

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKSENEL YÜKLÜ TEKİL FORE KAZIKLARIN OTURMASI ÜZERİNE BİR
İNCELEME**

DOKTORA TEZİ

Mustafa MERT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKSENEL YÜKLÜ TEKİL FORE KAZIKLARIN OTURMASI ÜZERİNE BİR
İNCELEME**

DOKTORA TEZİ

**Mustafa MERT
(501122303)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa Tuğrul ÖZKAN

ŞUBAT 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501122303 numaralı Doktora Öğrencisi Mustafa MERT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “EKSENEL YÜKLÜ TEKİL FORE KAZIKLARIN OTURMASI ÜZERİNE BİR İNCELEME” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mustafa Tuğrul ÖZKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge SİYAHİ
Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Berrak TEYMÜR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 27 Aralık 2020
Savunma Tarihi : 03 Şubat 2021





Eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Bu doktora tezinde, kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak yeni bir yük-oturma analiz yöntemi geliştirilmiştir.

Tez çalışmalarım boyunca gösterdiği maddi manevi her türlü yardımdan dolayı değerli hocam Sayın Doç.Dr. M. Tuğrul ÖZKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY'a ve Prof. Dr. Bilge SİYAHİ'ye çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasında dataları kullanılan enstrümanlı statik yükleme deneylerinin uygulama aşamalarında bana yardımcı olan tüm TEMELTAŞ çalışanlarına teşekkür ederim. Bu deneylere ilave olarak incelenen enstrümanlı kazık yükleme deney datalarını benimle paylaşan KASKTAŞ firması çalışanlarına da çok teşekkür ediyorum.

Makale hazırlama konusunda bana büyük yardımları olan değerli hocam Prof. Dr. Zekai CELEP'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca aynı üniversitede beraber çalıştığımız ve bilgisayar programlama konusunda bana çok yardımcı dokununan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Cenk AKSOYLAR'a da çok teşekkür ediyorum.

Tezin oluşturulması sırasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Aralık 2020

Mustafa MERT
(İnş. Y. Müh.)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ	5
2.1 Üstten Yükleme Statik Kazık Yükleme Deneyleri	6
2.2 Osterberg Statik Kazık Yükleme Deneyi	14
2.3 Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi	22
2.3.1 Chin-Kondner yöntemi	23
2.3.2 Alku-Özkan yöntemi	24
3. TEKİL KAZIKLARDA YÜK-OTURMA ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	27
3.1 Poulos ve Davis (1968) Yöntemi	28
3.2 Randolph ve Wroth (1978) Yöntemi	34
3.3 Bowles Yöntemi	36
3.4 Tomlinson ve Woodward (2007) Yöntemi	37
3.5 Coyle ve Reese (1966) Yöntemi	37
3.6 Fleming (1992) Yöntemi	40
3.7 Vallabhan & Mustafa (1996) Yöntemi	44
3.8 Zhang ve Diğ. (2016) Yöntemi ile Oturma Hesabı	47
3.9 Bohn ve Diğ. (2016) Yöntemi ile Oturma Hesabı	51
3.10 Boonyatee ve Lai (2017) Yöntemi	52
3.11 Xia ve Zou (2017) Yöntemi	55
4. İNCELENEN KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ	59
4.1 İskenderun Enerji Santrali Projesi	59
4.1.1 Zemin bilgisi	59
4.1.2 Yükleme deneyi sistemi ve deney programı	64
4.1.3 Yükleme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	67
4.2 Bakü Otel Projesi	76
4.2.1 Zemin bilgisi	77
4.2.2 Yükleme deneyi sistemi ve deney programı	79
4.2.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	83
4.3 Basra Projesi	93
4.3.1 Zemin bilgisi	93

4.3.2 Deney sistemi ve deney programı	94
4.3.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	96
4.4 İzmir Bomonti Projesi	103
4.4.1 Zemin bilgisi	103
4.4.2 Deney sistemi ve deney programı	104
4.4.3 Deney sonuçları ve değerlendirmesi	106
4.5 Yenikapı Projesi	110
4.5.1 Zemin bilgisi	110
4.5.2 Deney sistemi ve deney programı	111
4.5.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	113
4.6 Bağdat Projesi.....	116
4.6.1 Zemin bilgisi	117
4.6.2 Deney sistemi ve deney programı	117
4.6.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	119
4.7 İzmir Aliğa Projesi.....	122
4.7.1 Zemin özellikleri	123
4.7.2 Deney sistemi ve deney programı	123
4.7.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi	125
4.8 Kazık Yükleme Deneylerinden Toplam Taşıma Gücü Hesapları	126
5. KAZIK OTURMA ANALİZLERİ	129
5.1 Elastisite Teorisine Dayanan Oturma Analizleri.....	129
5.1.1 Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile yapılan oturma analizleri	129
5.1.2 Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile yapılan oturma analizleri.....	134
5.2 Yük-Transfer Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Oturma Analizleri	137
5.2.1 Fleming (1992) yöntemi ile yapılan oturma analizleri.....	137
5.2.2 Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri.....	141
5.2.3 Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri	145
5.2.4 Boonyatee ve Lai (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri.....	148
5.2.5 Yük-transfer yöntemlerinin değerlendirilmesi	151
6. TEKİL SÜRTÜNME KAZIKLARI OTURMA ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ HİPERBOLİK YÖNTEM	159
6.1 Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi	159
6.2 Yeni Yöntem için Parametre Çalışmaları.....	162
6.3 Yeni Yöntem ile Yapılan Hesaplar ve Karşılaştırmalar	164
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	181
7.1 Literatür Çalışmaları.....	181
7.2 Yeni Yöntem Çalışması.....	182
KAYNAKLAR.....	187
EKLER	191
ÖZGEÇMİŞ.....	213

KISALTMALAR

FHWA : Federal Highway Administration

SG : Strain Gauge





SEMBOLLER

E_s	: Zeminin elastisite modülü
P_s	: Sürtünme direncinden karşılanan yük
P_b	: Uç direncinden karşılanan yük
P_{su}	: Kazık toplam sürtünme direnci
P_{bu}	: Kazık toplam uç direnci
P_{tu}	: Kazık toplam taşıma gücü
τ_{su}	: Kazık toplam birim sürtünme direnci
τ_{bu}	: Kazık toplam birim uç direnci
τ_s	: Kazığa etkiyen birim sürtünme direnci
τ_{sz}	: Kazığa z derinliğinde etkiyen birim sürtünme direnci
τ_b	: Kazığa etkiyen birim uç direnci
I	: Oturma tesir faktörü
D	: Kazık çapı
L	: Kazık boyu
G_s	: Zemin kayma modülü
G_b	: Kazık tabanındaki zeminin kayma modülü
A_s	: Kazık yüzey alanı
ν_s	: Zemin Poisson oranı
ν_b	: Kazık tabanındaki zeminin Poisson oranı
r_0	: Kazık yarıçapı
r_m	: Kazık etki yarıçapı
R_k	: Kazık sıkışabilirliği düzeltme faktörü
R_h	: Derinlik düzeltme faktörü
R_ν	: Zemin poisson oranı için düzeltme faktörü
R_b	: Taşıyıcı tabaka rijitliği için düzeltme faktörü
s_t	: Kazık başında meydana gelen toplam oturma
s_s	: Kazık çevresinde meydana gelen şaft oturması
s_u	: Kazık ucunda meydana gelen oturma

E_k	: Kazık malzemesinin elastisite modülü
A_k	: Kazık kesit alanı
E_i	: Zeminin i. tabakasının elastisite modülü
h_i	: Zeminin i. tabakasının kalınlığı
n	: Kazık boyunca geçilen zemin tabakası sayısı
η	: Kazık uç çapının kazık çapına oranı
ξ	: Kazık boyunca geçilen zeminin ortalama kayma modülü
ρ	: Zemin kayma gerilmesinin derinlikle değişimi
λ	: Kazık-zemin rijitlik oranı
μl	: Kazık sıkışabilirliğinin ölçüsü
mI_s	: Şekil faktörü
I_f	: Gömme faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tek seviyeli Osterberg yükleme deneyinde elastik sıkışma değeri hesabı (Loadtest, 2001).....	21
Çizelge 2.2 : Üstten yükleme durumunda elastik sıkışma değeri hesabı (Loadtest, 2001).....	21
Çizelge 3.1 : Yük-transfer yöntemi üzerinden oluşturulan hiperbolik eğri modelleri.....	52
Çizelge 4.1 : ITKS-1 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	60
Çizelge 4.2 : ITKS-2 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	61
Çizelge 4.3 : ITKS-3 ve ITKS-4 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	61
Çizelge 4.4 : Deney programı.....	66
Çizelge 4.5 : Oturma değerleri (ITKS-1).....	68
Çizelge 4.6 : Oturma değerleri (ITKS-2).....	69
Çizelge 4.7 : Oturma değerleri (ITKS-3).....	69
Çizelge 4.8 : Oturma değerleri (ITKS-4).....	69
Çizelge 4.9 : Birim sürtünme direnci değerleri.....	72
Çizelge 4.10 : Test kazıklarının özellikleri (Bakü Otel Projesi).....	76
Çizelge 4.11 : Test kazıklarının özellikleri.....	76
Çizelge 4.12 : Bakü projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	77
Çizelge 4.13 : Deney programı (BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıkları).....	80
Çizelge 4.14 : Deney programı (BOTK-4 ve BOTK-5 kazıkları).....	83
Çizelge 4.15 : BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıkları oturma değerleri.....	84
Çizelge 4.16 : BOTK-4 ve BOTK-5 kazıkları oturma birim sürtünme direnci değerleri.....	92
Çizelge 4.17: Test kazıklarının özellikleri.....	93
Çizelge 4.18 : Basra projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	94
Çizelge 4.19 : Test kazıklarının özellikleri.....	97
Çizelge 4.20 : Toplam birim sürtünme direnci değerleri.....	101
Çizelge 4.21 : İzmir Bomonti projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.....	104
Çizelge 4.22 : Deney programı.....	105
Çizelge 4.23 : Toplam birim sürtünme direnci değerleri.....	109
Çizelge 4.24 : Yenikapı idealize zemin profili ve parametreleri.....	111
Çizelge 4.25 : Yenikapı idealize zemin profili ve parametreleri.....	112
Çizelge 4.26 : Hesaplanan ve ölçülen toplam birim sürtünme direnci değerleri.....	116
Çizelge 4.27 : Bağdat projesi idealize zemin profili ve parametreleri.....	117
Çizelge 4.28 : Oturma değerleri (BATK).....	120
Çizelge 4.29 : Hesaplanan ve ölçülen toplam birim sürtünme direnci değerleri.....	122
Çizelge 4.30 : Aliğa projesi idealize zemin profili ve parametreleri.....	123
Çizelge 4.31 : Deney programı.....	124

Çizelge 4.32 : Oturma değerleri (ATK).	125
Çizelge 4.33 : Kazık yükleme deneylerinden elde edilen toplam taşıma gücü değerleri.	126
Çizelge 4.34 : Kazıkların toplam sürtünme direnci ile toplam uç direnci değerleri.	127
Çizelge 5.1 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile İTKS-1 kazığı oturma analizi. ..	130
Çizelge 5.2 : İTKS-1 kazığı için Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen yük-oturma değerleri.	131
Çizelge 5.3 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile İTKS-2-3-4 kazıkları oturma analizi.	132
Çizelge 5.4 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile oturma analizi.	133
Çizelge 5.5 : Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile oturma analizleri.	135
Çizelge 5.6 : Kritik yükler için hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri.	136
Çizelge 5.7 : Fleming (1992) yöntemi için gerekli kazık-zemin parametreleri.	139
Çizelge 5.8 : Bohn (2016) yöntemi için gerekli parametreler.	142
Çizelge 5.9 : BETK-1 numaralı kazık için yapılan oturma analizi.	143
Çizelge 5.10 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi için gerekli kazık-zemin parametreleri.	146
Çizelge 5.11 : Kritik yükler için hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri.	152
Çizelge 6.1 : İncelenen test kazıklarının Alku-Özkan (2006) yöntemine göre hesaplanan parametreleri ve kazık toplam taşıma gücü değerleri.	160
Çizelge 6.2 : Kazık yükleme deneylerinden elde edilen toplam taşıma gücü ve kritik yük değerleri.	162
Çizelge 6.3 : Farklı yöntemlerle hesaplanan ve deney sırasında ölçülen oturma değerleri.	167
Çizelge 6.4 : Deney sırasında ölçülen ve yeni yöntem ile hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırılması.	173
Çizelge 6.5 : Zemin özellikleri ve parametreleri (Wang ve diğ., 2012).	174
Çizelge 6.6 : Alku ve Özkan (2006) tarafından incelenen test kazıklarına ait parametreler.	174
Çizelge 6.7 : Deney sırasında ölçülen ve yeni yöntem ile hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırılması.	179

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yükleme deney sistemi yerleşim planı.....	7
Şekil 2.2 : Yükleme deney sistem kesiti (A-A kesiti).	7
Şekil 2.3 : Yükleme deney sistemi görünümü.	8
Şekil 2.4 : Yükleme deneyi yer değiştirme ölçümleri.	8
Şekil 2.5 : Tanjant modülü-mikro gerinim grafiği.	14
Şekil 2.6 : Osterberg yükleme deneyi düzeneği (Düzceer, 2002).	16
Şekil 2.7 : Fore kazık içerisine farklı pozisyonlarda yerleştirilen Osterberg yük hücreleri (Osterberg, 1998).....	16
Şekil 2.8 : Osterberg yük hücresinin ve gerinim ölçerlerin kazık donatısına montajı.	17
Şekil 2.9 : Osterberg statik yükleme deney sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.	18
Şekil 2.10 : Örnek Osterberg deney sonuçları (Bakü Projesi).	19
Şekil 2.11 : Örnek Osterberg yükleme deneyi eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi. ...	19
Şekil 2.12 : Osterberg yükleme deneyinde basitleştirilmiş elastik sıkışma hesabı (LOADTEST, 2001).	20
Şekil 2.13 : Üstten yükleme durumunda basitleştirilmiş elastik sıkışma hesabı (Loadtest, 2001).	21
Şekil 2.14 : Elastik sıkışma değerlerinin eklenmesi sonucu elde edilen eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi.	22
Şekil 2.15 : Chin-Kondner yöntemi grafiği.	23
Şekil 2.16 : Alku ve Özkan (2006) yönteminde başlangıç grafiği.	24
Şekil 2.17 : Alku ve Özkan (2006) yönteminde sonlanma grafiği.	25
Şekil 2.18 : Alku ve Özkan yöntemine göre oluşturulan ideal yük-oturma eğrisi. ...	26
Şekil 2.19 : Aktepe ve Özkan (2016) yöntemi kritik yük hesabı.....	26
Şekil 3.1 : β_0 oranı grafiği (Poulos ve Davis, 1980).	29
Şekil 3.2 : Kazık sıkışabilirlik katsayısı ve Poisson oranı düzeltme faktörü (Poulos ve Davis, 1980)..	29
Şekil 3.3 : Taban modülü düzeltme faktörü, C_b (Poulos ve Davis, 1980).	30
Şekil 3.4 : Temel oturma-tesir faktörü, I_0 (Poulos ve Davis,1980).	31
Şekil 3.5 : Kazık sıkışabilirliği, Poisson oranı ve derinlik düzeltme faktörleri (Poulos ve Davis, 1980).	32
Şekil 3.6 : Taban modülü düzeltme faktörü (Poulos ve Davis, 1980).	33
Şekil 3.7 : Davis ve Poulos yöntemi toplam yük-oturma grafiği.....	34
Şekil 3.8 : Örnek bir kayma gerilmesi-kazık oturması eğrisi (Coyle ve Reese,1966).	38
Şekil 3.9 : Yük-transfer analizi (Coyle ve Reese, 1966).	39
Şekil 3.10 : Şaft ve uç dayanım grafikleri (Chin, 1970).	41
Şekil 3.11 : Kazık ve zemin gösterimi (Vallabhan & Mustafa, 1996).	44
Şekil 3.12 : Kazık uç direnc ile uç oturması arasındaki ilişki (Xia ve Zou, 2017). ...	57

Şekil 4.1 : ITKS-1 ve ITKS-2 boy kesiti ve zemin profili.	62
Şekil 4.2 : ITKS-3 ve ITKS-4 boy kesiti ve zemin profili.	63
Şekil 4.3 : Deney sistem kesiti.	64
Şekil 4.4 : ITKS-3 kazığına ait gerinim ölçer seviyeleri.	67
Şekil 4.5 : Yük-oturma grafiği (ITKS-1).	70
Şekil 4.6 : Yük-oturma grafiği (ITKS-2).	70
Şekil 4.7 : Yük-oturma grafiği (ITKS-3).	71
Şekil 4.8 : Yük-oturma grafiği (ITKS-4).	71
Şekil 4.9 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-1).	73
Şekil 4.10 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-2).	73
Şekil 4.11 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-3).	74
Şekil 4.12 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-1).	74
Şekil 4.13 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-2).	75
Şekil 4.14 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-3).	75
Şekil 4.15 : Bakü otel bölgesi kazıklarına ait boy kesiti ve zemin profili.	78
Şekil 4.16 : Bakü Projesi test kazıkları gerinim ölçer yerleşimi.	81
Şekil 4.17 : Bakü Projesi test kazıkları o-cell ve gerinim ölçer yerleşimi.	82
Şekil 4.18 : BOTK-1 yük-oturma grafiği.	84
Şekil 4.19 : BOTK-2 yük-oturma grafiği.	85
Şekil 4.20 : BOTK-3 yük-oturma grafiği.	85
Şekil 4.21 : Eksenel yük-derinlik ve birim sürtünme direnci-derinlik diyagramları.	87
Şekil 4.22 : BOTK-4 ve BOTK-5 yük-oturma grafiği.	89
Şekil 4.23 : BOTK-4 eksenel yük-derinlik grafiği.	91
Şekil 4.24 : BOTK-5 eksenel yük-derinlik grafiği.	91
Şekil 4.25 : BOTK-4 ve BOTK-5 birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.	92
Şekil 4.26 : Basra projesi yükleme deney sistemi görünümü.	95
Şekil 4.27 : Basra test kazıkları boy kesiti ve gerinim ölçer yerleşimi.	96
Şekil 4.28 : BETK-1 ve BETK-2 yük-oturma grafikleri.	97
Şekil 4.29 : BETK-3 ve BETK-4 yük-oturma grafikleri.	97
Şekil 4.30 : Basra projesi test kazıklarına ait yük-derinlik grafikleri.	102
Şekil 4.31 : Basra projesi test kazıklarına ait birim sürtünme direnci-derinlik grafikleri.	102
Şekil 4.32 : Test kazığı enstrümantasyonu.	106
Şekil 4.33 : BTK yük-oturma grafiği.	107
Şekil 4.34 : BTK eksenel yük-derinlik grafiği.	108
Şekil 4.35 : BTK toplam birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.	109
Şekil 4.36 : Test kazığı enstrümantasyonu.	113
Şekil 4.37 : YTK yük-oturma grafiği.	114
Şekil 4.38 : YTK eksenel yük-derinlik grafiği.	115
Şekil 4.39 : YTK toplam birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.	116
Şekil 4.40 : Bağdat projesi yükleme deney sistemi.	118
Şekil 4.41 : Test kazığı enstrümantasyonu ve zemin profili.	119
Şekil 4.42 : BATK yük-oturma grafiği.	120
Şekil 4.43 : BATK eksenel yük-derinlik grafiği.	121
Şekil 4.44 : BATK birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.	122
Şekil 4.45 : ATK yük-oturma grafiği.	125

Şekil 5.1 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafiği (İTKS-1).	131
Şekil 5.2 : Fleming (1992) yöntemi akış şeması.....	141
Şekil 5.3 : BETK-1 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.....	144
Şekil 5.4 : İTKS-4 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.	147
Şekil 5.5 : Boonyatee ve Lai (2017) yönteminin akış şeması.....	149
Şekil 5.6 : BETK-3 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.....	151
Şekil 5.7 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-1, İTKS-2 ve İTKS-3).....	153
Şekil 5.8 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-4, BOTK-1 ve BOTK-2).....	154
Şekil 5.9 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (Basra Test Kazıkları ve BATK).	155
Şekil 5.10 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (ATK, BTK ve YTK).	156
Şekil 6.1 : İTKS-4 kritik yük değeri hesabı.	161
Şekil 6.2 : Belirlenen c1, c2 ve d katsayı değerleri.....	164
Şekil 6.3 : Yeni yöntemin şematik anlatımı.....	165
Şekil 6.4 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-1,2,3).	168
Şekil 6.5 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-4 ve BOTK-1,2).	169
Şekil 6.6 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (BETK-1,2,3,4 ve BATK).	170
Şekil 6.7 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (ATK, BTK ve YTK). ...	171
Şekil 6.8 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.....	174
Şekil 6.9 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması (TK-13,14,18).	175
Şekil 6.10 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.....	176
Şekil 6.11 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması (TP3 ve TP4).	177
Şekil 6.12 : Baret kazıklar için ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.....	178
Şekil A.1 : Elastik teori yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafikleri.	192
Şekil A.2 : Elastik teori yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafikleri.	193
Şekil B.1 : Fleming (1992) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.	194
Şekil B.2 : Fleming (1992) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.	195
Şekil B.3 : Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.....	196
Şekil B.4 : Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.....	197
Şekil B.5 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri. ...	198
Şekil B.6 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri. ...	199
Şekil B.7 : Boonyatee ve Lai. (2017) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.	200
Şekil B.8 : Boonyatee ve Lai. (2017) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.	201
Şekil C.1 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (İTKS-1 ve İTKS-2).	202
Şekil C.2 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (İTKS-3 ve İTKS-4).	203
Şekil C.3 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BOTK-1 ve BOTK-2)..	204
Şekil C.4 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BETK-1 ve BETK-2)..	205
Şekil C.5 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BETK-3 ve BETK-4)..	206
Şekil C.6 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (ATK ve BATK).	207
Şekil C.7 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BTK ve YTK).	208

Şekil C.8 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (İTKS-1,2,3,4).	209
Şekil C.9 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BETK-1,2,3,4).	210
Şekil C.10 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BOTK-1,2, BATK, ATK).	211
Şekil C.11 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BTK ve YTK).	212



EKSENEL YÜKLÜ TEKİL FORE KAZIKLARIN OTURMASI ÜZERİNE BİR İNCELEME

ÖZET

Geleneksel temel mühendisliği uygulamalarında sürekli temel ve radye temellerde oturmaları minimize etmek amacıyla kazıklar imal edilmektedir. Ancak kazıklarda oturma analizleri yeterince yaygınlaşmış değildir. Temel mühendisliğinde genel olarak kazık taşıma güçleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan kazık taşıma gücü, kazıklara gelen yükten fazla ise kazık tasarımının doğru olduğu kabul edilir. Bir başka deyişle kazık taşıma kapasitesinin yeterli olması durumunda diğer etkenler göz önüne alınmaz. Sadece kazık kapasitelerini hesaba katarak yapılan tasarımlar güvenli ve ekonomik değildir. Bütün kazık tasarımlarında, kazık taşıma gücü hesaplarına ek olarak oturma analizleri de yapılmalıdır.

Tez çalışması kapsamında eksenel yüklü tekil sürtünme kazıkları için yeni bir oturma analiz yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem bağıntılarının oluşturulması için 14 farklı kazık yükleme deneyi incelenmiştir. İncelenen test kazıkları farklı bölgelerde imal edilen sürtünme kazıklarından oluşmaktadır. Söz konusu test kazıkları; İskenderun, Bakü, İzmir, Basra, Bağdat, İstanbul'da yer almaktadır. İncelenen test kazıklarından 12 tanesi çapları 60 cm ile 200 cm arasında değişen dairesel fore kazık iken 2 tanesi dikdörtgen kesitli baret kazık tipindedir. İstanbul-Yenikapı ve İzmir bölgesinde incelenen 2 adet baret kazıktan birinin boyutları 280x100 cm iken diğer baret kazığın boyutu 280x120 cm'dir. İncelenen fore kazık yükleme deneylerinde test kazıkları, göçme durumuna kadar yüklenmiştir. Böylece yeni yöntem parametreleri fore kazığın hem elastik bölgedeki lineere yakın olan davranışını hem de göçme bölgesindeki hiperbolik davranışını modelleyebilmektedir. İncelenen kazıklar betonarme yerinde dökme (fore) kazık tipinde ve her biri sürtünme kazığıdır. Bu yüzden yeni yöntemin ülkemizde en yaygın kullanılan kazık tipi olan betonarme fore kazıklar için geçerli olduğu söylenebilir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından tekil kazıkların oturma analizi için geliştirilen birçok farklı yöntem vardır. Bu yöntemler literatürde genel olarak 3 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi yük-transfer yöntemleri, ikincisi elastik teoriye dayalı yöntemler ve üçüncüsü ise yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemini de içeren nümerik yöntemlerdir. Bu tez çalışması kapsamında elastik yöntemler ile yük-transfer yöntemleri üzerinde durulmuştur. Elastik yöntemlerden yaygın olarak bilinen 4 farklı yöntem incelenirken yük-transfer yöntemlerinden toplam 7 farklı yöntem incelenmiştir. Yük transfer yöntemleri genel olarak güncel yöntemlerden seçilmiştir. Güncel olan 4 farklı yük-transfer yöntemi ile de tez kapsamında incelenen 14 test kazığı üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. Bu yöntemlere ilave olarak yaygın olarak bilinen 2 adet elastik teori yöntemi ile de kazık oturma analizleri yapılmıştır. Tez çalışmasının 5. bölümünde elastik teori ve yük-transfer yöntemleri ile yapılan oturma analizleri yer almaktadır. Yük-oturma analizleri sonucunda her bir yöntem ile tahmin

edilen oturma değerleri hem birbirleri ile hem de deneylerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tezin 6. bölümünde ise tez kapsamında geliştirilen yeni yöntem için 2 adet hiperbolik fonksiyonu sunulmuş ve hiperbolik fonksiyonlarda yer alan parametrelerin bağıntılarının nasıl elde edildiği açıklanmıştır. Yöntemdeki hiperbolik fonksiyonlar kazık yük-oturma grafiğini ikiye ayırarak belirlenmiştir. Bu fonksiyonlardan ilki yük-oturma grafiğinin başlangıç kısmını tanımlarken ikincisi yük-oturma grafiğinin bitiş kısmını tanımlamaktadır. Böylece yeni yöntem ile kazığın düşey yöndeki linner olmayan davranışını gerçeğe yakın bir şekilde modellenebilmektedir. Tanımlanan iki adet hiperbolik fonksiyonda yer alan 4 adet parametrenin bağıntıları tez kapsamında incelenen 14 farklı kazık yükleme deney sonuçları ile ilişkilendirilerek elde edilmiş ve bağıntı katsayıları her bir deney üzerinde hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar genel olarak birbirine yakın elde edilmiştir. Yöntem katsayıları elde edilen bu katsayıların ağırlıklı ortalaması alınarak belirlenmiştir. Elde edilen bu katsayılar bağıntılarda yerine koyularak yöntemin akış şeması oluşturulmuştur. Yöntemde kritik olan durum ise yöntemde belirlenen iki hiperbolik fonksiyonun nerede birbirinden ayrılacağı sorunudur. Yeni yöntem için yapılan çalışmalarda bu ayrımın kazık toplam taşıma gücünün %70'ine karşılık gelen yük değerinde yapılacağı belirlenmiştir. Kazık toplam taşıma gücünün %70'ine kadar olan bölgede yük-oturma grafiğinin ilk kısmını modelleyen hiperbolik fonksiyon kullanılırken Kazık toplam taşıma gücünün %70'ine karşılık gelen yükten büyük olan yük değerlerinde ise yük-oturma grafiğinin bitiş kısmını modelleyen diğer hiperbolik fonksiyon kullanılmıştır. Ancak yeni yöntem hesaplarında belirlenen bağıntılarla bazı kazıklarda yapılan oturma analizlerinde kritik yüke karşılık gelen yük-oturma grafiğini ilk kısmındaki oturma (s_1) değeri grafiğin ikinci kısmındaki oturma değerinden büyük (s_2) elde edilmiştir. Bu durumlarda kritik yük (P_{kr}) değeri s_2 değerinin s_1 değerini geçeceği yüke kadar çıkarılmıştır. 6. Bölümün sonunda ise yeni yöntemin akış şemasına uygun şekilde incelenen 14 test kazığı üzerinde oturma analizleri yapılmış ve bu analizler hem deneyde ölçülen değerler ile hem de yük-trasfer yöntemleri ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Tezin 7. Bölümünde yer alan sonuç ve öneriler kısmında ise yapılan karşılaştırmalar ile ilgili değerlendirmeler yer almaktadır. Tez kapsamında geliştirilen yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen oturma değerlerinin genel olarak deney sonuçlarına yakın elde edildiği söylenebilir. Yeni yöntemin sağlamasının yapılması için literatürden alınan 9 yükleme deney datası üzerinde de yeni yöntem ile oturma analizi yapılmıştır. Bu deneylerden 7 tanesi dairesel fore kazıklar üzerinde uygulanırken 2 tanesi baret kazıklar üzerinde üstten yüklemeli olarak uygulanmıştır. Yeni yöntem ile tahmin edilen oturma değerlerinin deney sonuçlarına oldukça yakın çıktığı görülmüştür.

İncelenen bütün kazıklardan elde edilen sonuçlar birbirleri ile boy/çap oranlarına göre de değerlendirilmiştir. Kritik yüklere karşılık gelen hesaplanan ve ölçülen oturma değerlerinin arasındaki yüzdesel farklar kazık boy/çap oranının 30 ile 60 değerleri arasında olduğu durumlarda daha az çıkmıştır. Kazık boy/çap oranının 30 ile 60 arasında olması durumunda yeni hiperbolik yöntemden elde edilen sonuçların daha uygun olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak tekil sürtünme kazıklarının oturma analizi için geliştirilen yeni hiperbolik yöntemin normal (60-100cm) ve büyük çaplı (120-200cm) betonarme fore kazıklar üzerinde uygulanabilir olduğu söylenebilir.

Yeni geliştirilen yöntemin incelenen diğer yük-transfer yöntemlerinden farkı uygulama alanının daha az kapsamlı olması ancak diğer yandan diğer yöntemlere göre uygulamasının daha pratik olmasıdır. Zemin birimleri oldukça heterojen bir yapıya sahipken diğer yöntemler bu birimler için deformasyon parametreleri belirleyerek hesaplar yapmaktadır ancak zemin kayma modülü ve elastisite modülünü doğru bir şekilde belirlemek oldukça güçtür. Bu yöntemin avantajı bu değerlere bağlı kalmadan sürtünme kazıkları için sabit deformasyon parametrelerini kazık boyutuna ve kazık toplam taşıma gücü değerine bağlayarak oturma analizi yapılmasına olanak sağlamasıdır. Dezavantajı ise bütün kazık ve zemin tipleri için geçerliliği olmamasıdır. Diğer yük-transfer yöntemlerine alternatif olarak betonarme fore kazık oturma analizini kontrol etmek amacı ile pratik ve uygulanabilir bir yöntemdir.





AN INVESTIGATION ABOUT SETTLEMENT ANALYSIS OF AXIALLY LOADED SINGLE PILES

SUMMARY

Very often, only bearing capacity calculations are done for the design of piled foundations. However, pile settlement calculations are of prime importance and are considered as a part of pile design. In practice, there are pile applications damaged due to large settlement, where the piles have sufficient capacity.

This study describes a new hyperbolic method based on load transfer method for settlement analysis of axially loaded single friction piles. The new method is obtained by examining 14 pile load tests. The examined test piles were loaded until the piles were failed, and they were chosen from friction bored piles having variable diameters from 0.6 to 2.0 m and located in different geographical regions which are Istanbul, Iskenderun, Baghdad, Basra, Baku and Izmir. Twelve of these test piles were circular bored piles, and two of them were barrette piles. Twelve of these test piles were instrumented. Osterberg cell test was applied to the 4 of these piles, and the top loading method was applied to the others. Pile loading tests are generally selected from the failure tests to develop the method proposed in the study and to assess the accuracy of the method. Load transfer mechanism and shaft resistance along the pile are obtained by strain gauges placed into the test piles which is an important procedure for evaluating load transfer mechanism and settlement analysis. From the mechanical point of view, the axial strain along the pile axis at various sections is measured by the strain gauges and axial load of the pile at the corresponding sections, and its variation along the pile axis can be evaluated by using the axial rigidity of the pile and the axial strain measured.

There are several methods for settlement analysis of single piles developed by many researchers. In literature, these methods are examined in three main categories which are the load transfer method, the elastic theory method, and the numerical analysis method including finite element. In the scope of this thesis, load transfer method and elastic theory method are examined. While 4 widely used methods are examined from elastic theory method, 7 different method are examined from load transfer method in this study. Investigated load transfer methods are generally chosen from recent methods. Settlement analysis of 14 test piles are carried out by using 4 load transfer methods which are Fleming (1992), Bohn et. al. (2016), Zhang et. al. (2016) and Boonyatee and Lai (2017) methods. Bohn et al. (2016), Zhang et al. (2016), Boonyatee and Lai (2017), and Fleming (1992) have developed models based on the load transfer method for predicting variations of axial load and friction force along the pile axis. In all of these models, settlement of the tip and the shaft of the pile are calculated by using the parameters depending on the ultimate tip and the ultimate shaft resistance of the pile. Additionally, settlement analysis of 14 test piles are carried out by using

elastic theory methods which are the methods developed by Poulos and Davis (1968) and Randolph and Wroth (1978).

In the method of Alku and Ozkan (2006), a relationship between pile load and settlement is proposed by simplifying the load–settlement curves and by considering the relationship in two separate sections to capture the nonlinear behavior of the process. A new hyperbolic method presented for the analysis of single pile behavior under axial loads is based on hyperbolic variation described by Alku and Ozkan (2006). While the method developed by Alku and Ozkan (2006) is related to the evaluation of the pile load test results, the new hyperbolic method is developed for settlement analysis of single piles. In fact, the new method can be regarded as an extension of the method by Alku and Ozkan (2006) which gives the ultimate load. However, the new method yields an entire load–settlement behavior of the pile including the ultimate load. In the new proposed method, two different relationships between load and settlement are assumed similar to that of the method by Alku and Ozkan (2006).

In the 5th part of the thesis, 2 hyperbolic functions which is obtained by Alku and Ozkan (2006) are presented for the new method developed within the scope of the thesis and how the relations of the parameters in the hyperbolic functions are obtained. The relations of the 4 parameters (a_1 , a_2 , b_1 , b_2) in the two defined hyperbolic functions were obtained by correlating them with the results of 14 pile loading tests examined within the scope of the thesis. In the relations of these parameters obtained 3 coefficients are calculated for each test piles. The calculated coefficients are generally obtained close to each other. Coefficients of these relations were determined by taking the weighted average of these coefficients. The flow chart of the method is created by substituting these obtained coefficients in the relations. The critical situation in the method is where the two hyperbolic functions determined in the method will be separated from each other. It has been determined that this separation will be made at the load value corresponding to 70% of the ultimate bearing capacity of the pile. While the hyperbolic function modeling the first part of the load-settlement graph is used for up to 70% of the total load-bearing capacity of the pile, the other hyperbolic function that models the end part of the load-settlement graph is used for the load values that are greater than 70% of the ultimate bearing capacity of the pile. However, the settlement in the first part (s_1) of the load-settlement graph corresponding to the critical load was obtained greater than the settlement in the second part (s_2) of the graph in the settlement analysis performed on some piles with the relations determined in the new method. In this case, critical load of the pile (P_{kr}) is increased until the s_2 value exceeds the s_1 value. At the end of the 6th Section, settlement analysis of 14 test piles are carried out by using new method and these analyzes were compared with both the values measured in the load tests and the values obtained by the examined methods which are based on load-transfer method.

The new hyperbolic method does not depend on deformation parameters of soil such as elasticity and shear modulus of soil (E_s and G_s) and Poisson's ratio of soil (ν_s), which can be accepted an advantage of this method, unlike the methods developed by Fleming (1992), Zhang et al. (2016), and Boonyatee and Lai (2017). It is well known that these parameters are very difficult to determine, especially if sufficient number of laboratory and field tests has not been conducted. The main variable of new method is the ultimate load of the pile and if it is evaluated properly the load–settlement relationship can be predicted with an acceptable accuracy being close to the measurements.

The results of the pile settlement analysis and those of the pile load tests demonstrate that the new hyperbolic method yields accurate results for the most bored friction piles. The load settlement plots obtained by the new method match appropriately with measured values. Comparison of the numerical results which are given in the tables and illustrated in the plots clearly indicates that settlements predicted by the new hyperbolic method are generally close to the measured values. Generally, the settlements in the failure region are difficult to predict to the settlements obtained in the pile load tests. However, it is shown that the prediction of the new hyperbolic method in the failure region of load–settlement plots is very close as given for some test piles, such as Iskenderun and Baku test piles. There is also good agreement between measured and calculated settlement values of test pile which is examined to validate the new hyperbolic method. In the last part of the study, to validate the proposed method, a total of 9 load test data chosen from the literature were simulated. While 7 of the 9 load test data belong to circular bored piles, 2 of them belong to barrette piles. Test piles are bored circular concrete piles having variable diameters from 0.65 to 1.65 m and located in different geographical regions. The dimensions of the simulated barrette piles are 0.8x2.5 m and 1.5x3.0 m. Ultimate load of each simulated test piles was evaluated by using the method developed by Alku and Ozkan (2006). Then load-settlement plots of the simulated test piles were obtained by using the hyperbolic variations of the new method. According to comparisons between the measured values it can be said that the agreement between the prediction and measurement is generally very good.

The calculated settlement values obtained from all examined piles were evaluated according to their length/diameter ratio. Percentage differences between calculated and measured settlement values corresponding to critical loads were found less when the pile length / diameter ratio was between 30 and 60 values. If the pile length / diameter ratio is between 30 and 60, it can be said that the results obtained from the new hyperbolic method are more appropriate.

The difference of the proposed new hyperbolic method from other load-transfer methods is that its application area is less comprehensive, but on the other hand, its application is more practical than other methods. The proposed new hyperbolic method is more practical than the other examined methods, and the number of variables that the new method uses on is less than other examined methods.

The numerical results show that the new hyperbolic method is suitable for both large and common diameter bored friction piles. However, the new method is not able to produce predictions having acceptable accuracy, which indicates the behavior of these piles cannot be captured by using the assumption, on which the new method is based.



1. GİRİŞ

Geleneksel temel mühendisliği uygulamalarında sürekli temel ve radye temellerde oturmaları minimize etmek amacıyla kazıklar imal edilmektedir. Ancak kazıklarda oturma analizleri yeterince yaygınlaşmış değildir. Temel mühendisliğinde genel olarak kazık taşıma güçleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan kazık taşıma gücü, kazıklara gelen yükten fazla ise kazık tasarımının doğru olduğu kabul edilir. Bir başka deyişle kazık taşıma kapasitesinin yeterli olması durumunda diğer etkenler göz önüne alınmaz. Sadece kazık kapasitelerini hesaba katarak yapılan tasarımlar güvenli ve ekonomik değildir. Bütün kazık tasarımlarında, kazık taşıma gücü hesaplarına ek olarak oturma analizleri de yapılmalıdır. Kazık oturma analizleri bütün kazıklı temel hesaplarının bir parçası olmalıdır (Fellenius, 2004).

Çeşitli araştırmacılar tarafından tekil kazıkların oturma analizi için geliştirilen birçok farklı yöntem vardır. Bu yöntemler literatürde genel olarak 3 ana gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi ilk olarak Seed ve Reese (1957) tarafından oluşturulan yük-transfer yöntemi, ikincisi elastik teoriye dayalı yöntemler (Davis ve Poulos, 1968) ve üçüncüsü ise yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemini de içeren nümerik yöntemlerdir.

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

Araştırma kapsamında eksenel yüklenen fore kazıklarda oturmaları hesaplamak için 4 ayrı projede uygulanan toplam 14 ayrı fore kazık yükleme deney verileri kullanılarak üç kademeli bir çalışma sistemi yürütülecektir. Çalışma sistemine göre ilk olarak her bir projenin zemin etüd raporları kullanılarak çeşitli elastik teori ve yük-transfer yöntemleri ile fore kazık oturma hesapları yapılmıştır. İkinci aşamada, fore kazık yükleme deney verileri değerlendirilerek ilk aşamadaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Son aşamada ise elde edilen sonuçlarla yaygın kullanıma uygun bir metot geliştirilerek fore kazık oturma hesabı için yeni bir yöntem oluşturulmuştur. Geliştirilen yeni yöntem ile sürtünme kazıklarının oturma hesaplarının diğer yöntemlere göre daha pratik ve deney sonuçlarına yakın olacak şekilde yapılması hedeflenmiştir.

Tez kapsamında yaygın olarak kullanılan elastik teori yöntemleri ve yük-transfer teorisine dayalı yöntemler incelenmiştir. İncelenen yöntemler ile kazık oturma analizlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için kazık yükleme deney datalarının enstrümanlı statik yükleme deneylerinden alınmıştır. Kazığın yük-transfer mekanizmasını modelleyebilmek için önemli bir parametre olan kazık boyunca oluşan sürtünme direnci değerleri, enstrümanlı yükleme deneylerinde kazık içersine yerleştirilen gerinim ölçerler (strain gauge) sayesinde elde edilebilmektedir. Kazığın eksenel rijitliği ve gerinim ölçer ölçümleri ile kazık aksı boyunca kazığın birim yer değiştirmesindeki ve kazığa etkiyen eksenel yük değerlerindeki değişimler hesaplanabilmektedir. Böylece elde edilen bu parametreler sayesinde mevcut yük-transfer yöntemleri ile daha doğru analizler yapılabilmektedir.

Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan derin temel sistemi betonarme fore kazıklardır. Tez kapsamında incelenen bütün kazıklar da fore kazık yöntemi ile imal edilmiştir. İncelenen 14 kazıktan 12 adedi dairesel kesitli fore kazık iken 2 adedi dikdörtgen kesitli baret kazıktır. Sabit deformasyon katsayıları kullanılarak geliştirilen yeni yöntemin, fore kazık davranışları incelenerek oluşturulduğu için yeni geliştirilen yöntemin kapsamının betonarme fore kazıklar için geçerli olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, farklı malzeme ve tipteki kazıkların oturma davranışları betonarme fore kazıklardan farklı olacaktır. Çanakçı ve Hamed (2017) çalışmasında kazık malzeme cinslerine göre kazıkların oturma davranışını incelemiştir. Bu çalışma sonucuna göre pürüzlü beton kazıkların toplam taşıma gücü değeri; ahşap, çelik ve pürüzsüz beton kazıklardan sırası ile 2.3, 2 ve 1.3 kat daha fazla elde edilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Tez kapsamında 4 adet elastik teoriye dayanan yöntem ile 7 adet yük-transfer yöntemi incelenmiştir. İncelenen elastik teori yöntemleri; Poulos ve Davis (1968), Randolph ve Wroth (1978), Bowles ve Tomlinson tarafından geliştirilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerden iki adedi (Poulos ve Davis (1968) ile Randolph ve Wroth (1978) tarafından geliştirilen yöntemler) kullanılarak incelenen 14 adet fore kazık üzerinde oturma analizi yapılmıştır. Tez kapsamında incelenen yük-transfer yöntemleri ise; Coyle ve Reese (1966), Fleming (1992), Vallabhan ve Mustafa (1999), Bohn ve diğ. (2016), Boonyatee ve Lai (2017), Zhang ve diğ. (2016) ve Xia ve Zou (2017) tarafından geliştirilen yöntemlerdir. Bu yöntemlerden güncel olan 3 yöntem (Bohn ve

diğ. (2016), Zhang ve diğ. (2016), Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yöntemler) ile yaygın kullanımı olan Fleming (1992) yöntemi kullanılarak eksenel yüklü tekil kazıkların oturma analizi yapılmıştır.

Vallabhan ve Mustafa (1999) çalışmasında tekil kazık oturma analizi için iterasyon prosedürünü kullanarak kapalı form çözümü tekniği geliştirmiştir. Vallabhan ve Mustafa (1999) kazığın geçtiği zemini iki tabakalı olarak tanımlamıştır.

Boonyatee ve Lai (2017), Zhang ve diğ. (2016) ve Xia ve Zou (2017) çalışmalarında tabakalı zeminlerde oturma analizi yaparken geliştirilen bu yöntemlerin prosedürleri birbirine benzemektedir. Her üç yöntemde de oturma analizi hesapları, kazık uç noktasından kazık başına doğru yapılmaktadır. Her üç yöntem de birbirinden farklı bağıntılarla kazık uç yükü-uç deplasmanı ve kazık sürtünme direnci-kazık şaft oturması arasında bir ilişki kurmuştur. Boonyatee ve Lai (2017) çalışmasında, Wang ve diğ. (2012) tarafından önerilen yük-oturma ilişkisi için belirlenen algoritmayı geliştirerek kendi yöntemini oluşturmuştur. Boonyatee ve Lai (2017), Wang ve diğ. (2012) tarafından da kullanılan toplam 25 adet enstrümanlı yükleme deney datasını incelemiştir. Zhang ve diğ. (2016) ise O'Neill ve diğ. (1982) tarafından kullanılan hesap parametreleri ile kendi yönteminin sağlamasını yapmıştır. Xia ve Zou (2017) da benzer bir yöntem geliştirmiş ve geliştirdiği yöntemin sağlamasını Dong ve diğ. (1994) ve Zhang ve Zhang (2012) tarafından kullanılan deneysel datalar ile yapmıştır.

Bohn ve diğ. (2016) çalışmasında yeni ve pratik bir yük-transfer hiperbolik eğrisi geliştirmiştir. Bu yöntem ile tez kapsamında geliştirilen yöntem arasında pratiklik açısından benzerlik vardır ve her iki yöntem de zemin deformasyon parametrelerini sabit olarak almıştır.

Fleming (1992) çalışmasında, kazık sürtünme direnci ile şaft oturması arasındaki bağıntıyı oluştururken Chin (1970) tarafından geliştirilen kazık yükleme deneyi değerlendirme yönteminden yararlanmıştır.

Tez kapsamında eksenel yüklü tekil fore kazıkların oturma analizi için geliştirilen yeni hiperbolik yöntemde Alku ve Özkan (2006) ve Aktepe ve Özkan (2016) tarafından geliştirilen kazık yükleme deneyi değerlendirme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Alku ve Özkan (2006) tarafından ideal yük-oturma eğrisi için önerilen hiperbolik fonksiyonlardaki değişkenler ile kazık ve zemin parametreleri arasında bağıntılar oluşturularak yeni pratik oturma analiz yöntemi geliştirilmiştir.



2. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

Kazık yükleme deney yöntemleri; ilgili standartlar ve literatürde yer alan kazık yükleme deney çalışmaları ile beraber araştırılmıştır. Bu bölümde kazık yükleme deney sonuçlarının değerlendirilmesi konusunda yapılan bazı çalışmalardan bahsedilmiştir. Yük-oturma analizleri geliştirilirken yükleme deney sonuçlarının değerlendirme yöntemlerinden faydalanılmıştır. Chin (1970) ve Alku ve Özkan (2006) tarafından geliştirilen kazık yükleme deneyi değerlendirme yöntemleri tekil kazıkların yük-oturma analizlerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır.

Kazık yükleme deneylerinin yapılışının temel amaçları Fuller ve Hoy (1970) tarafından aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

- Belirlenen kazık tasarım taşıma gücü değerinin doğruluğunu kanıtlamak için yapılır.
- Kazıklı temel tasarımı için gerekli kriterleri belirlemek amacıyla yapılır.

Yukarıda belirtilen birinci amaç için test kazıklarının kazık tasarım taşıma gücü değerinin 1.5-2 katına yüklenmesi yeterli olurken ikinci amacın sağlanması için kazıkların göçme durumuna kadar yüklenmesi gereklidir. Söz konusu tez kapsamında incelenen yükleme deneylerinin hepsi ikinci amaç doğrultusunda yapılmış kazık yükleme deneyleridir.

FHWA NHI-06-089 (2006) numaralı raporda ise statik kazık yükleme deneyi yapılmasının nedenleri 5 madde halinde sıralanmıştır.

- 1- Tasarım yükünü uygun bir güvenlik faktörü ile belirleyip derin temel sisteminin uygunluğunu teyit ederek yapıdaki riskleri minimuma indirmek.
- 2- Derin temel sistemi taşıma gücünün belirlenmesinin en uygun yoludur.
- 3- Derin temel sisteminin tasarımında ve/veya inşasında yeni bir bilgi geliştirmek.
- 4- Yeni statik ve dinamik analiz yöntemlerinin uygulamaya koyulması.

- 5- Yük ve direnç faktörü tasarımı (Load and Resistance Factor Design (LRFD)) gibi yeni tasarım prosedürlerinin kalibrasyonunun yapılması.

Tez alışması kapsamında incelenen test kazıkları üzerinde genel olarak iki farklı kazık yükleme deney yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemlerden ilki üstten yüklemeli statik kazık yükleme deneyleridir. Bu deneylerde kazıklar enstrümanlı ve enstrmansız olarak imal edilebilir. Enstrümanlı test kazıklarının donatılarına belli aralıklarla gerinim ölçerler monte edilir. Böylece kazık boyunca yük değişimini ve birim sürtünme direnci değerlerini elde edebiliyoruz. Tez kapsamında incelenen test kazıklarının çoğu enstrümanlı olarak imal edilmiştir. İncelenen kazık yükleme deney yöntemlerinden diğeri ise Osterberg yükleme deneyidir. Osterberg yükleme deneyi de statik kazık yükleme deney yöntemlerinden biridir ancak bu deneyde yükleme kazık başından yapılmamaktadır. Osterberg yükleme deneyinde yükleme yapacak olan hidrolik kriko koruma plakaları arasında kazığın içerisine yerleştirilir ve yükleme kazık içerisinde çift yönlü olacak şekilde yapılır.

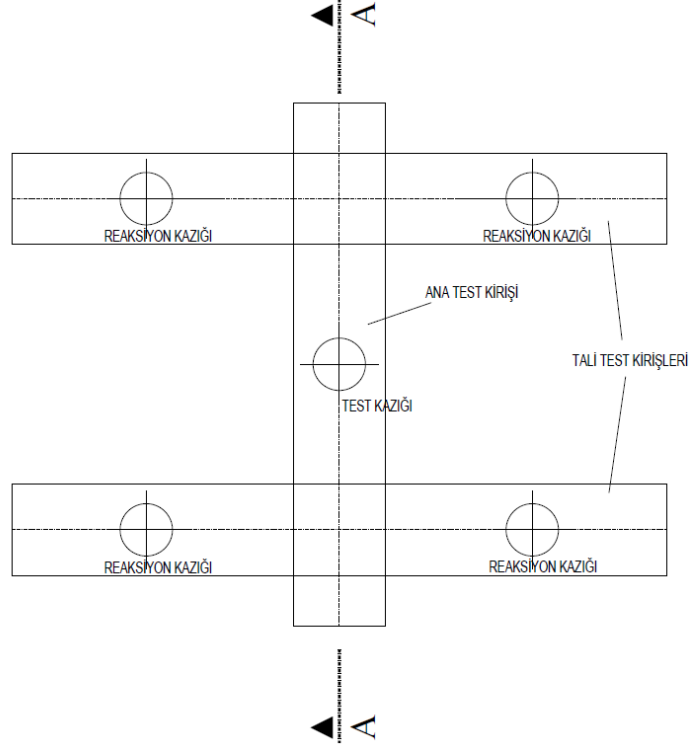
2.1 stten Yüklemeli Statik Kazık Yükleme Deneyleri

stten yüklemeli statik kazık yükleme deney sistemleri genel olarak 4 farklı şekilde uygulanmaktadır.

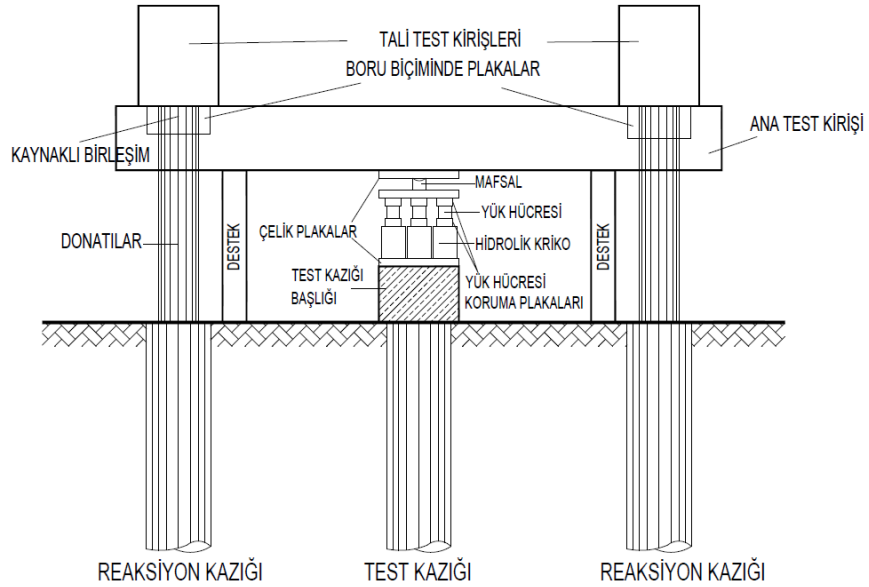
- 1- Kazık üstünde oluşturulan ağırlık platformları ile test kazıkları direkt olarak yüklenebilir.
- 2- Kazık üstüne yerleştirilen platformdaki ağırlıklardan reaksiyon alınarak test kazıkları hidrolik krikolar ile yüklenebilir.
- 3- Test kazığı çevresinde imal edilen kazıklardan reaksiyon alınarak hidrolik kriko ile test kazıkları yüklenebilir.
- 4- Test kazığı çevresinde imal edilen ankrajlardan reaksiyon alınarak hidrolik kriko ile test kazıkları yüklenebilir.

Tez kapsamında incelenen üstten yüklemeli kazık yükleme deneylerinde reaksiyon sistemi 3. maddede belirtildiği şekilde test kazığı çevresine imal edilen reaksiyon kazıkları ile oluşturulmuştur. İncelenen statik yükleme deneyleri göçme durumuna kadar yüklendiği için genelde kazık çevresine yerleştirilen 4 adet reaksiyon kazığı imal edilmiştir (şekil 2.1). Reaksiyon kazıkları içerisinden çıkan donatılar, elik tali kirişler

altına monte edilen boru şeklindeki plakalara kaynakla birleştirilir. Bu kaynaklı birleşimle hidrolik krik o ana test kirişine aktarılan yük tali kirişler vasıtasıyla reaksiyon kazıklarına iletilir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Yer değıştirme ölçümlerini almak için ise test kazığı başlık çevresine referans kirişleri yerleştirilir ve komparatörler yardımıyla yer değıştirme okumaları yapılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.1 : Yükleme deney sistemi yerleşim planı.



Şekil 2.2 : Yükleme deney sistem kesiti (A-A kesiti).



Şekil 2.3 : Yükleme deney sistemi görünümü.



Şekil 2.4 : Yükleme deneyi yer değiştirme ölçümleri.

ASTM D1143/D1143-M07 (Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load) standardına göre test kazıkları ile reaksiyon kazıkları arasındaki mesafenin reaksiyon kazık çaplarının 5 katından ve 3 metreden az olmaması gerekmektedir. Deplasman okumaları için kullanılan referans kiriş mesnetleri ile reaksiyon kazıkları arasındaki mesafe için de aynı şart geçerlidir.

İncelenen kazık yükleme deneylerinde ASTM D1143 ve JGJ 106 (Technical Code for Building Pile Foundations) standartları gözönüne alınarak deney prosedürleri oluşturulmuştur.

Yükleme deney prosedürleri 3 ana gruba ayrılır. Bunlar;

- Kademeli yavaş yükleme deneyi (*Maintained Load Test (ML)*)

- Sabit penetrasyon oranlı yükleme deneyi (*Constant Rate Penetration Test (CRP)*)
- Hızlı kademeli yükleme deneyi (*Quick Load Test (QML)*)

Tez kapsamında incelenen kazık yükleme deneylerinin çoğu ASTM-D1143 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve bu deneyler, standartta yer alan kademeli yavaş yükleme (ML) deney prosedürü dikkate alınarak uygulanmıştır.

Kademeli yavaş yükleme prosedürüne göre yüklemeye kazık tasarım taşıma gücünün %25'inden başlayarak kademeli olarak kazık tasarım taşıma gücünün %200'üne kadar devam edilir. İlk yüklemede yük arttırmaları kazık tasarım taşıma gücünün %25'i baz alınarak yapılır. Her yük kademesinde 5., 10. ve 20. dakikalarda deplasman okumaları alınır. Yük kademesinde 20 dakikadan uzun süre beklenmesi halinde her 20 dakika için deplasman okuması alınmaya devam edilir. ASTM-D1143 standardına göre yük arttırımı için deplasman artış hızının 0.25 mm/saat'ten daha az olması gerekir. Eğer deplasman artış hızı 0.25 mm/saat'ten fazla ise yükte beklemeye devam edilir ve her 20 dakikalık beklemelede yük artış hızı kontrol edilir. Maksimum yük haricindeki yüklerde 2 saate kadar beklenir. 2 saatlik beklemeden sonra deplasman artış hızı sağlanmasa dahi yüklemeye devam edilir. Maksimum yüke (kazık tasarım taşıma gücünün 2 katı) ulaşıldığında bu yükte en az 12 saat beklenir. 12 saat sonunda maksimum yükteki deplasman artış hızı 0.25 mm/saat değerini geçmesi halinde bu yükteki toplam bekleme süresi 24 saate çıkarılır. 12 saatlik beklemede 2 saate kadar 20 dakikada bir okuma alınırken 2 saatten sonra 1 saatte bir okuma alınır. Maksimum yükte 24 saat beklenmesi durumunda 12 saatten sonra 2 saatte bir okuma alınır. Maksimum yük seviyesine ulaştıktan sonra yük kademeli olarak boşaltılır. Yük boşaltma kademeleri maksimum uygulanan yükün %25'i oranında yapılır ve her yük boşaltma kademesinde toplam 20 dakika beklenir. 20 dakikalık beklemelede 5., 10. ve 20. dakikalarda deplasman okumaları alınır. Kazık yükleme deneyinde kazığın göçme durumuna kadar yüklenmesi amaçlanıyorsa yük boşaltıldıktan sonra test kazığı tekrar yüklenmeye başlanır. Bu sefer kazık tasarım yükünün 2 katına kadar yük arttırımı kazık tasarım yükünün %50'si baz alınarak yapılır ve her kademedede 20 dakika beklenir. Kazık tasarım yükünün 2 katından sonra test yükleri kazık tasarım yükünün %10'u oranında arttırılır. Her yük kademesinde deplasman artış hızı (0.25 mm/saat) şartına dikkat edilerek minimum 20 dakika beklenir. Öngörülen maksimum test yüküne kadar göçme gözlenmemesi durumunda maksimum test yükünde 2 saat beklenir ve

ardından yük boşaltılır. Göçme gözlenmesi durumunda kazık başı deplasman değerinin kazık çapının %15'ine eşit oluncaya kadar yüklemeye devam edilir. ASTM D1143 standardına göre kazık göçme yükü;

- Kazık başı deplasmanlarının ani olarak önemli miktarda artmasına neden olan yüküdür.
- Kazık başı deplasmanlarının, kazık çapının %15'ine ulaştığı durumdaki yük değeridir.

İncelenen kazık yükleme deneylerinden olan Basra projesindeki yükleme deneyleri JGJ 106 standardında (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles) belirtilen düzenlemelere uygun olarak yapılmıştır. Standartta belirtilen yavaş yükleme deney yöntemi uygulanmıştır. Standartta göre deney yükünün artış adımları tahmin edilen toplam deney yükünün 1/12'si olarak belirlenmiş ve 11 kademe yükleme aşamasına kadar deney neticelendirilir. Standartta göre her yük adımında minimum bekleme süresi 2 saat olmalı ve yük kademelerinde sırasıyla 5 dk., 10 dk., 15 dk., 15 dk., 15 dk., 30 dk. ve 30 dakikalık aralıklarla deplasman okumaları alınmalıdır. Deney prosedürüne göre bir sonraki yük adımına geçmeden önce gerekli kriter: 1 saat içinde oluşan oturma miktarı 0.1 mm'den az olmalıdır. Her yük kademesindeki bekleme süresi minimum 2 saat olmalıdır.

Uygulanan deney yönteminde testin sonlandırılmasının şartları aşağıda sıralanmıştır:

- Kazığın yüklendiği yükteki oturma değerinin bir önceki yükteki oturma değerinin 5 katına çıkması ve kazık başı oturmasının 40 mm'yi aşması,
- Kazığın yüklendiği yükteki oturma değerinin bir önceki yükteki oturma değerinin 2 katına çıkması ve yükteki relatif oturmaların 24 saat boyunca sabitlenmemesi,
- Planlanan maksimum yük değerine kadar çıkılması ve rölatif oturma standardının bu yükte de sağlanması,
- Reaksiyon kazıklarındaki deplasmanların izin verilebilir seviyenin (10 mm) üzerine çıkması.

Test kazıklarının enstrümanlı olarak imal edilmesi durumunda test kazığı içerisine yerleştirilen gerinim ölçerler (strain gage) yardımıyla test kazığı boyunca oluşan gerilme ve yük değerleri elde edilebilir. Bu yüzden derin temel sistemi tasarımına yardımcı olması için göçme durumu hedeflenen kazık yükleme deneylerinde test

kazıklarının enstrümanlı olarak imal edilmesi önerilmektedir. Enstrümanlı statik kazık yükleme deneyi ile derin temel sistemleri hem daha güvenli hem de daha ekonomik olarak tasarlanabilmektedir.

Genel olarak kullanılan iki tipte gerinim ölçer vardır. Bunlar elektrik dirençli gerinim ölçerler (electric resistance strain gages) ve titreşim telli gerinim ölçerlerdir (vibrating wire strain gages). Bu tez kapsamında incelenen enstrümanlı test kazıklarında titreşim telli gerinim ölçerler kullanılmıştır. Ayrıca tez kapsamında incelenen kazıkların hepsi fore kazık yöntemi ile oluşturulduğu için gömülü tip gerinim ölçerlerden yararlanılmıştır. Gömülü tip gerinim ölçerler kazık içerisinde farklı seviyelerde kazık donatılarına monte edilerek yerleştirilir. Kontrol okuması için bir kademede en az dört adet yerleştirilmesi önerilir. Ayrıca betonlama sırasında gerinim ölçerlere zarar verilmemesi için gerinim ölçerler üst kısmına koruma plakaları yerleştirilmelidir. Gerinim ölçerlerden çıkan kablolar ise yukarıda veri toplayıcısına bağlanacaktır. Ölçümlerde hata olmaması açısından kabloların PVC boru ile korunması önerilmiştir (FHWA-SA-91-042, 1992).

Gerinim ölçerlerden sadece birim şekil değiştirme değerleri elde edilir. Bu değerlerden yüke ulaşmak için kazık malzemesinin elastisite modülünü bilmemiz gerekiyor. Birim şekil değiştirme (ϵ) değerleri yardımıyla aşağıdaki temel formül yardımıyla kazık içerisindeki yük elde edilir (FHWA-SA-91-042, 1992).

$$P = \epsilon EA \quad (2.1)$$

Formülde;

ϵ : Gerinim ölçerlerden elde edilen birim şekil değiştirme

E : Kazık malzemesinin elastisite modülü

A : Kazık kesit alanı

Tez kapsamında incelenen kazıklar betonarme kazıklar olduğu için beton malzemesinin elastisite modülü hesaplarda dikkate alınabilir. Beton malzemesi elastisite modülü için ACI aşağıdaki formülü önermiştir.

$$E_c = k(f'_c)^{0.5} \quad (2.2)$$

f'_c : Betonun serbest basınç dayanımı (MPa)

ACI formülünde sabit k değeri yaygın olarak 4700 olarak kabul edilir. Bu bağıntı ile beton elastisite modülü için mantıklı değerler elde edilebilir ancak aşağıda listelenen sebeplerden ötürü elastisite modülü hesaplarında her durumda bu bağıntı geçerli olmayabilir (Hayes ve Simmonds, 2002).

- Birçok araştırmacı k katsayısının beton karışımına bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir. Bu araştırmacılardan Oluokun ve diğ. (1991) tarafından geliştirilen bağıntıya göre k katsayısı beton birim hacim ağırlığına (w_c) bağlı olarak değişmektedir.

$$k = 0.043(w_c)^{1.5} \quad (2.3)$$

w_c : Betonun birim hacim ağırlığı (kg/m^3)

- Beton numunesine yapılan serbest basınç dayanımı değerleri forajda yerleştirilen betonun serbest basınç dayanımını tam olarak yansıtmayabilir (Hayes ve Simmonds 2002). Denklem 2.2’de görüldüğü üzere betonun elastisite modülü değeri yaygın olarak beton serbest basınç dayanımının kareköküne bağlı olarak hesaplanmaktadır. Khan ve diğ. (1985) tarafından yapılan çalışmalarda şaft içerisinde yer alan kütle betonunun serbest basınç dayanımının silindir numunelerden elde edilen serbest basınç dayanımından yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.
- Beton malzemesinin elastisite modülü çelik malzemesinden farklı olarak sabit bir değer değildir ve betona etkiyen yüke ve betonun birim şekil değiştirmesine bağlı olarak değişmektedir (Fellenius, 2001).

Yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü gerinim ölçerden elde edilen veriler Fellenius (1989) tarafından geliştirilen yöntem ile değerlendirilmelidir. Bu yöntemde kazıkların tanjant modülü, gerinim ölçerlerden elde edilen verilerle hesaplanmış ve kazık malzemesinin (beton) elastisite modülünün birim şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak değiştiği dikkate alınmıştır.

Yöntemde kazığa yakın yerleştirilen en üst kademedeki gerinim ölçerlere etkiyen yük ile kazık başına etkiyen yükün aynı olduğu kabulü yapılmıştır. Deney başındaki ve sonundaki kazık malzemesinin elastisite modülü aynı kalmayacaktır. Bu sebeple kazıkta meydana gelen yük-oturma veya gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri düz bir çizgi halinde olmamaktadır (Fellenius, 2001).

Fellenius (1989) tarafından geliştirilen değerlendirme yönteminde gerinim ölçerlerden yükün elde edilmesi için aşağıda belirtilen adımlar izlenir. Söz konusu adımları açıklarken incelenen kazık yükleme deney verilerinden biri olan İTKS-1 numaralı test kazığı verilerinden yararlanılmıştır.

- Kazık kompozit malzemesinin (beton+çelik) tanjant modülü (M_t), gerinim değerleri arttıkça azalan bir eğilim gösterir (Şekil 2.5). Kazık tanjant modülü, matematiksel olarak;

$$M_t = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) = A\varepsilon + B \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir.

- Denklem 2.4'te belirtilen bağıntının integralinden gerilme bağıntısı elde edilir.

$$\sigma = \frac{A}{2} \varepsilon^2 + B\varepsilon \quad (2.5)$$

- Gerilme değeri aynı zamanda;

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (2.6)$$

bağıntısı ile ifade edildiğine göre bağıntıdaki kazık kompozit malzemesinin sekant modülü (E_s) değeri;

$$E_s = 0.5 A\varepsilon + B \quad (2.7)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir.

- Yukarıda belirtilen bağıntılardaki parametrelerin tanımları aşağıda sıralanmıştır.

M_t : Kazık kompozit malzemesinin tanjant modülü

E_s : Kazık kompozit malzemesinin sekant modülü

σ : Gerilme (yükün kazık kesit alanına bölünmesinden elde edilir.)

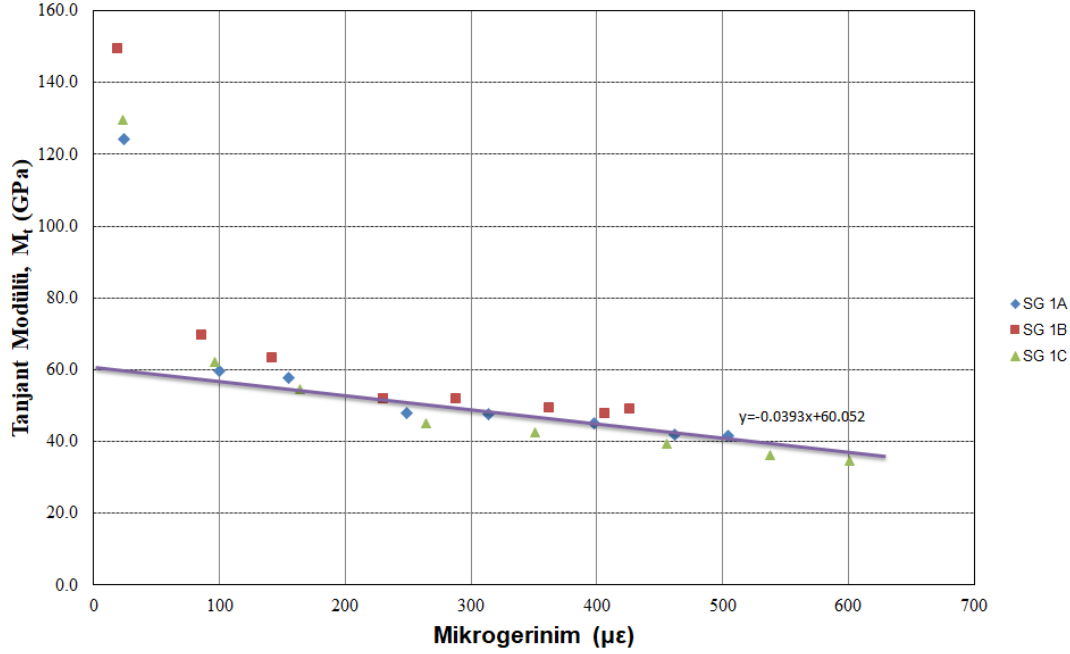
$d\sigma = (\sigma_{n+1} - \sigma_1)$: Yük arttırımı sonucunda oluşan gerilme değişimi

A : Tanjant modülü çizgisinin eğimi

ε : Ölçülen birim şekil değiştirme (gerinim)

$d\varepsilon = (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_1)$: Yük arttırımı sonucunda oluşan birim şekil değiştirme değişimi

B : Tanjant modülü çizgisinin y eksenini kestiği nokta (başlangıç tanjant modülü)



Şekil 2.5 : Tanjant modülü-mikro gerinim grafiği.

Şekil 2.5'te verilen tanjant modülünün mikro gerinim değerleri ile değişimini gösteren grafik incelenen test kazığı datalarından biri olan İTKS-1 numaralı test kazığına aittir. Bu grafiğe göre tanjant modülü ($M_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$) ile mikro gerinim (ε) arasındaki matematiksel bağıntı: $M_t = -0.0393\mu\epsilon + 60.052$ olarak elde edilmiştir. Buradan A ve B değerleri sırasıyla; $-0.0393 \frac{GPa}{\mu\epsilon}$ ve $60.052 GPa$ olarak elde edilir. Kazık kompozit malzemesinin sekant modülü ise; $E_s = -0.0196\mu\epsilon + 60.052$ olarak elde edilir. Bu durumda her bir gerinim ölçer kademesindeki yük değerleri, denklem 2.4'te verilen gerilme değeri ile kazık kesit alanının çarpılması sonucunda elde edilir.

$$P = -0.0098 (\mu\epsilon)^2 + 60.052\mu\epsilon \quad kN \quad (2.8)$$

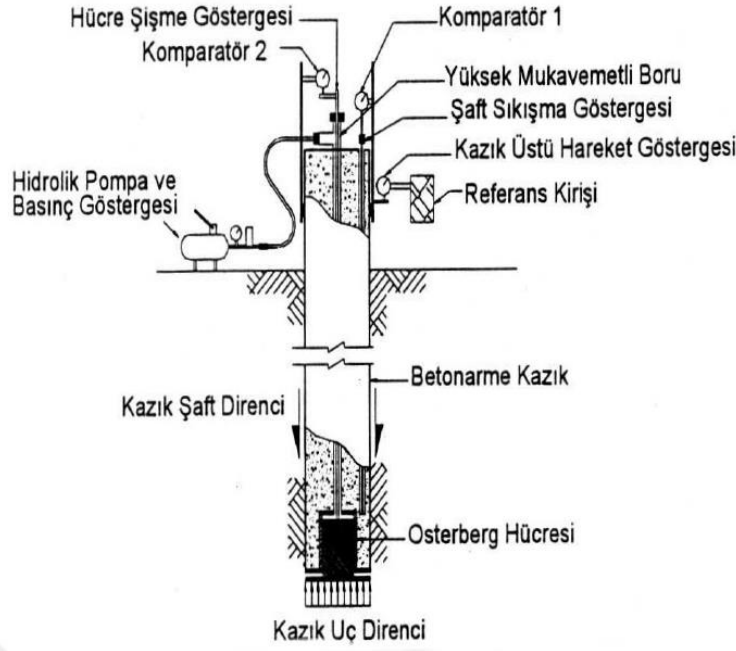
2.2 Osterberg Statik Kazık Yükleme Deneyi

Statik kazık yükleme deneyleri; klasik bir hidrolik krik, çelik kiriş ve reaksiyon sistemi kullanılmadan kazık içerisine yerleştirilen bir hidrolik krik-yük hücresi ile de

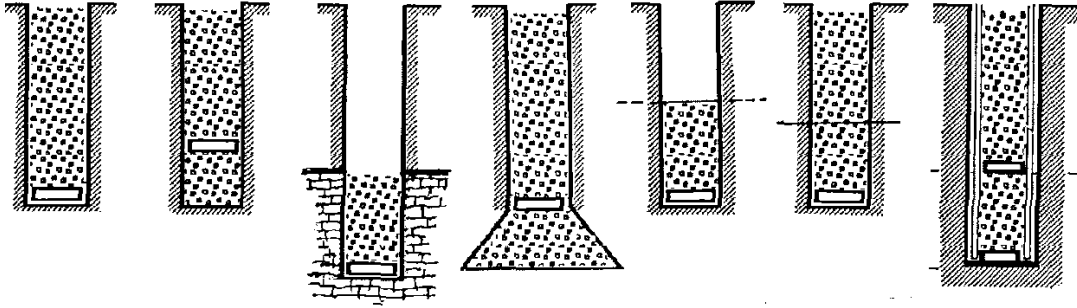
yapılabilir. Bu krikoya yöntemi geliştiren kişiden (Jorj Osterberg) esinlenerek Osterberg yük hücresi ismi verilmiştir.

Şekil 2.6'da Osterberg yükleme deney şeması gösterilmektedir. Şekil 2.6'da görüleceği üzere Osterberg yük hücresi kazık alt ucuna yerleştirilmiştir. Kazık uç direnci veya sürtünme direncinden birisi yenildiğinde deney sonlandırılmaktadır. Şekil 2.6'da verilen düzenek genelde kayaya soket fore kazıklar için yerleştirilir ve buradaki amaç kayaya soket kazığının toplam uç direncini elde etmektir. Ancak sürtünme kazıklarında kazık taşıma gücü hesaplarına göre Osterberg yük hücresi kazık içerisinde daha önce belirlenen bir seviyede yerleştirilebilir. Bu durumda Osterberg yük hücresinin altında veya üstünde kalan zemin birimlerinin sürtünme direnci yenilinceye kadar deneye devam edilir.

Şekil 2.7'de farklı seviyelere yerleştirilen Osterberg yük hücreleri gösterilmiştir. Şekil 2.7'de (a) şıkkındaki yerleşim biçimi Şekil 2.6'da detayı verilen uç kazıklarına uygulanan Osterberg yükleme deneyi tipidir. Bu deney tipinde eğer kazık uç direnci kazığının toplam sürtünme direncine göre çok daha büyükse sürtünme direnci yenilir ve deney toplam uç direncine ulaşmadan sonlandırılır. Bu durumda sadece kazığının toplam sürtünme direnci değeri elde edilir. Şekil 2.7 (b) şıkkında belirtilen yerleşim, yukarıda bahsi geçen sürtünme kazıkları için yapılan yerleşim tipidir. Bu yerleşimde yük hücresinin alt kısmı veya üst kısmının sürtünme direnci yenilir. Eğer kazık tasarımında gerçeğe yakın sürtünme ve uç direnci hesapları yapılarak yük hücresi buna göre yerleştirilirse iki kısımdan (üst veya alt bölge) birisinde göçme meydana geldiğinde diğer kısım da göçmeye yaklaşan bir durum oluşur. Şekil 2.7 (c) şıkkındaki yerleşimde kayaya soket kazığının sürtünme ve uç direnci değerleri zeminin jeolojik yükünden bağımsız olarak elde edilebilir. Şekil 2.7 (d) şıkkında kazık ucunda soğan başı sistemi uygulanan kazıklara uygun bir yerleşim gösterilmiştir. Şekil 2.7 (e) şıkkında belirtilen sistem, kazık üst kotu fore kazık imalat kotunun altında kaldığı durumlarda uygulanabilir. Şekil 2.7 (f) şıkkında belirtilen sistem, iki ayrı zemin tabakasının sürtünme direnci değerlerini belirlemek için kullanılır. Birinci aşamada kazık betonu alt seviyeye kadar dökülür ve deney gerçekleştirilir. İkinci aşamada ise kazık üst kotuna kadar beton dökümü tamamlandıktan sonra deney gerçekleştirilir. Şekil 2.7 (g) şıkkında belirtilen iki yük hücreli sistemde, hem kazık üst kısmının hem de kazık alt kısmının sürtünme direnci değerleri ile kazık toplam uç direnci ayrı ayrı elde edilebilir (Osterberg, 1998).



Şekil 2.6 : Osterberg yükleme deneyi düzeneği (Düzceer, 2002).



Şekil 2.7 : Fore kazık içerisinde farklı pozisyonlarda yerleştirilen Osterberg yük hücreleri (Osterberg, 1998).

Osterberg yükleme deneylerinde de donatılara enstrümanlı statik kazık yükleme deneylerinde olduğu gibi *strain gauge*'ler (gerinim ölçer) monte edilir. Ayrıca Osterberg yükleme deneylerinde deplasmanların ölçülmesi için gerekli seviyelerde telltale'ler ve LVWDT'ler (*Linear Vibrating Wire Transducer* – Lineer Titreşim Telli Yerdeğiştirme Dönüştürücü) yerleştirilir. LVWDT'ler, Osterberg yük hücresinin üst ve alt plakalarına yerleştirilerek yük hücresinin genişleme miktarı ölçülür. Osterberg yük hücresinin alt ve üst kısmına, kazık ucuna ve kazık başına yerleştirilen Telltale'ler yardımıyla da bu bölgelerdeki yer değiştirmeler ölçülür. Şekil 2.8'de Osterberg yük hücresinin üst ve alt plakalara kaynaklanması ve donatılar arasına yerleştirilmesi görülmektedir. Ayrıca donatılara monte edilen *strain gauge* (gerinim ölçer) gösterilmiştir.

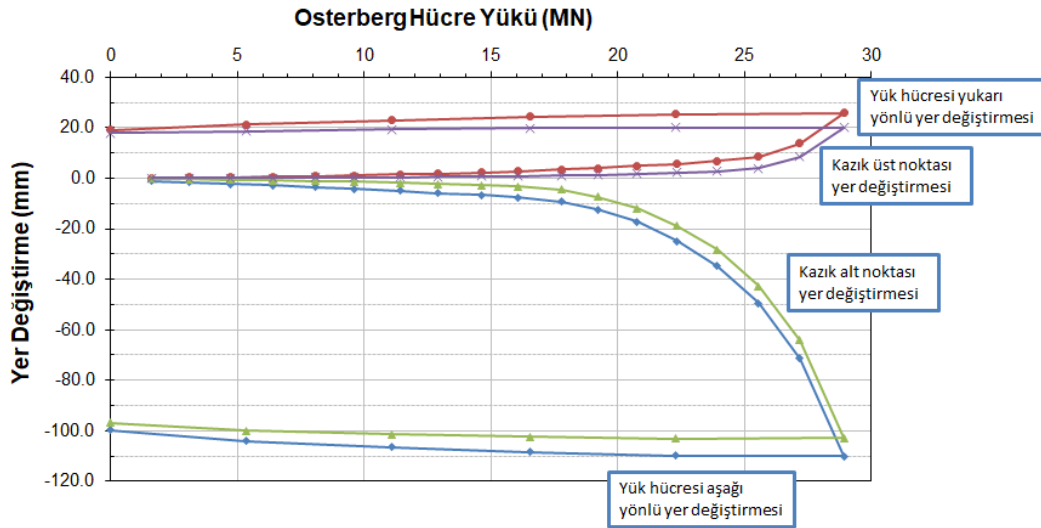


Şekil 2.8 : Osterberg yük hücresinin ve gerinim ölçerlerin kazık donatısına montajı.

Osterberg statik yükleme deneyleri, genel olarak ICE Specification for Piling and Embedded Retaining Walls (ICE, 2007) şartnamesine uygun olarak yapılmaktadır. Şartnamede belirtilen prosedür genel itibariyle kademeli yavaş yükleme (Maintained Load Test (ML)) deneyine benzer olacak şekilde açıklanmıştır.

Osterberg yükleme deneyinde, test kazığı göçme durumuna ulaşınca kadar veya maksimum yük hücresi kapasitesine kadar deneye devam edilir. Maksimum yüke eşit miktardaki yük artışları ile çıkılır ve her yük kademesinde minimum 30 dakika ve minimum oturma oranı şartı sağlanıncaya kadar beklenir. Minimum oturma oranı şartı ise 10 dakikada 0.05 mm'dir (Dinç ve Sağlamer, 2010).

Osterberg deney sonucunda Şekil 2.9'da gösterildiği şekilde aşağı ve yukarı yönlü yük-yer değiştirme grafiği elde edilir. Şekil 2.9'da verilen deney sonucu $\Phi 200$ cm çapında ve 76 m boyundaki sürtünme test kazığına aittir ve Osterberg yük hücresi Şekil 2.7 (b) şikkında belirtilen tipte yerleştirilmiştir. Söz konusu test kazığı, incelenen statik yükleme deneylerinden Bakü Projesine ait test kazığıdır. Deney sırasında yukarıda belirtildiği gibi hem Osterberg yük hücresinin yukarı ve aşağı yönlü hareketi hem de kazık ucu ve kazık üstünün yer değiştirmesi ölçülür. Şekil 2.9'da verilen örnek deneyde uygulanan masimum Osterberg hücre yükü 28.91 MN'dur. Bu yük çift yönlü olarak uygulandığı için test kazığına uygulanan toplam yük, bu değerin 2 katıdır. Bu durumda kazığa üstten uygulanan eşdeğer toplam yük 57.82 MN olarak kabul edilebilir. Bu yükün geleneksel üstten yüklemeli statik yükleme deney sisteminde uygulanması oldukça güç ve ekonomik değildir çünkü bu büyüklükteki yükü karşılayacak reaksiyon sistemi maliyeti oldukça yüksektir.

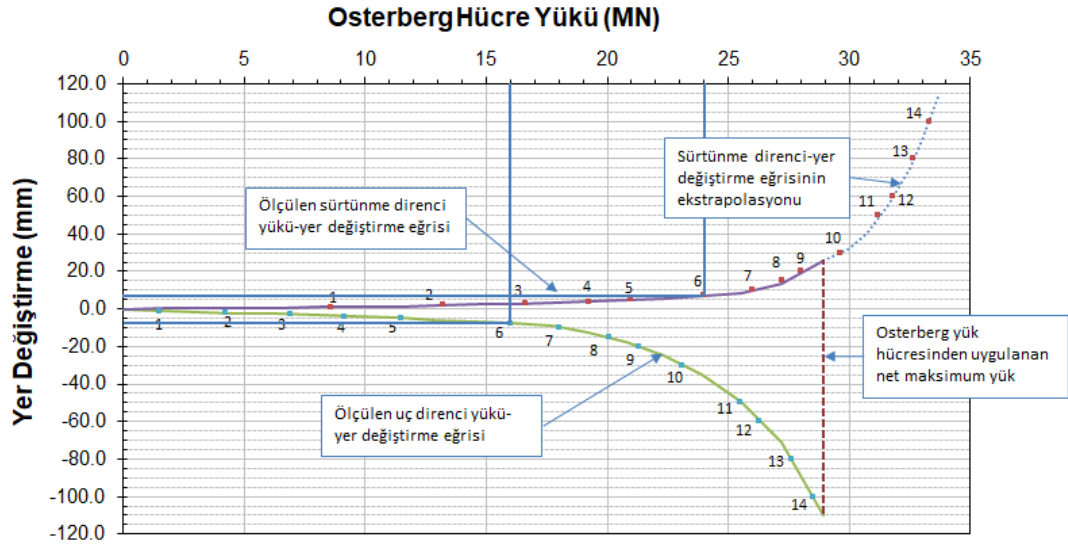


Şekil 2.9 : Osterberg statik yükleme deney sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.

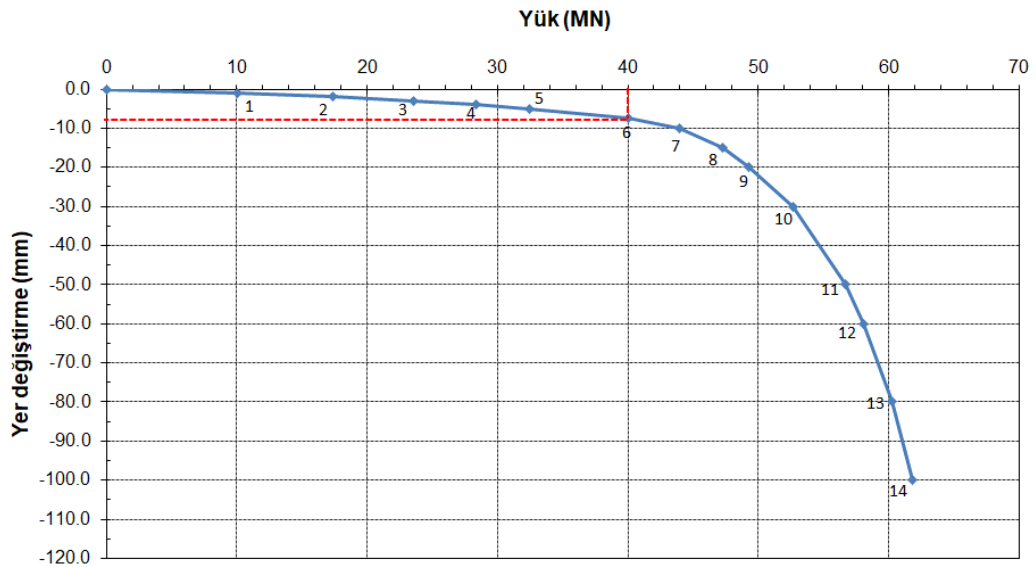
Yük-oturma analizleri için Şekil 2.9’da verilen iki eğrinin yorumlanarak üstten yüklemeli deney grafiklerine (eşdeğer yük-oturma grafiği) dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. LOADTEST firması, yapılan Osterberg statik yükleme deneylerinin rapor eklerinde eşdeğer yük-oturma eğrisinin oluşturulması için yöntem önermiştir (LOADTEST, 2001) ve tez kapsamında incelenen Osterberg yükleme deneylerinde eşdeğer yük-oturma eğrilerinin oluşturulması bu yöntemle yapılmıştır. Söz konusu yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada üstten yüklemeli deneye ait eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi elde edilirken ikinci aşamada bu eğriye test kazığının elastik sıkışma etkilerinin düzeltilmesi sonucu elde edilen değerler eklenir.

1. Aşama: Osterberg yükleme deneyi sonucunda herhangi bir deplasman değerine karşılık gelen Osterberg yük hücresinin üst kısmındaki toplam sürtünme direnci değeri (Osterberg yük hücresi yukarı yönlü deplasmanı-sürtünme direnci eğrisinden elde edilir.) ile Osterberg yük hücresinin alt kısmındaki toplam sürtünme direnci ile kazık uç direnci değeri (Osterberg yük hücresi aşağı yönlü deplasman değeri-Osterberg yük hücresinin alt kısmındaki sürtünme direnci+kazık uç direnci eğrisinden elde edilir.) toplanır. Toplamdan elde edilen yük değeri, üstten yüklemeli eşdeğer yük-deplasman grafiğinde baz alınan deplasmana neden olan yüküdür. Eşdeğer yük-deplasman grafiği, farklı deplasman değerleri için hesaplanarak elde edilir. Şekil 2.10’da verilen grafikte toplam 16 farklı deplasman değerine karşılık gelen yük değerleri elde edilmiştir. Mesela Şekil 2.10’da verilen 6 numaralı noktada 7.5 mm deplasman değerine karşılık

gelen toplam Osterberg yük hücresinin üst kısmında toplam sürtünme direnci değeri 24 MN iken Osterberg yük hücresinin altında kalan bölgede 7.5 mm deplasman değerine karşılık gelen toplam uç + sürtünme direnci değeri 16 MN'dur. Bu durumda üstten yükleme durumunda 7.5 mm deplasmana sebep olacak yük değeri 40 MN olarak elde edilir (Şekil 2.11). Ayrıca Osterberg yük hücresinin üst kısmında kalan bölgede yük arttırılarak farklı ekstrapolasyon yöntemleri ile oturma değerleri hesaplanabilir. 10-14 numaralı değerler arasında kalan kısımlardaki oturma değerleri, yük-yer değiştirme eğrisinin ekstrapolasyonu ile hesaplanmıştır.

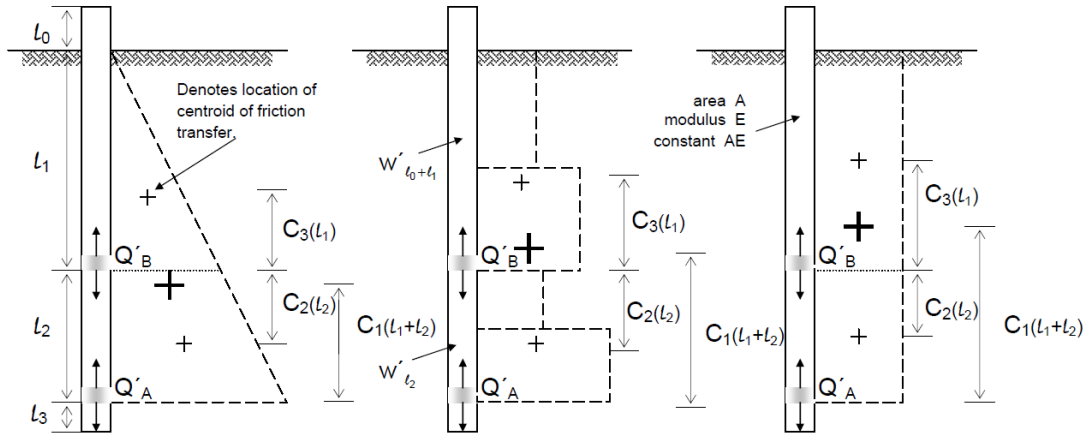


Şekil 2.10 : Örnek Osterberg deney sonuçları (Bakü Projesi).



Şekil 2.11 : Örnek Osterberg yükleme deneyi eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi.

2. Aşama: Bu aşamada, Osterberg yükleme deneyi ile oluşan elastik sıkışma ile üstten yüklemeli statik yükleme deneyi sonucunda oluşan elastik sıkışma arasındaki fark hesaplanarak 1. aşamada elde edilen değere eklenir. Böylece nihai eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi elde edilmiş olur. Üstten yükleme deneyinde test kazığında mobilize olan elastik sıkışma her zaman Osterberg yükleme deneyinde gerçekleşen elastik sıkışma değerini aşacaktır. Bu farkı hesaplamak için Loadtest (2001) tarafından önerilen yük-transfer modeli kullanılmaktadır. Söz konusu model Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’de verilen çizimlerde tek seviyeli ve çift seviyeli Osterberg deneyleri için özetlenmiştir. Tez kapsamında kullanılan hesaplamalarda tek seviyeli Osterberg yükleme deneyleri incelendiği için Q'_B değeri dikkate alınmamıştır. Ayrıca hesaplamalarda Osterberg yük hüresinin alt kısmında kalan elastik sıkışma farkı hesaplanmamıştır çünkü bu kısımda üstten yükleme ve Osterberg deneylerinde oluşacak elastik sıkışmalar birbirine eşittir. Bu yüzden hesaplarda $l_3 = 0$ olarak alınmıştır.



Şekil 2.12 : Osterberg yükleme deneyinde basitleştirilmiş elastik sıkışma hesabı (LOADTEST, 2001).

Şekil 2.12’de verilen basitleştirilmiş sürtünme direnci dağılımı modellerine göre Osterberg yükleme deneyinden elastik sıkışma değerleri Çizelge 2.1’de verilen formüllerle hesaplanır. Şekil 2.12 (a) şıkında verilen sürtünme direnci ağırlık merkezi faktörü (C_1) $\frac{1}{3}$ olarak hesaplanırken Şekil 2.12 (c) şıkında bu değer $\frac{1}{2}$ olarak hesaplanmıştır. Farklı zemin profillerinden geçen test kazığı için ağırlık merkezi faktörü (C_1) değeri (b) şıkında verilen şekilde hesaplanır.

$$\delta_{OLT} = \delta_{\uparrow(l_1+l_2)}$$

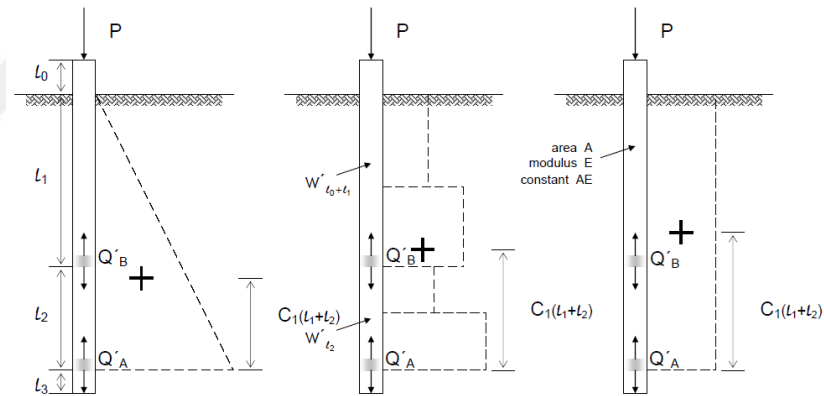
δ_{OLT} : Osterber deneyinde oluşan toplam elastik sıkışma

C_1 : Ağırlık merkezi faktörü.

Çizelge 2.1 : Tek seviyeli Osterberg yükleme deneyinde elastik sıkışma değeri hesabı (Loadtest, 2001).

$C_1 = \frac{1}{3}$	C_1	$C_1 = \frac{1}{2}$
$\delta_{\uparrow(l_1+l_2)} = \frac{1}{3} \frac{Q'_A(L_1+L_2)}{AE}$	$\delta_{\uparrow(l_1+l_2)} = C_1 \frac{Q'_A(L_1+L_2)}{AE}$	$\delta_{\uparrow(l_1+l_2)} = \frac{1}{2} \frac{Q'_A(L_1+L_2)}{AE}$

Şekil 2.13'te üstten yükleme durumunda kazığa etkiyen elastik sıkışma hesap modeli gösterilmiştir. Çizelge 2.2'de ise Şekil 2.13'te verilen modeli esas alarak üstten yükleme durumunda elastik sıkışma değerini bulmak için önerilen eşitlikler yer almaktadır.



Şekil 2.13 : Üstten yükleme durumunda basitleştirilmiş elastik sıkışma hesabı (Loadtest, 2001)

Çizelge 2.2 : Üstten yükleme durumunda elastik sıkışma değeri hesabı (Loadtest, 2001).

$\delta_{l_0} = \frac{Pl_0}{AE}$	$\delta_{l_0} = \frac{Pl_0}{AE}$	$\delta_{l_0} = \frac{Pl_0}{AE}$
$C_1 = \frac{1}{3}$	C_1	$C_1 = \frac{1}{2}$
$\delta_{\downarrow(l_1+l_2)}$ $= \frac{Q'_A + 2P}{3} \frac{(L_1 + L_2)}{AE}$	$\delta_{\downarrow(l_1+l_2)}$ $= [(C_1)Q'_A + (1 - C_1)P] \frac{(L_1 + L_2)}{AE}$	$\delta_{\downarrow(l_1+l_2)}$ $= \frac{Q'_A + P}{2} \frac{(L_1 + L_2)}{AE}$

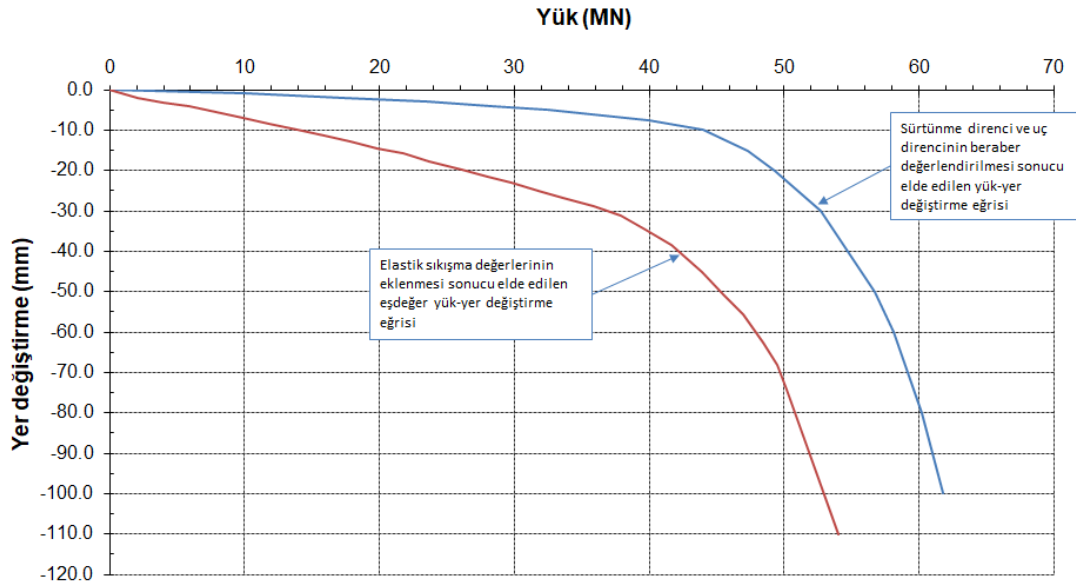
$$\delta_{TLT} = \delta_{l_0} + \delta_{\downarrow(l_1+l_2)}$$

δ_{TLT} : Üstten yükleme durumunda oluşan toplam elastik sıkışma

δ_{l_0} : L_0 boyunca oluşan aşağı yönlü elastik sıkışma

$\delta_{l_1+l_2}$: L_1 ve L_2 boyunca aşağı yönde oluşan elastik sıkışma.

Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de verilen eşitliklerle üstten yükleme durumu ve Osterberg hücresi ile yükleme durumunda oluşacak elastik sıkışma değerleri hesaplanır. Her iki durumda oluşan elastik sıkışma değeri arasındaki fark 1. aşamada elde edilen eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisinde elde edilen yer değiştirme değerlerine eklenir. Şekil 2.14’te Bakü Projesi test kazığına ait eşdeğer yük-yer değiştirme grafiği elastik sıkışma değerlerinin eklenmiş hali ile verilmiştir.



Şekil 2.14 : Elastik sıkışma değerlerinin eklenmesi sonucu elde edilen eşdeğer yük-yer değiştirme eğrisi.

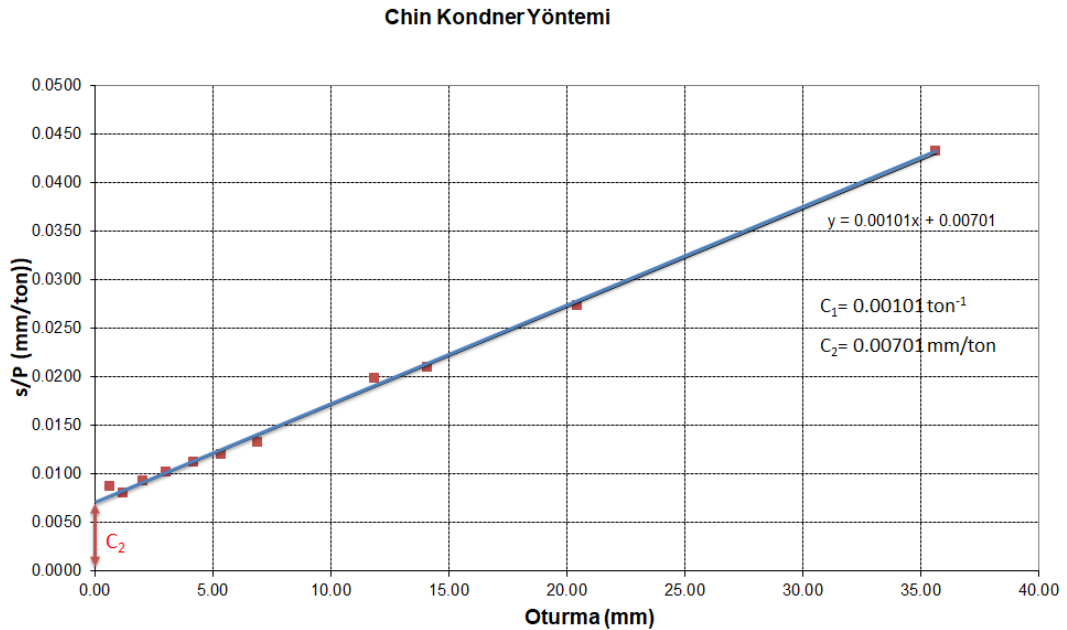
2.3 Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi

Kazık yükleme deneyleri sonucunda elde edilen yük-oturma eğrileri dikkate alınarak kazıkların nihai taşıma gücü (P_{tu}) elde edilebilir. Bunun için 40’ın üzerinde yöntem geliştirilmiştir. Literatürde genel kabul görmüş yöntemlerden başlıcaları; Chin Kondner yöntemi, Brinch-Hansen %80 yöntemi, De-Beer yöntemi, teğet yöntemi, Mazurkiewicz yöntemi, Decourt yöntemi ve Davisson yöntemidir. Bu yöntemlere ilave olarak Alku ve Özkan (2006) tarafından yapılan çalışmada yeni bir kazık yükleme deneyi yöntemi geliştirildi. Bu yöntem ile elde edilen kazık nihai taşıma gücü değerleri, Chin-Kondner ve Decourt (1999) yöntemi ile elde edilen değerlere yakın

elde edilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen kazık oturma analiz yöntemi Alku ve Özkan (2006) tarafından geliştirilen matematik modele dayanmaktadır. Ayrıca Aktepe ve Özkan (2016) tarafından geliştirilen yöntemde kazık yükleme deney değerlendirilmesi sonucu kazıkların kritik yük değerleri (P_{kr}) elde edilmiştir. Tez kapsamında incelenen yük-oturma analiz yöntemlerinden Fleming (1992) ise Chin (1970) tarafından geliştirilen modeli geliştirerek tekil kazıklar için oturma analiz yöntemi elde etmiştir. Yeni yöntemde kullanılan iki farklı kazık yükleme değerlendirme yöntemi ile Fleming (1992) tarafından geliştirilen Chin (1970) yöntemi bu bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.3.1 Chin-Kondner yöntemi

Bu yöntemde kazık yükleme deneyleri sonucunda Oturma/Yük (s/P) ve Oturma (s) değerleri bir grafik üzerinde çizildiğinde belli bir değerden sonra aralarında doğru bir orantı olduğu görülmüştür (Şekil 2.15). Düşük yük değerlerinde bu orantı düzgün sağlanamadığı için bu değerler hesaba katılmadan lineer doğrunun denklemi oluşturulur. Bu doğru orantıdan yük-oturma değerleri arasında bir bağıntı elde edilir. Chin-Kondner yöntemine göre kazığın nihai taşıma gücü, söz konusu lineer doğrunun eğiminin tersine eşittir.



Şekil 2.15 : Chin-Kondner yöntemi grafiği.

Chin-kondner yöntemine göre kazık nihai taşıma gücü (P_{tu}) değeri Şekil 2.15'te verilen doğrunun eğiminin (C_1) tersidir.

$$P_{tu} = \frac{1}{c_1} \quad (2.9)$$

Chin-Kondner yöntemi Şekil 2.15'te verilen grafikten yola çıkarak ideal yük-oturma değerini denklem 2.10'da verildiği şekilde tanımlamaktadır.

$$P = \frac{s}{c_1 s + c_2} \quad (2.10)$$

c_2 : Chin-Kondner yöntem grafiğinde oluşturulan lineer doğrunun y eksenin kestiği yer (mm/ton).

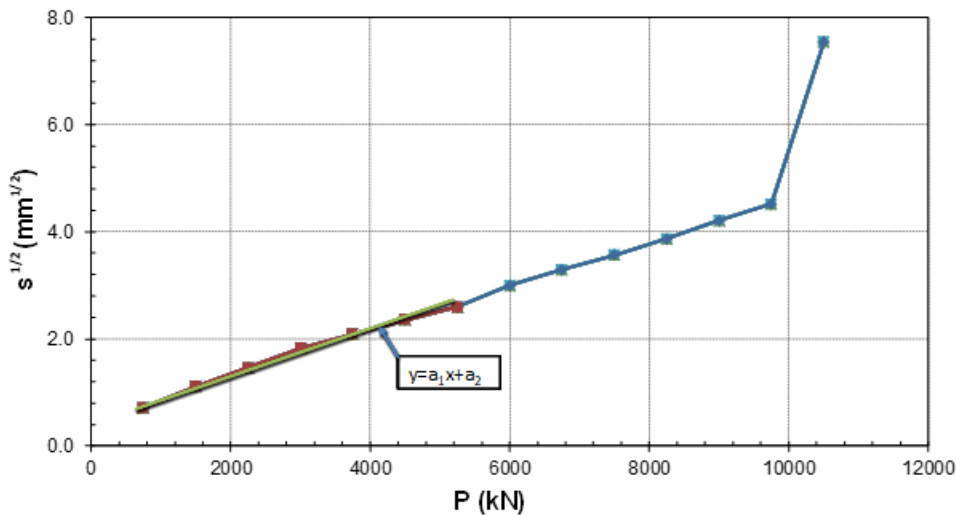
s : Kazığın oturma değeri (mm)

Chin-Kondner yönteminin doğru sonuç vermesi için kazığın göçme bölgesine yaklaşması tavsiye edilir.

2.3.2 Alku-Özkan yöntemi

Alku ve Özkan (2006) yönteminde kazık yük-oturma ilişkisi idealize edilerek açıklanmıştır. İdeal yük oturma eğrileri, kazıklardaki lineer olmayan davranışı da açıklayacak şekilde iki ayrı kısımda formülize edilmiştir.

İdeal yük-oturma eğrilerinin ilk kısmı oturma değerlerinin kareköküyle ($s^{1/2}$) yük (P) değerleri ilişkilendirilerek oluşturulmuştur. Bu grafikteki değerler, Şekil 2.16'da da görüleceği üzere belli bir değere kadar doğrusal bir eğilim gösterir. Doğrusal eğilim gösteren noktalar ortalama bir doğru çizgisiyle birleştirilerek doğrunun denklemi ile a_1 ve a_2 katsayıları belirlenir.



Şekil 2.16 : Alku ve Özkan (2006) yönteminde başlangıç grafiği.

Grafikteki eğri formunu almaya başladığı noktalar ise kazığın göçmeye başladığı kısım olarak tanımlanır ve bu noktadaki değerler ikinci kısımda formülize edilmiştir.

Şekil 4.2.1’de görüldüğü üzere söz konusu doğru formülü $y=a_1x+a_2$ olarak elde edilmiştir. Bu durumda idealize yük oturma grafiğinin ilk kısmı için yük-oturma arasındaki ilişki;

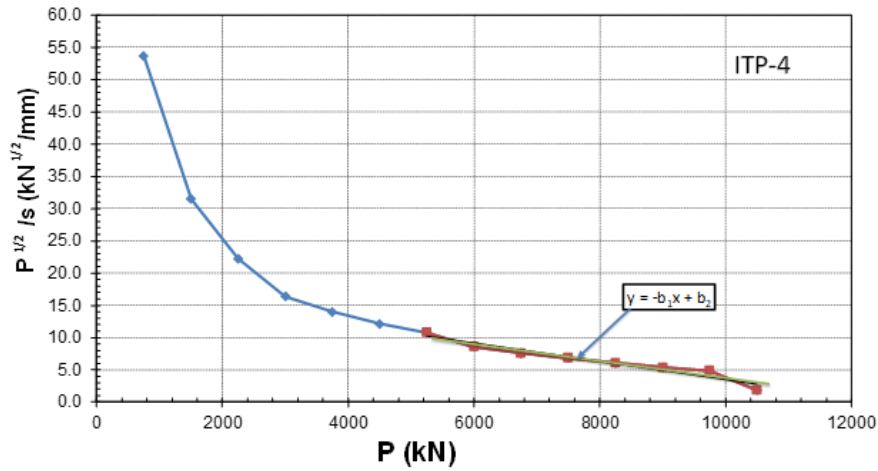
$$s = (a_1P + a_2)^2 \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. Bu bağıntı yük-oturma eğrisinin başlangıç bölümünü tanımlar.

Yöntemde yük-oturma eğrisinin kalan kısmını tanımlamak için yükün karekökü/oturma-yük ($P^{1/2}/s - P$) grafiği çizilir. Şekil 2.17’de de görüleceği üzere elde edilen değerler belli bir noktadan sonra doğrusal olarak çıkmaktadır. Bu doğrusal noktalar bireleştirilerek doğru denklemi $y = b_1x + b_2$ olarak elde edilir. Doğru denkleminde b_1 ve b_2 katsayıları elde edilir. Bu denklemde x ve y gerçek değerleri yerine koyularak;

$$S = \frac{\sqrt{P}}{b_1P+b_2} \quad (2.12)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı yük-oturma eğrisinin son bölümünü tanımlar.

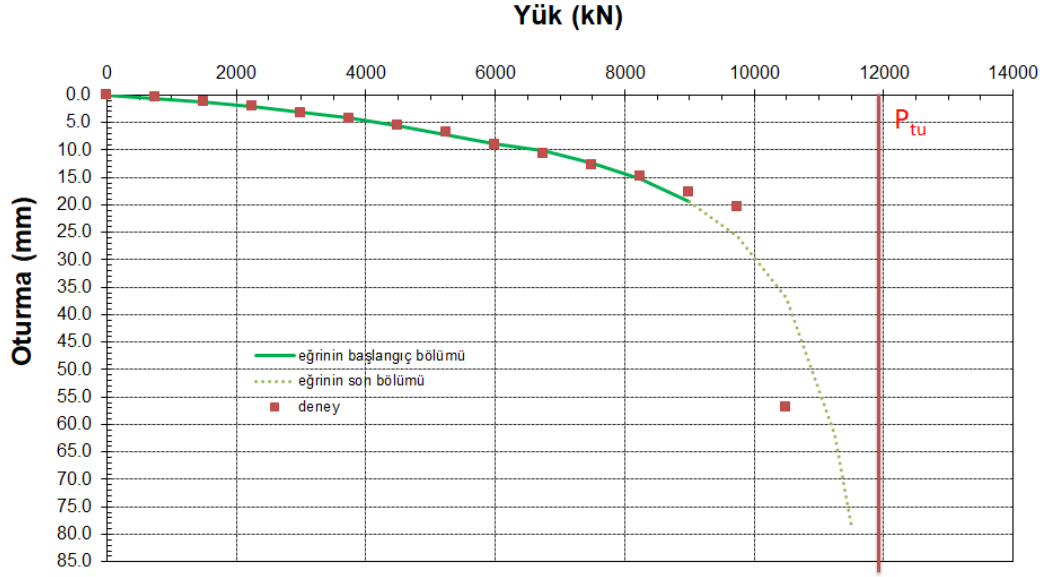


Şekil 2.17 : Alku ve Özkan (2006) yönteminde sonlanma grafiği.

Alku ve Özkan (2006) yöntemine göre kazık nihai taşıma gücü değeri denklem 2.13’te verildiği şekilde hesaplanır.

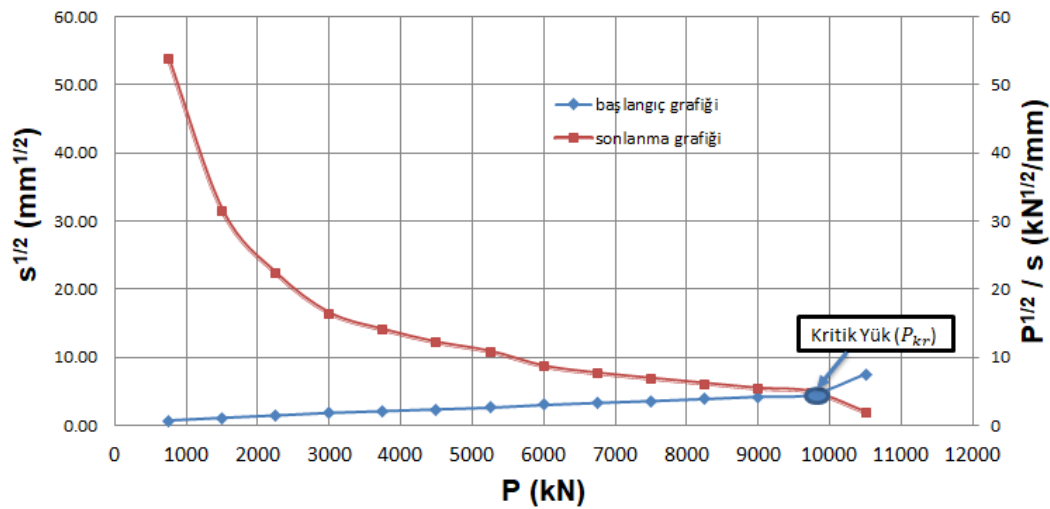
$$P_{tu} = -\frac{b_2}{b_1} \quad (2.13)$$

Yük oturma grafiğinin başlangıç ve son bölümleri için elde edilen eğri denklemleri deney verileri ile birlikte yük-oturma grafiği üzerinde çizilip ideal bir yük-oturma eğrisi elde edilebilir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Alku ve Özkan yöntemine göre oluşturulan ideal yük-oturma eğrisi.

Aktepe ve Özkan (2016) çalışmasında, Alku ve Özkan (2006) yönteminde yer alan başlangıç ve sonlanma grafiklerini (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de yer alan grafikleri) birleştirmiştir. Her iki grafikteki x ekseninde yük değerleri girilirken y ekseninde ise başlangıç grafiği için $s^{1/2}$ ve sonlanma grafiği için $P^{1/2}/s$ değerleri girilmiştir (Şekil 2.19). Sonuç olarak iki grafiğin bir noktada kesiştiği görülmüş ve bu kesiştiği noktaya kritik yük (P_{kr}) denilmiştir.



Şekil 2.19 : Aktepe ve Özkan (2016) yöntemi kritik yük hesabı.

3. TEKİL KAZIKLARDA YÜK-OTURMA ANALİZ YÖNTEMLERİ

Tekil kazıklarda meydana gelen oturmalar aşağıda sıralanan 5 ana bileşenden oluşmaktadır (Rao, 2011).

- 1- Kazığın elastik sıkışması
- 2- Kazığın çevresindeki zemin göre hareketi
- 3- Kazık çevresindeki zeminin oturması. Zeminin oturması elastik oturma ve konsolidasyon oturmasını kapsamaktadır
- 4- Kazık ucundaki zeminin oturması (elastik ve konsolidasyon oturması)
- 5- Sabit eksenel yük altında kazık malzemesinin sünmesi (Rao, 2011).

Kazık oturma hesapları için basit ampirik metodlardan karmaşık lineer olmayan sonlu eleman metodlarına kadar birçok yöntem bulunmuştur. Kazık oturma hesapları için geliştirilen mevcut metodlar 3 ana kategoride incelenebilir (Poulos ve Davis, 1980):

- Seed ve Reese (1957) tarafından ortaya atılan yük transfer metodu, kazık direnci ve kazığı sonlu sayıda elemana bölerek ölçülen kazık hareketi arasındaki ilişkiyi kullanır.
- Birçok araştırmacı tarafından uygulanan elastik teori analizleri ile kazık oturma hesapları yapılabilir. Bu analizlerde kazık üniform yüklenen elemanlara bölünür ve kazık ve zemin deplasmanları arasındaki sıkışma sınırlamaları kullanılarak bir çözüm elde edilir.
- Nümerik yöntemlerle oturma analizleri yapılabilir. Uygulamada en yaygın kullanılan nümerik yöntem, sonlu elemanlar yöntemidir.

Tez kapsamında, tekil kazıkların oturma analizleri üzerine geliştirilen toplam 9 farklı yöntem incelenmiştir. Elastik teori analizlerine dayanan ve literatürde yaygın olan yöntemler:

- Poulos ve Davis (1968) yöntemi,
- Randolp ve Wroth (1978) yöntemi,

- Bowles yöntemi,
- Tomlinson ve Woodward yöntemi

Yük-transfer yöntemi baz alınarak geliştirilen yöntemlerden başlıcaları ise;

- Coyle ve Reese (1966) yöntemi,
- Fleming (1992) yöntemi,
- Vallabhan ve Mustafa (1999) yöntemi,
- Zhang ve Diğ. (2016) yöntemi,
- Xia ve Zou (2017) yöntemi,
- Bohn ve diğ. (2016) yöntemi,
- Boonyatee ve Lai (2017) yöntemi.

3.1 Poulos ve Davis (1968) Yöntemi

Elastisite teorisine dayalı bu yöntem ilk olarak Poulos ve Davis (1968) tarafından sunulmuştur. Yöntemde kazık boyunca geçilen zemin tabakaları, elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) değerlerine göre kategorize edilir.

Yöntemde öncelikle uygulanan toplam yükün uç ve sürtünme direnci dağılımı modellenmiştir. Kazık taban yükü ile kazığa uygulanan toplam yük arasındaki oran (β), sıkıştırılamayan kazıklar için elde edilen oranın (β_0) zeminin rijitliği ve kazığın sıkışabilirliği gibi etkenleri gözönüne alan bir takım düzeltme faktörleriyle çarpılmasıyla elde edilir (Poulos, 1972).

$$\beta = \frac{P_b}{P_t} = \beta_0 \cdot C_k \cdot C_b \cdot C_v \quad (3.1)$$

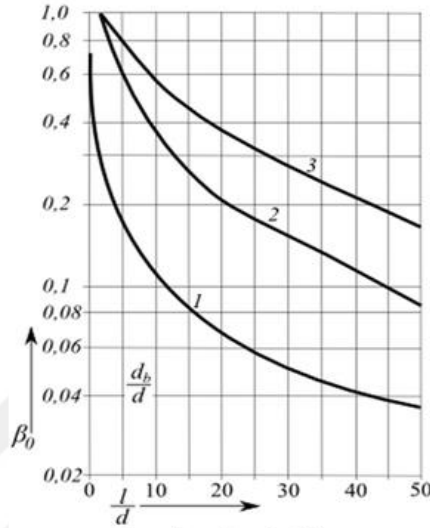
β_0 : Sıkıştırılamayan kazıklar için taban yükü-uygulanan yük oranı, sıkıştırılamayan zemindeki kazık boyunca transfer edilen yükün basınç etkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu oran değerleri, kazık boyunun kazık çapına ve kazık taban çapının kazık çapına oranına bağlı birer fonksiyondur (Şekil 3.1).

P_b : Kazık tabanına etkiyen yük,

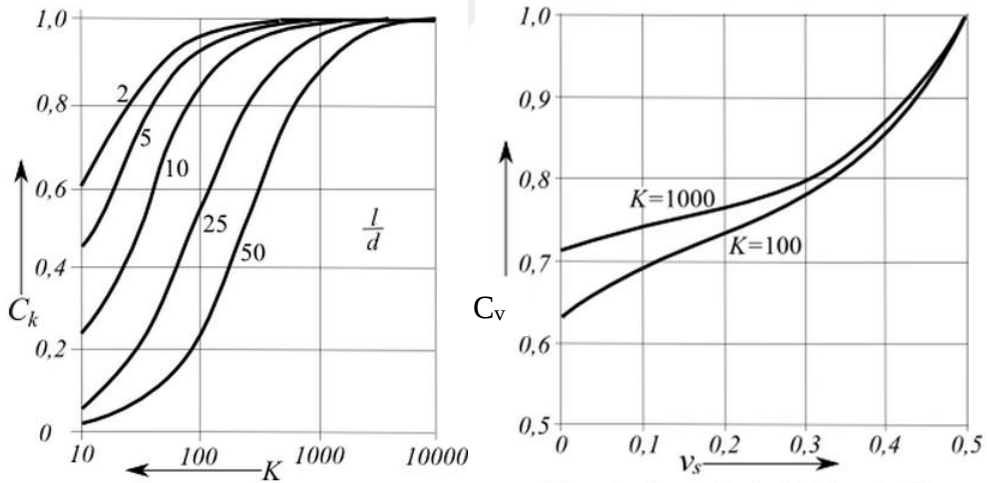
P_t : Kazık başına etkiyen toplam yük,

C_k : Kazık sıkışabilirliği düzeltme faktörü, çeşitli kazık boyu- kazık çapı (l/d) oranları için kazık rijitlik katsayısı (K) değerine bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.2).

C_v : Zemin Poisson oranı için düzeltme faktörü, çeşitli kazık rijitlik faktörü (K) değerleri için kazığı çevreleyen zemin poisson oranlarına bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.2).



Şekil 3.1 : β_0 oranı grafiği (Poulos ve Davis, 1980).



Şekil 3.2 : Kazık sıkışabilirlik katsayısı ve Poisson oranı düzeltme faktörü (Poulos ve Davis, 1980).

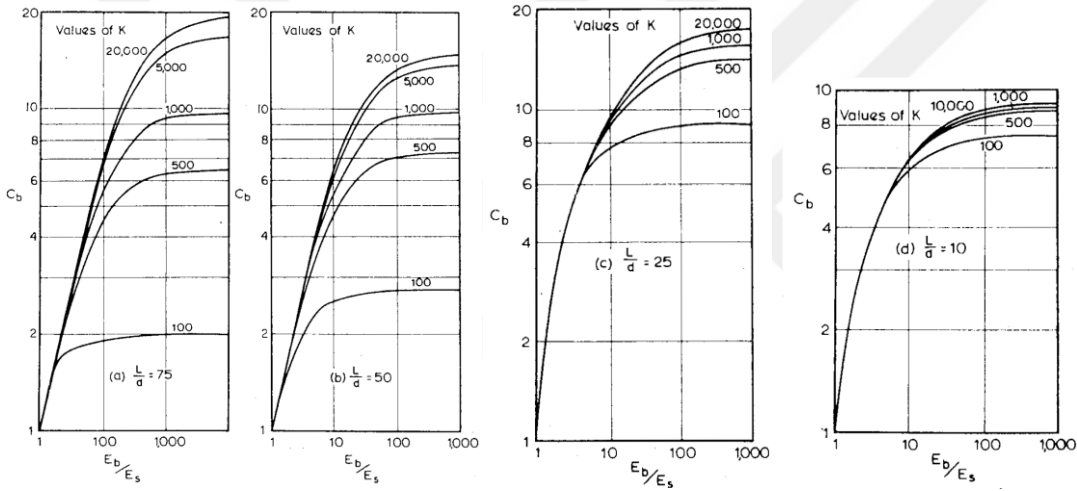
C_b : Taşıyıcı tabaka rijitliği için düzeltme faktörü, çeşitli kazık rijitlik faktörü (K) değerleri ve kazık boy-çap oranları için kazık elastisite modülünün kazığı çevreleyen zemin Young modülüne (E_b/E_s) oranına bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.3).

Yukarıda belirtilen düzeltme faktörlerinin hepsi kazık rijitlik katsayılarına bağlıdır. Kazık rijitlik katsayısı, kazık malzemesinin elastisite modülünün (E_k) kazığı çevreleyen zeminin Young modülüne (E_s) oranıdır.

$$K = \frac{E_k}{E_s} \quad (3.2)$$

Zemin Young modülü (E_s); deviyatör normal gerilme farkının, bu gerilme farkına karşılık gelen birim deformasyon değişimine (ε_E) oranı olarak tanımlanır.

$$E_s = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_E} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3 : Taban modülü düzeltme faktörü, C_b (Poulos ve Davis, 1980).

Kazık-zemin arasındaki sürtünme direncinden karşılanan yük (P_s), denklem 3.4’de verildiği şekilde hesaplanır.

$$P_s = P_t(1 - \beta) \quad (3.4)$$

Yöntemde zemin sürtünme direnci (P_s) ile kazık başında meydana gelen oturma arasında (s_t) kazık toplam sürtünme direnci (P_{su}) değerine kadar olan bölgede lineer ilişki kabulü yapılmıştır. Buna göre kazık başında meydana gelen oturma aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$s_t = \frac{I}{E_s d} \cdot \frac{P_s}{(1-\beta)} \quad (3.5)$$

E_s : Kazık kesiti boyunca geçilen zeminin ortalama Young modülü.

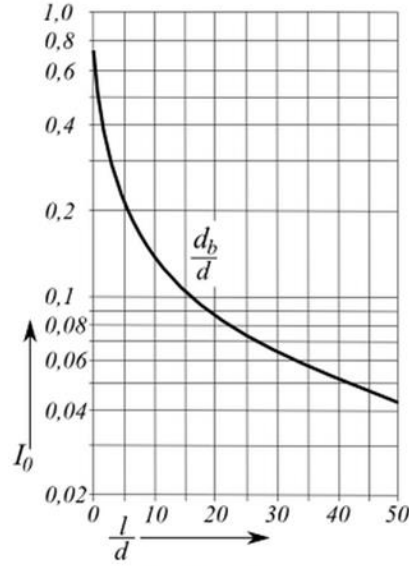
I : Oturma-tesir faktörü

d : Kazık çapı.

Yüzen kazıklar için oturma-tesir faktörü (I) değeri aşağıda belirtilen bağıntı ile elde edilebilir.

$$I = I_0 \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v \quad (3.6)$$

I_0 : Yarı-sonsuz kütlede sıkıştırılamayan kazıklar için temel oturma-tesir faktörü (zemin $v_s = 0.5$ için). I_0 oturma-tesir faktörü kazık boyu ve çapına bağlı bir katsayıdır. Şekil 3.4’de verilen grafik üzerinden elde edilebilir.



Şekil 3.4 : Temel oturma-tesir faktörü, I_0 (Poulos ve Davis,1980).

R_k : Kazık sıkışabilirliği düzeltme faktörü, çeşitli kazık boyu-kazık çapı (l/d) oranları için kazık rijitlik katsayısı (K) değerine bağlı bir fonksiyondur. Şekil 3.5’de verilen grafik üzerinden elde edilir.

R_h : Derinlik düzeltme faktörü, çeşitli kazık boyu-kazık çapı (l/d) oranları için kazık altında devam eden sonlu zemin tabaka kalınlığının kazık boyuna oranına bağlı bir fonksiyondur. Şekil 3.5’de verilen grafik üzerinden elde edilir.

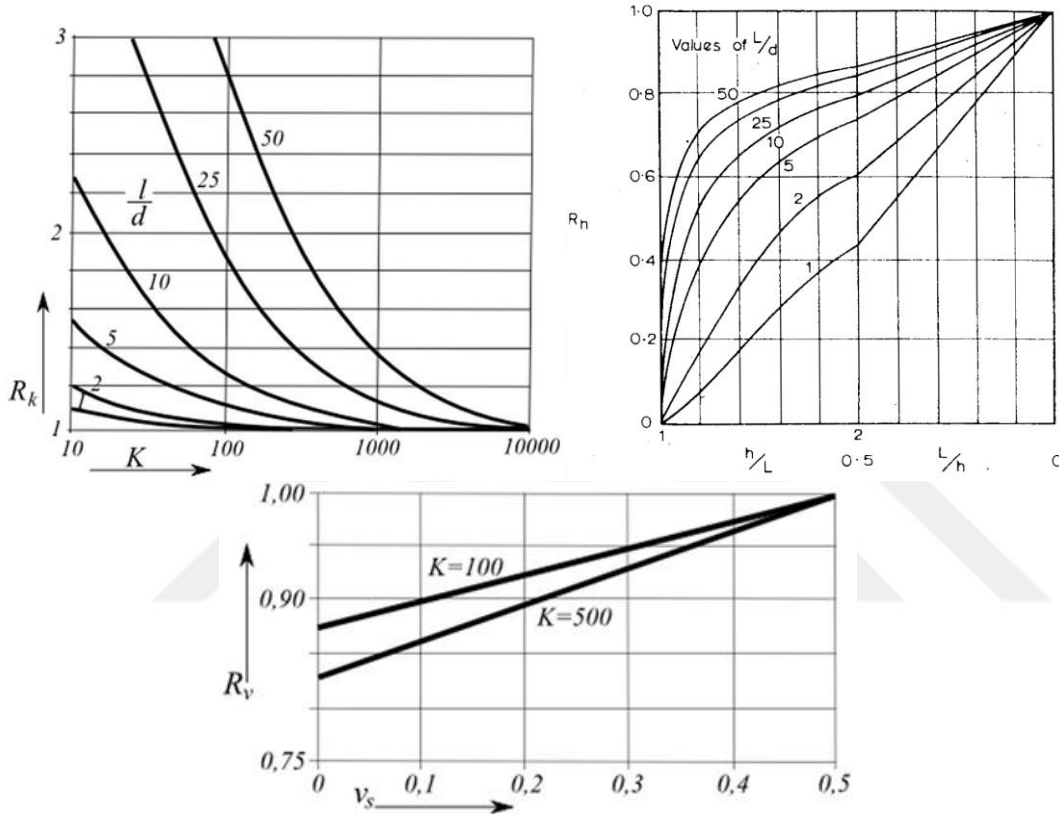
R_v : Zemin poisson oranı için düzeltme faktörü, çeşitli kazık rijitlik faktörü (K) değerleri için kazığı çevreleyen zemin poisson oranlarına bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.5).

Uç kazıkları için oturma-tesir faktörü (I), denklem 3.7’de verildiği şekilde hesaplanır.

$$I = I_0 \cdot R_k \cdot R_b \cdot R_v \quad (3.7)$$

Denklemden yer alan I_0 , R_k ve R_v faktörleri denklem 3.6'da belirtilen faktörle aynıdır.

R_b : Taşıyıcı tabaka rijitliği için düzeltme faktörü, çeşitli kazık rijitlik faktörü (K) değerleri ve kazık boy-çap oranları için kazık elastisite modülünün kazığı çevreleyen zemin Young modülüne (E_b/E_s) oranına bağlı bir fonksiyondur (Şekil 3.6).



Şekil 3.5 : Kazık sıkışabilirliği, Poisson oranı ve derinlik düzeltme faktörleri (Poulos ve Davis, 1980).

Kazık uç yükü ile kazık başında meydana gelen oturma arasında da kazık toplam uç direnci (P_{tu}) değerine kadar benzer şekilde lineer ilişki kabulü yapılarak denklem 3.8'de verildiği şekilde bir bağıntı elde edilmiştir.

$$s_t = \frac{I}{E_s d} \cdot \frac{P_b}{\beta} \quad (3.8)$$

Toplam birim sürtünme direnci aşıldıktan sonra oluşacak kazığın elastik sıkışması deklemler 2.21'de elde edilen oturma değerine eklenmesi gerekmektedir. Söz konusu sıkışma miktarı kazığı tam elastik olarak kabul ederek denklem 3.9'da verilen bağıntı ile hesaplanır.

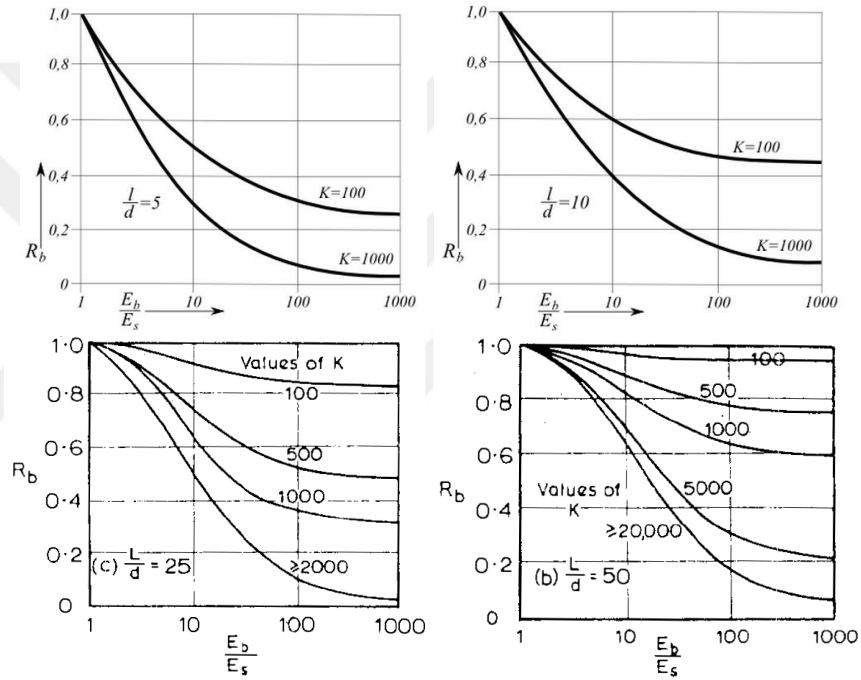
$$\Delta s = \left(P_b - \frac{P_{su}\beta}{(1-\beta)} \right) \cdot \frac{L}{E_k A_k} \quad (3.9)$$

E_k : Kazık malzemesinin elastisite modülü,

A_k : Kazık kesit alanı.

Bu durumda kazık uç yükü ile toplam oturma arasındaki ilişki her iki bağıntının toplamı ile denklem 3.10'da belirtildiği şekilde elde edilir.

$$s_t = \left(\frac{L}{E_s d} \right) \cdot \left(\frac{P_b}{\beta} \right) + \left(P_b - \frac{P_{su}\beta}{(1-\beta)} \right) \cdot \frac{L}{E_k A_k} \quad (3.10)$$



Şekil 3.6 : Taban modülü düzeltme faktörü (Poulos ve Davis, 1980).

Denklem 3.2 ve 3.5'de verilen bağıntılardaki zeminin ortalama Young modülü (E_s), aşağıda verilen bağıntı ile elde edilebilir.

$$E_s = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n E_i h_i \quad (3.11)$$

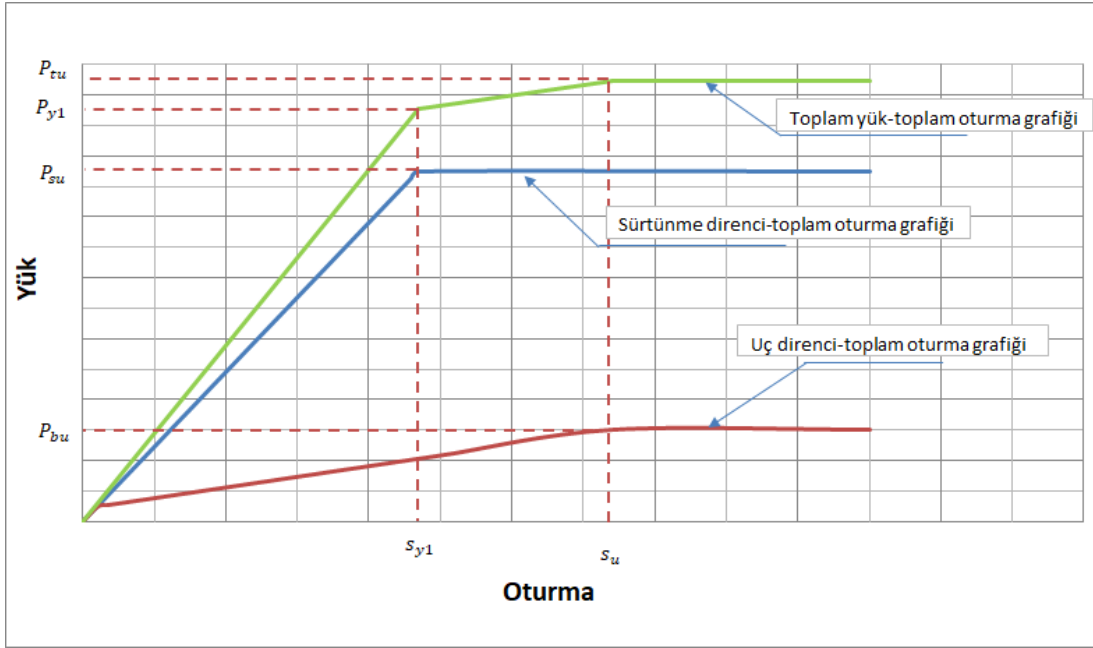
E_i : i tabakasının Young modülü,

h_i : i tabakasının kalınlığı,

n : Kazık boyunca geçilen zemin tabakası sayısı.

Denklem 3.5 ve denklem 3.8’de verilen bağıntılar yardımı ile kazık uç yükü-oturma ve sürtünme direnci-oturma arasındaki ilişkinin grafiği Şekil 3.7’de örnek bir kazık projesi üzerinden oluşturulmuştur. Bu grafik üzerinden de yöntemin önerdiği yük (P)-toplam oturma (s_t) grafiği oluşturuldu. Grafikte yer alan P_{y1} yük değeri, toplam sürtünme direncinde (P_{su}) elde edilen oturma değerine (s_{y1}) karşılık gelen toplam yük değeridir. P_{y1} değeri, β oranına bağlı olarak aşağıda verildiği şekilde elde edilir.

$$P_{y1} = \frac{P_{su}}{1-\beta} \quad (3.12)$$



Şekil 3.7 : Davis ve Poulos yöntemi toplam yük-oturma grafiği.

3.2 Randolph ve Wroth (1978) Yöntemi

Randolph ve Wroth (1978) tarafından geliştirilen bu yöntemde zemin içindeki kazığın da sıkışabilirliğini göz önüne almıştır. Kazığın gömülü olduğu zemin kütlelerinin sıkılığının derinlikle lineer olarak arttığı kabulü yapılmıştır. P yükü ile yüklenmiş r_0 yarıçaplı ve E_k elastisite modülü olan bir kazık boyunca belli bir derinlikte kazıkta birim deformasyon (ε_z), kazıktaki oturma değeri, s olarak gösterilerek

$$\varepsilon_z = -\frac{ds}{dz} = \frac{P}{\pi r_0 E_k} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. Kazık yükünün çevre zemine aktarılması aşağıdaki bağıntı ile açıklanabilir (Birand, 2007).

$$\frac{dP}{dz} = -2\pi r_0 \tau_s \quad (3.14)$$

τ_s : kazık çevresinde oluşan kayma gerilmesi.

Buradan oturma (s) -kayma gerilmesi (τ) ilişkisi kullanılarak Denklem 3.15’de belirtilen bağıntı elde edilir.

$$\frac{d^2 s}{dz^2} = \frac{2G}{\zeta E r_0^2} \quad (3.15)$$

Bu denklemin çözümü (Randolph ve Wroth, 1978):

$$\frac{P}{G_l r_0 s_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-v)\xi} + \frac{2\pi\rho \tanh(\mu l)}{\zeta} \frac{L}{\mu l} \frac{1}{r_0}}{1 + \frac{4\eta}{\pi\lambda(1-v)\xi} \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \frac{L}{r_0}} \quad (3.16)$$

şeklindedir. Bu çözümdeki parametreler aşağıda açıklanmıştır:

L : Kazık boyu,

$\eta = d_b/d$: Kazık uç çapının kazık çapına oranı (Soğan başı olmayan kazıklar için 1 değeri alınır.),

$\xi = G_l/G_b$: Kazık boyunca geçilen zeminin ortalama kayma modülü (G_l) / Kazık ucundaki zeminin kayma modülü (G_l),

$\rho = G'/G_l$: Zemin kayma gerilmesinin derinlikle değişimi. G' değeri, kazık başındaki zeminin kayma modülünü göstermektedir.

$\lambda = E_k/G_l$: Kazık-zemin rijitlik oranı,

$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)$: Kazığın etki yarıçapının ölçüsü. r_m değeri, kazık etki yarıçapını gösterirken r_0 değeri, kazık efektif yarıçapını göstermektedir. Dairesel kazıklarda kazık yarıçapı olarak alınabilir. Kazık etki yarıçapı ise sürtünme kazıkları için aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilir.

$$r_m = 2\rho(1-v)L \quad (3.17)$$

Uç kazıkları için kazık etki yarıçapı denklem 3.18’de verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$r_m = L_p \left(\frac{1}{4} + \left[2\rho(1 - \nu) - \frac{1}{4} \right] \zeta \right) \quad (3.18)$$

$\mu l = \sqrt{\frac{2}{\zeta(L/r_0)\lambda}}$: Kazık sıkışabilirliğinin ölçüsü.

3.3 Bowles Yöntemi

Bowles (1998) tarafından önerilen yöntemde, kazık başında meydana gelecek toplam oturma (s_t) değeri, kazıkların eksenel oturma değeri (s_s) ile uç oturma değerinin (s_b) toplamı ile elde edilmiştir.

$$s_t = s_s + s_b \quad (3.19)$$

Kazık eksenel oturması her kazık segmentine (ΔL) etkiyen eksenel yüke (P_{av}) bağlı olarak aşağıdaki formülle hesaplanacaktır.

$$\Delta s_s = \frac{P_{av} \Delta L}{A_{av} E_p} \quad (3.20)$$

ΔL değeri, her bir kazık segmentinin boyudur. E_p değeri kazık elastisite modülü, ve A_{av} ise kazık ortalama enkesit alanıdır. Kazık enkesiti ve kazık tipi kazık imalatı boyunca değişmiyorsa bu kısımda tek çeşit parametre alınabilir. Aksi taktirde her değişen kazık en kesiti için ayrı ayrı hesap yapılacaktır. Örneğin imal edilen fore kazık sistemi belli bir noktaya kadar muhafaza borulu imal edildiyse kazık çapında farklılık olacaktır. Bu durumda iki ayrı oturma hesabı yapıp bunların toplanması gerekmektedir.

$$s_s = \Sigma \Delta s_s \quad (3.21)$$

Bu yöntemde kazık uç oturması ise aşağıda verilen formülle hesaplanır:

$$\Delta H_{pt} = q_b D \frac{1 - \nu^2}{E_s} m I_s I_f F_1 \quad (3.22)$$

$m I_s$: şekil faktörü (1 alınabilir),

$$I_f : \text{gömme faktörü} \quad I_f = \begin{cases} 0.55, & L/D \leq 5 \\ 0.50, & L/D > 5 \end{cases}$$

D : kazık uç çapı,

ν : Zemin Poisson oranı

q_b : Kazık uç gerilmesi (Kazık uç yükü/kazık uç kesit alanı= P_b/A_b),

E_s : kazık uç noktasındaki zemin elastisite modülü,

F_1 : Aşağıda belirtilen durumlara göre hesaplanan azaltma faktörü:

Uç yükü $P_b \leq 0$ ise $F_1 = 0.25$ alınır.

Uç yükü $P_b > 0$ ise $F_1 = 0.50$ alınır.

Uç kazığı ise $F_1=0.75$ (bu durumda da çevre sürtünmesi 0'dan büyüktür.)

3.4 Tomlinson ve Woodward (2007) Yöntemi

Tomlinson yönteminde kazık oturması genel olarak Bowles yöntemine benzer şekilde kazık elastik kısalması ve kazık ucu oturmasının toplamından elde edilmektedir.

$$s_t = \frac{(P_s + 2P_b)}{2A_s E_p} + \frac{\pi P_b B(1 - \nu^2)I_p}{4 A_b E_b} \quad (3.23)$$

P_s ve P_b : Kazık uç ve çevre sürtünme yükleri,

L : Kazık boyu,

A_s ve A_b : Kazık çevre ve uç kesit alanları,

E_p : Kazık malzemesinin elastisite modülü

B = Kazık genişliği (silindirik kazıklar için kazık çapı D alınır.)

ν : Zemin Poisson oranı,

I_p : L/D oranına bağlı etki faktörü,

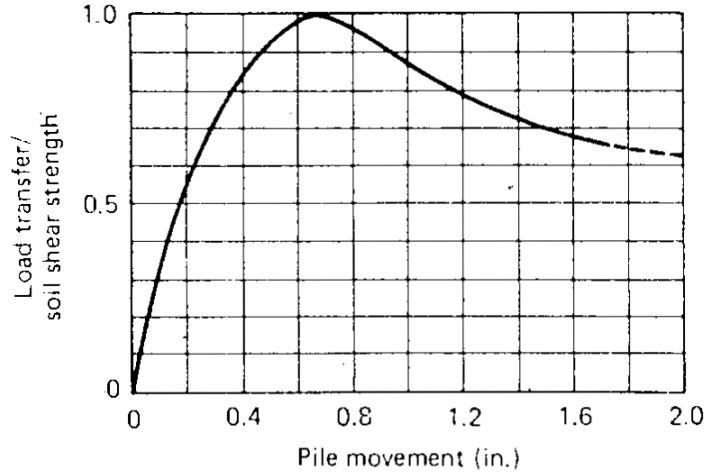
E_b : Kazık uç kısmı altında kalan zeminin deformasyon modülü,

I_p etki faktörü değeri $L/D > 5$ olması halinde 0.5 alınabilir.

3.5 Coyle ve Reese (1966) Yöntemi

Coyle and Reese (1966) tarafından geliştirilen yük transfer metodunda kazıklar üzerinde uygulanan saha deneylerinden elde edilen zemin verileri ve model kazıklar

üzerinde uygulanan laboratuvar deneylerinden faydalanılmıştır. Bu yöntemde istenilen zemin verisi yük transferi-zemin kayma direnci oranıyla kazık oturması arasında kurulan ilişkiden elde edilen eğrilerdir (Şekil 3.8). Uygulamadaki problemlerde, bu bağıntıdaki yük transferi bütün kazık boyu boyunca birkaç bölgede uygulanır (Coyle ve Reese, 1966).



Şekil 3.8 : Örnek bir kayma gerilmesi-kazık oturması eğrisi (Coyle ve Reese,1966).

Bu yöntemin adımları şu şekilde özetlenebilir (Rao, 2011):

1. Kazık, zemin profilleri dikkate alınarak birkaç elemana bölünür.
2. Kazık uç oturması, s_b olarak tanımlanır. İlk etapta s_b değeri küçük bir değer kabul edilir.
3. Uç oturmasından dolayı oluşacak uç direnci, P_b hesaplanır. Bu hesaplamada kazık ucu rijit bir daire olarak kabul edilir ve Boussinesq teoremi kullanılır.

$$P_t = \frac{2dEs_t}{(1 - \nu^2)} \quad (3.24)$$

E , ν parametreleri; üç eksenli deneylerden elde edilen zeminin ortalama deformasyon parametreleridir.

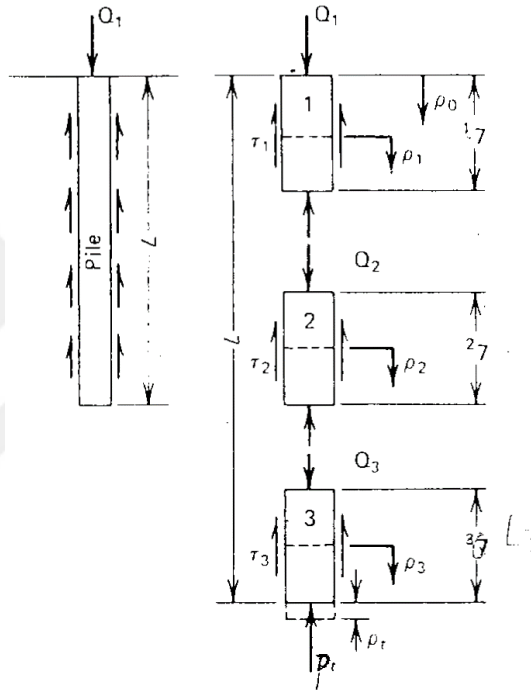
4. Şekil 3.9'da da gözüken kazığın en alttaki elemanının orta noktasındaki oturma, s_3 olarak kabul edilmiştir. (ilk deneme için $s_b = s_3$ olarak kabul edilmiştir.)
5. Kabul edilen s_3 değeri kullanılarak uygun bir transfer yükü/zemin kayma direnci oranı-oturma grafiğinden (Şekil 3.8'deki grafik örnek olarak verilmiştir.) bu s_3 değerine karşılık gelen transfer yükü/zemin kayma direnci oranı bulunur.

6. Kayma direnci-derinlik grafiğinden de kazık üzerinde belirlenen elemanın kayma direnci (τ_s) elde edilir.
7. Yük transferi (adezyon) ($\tau_a = \text{oran} \times \text{kayma direnci}$) elde edilir. 3. ve en alttaki elemana etki eden yük P_3 değeri aşağıda verilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$P_3 = P_t + \tau_a L_3 C_3 \quad (3.25)$$

L_3 : 3. elemanın uzunluğu,

C_3 : 3. elemanın ortalama çevresi.



Şekil 3.9 : Yük-transfer analizi (Coyle ve Reese, 1966).

8. Kazık elemanının orta noktasındaki elastik deformasyon (eleman üzerindeki yük lineer kabulü yapılır.) ise şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta s'_3 = \left(\frac{P_m + P_t}{2} \right) \left(\frac{L_3}{2A_3 E_p} \right) \quad (3.26)$$

$$P_m = \frac{P_3 + P_t}{2},$$

A_3 : 3. Elemanın kesit alanı,

E_p : Kazık malzemesinin elastisite modülü.

9. Seçilen kazık elemanının ortasındaki yeni oturma değeri şu şekilde elde edilir:

$$s'_3 = s_b + \Delta s'_3 \quad (3.27)$$

10. s'_3 değeri, 4. adımda kabul edilen s_3 değeri ile karşılaştırılır.

11. Eğer hesaplanan oturma değeri s'_3 , başta kabul edilen s_3 değeri ile belirli bir toleransta eşleşmiyorsa, işlemler 2. adımdan 10. adıma kadar tekrar edilerek orta noktada yeni bir oturma değeri elde edilir.

Eşleşme sağlandığında hesaplamalar diğer elemanlar için de yapılır. Son olarak kazık başına etkiyen P_0 yükü ve kazık başında meydana gelen s_0 oturma değeri elde edilir (Poulos ve Davis, 1980).

3.6 Fleming (1992) Yöntemi

Bu yöntem, kazık sürtünme ve uç dayanımlarını tanımlamak için hiperbolik fonksiyonların kullanımını esas almaktadır. Bu fonksiyonlar birleştirildiğinde ve basit bir prosedürle elastik kazık kısalması eklendiğinde, doğru bir model elde edilir (Fleming, 1992).

Yöntem değişkenleri genel olarak şu şekilde sıralanmıştır: Kazık toplam uç taşıma gücü (P_{tu}), kazık toplam sürtünme dayanımı (P_{su}), kazık parametreleri (L, D, E_p), zemin ve kazık parametrelerine bağlı elde edilen shaft esneklik faktörü (M_s), kazık taban bölgesindeki zemin elastisite modülü (E_b) ve etkili kazık boyu faktörü (K_E).

Chin (1970, 1972) çalışmasında, kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlarla kazık sürtünme ve uç taşıma gücü hesaplarını elde etmiştir. Bu çalışmaya göre rijit bir kazıkta oturma/yük oranı ile oturma değerleri arasında şekil 3.10'da görüleceği üzere bir orantı vardır.

Bu grafikten toplam sürtünme direnci aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanabilir (Fleming, 1992).

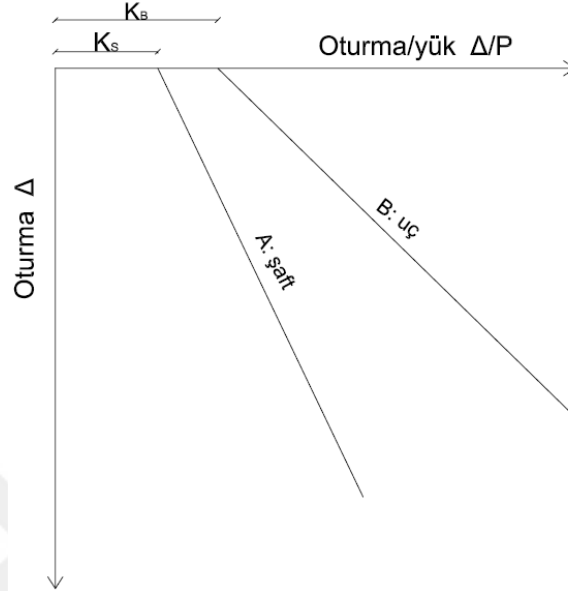
$$P_{su} = \frac{s_s}{\left(\frac{s_s}{P_s}\right) - K_s} \quad (3.28)$$

Bu formülden shaft oturması çekilerek;

$$s_s = \frac{K_s P_{su} P_s}{P_{su} - P_s} \quad (3.29)$$

formülü elde edilir. Bu formüle benzer olarak aynı işlem uç oturması için uygulanır:

$$s_b = \frac{K_b P_{bu} P_b}{P_{bu} - P_b} \quad (3.30)$$



Şekil 3.10 : Şaft ve uç dayanım grafikleri (Chin, 1970).

Belirli bir yükte kazık şaft oturması kazık çapı D_s değerinin direk bir fonksiyonu olduğuna dair önemli deliller vardır (Randolph & Wroth, 1982). Buna benzer olarak önemli sayıdaki çalışmalar göstermiştir ki; K_s değeri, P_{su} değerinin ters fonksiyonudur. Örneğin şaft oturması, toplam sürtünme dayanımı arttıkça azalmaktadır (Fleming, 1992).

$$K_s = \frac{M_s D_s}{P_{su}} \quad (3.31)$$

M_s : Boyutsuz esneklik faktörü.

Bu durumda denklem 3.31’de belirtilen K_s değeri denklem 3.29’da belirtilen bağıntıda yerine yazılarak şaft oturması şu şekilde elde edilir:

$$s_s = \frac{M_s D_s P_s}{P_{su} - P_s} \quad (3.32)$$

Randolph&Worth (1978, 1982) çalışmalarında M_s değeri, $\zeta \tau_s / (2G)$ olarak hesaplanmıştır. Bu formülde ζ değeri, $\zeta = \ln(r_m / r_0)$ formülüyle hesaplanır. r_m yarıçapı, etki yarıçapı olarak da adlandırılabilir ve kazık-zemin arasındaki etkileşimin

çok düşük olduğu bölgeye kadar olan yarıçaptır. r_0 , kazık yarıçapıdır. r_m yarıçapının hesabı yukarıda Randolph ve Wroth (1978) yönteminde belirtilmiştir. Randolph&Wroth çalışmalarında M_s değerinin 0.001-0.004 aralığında olduğu görülmektedir.

Tomlinson yönteminde de belirtildiği üzere kazık uç oturması dairesel temellerin oturma hesapları için uygulanan aşağıdaki formülle tanımlanabilir.

$$s_b = \frac{\pi q}{4 E_b} D_b (1 - \nu^2) f_1 \quad (3.33)$$

E_b : Kazık taban bölgesi zemin elastisite modülü,

q : Uygulanan kazık uç gerilmesi,

s_b : Kazık uç oturması,

D_b : Kazık uç yarıçapı,

ν : Kazık taban bölgesi zemin Poisson oranı,

f_1 : Temel derinliğine bağlı standart oturma azaltma faktörü.

Fleming (1992) tarafından yapılan çalışmada $\nu = 0.3$ ve $f_1 = 0.85$ kabul edilmiştir. Ayrıca kazık uç yükü ($q \times A_b$) toplam uç taşıma gücünün (P_{bu}) $1/4$ 'ü olduğu zaman hiperbolik fonksiyon ile lineer elastik fonksiyonlar birbirine eşitlenmekte ve böylece K_b katsayısı şu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$K_b = \frac{0.6}{D_b E_b} \quad (3.34)$$

Denklem 3.30'da belirtilen hiperbolik fonksiyondaki K_b değeri yerine yukarıdaki eşitliği yazdığımızda kazık uç oturması aşağıda belirtildiği şekilde hesaplanabilir.

$$s_b = \frac{0.6 P_{bu} P_b}{D_b E_b (P_{bu} - P_b)} \quad (3.35)$$

Bu çalışmada kazık tamamen rijit olarak kabul edilmiştir. Bu durumda; $s_s = s_b = s_t$ olarak kabul edilir. Ayrıca toplam yük, $P_t = P_s + P_b$ şeklinde hesaplanır. Kazık sürtünme yükü, denklem 3.32'den aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_s = \frac{P_{su} s_s}{M_s D_s + s_s} \quad (3.36)$$

Denklem 3.35'den ise kazık uç yükü hesaplanabilir.

$$P_b = \frac{D_b E_b s_b P_{bu}}{0.6 P_{bu} + D_b E_b s_b} \quad (3.37)$$

Yukarıda belirtildiği üzere uç oturması ve shaft oturması, toplam oturmaya eşitlenir ve sürtünme yükü ile uç yükü toplanırsa kazık toplam yükü ile kazık başı oturma değerleri arasında aşağıdaki fonksiyon elde edilir.

$$P_t = \frac{a s_t}{c + s_t} + \frac{b s_t}{d + e s_t} \quad (3.38)$$

Bu formülde: $a = P_{su}$, $b = D_b E_b P_{bu}$, $c = M_s D_b$, $d = 0.6 P_{bu}$ ve $e = D_b E_b$ değerlerine eşittir.

Yukarıda ifade edilen toplam yük formülü aşağıda belirtilen 2. dereceden olan fonksiyona dönüştürülebilir.

$$(e P_T - a e - b) s_t^2 + (d P_T + e c P_T - a d - b c) s_t + c d P_T = 0 \quad (3.39)$$

Kazıklarda zemin parametrelerine bağlı hesaplanan uç ve shaft oturmalarına ilaveten elastik kısalma da gözlemlenmektedir. Fleming çalışmasında elastik kısalmayı 3 kısımda incelemiştir.

- Kazıklarda düşük sürtünme direncine sahip kazık başından L_0 uzaklığına kadar olan bölge,
- Sürtünme kuvvet aktarımının gerçekleştiği L_F uzunluğundaki bölge,
- Toplam sürtünme kuvvetinden sonraki yüklerde kazıkta elastik kısalma.

Fleming (1992) tarafından yapılan elastik kısalma hesapları ikiye ayrılmıştır. Kazığa uygulanan toplam yükün (P_t) kazık toplam sürtünme taşıma gücünden (P_{su}) düşük olduğu durum için kazık elastik kısalması (s_e) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$s_e = \frac{4 P_t (L_0 + K_E L_F)}{\pi D_s^2 E_p} \quad (3.40)$$

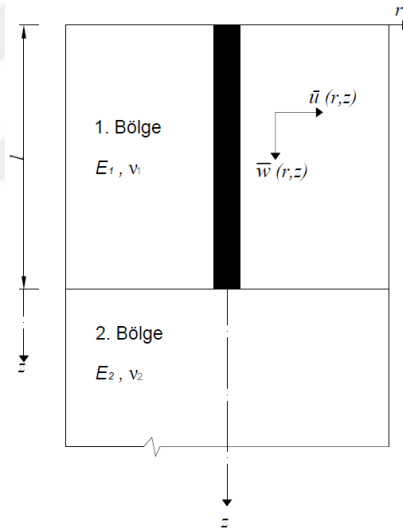
Uygulanan yükün toplam sürtünme gücünden daha yüksek olduğu durumlarda ise kazık elastik kısalması;

$$s_e = \frac{4}{\pi} \frac{1}{D_S^2 E_C} [P_T(L_0 + L_F) - L_F U_S(1 - K_E)] \quad (3.41)$$

Bu formüllerde $K_E L_F$ değerleri kazık efektif boyunu belirtmektedir. Zemin sertliği derinlikle üniform bir şekilde artıyorsa K_E değerinin 0.67 olarak alınması önerilmektedir. Genel olarak 0.4-0.67 arasında alınabilir.

3.7 Vallabhan & Mustafa (1996) Yöntemi

Vallabhan&Mustafa (1996) aksenal yüklenen ayak temeller ile ilgili değişkenli bir model sunmuştur. Bu çalışmada kazıklara göre daha kısa imal edilen ayak temellerin yük dağılımı ve oturma analizleri üzerinde durulmuştur. Bu yöntemin kazıklı temellerde de uygulanabileceği belirtilmiştir. Bu yeni yöntemde aksenal yüklü kazıklar için t-z eğrileri oluşturularak Coyle&Reese (1966) yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem Reese modelinde olduğu gibi yük-transfer metoduna dayanmaktadır.



Şekil 3.11 : Kazık ve zemin gösterimi (Vallabhan & Mustafa, 1996).

Yöntemde Şekil 3.11’de görüldüğü gibi tekil bir silindirik ayak temel veya kazık dikkate alınmıştır. Kazık boyunca geçilen zeminin üniform olduğu ve kazık tabanında daha sert bir tabaka geçildiği kabul edilmiştir. Bu yüzden Young modülü ve Poisson oranı gibi malzeme özellikleri bilinen iki tabaka zemin tanımlanmıştır. Problem aksimetrik olduğu için silindirik koordinatlar (r, θ, z) kullanılmıştır. Vallabhan bu yöntemde radyal yer değiştirmeleri $\bar{u}(r, z)$ düşey yer değiştirmelere göre çok düşük olacağı için dikkate almamıştır. Kazığı çevreleyen zeminin herhangi bir noktadaki (r, z) düşey deplasmanı şu şekilde tanımlanabilir:

$$\bar{w}(r, z) = w(z) \cdot \phi(r) \quad (3.42)$$

Kazık zemin arasındaki toplam potansiyel enerji şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} \phi &= U_k + U_z - \tilde{P}w(0) \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l E_p A_p \varepsilon_z^2 dz + \frac{1}{2} \int \int \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dvol - \tilde{P}w(0) \end{aligned} \quad (3.43)$$

σ_{ij} ve ε_{ij} değerleri zeminde oluşan gerilme ve şekil değiştirme bileşenleridir. Vallabhan&Das (1988) çalışmasında varyasyonel hesap yöntemini kullanarak gerilme ve şekil değiştirme değerleri yerine w ve ϕ değişkenlerini alarak kazıklar için aşağıdaki diferansiyel denklemi oluşturmuştur.

$$-(E_p A_p + 2t_1) \frac{d^2 w}{dz^2} + k_1 w = 0 \quad 0 < z < 1 \quad (3.44)$$

Sınır koşulları kullanılarak;

$$\begin{aligned} z = 0, \quad & -(E_p A_p + 2t_1) \frac{dw}{dz} = \tilde{P}_0 \text{ ve} \\ z = l, \quad & -(E_p A_p + 2t_1) \frac{dw}{dz} = K w_l \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$K = \sqrt{[k_2(E_2 \pi R^2 + 2t_2)]} \quad (3.46)$$

Yukarıda belirtilen denklemlerde k ve t değerleri denklem 3.47 ve 3.48’de verildiği şekilde hesaplanır.

$$k_i = 2\pi G_i \int_R^\infty r \left(\frac{d\phi}{dr} \right)^2 dr \quad (3.47)$$

$$2t_i = 2\pi E_i \int_R^\infty r \phi^2 dr \quad (3.48)$$

$i = 1, 2$ değerleri Şekil 3.11’de belirtilen zeminin iki ayrı bölgesini temsil etmektedir. Bu modelde kazık tabanında yay tanımlayan klasik Reese modeli kullanılmış ve aşağıda belirtilen alan denklemi oluşturulmuştur (Vallabhan ve Mustafa, 1996).

$$r \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\phi}{dr} \right) - \frac{n}{m} r^2 \phi = 0, \quad R < r < \infty \quad (3.49)$$

$r = R, \phi = 1$ ve $r = \infty, \frac{d\phi}{dr} = 0$ sınır koşulları için m ve n değerleri aşağıda verilen denklemlerle hesaplanır.

$$m = 2\pi G_1 \int_0^l w^2 dz + \pi G_2 \frac{w_l^2}{\alpha} \quad (3.50)$$

$$n = 2\pi \bar{E}_1 \int_0^l \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz + \pi E_2 \alpha w_l^2 \quad (3.51)$$

Bu denklemlerde verilen α değeri ise Vallabhan ve Mustafa (1996) tarafından denklem 3.52’de verildiği şekilde elde edilmiştir.

$$\alpha = \sqrt{\left[\frac{k_2}{(E_2 \pi R^2 + 2t_2)} \right]} \quad (3.52)$$

Yukarıda belirtilen denklem 3.43 ve denklem 3.48 numaralı denklemler, w ve ϕ değerlerinin fonksiyonu ve integrali olan katsayılarla oluşturulan diferansiyel denklemlerdir. Bu katsayıları ancak sabit kabul edilirse sınır koşullarına tabi kapalı form denklem çözümü yapılabilir.

Denklem 3.49’da $\beta = \sqrt{(n/m)}$ kabulüyle denklem sıfır mertebesindeki Bessel denklemine dönüştürülür.

$$r \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\phi}{dr} \right) - \beta^2 r^2 \phi = 0, \quad R < r < \infty \quad (3.53)$$

$$\phi(r) = C_1 I_0(\beta r) + C_2 K_0(\beta r)$$

Bu denklemde $I_0(\beta r)$ ve $K_0(\beta r)$ değerleri ayrı ayrı birinci ve ikinci tür sıfır mertebesindeki Bessel fonksiyonudur. C_1 ve C_2 katsayıları denklem 3.49’da belirtilen sınır koşullarına bağlıdır ve bu yüzden $C_1 = 0$ olarak elde edilmiştir. Bu sınır koşulları altında denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\phi(r) = \frac{K_0(\beta r)}{K_0(\beta R)} \quad (3.54)$$

Benzer olarak diferansiyel denklemin çözümüyle;

$$w(z) = B_1 e^{-\alpha z} + B_2 e^{\alpha z}, \quad 0 < z < 1$$

$$\alpha = \sqrt{\left[\frac{k_1}{(E_p A_p + 2t_1)} \right]} \quad (3.55)$$

bağıntıları elde edilir. Sınır koşullarını denklem 3.45'e uygulayarak B_1 ve B_2 değerleri elde edilir.

$$B_1 = \frac{\tilde{P}_0 e^{\alpha l} (K + a)}{[e^{\alpha l} (K + a) + e^{-\alpha l} (K - a)]a} \quad (3.56)$$

$$B_2 = \frac{-\tilde{P}_0 e^{-\alpha l} (K - a)}{[e^{\alpha l} (K + a) + e^{-\alpha l} (K - a)]a}$$

Bu denklemlerde α katsayısı;

$$a = \sqrt{[k_1 (E_p A_p + 2t_1)]} \quad (3.57)$$

formülü ile bulunur.

Vallabhan&Mustafa (1996) çalışmalarında yukarıda belirtilen denklemleri bilgisayarda MAPLE programını kullanarak çözmüştür ve kazık başında meydana gelen oturma değerini yukarıdaki denklemlerin çözümü ile denklem 3.58'de verilen bağıntı ile hesaplamıştır.

$$w_{max} = w(0) = \tilde{P}_0 \frac{e^{\alpha l} (K + a) - e^{-\alpha l} (K - a)}{[e^{\alpha l} (K + a) + e^{-\alpha l} (K - a)]a} \quad (3.58)$$

3.8 Zhang ve Diğ. (2016) Yöntemi ile Oturma Hesabı

Zhang ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntem bize tabakalı zeminlerde imal edilen eksenel yüklü tekil kazıkların yük-yer değiştirme ilişkisinin doğrusal olmayan analizi için basitleştirilmiş bir yaklaşım sunmaktadır. Söz konusu yöntemde, oturma analizleri için hiperbolik modeller kullanılmıştır. Kazık sürtünme direnci ile kazık çevresindeki zemin rölatif deplasmanları arasındaki ilişki hiperbolik modeller kullanılarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde kazık uç direnci ile kazık uç deplasmanları arasındaki ilişkiyi tanımlamak için de hiperbolik modelden yararlanılmıştır.

Birim sürtünme direnci ve kazık çevresindeki zeminin oturma arasındaki ilişki Lee ve Xiao (2001) tarafından denklem 3.59’da verilen bağıntı geliştirilmiştir.

$$\tau_{sz} = \frac{s_{sz}}{a + b \cdot s_{sz}} \quad (3.59)$$

τ_{sz} : z derinliğindeki birim sürtünme direncidir.

s_{sz} : z derinliğindeki kazık çevresindeki zeminin rölatif deplasmanıdır.

a ve b : ampirik katsayılar.

Lee ve Xiao (2001) tarafından z derinliğindeki kazık çevresindeki zeminin toplam deplasmanı ise denklem 3.60’daki formül ile belirtilmiştir.

$$s_z = s_{sz} + \Delta s_{sz} \quad (3.60)$$

Kazık çevresindeki zeminin rölatif deplasmanı denklem 3.59’dan $s_{sz} = \frac{a \cdot \tau_{sz}}{1 - b \cdot \tau_{sz}}$ olarak elde edilir. Randolp ve Wroth (1979) tarafından önerildiği şekliyle Δs_{sz} değeri sadece birim sürtünme direncine bağlıdır.

$$\Delta s_{sz} = c \cdot \tau_{sz} \quad (3.61)$$

Bu durumda 3.58, 3.59 ve 3.60 numaralı denklemler birleştirilerek kazık çevresindeki zeminin toplam oturma değeri denklem 3.62’deki şekilde elde edilir. Bu formülden çevre sürtünme direnci çekildiğinde ise denklem 3.63’deki bağıntı elde edilecektir.

$$s_z = \frac{a \cdot \tau_{sz}}{1 - b \cdot \tau_{sz}} + c \tau_{sz} \quad (3.62)$$

$$\tau_{sz} = \frac{(a + c + b s_z) \pm \sqrt{(a + c + b s_z)^2 - 4 b c s_z}}{2 b c} \quad (3.63)$$

Söz konusu formüllerdeki a , b ve c katsayıları denklem 3.64 ve denklem 3.65 numaralı formüllerde belirtilmiştir (Zhang ve diğ., 2016).

$$a = c = \frac{r_0}{G_s} \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (3.64)$$

$$b = \frac{1}{\tau_{sf}} = \frac{R_{sf}}{\tau_{su}} \quad (3.65)$$

G_s : Kazık çevresindeki zeminin kayma modülü. Tabakalı zeminlerde $G_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} G_{si} h_i}{L}$ formülüyle hesaplanabilir. Burada h_i zemin tabakasının kalınlığını, L kazık boyunu ve n_s zemin tabaka sayısını belirtmektedir.

r_0 : Kazık yarıçapı.

r_m : Kazık merkezi ile kazık yüklenmesinden ötürü oluşan kazık sürtünme gerilmesinin yok olduğu nokta arasındaki radyel uzaklıktır. Bir diğer ifade ile kazık etki yarıçapıdır. Randolph ve Wroth (1979), bu değer için $r_m = 2.5L(1 - \nu_s)$ bağıntısını önerirken Lee (1993) tarafından r_m değeri için $r_m = 2.5L \frac{\sum_{i=1}^{n_s} G_{si} h_i}{G_{sm} L} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \nu_{si} h_i}{L} \right)$ bağıntısı önerilmiştir. Burada ν_{si} i numaralı zemin tabakasının Poisson oranı ve G_{sm} ise zemin tabakalarındaki maksimum zemin kayma modülüdür.

τ_{su} : zeminin toplam sürtünme direncidir.

τ_{sf} : Asimtotik sürtünme direncidir ve toplam sürtünme direncinden bir miktar büyüktür.

R_{sf} : Hiperbolik eğri sabitidir ve sürtünme direnci hiperbolik modeli için R_{sf} değeri 0.80-0.95 arasında değişmektedir.

Kazık uç direnci ve uç oturması arasındaki hiperbolik ilişki denklem 3.66'da yer alan bağıntıda verildiği şekilde elde edilmiştir (Zhang ve diğ., 2016).

$$\tau_b = \frac{s_b}{A + B \cdot s_b} \quad (3.66)$$

τ_b : Kazık uç direnci,

s_b : Kazık ucundaki zeminin oturması,

A ve B : Ampirik katsayılarıdır.

A ampirik katsayısı yöntemde Randolph ve Wroth (1979) tarafından önerildiği şekilde alınmıştır.

$$A = \frac{\pi r_0 (1 - \nu_b)}{4 G_b} \quad (3.67)$$

G_b : Kazık ucundaki zeminin kayma modülü,

v_b : Kazık ucundaki zeminin Poisson oranıdır.

B katsayısı ise zemin toplam uç direncine (τ_{bu}) bağlı olarak denklem 3.68’de verilen formülünden elde edilir.

$$B = \frac{1}{\tau_{bf}} = \frac{R_{bf}}{\tau_{bu}} \quad (3.68)$$

τ_{bf} : Asimtotik uç direncidir ve toplam uç direncinden bir miktar büyüktür.

Zhang ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen tabakalı zeminlerde imal edilen tekil kazıklarda oturma analizleri ile ilgili yöntemin adımları aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Kazık n sayıda ufak parçalara bölünür.
- 2) Kazık uç oturması olarak bir s_{bn} (n. parçadaki oturma değeri) değeri kabul yapılır.
- 3) s_{bn} değerine bağlı olarak denklem 3.65’den kazık uç yükü (P_{bn}) elde edilir.
- 4) Kazığın n. parçasının ortasındaki düşey yerdeğiştirme (s_{cn}) ile kazık uç oturması birbirine eşit kabul edilir ($s_{cn} = s_{bn}$) ve bu değere bağlı olarak denklem 3.63’de verilen bağıntı ile n. parçadaki sürtünme direnci (τ_{sn}) elde edilir.
- 5) Kazığın n. parçasının üst noktasındaki yük değeri;

$$P_{tn} = P_{bn} + \pi d L_n \tau_{sn} \quad (3.69)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda d , kazık çapını ve L_n ise kazığın n. parçasının uzunluğunu göstermektedir.

- 6) Kazığın n. parçasının orta noktasındaki elastik deformasyon;

$$s_{cmn} = \left(\frac{P_{tn} + P_{bn}}{2} + P_{bn} \right) \frac{0.5 L_n}{2 E_p A_p} \quad (3.70)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda E_p kazık malzemesinin elastisite modülü ve A_p ise kazık kesit alanıdır.

- 7) Kazığın n. parçasının üst noktasındaki deplasman (s_{tn}) s_{cmn} ve s_{bn} değerlerinin toplamıyla bulunur.

- 8) Elde edilen s_{tn} değeri üzerinden denklem 3.63'deki bağıntı yardımıyla revize zemin sürtünme direnci (τ'_{sn}) elde edilir. Ardından n. parçanın üst noktasına gelen yük tekrar τ'_{sn} değeriyle hesaplanır.

$$P_{tn} = P_{bn} + \pi d L_n \tau'_{sn} \quad (3.71)$$

- 9) 4-8 arasındaki adımlar her kazık parçası için kazık başındaki 1. Parçaya gelene kadar tekrarlanır.
- 10) 2-9 arasındaki adımlar farklı s_{bn} değerleri için yeterli sayıda yük-deplasman verileri elde edilinceye kadar tekrarlanır.

3.9 Bohn ve Diğ. (2016) Yöntemi ile Oturma Hesabı

Bohn ve diğ. (2016) çalışmasında farklı tipte bir yük-transfer yöntemi geliştirmiştir. Daha önceden geliştirilen yük-transfer eğrileri genel olarak ya uluslararası yaygınlığı olmayan pressiometre deney sonuçlarına dayanmaktadır ya da belirli kazık ve zemin tipleri için geliştirilmiştir. Bu yüzden Bohn ve diğ. (2016) fazla sayıda ve çeşitli bölgelerde yapılan 50 ayrı enstrümanlı kazık yükleme deneyleri üzerinde bir incelemiş ve bu deneyler üzerinden parametrik çalışmalar yapmıştır. Çalışmasında hiperbolik ve kübik kök yük-transfer eğrileri oluşturmuştur. Tez kapsamında diğer yöntemlerle de karşılaştırmak için Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen hiperbolik yük-transfer eğrisi açıklanmıştır.

Bohn ve diğ. (2016), Hirayama (1990) ve Fleming (1992) tarafından geliştirilen hiperbolik modeller üzerinden ortalama şaft ve uç esneklik faktörleri (M_s ve M_b) elde etmiştir. Her üç modelin özeti Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1'de de görüleceği üzere Bohn ve diğ. (2016) tarafından bütün zemin tipleri için ortalama şaft deformasyon parametresi (M_s) değeri 0.0038 olarak elde edilirken uç deformasyon parametresi (M_b) değeri 0.01 olarak elde edilmiştir. Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntemin uygulamasında kazık başına gelen yükün kazık-zemin arasındaki sürtünme ve uç direncine dağılımının doğru yapılması gerekmektedir. Tez kapsamında incelenen bu yöntemin uygulamasında enstrümanlı kazık yükleme deneylerinden elde edilen uç/sürtünme yükü oranları dikkate alınarak oturma analizleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1 : Yük-transfer yöntemi üzerinden oluşturulan hiperbolik eğri modelleri.

Yöntem Adı	Matematiksel İfade		Deformasyon Parametreleri
Hirayama (1990)	Şaft	$\tau_{sz} = \frac{\tau_{su}s_s}{0.0025D + s_s}$	0.0025
	Uç	$\tau_b = \frac{\tau_{bu}s_b}{0.25D + s_b}$	0.25
Fleming (1992)	Şaft	$\tau_{sz} = \frac{\tau_{su}s_s}{M_s B + s_s}$	M_s
	Uç	$\tau_b = \frac{\tau_{bu}s_b}{0.6\pi \frac{B}{4E} \tau_{bu} + s_b}$	Young Modülü (E)
Bohn ve diğ. (2016)	Şaft	$\tau_{sz} = \frac{\tau_{su}s_s}{M_s D + s_s}$	$M_s=0.0038$
	Uç	$\tau_b = \frac{\tau_{bu}s_b}{M_b D + s_b}$	$M_b=0.01$

3.10 Boonyatee ve Lai (2017) Yöntemi

Boonyatee ve Lai (2017), yük-transfer yöntemini baz alarak yeni bir yöntem geliştirmiştir. Söz konusu yöntem ile kısa-dönem oturmalar tahmin edilebilir ve statik kazık yükleme deney sonuçları ile doğrulanabilir.

Zhang (2016) yönteminde de açıklandığı üzere bu yöntemde de yük-transfer yöntemlerinin uygulanmasında kazık n adet parçaya bölünerek oturma analizi yapılacaktır. Boonyatee ve Lai (2017) çalışmalarında diğer yük-transfer modellerinden farklı olarak kazık çevresindeki zeminin sıyrılma durumu da dikkate alınmıştır. Bir adet kazık parçasının sürtünmeden kaynaklı toplam oturma değeri (s_i) elastik olmayan kısım (zeminin sıyrılmasından ötürü deformasyonu, s_{si}) ile elastik oturmanın (s_{ei}) toplamına eşittir.

$$s_i = s_{si} + s_{ei} \quad (3.72)$$

Zeminin sıyrılması ile oluşan deformasyon ve meydana gelen kayma direnci arasındaki ilişki Wang, Xie ve Wang (2012) tarafından üstel model kullanılarak modellenmiştir.

$$\tau_{si} = a_i(1 - e^{-b_i s_{si}}) \quad (3.73)$$

Matematiksel a_i parametresi maksimum birim sürtünme direncinin (τ_{su}) azaltma faktörüne (R) oranından elde edilir. R değeri Zhang ve diğ. (2016) yönteminde açıklandığı üzere 0.8-0.95 arasında alınabilir. Diğer bir parametre olan b_i değeri ise a_i parametresine bağlı olarak denklem 3.75’de verildiği şekilde hesaplanacaktır.

$$a_i = \frac{\tau_{su}}{R} \quad (3.74)$$

$$b_i = \frac{G_{si}}{a_i r_0 \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)} \quad (3.75)$$

Zeminin elastik deformasyonu (s_{ei}) ise bu yöntemde Randolph ve Wroth (1978) çalışmasında belirtildiği şekilde alınmıştır.

$$s_{ei} = \frac{r_0}{G_{si}} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \tau_i = C_i \tau_i \quad (3.76)$$

Kazık ucundaki oturma (s_b) değeri, kazıkucuna gelen yük değerine bağlı olarak denklem 3.77’de belirtilen bağıntıdaki şekilde elde edilmektedir (Boonyatee ve Lai, 2017).

$$P_b = a_b (1 - e^{-b_b s_b}) \quad (3.77)$$

Matematiksel a_b ve b_b parametreleri denklem 3.78 ve 3.79’da verilen bağıntılar yardımıyla elde edilir.

$$a_b = \frac{P_{bu}}{R} \quad (3.78)$$

$$b_b = \frac{4G_{sb}r_0}{a_b(1 - \nu_{sb})} \quad (3.79)$$

Kazık içerisinde bir i. parçanın tabanındaki oturma değeri (s_{ib}), i. parçanın orta noktasındaki zemin elastik ve elastik olmayan oturma değerleri ile orta noktanın altında kalan parçanın elastik sıkışma (s_{ci}) değerlerine bağlıdır.

$$s_{bi} = s_{si} + s_{ei} - s_{ci} \quad (3.80)$$

Kazığın elastik sıkışması (s_{ci}) ise denklem 3.81’de verildiği şekilde hesaplanır.

$$s_{ci} = \frac{1}{2} \left[P_{bi} + \frac{P_{ti} + P_{bi}}{2} \right] \frac{l_i}{2E_p A_p} = [4P_{bi} + \tau_{si} 2\pi r_0 l_i] \frac{l_i}{8E_p A_p} \quad (3.81)$$

Denklem 3.72, 3.75, 3.79 ve 3.80 numaralı bağıntılar dikkate alındığında kazığın i. parçasının taban oturması (s_{bi}) ile shaft oturması (s_{si}) arasındaki ilişki denklem 3.82’de verildiği şekilde elde edilir.

$$s_{bi} = C_i \tau_{si} + s_{si} - [4P_{bi} + \tau_{si} 2\pi r_0 l_i] \frac{l_i}{8E_p A_p} \quad (3.82)$$

$$= C_i [a_i (1 - e^{-b_i s_{si}})] + s_{si} - [4P_{bi} + a_i (1 - e^{-b_i s_{si}}) 2\pi r_0 l_i] \frac{l_i}{8E_p A_p}$$

Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen tabakalı zeminlerde imal edilen tekil kazıklarda oturma analizleri ile ilgili yöntemin adımları aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Kazık n sayıda ufak parçalara bölünür.
- 2) Kazık uç oturması olarak bir s_{bn} (n. parçadaki oturma değeri) değeri kabul yapılır. Bu değer için başlangıçta çok küçük bir değer seçilir (Ör: kazık çapının binde biri).
- 3) Denklem 3.77’deki bağıntı kullanılarak kabul edilen s_{bn} değerinden kazık uç yükü (P_b) elde edilir.
- 4) Kazığın n. parçasından itibaren hesaplara başlanarak kazığın baş kısmına doğru gidilir.
- 5) Zeminin her parçası için sıyrılma miktarı (s_{si}) taban oturma değerine (s_{bi}) göre denklem 3.82’deki bağıntıdan elde edilebilir.
- 6) Kazığın i. parçasındaki sürtünme direnci (τ_{si}) denklem 3.73’deki bağıntıdan zemin sıyrılma (elastik olmayan shaft oturması, s_{si}) miktarına göre elde edilir.
- 7) Kazığın i. parçasının üst kısmındaki oturma (s_{ti}) ve yük (P_{ti}) değerleri denklem 3.83 ve 3.84’de verilen bağıntılarla bulunur.

$$P_{ti} = P_{bi} + 2\pi r_0 l_i \tau_{si} \quad (3.83)$$

$$s_{ti} = s_{bi} + \frac{P_{ti} + P_{bi}}{2E_p A_p} l_i \quad (3.84)$$

- 8) Kazığın alt parçasından üst parçasına geçerken alt parça üst noktasının oturma ($s_{t(i-1)}$) ve yük değerlerinin ($P_{t(i-1)}$) üst parçadaki taban oturmasına (s_{bi}) ve taban yüküne (P_{bi}) eşit olduğu kabul edilerek işlemlere devam edilir ($s_{b(i)} = s_{t(i-1)}, P_{bi} = P_{t(i-1)}$).

- 9) Kabul edilen taban oturması için kazık 1. parçasının üst noktasının (kazık başı oturması) oturması elde edilerek işlem tamamlanır.
- 10) Bu işlem farklı taban oturma değerleri için tekrarlanarak kazık başına etki eden çeşitli yüklere karşılık oturma değerleri bulunur. Yeterli miktarda değer elde edildikten sonra kazık başı için yük-oturma grafiği çizilebilir.

3.11 Xia ve Zou (2017) Yöntemi

Xia ve Zou (2017) çalışmasında parçalı fonksiyon kabulü yaparak kazık çevresindeki zeminin sürtünme direnci ile kazık çevresindeki zeminin rölatif yer değiştirmesi arasındaki lineer olmyan ilişkiyi benzeştirmiştir. Kazık uç yükü ile uç oturmasını benzeştirmek için de başka bir model geliştirilmiştir (Xia ve Zou, 2017).

Xia ve Zou (2017) oluşturduğu modelde diğer yöntemlerden farklı olarak kazık-zemin yüzeyindeki zeminin yumuşama etkisini de dikkate almıştır. Bahsedilen yumuşama etkisi dikkate alınarak çevre sürtünmesi ile kazık-zemin yüzeyindeki zeminin rölatif deplasmanı arasındaki ilişki aşağıdaki parçalı fonksiyonlarla belirtilmiştir.

$$\tau(\Delta s) = \begin{cases} a \cdot (1 - e^{-b \cdot \Delta s}) + \tau_0, & \Delta s < s_{su} \\ 2 \cdot \tau_{su} - c \cdot (1 - e^{-d \cdot \Delta s}), & \Delta s > s_{su} \end{cases} \quad (3.85)$$

τ_{su} : Maksimum sürtünme direnci,

s_{su} : Maksimum sürtünme direncine karşılık gelen rölatif oturma değeri,

τ_0 : Başlangıç kritik sürtünme direnci (yapılan hesaplarda dikkate alınmamıştır.),

a, b, c ve d : Ampirik katsayılar.

Kazık-zemin yüzeyindeki zeminin rölatif deplasmanı s_u değerine ulaşınca $\tau(s_{su}) = \tau_{su}$ eşitliği yazılabilir (Xia ve Zou, 2017). Bu durumda denklem 3.86 ve 3.87 numaralı bağıntılar ortaya çıkar.

$$a \cdot (1 - e^{-b \cdot s_{su}}) + \alpha \cdot \tau_{su} = \tau_{su} \quad (3.86)$$

$$2 \cdot \tau_{su} - c \cdot (1 - e^{-d \cdot s_{su}}) = \tau_{su} \quad (3.87)$$

Xia ve Zou (2017) çalışmasında c ve d parametrelerini denklem 3.88 ve 3.89'da belirtildiği şekilde elde etmiştir. Bu bağıntılarda belirtilen β parametresi rezidüel birim sürtünme direncinin toplam sürtünme direncine oranı olarak belirtilmiştir. β

parametresinin değeri gevşek kum zeminler için 0.4-1.0 arasında, sıkı kumlarda ise 1-2 arasında alınabilir (Davies ve Chan, 1981).

$$c = (2 - \beta) \cdot \tau_{su} \quad (3.88)$$

$$d = \frac{\ln\left(\frac{1-\beta}{2-\beta}\right)}{s_{su}} \quad (3.89)$$

Zhang ve Zhang (2012) tarafından yapılan çalışmada a ve b parametrelerinin çarpımı denklem 3.90'da verildiği şekilde elde edilmiştir.

$$a \cdot b = \frac{2\beta}{\beta - 1 + \sqrt{1-\beta}} \cdot \frac{\tau_{su}}{s_{su}} \quad (3.90)$$

Denklem 3.85 ve 3.89 numaralı bağıntıların eşleştirilmesiyle a parametresi için denklem 3.91 numaralı bağıntı elde edilir.

$$a \cdot \left\{ 1 - e^{-[2\beta/(\beta-1+\sqrt{1-\beta})] \cdot (\tau_{su}/a)} \right\} = (1 - \alpha) \cdot \tau_{su} \quad (3.91)$$

Kazık uç oturması değeri, nihai kazık uç direncine karşılık gelen oturma değerinden (s_{bu}) az olduğunda kazık uç oturması ile uç direnci arasında lineer elastik bir ilişki vardır (Xia ve Zou, 2017). Kazık uç oturmasının s_{bu} değerinden büyük olması durumunda ise kazık uç oturması değişen yük değerlerine göre hiperbolik olarak artım gösterir (Şekil 3.12). Uç direnci ile uç oturması arasındaki ilişki parçalı fonksiyonla aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

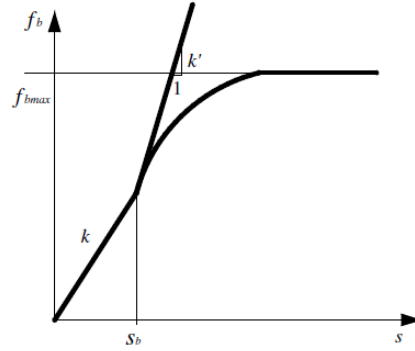
$$\tau_b(s_b) = \begin{cases} k \cdot s_b, & s_b < s_{bu} \\ \frac{s_b - s_{bu}}{v + w \cdot (s_b - s_{bu})}, & s_b > s_{bu} \end{cases} \quad (3.92)$$

$\tau_b(s_b)$: Kazık uç oturmasına karşılık gelen kazık uç direnci,

k : Kazık uç yükü ve uç oturması arasındaki ilişkinin lineer elastik olması durumunda grafiğin eğim değeri.

Denklem 3.92'deki v parametresi, sürtünme direncinde olduğu gibi $\tau_b(s_{bu}) = \tau_{bu}$ eşitliğinden $v = \frac{1}{k'}$ olarak belirlenir. k' değeri Şekil 3.12'de gösterilen grafiğin lineer

olmayan kısmının başlangıç eğimidir ve söz konusu Xia ve Zou (2017) yönteminde $k = k'$ olarak alınmıştır.



Şekil 3.12 : Kazık uç direnci ile uç oturması arasındaki ilişki (Xia ve Zou, 2017).

Denklem 3.92'deki parçalı fonksiyonun 2. kısmı için $s \rightarrow \infty$, τ_{bu} değeri şu şekilde yazılır (Xia ve Zou, 2017):

$$\tau_{bu} = \frac{1}{w} + k \cdot s_b \quad (3.93)$$

Randolph ve Wroth (1978), k parametresini denklem 3.94'deki bağıntıda verildiği şekilde önermiştir.

$$k = \frac{4G_b}{\pi r_0(1 - \nu_b)} \quad (3.94)$$

Denklemde yer alan G_b değeri kazık tabanındaki zeminin kaymam modülü ve ν_b değeri ise yine kazık tabanındaki zeminin Poisson oranıdır.

Denklem 3.92'deki fonksiyonlarda yer alan s_{bu} değerini belirlemek oldukça karmaşıktır. Zhang ve Zhang (2012) yönteminde de kullanılan bu değer için saha deneylerine bağlı olarak çalışmalar yapmıştır. Yaptığı yükleme deneylerinden geri hesaplamalar ile s_{bu} değerinin aralığını zemin jeolojik yapısına göre 1.2-8.3mm arasında değiştiğini belirtmiştir (Zhang ve Zhang, 2012).

Xia ve Zou (2017) yönteminin uygulama adımları yukarıda belirtilen bağıntılara bağlı olarak şu şekilde belirtilmiştir:

- 1) Başlangıçta diğer yöntemlerde olduğu gibi küçük bir s_{b1} değeri kabul edilir.
- 2) Kabul edilen s_{b1} değerinden denklem 3.92'deki parçalı fonksiyon kullanılarak P_{b1} (kazık ucuna gelen yük) elde edilir.

- 3) $\Delta s = s_{b1}$ kabulü yapılarak kazığın tabandan 1. parçasının sürtünme direnci τ_{s1} , denklem 3.85'deki parçalı fonksiyon kullanılarak elde edilir.
- 4) 1. parçanın tepe noktasındaki kuvvet, P_{t1} aşağıda verilen bağıntıyla elde edilir.

$$P_{t1} = P_{b1} + 2\pi r_0 l_1 \tau_{s1} \quad (3.95)$$

- 5) Kazık 1. parçasına gelen ortalama yük şu şekilde hesaplanır.

$$P_1 = \frac{P_{b1} + P_{t1}}{2} \quad (3.96)$$

- 6) Kazık 1. parçasının toplam elastik sıkışması ise şu şekilde hesaplanır.

$$\varepsilon_1 = \frac{P_1 l_1}{E_p A_p} \quad (3.97)$$

- 7) Bu durumda kazık 1. parçasının üst noktasındaki oturma değeri (s_{t1}) taban oturması ve elastik sıkışmanın toplamına eşittir.

$$s_{t1} = \varepsilon_1 + s_{b1} \quad (3.98)$$

- 8) Boonyatee ve Lai (2017) ve Zhang ve diğ. (2016) yöntemlerinde belirtildiği üzere tabandan itibaren kazık baş kısmına kadar $s_{b(i)} = s_{t(i-1)}$, $P_{bi} = P_{t(i-1)}$ kabulüyle yukarıdaki işlemler kazık baş kısmına gelene kadar tekrarlanır. Böylece kazık başına gelen yük ve oturma değerleri elde edilmiş olur.

4. İNCELENEN KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

4.1 İskenderun Enerji Santrali Projesi

İskenderun Enerji Santrali Projesi kapsamında kazıkların taşıma gücünü elde edebilmek için statik yükleme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme deneyi için proje sahasının farklı bölgelerinde yapılan $\Phi 80\text{cm}$ çaplı test fore kazık boyları 30, 35, 40 ve 45 m boylarında imal edilmiştir. Yapılan statik yükleme deneylerinden 3 tanesi (30, 35 ve 40 m boylarındaki test kazıkları) enstrümanlı olarak yapılmıştır. Enstrümanlı olarak imal edilen test kazıklarının donatılarına belli aralıklarla gerinim ölçerler (strain gage) bağlanmıştır. Gerinim ölçerler sayesinde test kazıkları boyunca zeminin birim sürtünme direnci ve uç direnci elde edilebilmektedir. Bu sayede fore kazık oturma hesaplarının sağlaması daha güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir.

Test fore kazıkları dört farklı boy için ayrı ayrı numaralandırılmıştır. 30, 35, 40 ve 45m boylarındaki test kazıkları sırasıyla ITKS-1, ITKS-2, ITKS-3 ve ITKS-4 olarak numaralandırılmıştır. Bu bölümde; büyük bir sahada tasarlanan İskenderun Projesi kapsamında imal edilen test kazıklarının imal edildiği bölgelerdeki zemin birimlerinin tanımı ve parametreleri, yapılan deney yöntemi ve deney sonuçları açıklamaları ve son olarak deney sonuçlarının değerlendirilmeleri yer almaktadır.

4.1.1 Zemin bilgisi

Deney sahası, İskenderun Körfezi'nin doğu kıyılarında yer almakta olup, bir kıyı alüvyonu üzerinde bulunmaktadır.

Konumu nedeniyle doğusundaki Amanos'ların sarp batı yamaçlarından taşınan kaba malzemelerinden oluşan Akarsu Çökelleri ve Genç Deniz Çökellerinin oluşturduğu malzemedan meydana gelmektedir. Kuvaterner yaşlı bu birimler Alüvyon kökenlidir. Kıyı alüvyonlarının altında eski Alüvyon Sekisi yer almaktadır. Sahadaki zemin birimleri genel olarak orta sıkı killi çakıllı kum, orta katı-katı çakıllı kumlu kil, orta sıkı killi kumlu çakıl ve daha aşağı seviyelerde ise çok katı kumlu siltli kil birimlerden oluşmuştur.

Proje sahasında zemin profilinin ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 15-64.5 arasında değişen derinliklerde toplam 99 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj çalışması sırasında arazi deneyi olarak bütün sondajlarda her 1.5 m’de SPT deneyleri yapılmıştır. Yapılan sondajlarda maksimum 41.50 m derinliğe kadar Alüvyon Çökelleri tespit edilmiştir. Bunların altında da eski Alüvyonlar yer almaktadır. Sahada yeraltı suyuna yüzeyden 6.40-7.70 m arasında rastlanılmıştır. Yapılan hesaplarda yeraltı suyu kazık üst kotundan 5m aşağıda alınmıştır. Zeminlerin yerinde deformasyon modülü ve dayanımını ölçmek için Menard G tipi presiyometre aleti kullanılmıştır. Toplam 21 farklı sondaj noktasında farklı derinliklerde presiyometre deneyi uygulanmıştır. Zemin deformasyon hesaplarında yapılan presiyometre deney sonuçları büyük önem arz etmektedir. Projede sahanın büyüklüğü ve alüvyonel birimlerdeki zemin mukvemet parametrelerinin değişkenliğinden ötürü her bir test sahası için ayrı ayrı zemin tabaka kalınlıkları ve zemin parametreleri belirlenmiştir. ITKS-1 kazığı baca binası bölgesinde, ITKS-2 numaralı test kazığı türbin binası bölgesinde, ITKS-3 ve ITKS-4 numaralı test kazıkları ise kazan binası bölgesinde imal edilmiştir. ITKS-3 ve ITKS-4 numaralı kazıkları aynı bölgede imal edildiği için benzer zemin profili ve parametreleri belirlenmiştir. Bu yüzden İskenderun projesi için 3 ayrı zemin profili belirlenmiş ve elde edilen zemin parametreleriyle beraber Çizelge 4.1-4.3’te gösterilmiştir. Test kazıkları üzerinde yapılan oturma hesaplarında çizelgelerde belirtilen zemin profili ve parametreleri kullanılmıştır. Yük-transfer yöntemleri kullanılarak yapılan oturma analizlerinde zemin kayma modülü değeri önemli olduğu için çizelgelerde bu parametre belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 : ITKS-1 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poison Oranı (μ)
Orta Sıkı KUM	6.00	19	0	32	25000	0.3
Katı Kumlu Çakıllı KİL	16.00	18	60	0	20000	0.35
Çok Katı Kumlu Çakıllı KİL	8.00	19	150	0	80000	0.3

Çizelge 4.2 : ITKS-2 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

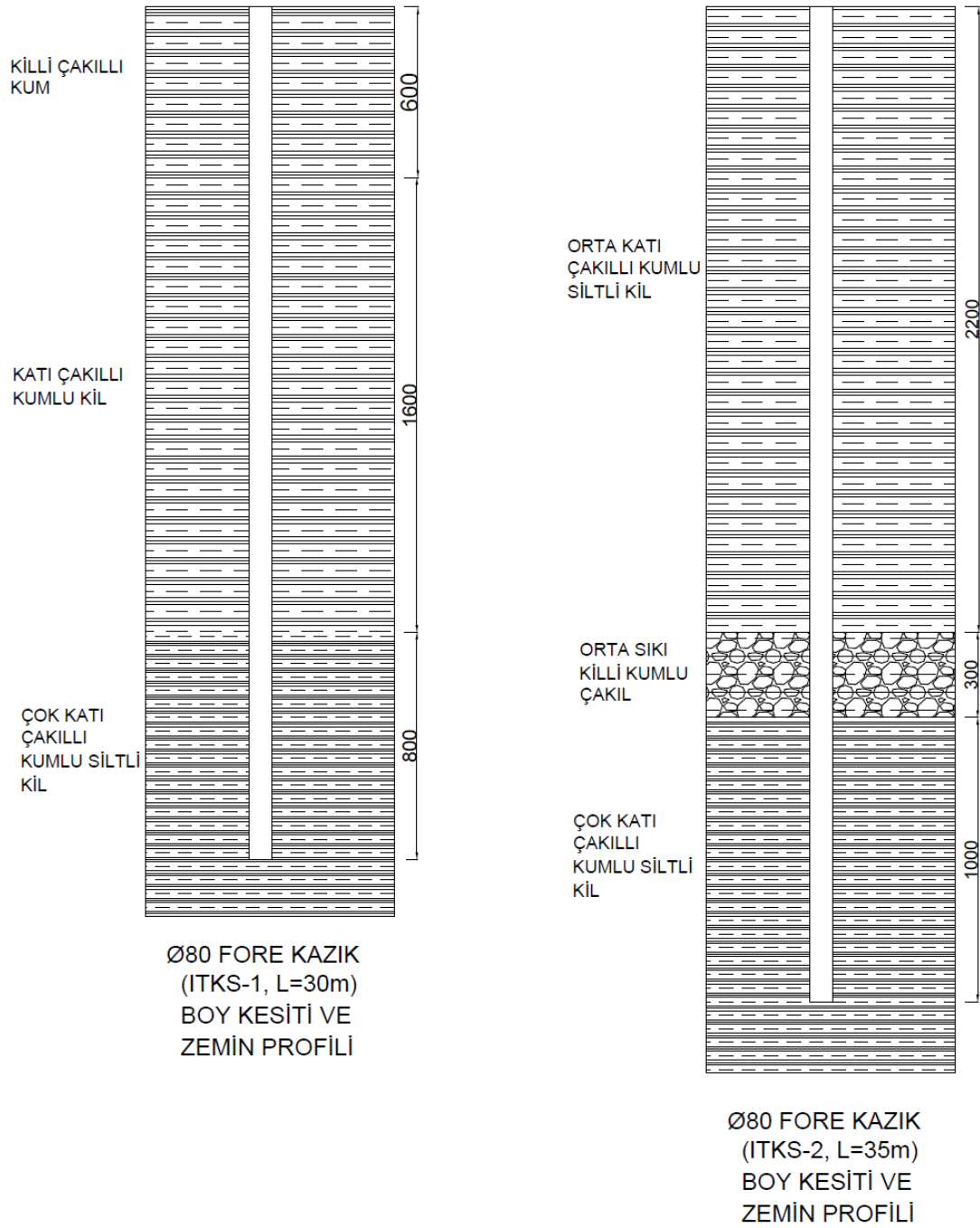
	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poisson Oranı (μ)
Orta Katı Çakıllı KİL	22.00	17	45	0	15000	0.3
Orta Sıkı Kumlu ÇAKIL	3.00	19	0	34	35000	0.35
Çok Katı Kumlu Çakıllı KİL	10.00	19	150	0	80000	0.3

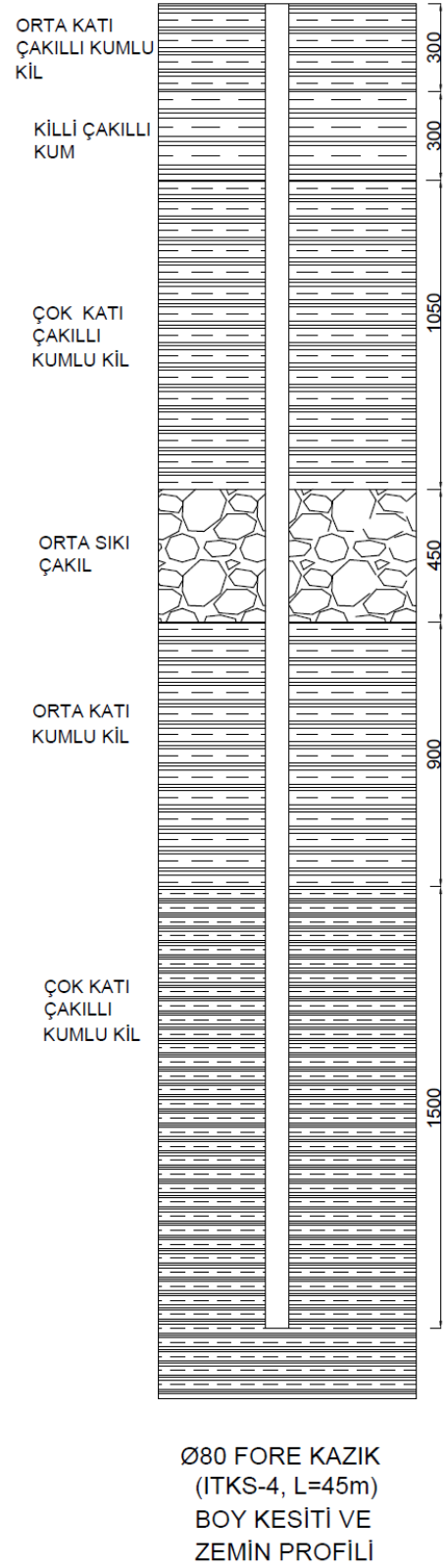
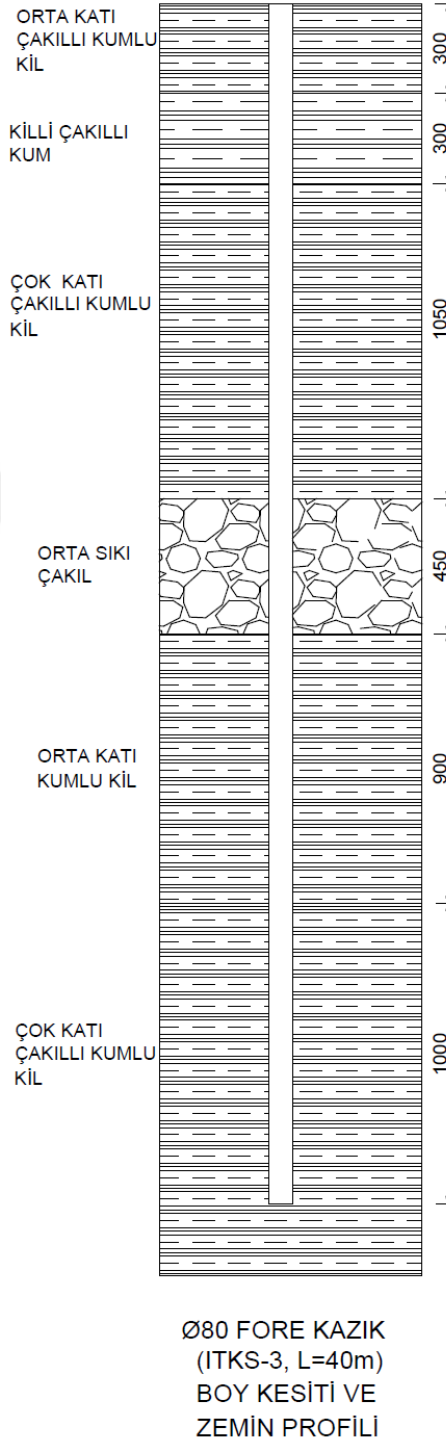
Çizelge 4.3 : ITKS-3 ve ITKS-4 için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poisson Oranı (μ)
Orta Katı Çakıllı KİL	3.00	17	45	0	15000	0.4
Orta Sıkı KUM	3.00	19	0	32	20000	0.3
Çok Katı Kumlu Çakıllı KİL	10.5	19	150	0	30000	0.3
Orta Sıkı Kumlu ÇAKIL	4.50	19	0	34	35000	0.35
Orta Katı Kumlu KİL	9.00	17	45	0	20000	0.4
Çok Katı Kumlu Çakıllı KİL	10-15	19	150	0	80000	0.3

İskenderun projesi kapsamında imal edilen her bir test kazığı için kazık kesiti ve zemin profilleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge ve şekillerde belirtilen zemin birimleri ve parametreleri dikkate alınarak yapılan taşıma gücü hesaplarına göre $\Phi 80$ cm çaplı fore kazık tasarım dayanımı 3000 kN olarak hesaplanmış ve statik yükleme deney programları bu yük değerine göre belirlenmiştir.



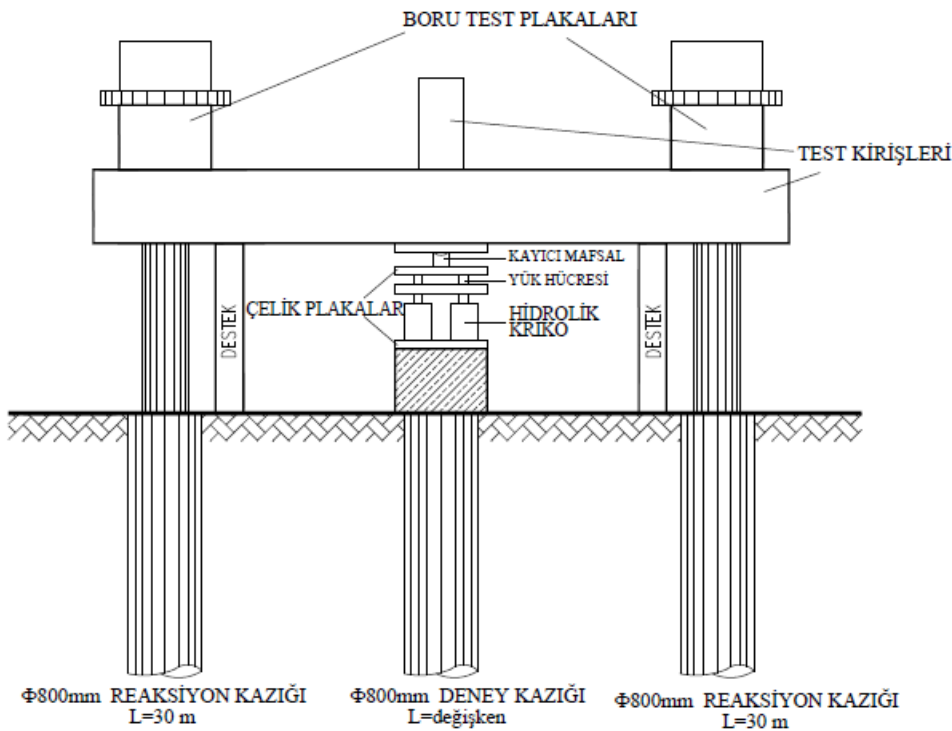


Şekil 4.2 : ITKS-3 ve ITKS-4 boy kesiti ve zemin profili.

4.1.2 Yükleme deneyi sistemi ve deney programı

İskenderun Projesi kapsamında yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda bütün test kazıklarında proje yükü 3000 kN olarak belirlenmiştir. Deneyde yükleme kademesi proje yükünün %25'i olarak alınmıştır. Maksimum yük proje yükünün %300'ü (9,000 kN) olarak belirlenmiştir. Yalnız deney reaksiyon sistemi 12,000 kN yüke uygun olarak teşkil edilmiştir. Bu yüzden bazı deneylerde 9,000 kN değerine kadar göçme meydana gelmediği için yüklemeye devam edilmiştir.

Statik yükleme deneyleri, ASTM-D1143/ D1143M-07 (Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load) standardına uygun olarak yapılmıştır. Standartta 3 farklı reaksiyon sisteminden söz edilmektedir. İskenderun'da uygulanan yükleme deneyinde test kazığına, çevresinde imal edilen 4 adet fore kazıktan reaksiyon olarak hidrolik kriko yardımıyla yükleme yapılmıştır. Reaksiyon kazıklarının çapları 80cm ve boyları 30 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca hidrolik krikolardan uygulanan yükleri kontrol etmek amacıyla yük hücreleri de (load cell) her bir kriko üzerine merkezci olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney sistem kesiti Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 : Deney sistem kesiti.

Proje yükü değerine ulaşabilmek için çıkılan her yük kademesinde beklenen yarım saat boyunca bütün ara beklemelemlerde 5 ve 10'ar dakikalık okumalar alınmıştır. Çizelge

4.4'te yükleme deneylerinde uygulanan yük adımları, yükler ve bekleme süreleri detaylı olarak verilmiştir. Yükleme üç çevrimli yapılmıştır. Birinci çevrimde kanıt yükleme prosedürü uygulanırken ikinci ve üçüncü çevrimlerde genişletilmiş kanıt yükleme deney prosedürü uygulanmıştır. Deneyde ara beklemelerde bu prosedürlere uygun olan minimum bekleme süreleri uygulanmıştır.

Kanıt yükleme deney prosedürüne göre bir sonraki yük adımına geçmeden önce aşağıda sıralanan kriterler kontrol edilmelidir.

- 30 dakika içinde oluşan oturma miktarı, o anda oluşan toplam oturma miktarının %0.5'inden az olmalıdır.
- 30 dakika içinde oluşan oturma miktarı 0.05 mm'den az olmalıdır.

İskenderun'da yapılan yükleme deneylerinin üç adedinde (I-TKS1, I-TKS2 ve I-TKS3) test kazığı içine gerinim ölçerler (strain gage) yerleştirilerek kazık boyunca etki eden birim şekil değiştirme verileri alınmış ve bunun sonucunda zemin-kazık arasındaki birim sürtünme direnç değerleri hesaplanmıştır. Gerinim ölçerler her 4 m'de 1 kademe olmak üzere I-TKS1 kazığında 8 kademe, I-TKS2 kazığında 10 kademe ve I-TKS3 kazığında ise toplam 11 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Her kademede kontrol amaçlı toplam üçer adet gerinim ölçer bağlanmıştır. Şekil 4.4'de örnek olarak I-TKS3 numaralı enstrümanlı test kazığına ait boy kesit verilmiştir.

Her bir gerinim ölçere etki eden yük denklem 4.1'de verildiği şekilde hesaplanır.

$$P = \varepsilon EA \quad (4.1)$$

Bu formülde;

P= yük

ε = gerinim ölçerlerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri

A= Fore kazık kesit alanı

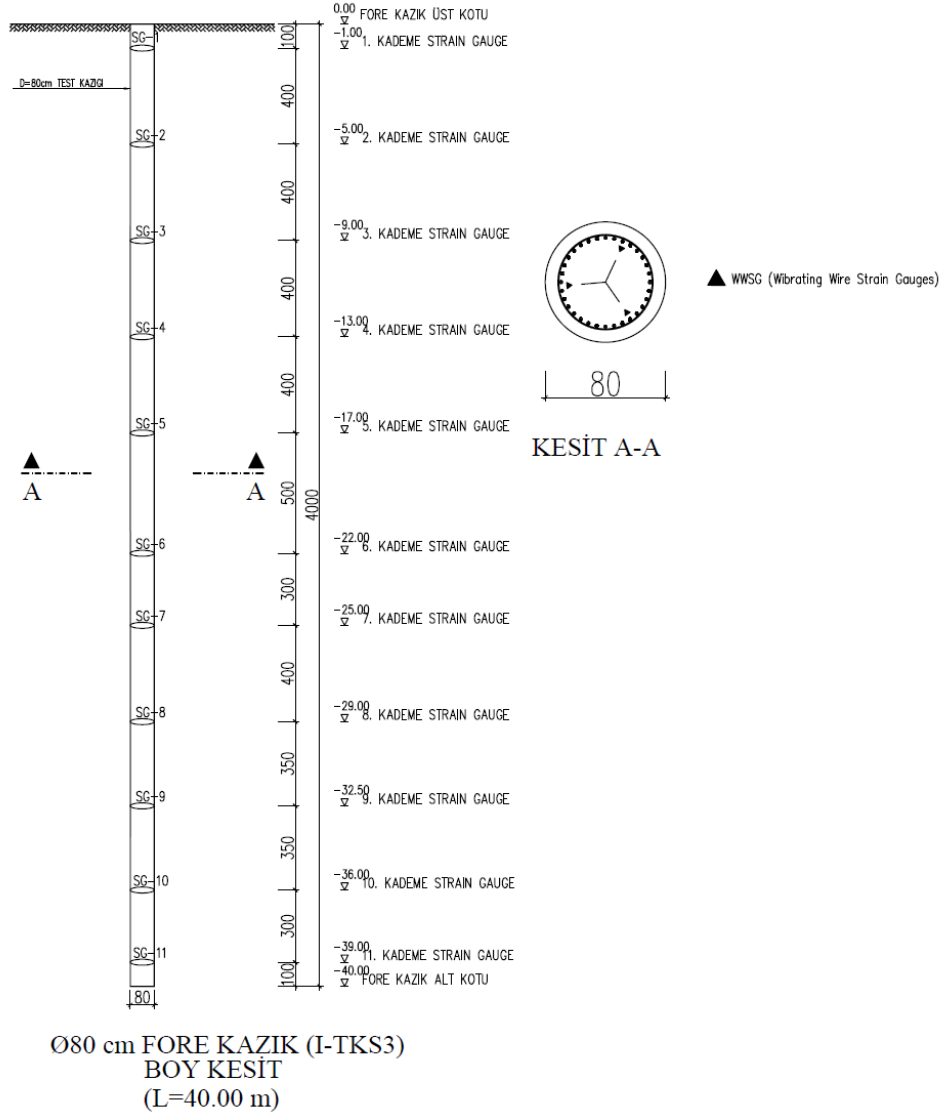
E= Çelik ve betondan oluşan kompozit malzemenin elastisite modülü.

Çeliğin elastisite modülü için net değerler verilebilir ancak fore kazık imalatında dökülen beton malzemesi için aynı durum söz konusu değildir. Ayrıca statik yükleme öncesinde ve yükleme sırasında bütün kazık boyunca elastisite modülü aynı olmayacaktır. Bu deneylerde her bir kademeye gelen yük hesabı en üst kademede (test

kazığı üst kotundan 1m aşağıda) yer alan gerinim ölçerlere etki eden yükün uygulanan yük olduğu kabulü yapılmıştır.

Çizelge 4.4 : Deney programı.

Eksenel Statik Yükleme Deneyi					
Yük Adımı	Yük	Proje Yüğü (%)	Yük (kN)	Minimum Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)
1	25%DVL	25	750	20dk	0,5,5,10
	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
	75%DVL	75	2250	20dk	0,5,5,10
	100%DVL	100	3000	1sa	0,5,5,5,15,15,15
	75%DVL	75	2250	20dk	0,5,5,10
	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
	25%DVL	25	750	20dk	0,5,5,10
	0	0	0	20dk	0,5,5,10
2	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
	100%DVL	100	3000	20dk	0,5,5,10
	125%DVL	125	3750	20dk	0,5,5,10
	150%DVL	150	4500	20dk	0,5,5,10
	175%DVL	175	5250	20dk	0,5,5,10
	200%DVL	200	6000	12sa	0,5,5,5,15,15,15,30,30,30,30,60,60,60,60,60,60,60
	150%DVL	150	4500	20dk	0,5,5,10
	100%DVL	100	3000	20dk	0,5,5,10
	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
	25%DVL	25	750	20dk	0,5,5,10
	0	0	0	1sa	0,5,5,5,15,15,15
	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
3	100%DVL	100	3000	20dk	0,5,5,10
	150%DVL	150	4500	20dk	0,5,5,10
	200%DVL	200	6000	20dk	0,5,5,10
	225%DVL	225	6750	20dk	0,5,5,10
	250%DVL	250	7500	20dk	0,5,5,10
	275%DVL	275	8250	20dk	0,5,5,10
	300%DVL	300	9000	2sa	0,5,5,10,10,30,60
	250%DVL	250	7500	20dk	0,5,5,10
	200%DVL	200	6000	20dk	0,5,5,10
	100%DVL	100	3000	20dk	0,5,5,10
	50%DVL	50	1500	20dk	0,5,5,10
	0	0	0	20dk	0,5,5,10
25sa 20 dk Proje Tasarım Yüğü, 3000kN DVL					



Şekil 4.4 : I-TKS-3 kazığına ait gerinim ölçer seviyeleri.

4.1.3 Yükleme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Her bir yükleme deneyi çizelge 4.4'te verilen programa uygun olarak yapılmıştır. Bütün yük adımlarına karşılık gelen oturma değerleri deney programına uygun olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir test kazığı için elde edilen kritik yükler altındaki oturma değerleri çizelge 4.5-8'de verilmektedir.

Elde edilen oturma değerleri sonuçlarında ve yük-oturma grafiklerinde görüldüğü üzere I-TKS-1, I-TKS-2 ve I-TKS-4 numaralı test kazıklarında göçme gözlenmiştir. I-TKS3 numaralı test kazığında ise deney sırasında 9000 kN değerinden büyük yük

uygulanmamış ve bu test kazığında göçme gözlemlenmemiştir. Deney sonunda dört adet test kazığında elde edilen yük-oturma grafikleri şekil 4.5-8’de gösterilmektedir.

ITKS-1 numaralı kazıkta 3. çevrimde 9000 kN değerindeki yükte oturma değeri 21.49 mm olarak okundu. Ardından reaksiyon kazıklarındaki deplasman miktarı kritik düzeyin altında olduğu için yüklemeye devam edildi. 11250 kN değerine gelindiğinde oturma artışı hızlandı ve 11250 kN değerinde 64.06mm olarak ölçüldü. ITKS-1 numaralı kazığa ait yük-deplasman grafiğinde 10500 kN ve 11250 kN yükleri arasında kazığın göçtüğü görülmektedir. Bu durum aynı zamanda yükün 11250 kN değerinden boşaltılmaya başladığında anlaşılmaktadır. Toplam plastik oturma 53.71 mm olarak ölçülmüştür.

ITKS-2 numaralı kazıkta 3. çevrimde 8250 kN değerine gelindiğinde bar saati geriye döndü ve deformasyon ölçerlerde oturma hızının arttığı gözlemlendi. 8250 kN yükte son okunan değerlere göre oturma miktarı 50.65 mm olarak ölçüldü.

ITKS-3 numaralı kazıkta 3. Çevrimde proje yükünün %300’ünde karşılık gelen 9000 kN değerindeki yükte toplam oturma değeri 14.52 mm ve toplam plastik oturma değeri 4.02 mm olarak ölçülmüştür. P3 numaralı kazıkta göçme gözlemlenmemiştir ve fore kazık 9000 kN değerindeki yükü güvenli bir şekilde taşımıştır. Söz konusu kazık deneyinde pompa arızası olduğu için 9000 kN yük değerinden sonra yük kademeli olarak boşaltılarak 0 değerine kadar düşülmüştür.

Çizelge 4.5 : Oturma değerleri (ITKS-1).

YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
3000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	2.76	0.91
3,000 kN (2.çevrim) (100% DWL)	2.87	-
6,000 kN (2. çevrim) (100% DWL+100%SWL)	8.82	4.42
3,000 kN (3. çevrim) (100% DWL)	6.60	-
6,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	9.45	-
9,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+200%SWL)	21.49	-
10,500 kN (3.çevrim) (100% DWL+250%SWL)	41.49	-
11,250 kN (3.çevrim) (100% DWL+275%SWL)	64.06	53.71

Çizelge 4.6 : Oturma değerleri (ITKS-2).

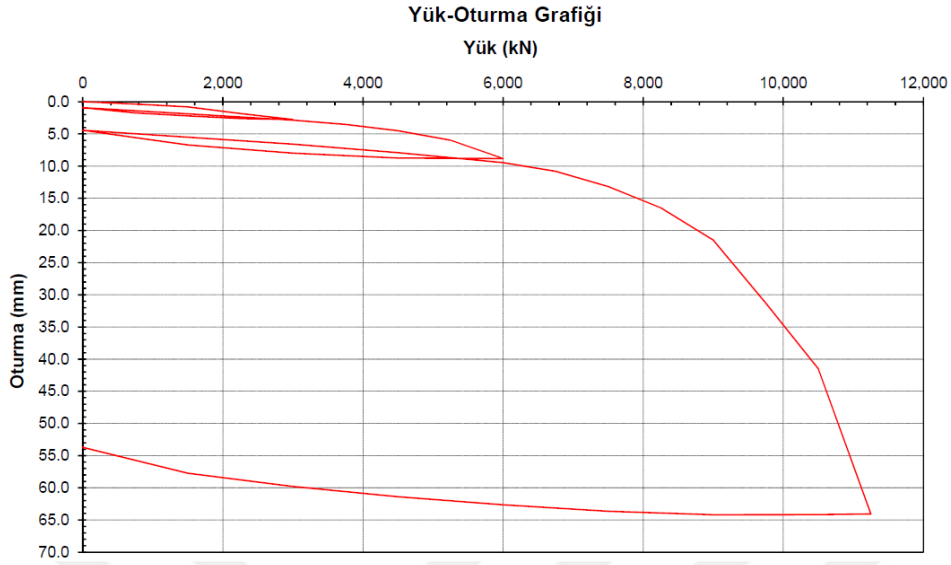
YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
3000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	3.03	0.54
3,000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	3.34	-
6,000 kN (2.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	10.66	4.24
3,000 kN (3.çevrim) (100% DWL)	7.95	-
6,000 kN (100% DWL+100%SWL)	11.88	-
7,500 kN (100% DWL+150%SWL)	20.45	-

Çizelge 4.7 : Oturma değerleri (ITKS-3).

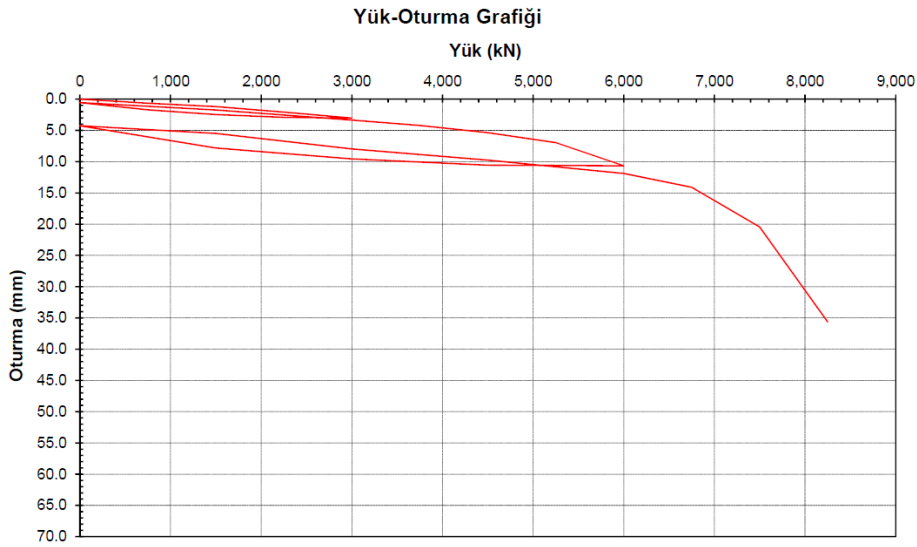
YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
3000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	2.38	0.59
3,000 kN (2.çevrim) (100% DWL)	2.64	-
6,000 kN (2.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	8.22	2.40
3,000 kN (3.çevrim) (100% DWL)	5.13	-
6,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	8.23	-
9,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+200%SWL)	14.52	4.02

Çizelge 4.8 : Oturma değerleri (ITKS-4).

YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
3000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	3.34	1.00
3,000 kN (1.çevrim) (100% DWL)	3.48	-
6,000 kN (2.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	9.01	2.51
6,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+100%SWL)	9.29	-
9,000 kN (3.çevrim) (100% DWL+200%SWL)	17.71	-
9,750 kN (3.çevrim) (100% DWL+200%SWL)	20.45	-
10,500 kN (3.çevrim) (100% DWL+250%SWL)	56.99	-

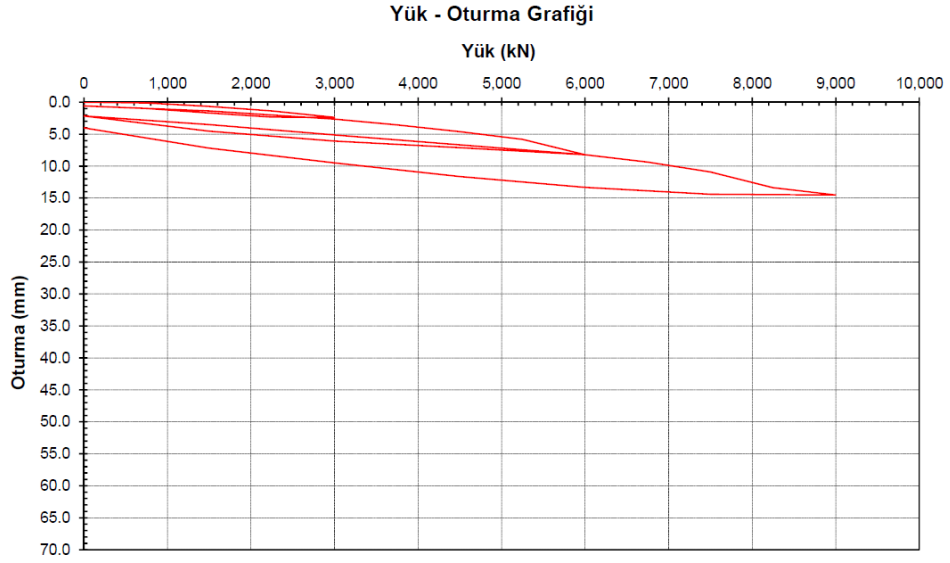


Şekil 4.5 : Yük-oturma grafiği (ITKS-1).

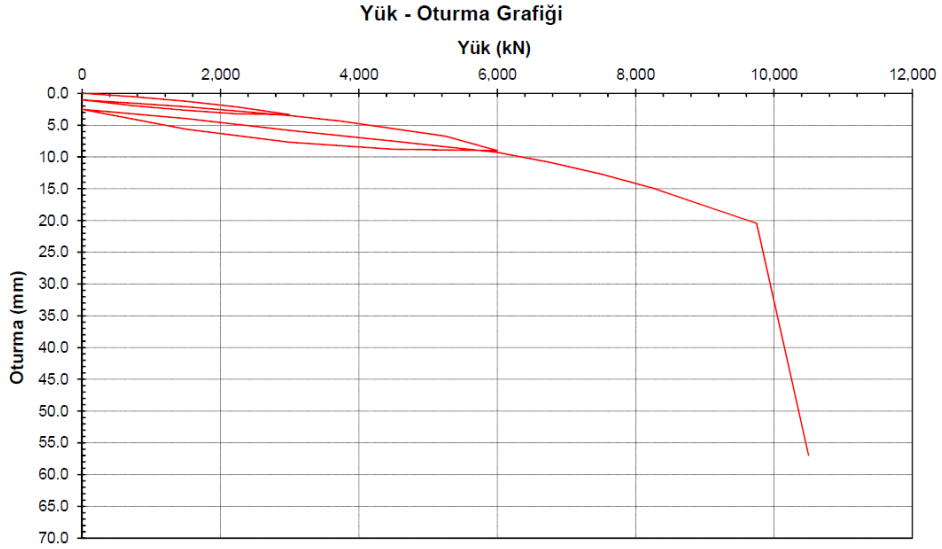


Şekil 4.6 : Yük-oturma grafiği (ITKS-2).

ITKS-4 numaralı kazıkta 3. çevrimde 9000 kN değerindeki yükte oturma değeri 17.71 mm olarak okundu. Ardından reaksiyon kazıklarındaki deplasman miktarı kritik düzeyin altında olduğu için yüklemeye devam edildi. 10500 kN değerine gelindiğinde oturma artışı hızlandı ve bu yükte oturma 56.99mm olarak ölçüldü. 10500 kN yük değerine gelindiğinde bar saati geriye düştü ve fore kazığa daha fazla yük uygulanamadı. ITKS-4 numaralı kazığa ait yük-deplasman grafiğinde 10500 kN değerinde kazığın göçtüğü görülmektedir.



Şekil 4.7 : Yük-oturma grafiği (ITKS-3).



Şekil 4.8 : Yük-oturma grafiği (ITKS-4).

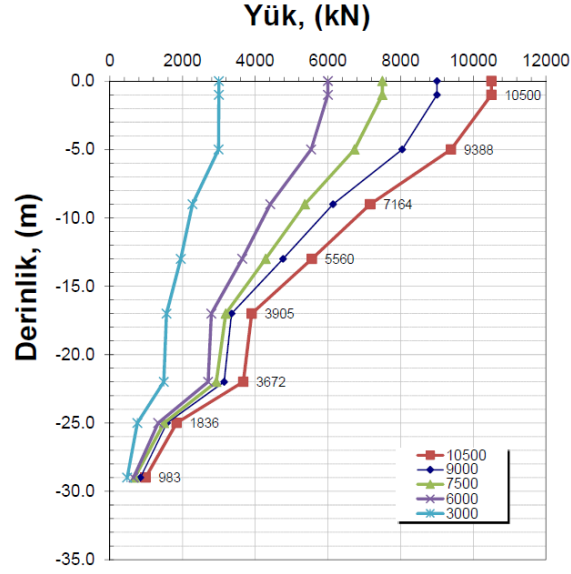
ITKS-1 numaralı kazık 11250 kN yükte göçme gözlemlendiği için maksimum 10500 kN yük için strain gage okumaları dikkate alınmıştır. Maksimum 10500 kN yük değerinde her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri $25.862 \text{ kN}/\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. ITKS-2 numaralı test kazığında maksimum 8250 kN yük değerinde her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri $18.102 \text{ kN}/\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. ITKS-3 numaralı test kazığında ise maksimum 9000 kN yük değerinde ise her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri $19.164 \text{ kN}/\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Bütün kademelerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri arasındaki farklar ($\Delta\epsilon$) yardımıyla test kazığı boyunca etki eden yük değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.1-3'te belirtilen zemin özellikleri ve parametreleri ile elde edilen sürtünme dirençleri ile

yükleme deneyinde gerinim ölçerler ile elde edilen sürtünme direnci değerleri Çizelge 4.9'da karşılaştırılmıştır. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 40-200 kPa arasında değişmektedir. Ayrıca kil birimlerde elde edilen sürtünme direnci değerleri beklendiği üzere granüler zemin birimlerinden daha büyük çıkmıştır. Çizelgede ve grafiklerde görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri genel olarak gerinim ölçerlerden elde edilen değerlere göre düşük çıkmıştır. Oturma analizlerinin sağlamlasının doğru yapılması için sahada kazık oturma hesaplarında ölçülen birim sürtünme direnci verileri kullanılmıştır.

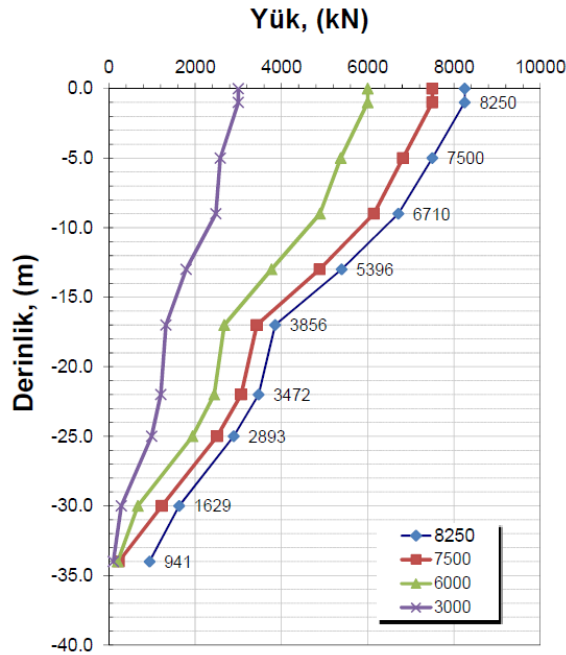
Çizelge 4.9 : Birim sürtünme direnci değerleri.

I-TKS1				I-TKS2			
Zemin Cinsi	Kalınlık, d (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)	Zemin Cinsi	d (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)
Orta Sıkı Kum	6.00	20	110	Orta Katı Kil	5.00	45	75
Katı Kil	3.00	60	221	Orta Katı Kil	4.00	45	79
Katı Kil	4.00	60	159	Orta Katı Kil	4.00	45	130
Katı Kil	4.00	60	164	Orta Katı Kil	4.00	45	153
Katı Kil	5.00	60	23	Orta Katı Kil	5.00	45	31
Çok Katı Kil	3.00	105	186	Orta Sıkı Çakıl	3.00	80	77
Çok Katı Kil	5.00	105	85	Çok Katı Kil	5.00	105	101
				Çok Katı Kil	5.00	105	110
I-TKS3							
Zemin Cinsi	Kalınlık, d (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)				
Orta Katı Kil	4.00	45	109				
Orta Sıkı Kum	4.00	60	41				
Çok Katı Kil	4.00	105	120				
Çok Katı Kil	4.00	105	185				
Orta Sıkı Çakıl	5.00	60	43				
Orta Katı Kil	3.00	45	172				
Orta Katı Kil	4.00	45	48				
Orta Katı Kil	3.50	45	89				
Çok Katı Kil	5.00	105	114				
Çok Katı Kil	3.50	105	92				

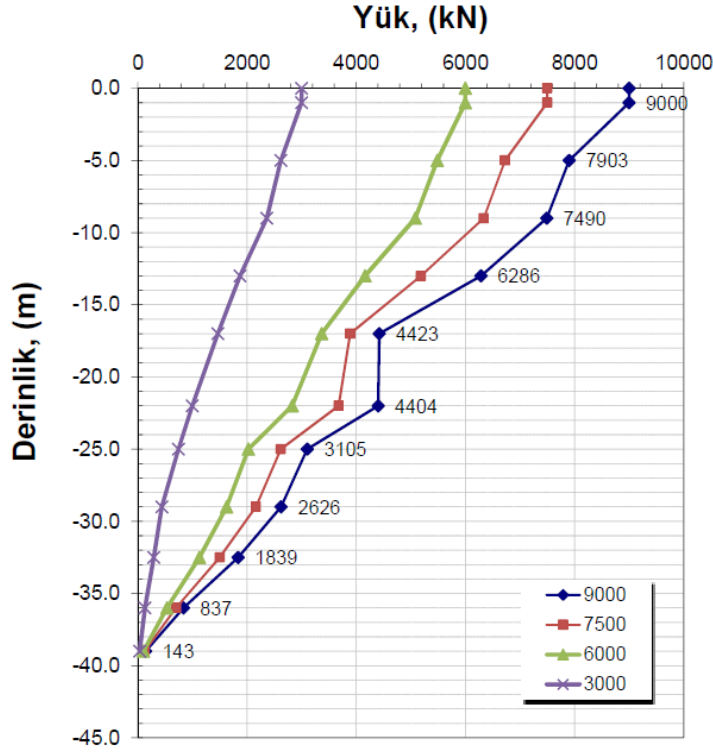
Kazıklara etki eden yüklerin derinliğe bağlı değişimlerini gösteren grafikler şekil 4.9-11’de verilmiştir. Eksenel yük değerleri her kritik yük kademesi için ve bütün gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanıp grafiklerde belirtilmiştir. Hesaplanan her kademedeki ΔP ($P_n - P_{n-1}$) yük farkı değerleri kazık çevre alanlarına bölündüğünde her kademedeki birim sürtünme dirençleri (τ_s) elde edilmiştir. Şekil 4.12-14’de verilen grafiklerde ise elde edilen bu değerlerle beraber hesaplanan sürtünme direnci değerleri ve zemin logu da grafiğe işlenmiştir.



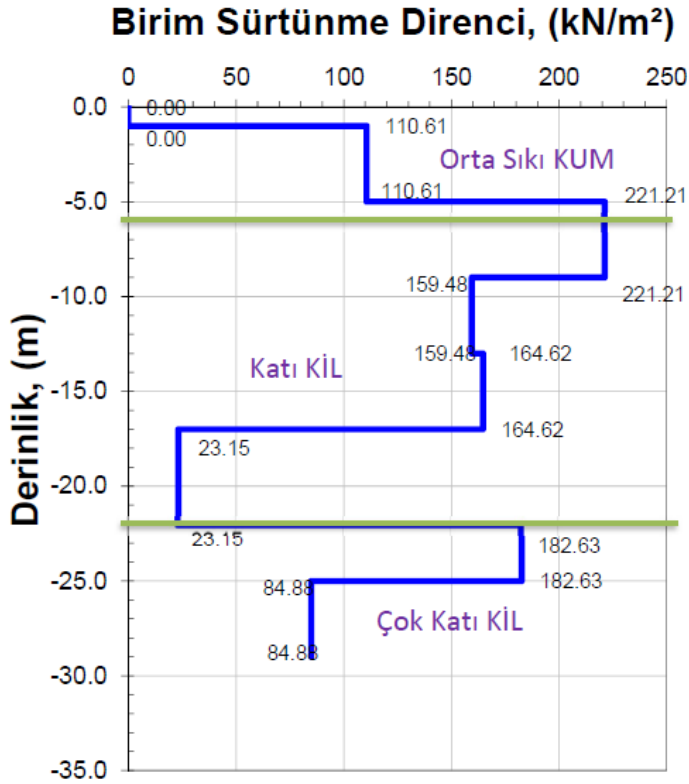
Şekil 4.9 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-1).



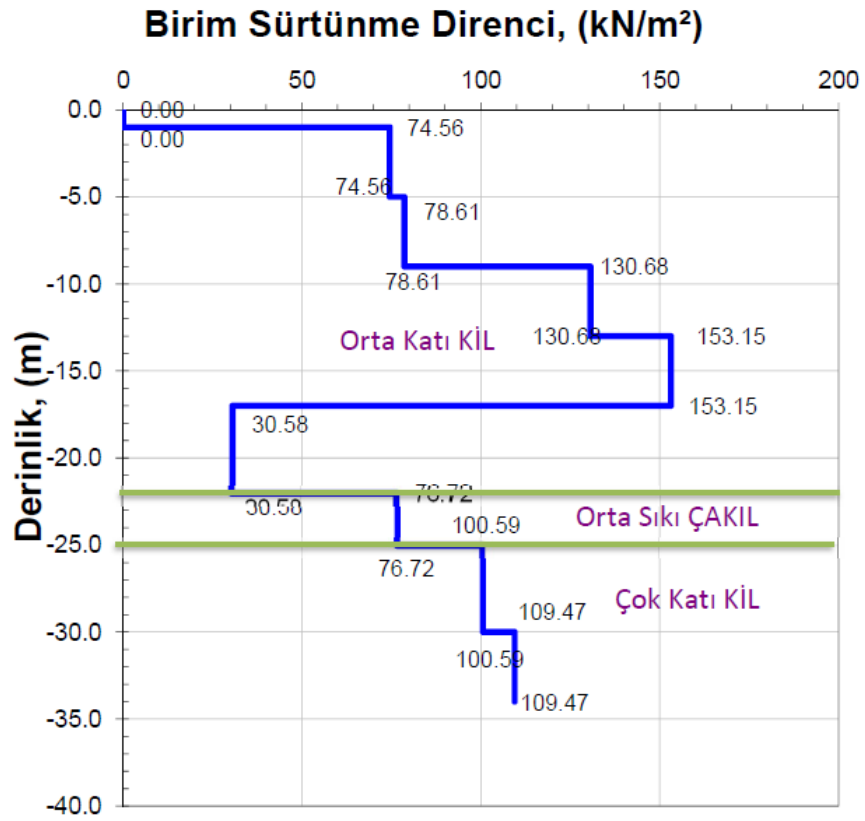
Şekil 4.10 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-2).



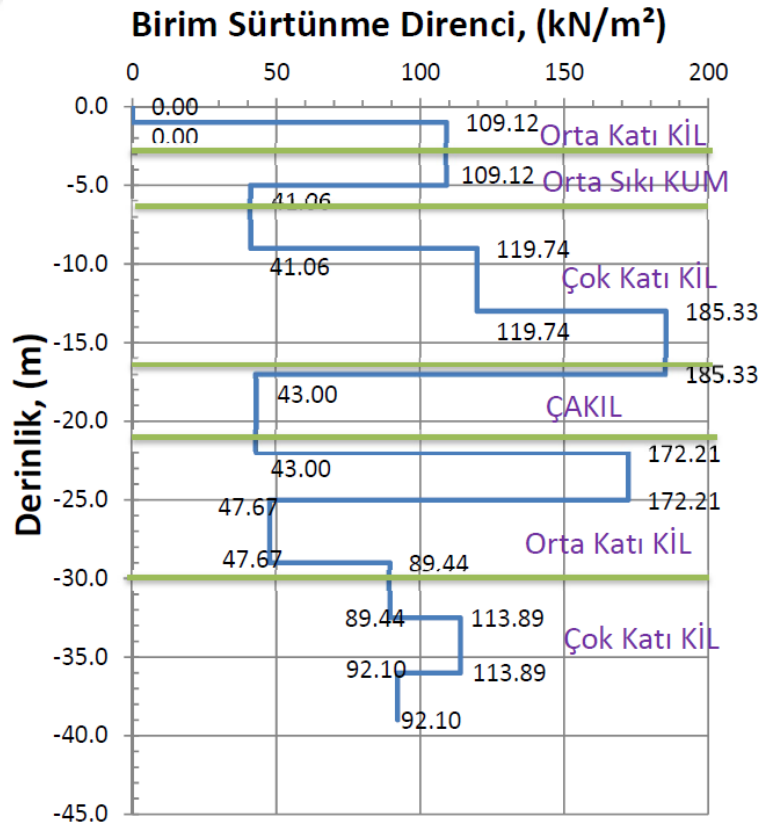
Şekil 4.11 : Kritik yük kademeleri için farklı gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanan eksenel yük grafiği (ITKS-3).



Şekil 4.12 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-1).



Şekil 4.13 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-2).



Şekil 4.14 : Birim sürtünme direnci-derinlik grafiği (ITKS-3).

4.2 Bakü Otel Projesi

Bakü Otel Projesi kapsamında 4 adet fore kazık üzerinde enstrümanlı statik yükleme deneyi ve 2 adet fore kazık üzerinde Osterberg yükleme deneyi yapılmıştır. Deney yapılan 4 adet fore kazık proje kazıklarıdır ve kazıklar maksimum proje yüklerinin %150'sine kadar yüklenmiştir. Osterberg yükleme deneyi yapılan 2 adet fore kazık ise projeden önce imal edilen test kazıklarıdır. Test kazıklarında göçme gözlenene kadar yükleme yapılmıştır.

Otel Projesi kapsamında statik yükleme deneyi yapılan fore kazıkların 3 adedi $\Phi 200$ cm çaplı ve 1 adedi $\Phi 150$ cm çaplı imal edilmiştir. Projenin otel bölgesinde projenin etrafı palplanşlarla çevrilerek ortalama 6m yüksekliğinde deniz dolgusu yapılmıştır. Fore kazıklar bu bölgede üst kotlarından 5-7m yukarıdan imal edilmiştir ve test sonrasında fore kazıkların ilk 5-7 m'si kırılacaktır. Bu yüzden fore kazık tasarım yükleri her bir test kazığı için 1000 kN arttırılmıştır. Bu bölgede yapılan 4 adet test kazığına ait özellikler (çap, boy, tasarım yükleri) çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Test kazıklarının özellikleri (Bakü Otel Projesi).

Test Kazık No	Çap (cm)	Tasarım Boyu (m)	Toplam Boy (m)	Proje Yüğü (kN)	Artık Yüğü (kN)	Test Yüğü (kN)
BO-TK1	$\Phi 200$	52	59	13000	1000	19000
BO-TK2	$\Phi 200$	60	67	14000	1000	22000
BO-TK3	$\Phi 150$	70	76	14000	1000	22000

Sahada imal edilen proje kazıklarından önce fore kazık taşıma gücünü ve kazık-zemin etkileşimini incelemek amacıyla otel bölgesinde 2 adet osterberg yük hücresi ile kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Söz konusu kazıkların her ikisi de $\Phi 200$ cm çaplı imal edilmiştir. Çizelge 4.11'de verilen test yükleri osterberg yük hücresinden uygulanan yüklerdir. Bu yükler her iki yönlü uygulandığı için test kazığına uygulanan toplam test yükü verilen yüklerin 2 katı olarak alınır.

Çizelge 4.11 : Test kazıklarının özellikleri.

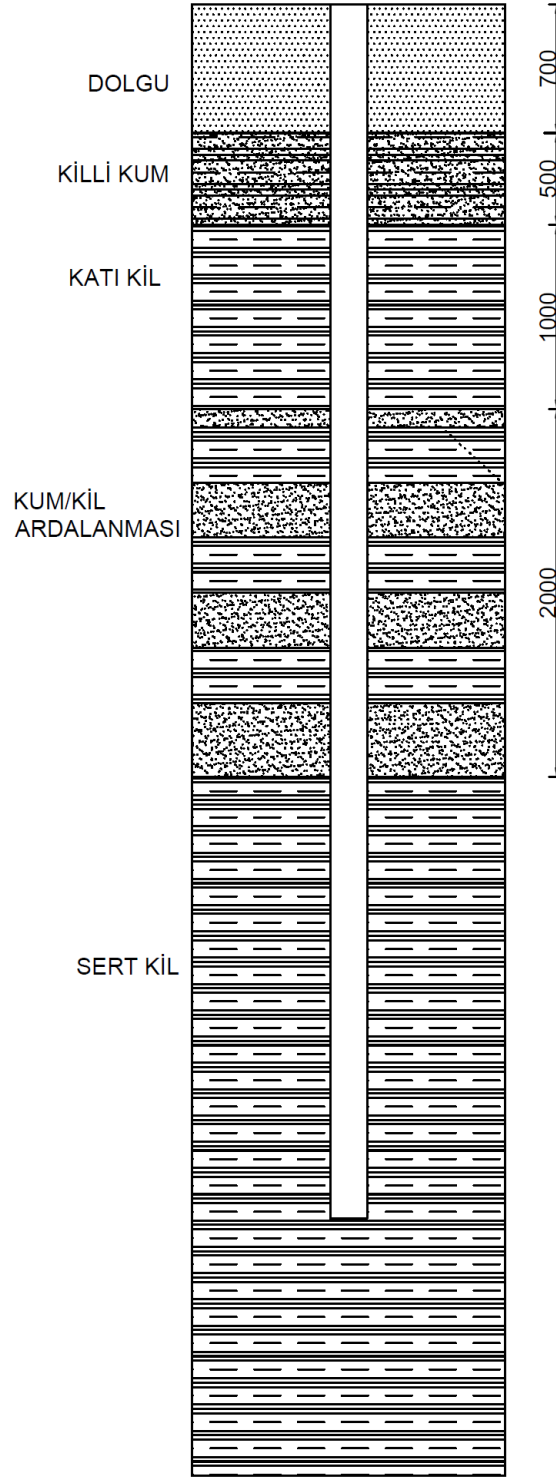
Test Kazık No	Çap (cm)	Kazık Boyu (m)	Proje Tasarım Yüğü (kN)	O-cell Test Yüğü (kN)
BO-TK4	$\Phi 200$	76.00	20000	28910
BO-TK5	$\Phi 200$	76.80	20000	25510

4.2.1 Zemin bilgisi

Otel bölgesinde yapılan sondajlardan elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinin kalınlıkları genel itibariyle büyük değişiklikler göstermemektedir. O yüzden 5 kazık için de idealize tek bir zemin profili oluşturulmuştur (Çizelge 4.12). Her 5 kazık için oluşturulan boy kesit ve zemin profili şekil 4.15’de ayrıca çizilmiştir. Test kazıklarının boyları farklılık gösterdiği için sert kil tabakasının kalınlığı 17-34.8 m arasında değişiklik göstermektedir. Zemin etüd raporunda belirtilen laboratuvar ve saha deneyleri esas alınarak zemin profili ve zemin mühendislik parametreleri de belirlenmiştir ve bu parametreler de çizelge 4.12’de belirtilmiştir. Belirlenen zemin profiline göre sahada üst 7 m’lik kısımda dolgu tabakası, bu tabakanın altında sırasıyla; killi kum, katı kil, kum-kil ar dalanması ve daha aşağı seviyelerde ise sert kil tabakalarından oluşmaktadır. Sahada yapılan SPT deneylerinden elde edilen verilere göre killi kum, katı kil, kum-kil ar dalanması ve sert kil tabakalarında ortalama SPT- N_{30} sayıları sırasıyla; 12, 25, 30 ve 50 olarak elde edilmiştir. Sahadan alınan kil numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda drenajsız kohezyon değerleri; 12-22 m arasında 100-150 kPa arasında, 22-42 m arasında 150-200 kPa arasında ve daha aşağı seviyelerde ise 200-250 kPa arasında elde edilmiştir. 22-42m arasında yer alan kum-kil ar dalanması için içsel sürtünme açısı değeri de hesaba katılmıştır. Bu yüzden bu tabakanın kohezyon değeri laboratuvar deneylerinden elde edilen değerlerden küçük (48 kPa) alınmıştır. Bakü Otel projesinde otel binasının Hazar denizinde yapılacak dolgu üzerine inşa edileceği için proje sahasının etrafı paplanşlarla çevrilerek 7 m yüksekliğinde dolgu yapılmıştır. Bu yüzden hesaplarda yeraltı suyu seviyesi yüzeyde alınmıştır.

Çizelge 4.12 : Bakü projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poison Oranı (μ)
DOLGU	7.00	17	-	-	10000	-
Killi KUM	5.00	19	0	29	60000	0.35
Katı KİL	10.00	19	110	0	75000	0.37
Kum-Kil Ar dalanması	20.00	20	48	18	75000	0.35
Sert KİL	-	20	200	0	90000	0.3



Ø150-200 FORE KAZIK
(Bakü Otel Kazıkları)
BOY KESİTİ VE
ZEMİN PROFİLİ

Şekil 4.15 : Bakü otel bölgesi kazıklarına ait boy kesiti ve zemin profili.

4.2.2 Yükleme deney sistemi ve deney programı

Bakü Projesi kapsamında yapılan uygulama kazıklarında proje tasarım yükleri 13000-14000 kN arasında değişiklik göstermektedir. Deneyde yükleme kademesi proje yükünün %25'i olarak alınmıştır. Test yapılacak fore kazıklar aynı zamanda proje kazıkları olacağı için maksimum yük proje yükünün %150'si olarak belirlenmiştir. Her test kazığı için hesaplanan artık yükler 0 okuması olarak kabul edilecektir.

Bakü'de proje kazıklarına uygulanan yükleme deneylerinde test kazığına, çevresinde imal edilen 4 adet fore kazıktan reaksiyon olarak hidrolik kriko yardımıyla yükleme yapılmıştır. Osterberg deney sisteminde ise deney yükleri, kazık içerisine yerleştirilen hidrolik kriko ile iki yönlü olarak uygulanmıştır. Proje test kazıklarının çevresinde yer alan kazıklar reaksiyon kazığı olarak belirlenmiştir ve çapları test kazıklarıyla aynı (150-200 cm) olarak belirlenmiştir. Ayrıca hidrolik krikolardan uygulanan yükleri kontrol etmek amacıyla yük hücreleri de (load cell) her bir kriko üzerine merkezci olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney sistemi genel olarak İskenderun deney sistemine benzerdir ancak bu deneylerde test yükleri İskenderun deneyine oldukça fazla (22000 kN) olduğu için test kiriş boyutları ve kriko kapasiteleri ona göre belirlenmiştir. Proje öncesi imal edilen test kazıklarına uygulanan Osterberg deney sisteminde ise reaksiyon kazıklarına ihtiyaç olmayacaktır.

Çizelge 4.13'te otel bölgesi proje kazıkları için oluşturulan deney programı verilmiştir. Proje yükü değerine ulaşabilmek için çıkılan her yük kademesinde beklenen yarım saat boyunca bütün ara beklemeelerde 5, 10 ve 15'er dakikalık okumalar alınmıştır. Deney programında ara beklemeeler ve kritik yüklerdeki bekleme süreleri detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 4.13'te Deney programı proje kazıklarına (BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıkları) uygulanan deneyler için oluşturulmuştur. Osterberg deney prosedürü daha farklıdır.

Yükleme iki çevrimli yapılmıştır. Birinci çevrimde kanıt yükleme deney prosedürü, ikinci çevrimde ise genişletilmiş kanıt yükleme deney prosedürü uygulanmıştır. Deneyde ara beklemeelerde bu prosedürlere uygun olan minimum bekleme süreleri uygulanmıştır.

Kanıt yükleme deney prosedürüne göre bir sonraki yük adımına geçmeden önce aşağıda sıralanan kriterler kontrol edilmelidir.

- 30 dakika içinde oluşan oturma miktarı 0.05 mm'den az olmalıdır.

Genişletilmiş kanıt yükleme deney prosedürüne göre ise bir sonraki yk adımına geçmeden önce aşağıdaki kriter kontrol edilmelidir.

- 1 saat içinde oluşan oturma miktarı 0.25 mm'den az olmalıdır.

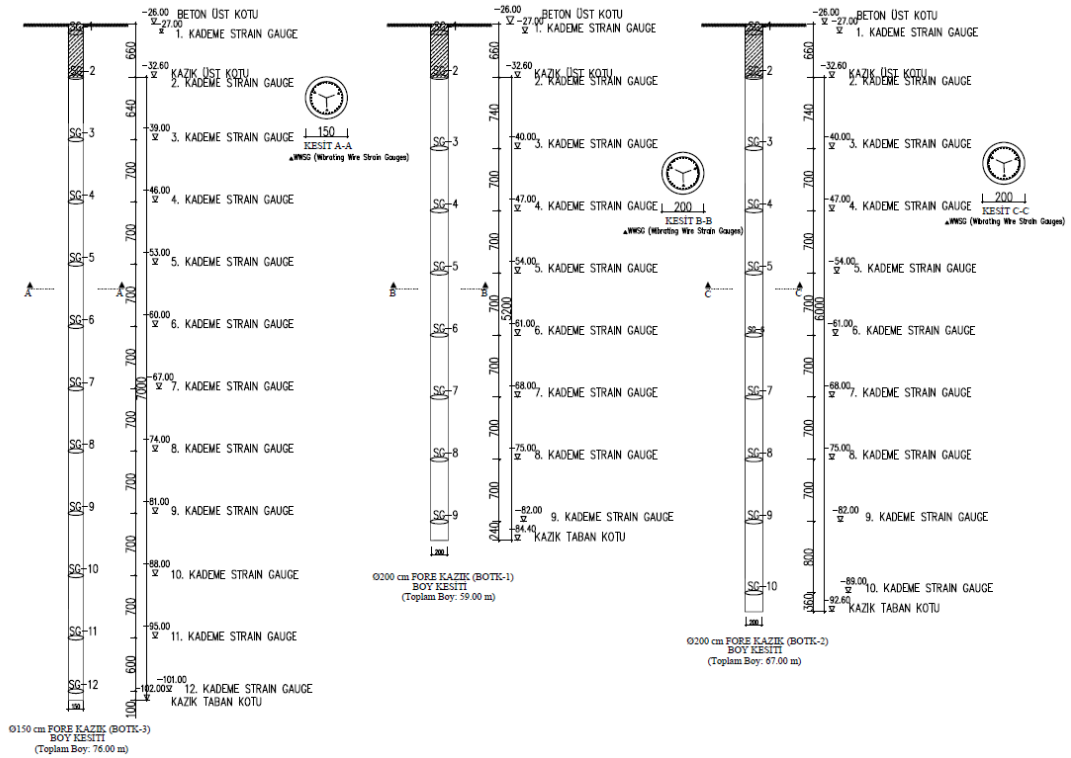
Bu prosedürün uygulandığı test kazıkları proje kazıkları olduğı için göçme durumuna kadar yüklenmemiş ve kazıklar proje yükünün %150'sine kadar yüklenmiştir.

Çizelge 4.13 : Deney programı (BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıkları).

Eksenel Statik Yükleme Deneyi					
Yük Adımı	Yük	Proje Yükü (%)	Yük (kN)	Minimum Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)
1	0 %DVL	0	1000	30 dk	0,5,5,5,15
	25 %DVL	25	4500	30 dk	0,5,5,5,15
	50 %DVL	50	8000	30 dk	0,5,5,5,15
	75 %DVL	75	11500	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL	100	15000	1 sa	0,5,5,5,15,15,15
	75 %DVL	75	11500	20 dk	0,5,5,10
	50 %DVL	50	8000	20 dk	0,5,5,10
	25 %DVL	25	4500	20 dk	0,5,5,10
2	0	0	1000	20 dk	0,5,5,10
	50 %DVL	50	8000	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL	100	15000	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL+25 %SWL	125	18500	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL+50 %SWL	136	20000	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL+43 %SWL	143	21000	30 dk	0,5,5,5,15
	100 %DVL+50 %SWL	150	22000	12 sa	0,5,5,5,15,15,15,30,30,30,30,30,30,60,60,60,60,60,60,60,60
	100 %DVL	100	15000	20 dk	0,5,5,10
	50 %DVL	50	8000	20 dk	0,5,5,10
	25 %DVL	25	4500	20 dk	0,5,5,10
	0	0	0	1sa	0,5,5,5,15,15,15
	~ 21sa				

Bakü'de yapılan yükleme deneyinde bütün test kazıklarında test kazığı içine gerinim ölçerler (strain gage) yerleştirilerek kazık boyunca etki eden birim şekil değıştirme verileri alınmış ve bunun sonucunda zemin-kazık arasındaki birim sürtünme direnç değerleri hesaplanmıştır. BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıklarında gerinim ölçerler

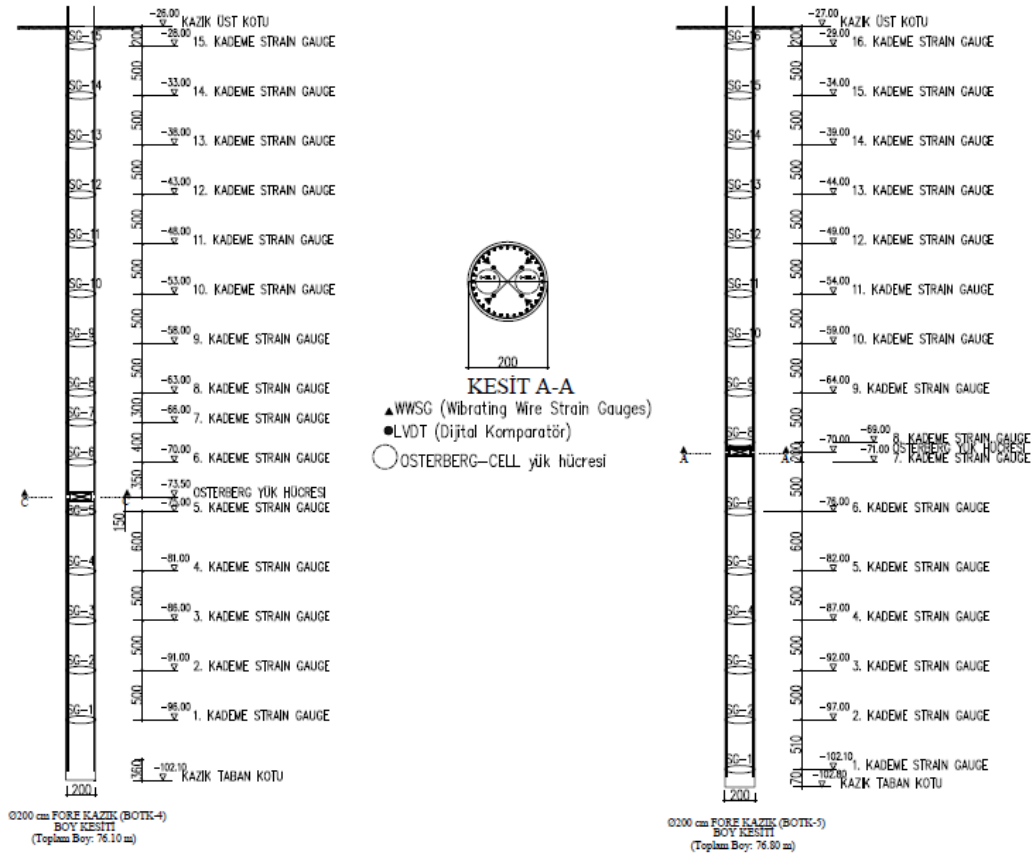
genel olarak her 7 m’de 1 kademe olmak üzere BOTK-1 kazığında 9 kademe, BOTK-2 kazığında 10 kademe ve BOTK-3 kazığında ise toplam 12 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Her kademedeki kontrol amaçlı toplam üçer adet gerinim ölçer bağlanmıştır. Şekil 4.16’da her 3 enstrümanlı test kazıklarına ait boy kesit verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere test kazıklarının üst kotu -26.00 m’dir. Ancak projede kazık üst kotu -32.60 m olduğu için üst kısımdaki 6.60 m derinliğindeki dolgu kısmının sürtünme direnci Çizelge 4.10’da artık yük (1000 kN) olarak belirtilmiştir.



Şekil 4.16 : Bakü Projesi test kazıkları gerinim ölçer yerleşimi.

BOTK-4 ve BOTK-5 numaralı test kazıklarında uygulanan Osterberg yükleme deneylerinde de test kazıklarının içerisine gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Bu kazıklarda her kademedeki toplam 4’er adet gerinim ölçer bağlanırken kademe aralıkları ortalama 5 m olarak belirlenmiştir. BOTK-4 ve BOTK-5 kazıklarında sırasıyla 15 ve 16 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Deney sisteminde 2 adet 610 mm çapında osterberg yük hücresi kazık içerisine yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücreleri koruma plakalarıyla beraber boy donatıları arasına monte edilmiştir. BOTK-4 numaralı test kazığında Osterberg yük hücresi -73.50 kotunda (kazık uç kotundan 28.60 m yukarıda) yerleştirilirken BOTK-5 numaralı test kazığında -70.00 kotunda (kazık uç kotundan 32.8 m yukarıda) yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücrelerinin her biri 13.6 MN yük uygulayacak şekilde kalibre edilmiştir. Yük hücrelerinin altında ve üstünde koruma

plakaları kaynaklanmıştır. Test kazıklarının uç ve üst bölge deplasmanlarını ölçmek için hem osterberg hücre seviyesinde hem de kazık uç ve kazık başı bölgesine deplasman ölçerler (telltale) yerleştirilmiştir. Bu deplasman ölçerler yardımıyla deney programına uygun olarak deplasman verileri alınmıştır. Osterberg yük hücresi ve gerinim ölçer seviyelerini gösteren sistem detayları ise Şekil 4.17’de özetlenmiştir. Test kazıklarına uygulanan deney programının detayları Çizelge 4.14’te verilmiştir. Çizelgede de görüleceği üzere BOTK-4 numaralı kazıkta toplam 18 farklı kısmen eşit yük artış adımları uygulanırken BOTK-5 numaralı kazıkta ise 16 farklı yük artış adımı uygulanmıştır. Her yük adımı 0, 1, 5, 10 ve 30. dakikalardaki deplasman okumaları not alınmıştır. Yük artışı için kanıt yükleme deney prosedüründe olduğu gibi 0.1mm/20 dakika oturma miktarı esas alınmıştır. 20 dakikalık beklemede 0.1 mm oturma aşılması durumunda yük arttırımı yapılmamış ve 30 dakika daha beklenmiştir. BOTK-4 numaralı kazıkta çift yönlü uygulanan toplam 28.91 MN değerindeki O-cell yükünde O-cell altındaki zemin tabakalarının uç ve sürtünme direnci aşılmış ve O-cell kapasitesinden fazla deplasman gözlenmiştir. BOTK-5 numaralı kazıkta ise çift yönlü toplam 25.51 MN yükte kazık taşıma gücü aşılmıştır.



Şekil 4.17 : Bakü Projesi test kazıkları o-cell ve gerinim ölçer yerleşimi.

Çizelge 4.14 : Deney programı (BOTK-4 ve BOTK-5 kazıkları).

BOTK-4			BOTK-5		
Yük (kN)	Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)	Yük (kN)	Bekleme Süresi	
1640	30 dk	0,1,1,3,5,20	1580	30 dk	0,1,1,3,5,20
3120	30 dk	0,1,1,3,5,20	3640	30 dk	0,1,1,3,5,20
4710	30 dk	0,1,1,3,5,20	5100	30 dk	0,1,1,3,5,20
6390	30 dk	0,1,1,3,5,20	6440	30 dk	0,1,1,3,5,20
8090	30 dk	0,1,1,3,5,20	7820	30 dk	0,1,1,3,5,20
9600	30 dk	0,1,1,3,5,20	9460	30 dk	0,1,1,3,5,20
11440	30 dk	0,1,1,3,5,20	11030	30 dk	0,1,1,3,5,20
12930	30 dk	0,1,1,3,5,20	12650	30 dk	0,1,1,3,5,20
14630	60 dk	0,1,1,3,5,20,30	14330	60 dk	0,1,1,3,5,20,30
16060	60 dk	0,1,1,3,5,20,30	15840	60 dk	0,1,1,3,5,20,30
17790	120 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30	17540	60 dk	0,1,1,3,5,20,30
19220	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	19300	90 dk	0,1,1,3,5,20,30,30
20760	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	20860	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30
22350	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	22430	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30
23910	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	24020	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30
25540	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	25510	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30
27180	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	19460	10 dk	0,1,1,3,5
28910	180 dk	0,1,1,3,5,20,30,30,30,30,30	14630	10 dk	0,1,1,3,5
22270	10 dk	0,1,1,3,5	10670	10 dk	0,1,1,3,5
16530	10 dk	0,1,1,3,5	5540	10 dk	0,1,1,3,5
11110	10 dk	0,1,1,3,5	0	60 dk	0,1,1,3,5,20,30
5370	10 dk	0,1,1,3,5			
0	60 dk	0,1,1,3,5,20,30			

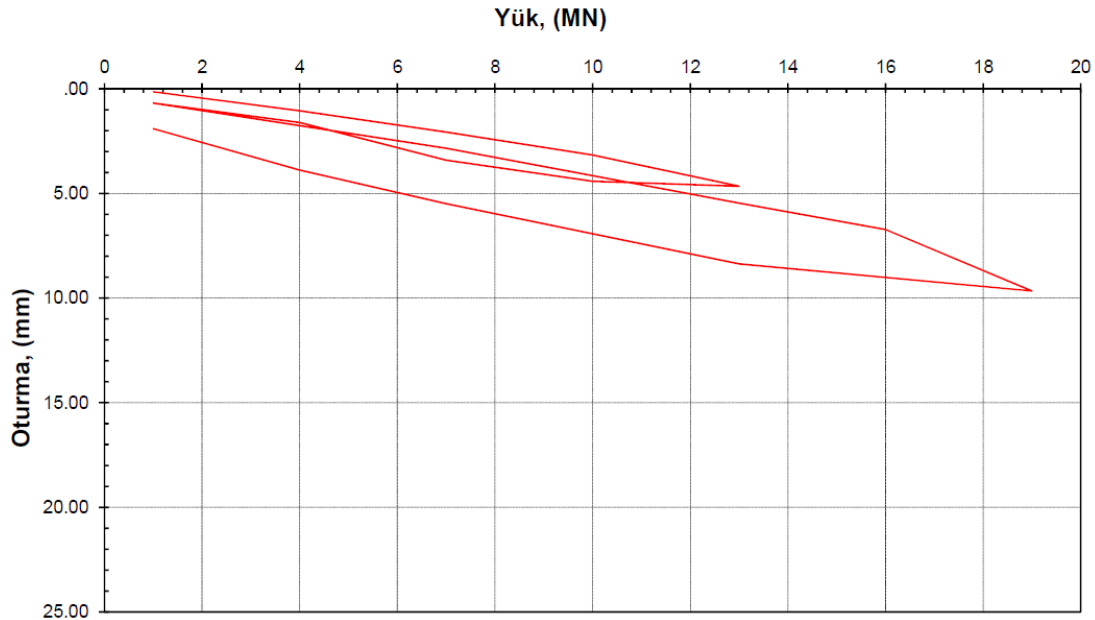
4.2.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 numaralı kazıklara yapılan yükleme deneyleri, Çizelge 4.13'te verilen programa uygun olarak uygulanmıştır. Bütün yük adımlarına karşılık gelen oturma değerleri deney programına uygun olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir test kazığı için elde edilen kritik yükler altındaki oturma değerleri çizelge

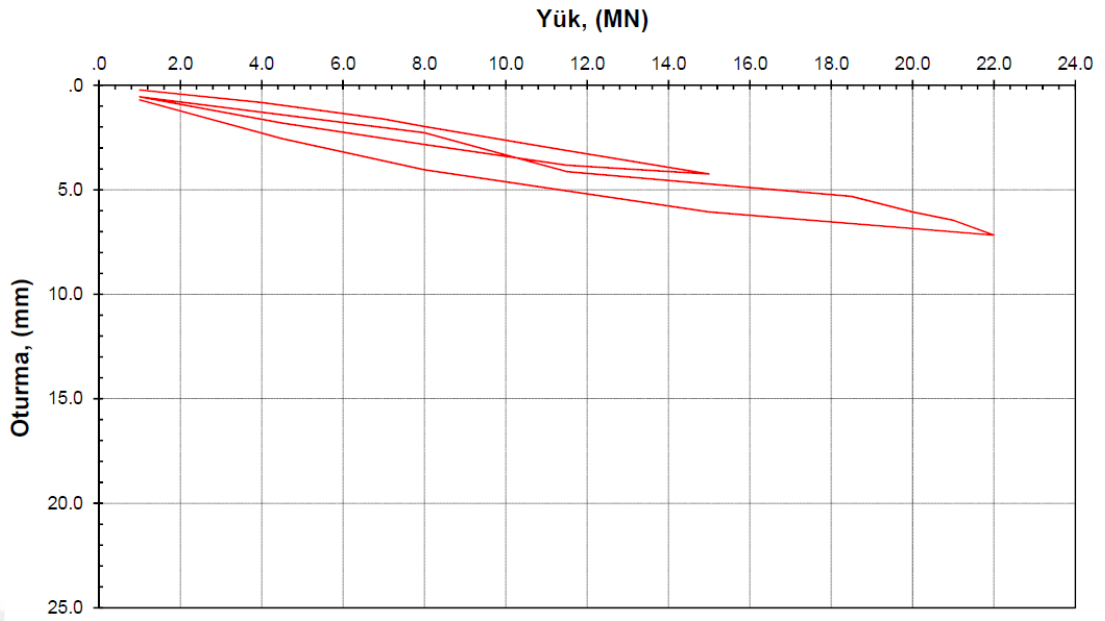
4.15'te verilmiştir. Her 3 test kazığına ait yük-oturma grafikleri ise Şekil 4.18-20'de verilmiştir.

Çizelge 4.15 : BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıkları oturma değerleri.

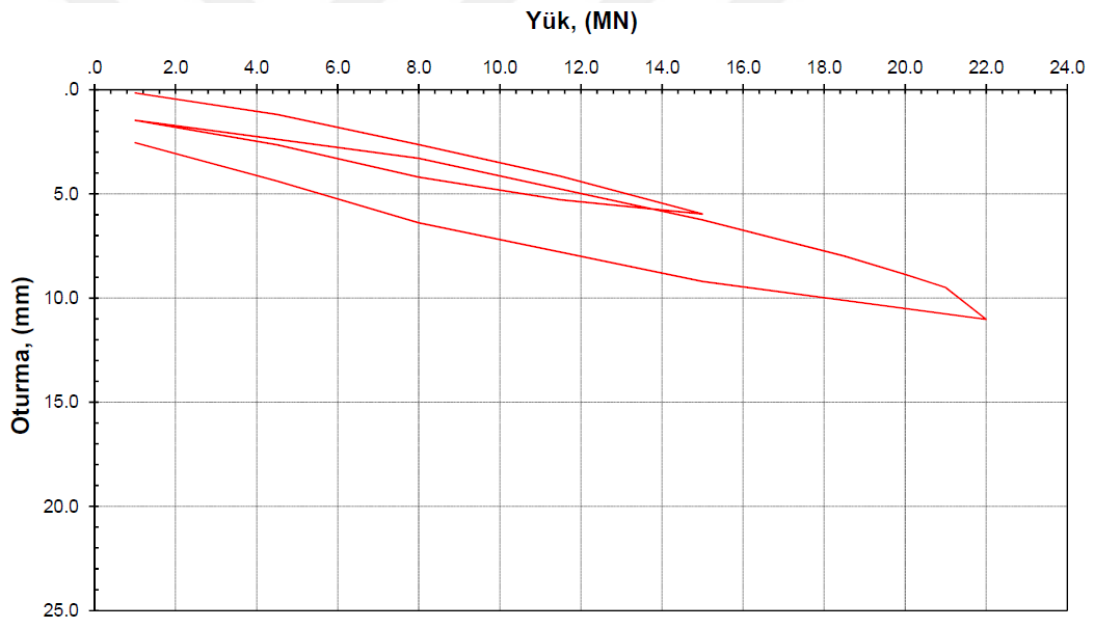
BOTK-1			BOTK-2		
YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)	YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
13,000 kN (1. Çevrim) (100% DWL)	4.66	0.68	15,000 kN (1. Çevrim) (100% DWL)	4.24	0.57
19,000 kN (2. Çevrim) (100% DWL+50% SWL)	9.66	1.91	22,000 kN (2. Çevrim) (100% DWL+50% SWL)	7.17	0.70
BOTK-3					
YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)			
15,000 kN (1. Çevrim) (100% DWL)	5.96	1.46			
22,000 kN (2. Çevrim) (100% DWL+50% SWL)	11.02	2.54			



Şekil 4.18 : BOTK-1 yük-oturma grafiği.



Şekil 4.19 : BOTK-2 yük-oturma grafiği.



Şekil 4.20 : BOTK-3 yük-oturma grafiği.

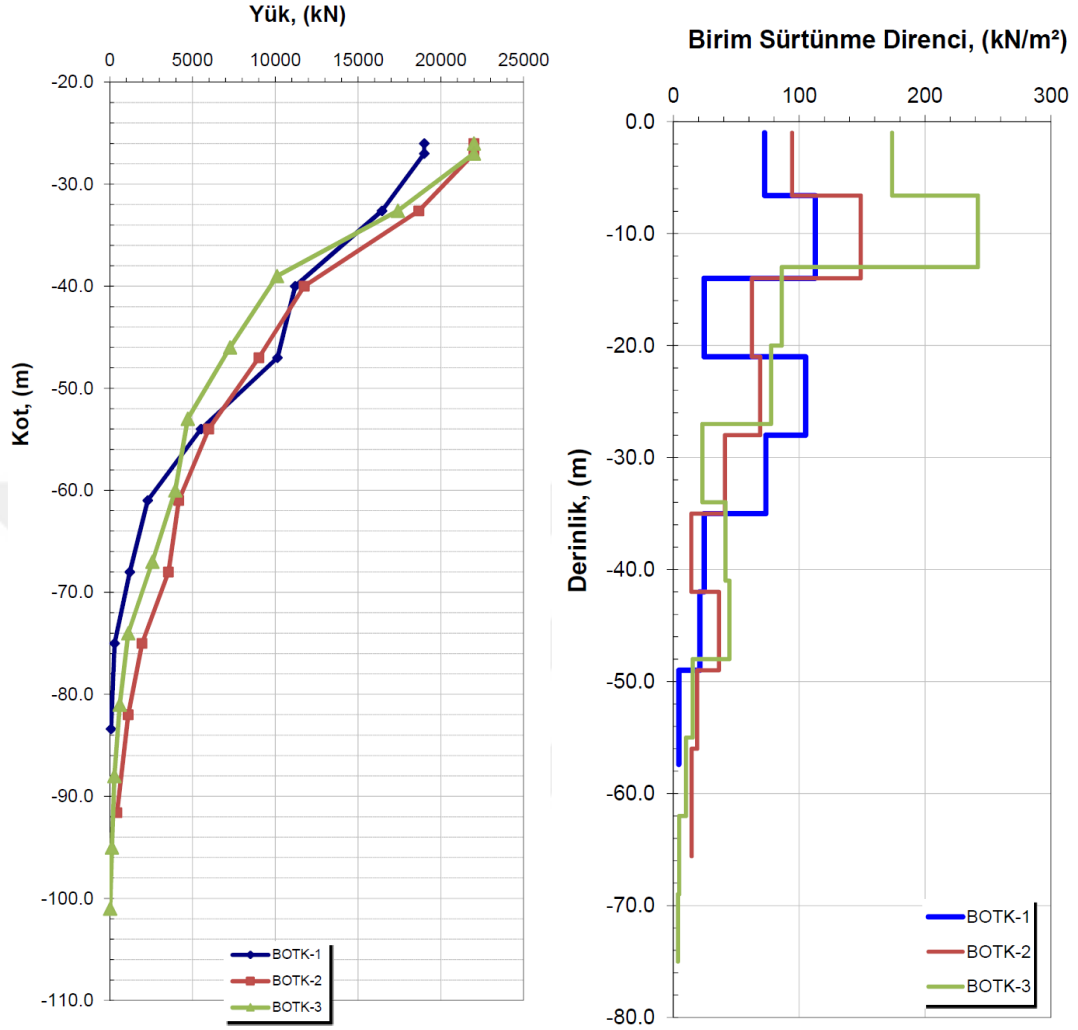
BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 numaralı kazıklar proje kazıkları olarak imal edilmiş ve proje tasarım yükünün %150'sine yüklenmiştir. Uygulanan maksimum yüklerde kazıklarda göçme durumu gözlenmemiştir. Ayrıca elastik ve plastik oturmalar kazık çapına göre oldukça düşük elde edilmiştir. Her üç kazık deneyinde de test kazıkları uygulanan yükleri emniyetli bir şekilde taşımıştır.

BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 numaralı test kazıklarına ortalama her 7 m'lik seviyelerde yerleştirilen gerinim ölçerler vasıtasıyla kazık boyunca geçilen zemin

birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri elde edilmiştir. Ayrıca gerinim ölçer sonuçları yardımıyla kazık boyunca etki eden normal yük diyagramları da oluşturulmuştur.

Her üç test kazığında da göçme gözlenmemiştir ve maksimum yükte elde edilen strain gage okumaları dikkate alınmıştır. BOTK-1 numaralı kazıkta maksimum 19000 kN yük değerinde her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri 18.775 kN/ε olarak elde edilmiştir. BOTK-2 numaralı test kazığında maksimum 22000 kN yük değerinde her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri 26.128 kN/ε olarak elde edilmiştir. BOTK-3 numaralı test kazığında ise maksimum 22000 kN yük değerinde ise her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri 25.346 kN/ε olarak elde edilmiştir. Bütün kademelerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri arasındaki farklar ($\Delta\epsilon$) yardımıyla test kazığı boyunca etki eden yük değerleri hesaplanmıştır. Kazıklara etki eden eksenel yüklerin derinliğe bağlı değişimlerini gösteren grafikler her üç test kazığının maksimum test yükleri için Şekil 4.21’de verilmiştir. Şekil 4.21’de görüleceği üzere her 3 kazığa etki eden yükler kazıkların uç noktasına gelmeden sönümlenmiştir. Kazıklar plastik deformasyon durumuna yaklaşmadığı için uç bölgesine kuvvet gelmemiş ve bütün kuvvet kazık-zemin arasındaki sürtünme direnci tarafından karşılanmıştır. Hesaplanan her kademedeki ΔP ($P_n - P_{n-1}$) yük farkı değerleri kazık çevre alanlarına bölündüğünde her kademedeki birim sürtünme dirençleri (τ_s) elde edilmiştir. Şekil 4.21’de eksenel yük-derinlik diyagramları yanında verilen grafikte ise her 3 kazık için hesaplanan sürtünme direnci değerleri grafiğe işlenmiştir. Ancak kazıklar göçme durumuna ulaşmadığı için bu değerler toplam birim sürtünme direnci olarak tanımlanamazlar. Bu sonuçlar sadece maksimum test yükü kademesindeki birim sürtünme direnci dağılımını vermektedir. En alt kademedeki gerinim ölçer farklarının az olmasının sebebi, maksimum test yükünün kazık uç noktasına gelene kadar kazık-zemin arasındaki sürtünme direnci ile karşılanmasıdır. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 50-150 kPa arasında değişmektedir. Sert kil tabakasına giren kısımlarda birim sürtünme direncinin düşük olmasının sebebi, bu kazıklarda uygulanan maksimum yükün düşük olması ve genel olarak kazık boyunun yarısında bu yükün karşılanmasıdır. Oturma analizlerinin sağlanmasının doğru yapılması için Bakü test kazıklarından O-cell yükleme deneyi yapılan BOTK-4 ve BOTK-5 numaralı test kazıklarından elde edilen deney verileri kullanılmıştır. Yalnız BOTK-1, BOTK-2 ve

BOTK-3 test kazıklarının da yük-oturma diyagramları kullanılarak oturma analizlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

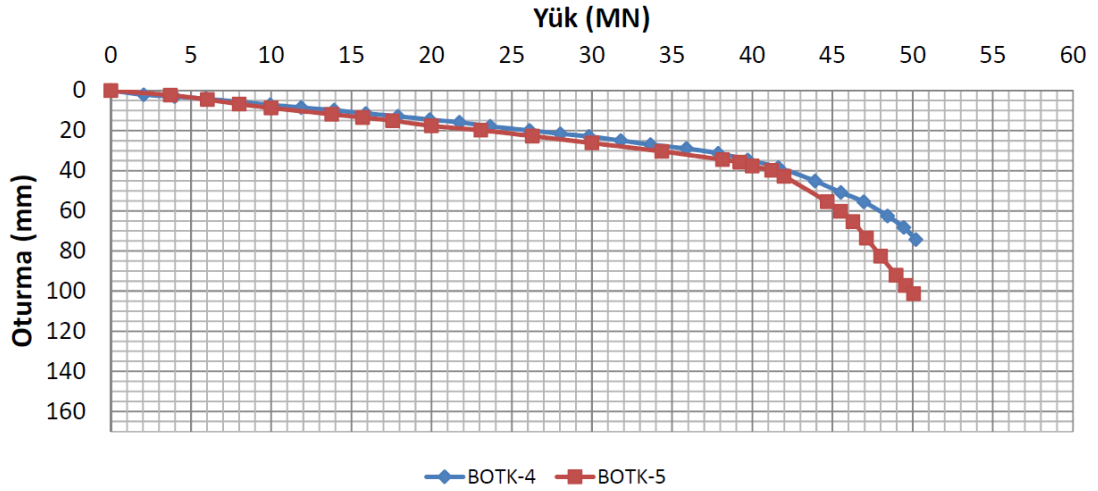


Şekil 4.21 : Eksenel yük-derinlik ve birim sürtünme direnci-derinlik diyagramları.

BOTK-1, BOTK-2 ve BOTK-3 kazıklarına yapılan yükleme deneyleri yukarıda belirtildiği üzere üstten yüklemeli olarak yapılmıştır ve deney yükleri maksimum 22 MN (tasarım yükünün %150'si) olduğu için kazıklarda göçme meydana gelmemiştir. Üstten yüklemeli deneylerde deney yüklerini daha çok arttırmak deneyin güvenliğini riske atabiliyor ve reaksiyon sistemini oluşturmak çok maliyetli olabiliyor. Bu yüzden yüksek kapasiteli deneylerde Osterberg-cell yükleme deney yöntemini kullanmak daha ekonomik olmaktadır. Kazık tasarımının ve analizlerin daha iyi yapılabilmesi için kazıkların göçme bölgesine geçmesi gerekmektedir. Bu yüzden 200 cm çapındaki BOTK-4 ve BOTK-5 test kazıklarını göçme durumuna kadar yüklemek için Osterberg-cell yükleme deneyi uygulanmıştır. Böylece kazıklarda meydana gelen

toplam birim sürtünme direnci ve uç direncini elde edilebildi. Sonraki bölümde Bakü Projesi için yapılan oturma analizlerinin sağlaması için bu deneylerden elde edilen datalar kullanılmıştır.

Uygulanan Osterberg deneylerinin prosedürü Bölüm 2.2’de belirtildiği şekilde izelge 4.14’te belirtilen programa uygun olacak şekilde yapılmıştır. Deplasman dataları LVDT’ler yardımıyla dakikada bir adet okuma alınarak data loggerdan bilgisayara aktarılmıştır. Ancak verilerin değerlendirmesi izelge 4.14’te verilen programa uygun olarak ve deplasman kriterlerine bağlı kalınarak yapılmıştır. BOTK-4 numaralı kazıkta yapılan yükleme deneyinde O-cell yk hücresinden uygulana yük 28910 kN değerine ulaştığında kazık ucundaki deplasmanlar 100 mm’yi aşarak 103 mm olarak ölçülmüş ve göçme durumuna geçilmiştir. Kazık başındaki deplasmanlar ise aynı yükte 20 mm olarak llmştir. Yük boştıldıktan sonra kazık ucu deplasmanları 97 mm olarak ölçülürken kazık başı deplasmanı 18 mm olarak llmştir. BOTK-5 numaralı kazıkta yapılan yükleme deneyinde ise O-cell yk hücresinden uygulanan yük 25510 kN değerine ulaştığında kazık ucundaki deplasmanlar 25 mm olarak llmştir. Kazık başındaki deplasmanlar ise aynı yükte 67.70 mm olarak llmştir. O-cell hücresinden uygulanan yük boşaltılırken hem kazık ucundaki hem de kazık başındaki deplasmanlarda artış gözlenmiştir. Kazık ucundaki deplasmanlar maksimum 40 mm olarak ölçülürken kazık başındaki deplasmanlar maksimum 87 mm olarak llmştir. BOTK-4 numaralı kazıkta kazık uç bölgesindeki deplasmanlar daha çok artarken bu göçmenin O-cell yk hücresinin alt kısmında meydana geldiği söylenbilir. BOTK-5 numaralı kazıkta ise kazık başındaki deplasmanlar daha çok çıkmış ve O-cell yk hücresinin üstünde kalan zemin gelen maksimum yükü taşıyamamıştır. Yapılan deneyler sonucunda Bölüm 2.2’de belirtilen yöntem ile her iki test kazığı için elde edilen eşdeğer yük-oturma grafikleri şekil 4.22’de verilmiştir. şekil 4.22’de görüldüğü üzere aynı bölgede imal edilen ve aynı yöntem ile yüklenen her iki test kazığının yük-oturma davranışı birbirine yakın elde edilmiştir. BOTK-4 ve BOTK-5 kazıklarının tasarımı yükleri 20 MN olarak belirlenmişti. BOTK-4 ve BOTK-5 kazıklarının tasarımı yüküne karşılık gelen oturma değerleri sırasıyla; 14.5 mm ve 176 mm olarak elde edilmiştir. BOTK-4 ve BOTK-5 kazıklarının tasarımı yükünün %150’sine karşılık gelen 30 MN test yükünde ise oturma değerleri ise sırasıyla; 22.9 mm ve 26.2 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.22 : BOTK-4 ve BOTK-5 yük-oturma grafiği.

Gerinim-ölçer datalarından elde edilen veriler değerlendirilerek her iki kazığa etki eden eksenel yük değerleri ve kazık boyunca elde edilen maksimum sürtünme ve uç direnci değerleri hesaplanmıştır. BOTK-4 ve BOTK-5 kazıkları boyunca elde edilen eksenel yük değerlerinin derinlikle değişimleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir. Şekil 4.23'te görüleceği üzere BOTK-4 kazığında -96 kotunda yer alan 1. kademe gerinim ölçer seviyesinde etki eden maksimum eksenel yük 17.40 MN'dur. Kazık alt kotu -102.10 olduğuna göre gerinim ölçer seviyesi altındaki 6.1 m boyundaki kısımdaki sürtünme direnci dikkate alınarak kazık uç direnci elde edilebilir. Bunun için 1-3. Kademedeki gerinim ölçerlerden elde edilen sürtünme direnci dikkate alınmıştır ve 1. kademe altındaki kısımda benzer sürtünme direnci olduğu kabul edilmiştir. -86 kotu ile -96 kotu arasındaki birim sürtünme direnci 114 kPa olarak hesaplanmıştır. Bu durumda fore kazık uç noktasına etkiyen maksimum yük 13 MN olarak hesaplanmıştır. 2000 mm çapındaki BOTK-4 numaralı test kazığının birim uç direnci ise 4138 kPa olarak elde edilir. Şekil 4.24'te görüleceği üzere BOTK-5 kazığında -101.1 kotunda yer alan 1. kademe gerinim ölçer seviyesinde etki eden maksimum eksenel yük 5.3 MN'dur. Kazık alt kotu -102.80 olduğuna göre gerinim ölçer seviyesi altındaki 1.7 m boyundaki kısımdaki sürtünme direnci dikkate alınarak kazık ucuna etki eden yük elde edilebilir. 1-2 kademe gerinim ölçerler arasındaki birim sürtünme direnci 268 kPa olarak elde edilmiştir. Bu durumda kazık ucuna etki eden yük 3 MN ve birim uç direnci ise 995 kPa olarak elde edilir. BOTK-4 numaralı kazıkta deney sırasında kazık ucundaki deplasmanlar ani olarak arttığı için bu kazıkta kazık ucunun taşıma gücünün aşıldığı söylenebilir ve bu yüzden kazık ucu toplam birim uç direnci 4138 kPa olarak alınabilir. Ancak BOTK-5 numaralı kazıkta kazık ucunda

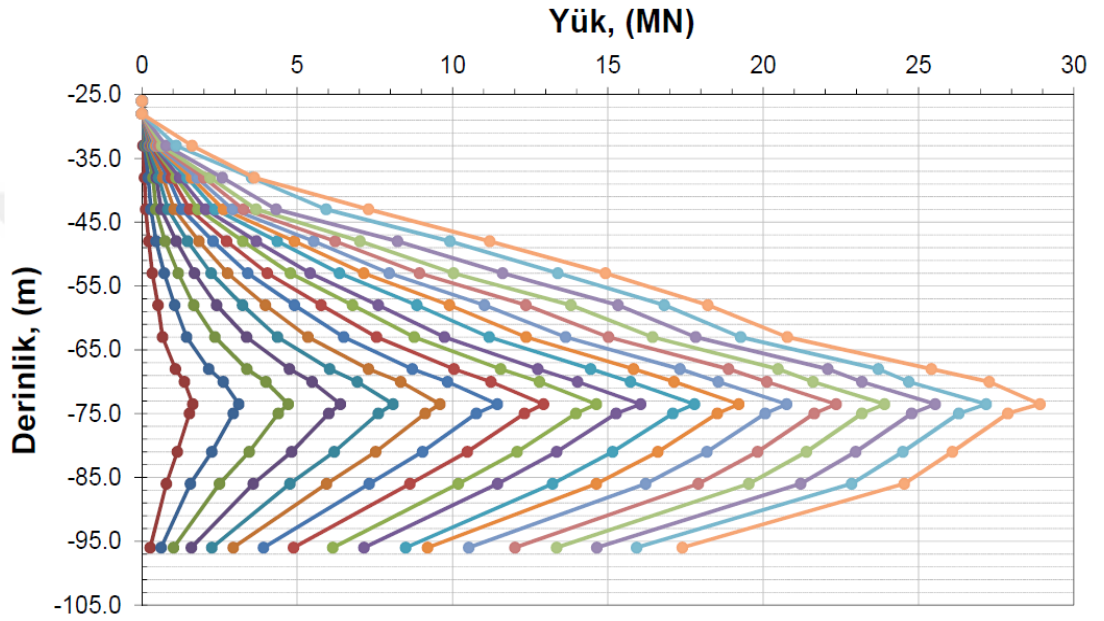
toplam taşıma gücüne ulaşılmamıştır. Bu kazıkta kazık alt kısmında hesaplanan 268 kPa değeri dikkate alınarak kazık ucunda oluşan toplam uç taşıma gücü ve toplam birim uç direnci hesaplanmıştır. Kazık tasarım yükü hesaplarında kazıklarda birim sürtünme direnci denklem 4.2’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\tau_s = \alpha c_u \quad (4.2)$$

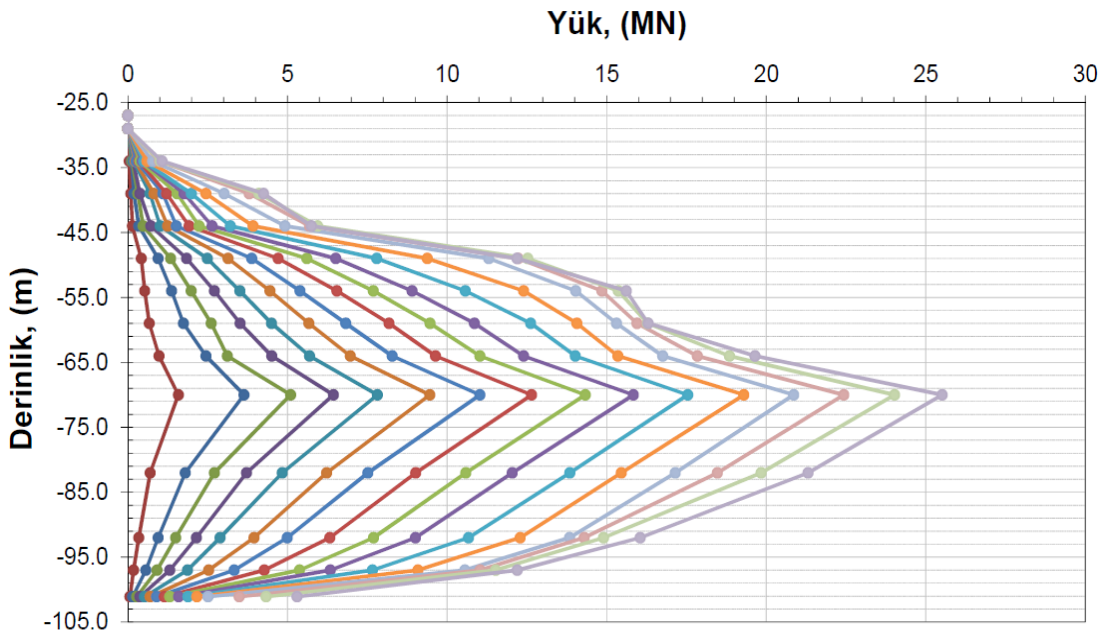
Kazık taşıma gücü hesaplarında adhezyon katsayısı (α) 0.625 olarak alınmıştır. BOTK-5 kazığının ucundaki zeminin birim sürtünme direnci gerinim ölçerlerden elde edilen verilere göre 238 kPa olarak elde edilmiştir. Bu durumda kazık ucundaki zeminin drenajsız kohezyon değeri (c_u) 380 kPa olarak hesaplanır. Kazık ucundaki birim uç direnci ise deklemler 3.3’te verildiği şekilde hesaplanabilir. Denklem 4.3 sonucuna göre kazık toplam birim uç direnci 3420 kPa ve toplam uç direnci 10.7 MN olarak elde edilir. Bu değer BOTK-4 kazığı için elde edilen toplam uç direnci değerine yakın elde edildiği için bu hesap kabulü ile oturma analizi hesapları yapılmıştır.

Hesaplanan her kademedeki ΔP ($P_n - P_{n-1}$) yük farkı değerleri kazık çevre alanlarına bölündüğünde her kademedeki birim sürtünme dirençleri (τ_s) elde edilmiştir. Şekil 4.25’de verilen grafiklerde ise her iki test kazığı için elde edilen bu değerlerle beraber zemin logunun derinlikle değişimi görülmektedir. Yükleme deneyinde gerinim ölçerler ile elde edilen sürtünme direnci değerleri Çizelge 4.9’da özetlenmiştir. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 30-268 kPa arasında değişmektedir. Çizelgede görüleceği üzere elde edilen birim sürtünme direnci değerleri daha önce hesaplanan birim sürtünme direnci değerleri ve zemin cinsleri ile karşılaştırılmıştır. Kil birimlerinde elde edilen sürtünme direnci değerleri beklendiği üzere granüler zemin ve dolgu birimlerinden daha büyük çıkmıştır. Ayrıca sert kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri diğer zemin birimlerinden genel olarak daha büyük elde edilmiştir. Killi kum birim sürtünme direnci değeri 30-50 kPa olarak elde edilirken katı kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri 50-120 kPa olarak elde edilmiştir. Kum-kil aralanmasının birim sürtünme direnci değerleri bazı bölgelerde sert kil tabakasının birim sürtünme direnci değerlerini geçmiştir. Kum-kil aralanmasının birim sürtünme direnci değeri BOTK-4 numaralı kazıkta 78-141 kPa değerleri arasında değişirken BOTK-5 numaralı kazıkta ise 60-203 kPa arasında değişmektedir. Her iki

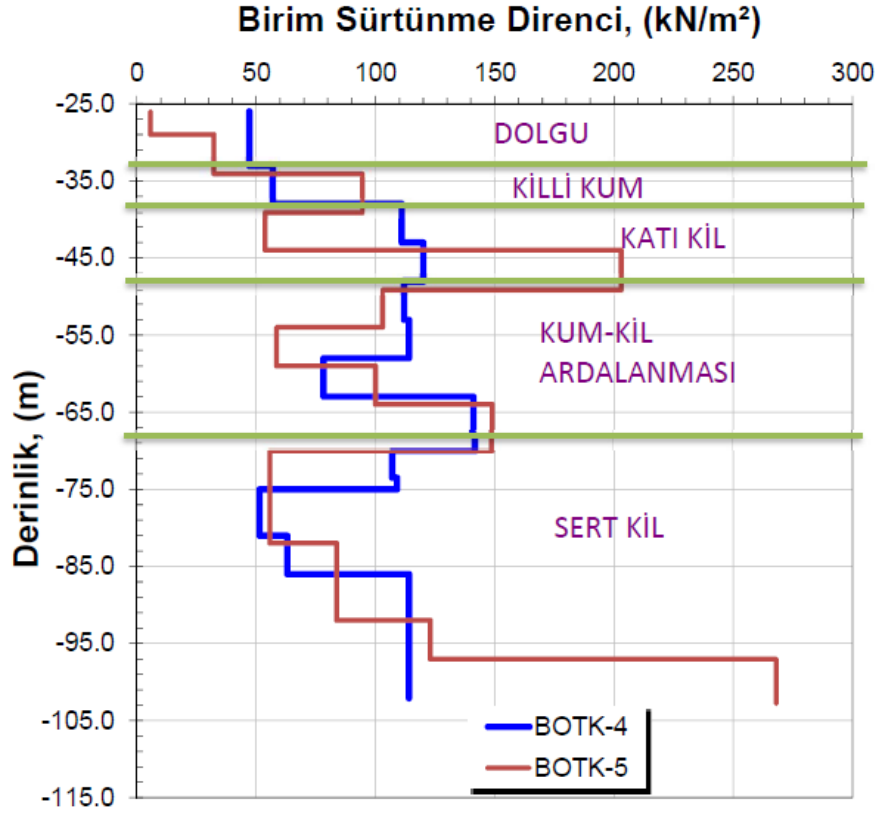
kazıdaki sürtünme direnci değerleri ortalaması birbirine yakın elde edilmiştir. Çizelgede ve grafiklerde görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri bazı zemin birimlerinde gerinim ölçerlerden elde edilen değerlere göre düşük çıkmıştır. Oturma analizlerinin sağlamlasının doğru yapılması için sahada kazık oturma hesaplarında BOTK-4 ve BOTK-5 kazıklarında ölçülen toplam birim sürtünme direnci verileri kullanılmıştır. Çünkü bu kazıklar göçme durumuna kadar yüklenmiştir.



Şekil 4.23 : BOTK-4 aksel yük-derinlik grafiği.



Şekil 4.24 : BOTK-5 aksel yük-derinlik grafiği.



Şekil 4.25 : BOTK-4 ve BOTK-5 birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.

Çizelge 4.16 : BOTK-4 ve BOTK-5 kazıkları oturma birim sürtünme direnci değerleri.

BOTK-4				BOTK-5			
Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m ²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m ²)	Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m ²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m ²)
Dolgu	7.00	-	47	Dolgu	3.00	-	6
Killi KUM	5.00	59	57	Dolgu-Killi Kum	5.00	59	32
Katı Kil	5.00	70	111	Katı Kil	5.00	70	95
Katı Kil	5.00	70	120	Katı Kil	5.00	70	54
Kum-Kil Ard.	5.00	115	112	Kum-Kil Ard.	5.00	115	203
Kum-Kil Ard.	5.00	127	114	Kum-Kil Ard.	5.00	127	103
Kum-Kil Ard.	5.00	139	78	Kum-Kil Ard.	5.00	139	59
Kum-Kil Ard.	5.00	150	141	Kum-Kil Ard.	5.00	150	100
Sert Kil	2.00	125	142	Sert Kil	6.00	125	149
Sert Kil	3.50	125	107	Sert Kil	12.00	125	56
Sert Kil	1.50	125	109	Sert Kil	10.00	125	84
Sert Kil	6.00	125	51	Sert Kil	5.00	125	123
Sert Kil	5.00	125	63	Sert Kil	5.80	125	312
Sert Kil	16.10	125	114				

4.3 Basra Projesi

Basra Elektrik Santrali Projesi kapsamında uygulanan 4 adet enstrümanlı statik yükleme deneyi incelenmiştir. Deney yapılan 4 adet fore kazık da test kazıklarıdır ve göçme durumuna kadar yüklenmiştir.

Basra Projesi kapsamında statik yükleme deneyi yapılan fore kazıkların 2 adedi (BETK-3 ve BETK-4) $\Phi 60$ cm çaplı ve 38.8 m boyundadır. Diğer 2 adedi (BETK-1 ve BETK-2) ise $\Phi 80$ cm çapında ve 36.8 m boyundadır. Bu bölgede yapılan 4 adet test kazığına ait özellikler (çap, boy, tasarım yükleri ve nihai test yükü) çizelge 4.17’de verilmiştir. Enstrümanlı olarak imal edilen test kazıklarının donatılarına belli aralıklarla gerinim ölçerler bağlanmıştır.

Çizelge 4.17: Test kazıklarının özellikleri.

Test Kazık No	Çap (cm)	Kazık Boyu (m)	Proje Tasarım Yüğü (kN)	Nihai Test Yüğü (kN)
BETK-1	$\Phi 80$	36.80	1800	6197
BETK-2	$\Phi 80$	36.80	1800	8364
BETK-3	$\Phi 60$	38.80	1500	4434
BETK-4	$\Phi 60$	38.80	1500	4787

Bu bölümde; Basra Projesi kapsamında imal edilen test kazıklarının imal edildiği bölgelerdeki zemin birimlerinin tanımı ve parametreleri, yapılan deney yöntemi ve deney sonuçları açıklamaları ve son olarak deney sonuçlarının değerlendirmeleri yer almaktadır.

4.3.1 Zemin bilgisi

Proje sahasında 30-40 m arasında değişen derinliklerde toplam 18 adet zemin araştırma sondajı yapılmıştır. 17 ayrı lokasyonda ise statik CPT deneyi yapılmıştır. Test kazıklarının yapıldığı dar bölgede ise toplam 2 adet sondaj verisi dikkate alınmıştır. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde standart zemin deneyleri (elek analizi, atterberg limit deneyleri, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri, vb.) yapılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek söz konusu test sahası için idealize zemin profili belirlenmiştir. Buna göre sahada en üstte 11.5 m kalınlığında yumuşak siltli kil tabakası (SPT-N değerleri 2-8 arasında), bu tabakanın altına sırasıyla; orta katı siltli kil tabakası (SPT-N değerleri 6-10 arasında), orta katı-katı siltli kil tabakası (SPT-N değerleri 8-16 arasında), sıkı kum tabakası (SPT-N değerleri 40-60 arasında) ve

daha aşağı seviyelerde ise çok sıkı kum (SPT-N değerleri 60-80 arasında) tabakası yer almaktadır. Saha ve laboratuvar deneyleri beraber değerlendirilerek elde edilen zemin parametreleri Çizelge 4.18’de verilmiştir. Diğer projelerde de belirtildiği gibi bu tez kapsamında genel olarak yük-transfer yöntemi incelendiği için zeminin kayma modülü ve Poisson oranı değerleri önem arz etmektedir. Sahada yer altı suyuna yüzeye oldukça yakın rastlanılmıştır. Yer altı suyu seviyesi genel olarak yüzeyden 0.50-0.75 m aşağıda gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.18 : Basra projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m^3)	Kohezyon (c) (kN/m^2)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) ($^\circ$)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m^2)	Poison Oranı (μ)
Yumuşak Siltli KİL	11.50	17	25	0	6000	0.35
Orta Katı Siltli KİL	5.00	18	40	0	10000	0.35
Orta Katı-Katı KİL	5.00	18	60	0	20000	0.3
Sıkı Siltli KUM	7.50	19	0	33	50000	0.3
Çok Sıkı Siltli KUM	-	19	0	35	70000	0.3

Çizelge 4.18’de verilen zemin parametreleriyle yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda 60cm çapında 38.8 m boyundaki fore kazıkların tasarım taşıma gücü değeri 1500 kN olarak elde edilirken 80 cm çapında 36.8 m boyundaki fore kazıkların tasarım taşıma gücü değeri 1800 kN olarak elde edilmiştir.

4.3.2 Deney sistemi ve deney programı

Basra projesindeki yükleme deneyleri JGJ 106 standardında (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles) belirtilen düzenlemelere uygun olarak yapılmıştır. Standartta belirtilen yavaş yükleme deney yöntemi uygulanmıştır. Deney yükünün artış adımları tahmin edilen toplam deney yükünün 1/12’si olarak belirlenmiş ve 11 kademe yükleme aşamasına kadar deneyin neticelenmesi planlanmıştır. Her yük adımında minimum bekleme süresi 2 saat olacaktır ve yük kademelerinde sırasıyla 5 dk., 10 dk. , 15 dk. , 15 dk., 15 dk., 30 dk. ve 30 dakikalık aralıklarla okuma alınacaktır. Deney prosedürüne göre bir sonraki yük adımına geçmeden önce gerekli kriter: 1 saat içinde oluşan oturma miktarı 0.1 mm’den az olmalıdır.

Uygulanan deney yönteminde testin sonlandırılmasının şartları aşağıda sıralanmıştır:

- Kazığın yüklendiği yükteki oturma değerinin bir önceki yükteki oturma değerinin 5 katına çıkması ve kazık başı oturmasının 40 mm'yi aşması,
- Kazığın yüklendiği yükteki oturma değerinin bir önceki yükteki oturma değerinin 2 katına çıkması ve yükteki relatif oturmaların 24 saat boyunca sabitlenmemesi,
- Planlanan maksimum yük değerine kadar çıkılması ve rölatif oturma standardının bu yükte de sağlanması,
- Reaksiyon kazıklarındaki deplasmanların izin verilebilir seviyenin (10 mm) üzerine çıkması.

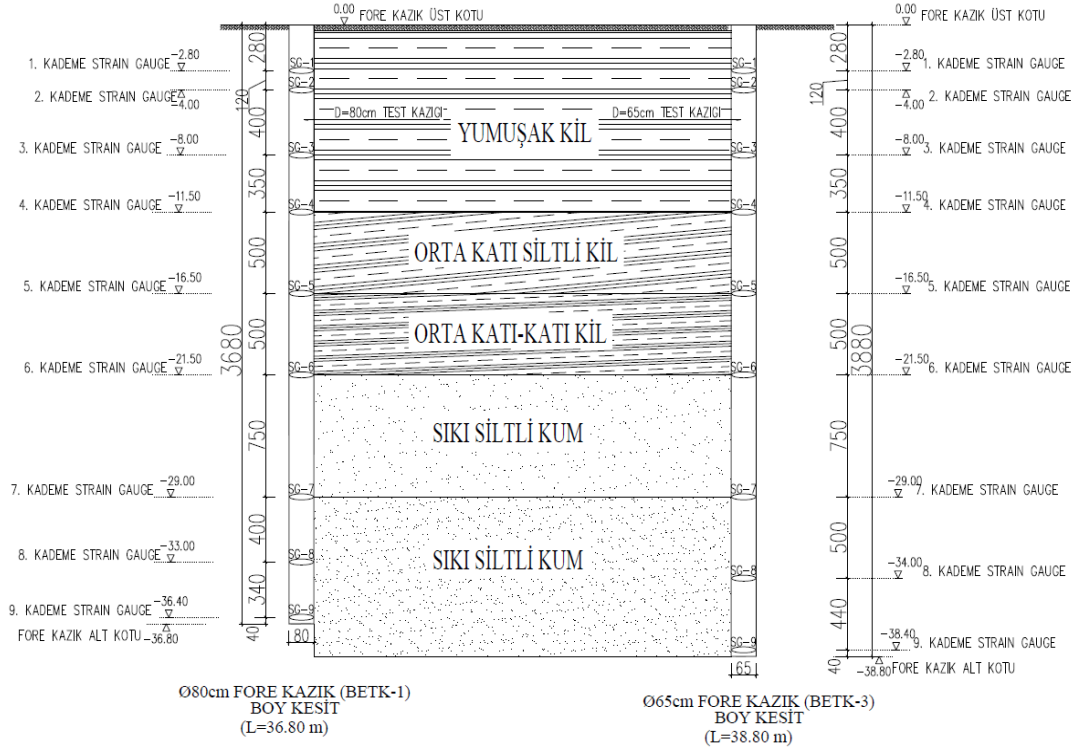
Basra projesinde yapılan testlerin reaksiyon sistemi İskenderun Projesi'ne benzer şekilde test kazığının etrafına 4 adet reaksiyon kazığı ile oluşturulmuştur. Test yükü 2 adet 5000 kN kapasiteli hidrolik kriko ile uygulanırken bu yükler toplam 1 ana kiriş ve 2 tali kiriş vasıtasıyla reaksiyon kazıklarına aktarılmaktadır. Reaksiyon kazık donatıları kaynaklı birleşimlerle kirişlerde yer alan ankraj bulonlarına bağlanan plakalara tutturulmaktadır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 : Basra projesi yükleme deney sistemi görünümü.

Basra'da yapılan 4 yükleme deneyinde de test kazığı içine rebar tipi gerinim ölçerler (strain gage) yerleştirilerek kazık boyunca etki eden birim şekil değiştirme verileri alınmış ve bunun sonucunda zemin-kazık arasındaki birim sürtünme direnç değerleri hesaplanmıştır. Gerinim ölçer aralıkları zemin cinsine göre çeşitlilik göstermektedir. Bütün test kazıklarında toplam 10 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Her kademedeki kontrol amaçlı toplam ikişer adet gerinim ölçer bağlanmıştır. Şekil 4.27'de

enstrümanlı test kazıklarına ait boy kesit zemin cinsi ile beraber verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere gerinim ölçer kotları kazık üst kotundan itibaren sırasıyla -2.8 m, -4.0 m, -8.0 m, -11.5 m, -16.5 m, -21.5 m, -29.0 m, -33.0 m (-34.0 m) ve -36.4 m (-38.4 m) derinlikte yer almaktadır.



Şekil 4.27 : Basra test kazıkları boy kesiti ve gerinim ölçer yerleşimi.

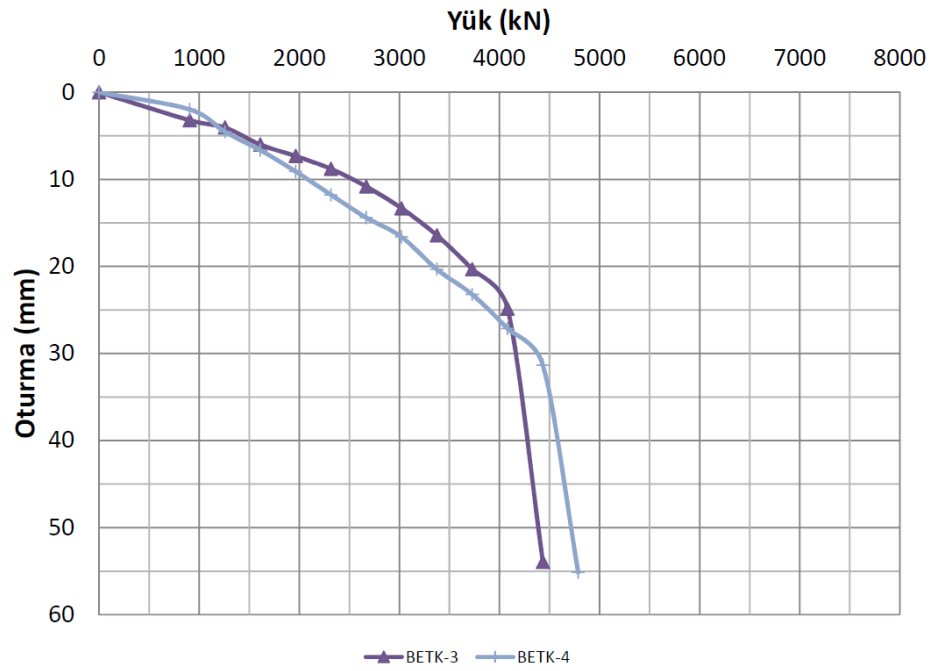
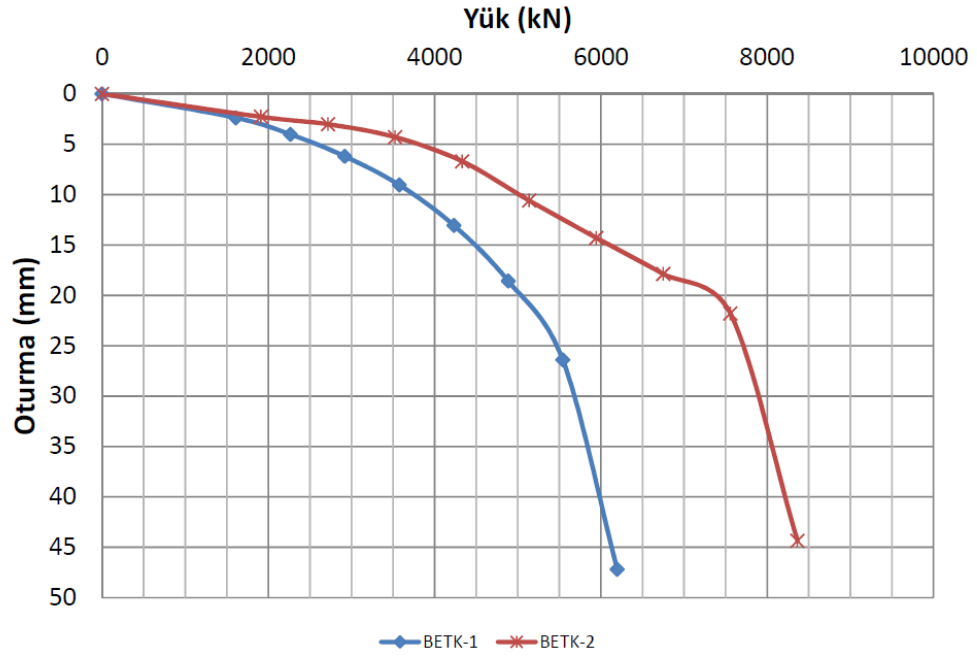
4.3.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Her bir yükleme deneyi yukarıda belirtilen yükleme deney prosedürü ve programına uygun olarak yapılmıştır. Bütün yük adımlarına karşılık gelen oturma değerleri deney programına uygun olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilmiştir. Dört test kazığı için uygulanan nihai test yükü ve bu yüke karşılık elde edilen oturma değerleri çizelge 4.19’da verilmektedir.

Elde edilen oturma değerleri sonuçlarında ve yük-oturma grafiklerinde görüldüğü üzere 4 test kazığında da göçme gözlenmiştir. Deney sonunda 80cm çaplı BETK-1 ve BETK-2 kazıklarında elde edilen yük-oturma grafikleri şekil 4.28’de verilirken 65 cm çaplı BETK-3 ve BETK-4 kazıklarına ait yük-oturma grafikleri Şekli 3.29’da verilmektedir.

Çizelge 4.19 : Test kazıklarının özellikleri.

Test Kazık No	Uygulanan Nihai Yük (kN)	Nihai Yükte Oturma Değeri (mm)
BETK-1	6197	47.192
BETK-2	8364	44.358
BETK-3	4434	53.96
BETK-4	4787	55.128



BETK-1 numaralı kazıkta 9. yük kademesi olan 6197 kN yükte oturma değerleri 40 mm'yi aştığı için yükleme durdurularak boşaltma işlemine geçilmiştir. Yük boşaltıldıktan sonra toplam plastik oturma değeri 36.57 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda BETK-1 numaralı kazık üzerinde uygulanan 6197 kN yükte kazıkta göçme meydana geldiği söylenebilir.

BETK-2 numaralı kazıkta 6751 kN yükten 7558 kN yük değerine çıkarken oturma artışı 3.923 mm olarak ölçülmüş ve 7558 kN yükte toplam oturma değeri 21.808 mm olmuştur. Uygulanan yük, 7558 kN yükten 8364 kN yük değerine çıkıldığında ise kazıkta oturma değeri 44.358 mm olmuş ve oturma artış değeri, bir önceki yük kademelerindeki oturma artış değerinin 5 katını geçmiştir. Ayrıca kritik olan 40 mm oturma değeri de aşılmıştır. Ardından uygulanan yük boşaltılmış ve toplam plastik oturma değeri 36.926 mm olarak belirlenmiştir. BETK-2 numaralı test kazığında 8364 kN yük uygulanırken göçme gözlemlenmiştir.

BETK-3 numaralı kazıkta uygulana deneyde 3728 kN yükten 4081 kN yük değerine çıkarken oturma artışı 4.527 mm olarak ölçülmüş ve 4081 kN yükte toplam oturma değeri 24.85 mm olmuştur. Uygulanan yük, 4081 kN yükten 4434 kN yük değerine çıkıldığında ise kazıkta oturma değeri 53.496 mm olmuş ve oturma artış değeri, bir önceki yük kademelerindeki oturma artış değerinin 5 katını geçmiştir. Ayrıca kritik olan 40 mm oturma değeri de aşılmıştır. Ardından uygulanan yük boşaltılmış ve toplam plastik oturma değeri 45.277 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak BETK-3 numaralı test kazığında 4434 kN yük uygulanırken göçme gözlemlenmiştir.

BETK-4 numaralı test kazığında 4434 kN yük değerinden 4787 kN yük değerine çıkıldığında deplasmanlarda aşırı artış gözlemlenmiş ve oturma değeri 40 mm'yi aşarak 55.128 mm olarak ölçülmüştür. Ardından yük boşaltılmış ve toplam plastik oturma değeri 47.35 mm olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak BETK-4 numaralı test kazığında 4787 kN yük uygulanırken göçme gözlemlendiği söylenebilir.

BETK-1, BETK-2, BETK-3 ve BETK-4 numaralı test kazıklarına kazık boyunca geçilen zemin cinsleri dikkate alınarak farklı seviyelerde yerleştirilen rebar tipi gerinim ölçerler vasıtasıyla zemin birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri elde edilmiştir. Ayrıca gerinim ölçer sonuçları yardımıyla kazık boyunca etki eden normal yük diyagramları da oluşturulmuştur.

Rebar tipi gerilim ölçerler, donatılarda meydana gelen gerilimdeki değişimleri ölçerler ve bu ölçümlerden elde edilen sonuçlarla donatı gerilim ölçer seviyelerindeki eksenel yükler ve gerilim ölçer seviyeler arasındaki zemin-kazık arasında meydana gelen birim sürtünme direnci değerleri elde edilir. Rebar tipi gerilim ölçerler ana kazık dontısına kaynakla birleştirilir ve her seviyede ikişer adet yerleştirilmiştir. Kazık donatılarında meydana gelen gerilim değişimleri ile rebar tipi gerilim ölçerlerde (vibrating wire reinforcement meter) frekans değişikliğine neden olur ve data logger vasıtasıyla 1 saniye aralıklarla frekans değişimleri kaydedilir. Kazık başında uygulanan farklı yüklerde frekans değerlerindeki değişimler gözlemlenerek denklem 4.3’de verilen formül yardımıyla donatıya etkiyen eksenel yük hesaplanır.

$$P = K (f_i^2 - f_0^2) \quad (4.3)$$

Denklemde; P – Donatıya etkiyen eksenel kuvvet (kN);

f_0 – Başlangıçtaki gerilim ölçer frekans okuması;

f_i – i. kademede gerilim ölçer frekans okuması;

K – Gerilim ölçer kalibrasyon katsayısı;

Donatıya etkiyen eksenel yük hesabından sonra bu değere bağlı olarak her kademede kazıkta meydana gelen eksenel yük değerleri Denklem 4.4’de belirtildiği şekilde hesaplanır.

$$N_i = \frac{P_i}{E_d A_g} E_i A_i \quad (4.4)$$

Denklemde; N_i – i. kademede kazığa etkiyen eksenel kuvvet (kN);

P_i – i. kademede donatıya etkiyen eksenel kuvvet (kN);

E_d – Donatı deformasyon modülü (GPa);

E_i – i. kademede kazık malzemesinin deformasyon modülü (GPa) (kazıkta beton ve çeliğin birleşik deformasyon modülü alınır.);

A_g – Rebar tipi gerilim ölçer kesit alanı (m²);

A_i – i. kademede kazık kesit alanı (m²);

Kazık eksenel yük değerleri hesaplandıktan sonra kademeler arasındaki eksenel yük farklarından kazık-zemin arasında oluşan birim sürtünme direnci değerleri ile kazık birim uç direnci denklem 4.5 ve 4.6’da belirtildiği şekilde elde edilir.

$$\tau_{si} = \frac{N_i - N_{i+1}}{u l_i} \quad (4.5)$$

$$\tau_p = \frac{N_n}{A_k} \quad (4.6)$$

Denklemlerde; τ_{si} – i. kademede kazık çevresel birim sürtünme direnci (kPa);

τ_p – kazık birim uç direnci (kPa);

u – kazık çevresi (m);

N_n – Kazık ucuna etkiyen kuvvet (kN);

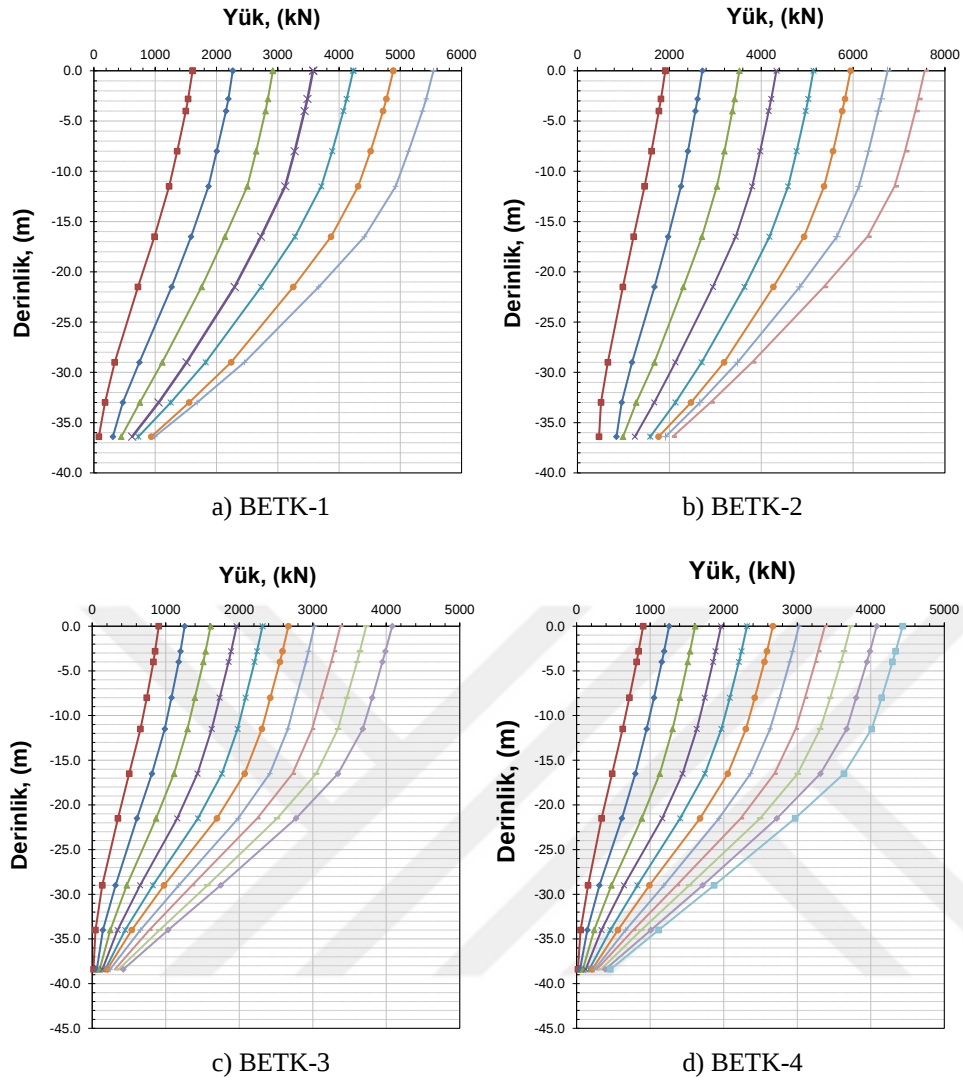
l_i – i ve i+1 kademelerinin arasındaki mesafe (m);

Yukarıda belirtilen formüller yardımıyla Basra test kazıkları boyunca etkiyen eksenel yük ve birim sürtünme direnci değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.30’da her yük kademesi için elde edilen eksenel yük değerlerinin derinlikle değişimleri verilmiştir. Şekil 4.31’de ise verilen grafiklerde ise 80 ve 60 cm çaplı test kazıklarına (BETK-1 ve BETK-2) ait göçme yükünde elde edilen sürtünme direnci değerlerinin derinlikle değişimi verilmiştir. Yükleme deneyinde rebar tipi gerilim ölçerler ile elde edilen toplam birim sürtünme direnci değerleri Çizelge 4.20’de özetlenmiştir. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 30-268 kPa arasında değişmektedir. Çizelgede görüleceği üzere elde edilen birim sürtünme direnci değerleri daha önce hesaplanan birim sürtünme direnci değerleri ve zemin cinsleri ile karşılaştırılmıştır. Yumuşak kil birimlerde elde edilen sürtünme direnci değerleri çok sıkı kum birimlerinden daha küçük çıkmıştır. Ayrıca genel olarak zeminin sıklığı ve kıvamı derinlikle arttığı için grafiklerde görüleceği üzere toplam birim sürtünme direnci değerleri de derinlikle artmaktadır. Yumuşak kil toplam birim sürtünme direnci değeri ortalama 20 kPa, orta katı kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri 40-50 kPa, orta katı-katı kil tabakasının toplam birim sürtünme direnci değerleri 60-75 kPa, sıkı kım ve çok sıkı kum tabaklarının toplam birim sürtünme direnci değerleri ise 75-90 kPa olarak elde

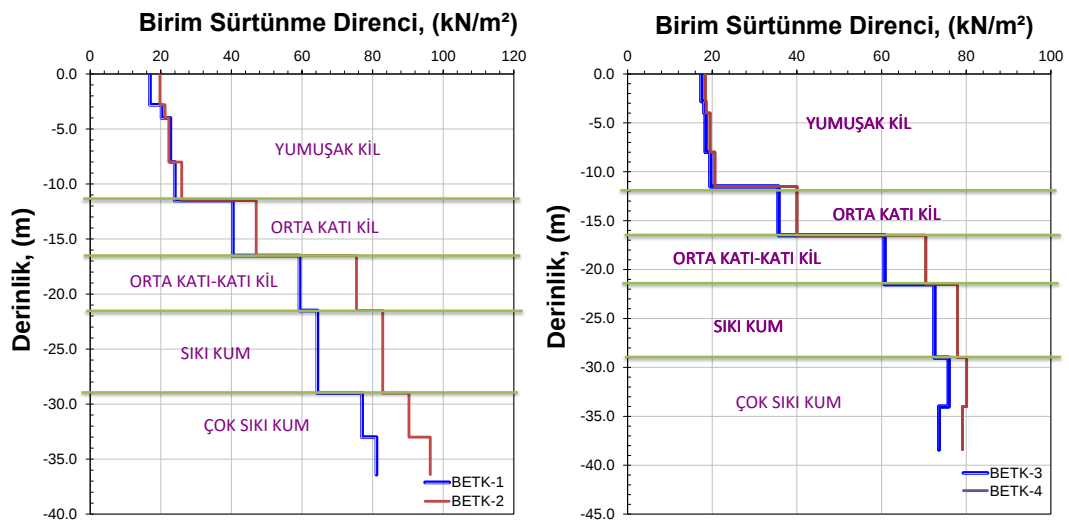
edilmiştir. Her dört kazıdaki toplam birim sürtünme direnci değerleri ortalaması birbirine yakın elde edilmiştir. Çizelgede ve grafiklerde görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri bazı zemin birimlerinde gerinim ölçerlerden elde edilen değerlere göre düşük çıkmıştır. Oturma analizlerinin sağlamlasının doğru yapılması için sahada kazık oturma hesaplarında test kazıklarında ölçülen toplam birim sürtünme direnci verileri kullanılmıştır. Çünkü bu kazıklar göçme durumuna kadar yüklenmiştir.

Çizelge 4.20 : Toplam birim sürtünme direnci değerleri.

BETK-1				BETK-2		
Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)
Yumuşak Kil	2.80	25	21	2.80	25	21
Yumuşak Kil	1.20	25	21	1.20	25	21
Yumuşak Kil	4.00	25	21	4.00	25	21
Yumuşak Kil	3.50	25	21	3.50	25	26
Orta Katı Kil	5.00	40	40	5.00	40	47
Katı Kil	5.00	60	59	5.00	60	75
Sıkı Kum	7.50	105	64	7.50	105	83
Çok Sıkı Kum	4.00		77	4.00		90
Çok Sıkı Kum	3.40		81	3.40		96
BETK-3				BETK-4		
Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m²)
Yumuşak Kil	2.80	25	18	2.80	25	19
Yumuşak Kil	1.20	25	18	1.20	25	19
Yumuşak Kil	4.00	25	18	4.00	25	19
Yumuşak Kil	3.50	25	18	3.50	25	19
Orta Katı Kil	5.00	40	36	5.00	40	40
Katı Kil	5.00	60	61	5.00	60	70
Sıkı Kum	7.50	105	72	7.50	105	78
Çok Sıkı Kum	5.00		76	5.00		80
Çok Sıkı Kum	4.40		73	4.40		80



Şekil 4.30 : Basra projesi test kazıklarına ait yük-derinlik grafikleri.



Şekil 4.31 : Basra projesi test kazıklarına ait birim sürtünme direnci-derinlik grafikleri.

4.4 İzmir Bomonti Projesi

İzmir Bomonti Projesi kapsamında 1 adet baret kazık üzerinde Osterberg yükleme deneyi yapılmıştır. Deney yapılan 1 adet baret kazık projeden önce imal edilen test kazığıdır ve kazıkta göçme gözlenene kadar yükleme yapılmıştır. Proje kapsamında Osterberg yükleme deneyi yapılan baret kazığı 2800x1200 mm boyutlarında ve 98 m boyundadır. Söz konusu sahada 130 m'ye varan sondajlar yapılmış ve kaya tabakasına rastlanılmamıştır. Söz konusu projede büyük boyutlu ve derin baret kazıkların tasarlanmasının sebebi yüksek katlı binadan gelen büyük yüklerin karşılanması ve oturmaların sınırlandırılmasıdır. Fore kazık yerine baret kazıkların tercih sebebi ise baret kazıklarda sürtünme yüzeyinin daha fazla olmasıdır çünkü proje kazıkları boyunca kaya tabakasına rastlanmadığı için kazıklar sürtünme kazığı olarak tasarlanmıştır.

4.4.1 Zemin bilgisi

Sahada yapılan zemin etüt çalışmaları kapsamında toplam 25 adet zemin araştırma sondajı yapılmıştır. Sondaj derinlikleri 25 m ile 240 m arasında değişmektedir. Arazide saha deneyi olarak SPT, CPT, Presiyometre ve arazi vane deneyleri yapılmıştır. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde standart zemin deneyleri (elek analizi, atterberg limit deneyleri, doğal birim hacim ağırlık deneyi, konsolidasyon deneyi, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleri, vb.) yapılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirilerek söz konusu test sahası için idealize zemin profili belirlenmiştir. Buna göre sahada en üstte 6 m kalınlığında gevşek kum-çakıl tabakası (SPT-N değerleri 5-17 arasında) ile 13 m kalınlığında yumuşak kil (SPT-N değerleri 3-13 arasında) tabakası yer alır. Bu tabakaların altında sırasıyla; orta sıkı kum-çakıl tabakası (SPT-N değerleri 8-16 arasında), kum-kil ar dalanması (SPT-N değerleri 14-19 arasında), çok katı kil tabakası (SPT-N değerleri 17-34 arasında), çok katı-sert kil tabakası (SPT-N değerleri 20-48 arasında), kum-kil ar dalanması (SPT-N değerleri genel olarak refü vermiştir.), sert kil tabakası (SPT-N değerleri 43-60 arasında) ve daha aşağı seviyelerde ise çok sıkı kum-çakıl tabakaları ile sert kil tabakalarının ar dalanması (SPT-N değerleri 67-81 arasında) yer almaktadır. Saha ve laboratuvar deneyleri beraber değerlendirilerek elde edilen zemin parametreleri Çizelge 4.21'de verilmiştir. Sahada yer altı suyuna yüzeye genel olarak yüzeyden 2.00 m aşağıda rastlanmıştır.

Çizelge 4.21 : İzmir Bomonti projesi için idealize zemin profili ve zemin parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poison Oranı (μ)
Gevşek Kum-Çakıl	6.00	18	0	29	3000	0.4
Yumuşak KİL	13.00	18	50	0	3000	0.4
Orta Sıkı Kum-Çakıl	5.00	19	0	30	6000	0.35
Kum-Kil Ardalanması	7.00	19	70	0	11000	0.35
Çok Katı Kil	14.00	19	90	0	30000	0.3
Çok Katı-Sert Kil	7.00	20	150	0	55000	0.3
Kum-Kil Ardalanması	10.00	20	130	0	30000	0.3
Sert Kil	16.00	20	180	0	60000	0.3
Çakıl-Kum-Kil	15.00	20	220	0	90000	0.3
Çakıl-Kum-Kil	-	20	220	0	100000	0.3

Çizelge 4.22’de verilen zemin parametreleriyle yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda 2800x1200 mm ebatlarında ve 98 m boyundaki baret kazıkların toplam taşıma gücü değeri 42000 kN olarak elde edilmiştir.

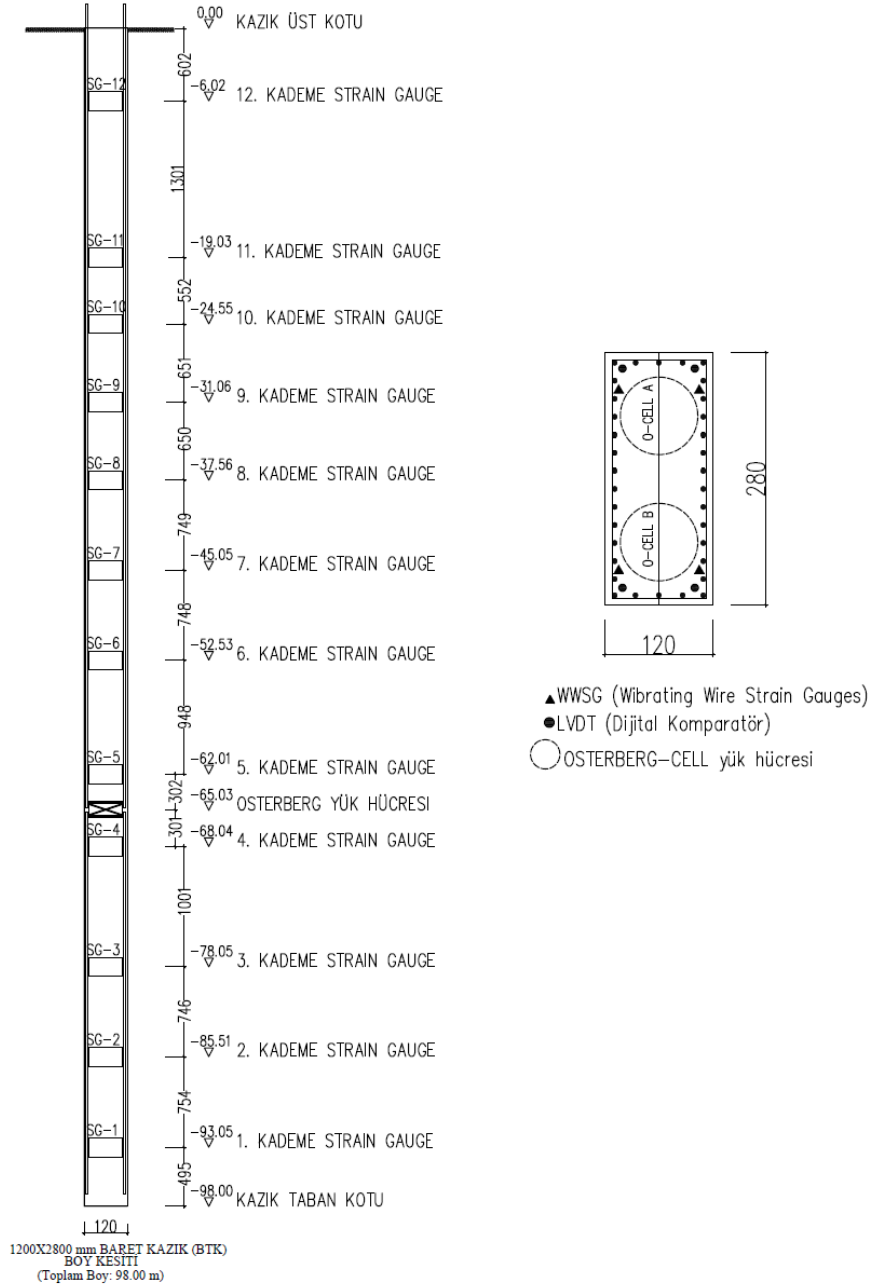
4.4.2 Deney sistemi ve deney programı

Bomonti Projesi kapsamında yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda test kazığının toplam taşıma gücü 42000 kN olarak belirlenmiştir. 98 m boyundaki test kazığında Osterberg yükleme deney sistemi uygulanmıştır. Deney öncesinde baret test kazığının içerisine gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Bu kazıklarda her kademede toplam 4’er adet gerinim ölçer bağlanırken kademe aralıkları 5-10 m arasında değişmektedir. Gerinim ölçer kademeleri genel olarak kazık boyunca geçilen zemin profiline göre belirlenmiştir. Test kazığında toplam 12 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Deney sisteminde 2 adet 860 mm çapında osterberg yük hücresi kazık içerisine yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücreleri koruma plakalarıyla beraber boy donatıları arasına monte edilmiştir. Bomonti projesi test kazığında Osterberg yük hücresi -65.00 kotunda (kazık uç kotundan 33 m yukarıda) yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücrelerinin her biri 27 MN yük uygulayacak şekilde kalibre edilmiştir. Yük hücrelerinin altında ve üstünde koruma plakaları kaynaklanmıştır. Test kazıklarının uç

ve üst bölge deplasmanlarını ölçmek için hem osterberg hücre seviyesinde hem de kazık uç ve kazık başı bölgesine deplasman ölçerler (telltale) yerleştirilmiştir. Bu deplasman ölçerler yardımıyla deney programına uygun olarak deplasman verileri alınmıştır. Osterberg yük hücresi ve gerinim ölçer seviyelerini gösteren sistem detayları Şekil 4.32’de özetlenmiştir. Test kazıklarına uygulanan deney programının detayları Çizelge 4.22’de verilmiştir. Osterberg hücrelerinden maksimum uygulanan çift yönlü yük 54.89 MN’dur. Çizelgede de görüleceği üzere BTK numaralı kazıkta toplam 15 farklı kısmen eşit yük artış adımları uygulanmıştır. Deplasman okumaları her dakika için data loggerlar ile kaydedilmiştir ancak bütün yük adımlarında 0, 1, 5, 10, 20, 30. dakikalardaki deplasman okumaları not alınmıştır. Yük artışı için kanıt yükleme deney prosedüründe olduğu gibi 0.1mm/20 dakika oturma miktarı esas alınmıştır. 20 dakikalık beklemede 0.1 mm oturmanın aşılması durumunda yük arttırımı yapılmamış ve 30 dakika daha beklenmiştir. Tes kazığında yukarı yönlü uygulanan maksimum net yük 51.88 MN değerine ulaştığında O-cell üstündeki zemin tabakalarının toplam sürtünme direnci aşılmış ve O-cell yük hücresinin üstünde ölçülen deplasman değeri 29.23 mm değerine ulaşmıştır. O-cell yük hücresinden aşağı yönlü uygulanan maksimum yük ise 54.89 MN’dur ve bu yükte O-cell yük hücrsinin altındaki ölçülen deplasman değeri 88.60 mm’dir.

Çizelge 4.22 : Deney programı.

Yük (kN)	Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)	Yük (kN)	Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)
4370	30 dk	0,1,1,3,5,10,10	48430	10 dk	0,1,1,3,5
8290	50 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10	35190	10 dk	0,1,1,3,5
12580	40 dk	0,1,1,3,5,10,10,10	17710	10 dk	0,1,1,3,5
16810	40 dk	0,1,1,3,5,10,10,10	0	60 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10,10
20680	60 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10,10			
25660	60 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10,10			
29520	70 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10,10,10			
33440	70 dk	0,1,1,3,5,10,10,10,10,10,10			
37520	120 dk	0,1,1,3,5, 11x10			
41750	160 dk	0,1,1,3,5, 15x10			
45940	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10			
50230	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10			
52400	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10			
53770	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10			
54890	40 dk	0,1,1,3,5,10,10,10			

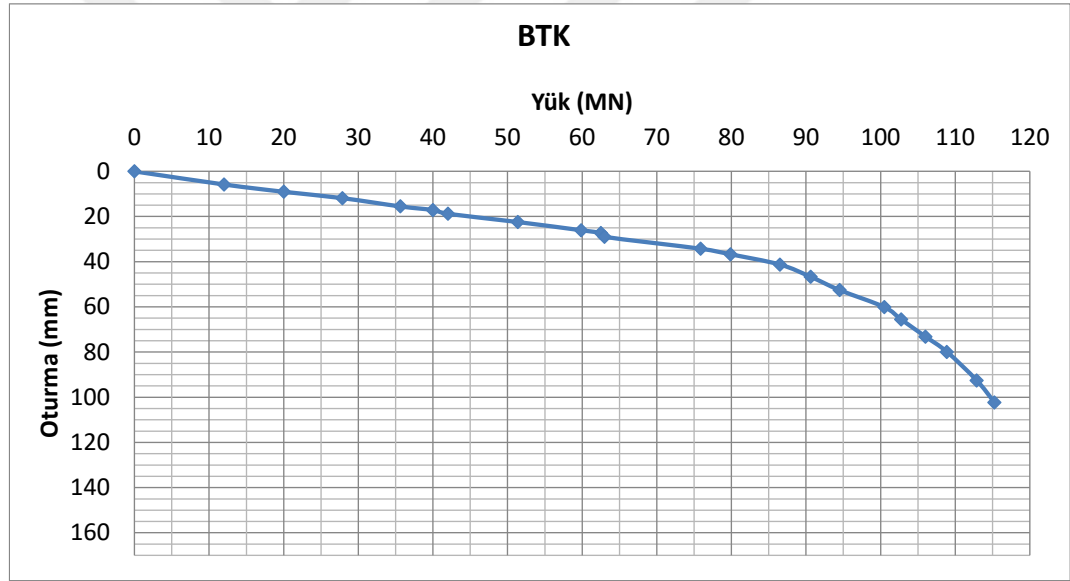


Şekil 4.32 : Test kazığı enstrümantasyonu.

4.4.3 Deney sonuçları ve değerlendirmesi

1200x2800 mm boyutlarındaki baret test kazığını göçme durumuna kadar yüklemek için Osterberg-cell yükleme deneyi uygulanmıştır. Böylece kazıklarda meydana gelen toplam birim sürtünme direnci ve uç direncini elde edilebildi. Uygulanan Osterberg deneylerinin prosedürü Bölüm 2.2’de belirtildiği şekilde Çizelge 4.22’de belirtilen programa uygun olacak şekilde yapılmıştır. Deplasman dataları LVDT’ler yardımıyla dakikada bir adet okuma alınarak data loggerdan bilgisayara aktarılmıştır. Ancak verilerin değerlendirilmesi Çizelge 4.22’de verilen programa uygun olarak ve

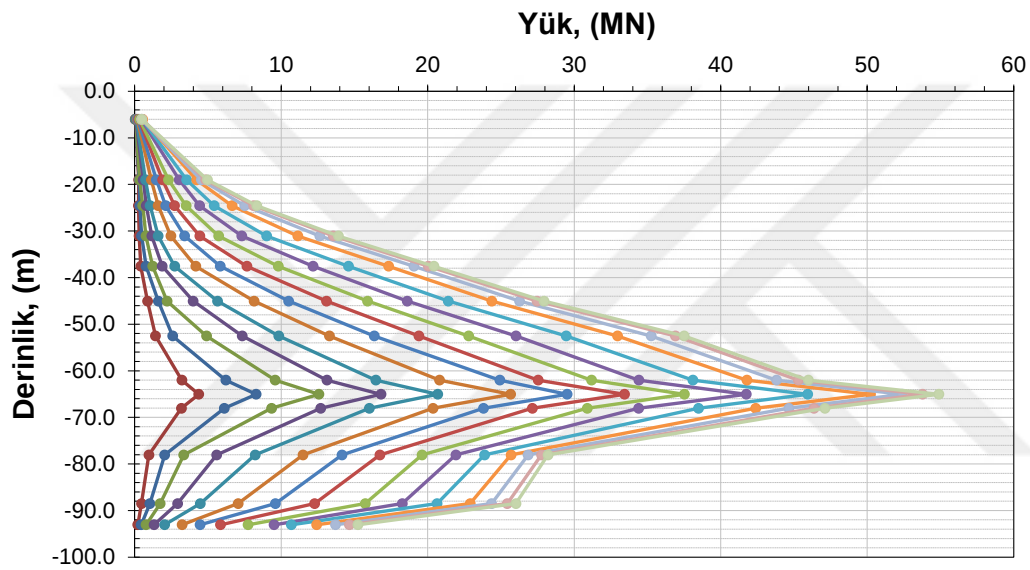
deplasman kriterlerine bağılı kalınarak yapılmıştır. BTK numaralı kazıkta yapılan yükleme deneyinde O-cell yük hücresinden uygulanan yük 54.89 MN değerine ulaştığında kazık ucundaki deplasmanlar 94.69 mm olarak ölçülmüş ve göçme durumuna geçilmiştir. Kazık başındaki deplasmanlar ise aynı yükte 16.88 mm olarak ölçülmüştür. Yük boşaltıldıktan sonra kazık ucu deplasmanları 92.28 mm olarak ölçülürken kazık başı deplasmanı 16.59 mm olarak ölçülmüştür. BTK numaralı kazıkta kazık uç bölgesindeki deplasmanlar daha çok artmış ve bu yüzden göçmenin O-cell yük hücresinin alt kısmında meydana geldiği söylenebilir. Yapılan deneyler sonucunda Bölüm 2.2’de belirtilen yöntem ile BTK test kazığı için elde edilen eşdeğer yük-oturma grafiği Şekil 4.33’de verilmiştir. BTK kazığına ait tasarım yükü 42 MN olarak belirlenmişti. BTK kazığının tasarım yüküne karşılık gelen oturma değeri 18.8 mm olarak elde edilmiştir. Tasarım yükünün %150’sine karşılık gelen 63 MN test yükünde ise oturma değeri 29 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.33 : BTK yük-oturma grafiği.

Gerinim-ölçer datalarından elde edilen veriler değerlendirilerek test kazığına etki eden eksenel yük değerleri ve kazık boyunca elde edilen maksimum sürtünme ve uç direnci değerleri hesaplanmıştır. Sürtünme ve uç direnci hesapları Bakü projesinde anlatılan Osterberg yükleme deneylerine benzer şekilde yapılmıştır. BTK kazığı boyunca elde edilen eksenel yük değerlerinin derinlikle değişimleri Şekil 4.34’de verilmiştir. Şekil 3.34’de görüleceği üzere BTK kazığında -93.05 kotunda yer alan 1. kademe gerinim ölçer seviyesinde etki eden maksimum eksenel yük 15.23 MN’dur. Kazık alt kotu -98.00 olduğuna göre gerinim ölçer seviyesi altındaki 4.95 m boyundaki kısımdaki

sürtünme direnci dikkate alınarak kazık uç direnci elde edilebilir. Bunun için 1-2. Kademedeki gerinim ölçerlerden elde edilen sürtünme direnci dikkate alınmıştır ve 1. kademe altındaki kısımda benzer sürtünme direnci olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda fore kazık uç noktasına etkiyen maksimum yük 3.53 MN olarak hesaplanmıştır. 1200x2800 mm boyutlarındaki BTK numaralı test kazığının birim uç direnci ise 1051 kPa olarak elde edilir. Şekil 4.34'te görüleceği üzere Test kazığında deney sırasında kazık ucundaki deplasmanlar ani olarak arttığı için bu kazıkta kazık ucunun taşıma gücünün aşıldığı söylenebilir ve bu yüzden kazık ucu toplam birim uç direnci 1051 kPa olarak alınabilir.



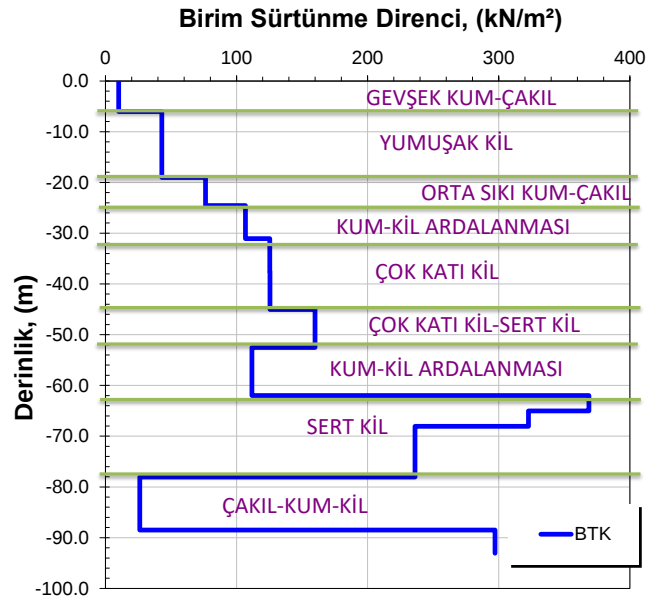
Şekil 4.34 : BTK eksenel yük-derinlik grafiği.

Şekil 4.35'de verilen grafikte test kazığı için deney sonucunda elde edilen toplam birim sürtünme direnci (τ_{su}) değerlerinin derinlikle değişimi görülmektedir. Zemin profili de bu grafiğe işlenerek toplam sürtünme direnci değerleri ile zemin cinsleri arasındaki değişim gösterilmiştir. Yükleme deneyinde gerinim ölçerler ile elde edilen sürtünme direnci değerleri Çizelge 4.23'de özetlenmiştir. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 4-368 kPa arasında değişmektedir. Çizelgede görüleceği üzere deney sonucunda elde edilen toplam birim sürtünme direnci değerleri, daha önce hesaplanan birim sürtünme direnci değerleri ve zemin cinsleri ile karşılaştırılmıştır. Kil birimlerde elde edilen sürtünme direnci değerleri beklendiği üzere granüler zemin ve dolgu birimlerinden daha büyük çıkmıştır. Sonuçlara göre sürtünme direnci değerleri ile kil birimlerin

sertlikleri de birbirleri ile örtüşmektedir. Sert kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri diğer zemin birimlerinden genel olarak daha büyük elde edilmiştir. Zemin profilinin üst kısımlarında yer alan kum-çakıl birimlerin toplam birim sürtünme direnci değerleri 10-70 kPa arasında elde edilirken çok katı ve sert kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri 120-360 kPa arasında elde edilmiştir. Çizelgede ve grafiklerde görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri bazı zemin birimlerinde gerinim ölçerlerden elde edilen değerlere göre düşük çıkmıştır. Oturma analizlerinin sağlamlasının doğru yapılması için oturma analizlerinde ölçülen toplam birim sürtünme direnci verileri kullanılmıştır.

Çizelge 4.23 : Toplam birim sürtünme direnci değerleri.

Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m ²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m ²)
Gevşek Kum	6.02	8	3.9
Yumuşak Kil	13.01	50	37.9
Orta Sıkı Kum	5.52	40	70.3
Kum-Kil Ardalanması	6.51	70	101
Çok Katı Kil	6.50	85	120
Çok Katı Kil	7.49	112	119
Çok Katı-Sert Kil	7.48	100	155
Kum-Kil Ardalanması	9.48	100	106
Sert Kil	3.02	125	363
Sert Kil	3.01	125	326
Sert Kil	10.01	125	236
Çakıl-Kum-Kil	10.46	145	54.2
Çakıl-Kum-Kil	9.49	145	297



Şekil 4.35 : BTK toplam birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.

4.5 Yenikapı Projesi

Yenikapı Projesi kapsamında 1 adet baret kazık üzerinde Osterberg yükleme deneyi yapılmıştır. Deney yapılan 1 adet baret kazık projeden önce imal edilen test kazığıdır ve kazıkta göçme gözlenene kadar yükleme yapılmıştır. Proje kapsamında Osterberg yükleme deneyi yapılan baret kazığı 2800x1000 mm boyutlarında ve 37.5 m boyundadır. Söz konusu projede tasarlanan baret kazıklar viyadük temelleri altında imal edilecektir. Söz konusu sahada yapılan zemin etütleri kapsamında 25-52 m arasında değişen derinliklerde toplam 21 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Bu projede de Bomonti projesine benzer şekilde kaya tabakasına rastlanılmadığı için temel altında büyük boyutlu baret kazıklar imal edilmiştir. Baret kazıkların sürtünme yüzey alanı daha fazla olduğu için benzer kesit alanına sahip fore kazıklara göre taşıma gücü daha fazla olacaktır.

4.5.1 Zemin bilgisi

Proje kapsamında yapılan sondajlar incelendiğinde zemin birimlerinin üst kısmında 5.00-7.50 metre arasında değişen kalınlıklarda kum-çakıl birimlerden oluşan sunni dolgu tabakası görülmektedir. Bu tabakanın altında ise sırası ile; gevşek siltli kum (SPT-N₃₀: 3-5), katı kil (SPT-N₃₀: 10-20) ve sert kil (SPT-N₃₀: 30-R) tabakaları yer almaktadır. Sondajlar sırasında her 1.5 m’de bir SPT deneyleri yapılmıştır. Zemin etüdü kapsamında yapılan 21 adet sondaj 10 adedinde presiyometre deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, 10 adet sondaj kuyusunda 3 m aralıklarla uygulanmıştır. Bu deneyler yardımıyla oturma analizlerinde kullanılan zemin elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Sondajlar sırasında çeşitli derinliklerden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde zemin laboratuvarında standart zemin deneyleri yapılarak zemin indeks özellikleri ve mukavemet parametreleri belirlenmiştir. Siltli kum birimleri üzerinde laboratuvarında zemin direkt kesme deneyleri yapılırken kil birimler üzerinde üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Siltli kum birimlerde SPT-N₃₀ oldukça düşük elde edilirken direkt kesme deneylerinden elde edilen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri de buna paralel olarak çok düşük elde edilmiştir. Hesaplarda üst bölgedeki kum birimler için elde edilen sürtünme direnci değeri yok denecek kadar azdır. Katı kil birimlerde yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilen kohezyon değerleri de saha deneyleri ile uyumludur.

Yenikapı projesi kapsamında imal edilen test kazığı boyunca geçilen zemin birimleri, tabaka kalınlıkları ve belirlenen zemin mühendislik parametreleri Çizelge 4.24'te özetlenmiştir. Zemin tabakalarının mühendislik parametreleri, saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçların beraber değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Yapılan sondajlar sırasında yer altı suyu doğal zemin kotundan 4 m aşağıda rastlanılmıştır.

Çizelge 4.24 : Yenikapı idealize zemin profili ve parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m^3)	Kohezyon (c) (kN/m^2)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) ($^\circ$)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m^2)	Poison Oranı (μ)
Gevşek Siltli Kum	10.00	18	0	28	15000	0.3
Katı KİL	12.00	19	50	0	30000	0.35
Sert KİL 1	6.00	20	200	0	50000	0.35
Sert KİL 2	-	21	250	0	90000	0.3

Çizelge 4.24'de verilen zemin parametreleriyle yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda 2800x1000 mm ebatlarında ve 37.5 m boyundaki baret kazıkların tasarım taşıma gücü değeri 10000 kN olarak elde edilmiştir.

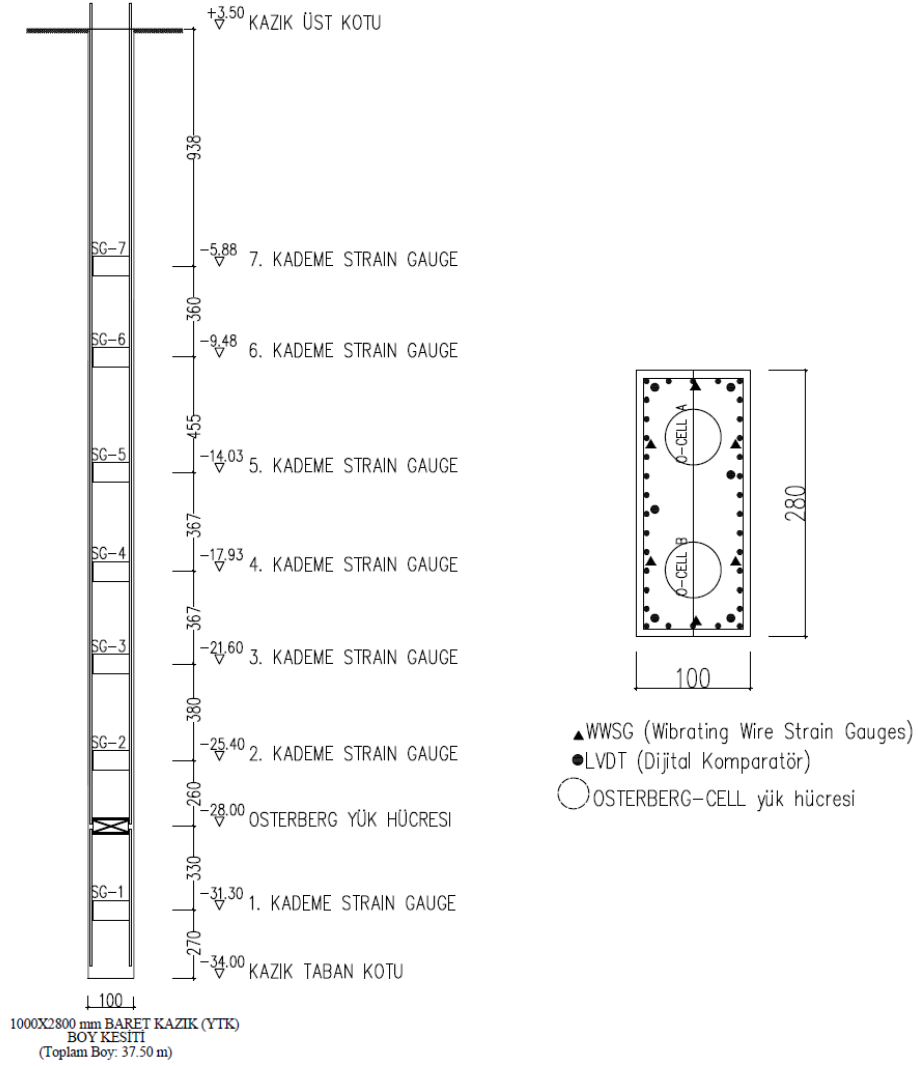
4.5.2 Deney sistemi ve deney programı

Deney sistemi, Bomonti projesinde belirtilen sisteme benzer olarak Osterberg yükleme deneyine uygun olacak şekilde oluşturulmuştur. Test kazığının içerisine toplam 7 kademe ve her kademede 6'şar adet gerinim ölçer (strain gauge) bağlanırken kademe aralıkları 2.5-5 m arasında değişmektedir. Deney sisteminde 2 adet 430 mm çapında osterberg yük hücresi kazık içerisine yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücreleri koruma plakalarıyla beraber boy donatıları arasına monte edilmiştir. Bomonti projesi test kazığında Osterberg yük hücresi -28.00 kotunda (kazık uç kotundan 6 m yukarıda) yerleştirilmiştir. Osterberg yük hücrelerinin her biri 27 MN yük uygulayacak şekilde kalibre edilmiştir. Yük hücrelerinin altında ve üstünde koruma plakaları kaynaklanmıştır. Test kazığının uç ve üst bölge deplasmanlarını ölçmek için hem osterberg hücre seviyesinde hem de kazık uç ve kazık başı bölgesine deplasman ölçerler (telltale) yerleştirilmiştir. Bu deplasman ölçerler yardımıyla deney programına uygun olarak deplasman verileri alınmıştır. Osterberg yük hücresi ve gerinim ölçer seviyelerini gösteren sistem detayları Şekil 4.36'da özetlenmiştir. Test kazığına uygulanan deney programının detayları Çizelge 4.25'de verilmiştir. Osterberg

hücrelerinden uygulanan maksimum çift yönlü yük 10.42 MN'dur. Çizelgede de görüleceği üzere YTK numaralı kazıkta toplam 15 farklı kısmen eşit yük artış adımları uygulanmıştır. Deplasman okumaları her dakika için data loggerlar ile kaydedilmiştir ancak bütün yük adımlarında 0, 1, 5, 10, 20, 30. dakikalardaki deplasman okumaları not alınmıştır. Yük artışı için kanıt yükleme deney prosedüründe olduğu gibi 0.1mm/20 dakika oturma miktarı esas alınmıştır. 20 dakikalık beklemede 0.1 mm oturmanın aşılması durumunda yük arttırımı yapılmamış ve 30 dakika daha beklenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra Osterberg yük hücresi altında göçme meydana gelmiş ve yük boşaltımına geçilmiştir. Yükün boşaltılması da kademeli bir şekilde yapılmış ve yük boşaltımında her kademedede 10 dakika beklenmiştir. Yük tamamen boşaltıldığında ise deplasman artışı yavaşlayana kadar beklenmiştir. Test kazığında yukarı yönlü uygulanan maksimum net yük 9.20 MN değerine ulaştığında O-cell üstündeki zemin tabakalarının toplam sürtünme direnci aşılmış ve O-cell yük hücresinin üstünde ölçülen deplasman değeri 10.85 mm değerine ulaşmıştır. O-cell yük hücresinden aşağı yönlü uygulanan maksimum yük ise 10.42 MN'dur ve bu yükte O-cell yük hücresinin altında ölçülen deplasman değeri 73.14 mm'dir.

Çizelge 4.25 : Yenikapı idealize zemin profili ve parametreleri.

Yük (kN)	Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)
1000	30 dk	0,1,1,3,5,10,10
1370	30 dk	0,1,1,3,5,10,10
2010	30 dk	0,1,1,3,5,10,10
2850	30 dk	0,1,1,3,5,10,10
3570	40 dk	0,1,1,3,5,10,10,10
4210	60 dk	0,1,1,3,5, 5x10
4870	90 dk	0,1,1,3,5,10, 8x10
5590	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
6260	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
6950	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
7660	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
8370	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
9030	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
9700	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
10420	180 dk	0,1,1,3,5, 17x10
8840	60 dk	0,10,10,10,10,10,10
6200	10 dk	0,1,1,3,5
3870	10 dk	0,1,1,3,5
2210	10 dk	0,1,1,3,5
0	750 dk	0,1,1,3,5,20, 24x30

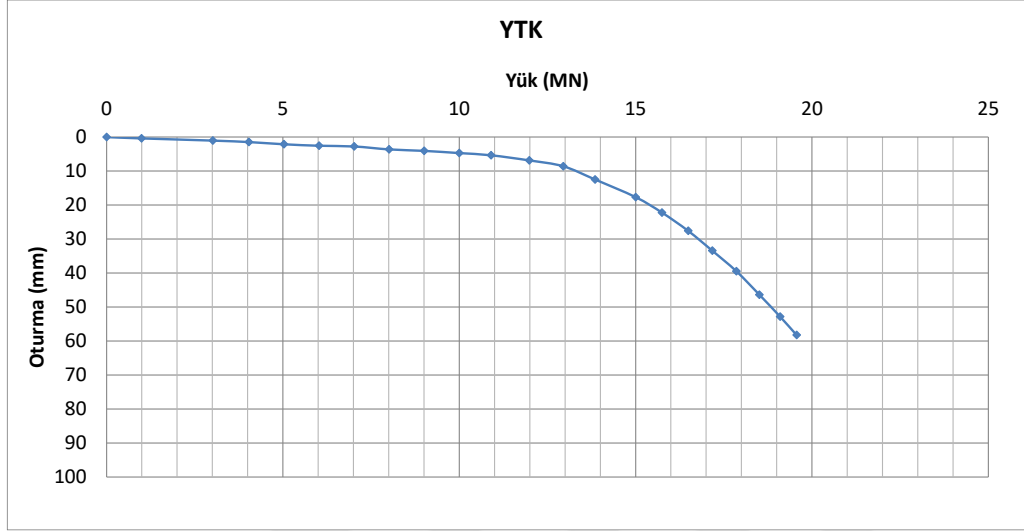


Şekil 4.36 : Test kazığı enstrümantasyonu.

4.5.3 Deney sonuçları ve değerlendirmesi

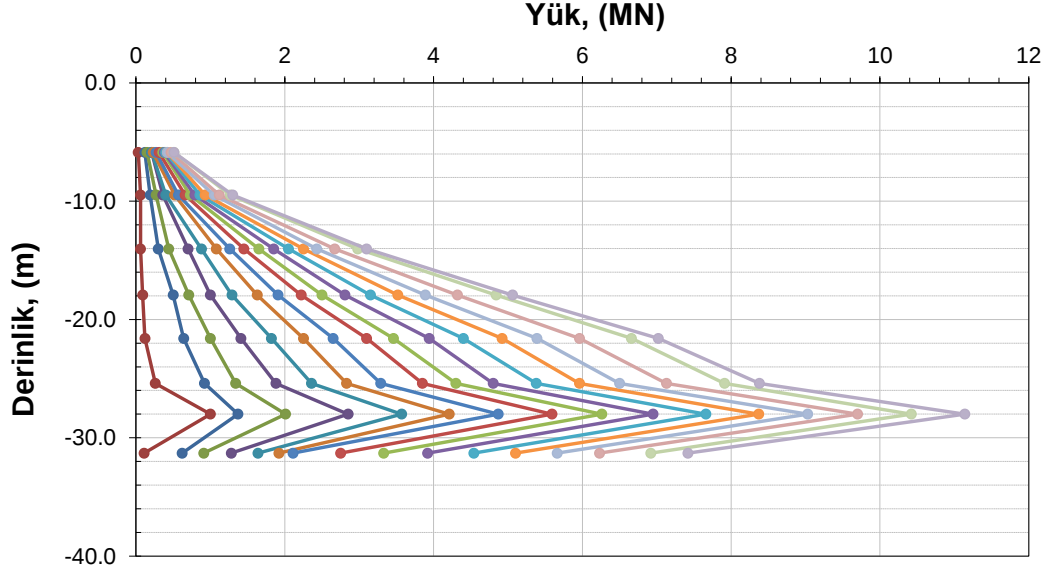
1000x2800 mm boyutlarındaki baret test kazığını göçme durumuna kadar yüklemek için Osterberg-cell yükleme deneyi uygulanmıştır. Deplasman dataları LVDT'ler yardımıyla dakikada bir adet okuma alınarak data loggerdan bilgisayara aktarılmıştır. Ancak verilerin değerlendirmesi Çizelge 4.25'de verilen programa uygun olarak ve deplasman kriterlerine bağlı kalınarak yapılmıştır. YTK numaralı kazıkta yapılan yükleme deneyinde O-cell yük hücresinden uygulanan yük 10.42 MN değerine ulaştığında kazık ucundaki deplasmanlar 73.14 mm olarak ölçülmüş ve göçme durumuna geçilmiştir. Kazık başındaki deplasmanlar ise aynı yükte 10.85 mm olarak ölçülmüştür. BTK numaralı kazıkta kazık uç bölgesindeki deplasmanlar daha çok artmış ve bu yüzden göçmenin O-cell yük hücresinin alt kısmında meydana geldiği söylenebilir. Yapılan deneyler sonucunda Bölüm 2.2'da belirtilen CEMSET oturma

analizi yöntemi ile YTK test kazığı için elde edilen eşdeğer yük-oturma grafiği Şekil 4.37’de verilmiştir. YTK kazığına ait tasarım yükü 10 MN olarak belirlenmiştir. YTK kazığının tasarım yüküne karşılık gelen oturma değeri 4.7 mm olarak elde edilmiştir. Tasarım yükünün %150’sine karşılık gelen 15 MN test yükünde ise oturma değeri 17 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.37 : YTK yük-oturma grafiği.

Gerinim-ölçer datalarından elde edilen veriler değerlendirilerek test kazığına etki eden eksenel yük değerleri ve kazık boyunca elde edilen maksimum sürtünme ve uç direnci değerleri hesaplanmıştır. Sürtünme ve uç direnci hesapları Bakü projesinde anlatılan Osterberg yükleme deneylerine benzer şekilde yapılmıştır. Gerinim ölçerlerden alınan datalar yardımıyla YTK kazığı boyunca elde edilen eksenel yük değerlerinin derinlikle değişimleri Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekil 4.38’de görüleceği üzere YTK kazığında -31.3 kotunda yer alan 1. kademe gerinim ölçer seviyesinde etki eden maksimum eksenel yük 7.42 MN’dur. Kazık alt kotu -34.00 olduğuna göre gerinim ölçer seviyesi altındaki 2.7 m boyundaki kısımdaki sürtünme direnci dikkate alınarak kazık uç direnci elde edilebilir. Bunun için 1-2. Kademedeki gerinim ölçerlerden elde edilen sürtünme direnci dikkate alınmıştır ve 1. kademe altındaki kısımda benzer sürtünme direnci olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda fore kazık uç noktasına etkiyen maksimum yük 4.06 MN olarak hesaplanmıştır. 1000x2800 mm boyutlarındaki YTK numaralı test kazığının toplam birim uç direnci (τ_{bu}) ise 1449 kPa olarak elde edilir. Test kazığında deney sırasında kazık ucundaki deplasmanlar ani olarak arttığı için bu kazıkta kazık ucunun taşıma gücünün aşıldığı söylenebilir ve bu yüzden kazık ucu toplam birim uç direnci 1449 kPa olarak alınabilir.

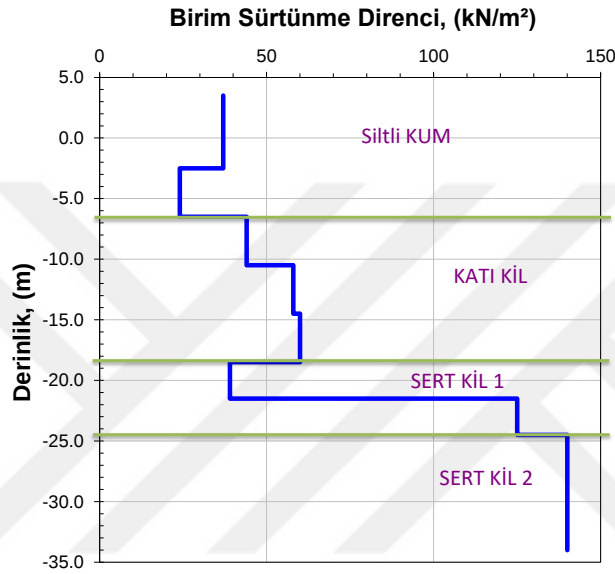


Şekil 4.38 : YTK eksenel yük-derinlik grafiği.

Şekil 4.39’da verilen grafikte test kazığı için deney sonucunda elde edilen toplam birim sürtünme direnci (τ_{su}) değerlerinin derinlikle değişimi görülmektedir. Zemin profili de bu grafiğe işlenerek toplam sürtünme direnci değerleri ile zemin cinsleri arasındaki değişim gösterilmiştir. Yükleme deneyinde gerinim ölçerler ile elde edilen sürtünme direnci değerleri Çizelge 4.26’da özetlenmiştir. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 25-140 kPa arasında değişmektedir. Çizelgede görüleceği üzere deney sonucunda elde edilen toplam birim sürtünme direnci değerleri, daha önce hesaplanan birim sürtünme direnci değerleri ve zemin cinsleri ile karşılaştırılmıştır. Kil birimlerde elde edilen sürtünme direnci değerleri beklendiği üzere gevşek granüler zemin birimlerinden daha büyük çıkmıştır. Sonuçlara göre sürtünme direnci değerleri ile kil birimlerin sertlikleri de birbirleri ile örtüşmektedir. Sert kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri katı kil birimlerinden genel olarak daha büyük elde edilmiştir. Zemin profilinin üst kısımlarında yer alan siltli kum birimlerin toplam birim sürtünme direnci değerleri 25-37 kPa arasında elde edilirken katı ve sert kil birimlerinin birim sürtünme direnci değerleri 58-140 kPa arasında elde edilmiştir. Çizelgede görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri gerinim ölçerlerden elde edilen değerlerle genel olarak uyumlu çıkmıştır. Oturma analizlerinin sağlamlasının doğru yapılması için oturma analizlerinde ölçülen toplam birim sürtünme direnci verileri kullanılmıştır.

Çizelge 4.26 : Hesaplanan ve ölçülen toplam birim sürtünme direnci değerleri.

Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m ²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m ²)
Siltli Kum	6.00	10	37
Siltli Kum	4.00	18	24
Katı Kil	4.00	50	44
Katı Kil	4.00	50	58
Katı Kil	4.00	50	60
Sert Kil-1	3.00	150	39
Sert Kil-1	3.00	150	125
Sert Kil-2	9.50	180	140



Şekil 4.39 : YTK toplam birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.

4.6 Bağdat Projesi

Bağdat stadyum projesi kapsamında proje tasarım öncesinde bir adet enstrümanlı kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Yükleme deneyi yapılan test kazığının çapı 800 mm ve boyu 25 m'dir. Yükleme deney sistemi üstten yüklemelidir ve test kazığı etrafında 4 adet reaksiyon kazığı imal edilmiştir. Reaksiyon kazıkları da 800 mm çapında ve 25 m boyundadır. Enstrümanlı olarak imal edilen test kazığının donatılarına belli aralıklarla gerinim ölçerler (strain gage) bağlanmıştır.

Bu bölümde; Bağdat Stadyum Projesi kapsamında imal edilen test kazığının imal edildiği bölgedeki zemin birimlerinin tanımı ve parametreleri, yapılan deney yöntemi ve deney sonuçları açıklamaları ve son olarak deney sonuçlarının değerlendirilmesi yer almaktadır.

4.6.1 Zemin bilgisi

Sahada yapılan zemin etüt çalışmaları kapsamında 20-35 m arasında değişen derinliklerde toplam 10 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Sondaj çalışmaları sırasında her 1.5 m’de bir adet SPT deneyi yapılmıştır. Sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvarda standart zemin deneyleri (elek analizi, atterberg limit deneyleri, birim hacim ağırlık deneyleri, kimyasal deneyler, tek eksenli basınç dayanımı ve konsolidasyon deneyleri) yapılmıştır. Test kazığı bölgesinde yapılan sondajlar incelendiğinde zemin birimlerinin üst kısmında ortalama 9 metre kalınlığında orta katı killi silt tabakası (SPT-N₃₀: 9-17) görülmektedir. Bu tabakanın altında ise sırası ile; çok katı siltli kil taakası (SPT-N₃₀: 31-39), sert siltli kil tabakası (SPT-N₃₀: 35-42) ve daha aşağı seviyelerde ise siltli kum (SPT-N₃₀: 28-35) tabakaları yer almaktadır.

Bağdat projesi kapsamında imal edilen test kazığı boyunca geçilen zemin birimleri, tabaka kalınlıkları ve belirlenen zemin mühendislik parametreleri Çizelge 4.27’de özetlenmiştir. Zemin tabakalarının mühendislik parametreleri, saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçların beraber değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Yapılan sondajlar sırasında yer altı suyuna doğal zemin kotundan 2.5 m aşağıda rastlanılmıştır.

Çizelge 4.27 : Bağdat projesi idealize zemin profili ve parametreleri.

	Tabaka Kalınlığı (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poison Oranı (μ)
Killi SİLT	9.00	19	35	0	15000	0.35
Siltli KİL 1	8.00	19	100	0	50000	0.3
Siltli KİL 2	4.00	20	150	0	70000	0.3
Siltli KUM	-	20	5	33	60000	0.3

Çizelge 4.27’de verilen zemin parametreleriyle yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda 800 mm çapında ve 25 m boyundaki fore kazıkların tasarım taşıma gücü değeri 2000 kN olarak elde edilmiştir.

4.6.2 Deney sistemi ve deney programı

Bağdat projesindeki yükleme deneyi, ASTM D 1143-07 standardında (Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load) belirtilen yavaş yükleme deney prosedürüne uygun olarak yapılmıştır. Deney yükünün artış adımları

fore kazık tasarım yükünün %25'i olarak belirlenmiştir. Yükleme deneyi iki çevrimli yapılacak şekilde tasarlanmıştır. İlk yükleme çevriminde 2000 kN (test kazığı tasarım yükü) değerine kadar yüklenmesi planlanırken ikinci çevrimde tasarım yükünün 3 katı olan 6000 kN değerindeki yüke kadar yüklenmesi planlanmıştır. Her yük adımında minimum bekleme süresi 30 dakika olacaktır ve yük kademelerinde sırasıyla 5 dk. ve 15 dakikalık aralıklarla okuma alınmıştır. Deney prosedürüne göre bir sonraki yük adımına geçmeden önce gerekli kriter: 30 dakika içinde oluşacak oturma miktarı, o zamana kadar gerçekleşen oturma miktarının %0.5'inden az olmasıdır. Ayrıca 30 dakika içinde gerçekleşen oturma miktarının 12 mm'yi geçmemesi gerekmektedir.

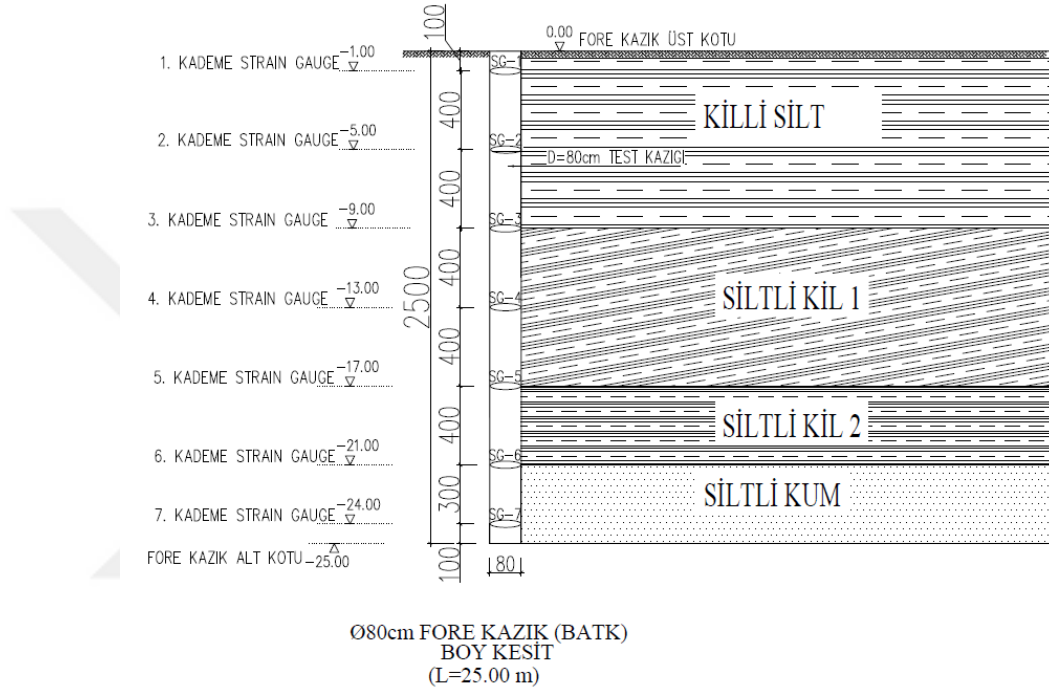
Uygulanan deney yönteminde testin sonlandırılmasının şartı ise kazığın yüklendiği yükteki oturma değerinin bir önceki yükteki oturma değerinin 5 katına çıkması ve kazık başı oturmasının kazık çapının %10'unu aşmasıdır.

Bağdat projesinde yapılan testlerin reaksiyon sistemi İskenderun Projesi'ne benzer şekilde test kazığının etrafına 4 adet reaksiyon kazığı ile oluşturulmuştur. Test yükü 2 adet 5000 kN kapasiteli hidrolik krik o ile uygulanırken bu yükler toplam 1 ana kiriş ve 2 tali kiriş vasıtasıyla reaksiyon kazıklarına aktarılmaktadır. Reaksiyon kazık donatıları kaynaklı birleşimlerle kirişlerde yer alan ankraj bulonlarına bağlanan plakalara tutturulmaktadır (Şekil 4.40).



Şekil 4.40 : Bağdat projesi yükleme deney sistemi.

Bağdat'da yapılan yükleme deneyinde test kazığı içerisine gerinim ölçerler (strain gage) yerleştirilerek kazık boyunca etki eden birim şekil değiştirme verileri alınmış ve bunun sonucunda zemin-kazık arasındaki birim sürtünme direnç değerleri hesaplanmıştır. Gerinim ölçerler her 4 m'de 1 kademe olmak üzere toplam 7 kademe gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Her kademe kontrol amaçlı toplam üçer adet gerinim ölçer bağlanmıştır. Şekil 4.41'de test kazığına ait boy kesiti zemin profili ile beraber verilmiştir.



Şekil 4.41 : Test kazığı enstrümantasyonu ve zemin profili.

4.6.3 Deney sonuçları ve değerlendirilmesi

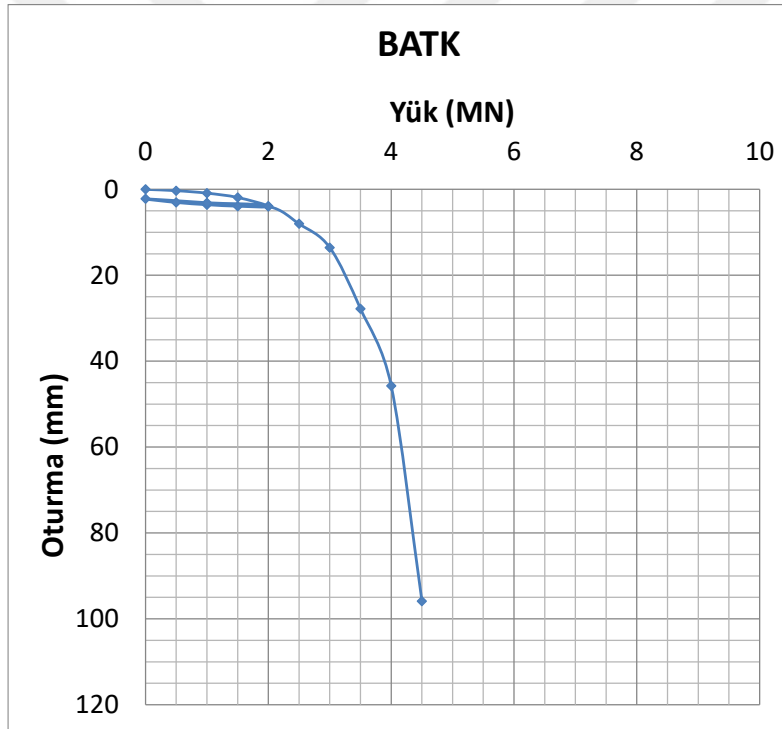
Yükleme deneyi Bölüm 4.6.2'de verilen programa uygun olarak yapılmıştır. Bütün yük adımlarına karşılık gelen oturma değerleri deney programına uygun olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir test kazığı için elde edilen kritik yükler altındaki oturma değerleri çizelge 4.28'de verilmektedir.

Elde edilen oturma değerleri sonuçlarında ve yük-oturma grafiklerinde görüldüğü üzere BATK numaralı test kazığında 4000 kN yükten 4500 kN yüke geçerken göçme gözlenmiştir. Deney sonunda test kazığında elde edilen yük-oturma grafiği şekil 4.42'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.28 : Oturma değerleri (BATK).

YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
2000 kN (1.çevrim)	3.47	2.19
2000 kN (2.çevrim)	3.96	-
3000 kN (2. çevrim)	13.54	-
4000 kN (2. çevrim)	45.74	-
4500 kN (2. çevrim)	95.87	

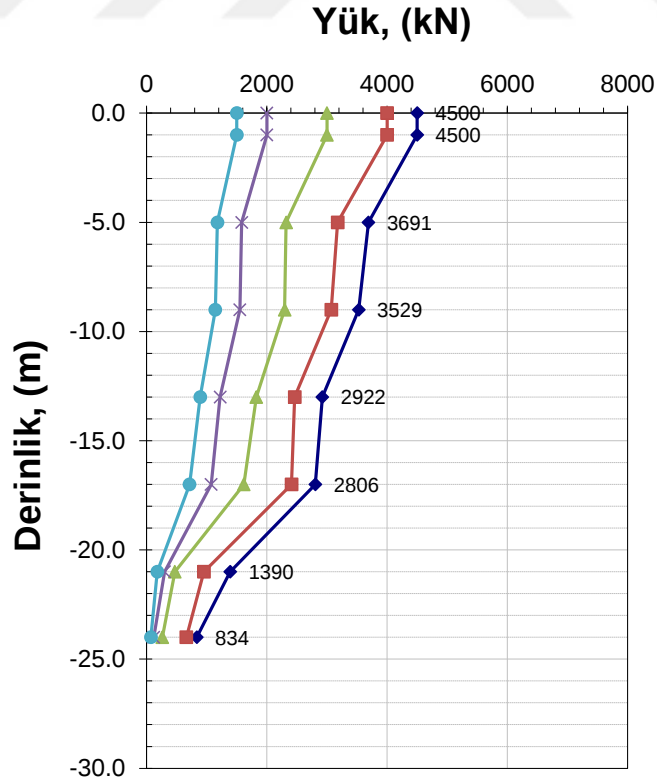
BATK numaralı kazıkta 2. çevrimde 4500 kN değerine gelindiğinde bar saati geriye döndü ve deformasyon ölçerlerde oturma hızının arttığı gözlemlendi. 4500 kN yükte dijital komparatörlerden son okunan değerlere göre oturma miktarı 95.87 mm olarak ölçüldü.



Şekil 4.42 : BATK yük-oturma grafiği.

BATK numaralı kazıkta, 4500 kN yükte göçme gözlemlendiği için maksimum 4500 kN yük için strain gage okumaları dikkate alınmıştır. Maksimum 4500 kN yük değerinde her bir birim mikro gerinim için değişen yük değeri 25.281 kN/ε olarak elde edilmiştir. Bütün kademelerden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri arasındaki farklar ($\Delta\epsilon$) yardımıyla test kazığı boyunca etki eden yük değerleri hesaplanmıştır. Test kazığına etki eden yüklerin derinliğe bağlı değişimlerini gösteren grafik şekil 4.43'de

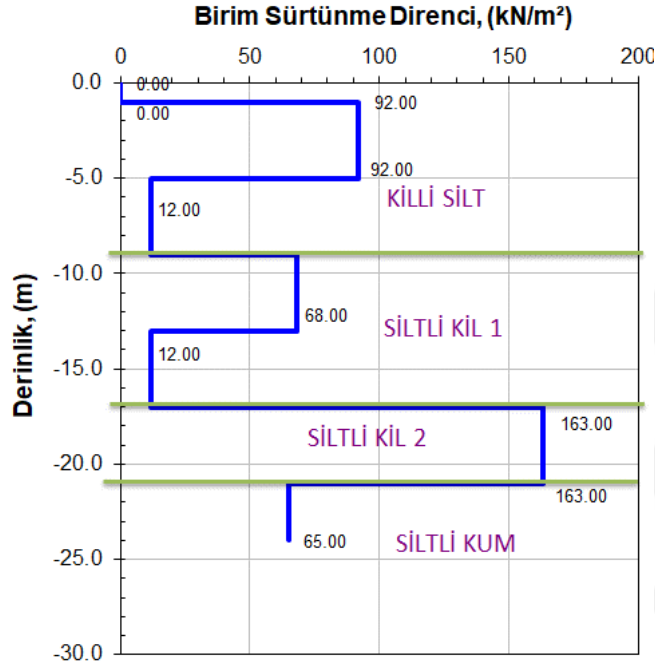
verilmiştir. Eksenel yük değerleri her kritik yük kademesi için ve bütün gerinim ölçer seviyelerinde hesaplanıp grafiklerde belirtilmiştir. Hesaplanan her kademedeki ΔP ($P_n - P_{n-1}$) yük farkı değerleri kazık çevre alanlarına bölündüğünde her kademedeki birim sürtünme dirençleri (τ_s) elde edilmiştir. Şekil 4.44’de verilen grafikte ise elde edilen bu değerlerle beraber hesaplanan sürtünme direnci değerleri ve zemin logu da grafiğe işlenmiştir. Çizelge 4.27’de belirtilen zemin özellikleri ve parametreleri ile elde edilen sürtünme dirençleri ile yükleme deneyi sonucunda gerinim ölçerler ile elde edilen toplam birim sürtünme direnci (τ_{su}) değerleri Çizelge 4.29’da karşılaştırılmıştır. Çizelgede verilen sürtünme direnci değerleri kazıkların göçme durumundaki değerlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre zemin birimlerinde birim sürtünme direnci değerleri genel olarak 12-140 kPa arasında değişmektedir. Kil birimlerde elde edilen sürtünme direnci değerlerinin kilin sertlik derecesine göre arttığı görülmüştür. Hesaplarla uyumlu olacak şekilde sert siltli kil tabakasındaki birim sürtünme direnci değeri, siltli kum tabakasında elde edilen birim sürtünme direnci değerinden yüksek elde edilmiştir. Çizelgede görüleceği üzere zemin birimleri ile hesaplanan toplam birim sürtünme direnci değerleri, genel olarak gerinim ölçerlerden elde edilen değerlere yakın hesaplanmıştır.



Şekil 4.43 : BATK eksenel yük-derinlik grafiği.

Çizelge 4.29 : Hesaplanan ve ölçülen toplam birim sürtünme direnci değerleri.

Zemin Cinsi	Kalınlık (m)	Hesaplanan τ_{su} (kN/m ²)	Ölçülen τ_{su} (kN/m ²)
Killi Silt	5.00	35	92
Killi Silt	4.00	35	12
Siltli Kil 1	4.00	70	68
Siltli Kil 1	4.00	70	12
Siltli Kil 2	4.00	105	163
Siltli Kum	3.00	52	65



Şekil 4.44 : BATK birim sürtünme direnci-derinlik grafiği.

4.7 İzmir Aliaga Projesi

İzmir Aliaga Projesi kapsamında proje tasarım öncesinde bir adet kazık yükleme deneyi yapılmıştır. Yükleme deneyi yapılan test kazığının çapı 800 mm ve boyu 18.7 m'dir. Yükleme deney sistemi üstten yüklemelidir ve test kazığı etrafında 2 adet reaksiyon kazığı imal edilmiştir. Reaksiyon kazıkları 1000 mm çapında ve 25 m boyundadır. Aliaga projesindeki test kazığı yukarıda belirtilen deneylerden farklı olarak enstrümanlı değildir. Bu yüzden oturma analizlerinde, zemin birimleri için hesaplanan birim sürtünme dirençleri ve yükleme deney sonucunda elde edilen toplam taşıma gücü değerleri dikkate alınmıştır.

Bu bölümde; İzmir Aliaga Projesi kapsamında imal edilen test kazığının imal edildiği bölgedeki zemin birimlerinin tanımı ve parametreleri, yapılan deney yöntemi, deney sonuçları ve son olarak deney sonuçlarının değerlendirmeleri yer almaktadır.

4.7.1 Zemin özellikleri

Proje sahası yüz ölçümü toplam yaklaşık 245000 m²'dir. Saha çok büyük olduğu için proje sahasında zemin etüt çalışmaları kapsamında genel olarak 30-40 m arasında değişen derinliklerde toplam 113 adet sondaj çalışması yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında incelenen test kazığı bölgesinde yer alan 5 adet sondaj incelenerek idealize zemin profili ve zemin parametreleri belirlenmiştir. Test kazığı bölgesinde yapılan sondajlar incelendiğinde zemin birimlerinin üst kısmında ortalama 6 metre kalınlığında katı kil tabakası (SPT-N₃₀: 6-13) görülmektedir. Bu tabakanın altında sert kil tabakası (SPT-N₃₀: 31-R) ve daha aşağı seviyelerde ise tamamen ayrılmış tuf tabakaları yer almaktadır.

Aliağa projesi kapsamında imal edilen test kazığı boyunca geçilen zemin birimleri, tabaka kalınlıkları ve belirlenen zemin mühendislik parametreleri Çizelge 4.30'de özetlenmiştir. Zemin tabakalarının mühendislik parametreleri, saha ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçların beraber değerlendirilmesi ile belirlenmiştir. Yapılan sondajlar sırasında yer altı suyuna doğal zemin kotundan 2.5 m aşağıda rastlanılmıştır.

Çizelge 4.30 : Aliağa projesi idealize zemin profili ve parametreleri.

	Derinlik (m)	Doğal Birim Hacim Ağırlığı (γ) (kN/m ³)	Kohezyon (c) (kN/m ²)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ) (°)	Zemin Kayma Modülü (G) (kN/m ²)	Poison Oranı (μ)
Katı KİL	6.00	19	150	0	30000	0.3
Sert KİL 1	2.50	19	150	0	60000	0.3
Sert KİL 2	6.50	20	200	0	90000	0.2
TUF	-	20	300	0	100000	0.2

Çizelge 4.30'da verilen zemin parametreleriyle yapılan taşıma gücü hesapları sonucunda 800 mm çapında ve 18.7 m boyundaki fore kazıkların tasarım taşıma gücü değeri 3330 kN olarak elde edilmiştir.

4.7.2 Deney sistemi ve deney programı

İzmir Aliağa projesindeki yükleme deneyi, ASTM D 1143-07 standardında (Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load) belirtilen yavaş yükleme deney prosedürüne uygun olarak yapılmıştır. Deney programı ve yük artış koşulları genel olarak Bağdat Projesi'nde belirtildiği şekilde uygulanmıştır. Deney yükünün artış adımları fore kazık tasarım yükünün %25'i olarak belirlenmiştir.

Yükleme deneyi iki çevrimli yapılacak şekilde tasarlanmıştır. İlk yüklemde 3330 kN (test kazığı tasarım yükü) değerine kadar yüklenmesi planlanırken ikinci çevrimde tasarım yükünün 2.5 katı olan 8330 kN değerindeki yüke kadar yüklenmesi planlanmıştır. 8330 kN yük değerinde deplasman değerleri hızlı bir şekilde arttığı için deney sonlandırılmıştır. Her yük adımında minimum bekleme süresi 30 dakika olacaktır ve yük kademelerinde sırasıyla 5 dk. ve 10 dakikalık aralıklarla okuma alınmıştır. Yüklem deneyi genel olarak Çizelge 4.31’de verilen programa uygun olarak yapılmıştır.

Çizelge 4.31 : Deney programı.

Eksenel Statik Yüklem Deneyi					
Yük Adımı	Yük	Proje Yüğü (%)	Yük (kN)	Minimum Bekleme Süresi	Okuma Aralıkları (Dk.)
1	25%DVL	25	840	30dk	0,5,5,10,10
	50%DVL	50	1670	30dk	0,5,5,10,10
	75%DVL	75	2500	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL	100	3330	2 sa	0,5,5,10,10,15,15,15,15,15,15
	75%DVL	75	2500	30dk	0,5,5,10,10
	50%DVL	50	1670	30dk	0,5,5,10,10
	25%DVL	25	840	30dk	0,5,5,10,10
2	0	0	0	60dk	0,5,5,10,10,10,10,10
	50%DVL	50	1670	30dk	0,5,5,10,10
	100%DVL	100	3330	60dk	0,5,5,10,10,10,10,10
	100%DVL+25%SWL	125	4170	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL+50%SWL	150	5000	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL+75%SWL	175	5830	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL+100%SWL	200	6660	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL+125%SWL	225	7500	90dk	0,5,5,10,10,10,10,10,10,10,10
	100%DVL+150%SWL	250	8330	-	

İzmir Aliğa Projesinde yapılan testlerin reaksiyon sistemi; test kazığının etrafına imal edilen 2 adet reaksiyon kazığı ile oluşturulmuştur. Test yükü 1 adet 10000 kN kapasiteli hidrolik krika ile uygulanırken bu yükler toplam 1 ana kiriş kiriş vasıtasıyla

reaksiyon kazıklarına aktarılmaktadır. Reaksiyon kazık donatıları kaynaklı birleşimlerle kirişlerin üzerinde yer alan çelik dairesel plakalara tutturulmaktadır.

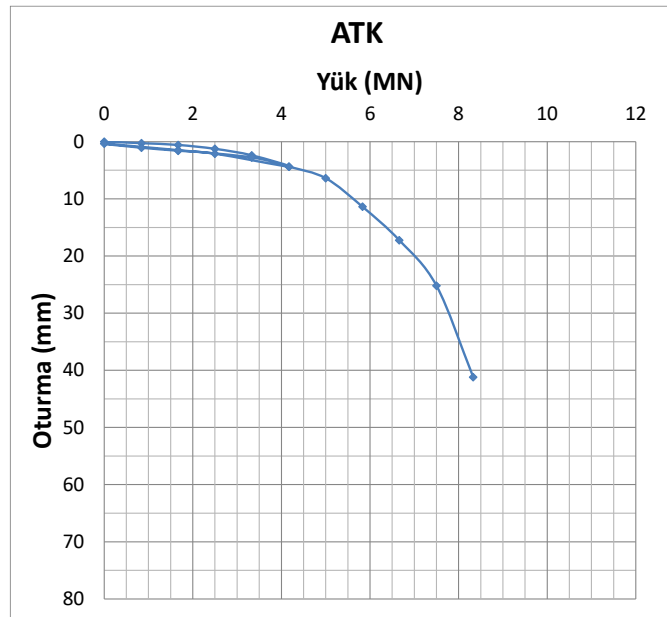
4.7.3 Deney sonuçları ve değerlendirmesi

Yüklemeye deneyi Bölüm 4.7.2’de verilen programa uygun olarak yapılmıştır. Bütün yük adımlarına karşılık gelen oturma değerleri deney programına uygun olarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri çizilmiştir. Her bir test kazığı için elde edilen kritik yükler altındaki oturma değerleri çizelge 4.32’de verilmektedir.

Elde edilen oturma değerleri sonuçlarında ve yük-oturma grafiklerinde görüldüğü üzere ATK numaralı test kazığında 8330 kN yüke ulaşıldığında göçme gözlenmiştir. Deney sonunda test kazığında elde edilen yük-oturma grafiği şekil 4.45’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.32 : Oturma değerleri (ATK).

YÜK ADIMI	TOPLAM OTURMA (mm)	TOPLAM PLASTİK OTURMA (mm)
3330 kN (1.çevrim)	2.39	0.37
3330 kN (2.çevrim)	2.77	-
6660 kN (2. çevrim)	17.24	-
8330 kN (2. çevrim)	41.19	-



Şekil 4.45 : ATK yük-oturma grafiği.

4.8 Kazık Yükleme Deneylerinden Toplam Taşıma Gücü Hesapları

Bölüm 4.1-4.7’de 7 farklı sahada yapılan toplam 14 adet fore kazık yükleme deneyi incelenmiştir. Bu bölümde ise yükleme deneyi grafiklerinden her bir test kazığının toplam taşıma gücü (P_{tu}) değerleri elde edilmiştir. 14 adet fore kazık yükleme deneyinden Bölüm 2.3.1 ve Bölüm 2.3.2’de belirtilen Chin-Kondner yöntemi ile Alku-Özkan yöntemi kullanılarak kazık toplam taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Elde edilen toplam taşıma gücü değerleri Çizelge 4.33’de özetlenmiştir. Çizelge 4.33’de görüldüğü üzere her iki yöntem ile hesap edilen toplam taşıma gücü değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. Yük-oturma analizlerinde genel olarak Alku ve Özkan (2006) yöntemi ile elde edilen değerler kullanılmıştır. Ancak Fleming (1992) yöntemi geliştirdiği yük-oturma analizinde Chin (1970) yöntemi bağıntılarından faydalandığı için Fleming (1992) yöntemi ile yapılan analizlerde toplam taşıma gücü değeri Chin-Kondner yönteminden elde edilen değerlerden alınmıştır.

Çizelge 4.33 : Kazık yükleme deneylerinden elde edilen toplam taşıma gücü değerleri.

Kazık No	Toplam Yük, P_{tu} (kN) (Chin, 1970)	Toplam Yük, P_{tu} (kN) (Alku and Ozkan, 2006)
İTKS-1	12121	12262
İTKS-2	9813	9492
İTKS-3	12800	12061
İTKS-4	12300	12463
BOTK-1	65789	60874
BOTK-2	58343	56442
BETK-1	7519	7205
BETK-2	10111	10203
BETK-3	5341	4759
BETK-4	6341	5952
BATK	4812	4706
ATK	9285	9791
BTk	149476	140734
YTK	22133	21661

İncelenen kazıklarda toplam sürtünme direnci (P_{su}) ile toplam uç direnci (P_{bu}) değerlerinin ayrımı ise kazık içerisine yerleştirilen gerinim ölçerler yardımı ile elde edilmiştir. En alt seviyedeki gerinim ölçere etki eden yüklerden uç direnci elde edilmiş ve toplam taşıma gücü ile toplam uç direnci arasındaki farktan ise kazıkların toplam sürtünme direnci değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.34).

Çizelge 4.34 : Kazıkların toplam sürtünme direnci ile toplam uç direnci değerleri.

Kazık No	Toplam Sürtünme Direnci, P_{su} (kN)	Toplam Uç Direnci, P_{bu} (kN)	Toplam Yük, P_{tu} (kN) (Alku ve Ozkan, 2006)
İTKS-1	11279	983	12262
İTKS-2	8551	941	9492
İTKS-3	11078	983	12061
İTKS-4	11480	983	12463
BOTK-1	47874	13000	60874
BOTK-2	45742	10700	56442
BETK-1	6215	990	7205
BETK-2	8854	1349	10203
BETK-3	4337	422	4759
BETK-4	5494	458	5952
BATK	3718	988	4706
ATK	6066	3725	9791
BTK	137204	3530	140734
YTK	17604	4057	21661



5. KAZIK OTURMA ANALİZLERİ

Bu bölümde, 4. bölümde verilen incelenen fore kazıklar üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. Bu bölümde yapılan oturma analizleri 3. bölümde açıklanan bazı yöntemler kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar hem birbirleri ile hem de kazık yükleme deneylerinde ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. İlk kısımda elastisite teorisine dayanan Poulos ve Davis (1968) ve Randolph ve Wroth (1978) yöntemleri ile oturma analizleri yapılmıştır. İkinci kısımda ise yük-transfer yöntemleri ile hesaplar yapılmıştır. Yük-transfer yöntemlerinden ilk olarak yaygın olarak kullanılan Fleming (1992) yöntemi ile Vallabhan & Mustafa (1996) yöntemleri ile oturma analizleri yapılmıştır. Bu analizlerden sonra güncel olan Zhang ve diğ. (2016), Bohn ve diğ. (2017) ve Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yük-transfer yöntemleri kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Bu hesaplar, 4. Bölümde incelenen 14 farklı fore kazık üzerinde yapılmıştır.

5.1 Elastisite Teorisine Dayanan Oturma Analizleri

5.1.1 Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

Poulos ve Davis (1968) tarafından geliştirilen yöntemin detayları 3.1 numaralı bölümde açıklanmıştır. Söz konusu yöntem ile yapılacak oturma analizleri için gerekli zemin ve kazık parametreleri aşağıda sıralanmıştır:

Kazık boyu (L), kazık çapı (d), kazık uç çapı (d_b), kazık boyunca geçilen zeminin ortalama Poisson oranı (ν_s) ve elastisite modülü (E_s), kazık toplam sürtünme direnci (P_{su}), kazık toplam uç direnci (P_{su}), kazık sıkışabilirlik katsayısı ($K = E_k/E_s$), kazık tabanındaki zeminin elastisite modülü (E_b) ve kazık malzemesinin elastisite modülü (E_k).

7 farklı sahada incelenen toplam 14 adet fore kazık üzerinde yukarıda belirtilen parametreler kullanılarak oturma analizleri yapılmıştır. İskenderun bölgesinde İTKS-1 numaralı kazık için yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak elde edilen

düzeltilme katsayıları ile kritik durumlar için hesaplanan oturma değerleri (P_{y1} ve P_{tu} yüküne karşılık gelen s_{y1} ve s_u oturma değerleri) Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. β_0 , C_k , C_b , C_v , I_0 , R_k , R_v ve R_b düzeltme faktörleri yukarıda sıralanan parametrelere bağlı olarak 3. bölümde verilen Şekil 3.1-6’da verilen grafikler yardımı ile elde edilmiştir. Yöntemde kullanılan kazık toplam taşıma gücü (P_{tu}) değeri ise kazık yükleme deney grafiğinden Alku ve Özkan (2006) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kazık toplam sürtünme direnci ve uç direnci değerleri ise gerinim ölçer datalarından elde edilen değerlerdir.

Çizelge 5.1 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile İTKS-1 kazığı oturma analizi.

L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (kPa)	K
30	0.8	37.5	47000	100000	0.33	30000000	638
β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
0.042	0.73	2.7	0.82	0.0679	0.055	1.65	0.93
R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
0.96	0.08102	11279	983	12100	12262	24.3	31.53

Poulos ve Davis (1968) yönteminde grafikte yer alan toplam sürtünme direncine (P_{su}) ve β değerine bağlı P_{y1} direnci 3. Bölümde denklem 3.12’de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır. Bu değere karşılık gelen s_{y1} oturma değeri ise denklem 2.18’de verilen bağıntıya benzer şekilde aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$s_{y1} = \frac{I \cdot P_{y1}}{E_s \cdot d} \quad (4.1)$$

Denklem 2.23’de verilen bağıntıda kazık uç yükü (P_b) değerine karşılık kazık toplam uç direnci (P_{bu}) yazılınca yöntemdeki toplam oturma (s_u) değeri elde edilir.

$$s_u = \left(\frac{I}{E_s d} \right) \cdot \left(\frac{P_{bu}}{\beta} \right) + \left(P_{bu} - \frac{P_{su} \beta}{(1 - \beta)} \right) \cdot \frac{L}{E_k A_k} \quad (4.2)$$

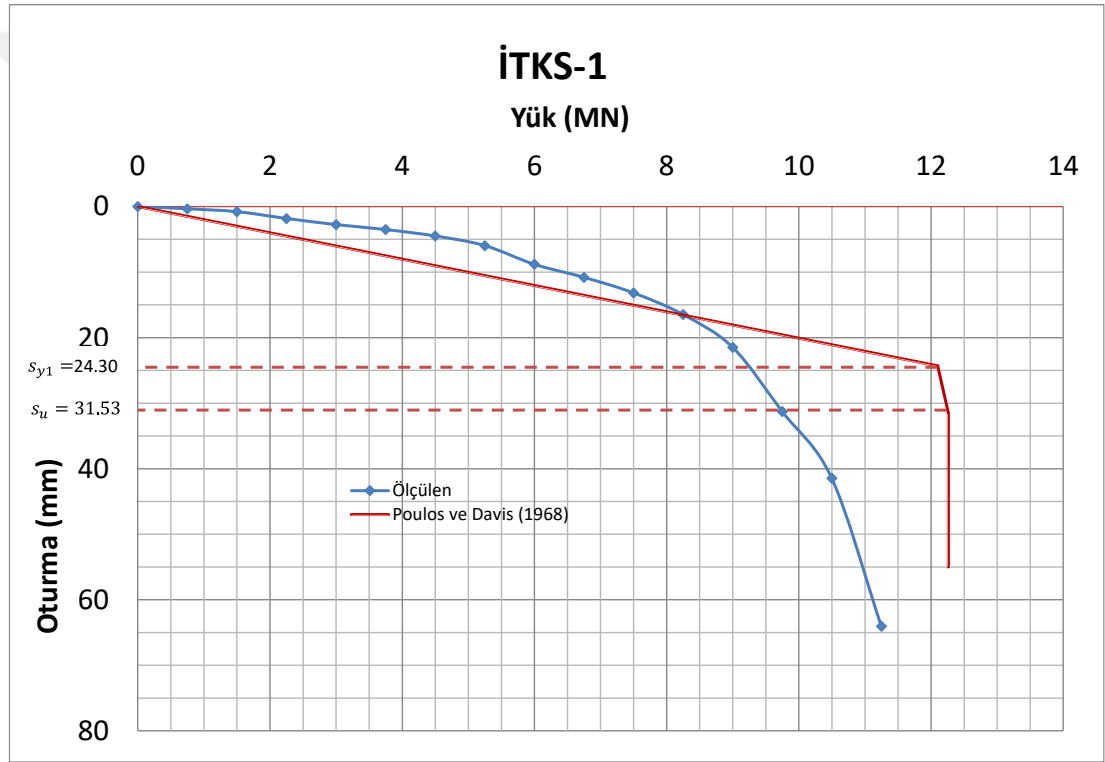
Sonuç olarak kazığa etkiyen yüke bağlı değişen oturma değerleri Çizelge 5.2’de verildiği şekilde elde edilmiştir.

İTKS-1 numaralı kazık için Poulos ve Davis (1968) yöntemi kullanılarak yapılan yük-oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafiği ise Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu yöntemde yük-oturma ilişkisi lineer olarak modellendiği için lineer bölgeden sonraki oturma değerleri ölçülen değerlere yakın elde edilmemiştir ancak

lineer bölgede (0-8000 kN arasında) ölçülen ve hesaplanan değerler bir miktar daha yakın çıkmıştır.

Çizelge 5.2 : İTKS-1 kazığı için Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen yük-oturma değerleri.

P (kN)	s (mm)	P (kN)	s (mm)	P (kN)	s (mm)
750	1.51	5250	10.54	9750	19.58
1500	3.01	6000	12.05	10500	21.09
2250	4.52	6750	13.56	11250	22.59
3000	6.02	7500	15.06	12000	24.10
3750	7.53	8250	16.57	12100	24.30
4500	9.04	9000	18.07	12262	31.53
				12262	60.00



Şekil 5.1 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafiği (İTKS-1).

İskenderun bölgesindeki diğer test kazıkları için Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile yapılan oturma analizleri Çizelge 5.3’de özetlenmiştir. Bu değerlere bağlı olarak yük-oturma ilişkisi yukarıda açıklandığı şekilde diğer test kazıkları için de elde edilerek yük-oturma grafikleri çizilmiştir. Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen yük-oturma grafikleri yükleme deneyleri ile ölçülen değerlerle beraber tezin ekinde Ek A’da verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile İTKS-2-3-4 kazıkları oturma analizi.

İTKS-2	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	35	0.8	43.75	45000	100000	0.30	30000	667
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.04	0.7	3	0.78	0.0655	0.05	1.7	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.96	0.0759	8551	941	9151	9492	18.03	31.07
İTKS-3	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	40	0.8	50	50000	100000	0.34	30000	600
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.037	0.6	2.5	0.82	0.0655	0.045	1.6	0.95
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.0670	11078	983	11606	12061	18.56	37.40
İTKS-4	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	45	0.8	56.25	55000	100000	0.33	30000	545
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.037	0.5	2.2	0.82	0.0334	0.045	1.8	0.94
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.96	0.0731	11480	983	11876	12463	19.07	50.68

4. Bölüm’de incelenen diğer 10 adet test kazığı üzerinde de Poulos ve Davis (1968) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak oturma analizleri benzer şekilde yapılmıştır. Yöntemde kullanılan datalarla beraber hesaplanan kritik oturma değerleri Çizelge 5.4’te listelenmiştir. İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen oturma değerleri, ölçülen değerlerle ve Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile elde edilen değerler ile Çizelge 5.6’da karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yöntem genel olarak lineer sonuç verdiği için deplasmanların elastik olduğu bölgede biraz daha yakın sonuçlar verirken kazığın göçme bölgesinde kazık toplam taşıma gücü değerine bağlı olarak ölçülen değerlerden uzak sonuçlar elde edilmiştir. İskenderun test kazıklarında tasarım yükünde (3 MN) hesaplanan oturma değerleri ile ölçülen değerler arasındaki yaklaşım oranları %60-%150 arasında değişirken tasarım yükünün 2-3 katı yüklerde ölçülen değerlere yaklaşım oranları %10-%40 arasında değişmektedir. Tasarım yükünün 3 katı yükten sonra yaklaşım oranları tekrar artmaktadır. Bakü test kazıklarında tasarım yükünde ve tasarım yükünün 1.5-2 katı yüklerde ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine yakın elde edilirken bu değerler arasındaki yaklaşım oranları %15-50 arasında değişmektedir. Daha yüksek yüklerde kazık göçme bölgesine geçince ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark artmaktadır. Basra test kazıklarında ise tasarım yükü ve tasarım

yükünün 2 katı değerlerinde genel olarak ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine yakın elde edilirken tasarım yükünün 3 katında ve daha yüksek yüklerde aradaki fark açılmıştır. BETK-4 numaralı kazıkta ise genel olarak hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasındaki fark diğer kazıklara göre fazla çıkmıştır. ATK ve YTK kazıkları için de Basra ve İskenderun kazıklarına benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Ancak 98 m uzunluğundaki BTK baret kazığı için ölçülen ve hesaplanan değerler arasında genel olarak 2 kat fark çıkmıştır. BATK kazığında ise tasarım yükü için hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri birbirine yakın elde edilirken tasarım yükünün 1.5-2 katında oturma değerleri arasındaki fark çok açılmıştır.

Çizelge 5.4 : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile oturma analizi.

BOTK-1	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (MPa)	K
	76	2	38	98000	117000	0.33	36000	367
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.042	0.65	1.8	0.8	0.0393	0.055	2.1	0.95
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.10753	47874	13000	50874	60874	26.81	188.84
BOTK-2	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (MPa)	K
	76.8	2	38.4	99000	117000	0.33	36000	364
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.042	0.65	1.8	0.8	0.0393	0.045	2.2	0.95
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.09217	45742	10700	47614	56442	26.02	132.70
BETK-1	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (MPa)	K
	36.8	0.8	46	40000	90000	0.36	30000	750
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.04	0.76	2.7	0.83	0.0681	0.045	1.6	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.06562	6215	990	6669	7205	12.74	19.36
BETK-2	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (MPa)	K
	36.8	0.8	46	40000	90000	0.36	30000	750
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.04	0.76	2.7	0.83	0.0681	0.045	1.6	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.06562	8854	1349	9501	10203	18.16	42.32
BETK-3	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	ν_s	E_k (MPa)	K
	38.8	0.6	64.667	43000	90000	0.35	30000	698
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.036	0.65	2.4	0.82	0.0461	0.045	1.6	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.06562	4408	351	4621	4759	11.21	42.32

Çizelge 5.4(devam) : Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile oturma analizi.

BETK-4	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	38.8	0.6	64.667	43000	90000	0.35	30000	698
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.036	0.65	2.4	0.82	0.0461	0.045	1.6	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.06562	6176	458	6239	6634	15.71	39.42
BTK	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	98	2.546	38.492	50000	110000	0.33	36000	720
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.042	0.78	1	0.82	0.0220	0.055	2.2	0.95
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.98	0.11265	137204	3530	137204	140734	121.42	142.23
YTK	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	37.5	1.888	19.862	56000	110000	0.32	36000	643
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.07	0.85	3	0.8	0.1428	0.085	1.5	0.93
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.92	0.10909	17604	4057	20537	21661	18.16	29.73
BATK	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	25	0.8	31.25	54000	78000	0.32	30000	556
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.05	0.8	3.5	0.8	0.1120	0.065	1.5	0.94
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.93	0.08523	3718	988	4187	4706	7.34	18.27
ATK	L (m)	d (m)	L/d	E_s (kPa)	E_b (kPa)	v_s	E_k (MPa)	K
	18.7	0.8	23.375	84000	120000	0.25	30000	357
	β_0	C_k	C_b	C_v	$P_t/P_b(\beta)$	I_0	R_k	R_v
	0.063	0.83	3.5	0.74	0.1354	0.077	1.3	0.92
	R_b	I	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{y1} (kN)	P_{tu} (kN)	s_{y1} (mm)	s_u (mm)
	0.96	0.08841	6066	3725	7016	9791	7.98	39.63

5.1.2 Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

Randolph ve Wroth (1978) tarafından geliştirilen yöntemin detayları 3.2 numaralı bölümde açıklanmıştır. Söz konusu yöntem ile 14 adet incelenen test kazığı için oturma analizleri yapılmıştır. Yöntemde kullanılan kazık ve zemin parametreleri ile hesaplanan $\eta, \xi, \rho, \zeta, \lambda$ ve μl parametreleri Çizelge 5.5'te özetlenmiştir. Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile yapılan hesaplar sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri Ek A'da Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen sonuçlarla aynı grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde, elastisite teorisine dayalı yöntemler hem birbirleri ile hem de ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.5 : Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile oturma analizleri.

Kazık No	G_1 (MPa)	G_1 (MPa)	G_b (MPa)	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	η	ν	ξ	ρ	λ	ζ	μl
BOTK-1	10	74	90	76	1	11	1	0.33	0.822	0.111	486.5	2.43	0.00472
BOTK-2	10	74	90	76.8	1	12	1	0.3	0.822	0.111	486.5	2.47	0.00465
İTKS-1	25	37	80	30	0.4	13	1	0.33	0.462	0.313	810.8	3.45	0.00309
İTKS-2	15	35	80	35	0.4	9	1	0.3	0.437	0.188	857.1	3.13	0.00292
İTKS-3	15	39	80	40	0.4	10	1	0.34	0.487	0.188	769.2	3.21	0.00285
İTKS-4	15	43.5	80	45	0.4	11	1	0.33	0.543	0.188	689.7	3.34	0.00278
BETK-1	6	31	70	36.8	0.4	4	1	0.36	0.4429	0.086	967.7	2.31	0.00312
BETK-2	6	31	70	36.8	0.4	4	1	0.36	0.4429	0.086	967.7	2.31	0.00312
BETK-3	6	33	70	38.8	0.3	4	1	0.35	0.4714	0.086	909.1	2.67	0.00253
BETK-4	6	33	70	38.8	0.3	4	1	0.35	0.4714	0.086	909.1	2.67	0.00253
BTK	3	41	90	98	1.034	4.4	1	0.33	0.4556	0.033	878	1.45	0.00407
YTK	15	44	90	37.5	0.944	8.5	1	0.32	0.489	0.167	818	2.2	0.00529
BATK	15	42	60	25	0.4	9.4	1	0.25	0.7	0.25	714	3.15	0.00377
ATK	30	42	100	18.7	0.4	8.4	1	0.25	0.42	0.3	714.3	3.05	0.00443

İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen ölçülen oturma değerleri, Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile elde edilen değerler ile Çizelge 5.6'da karşılaştırılmıştır. Aynı çizelgede Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen sonuçlar da yer almaktadır. Ek A'da yer alan grafikler ve Çizelge 5.6'daki sonuçlar incelendiğinde İskenderun ve Bakü test kazıkları ile BATK ve YTK kazıklarında Poulos ve Davis (1968) ile Randolph ve Wroth (1978) yöntemlerinden elde edilen oturma değerlerinin genel olarak birbirine yakın çıktığı söylenebilir. Bu yüzden elastisite teorisine dayanan yöntemlerde ölçülen değerlere yaklaşım miktarları bu test kazıklarında aynıdır. Basra test kazıklarında ise Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile elde edilen oturma değerleri, Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen değerlere göre ölçülen değerlere daha çok yaklaşmıştır. 98 m uzunluğundaki BTK baret kazığı için ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark yüksek çıkmıştır. ATK kazığında ise Poulos ve Davis (1968) yöntemi ile elde edilen oturma değerleri, Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile elde edilen değerlere göre ölçülen değerlere daha çok yaklaşmıştır.

Her iki yöntemde de yük-oturma ilişkisi genel itibariyle lineer devam etmektedir. Bu yüzden bu yöntemler kazığın plastik bölgedeki davranışını tam olarak modelleyememektedir. Ancak tasarım yükü ve tasarım yükünün 2 katı yüklerde genel olarak ölçülen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.6 : Kritik yükler için hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri.

	İTKS-1			İTKS-2			İTKS-3		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	3	6	7.5	3	6	9
Poulos ve Davis (1968) (mm)	6.02	12.05	18.07	5.91	11.82	17.73	6.28	12.56	18.84
Randolph ve Wroth (1978) (mm)	5.03	10.07	15.10	6.63	13.27	19.90	5.93	11.85	17.78
Ölçülen (mm)	2.76	8.82	21.49	3.03	10.66	20.45	2.38	8.22	14.52
	İTKS-4			BOTK-1			BOTK-2		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	20	30	40	20	30	40
Poulos ve Davis (1968) (mm)	4.82	9.63	14.45	10.54	15.81	21.08	10.93	16.39	21.86
Randolph ve Wroth (1978) (mm)	5.35	10.69	16.04	12.64	18.97	25.29	12.74	19.12	25.49
Ölçülen (mm)	3.34	9.01	17.71	14.59	23.28	35.89	17.6	26.2	37.67
	BETK-1			BETK-2			BETK-3		
Uygulanan Yük (MN)	2.26	4.23	6.2	2.72	5.14	6.75	1.61	2.32	3.37
Poulos ve Davis (1968) (mm)	4.33	8.09	11.85	5.2	9.82	12.9	3.91	5.62	8.19
Randolph ve Wroth (1978) (mm)	7.33	13.7	20.06	8.8	16.64	21.86	6.62	9.51	13.85
Ölçülen (mm)	4.02	13.05	47.19	3.02	10.59	17.88	6.01	8.8	16.43
	BETK-4			ATK			BATK		
Uygulanan Yük (MN)	1.61	2.32	3.37	3.33	5	6.66	2	3	4
Poulos ve Davis (1968) (mm)	3.91	5.62	8.19	3.79	5.69	7.58	3.51	5.26	7.01
Randolph ve Wroth (1978) (mm)	6.61	9.51	13.85	6.02	9.04	12.04	3.72	5.59	7.45
Ölçülen (mm)	6.65	11.77	20.34	2.39	6.4	17.24	3.96	13.54	45.74
	YTK			BTK					
Uygulanan Yük (MN)	10	15	17	42	63	86.5			
Poulos ve Davis (1968) (mm)	8.84	13.26	15.03	35.4	55.75	76.55			
Randolph ve Wroth (1978) (mm)	9.22	13.83	15.68	51.06	80.4	110.4			
Ölçülen (mm)	4.7	17.65	28.42	18.8	29	41.28			

Elastisite teorisine dayanan yukarıya incelenen yöntemlerin kazık tasarım yükünde meydana gelecek oturmaların tahmininde kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir ancak kazığın plastik bölgedeki deformasyonunu tahminde bu yöntemler, zayıf kalmaktadır.

5.2 Yük-Transfer Yöntemleri Kullanılarak Yapılan Oturma Analizleri

3. Bölümde belirtilen yük-transfer yöntemlerinden güncel olan 4 farklı yöntem (Fleming (1992), Bohn ve diğ. (2016), Zhang ve diğ. (2016) ve Boonyatee ve Lai (2017) yöntemleri) ile incelenen test kazıkları için oturma analizleri yapılmıştır.

5.2.1 Fleming (1992) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

3. Bölümde detayları açıklanan Fleming (1992) yöntemi kullanılarak 14 farklı test kazığı üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. Yöntemde kullanılan zemin ve kazık parametreleri şu şekilde sıralanabilir: Kazık toplam taşıma gücü (P_{tu}), kazık toplam sürtünme direnci (P_{su}), kazık boyu, çapı ve kazık elastisite modülü (L, D ve E_k), şaft esneklik faktörü (M_s), kazık taban bölgesindeki zeminin elastisite modülü (E_b) ve etkili kazık boyu faktörü (K_E). Fleming (1992) çalışmasında Chin (1970) tarafından geliştirilen kazık yükleme deneyi değerlendirme yöntemini kullanarak oturma analizi yöntemi geliştirmiştir. Bu yüzden Fleming (1992) yönteminin sağlaması için yapılan oturma analizlerinde kullanılan kazık toplam taşıma gücü değerleri (P_{tu}), kazık yükleme deneylerinden Chin (1970) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Şaft esneklik faktörü değeri, Randolph ve Wroth (1978, 1982) tarafından önerilen $\zeta \tau_s / (2G)$ bağıntısı ile elde edilmiştir. Bu formüldeki değişkenler Randolph ve Wroth (1978) yöntemi ile yapılan hesaplardan alınmıştır. Fleming (1992), Kazığın elastik sıkışmasının hesabında kullanılan etkili kazık boyu faktörü (K_E) K_E faktörü değerinin 0.4-0.67 arasında alınabileceğini belirtmiştir. Kazığın elastik sıkışmasının hesabında kullanılan etkili kazık boyu faktörü (K_E) parametresi bütün test kazıklarında 0.45 olarak alınmıştır. Kazıkların elastik sıkışma hesapları için kazık boyları L_0 ve L_F olmak üzere iki ayrı kısma ayrılmıştır. Kazık boyunun üst kısmındaki düşük sürtünme direncine sahip kısım L_0 uzunluğunda iken diğer kalan kısım L_F uzunluğundadır. Yöntemde kullanılan bu parametreler 14 farklı test kazığı için ayrı ayrı Çizelge 5.7’de listelenmiştir.

14 farklı kazık için Fleming (1992) yöntemi ile oturma analizlerini yaparken MATLAB programı kullanılmıştır. Fleming (1992) yönteminde belirlenen 3 ayrı fonksiyon MATLAB programında tanımlanmış ve farklı yükler için oturma hesapları yapılmıştır. Bu fonksiyonlar denklem 2.52 ve denklem 2.54’deki bağıntılar esas alınarak oluşturulmuştur. Yöntemin akış şeması Şekil 5.2’de verilmiştir. Yeterli veri elde edildikten sonra yük-oturma grafikleri elde edilmiştir. Flemnig (1992) tarafından

geliştirilen yöntem, MALTAB programına işlendi ve yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri EK B-Şekil B.1 ve B.2’de verilmiştir. İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen ölçülen oturma değerleri, Fleming (1992) yöntemi ile elde edilen değerler ile Bölüm 5.2’nin sonunda Çizelge 5.11’de karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.11’de diğer yük-transfer yöntemleri ile elde edilen sonuçlar da yer almaktadır. Fleming (1992) yöntemi ile elde edilen oturma değerleri ile ölçülen değerler kazığın göçme bölgesinde genel olarak karşılaştırıldığında aradaki fark oranları %0-15 arasında değişmektedir. İskenderun test kazıklarının yük-oturma grafiklerindeki göçme bölgesi, Fleming (1992) yöntemi ile çok doğru bir şekilde hesaplanmıştır. İskenderun test kazıklarında tasarım yükünde ve tasarım yükünün 2 katı yükte (3-6 MN) hesaplanan oturma değerleri ile ölçülen değerler arasındaki yaklaşım oranları %10-%50 arasında değişmektedir. İskenderun test kazıklarının yük-oturma grafiklerinde görüldüğü üzere Fleming (1992) yöntemi ile hesaplanan değerler ile ölçülen değerler genel olarak birbirine yakın elde edilmiştir. Çizelge 5.11’de görüleceği üzere kritik yüklerde hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki yaklaşım oranı genel olarak %40-80 arasında değişmektedir. İskenderun kazıkları için yapılan hesaplara göre ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark bir miktar daha fazladır. Yük-oturma grafiklerinde görüleceği üzere göçme bölgesindeki yükler arasındaki fark ise %10-15 arasındadır. BETK-1, BETK-2 ve BETK-3 test kazıklarında Fleming (1992) yöntemi ile yapılan analizler sonucunda elde edilen yük-oturma grafiklerinde görüleceği üzere İskenderun test kazıklarına benzer şekilde hesaplanan ve ölçülen değerler birbirine yakın elde edilmiştir. Bu kazıklarda, hem elastik hem de göçme bölgesinde ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasında genel olarak %5-30 arasında değişen yaklaşım oranları vardır. BETK-4 numaralı kazıktan elde edilen sonuçlarda ise bu oran biraz daha artmıştır ve elastik bölgeden göçme bölgesine geçerken ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark fazla çıkmıştır. YTK ve BTK baret kazıklarında, ölçülen ve hesaplanan değerler hem elastik hem de göçme bölgesinde birbirine yakın elde edilmiştir. Baret kazık çözümlerinde eşdeğer çap değerleri kullanılmasına rağmen Fleming (1992) yöntemi ile yakın değerler elde edilebilmiştir. ATK test kazığında ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki yaklaşım oranı her yükte genel olarak paralellik gösterirken bu oran ortalama %40 olarak elde edilmiştir. BATK test kazığında ise 2 MN yükten sonra ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark diğer test kazıklarının sonuçlarına göre fazla çıkarken göçme bölgesinin doğru modellendiği söylenebilir. 2

MN yük değerine kadar hesaplanan oturma değerleri ile ölçülen oturma değerleri birbirleri ile eşleşmektedir.

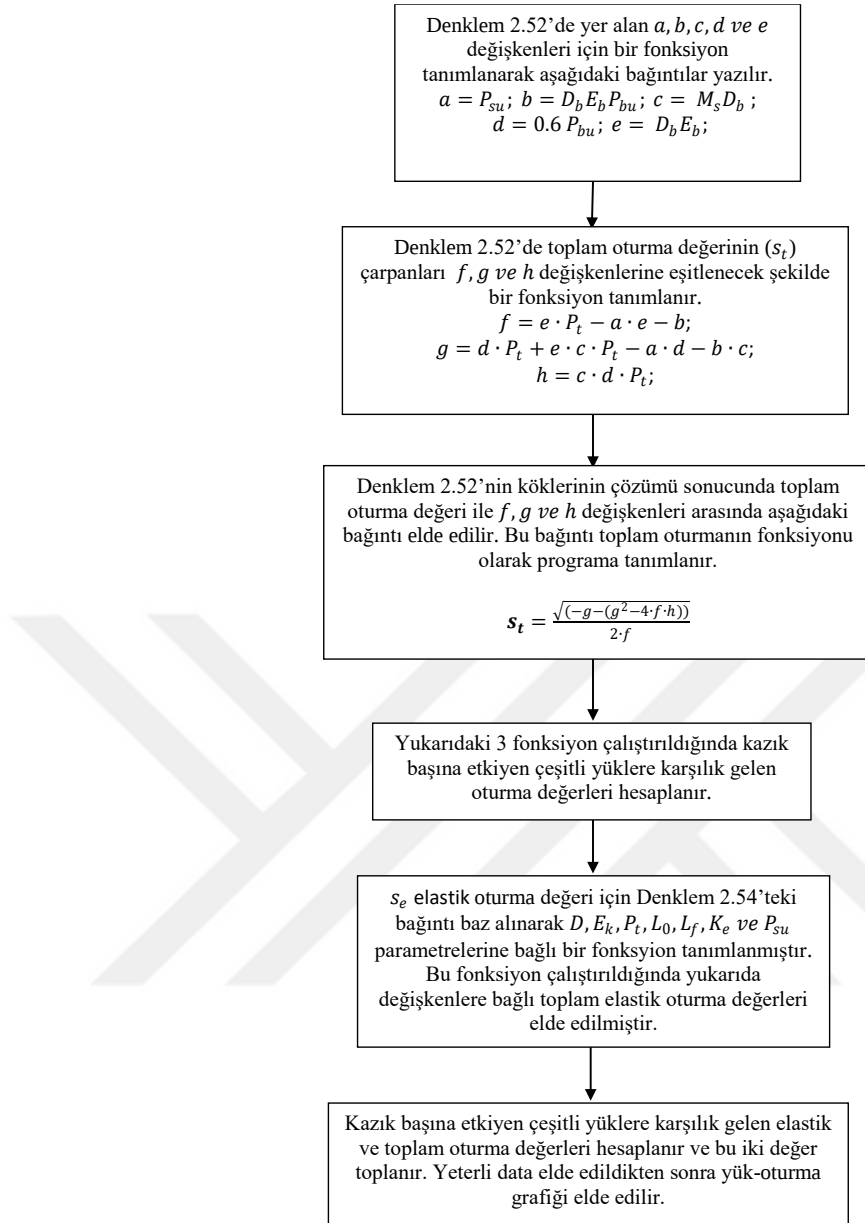
Çizelge 5.7 : Fleming (1992) yöntemi için gerekli kazık-zemin parametreleri.

İTKS-1	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	30	0.8	3	27	30	100
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.006	0.45	11138	983	12121	
İTKS-2	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	35	0.8	3	32	30	100
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.004	0.45	8872	941	9813	
İTKS-3	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	40	0.8	3	37	30	100
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.004	0.45	11817	983	12800	
İTKS-4	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	45	0.8	3	42	30	100
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0038	0.45	11317	983	12300	
BOTK-1	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	76	2	7	69	36	117
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.002	0.45	53789	13000	64789	
BOTK-2	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	76.8	2	7	69.8	36	117
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.002	0.45	47643	10700	58343	
BETK-1	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	36.8	0.8	11.5	25.3	30	90
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0028	0.45	6529	990	7519	
BETK-2	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	36.8	0.8	11.5	25.3	30	90
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0035	0.45	8762	1349	10111	
BETK-3	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	38.8	0.6	11.5	27.3	30	90
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0027	0.45	4990	351	5341	
BETK-4	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k (GPa)	E_b (MPa)
	38.8	0.6	11.5	27.3	30	90
	M_s	K_e	P_{su} (kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0031	0.45	5883	458	6341	

Çizelge 5.7(devam) : Fleming (1992) yöntemi için gerekli kazık-zemin parametreleri.

BTK	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k(GPa)	E_b (MPa)
	98	2.546	19	79	36	110
	M_s	K_e	P_{su}(kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.004	0.45	145946	3530	149476	
YTK	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k(GPa)	E_b (MPa)
	37.5	1.888	35.5	2	30	110
	M_s	K_e	P_{su}(kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.002	0.45	18076	4057	22133	
BATK	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k(GPa)	E_b (MPa)
	25	0.8	2	23	30	78.00
	M_s	K_e	P_{su}(kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.0023	0.45	3824	988	4812	
ATK	L (m)	d (m)	L_0 (m)	L_f (m)	E_k(GPa)	E_b (MPa)
	18.7	0.8	17.7	1	30	120.00
	M_s	K_e	P_{su}(kN)	P_{bu} (kN)	P_{tu} (kN)	
	0.004	0.45	5560	3725	9285	

Fleming (1992) yöntemi ile elde edilen sonuçları genel olarak değerlendirmek gerekirse yöntem ile hesaplanan ve deney sırasında ölçülen değerler arasında iyi bir eşleşme olduğu söylenebilir. Bu yöntem tekil kazıkların oturma analizlerinde yaygın olarak bilinen yük-transfer yöntemlerindendir. Kazığın lineer olmayan yer değiştirme davranışını doğruya yakın bir şekilde modelleyebilmektedir. Yöntemden doğruya yakın sonuçlar elde edebilmek için kazığın toplam sürtünme ve uç direnci değerlerini doğru belirleyebilmek gerekmektedir. Ayrıca kazık tabanındaki zeminin elastisite modülü değeri de sonucu büyük ölçüde etkilemektedir. Bu değer için uygun saha ve laboratuvar deneyleri ile doğru belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle kazık shaftında oluşan yer değiştirmelerde etkili olan shaft esneklik faktörü değerinin doğru belirlenmesi, yük-oturma eğrisi elastik bölgedeki kısmının doğru tahmin edilmesi için önemlidir. Yapılan analizlerde bu değer, Randolph ve Wroth (1978) tarafından önerilen bağıntı ile elde edilmiştir. Fleming (1992) de aynı yönteme atıf yaparak bu değer için 0.001-0.004 arasında bir değer alınabileceğini belirtmiştir. İTKS-1 numaralı kazıkta shaft esneklik faktörü değeri 0.004 değerinin bir miktar üstünde (0.006) hesaplanmıştır. Bu durumlarda hesaplanan değer dikkate alınmıştır. Bazı kazıklarda ise shaft esneklik faktörü değeri 0.0045 civarında elde edilmiştir. Bu kazıklarda shaft esneklik faktörü değeri 0.004 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.2 : Fleming (1992) yöntemi akış şeması.

5.2.2 Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

Bohn ve diğ. (2016) yönteminde şaft ve uç yer değiştirmeleri (s_s ve s_b) Flmenig (1992) yönteminde olduğu gibi ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bohn ve diğ. (2016) tarafından önerilen sürtünme direnci (τ_{sz}) ile şaft yer değiştirmesi (s_s) arasındaki bağıntı ile uç direnci (τ_b) ve uç oturması (s_b) arasındaki bağıntı Çizelge 3.1'de verilmiştir. Buradaki bağıntılardan şaft oturmasını ve uç oturmasını çekersek aşağıdaki bağıntılar elde edilir. Aşağıda verilen bağıntılarda 0.0038 değeri, sabit şaft esneklik faktörü (M_s) iken 0.01 değeri, sabit uç faktörüdür (M_b). Yöntemde oturma değerlerini etkileyen diğer parametreler; toplam sürtünme direnci (τ_{su}) ve toplam uç direnci (τ_{bu}) değerleridir.

$$s_s = \frac{0.0038 \cdot D \cdot \tau_{sz}}{(\tau_{su} - \tau_{sz})} \quad (4.1)$$

$$s_b = \frac{0.01 \cdot D \cdot \tau_b}{(\tau_{bu} - \tau_b)} \quad (4.2)$$

14 farklı test kazığı için yöntem uygulamasında her yük kademesi için yüzdesel olarak sürtünme ve uç yükleri paylaştırılmıştır. İncelenen test kazıkları sürtünme kazıkları olduğu için kazığın uç kısmına etkiyen yükün toplam yüke oranı (P_b/P_t) genelde %1-15 civarında olmaktadır. Bu oranlar test kazıklarının içerisinde yer alan gerinim ölçerler yardımı ile elde edilmiştir. Her bir test kazığının oturma analizi için kullanılan parametreler (τ_{su} , τ_{bu} ve P_b/P_t) Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Bohn (2016) yöntemi için gerekli parametreler.

İTKS-1	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	30	0.8	9	130	1956
İTKS-2	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	35	0.8	4	93	1875
İTKS-3	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	40	0.8	4	120	1956
İTKS-4	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	45	0.8	4	126	1956
BOTK-1	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	76	2	15	96	4138
BOTK-2	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	76.8	2	5	105	3406
BETK-1	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	36.8	0.8	14	49	1970
BETK-2	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	36.8	0.8	19	59	2684
BETK-3	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	38.8	0.6	8	52	1242
BETK-4	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	38.8	0.6	8	57	1620
BTK	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	98	2.546	1	136	1051
YTK	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	37.5	1.888	6-10	74	1449
BATK	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	25	0.8	6-20	70	1966
ATK	<i>L</i> (m)	<i>d</i> (m)	P_b/P_t (%)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)
	18.7	0.8	30	129	7411

Bu yöntem incelenen diğer yük-transfer yöntemlerine göre daha pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde deformasyon parametreleri bütün kazık tipleri ve zemin tipleri için sabit alınmış ve oturma değerleri toplam sürtünme ve toplam uç direncine bağlı elde edilmektedir. Yöntemde kullanılan toplam uç ve toplam sürtünme direnci parametreleri gerinim ölçer datalarından elde edilmiştir. Çizelge 5.8’de her kazık için ayrı ayrı belirtilen τ_{su} parametresi, farklı tabakalar için elde edilen toplam sürtünme direnci değerlerinin ağırlıklı ortalamasıdır.

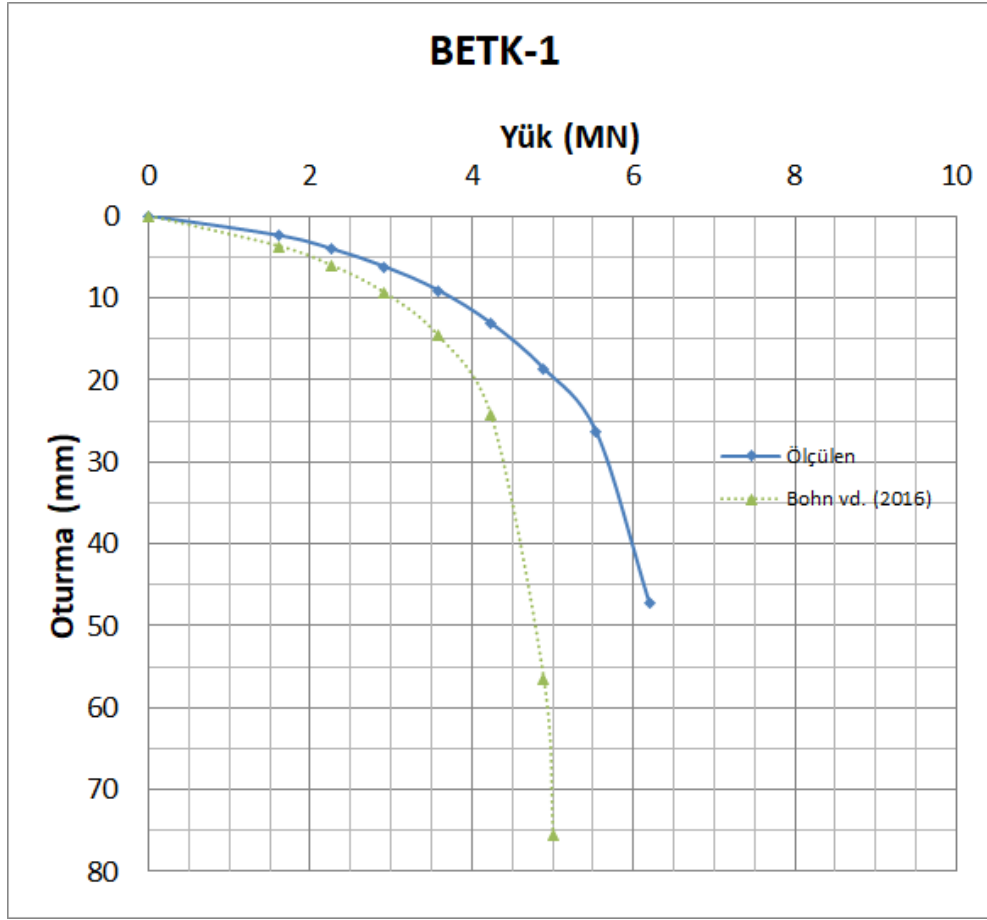
Çizelge 5.9’da, Basra bölgesi test kazıklarından BETK-1 numaralı kazık üzerinde Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntem ile yapılan oturma analizi verilmiştir. BETK-1 numaralı test kazığı üzerinde yapılan enstrümanlı yükleme deneyi sonuçlarına göre kazık uç yükünün toplam yüke oranı her yük kademesinde ortalama %14 olarak elde edilmiştir. Bu orana göre her yük kademesinde oluşan sürtünme ve uç yükü değerleri hesaplanmış ve devamında denklem 4.1 ve 4.2’de verilen yöntem bağıntıları yardımı ile belirtilen yüklerde oturma hesapları yapılmıştır.

Çizelge 5.9 : BETK-1 numaralı kazık için yapılan oturma analizi.

τ_{su} (kPa)	D (m)	L (m)	P_b/P_t (%)						
49	0.8	36.8	14						
P_t (kN)	P_s (kN)	P_b (kN)	τ_s (kPa)	τ_b (kPa)	s_s (mm)	s_b (mm)	s_t (mm)	Ölçülen (mm)	
1610	1384.6	225.4	14.97	448.42	1.34	2.36	3.70	2.38	
2265	1947.9	317.1	21.06	630.85	2.29	3.77	6.06	4.02	
2920	2511.2	408.8	27.15	813.28	3.78	5.62	9.40	6.21	
3576	3075.4	500.6	33.25	995.99	6.42	8.18	14.60	9.05	
4231	3638.7	592.3	39.34	1178.42	12.38	11.91	24.29	13.06	
4886	4202.0	684.0	45.43	1360.85	38.71	17.87	56.58	18.58	
5000	4300.0	700.0	46.49	1392.61	56.36	19.30	75.66	26.41	

Çizelge 5.9’da her yük kademesi için hesaplanan oturma değerleri Şekil 5.3’de yük-oturma grafiği olarak verilmiştir. Bu grafikte BETK-1 numaralı kazığa yapılan yükleme deneyi sonucunda ölçülen değerler de verilmektedir. Ölçülen değerler ile hesaplanan değerler arasında belli bir oranda fark olsa da grafik başlangıcından itibaren iki grafik arasında bir paralellik olduğu söylenebilir. Ölçülen ve hesaplanan iki grafik incelendiğinde kazığın göçmeye ulaştığı yükler arasında ortalama %20 oranında bir fark çıkmıştır. Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen bu yöntem, kazık toplam uç ve sürtünme direncine bağlı olarak kazığın lineer olmayan davranışını

pratik bir şekilde modelleyebilmektedir. Diğer test kazıkları için elde edilen yük-oturma grafikleri Ek B.'de Şekil B.3 ve B.4'de verilmektedir.



Şekil 5.3 : BETK-1 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.

İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen ölçülen oturma değerleri ve Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile elde edilen değerler, Bölüm 5.2'nin sonunda Çizelge 5.11'de diğer yük-transfer yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile beraber karşılaştırılmıştır. Basra test kazıklarında Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen hiperbolik yöntem ile yapılan hesaplar sonucunda, kazığın oturma davranışı belli oranda doğru modellenenmiştir. Özellikle 60cm çapındaki BETK-3 ve BETK-4 numaralı kazıklarda ölçülen ve hesaplanan değerler arasında iyi bir eşleşme olduğu söylenebilir. Büyük çaplı Bakü test kazıklarından BOTK-1 numaralı kazıkta ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark az çıkarken BOTK-2 numaralı kazıkta bu farkın fazla olduğu söylenebilir. Baret kazıklardan BTK test kazığında elastik bölgede ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine yakın çıkarken göçme bölgesi bu yöntem ile doğru bir şekilde modellenememiştir. YTK baret kazığında ise bu durumun tam tersi olarak elastik bölgedeki değerler arasındaki fark

fazla çıkarken kazığın göçme bölgesi doğru modellenebilmiştir. İskenderun test kazıklarından İTKS-2 ve İTKS-3 numaralı kazıklardan elde edilen grafiklerde, söz konusu yöntem ile hesaplanan değerler ve ölçülen değerler arasında mükemmele yakın bir eşleşme olduğu söylenebilir. Ancak İTKS-1 ve İTKS-4 numaralı kazıklarda elastik ve göçme bölgesi ölçülen değerlere göre farklı çıkmıştır. Bu kazıklarda hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasında büyük oranda farklar vardır. BATK ve ATK kazıklarının davranışı, deney verileri ile karşılaştırıldığında Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile doğru bir şekilde modellenebildiği söylenebilir.

5.2.3 Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

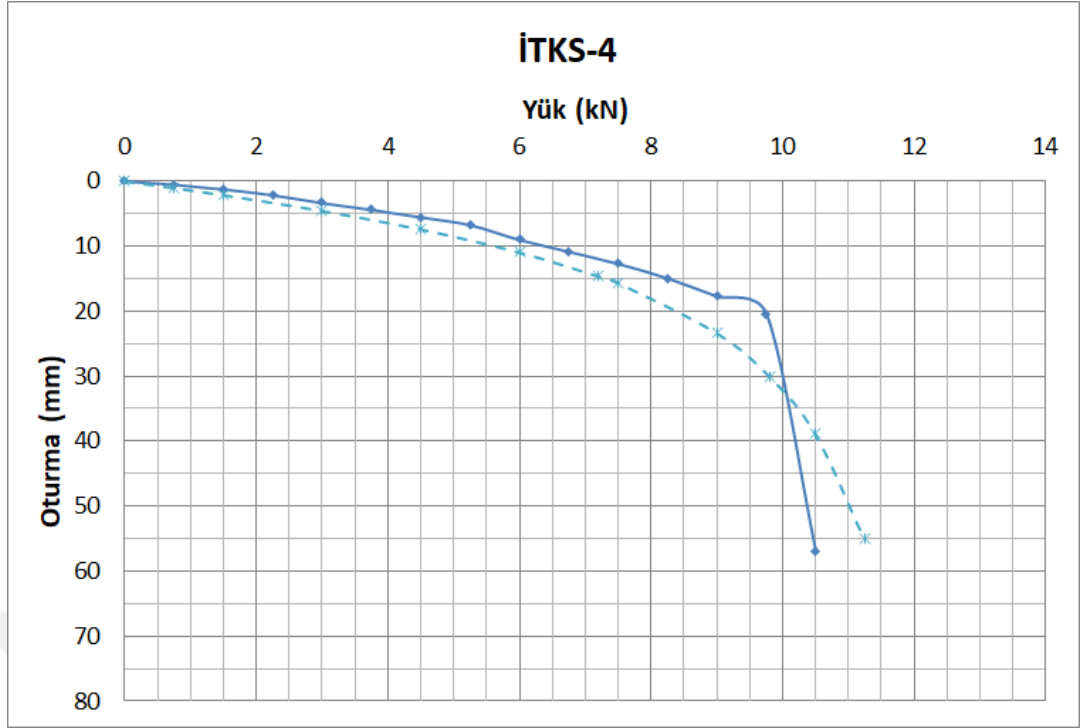
Zhang ve diğ. (2016) tarafından tekil kazıkların oturma analizi için hiperbolik fonksiyonlar geliştirilmiştir. Bu fonksiyonlardaki deformasyon parametreleri toplam uç ve sürtünme direnci değerleri ile zemin kayma modülü değerlerine bağlı olarak elde edilmiştir. Söz konusu fonksiyon ve parametre bağıntıları Bölüm 3.8’de verilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak incelenen 14 test kazığı üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. Yöntemde kullanılan zemin ve kazık parametreleri; kazık yarıçapı ve kazık etki yarıçapı (r_0 ve r_m), kazık çevresindeki zeminin kayma modülü (G_s), kazık ucundaki zeminin kayma modülü (G_b), zemin toplam birim sürtünme ve birim uç direnci (τ_{su} ve τ_{bu}) ve hiperbolik eğri katsayılarıdır (R_{sf} ve R_{bf}). Yöntemde kullanılan bu parametreler Çizelge 5.10’da her kazık için özetlenmiştir. Toplam birim sürtünme direnci değerleri deneyler sırasında gerinim ölçerlerden elde edilen datalardan alınmıştır ve her tabakada farklılık göstermektedir. Gerinim ölçerler yardımı ile elde edilen toplam birim sürtünme direnci (τ_{su}) değerleri incelenen bütün test kazıkları için Bölüm 4’te verilmiştir. Bu yüzden özet çizelgede her kazık için ölçülen en büyük ve en küçük toplam birim sürtünme direnci değerleri verilmiştir. Kazık çevresindeki zeminin kayma modülü (G_s) değeri, tabakalı zeminlerde $G_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} G_{si} h_i}{L}$ formülüyle hesaplanmıştır. Burada h_i zemin tabakasının kalınlığını, L kazık boyunu ve n_s zemin tabaka sayısını belirtmektedir. Hiperbolik eğri katsayısı (R_{sf} ve R_{bf}) değerleri 0.9 olarak kabul edilmiştir.

Zhang ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntem ile oturma analizler MS Excel programı yardımı ile yapılmıştır. Bölüm 3.8’de açıklanan yöntem adımları uygulanarak test kazıkları için oturma analizleri tamamlanmıştır. Örnek olarak İTKS-4 numaralı kazık için hesaplanan yük-oturma grafiği Şekil 5.4’de verilmiştir. Grafikte

deney sonucunda elde edilen yük-oturma grafiği de görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere söz konusu test kazığının oturma davranışı Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile deney sonuçlarına yakın bir şekilde modellenebilmiştir. Hem tasarım yükündeki oturma değerleri hem de kazığın göçme bölgesindeki oturma davranışı deney sonuçlarına oldukça yakın elde edilmiştir. Ancak diğer aynı bölgede yer alan diğer test kazıkları için aynı durum söz konusu değildir. İTKS-1, İTKS-2 ve İTKS-3 test kazıklarından elde edilen sonuçlar deney sonuçlarına göre bir miktar daha farklı çıkmıştır. Ancak kazığın lineer olmayan oturma davranışı, deney sonuçlarına paralel bir şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 5.10 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi için gerekli kazık-zemin parametreleri.

İTKS-1	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	30	0.4	16.19	26	80	25-221	1956	0.9
İTKS-2	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	35	0.4	23.32	31	80	30-153	1872	0.9
İTKS-3	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	40	0.4	32.34	39	80	41-185	1956	0.9
İTKS-4	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	45	0.4	40.88	3	80	41-185	1956	0.9
BOTK-1	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	76	1	108.58	76.5	90	47-141	4138	0.9
BOTK-2	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	76.8	1	108.00	75	90	7-312	3406	0.9
BETK-1	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	36.8	0.4	27.59	31	70	21-81	1969	0.9
BETK-2	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	36.8	0.4	27.59	31	70	21-96	4120	0.9
BETK-3	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	38.8	0.3	31.03	33	70	18-76	1492	0.9
BETK-4	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	38.8	0.3	31.03	33	70	19-80	1619	0.9
BTK	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	98	2.546	69.5	32	100	4-297	1051	0.9
YTK	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	37.5	1.888	32.20	45	90	24-140	1449	0.9
BATK	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	25	0.4	30.00	42	60	12-163	1966	0.9
ATK	L (m)	r_0 (m)	r_m (m)	G_s (MPa)	G_b (MPa)	τ_{su} (kPa)	τ_{bu} (kPa)	R
	18.7	0.4	24.24	69	100	97-200	7411	0.9



Şekil 5.4 : İTKS-4 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.

Zhang ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak elde edilen yük-oturma grafikleri ölçülen değerler ile beraber Ek B. Şekil B.5 ve B.6’da verilmiştir. İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen ölçülen oturma değerleri ve Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile elde edilen değerler, Bölüm 5.2’nin sonunda Çizelge 5.11’de diğer yük-transfer yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile beraber karşılaştırılmıştır. Söz konusu yöntem ile elde edilen sonuçlara göre Bakü test kazıklarından BOTK-1 numaralı kazıkta deney sonucunda elde edilen oturma değerlerine oldukça yakın (%20-30 oranında farklı) değerler elde edilmiş ve kazığın göçme durumu da gerçeğe yakın bir şekilde modellenmiştir. BOTK-2 numaralı kazıkta ise yöntem ile hesaplanan oturma değerleri ölçülen değerlere göre daha az elde edilirken kazığın göçme yükü ortalama %15 oranında daha fazla çıkmaktadır. Söz konusu yöntem ile Basra test kazıkları üzerinde yapılan hesaplar, deney sonuçlarına genel olarak oldukça yakın elde edilmiştir. Yalnız BETK-4 numaralı kazığın elastik bölgedeki oturma değerleri tahmin edilen değerlerden daha yüksek (%60-%70 oranında) çıkarken BETK-2 numaralı kazığın göçme bölgesi deney sonuçlarına göre daha farklı çıkmıştır. BETK-2 numaralı kazıkta tahmin edilen göçme yükü deney sonuçlarına göre yaklaşık %20 daha yüksektir. BETK-4 numaralı kazıkta elastik bölgede tahmin edilen değerler, deney sonuçlarına göre daha farklı çıksa da göçme durumu doğru bir şekilde modellenmiştir. BETK-1 ve BETK-3 numaralı

kazıklara ait yük-oturma grafiklerine ve Çizelge 5.11'deki değerlere bakıldığında hesaplanan oturma değerleri ile ölçülen değerlerin birbirine yakın elde edildiği görülebilmektedir. Bağdat test kazığına (BATK) ait sonuçlarda ise BETK-2 numaralı kazıktaki duruma benzer şekilde elastik bölgede hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri birbirine oldukça yakın çıkarken göçme durumuna doğru bu değerler arasındaki fark açılmıştır. Kazığın göçme yükü ise hesaplanan grafikte, deney sonucuna göre %15 oranında yüksek çıkmıştır. Baret kazıklardan BTK test kazığında hesaplanan ile ölçülen değerler arasında önemli derecede farklar çıkarken YTK test kazığında ise hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki farklar BTK test kazığındaki farklara göre oldukça azdır. YTK test kazığında, kazık göçme bölgesine geçerken ölçülen ve hesaplanan oturma değerleri arasındaki farklar artmıştır. ATK test kazığında ise ölçülen ve hesaplanan değerler arasında mükemmele yakın bir uyumdan söz edilebilir.

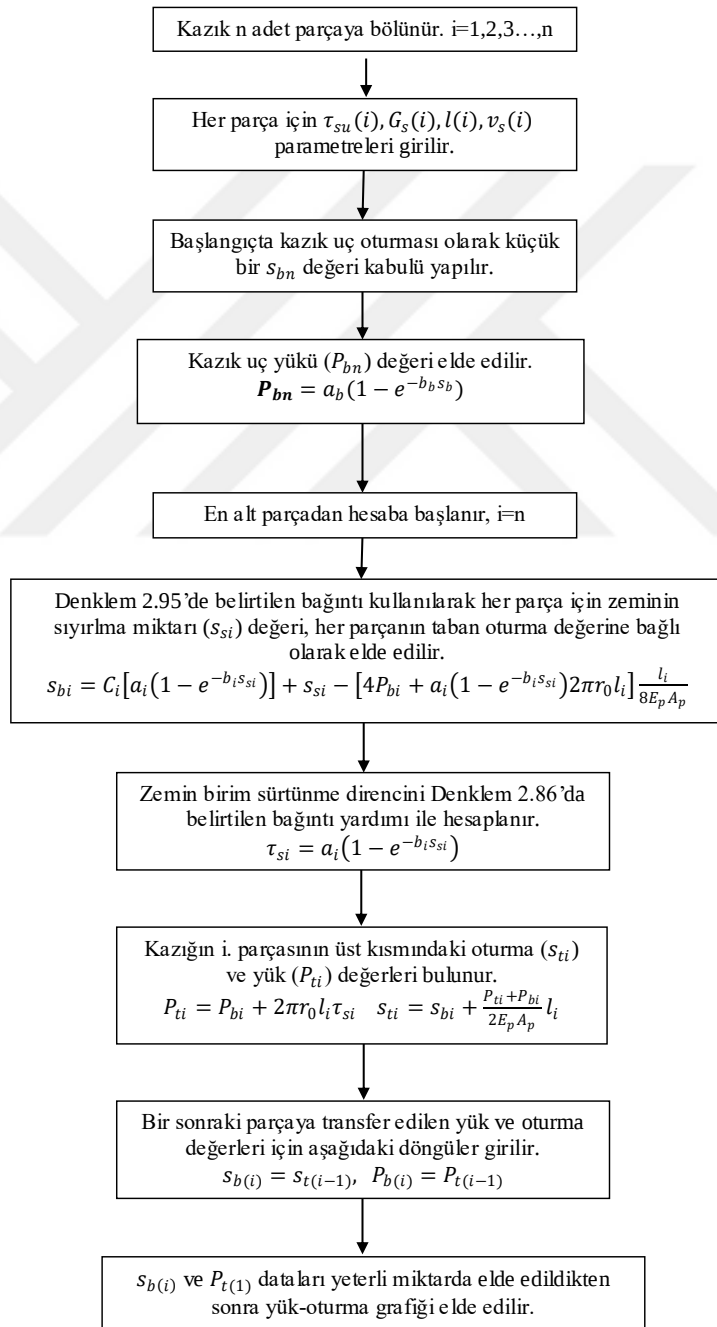
5.2.4 Boonyatee ve Lai (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri

Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen bu yöntemin uygulaması Zhang ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntemle benzerdir. Yöntemde kullanılan bağıntılar Bölüm 3.10'da açıklanmıştır. Yöntemin hesaplarında, Zhang ve diğ. (2016) yöntemine benzer şekilde ilk etapta kazık n parçaya bölünür ve kazık uç noktasında bir oturma değeri tanımlanır. Ardından yöntemde belirtilen bağıntılar kullanılarak kazık başına doğru sürtünme direncinden oluşan yer değiştirmeler ile elastik sıkışma değerleri hesaplanarak kazık başındaki oturma değeri elde edilir. Boonyatee ve Lai (2017) çalışmalarında diğer yük-transfer modellerinden farklı olarak kazık çevresindeki zeminin sıyrılma durumu da dikkate alınmıştır.

Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak incelenen 14 test kazığı üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. Yöntemde kullanılan zemin ve kazık parametreleri, genel olarak Zhang ve diğ. (2016) tarafından kullanılan parametreler ile aynıdır ve şu şekilde sıralanabilir: kazık yarıçapı ve kazık etki yarıçapı (r_0 ve r_m), kazık boyu (L), kazık malzemesinin elastisite modülü (E_k), kazık çevresindeki zeminin kayma modülü (G_s), kazık ucundaki zeminin kayma modülü (G_b), zemin toplam birim sürtünme direnci (τ_{su}), toplam uç direnci (P_{bu}), kazık malzemesinin elastisi ve hiperbolik eğri katsayısıdır (R). Yöntemde kullanılan bu parametreler, bir önceki bölümde (Bölüm 5.2.3) 14 farklı test kazığı için Çizelge 5.10'da her kazık için

özetlenmiştir. 14 adet test kazığının kazık uç toplam uç direnci (P_{bu}) ve kazık malzemesinin elastisite modülü (E_k) parametreleri, Bölüm 5.2.1’de Fleming (1992) yöntemi ile yapılan oturma analizleri için gerekli parametreler bölümünde (Çizelge 5.7) belirtilmiştir.

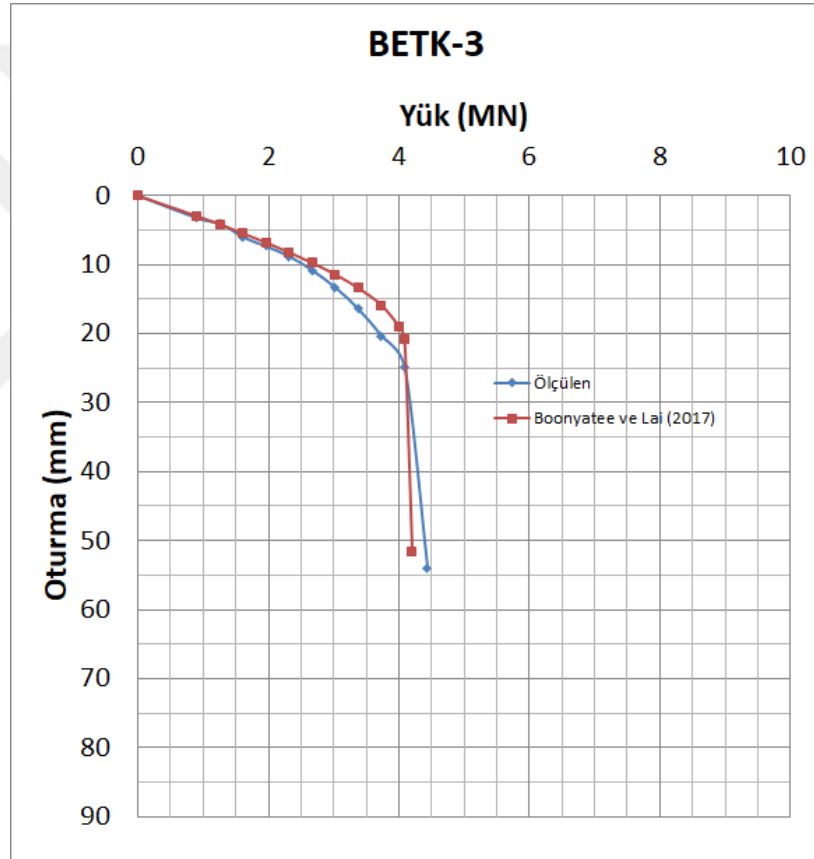
Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yöntemin bağıntıları MATLAB programına işlenerek incelenen 14 farklı kazık üzerinde oturma analizleri yapılmıştır. MATLAB programına işlenen yöntemin akış şeması Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5 : Boonyatee ve Lai (2017) yönteminin akış şeması.

Boonyatee ve Lai (2017) yöntemi kullanılarak elde edilen yük-oturma grafikleri Ek-B'de Şekil B.7 ve B.8'de verilmiştir. İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen ölçülen oturma değerleri ve Boonyatee ve Lai (2016) yöntemi ile elde edilen değerler, Bölüm 5.2'nin sonunda Çizelge 5.11'de diğer yük-transfer yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile beraber karşılaştırılmıştır. Söz konusu yöntem ile elde edilen sonuçlara göre İskenderun test kazıklarında tahmin edilen oturma değerleri deney sonuçlarına genel olarak yakın elde edildiği söylenebilir. Şekil B.7'deki yük oturma grafikleri incelendiğinde İskenderun test kazıklarında elastik bölgedeki sonuçlar belli oranda deney sonuçları ile paralellik gösterdiği söylenebilir. İTKS-1 ve İTKS-2 numaralı kazıkların göçme durumuna geçtikten sonraki oturma değerleri de deneyde ölçülen değerlere yakın elde edilmiştir. Sadece İTKS-4 numaralı kazığın göçme yükü deneyden elde edilen sonuçlara göre %13 oranında farklı çıkmıştır. Bakü test kazıkları için yapılan oturma analizleri incelendiğinde elastik bölge için tahmin edilen oturma davranışı genel olarak deney sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilirken göçme durumuna geçildikten sonra hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki fark artmaktadır. Basra test kazıkları üzerinde yapılan oturma analizleri incelendiğinde İskenderun test kazıkları ile benzer yakınlığın olduğu söylenebilir. Basra test kazıklarında da tahmin edilen oturma değerleri deney sonuçlarına genel olarak yakın elde edilmiş ve hem elastik bölgedeki hem de göçme bölgesindeki sonuçların belli oranda deney sonuçları ile paralellik gösterdiği söylenebilir. Sadece BETK-4 numaralı kazıkta yapılan analizlerde elastik bölgenin bir kısmında deney sonuçlarından fazla uzaklaşmıştır. Onun haricindeki Basra test kazıklarında elde edilen sonuçlar genel olarak deney sonuçları ile uyumludur. Özellikle BETK-3 numaralı kazık için söz konusu yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda deney grafiği ile üst üste örtüştüğü görülmektedir (Şekil 5.6). BATK numaralı test kazığında yapılan analizlere göre 2.5 MN yük değerine kadar ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine oldukça yakın elde edilirken bu yük değerinden sonraki yüklerde aradaki fark yüksek miktarda açılmış ve kazığın göçme durumu deney sonucundan oldukça farklı elde edilmiştir. Deney sonucunda BATK numaralı kazıkta 4.5 MN yükte göçme gözlemlenirken söz konusu yöntem ile yapılan analizler sonucunda kazık göçme yükü 6.0 MN olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni deney sırasında elde edilen toplam birim sürtünme ve uç direnci değerleri ile ilgili olabilir. ATK numaralı kazıkta da göçme durumu benzer şekilde farklı elde edilmiş ama bu fark BATK numaralı kazıkta elde edilen farktan fazla değildir. YTK ve BTK baret

kazıkları için yapılan oturma analizleri ise deney sonucuna göre oldukça farklı çıkmıştır. Bunun nedeni kazık ebatlarının büyük ve dikdörtgen şeklinde olması olabilir. Çünkü yöntem parametrelerinde baret kazıkların eşdeğer yarıçap değerleri kullanılmıştır. Ayrıca BTK test kazığının çok uzun bir kazık olması da bu farka neden olmuş olabilir. Bomonti bölgesindeki derin alüvyon tabakaları için belirlenen zemin kayma modülü değerleri elastik bölge için tahmin edilen oturma değerlerini etkilemekte ve bu kayma modülü değerlerinin gerçekten düşük elde edilmesi sonucunda elastik bölgede ortaya çıkan farka neden olmuş olabilir. Diğer yandan YTK kazığı için elastik bölgede ölçülen ve hesaplanan değerler arasında ciddi farklar bulunmamaktadır.



Şekil 5.6 : BETK-3 ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiği.

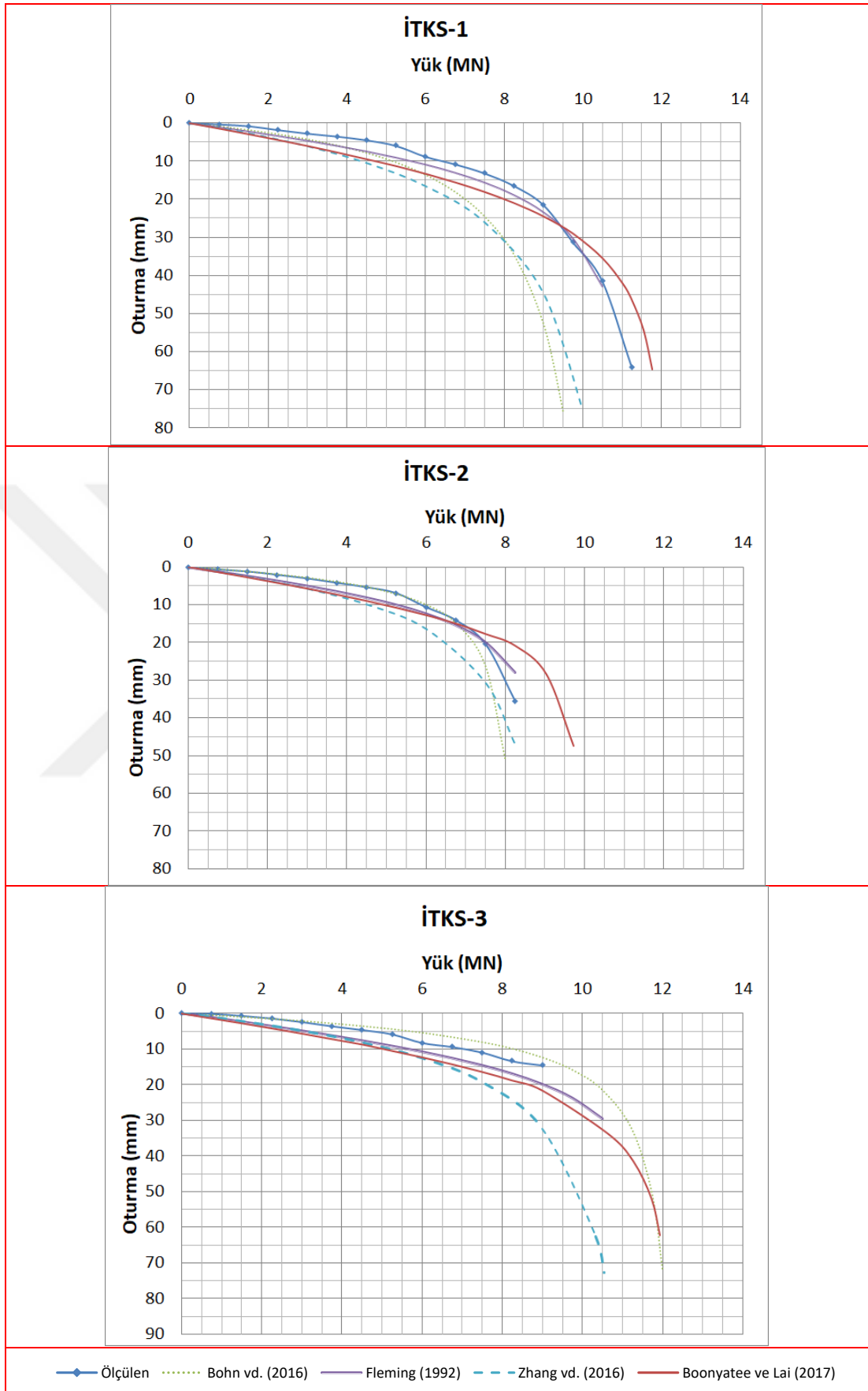
5.2.5 Yük-transfer yöntemlerinin değerlendirilmesi

İncelenen test kazıklarının tasarım yükü (DVL) ve tasarım yükü katlarına karşılık gelen oturma değerleri, yukarıda analizleri yapılan yük-transfer yöntemleri kullanılarak elde edilen değerler ile Çizelge 5.11’de karşılaştırılmıştır. Yük-transfer yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafiklerini beraber karşılaştırmak için 14 farklı

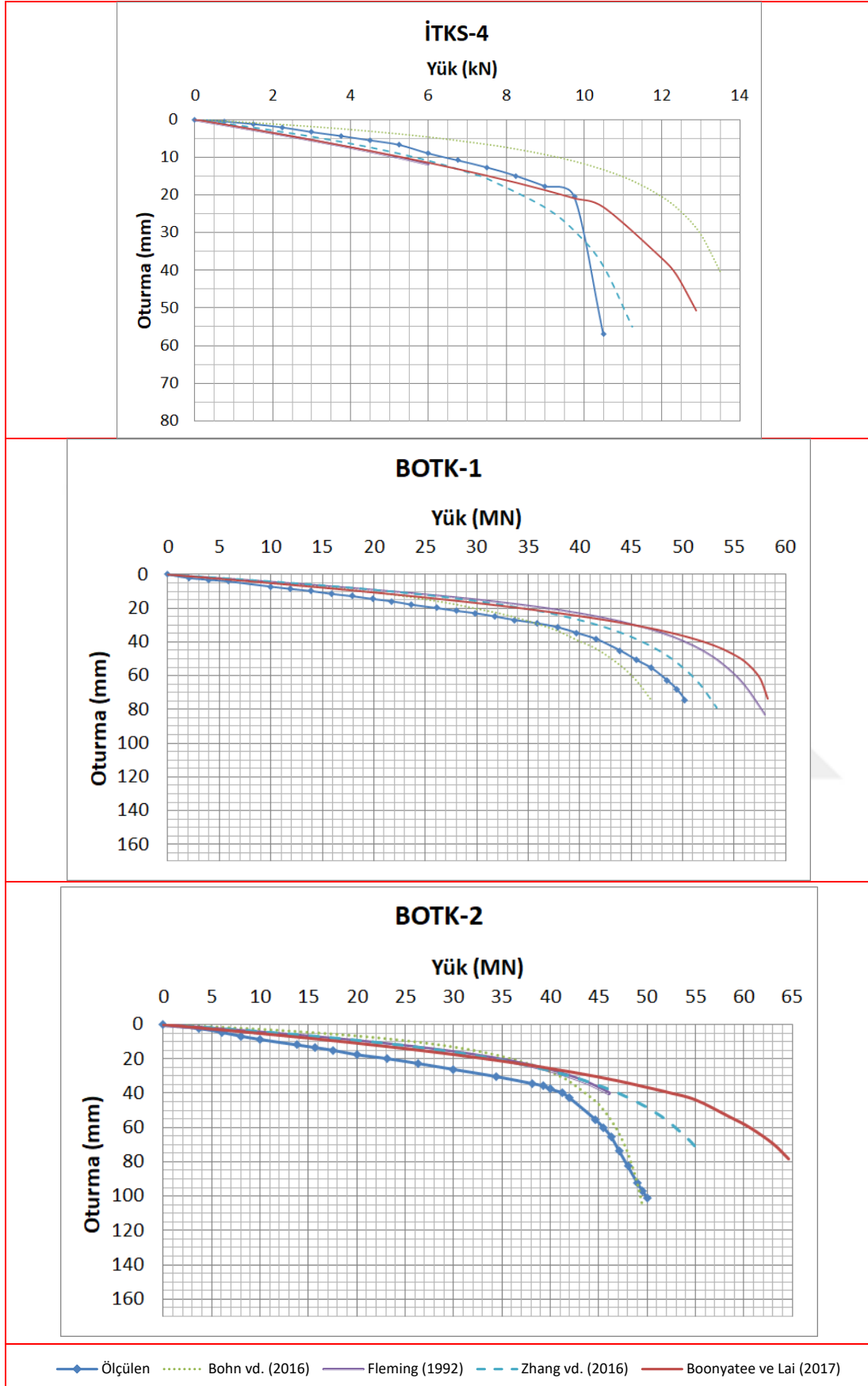
test kazığına ait grafikler Şekil 5.7-10’da deney sonucunda elde edilen grafikler ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 5.11 : Kritik yükler için hesaplanan ve ölçülen oturma değerleri.

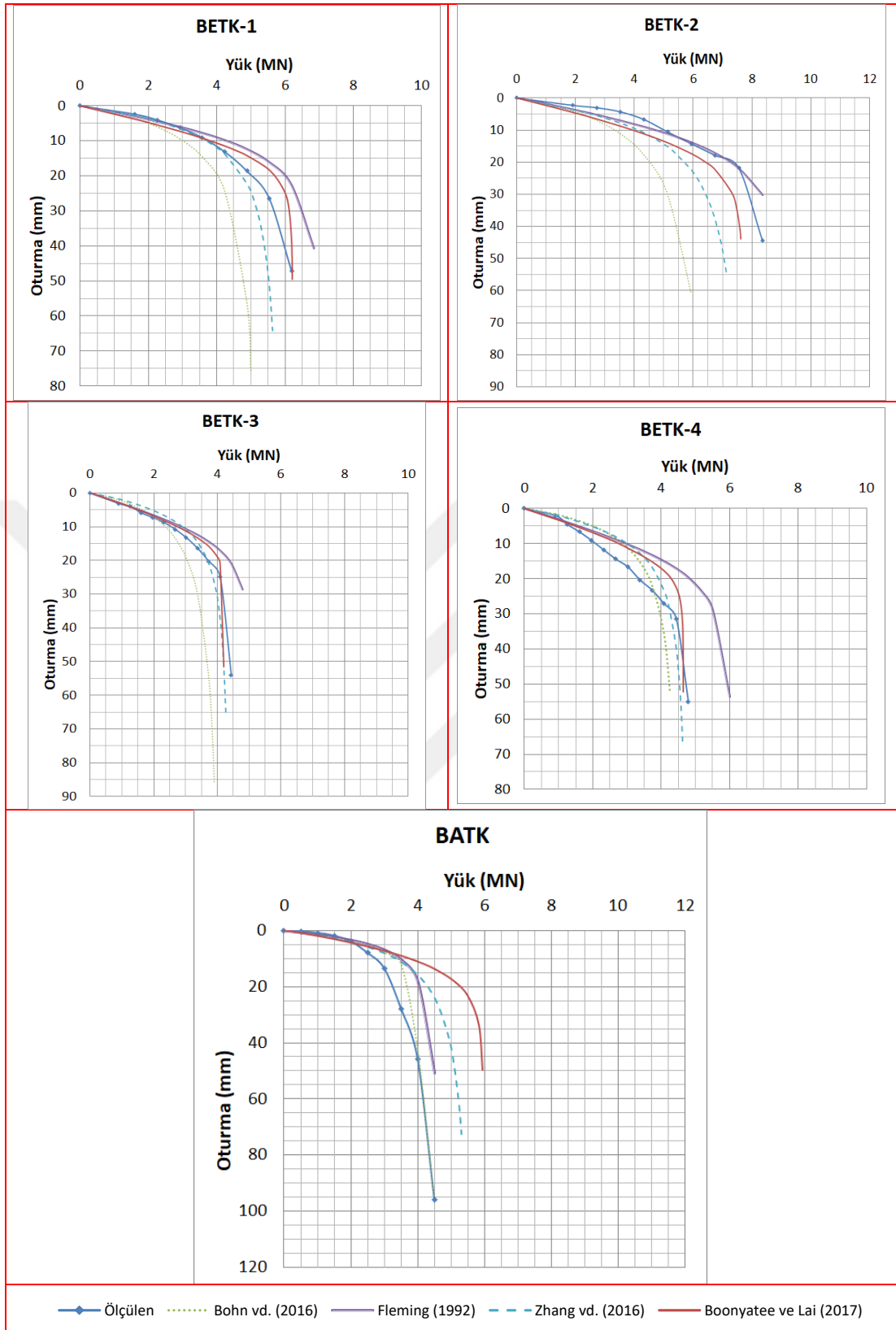
	İTKS-1			İTKS-2			İTKS-3		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	3	6	7.5	3	6	9
Fleming (1992) (mm)	4.64	10.90	23.42	4.96	12.37	20.00	4.94	10.82	19.87
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	4.20	13.57	52.90	2.82	9.97	26.05	2.07	5.36	12.29
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	6.03	16.5	44.52	5.76	16.4	30.66	4.92	12.6	32.36
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.98	13.27	24.46	5.72	12.75	28.00	5.63	12.28	21.6
Ölçülen (mm)	2.76	8.82	21.49	3.03	10.66	20.45	2.38	8.22	14.52
	İTKS-4			BOTK-1			BOTK-2		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	20	30	40	20	30	40
Fleming (1992) (mm)	5.39	11.81	22.07	9.01	14.75	22.94	9.46	15.96	26.74
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	1.88	4.65	9.30	10.48	20.12	38.96	6.62	13.03	27.40
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	4.56	10.94	23.34	8.97	15.76	27.04	9.13	16.07	26.93
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.42	11.49	18.79	10.55	16.72	24.35	10.9	17.52	25.66
Ölçülen (mm)	3.34	9.01	17.71	14.59	23.28	35.89	17.6	26.2	37.67
	BETK-1			BETK-2			BETK-3		
Uygulanan Yük (MN)	2.26	4.23	6.2	2.72	5.14	6.75	1.61	2.32	3.37
Fleming (1992) (mm)	4.46	9.52	20.88	5.30	11.23	17.18	5.25	7.80	12.43
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	6.06	24.29	-	6.96	30.06	-	4.94	9.63	30.17
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	4.45	13.79	-	5.49	15.39	37.97	3.89	6.67	14.55
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.45	11.43	39.51	6.54	13.95	22.34	5.46	8.22	13.4
Ölçülen (mm)	4.02	13.05	47.19	3.02	10.59	17.88	6.01	8.8	16.43
	BETK-4			ATK			BATK		
Uygulanan Yük (MN)	1.61	2.32	3.37	3.33	5	6.66	2	3	4
Fleming (1992) (mm)	5.19	7.64	11.73	5.36	11.26	26.46	3.36	6.82	18.15
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	3.61	6.46	15.27	3.69	12.49	-	3.38	7.98	42.12
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	3.78	6.37	12.68	4.52	8.44	15.44	4.24	8.15	17.00
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.41	8.1	13.06	5.19	8.39	12.56	4.38	7.29	11.11
Ölçülen (mm)	6.65	11.77	20.34	2.39	6.4	17.24	3.96	13.54	45.74
	YTK			BTK					
Uygulanan Yük (MN)	10	15	17	42	63	86.5			
Fleming (1992) (mm)	5.90	13.23	19.78	22.2	34.5	49.98			
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	13.1	30.54	41.74	9.62	19.17	47.77			
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	8.50	17.04	22.6	26.32	49.94	100.1			
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	7.71	12.66	15.10	39.68	63.21	97.22			
Ölçülen (mm)	4.70	17.65	28.42	18.8	29	41.28			



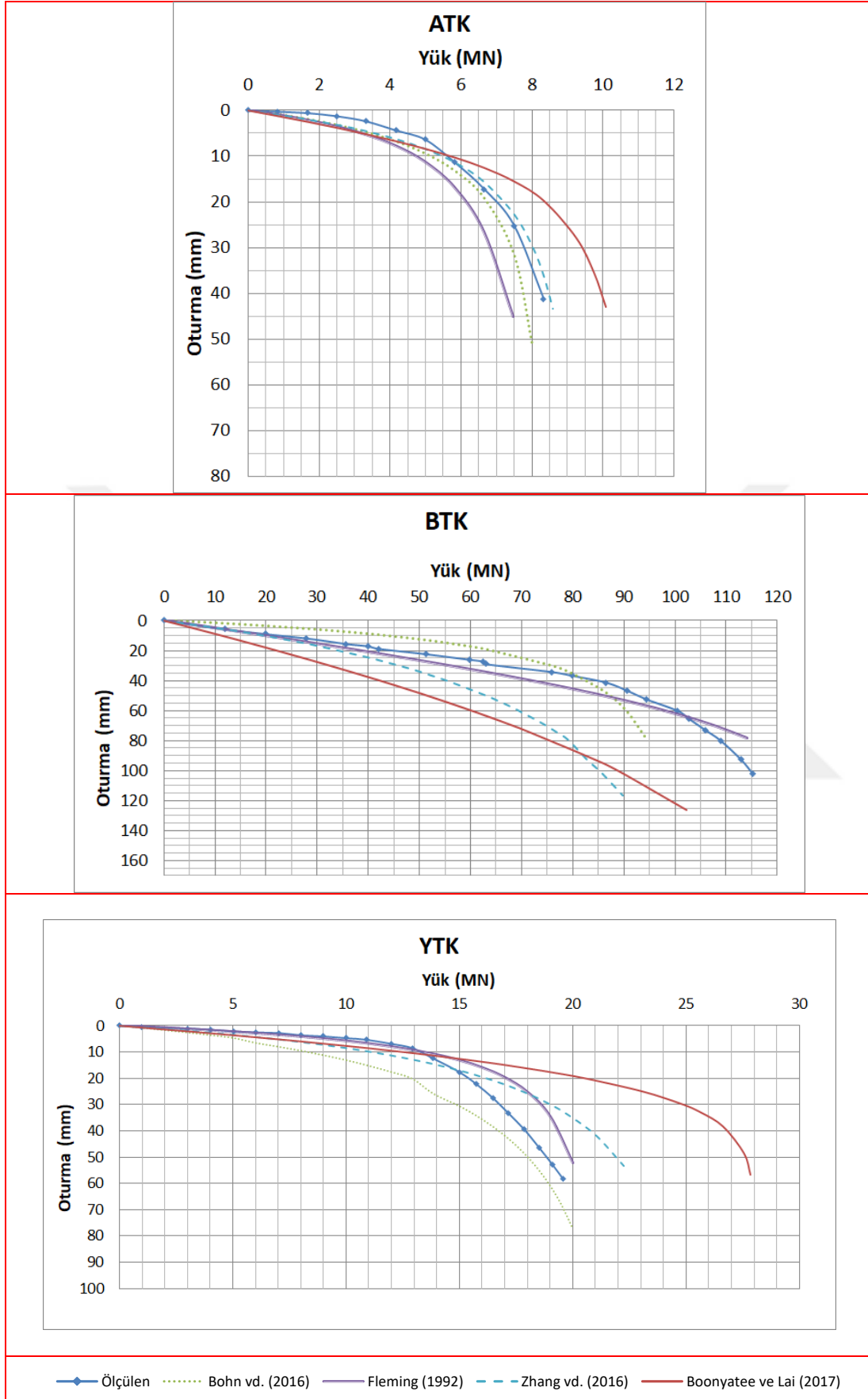
Şekil 5.7 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-1, İTKS-2 ve İTKS-3).



Şekil 5.8 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-4, BOTK-1 ve BOTK-2).



Şekil 5.9 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (Basra Test Kazıkları ve BATK).



Şekil 5.10 : Yük-transfer yöntemleri ile hesaplanan yük-oturma grafikleri (ATK, BTK ve YTK).

İncelenen yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile ölçülen oturma değerleri yukarıdaki bölümlerde genel olarak değerlendirilmiştir. İncelenen 4 farklı yük-transfer yöntemini kendi içerisinde değerlendirdiğimizde Zhang ve diğ. (2016) ile Boonyatee ve Lai (2017) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Her iki yöntemin bağıntıları farklı olsa da uygulama adımları ve yöntemlerde kullandıkları parametreler genel olarak birbirine benzemektedir. Yalnız kazığın göçme bölgesinde, iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasındaki fark açılmaktadır ve Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yöntemde göçme yükü, Zhang ve diğ. (2016) yönteminden elde edilen sonuçlara göre yüksek çıkmaktadır. Her iki yöntemde de büyük çaplı dairesel ve büyük ebatlı baret kazıklarda deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilememiştir. Yalnız BOTK-1 numaralı 200 cm çaplı kazıktan elde edilen sonuçlara göre Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile elde edilen oturma değerlerinin deney sonucunda ölçülen değerlerle arasındaki fark önemli miktarda değildir.

80cm çaplı İskenderun test kazıklarına ait sonuçlar incelendiğinde elastik ve göçme bölgesinin ortalama olarak en iyi Fleming (1992) yöntemi ile modellendiği söylenebilir (Mert ve Özkan, 2019). Fleming (1992) yöntemi ile elde edilen yük-oturma grafikleri birçok kazıkta Zhang ve diğ. (2016) ve Boonyatee ve Lai (2017) yöntemleri ile elde edilen grafiklerin arasında kalmıştır. Bazı kazıklardan (Ör: İTKS-1, İTKS-3 ve BETK-1) elde edilen sonuçlara göre Fleming (1992) yöntemi ile Boonyatee ve Lai (2017) yöntemleri ile hesaplanan oturma değerleri birbirine yakın çıkarken bazı kazıklardan (Ör: İTKS-4, BOTK-2 ve BETK-1) elde edilen sonuçlara göre Fleming (1992) yöntemi ile Zhang ve diğ. (2016) yöntemleri ile hesaplanan oturma değerleri birbirine yakın çıkmıştır. BTK ve YTK baret kazıklarında yapılan analizlerde deney sonuçlarına en yakın yük-oturma davranışı Fleming (1992) yöntemi ile modellenebilmiştir. Ancak Bakü test kazıklarının ölçülen oturma değerleri, Fleming (1992) yöntemi ile yapılan analizlerde elde edilen oturma değerlerine genel olarak uzak çıkmıştır.

Diğer yöntemlere göre daha pratik bir yöntem olan Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile yapılan oturma analizleri bazı kazıklardan elde edilen deney sonuçlarına göre diğer yöntemlerden daha farklı çıkarken BOTK-1 ve BOTK-2 gibi büyük çaplı kazıklarda Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile deney sonuçlarına en yakın oturma değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11’de listelenen değerlere bakıldığında İskenderun kazıklarında kazık tasarım yükü (3 MN) ve 6 MN yük değerlerinde deneyde ölçülen oturma değerlerine en yakın sonuçlar Bohn ve diğ. (2016) ve Zhang ve diğ. (2016) yöntemleri ile hesaplanmıştır (Mert ve Özkan, 2019). İskenderun test kazıklarından elde edilen sonuçlar, göçme bölgesi ile değerlendirildiğinde deney sonucuna en yakın değerlerin Fleming (1992) yöntemi ile hesaplandığı söylenebilir. Bakü test kazıklarının tasarım yükü ve tasarım yükünün 2 katı olan 20 MN ve 30 MN yük değerleri için hesaplanan oturma değerleri karşılaştırıldığında genel olarak Fleming (1992), Zhang ve diğ. (2016) ve Boonyatee ve Lai (2017) yöntemlerinden elde edilen değerler birbirine oldukça yakın çıkmış ve hesaplanan değerlerin deney sonuçlarına yakın olduğu söylenebilir.



6. TEKİL SÜRTÜNME KAZIKLARI OTURMA ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ HİPERBOLİK YÖNTEM

Bu bölümde kazık oturma analizleri için geliştirilen yeni yöntem açıklanmıştır. Kazık oturma hesapları ile ilgili 5. Bölümde toplam 6 yöntem kullanılarak kazıkların yük-oturma grafikleri elde edilmiştir. İncelenen 6 yöntemden farklı olarak daha az parametre ile sürtünme kazıkları için oturma analiz yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni yöntemde Alku ve Özkan (2006) ile Aktepe ve Özkan (2016) tarafından elde edilen bağıntılardan faydalanılmıştır. Alku ve Özkan (2006), kazık yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma davranışını inceleyerek kazık toplam taşıma gücü değerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Aktepe ve Özkan (2016) çalışmasında Alku ve Özkan (2006) tarafından geliştirilen bağıntılar yardımı ile kazıkların kritik yük değerini hesaplamıştır. Bu yeni yöntemin bağıntılarının oluşturulması için 4. Bölümde incelenen 14 farklı kazık yükleme deney datası değerlendirilmiş ve Alku-Özkan (2006) ve Aktepe-Özkan (2016) yöntemlerinden yararlanarak bu deneyler üzerinden parametrik çalışmalar yapılmıştır.

6.1 Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 2.3.2’de açıklandığı üzere Alku-Özkan (2006) yönteminde kazık yük-oturma ilişkisi idealize edilerek açıklanmıştır. İdeal yük oturma eğrileri, kazıklardaki lineer olmayan davranışı da açıklayacak şekilde iki ayrı kısımda formulize edilmiştir. Söz konusu grafiklerin detayları Bölüm 2.3.2’de açıklanmıştır. Bu yöntemle göre idealize yük-oturma grafiğinin ilk kısmı için yük oturma arasındaki ilişki aşağıda verilen bağıntı ile tanımlanmıştır.

$$s = (a_1P + a_2)^2 \quad (6.1)$$

Bu bağıntı yük-oturma eğrisinin başlangıç bölümünü tanımlar. İdealize yük-oturma grafiğinin son kısmı ise aşağıda verilen bağıntı ile elde edilmektedir.

$$s = \frac{\sqrt{P}}{b_1 P + b_2} \quad (6.2)$$

Alku-Özkan yönteminde kazık toplam taşıma gücü;

$$P_{tu} = -\frac{b_2}{b_1} \quad (6.3)$$

olarak kabul edilmiştir. Bölüm 2.3.2’de de açıklandığı üzere Denklem 6.1 ve 6.2’de verilen bağıntılar yardımı ile ideal yük-oturma eğrisi oluşturulabilir (Şekil 2.18).

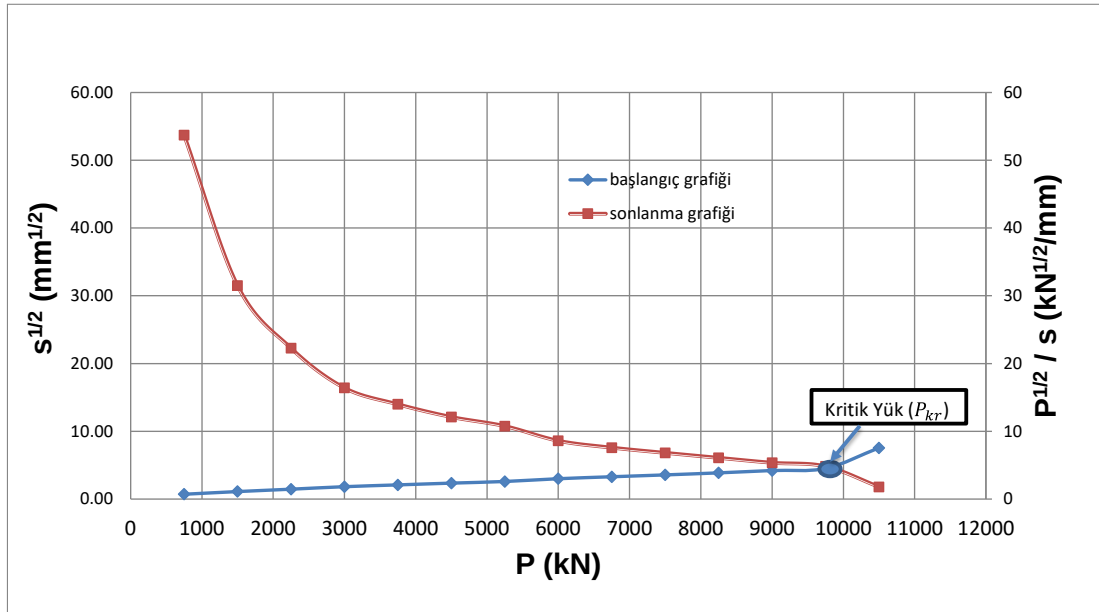
Yöntemde belirtilen katsayılar ve kazık göçme yükleri 7 ayrı sahadaki toplam 14 adet yükleme deneyi için hesaplanmıştır. İskenderun, Bakü, Basra, Bağdat, İzmir, Bomonti ve Yenikapı bölgelerinde test kazıkları üzerinde yapılan kazık yükleme deneylerinin Alku-Özkan (2006) yöntemi ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen a_1, a_2, b_1 ve b_2 parametreleri ve kazık toplam taşıma gücü (P_{tu}) değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Ayrıca incelenen 14 adet kazık yükleme deneyinin verilerinden a_1, a_2, b_1 ve b_2 parametrelerinin elde edildiği grafikler Ek C’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : İncelenen test kazıklarının Alku-Özkan (2006) yöntemine göre hesaplanan parametreleri ve kazık toplam taşıma gücü değerleri.

Kazık No	İTKS-1	İTKS-2	İTKS-3	İTKS-4	BOTK-1
a_1	0.000407	0.000406	0.000441	0.000419	0.00013
a_2	0.3418	0.5067	0.1800	0.4805	1.27302
b_1	-0.001379	-0.002100	-0.001709	-0.001413	-0.000278
b_2	16.9099	19.933	20.612	17.61	16.923
P_{tu} (kN)	12262	9492	12061	12463	60874
Kazık No	BOTK-2	BETK-1	BETK-2	BETK-3	BETK-4
a_1	0.000138	0.000745	0.0005810	0.000862	0.001399
a_2	1.3753	0.3316	0.208674	0.9966	0.2587
b_1	-0.000328	-0.001661	-0.001315	-0.003787	-0.001233
b_2	18.513	11.967	13.4164	18.0242	7.3393
P_{tu} (kN)	56442	7205	10203	4759	5952
Kazık No	BATK	ATK	BTK	YTK	
a_1	0.000952	0.000414	0.000055	0.0001976	
a_2	0.02177	0.123278	1.8981	0.423819	
b_1	-0.002157	-0.001508	-0.0001293	-0.0009609	
b_2	10.1511	14.7654	18.196967	20.8139	
P_{tu} (kN)	4706	9791	140734	21661	

Çizelge 6.1’de görüleceği üzere aynı sahalarda imal edilen kazıklarda elde edilen yöntem parametreleri genel itibariyle birbirine yakın çıkmıştır. Hesaplanan

a_1, a_2, b_1 ve b_2 parametreleriyle her bir test kazığının bulunduğu bölgenin zemin özellikleri ve test kazığı özellikleri arasında bağıntılar elde edilerek tekil kazık oturma analizleri yapılmıştır. Bunun için öncelikle kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafiklerinin başlangıç ve son bölümlerini ayıran kritik yükleri elde etmek gerekmektedir. Aktepe ve Özkan (2016) tarafından kritik yük değerinin elde edilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışma Bölüm 2.3.2’de açıklanmıştır. Alku ve Özkan (2006) yönteminde bağıntıları verilen başlangıç ve sonlanma eğrileri aynı grafik üzerinde işlendiğinde iki eğrinin çakışma noktasına kritik yük değeri olarak tanımlanmıştır (Aktepe ve Özkan, 2016). Örnek olarak İTKS-4 numaralı kazığa ait elde edilen kritik yük değeri Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.1’de görüleceği üzere İTKS-4 numaralı test kazığının kritik yük değeri 9750 kN olarak elde edilir. Diğer test kazıkları için Aktepe ve Özkan (2016) yöntemine göre kritik yük değerleri elde edilmiş ve söz konusu grafikler Ek C’de verilmiştir. Yöntemin uygulaması sonucunda bütün kazıklar için elde edilen kritik yük değerleri, Çizelge 6.2’de Alku ve Özkan (2006) yöntemi ile elde edilen toplam taşıma gücü değerleri ile birlikte verilmiştir. Çizelge 6.2’de görüleceği üzere Aktepe-Özkan (2016) yöntemi ile hesaplanan kazık kritik yükünün toplam taşıma gücüne oranı 0.70 olarak elde edilmiştir. Yük-oturma analizinde belirlenen hiperbolik bağıntılar hesaplanan toplam taşıma gücünün %70’i esas alınarak birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 6.1 : İTKS-4 kritik yük değeri hesabı.

Çizelge 6.2 : Kazık yükleme deneylerinden elde edilen toplam taşıma gücü ve kritik yük değerleri.

Kazık No	Kritik Yük, P_{kr} (kN) (Aktepe ve Ozkan, 2016)	Toplam Yük, P_{tu} (kN) (Alku ve Ozkan, 2006)	P_{kr}/P_{tu}
İTKS-1	9000	12262	0.73
İTKS-2	7500	9492	0.79
İTKS-3	10500	12061	0.87
İTKS-4	9750	12463	0.78
BOTK-1	40000	60874	0.66
BOTK-2	37000	56442	0.66
BETK-1	4750	7205	0.66
BETK-2	6750	10203	0.66
BETK-3	3200	4759	0.67
BETK-4	2700	5952	0.45
BATK	3000	4706	0.64
ATK	6850	9791	0.70
BTk	90000	140734	0.64
YTK	16000	21661	0.74

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de hesaplanan değerler kullanılarak bir sonraki bölümde yeni yöntem içi parametre çalışmaları yapılmıştır.

6.2 Yeni Yöntem için Parametre Çalışmaları

Tekil kazıkların oturma analizi için geliştirilen yeni yöntemde Özkan ve Alku (2006) yönteminde belirtilen iki ayrı yük oturma bağıntısı kullanılacaktır.

$$\begin{aligned}
 P \leq P_{kr} &\rightarrow s_1 = (a_1 P + a_2)^2 \\
 P > P_{kr} &\rightarrow s_2 = \frac{\sqrt{P}}{b_2 - b_1 P}
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Yukarıdaki bağıntılarda verilen a_1, a_2, b_1 ve b_2 parametreleri, oturma analizi için zemin ve kazık parametreleri ile ilişkilendirilecektir. Çizelge 6.1’de görüleceği üzere benzer zemin ve kazık parametreleri için benzer katsayılar elde edilmiştir.

Belirlenecek a_1, a_2, b_1 ve b_2 parametrelerin birimleri sırasıyla $\frac{mm^2}{kN}$, $mm^{1/2}$,

$\frac{1}{kN^2 mm}$, $\frac{kN^2}{mm}$ olacaktır. Söz konusu parametreler genel olarak kazık boyutlarına ve

kazık toplam taşıma gücü ile ilişkilendirilmiştir. Eksenel yüklü tekil kazıkların oturma

analizi için geliştirilen bu yeni hiperbolik yöntemde; kazık toplam taşıma gücü (P_{tu}) ve kazık boy ve çapları (L ve D) gibi zemin ve kazık parametreleri kullanılmıştır. Kazık toplam taşıma gücü değeri zemin ve kazık parametrelerine bağlı değişmektedir. Genel olarak aynı sahada bulunan benzer boyutlardaki fore kazıklarda yük-oturma eğrisinin ilk kısmının ana parametresi (yük değerinin çarpanı) olan a_1 parametresinin birbirine yakın elde edildiği görülmektedir. Bu yüzden bu parametre ile kazık toplam taşıma gücü arasında bir bağıntı oluşturulmuştur. Yük-oturma grafiğinin ilk kısmındaki a_2 parametresi ise kazık boyu ve çapına bağlanmıştır. 14 farklı kazık yükleme deney verileri incelenerek a_1 ve a_2 parametreleri için aşağıdaki bağıntılar oluşturulmuştur.

$$a_1 = \frac{c_1 \sqrt{r_0}}{P_{tu}/R} \quad (5.5)$$

$$a_2 = c_2 (\pi DL)^{1/4} \quad (5.6)$$

Farklı çap ve boylardaki kazıklara uygulanan 14 farklı yükleme deneyinden elde edilen katsayı değerlerinin ağırlıklı ortalaması ile c_1 ve c_2 katsayıları elde edilmiştir. c_2 değeri hesaplarında deneylerden elde edilen en büyük ve en küçük değerler diğer değerlerden çok farklı olduğu için ortalama hesaplarına katılmamıştır. Katsayı hesapları sonucunda c_1 değeri 0.28 olarak elde edilirken c_2 değeri 5×10^{-3} olarak elde edilmiştir (Şekil 6.2). Bu bağıntılarda yer alan kazık ve zemin parametreleri;

P_{tu} : Kazık toplam taşıma gücü (kN),

D : Kazık çapı (mm),

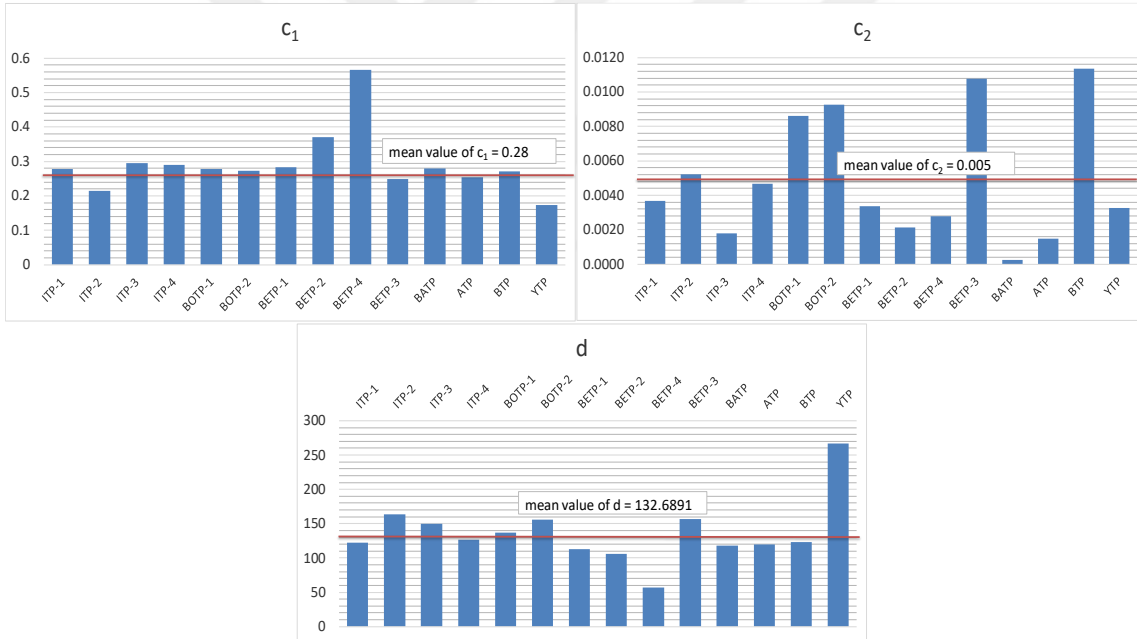
R : Hiperbolik eğri katsayısı (0.80-0.95 arasında alınabilir.)

Yük-oturma eğrisinin sonlanma kısmını analiz etmek amacıyla b_1 ve b_2 parametrelerini belirlemek gerekiyor. Alku-Özkan (2006) tarafından belirtildiği üzere kazık toplam taşıma gücü değeri, $P_{tu} = -\frac{b_2}{b_1}$ olarak belirlenmiştir. Bunun için incelenen 14 yükleme deneyi sonucunda b_1 ve b_2 parametreleri kazık çapına ve kazık toplam taşıma gücü değerine bağlı birer parametre olarak kabul edilmiştir. İncelenen 14 kazık yükleme deneyi sonucunda b_1 ve b_2 parametreleri için aşağıdaki bağıntılar belirlenmiştir.

$$b_1 = \frac{d}{\sqrt{P_{tu}} \cdot D} \quad (5.7)$$

$$b_2 = \frac{d\sqrt{P_{tu}}}{D} \quad (5.8)$$

Yukarıda verilen bağıntılarla deney sonuçları eşleştirildiğinde elde edilen katsayı değerlerinin ağırlıklı ortalaması ile her iki bağıntıda aynı d sabit katsayısı elde edilmiştir. Yapılan katsayı hesapları sonucunda d katsayısı **132.6891** olarak belirlenmiştir (Şekil 6.2). Belirlenen d katsayısının hassasiyeti yöntemi incelenen test kazıklarına uygulayarak belirlenmiştir. **b_1 ve b_2** parametreleri, kazığın göçme bölgesindeki oturma değerlerini önemli ölçüde etkilediği için belirlenen d katsayısının hassasiyeti, hesaplanan oturma değerlerinin incelenen deney sonuçlarına en yakın olacak şekilde ayarlanmıştır.

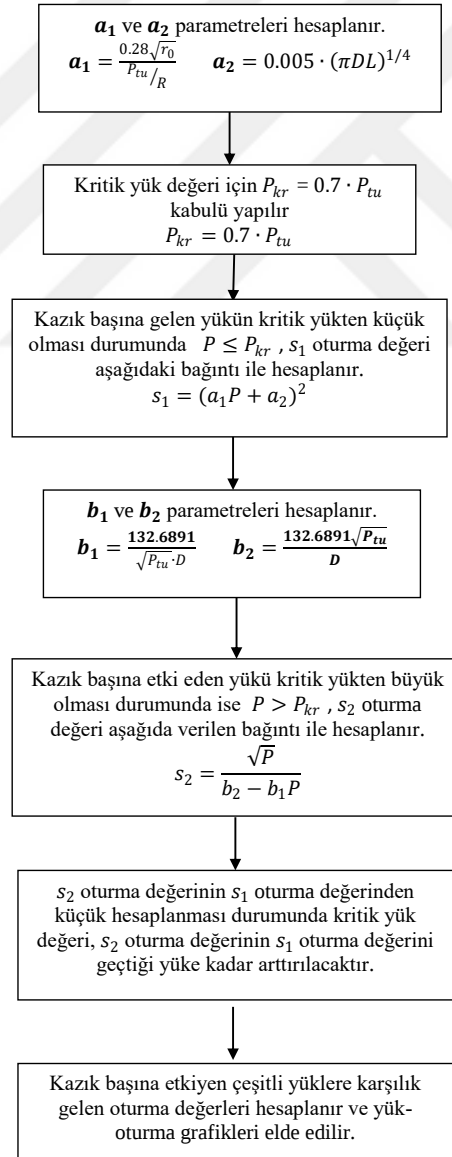


Şekil 6.2 : Belirlenen c_1, c_2 ve d katsayı değerleri.

6.3 Yeni Yöntem ile Yapılan Hesaplar ve Karşılaştırmalar

Bölüm 6.2’de elde edilen katsayı değerleri, Şekil 6.3’te verilen yeni yöntemin akış şemasında Denklem 6.5-8’deki yerlerine koyulmuştur. Yeni hiperbolik yöntem Alku ve Özkan (2006) tarafından geliştirilen yük-oturma bağıntılarına dayanmaktadır. Yeni yöntemde yük-oturma grafiği elde edilirken kritik yükün belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Söz konusu 14 yükleme deneyinin yeni belirlenen yöntem ile sağlaması

yapılırken kritik yük öncelikle Aktepe-Özkan (2016) tarafından geliştirilen yöntem ile belirlenmiştir. Çizelge 6.2’de görüleceği üzere elde edilen kritik yük değeri kazık toplam taşıma gücünün ortalama %70’ine eşit olduğu için oturma analizlerinde ilk etapta $P_{kr} = 0.7 \cdot P_{tu}$ kabulü yapılmıştır. Ancak yeni yöntem hesaplarında belirlenen bağıntılarla bazı kazıklarda yapılan oturma analizlerinde kritik yüke karşılık gelen yük-oturma grafiğini ilk kısmındaki oturma (s_1) değeri grafiğin ikinci kısmındaki oturma değerinden büyük (s_2) elde edilmiştir. Bu durumlarda kritik yük (P_{kr}) değeri s_2 değerinin s_1 değerini geçeceği yüke kadar çıkarılmıştır. Bu durum göz önüne alınarak Denklem 5.4’de belirtilen hiperbolik yöntem bağıntıları ile kazık yük-oturma grafikleri elde edilmiştir. Yeni oturma analizi yönteminin şematik anlatımı Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3 : Yeni yöntemin şematik anlatımı.

Hesap yöntemlerinden elde edilen kazık tasarım yüküne ve yükün katlarına karşılık gelen oturma değerleri Çizelge 6.3’de verilmiştir. Genel olarak yük-transfer yöntemleriyle elde edilen kazık tasarım yüküne karşılık gelen oturma değerleri ölçülen değerlere yakın elde edilmiştir. YTK baret kazığında ise yeni yöntemle elde edilen değerler ölçülen değerlere uzak kalmıştır. Yeni hiperbolik yöntem, dairesel fore kazıklarda baret kazıklara göre daha uygun sonuçlar vermiştir. Baret kazıklarda yakın sonuç vermemesinin nedeni yeni yöntem analizinde eşdeğer çaplar üzerinden hesaplar yapılması olabilir. Buna rağmen BTK test kazığının oturma davranışı yeni yöntem ile diğer yöntemlere göre daha iyi modellenenilmektedir.

Yeni yöntem çalışmasında değerlendirilen 14 farklı test kazığının oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri Şekil 6.4-7’de verilmiştir. Grafiklerde ölçülen değerler ile 4 farklı yöntemle elde edilen değerler de yeni yöntem analizleriyle karşılaştırılmıştır.

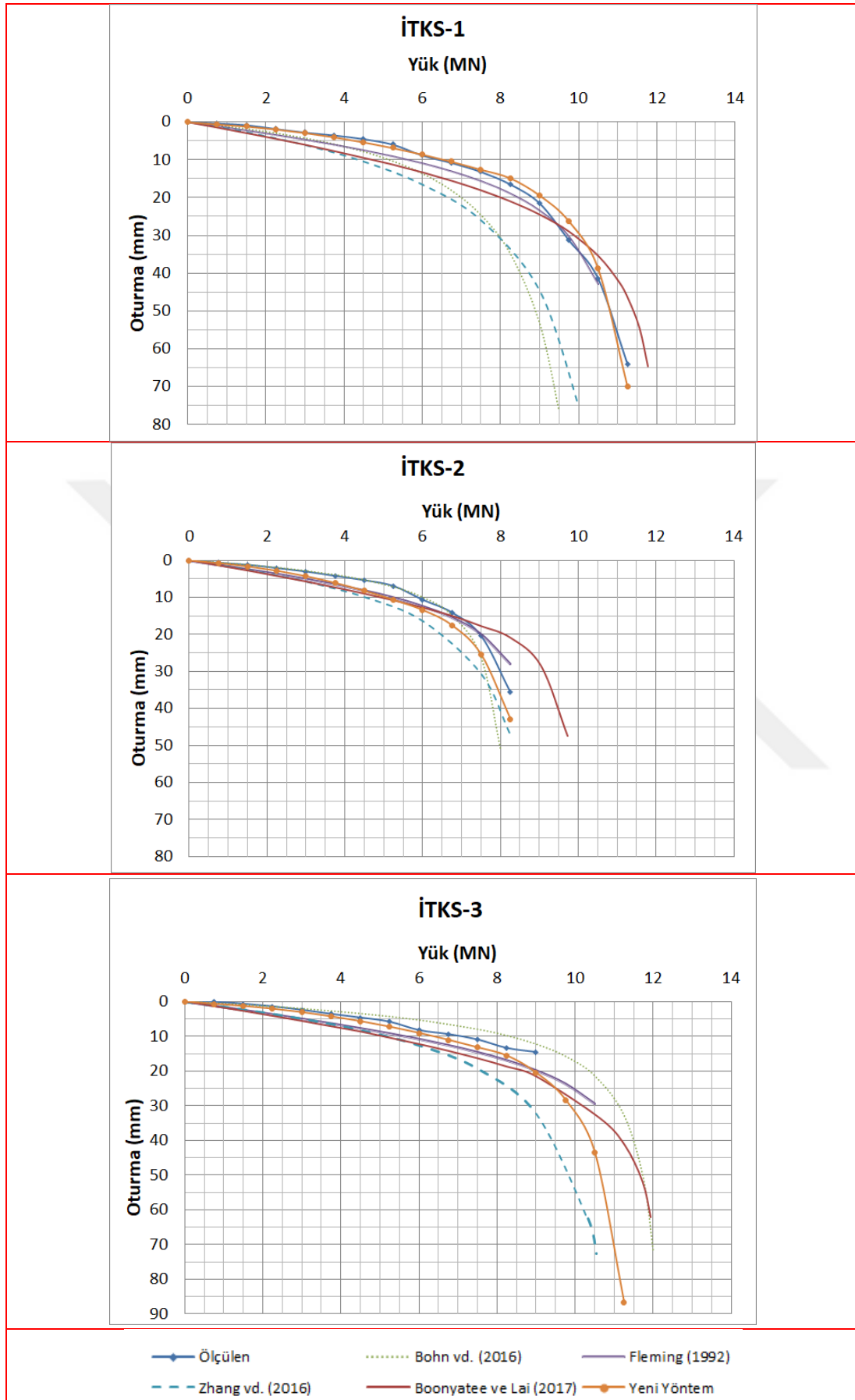
Şekil 6.4 ve 6.5’de gösterilen İskenderun bölgesindeki test kazıklarının yük oturma grafiklerinden yeni yöntem ile ölçülen değerler elastik bölgede ve göçme bölgesinde oldukça iyi bir şekilde eşleşmiştir. İskenderun test kazıklarında ölçülen oturma değerleri ile hesaplanan oturma değerleri arasındaki fark elastik ve göçme bölgesinde ortalama %15-20 arasında elde edilmiştir.

Şekil 6.6’da verilen Basra kazıklarında BETK-1, BETK-2 ve BETK-3 test kazıklarında ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine yakın elde edilirken BETK-4 test kazığında elastik ve göçme bölgelerinde %50 civarında bir fark oluşmuştur. BETK-1, BETK-2 ve BETK-3 numaralı test kazıklarında ise hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki fark ise %20-25 arasında elde edilmiştir.

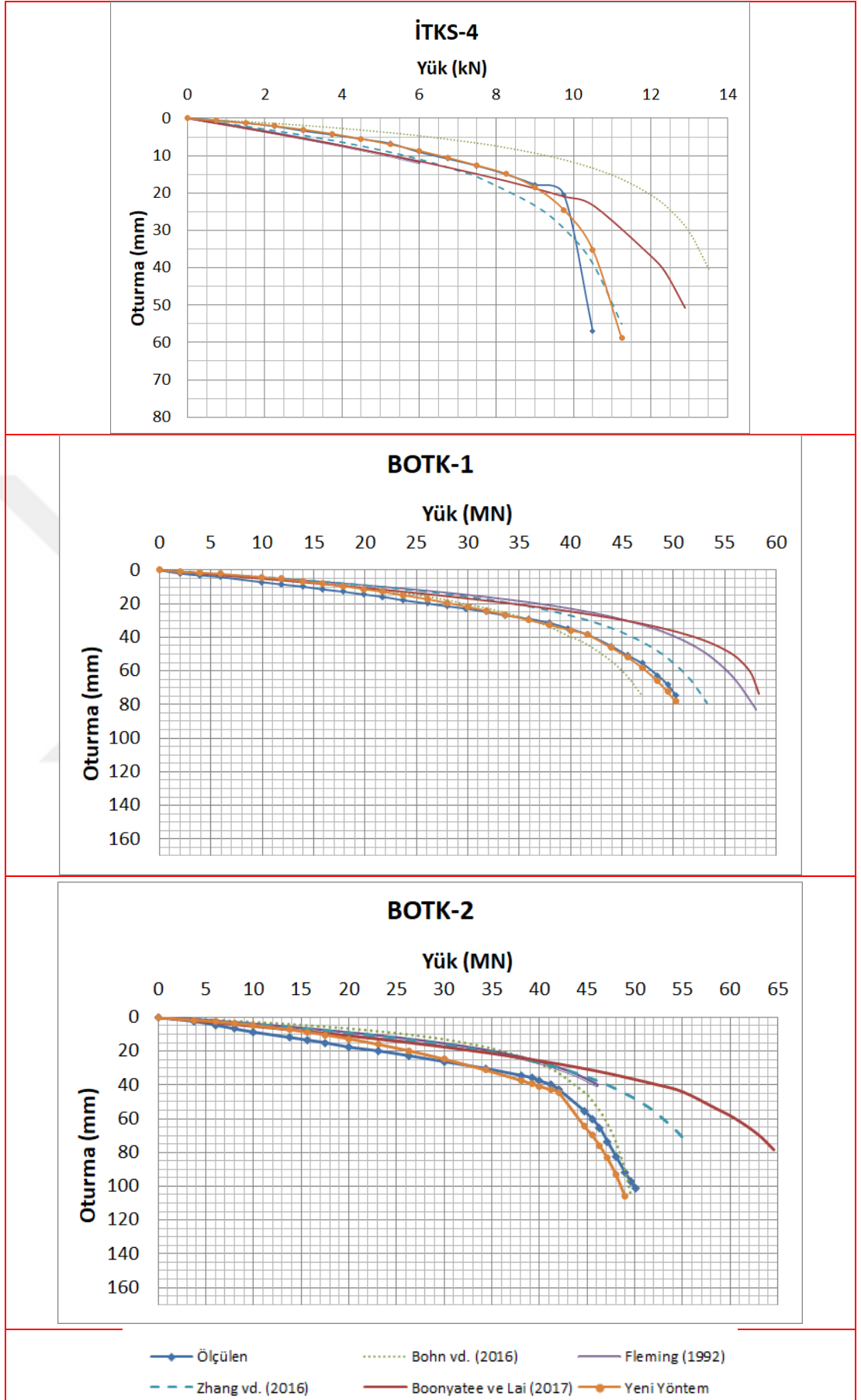
Şekil 6.5’de verilen Bakü test kazıklarında yük-oturma grafiklerinde görüleceği üzere yeni yöntem ile ölçülen değerler hem elastik hem de göçme bölgesinde mükemmel bir şekilde eşleşmiştir. Bu bölgelerdeki oturma değerlerinin yüzdesel farkı ortalama %10-15 arasında elde edilmiştir. Aliağa ve Bağdat bölgelerindeki test kazıklarında da oturma değerlerinde oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de verilen bu test kazıklarında özellikle göçme bölgeleri ölçülen değerlere çok yakın çıkmıştır. Göçme bölgelerinde hesaplanan değerlerde ölçülen değerlere göre yüzdesel fark %15-20 olarak elde edilirken elastik bölgedeki yüzdesel fark ise %35-40 arasında elde edilmiştir.

Çizelge 6.3 : Farklı yöntemlerle hesaplanan ve deney sırasında ölçülen oturma değerleri.

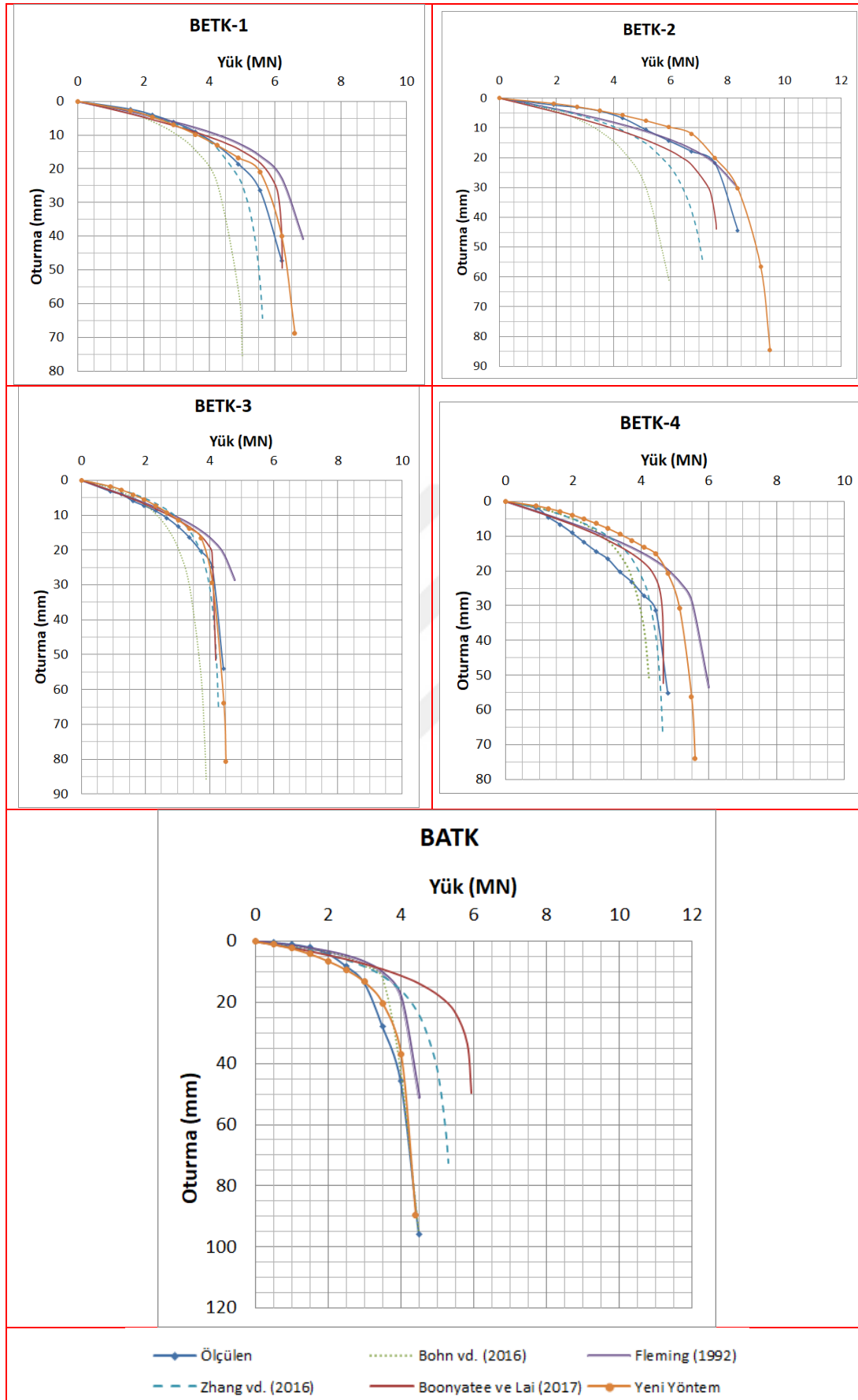
	İTKS-1			İTKS-2			İTKS-3		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	3	6	7.5	3	6	9
Fleming (1992) (mm)	4.64	10.90	23.42	4.96	12.37	20.00	4.94	10.82	19.87
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	4.20	13.57	52.90	2.82	9.97	26.05	2.07	5.36	12.29
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	6.03	16.5	44.52	5.76	16.4	30.66	4.92	12.6	32.36
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.98	13.27	24.46	5.72	12.75	28.00	5.63	12.28	21.6
Yeni Yöntem (mm)	2.89	8.60	19.41	4.31	13.47	25.54	3.08	9.05	20.52
Ölçülen (mm)	2.76	8.82	21.49	3.03	10.66	20.45	2.38	8.22	14.52
	İTKS-4			BOTK-1			BOTK-2		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	20	30	40	20	30	40
Fleming (1992) (mm)	5.39	11.81	22.07	9.01	14.75	22.94	9.46	15.96	26.74
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	1.88	4.65	9.30	10.48	20.12	38.96	6.62	13.03	27.40
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	4.56	10.94	23.34	8.97	15.76	27.04	9.13	16.07	26.93
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.42	11.49	18.79	10.55	16.72	24.35	10.9	17.52	25.66
Yeni Yöntem (mm)	2.99	8.66	18.44	11.27	21.78	35.71	12.71	24.77	40.81
Ölçülen (mm)	3.34	9.01	17.71	14.59	23.28	35.89	17.6	26.2	37.67
	BETK-1			BETK-2			BETK-3		
Uygulanan Yük (MN)	2.26	4.23	6.2	2.72	5.14	6.75	1.61	2.32	3.37
Fleming (1992) (mm)	4.46	9.52	20.88	5.30	11.23	17.18	5.25	7.80	12.43
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	6.06	24.29	-	6.96	30.06	-	4.94	9.63	30.17
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	4.45	13.79	-	5.49	15.39	37.97	3.89	6.67	14.55
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.45	11.43	39.51	6.54	13.95	22.34	5.46	8.22	13.4
Yeni Yöntem (mm)	4.68	13.06	39.98	2.84	7.54	11.94	4.09	7.32	13.91
Ölçülen (mm)	4.02	13.05	47.19	3.02	10.59	17.88	6.01	8.8	16.43
	BETK-4			ATK			BATK		
Uygulanan Yük (MN)	1.61	2.32	3.37	3.33	5	6.66	2	3	4
Fleming (1992) (mm)	5.19	7.64	11.73	5.36	11.26	26.46	3.36	6.82	18.15
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	3.61	6.46	15.27	3.69	12.49	-	3.38	7.98	42.12
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	3.78	6.37	12.68	4.52	8.44	15.44	4.24	8.15	17.00
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	5.41	8.1	13.06	5.19	8.39	12.56	4.38	7.29	11.11
Yeni Yöntem (mm)	2.92	5.09	9.45	3.75	7.30	11.98	6.41	13.28	37.05
Ölçülen (mm)	6.65	11.77	20.34	2.39	6.4	17.24	3.96	13.54	45.74
	YTK			BTK					
Uygulanan Yük (MN)	10	15	17	42	63	86.5			
Fleming (1992) (mm)	5.90	13.23	19.78	22.2	34.5	49.98			
Bohn ve diğ. (2016) (mm)	13.1	30.54	41.74	9.62	19.17	47.77			
Zhang ve diğ. (2016) (mm)	8.50	17.04	22.6	26.32	49.94	100.1			
Boonyatee ve Lai (2017) (mm)	7.71	12.66	15.10	39.68	63.21	97.22			
Yeni Yöntem (mm)	14.65	29.33	36.62	10.38	19.49	33.05			
Ölçülen (mm)	4.70	17.65	28.42	18.8	29	41.28			



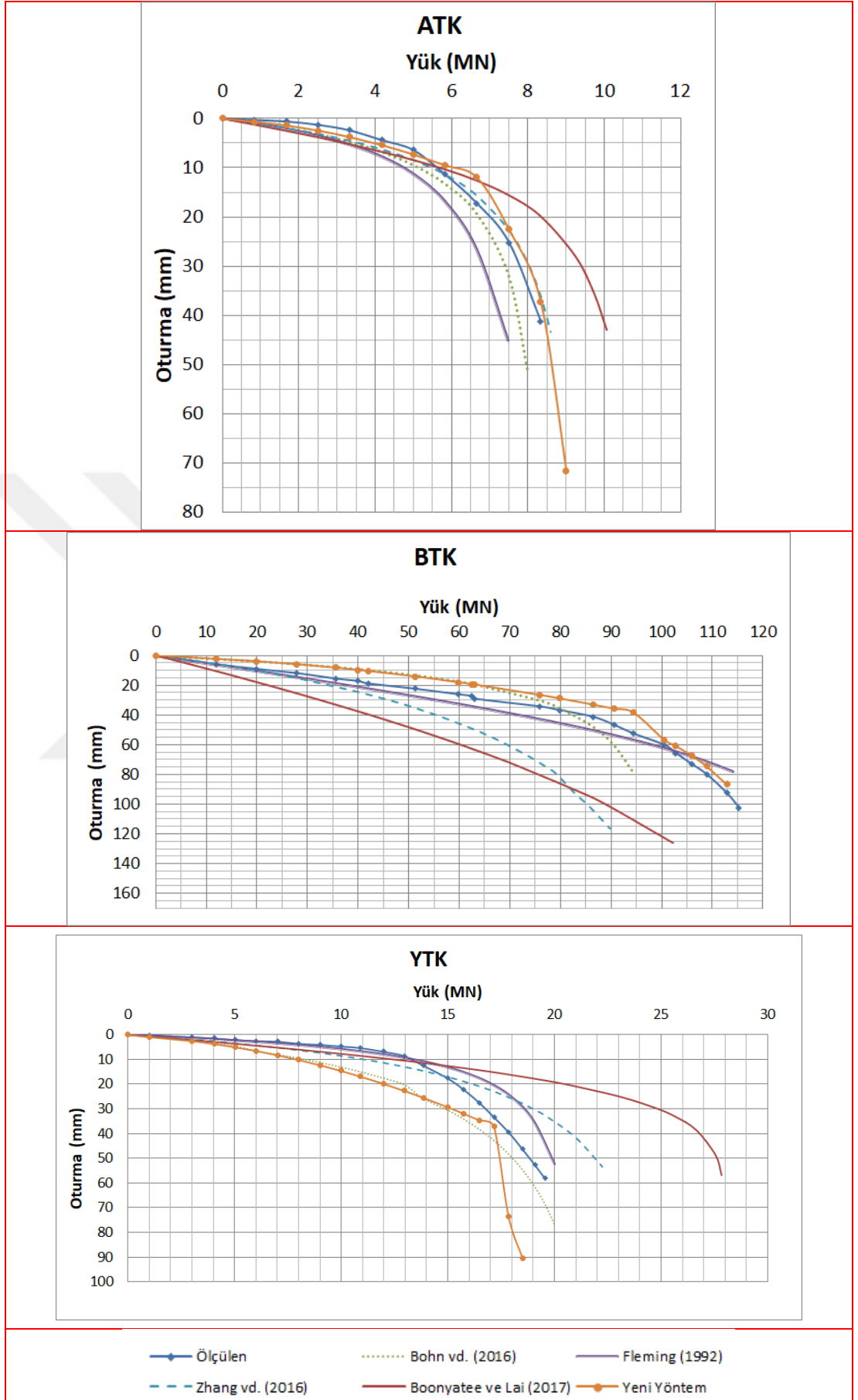
Şekil 6.4 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-1,2,3).



Şekil 6.5 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (İTKS-4 ve BOTK-1,2).



Şekil 6.6 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (BETK-1,2,3,4 ve BATK).



Şekil 6.7 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafikleri (ATK, BTK ve YTK).

Şekil 6.7’de verilen baret kazıklar için elde edilen yük oturma grafiklerinde görüleceği üzere yeni hiperbolik yöntem ile yapılan hesaplarda deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilememiştir. Ancak BTK-1 numaralı kazıkta yapılan hesaplarda göçme bölgesi için iyi sonuç elde edildiği söylenebilir.

Genel olarak revize edilen yeni yöntemin hem büyük çaplı kazıkların (BOTK-1) hem de normal çaplı kazıkların (BETK-3, İTKS-1) oturma analizleri için uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Ancak baret kazıklar için yeni yöntem çok iyi sonuçlar vermemekle birlikte diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında göçme durumları için uygulanabilir olduğu söylenebilir.

İncelenen kazıklar için yeni yöntem ile yapılan oturma hesaplarının ölçülen değerler ile olan yüzdesel farklar Çizelge 6.4’te özetlenmiştir. Çizelge 6.3’te belirtilen kırıktık yükler için ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki yüzdesel farklar hesaplanmıştır. Çizelge 6.4’te yüzdesel farkların değerlendirilmesi için incelenen kazıkların boy/çap (L/D) oranları da verilmiştir.

Çizelge 6.4’te görüleceği üzere kritik yüklerde ölçülen değerlere yüzdesel olarak en yakın sonuçlar kazık boy/çap oranının 30-60 arasında olduğu durumlarda elde edilmiştir. Kazık boy/çap oranının 30’dan düşük olduğu YTK ve ATK kazıklarında yüzdesel farklar diğer kazıklara göre yüksek çıktığı söylenebilir. Kazık boy/çap oranının yüksek olduğu ($L/D > 60$) BETK-4 kazığında ise yine yüzdesel farkların büyük çıktığı söylenebilir. Boy/çap oranları 37.5-56.25 arasında değişen İskenderun ve Bakü test kazıklarında kırıktık yüklerde ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki yüzdesel farklar genel olarak ortalama %4-30 arasında çıkmıştır. L/D oranının 46 olduğu BETK-1 ve BETK-2 kazıklarında ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki farklar İskenderun test kazıklarından elde edilen sonuçlara benzer olarak %1-30 arasında elde edilmiştir. BATK numaralı kazıkta ise tasarım yükünde yüzdesel fark bir miktar fazla çıkarken plastik bölgeye doğru ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki yüzdesel farklar azalmıştır. YTK test kazığı ile ilgili büyük yüzdesel farkın sebebi yukarıda açıklandığı üzere baret kazıklar için yeni hiperbolik yöntem ile yapılan hesaplarda eşdeğer kazık çaplarının kullanılmasının olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca YTK kazığındaki yüzdesel farkın diğer bir baret kazık olan BTK kazığındaki farktan büyük olmasının sebebi, YTK kazığının boy/çap oranının 30’dan düşük olmasıdır. Yukarıda belirtildiği üzere yeni yöntem ile yapılan hesaplarda en uygun sonuçlar kazık boy/çap oranının 30 ile 60 arasında olduğu durumlarda elde edilmiştir.

Çizelge 6.4 : Deney sırasında ölçülen ve yeni yöntem ile hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırılması.

	İTKS-1			İTKS-2			İTKS-3		
BOY/ÇAP (L/D)	37.5			43.75			50		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	3	6	7.5	3	6	9
Yeni Yöntem (mm)	2.89	8.60	19.41	4.31	13.47	25.54	3.08	9.05	20.52
Ölçülen (mm)	2.76	8.82	21.49	3.03	10.66	20.45	2.38	8.22	14.52
Yüzde Fark (%)	4.71	2.49	9.68	42.24	26.36	24.89	29.41	10.10	41.32
	İTKS-4			BOTK-1			BOTK-2		
BOY/ÇAP (L/D)	56.25			38			38.4		
Uygulanan Yük (MN)	3	6	9	20	30	40	20	30	40
Yeni Yöntem (mm)	2.99	8.66	18.44	11.27	21.78	35.71	12.71	24.77	40.81
Ölçülen (mm)	3.34	9.01	17.71	14.59	23.28	35.89	17.6	26.2	37.67
Yüzde Fark (%)	10.5	3.885	4.12	22.76	6.44	0.50	27.78	5.46	8.34
	BETK-1			BETK-2			BETK-3		
BOY/ÇAP (L/D)	46			46			64.7		
Uygulanan Yük (MN)	2.26	4.23	6.2	2.72	5.14	6.75	1.61	2.32	3.37
Yeni Yöntem (mm)	4.68	13.06	39.98	2.84	7.54	11.94	4.09	7.32	13.91
Ölçülen (mm)	4.02	13.05	47.19	3.02	10.59	17.88	6.01	8.80	16.43
Yüzde Fark (%)	16.4	0.08	15.28	5.96	28.80	33.22	31.95	16.82	15.34
	BETK-4			ATK			BATK		
BOY/ÇAP (L/D)	64.7			23.37			31.25		
Uygulanan Yük (MN)	1.61	2.32	3.37	3.33	5	6.66	2	3	4
Yeni Yöntem (mm)	2.92	5.09	9.45	3.75	7.3	11.98	6.41	13.28	37.05
Ölçülen (mm)	6.65	11.77	20.34	2.39	6.4	17.24	3.96	13.54	45.74
Yüzde Fark (%)	56.1	56.75	53.54	56.90	14.06	30.51	61.87	1.92	19.00
	YTK			BTK					
BOY/ÇAP (L/D)	19.9			38.5					
Uygulanan Yük (MN)	10	15	17	42	63	86.5			
Yeni Yöntem (mm)	14.65	29.33	36.62	10.38	19.49	33.05			
Ölçülen (mm)	4.7	17.65	28.42	18.8	29	41.28			
Yüzde Fark (%)	212	66.18	28.85	44.79	32.79	19.94			

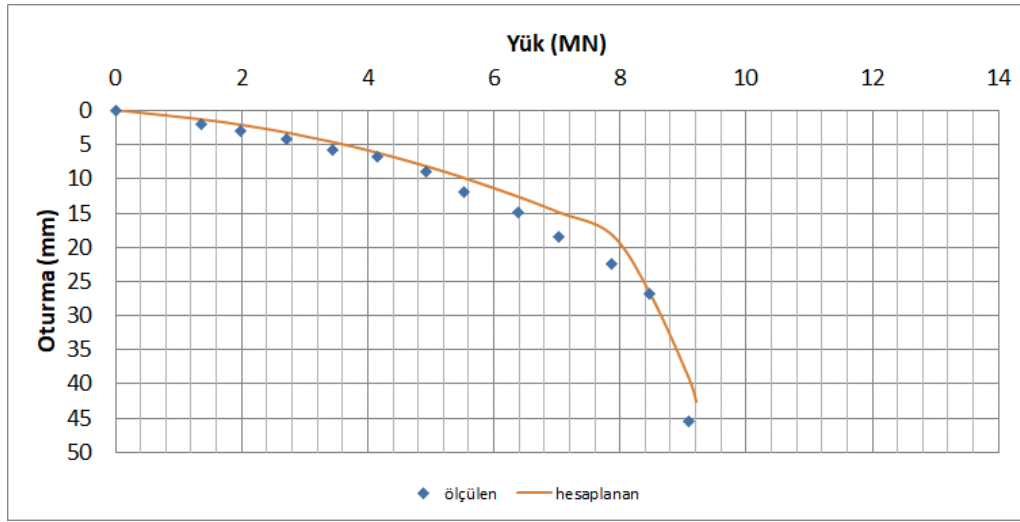
Literatürde olan çalışmalar üzerinden yeni yöntemin sağlaması yapılmıştır. He (2002) tarafından incelenen kazık yükleme deney dataları kullanılarak yeni yöntem ile hesap yapılmıştır. Bu deney datası, Boonyatee ve Lai (2017) ve Wang ve diğ. (2012) tarafından da incelenerek kendi yöntemlerinin sağlamasında kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada incelenen test kazığı fore kazık yöntemi ile imal edilirken çapı 0.8 m ve boyu 47.6 m’dir. Alku-Ozkan yöntemi kullanılarak incelenen fore kazığın toplam taşıma gücü 10600 kN olarak hesaplanmıştır. Test kazığı boyunca geçilen zemin profili ve özellikleri Wang ve diğ. (2012) tarafından Çizelge 6.5’de özetlenmiştir. Yeni yöntem kullanılarak yapılan yük-oturma analizi sonucunda elde edilen yük-oturma

grafığı Şekil 6.8’de verilmiştir. Şekil 6.8’de görüleceği üzere ölçülen değerlerle yeni yöntem ile hesaplanan değerler arasında mükemmele yakın bir eşleşme vardır.

Çizelge 6.5 : Zemin özellikleri ve parametreleri (Wang ve diğ., 2012).

Zemin Cinsi	Derinlik (m)	$\tau_{su}(kPa)$
Siltli Kil	0-9.15	35.1
Siltli Kil	9.15-12.45	53.1
Silt	12.45-17.25	45
İnce Kum	17.25-27.46	57.6
Silt	27.46-35.50	57.6
Silt	35.50-47.60	62.1

$$P_{bu} = 1344 \text{ kN}$$



Şekil 6.8 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.

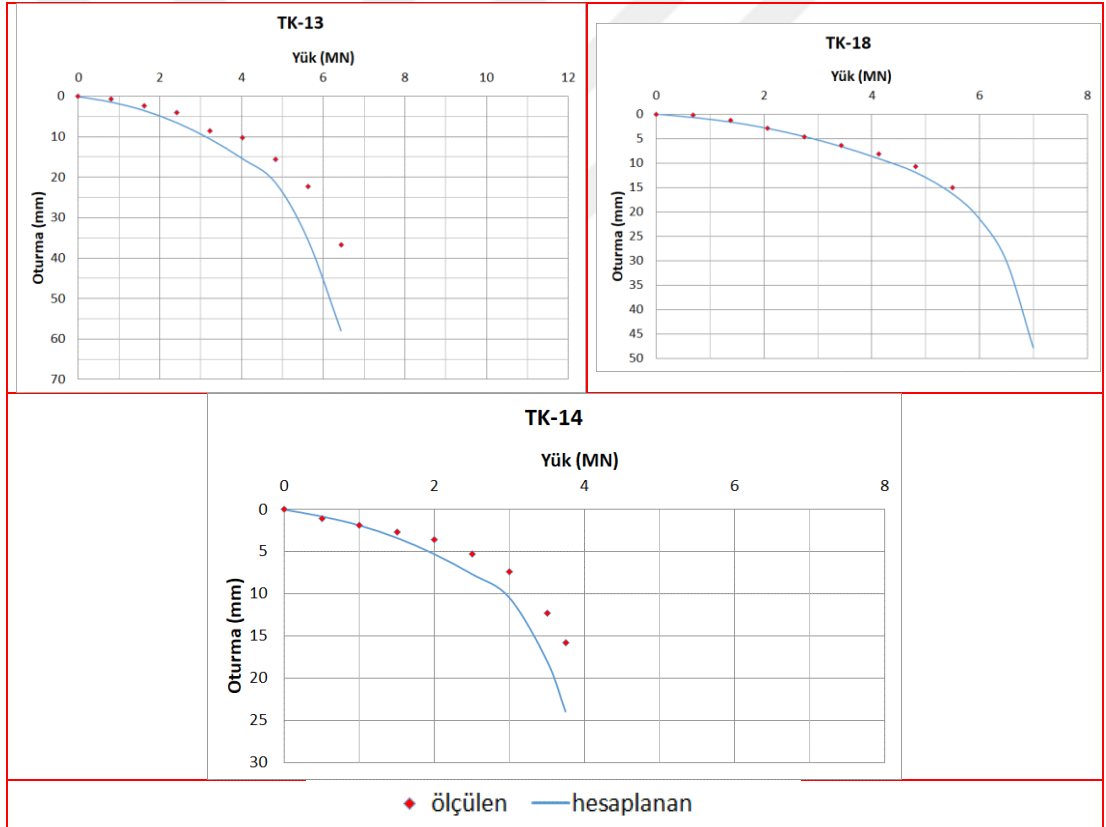
Yeni hiperbolik yöntemin sağlaması için Alku ve Özkan tarafından incelenen 3 adet fore kazık üzerinde oturma analizi yapılmıştır. Söz konusu kazıkların numaraları ile kazık parametreleri Çizelge 6.6’da özetlenmiştir. Kazık toplam taşıma gücü (P_{tu}) değerleri Alku-Özkan yöntemi ile elde edilmiştir.

Çizelge 6.6 : Alku ve Özkan (2006) tarafından incelenen test kazıklarına ait parametreler.

Kazık No	Kazık Çapı (m)	Kazık Boyu (m)	R	$P_{tu}(kN)$
TK13	1.65	15	0.85	7980
TK14	0.65	27	0.85	4600
TK18	0.80	16	0.90	7940

Çizelge 6.6’da verilen parametreler kullanılarak yeni hiperbolik yöntem ile fore kazıkların oturma analizleri yapılmıştır. Yeni hiperbolik yöntem ile elde edilen oturma değerleri ile deneyde ölçülen değerler Şekil 6.9’da karşılaştırılmıştır. Her 3 kazık için

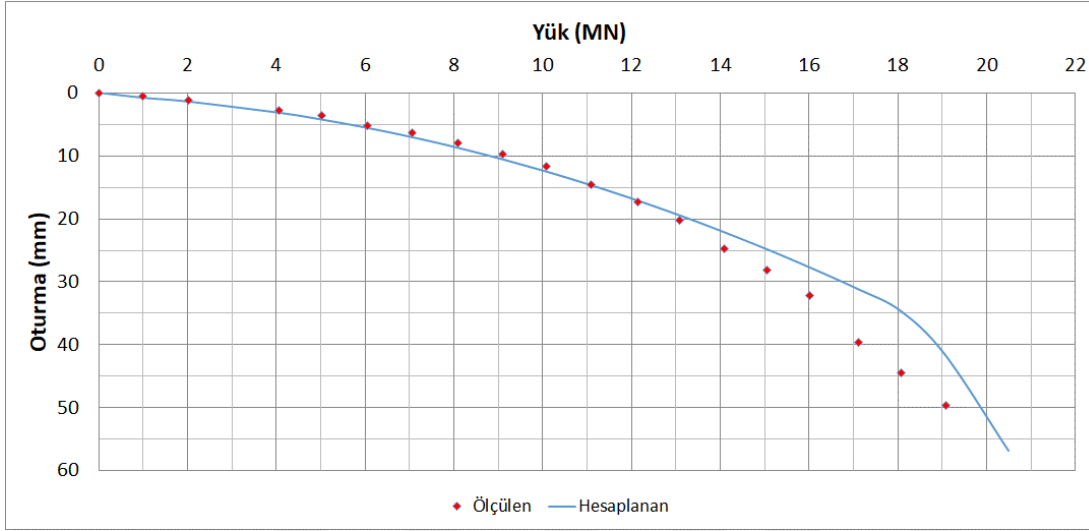
de ölçülen ile hesaplanan oturma değerlerinin birbirine yakın çıktığı söylenebilir. Özellikle TK-18 numaralı kazığın davranışı deney sonuçlarına çok yakın bir şekilde modellenebilmiştir. Yeni geliştirilen yük-oturma analiz yöntemi ile Çizelge 6.5'te verilen kazık parametreleri kullanılarak kazıkların göçme bölgesinden sonraki davranışı da ölçülen değerlere yakın bir şekilde modellenebilmektedir. Örnek olarak TK-18 numaralı kazığın yükleme deneyinde maksimum 5500 kN yük uygulanmış ve toplam oturma 15.04 mm olarak belirlenmiştir ve yeni geliştirilen kazık oturma analizi yöntemi ile uygulanan maksimum yükteki oturma değeri ve daha büyük yüklerdeki oturma davranışı gerçeğe yakın modellenebilmiştir. TK-13 ve TK-14 numaralı kazıklarda da elastik bölgedeki oturma değerleri ölçülen değerlere yakın elde edilirken göçme bölgesine doğru ölçülen ve hesaplanan oturma değerleri arasında az bir miktar fark oluşmuştur.



Şekil 6.9 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması (TK-13,14,18).

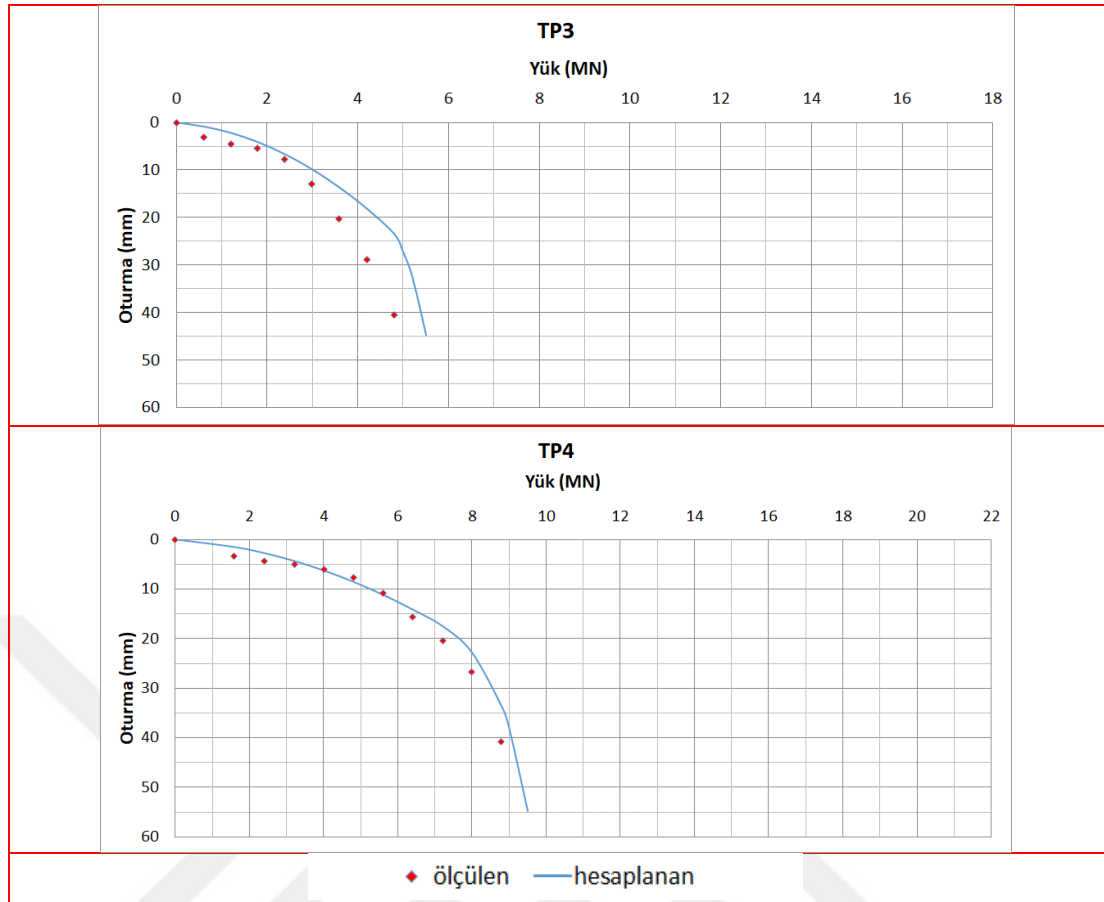
Hirayama (1990) tarafından incelenen 1.5 m çapında ve 44 m boyundaki fore kazık üzerinde de yeni geliştirilen yöntem ile oturma analizi yapılmıştır. İncelenen test kazığı Japonya'da Kuzey Osaka bölgesinde sürtünme kazığı olarak imal edilmiş ve deney sonucunda fore kazığın toplam taşıma gücü değeri (P_{tu}) 25000 kN olarak elde

edilmiştir. Bu analizde hiperbolik eğri katsayısı (R) 0.95 alınmıştır. Bu parametreler kullanılarak yeni geliştirilen yöntem ile yapılan oturma analizi sonucunda Şekil 6.10'da verilen yük-oturma grafiği elde edilmiştir. Şekil 6.10'da görüleceği üzere söz konusu büyük çaplı kazık için hesaplanan oturma değerleri deney sırasında ölçülen değerlere oldukça yakın elde edilmiş ve her iki grafik arasında iyi bir uyum oluşmuştur.



Şekil 6.10 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.

Yeni geliştirilen yöntemin kısa kazıklar üzerindeki davranışını ölçmek amacı ile Zhao ve diğ. (2020) tarafından incelenen 900 mm çaplı 10 m ve 15 m boylarındaki iki adet fore kazık üzerinde yeni yöntem ile oturma analizleri yapılarak yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.11). Bu çalışma kapsamında incelenen test kazıkları Çin'in Baishi Dağı'ndaki eğimli arazide imal edilmiştir. Söz konusu arazideki zemin profilinin ilk 3 m'si kumlu birimlerden (kayma dalgası hızı, $V_s = 150 - 200 \text{ m/s}$), kumlu birimlerin altında 6 m derinliğe kadar siltli kil birimler (kayma dalgası hızı, $V_s = 200 - 250 \text{ m/s}$) ve daha aşağı seviyelerde ise çakıl birimlerinden (kayma dalgası hızı, $V_s = 250 - 350 \text{ m/s}$) oluşmaktadır. Yapılan yükleme deneyleri sonucunda TP3 numaralı 10 m boyundaki test kazığının toplam taşıma gücü 6400 kN olarak hesaplanırken TP4 numaralı 15 m boyundaki test kazığının toplam taşıma gücü 10750 kN olarak hesaplanmıştır. TP3 ve TP4 numaralı kazıklarda yeni yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda ölçülen ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın çıktığı söylenebilir. 15 m boyundaki TP4 numaralı kazık için yapılan analiz sonucunda hesaplanan ve ölçülen değerlerin mükemmele yakın eşleştiği görülmektedir.

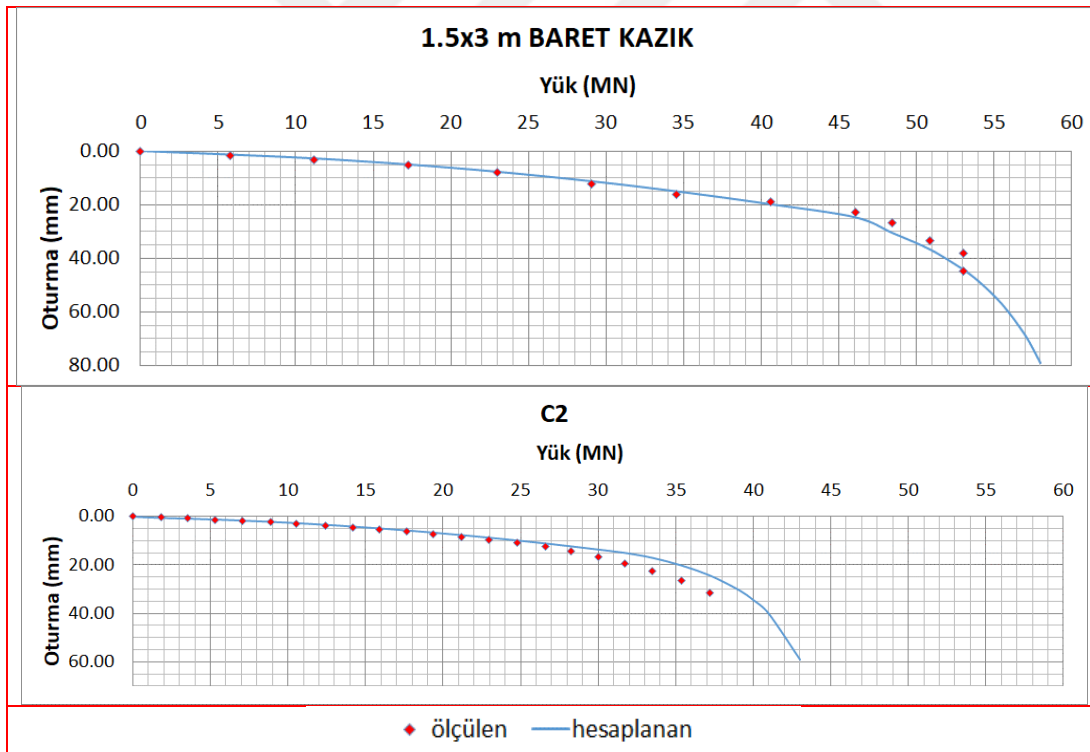


Şekil 6.11 : Ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması (TP3 ve TP4).

Yeni geliştirilen yöntemin incelenen 2 adet baret kazık (BTK ve YTK) üzerinde başarılı sonuç verdiği söylenemez. Bu yüzden iki farklı baret kazık üzerinde de yeni yöntem kullanılarak oturma analizi yapılmış ve yeni yöntemin baret kazıklar üzerindeki uygulanabilirliği kontrol edilmiştir. Oturma analizi yapılan baret kazıklardan birisi Rafa ve Moussai (2018) tarafından incelenen 1.5x3 m ebatlarında ve 57 m boyundaki baret kazıktır. Söz konusu baret kazık Bangkok'da bir gökdelen projesi kapsamında imal edilmiştir. Kazık boyunca geçilen zemin profili; üstte 13 m kalınlığında yumuşak kil tabakasından, bu tabakanın altında sırasıyla; 25 m derinliğe kadar katı kil tabakası, 34 m derinliğ kadar orta sıkı-sıkı kum tabakası, 51 m derinliğe kadar sert kil tabakası ve daha aşağı seviyelerde ise sıkı-çok sıkı kum tabakalarından oluşmaktadır. Zemin profilinden de anlaşılacağı üzere söz konusu baret kazık sürtünme kazığı olarak imal edilmiştir. 1.5x3 m ebatlı baret kazık üzerinde üstten yüklemeli statik yükleme deneyi yapılmış ve deney sonucunda baret kazığının toplam taşıma gücü (P_{tu}) değeri Alku ve Özkan (2006) yöntemi kullanılarak 65000 kN olarak elde edilmiştir. Yeni yöntem ile oturma analizi yapılan baret kazıklardan diğeri ise Lin

ve diğ. (2014) tarafından incelenen C2 numaralı baret kazıktır. Söz konusu baret kazık, 0.8x2.5 m ebatlarında ve 44 m boyunda Taipei şehrinde imal edilmiştir. Test sahası zemin profili, üstte 39 m kalınlığındaki kısım düşük plastisiteli kil ve siltli kum tabakalarının ardalanmasından oluşurken daha aşağı seviyelerde ise iyi derecelenmiş çakıl ve siltli çakıl tabakaları yer almaktadır. 0.8x2.5 m ebatlı baret kazık üzerinde üstten yüklemeli statik yükleme deneyi yapılmış ve deney sonucunda baret kazığın toplam taşıma gücü (P_{tu}) değeri Alku ve Özkan (2006) yöntemi kullanılarak 47600 kN olarak elde edilmiştir.

Yukarıda verilen parametreler kullanılarak baret kazıklar için yeni yöntem ile oturma analizleri yapıldı. Yapılan analizler sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri ile deney sırasında elde edilen yük-oturma grafikleri arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmüştür (Şekil 6.12). YTK ve BTK baret kazıklarında yapılan oturma analizlerinde ölçülen ve hesaplanan değerler arasında fark bir miktar fazla çıkmıştı ancak bu kazıklar için yeni yöntem analiz sonuçları oldukça iyi bir sonuç vermiştir.



Şekil 6.12 : Baret kazıklar için ölçülen ve hesaplanan yük-oturma grafiklerinin karşılaştırılması.

YTK ve BTK kazıklarının değerlendirilmesinde yeni yöntemin deney sonuçlarına göre farklı sonuç vermesinin sebebinin yöntemde yer alan yarıçap parametresi için baret kazıklarında eşdeğer çap hesaplarından elde edilen değer kullanılması olabileceği

belirtildi. Şekil 6.12'deki baret kazıklar için de aynı şekilde eşdeğer çap hesapları ile analizler yapılmış ve deney sonuçlarına oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Bu durumda YTK ve BTK baret kazıkları için yapılan oturma analizlerinin deney sonuçlarından farklı olmasının sebebinin bu kazıklardaki deney yönteminin Osterberg yükleme deney yöntemi ile yapılması olabilir. Bu deney yönteminde üstten yükleme analizi için yapılan yaklaşım ve göçme bölgesinin interpolasyon yöntemleri ile belirlenmesi, oturma analizi ile deney sonuçları arasında farkların oluşmasına neden olabilir.

Literatürden alınan test kazıkları üzerinde yeni hiperbolik yöntem ile yapılan oturma analizi sonuçları Çizelge 6.7'de özetlenmiştir. Çizelge 6.7'de literatürden incelenen test kazıklarının boy/çap oranları ile kiritik yüklere karşılık gelen ölçülen-hesaplanan oturma değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.7 : Deney sırasında ölçülen ve yeni yöntem ile hesaplanan oturma değerlerinin karşılaştırılması.

	He (2002)			TK13			TK-14		
Boy/Çap (L/D)	59.5			9.09			41.5		
Uygulanan Yük (MN)	2.7	4.9	7	1.6	3.2	5.6	1	2	3
Yeni Yöntem (mm)	3.30	8.18	14.97	3.43	10.42	35.56	1.86	5.27	10.43
Ölçülen (mm)	4.24	8.96	18.41	2.27	8.52	22.24	1.9	3.59	7.43
Yüzde Fark (%)	22.2	8.71	18.69	51.10	22.30	59.89	2.11	46.80	40.38
	TK-18			Hirayama (1990)			TP3		
Boy/Çap (L/D)	20			29.3			11.1		
Uygulanan Yük (MN)	2.06	3.44	4.81	5	10	15	1.2	2.4	3.6
Yeni Yöntem (mm)	2.91	6.66	11.92	4.25	12.54	24.86	2.20	6.67	13.69
Ölçülen (mm)	2.87	6.38	10.67	3.64	11.69	28.13	4.55	7.84	20.35
Yüzde Fark (%)	1.39	4.389	11.72	16.76	7.27	11.62	51.65	14.92	32.73
	TP4			1.5x3m			C2 (0.8x2.5m)		
Boy/Çap (L/D)	16.7			47.6			55.1		
Uygulanan Yük (MN)	2.4	4.8	8	17.3	34.5	50.9	10.5	21.2	30
Yeni Yöntem (mm)	2.78	8.54	22.73	5.03	15.07	36.83	3.02	7.60	13.58
Ölçülen (mm)	4.30	7.71	26.8	5.06	16.15	33.27	2.64	8.50	16.77
Yüzde Fark (%)	35.3	10.77	15.19	0.59	6.69	10.70	14.39	10.59	19.02

Çizelge 6.7 incelendiğinde Çizelge 6.4'ten elde edilen sonuçlar ile paralellik olduğu söylenebilir. Kazık çap/boy oranlarının 30-60 arasında kalması durumunda yeni yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen değerlerin ölçülen değerlere daha yakın çıktığı söylenebilir. Buradaki tek istisna olarak TK-18 numaralı kazık gösterilebilir. TK-18 numaralı kazıkta boy/çap oranı 20 olmasına rağmen

ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. TP3 ve TP4 numaralı kazıklar değerlendirildiğinde boy/çap oranı daha yüksek olan TP4 numaralı kazıkta hesaplanan oturma değerleri ile ölçülen değerler arasındaki yüzdesel fark, TP3 numaralı kazıktakine göre daha az çıkmıştır.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doktora tez çalışması kapsamında betonarme fore kazıkların eksenel yük altındaki oturma davranışı incelenmiştir. Farklı yöntemler ile yapılan oturma analizleri ile deneylerden elde edilen veriler karşılaştırıldı. Alku ve Özkan (2006) tarafından yapılan çalışma esas alınarak sürtünme kazıklarında geçerli olmak üzere yeni bir kazık oturma analizi yöntemi geliştirildi. Bu çalışmada betonarme dairesel fore kazıklar ve dikdörtgen kesitli fore kazıklar (baret kazıklar) incelenmiştir. Çelik ve ahşap gibi betondan farklı malzemedeki kazıkların oturma davranışı betonarme kazıklardan farklı olacağı için yeni geliştirilen yöntemin bu kazıklarda geçerli olmadığı söylenebilir. Ayrıca betonarme çakma kazıklar da bu tez kapsamında incelenmediği için yeni yöntemin bu kazıklar için de kullanılması durumunda gerçeğe uzak sonuçlar elde edilebilir. Özet olarak yeni geliştirilen yöntem, ülkemizde en yaygın olarak uygulanan betonarme fore kazıklar (yerinde dökme kazıklar) için uygulanabilir.

Yeni yöntemin oluşturulması için incelenen 14 farklı kazık yükleme deneyinde dairesel fore kazık çapları 60 cm ile 200 cm arasında değişirken baret kazıklar ise 280x100 cm ve 280x120 cm ebatlarındadır. Yeni yöntemin sağlaması için incelenen dairesel fore kazık çapları 65 cm ile 165 cm arasında değişirken baret kazıklar ise 150x300 cm ve 80x250 cm ebatlarındadır. Hem büyük çaplı hem de normal çaplı fore kazıklar üzerinde oturma analizleri yapılmıştır.

7.1 Literatür Çalışmaları

Tez kapsamında incelenen fore kazıklar için 4 farklı yük-transfer yöntemi ve 2 farklı elastik teorisine dayanan yöntem ile oturma analizleri yapılmıştır. Yük-transfer yöntemleri genel olarak güncel yöntemlerden seçilirken hesap yapılan elastik yöntemler ise yaygın olarak kullanılan Davis ve Poulos (1968) ve Randolph ve Wroth (1978) tarafından geliştirilen kazık oturma analiz yöntemleridir. Literatür çalışmaları kapsamında incelenen yöntemlerden 6 tanesi ile yapılan oturma analizleri sonucunda aşağıda listelenen sonuçlar elde edilmiştir.

- İskenderun test kazıklarında elastik ve göçme bölgeleri beraber değerlendirildiğinde deney sonuçlarına en yakın sonuçlar Fleming (1992) yöntemi ile elde edilmiştir.
- Basra test kazıklarında ise deney sonuçlarına ortalama olarak en yakın sonuçlar, Boonyatee ve Lai (2017) tarafından geliştirilen yöntem ile elde edilmiştir. Söz konusu yöntem ile İskenderun test kazıkları için de ölçülen değerlere yakın sonuçlar elde edilirken büyük boyutlu test kazıklarında (BTK, YTK, BOTK-1-2) deneyde elde edilen oturma değerleri ile arasında büyük farklar çıkmıştır.
- Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan oturma değerleri, İskenderun ve Basra test kazıklarında genel olarak diğer yöntemler ile elde edilen değerlerden ve ölçülen değerlerden farklı çıkmıştır. Ancak Bakü test kazıklarında elastik ve göçme bölgeleri beraber değerlendirildiğinde ölçülen değerlere en yakın sonuçlar bu yöntem ile hesaplanmıştır.
- Zhang ve diğ. (2016) ile Boonyatee ve Lai (2017) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar genel olarak birbirine yakın çıkmıştır. Ancak kazığın göçme bölgelerinde iki yöntem ile elde edilen değerler arasında farklar vardır.
- Elastik teorisine dayanan ve yaygın olarak kullanılan Poulos ve Davis (1968) ve Randolph ve Wroth (1978) yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafikleri, yük-oturma değerleri arasında genel olarak lineer bir ilişki sunmaktadır. Bu yüzden bu yöntemler ile yapılan hesaplarda kazığın plastik davranışı doğru bir şekilde modellenememektedir. Ancak kazıkların tasarım yükünde ve tasarım yükünün 2 katı olan yüklerde bu yöntemler kullanılarak genel olarak ölçülen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- İskenderun ve Bakü test kazıkları ile BATK ve YTK kazıklarında Poulos ve Davis (1968) ile Randolph ve Wroth (1978) yöntemlerinden elde edilen oturma değerlerinin genel olarak birbirine yakın çıktığı söylenebilir.

7.2 Yeni Yöntem Çalışması

Yeni yöntemde, Alku ve Özkan (2006) tarafından geliştirilen kazık yükleme deneyi değerlendirme yönteminde kullanılan yük-oturma ilişkisini tanımlayan iki adet hiperbolik fonksiyon baz alınmıştır. Bu fonksiyonlardaki katsayılar ile kazık

parametreleri (kazık çapı, kazık boyu, kazık toplam taşıma gücü değeri) ilişkilendirilerek yeni bir oturma analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemin diğer incelenen yöntemlerden farkı zemin deformasyon parametrelerine (zemin elastisite modülü ve zemin kayma modülü) bağlı kalmadan kazık toplam taşıma gücü değerini esas alarak sürtünme kazıkları için oturma tahmini yapmasıdır. Literatür çalışmasında incelenen yöntemler, kazık ucundaki ve çevresindeki zeminin deformasyon parametreleri ile hesap yapabildiği için bu yöntemler hem uç kazıkları hem de sürtünme kazıkları için geçerlidir. Bu tez çalışmasında ise belirlenmesi güç olan zemin deformasyon parametrelerine bağlı kalınmadan sürtünme kazıkları için yeni bir kazık oturma analizi yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Yeni yöntemin parametre ve katsayıları belirlemek için 14 farklı kazık yükleme deneyi incelenmiş ve her deneyin Alkuve Özkan (2006) yöntemi ile değerlendirmesi yapılarak fonksiyon parametreleri (a_1, a_2, b_1 ve b_2) hesaplanmıştır. Ardından her bir parametre için bir bağıntı oluşturulmuş ve bu bağıntılarda yer alan c_1, c_2 ve d katsayıları, 14 farklı test kazığı için hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Belirlenen katsayı ve bağıntılar ile incelenen bütün test kazıkları için yöntem parametreleri hesaplandı. Hesaplanan c_1, c_2 ve d katsayılar arasında genel olarak büyük farklar oluşmamıştır. Katsayı hesaplarında deneylerden elde edilen en büyük ve en küçük değerler diğer değerlerden çok farklı olduğu için ortalama hesaplarına katılmamıştır. Ardından katsayıların ağırlıklı ortalaması alınarak yöntemin c_1, c_2 ve d katsayıları sırasıyla 0.28, 0.005 ve 132.6891 olarak belirlenmiştir. b_1 ve b_2 parametreleri, kazığın göçme bölgesindeki oturma değerlerini önemli ölçüde etkilediği için belirlenen d katsayısının hassasiyeti, hesaplanan oturma değerlerinin incelenen deney sonuçlarına en yakın olacak şekilde ayarlanmıştır. Yöntemde kullanılan hiperbolik fonksiyonlara hesaplanan değerler işlenerek her bir test kazığının yük-oturma ilişkisi geliştirilen yeni yöntem ile oluşturuldu. Yeni yöntem ile hesaplanan oturma değerleri, deneylerde ölçülen değerler ile ve incelenen yük-transfer yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda aşağıda listelenen sonuçlar elde edilmiştir:

- Dairesel fore kazıklar üzerinde yeni yöntem ile yapılan oturma analizlerinin baret kazıklardakine kıyasla deney sonuçlarına daha yakın elde edildiği söylenebilir. BTK test kazığının oturma davranışı deney sonuçlarına göre uygun bir şekilde modellenemese de özellikle kazığın plastik davranış

gösterdiği bölgede hesaplanan değerlerin, deneyden ölçülen değerlere yakın elde edildiği söylenebilir. Diğer yandan deneyin sağlaması için iki adet baret kazık üzerinde yeni yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda ölçülen oturma değerlerine oldukça yakın değerler hesaplanmıştır. Bu yüzden yöntemin sürtnme kazığı olarak tasarlanan baret kazıklar için de uygun olduğu söylenebilir.

- İskenderun test kazıklarında yeni yöntem ile yapılan analizler sonucunda hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasında iyi bir eşleşme olduğu görülmüştür.
- Basra test kazıklarından BETK-1, BETK-2 ve BETK-3 kazıklarında söz konusu yeni yöntem ile hesaplanan ve deneyde ölçülen değerler birbirine yakın elde edilirken BETK-4 numaralı kazıkta hem elastik bölgede hem de kazığın göçme bölgesinde yeni yöntem ile deney sonuçlarına oldukça uzak oturma değeleri elde edilmiştir. Ancak BETK-4 numaralı kazıkta 2-4 MN yükleri arasında kalan bölge hem yeni yöntem, hem de incelenen diğer yük-transfer yöntemleri ile elde edilen değerler deney sonuçlarından oldukça farklı çıkmıştır. Bunun nedeni, bu değerler arasındaki kısımda ölçüm hatasından kaynaklanmış olabilir. BETK-4 numaralı kazığın göçme bölgesindeki davranışı ise Boonyatee ve Lai (2017), Zhang ve diğ. (2016) ve Bohn ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntemler ile deney sonucuna yakın bir şekilde modellenmiştir.
- Bakü test kazıklarının ikisinde de yeni yöntem ile yapılan oturma analizi sonucunda hesaplanan yük-oturma grafikleri ile Osterberg yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri arasında mükemmele yakın bir eşleşme olduğu söylenebilir.
- Aliğa ve Bağdat test kazıklarında da yeni yöntem ile yapılan oturma analizleri ile hesaplanan yük-oturma grafiklerinin hem elastik hem göçme bölgesinde deneylerden elde edilen grafiklerle örtüştüğü görülmüştür.
- İncelenen 14 farklı kazık yükleme deney verileri ile yeni yöntem oturma analizi ile yapılan hesaplar ile genel olarak örtüştüğü söylenebilir. Elde edilen bu sonuçlara göre yeni yöntemin hem büyük çaplı kazıkların (BOTK-1) hem

de normal çaplı kazıkların (BETK-3, İTKS-1) oturma analizleri için uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Geliştirilen yeni hiperbolik yöntem 14 adet kazık yükleme deney datası incelenerek oluşturulduğu için yeni yöntemin sağlaması literatürden başka deney verileri ile de yapılmıştır. Literatürden seçilen 7 adet dairesel kesitli fore kazık ve 2 adet baret kazık üzerinde yeni yöntem ile oturma analizleri yapılmış ve yapılan analizler deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yeni yöntemin sağlaması için incelenen dairesel fore kazık çapları 65 cm ile 165 cm arasında değişirken baret kazıklar ise 150x300 cm ve 80x250 cm ebatlarındadır. Bütün incelenen kazıklarda yeni yöntem ile yapılan oturma analizleri sonucunda, ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine oldukça yakın elde edilmiş ve ölçülen ile hesaplanan yük-oturma grafikleri arasında genel olarak iyi bir eşleşme olduğu grlmştir. İncelenen bütün kazıklardan elde edilen sonuçlar birbirleri ile boy/çap oranlarına göre de değerlendirilmiştir. Kritik yüklere karşılık gelen hesaplanan ve ölçülen oturma değerlerinin arasındaki yüzdesel farklar kazık boy/çap oranının 30 ile 60 değerleri arasında olduğu durumlarda daha az çıkmıştır. Kazık boy/çap oranının 30 ile 60 arasında olması durumunda yeni hiperbolik yöntemden elde edilen sonuçların daha uygun olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak tekil sürtünme kazıklarının oturma analizi için geliştirilen yeni hiperbolik yöntemin normal (60-100cm) ve büyük çaplı (120-200cm) betonarme fore kazıklar üzerinde uygulanabilir olduğu söylenebilir. Yeni geliştirilen yöntemin incelenen diğer yük-transfer yöntemlerinden farkı uygulama alanının daha az kapsamlı olması ancak diğer yandan diğer yöntemlere göre uygulamasının daha pratik olmasıdır. Zemin birimleri oldukça heterojen bir yapıya sahipken diğer yöntemler bu birimler için deformasyon parametreleri belirleyerek hesaplar yapmaktadır ancak zemin kayma modülü ve elastisite modülünü doğru bir şekilde belirlemek oldukça güçtür. Bu yöntemin avantajı bu değerlere bağlı kalmadan sürtünme kazıkları için sabit deformasyon parametrelerini kazık boyutuna ve kazık toplam taşıma gücü değerine bağlayarak oturma analizi yapılmasına olanak sağlamasıdır. Dezavantajı ise bütün kazık ve zemin tipleri için geçerliliği olmamasıdır. Diğer yük-transfer yöntemlerine alternatif olarak betonarme fore kazık oturma analizini kontrol etmek amacı ile pratik ve uygulanabilir bir yöntemdir.



KAYNAKLAR

- Alku, Y. & Ozkan, M. T.** (2006). *Kazık yükleme deneyleri ile nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi üzerine bir çalışma* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASTM** (2007). *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Loads* (ASTM D1143-07).
- Birand, A. A.** (2007). *Kazıklı Temeller*. Ankara, Türkiye: Teknik Yayınevi.
- Bowles, J. E.** (1997). *Foundation Analysis and Design*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Bohn, C., Lopes A. & Frank, L.** (2016). Development of axial pile load transfer curves based on instrumented load tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143 (1), 1-15.
- Boonyatee, T. & Lai, Q. V.** (2017). A non-linear load transfer method for determining the settlement of piles under vertical loading. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14 (2), 206-217.
- Canakci, H. & Hamed, M.** (2017). Experimental study on axial response of different pile materials in organic soil. *Geomechanics and Engineering*, 12 (6), 899-917.
- Chin, F. K.** (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles from Tests Not Carried to Failure, *Proceedings of the 2nd SE Asian Conference of Soil Engineering*, Singapore, 81-92.
- Chin, F. K.** (1972). The Inverse Slope As a Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Piles, *Proceedings of the 3rd SE Asian Conference of Soil Engineering*, Singapore, 83-91.
- Coyle, H. M. & Reese, R. C.** (1966). Load transfer for axially loaded piles in clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE 92 (2), 1-26.
- Davies, R. V. & Chan, A. K. C.** (1981). Pile design in Hong Kong. *Hong Kong Engineering*, 9 (3), 21-28.
- Decourt, L.** (1999). Behaviour of foundations under working load conditions. *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical engineering*, 4, (s.453-488).
- Dinç, H.** (2010). *Osterberg hücresi ile kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dong, J. R., Lin, S. T. & Dai, Y. M.** (1994). The load-transfer behavior of large diameter cast-in-situ pile in crushed pebble stratum. *Chinese Journal of the Geotechnical Engineering*, 16 (6), 123-131.

- Düzceer, İ.R.** (2002). *Kazık yükleme deneyleri ile nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi üzerine bir çalışma* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fellenius, B. H.** (2001). From strain measurements to load in an instrumented pile. *Geotechnical News Magazine*, 19 (1), 35-38.
- Fellenius, B. H.** (1989). The tangent modulus of piles determined from strain data. F. H. Kulhawy (Editör), *Proceedings of the 1989 Foundation Engineering Congress*, 1, (s.500-510). New York : American Society of Civil Engineers.
- Fellenius, B. H.** (2004). Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis. *Proceedings of Contributions in Honor of George G. Gobel*, (s.253-275). New York : American Society of Civil Engineers.
- FHWA. Khyfor, G .Z., Schnore, A. R., Carlo, T. A. ve Baily, P. F.** (1992). Static testing of deep foundations (No. FHWA-SA-91-042). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- FHWA. Samtani, N. C. ve Nowatzki, E. A.** (2006). Soils and foundation reference manual – volume II (No. FHWA-NHI-06-089). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Fleming, W. G. K.** (1992). A new method for single pile settlement prediction and analysis. *Geotechnique*, 42 (3), 411-425.
- Fuller, F. M. & Hoy, H. E.** (1970). Pile load tests including quick load test method, conventional methods, and interpretations. *Highway Research Record No.333*, 78-89.
- Hayes, J. & Simmonds, T.** (2002). Interpreting Strain Measurements From Load Tests In Bored Piles, *Proceedings of the Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations*, (No.1047). Nice, France.
- Hirayama, H.** (1990). Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. *Soils and Foundations*, 30 (1), 55-64.
- ICE** (2007). *Specification for Piling and Embedded Retaining Walls, 2nd Edition*. Thomas Telford Ltd., London.
- Khan, A. A., Cook, W. D. & Mitchell, D.** (1995). Early age compressive stress-strain properties of low, medium, and high strength concretes. *ACI Materials Journal*, 92 (6), 617.
- Lee, K. M. & Xiao, Z. R.** (2001). A simplified method for non-linear analysis of single piles in multilayered soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (5), 1063-1080.
- Lin, S. S., Lu, F. C., Kuo, C. J., Su, T. W. & Mulowayi, E.** (2014). Axial capacity of barrette piles embedded in gravel layer. *Journal of Geoengineering*, 9 (3), 103-107.
- LOADTEST** (2013). Data Report: HTP-01 – Crescent Hotel, Baku (Report No:FLT20061-1). Unpublished Report.

- Mert, M. & Ozkan, M. T.** (2017). Aletsel Statik Kazık Yükleme Deneyi ile Dinamik Kazık Yükleme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması, *3rd International Soil-Structure Interaction Symposium*, İzmir, Türkiye: Ekim 18-19.
- Mert, M. & Ozkan, M. T.** (2019). Settlement Analysis of Axially Loaded Bored Piles: A Case History, *International Research Conference*, New York, USA: June 4-5.
- Mert, M. & Ozkan, M. T.** (2020). A new hyperbolic variation method for settlement analysis of axially loaded single friction piles. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (794).
- Oluokun, F. A., Burdette, E. G. & Deathrage, H. J.** (1991). Elastic modulus, Poisson's ratio and, compressive strength relationships at early ages. *ACI Materials Journal*, 88, 3.
- O'Neill, M. W., Hawkins, R. A. & Mahar L. J.** (1994). Load transfer mechanisms in piles and pile groups. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 108 (12), 1605-1623.
- Osterberg, J. O.** (1998). The Osterberg Load Test Method for Bored and Driven Piles – The First Ten Years, *Proceedings of the 7th International Conference Exhibition Piling and Deep Foundations*. Deep Foundation Institute, Vienna, Austria.
- Poulos, H. G. & Davis, E. H.** (1968). The settlement behavior of single axially-loaded incompressible piles and piers. *Geotechnique*, 18 (3), 351-371.
- Poulos, H. G.** (1972). Load-settlement prediction for piles and piers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98 (SM9), 879-898.
- Poulos, H.G & Davis, E. H.** (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. Canada: Rainbow-Bridge Book Co.
- Rafa, S. A. & Moussai, B.** (2018). Three dimensional analysis of bored pile and barrette load tests subjected to vertical loadings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 55 (3), 146-152.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P.** (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 104 (GT12), 1468-1488.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P.** (1979). An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Geotechnique*, 29 (4), 423-439.
- Randolph, M. F. & Wroth, C. P.** (1982). Recent developments in understanding the axial capacity of piles in clay. *Ground Engineering*, 15 (7).
- Rao, Kamesvara N. S. V.** (2011). *Foundation Design Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Seed, H. & Reese L.** (1957). The action of soft clay along friction piles. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 122 (1), 731-754.
- Tomlinson, M. & Woodward, J.** (2007). *Pile Design and Construction Practice*. London, UK: Taylor&Francis.

- Vallabhan, C. V. G. & Das, Y. C.** (1988). A parametric study of beams on elastic foundations. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 114 (12), 2072-2082.
- Vallabhan, C. V. G. & Mustafa, G.** (1996). A new model for the analysis of settlement of drilled piers. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 20 (2), 143-152.
- Wang, Z., Xie X. & Wang, J.** (2012). A new non-linear method for vertical settlement prediction of a single pile and pile groups in layered soils. *Computers and Geotechnics*, 45, 118-126.
- Xia, Z. & Zou, J.** (2017). Simplified approach for settlement analysis of vertically loaded pile. *Journal of Engineering Mechanics*, 143 (11).
- Zhao, B., Wang, X., Yang, M., Liu D., Liu, D. & Sun, S.** (2020). Experimental study on static load of large diameter bored piles in nonuniform gravel soil. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- Zhang, Q. Q., Liu, S. W., Zhang, S., Zhang J. & Wang, K.** (2016). Simplified non-linear approaches for response of a single pile and pile groups considering progressive deformation of pile-soil system. *Soils and Foundations*, 56 (3), 473-484.
- Zhang, Q. Q. & Zhang, Z. M.** (2012). A simplified non-linear approach for single pile settlement analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (11), 1256-1266.

EKLER

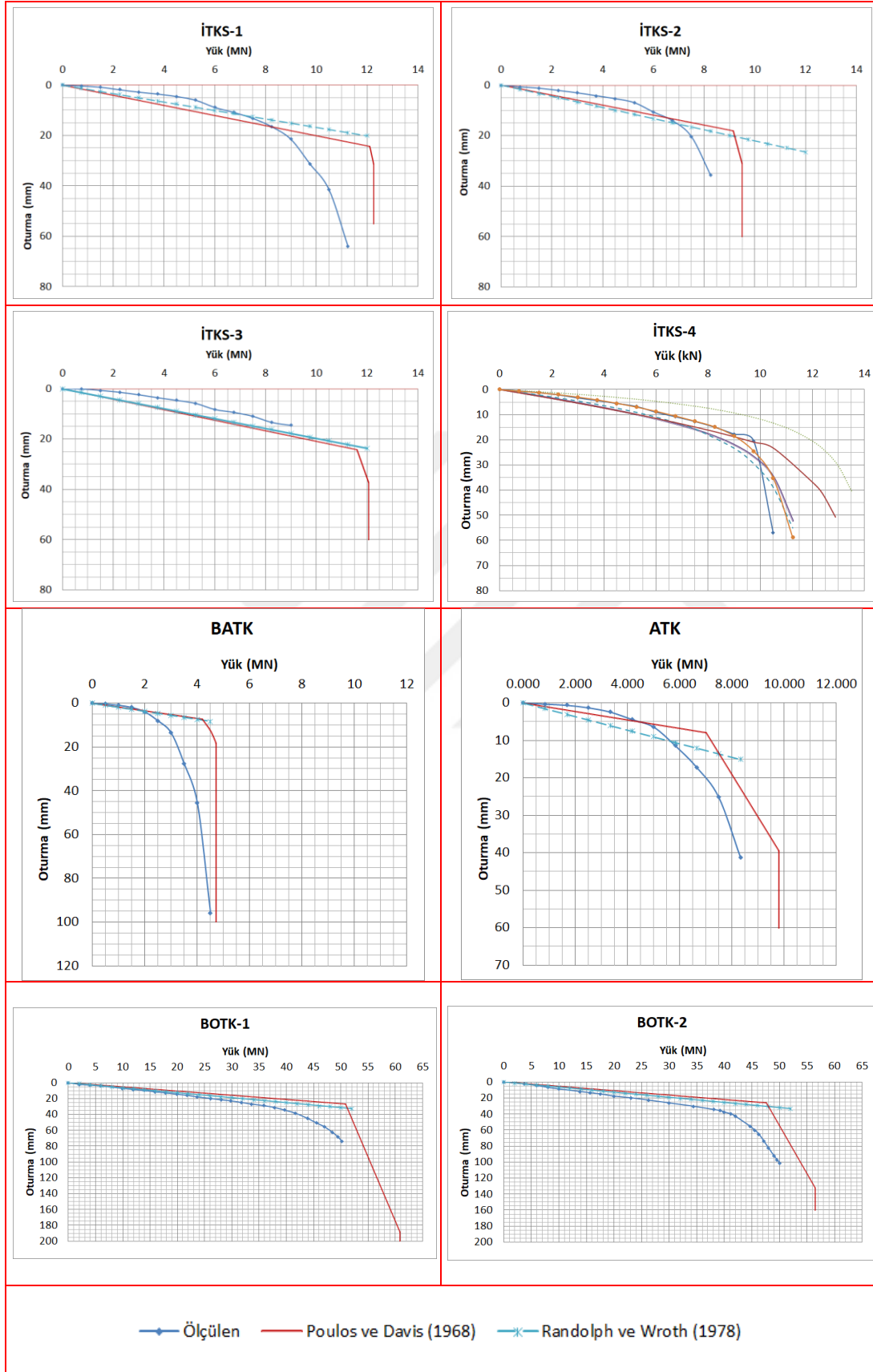
EK A: Elastik teori yöntemleri ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri

EK B: Yük-transfer yöntemleri ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri

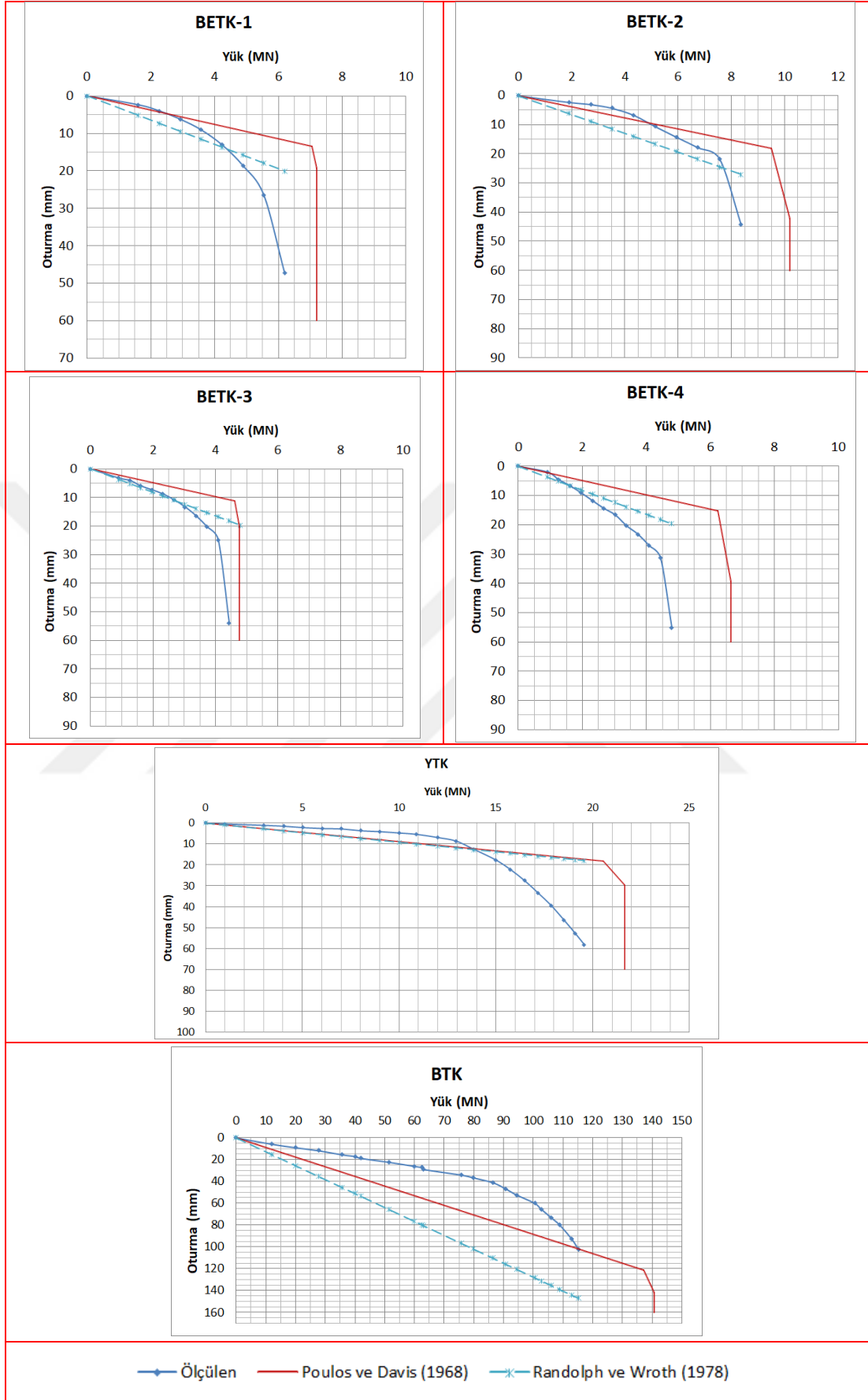
EK C: Alku-Özkan (2006) yöntemi kullanılarak elde edilen yöntem parametreleri



EK A Elastik teori yöntemleri ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri

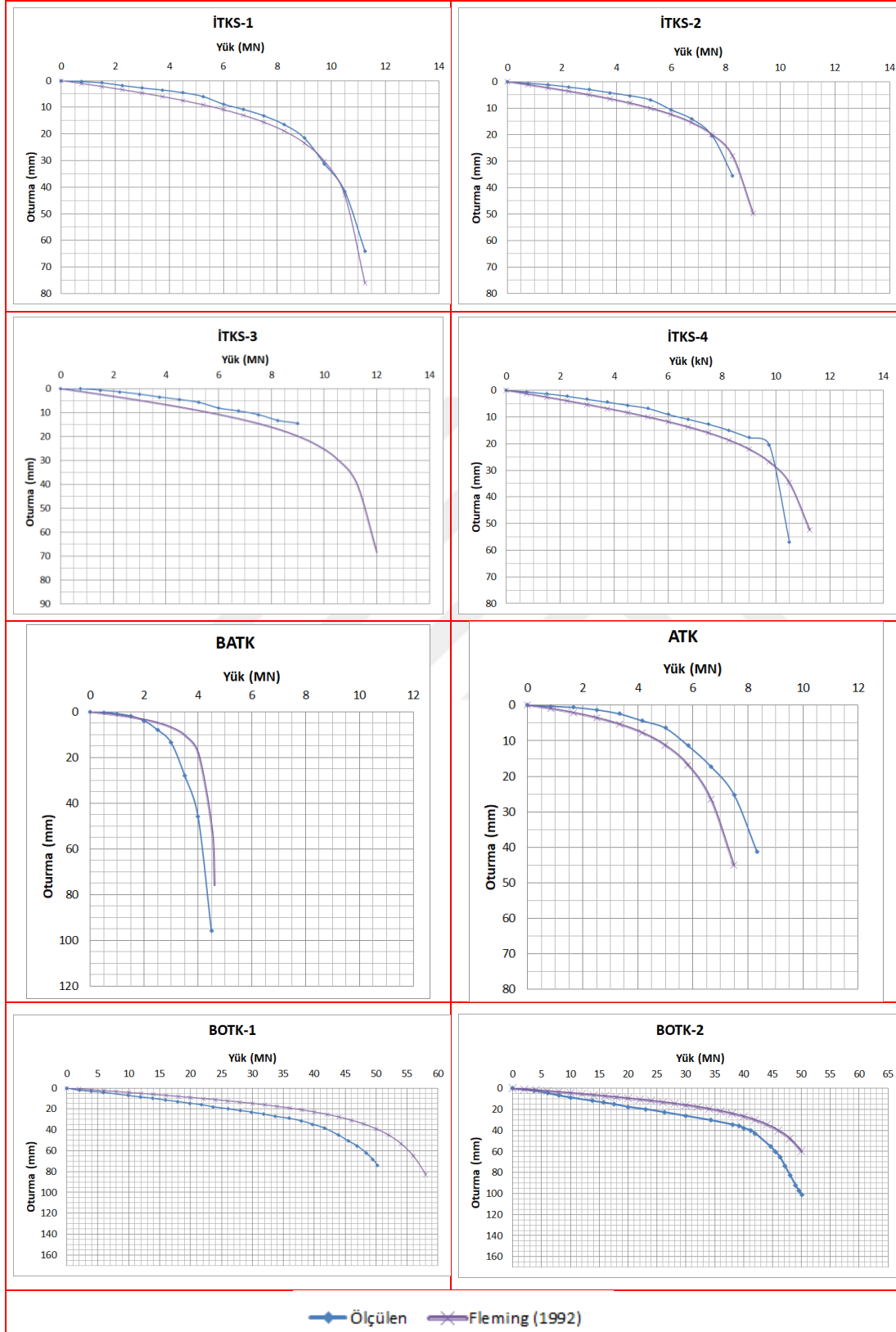


Şekil A.1 : Elastik teori yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafikleri.

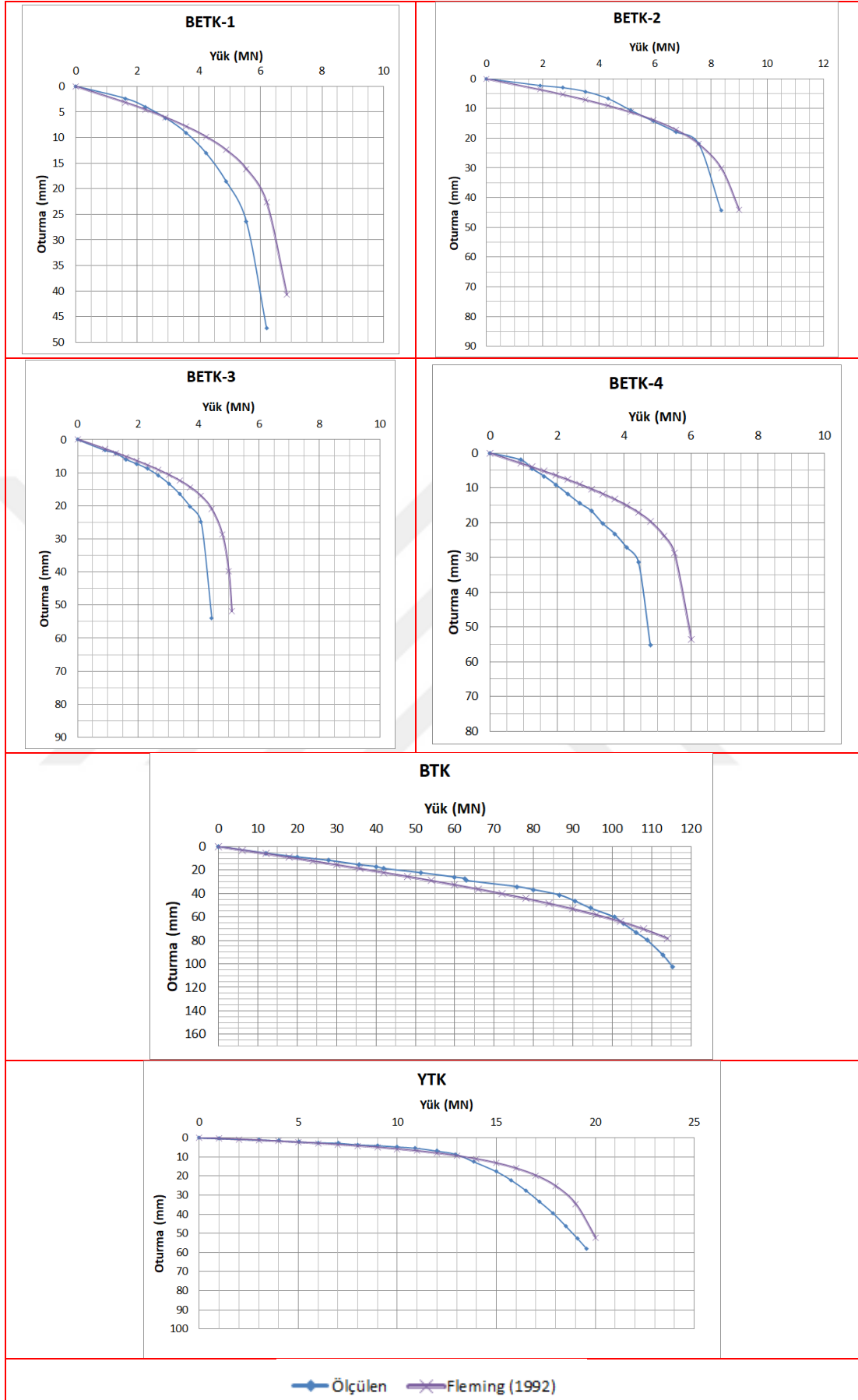


Şekil A.2 : Elastik teori yöntemleri ile elde edilen yük-oturma grafikleri.

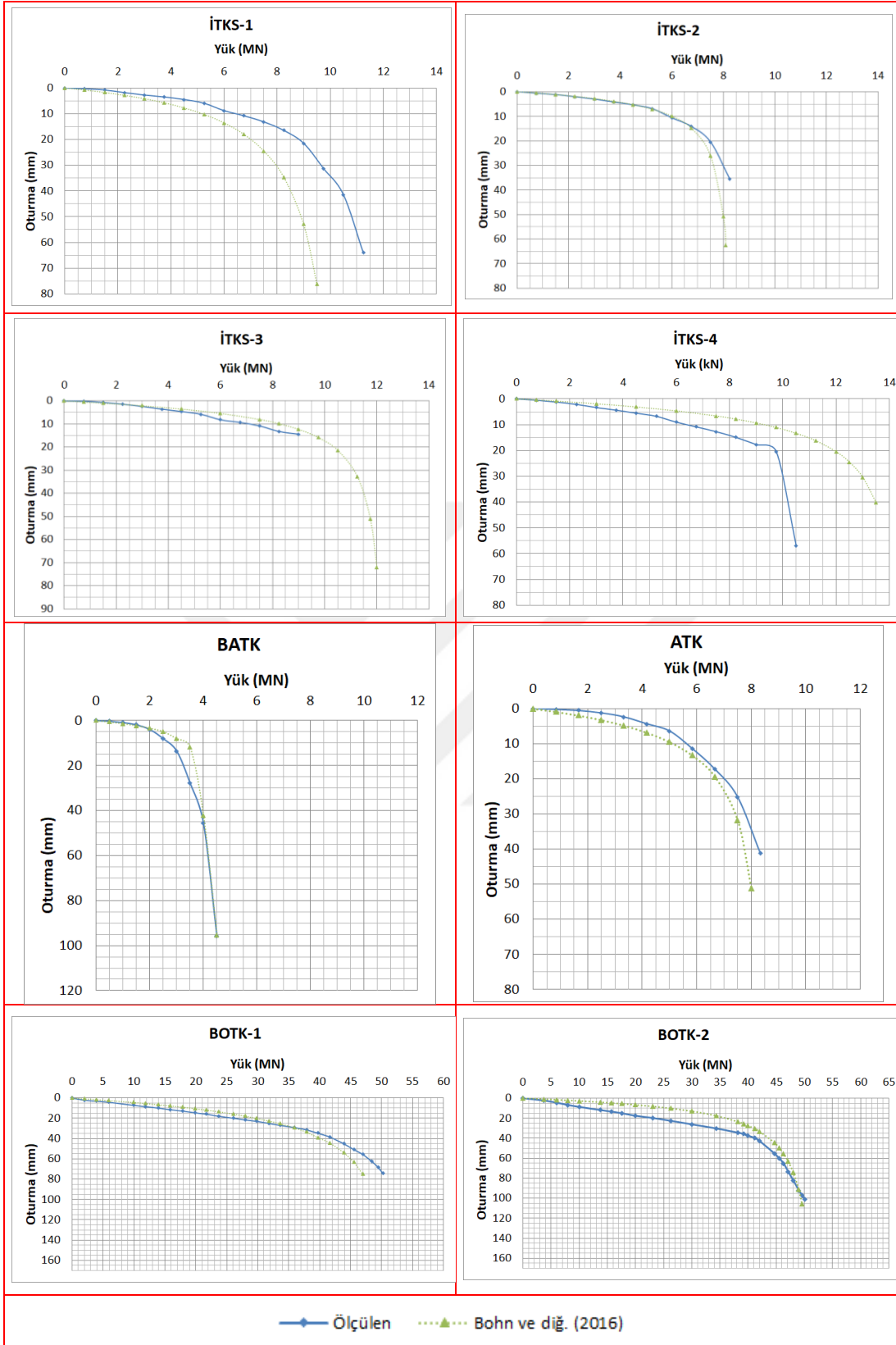
EK B Yük-transfer yöntemleri ile yapılan oturma analizleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri



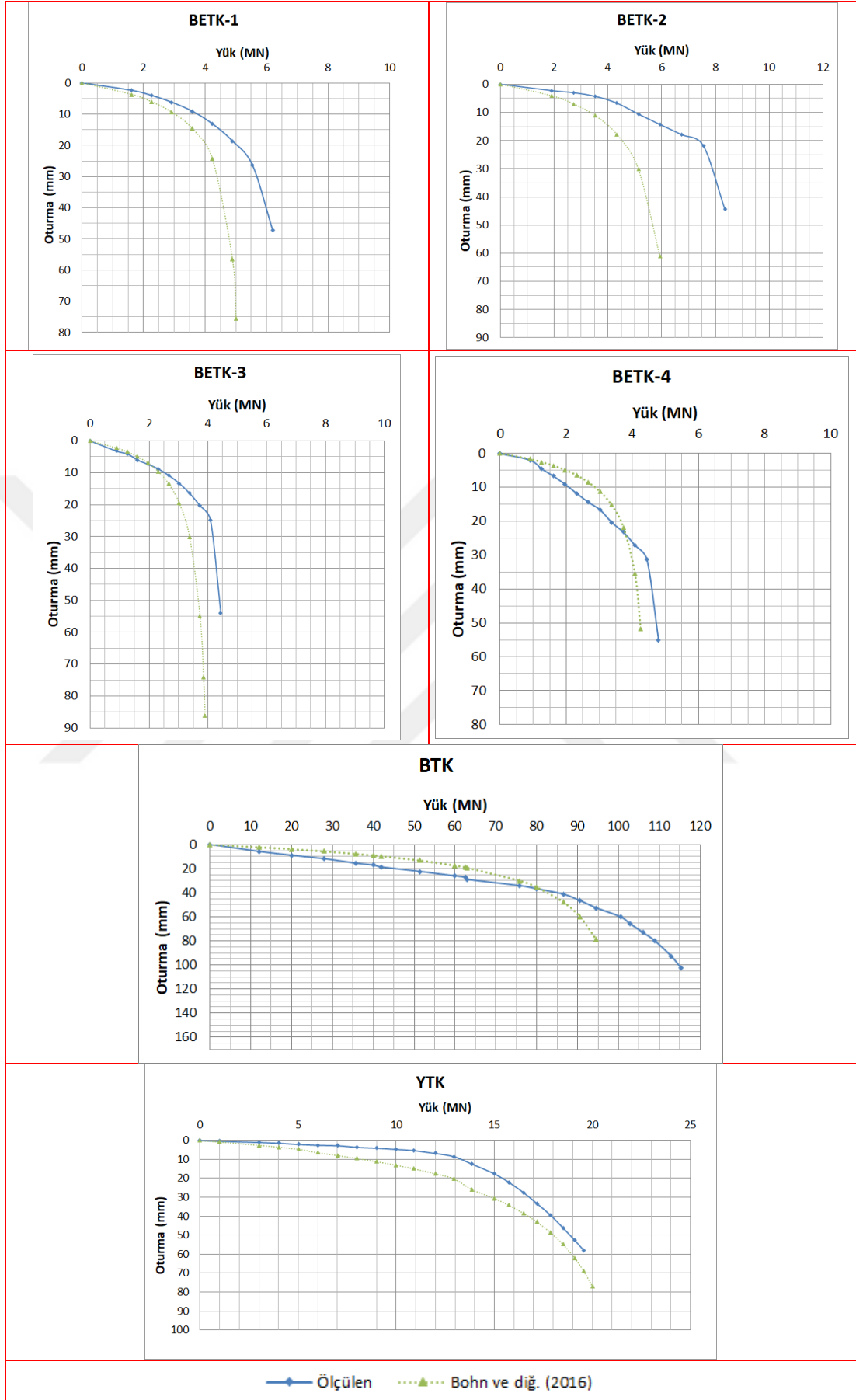
Şekil B.1 : Fleming (1992) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.



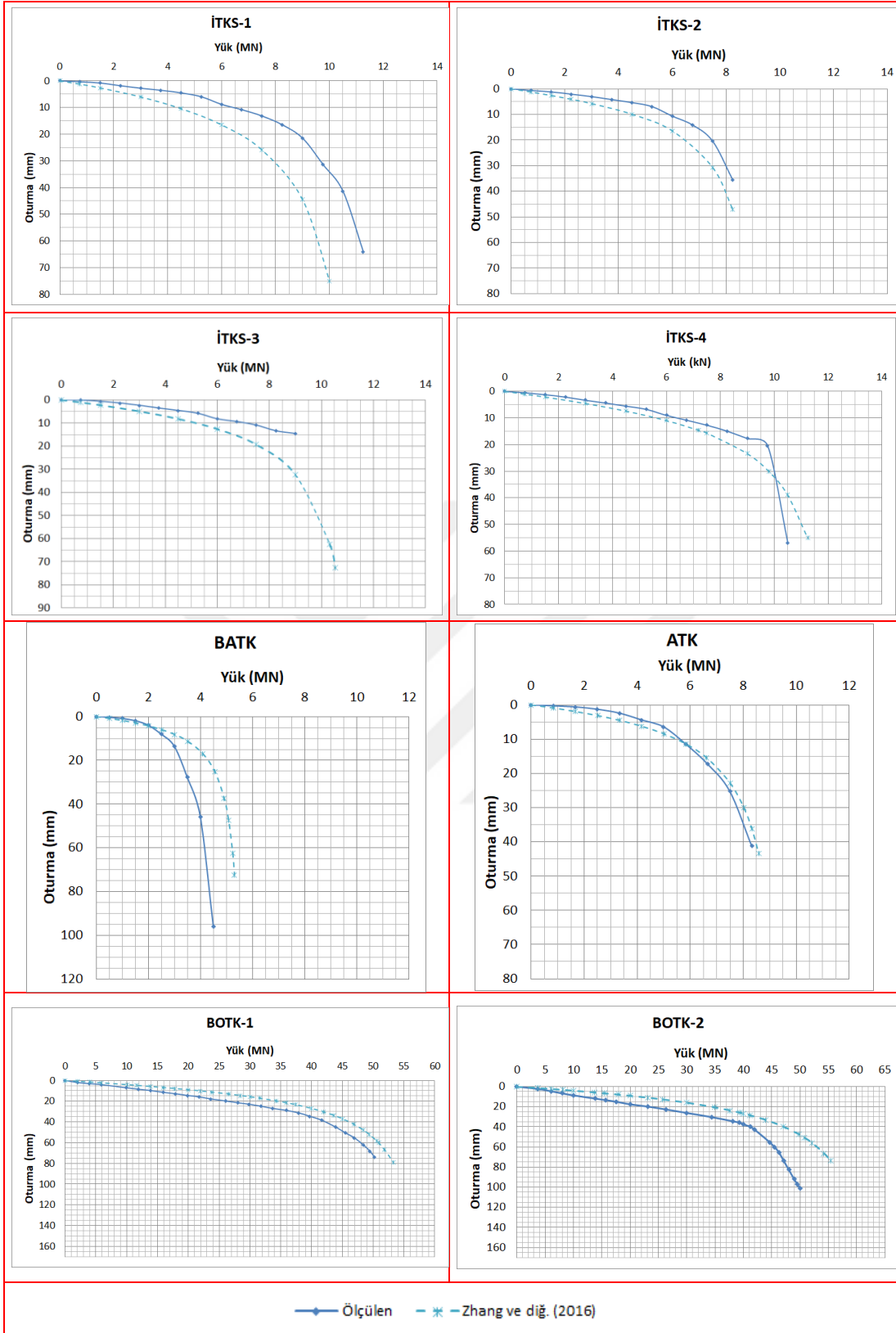
Şekil B.2 : Fleming (1992) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.



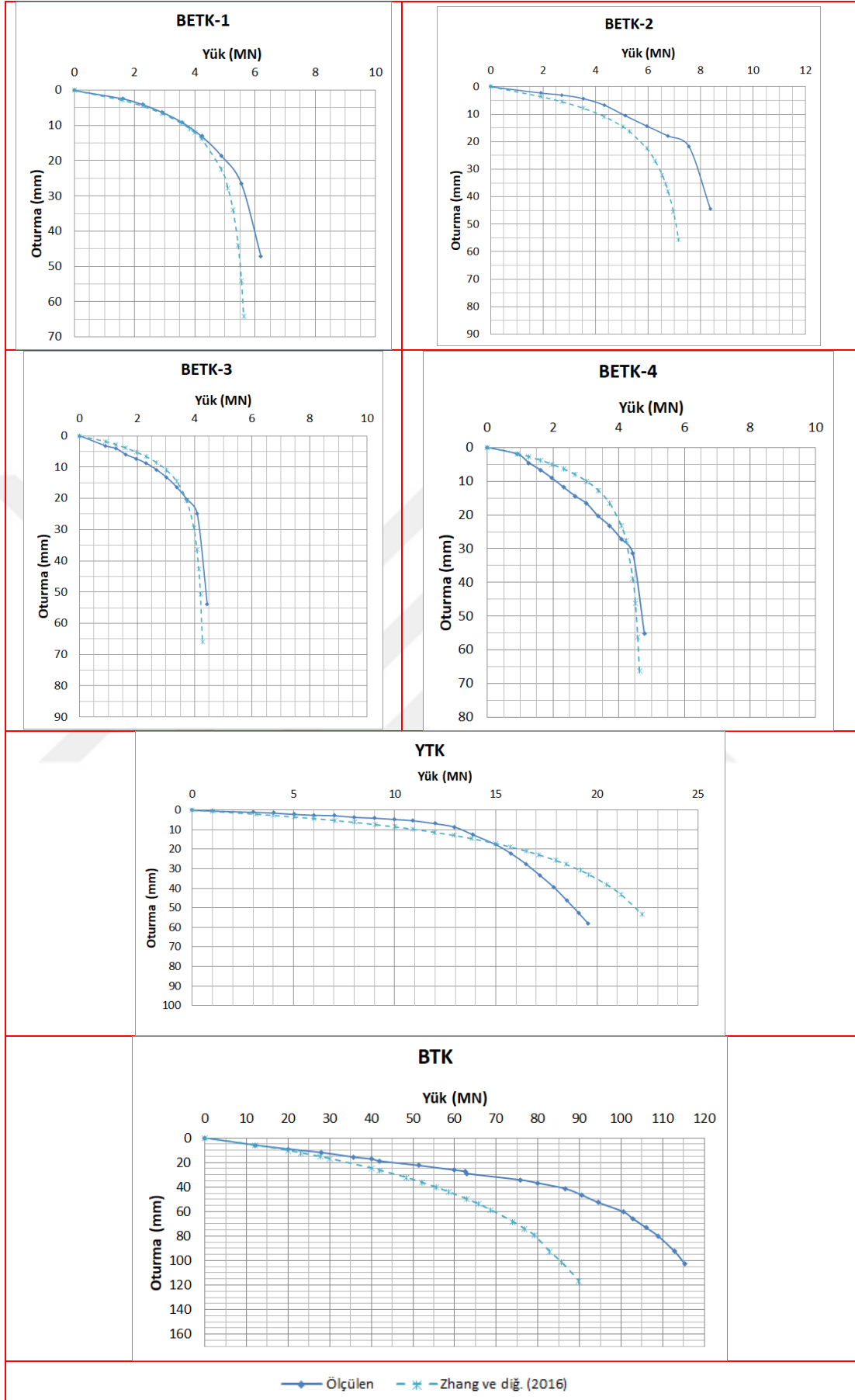
Şekil B.3 : Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.



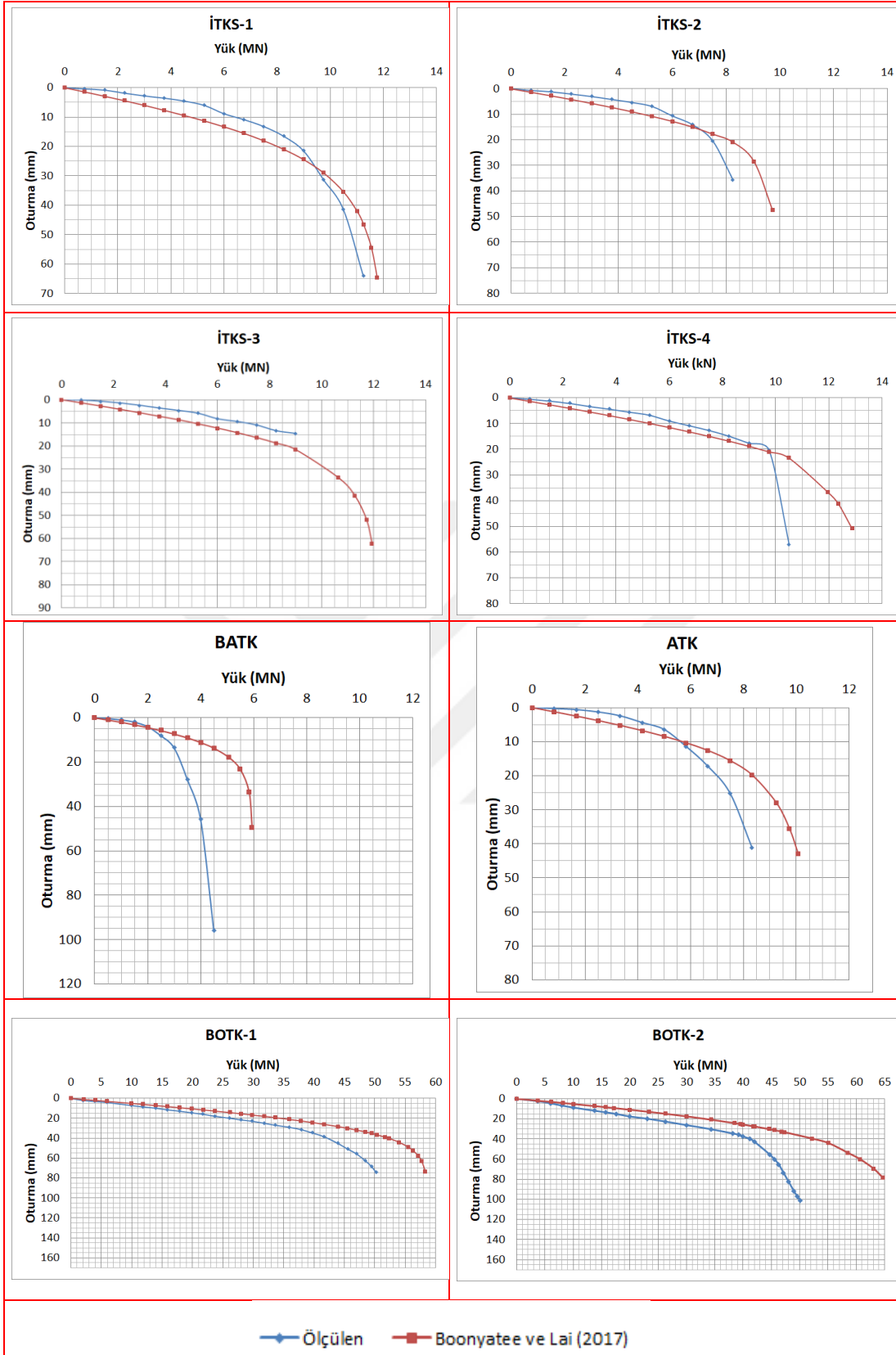
Şekil B.4 : Bohn ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.



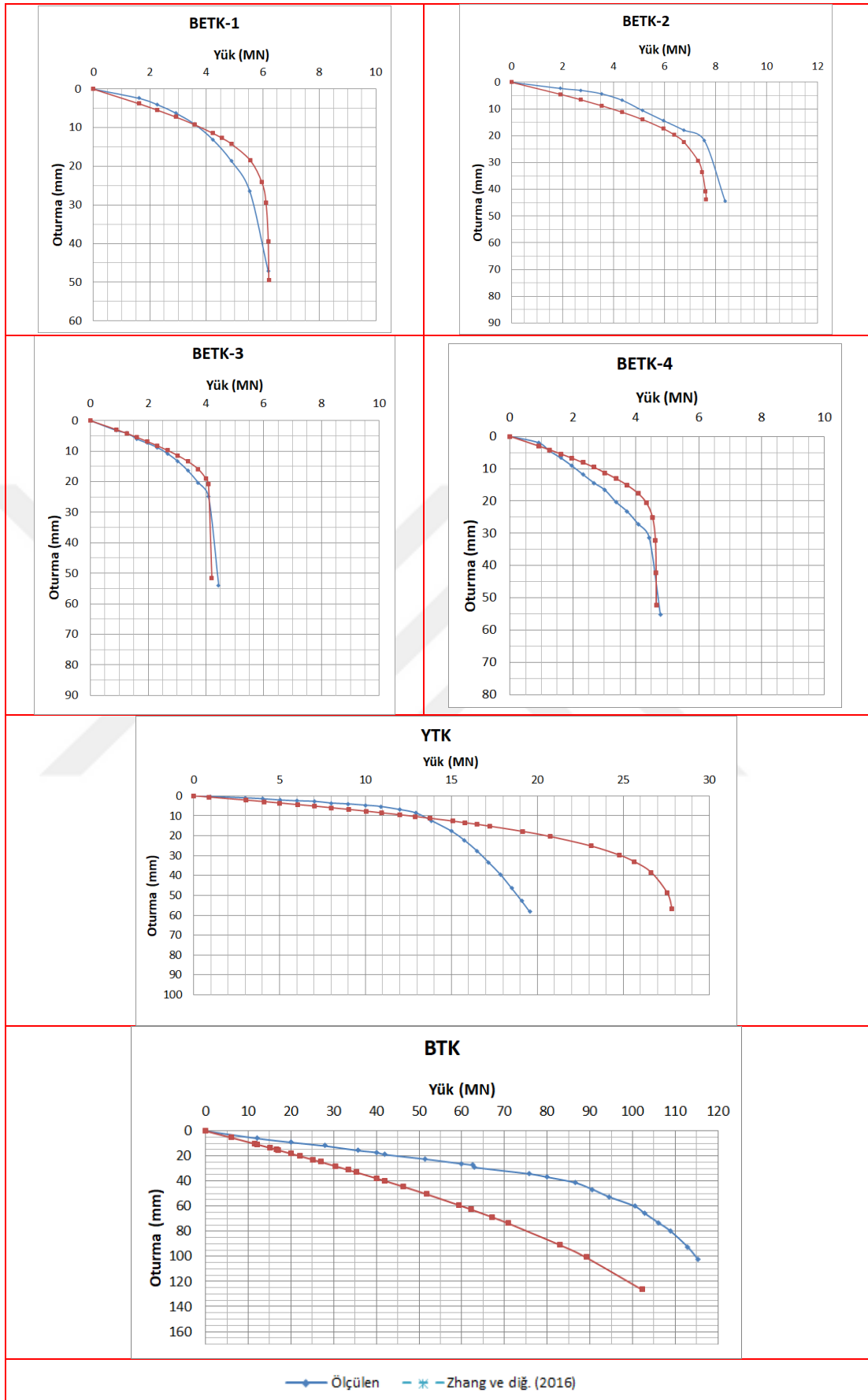
Şekil B.5 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.



Şekil B.6 : Zhang ve diğ. (2016) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.

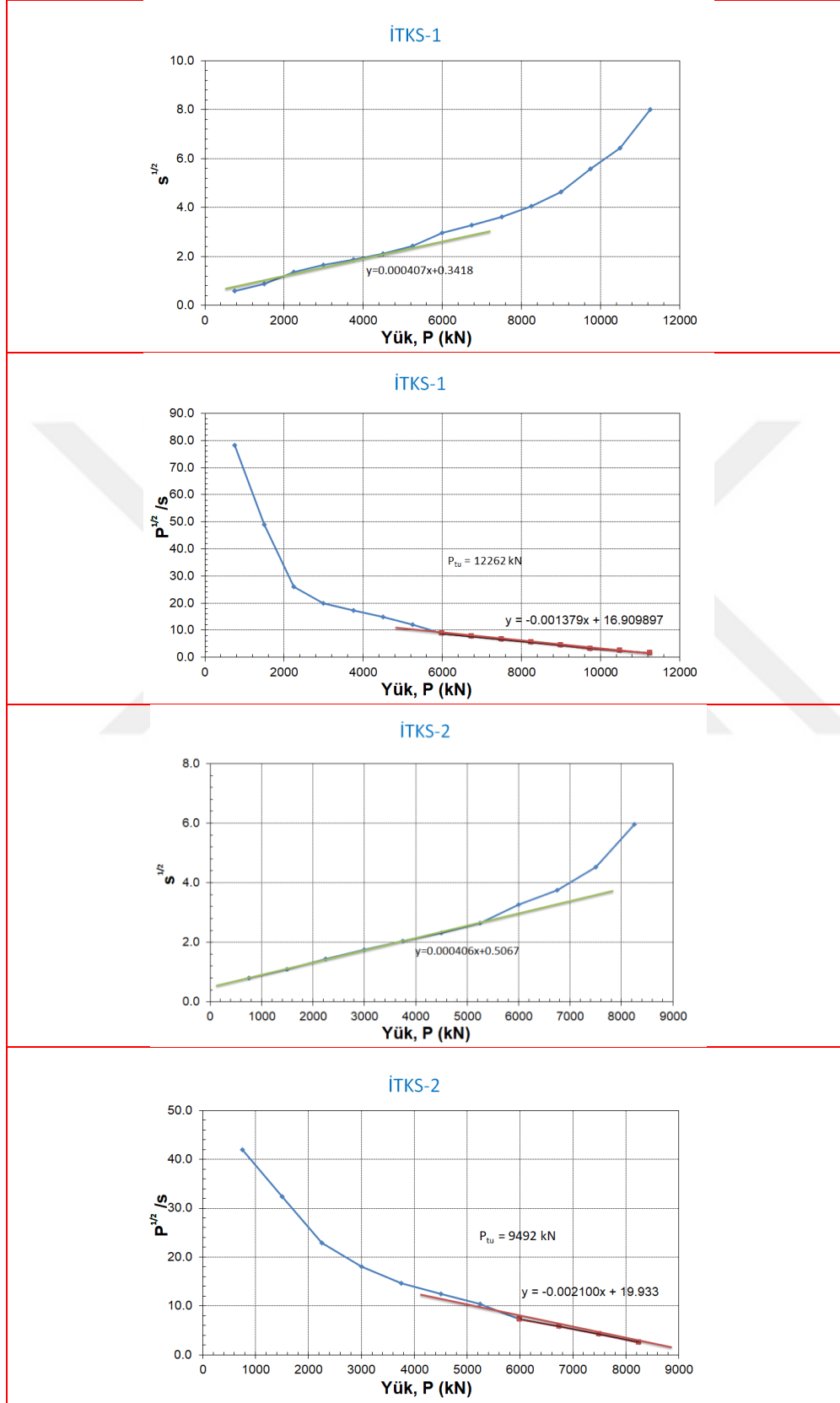


Şekil B.7 : Boonyatee ve Lai. (2017) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.

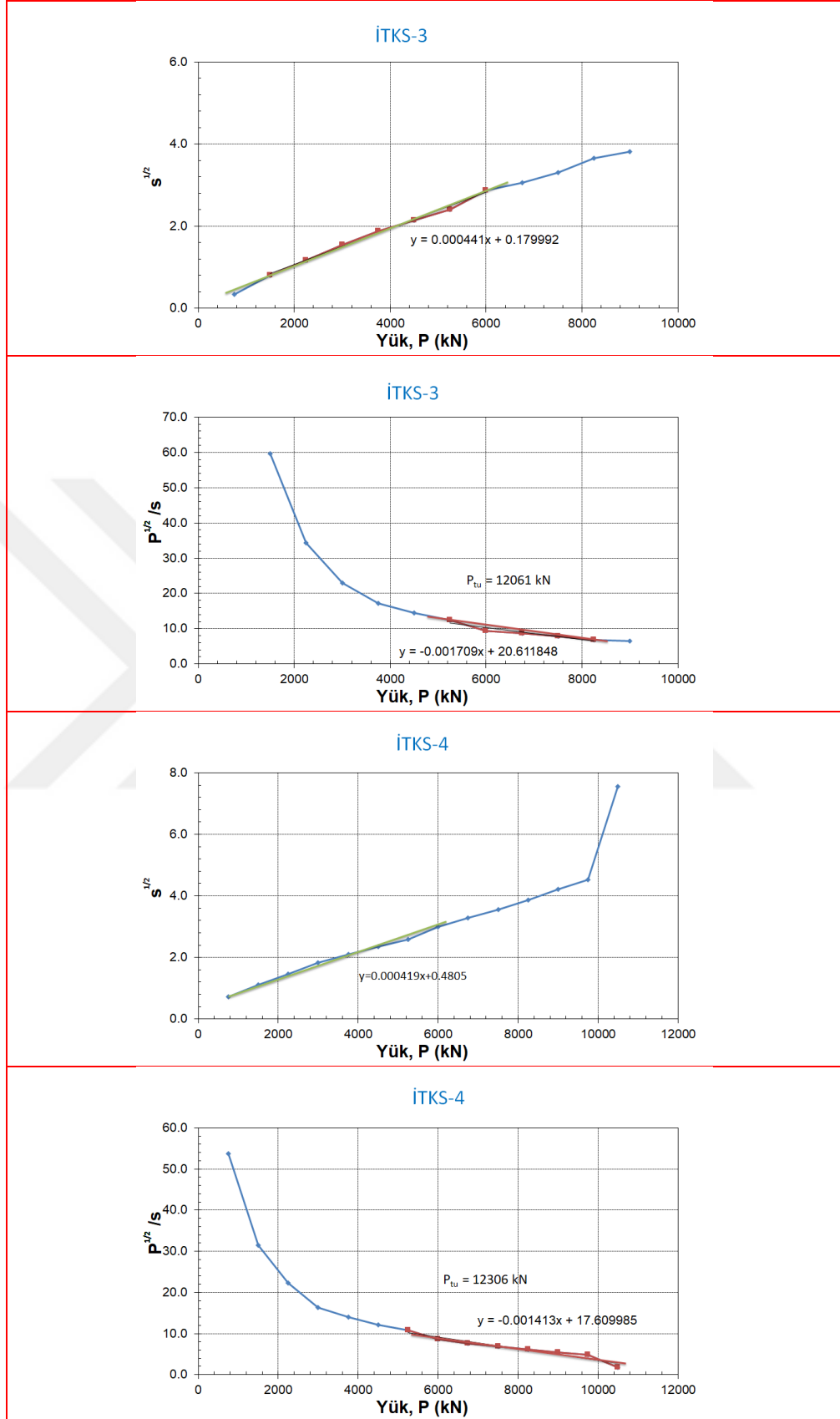


Şekil B.8 : Boonyatee ve Lai. (2017) yöntemi ile hesaplanan yük-oturma grafikleri.

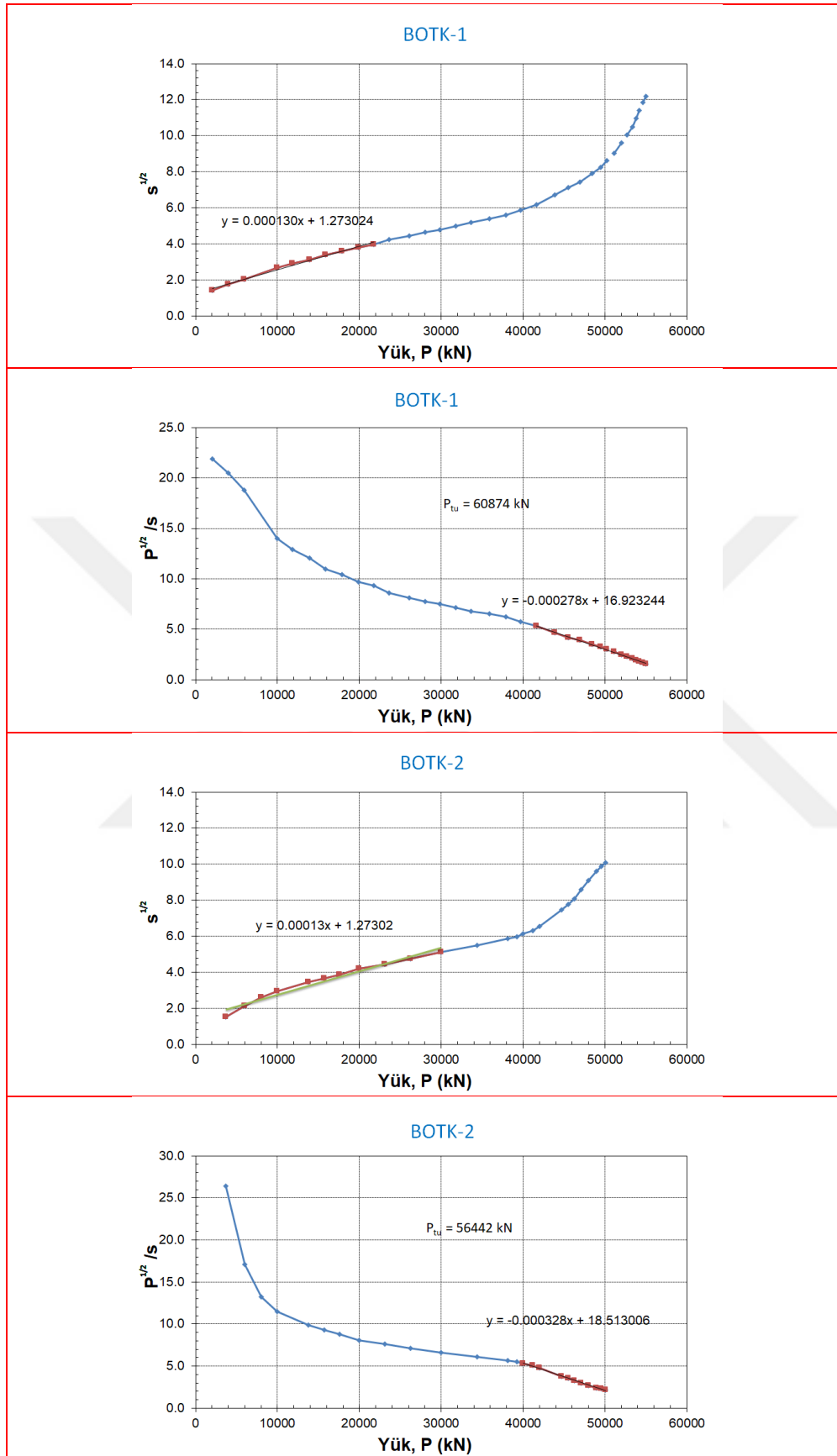
EK C Alku-Özkan (2006) yöntemi kullanılarak elde edilen yöntem parametreleri



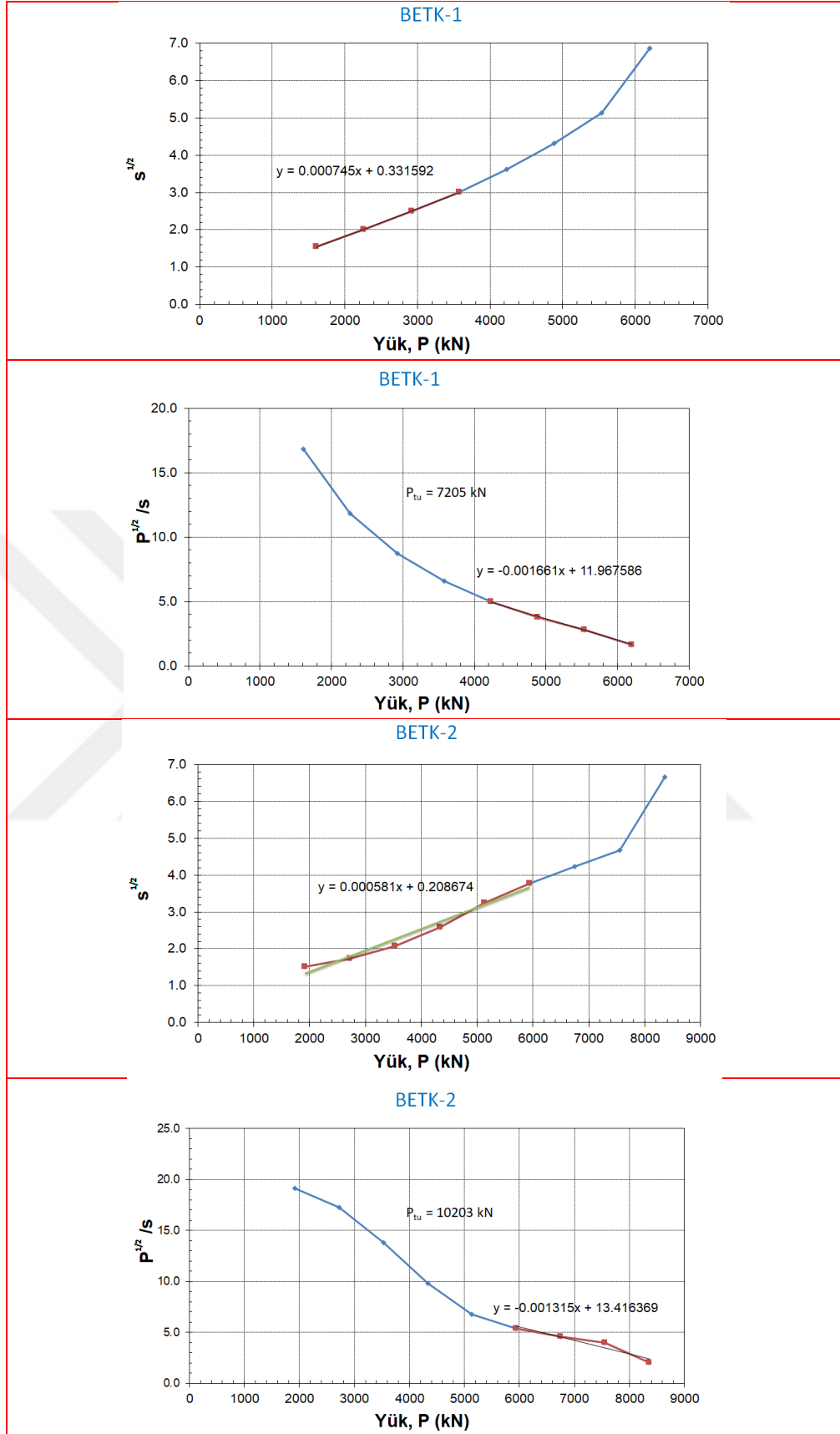
Şekil C.1 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (İTKS-1 ve İTKS-2).



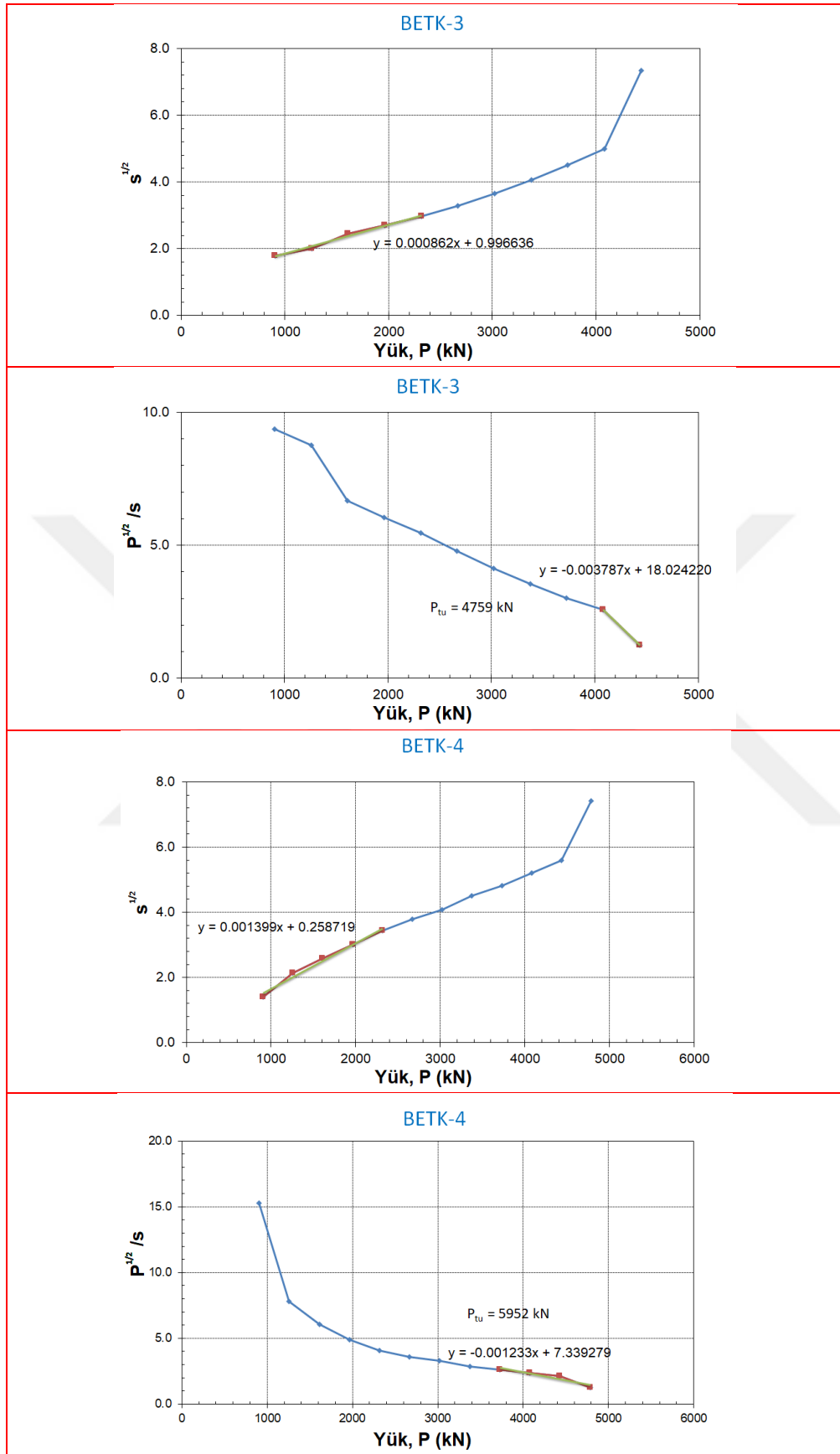
Şekil C.2 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (İTKS-3 ve İTKS-4).



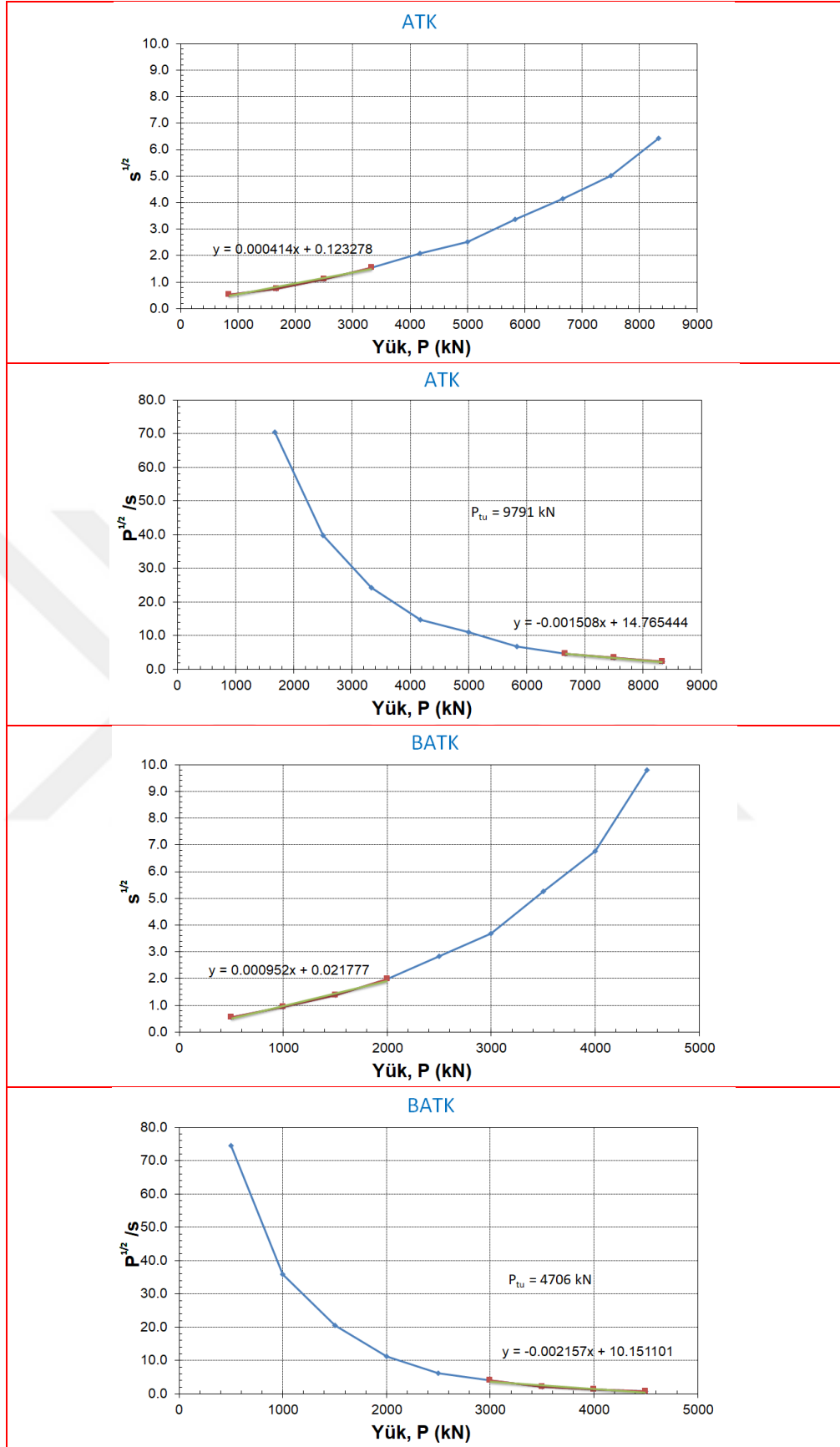
Şekil C.3 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BOTK-1 ve BOTK-2).



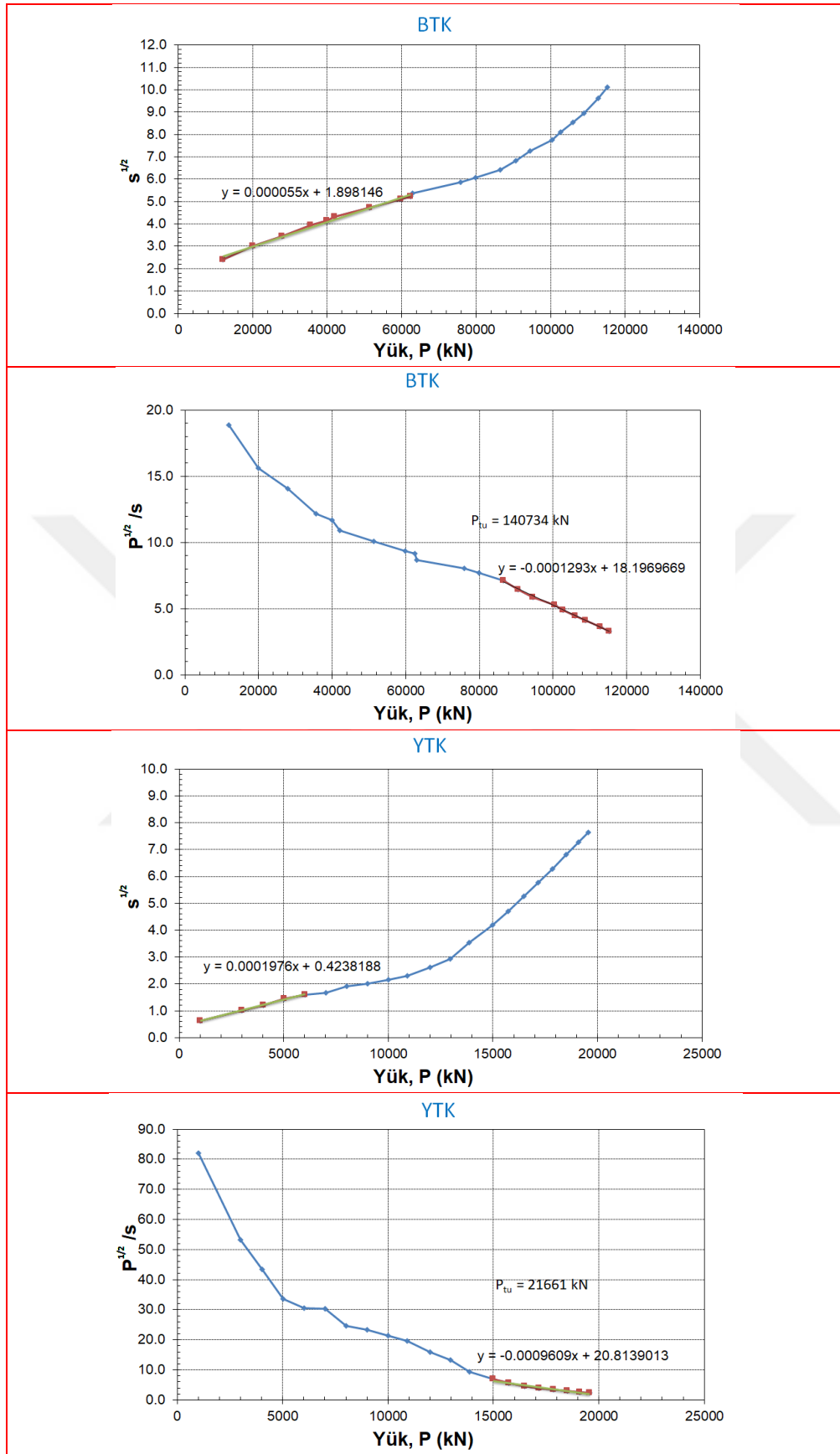
Şekil C.4 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BETK-1 ve BETK-2).



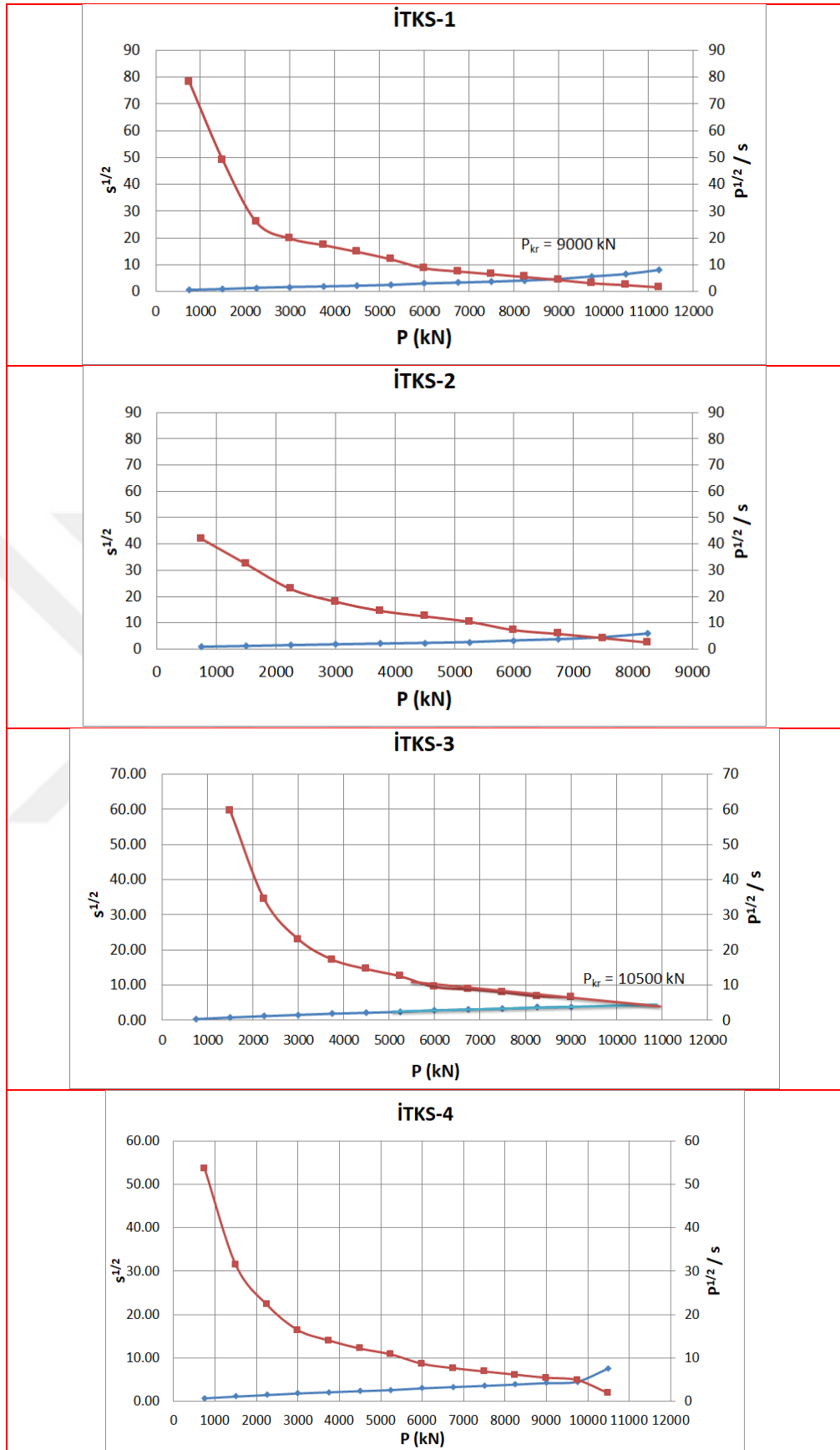
Şekil C.5 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BETK-3 ve BETK-4).



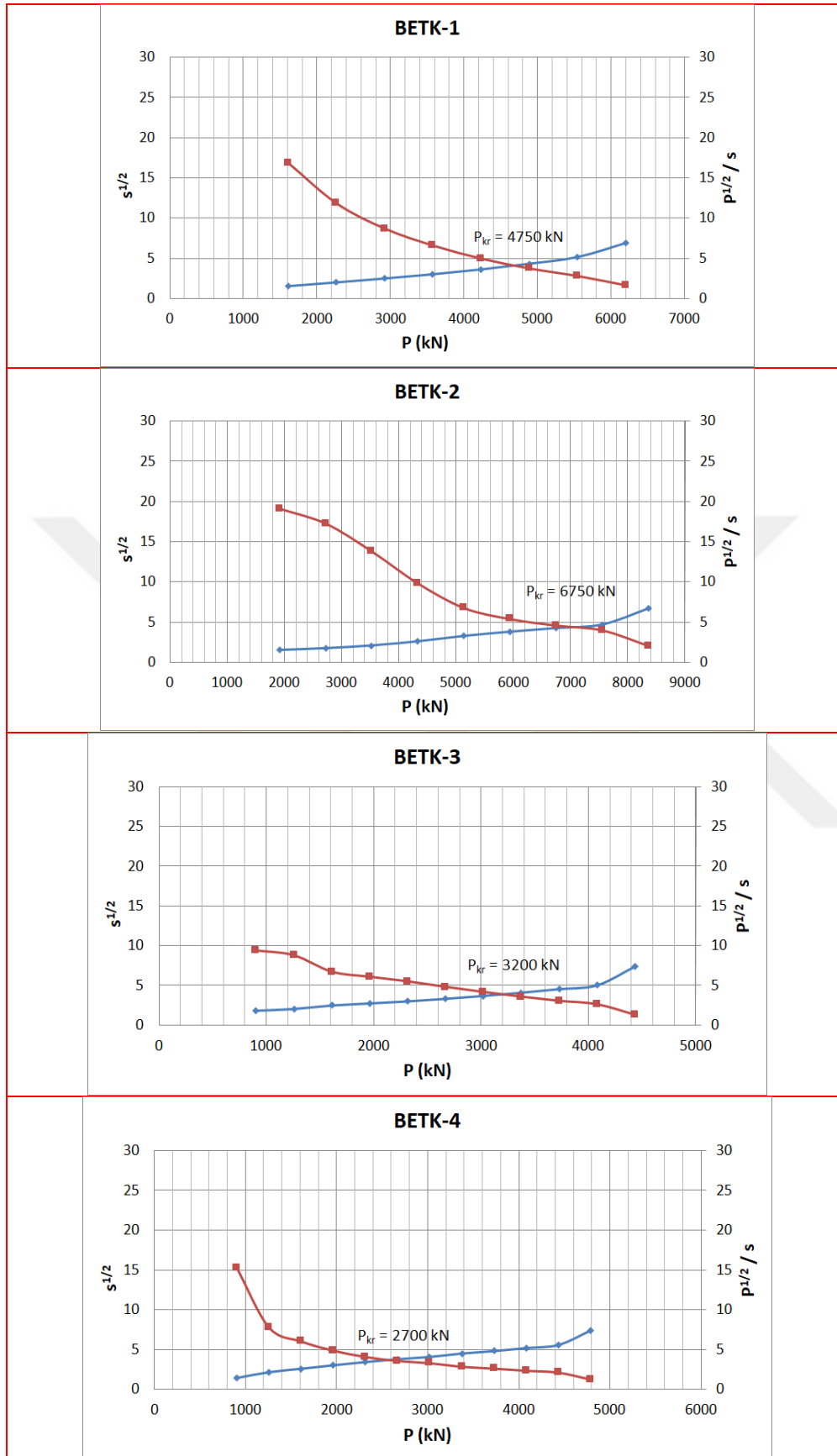
Şekil C.6 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (ATK ve BATK).



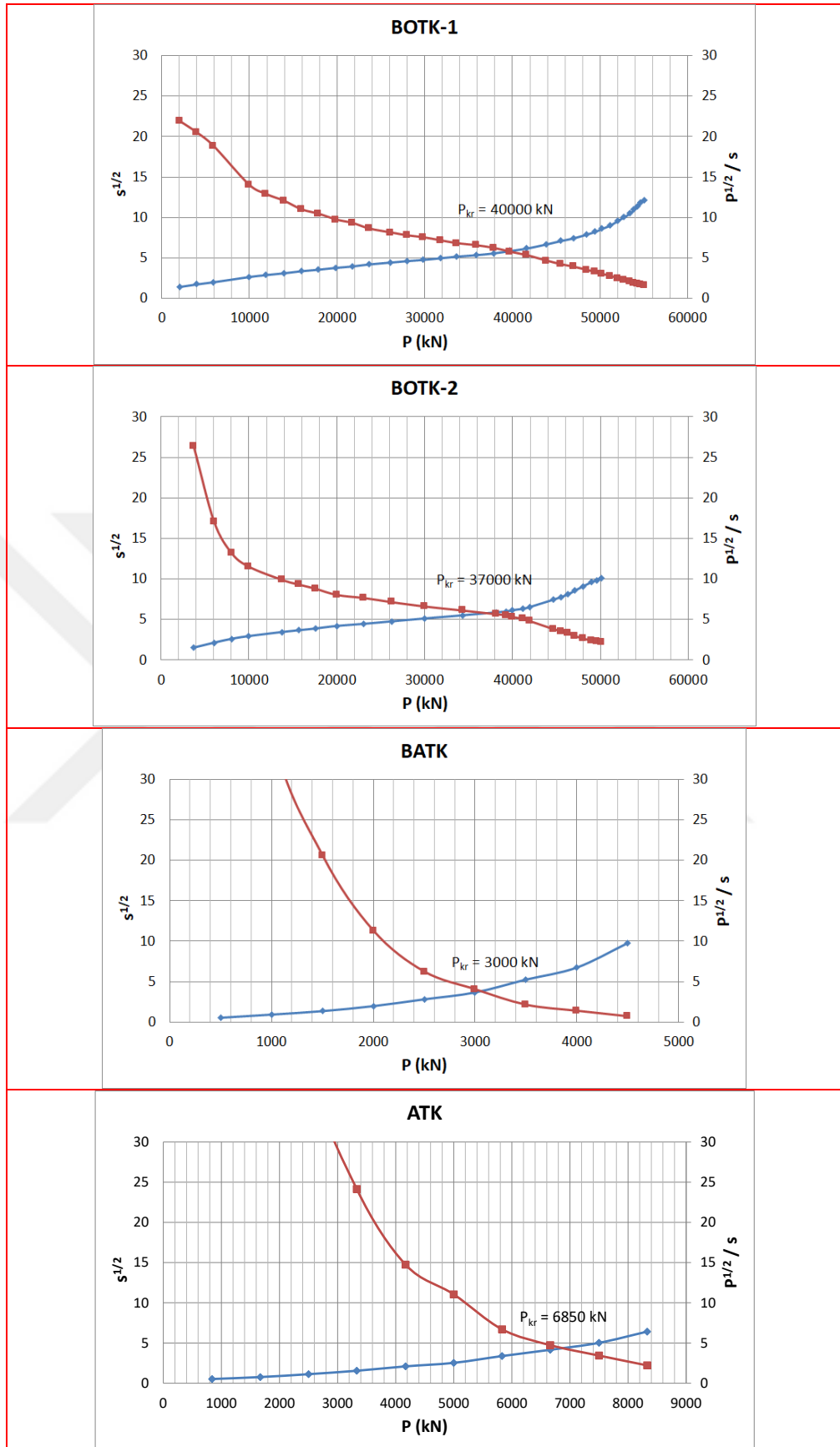
Şekil C.7 : Alku ve Özkan (2006) yöntem parametreleri (BTK ve YTK).



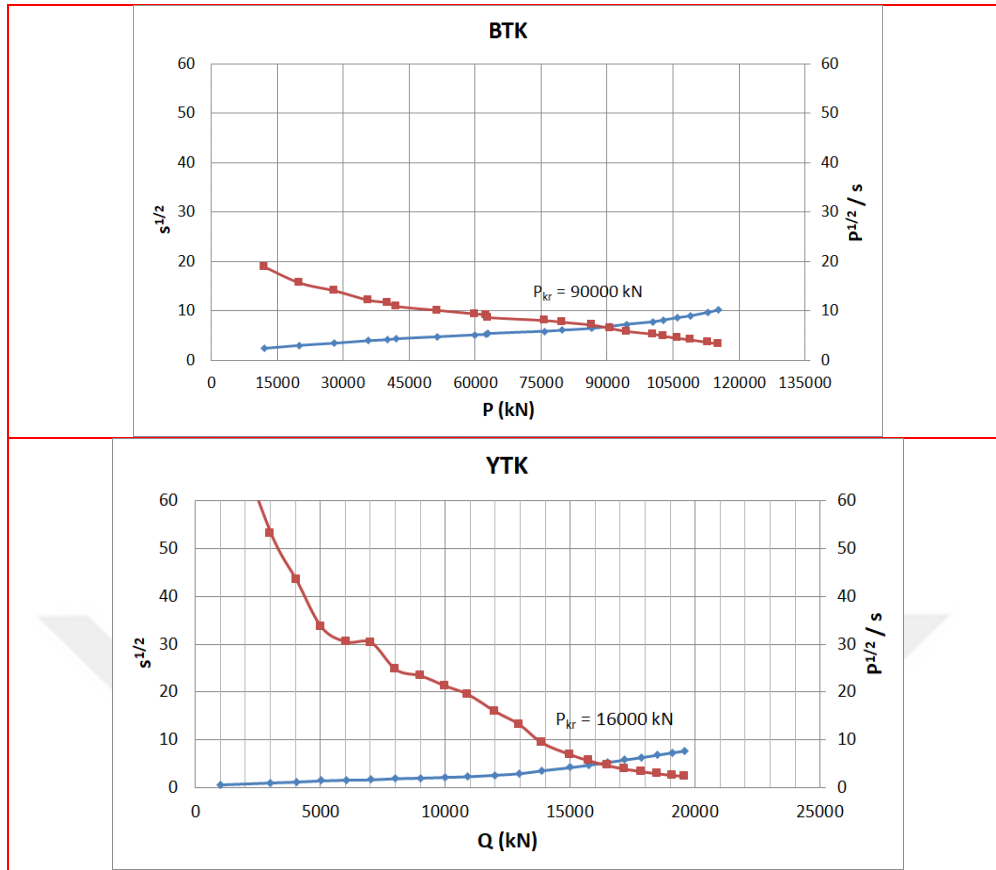
Şekil C.8 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (İTKS-1,2,3,4).



Şekil C.9 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BETK-1,2,3,4).



Şekil C.10 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BOTK-1,2, BATK, ATK).



Şekil C.11 : Aktepe ve Özkan (2006) yöntem ile kritik yük hesapları (BTK ve YTK).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mustafa MERT

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2012, İTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-2011 yılları arasında Mertaş İnşaat firmasında geoteknik proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2011-2015 yılları arasında Temeltaş İnşaat firmasında geoteknik proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2015 yılında Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve bu görevinde devam ediyor.
- 2021 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktorasını tamamladı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Mert M., Özkan M. T.** 2017. Alelstatik Kazık Yükleme Deneyi ile Dinamik Kazık Yükleme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması. *3rd International Soil-Structure Interaction Symposium*, October 18-19, 2017 İzmir, Turkey.
- **Mert M., Özkan M. T.** 2019. Settlement Analysis of Axially Loaded Bored Piles: A Case History. *International Research Conference*, June 4-5, 2019 New York, USA.
- **Mert, M., Özkan, M. T.** 2020. A New Hyperbolic Variation Method For Settlement Analysis Of Axially Loaded Single Friction Piles, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(794).