

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAKYA FORMASYONUNDA YAPILAN ÖNGERMELİ ANKRAJLI
DERİN KAZILARIN SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Arif ÇINAR**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAKYA FORMASYONUNDA YAPILAN ÖNGERMELİ ANKRAJLI
DERİN KAZILARIN SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Arif ÇINAR
(501061303)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Yard. Doç Dr. Aykut ŞENOL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER (İTÜ)
Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)**

HAZİRAN 2010

Babama,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinde, Trakya Formasyonunda yapılan öngermeli ankrajlı derin kazıların tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi incelenmiştir. İnceleme kapsamında, formasyonu oluşturan grovak birimlerin laboratuvarında ve arazide elde edilen ve hesaplamalarda kullanılan mühendislik parametreleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca uygulamadan örnek olması açısından iki farklı derin kazı projesi vaka analizi olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasında büyük destek ve emeği bulunan değerli hocam Sayın Yrd. Doç Dr. Aykut ŞENOL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin oluşturulmasında emeği geçen mesai arkadaşlarıma ve desteğini hiç esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Haziran 2010

Arif ÇINAR
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. TRAKYA FORMASYONUNUN TANIMLANMASI	3
2.1 Trakya Formasyonunun Jeolojik Özellikleri	3
2.2 Trakya Formasyonunun Geoteknik Özellikleri	4
2.2.1 Kaya kalitesi sınıflaması (RQD)	5
2.2.2 Kaya kütlesi sınıflaması	5
2.2.3 Jeolojik dayanım indeksi (GSI)	7
2.2.4 Fiziksel özelliklerin belirlenmesi	7
2.2.5 Mukavemet parametrelerinin belirlenmesi.....	8
2.2.6 Elastisite modülünün belirlenmesi	10
2.2.6.1 Kayaç numunenin elastisite modülünün belirlenmesi	11
2.2.6.2 Kaya kütlesinin elastisite modülünün belirlenmesi	13
2.2.6.3 Kayaç numune ve kaya kütlesi elastisite modülü ilişkisi	15
3. DERİN KAZI DESTEKLEME SİSTEMLERİ	21
3.1 Derin Kazı Yöntemleri	21
3.1.1 Açık kazı yöntemi	21
3.1.2 İçten iksalı kazı yöntemi.....	23
3.1.3 Ada kazı yöntemi.....	24
3.1.4 Yukarıdan aşağı kazı yöntemi	25
3.1.5 Anolu kazı yöntemi	27
3.1.6 Ankrajlı kazı yöntemi.....	27
3.1.6.1 Pasif ankrajlı kazı yöntemi	27
3.1.6.2 Öngermeli ankrajlı kazı yöntemi	28
3.2 Düşey Destek Sistemleri.....	31
3.2.1 Kuyu tipi betonarme duvarlar.....	31
3.2.2 Diyafram duvarlar	32
3.2.3 Palplanş duvarlar	33
3.2.4 Kazıklı perdeler	34
3.2.4.1 Aralıklı kazıklı perdeler	34
3.2.4.2 Teğet kazıklı perdeler	34
3.2.4.3 Kesişen kazıklı perdeler	35
4. YANAL TOPRAK BASINÇLARI.....	37
4.1 Sükunetteki Toprak Basıncı.....	38

4.2 Aktif ve Pasif Basınçlar	39
4.2.1 Coulomb teorisine göre aktif ve pasif toprak basınçları.....	40
4.2.2 Rankine teorisine göre aktif ve pasif toprak basınçları	42
4.2.3 Kohezyonlu zeminlerde yanal toprak basınçları	43
4.3 Öngermeli Ankrajlı İksalara Etkiyen Toprak Basınçları	43
5. ÖNGERMELİ ANKRAJLI İKSA TASARIMI.....	53
5.1 Öngermeli Ankrajların Sınıflandırılması.....	54
5.1.1 Geçici ve kalıcı ankrajlar	54
5.1.2 Ankraj imalat yöntemleri.....	55
5.1.2.1 Düz cidarlı, basınçsız enjeksiyonlu ankraj	55
5.1.2.2 Düz cidarlı, basınçlı enjeksiyonlu ankraj	56
5.1.2.3 Basınçlı enjeksiyonlu ankraj	56
5.1.2.4 Genişletilmiş köklü ankraj	57
5.2 Öngermeli Ankraj Bölümleri.....	57
5.2.1 Ankraj serbest boyu	57
5.2.2 Ankraj kök boyu	57
5.2.3 Ankraj kafa bölgesi.....	58
5.3 Öngermeli Ankraj Elemanları.....	58
5.3.1 Çimento enjeksiyonu	58
5.3.2 Ankraj halatı	58
5.3.3 Merkezleyici ve ayıraçlar	59
5.3.4 Diğer elemanlar	60
5.4 Öngermeli Ankrajların Göçme Mekanizması.....	61
5.4.1 Öngermeli ankraj elemanının göçme mekanizması.....	61
5.4.1.1 Ankraj halatının kopması	62
5.4.1.2 Zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünmenin yenilmesi	63
5.4.1.3 Enjeskiyon ve halat arasındaki sürtünmenin yenilmesi	64
5.4.2 Yüzey elemanı tahkikleri.....	65
5.4.3 Dış stabilite tahkikleri.....	66
5.4.3.1 Toptan göçme analizi	66
5.4.3.2 Taban kabarması	68
5.5 İksa Sistemine Etkiyecek Yüklerin Belirlenmesi	69
5.5.1 İksa sistemleri üzerinde etkili sürşaj yükleri	69
5.6 Sismik İksa Tasarımı	70
5.6.1 Sismik toprak basınçları	71
5.6.2 Sismik toptan stabilite tahkikleri	72
5.7 Öngermeli Ankraj Boyutlandırılması	73
5.7.1 Ankraj serbest boyunun tayini.....	73
5.7.2 Ankraj kök boyunun tayini	74
5.7.3 Ankraj yatay aralığının tayini	76
5.7.4 Ankraj halatının tayini	76
5.8 İksa Düşey Elemanının Tayini.....	77
5.8.1 Düşey elemanın kesitinin belirlenmesi.....	77
5.8.2 Düşey elemanın gömülü boyunun belirlenmesi	78
5.9 Öngermeli Ankraj Korozyon Tedbirlerinin Belirlenmesi.....	79
5.10 Ankrajlı İksa Hareketinin Gözlenmesi	79
5.10.1 Yatay iksa hareketlerinin gözlenmesi.....	80
5.10.2 Düşey iksa hareketlerinin gözlenmesi	83
5.11 Öngermeli Ankraj Deneyleri	84
5.11.1 Kanıt deneyi.....	84

5.11.2 Uygunluk deneyi	86
5.11.3 Kabul deneyi.....	86
6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE MODELLENEN ÖRNEK İKSALI KAZI ANALİZ VE SONUÇLARI.....	89
6.1 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı	89
6.2 Örnek Derin Kazı Projelerinin Sonlu Elemanlar İle modellenmesi	91
6.3 İnceleme Yapılan Çalışmalar.....	91
6.3.1 1 No'lu çalışma	91
6.3.1 2 No'lu çalışma	93
6.4 Zemin Koşullarının Tanımlanması	94
6.4.1 1 No'lu çalışmanın zemin koşulları.....	94
6.4.2 2 No'lu çalışmanın zemin koşulları.....	97
6.5 Geometrik Modelin Oluşturulması	100
6.6 Malzeme Özellikleri	101
6.7 Ağ Modelinin Oluşturulması	102
6.8 Analiz.....	103
6.9 Analiz Sonuçları	104
6.9.1 Yatay deplasmanlar	104
6.9.1.1 1 No'lu çalışmanın yatay deplasmanları	104
6.9.1.2 2 No'lu çalışmanın yatay deplasmanları	106
6.9.2 Gerilme – deformasyon ilişkisi	108
6.9.3 Öngermeli ankraj yükleri.....	112
6.9.4 Toptan göçme analizi	113
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	115
KAYNAKLAR.....	119
EKLER.....	121

KISALTMALAR

AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
GSI	: Jeolojik Dayanın İndeksi
LL	: Likit Limit
PL	: Plastik Limit
RMR	: Kaya Kütlesi Sınıflaması
RQD	: Kaya Kalitesi Sınıflaması

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : RQD sınıflamasına göre kaya kalitesi değerleri.	5
Çizelge 2.2 : RMR sınıflaması tablosu	6
Çizelge 2.3 : RMR sınıflamasına göre kaya kalitesi değerleri	7
Çizelge 2.4 : Grovak birimlerin fiziksel büyüklükleri için çeşitli araştırma değerleri.	8
Çizelge 2.5 : Grovak birimlerin genel mühendislik özellikleri.....	10
Çizelge 2.6 : Süreksizliklerdeki dolgu malzemesinin mukavemete etkisi	10
Çizelge 2.7 : RQD ve α ilişkisi	16
Çizelge 2.8 : Sismik ve statik elastisite modülleri arasındaki ilişki	19
Çizelge 2.9 : Trakya formasyonunda yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.....	19
Çizelge 3.1 : Çeşitli destek sistemlerinin karşılaştırılması	36
Çizelge 5.1 : 13 ve 15 mm halatların standart özellikleri	59
Çizelge 5.2 : Ankraj kök kapasitesine etki eden faktörler	63
Çizelge 5.3 : Zemin enjeksiyon arasındaki nihai sürtünme kapasitesi.	64
Çizelge 5.4 : Öngermeli ankraj yatay aralıkları.	76
Çizelge 5.5 : Kanıt deneyi germe bilgileri	85
Çizelge 5.6 : Uygunluk deneyi germe bilgileri	87
Çizelge 6.1 : 1 No'lu çalışma zemininin laboratuvar ve saha deneyleri sonuçları.	95
Çizelge 6.2 : Sonlu elemanlar programında kullanılan zemin parametreleri	96
Çizelge 6.3 : 2 No'lu çalışma zemini laboratuvar ve saha deneyleri sonuçları	99
Çizelge 6.4 : 2 No'lu çalışmada sonlu elemanlarda kullanılan parametreler	100
Çizelge 6.5 : 1 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modeli malzeme özellikleri	102
Çizelge 6.6 : 2 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modeli malzeme özellikleri	102
Çizelge 6.7 : 1 No'lu çalışmada elde edilen ankraj yükleri.	112
Çizelge 6.8 : 2 No'lu çalışmada elde edilen ankraj yükleri	112
Çizelge C.1 : 1 No'lu çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (sayfa 1)	145
Çizelge C.2 : 1 No'lu çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (sayfa 2)	147
Çizelge C.3 : 2 No'lu çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (sayfa 1)	151
Çizelge C.4 : 2 No'lu çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (sayfa 2)	153

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Trakya formasyonunun jeolojik konumu	3
Şekil 2.2 : Jeolojik yapının mukavemet parametreleri üzerindeki etkisi	9
Şekil 2.3 : Kaya mekaniğinde ölçek faktörünün şematik görüntüsü	11
Şekil 2.4 : Serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü ilişkisi	12
Şekil 2.5 : Kayaç numune parametreleri korelasyonu	13
Şekil 2.6 : RQD- α ilişkisi.	16
Şekil 2.7 : RMR- α ilişkisi	17
Şekil 2.8 : Sismik ve statik elastisite modülü ilişkisi	18
Şekil 3.1 : Eğimli açık kazı yöntemi	22
Şekil 3.2 : Konsol iksalı kazı yöntemi	22
Şekil 3.3 : İçten iksalı kazı yöntemi	23
Şekil 3.4 : Ada kazı yöntemi.	24
Şekil 3.5 : Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi	26
Şekil 3.6 : Anolu kazı yöntemi plan görünüşü	27
Şekil 3.7 : Pasif ankrajlı iksa elemanları.	28
Şekil 3.8 : Öngermeli ankraj detayı	29
Şekil 3.9 : Öngermeli ankrajlı kazı yöntemi	30
Şekil 3.10 : Kuyu tipi betonarme duvar tipik kesiti	31
Şekil 3.11 : Diyafram duvar imalatı	32
Şekil 3.12 : Palplanşlı duvar görüntüsü	33
Şekil 3.13 : Kazıklı perde görüntüsü	35
Şekil 4.1 : Yatay toprak basıncı katsayıları ve oluşumu	37
Şekil 4.2 : Yatay toprak basıncının oluşumu	38
Şekil 4.3 : Plastik denge teorisinin oluşumu	40
Şekil 4.4 : Coulomb göçme mekanizmasının oluşumu	41
Şekil 4.5 : Rankine göçme mekanizmasının oluşumu	42
Şekil 4.6 : İksalı kazılarda yanal toprak itkisinin oluşumu	43
Şekil 4.7 : Peck (1969) tarafından önerilen toprak yükü dağılımı	44
Şekil 4.8 : Tschebotarioff (1973) tarafından önerilen toprak yükü dağılımı	46
Şekil 4.9 : Lehman tarafından önerilen yanal toprak basıncı dağılımı	47
Şekil 4.10 : İsveç yapı yönetmeliğinde yer alan yatay toprak itkileri	48
Şekil 4.11 : İsviçre zemin ankrajları standardında yer alan yatay toprak itkileri	48
Şekil 4.12 : Navfac tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen toprak basıncı dağılımı.	49
Şekil 4.13 : Navfac tarafından kohezyonlu zeminler için önerilen toprak basıncı dağılımı	50
Şekil 4.14 : Çeşitli iksalı kazılarda seçilen ve gerçekleşen yük dağılımları	51
Şekil 4.15 : Ankrajlı iksalı kazılarda çeşitli yanal yüklerin karşılaştırması	51
Şekil 5.1 : Delgi ve enjeksiyon tipine göre ankraj çeşitleri	56
Şekil 5.2 : Öngermeli ankraj bölümleri	57
Şekil 5.3 : Su ve çimento oranının enjeksiyon dayanımına etkisi	59
Şekil 5.4 : Ankraj merkezleyici ve ayıraç görüntüsü	60

Şekil 5.5 : Ankraj kafa bölgesi görüntüsü	61
Şekil 5.6 : Öngermeli ankrajlı iksalarda oluşabilecek göçme mekanizmaları	62
Şekil 5.7 : Tek sıra ankrajlı sistemlerde kuvvet dengesi	67
Şekil 5.8 : Taban kabarması göçme mekanizması	68
Şekil 5.9 : Değişik sürşaj yüklerinden kaynaklanan yatay gerilme değerleri	70
Şekil 5.10 : İstinat yapısı üzerinde etkili dinamik yükler	71
Şekil 5.11 : Yatay sismik yük katsayısına göre göçme hattının belirlenmesi	72
Şekil 5.12 : Öngermeli ankraj serbest boyunun belirlenmesi	74
Şekil 5.13 : Düşey iksa elemanında oluşacak momentin belirlenmesi	77
Şekil 5.14 : Broms yöntemi ile nihai pasif direncin hesaplanması	78
Şekil 5.15 : Korozyondan koruma yöntemleri	80
Şekil 5.16 : Tipik inklinometre görüntüsü	81
Şekil 5.17 : İnklinometrenin çalışma prensibi	82
Şekil 5.18 : Grovak birimlerde öngermeli ankrajlı sistemlerin yatay deplasmanı	83
Şekil 5.19 : Düşey ve yatay deplasman ilişkisi	83
Şekil 5.20 : Kanıt deneyi yükleme grafiği	85
Şekil 5.21 : Uygunluk deneyi yükleme grafiği	87
Şekil 6.1 : İki boyutlu tipik sonlu elemanlar ağı	89
Şekil 6.2 : 1 No'lu çalışmanın genel görüntüsü	92
Şekil 6.3 : 1 No'lu çalışmanın tipik sistem kesiti	92
Şekil 6.4 : 2 No'lu çalışmanın tipik sistem kesiti	93
Şekil 6.5 : 1 No'lu çalışmanın idealize zemin profili.....	94
Şekil 6.6 : 2 No'lu çalışmanın idealize zemin profili	98
Şekil 6.7 : 1 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modelinin görüntüsü	101
Şekil 6.8 : 1 No'lu çalışmanın Plaxis ağ modelinin görüntüsü	103
Şekil 6.9 : 1 No'lu çalışmada elde edilen yatay deplasman.....	105
Şekil 6.10 : 1 No'lu çalışmanın Plaxis ve inklinometre deplasmanları	106
Şekil 6.11 : 2 No'lu çalışmanın Plaxis ve inklinometre deplasmanları	107
Şekil 6.12 : Zeminde gerilme deformasyon ilişkisi	108
Şekil 6.13 : 1 No'lu çalışma plastik Mohr-Coulomb noktaları	109
Şekil 6.14 : 2 No'lu çalışma plastik Mohr-Coulomb noktaları	109
Şekil 6.15 : 1 No'lu çalışmadan elde edilen yatay gerilmeler	110
Şekil 6.16 : 2 No'lu çalışmadan elde edilen yatay gerilmeler	111
Şekil 6.17 : 1 No'lu çalışma toptan göçme analizi sonucu yaklaşık göçme hattı ...	114
Şekil 6.18 : 2 No'lu çalışma toptan göçme analizi sonucu yaklaşık göçme hattı ...	114
Şekil A.1 : 1 No'lu çalışma sahası sondaj yerleşim planı	123
Şekil A.2 : 1 No'lu çalışma sahası 6 No'lu sondaj logu	125
Şekil A.3 : 1 No'lu çalışma sahası 7 No'lu sondaj logu	127
Şekil A.4 : 1 No'lu çalışma sahası 8 No'lu sondaj logu	129
Şekil B.1 : 2 No'lu çalışma sahası sondaj yerleşim planı	131
Şekil B.2 : 2 No'lu çalışma sahası 2 No'lu sondaj logu (1. Sayfa)	133
Şekil B.3 : 2 No'lu çalışma sahası 2 No'lu sondaj logu (2. Sayfa).....	135
Şekil B.4 : 2 No'lu çalışma sahası 3 No'lu sondaj logu (1. Sayfa).....	137
Şekil B.5 : 2 No'lu çalışma sahası 3 No'lu sondaj logu (2. Sayfa)	139
Şekil B.6 : 2 No'lu çalışma sahası 5 No'lu sondaj logu (1. Sayfa)	141
Şekil B.7 : 2 No'lu çalışma sahası 5 No'lu sondaj logu (2. Sayfa).....	143
Şekil C.1 : 1 No'lu çalışma ön hesaplama tipik kesiti	149
Şekil C.2 : 2 No'lu çalışma ön hesaplama tipik kesiti	155

TRAKYA FORMASYONUNDA YAPILAN ÖNGERMELİ ANKRAJLI DERİN KAZILARIN SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Bu araştırma Trakya Formasyonunda yapılan öngermeli ankrajlı derin kazıların tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünü incelemek için hazırlanmıştır. Yapılan araştırma ile grovak birimlerde yapılacak ankrajlı derin kazı projelerinde, mühendislik parametrelerinin seçilmesi ve iksa modelinin çözülmesi için gerekli literatür çalışmalarının bir arada sunulması ve benzer araştırmalara kaynak oluşturulması hedeflenmiştir. Genel olarak derin kazıların günümüzdeki önemi, kullanım alanı ve tasarım felsefesine vurgu yapılmış, derin kazı destekleme sistemleri hakkında bilgiler verilmiş, koşullara göre seçilmesi gereken iksa sistemleri üzerinde durulmuştur. Derin kazıların sıkça yapıldığı İstanbul'un genel jeolojisini oluşturan Trakya Formasyonu ve bu formasyonda yer alan grovak birimlerin mühendislik parametreleri konu edilmiştir. İksa sistemlerinin tasarımı için büyük önem taşıyan yanıl toprak basınçları irdelenmiş ve değişik zemin koşulları ve iksa sistemlerine göre seçilmesi gereken yük dağılımları irdelenmiştir. Derin kazı iksa sistemi olarak, öngermeli ankrajlı iksa sistemlerinin tasarımı incelenmiş, ankrajlı sistem elemanları, ankraj stabilite tahkikleri ve kontrol deneyleri anlatılmıştır. Araştırma kapsamında, grovak birimde yapılan öngermeli ankrajlı sistemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile hesap yapan Plaxis bilgisayar programı ile modellenmesi konu edilmiş, İstanbul ili sınırlarında yapılan iki farklı öngermeli ankrajlı iksa uygulaması vaka analizi olarak irdelenmiştir. Öngermeli ankrajlı iksa sistemlerinin tasarımı, grovak birimlerin mühendislik parametreleri ve sonlu elemanlar analizi hakkında genel değerlendirmeler yapılmıştır.

MODELLING OF ANCHORED RETAINING SYSTEM BY FINITE ELEMENT METHOD IN TRACE FORMATION

SUMMARY

This research was conducted in order to examine the design of anchored excavation and find a solution with the finite elements method in Trace Formation. It was targeted that choosing of engineering parameters and at the same time all similar researches were presented to be a source for the projects of anchored excavation in greywacke units. It was carried out with different episodes, generally the ideas were given about the significance, usage field and philosophy for designing of deep excavation today. Also, some information was presented to support deep excavation and choose retaining systems in various conditions. Furthermore, “Trace Formation” which is based on Istanbul’s Geological structure and engineering parameters of greywacke units in this formation were described with details. In addition, lateral earth pressure which is so significant for designing retaining systems and load distribution considering in terms of different soil conditions and according to type of retaining systems were analysed. As a deep excavation retaining system, designing of anchored excavation, anchored system components and stability of anchorage were tested. In the scope of this research, anchored systems which were in greywacke units were modelled by Plaxis software which was based on the finite elements method. Two different anchored project applications were analysed as samples which are placed in Istanbul city borders. Consequently, it has been made general appraisal in terms of designing anchored retaining systems, engineering parameters of greywacke units and finite elements analysis.

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve büyük şehirlere başlayan göç, buralarda ki konut, işyeri, hizmet binası ve altyapı ihtiyaçlarını arttırmıştır. Gelişen teknoloji ve azalan yaşam alanları, özellikle kent merkezindeki yeni yapıların çok katlı olmasının yanında yeraltına doğru da ilerlemesini sağlamıştır. Son yıllarda, özellikle İstanbul gibi büyük yerleşim merkezlerinde neredeyse tüm yapılar bir veya birkaç bodrumlu yapılmaktadır. Özellikle kent merkezlerinde arsa sınırlarının müsait olmaması ve yapılacak kazı derinliğinin fazla olması nedeniyle, klasik tarzda ağırlık veya konsol, rijit istinat yapılarının kullanılması zor ve gayri ekonomik olmaktadır. Bunun yerine çok sıra destekli esnek iksa yapıları tercih edilmektedir. Rijit istinat yapılarında, istinat yapısı sonradan oluşturulan toprak yüklerini taşıırken, esnek derin kazı destekleme sistemlerinde ise mevcut toprak itkileri sonradan yapılacak iksa elemanları ile taşınmaktadır.

İksa elemanları, mevcut zemin koşulları değiştirilmeden imal edileceği için içerisinde bulunduğu ve istinad ettiği zemin koşullarının, tasarım açısından büyük önemi vardır. İksa elemanları projelendirilirken, parsel bazında yapılan zemin etüdları ve değişik mühendislik dallarının yaptığı arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçları kullanılmaktadır. Yapılan etüd ve deney çalışmalarında amaca yönelik çalışmaların yapılması ve tasarımda kullanılacak doğru sonuçların elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle ayrılmış kaya formasyonlarda yapılan iksalı kazılarda, tasarımda kullanılacak mühendislik parametrelerinin seçilmesi ve yorumlanması, kaya kütlelerinin süreksizliği sebebiyle oldukça zordur. Bu birimler için yapılan tasarımlarda, laboratuvarında kaya numunesi üzerinde yapılan deneylerin ve arazide yapılan sismik deneylerin sonuçlarının doğrudan kullanılması güvensiz sonuçlar doğurabilir.

Mevcut zemin koşulları, yapılacak kazının önemi, topoğrafik durum ve ekonomik dengeler dikkate alınarak seçilen derin kazı destekleme sistemleri boyutlandırılırken, iksa sistemine etkiyecek yükler değişik kabullerle belirlenir ve iksa elemanları üzerine etkitilerek iksa elemanları kesit tesirleri hesaplanır. İksa sistemlerinin

boyutlandırılmasında genelde kil ve kum zeminler için önerilen yük dağılımları kullanılmaktadır. Kullanılan yük dağılımlarının özellikle ayrıışmış kaya ve kaya formasyonlarda yapılan derin kazılar için ekonomik olmayan sonuçlar çıkaracağı gerçeğı göz ardı edilmemelidir.

İksalı derin kazılarda kazı güvenliğinin sağlanması amacıyla çeşitli gözlemler yapılmaktadır. Özellikle kazı aynasında oluşacak yatay deplasmanlar, kazı üst kotunda ve tabanında oluşacak düşey deplasmanlar ve iksa elemanlarında oluşacak yük değerleri, çeşitli deneysel aletler kullanılarak ölçülmekte ve olağandışı durumlarda yerinde tedbirler alınabilmektedir. Yapılan aletsel gözlemlerin diğeri bir avantajı ise sonuçlarının geri analizlerde kullanılması ve benzer iksalı kazılarda seçilecek yöntemin netleştirilmesine yardımcı olmasıdır.

İksalı derin kazılarda, iksa seçimi yapılırken, yapılacak kazının önemi, sınır koşulları, zemin koşulları ve maliyet gibi faktörler değerlendirilir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan derin kazı yöntemi öngermeli ankrajlı kazı yöntemidir. Bu araştırmada İstanbul ili ve çevresinin hakim zemin formasyonunu oluşturan Trakya Formasyonunda yapılan ankrajlı derin kazılarının tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi incelenmiştir. Bu kapsamda, ankrajlı iksa sisteminin hesap yöntemleri, grovak birimlerin mühendislik parametreleri, iksa sistemi yük dağılımları, öngermeli ankraj ön hesapları ve iksalı kazıların sonlu elemanlar ile modellenmesi konuları irdelenmiştir. Ayrıca grovak birimlerde uygulanmış iki farklı örnek proje vaka analizi olarak sunulmuş, sonlu elemanlar modeli ve arazide aletsel gözlemler sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılarak sonuçları üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

2. TRAKYA FORMASYONUNUN TANIMLANMASI

İlk olarak Penck (1919) tarafından *Thrazische Serie* olarak adlandırılan trakya formasyonu için yerli ve yabancı birçok araştırmacı tarafından araştırmalar yapılmış ve birimin genel jeolojisi hakkında bir kısım bilgiler sunulmuştur. Formasyon genel olarak İstanbul Boğazı'nın batı yakası olan Trakya'da yer almaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Trakya formasyonunun jeolojik konumu (www.mta.gov.tr).

2.1 Trakya Formasyonunun Jeolojik Özellikleri

İstanbul genelinde çeşitli tarihlerde yapılan sondaj ve stratigrafik çalışmalar sayesinde trakya formasyonunun genel jeolojik yapısı hakkında detaylı bilgi edinilmiştir. Bu incelemeler sonucunda, İstanbul arazisinin üst kısmını karbonifer

yaşlı trakya formasyonunun oluşturduğu anlaşılmıştır. Bu birimlerin 300-320 milyon yaşında olduğu tahmin edilmektedir. Formasyon genel olarak kumtaşı, grovak, silttaşı, kiltası ve şeylerden oluşmakta ve bu kırıntılı sediment istifinde yer yer andezit veya diyabaz türünden damarlar veya siltler sokulmaktadır. Yaklaşık 2000 m kalınlığındaki bu tortul istifin, ileri derecede tektonik deformasyona uğramış, şiddetle kıvrılmış, devrilmiş, ezilmiş olduğu belirlenmiştir. Trakya formasyonunu oluşturan birimler sedimenter kayaç olarak sınıflandırılmaktadır. Çok sayıdaki çatlak yüzeyleri ve kayma düzlemleri ile kırılmış, parçalanmış, dilim dilim olmuş formasyonda çok yönlü bir kırılma ve kayma sisteminin gelişmiş olduğu belirtilmiştir (Ketin ve Güner, 1989).

Formasyon içerisinde andezit ve diyabaz damarlarına sıkça rastlanır. Grovak ve killi şistlerin atmosfer ve su etkisinde kalan üst kısımları ayrıışmış durumdadır. Ayrıışmış zonun kalınlığı bölgesel olmakla beraber 2,50 m ile 15,00 m arasında değişmektedir (Sayar, 1971). Yüzeydeki ayrıışmış grovaklar, ayrıışma derecesine bağlı olarak kahve renkli ve sarımsı renktedir. Bu birimler çok kırıklı ve parçalanabilir yapıya sahiptir. Daha derindeki sağlam ve yoğun grovaklar koyu gri ve mavi-gri renktedirler. Bu birimlerde yer alan çatlaklar daha ziyade kılcal bir yapıya sahiptir (Özüer, 1975).

Çökelme ile oluşan grovaklar daha sonraları kıtasal hareketlere maruz kalarak bugünkü kırıklı ve kıvrımlı yapıyı kazanmışlardır. Kıvrımların ve süreksizliklerin genel doğrultusu Kuzey-Güney istikametindedir (Ketin, 1959).

Grovak birimler minerolojik olarak farklı dokuların bir araya gelmesi ile oluşmuştur. Yapılan araştırmalarda bu birim içerisinde, Kuvars, Feldspat, Limonit, Manyetit, Klorit ve Serizit minerolojik yapıları gözlenmiştir (Özüer, 1975).

2.2 Trakya Formasyonunun Geoteknik Özellikleri

Yapılaşmanın en fazla olduğu illerden biri olan İstanbul'un hakim zemin formasyonunu oluşturan grovak birimler, inşaat mühendisliği açısından büyük önem arz etmektedir. Yapı temellerinin oturduğu, iksa sistemlerinin istinat ettiği bu birimlerin mühendislik parametreleri pek çok araştırmacı tarafından incelenmekte ve yapılaşma öncesi tüm arazilerde yapılan sondaj ve jeofizik çalışmaları sayesinde birimler için değişik sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.2.1 Kaya kalitesi sınıflaması (RQD)

Deere (1989) tarafından geliştirilen RQD (*Rock Quality Designation*) yöntemi, kullanım kolaylığı bakımından kayaların sınıflanması için geliştirilen yöntemlerin arasında en çok bilinenidir. Mekanik sondaj sırasında alınan karot numunelerin 10 cm'den büyük olan parçalarının uzunluğunun toplamının, toplam karot numunesi uzunluğuna bölünmesi ile bulunan değer RQD olarak adlandırılmaktadır.

$$RQD = \frac{\sum 10\text{cm'den büyük parçaların uzunluğu}}{\text{Toplam karot numune uzunluğu}} * 100 \quad (2.1)$$

RQD yönteminde kaya kalitesi 5 ayrı sınıfa ayrılmaktadır.

Çizelge 2.1 : RQD sınıflamasına göre kaya kalitesi değerleri (Sebatini, 1999)

RQD (%)	Kaya Kalitesi
< 25	Çok Zayıf
25 – 50	Zayıf
50 – 75	Orta
75 – 90	İyi
90 - 100	Mükemmel

2.2.2 Kaya kütlesi sınıflaması (RMR)

RMR (*Rock Mass Rating*) sınıflaması 1973 yılında Bieniawski tarafından geliştirilmiş ve yıllar içerisinde değişikliğe uğramıştır. En son 1989 yılında revize edilerek bugün kullanıldığı şekli almıştır. RMR sınıflaması yapılırken, kayanın serbest basınç dayanımı (σ_c), RQD değeri, eklem sıklığı, yeraltı su durumu v.b. gibi birçok değişken kullanılır. RMR sınıflaması için örnek derecelendirme tablosu Çizelge 2.2'de verilmektedir.

RMR sınıflamasında, sınıflama kriteri olarak 5 ayrı değerlendirme yapılır. Her değerlendirme sonucunda kayayı temsilen bir değerlendirme puanı seçilir. Değerlendirme puanı en az 8 en çok 100 olabilir. Seçilen RMR puanına göre kayalar kalitesine göre sınıflandırılır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.2 : RMR sınıflaması tablosu (Bieniawski, 1989).

1	Kaya Numunesi Mukavemeti	Serbest Basınç	> 10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Tek Eksenli Basınç Dayanımına Göre		
		Tek Eksenli Basınç	> 250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa	1 – 5 MPa	<1 MPa
	Derecelendirme		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Derecelendirme		20	17	13	8	3		
3	Eklem Sıklığı		> 2 m	0.6 - 2 m	200 – 600 mm	60 – 200 mm	< 60 mm		
	Derecelendirme		20	15	10	8	5		
4	Eklem Durumu		Çok kaba yüzeyli, süreksiz, ayrışmamış, sert kaya	Kaba yüzeyli, <1 mm açıklıklı, az ayrışmış sert kaya	Az kaba yüzeyli, <1 mm açıklıklı, çok ayrışmış, yumuşak kaya	Sürtünme izli yüzey veya fay kili, <5 mm veya 1-5 mm açıklıklı sürekli eklemler	Yumuşak fay kili, >5 mm kalın veya açık eklemler, >5 mm sürekli eklemler		
	Derecelendirme		30	25	20	10	0		
5	Yeraltı Suyu	Tunelin 10 m'lik kısmından gelen su (lt./dak.)	Yok	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Eklem su basıncı (Büyük asal gerilme)	0	<0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	<0.5		
		Genel Koşul	Tam kuru	Nemli (kırıklardaki su)	Islak	Damla Halinde	Akış Halinde		
	Derecelendirme		15	10	7	4	0		

Çizelge 2.3 : RMR sınıflamasına göre kaya kalitesi değerleri.

RMR	Kaya Kalitesi
< 20	Çok Zayıf Kaya
21 – 40	Zayıf Kaya
41 – 60	Orta Kalitede Kaya
61 – 80	İyi Kaya
81 - 100	Çok İyi Kaya

2.2.3 Jeolojik dayanım indeksi (GSI)

GSI (*Geological Strength Index*), 1997 yılında Hoek ve Brown tarafından geliştirilen bir sınıflandırma birimidir. GSI sınıflaması, RMR sınıflamasına benzer şekilde kaya kütlelerinin fiziksel özelliklerinden faydalanılarak hesaplanır. Ancak çok yaygın olarak,

$$GSI = RMR - 5 \quad (2.2)$$

bağıntısı kullanılmaktadır.

2.2.4 Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Grovak birimlerin fiziksel büyüklükleri, birim hacim ağırlık (γ), su muhtevası (w), porozite (n), boşluk oranı (e) ve kıvam limitleri (LL, PL) olarak sıralanabilir. Grovak birimlerde yapılan yapıların tasarımında bu parametrelerin tayini için birçok araştırma yapılmış ve çeşitli kaynaklarda bu büyüklükler için belirli aralıklar verilmiştir. Kağıthane Piyalepaşa tunel hattı grovak birimlerinin mühendislik yapısını inceleyen Karagöz (2006) ise bu birimler hakkında detaylı ve güncel bilgiler sunmaktadır.

Bu çalışmalardan da anlaşılabileceği üzere, grovak numunelerinin birim hacim ağırlığı (γ), 22 ~ 27 kN/m³ arasında değişmektedir. Bu değer, ayrışma ve zamana bağlı olarak 20 kN/m³ mertebesine kadar düşebilir (Sağlam, 1985). Düşük olan porozite (n) değerleri, ayrışma düzlemlerindeki dolgu malzemesinin cinsi ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Grovak birimler üzerinde yapılan deneyler sonucunda birimlerin düşük plastisiteli kil (CL) sınıfında değerlendirilebileceği, likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerinin yaklaşık % 30 alınabileceği belirlenmiştir. Ayrıca bu birimler için ortalama boşluk oranı (e), 0.2 olarak belirlenmiştir (Özür, 1975).

Çizelge 2.4 : Grovak birimlerin fiziksel büyüklükleri için çeşitli araştırma değerleri.

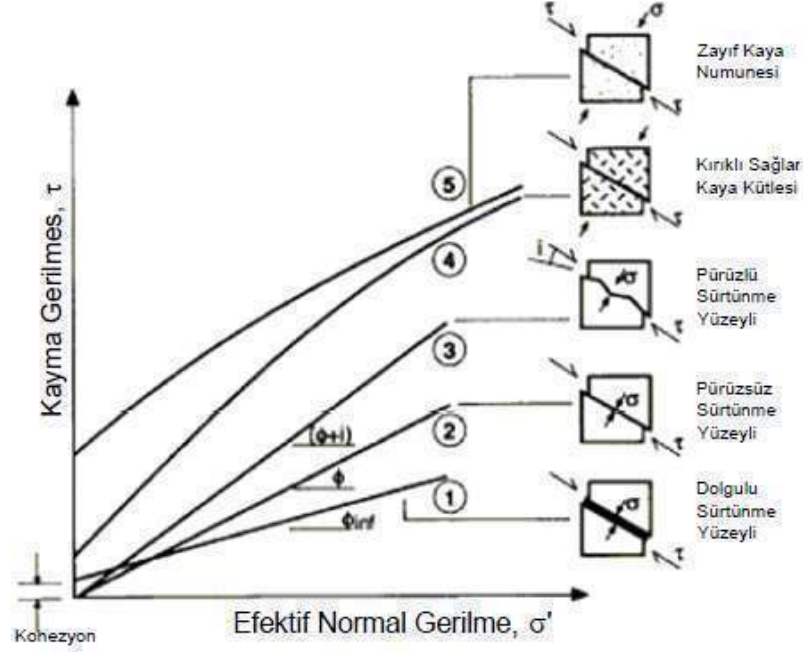
Lokasyon	γ	n	Kaynak
	(kN/m ³)	(%)	
Taksim	23,9-24,9	10,0-15,0	Güz (1968)
Harbiye (Ayrışmamış)	24,20	10,00	Kumbasar (1968)
Harbiye (Ayrışmış)	26,50	2,00	
Zincirlikuyu	23,6-24,6	17,5-18,5	Özüer (1975)
Maslak	23,8-25,4	14,0-17,0	
Taksim	24,6-25,6	13,6-14,0	
Zincirlikuyu	24,2-25,4	14,2-19,5	
Eyüp	26,4	2,4	Mahmutoğlu (1989)
Fatih	26,6	2,3	
Kasımpaşa	26,0	2,0	
Gümüşsuyu	26,3	2,5	
Beşiktaş	26,5	2,5	
Taşkılla	26,4	2,8	
Feriköy	26,7	2,0	Karagöz (2006)
Piyalepaşa	26,1	2,7	
Şişli	27,2	4,1	
Şişli	26,9	1,4	
Okmeydanı	27,0	2,9	
Okmeydanı	22,6	1,0	

Bu çalışmalardan da anlaşılaacağı üzere, grovak numunelerinin birim hacim ağırlığı (γ), 22 ~ 27 kN/m³ arasında değişmektedir. Bu değer, ayrışma ve zamana bağlı olarak 20 kN/m³ mertebesine kadar düşebilir (Sağlam, 1985). Düşük olan porozite (n) değerleri, ayrışma düzlemlerindeki dolgu malzemesinin cinsi ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Grovak birimler üzerinde yapılan deneyler sonucunda birimlerin düşük plastisiteli kil (CL) sınıfında değerlendirilebileceği, likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerinin yaklaşık % 30 alınabileceği belirlenmiştir. Ayrıca bu birimler için ortalama boşluk oranı (e), 0.2 olarak belirlenmiştir (Özüer, 1975).

2.2.5 Mukavemet parametrelerinin belirlenmesi

Geoteknik Mühendisliğinde yapılan hesaplarda zeminleri temsilen kullanılan parametrelerin önde geleni mukavemet parametreleridir. Grovak birimlerin kayma mukavemeti parametreleri (c ve ϕ) laboratuvar ve sahada birçok yöntemle doğrudan veya dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Laboratuvar ortamında elde yüksek mukavemet parametreleri elde edilirken, ayrışma ve çatlaklarda bulunan

dolgu malzemesi sebebiyle sahada daha küçük değerler bulunmaktadır. Özellikle daneler arasındaki kayma mukavemetinin bir ölçüsü olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı, çatlak ve süreksizlikten birinci derecede etkilenmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Jeolojik yapının kayma mukavemetine etkisi (Sabatini, 2002).

Şekilden de anlaşılacağı üzere, kayaç numunesi ne kadar sağlam ve bütün ise mukavemet parametreleri o kadar yüksektir. Ayırışmış ve ayırışma düzlemleri dolmuş birimler düşük mukavemet parametrelerine sahiptir. Ayırışma ve düzlemlerdeki dolgu malzemesi sebebiyle içsel sürtünme açısı (ϕ) fazla düşmezken, kohezyon değeri (c) önemli derecede azalmaktadır. Ayırışma düzlemlerinde yer alan ince daneli dolgu malzemesi bazen fiktif bir kohezyon yaratmakta ise de bu pozitif etki su ve zaman etkisiyle kaybolabilmektedir.

Laboratuvar ortamında kayanın kütlesini tam temsil etmeyen, çatlak ve süreksizlik düzlemleri barındırmayan numuneler üzerinde yapılan deneylerde, yüksek mukavemet parametreleri elde edilebilmektedir. Grovak birimlerin mühendislik parametreleri değerlendirilirken laboratuvar numunesi üzerinde ve arazide yapılan deneyler ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Genel olarak arazi deneyleri sonuçları, ayırışma, süreksizlik, su durumu ve çatlak durumunu daha doğru temsil etmektedir. Taşıma kapasitesi, şev stabilitesi ve iksa hesaplamalarında arazi deneylerinin yada laboratuvar deneylerinin düzeltilmiş halinin kullanılması gerekmektedir. Grovak birimlerin laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen mukavemet parametreleri ve

hesaplamalarda kullanılabilecek, araziye temsil eden mukavemet parametreleri Sağlamer (1985) tarafından da ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 : Grovak birimlerin genel mühendislik özellikleri (Sağlamer, 1985).

Parametre	Laboratuvar Numunesi	Arazide	Su ve Zaman Etkisi Altında
γ (kN/m ³)	26.5	25.0	20.0
c (kPa)	4500	500	0
ϕ (°)	40-45	35-40	14-18
E (MPa)	10000-15000	2000	500-800
μ (Poisson)	0.20	0.22	0.35

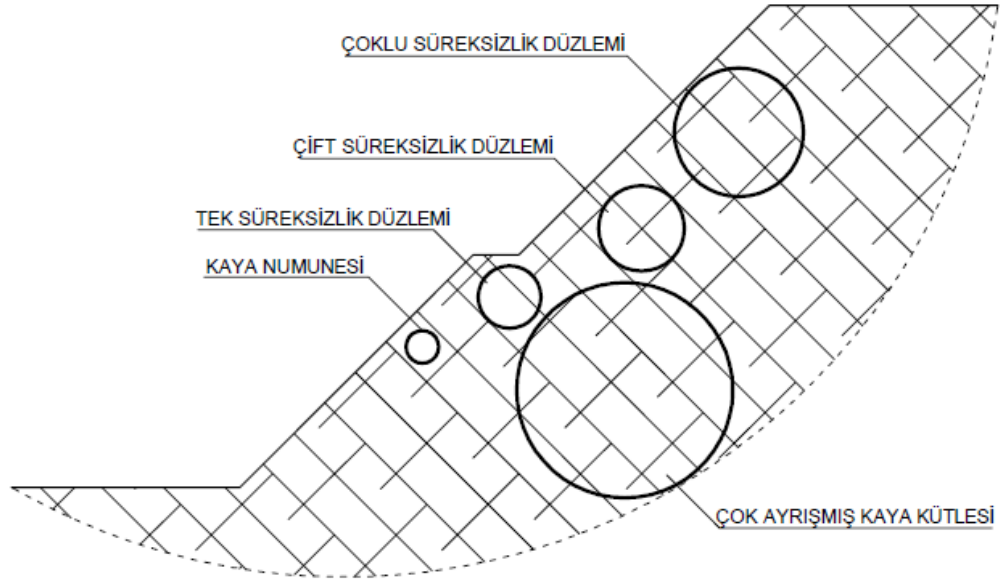
Süreksizlik düzlemlerinde ki dolgu malzemesinin özelliğine göre grovak birimlerin mukavemet parametrelerinin değişimi Özür (1975) tarafından aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.6 : Süreksizliklerdeki dolgunun mukavemete etkisi (Özür, 1975)

Sürtünme Yüzeyi Özelliği	ϕ (°)	c (kPa)
Dolgu malzemesi yok ve kuru	25	6
Dolgu malzemesi yok ve ıslak	29	0
İri daneli (kum) kuru malzeme	30	0
İnce daneli kuru malzeme	42	5
İnce daneli ıslak dolgu	4	35

2.2.6 Elastisite modülünün belirlenmesi

Grovak birimlerin çok ayrıışmış ve çatlaklı yapıda olması, numune davranışı ve kütle davranışının farklı olmasına sebep olmaktadır. Çatlaklarda ve süreksizliklerde bulunan su ve ince malzeme, kaya kütlelerinin fiziksel ve mekanik davranışını birbir etkilemektedir. Laboratuvarda kullanılmak üzere kaya kütlelerinin herhangi bir yerinden alınan numuneler bazen bu süreksizlik ve çatlak takımlarının davranışını tam olarak sergileyememektedir. Bu sebeple kaya mekaniğinde incelenen kütlenin ölçeği büyük önem arz etmektedir (Şekil 2.3).

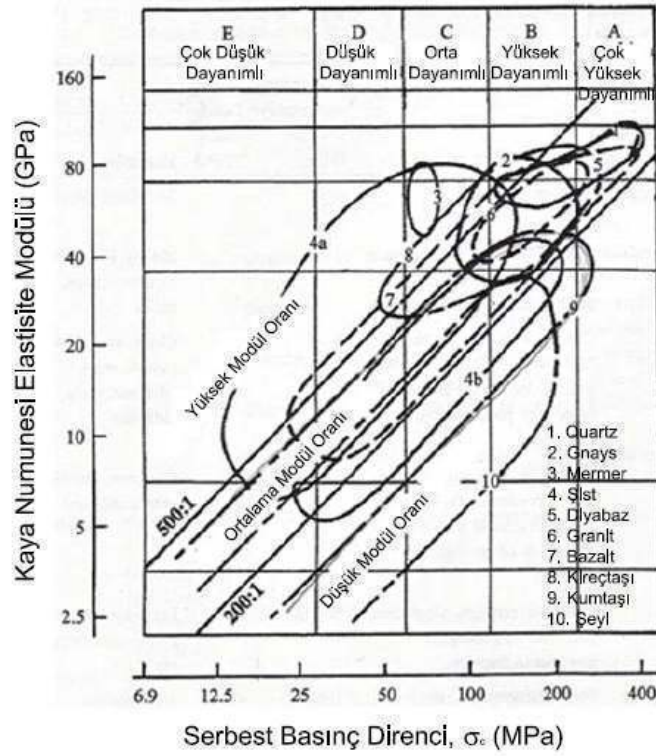


Şekil 2.3 : Kaya mekaniğinde ölçek faktörü (Zhang, 2005).

Örneğin kaya kütleğinde yapılan küçük çaplı delgiler, çatlak ve süreksizliklerden bağımsız olarak sadece kayaç numunesinin fiziksel özelliklerinden etkilenebilmektedir. Büyük ölçekte, tek süreksizlik düzlemi ve çatlak takımının bulunduğu bölgelerde yapılan stabilite analizlerinde, kütle kayma ve dönme analizlerinde ise kayacın sahip olduğı çatlak takımı ve süreksizlikler büyük öneme sahiptir (Zhang, 2005). Daha büyük ölçekte farklı yönlü süreksizlik ve çatlak takımı barındıran kütlelerde yapılan analizlerde ise kütleinin bir bütün olduğı ve mühendislik parametrelerinin kayaç numunesine göre daha düşük olduğı kabulü yapılmalıdır.

2.2.6.1 Kayaç numunenin elastisite modülünün belirlenmesi

Kayaç numunelerinin mukavemet parametreleri ve mekanik özellikleri laboratuvar ortamında yapılan deneylerle belirlenebilmektedir. Kaya numuneleri üzerinde çok yaygın olarak nokta yükleme ve serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki ilk olarak Deere ve Miller (1966) tarafından araştırılmış ve çeşitli bağıntılar türetilmiştir. AASHTO (1996) tarafından da kullanılması önerilen bu bağıntılarda, laboratuvar ortamında serbest basınç mukavemetleri, belirlenen numunelerin tanjant elastisite modülleri çıkarılmış, serbest basınç ve elastisite modülü arasındaki bağıntı belirlenmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Serbest basınç direnci ve elastisite modülü arasındaki ilişkisi (AASHTO, 1996).

Buna göre kumtaşı birimler için ortalama kayaç numunesi elastisite modülü değeri,

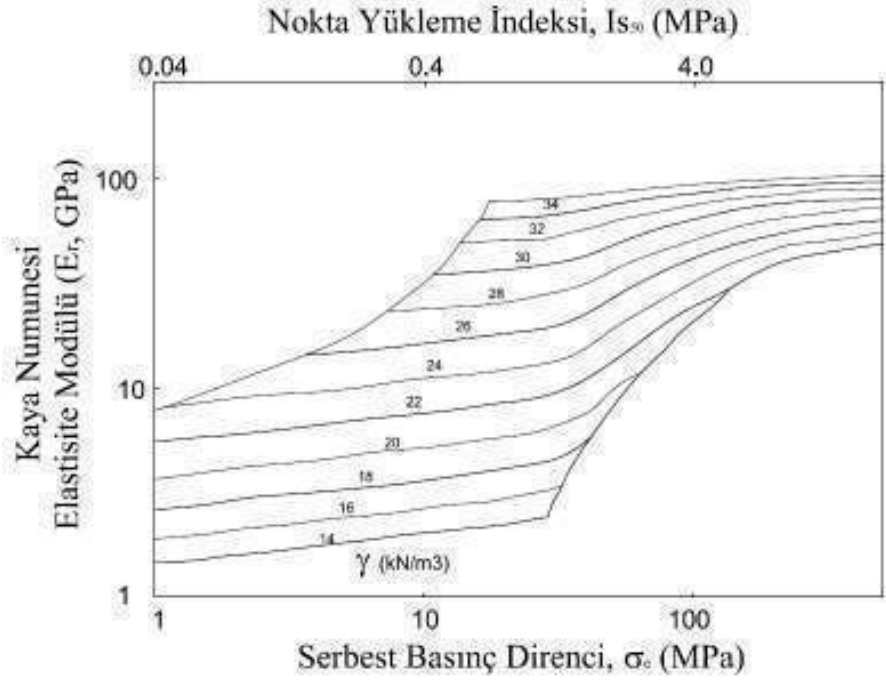
$$E_r = 200\sigma_c \text{ (MPa)} \quad (2.3)$$

olarak kabul edilebilir.

Sönmez ve arkadaşları (2005) 600'ü aşkın kayaç numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını incelemiş ve yapay sinir ağları yöntemini kullanarak çeşitli korelasyonlar geliştirmiştir. Kayaç numunesi nokta yük indeksi (Is_{50}), serbest basınç mukavemeti (σ_c), birim hacim ağırlığı (γ) ve elastisite modülü (E_r) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir (Şekil 2.5).

Dobrin ve Savit (1988), sismik dalga hızları (V_P ve V_S), malzeme yoğunluğu (ρ), poisson oranı (μ) ve elastisite modülü arasında bir ilişkinin olduğunu savunmaktadır. Buna göre kayaç numuneye ait elastisite modülü değeri ,

$$E_r = 2\rho V_s^2 (1 + \mu) \text{ (MPa)} \quad (2.4)$$



Şekil 2.5 : Kaya numune parametreleri korelasyonu (Sönmez, 2005).

olarak ifade edilebilir (Burger, 2006). Bu eşitlik sismik yöntemlerden faydalanılarak çıkarılmıştır ve ülkemizde de sıkça uygulanmaktadır. Ancak eşitlikten elde edilen değerlerin kayaç numunesini temsil ettiği, dolayısıyla kaya kütlelerini temsil için kullanılamayacağı unutulmamalıdır. Ayrıca elde edilen elastisite modülü, dinamik elastisite modülü olarak da adlandırılmaktadır. Bağlıtından elde edilen bu değerlerin temel ve iksa tasarımında doğrudan kullanılması tasarım açısından güvensiz sonuçlar doğurabilmektedir.

2.2.6.2 Kaya kütlelerinin elastisite modülünün belirlenmesi

Süreksizlik ve çatlak takımı barındıran kaya kütlelerinin mekanik özelliklerini belirlemek için saha deneyleri ve çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Saha deneylerinde en çok presyometre deneyi tercih edilirken, korelasyonlarda serbest basınç mukavemeti, RQD, RMR ve GSI sınıflaması ve sismik dalga hızları tercih edilmektedir.

Rowe ve Armitage (1984) tarafından zayıf dayanımlı kayalarda birçok saha deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen serbest basınç mukavemeti (σ_c) değerleri korele edilerek kaya kütleleri elastisite modülü için,

$$E_m = 215\sqrt{\sigma_c} \text{ (MPa)} \quad (2.5)$$

bağıntısı çıkarılmıştır. Radhakrishnan ve Leung (1989) tarafından, ayrıışmış sedimenter kayalar üzerinde yapılan deneyler sonucunda yukarıda yer alan denklemin doğru sonuçlar verdiği teyid edilmiştir.

Hoek ve Brown (1997) tarafından yapılan pratik gözlem ve derin kazı projelerinden geri analizlerle elde edilen sonuçlara göre, serbest basınç mukavemeti (σ_c)<100 MPa olan zayıf kayalarda,

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \text{ (GPa)} \quad (2.6)$$

bağıntısının kullanılması önerilmektedir.

Hoek (2004), GSI sınıflaması ve elastisite modülü arasındaki ilişki için aşağıdaki bağıntıyı önermektedir.

$$E_m = 0.33e^{0.064GSI} \text{ (GPa)} \quad (2.7)$$

Gökçeoğlu ve arkadaşları (2003) 115 adet veriyi inceleyerek RMR ve GSI sınıflaması ile elastisite modülü arasındaki ilişkiyi,

$$E_m = 0.0736e^{0.0755RMR} \text{ (GPa)} \quad (2.8)$$

$$E_m = 0.1451e^{0.0654GSI} \text{ (GPa)} \quad (2.9)$$

olarak ifade etmiştir.

Barton (2002), sismik P dalgası hızı (V_p , km/saniye) ve elastisite modülü arasındaki ilişkiyi,

$$E_m = 10 * 10^{(v_p - 3.5)/3} \text{ (GPa)} \quad (2.10)$$

olarak ifade etmiştir.

Özellikle tünel ve maden mühendisliğinde kullanılan bu bağıntıların derin kazı ve şev stabilitesi analizlerinde kullanılması durumunda dikkatli olunması gerekmektedir. Aynı bölge için kullanılan yukarıdaki denklemler çok farklı elastisite modülü değeri verebilmektedir. Kaya kütlelerinin elastisite modülünün belirlenmesi için geliştirilen bu bağıntılarda, süreksizlikler nedeniyle bozulan kayacın izotropik yapısı bozulmamış kabul edilir. Anizotrop durumdaki kaya kütleleri izotrop kabul edilir. Yapılan bu kabul süreksizlik ve çatlak takımlarına sahip kaya kütlelerinin her yönde farklı davranışlar sergileyeceği gerçeğini yok sayar. Ayrıca bu değerlerin bir

kısmı tünel mühendisliğinde deformasyon okumaları kullanılarak yapılan geri analizler sonucunda elde edilmektedir. Bu geri analizlerde yuvarlak veya bazen kutu kesitlere sahip tünel aynalarının kemerlenme etkisiyle normalden az deplasman yapacağı ve yüksek elastisite modülleri hesaplanacağı da unutulmamalıdır.

Bu belirsizliklerden arınmak için saha deneyleri yapılması ve parametrelerin saha deneylerinden elde edilmesi, pratik mühendislikte kullanılan en kesin yollardan biridir. Grovak birimlerin elastisite modülünün belirlenmesi için sahada presyometre, plaka yükleme ve dilatometre deneyleri yapılabilmektedir.

İstanbul'da Kadıköy-Kartal Metro hattında kumtaşı-kiltaşı formasyonlarda yapılan presyometre deneyleri sonuçlarına göre (Yüksel ve arkadaşları 2005) ortalama elastisite modülü 220 MPa olarak elde edilmiştir. Zetaş A.Ş. (1999) tarafından Amerikan Konsoloslugu (İstinye, İstanbul) inşaatında ayrılmış kumtaşı-kiltaşı birimlerde (RQD=0) yapılan presyometre deneyi sonucunda ise ortalama elastisite modülü 70 MPa bulunmuştur.

2.2.6.3 Kayaç numunesi ve kaya kütlesi elastisite modülü ilişkisi

Çatlak takımı ve süreksizliklerden bağımsız olarak elde edilen kaya numunesi elastisite modülü (E_r) ve süreksizlikler içeren kaya kütlesini temsilen elde edilen elastisite modülü (E_m) arasında çeşitli korelasyonlar mevcuttur. RMR ve GSI sınıflaması, sismik hız (V_p ve V_s) ve RQD değerleri kullanılarak geliştirilen bu korelasyonlarda, elastisite modülleri arasındaki ilişki,

$$\alpha = \frac{E_m}{E_r} \quad (2.11)$$

katsayısı ile ifade edilmektedir.

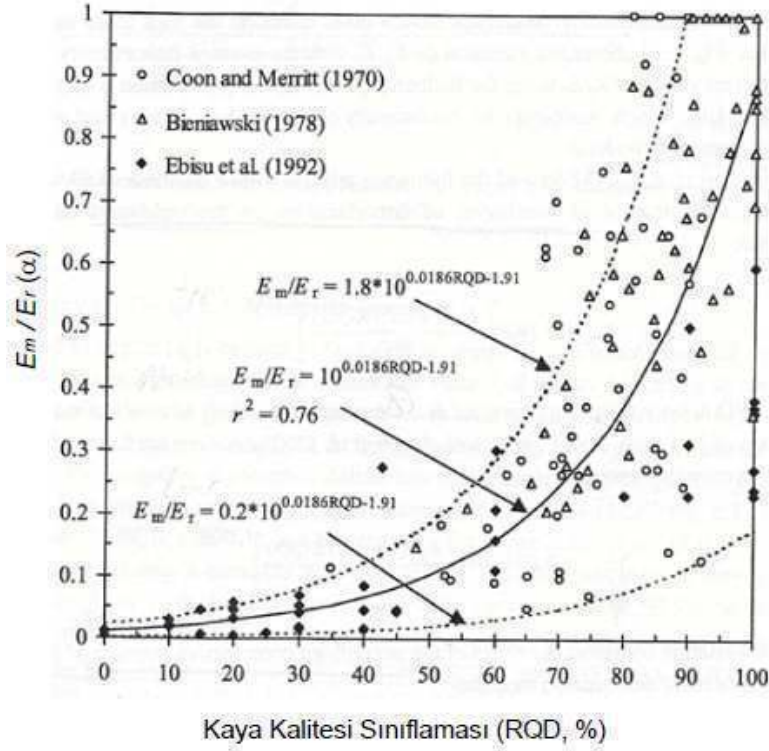
Deere ve arkadaşları (1967), RQD ve kaya kütlesi elastisite modülü arasında ilişkiyi irdelemiş ve ardından Coon ve Meritt (1970), RQD ve α arasındaki ilişki için çeşitli çalışmalar yapmış ve aşağıdaki bağıntıyı önermiştir.

$$\alpha = 0.0231(RQD) - 1.32 \geq 0.15 \quad (2.12)$$

AASHTO (1989), $RQD > 57$ için yukarıdaki bağıntıyı, $RQD < 57$ için ise $\alpha = 0.15$ değerinin kullanılmasını önermektedir. Bu denklem de, $RQD = 100$ olması halinde kayaç numunesi ve kaya kütlesi elastisite modülü eşit kabul edilmiştir. Ancak

RQD=%100 olması halinde bile kaya kütlesinde çatlak ve süreksizliklerin olabileceği ve dolayısıyla kütle davranışının farklı olacağı bilinmektedir (Zhang, 2005).

Zhang ve Einstein (2004), daha önce yayınlanmış bilgileri toplayarak aşağıdaki dağılımı elde etmişlerdir.



Şekil 2.6 : RQD- α ilişkisi (Zhang ve Einstein, 2004).

Carter ve Kulhawy (1988) deneysel yöntemler kullanarak, değişik RQD değerleri için α katsayıları belirlemişlerdir (Çizelge 2.7).

Çizelge 2.7 : RQD ve α ilişkisi (Sabatini ve arkadaşları, 2002)

RQD (%)	α	
	Süreksizlik Düzlemi Kapalı	Süreksizlik Düzlemi Açık
100	1,00	0,60
70	0,70	0,10
50	0,15	0,10
20	0,05	0,05

Deneysel yöntemler kullanılarak Mitri ve arkadaşları (1994) tarafından kullanılması önerilen bağıntı ise,

$$\alpha = \frac{1 - \cos(\pi * RMR / 100)}{2} \quad (2.13)$$

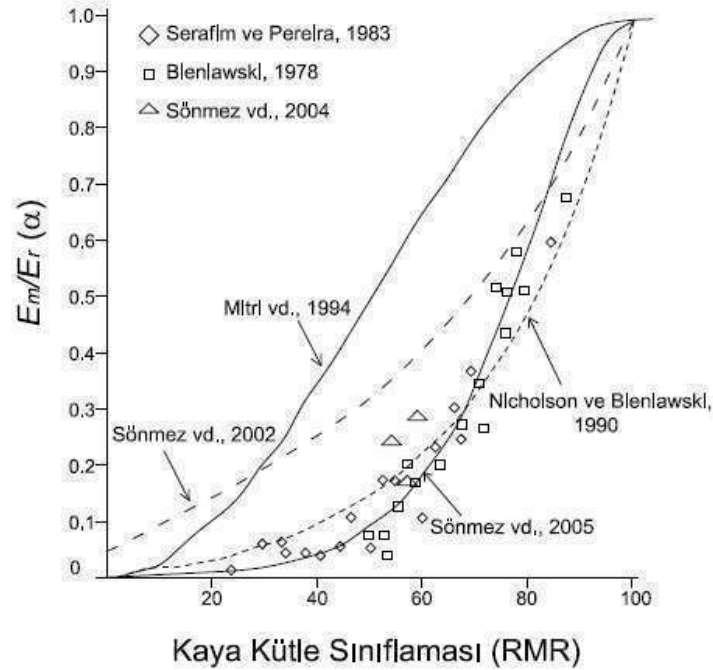
şeklindedir.

Hoek ve Diederichs (2005) tarafından önerilen bağıntıda α ve GSI sınıflaması arasındaki ilişki gösterilmektedir. Genel olarak tunel ve patlatma mühendisliğinde kullanılan bu bağıntıda oluşacak deplasmanların miktarına bağlı olarak 0 ve 1 arasında değişen etki katsayısı (D) kullanılmaktadır.

$$\alpha = (0.02 + \frac{1 - D / 2}{1 + e^{((60 + 15D - GSI) / 11)}}) \quad (2.14)$$

Yukarıda ki bağıntıda, patlama ve göçmede oluşacak zararların minimum olması durumu için D=0 ve tersi durum için D=1 olarak seçilebilir.

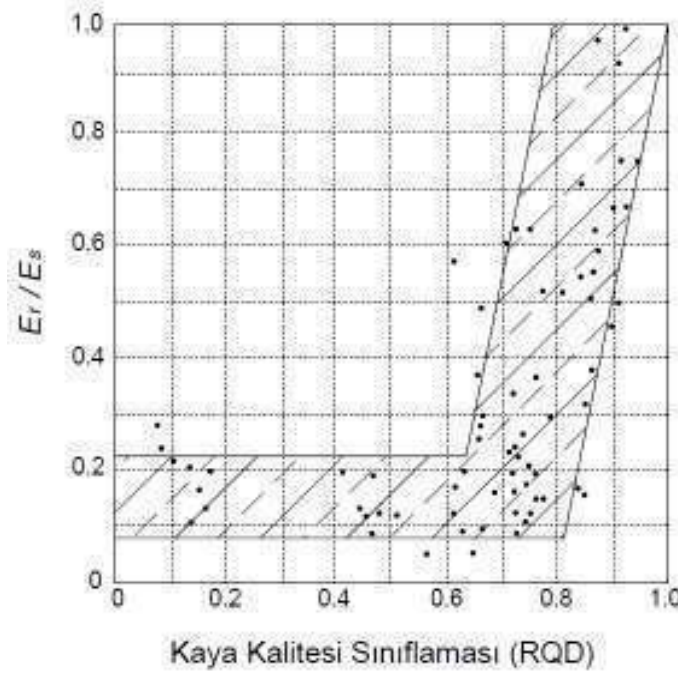
Sönmez vd. (2005)'nın değişik kaya numuneleri üzerinde yaptığı deneyler sonucunda, RMR sınıflaması değeri ve α katsayısı arasında ilişkiyi değerlendirmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : RMR- α ilişkisi (Sönmez vd., 2005).

Grovak numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonucunda yapılan değerlendirmede, düşük RMR değerleri için çok düşük α katsayılarının alınabileceği anlaşılmaktadır.

Deere (1967), yerinde yapılan sismik deneylerle elde edilen elastisite modülü (E_s) ve yükleme deneyleri ile elde edilen elastisite modülü (E_m) arasında RQD değerine bağlı bir ilişki olduğunu savunmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Sismik ve statik elastisite modülü ilişkisi (Hunt, 2005).

Sahada yapılan sismik deneylerde, düşük gerilme seviyeleri ve kısa dalga hareketleri nedeniyle hesaplanan elastisite modülleri gerçek değerlerin üzerinde olabilmektedir. RQD<%60 olan zayıf dayanımlı kayalarda bu fark daha da büyük olmaktadır (Hunt, 2005).

Sismik deneylerle elde edilen elastisite modüllerinin, sahada yapılan presyometre deneyleri ile kıyaslanması için Durgunoğlu ve Yılmaz (2007) tarafından İstanbul'un çeşitli bölgelerinde yer alan grovak birimler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. İncelenen birimlerin sismik ve presyometre deneyi ile hesaplanan kayma modülleri (G) arasındaki ilişki irdelenmiştir. Her birim için sabit poisson oranı (μ) kabul edildiğinde, aynı ilişkinin elastisite modülleri için de geçerli olacağı bilinmektedir.

Yapılan araştırmada, sondaj çalışmaları sırasında yapılan sismik deneyler sonucu elde edilen elastisite modüllerinin dinamik elastisite modülü olduğu, temel ve iksa tasarımı aşamasında kullanılamayacağı anlaşılmaktadır. Sismik deneylerle elde edilen elastisite modülü değerleri ayrılmış grovak birimler için 30 – 50 kat azaltılarak kullanılmalıdır.

Çizelge 2.8 : Sismik ve statik elastisite modülü ilişkisi (Durgunoğlu ve Yılmaz, 2007)

Birim Özelliği	Modül Oranı (E_s/E_m)	Referans
Gevşek Orta Sıkı Kum ($D_r=30-75$)	10 - 20	Seed ve Idriss, 1970
Sıkı Kum ($D_r=75-100$)	20 - 25	Seed Idriss (1970)
Çimentolu Kum	30 - 50	Wang, 1986
Yumuşak Kaya	30 – 50	Durgunoğlu ve Yılmaz (2007)
Sert Kaya	50 - 200	

İstanbul grovağında birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmış ve birimin mühendislik parametreleri araştırılmıştır. Özür (1975), Mahmutoglu (1989), Eriş (1999), Dalgıç (2002) ve Yüksel (2005) gibi araştırmacılar tarafından yapılan bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Çizelge 2.9).

Çizelge 2.9 : Trakya formasyonunda yapılan laboratuvar deneyleri sonuçları.

Lokasyon	RMR	σ_c (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)	E_r (MPa)	Kaynak
Beşiktaş	-	90	16.5	49	23000	Mahmutoglu (1985)
Levent	-	98	12	58	21500	
İstanbul	-	20	4.5	30-45	15000	Sağlam (1985)
Haliç	-	35	7	52	23000	Nazlı (1990)
Haliç	-	60	10	45	35000	
İstanbul	25	30	-	-	-	Eriş (1999)
İstanbul	40	70	-	-	-	
İstanbul	-	55	8.5	48	13000	Dalgıç (2002)
Kağıthane	38	21,7	4	46	3750	Karagöz (2006)

Grovak birimlerin çok çatlaklı, ayrılmış ve diğer birimlerle içiçe olması bu birimler için net parametrelerin atanmasını zor kılmaktadır. Laboratuvar ortamında elde edilen deney sonuçlarının, gerçek mukavemet parametrelerinin çok üzerinde olduğu, gerçekte ayrışma, su ve zaman etkisiyle birimlerin daha düşük mukavemet parametrelerine sahip olduğu unutulmamalıdır.

Kaya mekaniğinde polilit olarak adlandırılan, çok parçalı ortamların süreksizlikleri arasında herhangi bir dolgu malzemesi yok ise, parçadan parçaya aktırılan kuvvetin

homojen olduğu düşünölebilir. Ancak bu durumda bile, aktarılan kuvvet belirli noktalarda yoğunlaşarak gerilme yığılmasına sebep olmakta ve bu durum monolit adı verilen tek parçalı sistemlere göre polilit sistemin daha düşük mukavemet göstermesine ve daha kolay şekil değıştirerek plastikleşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca süreksizliklerdeki pürüzlölüğün türü ve pürüzlölüklerin, süreksizliklerdeki ince malzeme daneleri boyutlarına oranı sistemin kayma gerilmelerinin aktarılmasında büyük rol oynamaktadır. Ayrışmış süreksizlik yüzeyleri, kayacın mukavemet parametrelerinin laboratuarda kütle içinden alınan numuneden elde edilen mukavemet parametrelerinden düşük olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, laboratuvar deneyi sonuçlarının tek başına kayaya aktarılamayacağı ve kayanın her yeni ortam ve her yeni proje için mukavemet parametrelerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekliliğı ortaya çıkmaktadır (Vardar, 2000).

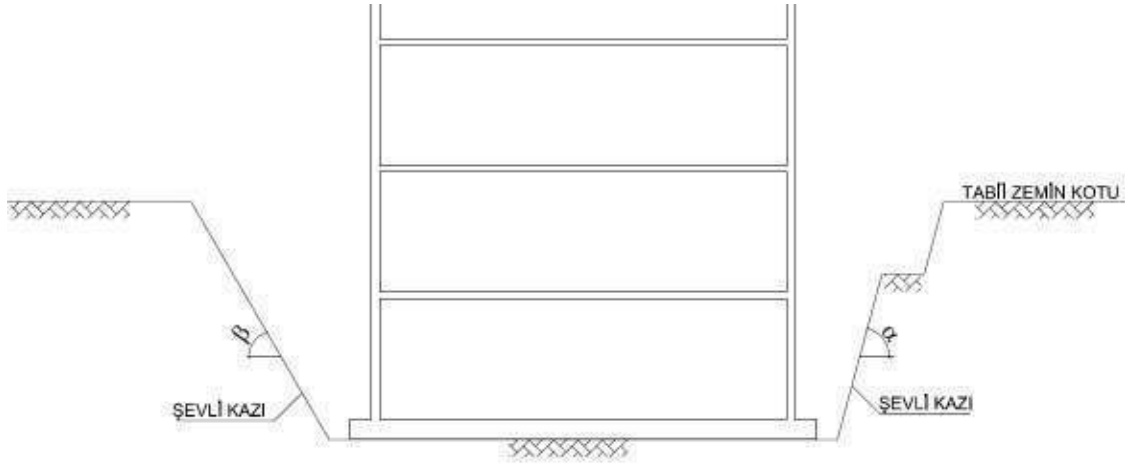
3. DERİN KAZI DESTEKLEME SİSTEMLERİ

3.1 Derin Kazı Yöntemleri

Artan nüfus ve yoğun yapılaşma sebebiyle özellikle büyük kentlerde derin temel ve dolayısıyla derin kazı iksa sistemlerine olan talep hızla artmaktadır. Derin kazı ve temel inşaatı; istinat yapısının inşasını, iksa elemanlarının oluşturulmasını, kazının yapılmasını, bina bodrum ve döşemelerinin inşasını kapsayan genel bir ifadedir. Birçok yöntemle oluşturulan derin kazı ve destekleme sistemlerinin seçiminde, mimari detaylar, saha jeolojisi, çevre ve iklim koşulları, malzeme ve ekipman varlığı, genel jeoloji ve bütçe konuları birlikte ele alınmalı ve tüm koşullara uygun seçenekler oluşturulmalıdır. Açık kazı, içten iksalı kazı, ada kazı yöntemi, ankrajlı kazı, yukarıdan aşağıya (*top-down*) ve anolu kazı en çok tercih edilen derin kazı iksa yöntemleridir. Kazı yönteminin yanında iksa sisteminin seçimi de; inşaat bütçesi, bitişik yapıların varlığı, malzeme ve ekipman varlığı, yapı türü ve komşu temellerin özelliği gibi bir çok faktörden etkilenmektedir. Bu bölümde çeşitli derin kazı ve iksa sistemleri hakkında genel bilgiler verilecektir.

3.1.1 Açık kazı yöntemi (*Full open cut method*)

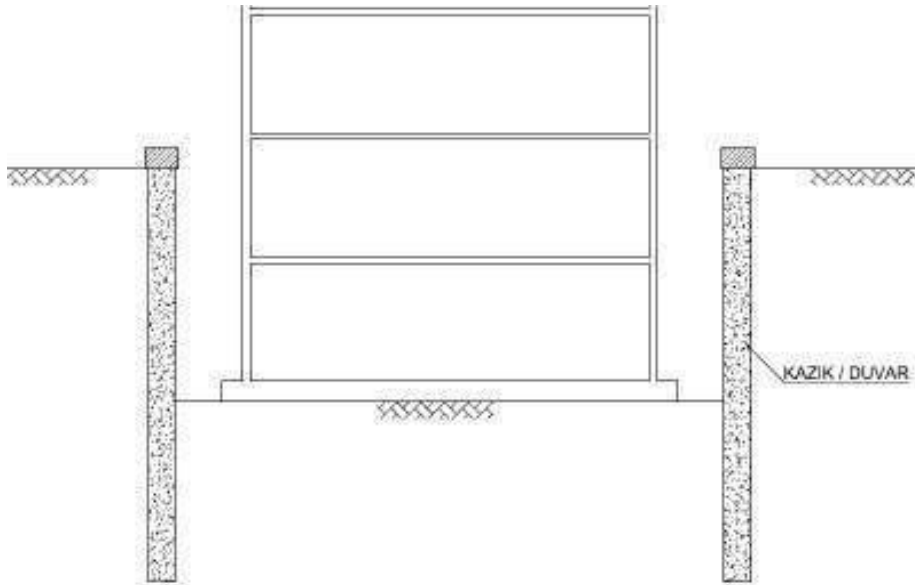
Açık kazı yöntemi, en çok tercih edilen kazı yöntemidir. Eğimli açık kazı (*Sloped open cut*) ve Konsol iksalı (*Cantilever*) olarak farklı tiplerde uygulanabilmektedir. Eğimli açık kazı yönteminde (Şekil 3.1) kazı için herhangi bir iksa elemanı veya istinat yapısı gerekmemektedir. İnşaat alanı belirli bir eğimle istenilen derinliğe kadar kazılır. Kazı derinliği çok fazla değilse, kazıyı engelleyecek herhangi bir elemanın olmaması sebebiyle hızlı ve ekonomiktir. Bununla birlikte kazının eğimli açılması, kazıdan çıkan malzemenin gereğinden fazla olmasına yol açmaktadır. Ayrıca üstyapı inşaatının tamamlanmasından sonra binayı desteklemesi için kazı çukuruna geri doldurulacak malzemenin de artacağı dikkate alınır, açık kazı yönteminin her projede ekonomik sonuçlar doğurmayacağı anlaşılmaktadır. Trakya formasyonunun jeolojik yapısının uygunluğu nedeniyle, bu formasyonlarda açık kazı yöntemi sıkça uygulanmaktadır.



Şekil 3.1 : Eğimli açık kazı yöntemi (*Slope open cut*, Ou, 2006).

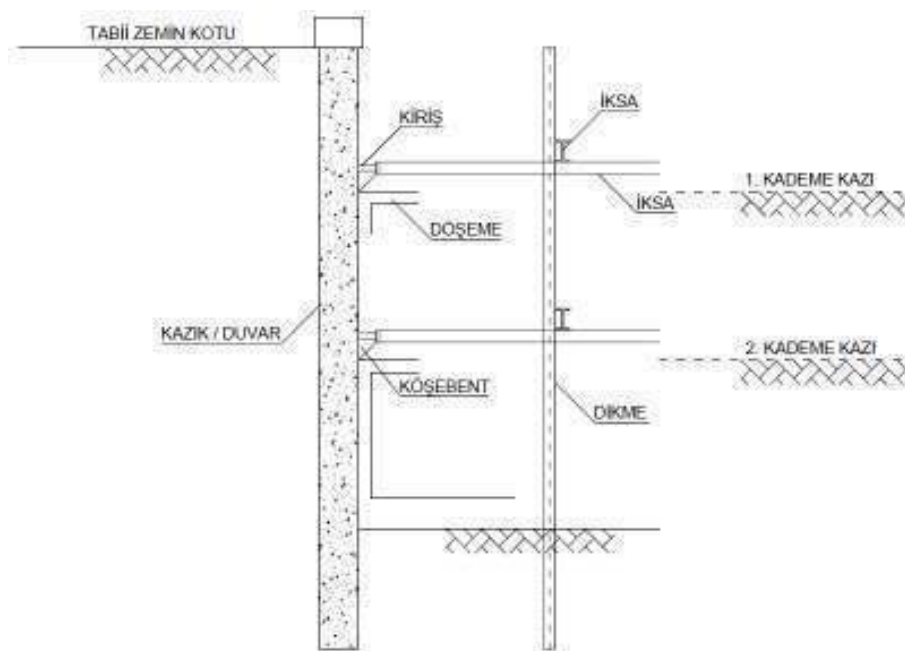
Eğimli açılan kazı çukurundan çıkan malzeme miktarının azaltılması için yatay iksa elemanlarına gerek olmadan belirli derinliklere kadar konsol çalışabilen düşey elemanlarla oluşturulan Konsol iksalı kazı yöntemi (Şekil 3.2) seçilir. Bu yöntem kazı yüksekliğinin nispeten az olduğu durumlarda tercih edilir. Seçilen düşey iksa elemanlarının rijitliği kazı güvenliğini sağlayacak tek etkidir.

Eğimli açık kazı ve konsol iksalı kazı yöntemleri, derin olmayan kazılarda diğer kazı yöntemlerine göre daha ekonomik sonuçlar doğurmaktadır. Bu iki yöntem arasındaki seçim ise analiz, tasarım ve değerlendirme sonucunda yapılmalıdır.



Şekil 3.2 : Konsol iksalı kazı yöntemi (*Cantilever method*).

Kazıdan dolayı oluşacak yatay toprak basıncının kazı aynası önüne yapılacak yatay iksa elemanları ile desteklenmesi yoluyla oluşturulan sistemler içten iksalı sistemlere örnek teşkil eder (Şekil 3.3). İçten iksalı kazı sistemleri iksa elemanı, göğüsleme kirişi, köşebent ve dikme gibi elemanlardan oluşur. Göğüsleme kirişleri toprak itkilerini yatay iksa elemanlarına aktarırken, köşebentler de kiriş açıklığını bölerek yatay eleman gereksinimini azaltmaktadır. Dikme elemanlar ise belirli aralıklarda oluşturularak yatay elemanların burkulma boyunu azaltılır. İçten iksalı kazılarda inşaat kademeleri ve iş planı önem kazanmaktadır.



Bu tür kazılar için önerilen imalat safhaları aşağıdaki gibi sıralanabilir,

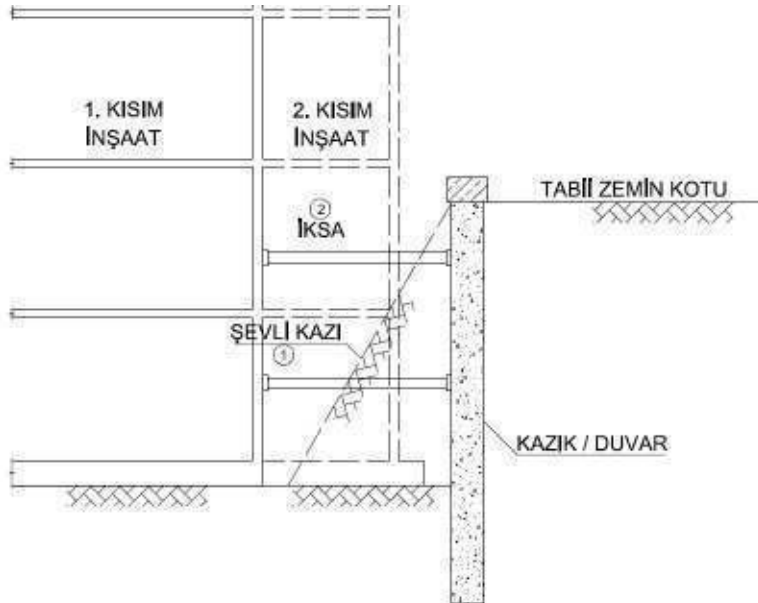
- i. Düşey iksa elemanları (kazık, diyafram duvar vb.) yapılır,
- ii. İlk kademe kazı yapılır,
- iii. Kazı çevresine kuşaklama kirişleri yapılır, yatay iksalarla birleştirilerek yük alması sağlanır,
- iv. Hedeflenen kazı derinliğine kadar 2. ve 3. maddeler tekrarlanır,
- v. Yapı temeli inşa edilir,
- vi. Temel üzerinde kalan iksa elemanları sökülür,
- vii. Yapı döşemesi yapılır,

viii. Tabii zemin kotuna kadar 6. ve 7. maddeler tekrarlanır. İnşaat sonunda kazı çukurunda kalan boşluklar doldurulur.

İçten iksalı kazı yönteminin en büyük avantajlarından biri, her derinlik ve genişlikteki kazıda uygulanabilir olmasıdır. Ancak kazı çukuru içerisinde yer alan yatay ve düşey elemanlar sebebiyle kazı işleri yavaş ve zor olmaktadır. Ayrıca parçalar halinde birleştirilen yatay elemanların eksantrisiteye yol açmayacak şekilde aynı hizada yerleştirilmesi, işçiliği zorlaştırması sebebiyle sistemin dezavantajlarındandır. İçten iksalı kazı yöntemi ülkemizde çok tercih edilmemektedir.

3.1.3 Ada kazı yöntemi (*Island excavation method*)

Bu yöntemde yatay toprak itkilerini almak üzere düşey ve yatay iksa elemanları birlikte kullanılır. Kazı alanının tamamının kazılması yerine, çekirdek kısmı kazılır ve düşey iksa elemanlarına yakın kısımlar topuk vazifesi görmek üzere şevli şekilde bırakılır. Binanın çekirdek kısmı yapıldıktan sonra şevli kısımlar alınarak düşey iksa elemanları ve bina arasında iksa elemanları oluşturulur. Binanın diğer kısımları yapılırken içten iksalar sırasıyla sökülür. Bu sistem içten iksalı kazı ve konsol kazı yönteminin birlikte kullanılması ile oluşturulur. Kazı yüksekliği fazla değilse tek sıra içten iksa kullanılarak tek kademede kazı yapılır. Kazı yüksekliği fazla ise içten iksalar kademeli şekilde atılır ve kazı kademeli yapılır (Şekil 3.4, Ou, 2006).



Şekil 3.4 : Ada kazı yöntemi.

Ada kazı yönteminin uygulanması için inşaat alanının yeterince büyük ve yapının derzli yapılmaya müsait olması gerekir. Kazı aynasında bırakılacak topuklar şev stabilitesi sorunu yaratmayacak şekilde şevlendirilmelidir. Kazı aynasında bırakılan yetersiz topuk kütlesi göçmeye neden olmasa bile yeterince pasif itki oluşturamayacağından büyük iksa deplasmanları ve yüzeysel oturmalara neden olabilir.

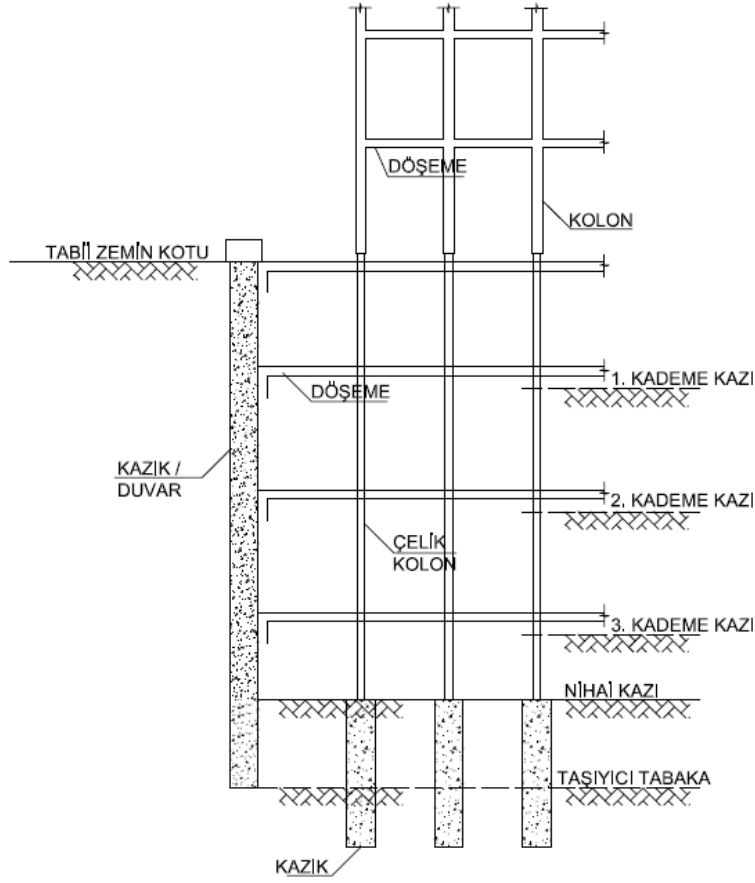
Bu yöntemin içten iksalı kazı yöntemine göre en büyük avantajı, daha az iksa elemanı, dolayısıyla daha az maliyet ve işçilik gerektirmesidir. Ayrıca geniş kazı çukurlarında içten iksa elemanlarının boyunun artacağı ve veriminin düşeceği dikkate alınırsa ada kazı yönteminin bu tür projelerde verimliliği daha da iyi anlaşılmaktadır. Yeterince iyi yapılmamış bina ve iksa elemanı bağlantıları bu sistemde kurulum ve söküm aşamasında sorun çıkmasına sebep olabilir. Ayrıca yeterince pasif direnç oluşturmayacak şekilde bırakılan topuk, aşırı deplasmanlara ve özellikle yumuşak zeminlerde göçmelere neden olabilir. Bu yöntem, hafriyat, iksa ve üstyapı işlerinin birlikte yürütülmesi gerekliliği sebebiyle pek tercih edilmemektedir.

3.1.4 Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi (*Top-down excavation method*)

Yeraltı yapılarında alışlagelmiş yöntem, yapının temelden başlayarak yukarı doğru yapılmasıdır. Şimdiye kadar anlatılan tüm kazı yöntemleri de, bu inşaat yöntemine dayalı yapıların yapılması için oluşturulmaktadır. Bu yöntemin tersine yukarıdan aşağıya kazı yönteminde yapının inşaatına yüzeyden başlanarak yer altına doğru inilir. Yukarıdan aşağıya kazı yönteminde kazı tamamlandığında yer altında yapılacak inşaat da tamamlanmaktadır. Kazı sırasında oluşacak yatay itkilerin tamamı kat döşemeleri tarafından taşınmaktadır. Bu yöntemde izlenmesi gereken yol aşağıda sıralandığı gibidir (Şekil 3.5).

- i. Düşey iksa elemanı (kazık, diyafram duvar vb.) inşa edilir,
- ii. Taban kazıkları yapılır ve üzerlerine gelecek çelik düşey iksalar oluşturulur,
- iii. 1. kademe kazı yapılır,
- iv. 1. kat döşemesi yapılır,
- v. 1. katın taşıyıcı sistemi yapılır,
- vi. 2. kademe kazı yapılır ve bu katın döşemesi yapılır,

- vii. Tasarlanan derinliğe kadar aynı işlemler tekrarlanır,
- viii. Temel tamamlanır.



Şekil 3.5 : Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi (Top down)

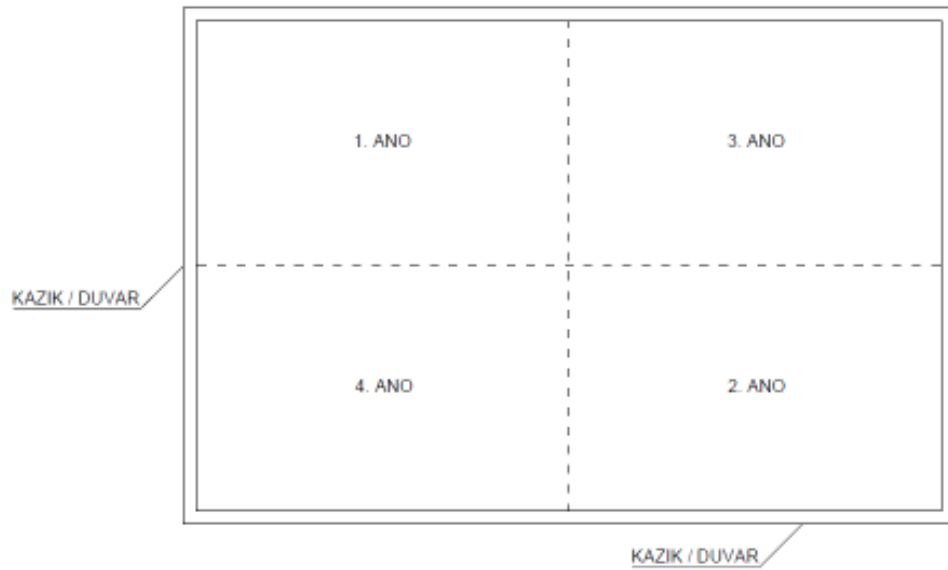
Diğer yöntemlere göre daha özel projeler için tercih edilen bu yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir.

- ✓ Taşıyıcı sistem, döşeme ve kazının aynı zamanda yapılması toplam inşaat süresini azaltmaktadır.
- ✓ Çelik iksa elemanlarına göre daha rijit olan döşemeler sayesinde güvenilir kazılar yapılmaktadır.
- ✓ Kat döşemelerinin rijit olması sebebiyle geniş açıklıklı, çok yönlü kullanıma açık alanlar elde edilebilmektedir.
- ✗ Diğer yöntemlere kıyasla bu yöntem daha pahalı olabilir.
- ✗ İnşaat sırasında aydınlatma ve havalandırma konularında zorluklar olabilir.

Yukarıdan aşağıya kazı yöntemi metro istasyonu gibi yer altı yapılarının inşasında sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem ülkemizde Ankara Metrosunun şehir merkezinde yer alan bazı kısımlarında başarıyla uygulanmıştır.

3.1.5 Anolu kazı yöntemi (*Zoned excavation*)

Derin kazılarda kazı aynasının açıklığı ne kadar fazla olursa, kazı aynasında oluşacak deplasman da o kadar fazla olacaktır. Zeminde oluşacak kemerlenme etkisi nedeniyle köşe bölgelerinde ve kısa kenarlarda diğer kenarlara göre daha az deplasman gözlenmektedir. Derin kazı sistemlerinde oluşacak deplasmanların azaltılması amacıyla özellikle geniş kazı çukurlarında kazının tamamının bir anda yapılması yerine, kazı alanı birkaç parçaya bölünür ve değişik zamanlarda kazı yapılır (Şekil 3.6). Böylece kazı aynasının boyutları ve dolayısıyla oluşacak deplasmanlar azaltılmış olur.



Şekil 3.6 : Anolu kazı yöntemi plan görünüşü.

3.1.6 Ankrajlı kazı yöntemi (*Anchored excavation*)

İçten iksalı kazılarda kullanılan yatay iksa elemanları yerine bu sistemde ankrajlar kullanılmaktadır. Ankrajlar öngermeli ve pasif olarak sınıflandırılmaktadır.

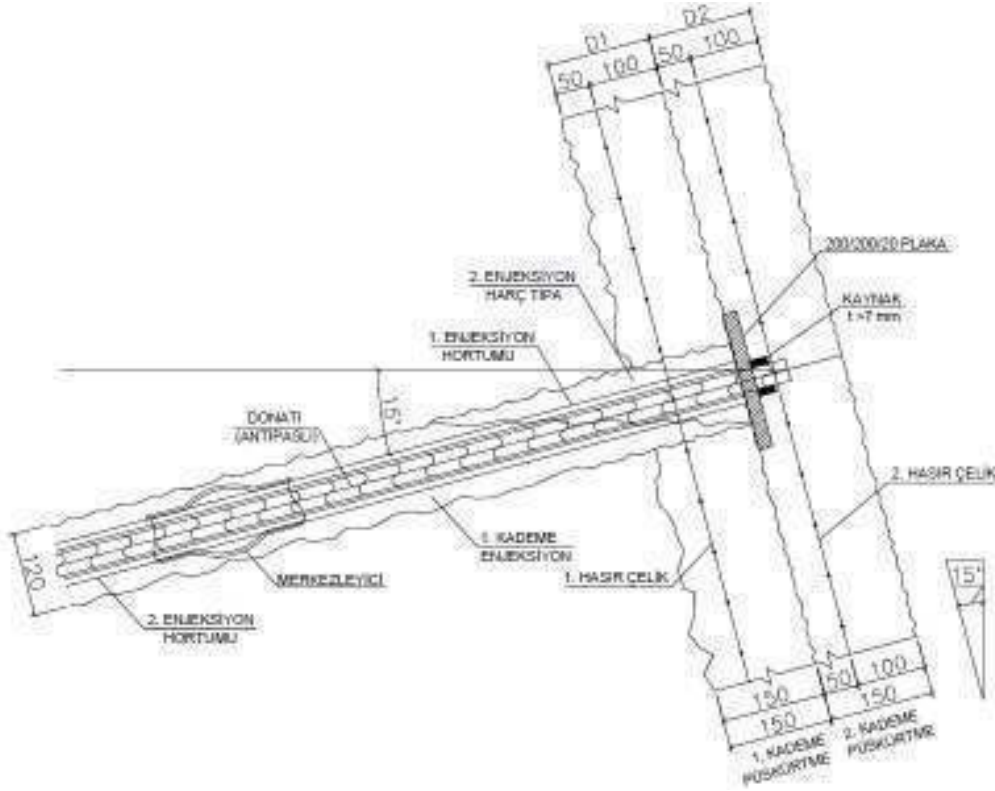
3.1.6.1 Pasif ankrajlı kazı yöntemi

Ankraj elemanlarına herhangi bir öngerme uygulanmayan bu yöntem zemin çivisi yöntemi diye de adlandırılmaktadır. Bu yöntemde öngermeli ankraj elemanları yerine

zemin hareketi vasıtasıyla yüklenmesi beklenen donatılar kullanılır. Öngermeli ankraj yöntemine göre derinliği daha az ve deplasman toleransının daha fazla olduğu derin kazılarda kullanılmaktadır. Zemin çivili iksalarda imalat akışı aşağıdaki gibidir,

- i. İlk kademe kazı aynası oluşturulduktan sonra yatay zemin çivisi delgisi yapılır,
- ii. Delikler içerisine projesinde belirtilen boy ve çaplarda donatılar yerleştirilir ve enjeksiyonlanır,
- iii. Kazı yüzeyine projesinde belirtilen ebat ve sayıda hasır çelikler yerleştirilir ve çivi kafalarına montajlanır,
- iv. Kazı aynası püskürtme beton (*shot-crete*) ile kaplanır,
- v. Alt kademe için aynı işlemler tekrarlanır.

Pasif ankrajlı iksa, yatay donatılar, hasır çelik, püskürtme beton, kafa plakası ve kuyu içi sarf malzemelerin birlikte kullanılması ile oluşmaktadır (Şekil 3.7).

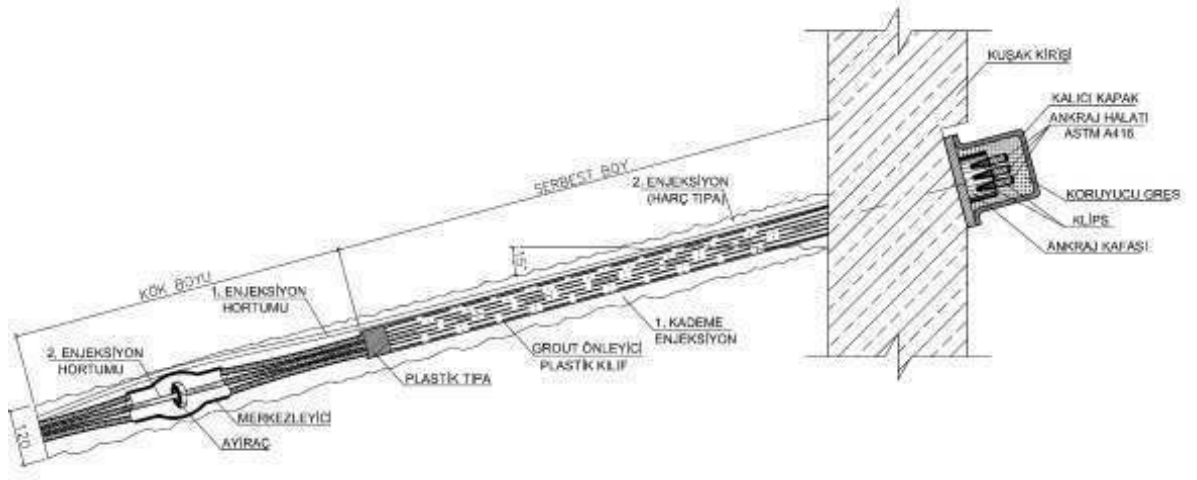


Şekil 3.7 : Pasif ankrajlı iksa elemanları.

3.1.6.2 Öngermeli ankrajlı kazı yöntemi

Bu yöntemde yatay toprak itkileri öngermeli ankrajlar ile karşılanır. Yatay toprak itkisini karşılayacak şekilde boyutlandırılan ankrajlar 3 kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım ankraj yüklerini alan kök kısmı, ikinci kısım yükleri kafa ve kök

arasında aktaran serbest kısım, üçüncü kısım ise kazı yüzeyinde yer alan ve iksa-ankraj bağlantısını yapan kafa kısmıdır (Şekil 3.8).

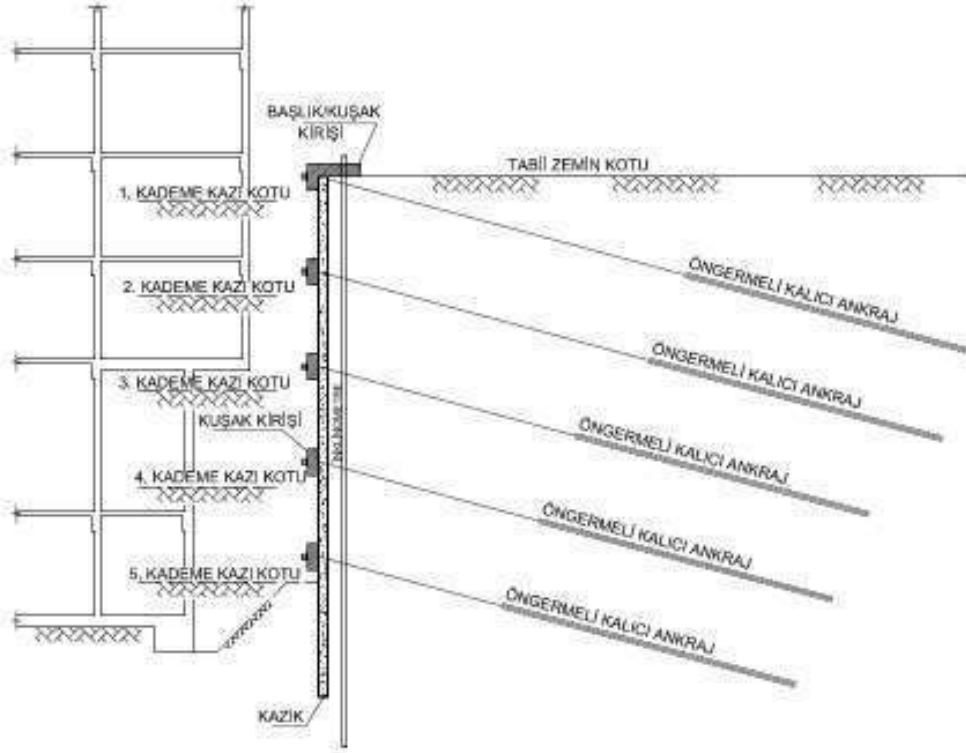


Şekil 3.8 : Öngermeli ankraj detayı.

Kademeli ankrajlı kazılarda izlenmesi gereken yol aşağıda sıralandığı gibidir (Şekil 3.9).

- i. 1. kademe kazı gerçekleştirilir,
- ii. Ankraj delgisi yapılır,
- iii. Ankraj halatı deliklere yerleştirilir,
- iv. Ankraj delikleri enjeksiyonlanır,
- v. Ankrajlara öngerme uygulanır ve istenilen yükte kilitlenir,
- vi. 2. kademe kazı yapılır,
- vii. Kazı derinliği boyunca 3., 4., 5. ve 6. maddeler tekrarlanır,
- viii. Yapı temeli inşa edilir,
- ix. Tabii zemin kotuna kadar kat döşemeleri yapılır ve geri kalan boşluklar doldurulur.

Ankrajlı kazı yönteminde yatay toprak itkileri ankrajlar vasıtasıyla taşınır. Ankrajlar ise yükleri, zemin-enjeksiyon arasındaki sürtünmeden kaynaklanan dayanım sayesinde taşıyabilmektedir. Dolayısıyla zemin dayanımı ve ankraj yükleri arasında doğrudan ilişki söz konusudur. İri daneli zeminlerde yüksek ankraj yükleri elde edilirken, ince daneli zeminlerde ankraj yükleri nispeten düşük kalmaktadır.



Şekil 3.9 : Öngermeli ankrajlı kazı yöntemi.

İri daneli zeminlerde özellikle yeraltı su seviyesi altında imalat yapılırken permeabilitenin yüksek olmasından kaynaklanan çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Ankraj deliklerinin su basıncı altında göçmesi ve su hareketi ile zeminin akması bu sorunların başta gelenlerindendir. Ankrajlı kazı yönteminin başlıca avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Kazı çukurunda herhangi bir elemanın olmaması sebebiyle inşaat işlerinde yüksek verimlilik sağlar,
- ✓ Kısa sürede yapılabilir,
- ✗ Zayıf zeminlerde uygulanması zordur,
- ✗ Yeraltı suyunun altında yapılan imalatlarda azami dikkat gerektirir,
- ✗ Yetersiz tasarımlarda kazı çevresinde büyük deplasmanlar oluşabilir.

Özellikle ankrajlı ve içten iksalı kazı yöntemlerinde yatay yükü taşıyan iksa elemanlarının bağlandığı düşey elemanlar vardır. Düşey destek sistemleri genel olarak kazı yapılmadan önce imal edilir ve kazı yapıldıkça yatay iksa elemanları ile desteklenir. Düşey destek sisteminin seçiminde yerel zemin koşulları, inşaat süreci ve önemi, komşu yapıların özellikleri, yatay iksa tipi ve proje maliyeti gibi birçok

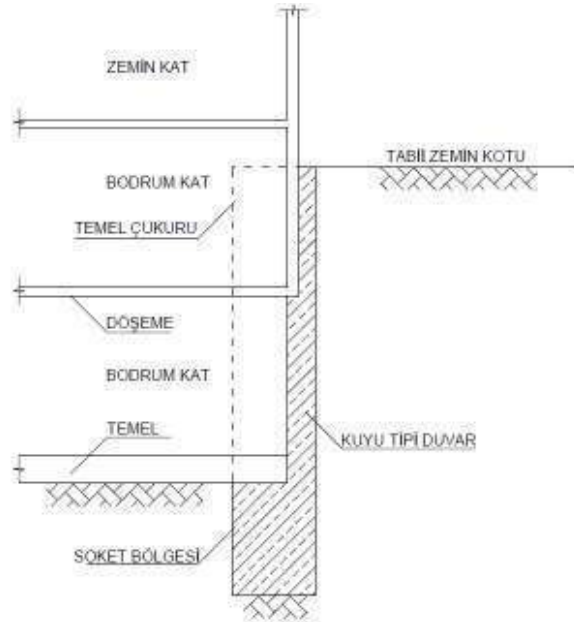
değişken rol almaktadır. İmalat kolaylığı, çabuk uygulanabilirliği ve bilinirliği sayesinde ankrajlı kazı yöntemi özellikle yoğun yerleşim bölgelerinde sıkça uygulanmaktadır. Trakya formasyonunun büyük kısmını oluşturan İstanbul boğazı çevresinde yapılan derin kazıların bir çoğu bu yöntemle yapılmaktadır.

3.2 Düşey Destek Sistemleri

Derin kazı iksa yöntemlerinin birçoğu, yatay ve düşey destek sistemlerinden oluşurlar. Yatay destek sistemleri ankraj veya içten iksa olurken, düşey destek sistemleri çeşitlilik göstermektedir.

3.2.1 Kuyu tipi betonarme duvarlar

Kuyu tipi betonarme duvarlar daha çok kendini tutabilen kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır. Kuyu perde imalatı, kazı çukuru çevresinde açılan yaklaşık (2.00 * 3.00) m² taban alanına sahip çukur içerisinde yapılır. Çukur kazı tabanına kadar kazılır ve genelde ahşap iksalarla desteklenir. Kazı tabanına ulaştıktan sonra çukur içerisine istenilen miktarda donatı yerleştirilir ve kalıp yapılarak beton dökülür (Şekil 3.10).



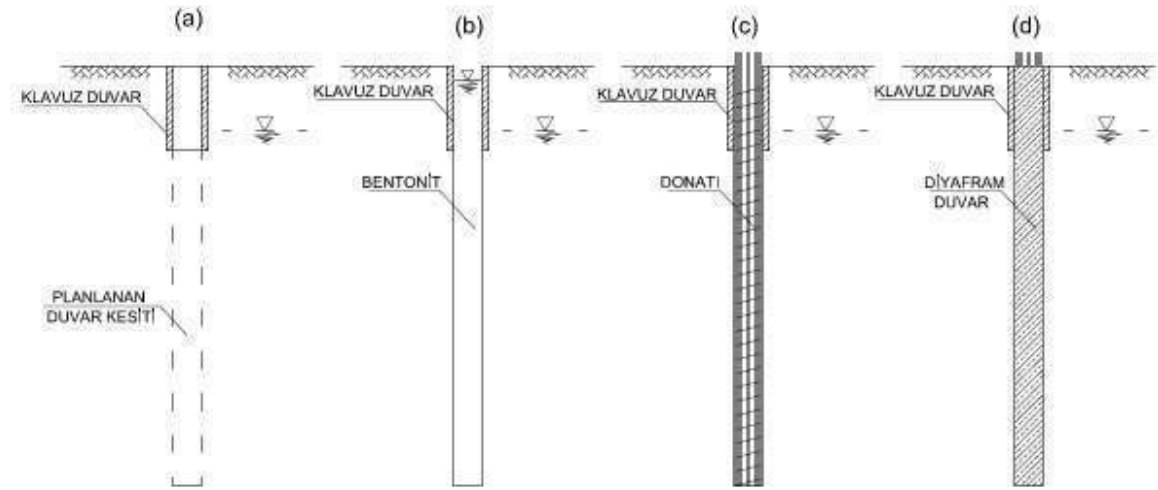
Şekil 3.10 : Kuyu tipi betonarme duvar tipik kesiti.

Kuyu perde imalatı, dar ve mevcut yapılar arasında yapılacak imalatlarda, makine ve ekipman çalışmasının zor olduğu durumlarda çok sık tercih edilmektedir. Mevcut

yapıların tam sınırından veya temelinin altından kuyu perde imalatının yapılabilmesi, bu imalatın en büyük tercih sebebidir. Ancak işçiliğinin zorluğu, su seviyesinin altında ve her zeminde kolaylıkla yapılamaması nedeniyle özel projeler dışında pek de tercih edilmemektedir.

3.2.2 Diyafram duvarlar

Diyafram duvar, ilk olarak 1950 yıllarında İtalya’da uygulanmış ve gelişen teknoloji ile tüm dünyada kullanılır hale gelmiştir. Özel kazı makineleriyle kazılan çukurların donatı ve betonla doldurulması sonucu istenilen derinlikte düşey duvarların elde edilmesi bu sistemin genel mantığıdır. Kazı esnasında çukurda oluşabilecek göçmelerin önlenmesi amacıyla çukur bentonit bulamacı ile doldurulur. Bu yüzden yöntemin diğer adı bulamaçlı hendektir (*Slurry walls*). Bu sistemde ilk kazı çukuru etrafında oluşacak dökülmeleri ve kazının düşeyliğini sağlamak amacıyla kazının her iki tarafına kılavuz duvarlar imal edilir (a). Kılavuz duvarların ortasından genişliği 2.50 m ile 3.30 m, kalınlığı 0.60 ile 1.20 m arasında değişen kepçelerle kazı yapılır. Kazıdan çıkan malzemenin yerine, yıkılmayı önlemek amacıyla bentonit bulamacı yerleştirilir (b). Kazı bittikten sonra hazırlanan donatı kazı çukuruna yerleştirilir (c). Tremi kullanılarak kazı tabanından itibaren beton dökülür (d) (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Diyafram duvar imalatı.

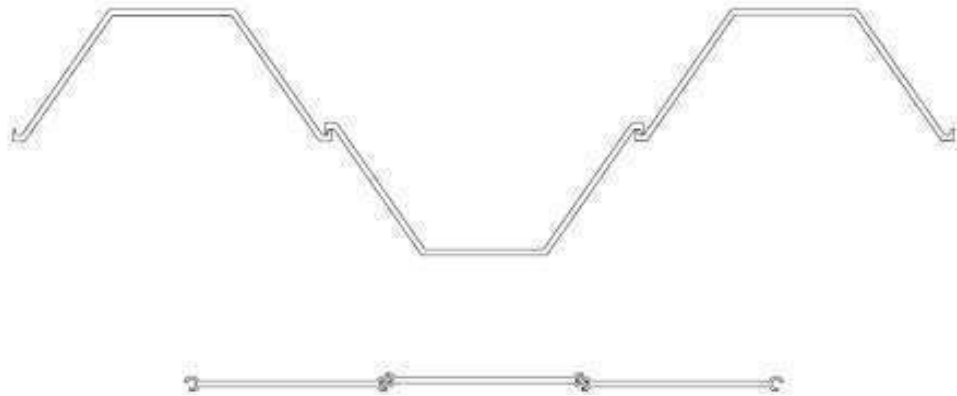
Çukur dışına çıkan bulamaç malzeme tekrar kullanılmak üzere toplanır. Anolar halinde yapılan kazıların birleşim noktalarında sızdırmazlığı önlemek ve yük aktarımını sağlamak amacıyla özel borular veya plakalar kullanılır. Geçirimsizlik ve perde görevini bir arada sağlayan diyafram duvarlar, konsol olarak çalıştıkları gibi

iksa derinliğinin artmasıyla birlikte yatay elemanlarla da desteklenebilirler. Diyafram duvarların avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ou, 2006).

- ✓ Geçici veya kalıcı iksa elemanı olarak kullanılabilirler,
- ✓ Sızdırmazlık özellikleri yüksektir,
- ✓ Diğer yöntemler göre daha derin duvarlar oluşturulabilir,
- ✓ Kesit genişliğinden fazla kazı yapmayı gerektirmez,
- ✓ İmalat sırasında oluşacak gürültü ve titreşim minimumdur,
- ✓ Üst yapı için bodrum perdesi olarak kullanılabilirler,
- ✗ Büyük ve pahalı ekipmanlar gerektirir,
- ✗ Uzun zaman ve yüksek maliyet gerektirir,
- ✗ Derin kazılarda kazının düşeyliğini sağlamak zor olabilir,
- ✗ Çakıl ve kaba malzeme içeren zeminlerde yapılması zordur.

3.2.3 Palplanş duvarlar

Hazır elemanların zemine çakılması ile oluşturulan iksa sistemidir. Palplanşlar zemine titreşim veya darbe yoluyla çakılırlar. Birbirleri ile kesişecek şekilde çakılan palplanşlar kesişim noktalarında kilitlenerek kazı aynasına paralel yönde sürekli bir perde oluştururlar (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Palplanşlı duvar görüntüsü.

Palplanşlar genel olarak ahşap, beton ve çelik malzemeden üretilirler. Genellikle çelik olarak tercih edilen palplanşların genişliklerinin uzunlukları yanında çok küçük

olması sebebiyle bu elemanlar çok narin yapıdadırlar. Kesit mukavemetlerinin artırılması amacıyla U, Z, Y ve T gibi çeşitli şekillerde üretilmektedirler. Kazı derinliğine ve yatay yüklere bağlı olarak konsol ve yatay desteklerle birlikte çalışabilirler. Palplanş duvarların avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ou, 2006).

- ✓ Kilitlemeler iyi yapıldığında yüksek sızdırmazlık sağlanabilir,
- ✓ Tekrar kullanılabilirler,
- ✓ Daneli zeminlerde çakma sırasında istenmeyen oturmalar oluşabilir,
- ✗ Katı ve sıkı zeminlerde çakma işlemi zordur,
- ✗ Suyu doymuş kaba daneli zeminlerde kazı tabanında kaynama ve palplanşların devrilme riski fazladır. Çakma boyunun uzun tutulması gerekir.

3.2.4 Kazıklı perdeler

Bu yöntemde istinat yapısı olarak, beton kazıklar kullanılır. Beton kazıklı istinat perdeleri daha çok yüksekliğin fazla olduğu iksa kazılarında tercih edilirler. Kazık çapları genelde 25 ile 200 cm arasında değişmektedir. Zemine çakılarak veya yerinde dökme yöntemle oluşturulan kazıklar, zemin koşulları, yatay yükler ve sızma problemi dikkate alınarak belirli aralıklarla veya kesişecek şekilde oluşturulurlar.

3.2.4.1 Aralıklı kazıklı perde

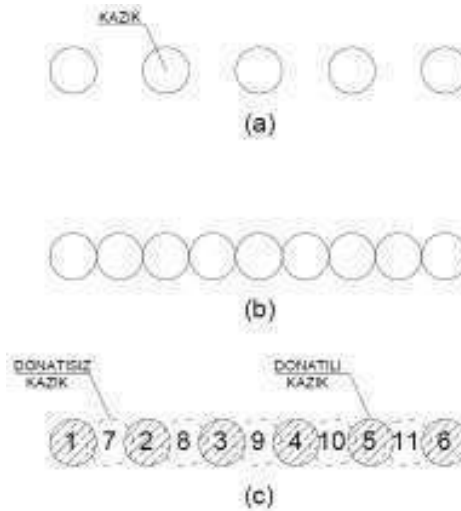
Mühendislik parametre değerleri yüksek olan zeminlerde uygulanır. Bu yöntemde kazıklar yatayda belirli aralıklarla oluşturulur (Şekil 3.13.a). Kazık aralıkları, arkadaki zeminin akmayacağı şekilde seçilir. İksa yüzeyinde oluşacak su hareketleri bu yöntemde engellenemez.

3.2.4.2 Teğet kazıklı perde

Yeraltı su hareketinin yüksek olduğu iksa yüzeylerinde, sızmaya ve noktasal dökülmelere karşı uygulanır. Kazıklar birbirlerine teğet şekilde oluşturulur (Şekil 3.13.b). Düşey ekseninde oluşacak sapmalardan ve yüksek su hareketlerinden kaynaklanan sızmalardan dolayı teğet kazıklar arkasına sızdırmazlık amaçlı jet enjeksiyonu da yapılabilir. Son yıllarda gelişen yeni teknolojiler sayesinde bu yöntem bir kazık bir jet grouting kolonu şeklinde de uygulanmaktadır.

3.2.4.3 Kesişen kazıklı perde

Kazı aynasında oluşacak sızma ve noktasal oyulmaların önlenmesi amacıyla daha çok düşük mühendislik parametrelerine sahip zeminlerde uygulanır. Kazıklar bir donatılı bir donatısız şekilde imal edilir (Şekil 3.13.c). Önce yapılan donatısız kazıklar sonra yapılacak donatılı kazıkların delgisi sırasında bir miktar kesilir. Donatısız kazıklar jet grouting yöntemiyle de oluşturulabilir. Bu yöntemde çakma kazıklar kullanılamaz.



Şekil 3.13 : Kazıklı perde görüntüsü (Ou, 2006).

Kazıklı perde yönteminin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Uygun kazık boyları seçilebilir ve kolay uygulanabilir,
- ✓ Palplanş duvarlara göre daha yüksek rijitliğe sahiptirler,
- ✓ Her zeminde değişik yöntemler kullanılarak oluşturulabilirler,
- ✓ Kolay ve hızlı imal edilirler,
- ✗ Tekrar kullanılamazlar,
- ✗ İmalat sırasında oluşabilecek süreksizliklerin kontrolü zordur.

Çizelge 3.1, çeşitli düşey destek sistemlerinin değişik koşullar ve özellikler altında karşılaştırmasını içermektedir (Ou, 2006).

Çizelge 3.1 : Çeşitli destek sistemlerinin karşılaştırılması (Ou,2006)

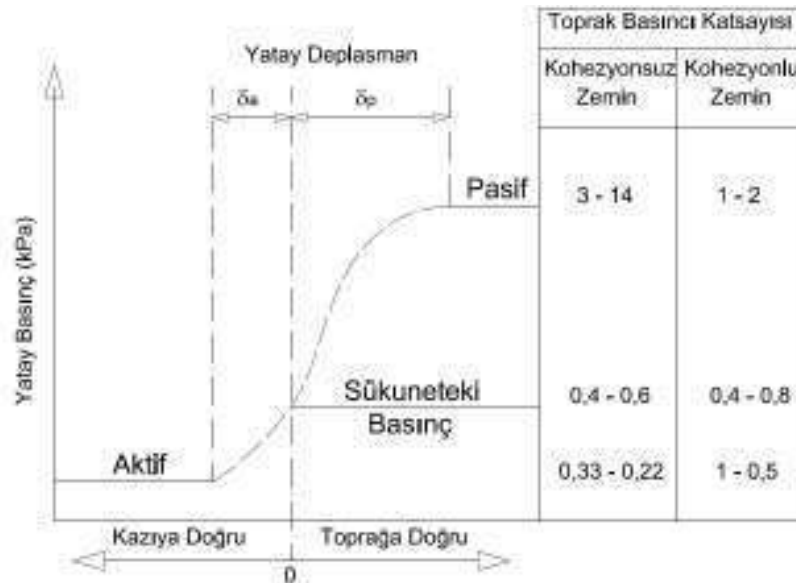
Destek Tipi	Zemin Cinsi				Sızdırmazlık ve Rijitlik		İnşaa Şartları				Kazı Derinliği	İnşaa Süreci	Bütçe
	Yumuşak Kil	Yumuşak Kaya	Kum	Çakıllı Zemin	Sızdırmazlık	Rijitlik	Gürültü ve Titreşim	Atık Malzeme	Yüzey Oturması	Yer altı Engelleri			
Kazık	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Palplanş	o	✗	✓	✗	o	✗	✗ ⁽¹⁾	✓	✗	o	✗	✓	✓
Diyafram Duvar	✓	✗	✓	o	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗

- ⁽¹⁾ Çakma yerine zemine sürme (titreşimle itme) yöntemi seçilirse gürültü azalır.
- ✓ Uygun
- o Kabul edilebilir
- ✗ Uygun değil

4. YANAL TOPRAK BASINÇLARI

Yanal toprak basıncı, istif halinde bulunan zemin danelerinin, kazı, büzülme ve genişleme gibi hareketlere zorlanması sonucu oluşan ve düşey toprak basıncına bağlı bir gerilme çeşididir. İksa sistemlerinde yapılan stabilite tahkiklerinin tümü çeşitli yük kabulleri altında gerçekleştirilir. Derin kazı, tunnel, maden havzaları ve diğer gömülü yapılar, çeşitli yanal yük kabullerine dayandırılarak tasarlanır ve inşa edilir (Bowles, 1996). Tasarım aşamasında yapılacak yanlış yük kabulleri, güvensiz veya ekonomik olmayan çözümler doğurabilir. İksa sistemleri için kabul edilecek yanal yükler, zemin özellikleri, seçilen iksa tipi, kazı güvenliği ve önemi, iksa amacı, deplasman toleransı gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Toprak basınçları genel olarak, Mohr kırılma zarfları olarak tanımlanan “Plastik Denge Yöntemi” kullanılarak tahmin edilir.

Yatay toprak basınçları harekete bağlı oluşur. Kazı aynası arkasında herhangi bir hareketin olmadığı durumdaki yatay toprak basıncı referans basınç alındığında, kazı aynasındaki hareket, kazı içine doğru olursa zeminde gevşeme olacak ve toprak itkisi azalacaktır. Hareketin ters tarafa olması ise zeminde sıkışmaya ve toprak itkisinin artmasına sebep olacaktır (Şekil 4.1).

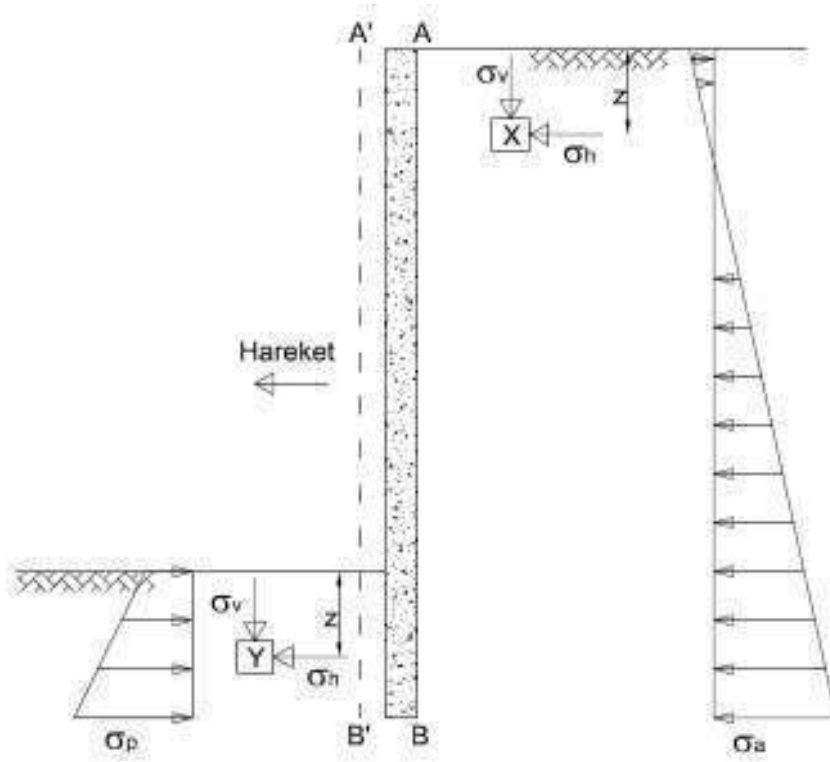


Şekil 4.1 : Yatay toprak basıncı katsayıları ve oluşumu (Bowles, 1996).

4.1 Sükunetteki Toprak Basıncı

Kazı aynası arkasında herhangi bir noktada yer alan hareketsiz birimin üzerindeki etkili yanal gerilme değeri sükunetteki toprak basıncı olarak tariflenir. İksa aynası arkasında ve z derinliğindeki, hareketin olmadığı herhangi bir noktada kayma gerilmesi oluşmayacaktır (Şekil 4.2). Bu noktada yatay gerilme değeri (σ_h') düşey gerilme değerinin (σ_v') bir oranı (K_0) ile ifade edilebilir.

$$\sigma_h' = K_0 \sigma_v' \quad (4.1)$$



Şekil 4.2 : Yatay toprak basıncının oluşumu (Ou, 2006).

Kohezyonsuz zeminlerde, ϕ kayma mukavemeti açısı olmak üzere,

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

bağıntısı kabul görmektedir (Jaky, 1944). Aşırı konsolide zeminlerde bu değerin,

$$K_{0,OC} = K_{0,NC} (AKO)^\alpha \quad (4.3)$$

aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ve bir katsayıya (α) bağlı olduğu belirlenmiştir (Alpan ve Schmidt, 1967). α katsayısı plastisite indeksine (PI) bağlı olarak değişmekte ve genel olarak

$$\alpha = \sin(\phi) \quad (4.4)$$

kabul edilebilmektedir. Genel olarak normal konsolide zeminlerde formül 4.2 ile hesaplanan değerler tatmin edici olmakla beraber, aşırı konsolide zeminlerde formül 4.3 ile hesaplanan değerler çok doğru olmamaktadır. Sükunetteki toprak basıncı, daha çok deplasman yapmayan rijit istinat yapılarının tasarımında kullanılır. Deplasman toleransı olan ankrajlı iksa gibi esnek iksa sistemlerinde genelde kullanılmaz.

4.2 Aktif ve Pasif Toprak Basınçları

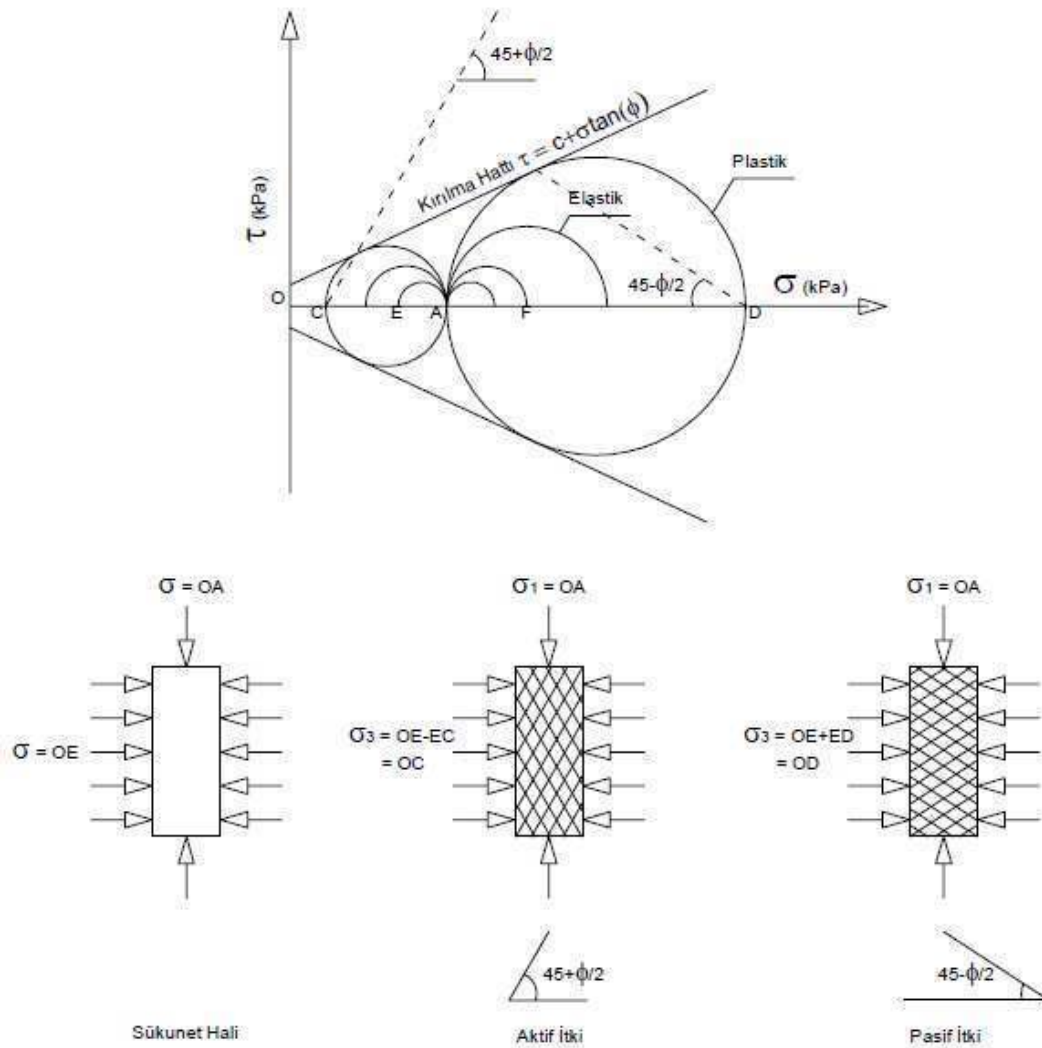
Karmaşık teorik analizlere bağlı olarak elde edilen aktif ve pasif toprak itkileri, birkaç temel faktöre bağlı olarak basitleştirilebilir.

- i. İksanın hareketi (dönme veya ötelenme),
- ii. İksanın rijitliği,
- iii. Zeminin rijitliği ve mukavemet parametreleri,
- iv. Zeminde oluşan yükleme veya öngerme,
- v. Zemin ve iksa arasındaki sürtünme.

Aktif ve pasif toprak itkilerinin hesabında genel olarak Coulomb (1776) tarafından geliştirilen “Coulomb Teorisi” ve Rankine (1857) tarafından geliştirilen “Rankine Teorisi” kullanılmaktadır. Bu iki teori, istinat yapılarına gelecek itkileri “Plastik Denge Teorisi”ni kullanarak hesaplamaktadır. Plastik denge teorisi Mohr kırılma zarfları ile açıklanabilir (Şekil 4.3).

Şekilde, A noktasından başlayıp kırılma hattına teğet olan daireler genel olarak düzlemsel plastik denge durumunu temsil etmektedir. EA veya AF noktalarından geçen daireler sükunetteki toprak basıncını (K_0), AE ve AC noktaları arasından geçen daireler aktif toprak basıncını (K_a) ve AD noktasından geçen daire pasif toprak

basıncını (K_p) temsil etmektedir. AC ve AD noktaları dışından geçen daireler göçme durumunu temsil etmektedir.



Şekil 4.3 : Plastik denge teorisinin oluşumu.

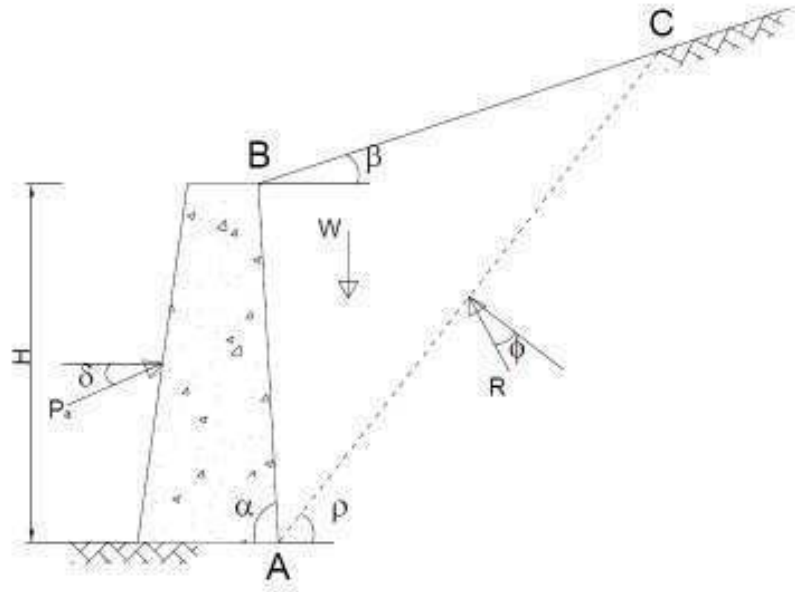
4.2.1 Coulomb teorisine göre aktif ve pasif toprak basınçları

Coulomb (1776) tarafından geliştirilen bu teoremin genel prensipleri aşağıdaki gibi sıralanabilir,

- i. Zemin izotropik ve homojendir,
- ii. Kopma yüzeyi düzlemseldir. Hesapları kolaylaştırmak için böyle kabul edilmiştir,
- iii. Kaydırıcı kuvvetler kayma düzlemi boyunca düzgün yayılıdır,
- iv. Kayan kütle rijit yapıdadır,

- v. Duvar ve kayan kütle arasında sürtünme vardır. Bu sürtünme $\delta=\tan(\phi)$ olarak kabul edilir,
- vi. Göçme olayı düzlemseldir. Üçüncü boyutta sonsuz uzunluğa sahip kütlelerin birim genişliği irdelenir.

Coulomb tarafından geliştirilen bu teoride kohezyonsuz zeminler ele alınmıştır. Arkasında belirli bir açığa sahip dolgu bulunan eğik yüzeyli bir istinatın üzerine etkiyen yatay basınçlar Şekil 4.4'te irdelenmiştir.



Şekil 4.4 : Coulomb göçme mekanizmasının oluşumu (Bowles, 1996).

Duvar arkasındaki kamanın dengede olabilmesi için üzerine gelecek kuvvetler denk olmalıdır. ABC kaması, kamanın ağırlığı (W), zemin ve duvar arasındaki itki (P_a) ve kayma düzlemi üzerinde oluşan reaksiyon (R) altında dengededir. Bu koşullar altında, Şekil 4.4'ten faydalanılarak aktif toprak basıncı katsayısı,

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.5)$$

bağıntısı kullanılarak ve pasif toprak basıncı katsayısı,

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.6)$$

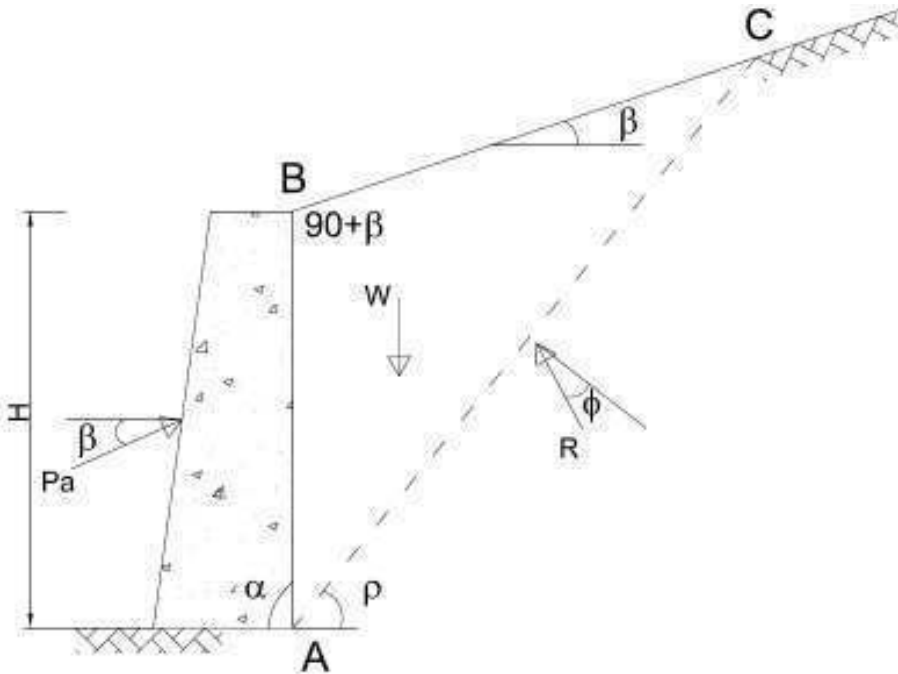
bağıntısından hesaplanmaktadır. Coulomb teorisi aktif ve pasif toprak basınçlarını sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

$$P_a = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.7)$$

$$P_p = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.8)$$

4.2.2 Rankine teorisine göre aktif ve pasif toprak basınçları

Rankine (1857) tarafından geliştirilen bu teori, plastik denge koşullarında ve Coulomb teorisinde yapılan kabuller altında geçerlidir. Coulomb teorisinden farkı, duvar arka yüzeyinin dik olması ve duvar-zemin arasında sürtünmeyi ihmal etmesidir. Rankine, duvarda hareket olmadığı sürece duvarın ön ve arka yüzündeki toprak itkisi katsayısının K_0 olduğunu ileri sürmektedir. Rankine teorisinde kullanılan parametreler Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Rankine göçme mekanizmasının oluşumu.

Duvarın, kazı tarafına hareketi aktif, toprak tarafına hareketi pasif, hareketsiz kalması ise sükunetteki toprak basıncını oluşturacaktır. Duvarın öne hareketi ile

oluşacak aktif toprak itkisi katsayısı (K_a) ve yatay toprak itkisi (P_a) duvar üst dolgusuna paralel doğrultuda ve,

$$K_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (4.9)$$

$$P_a = \frac{\gamma H}{2} \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (4.10)$$

değerindedir. Duvarın arka tarafa harekete zorlanması durumunda oluşacak pasif toprak itkisi katsayısı (K_p) ve toprak itkisi (P_p),

$$K_p = \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (4.11)$$

$$P_p = \frac{\gamma H^2}{2} \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (4.12)$$

değerleri ile ifade edilebilir.

4.2.3 Kohezyonlu zeminlerde yanal toprak basınçları

Coulomb ve Rankine, denklemlerinde zemine ait kohezyon değerini net olarak değerlendirememişlerdir. Yanal toprak basıncının oluşumunda kohezyonun etkisi, ilk olarak Bell (1915) tarafından araştırılmış ve yayınlanmıştır (Bowles, 1996). Buna göre z derinliğinde bir noktada aktif ve pasif yanal toprak itkileri sırasıyla,

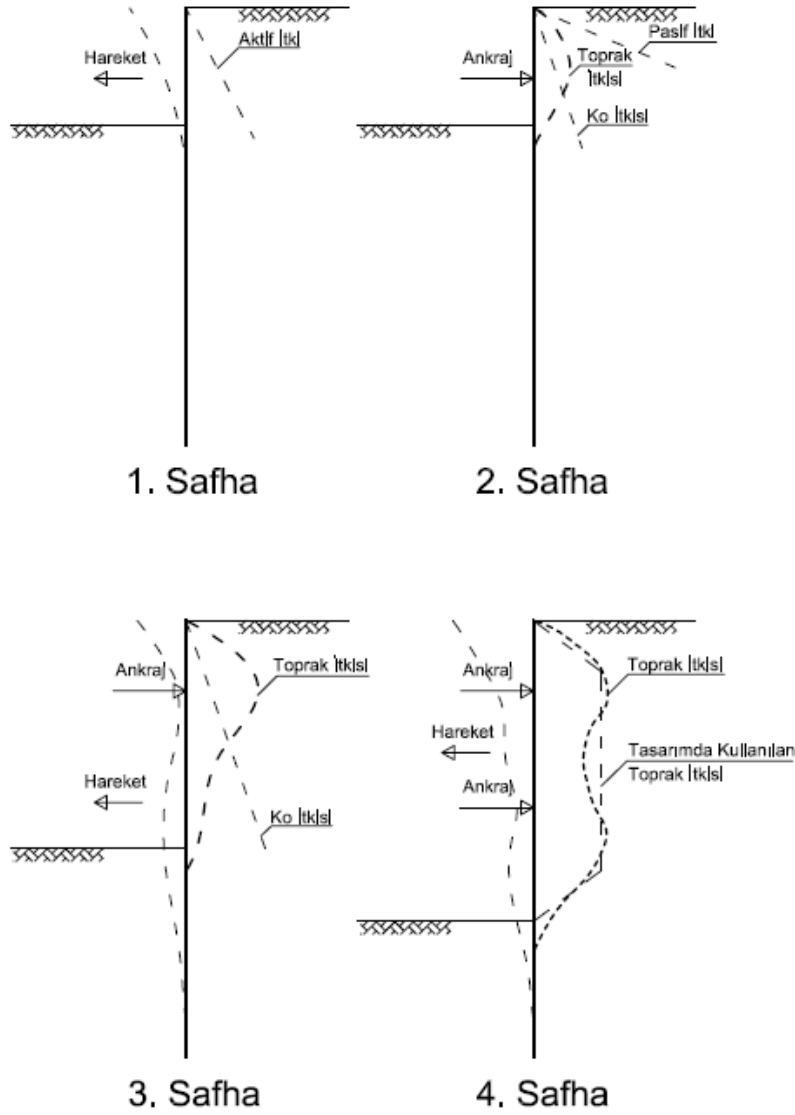
$$P_a = \gamma h K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (4.13)$$

$$P_p = \gamma h K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (4.14)$$

4.3 Öngermeli Ankrajlı İksalara Etkiyen Toprak Basınçları

İksalandırılmış kazılarda yanal toprak basınçları Coulomb ve Rankine Teorisine benzer şekilde hesaplanmaktadır. Ancak, iksalı kazılarda iksa yapım aşamaları, iksa deplasmanı ve sistemin göçme mekanizmasının oluşumu konsol iksalardan farklı toprak itkilerinin oluşmasına yol açmaktadır. Zira Coulomb ve Rankine Teorisi rijit istinat yapıları için geçerlidir. İksalı kazılarda kullanılan düşey iksa elemanları ise

istinat duvarlarına göre daha narin elemanlardır. Düşey iksa elemanının yatay hareketi ve bir nokta etrafında dönmesi arkasında oluşacak toprak itkisini etkilemektedir. İksalı kazılarda yanal toprak itkisinin oluşumu Şekil 4.6 ile açıklanabilir.

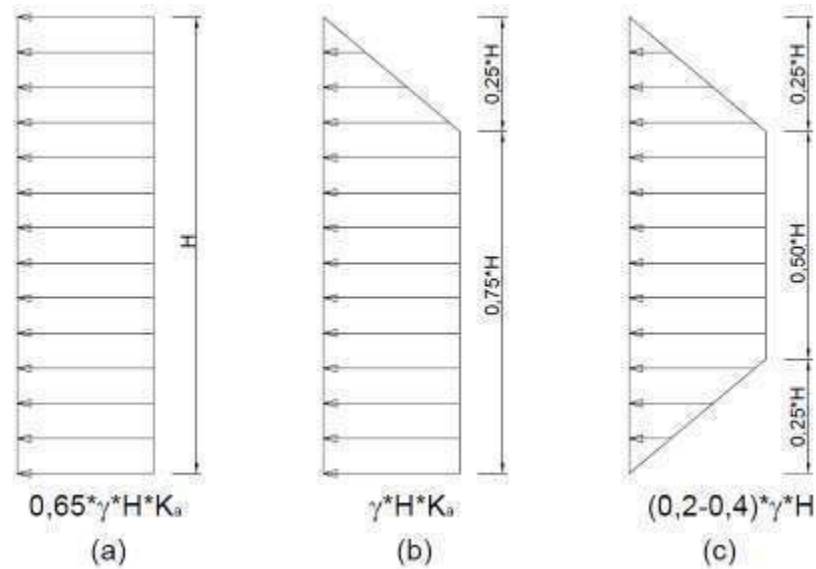


Şekil 4.6 : İksalı kazılarda yanal toprak itkisinin oluşumu (Bowles, 1996).

İksalandırılmış kazılarda ilk kazı sonrasında yanal toprak itkisi (1. safha) aktif toprak itkisi olarak alınabilir. Bu halde iksa duvarı zemine ankastre perde gibi çalışır. İlk kazı kademesinden sonra yapılacak ankraj elemanı ile yanal yükler alınır (2. Safha). Ankraj elemanına uygulanacak yükün yanal toprak yükünden büyük olması mevcut yanal itkinin artmasına hatta duvar arkasında pasif toprak itkisi oluşmasına sebep olabilir. İlk ankraj kademesinden sonra yapılacak kazı toprak yüklerinin yeniden değişmesine sebep olmaktadır. Bu safhada ankraj kademesinde oluşan maksimum

yük kazı tabanına doğru azalarak minimuma düşmektedir (3. Safha). 2. kademe ankrajda yapılacak öngerme üst kademede yer alan ankrajda bir miktar yük azalmasına sebep olacaktır. Aynı zamanda alt kademe ankraj arkasında, üst kademe ankraj bölgesinde oluşan gerilme dağılımına benzer ve uygulanacak yüke eşdeğer bir gerilme oluşmaktadır. Böylece kazı aynasında trapezoidal bir yük dağılımı oluşmaktadır (4. Safha). Sonraki kademeler için yapılacak kazı ve ankraj imalatlarında ilk iki kademe için oluşan toprak itkilerine benzer itkiler oluşmaktadır (FHWA-RD-98-076, 1998).

Öngermeli ankrajlı iksa kazılarında oluşacak yanal toprak itkilerinin, zeminin hareketine sebep olan gerçek toprak itkilerinden ziyade ankrajlara uygulanan öngerme yüklerine bağlı olduğu düşünülmektedir (Bowles, 1996). Gerçek toprak itkilerinin tam olarak anlaşılabilmesi nedeniyle birçok araştırmacı tarafından çeşitli toprak yükü dağılımı kabülleri yapılmıştır. İksalı kazılarda oluşacak yanal toprak itkileri ilk olarak Terzaghi (1943) ve daha sonra Terzaghi ve Peck (1967) tarafından araştırılmıştır. Araştırmalar Berlin’de Krey tarafından rapor edilmiş ve birçok projede gerçekleşen en büyük yük dağılımının ölçülmesi ile oluşturulmuştur. Daha sonraları Terzaghi ve Peck (1967) ve Peck (1969) tarafından modifiye edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Peck (1969) tarafından önerilen toprak yükü dağılımı.

yumuşak ve orta katı killer için (Şekil 4.7-b);

$$\sigma_a = \gamma H K_a \quad (4.16)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Yumuşak ve orta katı killerde aktif toprak itkisi katsayısının (K_a) bir m faktörü ile azaltılabileceği önerilmektedir.

$$K_a = 1 - m \frac{4c_u}{\gamma H} \quad (4.17)$$

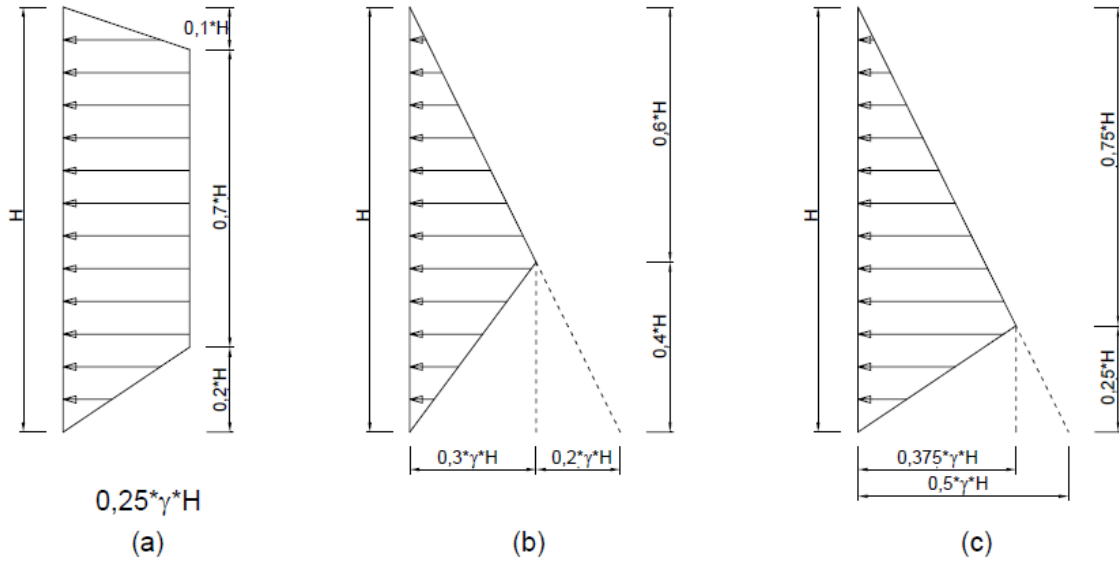
Denklemde kullanılan m katsayısı, yumuşak killerde 0.4 iken katı killerde 1.0 alınabilir.

Katı ve fisürlü killerde (Şekil 4.7-c);

$$\sigma_a = (0.2 \sim 0.4)\gamma H \quad (4.18)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Kısa inşaat süreci ve deplasman toleransının fazla olduğu durumlarda 0.2 katsayısı, tersi durumlarda 0.4 katsayısının seçilmesi uygun olmaktadır.

Yanal toprak itkileri konusunda Tschebotarioff (1973) tarafından da çalışmalar yapılmıştır. Tschebotarioff tarafından geliştirilen yük dağılımı (Şekil 4.8) genel olarak 16,00 m'den yüksek kazılar için daha doğru sonuçlar vermektedir (Bowles, 1996).



Şekil 4.8 : Tschebotarioff (1973) tarafından önerilen toprak yükü dağılımı.

Bu öneride kohezyonsuz zeminler için (Şekil 4.8-a);

$$\sigma_a = 0.25\gamma H \quad (4.19)$$

katı killerde yapılan geçici iksalar için (Şekil 4.8-b);

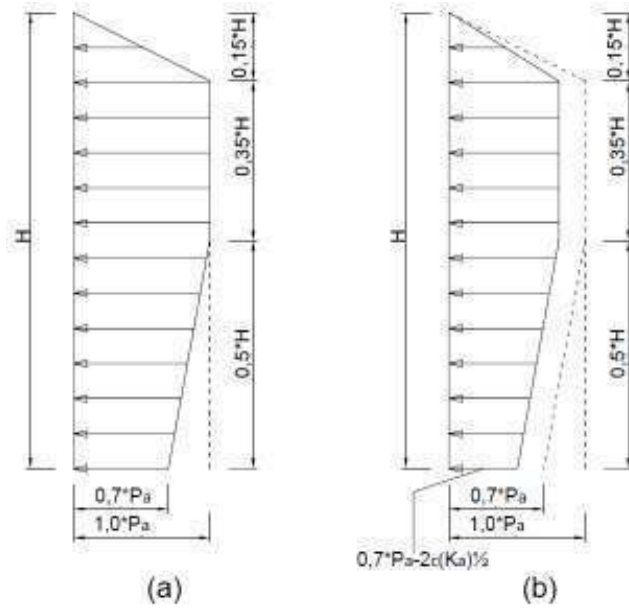
$$\sigma_a = 0.3\gamma H \quad (4.20)$$

orta katı killerde yapılan kalıcı iksalar için (Şekil 4.8-c);

$$\sigma_a = 0.5\gamma H \quad (4.21)$$

bağıntılarının kullanılması önerilmektedir.

Lehman tarafından yapılan çalışmalarda, yanal toprak basıncı dağılımının, derinlik boyunca daha fazla değişim göstereceği ve yaklaşık parabolik yapıda olacağı savunulmaktadır (Şekil 4.9).



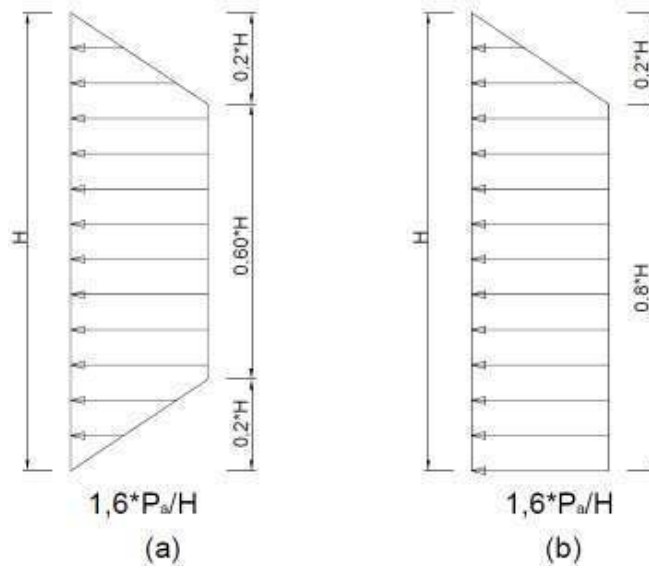
Şekil 4.9 : Lehman tarafından önerilen yanal toprak basıncı dağılımı.

Bu öneride kohezyonsuz zeminler Şekil 4.9-a'da, kohezyonlu zeminler için ise Şekil 4.9-b'de toprak basıncı dağılımları gösterilmektedir.

$$\sigma_a = 0.6\gamma HK_a \quad (4.22)$$

bağıntısının kullanılması önerilmektedir.

İksa sistemlerine etkiyen toprak itkileri çeşitli ülkelerin ve kuruluşların standartlarında da yer bulmuştur. İsveç yapı yönetmeliği (1974) tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen yatay toprak itkileri Şekil 4.10'da yer almaktadır.



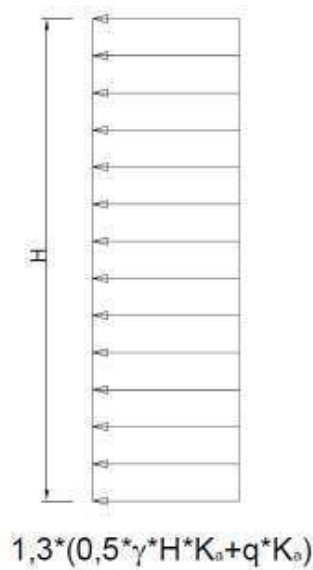
Şekil 4.10 : İsviçre yapı yönetmeliğinde yer alan yatay toprak itkileri.

Şekil 4.9’ da sıkı (a) ve gevşek (b) kohezyonsuz zeminler için ayrı ayrı yük dağılımı kabul edilmektedir. İsviçre yapı yönetmeliğine göre yanal toprak basıncı;

$$\sigma = 1.6 \frac{\sigma_a}{H} \quad (4.23)$$

olarak hesaplanabilir. Burada P değeri iksa aynası boyunca hesaplanan toplam aktif toprak basıncı olarak ele alınmaktadır.

İsviçre zemin ankrajları standardı (SIA-191) tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen toprak basıncı dağılımı Şekil 4.11’deki gibidir.



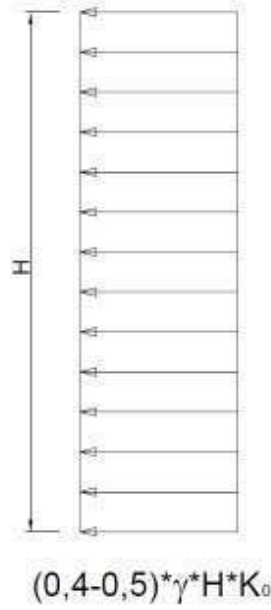
Şekil 4.11 : İsviçre zemin ankrajları standardında yer alan yatay toprak itkileri

Burada q değeri kazı aynası üzerinde yer alan sürşaj yükünü temsil etmektedir. Kazı aynasında oluşacak yanal toprak itkisi;

$$\sigma_a = 1.3(0.5\gamma HK_a + qK_a) \quad (4.24)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

Navfac tarafından çeşitli zeminler için önerilen yanal toprak basıncı dağılımı Şekil 4.12 ve 4.13'deki gibidir.



Şekil 4.12 : Navfac tarafından kohezyonsuz zeminler için önerilen basınç dağılımı.

Kohezyonsuz zeminler için önerilen;

$$\sigma_a = (0.4 \sim 0.5)\gamma HK_0 \quad (4.25)$$

bağıntısında yer alan 0,4 ve 0,5 katsayılarının, sırasıyla sıkı ve gevşek kum zeminler için kullanılması önerilmektedir.

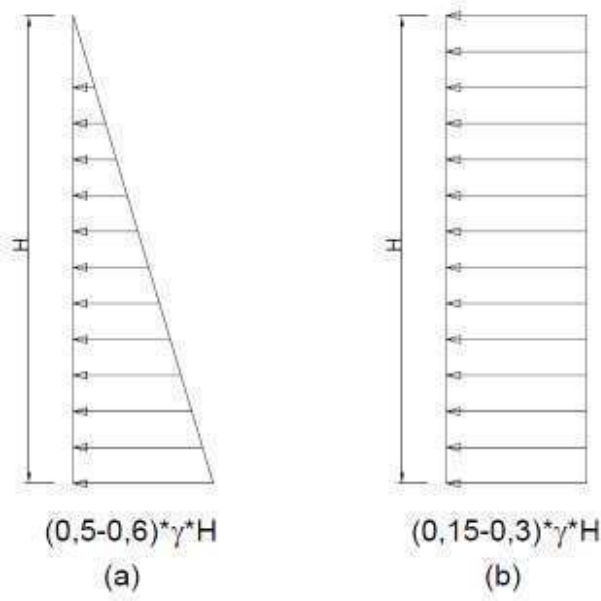
Navfac tarafından kullanılması önerilen bu dağılımlarda, yumuşak ve orta katı killer için (Şekil 4.13-a);

$$\sigma_a = (0.5 \sim 0.6)\gamma H \quad (4.26)$$

katı ve çok katı killer için (Şekil 4.13-b);

$$\sigma_a = (0.15 \sim 0.3)\gamma H \quad (4.27)$$

bağıntılarının kullanılması önerilmektedir.



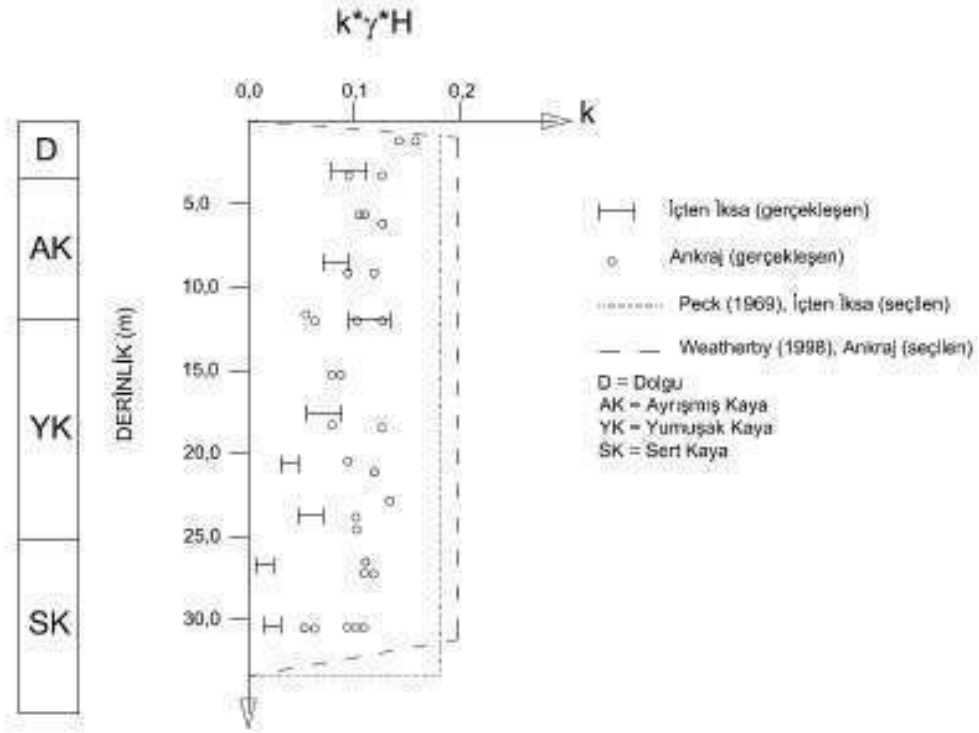
Şekil 4.13 : Navfac tarafından kohezyonlu zeminler için önerilen basınç dağılımı.

Katı ve çok katı killer için önerilen 0,15 ve 0,3 katsayıları zeminin kohezyonuna bağlı bir katsayı (N_0) olarak değişmektedir.

$$N_0 = \gamma \frac{H}{c} \quad (4.28)$$

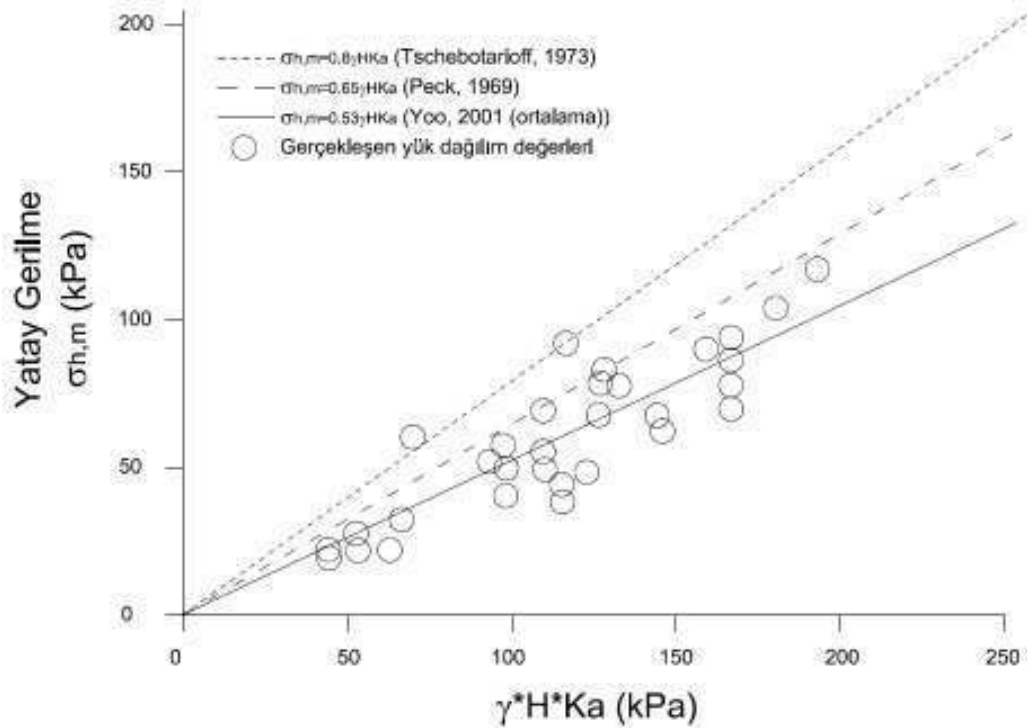
N_0 değerinin 4,0 ve üzeri olması durumunda 0,3 katsayısının ve tersi durumda 0,15 katsayısının kullanılması önerilmektedir.

Anılan bu araştırmacıların yanında, Bjerrum ve Kirkedam (1958), Lambe (1970), Golder (1970), Swatek (1972) ve Klenner gibi birçok araştırmacı yanal toprak basınçları hakkında çalışmalar yapmıştır ve öneriler sunmuştur. Önerilen toprak itkilerinin birçoğu içten iksalı kazılar için geçerli olmakla beraber ankrajlı kazıların tasarımında da kullanılması uygun olmaktadır (Navfac DM-7.2, 1982). Son yıllarda yapılan yeni araştırmalar önerilen toprak itkilerinin yüksek değerler olduğunu ve kabul edilmesi gereken toprak itkilerinin daha az olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle iksa deplasmanı ölçümleri sonucu ile yapılan geri analiz ve saha ölçüm teknikleriyle yapılan analizlerde ekonomik olmayan sonuçlar doğuracak toprak itkilerinin seçildiği anlaşılmıştır. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zemin kabulü ile yapılan yük dağılımı tercihleri, sert kil veya yumuşak kaya zeminlerde gerçekleşenin çok üstünde yanal yük hesaplamasına yol açmaktadır (Yoo, 2001). Ayırışmış ve yumuşak kaya ortamlarda yapılan yaklaşık 60 adet iksalı kazıda, seçilen ve gerçekleşen yanal toprak itkileri Şekil 4.14'te sunulmuştur.



Şekil 4.14 : İksalı kazılarda seçilen ve gerçekleşen yük dağılımları (Yoo, 2001).

Ankrajlı iksalı kazılarda oluşan yanal toprak basıncının, değişik araştırmacılar tarafından önerilen değerlerle olan ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.15'te sunulmuştur.



Şekil 4.15 : Ankrajlı kazılarda çeşitli yanal yüklerin karşılaştırması (Yoo, 2001).

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere Peck (1969) ve Tschebotarioff (1973) tarafından önerilen yük dağılımı aşırı güvenli tarafta kalmaktadır. Son yıllarda Hong ve Yoon (1995) tarafından yapılan araştırmalar ise bu örnekte sunulan değerlere oldukça yakındır. Şekil 14 ve Şekil 15 incelendiğinde, Trakya formasyonunu oluşturan ayrılmış grovak birimlerde yapılacak derin kazı projeleri için $0.15\gamma H$ veya $0.5\gamma H K_a$ yük dağılım değerlerinin seçilebileceği anlaşılmaktadır. Yapılan bu araştırmanın, ayrılmış veya yumuşak kaya ortamlarda yapılan kazıların neticesinde oluştuğu dolayısıyla kum ve kil gibi zemin formasyonundaki kazılarda uygulanamayacağı aşıkardır. Her derin kazı projesi, lokasyonu ve bölgesel jeolojisi bakımından diğerlerinden farklıdır. Derin kazı projelerinde kullanılacak yük dağılımları her proje için ayrı değerlendirilmelidir

5. ÖNGERMELİ ANKRAJLI İKSA TASARIMI

Derin kazılarda, iksa yüksekliği arttıkça yanal toprak basınçlarının klasik tipte betonarme istinat duvarlarla veya benzeri rijit yapılarla karşılanması oldukça zor ve maliyetli olmaktadır. Bu tür derin kazılarda zemin koşulları ve saha koşulları da dikkate alınarak genelde yatay iksa elemanları ile desteklenmiş esnek iksa çeşitleri kullanılmaktadır. Esnek iksa sistemlerinde kullanılan yatay elemanların biri de öngermeli ankrajdır.

İnşaat mühendisliğinde çok eski olmayan öngermeli ankraj kullanımı, öncelikle kaya formasyonlarda başlamış ve daha sonra gelişen teknolojik imkan ve artan tecrübe ile her tür zeminde ve yapıda uygulama sahası bulmuştur. Öngermeli ankraj sistemi basitçe, bir ucu zemine soketlenmiş yük taşıyan eleman olarak tanımlanabilir. Ankraj sistemi ilk olarak 1874 yılında Frazer tarafından Londra’da bir tren yolu kenarında bulunan kanal yataklarının tutulması için tanımlanmıştır. Bu uygulamada, ankraj elemanı olarak işlenmiş demir kullanılması düşünülmüştür. Uygulama açısından ilk örnek ise, Coyne (1934) öncülüğünde, Cezayir Cheurfas Barajı’nın öngermeli ankrajlar yardımıyla iyileştirilmesi projesidir (Xanthakos, 1991).

Ülkemizde özellikle derin kazıların desteklenmesinde çok kullanılan öngermeli ankraj sisteminin tasarımında kullanılan hesap adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sabatini, 1999’dan uyarlanmıştır).

- i. Proje kriterlerinin belirlenmesi (Ankraj imalat yöntemi, saha geometrisi, projenin amacı, iksa sisteminin tasarım ömrü ve inşaat yöntemi),
- ii. Zemin koşullarının belirlenmesi,
- iii. Tasarımda kullanılacak yatay toprak itkilerinin belirlenmesi, yatay toprak itkisi için zemin özelliklerine bağlı olarak yük dağılımının seçilmesi ve varsa su ve sürşaj yüklerinin belirlenmesi,
- iv. Ankrajların yatay aralığının ve iksa düşey elemanlarının eğilme momentlerini optimum kılacak düşey ankraj aralığının belirlenmesi,

- v. Düşey iksa elemanlarının boyutlandırılması. Düşey iksa elemanının eğilme rijitliğinin belirlenmesi,
- vi. Üstyapı temelleri, iksa sınır koşulları, zemin koşulları ve altyapı hatları dikkate alınarak ankraj açısının belirlenmesi,
- vii. Ankraja gelecek eksenel yükü dikkate alarak, ankraj elemanının boyutlandırılması,
- viii. Kazı tabanı altında gömülü iksa elemanının boyutlandırılması. Pasif itkilerin kontrol edilmesi,
- ix. Stabilite tahkiklerinin yapılması. Toptan göçme ve ankraj elamanı içsel stabilite analizlerinin yapılması,
- x. Oluşacak yatay ve düşey deplasmanların tahmin edilmesi. Gerekli durumlarda tasarımın revize edilmesi,
- xi. Ankraj kitleme yükü ve germe yükü değerlerinin belirlenmesi. Ankrajlar üzerinde yapılacak deneylerin belirlenmesi,
- xii. Ankrajlara uygulanacak yük ve yatay yük kabulleri altında, varsa kuşaklama ve başlık kirişlerinin boyutlandırılması.

5.1 Öngermeli Ankrajların Sınıflandırması

Öngermeli ankrajlar, tasarım ömrü ve imalat yöntemine göre çeşitli adlar altında anılabilir.

5.1.1 Geçici ve kalıcı ankrajlar

Bu sınıflamada ankrajların proje ömrü dikkate alınır. Tasarım ömrü olarak kısa ömürlü (geçici) ve uzun ömürlü (kalıcı) ankrajlar, hesaplamalarda kullanılan güvenlik katsayıları, imalatlarda kullanılan malzeme ve kontrol deneyleri ile birbirlerinden ayrılırlar.

Değişik şartnameler geçici ankraj için değişik zaman aralıkları tanımlamışlardır. Genel olarak geçici ankrajların tasarım ömrü 2 yıl olarak düşünülür. Ancak, zemin koşulları, imalat kontrolü, malzeme kalitesi tam olarak kestirilemeyen projelerde bu

süre daha az düşünülmektedir. AASHTO (1996)' da önerilen, değişkenlerin bilinirliğine göre bu sürenin 18 ile 36 ay arasında olacağıdır.

Genel olarak, proje ömrünün 6 aydan daha kısa olduğu geçici sistemlerde korozyona karşı önlem almaya ve sürekli gözlem yapmaya gerek olmaz. Daha uzun proje ömrüne sahip geçici sistemlerde, korozyona karşı önlem alınmazken, iksa sisteminin güvenliği için sürekli kontrollerin yapılması gerekmektedir (Xanthakos, 1991).

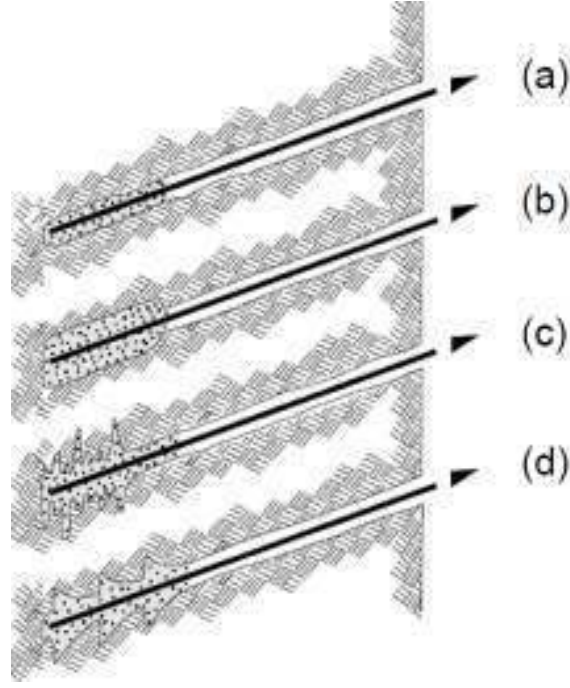
Tasarım ömrü 2~3 yıldan daha uzun olan ankrajlar kalıcı ankraj diye adlandırılır. Kalıcı ankrajlı iksa sistemlerinde, proje ömrü 75 ile 100 arasında düşünülür ve tasarım buna göre yapılır. Bu sistemlerde, iksa güvenliği için korozyona karşı tedbirler alınmalı ve iksa sisteminde sürekli kontroller yapılmalıdır.

5.1.2 Ankraj imalat yöntemleri

Öngermeli ankrajlarda, öngerme yükünü karşılayan kuvvet, zemin ve çimento enjeksiyonu arasındaki sürtünme direncidir. Ankraj delgi yöntemi ve enjeksiyon basıncına bağlı olarak zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünme direnci değişebilmektedir. Delgi işlemi zemin koşullarına bağlı olarak, burgulu, havalı ve darbeli olarak yapılmaktadır. Delgi yöntemi ve enjeksiyon basıncına göre oluşturulan ankraj türleri Şekil 5.1'de sunulmuştur.

5.1.2.1 Düz cidarlı, basınçsız enjeksiyonlu ankraj

Bu sistemde delgi işlemi havalı veya burgulu yöntemlerle yapılır (Şekil 5.1.a). Genelde kaya veya katı-sert, kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır. Delgi işlemi bittikten sonra kuyu içerisine yerleştirilen hortumlar yardımıyla kuyu içerisine enjeksiyon gönderilir. Ankraj kuvvetleri, nispeten pürüzsüz delik cidarı ve enjeksiyon arasındaki sürtünme ile karşılanır. Trakya formasyonunda yapılan ankrajlarda bu teknik uygulanır. Hızlı ve ekonomik olması sebebiyle diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilir.



Şekil 5.1 : Delgi ve enjeksiyon tipine göre ankraj çeşitleri.

5.1.2.2 Düz cidarlı, basınçlı enjeksiyonlu ankraj

Düz cidarlı ve basınçlı enjeksiyon kullanılarak oluşturulan bu sistem genelde, iri daneli granüler zeminlerde uygulanmaktadır (Şekil 5.1.b). Ankraj delgisi burgulu veya havalı sistemlerle yapılabilir. Kohezyonsuz birimlerde, özellikle su altında yapılan delgilerde kuyu içerisinde oluşacak göçüklerin engellenmesi için delik boyunca muhafaza boruları kullanılmaktadır. Bu sistemde ankrajların kök bölgesine zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesini arttırmak için düşük basınçlı (<1 MPa) enjeksiyon uygulanır. Böylece kök bölgesinde kuyu çapından daha büyük çaplı bir sürtünme kütlesi elde edilmiş olur.

5.1.2.3 Basınçlı enjeksiyonlu ankraj

Basınçlı enjeksiyonlu ankraj yönteminde kuyu içerisine yüksek basınçlı (>2 MPa) enjeksiyon gönderilerek ankraj kök bölgesinde sürtünme yüzeyinin artırılması hedeflenir (Şekil 5.1.c). Yüksek basınçla enjeksiyonlama işlemi ara verilerek bir veya birkaç gün sürebilir. Bu yöntem, genelde kohezyonsuz birimlerde uygulanmakla birlikte katı kohezyonlu zeminlerde de uygulanabilir (Littlejohn, 1980). Enjeksiyon basıncı ayarlanarak, çimento partiküllerinin zeminin boşluklu yapısını doldurması sağlanabilir. Ankraj kuvvetleri zemin ve enjeksiyon arasındaki

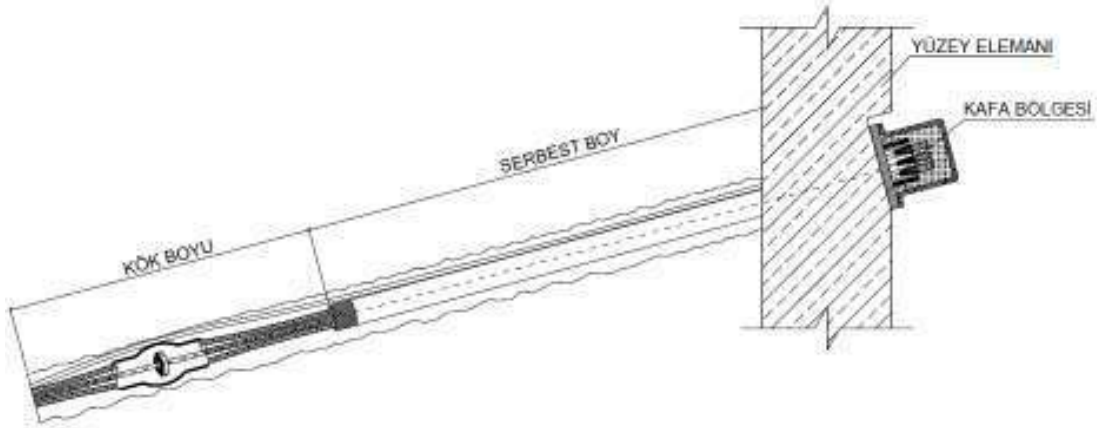
sürtünme direnci ile karşılanır. Sürtünme direnci kök bölgesinin çapının düzgün ve eşdeğer bir çapta olması kabulü ile hesaplanır.

5.1.2.4 Genişletilmiş köklü ankraj

Diğer yöntemlere tercihen pek kullanılmayan bu yöntem, katı-sert kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır (Şekil 5.1.d). Bu yöntemde, genişletilmiş bölgelerin çapı, normal kuyu çapının 4 katını aşabilmektedir. Zemin ve enjeksiyon arasındaki çeper (cidar) sürtünmesine ek olarak, genişletilmiş bölgelerde oluşacak uç direnci de hesaplarda kullanılmaktadır (Sabatini, 2002).

5.2 Öngermeli Ankraj Bölümleri

Öngermeli ankrajlar, serbest boy, kök boyu ve ankraj kafası olarak 3 bölüme ayrılırlar. Serbest boy ve kök boyu, zemin içerisinde gömülü kalan kısımlar, ankraj kafası ise zemin yüzeyinde ve yüzey elemanına bağlı kısımlardır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Öngermeli ankraj bölümleri.

5.2.1 Ankraj serbest boyu

Serbest boy, öngerme yükünü ve hareketlenme ile oluşacak ilave yükleri zemin ve enjeksiyon arasındaki bağ kuvvetinin olduğu kök boyuna aktaran kısımdır. Bu kısım, enjeksiyon ile bağı olmayan, serbest uzayabilen halat sarmalından oluşur. Serbest boyun uzunluğu, tahmin edilen göçme hattının dışında olacak şekilde hesaplanır.

5.2.2 Ankraj kök boyu

Kök boyu, tüm yüklerin zemin ve enjeksiyon sürtünmesi ile taşındığı kısımdır. Bu kısımda öngermeli halatlar enjeksiyon içerisinde gömülüdür. Zemin ve enjeksiyon arasındaki bağ gibi halat ile enjeksiyon arasındaki bağda yüklerin taşınması için

büyük rol oynar. Kök boyunun uzunluğu, zeminin sürtünme kapasitesine bağlı olarak belirlenir. Kaya formasyonlarda yapılan ankrajlarda kök boyunun 3 m'den az olmaması gerekmektedir. Ayrıca kök boyunun 10 m'den fazla olması, belirli bir boydan sonra gerilme aktarılmadığı için gereksiz görülmektedir (BS 8081).

5.2.3 Ankraj kafa bölgesi

Ankraj kafa bölgesi, tüm yüklerin tutulduğu, ankrajın düşey iksa elemanına veya yatay kuşak kirişlerine bağlandığı kısımdır. Öngerme uygulanan ankraj kafa kısmında yer alan kamalar (klips) vasıtasıyla istenilen yüke kilitlenmektedir. Kafa kısmında yer alan malzemeler yüksek basınçlara maruz kaldıklarından malzemelerin kalitesinden emin olunmalıdır.

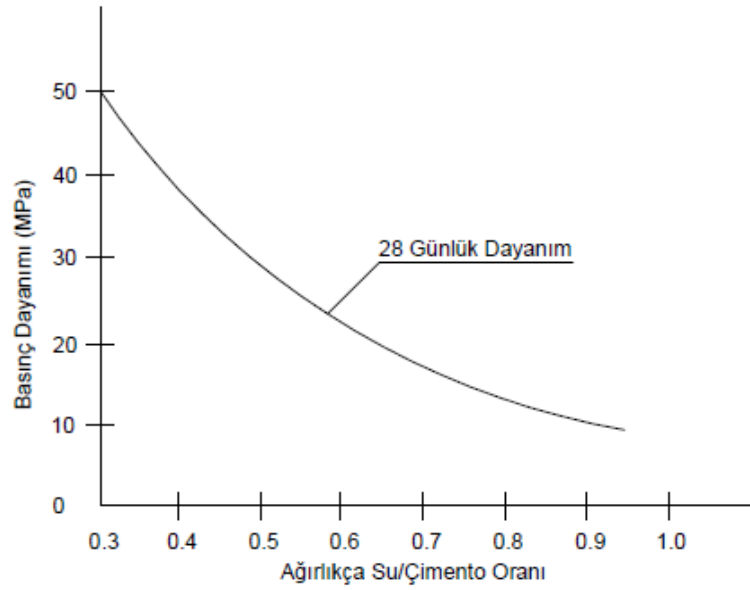
5.3 Öngermeli Ankraj Elemanları

5.3.1 Çimento enjeksiyonu

Çimento enjeksiyonu, halat yüklerini zemine aktaran bağlayıcı elemandır. Halat ve enjeksiyon arasındaki aderans sayesinde halat üzerindeki eksenel yükler enjeksiyon kütesine aktarılır ve oradan zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünme ile zemine aktarılır. Enjeksiyonda kullanılacak çimento yüksek dayanımlı çimento olmalıdır. BS 8081 Şartnamesinde, enjeksiyon için 28 günlük küp numune basınç dayanımının 40 MPa olması şart koşulmaktadır. Enjeksiyonlarda kullanılan ağırlıkça su çimento oranı (s/ç), BS 8081 Şartnamesi ve DIN 4125 Şartnamesinde sırasıyla, 0.35~0.60 ve 0.35~0.70 aralığında tanımlanmıştır. Düşük permeabiliteli kohezyonlu zeminlerde ve kaya ankrajlarında bu değerin 0.45'i aşmaması istenir. Su ve çimento oranının enjeksiyon karışımının basınç dayanımına etkisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

5.3.2 Ankraj halatı

Ankraj halatları demet halinde hazırlanmış, düşük gevşemeli çelik tellerden oluşur. Çapları ile anılan halatlar genelde 13 mm ve 15 mm olarak üretilmektedir. 7 adet çelik telin spiral şeklinde sürekli olarak sarılmasıyla oluşturulan halatların tasarım aşamasında kullanılması gereken, enkesit alanı, elastisite modülü ve eksenel çekme kapasitesi her üretici tarafından test edilerek sunulmaktadır.



Şekil 5.3 : Su ve çimento oranının enjeksiyon dayanımına etkisi (Xanthakos, 1991).

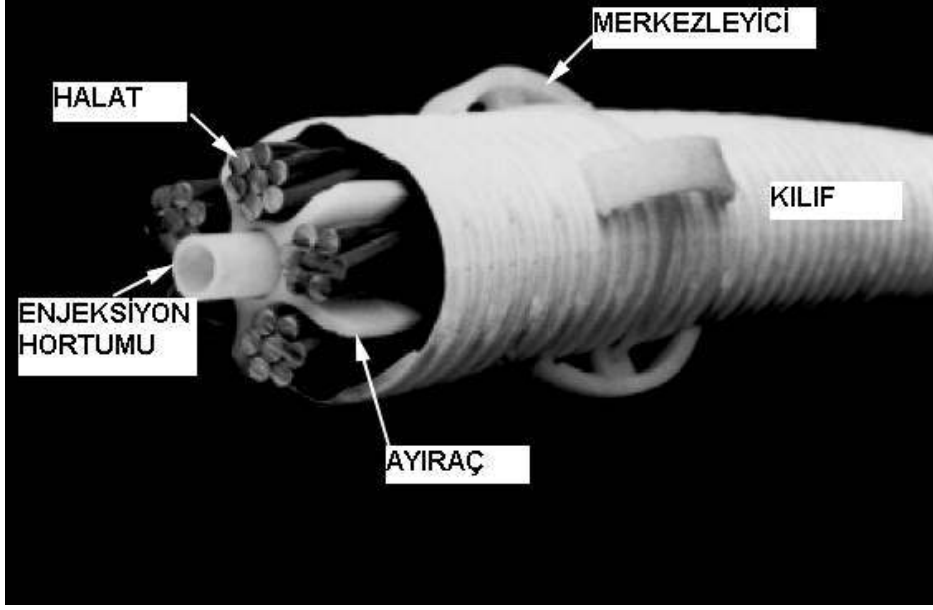
Ülkemizde de sıkça kullanılan 13 mm ve 15 mm çapındaki halatların özellikleri Çizelge 5.1’deki gibidir.

Çizelge 5.1 : 13 ve 15 mm halatların standart özellikleri (ASTM A416, 1997).

Anma Çapı		13 mm (0,5 inç)		15 mm (0,6 inç)	
Halat Tipi		Normal	Süper	Normal	Süper
Ortalama Çap	(mm)	12,5	12,8	15,2	15,5
Ortalama Kesit Alanı	(mm ²)	93	99	139	140
Birim Ağırlık	(kg/m)	0,74	0,78	1,10	1,10
Minimum Kopma Yüğü	(kN)	165	184	244	261
Elastisite Modülü	(MPa)	195000			

5.3.3 Merkezleyici ve ayıraçlar

Merkezleyici ve ayıraçlar, plastik malzemeden imal edilmekte ve ankraj halatının kuyu içerisindeki konumunu ayarlamakta kullanılmaktadır. Merkezleyicilerle, ankraj halatı kuyu içerisine merkezlenir ve halatın her tarafında enjeksiyon olması sağlanır. Ayıraçlar ise halatları birbirinden ayırarak halatlar arasında enjeksiyon girmesini ve dolayısıyla enjeksiyon ve halat arasındaki aderansın artmasını sağlamaktadır (Şekil 5.4). Merkezleyici ve ayıraç elemanları ankrajların kök bölgesinde kullanılmaktadırlar.



Şekil 5.4 : Ankraj merkezleyici ve ayıraç görüntüsü (Sabatini, 1999).

5.3.4 Diğer elemanlar

Öngermeli halatlarda kuyu içerisinde ve kuyu dışında birçok sarf malzeme kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme kalıcı ve geçici ankrajlarda farklılıklar göstermektedir. Ancak genel olarak,

- Kuyu içerisindeki halatların korozyondan korunmasını sağlayacak 50, 60 ve 75 mm çaplarında koruge boru,
- Kuyu içerisine enjeksiyon gönderilmesi için kullanılan 20 mm çapında ve 4, 10 veya 20 Bar basınç tutabilen enjeksiyon boruları,
- Ankrajları yüzey elemanına sabitleyen, klips (kama), ankraj plakası ve ankraj kafası,
- Kalıcı ankrajlarda ankraj kafa kısmını korozyon ve dış etkenlerden koruyan kalıcı kapak elemanı.

gibi değişik sarf malzemeler tüm ankraj işlerinde kullanılmaktadır. Öngermeli ankrajların yüzey elemanlarına sabitlendiği kafa bölgesinden bir görüntü Şekil 5.5'te sunulmuştur.



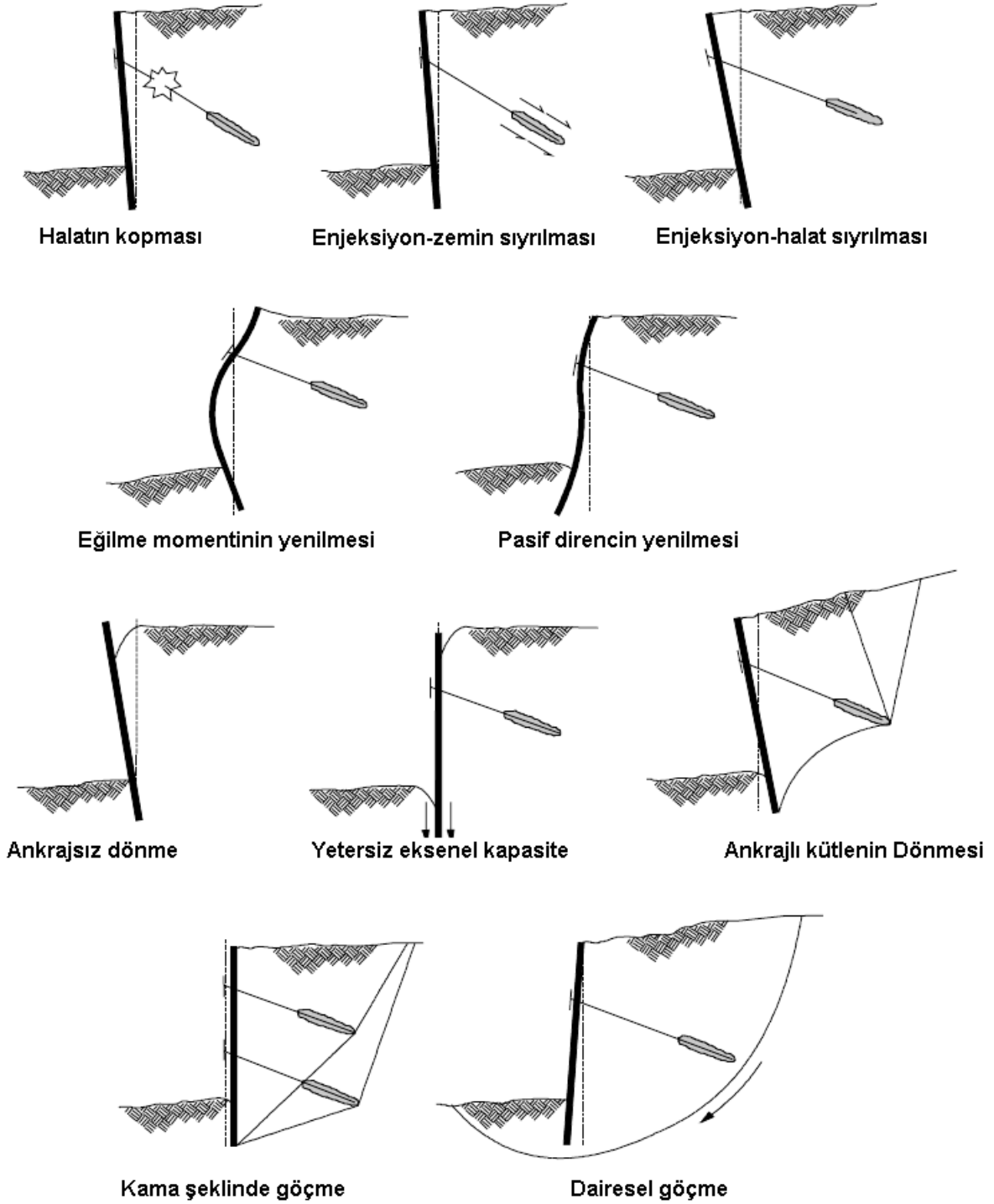
Şekil 5.5 : Ankraj kafa bölgesi görüntüsü.

5.4 Öngermeli Ankrajlı Sistemlerin Göçme Mekanizması

Öngermeli ankrajlı iksalarda genel prensip, ankrajlarla iyileştirilmiş bir kütlenin devrilme, kayma ve ötelenme gibi göçme mekanizmalarına karşı güvenli hale getirilmesidir. Ankrajlı iksa sistemini güvenli hale getirmek için birçok göçme mekanizmasının oluşumunu engellemek gerekmektedir. Ankrajlı iksalarda oluşabilecek göçme mekanizmaları Şekil 5.6’da gösterildiği gibi sıralanabilir.

5.4.1 Öngermeli ankraj elemanının göçme mekanizması

Öngermeli ankrajlarda oluşacak göçme, genel olarak aşırı yük artmasından kaynaklanmaktadır. Ankrajlarda oluşacak göçmeler, yükleme deneyi sırasında, kazı kademelerinde ve sürşaj yüklerinin etkilmesi gibi ankraj yüklerinin artmasına sebep olacak durumlarda görülebilir. Ankrajlarda oluşacak göçme, halat kopması, zemin-enjeksiyon arasındaki sürtünmenin yenilmesi ve halat-enjeksiyon arasındaki sürtünmenin yenilmesi ile oluşabilir.



Şekil 5.6 : Öngermeli ankrajlı iksalarda oluşabilecek göçme mekanizmaları.

5.4.1.1 Ankraj halatının kopması

Öngirme ve zaman içerisinde oluşacak yük artımları, ankraj halatında ilave eksenel kuvvetlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu eksenel yükler, halatın eksenel kapasitesini aştığı durumlarda, halatın kopması kaçınılmaz olmaktadır. Tasarımlarda halatın göçme yüküne ulaşılmaması için çeşitli güvenlik katsayıları kullanılmaktadır.

Geçici iksalarda halat tasarım yükünün, kopma yükünün maksimum %80'i olması istenirken, kalıcı iksalarda bu değer %60 mertebesinde kalmaktadır (Sebatini, 2002). Öngermeli ankraj tasarımında kullanılacak halat çapına göre seçilmesi gereken halat parametreleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Ankraj halatlarının tasarımında kopmaya karşı, geçici iksalarda yapının önemine göre 1.4~1.6, kalıcı iksalarda 2.0 güvenlik katsayısının kullanılması önerilmektedir (CICHE, 1998).

5.4.1.2 Zemin ve enjeksiyon arasındaki sürtünmenin yenilmesi

Öngermeli ankrajlarda yüklerin zemine aktarılması enjeksiyon kütlesi ve zemin arasındaki sürtünme direnci ile sağlanmaktadır. Sürtünme direnci, enjeksiyon kütlesi üzerindeki düşey gerilme ve zeminin kohezyonu ile ilişkilidir. Ankraj halatına uygulanacak yükler, zemin ve enjeksiyon arasında oluşacak sürtünme direncini aşarsa enjeksiyonlu kütle zeminden sıyrılabilir. Ankraj halatına uygulanan yükler, kök başlangıcından başlayarak kök sonuna doğru azalarak iletilir. Ankraj kök boyunun uzunluğu, ankraj kapasitesini de belirlemektedir. Ancak yapılan araştırmalarda, kök boyunun 9 m'den fazla olmasının ankraj kapasitelerinde büyük artışlar sağlanmadığını göstermektedir (Sebatini, 2002). Ankraj kök kapasitesinin belirlenmesinde etkili olan faktörler Çizelge 5.2'deki gibi sıralanabilir.

Çizelge 5.2 : Ankraj kök kapasitesine etki eden faktörler (Sebatini, 2002)

	Zemin Cinsi / Ankraj Kök Kapasitesi	
Faktör	Kohezyonsuz	Kohezyonlu
Zemin Özellikleri	İçsel sürtünme açısı ve dane çapı dağılımı etkilidir.	Adezyon ve plastisite indeksi etkilidir.
Delgi Yöntemi	Kullanılan muhafaza sürtünmeyi arttırılabilir.	Muhafazasız delgi veya su ile yapılan delgilerde kapasite düşebilir.
Kök Uzunluğu	6 m'ye kadar lineer, sonrasında azalan artışlar olur.	$c_u < 96$ kPa ise uzunluk ile doğrusal artış olur.
Enjeksiyon Basıncı	Basınçla beraber kapasitede artar.	Aşamalı enjeksiyon yapılarak kapasitede arttırılabilir.

Kaya ortamlarda yapılacak ankrajların kök kapasitesini belirlemek için en ideal yöntem, sahada çekme deneyleri yaparak kaya-enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesinin hesaplanmasıdır. Değişik birimlerde, zemin-enjeksiyon arasındaki nihai

sürtünme kapasitesi için, kaya özelliği, SPT değeri (N) ve drenajsız kohezyon (c_u) değerlerine bağlı olarak aşağıdaki değerler önerilmektedir.

Çizelge 5.3 : Zemin enjeksiyon arasındaki nihai sürtünme kapasitesi (JSF, 1990)

	Birim	Nihai Sürtünme Kapasitesi (kPa)
Kaya	Sert Kaya	1500 ~ 2500
	Yumuşak Kaya	1000 ~ 1500
	Ayrışmış Kaya	600 ~ 1000
	Çamurtaşı	600 ~ 1200
Çakıl	N = 10	100 ~ 200
	N = 20	170 ~ 250
	N = 30	250 ~ 350
	N = 40	350 ~ 450
	N = 50	450 ~ 700
Kum	N = 10	100 ~ 140
	N = 20	180 ~ 220
	N = 30	230 ~ 270
	N = 40	290 ~ 350
	N = 50	300 ~ 400
Kil		c_u

Trakya formasyonunda, RQD=0~15 olan, ayrışmış Grovak birimlerde yapılan çekme deneylerinde, zemin enjeksiyon arasındaki sürtünme direncinin (q_s) en az 250 kPa olduğu belirlenmiştir.

Ankraj halatı ve zemin arasındaki sürtünme kapasitesinin hesabında, geçici iksalarda yapının önemine göre 2.0~2.5, kalıcı iksalarda 3.0 güvenlik katsayısının kullanılması önerilmektedir (CICHE, 1998).

5.4.1.3 Enjeksiyon ve halat arasındaki sürtünmenin yenilmesi

Enjeksiyon ve halat arasındaki sürtünme direnci adezyon ile sağlanmaktadır. Adezyon, mikroskobik ölçekte pürüzlülüğe sahip çelik ankraj halatı ile enjeksiyon arasındaki fiziksel ilişki olarak açıklanabilir. Harekete bağlı olarak gelişen sürtünme direnci, halatın pürüzlülüğüne, halata uygulanan gerilmeye ve hareketin miktarına bağlı olarak değişir. Halat ve enjeksiyon arasındaki yük aktarım mekanizmasında adezyon kadar, mekanik kilitleme olayının da etkisi büyüktür. Mekanik kilitleme,

çıkıntı ve burgular gibi süreksizlikler ile enjeksiyon arasındaki fiziksel ilişkidir. Kenetlenme, nervürlü demir ve beton arasındaki bağda da asıl etken olarak bilinmektedir. Öte yandan halat ve enjeksiyon arasındaki sürtünme, enjeksiyon dayanımıyla da birebir alakalıdır. Enjeksiyon basınç dayanımının fazla olması halat-enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesini de arttırmaktadır. Ancak araştırmalar bu artışın doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır. Örneğin, 27.6 MPa basınç dayanımına sahip enjeksiyon içerisinde 17.2 MPa sürtünme kapasitesi elde edilirken, 34.5 MPa basınç dayanımına sahip enjeksiyon içerisinde 19.3 MPa sürtünme kapasitesi elde edilmiştir. Enjeksiyonun basınç dayanımındaki %25’lik artışa karşın, halat-enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesi %12 artmıştır. Halata oluşabilecek paslanma, halat çeperinde küçük girinti çıkıntılar yaparak enjeksiyon-halat arasındaki bağı artırır. Buna rağmen uygulamada paslanmış halatların kullanılması tercih edilmemektedir.

Enjeksiyon ve halat arasındaki sıyrılma olayına, zemin ve enjeksiyon arasındaki sıyrılma olayından daha az rastlanmaktadır. Bu ancak, incelenen bileşenlerin (enjeksiyon ve halat) bilinirliğinden kaynaklanabilir. Zira halat ve enjeksiyon özellikleri, zemin özelliklerine göre daha standart ve bilinir durumdadır.

Ankraj halatı ve enjeksiyon arasındaki sürtünme kapasitesinin hesabında, geçici iksalarda yapının önemine göre 2.0~2.5, kalıcı iksalarda 3.0 güvenlik katsayısının kullanılması önerilmektedir (BSI, 1989).

5.4.2 Yüzey elemanının tahkikleri

Öngermeli ankrajlı iksa sistemlerinde birçok yüzey elemanı kullanılabilir. Düşey iksa elemanları olarak da adlandırılan elemanlar, diyafram duvar, kazık, palplanş ve kuyu perde olarak sıralanabilir. Açılı olarak imal edilen ankrajları tutan yüzey elemanları, hem yatay hem de düşey yüklere maruz kalırlar. Düşey elemanlar için en kritik an, birinci kazı kademesi ve son kazı kademesinden sonra oluşmaktadır. Birinci kazı kademesinde, henüz yatay iksa elemanı olmadığından tüm yatay toprak itkileri düşey elemanlarla taşınır. Son kazı kademesinde ise sistemde oluşabilecek tüm yatay itkiler mobilize olur ve tasarım yükünün olduğu varsayımı yapılır. Düşey iksa elemanları için göçme oluşturacak etken, yatay yükler sebebiyle oluşan moment ve kesme kuvvetidir. Eleman üzerinde, germe ve kazıdan kaynaklı moment ve kesme kuvvetlerinin tasarım değerlerini aşması, düşey elemanın kırılmasına sebep olabilir.

Düşey elemanlar için yapılan betonarme hesaplamalarda düzgün kesitlerin oluştuğu, gerilmelerin beton ve donatı üzerine rijitlikleri oranında dağıldığı kabulleri yapılır. Ancak uygulama aşamasında özellikle yerinde dökülen kazık elemanlarda, zeminde oluşan göçmeden dolayı kesitlerin yeryer daraldığı, kalitesiz beton dökümünden kaynaklanan betonsuz kesitlerin olduğu sıkça rastlanılan bir durumdur. Bu durumlarda da, düşey elemanın kırılması, kopması ve devrilmesi olasıdır.

Düşey iksa elemanları için diğer bir göçme çeşidi ise elemanın düşey yükleri taşıyamayarak zemin içerisine batmasıdır. Bu durum, derin temel hesapları kullanılarak hesaplanan düşey elemanın eksenel kapasitesinin aşıldığı ve zeminin eksenel yükleri taşıyamadığını göstermektedir. Düşey iksa elemanlarının zeminde gömülü kalan kısımları için derin temel hesaplamaları kullanılarak eksenel kapasite hesapları yapılabilir.

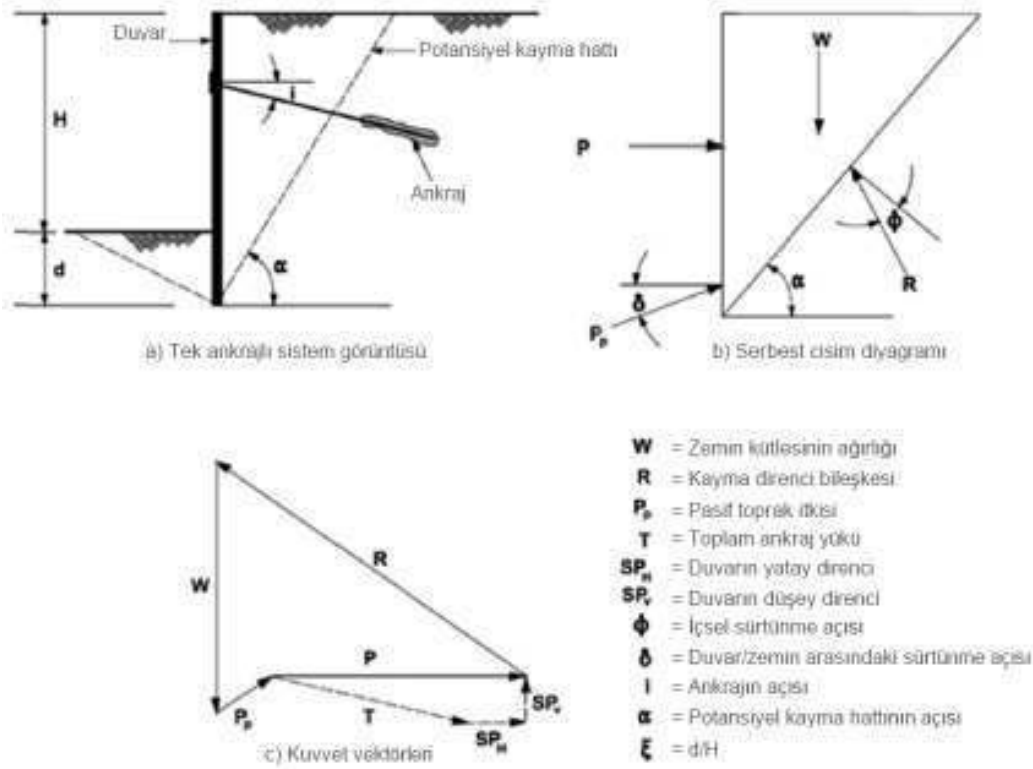
5.4.3 Dış stabilite tahkikleri

Öngermeli ankrajlı sistemlerde dış stabilite tahkikleri, sistemin bir bütün olarak göçmesini irdeleyen toptan göçme ve taban göçmesi olarak adlandırılan kabarma analizlerini kapsamaktadır.

5.4.3.1 Toptan göçme analizi

Toptan göçme, ankrajlı sistemlerde mutlaka irdelenmesi gereken ve göçme durumunda çok büyük zararlarla sonuçlanan hareket mekanizmasıdır. Ankrajlarla tutulu kütlenin tamamının bir bütün olarak göçmesi toptan göçme olarak adlandırılır. Ankrajlı sistemlerde toptan göçme analizleri tek sıralı ve çok sıralı ankrajlar için farklı yöntemlerle yapılmaktadır.

Tek sıralı ankrajlarda, kazı güvenliğini istenen değerde tutacak fiktif bir kuvvetin araştırıldığı Kayan Dilim Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, düşey iksa elemanının gömülü kısmından bir kayma düzlemi geçtiği kabul edilerek, aktif ve pasif itkiler hesaplanır, ankraj yükü de kullanılarak sistemin üzerindeki kuvvetler belirlenir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 : Tek sıra ankrajlı sistemlerde kuvvet dengesi.

Sistemi dengede tutacak kuvvet aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\xi = \frac{d}{H} \quad (5.1)$$

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{(1 + \xi)^2}{\tan(\alpha)} - K_p \xi^2 (\sin(\delta) + \frac{\cos(\delta)}{\tan(\alpha - \phi)}) \right] \tan(\alpha - \phi) \quad (5.2)$$

Hesaplamalar en büyük P kuvvetin bulana kadar kayma açısı (α) ve gömülü boy (d) değiştirilerek sürdürülür. Hesaplamalar sonucunda bulunan P kuvveti ankrajlara eksenel yük, düşey iksa elemanlarına da moment olarak paylaştırılır.

Çok sıralı ankrajlarda toptan göçme analizleri yapmak daha zordur. Bu sistemlerde basitçe, kayma daresini dilimlere ayırarak her dilim için denge denklemi oluşturan Bishop (1955) ve Fellenius (1936) yöntemleri kullanılmaktadır. Hesaplamalarda, düşey ve yatay kuvvet dengesini sağlayan Limit Denge Yöntemi kullanılmaktadır. Fellenius yönteminde, sistemin güvenliği kaymaya karşı koyan kuvvetlerin momentleri ile kaydıran kuvvetlerin momentlerinin oranıdır. Öngermeli ankrajlar da kayma dairesinin arkasına uzatılarak, kaymaya karşı koyan kuvvet olarak kullanılır. Kayma dairesinin merkezine göre alınan ankrajların momenti, kaymaya karşı koyan moment olarak stabiliteye katkı sağlamaktadır. Toptan göçme analizlerinde, statik ve

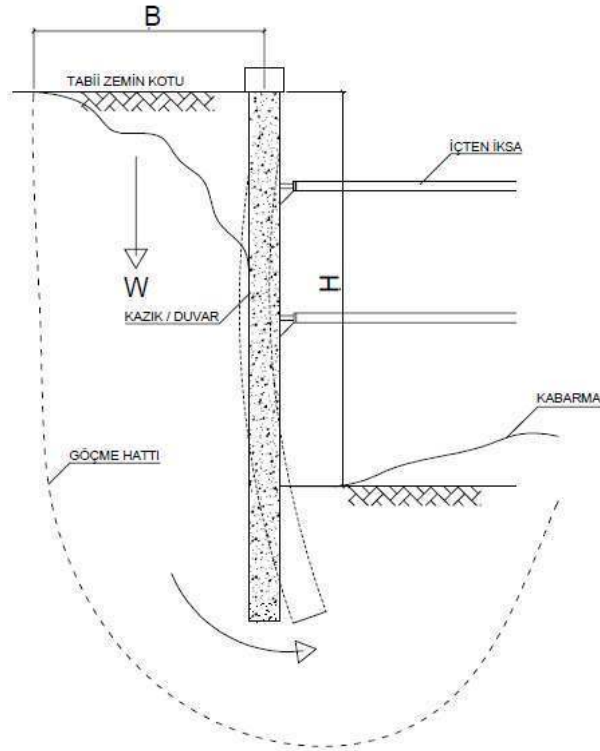
depremlı durumlarda sırasıyla 1.3 ve 1.1 güvenlik katsayıları kullanılır. İksa sisteminin, bina, yol, köprü v.b. gibi kritik yapılara veya deplasmana toleransı olmayan yapılara istinat etmesi durumunda kullanılması gereken minimum statik durum güvenlik katsayısı 1.5'tir (AASHTO, 1996).

Yapılan hesaplamalar, geçici veya kalıcı iksalarda farklı parametreler kullanılarak yapılmalıdır. Dış stabilite analizlerinde, geçici iksalar için drenajlı ve drenajsız zemin parametrelerinin hangisi daha riskli sonuç verirse, kalıcı iksalar için ise drenajlı zemin parametreleri kullanılarak hesaplamalar yapılmalıdır.

Yapılan tüm hesaplamalar yaklaşık sonuçlar vermekte ve çok zaman almaktadır. Son yıllarda geliştirilen bilgisayar programları kullanılarak, birçok kayma dairesi için aynı anda ve çok kısa sürede analizler yapılabilmektedir.

5.4.3.2 Taban kabarması

Taban kabarması genel olarak yumuşak kohezyonlu zeminlerde görülür. Taban kabarması, iksa tabanında, düşey iksa elemanı önündeki zemin tabakasının taşıma kapasitesinin, düşey elemanın arkasındaki toprak yükünü taşıyamaması durumu olarak tanımlanır. Bu durumda, kazı üst kotunda ciddi oturmalar ve kazı tabanında kabarmalar meydana gelir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 : Taban kabarması göçme mekanizması (Ou, 2006).

Taban kabarması olayı, Terzaghi yöntemi, Bjerrum ve Eide yöntemi ve kayma dairesi yöntemleriyle ayrı ayrı incelenmektedir. Tüm bu yöntemlerde, kazı tabanında, düşey iksa elemanı çevresinde dairesel bir göçme mekanizmasının olduğu ve bu mekanizmanın güvenlik faktörünün taşıma kapasitesi hesaplarına benzer mantıkla hesaplanabileceği vurgulanmaktadır.

Terzaghi yöntemiyle hesaplanan güvenlik katsayısı,

$$F_b = \frac{5.7c_u B}{W - Hc_u} \quad (5.3)$$

kohezyonlu zeminlerde kullanılan taşıma kapasitesi değerine benzer şekilde hesaplanmaktadır. Terzaghi yönteminde taban kabarmasına karşı güvenlik katsayısının $F_b > 1.5$ olması önerilmektedir (JSA, 1988). Taban kabarması olayına, yüksek taşıma kapasitesine sahip olan grovak birimlerde rastlanmaz.

5.5 İksa Sistemine Etkiyen Yüklerin Belirlenmesi

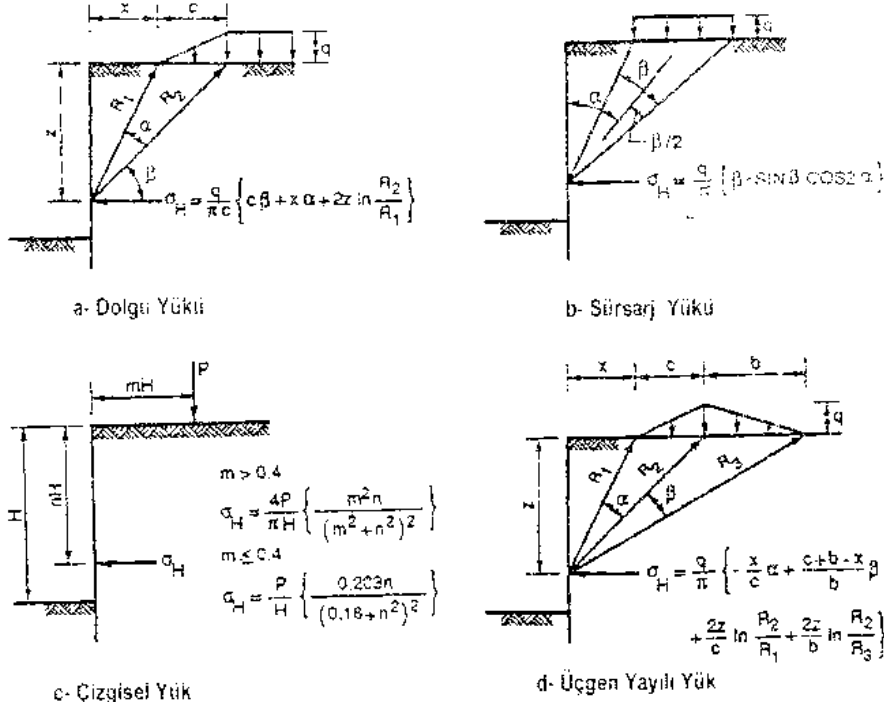
Ankrajlı iksa sistemlerinde etkili yüklerin belirlenmesi Bölüm 4'te detaylı olarak irdelenmiştir. İksa sisteminin yer aldığı zemin veya kaya birimin özelliklerine göre, iksa sistemi üzerinde etkili yanal yükler seçilir. Yanal toprak yükünün yanında iksa sistemleri üzerinde etkili olacak diğer yükler ise su ve sürşaj yüküdür.

5.5.1 İksa sistemleri üzerinde etkili sürşaj yükleri

İksa üst kotunda yer alan düşey yükler, iksa aynasında derinlik boyunca değişik noktalarda yatay gerilmeler doğurmaktadır. Düşey sürşaj yüklerinin (q) iksa aynası boyunca oluşturduğu yatay gerilme (σ_h), yatay toprak itkisi katsayısına (K) bağlı olarak değişmektedir.

$$\sigma_h = Kq \quad (5.4)$$

Değişik sürşaj yüklerinin doğurduğu yatay gerilme değerleri Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9 : Sürsarı yüklerinden kaynaklanan yatay gerilme değerleri (Navfac, 1982).

5.6 Sismik İksa Tasarımı

Ankrajlı sistemlerin sismik davranışı hakkında geniş çaplı araştırmalar henüz yapılamamıştır. California (1987) ve Northridge (1994) depremlerinde, ankrajlı iksalar üzerinde yapılan araştırmalar, ankrajlı sistemlerin diğer istinat yapılarına göre daha sağlıklı olduğunu ortaya koymuştur (Ho, 1998).

Ankrajlı sistemlerde yapılan sismik stabilite tahkikleri, içsel stabilite ve toptan stabilite tahkikleri adı altında ayrı ayrı incelenir. İçsel stabilite tahkiklerinde, ankraj halatının kopması, halat-enjeksiyon veya zemin-enjeksiyon arasındaki sıyrılma ve iksa duvarı stabilitesini etkileyecek yanal yük artışı incelenir. Toptan stabilite tahkiklerinde ise sistemin bir bütün olarak göçmesi incelenir.

5.6.1 Sismik toprak basınçları

Deprem anında iksa sistemlerinde oluşacak yanal toprak basınçları ilk olarak Okabe (1926) ve Mononobe (1929) tarafından incelenmiş ve Mononobe-Okabe yöntemi olarak günümüze kadar gelmiştir. Mononobe-Okabe yöntemi Coulomb yöntemini esas alır. Coulomb yönteminde aktif (P_A) ve pasif (P_P) toprak itkisi olarak

Aktif olarak kayması düşünülen kütlenin ağırlığı W_s , bu kütle üzerinde etkili yatay ve düşey sismik yük katsayıları ise sırasıyla k_h ve k_v 'dir.

$$D' = \left[1 + \left[\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + i - \theta)}{\cos(\delta - \beta + \theta) \cos(i - \beta)} \right]^{1/2} \right]^2 \quad (5.6)$$

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta + \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta - \beta + \theta) D'} \quad (5.8)$$

$$P_{PE} = \frac{1}{2} K_{PE} \gamma H^2 (1 - k_v) \quad (5.10)$$

71

H : İstinat duvarı yüksekliği (m)

ϕ : İstinat arkasındaki zeminin içsel sürtünme açısı (°)

δ : Duvar ve zemin arasındaki sürtünme katsayısı (genelde, $\delta=2/3\phi$)

$\dot{I}$: Duvar arkası dolgu eğimi (°)

β : Duvar arkasının eğimi (°)

k_h : Yerçekiminin bir fonksiyonu olan yatay sismik yük katsayısı

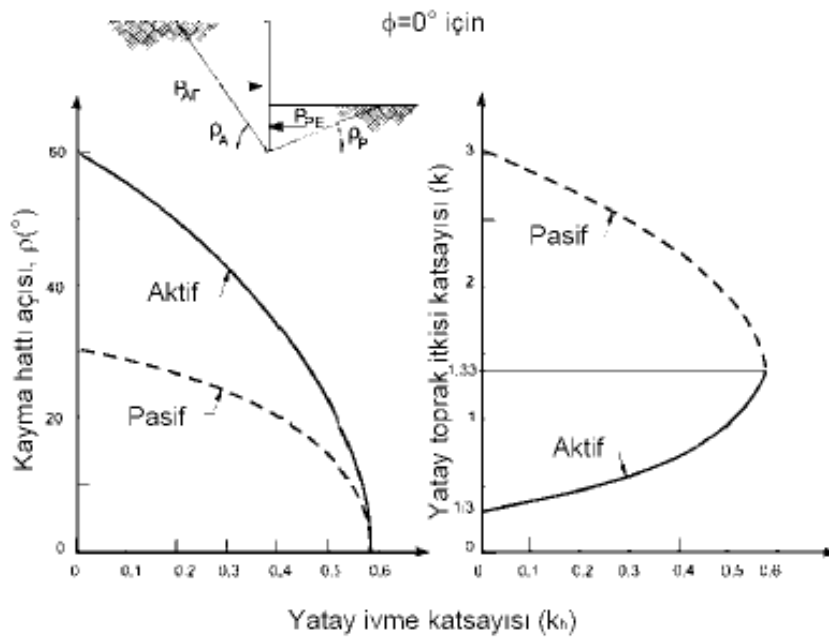
k_v : Yerçekiminin bir fonksiyonu olan düşey sismik yük katsayısı

g : Yerçekimi ivmesi

Yatay ve düşey sismik yük katsayıları sırasıyla, 0.0~0.5 ve 0.0~0.2 aralığında değişmektedir. Yatay doğrultuda mesnetlenmiş istinat perdeleri için düşey sismik yük katsayısı, $k_v=0$ alınabilmektedir. Bu durumda yatay sismik yük katsayısı (k_h), yerçekimi ivmesi katsayısının (A) yarısı alınabilir. Örneğin 1. Derecede deprem bölgesinde, $A=0.4g$ iken $k_h=0.2g$ alınabilir.

5.6.2 Sismik toptan stabilite tahkikleri

Sismik yükler altında toptan stabilite tehlikeleri, sanal statik (*pseudo-statik*) limit denge yöntemi kullanılarak yapılır. Düşey iksa elemanı alt ucundan ve ankrajların arkasından bir kayma hattının varlığı kabul edilir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 : Yatay ivme katsayısı ve tahmini göçme hattı ilişkisi (Sabatini, 1999).

Göçmesi muhtemel bölgenin tutulabilmesi için ankrajların kök boyunun kayma hattının dışında kalması gerekmektedir. Yatay sismik yük katsayısı arttığında, göçme hattının eğimi (ρ_A) azalmakta ve stabilite için gerekli ankraj serbest boyu da artmaktadır.

$$\rho_A = (\phi - \theta) + \tan^{-1} \left(\frac{\left\{ \tan(\tan a + \cot b) [1 + \tan(\delta + \theta + \phi) \cot b] \right\}^{1/2} - \tan a}{1 + \tan(\delta + \beta + \theta)(\tan a + \cot b)} \right) \quad (5.11)$$

$$a = \phi - i - \theta \quad (5.12)$$

$$b = \phi - \beta - \theta \quad (5.13)$$

Toptan göçme analizleri, pratik ve kapsamlı olması açısından daha çok bilgisayar programları kullanılarak yapılmaktadır. Toptan göçme analizlerinde de sismik yatay toprak itkisi, $k_h = 0.5A$ değeri kullanılabilir. AASHTO (1996), kullanılan bu değer 50 yılda bir kez %10 olasılıkla aşılabileceğini bildirmektedir. Sismik toptan stabilite analizlerinde hedeflenen güvenlik katsayısı en az 1.1 olmalıdır.

5.7 Öngermeli Ankraj Boyutlandırılması

5.7.1 Ankraj serbest boyunun tayini

Ankraj serbest boyunun tayini, kazı alt kotundan geçen muhtemel göçme hattının konumuna göre belirlenir (Şekil 5.12).

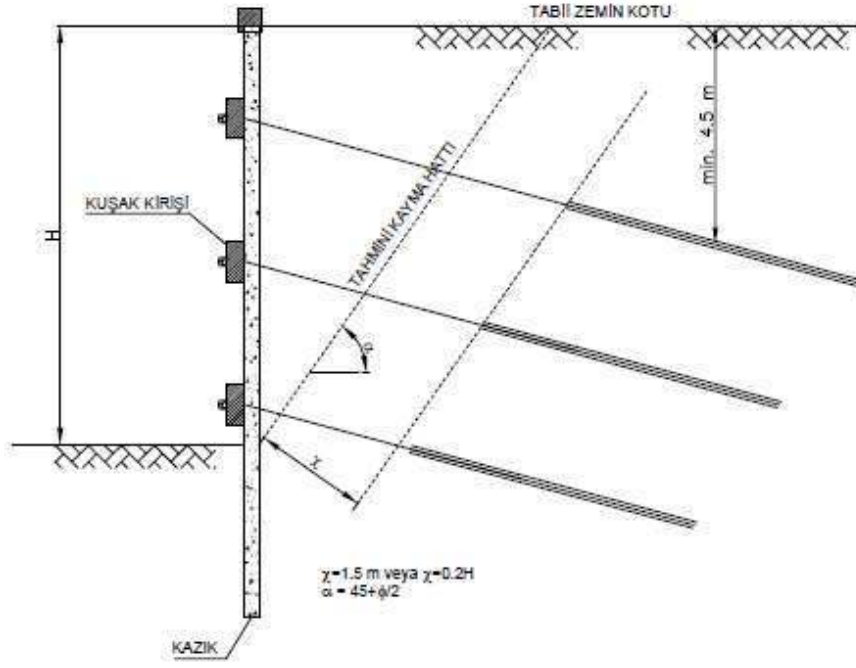
İstinat yapısı arkasındaki zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) değerine bağlı olarak, kayma hattının yatayla yaptığı açı değeri,

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (5.14)$$

ve serbest ankraj boyunun belirlenmesi için gerekli öteleme miktarı,

$$x = 0.2H \quad (\text{veya } x = 1.5 \text{ m, hangisi daha büyükse}) \quad (5.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Tasarlanacak iksanın önemi, istinat ettiği yapılar, bulunduğu zemin v.b. özellikler dikkate alınarak, muhtemel kayma hattının geçtiği nokta ve öteleme miktarı değişebilir. Ou (2006), muhtemel kayma hattının, düşey iksa gömülü boyunda oluşacak dönme noktasından geçtiğini ve öteleme miktarının $x \geq 2$ m olacağını savunmaktadır.



Şekil 5.12 : Öngermeli ankraj serbest boyunun belirlenmesi.

5.7.2 Ankraj kök boyunun tayini

Ankraj kök bıyunun tayininde ankrajın içerisinde bulunduğu zeminin sürtünme direnci büyük önem taşımaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde, ankraj kökü ile zemin arasındaki nihai sürtünme kuvveti (T_f , kN),

$$T_f = \pi D L \alpha c_u \quad (5.16)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada,

c_u : Ankraj kökü boyunca etkili ortalama drenajsız kohezyon (kPa)

α : Adezyon faktörü

D : Ankraj kök bölgesi delik çapı (m)

L : Ankraj kök bölgesi uzunluğu (m)

Kohezyonlu zeminlerde, kohezyon miktarı arttıkça adezyon faktörü düşmektedir. Genel olarak, $c_u > 100$ kPa olan katı-sert killerde $\alpha = 0.45$ değeri kullanılmaktadır (Xanthakos, 1991).

Kohezyonsuz zeminlerde, ankraj kök kapasitesi genel olarak (T_f , kN),

$$T_f = \sigma_v \pi D L \tan \phi \quad (5.17)$$

σ_v : Ankraj kökü boyunca etkili ortalama düşey efektif gerilme (kPa)

ϕ : Ankraj kökü boyunca yer alan zeminin içsel sürtünme açısı (°)

Öngermeli ankrajların kök kapasitesinin belirlenmesinde yapılan gözlem ve deneylerin önemi büyüktür. Zira yapılan deney ve gözlemler sonucunda birçok zemin için birim sürtünme kapasitesi değerleri elde edilmiştir (Çizelge 5.3). Hesaplamalarda, yukarıda yeralan bağıntılardan daha çok birim sürtünme kapasitesi (q_s) değerleri kullanılmaktadır.

$$T_f = q_s \pi D L \quad (5.18)$$

Kaya birimlerde yapılan öngermeli ankrajlarda da birim sürtünme kapasitesi değeri kullanılarak kök kapasitesi hesap edilmektedir. Kayalarda q_u serbest basınç mukavemeti olmak üzere,

$$T_f = (0.1 \sim 0.25) q_u \quad (5.19)$$

değeri kullanılmaktadır (Ou, 2006). Bloklu sağlam kayalarda 0.1 değeri kullanılırken ayrılmış kayalarda 0.25 değeri kullanılmaktadır.

Kök boyu için minimum uzunluk, zeminlerde 3.00 ve kayalarda 4.60 m olarak önerilmektedir. İksa üst kotlarında yapılacak ankrajların kök bölgesinde, yeterli reaksiyon alabilmek için en az 4.50 m gömülü olmalıdır. Birim sürtünme direnci değeri kullanılarak hesaplanan ankraj kök boyu kapasitesi için minimum güvenlik katsayısı zeminlerde 2.5 ve kayalarda 3.0 olmalıdır (AASHTO, 1996). Arazide yükleme deneyleri yapılarak bu değer test edilir ve gerektiğinde değiştirilebilir.

Ülkemizde yapılan ankrajlar genel olarak havalı veya augerli sistemlerle imal edilmekte ve ortalama delgi çapları 120 mm olmaktadır. Ankraj kök boyları da genelde 8.00 m seçilmektedir. Trakya formasyonunda yapılan öngermeli ankraj çekme deneyleri sonucunda 60-70 ton yükler rahatlıkla test edilebilmektedir. Özellikle grovak birimlerde yer alan ve 30-35 ton çekme yüküne göre tasarımı yapılan ankrajlı geçici iksa yapılarında, ankrajlara gelecek yükler dikkatlice hesaplanarak ankraj kök boyları kısa tutulabilir.

5.7.3 Ankraj yatay aralığının tayini

Öngermeli ankraj yatay aralığını belirlemek için, öncelikle yatay yük dağılımının her bir düşey ankraj sırasına gelen miktarını belirlemek gerekir. Her bir ankraj sırasına gelen yükler birim metre genişlikteki birim yüklerdir. Bu yükler yatay ankraj aralığı ile çarpılarak her bir ankraja gelen eksenel yük bulunmuş olur. Eksenel yükler hesaplanırken ankrajların yatayla yaptığı $10\sim15^\circ$ açı unutulmamalıdır. Ankraj yatay aralığı belirlenirken düşey iksa elemanının konumu da dikkate alınmalıdır. Zira kazıklı iksalarda öngermeli ankrajları kazıkların arasından yapmak hem kolay hem de kazıklara zarar vermemek açısından daha uygundur. Yatay aralığı belirlenen ankrajın üzerine gelecek yatay yük, halat kapasitesini, ankraj kök direncini, halat-enjeksiyon ve enjeksiyon-zemin arasındaki sürtünme direncini aşmamalıdır.

Ankrajların yatay aralığı, özellikle kök bölgesinde ve iksa yüzeyinde yüklerin girişiminden dolayı belirli bir değerden düşük olamaz. Bu değer çeşitli standartlarda, yüzey elemanının kalınlığı (d_b) dikkate alınarak, Çizelge 5.4'teki gibi tanımlanmaktadır.

Çizelge 5.4 : Öngermeli ankraj yatay aralıkları (CICHE, 1998).

Standart	Minimum yatay aralık
FIP (1982)	$>1.50\text{ m}$ veya $> 4d_b$
BSI (1989)	$>1.50\sim2.00\text{ m}$ veya $> 4d_b$
PTI (1989)	$>1.20\text{ m}$ veya $> 6d_b$
AASHTO (1996)	$>1.20\text{ m}$ veya $> 4d_b$
DIN (1990)	70 tondan sonra $>1.00\text{ m}$, 130 tondan sonra $> 1.50\text{ m}$

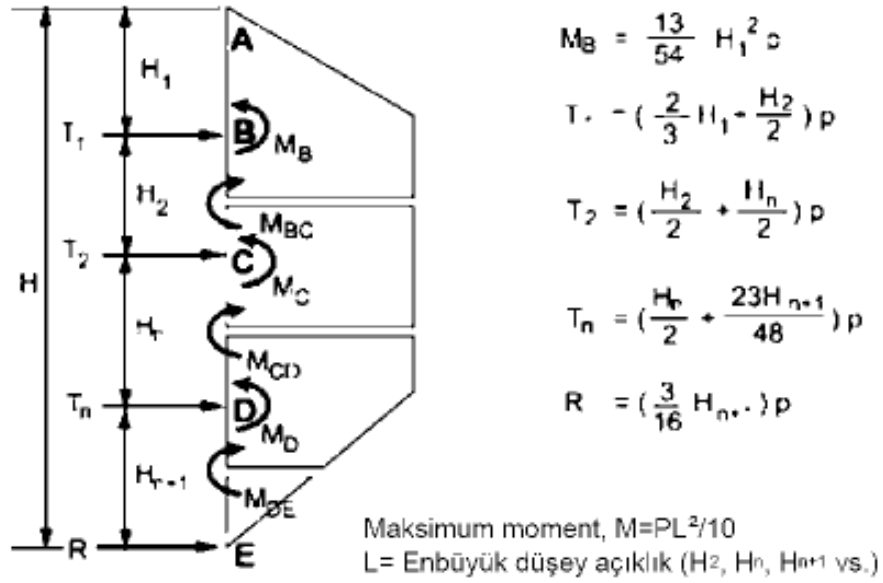
5.7.4 Ankraj halatının tayini

Öngermeli ankraj halatının tayini için, düşey ve yatay aralığı belirlenen herbir ankraja gelen eksenel kuvvetler halatlara aktarılır. Oluşan maksimum eksenel yükü taşıyacak halat kesiti ve sayısı Çizelge 5.1 kullanılarak seçilir. Tasarım sırasında, standart ölçülerde üretilen halatların çaplarının değil sayılarının değiştirilerek istenilen kapasitenin sağlanması daha uygun olacaktır.

5.8 İksa Düşey Elemanının Tayini

5.8.1 Düşey elemanın kesitinin belirlenmesi

İksa düşey elemanları, yanal toprak yükleri, sürşaj, su ve sismik yükler dikkate alınarak boyutlandırılır. İksa elemanı üzerinde, ankraj aralıkları ve yatay yüke bağlı oluşacak moment değeri düşey elemanın boyutlandırılmasında en büyük etkindir. Çok sıralı ankrajlı sistemlerde, düşey eleman çok açıklıklı, sürekli kiriş gibi düşünülür ve her ankraj noktası sanal mesnet olarak kabul edilir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : Düşey iksa elemanının momentin belirlenmesi (Sabatini, 1999).

Kabul edilen yatay yük dağılımına bağlı olarak, her ankraj için etkili yük alanı hesaplanarak, ankraj üzerinde etkili olan birim genişlikteki eksenel yük hesaplanır. Her bir ankraj noktasında kuvvet dengesi yazılarak etkili moment hesaplanabilir. Sürekli kiriş kabulü yapılarak iksa elemanı üzerinde oluşacak maksimum moment,

$$M_{maks} = \frac{1}{10} Pl^2 \quad (5.20)$$

olarak hesaplanabilir. Burada P , birim genişlikteki maksimum yatay yük değeri ve l ise düşey ankraj aralığıdır.

Düşey iksa elemanında oluşacak kesme kuvveti ise,

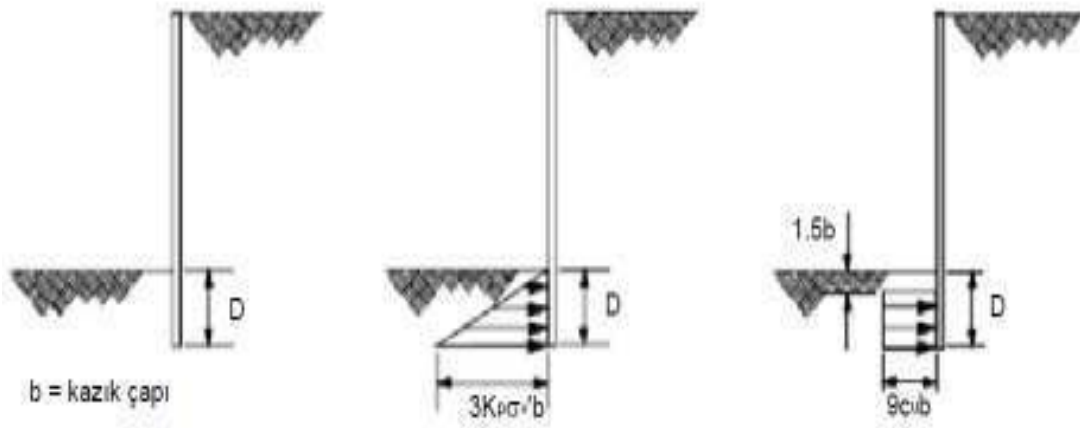
$$Q_{maks} = \frac{1}{2} Pl \quad (5.21)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanabilir.

Düşey iksa elemanında oluşacak eksenel yük değeri, açılı olarak imal edilen ankrajlara uygulanacak germe yüküne ve iksa elemanının kendi ağırlığına bağlı olarak her kademede değişiklik göstermektedir. Eksenel düşey yüklerin karşılanması için, düşey iksa elemanının derin temel hesapları kullanılarak eksenel kapasitesinin hesaplanması gerekmektedir. Eksenel kapasite hesabı yapılırken, düşey elemanın kazı kotunun altında yer alan gömülü boyu için sürtünme kapasitesi ve düşey elemanın alt ucu için uç kapasitesi hesapları ayrı ayrı yapılmalıdır.

5.8.2 Düşey elemanın gömülü boyunun belirlenmesi

Öngermeli ankrajlı iksa imalatında, ilk kademe kazı yapılırken tüm yatay yükler düşey eleman ve kazı tabanında oluşacak pasif zemin direnci ile karşılanır. Sonraki kademelerde, yatay yükler ankrajlar vasıtasıyla paylaşılırken son kazı kademesinde kazı tabanı ve öngermeli ankraj arasındaki bir miktar yatay itki yine pasif toprak direnci ile karşılanır. Kazı tabanında oluşabilecek pasif direnci, zemin cinsi, iksa hareketi ve iksa gömülü boyu ile birebir alakalıdır. Kazı kademelerinde ve özellikle son kazı kademesinde oluşacak yatay itkilerin karşılanması için gerekecek pasif direnç değeri, yatay yüklü kazıklarda olduğu gibi Broms (1965) tarafından geliştirilen bağıntılarla hesap edilmektedir. Broms (1965), iksa gömülü boyunda oluşabilecek pasif direnç değerini Şekil 5.14'teki gibi göstermiştir.



Şekil 5.14 : Broms yöntemi ile nihai pasif direncin hesaplanması.

Broms (1965) yöntemi ile hesaplanan pasif direnç, kazık soket boyunda oluşacak yatay itkidenden büyük olmalıdır. Kazık soket boyu değiştirilerek bu şart sağlanabilmektedir.

5.9 Öngermeli Ankraj Korozyon Tedbirlerinin Belirlenmesi

Öngermeli ankraj halatlarında zaman içerisinde oluşacak korozyonun önlenmesi için çeşitli tedbirler alınmaktadır. Alınacak tedbirler aşağıdaki gereksinimleri karşılamalıdır (Xanthakos, 1991).

- i. Korozyona karşı korunan ankrajların proje ömrü, en az diğer ankraj türlerinin proje ömrü kadar olmalıdır.
- ii. Alınacak tedbirler çevreye ve ankraj kapasitesine zarar vermemelidir.
- iii. Serbest boyda oluşacak sınırlı deplasmanlara engel olmamalıdır.
- iv. Diğer metal ve maddelerle reaksiyona girebilecek bileşenler içermemelidir.
- v. Ankraj proje ömrü boyunca ciddi bakım ve yenilenme gerektirmemelidir.
- vi. Germe sırasında oluşabilecek deplasmanlara izin vermelidir.

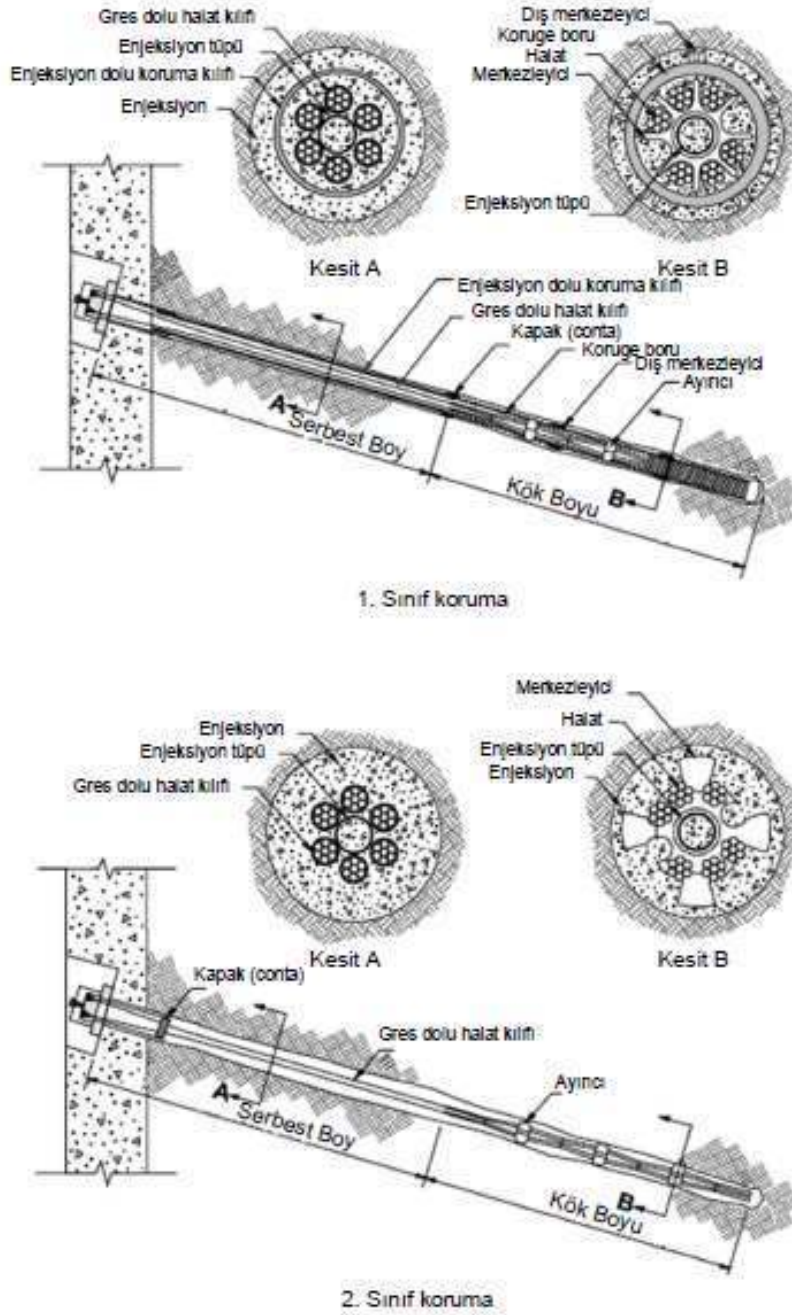
Korozyona karşı alınacak tedbirler, ankraj kafasında, serbest ve kök boyunda farklı olabilir. Kafa bölgesinde, beton veya çelik kapaklar yapılarak içerisi korozyona karşı etkili maddelerle veya enjeksiyonla doldurulur. Ankraj serbest boyunda, kılıf ve enjeksiyon kullanılarak, kök boyunda ise merkezleyici ve kılıf kullanılarak korozyona karşı tedbirler alınır.

Korozyona karşı alınacak tedbirler, zeminlerin korozif özellikleri ve ankrajlı sistemlerin önemi dikkate alınarak 3 farklı şekilde sınıflandırılabilir. Birinci sınıf koruma, zemin özelliklerinin korozif olduğu ve çok tabakalı değişken özellikli zeminler için kullanılır. İkinci sınıf koruma, zemin özelliklerinin korozif olduğu tek tabakalı zeminler için kullanılır (Şekil 5.15). Üçüncü sınıf koruma ise korozif olmayan zeminlerde korozyona karşı önlem alınmaması durumudur.

5.10 Ankrajlı İksa Hareketlerinin Gözlenmesi

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan elverişsiz durumların, zamanında önlem alınarak düzeltilmesi için arazide yapılan ölçüm ve gözlemler büyük önem taşımaktadır. Derin kazılarda yapılan kazı sebebiyle zeminde ve iksa elemanlarında yatay, düşey ve hem yatay hem düşey hareketler oluşabilir. İksa üst kotunda oluşan düşey deplasman, iksa aynasında oluşan yatay deplasman, kazı tabanında oluşan kabarma ve iksa elemanlarında oluşan dönme hareketi, iksa sistemleri için tariflenen

hareket tipleridir. Oluşan bu hareketler, iksa güvenliğinin yanında kazı sınırlarında bulunan üstyapıları da tehdit etmektedir.



Şekil 5.15 : Korozyondan koruma yöntemleri (Xanthakos, 1991).

5.10.1 Yatay iksa hareketlerinin gözlenmesi

İksa hareketlerinde oluşan tüm hareketlerin kaynağı genel olarak kazı sırasında oluşan yatay deplasmanlardır. Kazı boyunca her kademedede oluşacak yatay deplasmanların belirlenmesi için, geomatik yöntemler ve fiziksel yöntemler geliştirilmiştir. Geomatik yöntemler için, nivelman, alinyiman ve geomatik ağ

yöntemi sıralanabilir. Fiziksel yöntemler ise, ekstansometreler, çatlak ölçerler, yük hücreleri, reflektörler ve inklinometrelerdir. Ülkemizde yaygın ölçüm yöntemi inklinometredir.

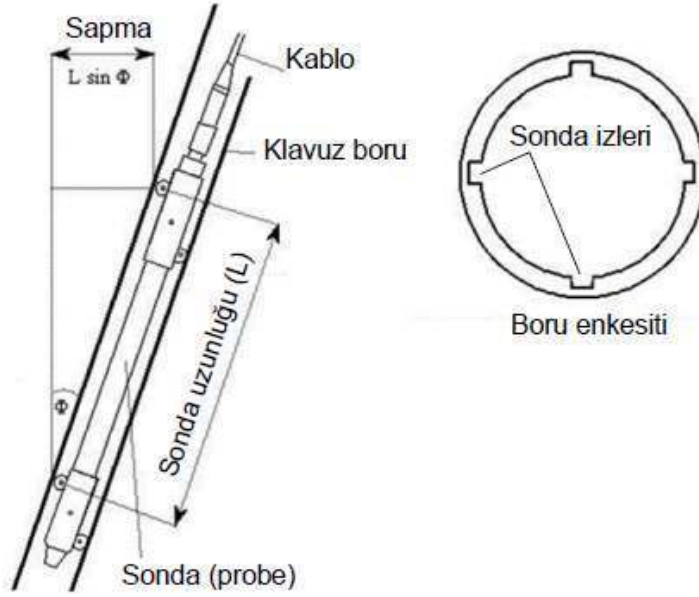
İnklinometre, içinden geçtiği borunun eksenine dik doğrultudaki hareketleri ölçen elektronik ünedir. İnklinometreler üç temel parçadan oluşmaktadır (Şekil 5.16).

- i. Plastik, alüminyum veya çelikten yapılan ve kazı yapılmadan önce zemine yerleştirilen kılavuz borusu. Kazı aynası derinliği boyunca ve ayna arkasına yerleştirilen boru, kalıcı olarak zemine yerleştirilir ve tüm okumalar bu borunun içerisinden alınır.
- ii. Yerçekimine bağlı bir transdüserle sahip ve ölçeklendirilmiş kabloya bağlı taşınabilir sonda kullanılarak düşey kılavuz borudan her 50 cm’de bir okuma alınır.
- iii. Sonda eğimini elektronik olarak algılayan taşınabilir okuma birimi ile okumalar kaydedilir.



Şekil 5.16 : Tipik inklinometre görüntüsü.

İnklinometrelerden ölçüm almak için, sonda aleti kılavuz borunun içerisine indirilir. Kablo çekilirken üzerindeki ölçeğe göre her birimde okuma alınır ve sondanın eğimi ölçülür. Ölçülen açı ve sondanın uzunluğundan faydalanılarak her kademede oluşan yatay deplasmanlar ölçülmüş olur (Şekil 5.17).

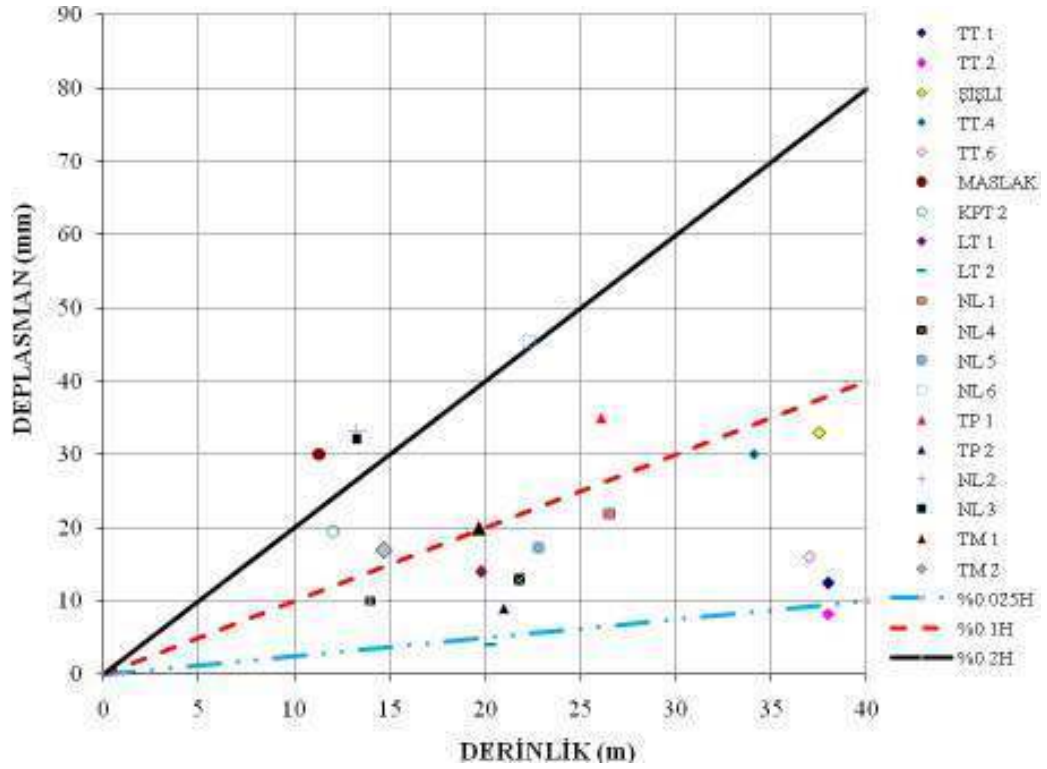


Şekil 5.17 : İnklinometrenin çalışma prensibi.

İksa aynasında oluşacak yatay deplasman miktarı, zemin cinsine ve kazı derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Kazı derinliğiyle doğru orantılı olarak artan yatay deplasman değeri, yumuşak killi zeminlerde, kumlu zeminlerden daha fazla olmaktadır. İksa aynasında kazı derinliğine (H_e) bağlı yatay deplasman,

$$\delta_{yatay} (\%) = (0.2 \sim 0.5) H_e \quad (5.22)$$

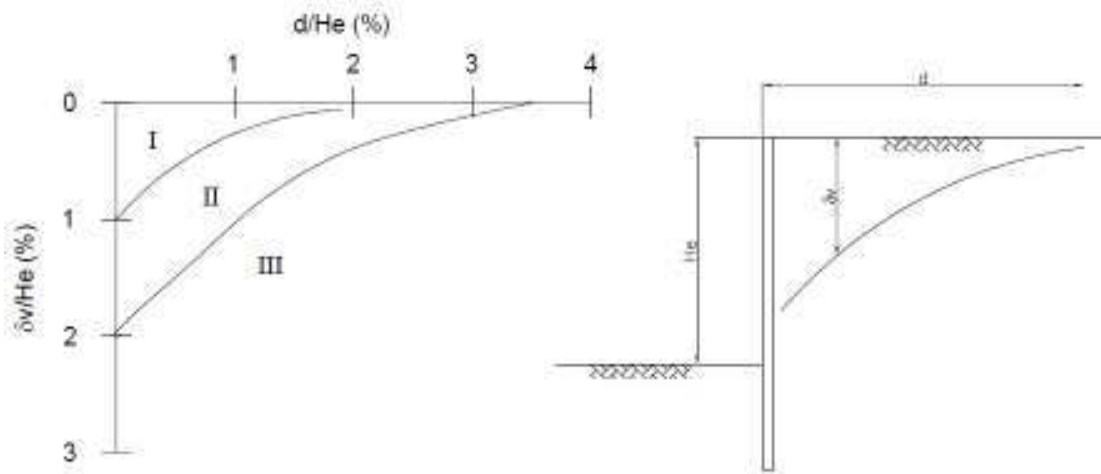
aralığındadır (Ou, 2006). Bu araştırma kapsamında yapılan çalışmalarda, grovak birimlerde yapılan ankrajlı derin kazılarda kullanılan 19 farklı inklinometre incelenmiş ve yatay deplasman değerinin ortalama $\%0.1H_e$ mertebesinde olduğu anlaşılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 : Grovak birimlerde öngermeli ankrajlı sistemlerin yatay deplasmanı.

5.10.2 Düşey iksa hareketlerinin belirlenmesi

Düşey iksa hareketleri iksa üst kotunda, oturma ve kazı tabanında kabarma şeklinde görülür. İksa üst kutunda oluşacak düşey deplasmanlar (δ_v), komşu yapılara için büyük risk oluşturmaktadır. Düşey deplasmanlar genel olarak topoğrafik ölçümlerle takip edilmektedir. Düşey deplasmanlar iksa aynasında oluşan yatay deplasmanlara bağlı olarak gelişir ve yatay deplasman oranında artar (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 : Kazı derinliği ve düşey deplasman ilişkisi (Peck, 1969).

Şekil 5.19’da tanımlanan I. Bölge, kum ve katı killler için, II. Bölge, çok derin olmayan ve yumuşak killerde yapılan kazılar için ve III. Bölge çok yumuşak killerde yapılan derin kazılar için tahmini deplasman dağılımını göstermektedir.

Mana ve Claugh (1981) tarafından yapılan araştırmalarda, düşey deplasman ($\delta_{düşey}$) ve yatay deplasman (δ_{yatay}) arasında,

$$\delta_{düşey} = (0.5 \sim 0.75)\delta_{yatay} \quad (5.23)$$

ilişkisinin olduğunu savunmaktadır. Çok yumuşak killerde, yatay ve düşey deformasyonların eşit olacağı söylenebilir (Ou, 2006).

5.11 Öngermeli Ankraj Deneyleri

Öngermeli ankrajların bir yapı elemanı olarak diğer elemanlardan en büyük farkı, işletmeye alınmadan önce mutlaka test edilmesidir. Her ankraj, imalattan sonra servis yüküne kilitlenmesi için hidrolik pistonlar kullanılarak gerilir. Bu germe işlemi ile aslında ankrajın kapasitesi de test edilmiş olur. Ankrajlarda yapılacak germe ve test işlemleri çeşitli standartlarda tanımlanarak, yapılacak deneyler amaçlarına göre sınıflandırılmıştır. Öngermeli ankrajlar üzerinde yapılan deneyler genel olarak, kanıt deneyi, uygunluk deneyi ve kabul deneyi olarak sınıflandırılabilir (BS 8081, 1989).

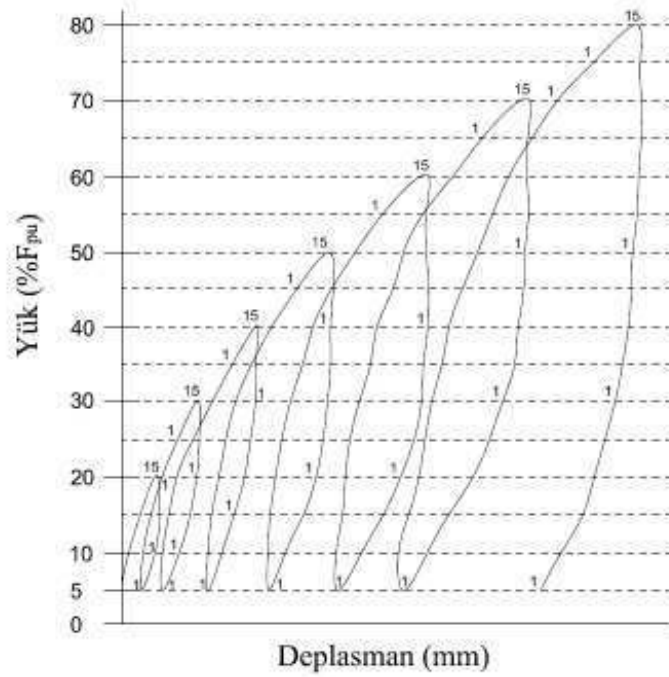
5.11.1 Kanıt deneyi

İnceleme alanında imal edilen, proje ankrajlarının üzerinde, kademeli yükleme ve boşaltma şeklinde yapılır. Tasarım aşamasında yapılan kabüllerin, saha koşulları ve malzeme özelliklerinin ve güvenlik katsayılarının kontrolünü sağlamak için yapılır. Kanıt deneyleri, kullanılan malzeme ve yöntemin yerinde veya laboratuvar da test edilmesini kapsamaktadır. Arazide öngermeli ankrajlar üzerinde yapılan deneylerle, malzemelerin, üretim, nakliye ve depolama gibi etkenlerden etkilenme derecesi de belirlenmiş olur.

Kanıt deneyinde ankraj yüklerinin ispatlanması için kademeli şekilde, ankraj halatı kopma yükünün (f_{pu}) belirli oranında yükleme ve boşaltmalar yapılır. Her yükleme ve boşaltmada ankraj yükü ve ankraj kafasında oluşacak deplasmanlar kaydedilir. Kanıt deneyi için önerilen yükleme ve boşaltma bilgileri Çizelge 5.5 ve Şekil 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Kanıt deneyi germe bilgileri (BS 8081, 1989).

Yük artış oranı (% f_{pu})							Minimum Gözlem Süresi
1. Çevrim	2. Çevrim	3. Çevrim	4. Çevrim	5. Çevrim	6. Çevrim	7. ve 8. Çevrim	
%	%	%	%	%	%	%	dakika
5	5	5	5	5	5	5	1
10	20	30	40	50	60	70	1
15	25	35	45	55	65	75	1
20	30	40	50	60	70	80	15
15	20	30	40	40	50	50	1
10	10	15	20	20	30	30	1
5	5	5	5	5	5	5	1



Şekil 5.20 : Kanıt deneyi yükleme grafiği (BS 8081, 1989).

Kanıt deneylerin proje yükünün (T_w) geçici ve kalıcı ankrajlarda sırasıyla %125 ve %150 katı test edilmelidir. Sahada yapılan kanıt deneyi sonuçları kullanılarak ankraj serbest boyu (L_{fs}) hesaplanabilmektedir.

$$L_{fs} = \frac{A_t E_s \Delta_e}{T} \quad (5.24)$$

Denkleimde,

A_t : Ankraj halatı enkesit alanı

E_s : Ankraj halatı elastisite modülü

Δe : Ankraj halatının maksimum yükteki elastik uzaması

T : Maksimum yük değeri

Hesaplanan ankraj serbest boyu, tasarım için amaçlanan serbest boyun %90'ından kısa veya %110'undan uzun olmamalıdır. Ayrıca hesaplanan serbest boy, kök boyunun %50'sinin, tasarlanan serbest boy ilavesi ile oluşacak boydan da uzun olmamalıdır. Belirlenen sınırların dışında uzamaların olması durumunda, kanıt yüküne kadar iki çevrim yükleme daha yapılır ve sonuçlar tekrar kontrol edilir. Eğer ankraj sınırlar içerisinde davranış gösteriyorsa iptal edilmez, tersi durumda ankrajın en yakın bölgesine bir yenisi yapılır.

5.11.2 Uygunluk deneyi

Uygunluk deneyleri, projede tanımlı çalışan ankrajlar üzerinde uygulanır. Bu deney için ayrıca ankraj yapmak gerekmez. Bu deneyde gerilen ankrajlar, aynı zemin koşulları ve aynı malzeme kullanılarak yapılan diğer ankrajlar için referans kabul edilir. Uygulama yapılan her bölgede en az ilk üç ankraj üzerinde uygunluk deneyi yapılmalıdır.

Uygunluk deneyinde germe yükleri, proje yükünün (T_w), geçici ve kalıcı ankrajlarda sırasıyla %125 ve %150 katı olmalıdır. Uygunluk deneyi için önerilen germe bilgileri Çizelge 5.6 ve Şekil 5.21'de sunulmuştur.

Maksimum yük, 15 dakika boyunca %5'ten az düşüş gösterirse ankrajda yük kaybı yok kabul edilir ve deney tamamlanır. Yük kaybı %5'ten büyükse 2 çevrim yükleme daha yapılarak deney uzatılır. Eğer şart sağlanmıyorsa, proje yükü deney sonucuna göre düşürülmelidir.

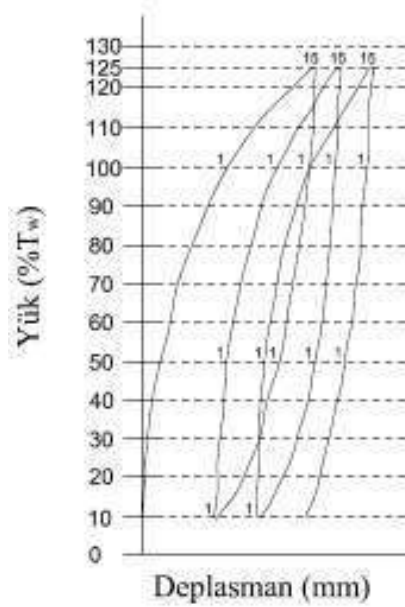
5.11.3 Kabul deneyi

Kabul deneyi sahada yapılan tüm ankrajlarda uygulanır. Ankrajların istenilen yüke kilitlenmesi sırasında proje yükünün (T_w) %125 veya %150'sine çıkılarak ankraj test edilir ve sonrasında %110'una kilitlenir. Kabul deneyi kriterleri uygunluk deneyi

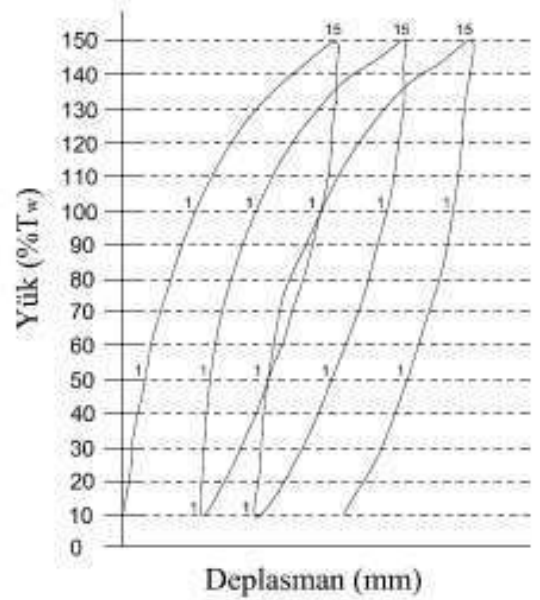
kriterlerine benzerlik göstermektedir. Deney adımları ve bekleme süreleri uygunluk deneyi değerleri ile aynı kabul edilebilir.

Çizelge 5.6 : Uygunluk deneyi germe bilgileri (BS 8081, 1989).

Geçici Ankrajlar		Kalıcı Ankrajlar		Minimum Gözlem Süresi
Yük artış oranı (%T _w)		Yük artış oranı (%T _w)		
1. Çevrim	2. ve 3. Çevrim	1. Çevrim	2. ve 3. Çevrim	
%	%	%	%	dakika
5	5	5	5	1
10	10	10	10	1
50	50	50	50	1
100	100	100	100	1
125	125	150	150	15
100	100	100	100	1
50	50	50	50	1
10	10	10	10	1



a) Geçici ankraj



b) Kalıcı ankraj

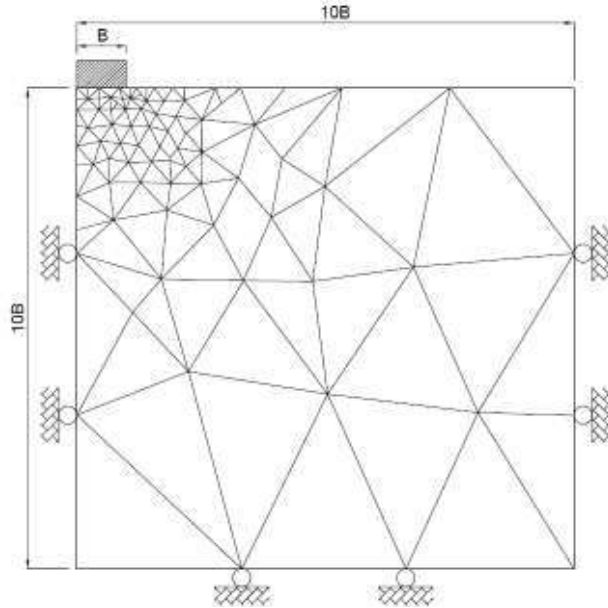
Şekil 5.21 : Uygunluk deneyi yükleme grafiği (BS 8081, 1989).

6. SONLU ELEMANLAR PROGRAMI İLE MODELLENEN ÖRNEK İKSALİ KAZI ANALİZ VE SONUÇLARI

Son yıllarda teknolojinin gelişimine bağlı olarak, karmaşık problemlerin çözümünde bilgisayar programlarının kullanılması oldukça yaygınlaşmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık matematik problemlerinin çözümünde, problemi küçük parçalara ayırarak yaklaşık hesaplamalar yapar. Mühendisliğin birçok alanında kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, geoteknik mühendisliğinde zemin ve yapı elemanlarının deformasyon analizlerinde kullanılmaktadır.

6.1 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

Plaxis bilgisayar programı, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, taşıma kapasitesi, oturma, şev stabilitesi gibi temel geoteknik problemlerini elasto-plastik davranışa uygun analiz etmek için Hollanda Delft Üniversitesi Geoteknik Bölümü tarafından geliştirilmiştir. Program, tanımlanan geometri ve elemanları, iki veya üç boyutlu olarak ve her boyutta çoklu ağlar oluşturarak çözmektedir. İki boyutlu tipik bir ağ sistemi Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : İki boyutlu tipik sonlu elemanlar ağı.

Sonlu elemanlar ağı üçgen elemanlardan oluşmaktadır. Üçgen elemanlar dörtgen elemanların kısa köşegenlerle ikiye ayrılmasıyla oluşmaktadır. Ağ elemanlarının temel işlevi tanımlanan düzlemi küçük parçalara bölerek her bölgede ayrı hesaplamalar yapılmasını ve oluşacak hataların minimuma indirgenmesini sağlamaktır. Her bir ağ elemanı 6 veya 15 noktadan oluşur. Bu noktalarda gerilmeler, şekil değiştirmeler ve boşluk suyu basıncı gibi parametreler hesaplanır. Geoteknik analizler yapan programda, kazık, temel ve perde gibi elemanlar çubuk eleman olarak, ankraj, içten iksa ve zemin çivisi gibi elemanlar ise çizgisel elemanlar olarak tanımlanır. Programda zemini temsilen ağlar kullanılırken, yapı ve zemin arasındaki etkileşimi tanımlamak için ara yüzey elemanları kullanılmaktadır.

Plaxis programında kullanılan perde, kazık, temel gibi elemanlar, eğilme ve uzama rijitlikleri girilerek tanımlanırlar. Programda kullanılan ankraj elemanları, uzama rijitlikleri ile tanımlanırlar. İki boyutlu analiz yapan programlarda kullanılan elemanların rijitlikleri birim metre genişlik için tanımlanmalıdır.

Lineer olmayan ve anizotrop yapıdaki zeminde gerilme-şekil değiştirme analizi yapmak için zemin modeli programa tanımlanmalıdır. Zemin programa tanımlanırken birim hacim ağırlık, kohezyon, kayma mukavemeti açısı, elastisite modülü ve poisson oranı gibi parametreler kullanılır. Lineer elastik model kullanılması durumunda sadece birim hacim ağırlık, elastisite modülü ve poisson oranının tanımlanması yeterlidir. Ancak anizotrop yapıdaki değişken birimlere sahip zeminlerde lineer elastik hesap modeli gerçeği tam yansıtmamaktadır. Plaxis, Mohr-Coulomb kırılma modelini kullanarak elasto-plastik analizler yapmakta ve gerçeğe yakın sonuçlar verebilmektedir.

Geoteknik problemlerin çözümünde kullanılacak sonlu elemanlar analizinde izlenecek yol aşağıdaki gibidir.

- i. Problemin tanımlanması,
- ii. İdealize zemin profilinin tanımlanması,
- iii. Kullanılacak zemin modelinin seçilmesi,
- iv. Problemin sonlu elemanlar sınırlarının ve görünümünün seçilmesi,
- v. Başlangıç koşullarının seçilmesi,
- vi. İnşaa kademelerinin belirlenmesi,

- vii. Zemin koşullarına, yapısal elemanlara ve inşaa kademelerine uygun ağ sisteminin oluşturulması,
- viii. Analizin yapılması,
- ix. Sonuçların değerlendirilmesi.

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis programı, örnek iksalı kazıların incelendiği bölümlerde de detaylı olarak tanımlanmıştır.

6.2 Örnek Derin Kazı Projelerinin Sonlu Elemanlar İle Modellenmesi

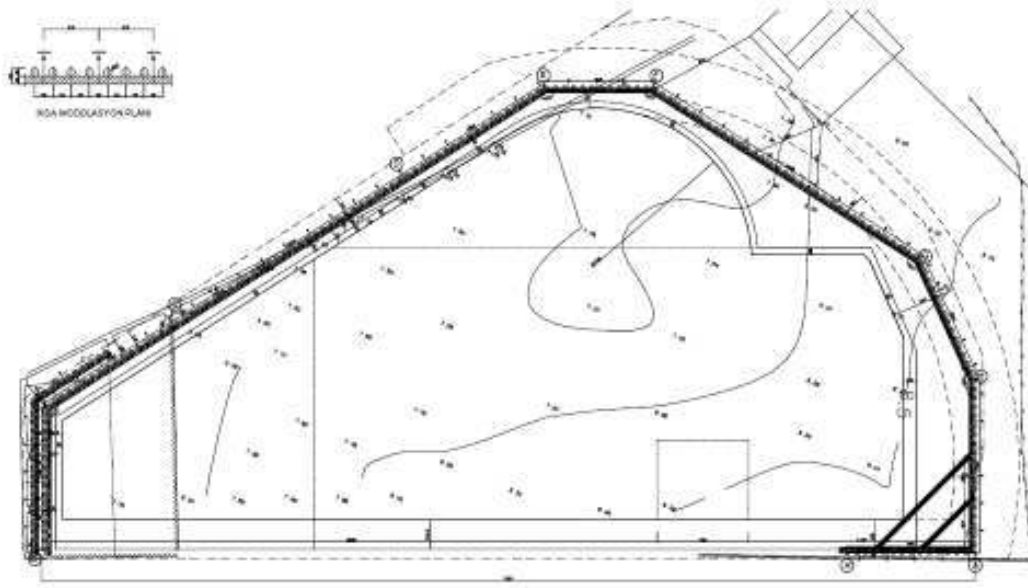
Bu bölümde grovak birimlerde yapılan iki farklı derin kazı projesi incelenmiştir. İki farklı projeyi incelemenin amacı, projelerin farklı lokasyonlarda, birinin çok ayrılmış diğerinin ise az-orta derecede ayrılmış grovak birimlerde yer almasıdır. Farklı geometrik ve geoteknik özelliklere sahip projeler aynı yöntemle incelenerek sonuçlar kıyaslanmıştır. İncelenen derin kazılar öngermeli ankraj ve yerinde dökme kazıklar (mini kazık ve fore kazık) kullanılarak imal edilmiştir. Yapılan derin kazılar, ön hesap yöntemleri ile boyutlandırılıp, sonlu elemanlar modeli oluşturularak projelendirilmiş ve yerinde başarıyla uygulanmıştır. Uygulanan bu projelerin, tasarım, modelleme ve sonuçları bu bölüm kapsamında incelenmiştir.

6.3 İnceleme Yapılan Çalışmalar

6.3.1 1 No'lu çalışma

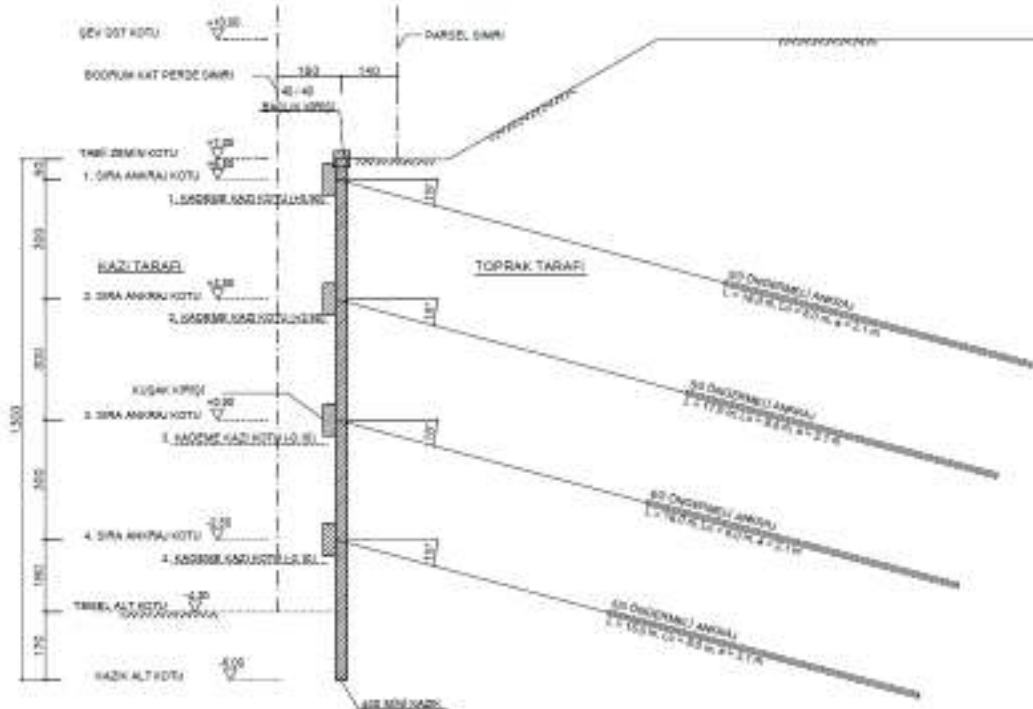
1 No'lu çalışma, trakya formasyonunun bariz olarak görüldüğü, son yıllarda yüksek yapıların yoğun olarak tercih edildiği Maslak bölgesinde yer almaktadır. Proje 1600 m² oturma alanına sahip çok katlı iş merkezi binasının yapılması için tasarlanan derin kazı iksa projesidir (Şekil 6.2).

İksa projesi kapsamında 11,00 ile 16.80 m arasında değişen yüksekliklerde kazı yapılması planlanmıştır. Yapılan kazı, arsa sınırları ve komşu yapılar dikkate alınarak iksalı olarak projelendirilmiştir. Maliyet, zaman ve arsa sınırlarında yer alan yapılar dikkate alınarak iksalı kazının mini kazık ve öngermeli ankrajlı olarak yapılması planlanmıştır.



Şekil 6.2 : 1 No'lu çalışmanın genel görüntüsü.

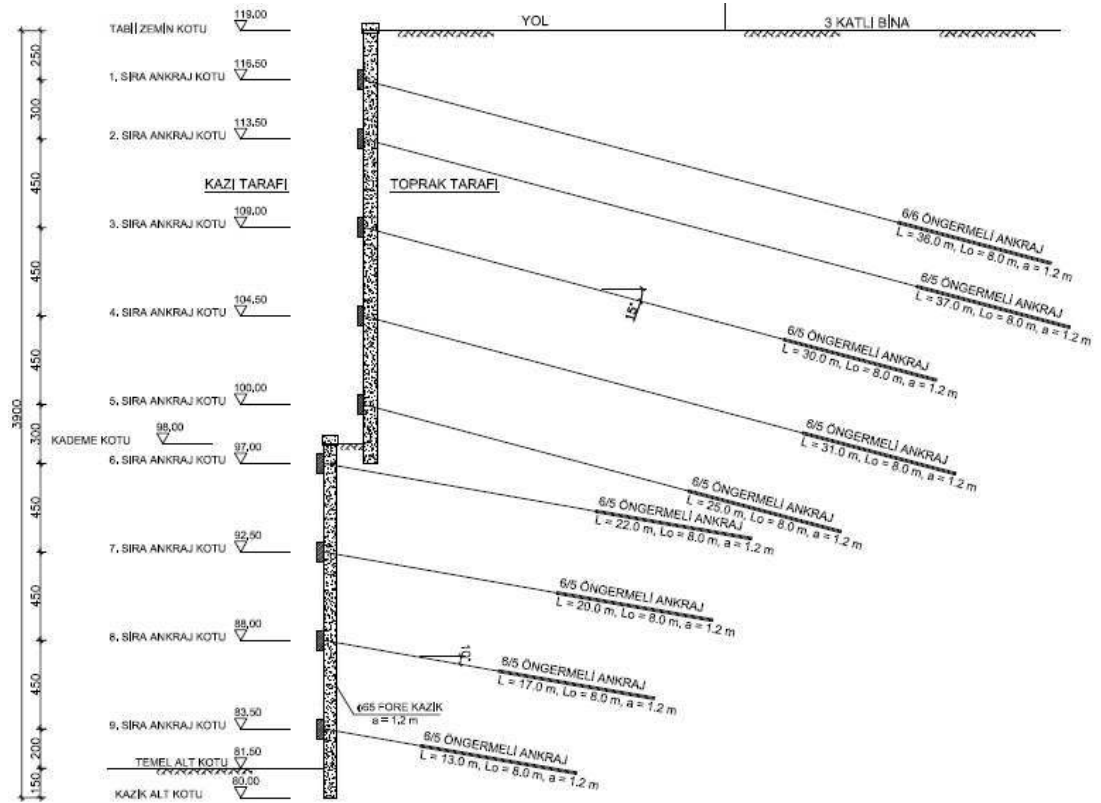
Ayrılmış grovak birimlerde yer alan proje alanı için 30 cm çapında, burgulu delgi yöntemiyle yapılan mini kazıklar ve havalı delgi yöntemi ile yapılan öngermeli ankrajlar projelendirilmiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 : 1 No'lu çalışmanın tipik sistem kesiti.

6.3.2 2 No'lu çalışma

2 No'lu çalışma, büyük çoğunluğunu trakya formasyonunun oluşturduğu Şişli bölgesinde yer almaktadır. Proje yaklaşık 18000 m² oturma alanına sahip çok katlı iş merkezi binasının yapılması için tasarlanan derin kazının desteklenmesi için yapılan iksalı kazı projesidir. İksa projesi kapsamında yüksekliği 17,00 m ile 40,00 m arasında değişen yükseklikteki kazıların yapılması planlanmıştır. Yapılan kazı, arsa sınırları ve komşu yapılar dikkate alınarak iksalı olarak projelendirilmiştir. İksalı kazının, çok yüksek kesitlere sahip olması iksa düşey elemanı olarak sürekli kazıkların yapılmasını zor kılmaktadır. Bu sebeple kesitlerde kazı aynasının kademeli olarak yapılması ve kazıkların iki farklı kottan imal edilmesi planlanmıştır. Kazının önemi dikkate alınarak iksalandırma işleminin öngermeli ankrajlarla sağlanması planlanmıştır. Ayrışmış grovak birimlerde yer alan proje alanı için 65 cm çapında, burgulu delgi yöntemiyle yapılan fore kazıklar ve havalı delgi yöntemi ile yapılan öngermeli ankrajlar projelendirilmiştir (Şekil 6.4).

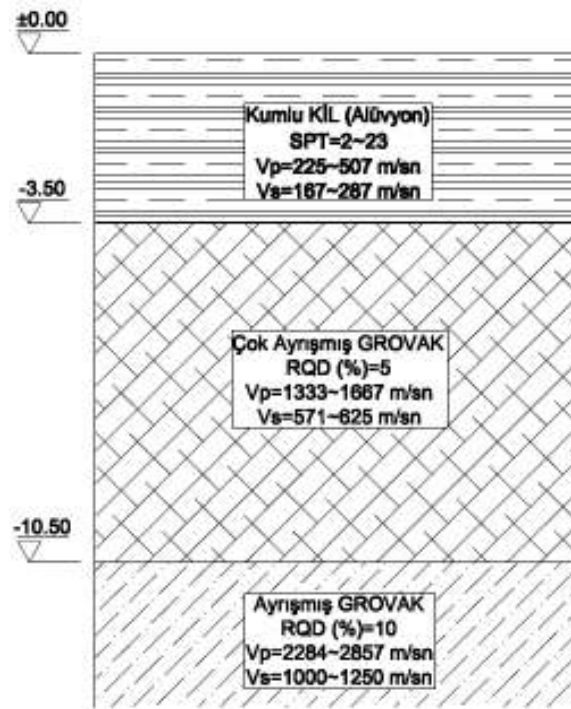


Şekil 6.4 : 2 No'lu çalışmanın tipik sistem kesiti.

6.4 Zemin Koşullarının Tanımlanması

6.4.1 1 No'lu çalışmanın zemin koşulları

Proje alanının mevcut zemin koşulları ve deprem anındaki davranışının belirlenmesi amacıyla arazide, araştırma sondajları, sismik kırılma deneyleri ve mikrotremer deneyleri yapılmıştır. Araştırma sondajları ve sismik deneyler sonucunda, arazinin genel olarak üç farklı jeolojik katmandan oluştuğu anlaşılmıştır. Arazi doğal kotundan itibaren ilk 2,00 ile 5,50 m arasında gri-kahverenkli kumlu kil birimler, altında çok ayrılmış zayıf dayanımlı, sarı-kahverenkli grovak birimler yer almaktadır. Yapılan iksalı kazı genel olarak çok ayrılmış grovak birimler içinde kalmaktadır. Bu birimin altında ise gri-boz renkli az ayrılmış kumtaşı birimler yer almaktadır. İnceleme alanında yapılan sondajlarda net olarak yeraltı suyuna rastlanmamıştır. Arazide yapılan sondajlar için hazırlanan örnek sondaj logu ve sondaj yerleşim planı EK 1'de sunulmuştur. Tüm sondaj logları, laboratuvar deneylerinin sonuçları ve arazi deneyleri incelenerek oluşturulan arazinin idealize edilmiş zemin kesiti Şekil 6.5'te verilmiştir.



Şekil 6.5 : 1 No'lu çalışmanın idealize zemin profili.

Sondajlardan alınan numuneler üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sahada yapılan sismik ve mekanik deneyler ile laboratuvarda yapılan deneyler

sonucunda birimler için elde edilen ortalama hesap parametreleri Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 : 1 No’lu çalışma zemininin laboratuvar ve saha deneyleri toplu sonuçları.

Parametre	Kumlu KİL	Çok Ayırışmış Grovak	Ayırışmış Grovak
Ortalama Derinlik (m)	3,50	10,50	-
Standart Penetrasyon Testi, SPT	2~12	28~Refü	-
Kaya Kalite Sınıflaması, RQD (%)	-	5	10
Sıkışma Dalgası Hızı, V_p (m/sn)	225~507	1333~1667	2284~2857
Kayma Dalgası Hızı, V_s (m/sn)	167~287	571~625	1000~1250
Poisson Oranı, μ	-	0,38~0,41	0,38
Elastisite Modülü, E (MPa)	-	2297~2691	6074~9997
Kayma Modülü, G (MPa)	-	654~810	2199~3618
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m ³)	-	1,96~2,03	2,15~2,27
Likit Limit, LL (%)	-	35~46	-
Plastik Limit, PL (%)	-	22~27	-
Su İçeriği, W_n (%)	-	23	-
Kaya Kütlesi Sınıflaması, RMR (%)	-	25	30
Jeolojik Dayanım İndeksi, GSI (%)	-	20	25
Nokta Yükleme İndeksi, I_{s50} (MPa)	-	0,08~1,24	

Sahada ve laboratuvarda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar programında kullanmak için yeterince uygun olmamaktadır. Gerilme ve deformasyon analizleri yapan sonlu elemanlar programında özellikle zeminlerin elastisite modülü

ve mukavemet parametreleri (kohezyon ve içsel sürtünme açısı) büyük önem taşımaktadır. Ancak sahada yapılan sismik deneyler vasıtasıyla hesaplanan elastisite modüllerinin gerçekten çok yüksek olduğu ve sonlu elemanlar programında kullanılması durumunda gerçeğe kıyasla çok az deplasmanların oluşacağı aşıkardır. Zeminlerin mukavemet parametrelerini doğrudan belirlemek için kesme deneyi ve üç eksenli sıkışma deneyi gibi deneyler yapılmadığında, parametrelerin tahmini için dolaylı hesaplamalar yapılmaktadır. Özellikle kaya birimlerde, nokta yükleme ve serbest basınç deneyi kullanılarak mukavemet parametrelerinin hesaplanması çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak kullanılan hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler kayaç numunesine ait mukavemet parametreleridir. Kayaç numunesi, çatlak takımı ve süreksizlikler barındıran kayaç kütesinin davranışını doğru temsil edememektedir. Bu yöntemlerle hesaplanan parametrelerin sonlu elemanlar analizinde kullanılması güvensiz sonuçlar doğurabilir.

1 No'lu çalışma için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere Bölüm 2'de tariflenen çeşitli korelasyonlar kullanılarak aşağıdaki parametrelerin kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 6.2 : Sonlu elemanlar programında kullanılan zemin parametreleri.

Parametre	Kumlu Kil	Çok Ayrışmış Grovak
Ortalama Derinlik (m)	3,5	-
Drenajlı Kohezyon, c' (kPa)	1,0	1,0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (°)	30	32
Elastisite Modülü, E_{50} (MPa)	25,0	135,0
Gevşeme Modülü, E_{ur} (MPa)	50,0	270,0
Poisson Oranı, μ	0,4	0,38
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m ³)	16,9	20,3

Parametreler arasında tanımlanan gevşeme modülü (E_{ur}), özellikle kazı ve tunel projelerinde kullanılmaktadır. Gevşeme modülü, zeminin yükleme değil boşaltma anındaki elastisite modülü olarak tanımlanır. Bu değer genelde %50 gerilme değerinden elde edilen elastisite modülü (E_{50}) değerine oranla,

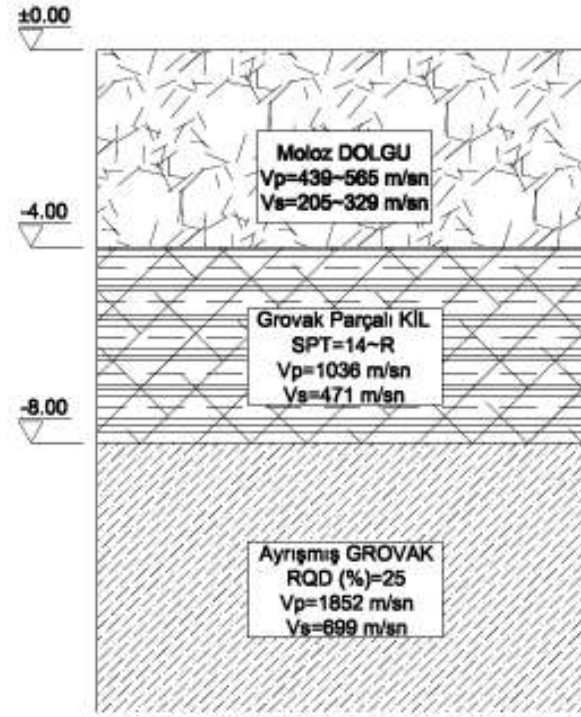
$$E_{ur} = (2 \sim 4)E_{50} \quad (6.1)$$

bağıntısı ile tanımlanmaktadır (Brinkgreve vd., 1998). Grovak birimlerde, arazide yapılan yükleme deneylerinde yükleme ve boşaltma eğrilerinin çok farklı eğimlerde olmadığı dolayısıyla yükleme ve boşaltma elastisite modüllerinin yakın olacağı anlaşılmaktadır.

Grovak birimlerde yapılan sonlu elemanlar analizinde hesap modeli olarak pekleşen model (*hardening soil*) kullanılmıştır. Bu modelde, sabit olarak atanan mukavemet ve deformasyon parametreleri derinlik boyunca arttırılarak kullanılmaktadır. Özellikle hava ve zamana bağlı olarak yüzeyde çok ayrılmış derinliklere inildikçe ayrışma derecesi azalan ve elastisite modülü artan grovak birimler için bu modelin kullanılması uygun görülmüştür.

6.4.2 2 No'lu çalışmanın zemin koşulları

Ön inceleme çalışmaları kapsamında arazide, araştırma sondajları, sismik kırılma deneyleri ve mikrotremer deneyleri yapılmıştır. Araştırma sondajları ve sismik deneyler sonucunda, arazinin genel olarak üç farklı jeolojik katmandan oluştuğu anlaşılmıştır. Arazi doğal kotundan itibaren ortalama ilk 4,00 m derinlikte moloz içerikli eski dolgu, 4,00 m ile 8,00 m arasında çok ayrılmış zayıf dayanımlı grovak ve grovak parçalı kil birimler yer almaktadır. Ayrılmış grovak ve grovak parçalı kil birimlerin altında ana kaya olarak tariflenen, sarı-kahve ve boz renkli az ayrılmış kumtaşı birimler yer almaktadır. İnceleme alanında yapılan sondajlarda net olarak yer altı suyuna rastlanmamıştır. Arazide yapılan sondajlar için hazırlanan örnek sondaj logu ve sondaj yerleşim planı EK 2'de sunulmuştur. 2 No'lu proje için, sondaj derinliği boyunca gözlenen, arazi ve laboratuar deneyleri sonucuna göre tahmin edilen idealize edilmiş zemin profili Şekil 6.6'daki gibidir.



Şekil 6.6 : 2 No’lu çalışmanın idealize zemin profili.

Sondajlardan alınan numuneler üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Sahada yapılan sismik ve mekanik deneyler ve laboratuvarda yapılan deneyler sonucunda birimler için elde edilen ortalama hesap parametreleri Çizelge 6.3’de sunulmuştur.

Birimlerin mukavemet parametrelerini doğrudan belirlemek için çeşitli derinliklerde üç eksenli sıkışma deneyi yapılmış ve ilgili derinlikteki birimi temsilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değeri hesaplanmıştır. Bulunan değerler, ilgili derinlikten alınan kaya numunesi mukavemet parametrelerini temsil etmektedir. Kayaç numunesi, çatlak takımı ve süreksizlikler barındıran kaya kütesinin davranışını doğru temsil edemediğinden çok yüksek mukavemet parametrelerine sahip olmaktadır. Ancak bu parametrelerin doğrudan sonlu elemanlar veya diğer hesap yöntemlerinde kullanılması çok güvensiz durumlar doğurabilir.

2 No’lu çalışma için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere Bölüm 2’de tariflenen çeşitli korelasyonlar kullanılarak Çizelge 6.4’teki parametrelerin kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 6.3 : 2 No'lu çalışma zemini laboratuvar ve saha deneyleri sonuçları.

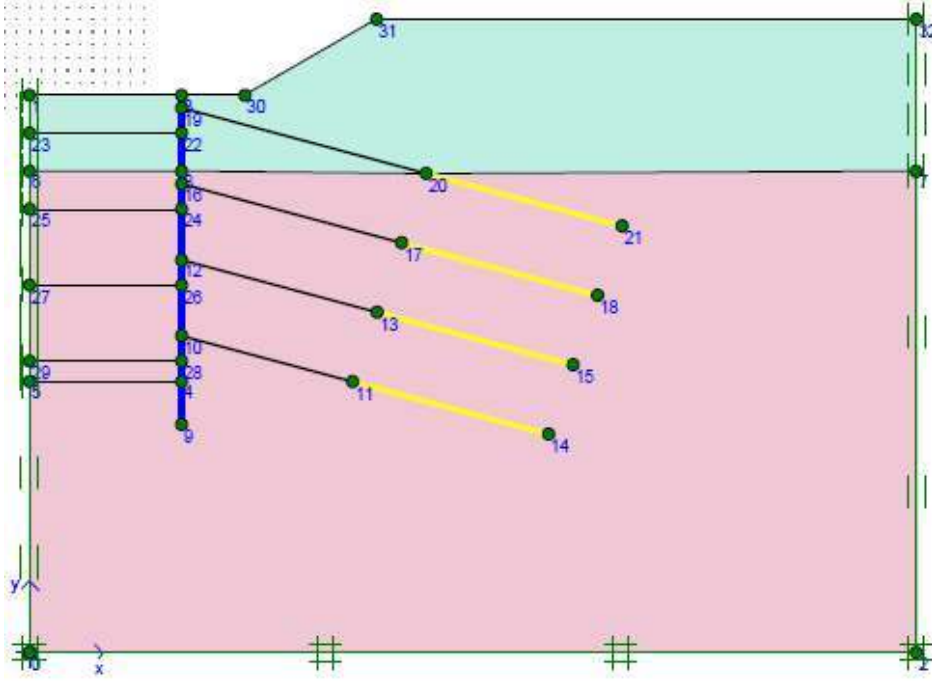
Parametre	Moloz Dolgu	Grovak Parçalı Kil	Az Ayrışmış Grovak
Ortalama Derinlik (m)	4,00	8,00	-
Standart Penetrasyon Testi, SPT	-	14~Refü	-
Kaya Kalite Sınıflaması, RQD (%)	-	-	25
Sıkışma Dalgası Hızı, V_p (m/sn)	439~565	1036	1852
Kayma Dalgası Hızı, V_s (m/sn)	205~329	471	699
Poisson Oranı, μ	0,33	0,40	0,41
Elastisite Modülü, E (MPa)	281	1231	2922
Kayma Modülü, G (MPa)	106	438	1031
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m ³)	16,9	19,3	20,7
Likit Limit, LL (%)	-	38	-
Plastik Limit, PL (%)	-	17~18	-
Kaya Kütlesi Sınıflaması, RMR (%)	-	21	40
Jeolojik Dayanım İndeksi, GSI (%)	-	16	35
Serbest Basınç Direnci, q_u (MPa)	-	0,34~0,36	-
Üç Eksenli Sıkışma Deneyi, c (MPa), ϕ (°)	-	-	2,5~8,3, 36~51
Nokta Yükleme İndeksi, I_{s50} (MPa)	-	-	0,62~9,69

Çizelge 6.4 : 2 No’lu çalışmada sonlu elemanlarda kullanılan zemin parametreleri.

Parametre	Moloz Dolgu	Grovak Parçalı Kil	Az Ayrışmış Grovak
Ortalama Derinlik (m)	4,00	8,00	-
Drenajlı Kohezyon, c' (kPa)	1,0	1,0	1,0
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (°)	28	32	38
Elastisite Modülü, E_{50} (MPa)	25,0	35,0	400,0
Gevşeme Modülü, E_{ur} (MPa)	50,0	70,0	800,0
Poisson Oranı, μ	0,33	0,40	0,41
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m ³)	16,9	19,3	20,7

6.5 Geometrik Modelin Oluşturulması

Sonlu elemanlar programında incelenen geoteknik problemler, programa çözdürülmeden önce mutlaka değişik bakış açıları kullanılarak çözülmeli ve program kullanılarak çözümün doğruluğu kontrol edilmelidir. 1 ve 2 No’lu çalışmalar da, Bölüm 5’te anlatılan yaklaşımlar doğrultusunda boyutlandırılmış ve kontrol amaçlı sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Değişik yaklaşımlar kullanılarak çözülen ve ön hesaplama niteliğinde olan hesaplamalar EK 3’de sunulmuştur. Plaxis programına tanımlanan geometrik model, gerçek kesitlerin prototipinin 2 veya 3 boyutlu olarak programın veri tabanına işlenmesi ile oluşturulmaktadır. Modelde, kazıklar kiriş elemanı, öngermeli ankrajların serbest boyları ankraj çubuğu ve kök boyları geotekstil olarak tanımlanır. Proje sınırlarında yer alan yapı ve toprak yükleri sürşaj yükü olarak tanımlanabilmektedir. İncelenen kesitte yer alan iksa elemanları, kazı kademeleri, komşu yapılar, yeraltı suyu ve sürşaj yükleri tanımlanarak geometrik model tamamlanır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 : 1 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modelinin görüntüsü.

6.6 Malzeme Özellikleri

1 ve 2 No'lu çalışmaların sonlu elemanlar ile analizinde kullanılan malzemeler, zemin, kazık ve öngermeli ankraj olarak sıralanabilir. Zemini temsilen önceki bölümlerde açıklanan parametreler (γ , c , ϕ , E , μ , ν_b) kullanılırken, kazık ve öngermeli ankrajları temsilen elemanların rijitlikleri kullanılmaktadır.

Eksenel kapasite ve eğilme momenti hesabında kullanılan eksenel rijitlik (EA) ve eğilme rijitliği (EI), r yarıçapında ve $E=25$ GPa (C25 Beton) elastisite modülüne sahip betondan imal edilen kazıklar için,

$$EA = E\pi r^2 \quad (6.2)$$

$$EI = E \frac{\pi r^4}{4} \quad (6.3)$$

olarak hesaplanmaktadır. Programa girilen değerlerin birim genişlik için olduğu dolayısıyla kazık aralığına bölünerek sonucun hesaplanacağı unutulmamalıdır.

Öngermeli ankrajlarda deplasman miktarlarının ve üzerlerinde oluşacak yüklerin tespiti için eksenel rijitliklerin (EA) tanımlanması gerekmektedir. Ankraj rijitlikleri Çizelge 5.1 kullanılarak, ankrajın halat sayısı, halat çapı ve elastisite modülüne göre hesaplanır. Ankraj rijitlikleri programa girilirken her ankraj için hesaplanan değer

doğrudan girilir, birim genişlikte analiz yapabilmek için ankrajın yatay aralığı ayrıca girilmelidir.

Plaxis programında kullanılan elemanların özellikleri Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.5 : 1 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modeli malzeme özellikleri.

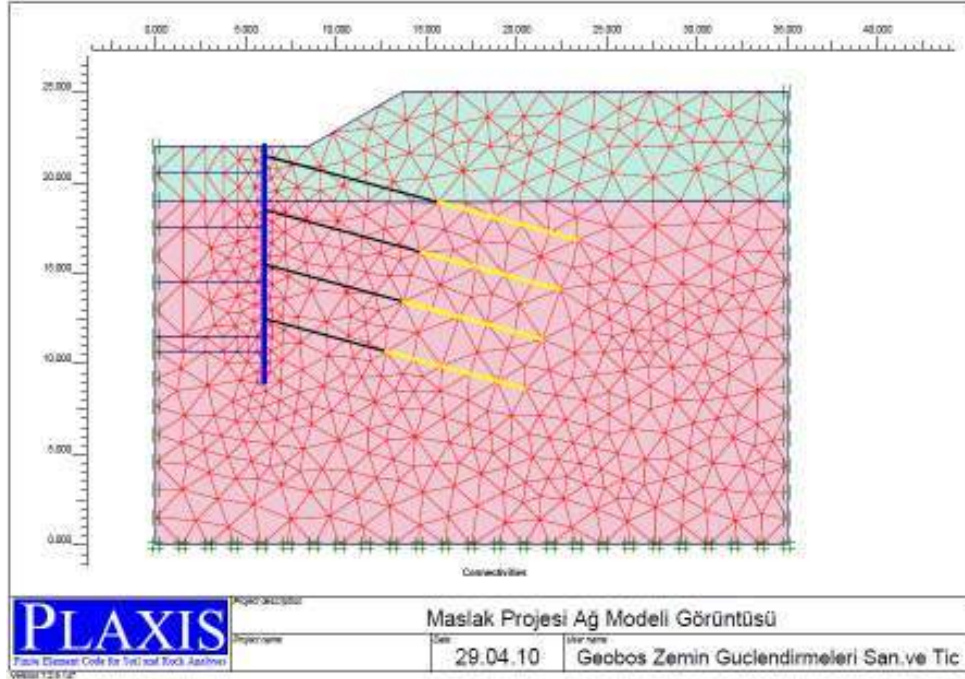
Kullanılan Malzeme	EA	EI
	(kN/m)	(kNm)
30 cm Çapında Kazık, 0.7 m arayla	2500000	14200
3 Adet 0,5'' Ankraj, 2.1 m arayla	27857	-
3 Adet 0,6'' Ankraj, 2.1 m arayla	39000	-

Çizelge 6.6 : 2 No'lu çalışmanın sonlu elemanlar modeli malzeme özellikleri.

Kullanılan Malzeme	EA	EI
	(kN/m)	(kNm)
65 cm Çapında Kazık, 1.2 m arayla	6875000	182550
5 Adet 0,6'' Ankraj, 1.2 m arayla	113750	-
6 Adet 0,6'' Ankraj, 1.2 m arayla	136500	-

6.7 Ağ Modelinin Oluşturulması

Modelde kullanılacak tüm malzeme ve elemanlar tanımlanarak analizlere geçmeden önce sistemin doğal halinin belirlenmesi gerekmektedir. Analiz boyunca yapılacak tüm hesaplamalar sistemin doğal halini baz alarak yapılmaktadır. Sisteme tanımlanan tüm elemanlarla birlikte model ağlara bölünerek sonlu elemanlar hesaplamalarında kullanılacak düğüm noktaları oluşturulur (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 : 1 No’lu çalışmanın Plaxis ağ modelinin görüntüsü.

Ağ sisteminin sıklığı hesap hassasiyetini artırırken analiz süresini uzatmaktadır. Başlangıç ağ modelinde sistemde tanımlı hiçbir eleman aktif değildir ve sistemde etkili gerilmeler sükunetteki gerilme davranışına (K_0 condition) uygun olarak derinlik boyunca üniform olarak artmaktadır.

6.8 Analiz

Hesaplamalarda kullanılacak tüm elemanların tanıtılması, sistemin geometrik koşullarının belirlenmesi ve başlangıç koşullarının modellenmesi ile analizler için yapılması gereken her şey tamamlanmış olmaktadır. Analizler, proje kapsamında yapılacak imalatların miktarına bağlı olarak safhalar şeklinde yapılır. Öngermeli ankrajlı sistemlerde her kazı kademesi ayrı tanımlanarak kazı kademelerinde oluşacak deplasmanlar, gerilmeler, kazık momentleri ve ankraj yükleri ayrı ayrı görülebilir. 1 No’lu çalışmada toplam 4 öngermeli ankraj kademesi için 9 ayrı safha tanımlanmıştır.

1. Safha - Mini kazık imalatı ve 1. Kademe kazı yapılması,
2. Safha- 1. Kademe öngermeli ankrajların gerilmesi,
3. Safha - 2. Kademe kazının yapılması,
4. Safha - 2. Kademe ankrajlarının gerilmesi,

5. Safha - 3. Kademe kazının yapılması,
6. Safha - 3. Kademe ankrajların gerilmesi,
7. Safha - 4. Kademe kazının yapılması,
8. Safha - 4. Kademe ankrajların gerilmesi,
9. Safha - Son kademe kazı yapılarak temel kotuna inilmesi.

2 No'lu çalışmada 9 öngermeli ankraj kademesi için toplam 19 safha tanımlanmış ve her safhada ardışık çözümler yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler sonucunda her kademe için,

- i. Kazı aynasındaki yatay deplasmanlar
- ii. İksa üst kotunda ve iksa tabanındaki düşey deplasmanlar
- iii. Öngermeli ankraj kuvvetleri
- iv. Gerilme şekil değiştirme değerleri, elastik davranmayan (plastikleşen) bölgelerin kontrol edilmesi
- v. Kazı aynasında ve tabanında oluşacak aktif ve pasif itkiler

mutlaka kontrol edilmelidir.

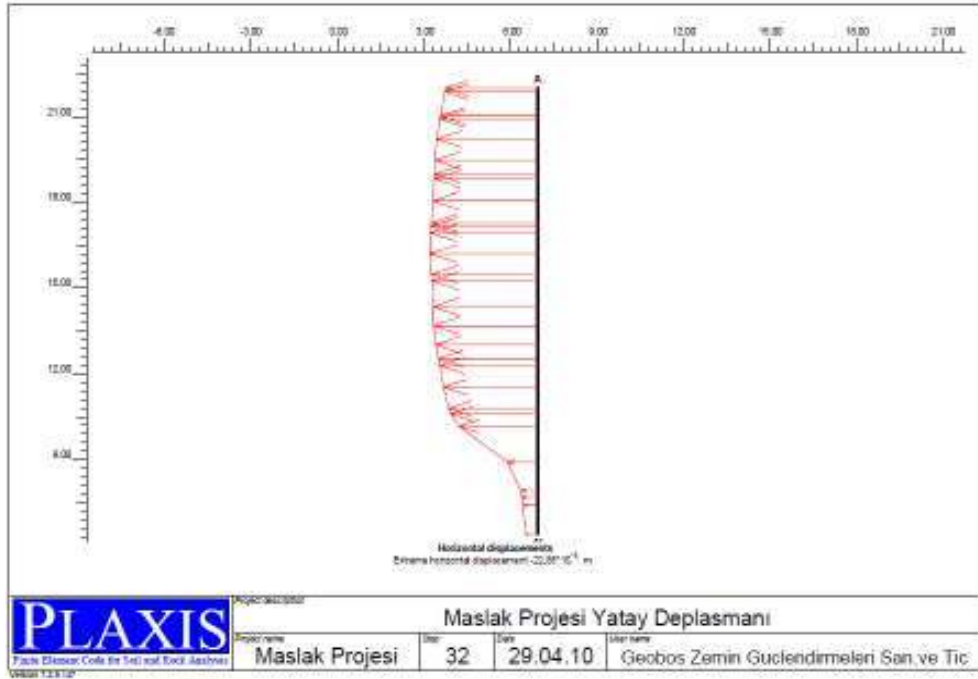
6.9 Analiz Sonuçları

Yukarıda sıralanan kontroller tüm analiz safhaları için yapılmış ve kritik olan son kademe kazı safhası sonuçları aşağıda verilmiştir.

6.9.1 Yatay deplasmanlar

6.9.1.1 1 No'lu çalışmanın yatay deplasmanları

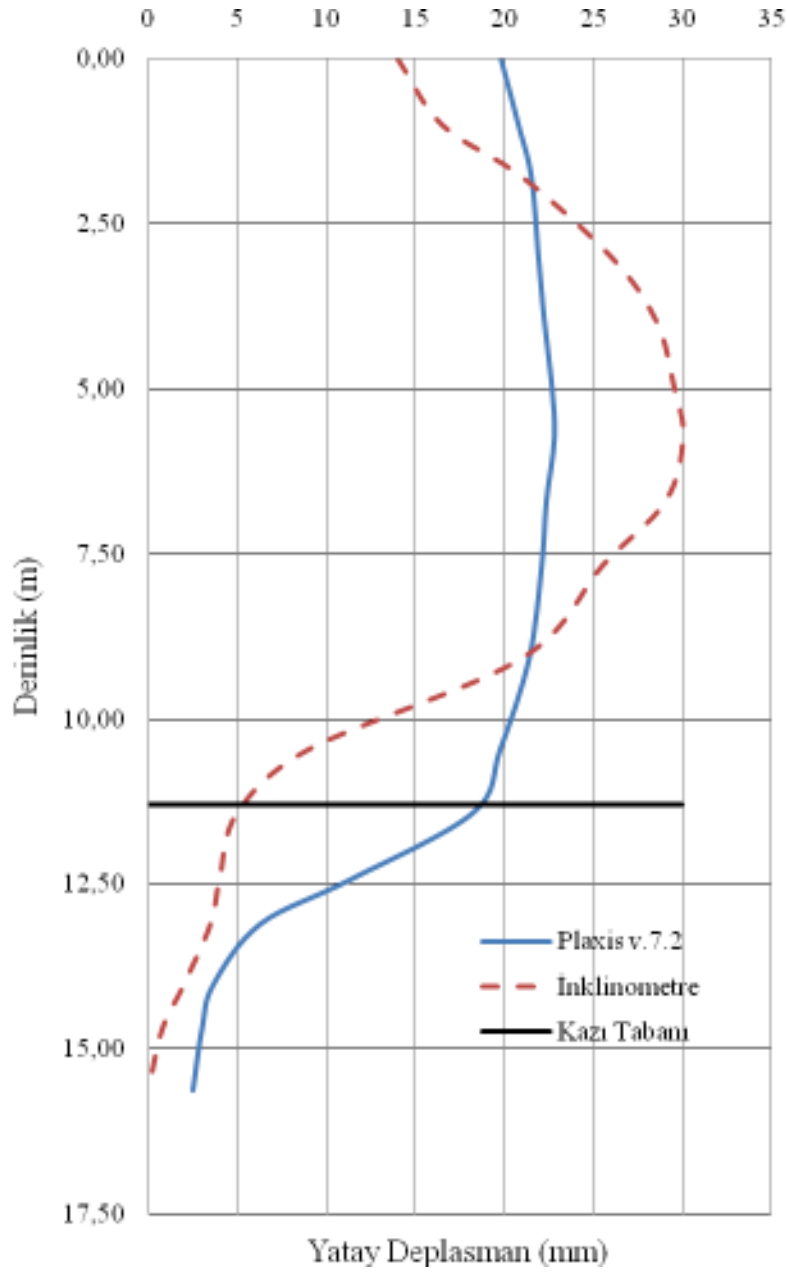
Analizde maksimum yatay deplasman son kazı kademesinin yapılması sonucunda iksa aynası ortalarında oluşmaktadır. İksa üst kotundan yaklaşık 6.00 m aşağıda oluşan deplasmanın miktarı 23 mm mertebesinde (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 : 1 No'lu çalışmada elde edilen yatay deplasman.

İksa hareketlerinin gözlenmesi için arazide kullanılan ve incelenen kesit ile aynı yerde yer alan inklinometre sonucunda ise yatay deplasman aynı derinlikte ve 30 mm mertebesinde. Maslak projesinde incelenen kesitte yer alan inklinometre deplasmanları ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deplasmanlar Şekil 6.10'de gösterilmektedir.

İncelenen kesitte oluşan deplasmanlar ve hesaplanan deplasmanlar aynı derinlikte, iksa yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimum değere ulaşmaktadır. Hesaplanan ve gerçekleşen deplasmanlar mertebe olarak birbirlerine yakın çıkmıştır. Plaxis programında yapılan analizde, kazı tabanında kazık soket bölgesinde gerçekleşenden daha fazla yatay deplasman görülmektedir. Kazık soket bölgesinde oluşan deplasmanın, sonlu elemanlar modelinde kazı tabanında oluşan kabarma ve sistemin bir bütün olarak ötelenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

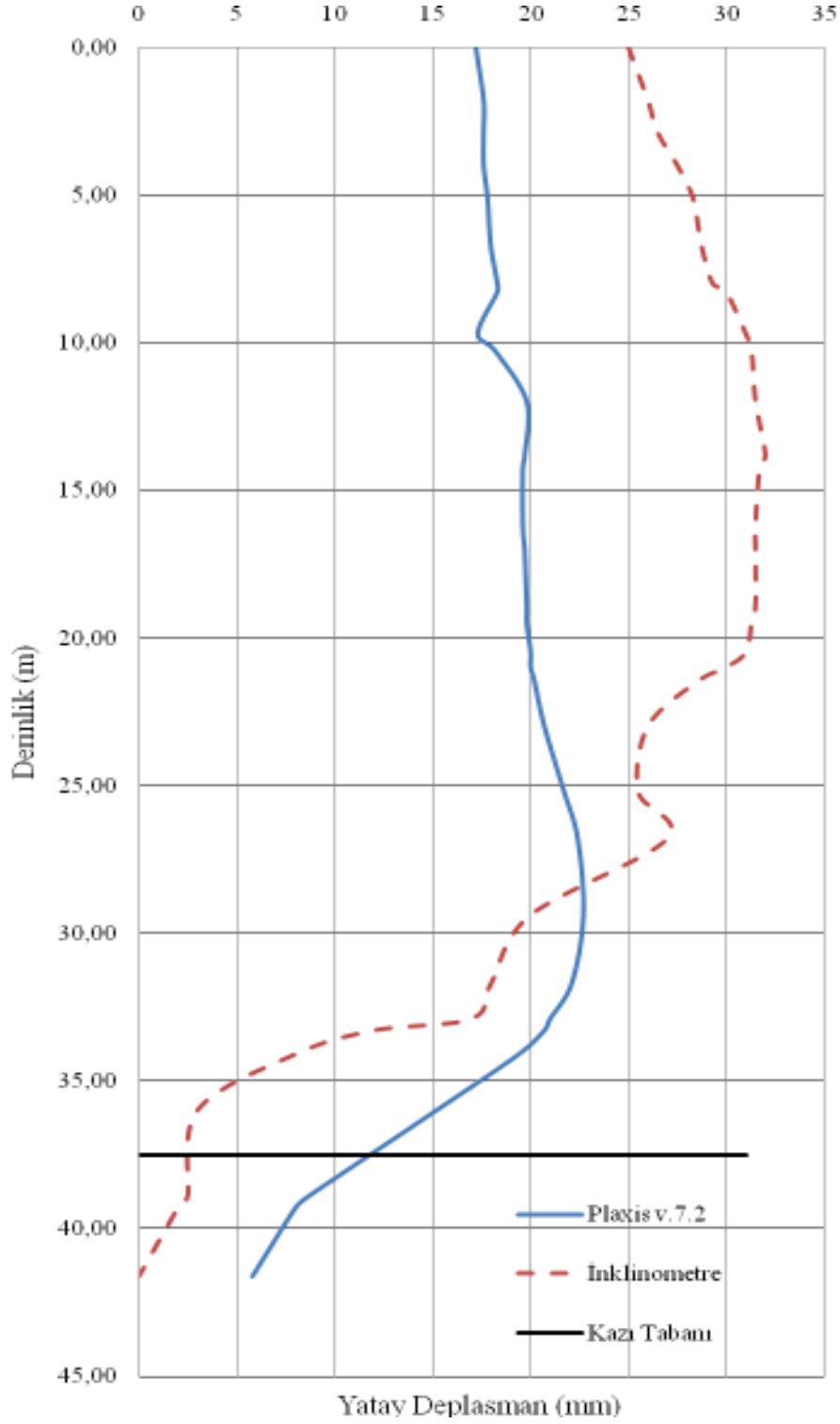


Şekil 6.10 : 1 No’lu çalışmanın Plaxis ve inklinometre deplasmanları.

6.9.1.2 2 No’lu çalışmanın yatay deplasmanları

Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen maksimum yatay deplasman son kazı kademesi sonrasında oluşmuştur. Maksimum deplasman, iksa üst kotundan yaklaşık 30,00 m aşağıda ve kazı tabanına yakın bölgede oluşmuştur. Oluşan deplasman 23 mm mertebesindedir. İksa hareketlerinin gözlenmesi için arazide kullanılan ve incelenen kesit ile aynı yerde yer alan inklinometre sonucunda ise yatay deplasman aynı derinlikte 20 mm mertebesindedir. Ancak inklinometrede görünen gerçek

deplasman kazı yüksekliğinin orta bölgesinde maksimum değerine ulaşmakta ve 32 mm mertebesine çıkmaktadır. 2 No'lu çalışmada incelenen kesitte yer alan inklinometre deplasmanları ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen deplasmanlar Şekil 6.11'de gösterilmektedir.

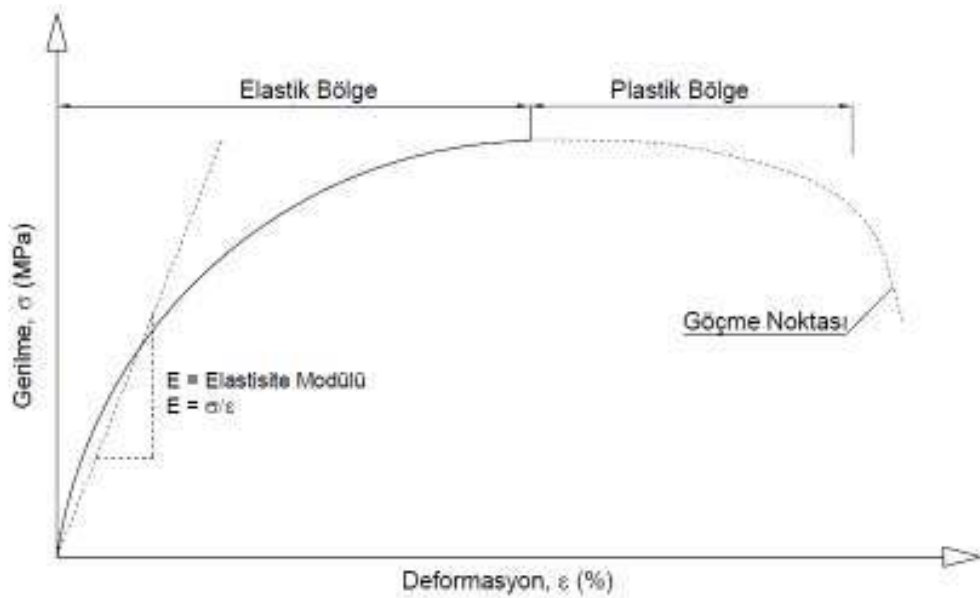


Şekil 6.11 : 2 No'lu çalışmanın Plaxis ve inklinometre deplasmanları.

Hesaplanan ve gerçekleşen deplasmanların, merteye olarak birbirlerine yakın olmasına rağmen maksimum deplasmanların yeri farklı noktalarda görünmektedir. Her iki çalışmada da, kazı tabanında kazık soket bölgesinde gerçekleşenden daha fazla yatay deplasman görünmektedir. Kazık soket bölgesinde oluşan deplasmanın, kazı tabanında oluşan kabarma ve sistemin bir bütün olarak ötelenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Arazide yapılan inklinometre ölçümlerinde kazı tabanında yatay deplasmanların önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. İnklinometre ölçümlerin, kılavuz borunun tabanının hareketi inklinometre okumalarına yansımamaktadır. İnklinometrelerde eğilme açıları ve düşey aralıklar kullanılarak deplasman hesapladığı için ötelenme şeklindeki deplasmanlar tam anlamıyla ölçülmemektedir. Dolayısıyla, Plaxis programı sonucuna benzer bir ötelenme arazide de gerçekleşmiş olabilir.

6.9.2 Gerilme – deformasyon ilişkisi

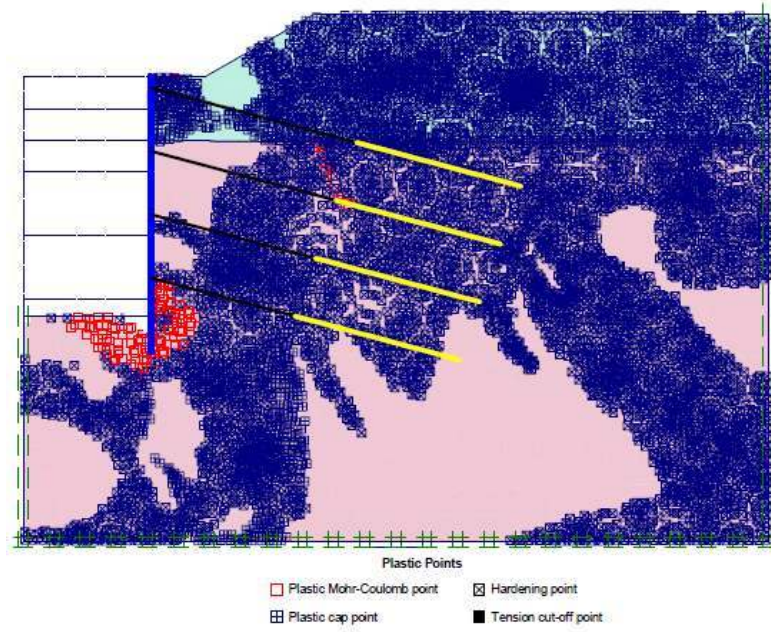
Plaxis sonlu elemanlar programı zemini elastoplastik davranış çerçevesinde çözümlemektedir. Zeminde oluşacak gerilmeler elastik sınırı aştığında, plastik deformasyonlar oluşmakta ve belirli noktadan sonra zeminde göçme oluşmaktadır (Şekil 6.12).



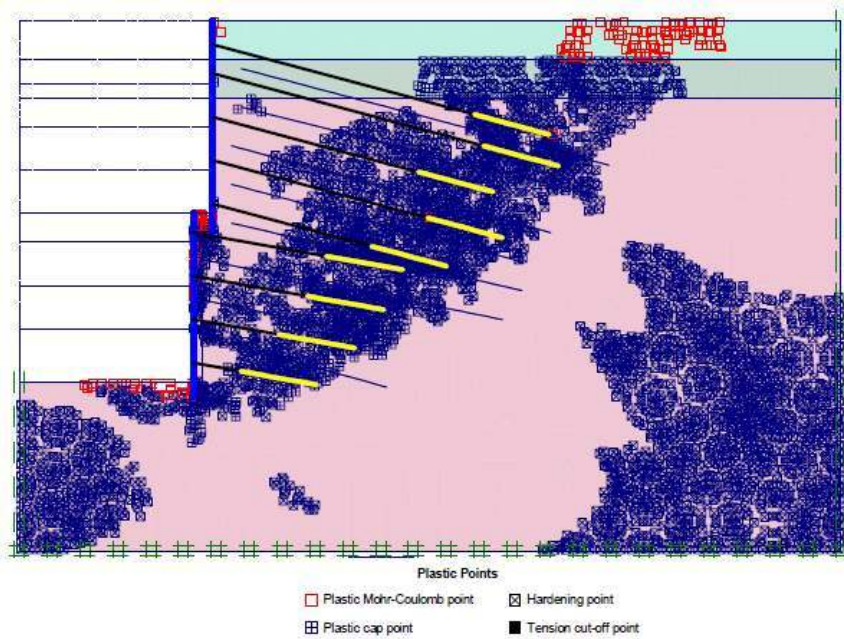
Şekil 6.12 : Zeminde gerilme deformasyon ilişkisi.

İksalı kazılarda, kazı aynasında etkili yatay yükler ise yatay deplasman arttıkça azalır. Bu durum, sükunetteki yatay toprak basıncının yatay deplasman vasıtasıyla aktif toprak basıncına dönüşmesi ile açıklanabilir. Ancak iksa aynasındaki yatay

deplasmanın artması zeminin elastik davranışını zorlayacağından göçme oluşması bu durum için de kaçınılmazdır. Plaxis programı ile yapılan analizlerde her nokta için yatay ve düşey gerilmeler hesaplanabilmektedir. Programda, Mohr-Coulomb göçme mekanizmasında tanımlanan elastik sınırın üzerinde yer alan noktalar plastik Mohr-Coulomb noktaları olarak adlandırılmaktadır. 1 ve 2 No'lu çalışmalar için yapılan analizler sonucunda kesitlerde oluşan plastik noktalar sırasıyla Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de görülmektedir.



Şekil 6.13 : 1 No'lu çalışma analizi Mohr-Coulomb noktaları.

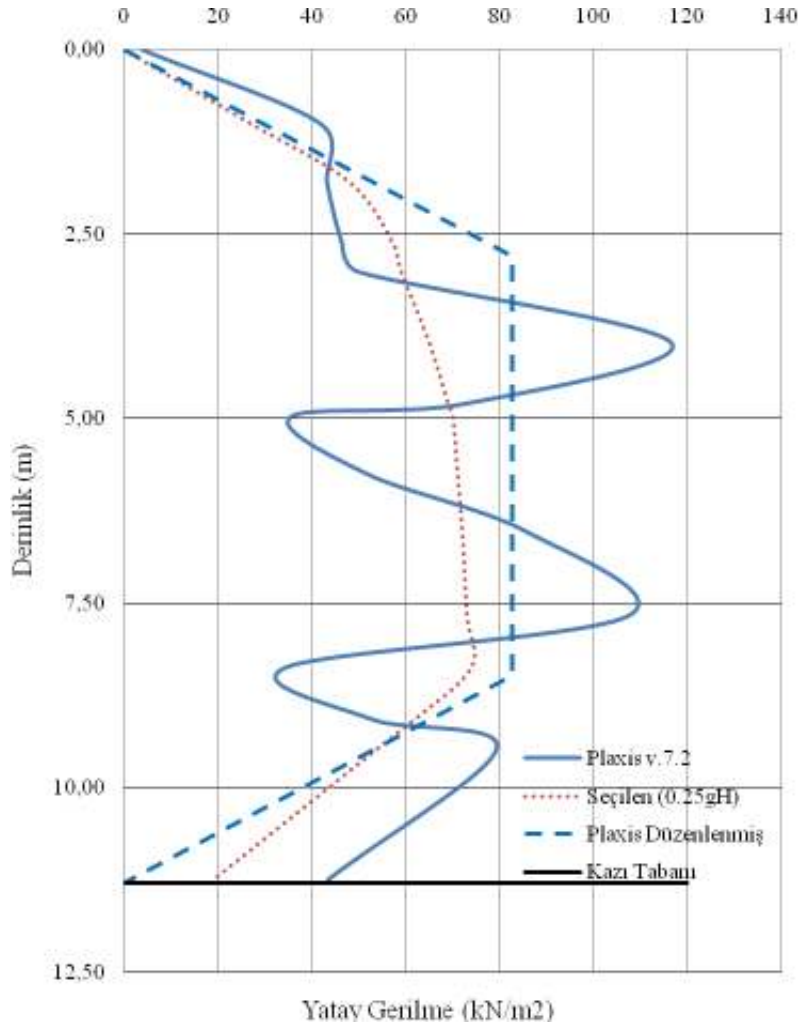


Şekil 6.14 : 2 No'lu çalışma analizi Mohr-Coulomb noktaları.

Analizler sonucunda, yatay ve düşey deplasmanın en fazla olduğu, kazı tabanında plastik noktaların yoğunlaştığı görülmektedir. İksa tabanında, gömülü kazık derinliği boyunca oluşan plastik noktalar kazık düşey elemanın gömülü boyunun yeterli olmadığını işaret etmektedir. Ancak bir önceki bölümde de değinildiği gibi, sonlu elemanlar analizinde kazı tabanında, arazide gerçekleşenden daha büyük deplasmanın oluşması bu noktalarda plastik noktaların oluşmasının sebebi olabilir. Analizler sonunda iksa aynasından alınan düşey kesit üzerinde oluşan yatay gerilmeler incelenerek ön hesaplarda kabul edilen değerlerin doğruluğu kontrol edilmelidir. Maslak projesinde Denklem 4.17’den faydalanılarak elde edilen ve,

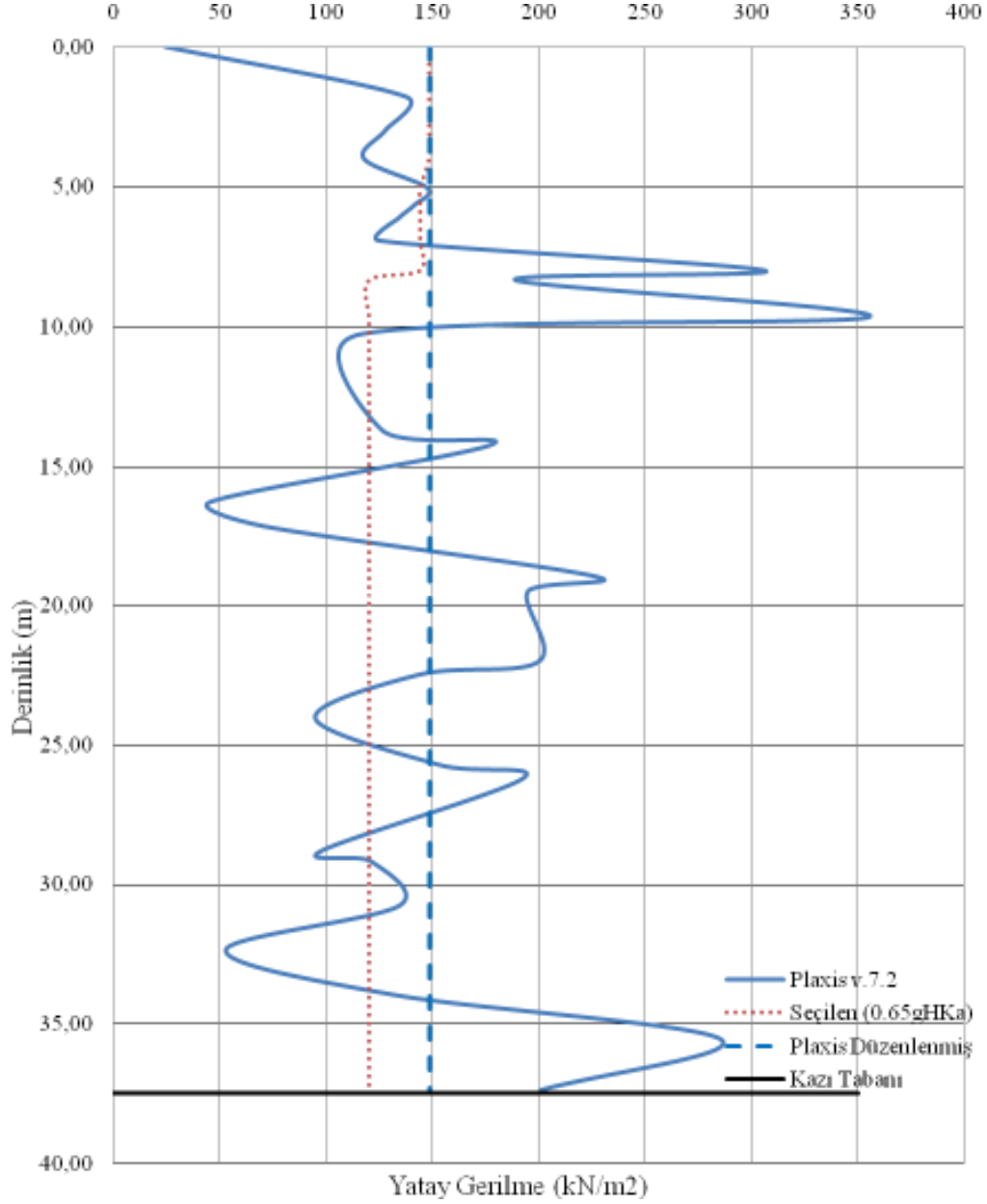
$$\sigma_h = 0.25\gamma H \quad (6.4)$$

yük kabulü kullanılarak hesap edilen itkiler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen yatay gerilmeler Şekil 6.15’de görülmektedir.



Şekil 6.15 : 1 No’lu çalışma yatay gerilmeler.

2 No'lu çalışmada fore kazıkların arkasından alınan düşey kesit üzerindeki yatay gerilmeler ve ön hesaplarda Denklem 4.14 kullanılarak hesaplanan yatay gerilmeler Şekil 6.16'te görülmektedir.



Şekil 6.16 : 2 No'lu çalışma yatay gerilmeler.

Ön hesaplamalarda seçilen yük dağılımları ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen yük dağılımları birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, ankraj bölgelerinde öngermeden dolayı gerilme artışları oluşsa da genel ortalama düşünülürse iksalı kazılar için seçilen yük dağılımlarının uygun olduğu söylenebilir.

6.9.3 Öngermeli ankraj yükleri

Sonlu elemanlar analizinde deplasmanlara bağlı yük artışının da dikkate alınması sebebiyle ankraj yükleri gerçekçi olarak tahmin edilebilmektedir. Ön yaklaşımlarla hesaplanan ankraj yükleri, programda öngörme olarak tanımlanmakta ve analiz sonucunda ankrajda oluşacak yük kontrol edilebilmektedir.

1 ve 2 No'lu çalışmalarda ön hesaplamalarla tahmin edilen ve Plaxis programında öngörme yükü olarak kullanılan ankraj yükleri ve sonlu eleman analizi sonucunda gerçekleşen ankraj yükleri sırasıyla Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 : 1 No'lu çalışma ankraj yükleri.

Ankraj Sırası	Ön Hesaplamalar (kN/m)	Sonlu Elemanlar (kN/m)
Kademe	53,8	61,6
Kademe	199,1	217,4
Kademe	215,2	231,1
Kademe	165,7	187,0

Çizelge 6.8 : 2 No'lu çalışma ankraj yükleri.

Ankraj Sırası	Ön Hesaplamalar (kN/m)	Sonlu Elemanlar (kN/m)
1. Kademe	594,8	548,9
2. Kademe	540,0	538,0
3. Kademe	546,4	545,6
4. Kademe	540,4	551,1
5. Kademe	450,4	459,9
6. Kademe	450,4	464,1
7. Kademe	540,4	475,8
8. Kademe	540,4	600,4
9. Kademe	510,4	517,0

Çizelgelerde yer alan değerler incelendiğinde ön hesaplamalar ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu yakınlık Plaxis programına girilen öngerme yükünün doğruluğunu ispat etmektedir. Ancak, Plaxis programına girilen öngerme yükü merteye olarak ön hesaplamalardaki yükten çok farklı değilse, program her zaman girilen öngerme yüküne yakın değerler vermektedir. Örneğin, ön hesaplamalarda 30 ton olarak hesaplanan öngerme yükü programa 40 ton olarak girilirse sonlu eleman analizi sonunda girilen 40 ton yüke yakın ankraj yükü çıkabilmektedir. Ön hesaplarda bulunan ankraj yüklerinden daha fazla öngerme yapılması kazı aynasında gereksiz pasif itkiler doğuracağından kazı stabilitesi için tehlikelidir. Bu yüzden ön hesaplamalarda bulunan değerler aynen kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmalı ve sonuçlar kontrol edilmelidir.

6.9.4 Toptan göçme analizi

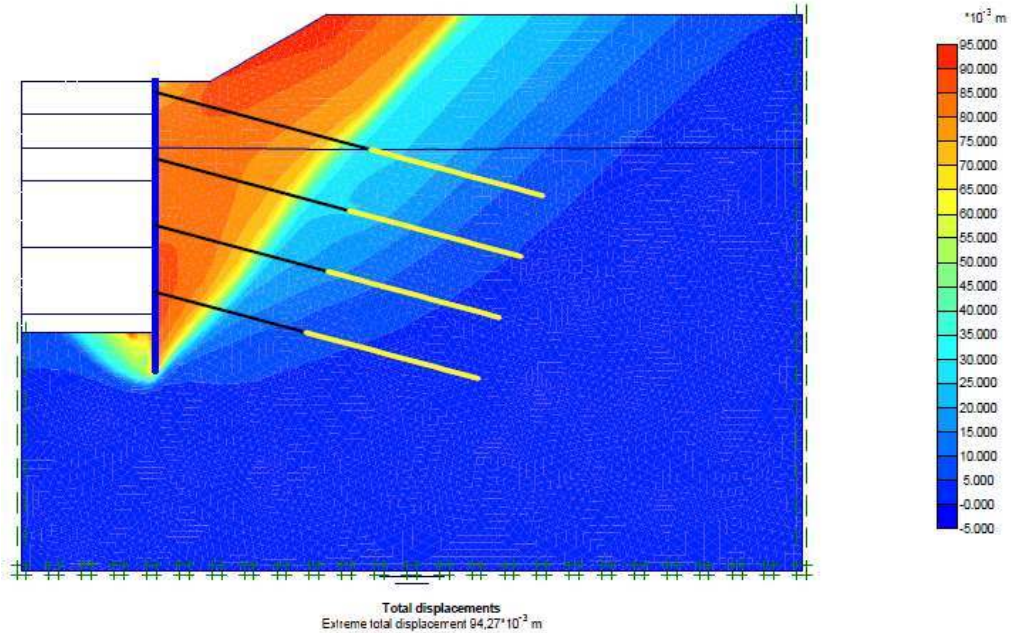
Plaxis programında toptan göçme analizleri, modelin sahip olduğu mukavemet parametrelerinin göçme oluşuncaya kadar azaltılması ile yapılmaktadır. Sistemin toptan göçmeye karşı güvenlik katsayısı (GS), mevcut mukavemet parametrelerinin (c, ϕ), azaltılmış mukavemet parametrelerine (c_r, ϕ_r) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$GS = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad (6.4)$$

Tüm kazı kademelerinde toptan göçme analizleri yapılabilmektedir. Ancak derinlikle oluşacak yatay itkilerin artması sebebiyle son kazı kademelerinde toptan göçme analizi daha riskli sonuçlar verebilmektedir.

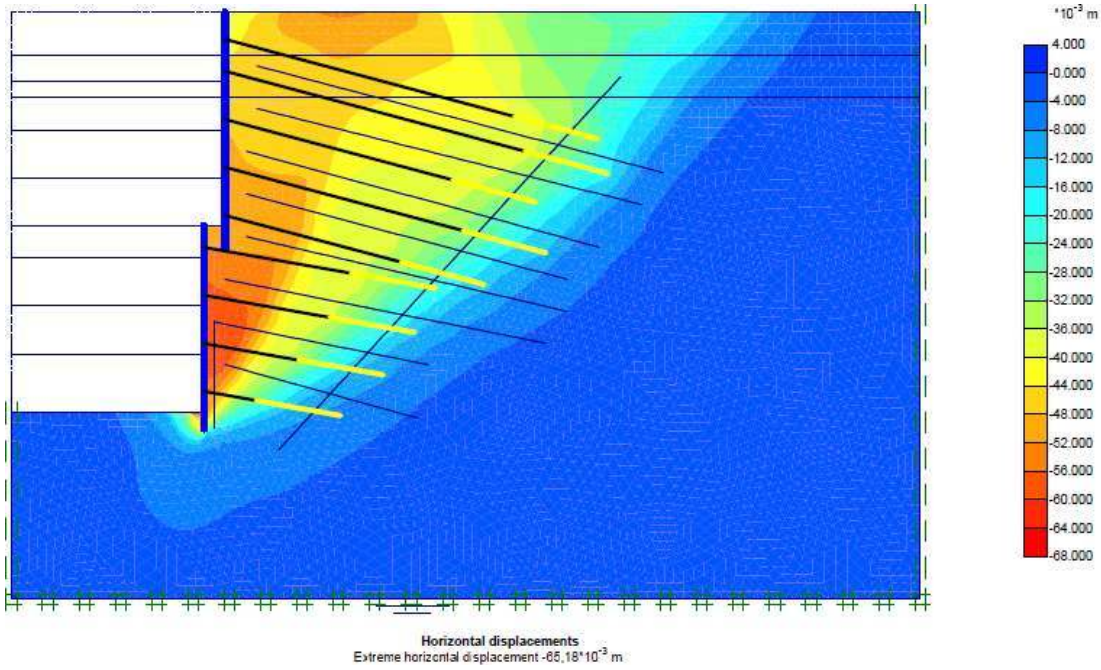
1 ve 2 No'lu çalışmalar için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucuna göre, son kazı kademesinde toptan göçmeye karşı güvenlik katsayısı sırasıyla, $GS_1=1.30$ ve $GS_2=1.25$ olarak hesaplanmıştır.

Toptan göçme analizlerinde, iksa aynası arkasında Şekil 5.12'de tariflenen tahmini kayma hattına benzer şekilde göçme hattının oluştuğu görülmektedir (Şeki 6.17 ve 6.18). Şekil 6.17'de üçgen kama olarak görünen tahmini kayma hattı, öngermeli ankrajların serbest bölgesinden geçmelidir.



Şekil 6.17 : 1 No’lu çalışma toptan göçme analizi sonucu.

Aksi halde ankrajlara uygulanan öngerme yükleri, stabiliteyi sağlamak yerine aktif kamayı harekete geçirici rol oynar.



Şekil 6.18 : 2 No’lu çalışma toptan göçme analizi sonucu.

İncelenen kesitlerde ankraj serbest boylarının tahmini göçme hattının dışında kalması, ön hesaplamalarda seçilen serbest boyların yeterli olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Derin kazılar son yıllarda inşaat mühendisliği projelerinin vazgeçilmez birer parçası haline gelmiştir. Yoğun yerleşim bölgelerinde yapılan temel, metro, altyapı vb. gibi kazıların neredeyse tamamı artık derin kazı destekleme sistemleri kullanılarak yapılmaktadır. Ülkemizde özellikle yerleşimin yoğun olduğu büyük şehirlerde, derin kazı destekleme sistemlerinden en çok öngermeli ankrajlı iksa yöntemi kullanılmaktadır. Öngermeli ankrajlı iksa sistemleri, düşey iksa elemanı olarak kazık, palplanş, perde, diyafram ve kuyu perde sistemlerle birlikte uygulanarak istenilen derinlikte dik kazıların yapılmasını sağlamaktadır.

Öngermeli ankrajlı sistemlerin tasarımı, yük kabulleri ve seçilen malzemelerin çok değişik olması bakımından kapsamlı geoteknik hesaplama ve analizler gerektirmektedir. İksa sisteminin uygulanacağı zeminlerin idealize edilmesi ve mühendislik parametrelerinin belirlenmesi, iksa üzerinde etkili olacak yatay itkilerin zemin cinsine göre seçilmesi ve iksa elemanlarının boyutlandırılması öngermeli ankraj tasarımının genel prensibini oluşturmaktadır.

Bu araştırmada, iksalı derin kazıların sıkça uygulandığı İstanbul ilinin genel jeolojisini oluşturan Trakya formasyonunda yapılan öngermeli ankrajlı derin kazıların tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi konu edilmiştir. Araştırma kapsamında, grovak birimlerin genel özellikleri, derin kazı yöntemleri, yatay toprak basınçları, öngermeli ankraj hesap yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemiyle ankrajlı iksa analizi incelenmiştir. Ayrıca, Trakya formasyonunun genel özelliklerini taşıyan grovak birimlerde yapılmış iki farklı ankrajlı proje, vaka analizi olarak ele alınmıştır. Projeler sonlu elemanlar yöntemi ile hesap yapan Plaxis bilgisayar programı ile modellenerek, tasarımda kullanılan değerlerin, sonlu elemanlarla hesaplanan sonuçlar ve arazide yapılan ölçümlerle karşılaştırması yapılmıştır.

İksa yapılarında tasarım açısından en kritik değerlendirme zemin koşullarının ve tasarımda kullanılacak mühendislik parametrelerinin belirlenmesidir. Günümüzde artık her parsel için yapılması zorunlu kılınan zemin etüdüleri kapsamında, inşaat

yapılacak bölge hakkında genel bilgiler edinilmektedir. Bu etüdlerde, gerek arazide gerekse laboratuvarlarda çeşitli deneyler yapılarak zemin parametreleri hakkında değerlendirmeler yapılmaktadır. Yapılan değerlendirmeler bazen amaca yönelik olmamakla birlikte yanlış yönlendirmelere de sebebiyet verebilmektedir. Özellikle grovak gibi çok ayrılmış kaya birimlerde, arazide yapılan sismik deneylerden ve laboratuvarlarda temsili kaya numunesi üzerinde yapılan deneylerden elde edilen mühendislik parametrelerinin tasarımlarda doğrudan kullanılması yanlış sonuçlar doğurabilmektedir. Arazide yapılan sismik deneylerle elde edilen elastisite modülü ve kayma modülü, statik hesaplarda kullanılamayan, deprem anında sismik davranışı temsil eden dinamik modüllerdir. Laboratuvarlarda, çatlak ve süreksizlik düzlemleri olmayan temsili kaya numunesi üzerinde yapılan deneylerden elde edilen mukavemet parametreleri ise sadece ilgili kaya numunesine ait parametrelerdir. Tasarımlarda davranışı incelenen kaya kütlelerini temsil etmemektedir. Sismik deneylerle elde edilen dinamik modüller ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen çeşitli parametreler, kaya kütlelerini temsil eden RQD ve RMR değerleri kullanılarak kaya kütlelerinin tamamını temsil edecek ve tasarımlarda kullanılacak şekilde tekrar hesaplanabilir. Kaya kütlelerinin mukavemet parametrelerinin belirlenmesinde en doğru çözüm saha deneylerinin yapılmasıdır. Bu amaçla özellikle grovak birimlerin kesme mukavemeti parametrelerinin (c , ϕ) belirlenmesi için arazide kesme deneylerinin ve kaya kütlelerinin elastisite modülünün belirlenmesi için arazide presyometre deneyinin yapılması oldukça faydalı olacaktır.

İksalı kazıların tasarımında yatay toprak itkilerinin doğru belirlenmesi, iksa elemanlarının boyutlandırılması, dolayısıyla proje ekonomisi bakımından son derece önemlidir. Öngermeli ankrajlı iksa yönteminde kullanılmak üzere birçok araştırmacı tarafından yük dağılımları önerilmiştir. Önerilen dağılımların büyük çoğunluğu kum ve kil niteliğindeki zeminler içindir. Grovak birimlerin, mühendislik parametrelerinin kum ve kil zeminlerden daha iyi olduğu düşünülürse, önerilen yük dağılımlarının grovak birimler için muhafazakar sonuçlar doğuracağı aşıkardır. Grovak birimlerin özellikleri dikkate alınarak, önerilen yük dağılımlarının küçük olanının kullanılması, proje ekonomisi açısından uygun olabilir.

Öngermeli ankraj elemanlarının boyutlandırılmasında, genel iksa stabilitesini etkileyen parametrelerin yanında içsel stabilizeyi etkileyen parametrelerin de büyük önemi vardır. Öngermeli ankraj kök bölgesi ve zemin arasındaki sürtünme direnci de

bu değerlerden birisidir. Ankraj kök boyunun belirlenmesinde önemli olan sürtünme direncinin grovak birimlerde, kum ve kil zeminlere göre çok yüksek olduğu bilinmektedir. İksa projelerinde genelde sabit ve aynı kök boyunun kullanılması yerine, sürtünme direnci kullanılarak hesap edilen gerçek kök boyunun kullanılması ile projelerde ekonomi sağlanabilir.

İksalı derin kazıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar programlarında modellenmesi oldukça pratik ve özellikle deplasmanların tahmin edilmesi açısından önemlidir. Analiz edilecek model öncelikle yaklaşık hesaplamalarla boyutlandırılır ve bilgisayar programına tanımlanır. Bu araştırmada da grovak birimlerde yapılan iki farklı öngermeli ankrajlı iksa projesi yaklaşık yöntemlerle boyutlandırılarak sonlu elemanlar programına tanımlanmış ve analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, yaklaşık yöntemlerde seçilen, sonlu elemanlarda hesaplanan ve arazide ölçülen değerler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

İncelenen projeler için seçilen yük dağılımları sonlu elemanlar sonucunda hesaplanan yatay gerilmelere yaklaşık çıkmıştır. Her iki projede de, sonlu elemanlar analizinde öngörme yükünden dolayı ankraj kafa bölgelerinde gerilme birikmelerinin olduğu gözlenmiştir. Ankraj kafa bölgelerinde lokal gerilme artışlarının üniform olarak dağıtılması sonucunda elde edilen ortalama gerilmeler ön hesaplamalarda, çok ayrılmış grovak birimler için kullanılan $0.25\gamma H$ ve ayrılmış grovak birimler için kullanılan $0.65\gamma H K_a$ yük dağılımlarına benzerlik göstermektedir.

Sonlu elemanlar analizinde, iksa düşey elemanları arkasından alınan kesitlerde iksalı kazı derinliği boyunca oluşan yatay deplasmanlar görülebilmektedir. Arazide inklinometre okumaları ile elde edilen deplasmanlar ve sonlu elemanlara analizinden elde edilen deplasmanlar karşılaştırıldığında, her iki projede de arazi ve sonlu elemanlar analizi deplasmanlarının benzer olduğu görülmektedir. Mertebe olarak benzer sonuçlar bulunmasına rağmen arazide gerçekleşen deplasmanlar her iki projede de sonlu elemanlar ile hesaplanandan daha fazladır. Arazide gerçekleşen yatay deplasmanların fazla olmasının, kaya kütlelerinin süreksizlik ve çatlak özelliklerinin tam olarak temsil edilemediğinden kaynaklandığı düşünülebilir. Arazide ve sonlu elemanlar analizinde elde edilen ortalama yatay deformasyon (δh) değerleri çok ayrılmış ve ayrılmış grovak birimler için sırasıyla, % 0.2 ve % 0.1 mertebesindedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda, iksa tabanında arazide gerçekleşenden daha fazla yatay deplasman görülmektedir. Oluşan fazla deplasmanın

kazı topuğunda oluşan plastik deplasmanlar ve tabanda hesaplanan kabarmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha çok yumuşak kil birimlerde oluşması beklenen taban kabarması, grovak birimler için gerçekçi olmamakta ve sonlu elemanlar analizinde taban bölgesinde gerçekten daha fazla yatay deplasman oluşmasına sebep olmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde karşılaşılan diğer bir deplasman sorunu ise özellikle düşey gerilmelerin az olduğu üst sıra ankrajların gerilmesi sırasında yaşanmaktadır. Sonlu elemanlar modelinde, ankrajlara uygulanan germe kuvveti sebebiyle arazide gözlenemeyen geri deplasmanlar oluşabilmektedir.

Sonlu elemanlar programında kullanılan parametrelerin seçilmesi, yapılacak analizin doğruluğu için son derece önemlidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan programların yanlış veriler altında da sonuç üreteceği ancak çıkan sonucun yanlış olabileceği unutulmamalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler öncelikle değişik kabul ve yaklaşımlarla çözülmeli daha sonra bilgisayar programı yardımıyla kontrol edilmelidir.

KAYNAKLAR

- AASHTO**, 1996. *Standard Specifications for Highway Bridges*, Vol. 1., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.
- Arioğlu, E., Yılmaz, A. O. ve Tunçdemir, H.**, 2007. *Kayaya Gömülü Fore Kazıklar*, İstanbul, Türkiye.
- ASTM A416**, 1997. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Penn.
- Bowles, J. E.**, 1996. *Foundation of Analysis and Design*, USA.
- Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer P. A.**, 1998, Plaxis v.7.2, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Rotterdam, Brookfield.
- BS 8081**, 1989. *British Standart of Practice for Ground Anchorages*, British Standart Institution.
- Burger, H., R., Sheehan, A., F., Jones, C., H.**, 2006. *Introduction To Applied Geophysics*, Newyork, USA.
- CICHE**, 1998. *Criteria and Descriptions for Design and Construction of Anchors*. Chinese Institute of Civil and Hydrraulic Engineering, Taipei.
- Dalgıç, S.**, 2002. A Comparison of Predicted and Actual Tunnel Behaviour in the Istanbul Metro, Turkey. *Engineering Geology*, Vol:63, No:1-2, January.
- Das, B. M.**, 2008. *Advanced Soil Mechanics*, Newyork, USA.
- DIN 4125**, 1990. *Ground Anchorages Design, Contruction and Testing*, Deustche Norm.
- Durgunoğlu, H. T., and Yılmaz O.**, 2007. An Integrated Approach For Estimating Of Modulus Degregation In Soft Rocks. *Proceedings of the Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, June 25-28.
- Eriş, İ.**, 1999. İstanbul Metrosunda Geçilen Kayaçların Yer altı Kazıları Açısından Yorumu. 10. Yılında Erguvanlı'yı Anma Kollokyumu, *Mühendislik Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bülteni*, Yıl:22, Sayı:17, Kasım.
- Ho, C. L., Denby, G. M., Fragasy, R. J.**, 1998. Seismic Performance of Tied-Back Walls. Design and Performance of Earth Retaining Structures, *Geotechnical Special Publication No.25*, ASCE, pp. 843-853.
- Hunt, R., E.**, 2005. *Geotechnical Engineering Investigation Handbook*, Boca Raton, USA.
- Isik, N. S., Ulusay, R., Doyuran, V.**, 2008. Deformation Modulus of Heavily Jointed-Sheared and Blocky Greywackes by Pressuremeter tests:

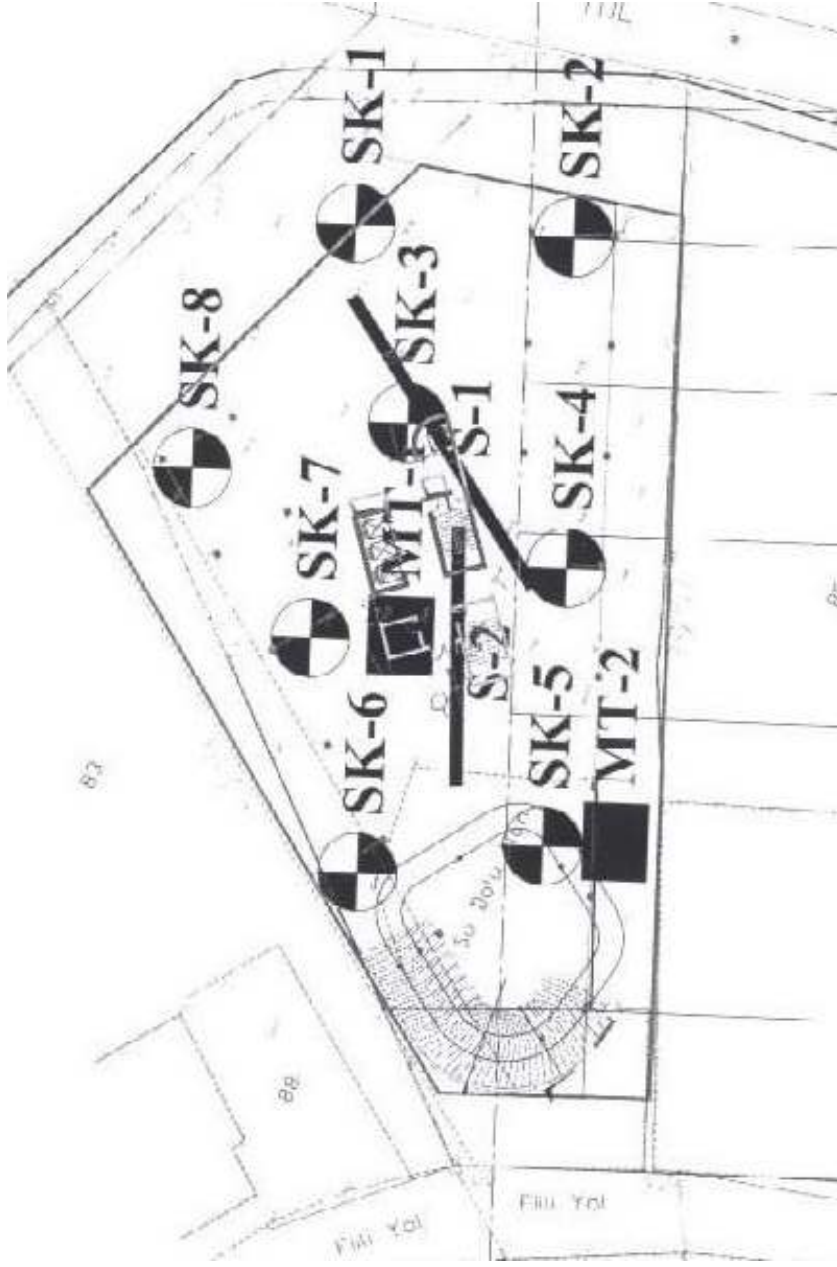
- Numerical, Experimental and Empirical Assessments, *Journal of Engineering Geology*, **101**, 269-282. Alındığı Tarih : Kasım 2008.
- JSA**, 1988. *Guidelines of Design and Construction of Deep Excavations*, Japanese Society of Architecture.
- JSF**, 1990. Design and Construction Criteria of Ground Anchors, *Japanese Soil and Foundation Society*.
- Karagöz , S. D.**, 2007. Kağıthane Piyalepaşa Tunelleri Mühendislik Jeolojisi Çalışması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kurs Notları**, 2001. International Course On Computation Geotechnics, Istanbul Technical University, Istanbul.
- Moradian, Z. A., and Behnia, M.**, 2009. Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Static Young's Modulus of Intact Sedimentary Rocks Using the Ultrasonic Test. *International Journal of Geomechanics*©ASCE, February.
- Navfac, DM-7.1**, 1982. *Soil Mechanic Design Manual 7.1*, USA.
- Ou, C. Y.**, 2006. *Deep Excavation*, Theory and Practice, London, UK.
- Özüer, A. B.**, 1975. Çatlaklı Grovak ve Killi Şistlerin Mühendislik Özellikleri, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A.**, 2002. Evaluation of Soil and Rock Properties, FHWA *Technical Report*, FHWA-IF-02-034, April.
- Sabatini, P. J., Pass, D. G., Bachus, R. C.**, 1999. Ground Anchorages And Anchored Systems, FHWA *Technical Report*, FHWA-IF-99-015.
- Sağlam, A.**, 1985. İstanbul Grovaklarında Yapılan Derin Kazılar (Deep Excavations in Istanbul Graywacke), *Turkish Group of Soil Mechanics Symposium on Design of Supports to Deep Excavations*, Istanbul, December.
- Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., Nefeslioğlu, H., A., Kayabaşı, A.**, 2005. Estimation of rock modulus : For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **43** (2006) 224-235.
- Xanthakos, P. P.**, 1991. *Ground Anchorages And Anchored Structures*, Washington, D.C., USA.
- Yıldırım, S.**, 2004. *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Yoo, C.**, 2001. Behaviour of Braced and Anchored Walls in Soils Overlying Rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (ASCE), Vol. **127**, no. 22326.
- Zhang, L., and Einstein, H. H.**, 2004. Using RQD to Estimate The Deformation Modulus of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Technical Note, no. **41**, pp. 337-341.
- Zhang, L.**, 2005. *Engineering Properties of Rock*, Massachusetts, USA.

EKLER

EK A : 1 No’lu Çalışma Sahası Örnek Sondaj Logları ve Sondaj Yerleşim Planı

EK B : 2 No’lu Çalışma Sahası Örnek Sondaj Logları ve Sondaj Yerleşim Planı

EK C : Ankraj Ön Hesapları ve Tipik Kesitler



SONDAJ LOGU

Numune ve Arazi Deneyleri Samples and In Situ Tests						Sondaj Metodu Boring Method		Rotary		İç Yeri Location											
						Sondajın Çapı Doring Diameter		76 mm													
						Muhafaza Borusu (çerçevesi)				Başlangıç Tarihi Date		15.10.2005		Sondaj No Borehole No		SK 6					
						Sondaj Makinesi Boring Equipment		D500		Başlangıç Tarihi Commenced		16.10.2005									
Derinlik Depth (m)		Tip ve No Type		0-15 15-30 30-45 45-60		N ₆₀		10 20 30 40 50		Karat % TCR		RQD %		Yeraltı Su Derinliği Water Depth (m)		TABAKA TANIMI Description Of Strata		Kilometre Level (m)		Profil Legend	
2	D1	4	8	13	21									1.00		Alüvyon grimsi açık kahve renkli az çakıllı kumlu kil		2.00			
4	D2	15	15	30	45											açık kahve sarımsı renkli süreksizlik yüzeyleri oksitlenmiş W5 ayrışmalı kumtaşı					
6	D3	25	50		R					10		0						6.00			
8										30		10				kahve boz renkli süreksizlik yüzeyleri oksitlenmiş çok sık çatlaklı W4 ayrışma dereceli silttaşı aratabakalı kumtaşı					
10										20		0									
12										20		0									
14										30		10						13.00			
16										25		7									
18										35		15				grimsi boz renkli süreksizlik yüzeyleri oksitlenmiş silttaşı kumtaşı ardalanması					
20										45		20									
										35		15									
										30		20						20.00			
sondaj kuyusu sonu 20.00 m																					

Şekil A.2 :1 No'lu çalışma 6 No'lu sondaj logu

SONDAJ LOGU

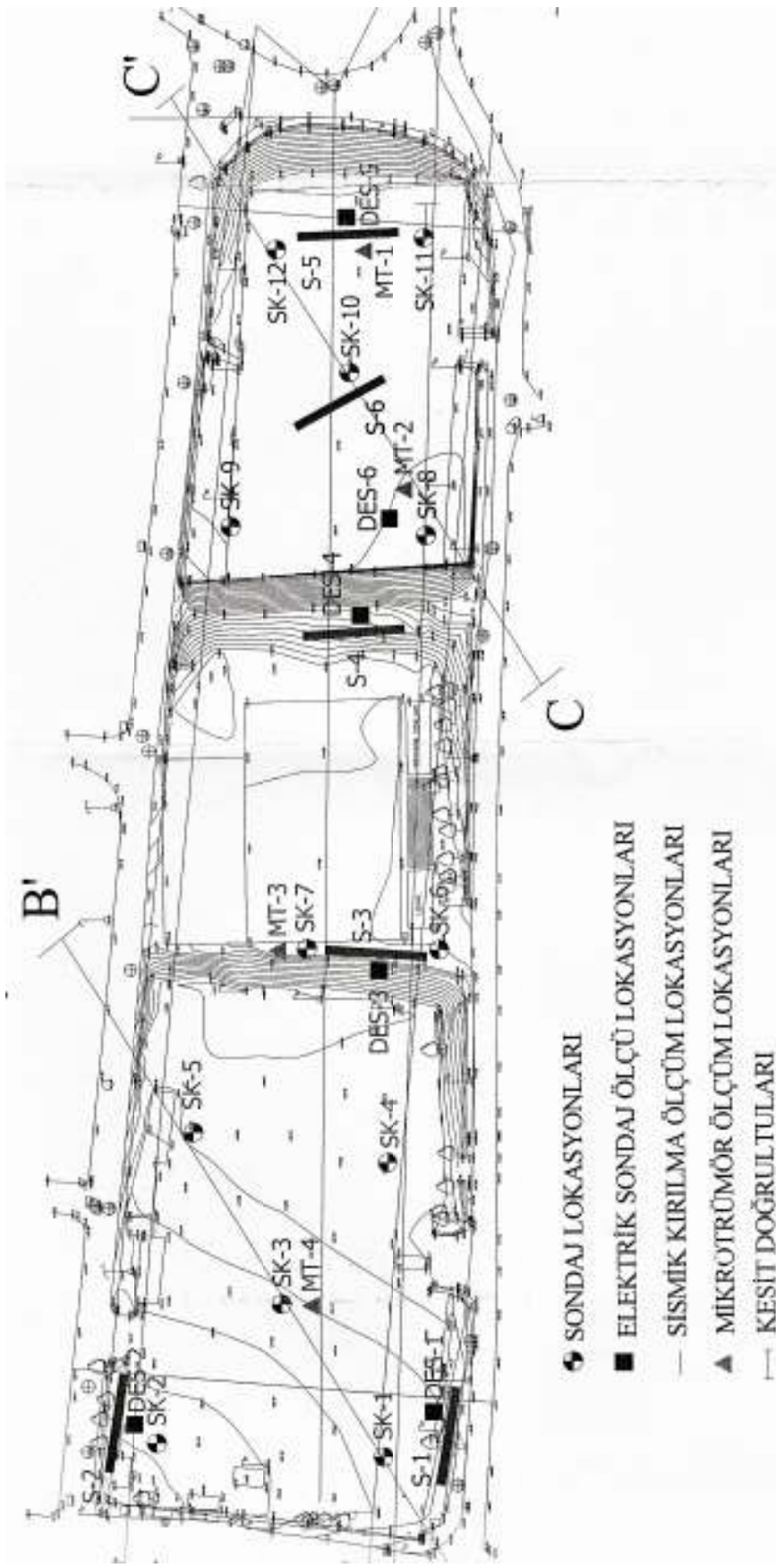
Numaralar ve ARAZİ Deneyleri Samples and In situ Tests		SPT Derinliği Darbeleri SPT Blows in cm				Ayarlar TCR		RQD %		Yeraltı Suyu Derinliği Water Depth (m)		TAMAKA TANIMI Description of Strata		Kazıya Dönüş Level (m)	Prof 1:10
Derinlik Depth (m)	Tip ve No Type	Q 10	15 30	30 45	N 30	10	20	30	40	50					
2	D1	2	3	3	6						1.00	Alüvyon grimsi açık kahve renkli az çakıllı kumlu kil			
	D2	3	7	8	15									3.50	
4												açık kahve sarımsı renkli sürekli yüzeyleri oksitlenmiş W5 ayrışmalı kumtaşı			
6						0	0							6.00	
8						20	0					kahve boz renkli W4 ayrışma dereceli kumtaşı			
						25	7							8.50	
10						30	10					grimsi kahve boz renkli sürekli yüzeyleri oksitlenmiş silttaşı aratabakalı kumtaşı			
12						35	20								
14						45	7								
16						50	25								
18						35	15								
						40	25								
20						40	25							20.00	
sondaj kuyusu derinliği 20.00 m															

Şekil A.3 : 1 No'lu Çalışma 7 No'lu sondaj logu.

SONDAJ LOGU

Numuneler ve Arazi Deneyleri Samples and In situ Tests						Sonda Metodu Boring Method		Rotary		İç Yeri Location		Başlangıç Tarihi Date			Sondaj No Borehole No		SK B.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
						Sonda Çapı Boring Diameter		76 mm		Bitiş Tarihi Commenced					18.10.2005																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
						Mühafize Donusu Deniği																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
						Sondaj Makinesi Boring Equipment		D500																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Tip ve No Type		0.15		15.30		30		45		75		30		10		20		30		40		50		60		70		80		90		100		110		120		130		140		150		160		170		180		190		200		210		220		230		240		250		260		270		280		290		300		310		320		330		340		350		360		370		380		390		400		410		420		430		440		450		460		470		480		490		500		510		520		530		540		550		560		570		580		590		600		610		620		630		640		650		660		670		680		690		700		710		720		730		740		750		760		770		780		790		800		810		820		830		840		850		860		870		880		890		900		910		920		930		940		950		960		970		980		990		1000		1010		1020		1030		1040		1050		1060		1070		1080		1090		1100		1110		1120		1130		1140		1150		1160		1170		1180		1190		1200		1210		1220		1230		1240		1250		1260		1270		1280		1290		1300		1310		1320		1330		1340		1350		1360		1370		1380		1390		1400		1410		1420		1430		1440		1450		1460		1470		1480		1490		1500		1510		1520		1530		1540		1550		1560		1570		1580		1590		1600		1610		1620		1630		1640		1650		1660		1670		1680		1690		1700		1710		1720		1730		1740		1750		1760		1770		1780		1790		1800		1810		1820		1830		1840		1850		1860		1870		1880		1890		1900		1910		1920		1930		1940		1950		1960		1970		1980		1990		2000		2010		2020		2030		2040		2050		2060		2070		2080		2090		2100		2110		2120		2130		2140		2150		2160		2170		2180		2190		2200		2210		2220		2230		2240		2250		2260		2270		2280		2290		2300		2310		2320		2330		2340		2350		2360		2370		2380		2390		2400		2410		2420		2430		2440		2450		2460		2470		2480		2490		2500		2510		2520		2530		2540		2550		2560		2570		2580		2590		2600		2610		2620		2630		2640		2650		2660		2670		2680		2690		2700		2710		2720		2730		2740		2750		2760		2770		2780		2790		2800		2810		2820		2830		2840		2850		2860		2870		2880		2890		2900		2910		2920		2930		2940		2950		2960		2970		2980		2990		3000		3010		3020		3030		3040		3050		3060		3070		3080		3090		3100		3110		3120		3130		3140		3150		3160		3170		3180		3190		3200		3210		3220		3230		3240		3250		3260		3270		3280		3290		3300		3310		3320		3330		3340		3350		3360		3370		3380		3390		3400		3410		3420		3430		3440		3450		3460		3470		3480		3490		3500		3510		3520		3530		3540		3550		3560		3570		3580		3590		3600		3610		3620		3630		3640		3650		3660		3670		3680		3690		3700		3710		3720		3730		3740		3750		3760		3770		3780		3790		3800		3810		3820		3830		3840		3850		3860		3870		3880		3890		3900		3910		3920		3930		3940		3950		3960		3970		3980		3990		4000		4010		4020		4030		4040		4050		4060		4070		4080		4090		4100		4110		4120		4130		4140		4150		4160		4170		4180		4190		4200		4210		4220		4230		4240		4250		4260		4270		4280		4290		4300		4310		4320		4330		4340		4350		4360		4370		4380		4390		4400		4410		4420		4430		4440		4450		4460		4470		4480		4490		4500		4510		4520		4530		4540		4550		4560		4570		4580		4590		4600		4610		4620		4630		4640		4650		4660		4670		4680		4690		4700		4710		4720		4730		4740		4750		4760		4770		4780		4790		4800		4810		4820		4830		4840		4850		4860		4870		4880		4890		4900		4910		4920		4930		4940		4950		4960		4970		4980		4990		5000		5010		5020		5030		5040		5050		5060		5070		5080		5090		5100		5110		5120		5130		5140		5150		5160		5170		5180		5190		5200		5210		5220		5230		5240		5250		5260		5270		5280		5290		5300		5310		5320		5330		5340		5350		5360		5370		5380		5390		5400		5410		5420		5430		5440		5450		5460		5470		5480		5490		5500		5510		5520		5530		5540		5550		5560		5570		5580		5590		5600		5610		5620		5630		5640		5650		5660		5670		5680		5690		5700		5710		5720		5730		5740		5750		5760		5770		5780		5790		5800		5810		5820		5830		5840		5850		5860		5870		5880		5890		5900		5910		5920		5930		5940		5950		5960		5970		5980		5990		6000		6010		6020		6030		6040		6050		6060		6070		6080		6090		6100		6110		6120		6130		6140		6150		6160		6170		6180		6190		6200		6210		6220		6230		6240		6250		6260		6270		6280		6290		6300		6310		6320		6330		6340		6350		6360		6370		6380		6390		6400		6410		6420		6430		6440		6450		6460		6470		6480		6490		6500		6510		6520		6530		6540		6550		6560		6570		6580		6590		6600		6610		6620		6630		6640		6650		6660		6670		6680		6690		6700		6710		6720		6730		6740		6750		6760		6770		6780		6790		6800		6810		6820		6830		6840		6850		6860		6870		6880		6890		6900		6910		6920		6930		6940		6950		6960		6970		6980		6990		7000		7010		7020		7030		7040		7050		7060		7070		7080		7090		7100		7110		7120		7130		7140		7150		7160		7170		7180		7190		7200		7210		7220		7230		7240		7250		7260		7270		7280		7290		7300		7310		7320		7330		7340		7350		7360		7370		7380		7390		7400		7410		7420		7430		7440		7450		7460		7470		7480		7490		7500		7510		7520		7530		7540		7550		7560		7570		7580		7590		7600		7610		7620		7630		7640		7650		7660		7670		7680		7690		7700		7710		7720		7730		7740		7750		7760		7770		7780		7790		7800		7810		7820		7830		7840		7850		7860		7870		7880		7890		7900		7910		7920		7930		7940		7950		7960		7970		7980		7990		8000		8010		8020		8030		8040		8050		8060		8070		8080		8090		8100		8110		8120		8130		8140		8150		8160		8170		8180		8190		8200		8210		8220		8230		8240		8250		8260		8270		8280		8290		8300		8310		8320		8330		8340		8350		8360		8370		8380		8390		8400		8410		8420		8430		8440		8450		8460		8470		8480		8490		8500		8510		8520		8530		8540		8550		8560		8570		8580		8590		8600		8610		8620		8630		8640		8650		8660		8670		8680		8690		8700		8710		8720		8730		8740		8750		8760		8770		8780		8790		8800		8810		8820		8830		8840		8850		8860		8870		8880		8890		8900		8910		8920		8930		8940		8950		8960		8970		8980		8990		9000		9010		9020		9030		9040		9050		9060		9070		9080		9090		9100		9110		9120		9130		9140		9150		9160		9170		9180		9190		9200		9210		9220		9230		9240		9250		9260		9270		9280		9290		9300		9310		9320		9330		9340		9350		9360		9370		9380		9390		9400		9410		9420		9430		9440		9450		9460		9470		9480		9490		9500		9510		9520		9530		9540		9550		9560		9570		9580		9590		9600		9610		9620		9630		9640		9650		9660		9670		9680		9690		9700		9710		9720		9730		9740		9750		9760		9770		9780		9790		9800		9810		9820		9830		9840		9850		9860		9870		9880		9890		9900		9910		9920		9930		9940		9950		9960		9970		9980		9990		10000		10010		10020		10030		10040		10050		10060		10070		10080		10090	

Şekil A.4 :1 No'lu Çalışma 8 No'lu sondaj logu



Sondaj derinliği (m)	Numune türü	Numune no	Zemin Deneyleri										Kaya özellikleri			Jeolojik Kesit	Zemin Tanımlaması
			Standart Penetrasyon Testi										Toplam karot TCR (%)	Sağlam karot yüzdesi	Kaya kalitesi RQD (%)		
			0-15	15-30	30-45	N30	SPT Grafiği										
							0	1	2	3	4						
2.0	SPT	1	5	7	7	14										İNŞAAT MOLOZLARI DOLGU	
4.0															4.0 m		
6.0	SPT	2	11	25	30	R										AYRIŞMIŞ (W5) KAYA PARÇALI KİL	
8.0															8.0 m		
10.0												63	8	8	SARI KAHVE KOYU GRİ RENKLERDE KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI		
12.0												67	35	13			
14.0												55	30	12			
16.0												27	23	20			
18.0												95	80	68			
20.0												67	48	40			
22.0												85	50	33			
24.0												85	35	20			
26.0												57	17	9			
28.0												90	77	53			
30.0												63	40	30			
												43	27	15			
												53	43	25			
												45	15	11			
												60	30	17			
												37	13	0			
Zemin değerlendirilmesi - SPT										Kaya niteliği RQD (%)		Ayrışma derecesi (W)		Çatlak sıklığı (# m)		X koordinatı Y koordinatı	
İnce tanelili (kohezyonlu)					İri tanelili (kohezyonsuz)												
N30: 0-2 : çok yumuşak					N30: 0-4 : çok gevşek					0 - 25 : çok zayıf		W1 : taze (ayrışmamış)		< 1 : mesif		Sondaj ağız kotu	
N30: 3-4 : yumuşak					N30: 5-10 : gevşek					25 - 50 : zayıf		W2 : az ayrışmış		1-3 : az çatlaklı-kırıktı		151.00	
N30: 5-8 : orta katı					N30: 11-30 : orta					50 - 75 : orta		W3 : orta derece ayrışmış		3-10 : kırık			
N30: 9-13 : katı					N30: 31-50 : sıkı					75 - 90 : iyi		W4 : ayrışmış		10-50 : çok çatlaklı-kırıktı			
N30: 14-30 : çok katı					N30: 50 > : çok sıkı					90 - 100 : çok iyi		W5 : tamamen ayrışmış		> 50 : parçalanmış		Yeraltı suyu durumu	
N30: 30 > : sert																8.0 metre	

Şekil B.2 :2 No'lu Çalışma 2 No'lu sondaj logu (1. Sayfa).

										Sondaj no : SK-2	Sayfa no : 2	Sondaj sonu: 50 metre
Sondaj derinliği (m)	Numune türü	Numune no	Zemin Deneyleri					Kaya özellikleri			Jeolojik Kesit	Zemin Tanımlaması
			Standart Penetrasyon Testi					Toplam karot TCR (%)	Sağlam karot yüzdesi	Kaya kalitesi RQD (%)		
			0-15	15 - 30	30 - 45	N30	SPT Grafiği					
32.0								30	7	0	35.0 m	ÇOK ÇATLAKLI-KIRIKLI KOYU KAHVE RENKTE KUMTAŞI
34.0								28	17	13		
36.0								20	11	7		
38.0								60	37	33	50.0 m	KOYU GRİ RENKLERDE KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI
40.0								63	50	40		
42.0								90	80	46		
44.0								85	40	16		
46.0								80	40	25		
48.0								65	32	21		
50.0								60	47	30		
52.0								85	55	40		
54.0								90	60	32		
56.0								65	50	35		
58.0								80	50	40		
60.0												
Zemin değerlendirilmesi - SPT							Kaya niteliği RQD (%)	Ayrışma derecesi (W)	Çatlak sıklığı (# m)	X koordinatı Y koordinatı		
İnce tanelili (kohezyonlu)			İri tanelili (kohezyonsuz)									
N30: 0-2 : çok yumuşak N30: 3-4 : yumuşak N30: 5-8 : orta kati N30: 9-13 : kati N30: 14-30 : çok kati N30: 30 > : sert			N30: 0-4 : çok gevşek N30: 5-10 : gevşek N30: 11-30 : orta N30: 31-50 : sıkı N30: 50 > : çok sıkı				0 - 25 : çok zayıf 25 - 50 : zayıf 50 - 75 : orta 75 - 90 : iyi 90 - 100 : çok iyi	W1 : taze (ayrışmamış) W2 : az ayrışmış W3 : orta derece ayrışmış W4 : ayrışmış W5 : tamamen ayrışmış	< 1 : masif 1-3 : az çatlaklı-kirikli 3-10 : kırıklı 10-50 : çok çatlaklı-kirikli > 50 : parçalanmış	Sondaj ağız kotu 151.00 Yeraltı suyu durumu 8.0 metre		

Şekil B.3 : 2 No'lu Çalışma 2 No'lu sondaj logu (2. Sayfa).

Sondaj derinliği (m)										Numune türü										Numune no										Zemin Deneyleri										Kaya özellikleri										Sondaj no : SK-3										Sayfa no : 1										Sondaj sonu: 50 metre																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Standart Penetrasyon Testi										SPT Grafiği										Toplam karot TCR (%)										Sağlam karot yüzdesi										Kaya kalitesi RQD (%)										Jeolojik Kesit										Zemin Tanımlaması																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
0-15										15-30										30-45										N30										SPT Grafiği										Toplam karot TCR (%)										Sağlam karot yüzdesi										Kaya kalitesi RQD (%)										Jeolojik Kesit										Zemin Tanımlaması																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
2.0										4.0										6.0										8.0										10.0										12.0										14.0										16.0										18.0										20.0										22.0										24.0										26.0										28.0										30.0										DOLGU										AYRIŞMIŞ (W5) KAYA PARÇALI KİL										SARI KAHVE RENKLERDE KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI										KOYU KAHVE KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
SPT										1										25										28										32										R										47										33										7										53										43										33										43										32										25										37										33										27										53										50										37										37										33										28										50										43										34										43										33										23										30										17										8										73										47										39										37										30										27										47										27										13										33										20										9										30										23										7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Bitirme tarihi : 20.11.2005										Sondaj no : SK-3		Sayfa no : 2		Sondaj sonu: 50 metre	
Sondaj derinliği (m)	Numune türü	Numune no	Zemin Deneyleri						Kaya özellikleri			Jeolojik Kesit	Zemin Tanımlaması		
			Standart Penetrasyon Testi						Toplam karot TCR (%)	Sağlam karot yüzdesi	Kaya kalitesi RQD (%)				
			0-15	15 - 30	30 - 45	N30	SPT Grafiği								
							11	22						33	44
32.0									47	20	15	KOYU KAHVE KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI			
34.0									33	30	23				
36.0									27	23	8				
38.0									27	21	13				
40.0									33	20	9				
42.0									30	23	7				
44.0									45	25	13				
46.0									50	30	21				
48.0									40	21	17				
50.0									50	27	10				
52.0									68	47	23				
54.0									50	21	11				
56.0									60	37	20				
58.0															
60.0															
Zemin değerlendirilmesi - SPT								Kaya niteliği RQD (%)	Ayrışma derecesi (W)	Çatlak sıklığı (# m)	X koordinatı Y koordinatı				
İnce tanelili (kohezyonlu)				İri tanelili (kohezyonsuz)											
N30: 0-2 : çok yumuşak N30: 3-4 : yumuşak N30: 5-8 : orta katı N30: 9-13 : katı N30: 14-30 : çok katı N30: 30 > : sert				N30: 0-4 : çok gevşek N30: 5-10 : gevşek N30: 11-30 : orta N30: 31-50 : sıkı N30: 50 > : çok sıkı				0 - 25 : çok zayıf 25 - 50 : zayıf 50 - 75 : orta 75 - 90 : iyi 90 - 100 : çok iyi		W1 : taze (ayrışmamış) W2 : az ayrışmış W3 : orta derecesinde ayrışmış W4 : ayrışmış W5 : tamamen ayrışmış		< 1 : masif 1-3 : az çatlaklı-kırıklı 3-10 : kırıklı 10-50 : çok çatlaklı-kırıklı >50 : parçalanmış			
												Sondaj ağız kotu 149.50			
												Yeraltı suyu durumu 10.0 metre			

Şekil B.5 : 2 No'lu Çalışma 3 No'lu sondaj logu (2. Sayfa).

Bürme tarihi : 18.11.2005										Sondaj no : SK-5		Sayfa no : 1		Sondaj sonu: 50 metre	
Sondaj derinliği (m)	Numune türü	Numune no	Zemin Deneyleri					Kaya özellikleri			Jeolojik Kesit	Zemin Tanımlaması			
			Standart Penetrasyon Testi					Toplam karot TCR (%)	Sağlam karot yüzdesi	Kaya kalitesi RQD (%)					
			0-15	15 - 30	30 - 45	N30	SPT Grafiği								
2.0											2.0 m	DOLGU			
4.0															
5.0	SPT	1	14	16	17	33						SARI AÇIK KAHVE RENKLİ AYRIŞMIŞ (W5) KAYA PARÇALI KİL			
8.0															
	SPT	2	23	36	R						10.5 m				
10.0															
12.0							27	0	0						
14.0							27	7	6						
16.0							33	23	8						
18.0							30	7	7						
20.0							20	7	7						
22.0							13	4	0		20.0 m				
24.0							27	20	0						
26.0							33	20	8						
28.0							27	14	0						
30.0							33	20	0						
							30	15	0						
							24	17	7						
							35	20	0						
Zemin değerlendirilmesi - SPT							Kaya niteliği RQD (%)		Ayrışma derecesi (W)		Çatlak sıklığı (# m)		X koordinatı Y koordinatı		
İnce tanelili (kohezyonlu)			İri tanelili (kohezyonsuz)												
N30: 0-2 : çok yumuşak			N30: 0-4 : çok gevşek				0 - 25 : çok zayıf		W1 : taze (ayrışmamış)		< 1 : masif		Sondaj ağız kotu 149.00		
N30: 3-4 : yumuşak			N30: 5-10 : gevşek				25 - 50 : zayıf		W2 : az ayrışmış		1-3 : az çatlaklı-kırıktı				
N30: 6-8 : orta katı			N30: 11-30 : orta				50 - 75 : orta		W3 : orta derece ayrışmış		3-10 : kırık				
N30: 9-13 : sıkı			N30: 31-60 : sıkı				75 - 90 : iyi		W4 : ayrışmış		10-50 : çok çatlaklı-kırıktı				
N30: 14-30 : çok katı			N30: 60 > : çok sıkı				90 - 100 : çok iyi		W5 : tamamen ayrışmış		> 50 : parçalanmış		Yeraltı suyu durumu 12.0 metre		

Şekil B.6 : 2 No'lu Çalışma 5 No'lu sondaj logu (1. Sayfa).

Sondaj no : SK-5										Sayfa no : 2	Sondaj sonu: 50 metre	
Sondaj derinliği (m)	Numune türü	Numune no	Zemin Deneyleri					Kaya özellikleri			Jeolojik Kesit	Zemin Tanımlaması
			Standart Penetrasyon Testi					Toplam karot TCR (%)	Sağlam karot yüzdesi	Kaya kalitesi RQD (%)		
			0-15	15 - 30	30 - 45	N30	SPT Grafiği					
32.0									34	10	7	KOYU GRİ - KAHVE RENKLİ KİLTAŞI-SİLT TAŞI ARA BANTLI KUMTAŞI
34.0									40	8	0	
35.0									33	13	0	
38.0									20	13	7	
40.0									30	20	0	
42.0									47	13	8	
44.0									24	11	7	
46.0									17	7	0	
48.0									37	12	9	
50.0									38	22	15	
52.0									42	27	13	
54.0									53	33	21	
56.0									47	38	19	
58.0												
60.0												
Zemin değerlendirilmesi - SPT							Kaya niteliği RQD (%)	Ayrışma derecesi (W)	Çatlak sıklığı (#/m)	X koordinatı Y koordinatı		
İnce taneli (kohezyonlu)			İri taneli (kohezyonsuz)									
N30: 0-2 : çok yumuşak N30: 3-4 : yumuşak N30: 5-8 : orta kırı N30: 9-13 : kırı N30: 14-30 : çok kırı N30: 30 > : sert			N30: 0-4 : çok gevşek N30: 5-10 : gevşek N30: 11-30 : orta N30: 31-50 : sıkı N30: 50 > : çok sıkı				0 - 25 : çok zayıf 25 - 50 : zayıf 50 - 75 : orta 75 - 90 : iyi 90 - 100 : çok iyi	W1 : tabii (ayrışmamış) W2 : az ayrılmış W3 : orta derece ayrılmış W4 : ayrılmış W5 : tamamen ayrılmış	< 1 : masif 1-3 : az çatlaklı-kırık 3-10 : kırık 10-50 : çok çatlaklı-kırık >50 : parçalanmış	Sondaj ağız kotu 149.00 Yeraltı suyu durumu 12.0 metre		

Şekil B.7 : 2 No'lu Çalışma 5 No'lu sondaj logu (2. Sayfa).

Çizelge C.1: 1 No’lu Çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (1. Sayfa).

qs = 500 kPa Çevre Sürtünme Kapasitesi, ayrılmış grovak

ANKRAJ YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	Kademe Derinliği	Hesaplanan Kuvvet	Yatay Aralık *	Ankraj Açısı	Hesaplanan Ankraj Yüğü, T _n
	m	kN/m	m	(°)	kN
1	0,5	53,8	2,1	15	117,0
2	3,5	199,1	2,1	15	432,9
3	6,5	215,2	2,1	15	467,9
4	9,5	165,7	2,1	15	360,2

* Kazık aralıkları da göz önünde bulundurularak seçilecektir.

ANKRAJ KÖK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	Ankraj Kökü				Hesaplanan Kök Boyu (m)	T _f güvenliir * (kN)	Seçilen Kök Boyu (m)
	Çap (m)	Birim Alan (m ² /m)	tf nihai (kN/m)	GKsürtünme			
1	0,12	0,377	188	2,5	2,5	188,5	8
2	0,12	0,377	188	2,5	6	452,4	8
3	0,12	0,377	188	2,5	6,5	490,1	8
4	0,12	0,377	188	2,5	5	377,0	8

* T_f güvenliir > T_n olmalıdır.

Çizelge C.2: 1 No’lu Çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (2. Sayfa).

ANKRAJ HALAT SAYISININ BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	GK _{kopma}	Kablo Çapı (inç)	Kablo Mukavemeti (kN) *	Halat Kapasitesi (kN)	Halat Sayısı (adet)	Ankraj Kapasitesi, T _{h_güvenilir} ** (kN)	Seçilen Halat Sayısı (adet)
1	1,5	0,5	184	122,7	2	245,3	3
2	1,5	0,5	184	122,7	3	368,0	3
3	1,5	0,6	261	174,0	2,8	487,2	3
4	1,5	0,5	184	122,7	3	368,0	3

* Ankraj Kablo Mukavemet ve Çapları ASTM A416 Standardından alınmıştır.

** T_{h_güvenilir} > T_n olmalıdır.

ANKRAJ HALAT ADERANSININ BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	GK _{germe} *	Germe Değeri, GK _{germe} *T _n (kN)	Uygulanacak Germe (kN)	Toplam Kablo Yüzeyi (m ²)	Halat-Enjeksiyon Gerilimesi, T _a (kN/m ²)	Halat Aderansı T _{fa} ** (kN/m ²)
1	1,10	128,7	130,0	0,96	136	1500
2	1,10	476,1	480,0	0,96	501	1500
3	1,10	514,6	520,0	1,15	453	1500
4	1,10	396,3	400,0	0,96	418	1500

* Geçici ankrajlar için uygunluk deneyi

** T_{fa} > T_a olmalıdır. Ankraj Kablo çeşidi olarak Temiz Crimped Kablo (T = 1500 kN/m²) kullanılacaktır.

Çizelge C.3: 2 No'lu Çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (1. Sayfa).

qs = 750 kPa Çevre Sürtünme Kapasitesi, az ayrılmış grovak

ANKRAJ YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	Kademe Derinliği	Hesaplanan Kuvvet	Yatay Aralık *	Ankraj Açısı	Hesaplanan Ankraj Yüğü, T _n
	m	kN/m	m	(°)	kN
1	2,5	594,8	1,2	15	738,9
2	5,5	540,0	1,2	15	670,9
3	10	546,4	1,2	15	678,8
4	14,5	540,4	1,2	15	671,4
5	19	450,4	1,2	15	559,5
6	23,5	450,4	1,2	10	548,8
7	26,5	540,4	1,2	10	658,5
8	31	540,4	1,2	10	658,5
9	35,5	510,4	1,2	10	621,9

* Kazık aralıkları da göz önünde bulundurularak seçilecektir.

ANKRAJ KÖK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	Ankraj Kökü					Hesaplanan Kök Boyu	T _t güvenli *	Seçilen Kök Boyu
	Çap (m)	Birim Alan (m ² /m)	t _f nihai (kN/m)	GKsürtünme	t _f güvenli (kN/m)			
1	0,12	0,377	283	2,5	113,1	7	791,7	8
2	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8
3	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8
4	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8
5	0,12	0,377	283	2,5	113,1	5	565,5	8
6	0,12	0,377	283	2,5	113,1	5	565,5	8
7	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8
8	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8
9	0,12	0,377	283	2,5	113,1	6	678,6	8

* T_t güvenli > T_n olmalıdır.

Çizelge C.4: 2 No'lu Çalışma öngermeli ankraj ön hesap tablosu (2. Sayfa).

ANKRAJ HALAT SAYISININ BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	GK _{Kopma}	Kablo Çapı	Kablo Mukavemeti	Halat Kapasitesi	Halat Sayısı	Ankraj Kapasitesi, T _n güvenli **	Seçilen Halat Sayısı
		(inç)	(kN) *	(kN)	(adet)	(kN)	(adet)
1	1,5	0,6	261	174,0	5	870,0	6
2	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
3	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
4	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
5	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
6	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
7	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
8	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5
9	1,5	0,6	261	174,0	4	696,0	5

* Ankraj Kablo Mukavemet ve Çapları ASTM A416 Standardından alınmıştır.

** T_n güvenli > T_n olmalıdır.

ANKRAJ HALAT ADERANSININ BELİRLENMESİ

Kademe İsmi	GK _{Geme} *	Germe Değeri, GK _{Geme} *T _n	Uygulanacak Germe	Toplam Kablo Yüzeyi	Halat-Enjeksiyon Genilmesi, T _a	Halat Aderansı T _{ta} **
		(kN)	(kN)	(m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)
1	1,10	812,8	820,0	2,30	357	1500
2	1,10	737,9	750,0	1,92	392	1500
3	1,10	746,7	750,0	1,92	392	1500
4	1,10	738,5	750,0	1,92	392	1500
5	1,10	615,5	620,0	1,92	324	1500
6	1,10	603,7	620,0	1,92	324	1500
7	1,10	724,3	720,0	1,92	376	1500
8	1,10	724,3	720,0	1,92	376	1500
9	1,10	684,1	700,0	1,92	366	1500

* Geçici ankrajlar için uygunluk deneyi

** T_{ta} > T_a olmalıdır. Ankraj Kablo çeşidi olarak Temiz Crimped Kablo (T = 1500 kN/m²) kullanılacaktır.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Arif ÇINAR

Doğum Yeri ve Tarihi: Kars / 21.04.1983

Adres: Evliya Çelebi Mahallesi, Atatürk Caddesi, No:8/1 Tuzla, İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği / İZMİR

Yayın Listesi:

- Yüksek Dolgu Kesitlerde Jet Grouting-Fore Kazık ve Toprakarme Duvarların Kombine Davranışı, ZM12 Kongresi, Ekim, 2008, Konya.
- Yüksek Dolgu Kesitlerde Jet Grouting-Fore Kazık ve Toprakarme Duvarların Kombine Davranışı, 3. Ulusal Geosentetikler Konferansı, Kasım, 2008, İstanbul.
- Determination Of Soil Nail Capacity In Greywacke Formation, Second International Conference, New Developments In Geotechnical Engineering, 28-30 May, 2009, Nicosia, TRNC.
- Grovak Birimlerde Pasif Ankraj Kapasitesinin Belirlenmesi. 3. Ulusal Geoteknik Kongresi, Aralık, 2009, Adana.
- Bir Akaryakıt dolum Tesisi İstinat Yapısının Geosentetik Donatılı “Bohçalama Tip” İstinat Sistemi İle Desteklenmesi, 4. Ulusal Geosentetikler Konferansı, Haziran, 2010, İstanbul.
- Grovak Birimlerde Yapılan Ankrajlı Derin Kazılarda Oluşan Yatay Deplasmanlar, ZM13 Kongresi, Ekim, 2010, İstanbul.

