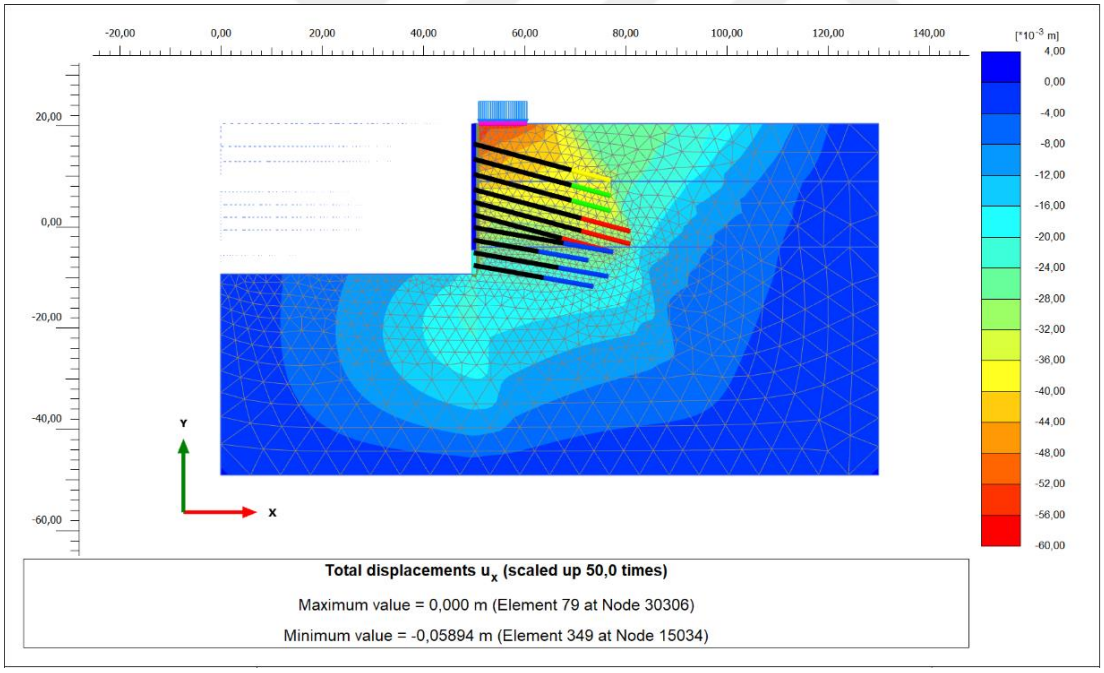


Şekil E.10 : ϕ=45° için kazıktaki yanal deplasmanlar.

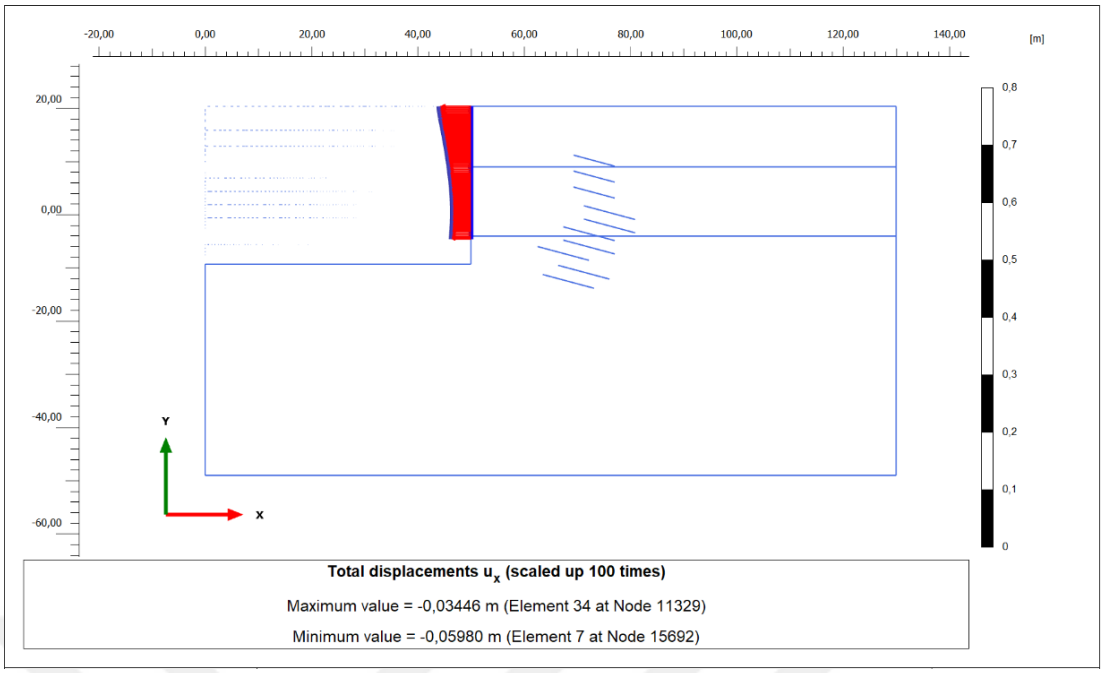
EK F



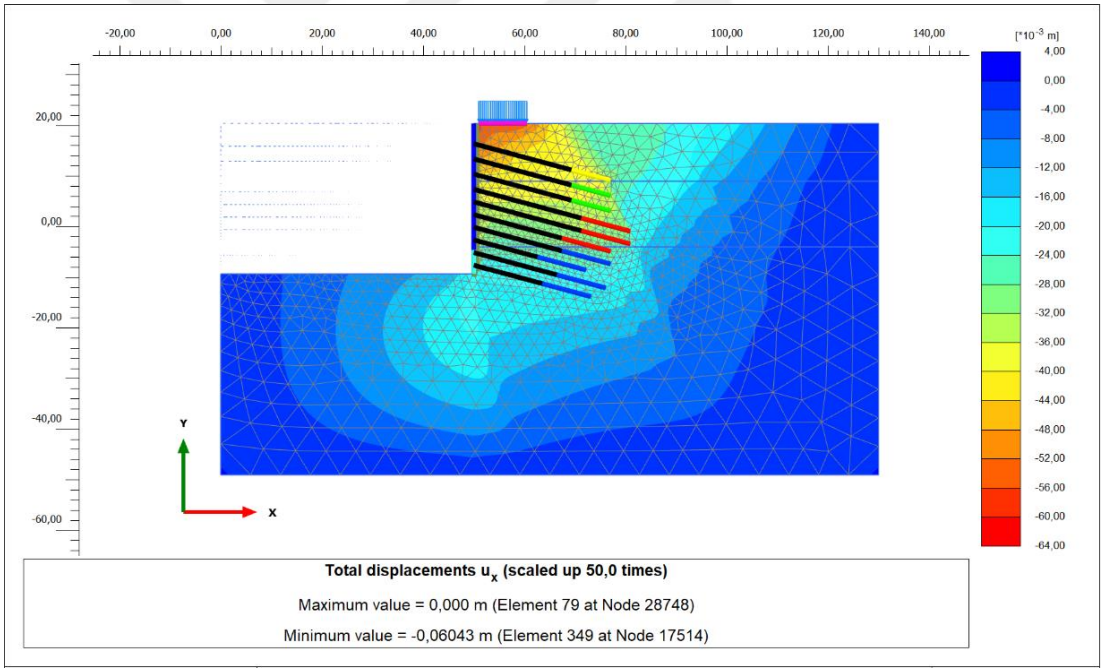
Şekil F.1 : 10° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar.



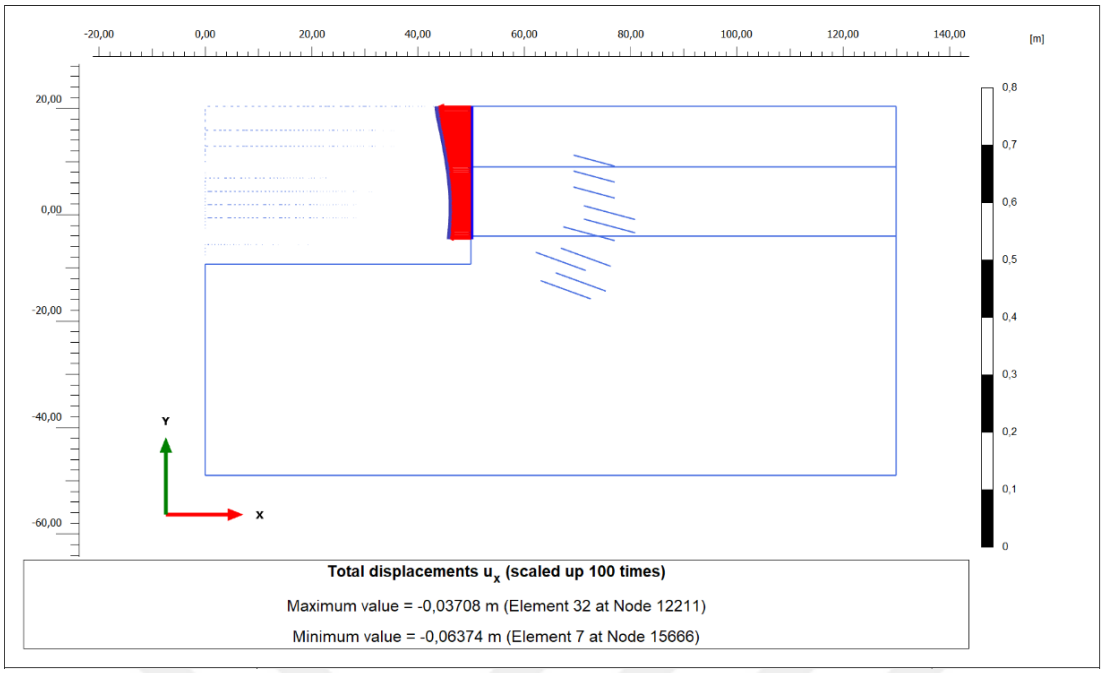
Şekil F.2 : 10° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü.



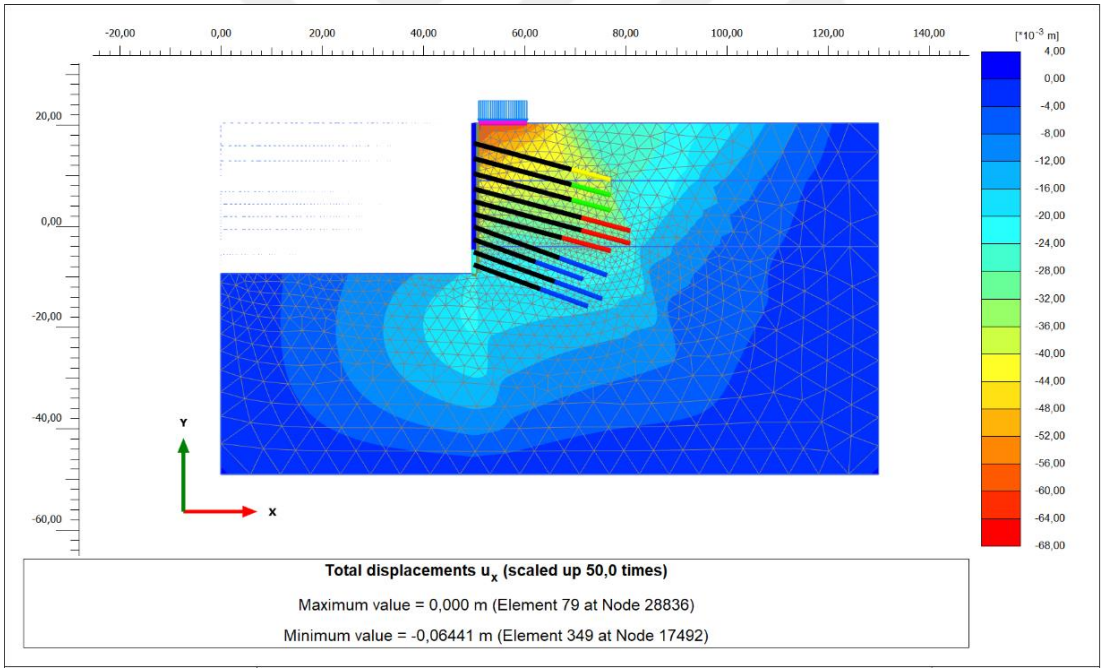
Şekil F.3 : 15° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar.



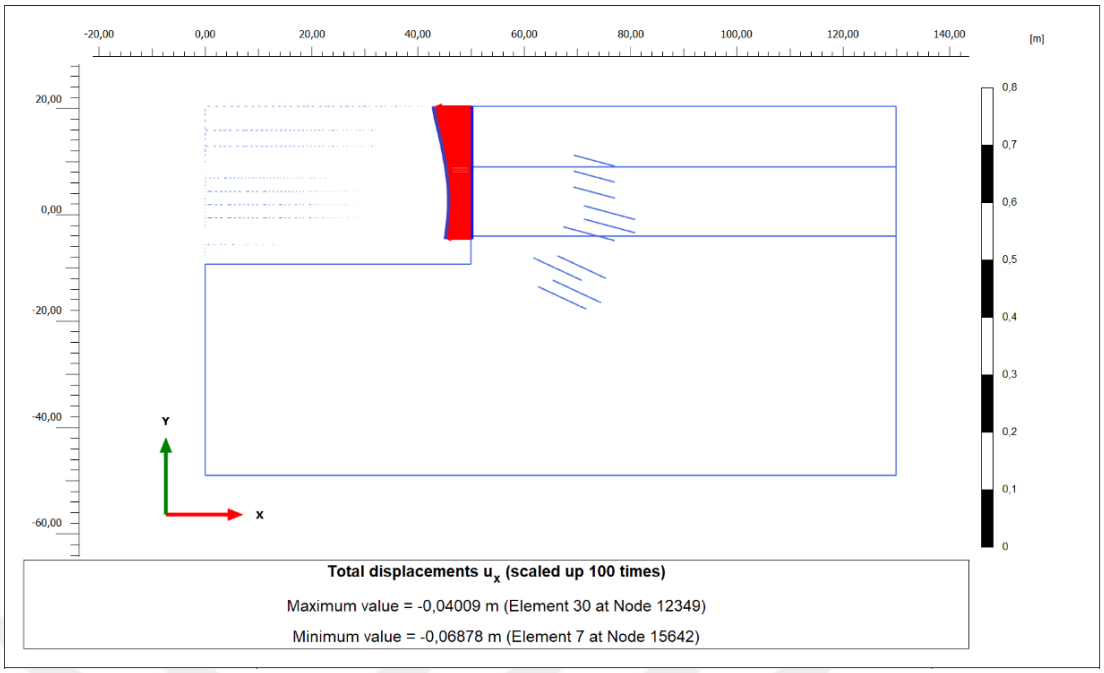
Şekil F.4 : 15° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü.



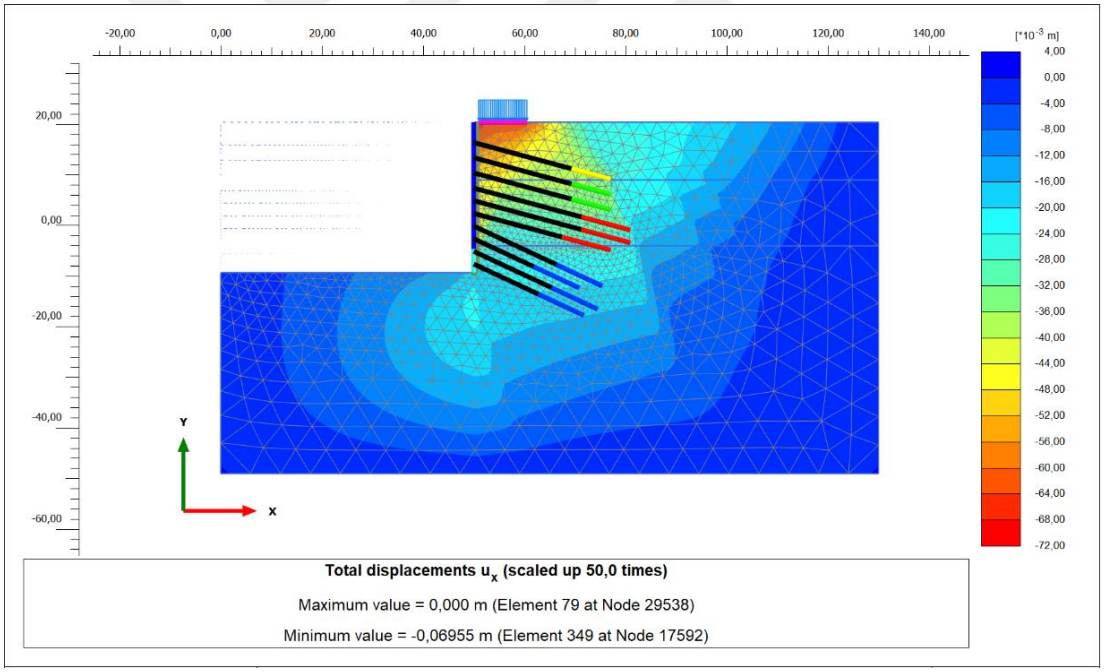
Şekil F.5 : 20° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar.



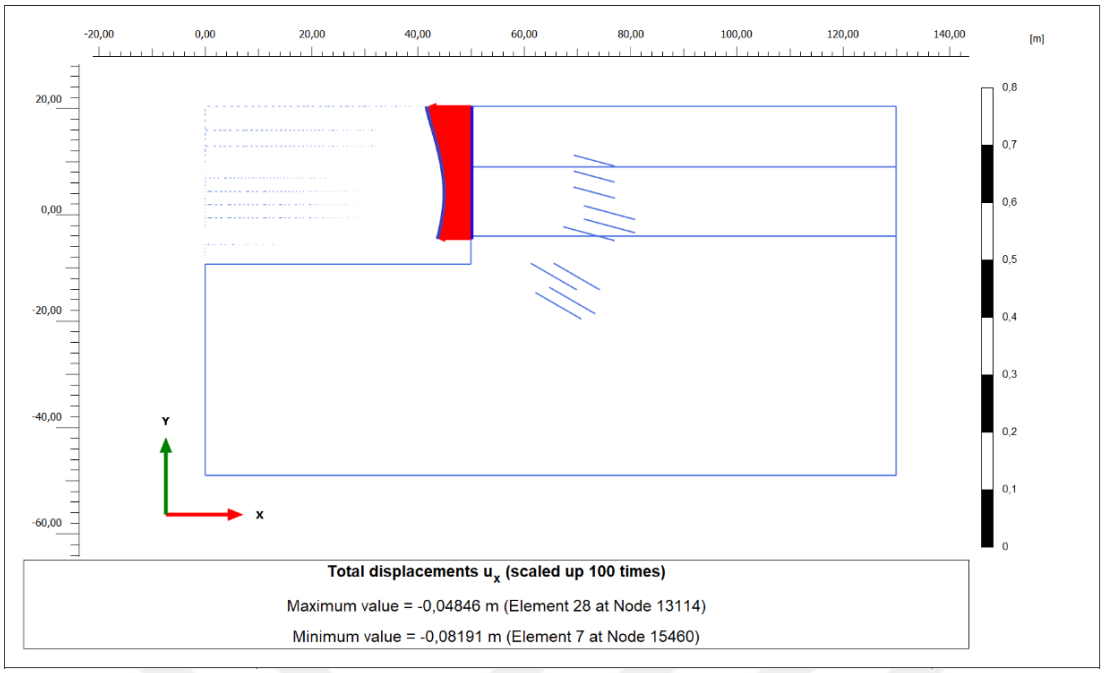
Şekil F.6 : 20° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü.



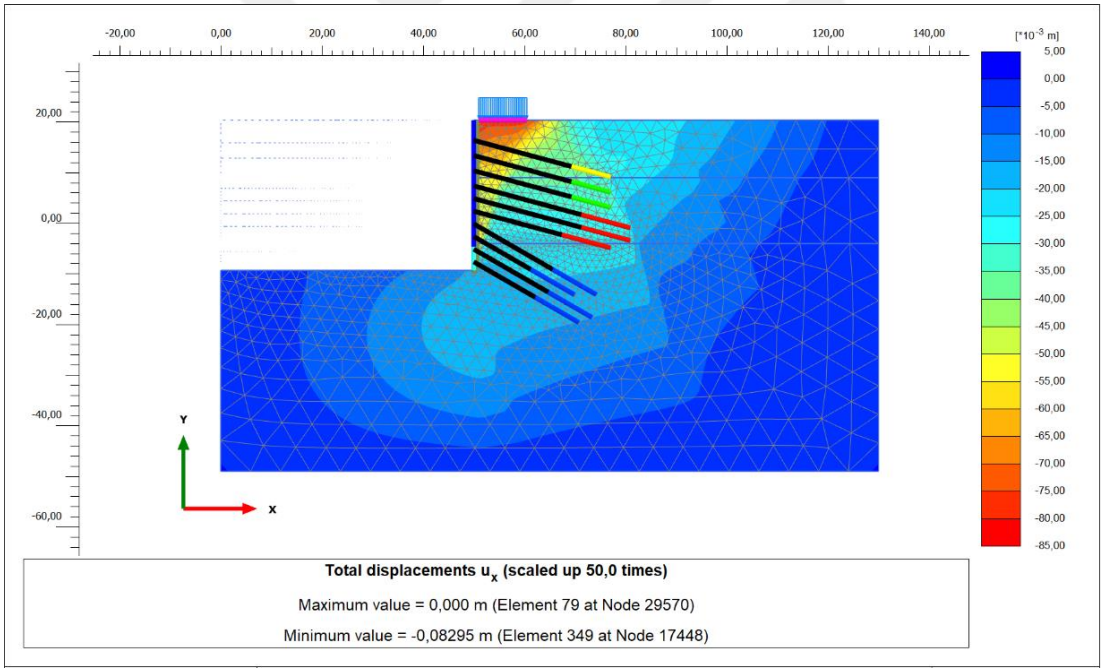
Şekil F.7 : 25° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar.



Şekil F.8 : 25° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü.



Şekil F.9 : 30° ankrajlar için kazıktaki yanal deplasmanlar.



Şekil F.10 : 30° ankrajlar için toplam yanal deplasmanların görüntüsü.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Gizem UÇAR
Doğum Tarihi ve Yeri **:** 12.02.1991, İzmir

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2015, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Geoteknik Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2017-Halen Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş. firmasında Geoteknik Değerlendirme ve Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.