

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ YÖNLÜ STATİK YÜKLEME DENEYİ VE NÜMERİK ANALİZLERLE
KAZIK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur YANKI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

MAYIS, 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ YÖNLÜ STATİK YÜKLEME DENEYİ VE NÜMERİK ANALİZLERLE
KAZIK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur YANKI
501111313**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

MAYIS, 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111313 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Onur YANKI** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“İKİ YÖNLÜ STATİK YÜKLEME DENEYİ VE NÜMERİK ANALİZLERLE KAZIK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2015**

Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Eşime ve Aileme,

ÖNSÖZ

Üst yapıdan gelen yüklerin taşınması için yüzeysel temellerin yeterli olmadığı durumlarda yaygın olarak kazıklı temeller kullanılmaktadır. Kazıklı temel sistemlerinin taşıma kapasitesinin yeterli olmaması, izin verilen oturma sınırlarını aşması veya tasarlanan kazıklı temel sisteminin ekonomik olmadığı durumlarda baret temel sistemleri tercih edilmektedir. Derin temel sistemlerinin yük altındaki davranışının belirlenmesi ekonomi ve maliyet açısından çok önemlidir. Bu sebeple, taşıma kapasitesi statik kazık formülleri ile hesaplanan kazık ve baretin saha koşullarındaki davranışını belirlemek amacıyla yapılan kazık yükleme deneyleri ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan nümerik analizler temel tasarımının değerlendirilmesinde önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, kazık davranışı ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi için, geleneksel kazık yükleme ve Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü statik kazık yükleme deneylerinin sonuçları ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Arazi deneyleri ve nümerik analiz sonucu elde edilen deplasman ve mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri dikkate alınarak kazık ve baret temel tasarımı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sırasında bana her türlü desteği sağlayan eşim ve aileme tüm kalbimle sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bilgisini ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Recep İYİSAN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma için bana gerekli vakti sağlayan çalışmanı olduğum Çorlu Belediyesi'ne ve Sayın İsmet ÖZŞAHİN'e, vaka analizlerine yönelik gerekli bilgileri sağlayan Zemin Etüd ve Tasarım A.Ş.'ye ve Sayın Prof. Dr. Turan Durgunoğlu'na, tez akışı ve fikir teatisi için kıymetli vakitlerini bana ayıran Sn. Hakan KÖPÜKLÜ ve Sn. Ahmet KANAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Onur YANKI
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
SEMBOLLER	xxiii
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	2
1.2 Kapsam.....	3
2. DERİN TEMELLER	5
2.1 Kazıkların Sınıflandırılması	7
2.1.1 İmal edildiği malzemenin cinsine göre kazıklar	7
2.1.1.1 Betonarme Kazıklar	8
2.1.1.2 Betonarme kazık yapım yöntemleri	9
2.1.2 Yapım şekillerine göre kazıklar	16
2.1.3 Çalışma şekillerine göre kazıklar	16
2.2 Kazık Çeşitlerinin Karşılaştırılması	18
2.3 Baret Temel	21
2.3.1 Baret imalatı	24
2.3.1.1 Saha ön hazırlığı.....	24
2.3.1.2 Kılavuz duvar (gidaj) imalatı	24
2.3.1.3 Delgi	25
2.3.1.4 Bentonit süspansiyonu destekli imalat	26
2.3.1.5 Donatı kafesinin hazırlanması	29
2.3.1.6 Beton dökümü	30
2.3.2 Baret imalat ekipmanları	31
3. KAZIKLARIN DÜŞEY YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ.....	35
3.1 Statik Analiz ile Kapasite Hesabı.....	36
3.1.1 Kohezyonsuz zemindeki tekil kazık ve baretin taşıma kapasitesi	37
3.1.2 Kohezyonlu zemindeki tekil kazık ve baretin taşıma kapasitesi.....	39
3.1.3 Kayaya soketli kazık ve baretin taşıma kapasitesi	42
3.2 Arazi Deneylerinden Elde Edilen Veriler Yardımıyla Kapasite Hesabı	45
3.2.1 Standart Penetrasyon Deney Verileri ile Kapasite Hesabı.....	45
3.2.2 Koni penetrasyon deney verileri yardımıyla kapasite hesabı.....	49
3.2.3 Menard pressiyometre deney verileri yardımıyla kapasite hesabı	55
3.3 Kazık Gruplarının Taşıma Kapasitesi	57
3.4 Kazıkların Oturması	60
3.4.1 Kazık yük aktarma mekanizması	60
3.4.2 Kazıkların elastik oturması	62

3.4.3 Kazık grubunun elastik oturması	64
3.4.4 Kazık grubunun konsolidasyon oturması	65
3.4.5 Negatif sürtünme direnci.....	67
3.4.5.1 Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması (Şekil 3.16 a).....	67
3.4.5.2 Kil zemin üzerine granüler dolgu yapılması (Şekil 3.16 b)	68
4. KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİNİN YERİNDE BELİRLENMESİ. 69	
4.1 Geleneksel Kazık Yükleme Deneyi.....	70
4.1.1 Deney ekipmanları	70
4.1.2 Yük uygulama yöntemi	71
4.1.3 Yükleme yöntemleri.....	74
4.1.3.1 Sabit yük kademesi artışına göre yükleme deneyi	74
4.1.3.2 Sabit oturma artışına göre yükleme deneyi	75
4.1.4 Yük ölçümü	77
4.1.5 Kazığın yer değiştirme miktarının ölçümü	78
4.1.6 Kazık yükleme deney verilerinin değerlendirilmesi	79
4.1.6.1 Matematik modele dayalı yöntemler	81
4.1.6.2 Grafik yöntemler	84
4.1.6.3 Oturmayı sınırlandıran yöntemler	89
4.2 Osterberg Yük Hücresi Deneyi	91
4.2.1 İki yönlü statik yükleme deneyi yapım yöntemi	93
4.2.1.1 Deney kazığının hazırlanması	93
4.2.1.2 Deney ekipmanları	95
4.2.2 Kazık yükleme prosedürü	98
4.2.3 Deney sırasında yapılan ölçümler	100
4.2.4 Deney sonuçlarının sunumu ve yorumu.....	102
4.2.4.1 Eşdeğer üstten yükleme yük – deplasman eğrisinin oluşturulması..	103
4.2.5 O-cell testin üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları	109
5. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ..... 111	
5.1 Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)	111
5.2 Plaxis 2D	113
5.2.1 Geometrik model.....	113
5.2.2 Kümeler (Clusters).....	114
5.2.3 Arayüzeyler (Interfaces).....	116
5.2.4 Gömülü kazık elemanı (embedded pile rows)	116
5.2.4.1 Gömülü kazık elemanı çalışma prensibi	118
5.2.5 Zemin ve yapı elemanlarının modellenmesi	120
5.2.5.1 Linear elastik model	122
5.2.5.2 Mohr – Coulomb model (Linear elastik tam plastik davranış)	122
5.2.5.3 Soft soil model	124
5.2.5.4 Soft soil creep model.....	124
5.2.5.5 Modifiye Cam kili modeli	126
5.2.5.6 Jointed rock model	127
5.2.5.7 Hardening soil model	128
5.2.5.8 Hardening soil small strain – stiffness model	130
5.2.5.9 Hoek Brown model	131
5.2.6 Analiz adımları ve sonuçları	132
6. VAKA ANALİZLERİ..... 133	
6.1 Saha-1, Proje Bilgileri	133
6.1.1 Arazi araştırmaları ve deneyler	134
6.1.2 Zemin türleri ve geoteknik model	140

6.1.3 Temel mühendisliği değerlendirmeleri	143
6.1.3.1 Baret ve kazık kapasite hesabı	144
6.1.3.2 Baret ve kazıkların oturması	145
6.2 Deney – 1, Baret O-cell Deneyi	148
6.2.1 Test bareti özellikleri	148
6.2.2 Test bareti enstrümantasyonu ve imalatı.....	149
6.2.3 İki yönlü statik yükleme deneyinin yapılışı	153
6.2.4 İki yönlü statik yükleme deney sonuçları ve yorumlanması.....	155
6.2.5 Baret üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizi.....	158
6.2.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması	158
6.2.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve baret) tanımlanması.....	159
6.2.5.3 Zemin ve baret elemanın modele atanması	161
6.2.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması	162
6.2.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi.....	163
6.2.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi.....	163
6.3 Deney – 2, Fore Kazık O-cell Deneyi	175
6.3.1 Test kazığı özellikleri.....	175
6.3.2 Test kazığı enstrümantasyonu ve imalatı	177
6.3.3 İki yönlü statik yükleme deneyinin yapılışı	181
6.3.4 İki yönlü statik yükleme deney sonuçları ve yorumlanması.....	183
6.3.5 Test kazığı üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizi	186
6.3.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması	186
6.3.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve kazık) tanımlanması	187
6.3.5.3 Zemin ve kazık elemanın modele atanması	188
6.3.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması	189
6.3.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi.....	190
6.3.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi.....	190
6.4 Deney – 3, Fore Kazık Geleneksel Statik Kazık Yükleme Deneyi.....	203
6.4.1 Test kazığı özellikleri.....	203
6.4.2 Test kazığı enstrümantasyonu ve imalatı	203
6.4.3 Geleneksel kazık yükleme deneyinin yapılışı	207
6.4.4 Deney sonuçlarının sunumu ve yorumlanması	209
6.4.5 Fore kazık üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi	211
6.4.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması	212
6.4.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve kazık) tanımlanması	213
6.4.5.3 Zemin ve kazık elemanın modele atanması	214
6.4.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması	215
6.4.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi.....	216
6.4.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi.....	216
7. TARTIŞMA	229
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	237
KAYNAKLAR	241
EKLER.....	247
ÖZGEÇMİŞ.....	283

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Office
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BDSLTL	: Bidirectional Static Loading Test
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
FHWA	: Federal Highway Association
HB	: Hoek-Brown
HS	: Hardening Soil (Pekleşen zemin)
O-CELL	: Osterber Yük Hücresi
OLT	: Osterberg Yükleme Deneyi
PMT	: Menard Pressiyometre Deneyi
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
TLT	: Top Load Test
TS	: Türk Standardı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yerinde dökme betonarme kazıkların en düşük çapları, (TS 1536).....	9
Çizelge 2.2 : Kazıkların teknik özellikleri, FHWA HI 97-013 (1998).	18
Çizelge 2.3 : Bentonit süspansiyonu hazırlama şartname kriterleri (TS EN 1538, 2010).	27
Çizelge 3.1 : N_q ve ϕ değerleri, (Prakash ve Sharma, 1990).	37
Çizelge 3.2 : Yatay toprak basıncı katsayısı, K_s (Tomlinson, 2004).	38
Çizelge 3.3 : Normal konsolide kumlar için K_0 değerleri, (Tomlinson, 2004).	38
Çizelge 3.4 : δ/ϕ' oranı için değerler, (Mc Charty P.E, 2007).	39
Çizelge 3.5 : D_f/B oranına göre değişen N_c değerleri, NAVFAC 7.2 (1982).	41
Çizelge 3.6 : Kazık çapına (D) göre değişen N_c değerleri).	41
Çizelge 3.7 : RQD – kütle faktörü ilişkisi, (Tomlinson, 2004).	44
Çizelge 3.8 : Kohezyonsuz zeminlerde rölatif sıkılık – N_{30} – ϕ – sıkılık bağıntısı. ..	47
Çizelge 3.9 : SPT-N değerleri – kazık uç ve çevre direnci ilişkisi (Meyerhof, 1976).	48
Çizelge 3.10 : SPT-N ile q_u ilişkisi, (Peck ve diğ., 1974).....	48
Çizelge 3.11 : CPT - çevre sürtünme direnci bağıntıları (Alsamman, 1995).	50
Çizelge 3.12 : CPT – Uç direnci bağıntıları, (Alsamman, 1995).	51
Çizelge 3.13 : Çevre sürtünme katsayısı, C_s (Eslami ve Fellenius, 1997).	52
Çizelge 3.14 : Killi zeminlerde p_L^* - E_M - c_u bağıntısı.	55
Çizelge 3.15 : Kumlu zeminlerde p_L^* – rölatif sıkılık – E_M ve SPT- N_{30} bağıntısı. ..	56
Çizelge 3.16 : Sürtünme kazıkları için grup etki faktörü bağıntıları, (Das, 2004). ..	59
Çizelge 4.1 : O-cell test yükleme prosedürü.....	99
Çizelge 4.2 : O-cell deneyinde farklı çevre sürtünmesi değerleri için teorik elastik sıkışma hesabı, (Straininstall, 2012).	106
Çizelge 4.3 : Geleneksel kazık yükleme yönteminde farklı çevre sürtünme modelleri için teorik elastik sıkışma, (Straininstall, 2012).....	107
Çizelge 4.4 : OLT ve TLT için elastik sıkışma örnek hesap tablosu, (Straininstall, 2012).	108
Çizelge 5.1 : Zemin türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).	121
Çizelge 5.2 : İmalat türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).....	121
Çizelge 6.1 : Saha - 1 sondaj bilgileri.....	135
Çizelge 6.2 : Laboratuvar deney sonuçları.	137
Çizelge 6.3 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2007).	138
Çizelge 6.4 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2008).	139
Çizelge 6.5 : Derin sondajlar zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2010).....	139
Çizelge 6.6 : L = 63 m, baret oturma hesabı.....	145
Çizelge 6.7 : L = 51.7 m, fore kazık oturma hesabı.	146
Çizelge 6.8 : L = 47.8 m, fore kazık oturma hesabı.	147
Çizelge 6.9 : Test bareti özellikleri.....	148
Çizelge 6.10 : Deney - 1 baret yükleme prosedürü.	154

Çizelge 6.11 : Gerilme ölçer seviyelerinde mobilize olan çevre sürtünme değerleri	155
Çizelge 6.12 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.	160
Çizelge 6.13 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.	161
Çizelge 6.14 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	164
Çizelge 6.15 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar	165
Çizelge 6.16 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	166
Çizelge 6.17 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	166
Çizelge 6.18 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	168
Çizelge 6.19 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	171
Çizelge 6.20 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	172
Çizelge 6.21 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	173
Çizelge 6.22 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	174
Çizelge 6.23 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	174
Çizelge 6.24 : $\phi 80$ cm test kazığı özellikleri.	176
Çizelge 6.25 : Deney – 2, kazık yükleme prosedürü.	183
Çizelge 6.26 : Göçme seviyesinde gözlenen deplasman ve net birim sürtünme direnci değerleri	185
Çizelge 6.27 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.	187
Çizelge 6.28 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.	188
Çizelge 6.29 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.	191
Çizelge 6.30 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.	192
Çizelge 6.31 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.	193
Çizelge 6.32 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.	193
Çizelge 6.33 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.	195
Çizelge 6.34 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	198
Çizelge 6.35 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	199
Çizelge 6.36 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	200
Çizelge 6.37 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	201
Çizelge 6.38 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	201
Çizelge 6.39 : Deney - 3, kazık yükleme prosedürü.	208
Çizelge 6.40 : Maksimum yükte gerilme ölçer seviyelerinde gözlenen birim sürtünme değerleri.	210
Çizelge 6.41 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.	213
Çizelge 6.42 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.	214
Çizelge 6.43 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	217
Çizelge 6.44 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	218
Çizelge 6.45 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	219
Çizelge 6.46 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	219
Çizelge 6.47 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.	221
Çizelge 6.48 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	224
Çizelge 6.49 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	225
Çizelge 6.50 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	226
Çizelge 6.51 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	227
Çizelge 6.52 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.	227

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kazıklı temellerin kullanım alanlarına göre çalışma prensibi (Das,2004). 6	6
Şekil 2.2 : Kuru yöntemle fore kazık imalatı, (O'Neill ve Reese, 1999)	12
Şekil 2.3 : Kılıflı yöntem, (O'Neill ve Reese, 1999).....	13
Şekil 2.4 : Slury Metodu ile imalat, (O'Neill and Reese, 1999).....	14
Şekil 2.5 : Tipik baret kesitleri, Durgunoğlu, (2011) 'den uyarlanmıştır.	22
Şekil 2.6 : Kolon – kazık grubu, kolon – baret yerleşimi, (Durgunoğlu, 2011).	23
Şekil 2.7 : Kılavuz duvar boyutları ve yerleşimi.	25
Şekil 2.8 : Gidaj detayı.	25
Şekil 2.9 : Toz ve süspansiyon bentonit (ZETAŞ Katalog, 2014).	27
Şekil 2.10 : Bentonit süspansiyonunun çalışma prensibi.	28
Şekil 2.11 : Bentonit destekli kazı yapımı ve ekipmanları (Zetaş Katalog, 2014). 28	28
Şekil 2.12 : Baret donatı kafesinin hazırlanması (Zetaş katalog, 2014).	29
Şekil 2.13 : Donatı kafesinin kuyuya indirilmesi, (Saha – 1, 2013).....	30
Şekil 2.14 : Sert zeminde baret temel yapım aşamaları.	30
Şekil 2.15 : Hidrofreze (cutter), (projects.soundtransit.org).....	31
Şekil 2.16 : Grab çeşitleri, (projects.soundtransit.org).	31
Şekil 2.17 : Desander ünitesi, (bauer.de).	32
Şekil 2.18 : Bentonit tankı, (Saha – 1, 2013).	32
Şekil 2.19 : Depolama ve transfer ünitesi, (zmakina.com.tr)	33
Şekil 3.1 : Kayaya soketlenen kazıklar için azaltma faktörleri (Tomlinson, 2004). . 42	42
Şekil 3.2 : Kayadaki süreksizlik düzlemlerine ilişkin düzeltme faktörü, (Tomlinson, 2004).	43
Şekil 3.3 : Kütle faktörü değerleri, (Tomlinson, 2004).	43
Şekil 3.4 : $K_{sp} - c/D$ ilişkisi, (Toğrol ve Tan, 2003).....	45
Şekil 3.5 : SPT-N değeri – Rölatif sıklık korelasyonu, (Fleming, 1986).	46
Şekil 3.6 : Taşıma gücü katsayıları ve SPT direnci arasındaki bağıntıyı gösteren eğriler, (Peck, Henson ve Thorburn, 1974).....	47
Şekil 3.7 : SPT-N ile c_u ilişkisi, (Sowers, 1979).....	49
Şekil 3.8 : Kazık birim uç direncini veren koni penetrasyon verilerinin ortalamasının alınması, (Fleming ve diğ., 2009)	54
Şekil 3.9 : Kil, silt ve kum-çakıl birimler için k değerleri, Baguelin ve diğ. (1978). 56	56
Şekil 3.10 : Kazıklarda çevre sürtünmesi – limit basınç bağıntısı.....	57
Şekil 3.11 : Kazıklarda grup etkisi, (Das, 2004).....	58
Şekil 3.12 : Kazık başlığı-zemin ilişkisi, (Budhu, 2007).....	58
Şekil 3.13 : Kazık yük aktarma mekanizması, (Das, 2004).	61
Şekil 3.14 : Kazık boyunca çevre sürtünmesi direnci dağılımı, (Das, 2004).	63
Şekil 3.15 : Kazık gruplarının konsolidasyon oturması, (Das, 2004).....	66
Şekil 3.16 : Negatif sürtünme direnci, (Das, 2004).	67
Şekil 4.1 : Geleneksel kazık yükleme deney düzeneği, (Das, 2007).	71
Şekil 4.2 : Reaksiyon kirişleri ve hidrolik kriko ile yapılan yükleme deneyi (ASTM D 1143-07, 2007)..	72

Şekil 4.3 : Ağırılık kutusu yada platform ile birlikte hidrolik kriko ile yapılan yüklemeye deneyi (ASTM D 1143-07, 2007).	72
Şekil 4.4 : Ankrājlar yardımıyla gerçekleştirilen statik yüklemeye deneyi (Yi, 2004).	73
Şekil 4.5 : Sabit yük kademe artışı yöntemiyle yapılan yüklemeye deneyi yük-deplasman eğrisi, (Simons ve Menizes, 2004).	75
Şekil 4.6 : Sabit oturma artışına göre yapılan yüklemeye deneyi eğrisi, (Aygül, 2011).	76
Şekil 4.7 : Komparatör ve komparatör standı, (teknikel.com).....	78
Şekil 4.8 : Tipik yük – oturma eğrisi, (Tomlinson, 2004).	80
Şekil 4.9 : Chin – Kondner yöntemi, (Hudson, 2008).	81
Şekil 4.10 : Brinch – Hansen yöntemi.	83
Şekil 4.11 : Van der Veen yöntemi.	84
Şekil 4.12 : De Beer yöntemi.	85
Şekil 4.13 : Teğet yöntemi.	85
Şekil 4.14 : Mazurkiewicz yöntemi.	86
Şekil 4.15 : Brinch – Hansen %90 yöntemi.	87
Şekil 4.16 : Butler – Hoy yöntemi.	87
Şekil 4.17 : Fuller – Hoy yöntemi.	88
Şekil 4.18 : Corps of Engineers yöntemi.	89
Şekil 4.19 : Davisson yöntemi.	89
Şekil 4.20 : Hirany – Kulhawy yöntemi.	91
Şekil 4.21 : Geleneksel yüklemeye deneyi ile Osterberg hücresiyle yüklemeye deneyi yük dağılımı, (England, 2003b).....	92
Şekil 4.22 : O-cell test ekipmanları şematik gösterimi, (Dai ve Gong, 2011).	96
Şekil 4.23 : O-cell test deney düzeneği ve veri alıcı, (Saha - 1, 2013).	97
Şekil 4.24 : O-cell test ekipmanları, (Saha - 1, 2013).	97
Şekil 4.25 : Elektronik deplasman ölçer.	100
Şekil 4.26 : O-cell deneyinde elde edilen yük – oturma eğrisi, (Straininstall, 2012).	104
Şekil 4.27 : Örnek eşdeğer yukardan yüklemeye durumundaki yük – oturma eğrisi, (Straininstall, 2012).	105
Şekil 4.28 : O-cell yük hücresiyle yüklemeye durumunda kazıkta oluşan örnek çevre sürtünme direnci dağılımı, (Straininstall, 2012).	105
Şekil 4.29 : Üstten yüklemeye durumunda kazıkta oluşan örnek çevre sürtünme direnci dağılımı, (Straininstall, 2012).	106
Şekil 4.30 : Kazığın elastik sıkışması ilave edilmiş eşdeğer yük deplasman eğrisi, (Straininstall, 2012).	108
Şekil 4.31 : Geleneksel yüklemeye deneyi ve Osterberg yüklemeye deneyinin maliyetinin karşılaştırılması, (England, 2003a).	110
Şekil 5.1 : Geometrik model.	114
Şekil 5.2 : Gerilme noktaları ve düğüm noktaları (Brinkgreve, 2010).	115
Şekil 5.3 : Kümeleri oluşturulmuş zemin modeli.	115
Şekil 5.4 : Kazık – zemin arayüzeyi.	116
Şekil 5.5 : Gömülü kazık elemanı model parametreleri.	118
Şekil 5.6 : Gömülü kazık elemanı çalışma prensibi, (Sluis, 2012).	119
Şekil 5.7 : Arayüzey çalışma prensibi, (Sluis, 2012).	119
Şekil 5.8 : Linear elastik model parametreleri.	122
Şekil 5.9 : Linear elastik mükemmel plastik model (Plaxis, 2015).	123
Şekil 5.10 : Mohr – Coulomb model parametreleri.	123
Şekil 5.11 : Soft soil model parametreleri.	124
Şekil 5.12 : Soft soil creep model parametreleri.	125

Şekil 5.13 : Modifiye Cam kili modelinde $p' - q$ düzleminde akma yüzeyi.	126
Şekil 5.14 : Modifiye Cam kili model parametreleri.	126
Şekil 5.15 : Jointed rock modelin kapsamı (Plaxis, 2015).	127
Şekil 5.16 : Jointed rock model parametreleri.	127
Şekil 5.17 : HS model zemin parametreleri.	128
Şekil 5.18 : Standart drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme - şekil değiştirme ilişkisi.	129
Şekil 5.19 : HS small strain – stiffness model parametreleri.	131
Şekil 5.20 : Hoek - Brown model parametreleri.	132
Şekil 6.1 : Saha – 1 vaziyet planı.	134
Şekil 6.2 : Düzeltilmiş SPT- $(N_1)_{60}$ değerlerinin kot ile değişimi.	136
Şekil 6.3 : CPT sonuçlarından elde edilen drenajsız kayma mukavemetinin derinliğe bağlı değişimi.	140
Şekil 6.4 : Zemin kesiti.	141
Şekil 6.5 : Zemin tabakalarının mühendislik parametreleri.	142
Şekil 6.6 : $\phi 80$ cm çapındaki fore kazıklı temel sistemi planı.	143
Şekil 6.7 : 80 cm x 280 cm boyutlarında tasarlanan baret temel sistemi planı.	144
Şekil 6.8 : O-cell deneyi yük hücresi yerleşim planı.	149
Şekil 6.9 : Yük hücresi montajı, (Saha – 1, 2013).	149
Şekil 6.10 : Huni şeklinde tremi borusu kılavuz imalat detayı, (Saha – 1, 2013). ..	150
Şekil 6.11 : Gerilme ölçer.	151
Şekil 6.12 : Bourdon manometresi.	151
Şekil 6.13 : Veri kaydedici program ara yüzü.	151
Şekil 6.14 : Test bareti enstrümantasyon kesiti.	152
Şekil 6.15 : Deney – 1, yük – deplasman grafiği.	156
Şekil 6.16 : Eşdeğer üstten yükleme durumu yük – deplasman grafiği.	157
Şekil 6.17 : Baret gövdesinde mobilize olan çevre sürtünmesi dağılımı.	157
Şekil 6.18 : Uygulanan yükün baret boyunca dağılımı.	158
Şekil 6.19 : Deney – 1, geometrik model.	159
Şekil 6.20 : Deney – 1, zemin ve baret parametreleri atanmış analiz modeli.	162
Şekil 6.21 : Deney – 1, sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model.	162
Şekil 6.22 : Deney – 1, analiz adımları.	163
Şekil 6.23 : SEM – 1, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.	164
Şekil 6.24 : SEM – 2, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.	165
Şekil 6.25 : SEM – 3, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.	167
Şekil 6.26 : SEM – 4, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.	167
Şekil 6.27 : SEM – 5, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.	169
Şekil 6.28 : Analiz ve test sonucu elde edilen yük –deplasman eğrileri.	170
Şekil 6.29 : $\phi 80$ cm test kazığı Osterberg yük hücresi yerleşim planı.	177
Şekil 6.30 : Osterberg yük hücrelerinin donatı kafesine montajı.	178
Şekil 6.31 : Tremi borusu geçişi için kılavuz huni detayı.	178
Şekil 6.32 : Geokon 4911 model gerilme ölçerin donatıya montajı.	179
Şekil 6.33 : $\phi 80$ cm test kazığı deney ekipmanları enstrümantasyonu.	180
Şekil 6.34 : $\phi 80$ cm test kazığı deney ekipmanları şematik kesiti.	181
Şekil 6.35 : Deney – 2, iki yönlü statik yükleme deneyi yük – deplasman eğrisi. ..	184
Şekil 6.36 : Eşdeğer üstten yükleme, yük – deplasman eğrisi.	185
Şekil 6.37 : Deney – 2, modelin iki boyutlu oluşturulması (x-y düzlemi).	187
Şekil 6.38 : Deney – 2, zemin ve kazık elemanı atanmış analiz modeli.	189
Şekil 6.39 : Deney – 2, sonlu elemanlar ağı.	189
Şekil 6.40 : Deney – 2, hesap adımları.	190

Şekil 6.41 : SEM-1, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.	191
Şekil 6.42 : SEM-2, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.	192
Şekil 6.43 : SEM-3, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.	194
Şekil 6.44 : SEM-4, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.	194
Şekil 6.45 : SEM-5, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.	195
Şekil 6.46 : Test ve analiz sonucu elde edilen yük – deplasman eğrileri.	197
Şekil 6.47 : Deney – 3, test kazığı ve referans kazık yerleşimi.	204
Şekil 6.48 : Deney – 3, gerilme ölçer kotları.	204
Şekil 6.49 : Gerilme ölçer ve koruma levhası.	205
Şekil 6.50 : Hidrolik kriko ve yük hücresi yerleşimi.	205
Şekil 6.51 : Elektronik veri toplama sistemi ara yüzü.	206
Şekil 6.52 : Deney düzeneği genel görünüşü.	207
Şekil 6.53 : Deney – 3, yük – deplasman eğrisi.	209
Şekil 6.54 : Mobilize olan sürtünme direci değerlerinin derinlikle değişimi.	211
Şekil 6.55 : Deney – 3, geometrik model.	212
Şekil 6.56 : Deney – 3, zemin ve kazık parametreleri atanmış analiz modeli.	215
Şekil 6.57 : Deney – 3, zemin ve kazık parametreleri atanmış analiz modeli.	215
Şekil 6.58 : Deney – 3, analiz adımları.	216
Şekil 6.59 : SEM-1, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.	217
Şekil 6.60 : SEM-2, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.	218
Şekil 6.61 : SEM-3, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.	220
Şekil 6.62 : SEM-4, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.	220
Şekil 6.63 : SEM-5, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.	221
Şekil 6.64 : Test ve analiz sonucu elde edilen yük – deplasman eğrileri.	223
Şekil 7.1: Deney – 1, test yükünde SEM-5 analizi sonucu baret boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.	230
Şekil 7.2: Deney – 2, test yükünde SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.	232
Şekil 7.3: Deney – 3, test yükünde SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.	234
Şekil A.1: L = 63 m baret taşıma kapasitesi hesap föyü.	248
Şekil A.2: L = 51.7 m kazık taşıma kapasitesi hesap föyü.	249
Şekil A.3: L = 47.8 m kazık taşıma kapasitesi hesap föyü.	250
Şekil B.1: Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.	251
Şekil B.2: Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.	251
Şekil B.3: Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	252
Şekil B.4: Deney – 1, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.	252
Şekil B.5: Deney – 1, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.	253
Şekil B.6: Deney – 1, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	253
Şekil B.7: Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.	254
Şekil B.8: Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.	254
Şekil B.9: Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	255
Şekil B.10: Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.	255

Şekil B.11: Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	256
Şekil B.12: Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	256
Şekil B.13: Deney – 1, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	257
Şekil B.14: Deney – 1, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	257
Şekil B.15: Deney – 1, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	258
Şekil B.16: Deney – 2, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	258
Şekil B.17: Deney – 2, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	259
Şekil B.18: Deney – 2, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	259
Şekil B.19: Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	260
Şekil B.20: Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	260
Şekil B.21: Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	261
Şekil B.22: Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	261
Şekil B.23: Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	262
Şekil B.24: Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	262
Şekil B.25: Deney – 2, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	263
Şekil B.26: Deney – 2, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	263
Şekil B.27: Deney – 2, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	264
Şekil B.28: Deney – 2, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	264
Şekil B.29: Deney – 2, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.....	265
Şekil B.30: Deney – 2, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.	265
Şekil B.31: Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	266
Şekil B.32: Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.	266
Şekil B.33: Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.....	267
Şekil B.34: Deney – 3, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	267
Şekil B.35: Deney – 3, SEM – 2 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.	268
Şekil B.36: Deney – 3, SEM – 2 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.....	268
Şekil B.37: Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	269
Şekil B.38: Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.	269
Şekil B.39: Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.....	270
Şekil B.40: Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.....	270
Şekil B.41: Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.	271
Şekil B.42: Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.....	271

Şekil B.43: Deney – 3, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar	272
Şekil B.44: Deney – 3, SEM – 5 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.	272
Şekil B.45: Deney – 3, SEM – 5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.....	273
Şekil C.1: Deney – 1, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	274
Şekil C.2: Deney – 1, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	274
Şekil C.3: Deney – 1, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	275
Şekil C.4: Deney – 1, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	275
Şekil C.5: Deney – 1, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	276
Şekil C.6: Deney – 2, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	276
Şekil C.7: Deney – 2, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	277
Şekil C.8: Deney – 2, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	277
Şekil C.9: Deney – 2, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	278
Şekil C.10: Deney – 2, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	278
Şekil C.11: Deney – 3, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	279
Şekil C.12: Deney – 3, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	279
Şekil C.13: Deney – 3, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	280
Şekil C.14: Deney – 3, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	280
Şekil C.15: Deney – 3, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.....	281

SEMBOLLER

A_p	: Kazık enkesit alanı
A_s	: Kazık çevre alanı
a_{sb}	: Baret birim çevre sürtünme genişliği
a_{sp}	: Kazık birim çevre sürtünme genişliği
B_g	: Kazık grubunun plandaki genişliği
c	: Kayadaki çatlak aralığı
c_a	: Kazıkla zemin arasındaki adhezyon
C_s	: Koni penetrasyon direnci çevre sürtünme katsayısı
C_t	: Koni penetrasyon direnci uç temas katsayısı
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
C_1	: Osterberg test, kazık ağırlık merkezi faktörü
d	: Kayaya soketli kazıklarda derinlik katsayısı
D	: Kazık çapı
D_f	: Kazık ucunun zemin yüzeyine mesafesi
D_s	: Kazığın kaya içerisindeki soket çapı
E_p	: Kazık malzemesinin elastisite modülü
E_s	: Kazık ucundaki zeminin elastisite modülü
\bar{f}_s	: Koni penetrasyon deneyinde ortalama çevre sürtünmesi
f_1	: Pressiyometre deneyi soket bölgesindeki birim çevre sürtünmesi
f_s	: Kazığın birim çevre sürtünme direnci
H_f	: Tabaka kalınlığı
I	: Kazık grubu oturması etki faktörü
I_p	: Kazık grubunda, L/B oranına bağlı etki faktörü
I_{wp}	: Uç direncinin neden olduğu oturma etki faktörü
I_{ws}	: Sürtünme direncinin neden olduğu oturma etki faktörü
j	: Kayanın kütle faktörü
k	: Pressiyometre deneyi taşıma kapasitesi faktörü
K_s	: Yatay toprak basıncı katsayısı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
L	: Kazık boyu
L_e	: Efektif kazık boyu
L_s	: Kazığın kaya içindeki soket boyu
m	: Kazığın uç kapasitesinin hesabında kullanılan deneysel katsayı
n	: Kazığın sürtünme kapasitesinin hesabında kullanılan deneysel katsayı
N_c, N_q, N_γ	: Terzaghi taşıma gücü katsayıları
$SPT-N$: SPT değeri
$SPT-\bar{N}$: Kazık boyunca ortalama SPT değeri
p	: Kazık çevresi
p_L^*	: Pressiyometre deneyi, net limit basınç
q_a	: Emniyetli birim uç taşıma gücü
Q_d	: Kazık grubundaki her bir kazığın taşıma kapasitesi
q_p	: Birim uç gerilmesi

Q_p	: Kazığın uç kapasitesi
q_{ccpt}	: Koni penetrasyon uç direnci
q_E	: Efektif koni penetrasyon direnci
q_{Eg}	: Efektif koni penetrasyon uç direnci geometrik ortalaması
$Q_{gd(u)}$: Kazık grubunun nihai taşıma kapasitesi
Q_s	: Kazığın çevre sürtünmesi
q_T	: Düzeltilmiş koni penetrasyon direnci
q_i'	: Net birim uç koni penetrasyon direnci
q_u	: Tek eksenli basınç dayanımı
Q_u	: Nihai kazık taşıma kapasitesi
Q_{wp}	: Servis yükü altında kazık uç yükü
Q_{ws}	: Servis yükü altında toplam sürtünme kapasitesi
$Q_{\uparrow A}$: Yukarı yönde O-cell yükü
$Q_{\uparrow A}'$: Kazık üst parçası ağırlığı çıkarılmış, yukarı yönde net O-cell yükü
$Q_{\downarrow A}$: Kazık alt parçası ağırlığı çıkarılmış, aşağı yöndeki net O-cell yükü
$Q_{\downarrow A}'$: Aşağı yöndeki O-cell yükü
s	: Kazığın oturması
s_e	: Kazığın elastik sıkışması
$s_{g(e)}$: Kazık grubunun elastik oturması
s_p	: Kazık uç direncinden kaynaklanan oturma
s_s	: Kazık sürtünme direncinden kaynaklanan oturma
u_2	: CPT, Konik uç gerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı
W_p	: Kazık ağırlığı
α	: Azalatma faktörü
β	: Sürtünme Katsayısı
β	: Kayadaki süreksizlik düzlemlerine ilişkin düzeltme faktörü
ΔL	: Birim kazık boyu
ϕ_u'	: Drenajsız kayma mukavemeti açışı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
γ'	: Zeminin su altındaki birim hacim ağırlığı
γ_f'	: Dolgunun su altındaki birim hacim ağırlığı
σ_h'	: Efektif yatay gerilme
σ_v'	: Efektif düşey gerilme
σ_{vI}'	: Kazık üzerindeki herhangi bir noktadaki efektif düşey gerilme
μ_s	: Zeminin poisson oranı
η	: Kazık grup etki faktörü
δ	: Kazık – zemin arasındaki sürtünme açısı
δ_e	: Osterberg test sonucunda, kazığın elastik boy kısalması
δ_s	: Osterberg test sonucunda, kazığın ucundaki zeminin elastik sıkışması
δ_{sp}	: Osterberg test sonucunda, kazığın ucundaki zeminin sıkışması
δ_{OLT}	: Osterberg deneyindeki toplam elastik sıkışma
$\delta_{\uparrow(L_1+L_2)}$: Osterberg test, L ₁ ve L ₂ boyunca toplam elastik sıkışma
$\delta_{\downarrow(L_1+L_2)}$: Osterberg test, L ₁ ve L ₂ boyunca aşağı yönlü sıkışma
ω	: Yük – deformasyon bağıntısının şekline bağlı katsayı

İKİ YÖNLÜ STATİK YÜKLEME DENEYİ VE NÜMERİK ANALİZLERLE KAZIK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Geoteknik Mühendisliği'nde üst yapıdan gelen yüksek mertebelerdeki yüklerin taşınması için yüzeysel temellerin yeterli olmadığı durumlarda derin temel sistemleri ve bu sistemlerden en yaygın olarak da kazıklı temeller kullanılmaktadır. Üst yapı yüklerinin fazla olması nedeniyle, kazıklı temel olarak tasarlanan sistemin izin verilen oturma sınırlarını aşması veya bu sistemin ekonomik olmadığı durumlarda baret temel sistemi tercih edilmektedir. Baret temeller dikdörtgen şeklinde olup, eşdeğer çaptaki kazıklara göre daha fazla taşıma kapasitesine sahiptir.

Bir sahada imal edilecek fore kazık ve baretin çalışma şekli ve taşıma kapasitesi proje sahasında gerçekleştirilen zemin araştırmaları ve laboratuvar çalışmaları sonrasında elde edilen veriler ile belirlenebilmektedir. Kazıkların taşıma kapasitesinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlar, zeminin mühendislik özellikleri dikkate alınarak statik kazık formülleri ile yapılan kapasite hesapları, sahada uygulanan kazık yükleme deneyleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen nümerik analizlerdir. Statik hesaplamalarda kazığın veya baretin uç ve sürtünme kapasitesi ayrı ayrı bulunabilmektedir. Kazık yükleme deneyleri saha koşullarındaki davranışı belirlemek tasarımın güvenliğini ve doğruluğunu test etmek için en etkin yöntemdir. Saha davranışına en yakın zemin modeli ile gerçekleştirilen nümerik analizler ise imalat öncesi ve sahada gerçekleştirilen deney sonrasında yapılan yaklaşımların kontrolü için destekleyicidir.

Bu çalışma kapsamında, kazık davranışı ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla geleneksel kazık yükleme ve Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü statik kazık yükleme deneylerinin sonuçları ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Arazi deneyleri ve nümerik analizler sonucu elde edilen deplasman ve mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri dikkate alınarak kazık ve baret temel tasarımı değerlendirilmiştir.

Bu amaçla, iki yönlü statik yükleme ve geleneksel kazık yükleme deneyinin gerçekleştirildiği kazık ve baret, arazi deneylerinden elde edilen zemin parametreleri dikkate alınarak sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş, sahada yapılan deneyler sonucunda elde edilen deplasman değerleri göz önünde bulundurularak nümerik analizler sırasında parametrik yaklaşımlar yapıp kazık ve baret için seçilen modelin uygunluğu kontrol edilmiştir. Kapasite hesapları yapılan kazık ve barette yük altında oluşan teorik deplasman değerleri, sahada gerçekleştirilen Osterberg yük hücresi kullanılarak yapılan iki yönlü statik yükleme deneyi ve geleneksel kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen mobilize sürtünme direnci, deplasman değerleri ile nümerik analizlerle elde edilen sürtünme direnci ve deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Sahada gerçekleştirilen deneyler sonucunda gözlenen deplasman ve kazık gövdesi boyunca mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri ve nümerik analizler sonucunda elde edilen verilere etki eden faktörler irdelenmiştir.

Parametrik yaklaşımlar ile yapılan nümerik analizler ve sahada gerçekleştirilen yükleme deneyleri sonucunda, sahada gerçekleştirilen yükleme deneylerinde kazık ve barette oluşan deplasman değerleri ile kazık ve baret gövdesinde mobilize olan çevre sürtünme direnci, aynı zemin parametreleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analizler sonucu elde edilen deplasman ve mobilize olan çevre sürtünme direnci değerlerinden daha küçük elde edilmiştir. Arazi yükleme deneyleri ve nümerik analizler sonucunda gözlenen bu farklılıkların; sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde modelin sahada yükleme deneylerinin yapıldığı bölgenin karakteristik özelliğini tam yansıtamaması, modelde malzeme davranışının tam rijit olarak kabul edilmesi, sahada imalat sırasında zeminde oluşabilecek örselenmenin nümerik analizlerde tanımlanamaması ve yeteri kadar özenli olmayan imalatın deney sonuçlarını etkilemesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

Bu sebeple, arazi yükleme deneyleri ve nümerik analiz sonuçlarının doğru şekilde değerlendirilmesi için; nümerik analizlerde kullanılan zemin parametrelerinin ortalama değerler alınarak yüksek güvenlikle çözülmesi, sahada gerçekleştirilen sondaj loglarının deney bölgesine yakın yerlerde yapılması, nümerik analizlerin farklı malzeme ve zemin modeli kullanarak analiz sayısının artırılması ile baret ve kazık davranışının genellenebileceği düşünülmektedir.

INVESTIGATION OF PILE BEHAVIOUR WITH BIDIRECTIONAL STATIC LOADING TEST AND NUMERICAL ANALYSIS

SUMMARY

Deep foundation system is used for handling of loads in high places from the superstructure in Geotechnical Engineering, in cases where the shallow foundations are not enough bearing capacity. Piled foundations are most commonly used in these systems. Due to the higher load of the superstructure, barette foundation is preferred in case where the system designed as pile foundation exceeds the permissible settlement limit or this system is uneconomical. Barette foundation is rectangular, has a greater bearing capacity than the equivalent diameter of the pile.

Bearing capacity and the type of the bored pile and barette which will be constructed in-situ can be determined by the data obtained after the laboratory studies and the in-situ investigations in the project area. Several methods are available for determining the bearing capacity of piles. These are the capacity calculations made with static pile formulas considering the engineering properties of soil, pile load tests which are applied in the field and the numerical analysis performed by the finite elements method. Tip and friction capacity of the barette or pile can be obtained separately in static calculations. Pile load tests are the most effective methods to determine its behaviour of the in-situ conditions and for testing safety and accuracy of design. The numerical analysis that were performed with the most suitable soil model of constructing behaviour is supported to the control of approaches after the analysis made in the field and before constructing.

In this study, to be determined pile behavior and bearing capacity, the conventional pile loading and bi-directional static pile loading test results made with Osterberg load cell and the numerical analysis results made with the finite elements method were compared. Pile and barette foundation design is evaluated to consider the displacement and mobilizing skin friction values that obtained by the field test and numerical analysis results.

For this purpose, the pile and the barette which were done bi-directional static loading and conventional pile loading tests, were modeled with the finite elements method taking into consideration the soil parameters obtained from the field tests. The suitability of the specified model for the pile and barette has been checked with the displacement values obtained by the analysis conducted in the field and depending on the parametric approaches made during numerical analysis. Theoretical displacement values occurred under the test load in the pile and barette which were done capacity calculations, displacement and mobilised skin friction values which have been observed from bidirectional static loading and conventional pile loading tests have been compared with displacement and mobilised skin friction values from numerical analysis. The factor affecting the data which were obtained as a result of the numerical analysis and the displacement observed in the end of the tests in the field and the skin friction values mobilized along the pile shaft have been examined.

Based on the numerical analysis made with parametric approaches and loading test conducted on the field, the displacement values occurred in barette and piles in the loading tests with the skin friction values which have been mobilized on the pile and barette sahft has been determined as much as smaller than mobilized skin friction values and displacement values which were obtained as a result of numerical analysis made by the finite elements method in the same soil parameters. The differences observed in the results of field loading tests and numerical analysis has been considered to occur as a reason of that the model could not have exactly showed the characteristic properties of the area made by the numerical analysis with the finite elements method came out, the behaviour of the materials could not have approved as currently rigid in the model, the distribution which will be occurred in the soil during the construction could not have identified and affecting of the analysis results by the construction which has not been careful enough.

In this cases, for evaluating of the in-situ loading tests and numerical analysis correctly; soil parameters used in the numerical analysis should be solved in high security by taking average values, borehole logs conducted in the field should be made in close to experimental area, and also the acts of the barette and pile is expected to be generalized by increasing the analysis the usage with the different materials and soil model.

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisindeki gelişmeler ve yaşam şeklindeki değişimler, çeşitli standartları ve bu standartlara uygun biçimde değişim ve gelişimi beraberinde getirmektedir. Değişimlere paralel olarak, gereksinimlerin artması ve insanoğlunun hayata daha aktif biçimde bağlanabilmesi amacıyla mühendislik alanında kapasitenin artırılması amacıyla farklı tasarımların ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Mühendislik alanında yaşanan gelişim ve değişimden, inşaat mühendisliği de doğrudan etkilenmiştir. Sanayi ve endüstrideki gelişmeler, iş alanı ve iş gücü gerekliliğini ortaya çıkartmakla beraber, kontrolsüz göç ve istihdam olanakları ile birlikte büyükşehirlerde yaşam alanı sorunlarını beraberinde getirmiştir. Sanayi ve kentsel yerleşimde artan kat adedi, yapı yüklerinin artmasına, geoteknik mühendisliği açısından bu yüklerin güvenli şekilde taşınabilmesi için geleneksel temel sistemlerinin gözden geçirilmesini ve gelişmiş metodaların kullanıldığı uygulamaların yapılmasına olanak sağlamıştır.

Ülkemizde ve dünyada depremselliğin etkisinde göz önünde bulundurularak üst yapı yükleri deprem etkisi altında irdelendiğinde, yüzeysel temeller tarafından taşınamaması ve zemin özelliklerine bağlı olarak oturma kriterlerinin sağlanmaması durumunda derin temel sistemleri çözüm olarak kullanılmaktadır. Derin temel uygulamalarında, ülkemizde ve dünyada çözüm olarak genelde betonarme kazıklar ve kazıkların özel formasyonu olan baretler kullanılmaktadır. Baret ve kazıklar çeşitli standart ve şartnamelere bağlı olarak tasarlanmaktadır. Mühendisliğin her alanında olduğu gibi, geoteknik mühendisliğinde de kazıklı temel sistemlerinin tasarımında maliyet - güvenlik analizi yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, üst yapı yüklerinin kazıklar ile taşınamaması ya da kazık tasarımında maliyet faktörünün artması ve kazık imalatı için gerekli teçhizatın yetersiz olması sebebiyle, kazıklar yerine dikdörtgen kesitli ve aynı beton ve demir miktarıyla %35'e varan kapasite üstünlüğü sağlayan baret temeller kullanılmaktadır. Baret temeller şekli itibariyle fore kazıklara göre daha fazla çeper sürtünmesine sahip olup daha fazla taşıma kapasitesine sahiptirler (Lei, 2001).

Güvenlik faktörleri dikkate alınarak, arazi deney verileri ve statik kazık formülleri ile kapasitesi hesaplanan kazığın ve baretin imalatının tamamlanmasından sonra, davranışının gözlemlenmesi temel sisteminin güvenliği için önem arz etmektedir. Bu amaçla tam ölçekli kazık yükleme deneyleri, tasarımın desteklenmesi ve gözden geçirilmesi için gereklidir.

Geleneksel kazık yükleme deneyi için gerekli reaksiyon sisteminin mobilizasyonunun iş gücü gerektirmesi ve maliyetinin yüksek olması sebebiyle, daha pratik ve derinlikle kazıkta meydana gelen gerilmeleri detaylı şekilde irdeleme olanağı sağlayan, kazığın uç ve çevre direncini daha net ve ayrı ayrı gözlemleyebilmek amacıyla Osterberg yük hücresi kullanılarak geleneksel kazık yükleme deneyine alternatif Osterberg (O-cell) deneyi gerçekleştirilmektedir. O-cell testi ile yüksek yükler altında güvenli şekilde kazık ya da baret davranışı gözlemlenmektedir. Osterberg deneyi, gerçekleştirilecek yük kapasitesine göre geleneksel kazık yükleme deneyinden daha ekonomik olmaktadır (England, 2003a).

Kazık ve kazık gruplarının kapasitesinin belirlenmesinde, ne yalnızca statik ve amprik yöntemlerle yapılan hesaplar, ne de kazık yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma, yük-gerilme verileri tasarımda etkin çözüm değildir. Statik analizler ile arazide gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi ve imalat kalite gözlemlerine ek olarak yapılan numerik analizlerle tasarımın güvenliği irdelenerek gerekli kazık optimizasyonu sağlanabilmektedir. Yapılacak olan numerik analizler ile yükleme deneylerinde kazık ya da baretin yük altındaki davranışı hakkında detaylı bilgiler elde edilir. Buna ek olarak, sahada gerçekleştirilen imalatın kalitesinin kontrolü için de çeşitli arazi testleri gerçekleştirilir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Sürtünme kazığı ve baretini olarak imal edilen yada kazık kapasitesini oluşturan çevre sürtünme direncinin, uç direncinden daha fazla olduğu kazıkların veya baretin, servis yükü altında üst yapıdan gelen yükleri güvenle taşıyabilmesi için, kazık gövdesi boyunca sürtünme direncinin mobilize olması gerekmektedir. Literatürde yer alan araştırmalarda, sürtünme direncinin mobilize olması için baret ya da kazığın yük altında 5 – 10 mm kadar yer değiştirmesi gerektiği belirtilmektedir (Das, 2004). Kazık kapasitesinin belirlenmesi ve kazığın servis yükü altındaki davranışının gözlenebilmesi için arazi deneyleri çok etkindir. Arazi deneyleri sonrasında elde

edilen veriler yardımıyla gerekli kazık optimizasyonu ve kazık kapasite değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Statik kazık formülleri yardımıyla yapılan kapasite hesabı kontrolünün bir parçasını da, sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen numerik analizler oluşturur. Bu çalışmanın amacı, kapasite hesapları yapılan kazık ve barette yük altında oluşan teorik deplasman değerleri ile sahada gerçekleştirilen Osterberg yük hücresi kullanılarak yapılan iki yönlü statik yükleme deneyinden elde edilen mobilize sürtünme direnci ve deplasman değerleri ile numerik analizlerle elde edilen sürtünme direnci ve deplasman değerlerinin karşılaştırılması olmuştur. Buna ek olarak, sahada gerçekleştirilen deneyler sonucunda gözlenen deplasman ve kazık gövdesi boyunca mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri ve numerik analizler sonucunda elde edilen verilere etki eden faktörlerin irdelenmiştir. Bu amaçla, iki yönlü statik yükleme ve geleneksel kazık yükleme deneyinin gerçekleştirildiği kazık ve baret, arazi deneylerinden elde edilen zemin parametrelerini dikkate alarak sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş, sahada yapılan deneyler sonucunda elde edilen deplasman değerleri göz önünde bulundurularak numerik analizler sırasında parametrik yaklaşımlar yaparak kazık ve baret için seçilen modelin uygunluğu kontrol edilmiştir.

1.2 Kapsam

Bu çalışma kapsamında fore kazık ve baretin, arazide gerçekleştirilen incelemeler ve arazi deneylerinden elde edilen veriler yardımıyla hesaplanan kazık kapasitelerinin kontrolü ve saha koşullarındaki gerçek durumunu gözlemek amacıyla, sahada gerçekleştirilen Osterberg yük hücresi ve geleneksel kazık yükleme deney sonuçları incelenmiştir. Ayrıca, sahada gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme ve iki yönlü statik yükleme deneyleri, sonlu elemanlar metodu ile yapılan numerik analizler ile kazık yükleme deneyler sonucunda elde edilen mobilize çevre sürtünme direnci değerleri karşılaştırılmış ve kazık davranışları değerlendirilmiştir.

2. Bölüm’de kazıkların sınıflandırılması, kazık çeşitlerinin karşılaştırılması, yapım yöntemleri ile fore kazıkların dikdörtgen kesiti olan baret temel, baret temelin üstünlükleri ve imalat şekli hakkında geçmiş ve güncel kaynaklar araştırılarak literatürden bilgiler verilmiştir.

3. Bölüm’de kazık ve baretin düşey yük taşıma mekanizmaları ile düşey yük kapasite hesabında kullanılan yöntemler ve yük altında kazık ve kazık gruplarının davranışı hakkında literatürden bilgiler verilmiştir.

4. Bölüm’de sahada kazıklar ve baret üzerinde gerçekleştirilen gelenkesel ve iki yönlü statik yükleme deneyi, deney ekipmanları, deneylerin yapılışı, deneylerin karşılaştırılması ve sonuçlarının sunumu ile ilgili bilgiler verilmiştir.

5. Bölüm’de kazık ve baret kapasite kontrolü ve kazık davranışının modellenmesi amacıyla çalışma kapsamında kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ve bu yöntemle analiz yapan Plaxis programı, modelin oluşturulması, zemin ve malzeme modelleri, zemin ve malzeme parametrelerinin modele atanması ve analiz adımları ile ilgili literatürden bilgiler verilmiştir.

6. Bölüm’de tez kapsamında yer alan üç vaka analizine yer verilmiş, baret temel ve fore kazığın imal edilidği proje bilgileri, baret ve fore kazık taşıma kapasiteleri, literatürde yer alan bağıntılar yardımıyla yaklaşık oturma hesapları, baret ve fore kazık üzerinde gerçekleştirilen kazık yükleme deneyleri, sonlu elemanlar metodu ile parametrik yaklaşımlarla yapılan numerik analizler sonucu elde edilen verileri ile arazi deney sonuçlarından elde edilen kazık davranışlarının karşılaştırılmış ve sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Sonuç ve öneriler bölümde, saha incelemeleri ve laboratuvar deneyleri sonrasında elde edilen veriler ile zeminlerin mühendislik parametreleri için literatürde yer alan öneriler göz önünde bulundurularak, her vaka analizinde saha deplasman değerlerini elde etmek ve çevre sürtünme kapasitesini değerlendirmek amacıyla beş adet parametrik yaklaşımla gerçekleştirilen numerik analizler ve test sonuçları ile ilgili değerlendirmeler yapılmış ve öneriler verilmiştir. Kazık ve baretin saha ve numerik analizi soncunda elde edilen veriler ışığında yük altındaki davranışı karşılaştırılmıştır. Saha koşulları ve parametrik yaklaşımlarla yapılan nümerik analizlerin kazık ve baret kapasitesinin değerlendirilmesindeki etkisine yer verilmiştir.

2. DERİN TEMELLER

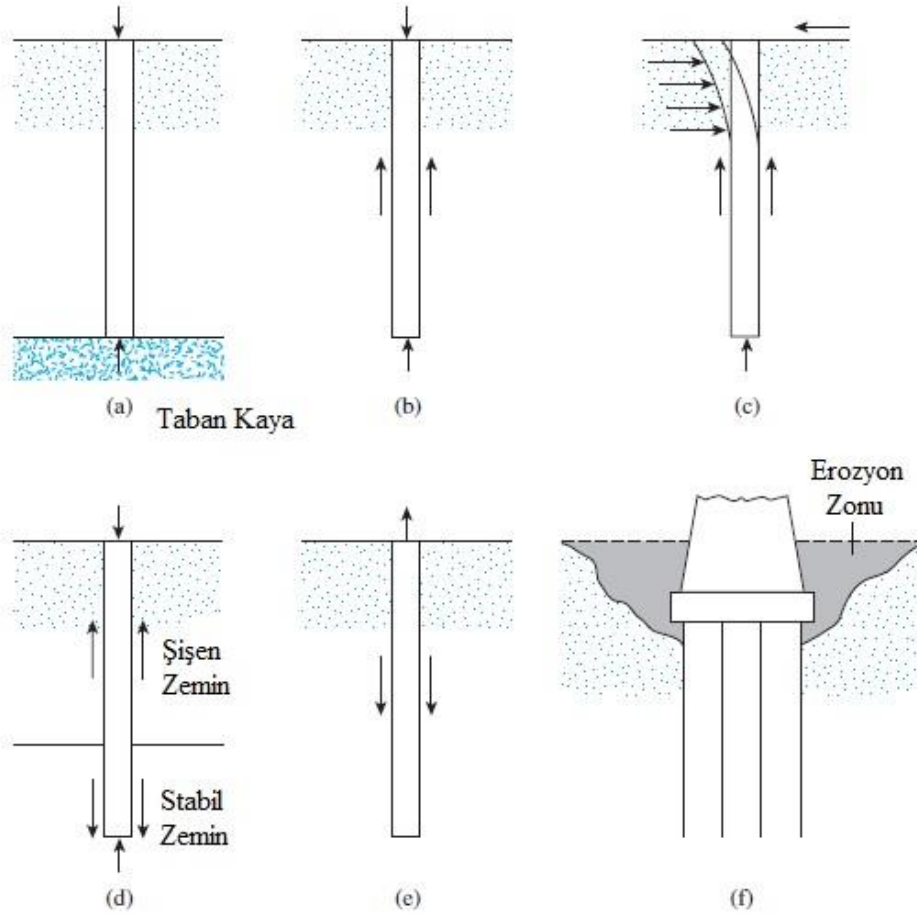
Üst yapıdan gelen yükleri kısmen ya da tamamen zemin yüzeyinden daha derinde yer alan sağlam tabakalara aktaran, temel derinliği ile temel genişliği oranı (Df/B) en az 5 ve daha büyük olan sistemler derin temel olarak isimlendirilmektedir (Bowles, 1996). Bu kapsamda derin temellerin kazıklar, ayak - kesonlar ve günümüzde kullanımı yaygınlaşan fore kazıkların özel şekli olan baretten oluştuğu düşünülebilir.

Reese vd. (2006), kazıklı temellerin mühendislik çözümü olarak kullanımını aşağıdaki gibi özetlemektedir:

1. Üst yapıdan gelen yatay ve düşey yüklerin zemin yüzeyinden daha derinlerde bulunan ve taşıma gücü daha yüksek olan sağlam tabakalara güvenilir biçimde aktarılması amacıyla uç kazığı olarak tasarlanarak kullanılmaktadır.
2. Üst yapı yüklerini kısmen yumuşak ve gevşek zemin tabakalarına, sürtünme direnci yardımıyla güvenilir biçimde aktarılması amacıyla sürtünme kazığı olarak tasarlanarak kullanılmaktadır.
3. İri daneli ve gevşek zeminlerin taşıma kapasitesini arttırmak, tabakaların sıkışmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.
4. Yeraltı su seviyesi yüksek olan zeminlerde, yapıya etki edecek olan hidrostatik basınç ve döndürme etkisini sönmölemek ve yapının stabilitesini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır.
5. Taşıma kapasitesinin fore kazıklar ile sağlanmadığı durumda, daha fazla sürtünme ve uç kapasitesinin elde edilmesi amacıyla baret temel sistemleri kullanılmaktadır.
6. Erozyona maruz kalabilecek köprü ayaklarında ilave güvenlik oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır.
7. Açık-deniz platform inşasında yükün su yüzeyinden deniz altındaki tabakalara aktarılmasında kullanılır.
8. Yüksek oranda sıkışma özelliğine sahip zeminler üzerinde inşa edilen sürekli veya radye temellerde karşılaşılan oturmaların kontrolünde kullanılır.

9. Makine temelleri altında oluşacak titreşimler göz önünde bulundurularak, makine temelleri altındaki zeminlerin güçlendirilmesinde kullanılmaktadırlar.

Yukarıda maddeler halinde belirtilen, kazıklı temel gerektiren zemin ve yükleme koşulları ve kazıkların bu zemin kesitindeki çalışma prensibi ile ilgili bazı örnekler Şekil 2.1’de verilmektedir.



Şekil 2.1 : Kazıklı temellerin kullanım alanlarına göre çalışma prensibi (Das,2004).

(a) taban kaya üzerinde bir ya da birden fazla sıkışabilir veya zayıf zemin tabakası bulunması durumunda uç kazığı olarak çalışan kazık kesiti,

(b) taban kaya bulunmaması durumunda sürtünmeye çalışan kazık kesiti,

(c) yatay yük etkimesi durumunda kazık kesiti,

(d) temeller altında şişen zeminler bulunması ve sert zemin tabakasına soketlenmiş kazık kesiti,

(e) su altında kalan temellerde suyun kaldırma etkisine maruz kalan çekme kazığı kesiti,

(f) köprü, viyadük vb. yapıların ayak temelleri zemininde meydana gelen yüzey erozyonu kesiti.

2.1 Kazıkların Sınıflandırılması

Günümüz literatüründe kazıklar, çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu kapsamda yaygın olarak kazıklar aşağıdaki gibi üç gruba ayrılır (Toğrol ve Tan, 2003; Tomlinson, 2004; Das, 1999):

- İmal edildiği malzemenin cinsine,
- Yapım şekillerine,
- Çalışma prensibine göre.

2.1.1 İmal edildiği malzemenin cinsine göre kazıklar

Kazıkların imal edildiği malzeme cinsine bağlı olarak pek çok üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları olmakla birlikte, uygulama çeşidine göre uygun çözüm yöntemleri sunmaktadırlar. Coduto (2001), kazık tipini seçerken kazığın servis yükü, taşıma kapasitesini sağlayacak kazık çapı, gerekli kazık boyu, kazığın uygulanacağı bölgenin jeolojik yapısı, kazığın durabilitesi ve kazığın imal ediliş amacının göz önünde bulundurulması gerekliliğini vurgulamaktadır.

İmal edilen malzeme cinsine göre kazıklar aşağıdaki gibi 4 ana grupta toplanabilir.

- Ahşap kazıklar,
- Betonarme kazıklar,
- Çelik kazıklar,
- Kompozit kazıklar.

Bu tez kapsamını betonarme kazıklar oluşturmaktadır. Bu sebeple, betonarme kazıklar hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir. Yukarıda maddeler halinde sıralanan kazık tipleri hakkında literatürde Coduto (2001), Bowles (1996), Das (2004), Budhu (2007), Toğrol ve Tan (2003) tarafından geniş bilgiler verilmektedir.

2.1.1.1 Betonarme Kazıklar

Betonarme kazıklar günümüz teknolojisinde, uygulama kolaylığı ve zemin çeşidine bağlı olarak sağladığı taşıma kapasitesi ve maliyet faktörü göz önünde bulundurulduğunda ekonomik olması sebebiye yerinde dökme betonarme kazıklar olarak sık tercih edilmektedir. Ayrıca, betonarme kazıklar prefabrik olarak üretilmekte ve çakılma yoluyla zemine teşkil edilebilmektedir. Bu kapsam çerçevesinde, betonarme kazıkları betonarme çakma kazıklar ve betonarme yerinde dökme kazıklar olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Yerinde dökme betonarme kazıklar hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmektedir.

a. Betonarme Yerinde Dökme Kazıklar

Betonarme yerinde dökme kazıklar, kaplama borulu veya kaplama borusuz sondaj deliğinin açılarak donatının indirilmesi ve takiben açılan sondaj kuyusunun betonlanması şeklinde imal edilir. Ucu kapalı bir kaplama borusunun şahmerdan, hidrolik veya titreşimli bir çekiç vasıtası ile zemine itilmesi ile imalatı yapılan kazıklara “betonarme çakma kazık” adı verilmektedir. Ucu açık bir kılıf (koruma borusu) zemine itilerek ve bu koruma borusunun içinde yer alan zeminin temizlenerek forajı yapılan kazıklara, “sondaj kazığı ya da fore kazık” adı verilmektedir (Budhu, 2007).

Genel olarak yerinde dökme olarak imalatı yapılan kazıkların çapları değişken olmakla birlikte, donatılı veya donatısız ve kazık alt ucuna doğru genişleyecek şekilde imal edilebilirler. Bazı özel durumlarda ise çapları 300 mm ve daha küçük olacak şekilde “mini kazık” adıyla bilinen şekilde imal edilebilirler (Das, 1990).

Das (1990), yerinde dökme betonarme fore kazıkların üstünlüklerini aşağıdaki gibi özetlemektedir:

- Taşıma kapasitesinin sağlanması amacıyla tekil olarak kullanılabilir.
- Zeminin kohezyonlu ve kohezyonsuz olmasına göre uygun imalat yöntemleri mevcuttur.
- Temel alt kotuna kadar kazı yapılmadan ön delgi ile fore kazık imalatı gerçekleştirilebilir.
- Fore kazıkların imalatı sırasında oluşabilecek ses ve titreşim miktarı azdır.
- Yerinde dökme betonarme fore kazık imalatı sırasında kazık ucu genişletilerek kazığın uç taşıma kapasitesi artırılabilir.

- İmalat sırasında kazı yüzeyinden, kazık alt kotu görsel olarak derinliğe bağlı kontrol edilebilir.
- Foraj esnasında kazı, mobil ekipmanlar yardımı ile kontrol edilebilmektedir. Bu durum imalat sırasında fazla kazı ya da yataydan sapmayı belirleyerek ekonomi sağlamaktadır.
- Farklı çaplarda imal edilebilmesi sebebiyle yerinde dökme betonarme kazıkların yatay yüklere karşı taşıma kapasitesi fazladır.

TS 1536 uzunluklarına göre betonarme yerinde dökme kazıkların çaplarının en küçük değerleri Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi vermektedir.

Çizelge 2.1 : Yerinde dökme betonarme kazıkların en küçük çapları (TS 1536).

Kazık Boyu, L (m)	En küçük kazık çapı, D (mm)
$L \leq 10$	300
$10 < L \leq 15$	350
$15 < L \leq 20$	400
$20 < L \leq 30$	500

Yerinde dökme kazıkların imalatı için çeşitli yapım yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden uygun olanının seçilmesinde belirleyici olan etkenler arazinin geoteknik özellikleri ve tip kazığın imalata uygunluğudur.

2.1.1.2 Betonarme kazık yapım yöntemleri

Das (2004), yerinde dökme betonarme kazıkların yapımında kullanılan başlıca yöntemleri aşağıdaki gibi özetlemektedir:

- Kuru Yöntem:** Bu yöntem genel olarak yerlatı suyunun yer almadığı ve özellikle kendini tutabilen (kohezyonlu) zeminlerde ve kayalarda uygulanmaktadır. Zeminden kuyuya su sızması halinde bu yöntemle yapılacak imalatlarda ciddi stabilite kayıpları ortaya çıkmaktadır. Kuyu dibinde biriken su göçmelere neden olmakla birlikte, kuyu dibindeki zemin betona karışıp kazığın uç direncini düşürmektedir.
- Islak Yöntem:** Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu durumlarda ıslak yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntem genel olarak kazık çapının büyük olduğu durumlarda uygulanmaktadır. Kazı kotunun üst seviyesine yaka kılıfı yerleştirilerek kazı çeperinde oluşan su basıncına karşı aktif su basıncı

oluşturulur. Bu yöntemde genelde slurry denilen bentonit süspansiyonu kullanılmaktadır. Bentonit süspansiyonu mineral, sentetik ve doğal olabilir.

Mineral slurry, bentonit mineralinden ya da atapulgit mineralinin suyla karışımından oluşmaktadır. Mineral slurry, sudan biraz daha fazla yoğundur. Bu sebeple slurry, kazı üst seviyesinden 1 – 1.50 m daha yüksekte yaka kılıfı ile teşkil edilir. Bu kot farkı, başlangıçta kazı çeperine doğru yatay akışa sebep olmakta ve yavaş yavaş bentonit kazı yüzeyinde filtre çamuru oluşturmaktadır. İmalat süresi uzadıkça bentonit süspansiyonu zemin ile karışarak kazı dibinde birikintilerin toplanmasına neden olmaktadır. Bu yüzden teknik olarak betonlamadan önce, süspansiyonun içerisinde maksimum %4 oranında kum muhteviyatına izin verilmektedir (Das, 1990).

Sentetik slurry, polimer ile suyun karışımından oluşan şurup solisyonudur. Sentetik slurry kullanılarak yapılan imalatlarda karışım, kazı ve betonlama sırasında yeraltı su seviyesinin 1.75 - 2.00 m üzerinde tutulması gerekmektedir. Bu kot farkı, kazı çeperine doğru yatay akışa sebep olmasına rağmen filtre çamuru (filter cake) oluşturmamaktadır. Sentetik slurry kullanılması durumunda, zemin partiküllerinin kazı dibine çökmesi daha hızlı olmakla birlikte kazı dibinden temizlenebilmektedir.

Doğal slurry, hiçbir zaman zararlı suların (göl suyu, deniz suyu, kirli sular) bulunduğu bölgelerde kullanılabilir değildir. Yaka kılıfı, yeraltı su seviyesinden yaka yaklaşık 2.50 - 3.00 m yukarda tutulup gerekli stabilite sağlanır. Kot farkının sebep olduğu yatay akış yeterince hızlı olup kazı çeperinden dışarı doğru yeterli gerilme oluşturup stabilite sağlamaktadır. Bu yöntem iri daneli zeminler için uygun olmasına rağmen çok tercih edilmemektedir. Kazık makinasının oluşturduğu ufak gerilmeler, kazı çeperinde bölgesel göçmelere sebep olabilir. Bu yöntem su seviyesinin yüzeye yakın olduğu kil ve kaya formasyonlarında oldukça etkindir.

Yukarıda adı geçen süspansiyonların kullanımına izin verildiği zaman, bitmiş olan imalatta kazık gövdesinin kapasitesini etkilemektedir (Brown, 2000).

iii. Kılıflı Yöntem (Casing): Kazı çeperinin stabilitesi, kazı boyunca ya da kohezyonsuz zemin tabakasının yer aldığı kotta çelik kılıf ile sağlanabilir. Kılıf genellikle, ince bir çepere sahip çelik borudan oluşmakla birlikte kazı aparatından biraz daha geniş çaptadır. Kazı içerisine çakılarak, rotaty ile ya da vibrasyon ile teşkil edilir. Kazı sırasında, slurry ile stabilite sağlanmaması

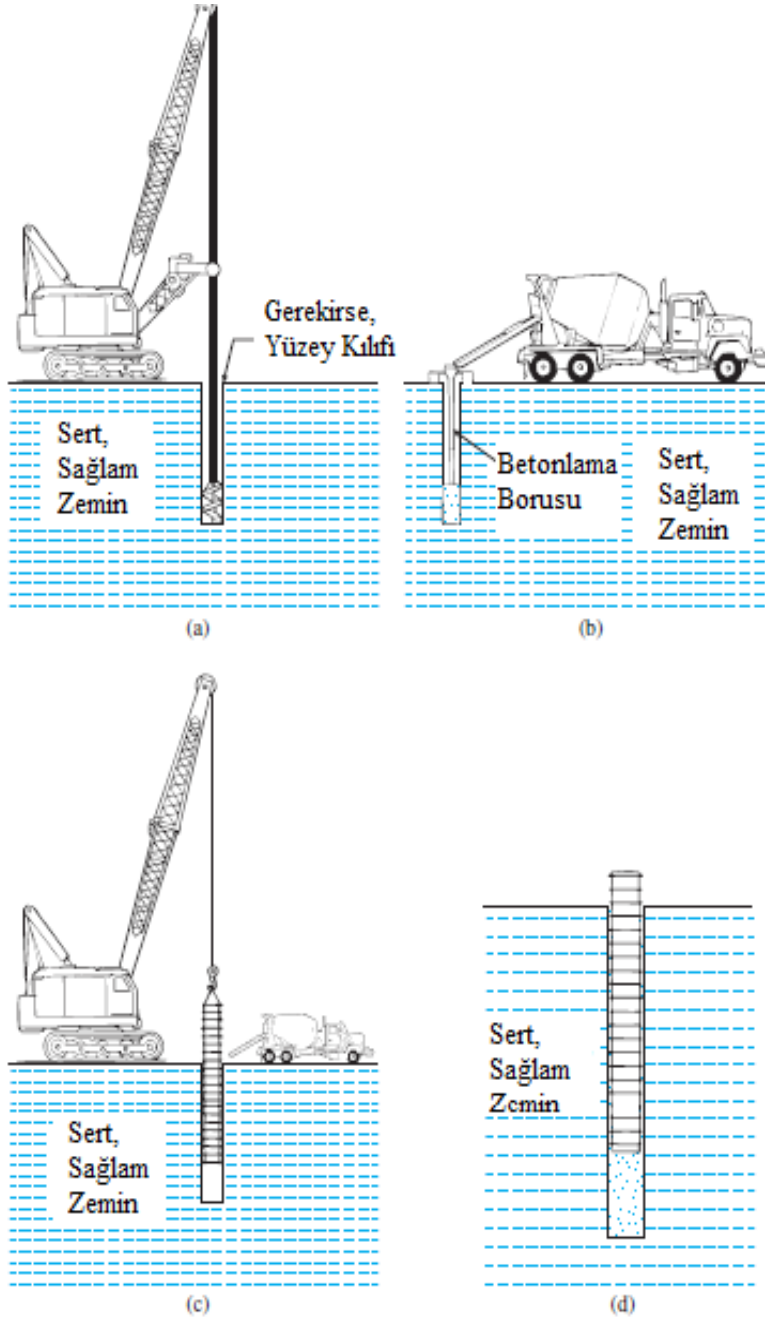
durumunda, kazı derinliğinin yüksek olduğu yerlerde ve zayıf zeminlerde kullanılmaktadır. Kılıf, betonlama işlemi bitene kadar kazı çukurunda tutulmalıdır. Kılıfın çekilmesi sırasında kazı çeperinde oluşabilecek deformasyonlar kazık kapasitesini doğrudan etkilemektedir (Camp ve diğ., 2002). Kazı derinliği boyunca kılıf kullanılması için, kazık çapının 30D veya 50D katı arasında bir kazı derinliğinde imalat yapılabilir.

- iv. Betonlama ve Karışık Yöntem:** Kazık imalatında kullanılan beton, genellikle yeteri kadar akışkan olup kuyu içerisinde yer alan slurry içerisinde ince veya iri agreganın ayrışmasını engellemek amacıyla tremi borusu ile dökülür. Tremi borusu yaklaşık olarak 20 - 30 cm çapında, ano boyları 3.00 - 6.00 metre arasında değişen çelik borudur. Tremi borusu betonlama işleminden önce düz bir hat boyunca kuyu dibine indirildikten sonra betonlama aşağıdan yukarı doğru yapılmaya başlar. Betonlama işlemi sırasında tremi borusu 1.50 - 3.00 m kaldırılarak kazık üst kotuna kadar betonlama devam ettirilir.

Kuru yöntemde ise betonlama serbest düşüşle yapılmasına rağmen, çoğu zaman yapımına izin verilmemektedir. Betonun serbest düşüşü, kazı çeperine uygulanan yatay basınca neden olmakta, boşluk oranını azaltmakta ve betonun yoğunluğunu arttırmaktadır. Bununla birlikte serbest düşüş sebebiyle hız kazanan beton etriyelerin bağlarını kopartmakta, beton içerisindeki hava boşluk oranını azaltmaktadır.

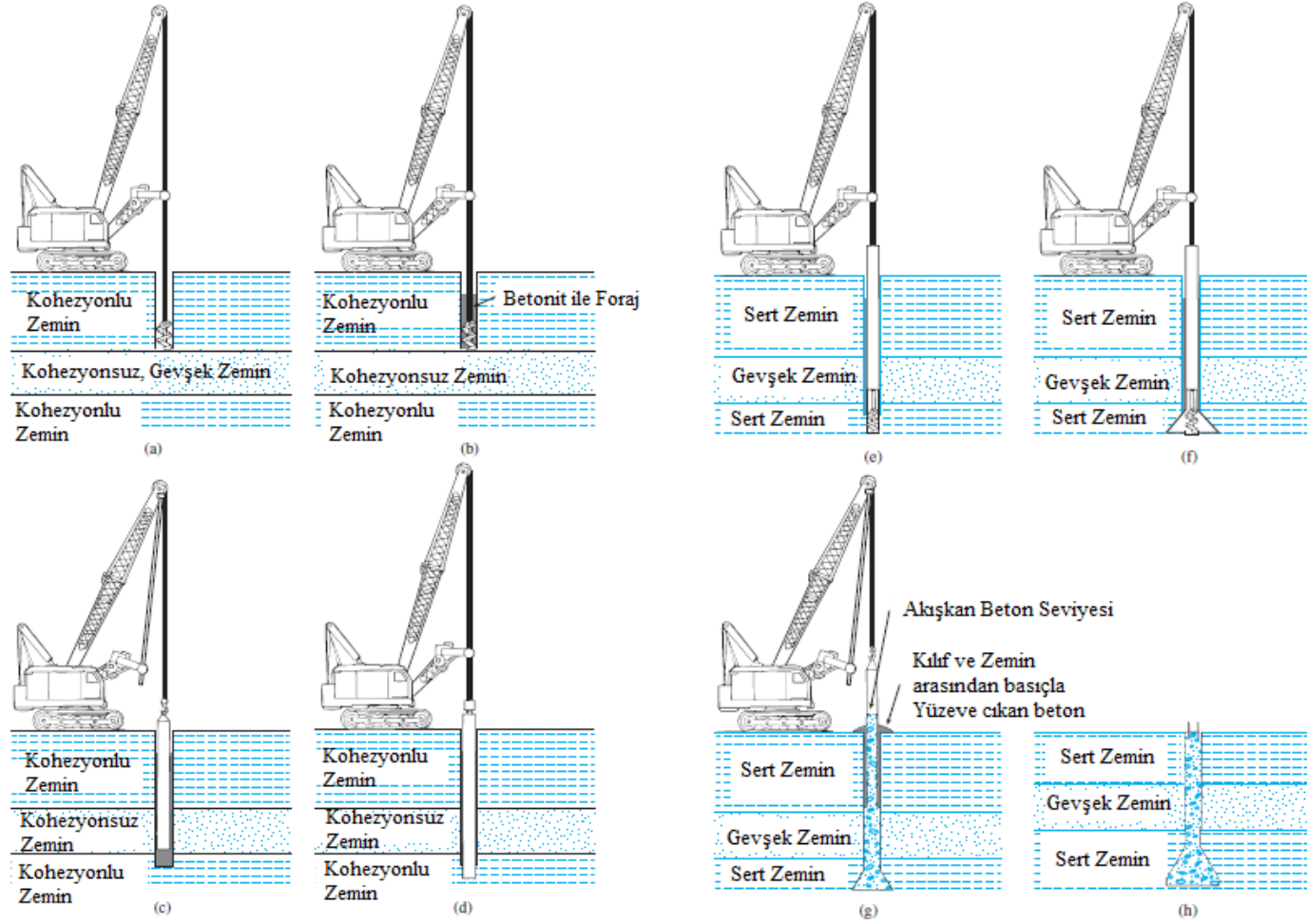
Fore kazıklarda kullanılan karışık yöntemde, akışkan betonun kazı çeperine yatay basınç sağlaması için betonun etkili slump miktarı 15 - 20 cm arasında olmalıdır. Daha da önemlisi betonlama süresince beton slump değeri 10 cm değerinden az olmamalıdır. Tremi borusunu veya yaka kılıfı çıkarıncaya kadar geçen süre içerisinde, negatif yatay basınç oluşumunu engellemek amacıyla beton yeteri kadar akışkan olmalıdır. Yapılan son çalışmalar neticesinde slump değerinin 10 cm 'den daha küçük olması durumunda kazık gövdesinde oluşan sürtünme direnci azalmaktadır. Çünkü, kazık betonunun dökümü sırasında herhangi bir vibrasyon uygulanamamakta ve bu yüzden betonun içerisinde yer alan agreganın donatı kafesinden geçecek kadar küçük olması gerekmektedir. Donatı aralığı, maksimum agrega çapının 3 ila 5 katından küçük olmayacak şekilde teşkil edilmelidir (FHWA, 1999).

Yerinde dökme betonarme kazık imalatı için kullanılan yöntemlere ait şematik gösterimler Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.2 : Kuru yöntemle fore kazık imalatı, (O'Neill ve Reese, 1999)

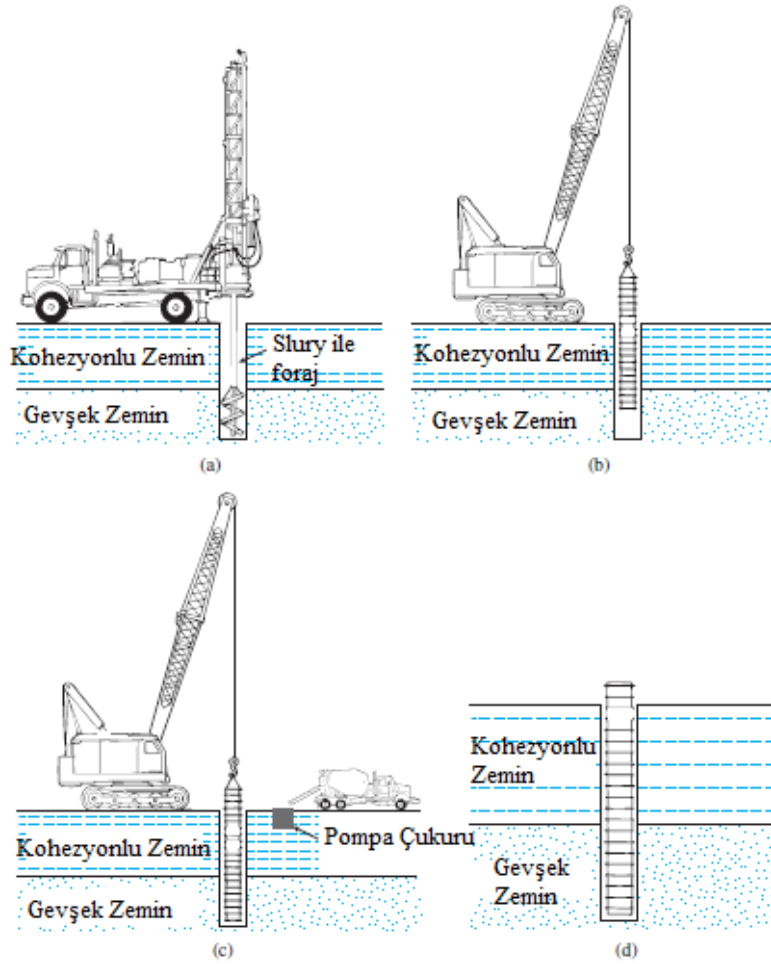
Şekil 2.2'de gösterilen kuru yöntemle imalattta kazı burgu ile kazık alt kotuna kadar tamamlandıktan sonra, kuyu içerisine donatı kafesi indirilir ve ardından betonlanarak imalat tamamlanır.



Şekil 2.3 : Kılıflı yöntem, (O'Neill ve Reese, 1999)

Şekil 2.3'te belirtilen kılıflı yöntemde imalat adımlarını detaylı olarak incendiğinde:

Forajı yapılacak olan kazık kuyusunun ön delgisi burğu ile kohezyonlu zemin tabakası sınırına kadar gerçekleştirilir, daha sonra kuyu stabilitesini sağlamak amacıyla kuyuya bentonit eklenir, bentonit ile birlikte kohezyonsuz zemin tabakasının at kotuna kadar kılıf ile foraja devam edilir. Sonrasında bentonit kuyudan çekilerek, koruma kılıfı ile kuyu dibine kadar inilerek foraj tamamlanır. Forajın bitmesiyle birlikte donatı kuyuya indirilir ve betonlama işlemi sırasında kılıf yavaşça çekilerek imalat tamamlanır. Kılıflı yöntemle imalat genellikle kohezyonsuz zeminlerde gerçekleştirilir.



Şekil 2.4 : Slury Metodu ile imalat, (O'Neill and Reese, 1999)

Şekil 2.4'te gösterilen bentonit süspansiyonu ile yapılan imalat su seviyesinin platform kotuna yakın olduğu kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılır. Forajın başladığı ve kuyu dibine ulaşıp donatının indirilmesine kadar bentonit

(slurry) kullanılır. Bentonlama işlemi ile aynı anda pompa yardımıyla kuyudan bentonit çekilerek imalat tamamlanır.

Yerinde dökme betonarme kazıkların yapım aşamasından sonra tasarlanan servis yükünü karşılayabilmesi ve yapısal stabilitenin korunabilmesi için gerekli yapım ve uygulama detayları aşağıdaki gibidir (Das, 2004).

- Kazı çeperinin stabilitesi sağlanmalıdır. Yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu bölgelerde zemin stabilitesinin sağlanması amacıyla kılıf veya bentonit süspansiyonu ile foraj yapılması gerekmektedir.
- Kazı çukuru donatı kafesi indirilmeden temizlenmelidir, aksi takdirde kazı çeperinden düşen zemin daneleri kazık uç kapasitesini düşürmektedir.
- Kazı çukurunun hazırlanması ile betonlanması arasındaki süre minimuma indirgenmelidir.
- Kazığın forajı, ıslak yöntem (bentonit süspansiyonu) ile yapılacak ise, bentonitin kazı çeperinde filtre tabakası oluşturmaması için yoğunluk, akışkanlık ve kum oranı beton dökümü ve foraj öncesi kontrol edilmeli, eğer şartname sınır değerlerini aşıyor ise şartname sınır değerleri içinde kalana kadar kuyu içerisindeki bentonit sirkülasyonu sağlanmalıdır.
- Kazık boyunca gerçekleştirilen kazı derinliği, kazı tabanından itibaren 1.00 m daha ilerletilir. Böylece betonlama sırasında, kılıfın çekimi ile aynı anda betona zemin ve su girişi engellenerek kılıfın yukarı çekilmesi kolaylaştırılır.
- Betonlamayı kolaylaştırmak için etriyeler arası mesafeler, pas payları uygun değerlerde seçilmelidir. TS EN 1536 tarafından önerilen paspayı ve enine donatı aralıkları aşağıdaki gibidir.
 - Enine donatı aralığı en çok 150 - 200 mm mesafede ve spiral şeklinde olmalıdır.

Pas payı;

- Kazık çapı 60 cm'den büyük olanlarda 60 mm, 60 cm'den küçük olanlarda ise 50 mm olmalıdır.
- Kazığın muhafaza borusuz olarak yumuşak zeminde imal edilmesi, donatının betonlama işleminden sonra indirilmesi, kazık çukur çeperlerinin düzensiz olduğu, betonun su seviyesini altında ve beton

agregasının $D_{maks}= 32$ mm olarak döküldüğü durumlarda 75 mm olarak yapılabilir.

2.1.2 Yapım şekillerine göre kazıklar

Uygulamada kullanılan yapım teknolojilerini ele alındığında, genel bakış açısıyla kazık çeşitleri yapım şekline göre başlıca iki gruba ayrılır. Bu kapsamda sırasıyla, zeminde büyük veya küçük yerdeğiştirmelere sebep olan çakma kazıklar ile zeminde yer değiştirme yapmayan sondaj kazıklarının imalat şekli sınıflandırmayı belirler. İmalatı şantiye alanında ya da prefabrik olarak gerçekleştirilen betonarme, çelik ve ahşap kazıkların zemine teşkilinde, zeminin iri daneli ve kohezyonlu olmasına bağlı olarak zeminde yer değiştirme oluşur. Bu sebeple, kazığın teşkil edildiği zemin kohezyonlu ise kazığın çakımı sırasında zemin kabarma özelliği (heaving) göstermektedir. İri daneli zeminlerde ise kazık çakımı sırasında kompaksiyon oluşur. Yerinde dökme betonarme kazıklarda kazık imalatı zeminin forajından sonra donatı kafesinin indirilmesi ve betonlanması ile imalat tamamlandığı için zeminde yer değiştirmeler gözlenmemektedir (Fathi, 2012).

2.1.3 Çalışma şekillerine göre kazıklar

Çalışma prensibine göre kazıklar dört gruba ayrılabilir (Alkaya ve Yeşil, 2013).

- Uç kazıkları
- Sürtünme kazıkları
- Kompaksiyon kazıkları
- Çekme kazıkları.

Sondaj logları sırasında derinliği tespit edilen ana kaya ya da kaya formasyonuna sahip zeminde mobilize olacak şekilde imalatı yapıp üst yapı yüklerini kazık ucundaki sağlam tabakaya aktaran kazıklar uç kazıkları olarak adlandırılmaktadır. Uç kazıkları, kaya yerine daha sert ya da fazla kompakte olmuş zemin tabakası üzerinde inşa edilmesi halinde kazığın servis yükünü taşıyabilmesi ve taşıma kapasitesine ulaşabilmesi amacıyla kazığın belirli miktarda deplasman yapıp kazık ucunun mobilize olabilmesi için, kazık ucu bu sert tabaka içerisinde bir miktar daha uzatılmalıdır. Buna göre uç direncinin tamamen mobilize olabilmesi için, kazık alt ucunun kazık çapının %10 - 25'i kadar deplase olması gerekmektedir (Das, 1990).

Kazık imalatının gerçekleştirileceği bölgede yapılan saha incelemeleri sonrasında, zemin kesitinde ana kayanın yeterince derinde olduğu ya da herhangi kaya formasyonuna rastlanmadığı durumlarda, üst yapı yüklerinin kazık çevre sürtünmesi yardımıyla karşılanarak, altta yer alan sağlam tabakalara aktarılmasını sağlayan kazıklar, sürtünme kazıkları olarak adlandırılmaktadır. Sürtünme kazıklarının kohezyonlu zeminlerde imal edildiği durumlarda, üst yapıdan gelen yüklere karşı oluşturduğu direnç adhezyon olarak da adlandırılmaktadır. Sürtünme kazıklarının boyu, zeminin kayma direncine, üst yapı yüküne ve kazık çapına bağlı olarak belirlenir. Kazık boyunun belirlenmesinde, kazık - zemin etkileşimi, mühendislik tecrübeleri etkin rol oynamaktadır. Sürtünme kazıklarının tasarlanan sürtünme direncinin mobilize olması için, kazık çapı ve boyundan bağımsız olmak koşuluyla kazık zemin içerisinde kısmen 5-10 mm arasında yerdeğiştirmesi gerekmektedir (Das, 1990).

İri daneli zeminlerde, yüzeye yakın derinlikte kazık servis yükü altında mobilize olup gerekli taşıma kapasitesini sağlayacak efektif kompaksiyonu ya da zeminin taşıma kapasitesinin düşük olduğu yüzeye yakın kesimlerde yeterli sıkışmayı sağlamak amacıyla kazık çakılır. Bu işlevi gerçekleştiren kazıklara, kompaksiyon kazıkları adı verilmektedir. Kompaksiyon kazıklarının boyları, zeminin kompaksiyon yapılmadan önceki rölatif yoğunluğuna, sıkıştırma sonrasında zeminde istenen rölatif yoğunluğa, kompaksiyon için gerekli derinliğe bağlı olarak belirlenmektedir. Genel olarak, kompaksiyon kazıklarının boyları kısa olmakla birlikte gerekli uzunluk saha incelemelerine bağlı olarak belirlenmelidir.

Çekme kazıkları, yer altı su seviyesi altında inşa edilen yapıların temelleri altında, özellikle havuz yapılarında ve hafif yapılarda ortaya çıkan kaldırma kuvvetini karşılamak üzere imal edilen ve çekme kuvvetine çalışan kazıklardır. Gerekli taşıma kapasitesi ankrajlar ile sağlanabiliyorsa, ankrajlar çekme kuvvetlerine karşı koymak amacıyla inşa edilebilir. Temellerin çoğu kendi ağırlığı altında kaldırma yüklerine karşı koyabilirken, hafif yapı temelleri ve su yapılarının stabilitesinin sağlanması amacıyla ankrajlar kullanılarak, daha düşük maliyetle daha efektif çözümler üretilir. Ayrıca ankrajlar iksa sistemlerinde yanal yüklere karşı koymak için kullanılmaktadırlar. Ankrajların, tasarım yükü ve kapasiteleri, geometri ve zemin tipinden hesaplanmaktadır (Coduto, 2001).

2.2 Kazık Çeşitlerinin Karşılaştırılması

Kazıklı temel ya da iksa sistemi inşaatlarında, projede uygulanacak kazık tipinin seçimi önemlidir. Bu seçim esnasında arazi özellikleri başta olmak üzere uygulanabilirlik, maliyet, taşıma – depolama ve iş güvenliği gibi konular göz önünde bulundurulmalıdır. Bu noktada, kazık çeşitlerinin tipik özelliklerinin karşılaştırılmasında fayda vardır. Belirli kazık türlerine ait özellikler FHWA HI 97-013 (1998)'de Çizelge 2.2'de özetlenmiştir:

Çizelge 2.2 : Kazıkların teknik özellikleri, FHWA HI 97-013 (1998).

Kazık Çeşidi	Ahşap Kazık	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	5.0 - 20.0 m	
Tipik aksenal tasarım yükü	100 kN- 500kN	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> ● Maliyeti göreceli olarak düşük ● Kalıcı tipleri çürümeye dayanıklı ● Taşınması kolay 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> ● Kesilmesi zor ● Çakımı sırasında tahrip olma riski fazla ● Tamamı su altında olmayan tiplerde çürüme riski mevcut. 	
Notlar	<ul style="list-style-type: none"> ● Granüler zeminlerde sürtünme kazığı olarak kullanıma çok uygun 	

Kazık Çeşidi	Çelik H Profil	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	5.0 - 30.0 m	
Tipik aksenal tasarım yükü	400 kN- 2000kN	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> ● Kesilmesi kolay ● Farklı boy ve kesitleri mevcut ● Nihai kapasitesi fazla ● Hafif engelleri geçebilir ● Önlem alınırsa büyük engelleri geçebilir 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> ● Hasar sonucu korozyon oluşması riski fazla ● İri daneli zeminde sürtünme kazığı olarak kullanıma uygun değil 	
Notlar	<ul style="list-style-type: none"> ● Uç kazığı olarak kullanılmaya uygun ● Koroziyon bölgelerde izin verilebilir taşıma kapasitesi düşürülmeli 	

Kazık Çeşidi	Çelik Boru Kazık	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	5.0 - 30.0 m	
Tipik aksenal tasarım yükü	400 kN- 2000kN (Beton Dolgulu ya da dolgusuz, merkez taşıyıcı) 5000kN-15000kN (Beton dolgulu ve merkez taşıyıcı)	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • İyi imalat kontrolüne sahip • Farklı boy ve kesitleri mevcut • Açık uçlu borularda yerdeğiştirme az • Açık uç ile engellere karşı güvenli • Kazık sonradan temizlenebilir ya da sürülebilir • Yüksek taşıma kapasitesi • Kesilmesi kolay 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • Kapalı uçta yer değiştirme fazla • Açık uçlu türleri granüler zeminde sürtünme kazığı olarak kullanıma uygun değil 	
Notlar	• Yanal yüklemeye halinde desteksiz kalan kısmında yüksek eğilme momenti kapasitesine sahip	

Kazık Çeşidi	Prekast-Ön germeli Kazık	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	10.0 - 15.0 m (Prekast kazıklar) 15.0 - 40.0 m (Öngermeli Kazıklar)	
Tipik aksenal tasarım yükü	400 kN- 1000kN (Prekast Kazıklar) 400 kN - 4500kN (Öngermeli kazıklar)	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek taşıma kapasitesine sahip • Korozyona karşı korunabilir • Güçlü darbelere karşı dayanıklı 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • Öngerme uygulanmadığı zaman taşıma sırasında zarar görme riski • Kesilme durumunda kırılma riski fazla • Yatırım maliyeti yüksek • Büyük yerdeğiştirme oranına sahip • Öngermeli türlerin eklenip kesilmesi zor 	
Notlar	• Silindirik tipleri, eğilme momenti kapasitesi açısından daha fazla dayanıma sahip	

Kazık Çeşidi	Yerinde Dökme Betonarme Kazık (Kılıfın mandrel ile sürüldüğü tip)	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	3.0 - 40.0 m (Ancak genellikle 15.0m - 25.0m arasında kullanılmakta)	<p>Şematik Gösterim</p> <p>Üst kot</p> <p>200 - 450 mm</p> <p>Kesit Alanı</p> <p>Kıvrımlı Dış Yüzey</p> <p>Kalınlık 3,3 - 0,5 mm</p> <p>Düz veya İnceltilmiş Yüzey</p>
Tipik eksenel tasarım yükü	Geniş bir aralıkla değişmekle birlikte genel olarak 400 kN-1400kN civarı	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük Maliyetli • Kazık ucu incelen tipleri, iri daneli zeminlerde daha fazla mukavemetli • Kuyu açıldıktan sonra imalat gözlenebilir • Donatı zayıfatı daha az • Hem uç, hemde sürtünme kazığı olabilir 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • Betonladıktan sonra kesimi güç • Tekrar olarak çakımı sakıncalı • İnce muhafaza ile imalatı ya da toprak basıncı sebebiyle tahrip olabilir • Büyük yerdeğiştirme oranına sahip 	
Notlar	• Granüler zeminlerde sürtünme kazığı olarak kullanıma uygun	

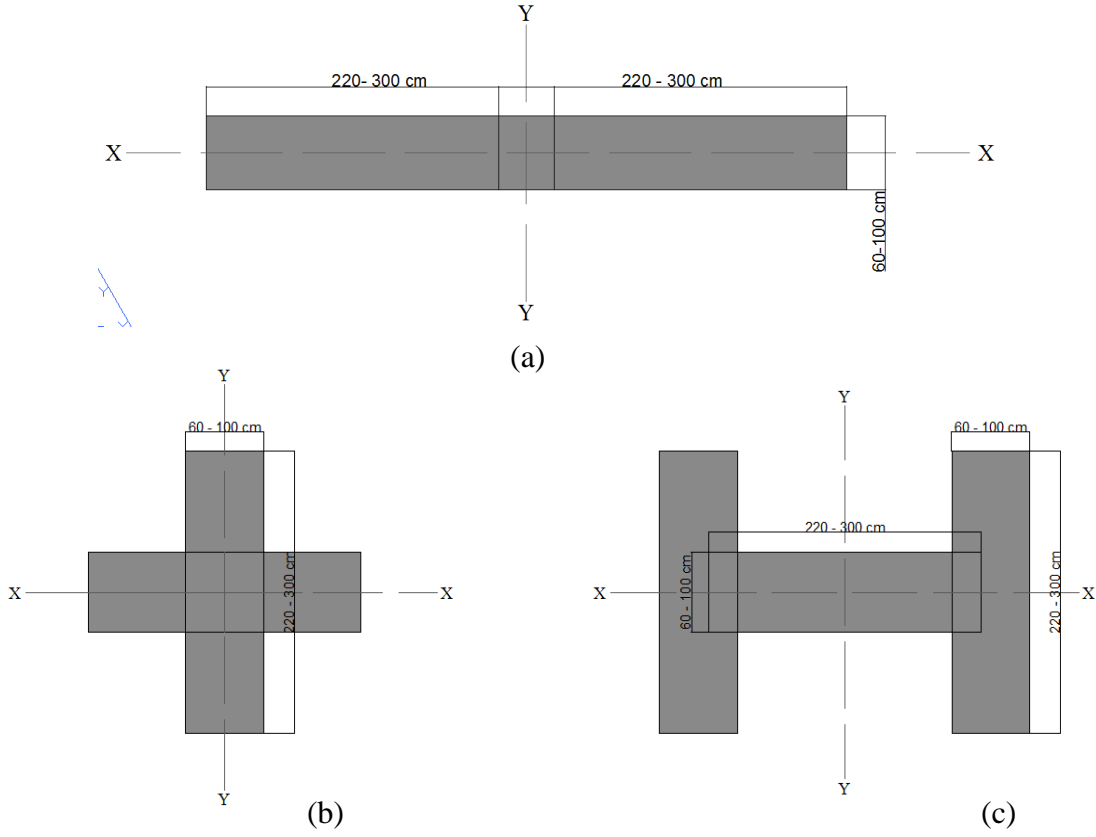
Kazık Çeşidi	Yerinde Dökme Betonarme Kazık (Kılıfın mandrelsiz sürüldüğü tip)	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	5.0 - 25.0 m	<p>Şematik Gösterim</p> <p>Üst Kot</p> <p>300 - 450 mm</p> <p>Kabuk Kalınlığı 3.0 - 6.0 mm</p> <p>Tipik En Kesit</p> <p>Oluklu Dış yüzey</p> <p>250 - 900 mm</p> <p>Kabuk Kalınlığı 3.0 - 6.0 mm</p> <p>Tipik En Kesit</p> <p>Spiral Kaynaklı Dış Yüzey</p> <p>Düz veya İncelen Dış Yüzey</p> <p>Minimum Topuk Çapı 200 mm</p>
Tipik eksenel tasarım yükü	500kN - 1350kN	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • Tekrar çıkarılabilir • Oluklu kılıf tahribata dayanıklı 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • Betonladıktan sonra kesimi güç • Büyük yerdeğiştirme oranına sahip 	
Notlar	• Orta boylardaki sürtünme kazığı imalatı için oldukça uygun	

Kazık Çeşidi	Yerinde Dökme Betonarme Kazık (Kılıfın mandrelsiz sürüldüğü tip)	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	50.0 m'ye kadar boyların tümü	<p>Şematik Gösterim</p> <p>Üst Kot</p> <p>Taşıma Gücü Zayıf Zemin</p> <p>Taşıma Gücü Yüksek Zemin Tabakası yada Kaya</p> <p>Uç Direnci</p> <p>Şaft Direnci</p>
Tipik eksenel tasarım yükü	1500kN - 20000kN	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • İmalat sırasında kazık boyu revizyonu • Yüksek taşıma kapasitesi ve eğilme momenti • Zemin tipine göre imalat cinsi • Kolon olarak üst yapının devamlılığı • Referans başlığına gerek yok 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • İmalatta daha fazla kontrol gerekli • Üretim şekli kaliteyi ve kapasiteyi • direkt olarak etkiler • Özellikle bloklu zeminlerde orta çaplı kazık imalatı zorlu 	
Notlar	• Yumuşak killer ve gevşek kumlarda imalatı için önlem alınmalı	

Kazık Çeşidi	Kompozit Kazık	Şematik Gösterim
Üretilen Boylar	15.0 -65.0 m	<p style="text-align: center;">Tipik Kombinasyonlar</p>
Tipik aksenal tasarım yükü	300kN - 1800kN	
Üstünlükleri	<ul style="list-style-type: none"> • Ahşap kompozit kazıklarda düşük maliyet • Çelik kompozit kazıklarda yüksek kapasite • Çelik boru kazıklarda kontrollü imalat 	
Sınırlayıcı yanları	<ul style="list-style-type: none"> • Boru kazıklarda birleşim noktalarında kırılma riski 	
Notlar	<ul style="list-style-type: none"> • Kullanılan en zayıf malzeme, izin verilebilir taşıma gücünü belirler 	

2.3 Baret Temel

Çok katlı konut, otel, iş merkezi gibi yapıların inşası teknolojinin gelişimi ve insan ihtiyaçlarının artmasıyla birlikte, geoteknik mühendisliğinde de temel tasarımı konusunda çeşitli gereksinimleri ortaya çıkartmıştır. Bu kapsamda, fore kazıklardan farklı olarak dikdörtgen şeklinde ve daha fazla kesit alanı ve çevre sürtünmesine sahip olan baret imalatı yaygınlaşmıştır. Baret, fore kazığın ya da diğer değişik yerinde dökme betonarme kazıklardan farklı olarak, özel kazı ekipmanları ile açılan kuyuya donatının indirilip betonlanması ile imal edilmektedirler. Baret, genel olarak üst yapı kolon ve perde şekline daha yakın bir kesite sahip olduğu için temel tasarımda kolon – perde aksında imal edilerek yapısal sürekliliğin temele kadar uzanmasını sağlar. Baret, iri daneli, kaya ya da kohezyonlu zeminlerde imal edilebilmektedir. İmalatı ilerki bölümlerde anlatılan hidrolik ve mekanik grab ile gerçekleştirilir. Baret tasarımı genellikle, standartlarda belirtilen kazık aralığı ve gerekli taşıma kapasitesine sahip kazıklarla üst yapı yüklerinin taşınmaması durumunda tercih edilir. Bu durumlarda temel tasarımında maliyet, zaman ve güvenlik dikkate alındığında baret tercihi daha ekonomik olmaktadır. Dikdörtgen kesite sahip baretin kısa kenar uzunluğu 60 - 80 - 100 - 120.00 cm, uzun kenar uzunluğu ise 220 – 280 – 300 cm olarak imal edilmektedirler. Baret boyutlarının belirlenmesinde gerekli taşıma kapasitesi ve imalatı gerçekleştiren ekipmanın kapasitesi etkili olmaktadır (Durgunoğlu, 2011). Proje koşullarına bağlı olarak, T, +, H, L, II şeklinde imal edilebilirler. Baret, yeterli taşıma kapasitesi ve kazı ekipmanına göre 100 metreye kadar imal edilir. Tipik baret kesitleri Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5 : Tipik baret kesitleri, Durgunoğlu, (2011) 'den uyarlanmıştır.

Şekil 2.5 (a)'da verilen baret imalatı iki adet baret kazısının gerçekleşmesinden sonra donatının kuyuya indirilmesinin ardından betonlanması ile gerçekleşmektedir. Kuyu stabilitesi bentonit çamuru ile sağlanır. Diyafram duvar imalatı da benzer şekilde gerçekleştirilir. (b)'de verilen baret imalatı için önce x - x aksı ya da y - y aksı yönündeki kazı gerçekleştirilir. Daha sonra kazısı gerçekleştirilen eksene dik olan eksenin kazısı gerçekleştirilir. Donatı kuyuya, + şeklinde imal edilerek ya da dikdörtgen şeklinde hazırlanan baret donatısı ve geri kalan kısımları parça donatı olarak indirilir. (c)'de verilen baret imalatı ilk olarak H şeklinde olan imalatın ortada yer alan baret delgisi yapılır, daha sonra kenarlarda yer alan baret delgileri gerçekleştirilerek kazı tamamlanır. Kazı stabilitesi kuyu içerisine doldurulan bentonit ile sağlanır. H şeklindeki baret donatısı ayrı ayrı 3 adet dikdörtgen şeklinde imal edilerek kuyuya indirilir ve ardından betonlanarak imalat gerçekleştirilir.

Baretin fore kazıklara göre üstünlükleri (Durgunoğlu, 2011):

- Aynı kesit alanına sahip dairesel kesitli bir kazığa göre daha fazla sürtünme yüzeyi elde edilir. Basit bir örnekle açıklayacak olursak:

2.80 m x 0.80 m boyutlarında bir baret kazığının kesit alanı 2.24 m^2 'dir.

Bu baretin birim sürtünme çevresi: $a_{sb} = 2 \cdot (2.80 + 0.80) = 7.20$ m/m'dir.

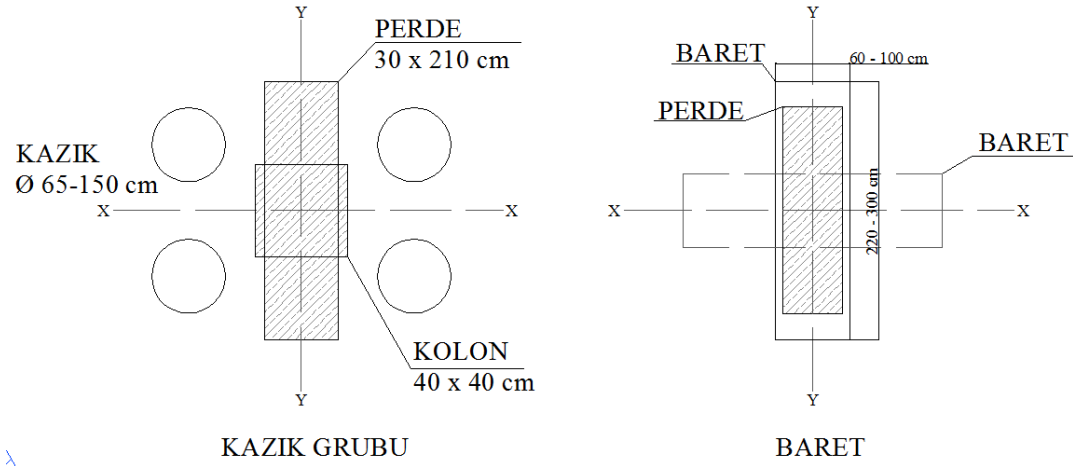
Aynı kesit alanına sahip kazığın çapı: $d_{eş} = \sqrt{\frac{4 \times 2.24}{\pi}} = 1.69$ m

Eş değer çaplı kazığın birim sürtünme çevresi: $a_{sp} = \pi \times 1.69 = 5.31$ m/m

Birim sürtünme çevresi oranı: $\frac{a_{sb}}{a_{sp}} = \frac{7.20}{5.31} = 1.35$ olarak hesaplanmaktadır. Bu

nedenle düşey yük taşıma kapasiteleri yüksektir.

- Üst yapıdan gelen yükler doğrultusunda imal edildiklerinde, yüksek yatay yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Bunun sebebi, baret boyutlarını dikkate aldığımızda aynı alana sahip kazığa göre daha fazla eğilme rijitliğine sahiptir.
- İmalatı Şekil 2.5'te gösterildiği gibi farklı şekillerde gerçekleştirilir.
- Taban kayanın derinde olduğu ve kayaya soketin gerektiği durumlarda rotari tipi kazı yöntemlerine göre daha fazla düşeylik kontrolü sağlaması ve grab/hidrofreze (cutter) kullanımı nedeni ile yüksek oranda kazı kolaylığı sağlanabilmektedir,
- Yapısal bütünlük açısından klasik tipte fore kazıklara göre daha uygundur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Kolon – kazık grubu, kolon – baret yerleşimi, (Durgunoğlu, 2011).

Şekil 2.6'da gösterilen kazık grubu, üst yapıdaki kolon ve perdeden temele aktarılan yükleri şartnamede belirtilen kazık ara mesafeleri ile tasarlanıp, yapısal bütünlük temel alt kotunda sonlanmaktadır. Baret imalatında ise kolon – perde aksında imal edilen bir adet baret ile taşıma kapasitesi sağlanmakta ve yapısal bütünlük temel altında da devam etmektedir (Yıldız, 2011).

2.3.1 Baret imalatı

Baret, teknik şartnamede (TS EN 1538, Özel Jeoteknik Uygulamalar – Diyafram Duvar) tariflenen yöntemlerin uygulanması ile projede öngörülen kalınlık ve derinlikte, zeminde bir kazı çukuru oluşturulması, bu kuyunun çökmesini engelleyen sıvının (bentonit çamuru) konulması, hazırlanan donatı kafesinin bu çukurun içine yerleştirilmesi ve betonunun tremi borusuyla dökülmesi işlemlerinden oluşur. Diyafram duvardan farklı olarak, temel altında imal edilir ve kısa kenar boyutu 60 – 100 cm, uzun kenar boyutu 220 – 300 cm'dir. Diyafram duvar, anolar şeklinde imal edilerek geçirimsizlik sağlamaktadır. Baret ise diyafram duvar imalatında kullanılan tek bir ano gibi olduğu için TS EN 1538'e uygun yapılıdır.

2.3.1.1 Saha ön hazırlığı

Öncelikle kazı makinasının çalışmasına müsaade edecek şekilde platformun hazırlanması; hazırlanan platformun yer altı suları, yağmurdan korunması için gerekli derivasyon ve pompaj işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Saha ön hazırlığı yapılırken, temel tasarımında yer alan baret yerleşimi göz önünde bulundurulurken imalatı gerçekleşecek baret sırası göz önünde bulundurulmalıdır. Baret kazısı sırasında kazı çukuru içerisindeki bentonit döngüsünü sağlayacak bentonit çukuru ve bentonit sürkülasyonu sağlayacak ekipmanın yerleşimi gerçekleştirilmelidir.

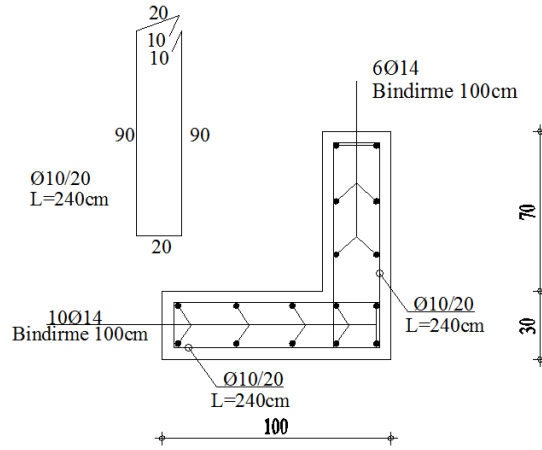
2.3.1.2 Kılavuz duvar (gidaj) imalatı

Baret imatları, yüzeydeki zemin koşulları, düşey ve yatay yükler hesaba katılarak tasarlanan detayı Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilen çift taraflı kılavuz duvarların (gidaj) arasında yapılmaktadır. Kılavuz duvarlarla (gidajla) desteklenen baret temeller, düşeylikte müsaade edilen sapmalar içinde kalacak şekilde imal edilebilmektedir. Gidajlar, temel altı projesinde koordinatları belli olan baret imalatından önce Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sahada imal edilip kazılarak yerleştirilir. Şekil 2.8'de detayı verilen gidajın boyu, imal edilecek baret uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.7 : Kılavuz duvar boyutları ve yerleşimi.

GİDAJ DETAYI



Şekil 2.8 : Gidaj detayı.

Gidaj yardımıyla ön delginin düşeyde izin verilen sınırlar içerisinde sapma yapması sağlanmış olur. Aynı zamanda kazı operatörü tarafından veya sahadaki diğer sebeplerden dolayı oluşabilecek aşırı yüklemelerde üst kotlardaki kazı stabilitesinin sağlanmasında bu duvarlar önemli rol oynarlar. Yine bu duvarlar sayesinde kazı sırasında zeminin üst kısımlarının yıkama ve bentonit sıvısından kaynaklanan dalgalanmalar ve istikrarsızlıklar önlenmektedir. Yüzeyleki ekipman yükleri kazıya yakın olduğunda oluşabilecek çökmeler de önlenmiş olur.

2.3.1.3 Delgi

Delgi sırasında, imalatın yapısal bütünlüğü sağlayacak şekilde yapılması amacıyla göz önünde bulundurulmuş 3 ana parametre vardır.

- **Zemin Koşulları:** Zemin koşullarının homojen ya da heterojen olması farklı delgi yöntemlerini ve ekipmanlarını gerektirmektedir. Katı ya da yumuşak

killer, gevşek kumlar, kuvarsit damarlı kalkerli kumtaşları delgiyi farklı yönleriyle zorlaştıran zeminlerdir. Karstik formasyonlarda, zemindeki boşluklardan kaybolan su nedeniyle delgi yapmak zorlaşır. Diğer yandan artezyen kaynağı olan bölgelerde de delgi yapmak oldukça zordur.

- **Baret Boyu:** Baret boyu, uygulama zorluğu açısından temel mühendisliğinde daima önemli parametrelerinden biri olmuştur. Kazık boyunun artması kazı derinliğinde artışı gerektirir. Kazı derinliğini artırabilmek için daha uzun ve mukavim ekipmanların kullanılması gerekir ve bu ekipmanlar doğal bir sonuç olarak standart ekipmana göre daha ağırdır. Ayrıca delgi sırasında kuyu dibinde biriken zeminin dışarı atılmasını sağlayan dolaşım sistemi de derinlik artışıyla birlikte daha yüksek basınçlara çıkabilen pompalara ihtiyaç duyacaktır. Bütün bu ekipman kapasite artışlarıyla birlikte, bu ekipmanların iş başına nakli de maliyet artırıcı diğer bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla baret boyu kullanılacak ekipman maliyetini etkileyen önemli bir faktördür.
- **Delgi boyutları:** Baret kesiti delgiyi etkileyen diğer bir önemli faktördür. Boyutlar arttıkça ihtiyaç duyulan ekipman ağırlaşacaktır ve ağırlaşan ekipmanla çalışabilmesi için makinaların da yüksek kapasiteli seçilmesi gerekecektir. Buna bağlı olarak ağır makinaların nakliyatı da daha zor ve maliyetli olmaktadır. Delgi boyutları, üst yapı yüklerini güvenle taşımak amacıyla tasarlanan baret boyuna bağlı olarak 20 – 100 m'ye kadar çıkabilmektedir.

2.3.1.4 Bentonit süspansiyonu destekli imalat

Baret kazıkların dikdörtgen kesitli imal edilmesi nedeniyle dikdörtgen muhafaza borusunu zemine itmek ve zeminden çekmek pratik açıdan mümkün değildir. Bu nedenle bentonit çamuru (süspansiyonu) yardımıyla baret kazık imalatı yapılmaktadır. Baret kazıkların imalatında kazı destek sistemi olarak kullanılan süspansiyonun ham maddesi bentonit “montmorillonit” tipi kildir. Toz bentonit ve taze bentonit süspansiyonuna ait fotoğraflar Şekil 2.9’da verilmektedir.



Şekil 2.9 : Toz ve süspansiyon bentonit (ZETAŞ Katalog, 2014).

Süspansiyonun, TS EN 1538:2010'a göre özellikleri Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3 : Bentonit süspansiyonu hazırlama şartname kriterleri (TS EN 1538, 2010).

Bentonit Süspansiyonu Özellikleri			
Özellik	Kullanım Safhaları		
	Taze	Tekrar Kullanım İçin Hazır	Betonlamadan Önce
Birim Hacim Ağırlığı	< 1.10	< 1.25	< 1.15
Marsh Değeri (s)	32 - 50	32 - 60	32 - 50
Akışkan Kaybı (ml)	< 30	< 50	-
pH	7 - 11	7 - 12	-
Kum Muhtevası Ağırlıkça(%)	-	-	< 4
Filtre Keki (mm)	< 3	< 6	-

Bentonitin maliyetli bir kil minerali olması sebebiyle, kazı sırasında kullanılan bentonit sirkülasyon işlemiyle tekrar kullanılabilir. Sirkülasyon sistemiyle kullanılan bentonit süspansiyonun belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler, Çizelge 2.3'te bentonit kullanım safhaları başlığı altında betonlanmadan önce ve sirkülasyona uğrayan bentonit süspansiyonun tekrar kullanımı durumuna bağlı olarak belirtilmiştir. Bentonit süspansiyonu kuyu cidarını neredeyse geçirimsiz ince bir film tabakası gibi kaplayıp yıkılmamasını sağlar. Çalışma prensibi Şekil 2.10'da verilmektedir. Şekil 2.10'da kazı içerisinde yer alan bentonit süspansiyonu kuyu çeperinin çökmemesi için çalışırken, zemin ve yer altı su seviyesi kuyu çeperinin göçmesi için çalışır. Bentonit süspansiyonun pasif itkisi, suyun ve zeminin aktif itkisinden büyük veya eşit olmalıdır.

Şekil 2.11’de hidrofreze (cutter) ile kazısı yapılan kaya’nın kuyu içerisinde hafriyatı, hidrofreze üzerinde yer alan çamur pompasıyla desander ünitesine aktarılmaktadır. Desander ünitesi, kazı hafriyatı içerisinde yer alan iri daneli zemini ve kum’u ayrıştırıp kalan bentonit süspansiyonunu, bentonit tankına aktarmaktadır. Kazı sırasında kullanılan bentonit süspansiyonu, toz halde bulunan bentonit silosundan belirli miktarda su ile bentonit karıştırıcısında karıştırılarak santifrüj pompa aracılığıyla bentonit tankına aktarılır. Bentonit tankına aktarılan bentonit süspansiyonu, santifrüj pompa aracılığıyla kazı çukuruna aktarılarak bentonit süspansiyonu seviyesi sabit tutularak kazı gerçekleştirilir.

2.3.1.5 Donatı kafesinin hazırlanması

Baret temellerde kullanılacak donatı kafesi, projesinde belirtilen boylarda, kuyu dışında imal edilmektedir (Şekil 2.12). Kazı’nın bentonitle desteklenmesinden sonra kuyuya indirilecek olan donatı kafesinin, yerleştirilmesi esnasında ek yerlerinden deforme olarak kopmasına müsaade etmeyecek şekilde (manşon, bağ teli veya kaynak) takviye donatılar kullanılır. Ayrıca zemin içinde yer alan kimyasal ve zararlı maddelerden donatıyı korumak için pas payı kullanılması gerekmektedir. Donatısı yerleştirilen kuyuya beton dökümü işleminin tremie borusu ile yapılacağı göz ardı edilmemelidir.



Şekil 2.12 : Baret donatı kafesinin hazırlanması (Zetaş katalog, 2014).

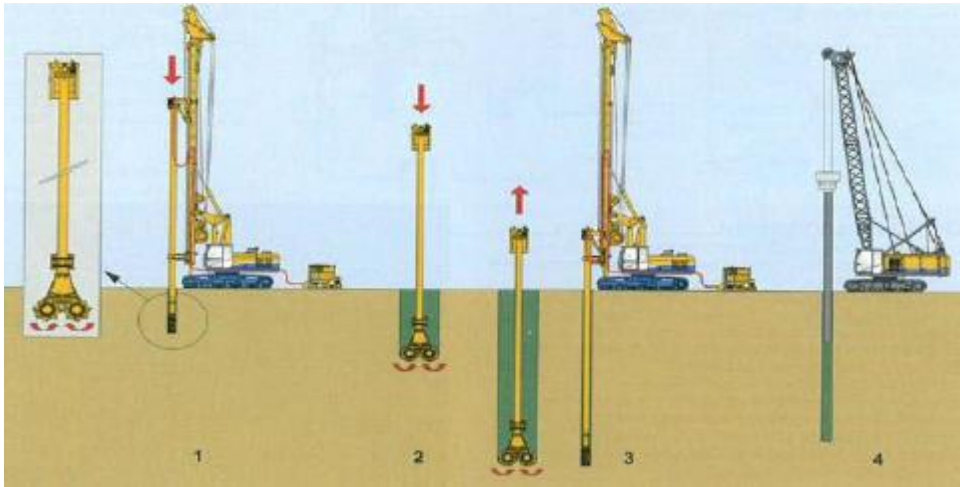


Şekil 2.13 : Donatı kafesinin kuyuya indirilmesi, (Saha – 1, 2013)

2.3.1.6 Beton dökümü

Kazı sırasında bentonitle desteklenen kuyu, projesindeki derinliğe ulaştığında, tremie borusu ile beton dökümüne başlanır. Tremie borusunun kuyu dibine mesafesi 30-40 cm civarlarında olması gerekmektedir. Beton üzerinde bentonit kalıntılarının veya toprak parçacıklarının kalmasını önlemek için gerekli uygulamalar kesinlikle yapılmalıdır. Bu sebeple kuyu içerisinde yer alan bentonitin niteliği Çizelge 2.3'e göre kontrol edilmelidir.

Cutter yardımıyla sert zemin kazısı baret alt kotuna kadar gerçekleştirildikten sonra bentonit destekli kuyuya donatı kafesi indirilip, tremie borusu yardımıyla betonlaması işleminin şematik gösterimi kısaca Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14 : Sert zeminde baret temel yapım aşamaları.

2.3.2 Baret imalat ekipmanları

Baret imalatında kullanılan ekipmanlar aşağıda özetlenmektedir.

Baret Kuyusu Kazı Makinası: Kazı çukurunun kazılması için kullanılan makinalardır. Parçalanmış ve alüvyon tarzı yumuşak zeminlerde mekanik veya hidrolik grab kullanılırken, anakaya ve sert zeminlerde hidrofreeze tipi kazıcı makineler kullanılmaktadır (Şekil 2.15 ve Şekil 2.16). Kazı derinliği makine kapasitesine göre 100 m'ye kadar çıkmaktadır.



Şekil 2.15 : Hidrofreeze (cutter), (projects.soundtransit.org).



Hidrolik grab



Mekanik grab

Şekil 2.16 : Grab çeşitleri, (projects.soundtransit.org).

Desander: Bu ünite, baret imalatının önemli parçalarından biridir. Kazılan kuyudan gelen malzemeyi (kum vb.) bentonit süspansiyonundan ayırıştırır. Şekil 2.17’de gösterilen desander, kumu sistemden ayırarak depolama ünitesine aktarır. Ayırılan bentonit süspansiyonunun kontrolü yapılarak tekrar kullanımını sağlamaktadır.



Şekil 2.17 : Desander ünitesi, (bauer.de).

Karıştırıcı (Mixer): Kuyuya aktarılacak olan bentonit süspansiyonunun hazırlandığı birimdir. Kuru bentonit minerali yeterli miktarda karıştırılarak bentonit süspansiyonu elde edikten sonra pompa ile depolama ünitesine aktarılır.

Depolama Ünitesi: Diyafram duvar veya baret imalatı sırasında kullanılan bentonitin bekletildiği hazne Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Bentonit tanklarında desanderden ayırıştırılan temiz bentonit tekrar kullanılmak için bekletilir. Bekleme süresince alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler ile kullanılabilirliği ölçülür.



Şekil 2.18 : Bentonit tankı, (Saha – 1, 2013).

Transfer Ünitesi: Depolama ünitesinde bentonit süspansiyonu bekletilir. Daha sonra karışım oranlarına bağlı olarak; süspansiyonun birim hacim ağırlığı 1.0 t/m^3 'ten büyük olduğu kontrolleri depolama ünitesinde gerçekleştirilir. TS EN 1538 şartname kriterini sağlayan bentonit süspansiyon, transfer ünitesi yardımıyla. kuyudan pompa ile geri basılan kirli bentoniti desander'a aktarır, temizlenen bentonitin de kazı çukuruna aktarılmasını sağlar. (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : Depolama ve transfer ünitesi, (zmakina.com.tr)

3. KAZIKLARIN DÜŞEY YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ

Kazığa etkiyen eksenel yük, kazık çevresi ve zemin arasındaki sürtünme kuvveti ile kazık ucunda oluşan kuvvetlerin toplamı tarafından karşılanmaktadır. Derinlikle artan yanal toprak basıncı, düşey sürtünme yükü oluşturmaktadır. Kazığın üst yapıdan gelen yükleri yeteri kadar güvenlikle taşıyabilmesi için belirli bir miktarda yer değiştirmesiyle birlikte adhezyon etkisi sürtünme direncine etki etmekte ve bu iki etken kazığın çevre sürtünmesini oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra yükün kazığın alt kotuna iletilmesiyle birlikte, oluşan reaksiyon kuvveti de uç direncini oluşturmaktadır. Taşıma kapasitesi hesabı sırasında kazığın yükü taşıma şekline göre kazıklar, uç veya sürtünme kazığı olarak da adlandırılır. Kazıkta oluşan çevre sürtünmesi - uç direnci oranı, kazık boyutlarına, kazığın zemine yerleştirilme biçimine (çakma yoluyla ya da foraj ile), zemin kesitine ve zeminin fiziksel özelliklerine göre değişmektedir (Ezeldin, 2004).

Eksenel yüklü tekil kazıklar için kazık taşıma kapasitesi, çevre sürtünmesi ve uç direncinin toplanması ile aşağıdaki eşitlikle elde edilmektedir.

$$Q_u = Q_s + Q_p = f_s A_s + q_p A_p \quad (3.1)$$

- Q_u : Nihai kazık taşıma kapasitesi
 Q_s : Çevre sürtünmesi
 Q_p : Uç direnci
 f_s : Birim sürtünme direnci
 A_s : Zeminle temas eden kazık çevre alanı
 q_p : Birim uç direnci
 A_p : Zeminle temas eden kazık en kesit alanı

Kazığın taşıma gücünü, kazığın göçmeden ve izin verilen değerlerin üzerinde oturma yapmadan taşıyacağı maksimum yük olarak nitelendirip kazık ve baret taşıma kapasitesi bulunduğu zemin koşulları içerisinde göstereceği farklı davranışlar göz önünde bulundurularak aşağıdaki metodlar ile hesaplanabilmektedir (Tomlinson, 2004).

1. Zeminin mukavemet özellikleri kullanılarak, statik analizler ile taşıma kapasitesi hesabı,
2. Arazi deneylerinden elde edilen veriler yardımıyla yapılan kapasite hesabı,
 - Standart penetrasyon deneyi (SPT)
 - Koni penetrasyon deneyi (CPT)
 - Pressiyometre deneyi (PMT)
3. Dinamik yöntemler kullanılarak yapılan taşıma kapasitesi hesapları,
 - Kazık çakma formülleri kullanılarak
 - Dalga denklemi analizi kullanılarak
4. Kazık yükleme deneyleri.

Bu bölümde, yukarıda maddeler halinde belirtilen statik analizler ve arazi deney verileri yardımıyla kazık kapasite hesabı hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. Kazık yükleme deneylerine 4. Bölüm’de detaylı olarak değinilmiştir. Dinamik yöntemler kullanılarak yapılan kazık taşıma kapasitesi hesabı hakkında literatürde Bowles (1996), Toğrol ve Tan (2003), Das (2004) tarafından detaylı bilgiler verilmiştir.

3.1 Statik Analiz ile Kapasite Hesabı

(3.1) denklemini Terzaghi ve Meyerhof’un yüzeysel temeller için uyarladığı taşıma kapasitesi denkleminde yerine koyduğumuzda uç direnci ve çevre sürtünmesi;

$$Q_p = A_p [cN_c + 1/2\gamma DN_\gamma + \gamma D_f N_q] \quad (3.2)$$

$$Q_s = p \sum_{L=0}^{L=L} f_s \Delta L \quad (3.3)$$

- c : Kazık ucu altındaki zeminin kohezyonu
 γ : Zeminin birim hacim ağırlığı
 N_c, N_q, N_γ : Taşıma gücü katsayıları
 D : Kazık genişliği ya da çapı
 D_f : Kazık ucunun zemin yüzeyine mesafesi
 p : Kazık çevresi
 ΔL : Birim kazık boyu
 L : Çevre sürtünmesinin mobilize olduğu kabul edilen kazık boyu

Statik taşıma gücü formüllerinde, bilinmeyenlere bağlı olarak güvenlik faktörü sayısı 2.0 ile 4.0 arasında değişmekle beraber, arazide kazık yükleme deneyi yapılmadıkça 3.0 olarak alınmalıdır (Toğrol ve Tan, 2003).

3.1.1 Kohezyonsuz zemindeki tekil kazık ve baretin taşıma kapasitesi

Kohezyonsuz zeminlerde imal edilecek kazıkların taşıma kapasitesine, kazık - zemin ara yüzeyinde oluşan değişimler dolaylı da olsa etki etmektedir. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde imal edilen çakma kazıkların, çakma sırasında kompaksiyon etkisiyle kazık çapının birkaç katı mesafede kazık çeperi boyunca zemin kompakte olmakta ve zeminin birim hacim ağırlığı artmaktadır. Yerinde dökme kazıklarda ise bu durum tam tersi durumlara sebep olabilmektedir.

Yalnız bu durumların mevcudiyeti ve bölgesi hakkında kesin bir bilgi edilemediği için tasarım, zeminin ilk durumu göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde kayma mukavemeti $c = 0$ olduğu için uç direnci hesabı için (3.2) eşitliği düzenlenecek olursa, $1/2\gamma DN_\gamma$ terimi çok küçük olduğu için göz ardı edilerek (3.2) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$Q_p = A_p \gamma D_f N_q \quad (3.4)$$

veya

$$Q_p = A_p \sigma_v' N_q \quad (3.5)$$

σ_v' : Kazık ucundaki efektif gerilme

Burada yarı - ampirik bir taşıma gücü katsayısı olan N_q , üç faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bunlar, Df/B oranı, taşıyıcı tabakanın kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve kazığın imalat metodudur. Bunların yanı sıra N_q değeri, tasarımda kabul edilen modeldeki teoriye ve buna karşılık gelen kırılma yüzeylerine göre de değişebilir (Sharma ve Prakash, 1990). Çizelge 3.1'de Sharma ve Prakash (1990), tarafından önerilen N_q ve ϕ değerleri yer almaktadır.

Çizelge 3.1 : N_q ve ϕ değerleri, (Prakash ve Sharma, 1990).

$\phi(^{\circ})$	20	25	28	30	32	34	36	38	40	42	45
N_q, Çakma Kazık	8	12	20	25	35	45	60	80	120	160	230
N_q, Fore Kazık	4	5	8	12	17	22	30	40	60	80	115

Kohezyonsuz zeminlerdeki çevre sürtünmesi, (3.3) eşitliği yardımıyla hesaplanabilmektedir. Eşitlikte yer alan f_s terimi şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$f_s = \sigma_h' \tan \delta \quad (3.6)$$

δ : Kazık – zemin arasındaki sürtünme açısı
 σ_h' : Efektif yatay gerilme

Kohezyonsuz zeminler için (3.6) eşitliği şu şekli alır:

$$Q_s = pK_s \tan \delta \sum_{L=0}^{L=L} \sigma_{v1}' \Delta L \quad (3.7)$$

K_s : Yatay toprak basıncı katsayısı

$\sum_{L=0}^{L=L} \sigma_{v1}' \Delta L$: Kazıkta l boyunca oluşan toplam düşey efektif gerilme

Genellikle tasarım amacıyla yapılan hesaplarda, δ (kazık gövde yüzeyinde kayma hareketine karşı gösterilen direcin gövde yüzeyine dik yönde etkiyen zemin basıncına oranını ifade eden katsayı) katsayısı $2/3\phi$ olarak kullanılmaktadır (Sharma ve Prakash, 1990). K_s yatay toprak basıncı katsayısı, kazık malzemesine, kazığın imal şekline, zeminin sıkılığına bağlıdır. Değeri, sükunetteki toprak basıncı katsayısı K_0 'a bağlı olarak Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Sükunuttaki yatay toprak basıncı katsayısı ise aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir veya Çizelge 3.3'ten alınabilir.

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (3.8)$$

Çizelge 3.2 : Yatay toprak basıncı katsayısı, K_s (Tomlinson, 2004).

Kazık İmal Şekli	K_s/K_0
Çakma Kazıklar, büyük sıkıştırma etkili	1.00 ~ 2.00
Çakma Kazıklar, düşük sıkıştırma etkili	0.75 ~ 1.25
Yerinde dökme betonarme kazıklar	0.75 ~ 1.00
Su jeti ile imal edilmiş kazıklar	0.50 ~ 0.70

Çizelge 3.3 : Normal konsolide kumlar için K_0 değerleri, (Tomlinson, 2004).

İzafi Sıklık	K_0
Gevşek	0.50
Orta Sıkı	0.45
Sıkı	0.35

McCharty P.E (2007), kazık çeperi ile zemin arasındaki sürtünme açısını, kazık boyunca zeminin kayma mukavemeti açısına bağlı olarak Çizelge 3.4'te ki gibi ifade etmektedir.

Çizelge 3.4 : δ/ϕ' oranı için değerler, (Mc Charty P.E, 2007).

Kazık gövde yüzeyi	δ/ϕ' oranı
Pürüzlü beton	1.0
Pürüzsüz beton	0.8 – 1.0
Pürüzlü çelik	0.7 – 0.9
Düzgün çelik	0.5 – 0.7
Ahşap	0.8 – 0.9

Sonuç olarak uç direnci ve çevre sürtünmesi için düzenlenen (3.5) ve (3.7) ifadeleri bir arada yazıldığında, kohezyonsuz zeminlerdeki kazıklar için statik taşıma kapasitesi şu şekilde olmaktadır:

$$Q_u = Q_p + Q_s = A_p \sigma_v' N_q + pK_s \tan \delta \sum_{L=0}^{L=L} \sigma_{v1}' \Delta L \quad (3.9)$$

3.1.2 Kohezyonlu zemindeki tekil kazık ve baretin taşıma kapasitesi

Kohezyonlu zeminlerde imalatı yapılacak olan kazık ve baretin taşıma kapasitesi hesaplarında kısa vadedeki taşıma kapasitesi dikkatlice hesaplanmalıdır. Bunun sebebi kazık elemanının zaman içerisinde yer aldığı kohezyonlu birimler pekleşerek mukavemeti zamanla artmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde imal edilecek temel yapılarının kapasite hesabında normal gerilme – kayma gerilmesi düzleminde gerilme zarfının eğimi sıfır olduğu için kayma mukavemeti açısı $\phi = 0$ olarak kabul edilmektedir. Yumuşak zeminlerde imal edilen sürtünme kazıklarında uç direncinin mobilize olması için kazığın yüksek oranda yer değiştirmesi gerekmektedir. bu sebeple yumuşak zeminlerde imal edilen kazıkların uç direnci gözardı edilir (Alen, 2012).

Drenajsız kayma mukavemeti değeri $s_u = c_u = c$ ve $\phi = 0$ olduğundan, kazık uç direnci hesabı için kullanılan (3.2) eşitliği şu şekli almaktadır:

$$Q_p = A_p [c_u N_c + \gamma D_f N_q] \quad (3.10)$$

$\phi = 0$ ve $N_q = 1$ olduğu için (3.10) eşitliğinin son şekli (3.11)'deki gibi olur:

$$Q_p = A_p c_u N_c \quad (3.11)$$

İnce daneli zeminlerde kazık ile zemin arasındaki sürtünme, zeminin kayma mukavemetine bağlıdır. Bu nedenle f_s çevre sürtünmesi:

$$f_s = c + \sigma_h \tan \delta \quad (3.12)$$

$c = c_a$: Kazıkla zemin arasındaki adhezyon

Dolayısıyla (3.3) eşitliği,

$$Q_s = p \sum_{L=0}^{L=L} c_a \Delta L \quad (3.13)$$

halini alır. Buna göre (3.2) ve (3.3) eşitliklerinin kümülatifi (3.14) eşitliğindeki gibi olur.

$$Q_u = Q_p + Q_s = A_p c_u N_c + p \sum_{L=0}^{L=L} c_a \Delta L \quad (3.14)$$

c_u : Kohezyonlu birimin drenajsız kayma mukavemeti

L_e : Efektif kazık boyu

α adhezyon katsayısı, kazık imalatı sırasında zeminin örselenmesine, aşırı konsolide killerde zeminin kazığı sarmasına bağlıdır. Ayrıca, bu değere varabilmesi için kazığın büyük miktarda yer değiştirmesi gerekmektedir. Bu sebeple, α adhezyon katsayısı değeri 1'den küçük değer almaktadır (Toğrol ve Tan, 2003).

Fleming ve diğ. (1986), kazık ile zemin arasındaki adhezyon katsayısı için normalize edilmiş kayma mukavemetine bağlı olarak;

$$f_s = \alpha c_u \quad (3.15)$$

$$c_u / \sigma_v' < 1 \text{ için } \alpha = 0.5 / (c_u / \sigma_v')^{1/2} \quad (3.16)$$

$$c_u / \sigma_v' > 1 \text{ için } \alpha = 0.5 / (c_u / \sigma_v')^{1/4} \quad (3.17)$$

α : Adhezyon katsayısı (0.25 – 1.0)

bağıntılarını vermektedir.

Burnland (1973), kil zeminlerin çevre sürtünmesini efektif gerilmeleri dikkate alarak:

$$f_s = K_s \sigma_v' \tan \delta = \beta \sigma_v' \quad (3.18)$$

β : Sürtünme Katsayısı

şeklinde hesaplamasını önermektedir.

Normal konsolide kile çakılan kazıklar için;

$$\beta_{nc} = (1 - \sin \phi') \tan \phi' \quad (3.19)$$

olarak verilmiştir.

Aşırı konsolide killerde çevre sürtünmesi, normal konsolide killere oranla daha büyüktür. Meyerhof (1976), aşırı konsolide killer için;

$$\beta = \beta_{nc} \sqrt{AKO} \quad (3.20)$$

AKO : Aşırı konsolidasyon oranı

değerini önermektedir.

(3.14) denkleminde görülen N_c taşıma gücü katsayısı, D_f/B oranına göre veya kazık çapına göre değişmektedir. Bu durumlar için pratikte tavsiye edilen N_c değerleri, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.5 : D_f/B oranına göre değişen N_c değerleri, NAVFAC 7.2 (1982).

D_f/B	N_c
0	6.2
1	7.8
2	8.5
≥ 4	9.0

Çizelge 3.6 : Kazık çapına (D) göre değişen N_c değerleri.

Fore Kazık Çapı	N_c
< 0,5 m	9
0,5 m - 1,0 m	7
> 1,0 m	6

Değerler Canadian Foundation Engineering Design Manual, (1985)'den alınmıştır.

3.1.3 Kayaya soketli kazık ve baretin taşıma kapasitesi

Kayaya soketli kazıkların tasarımı, statik yükleme deneyleri ve ana kayadan alınan numuneler üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deney sonuçlarından türetilmiş ampirik bağıntılar ile yerel tecrübelerle dayanarak yapılmaktadır. Tasarımın doğasında olan belirsizlikler, kaçınılmaz biçimde, ya temelin güvenle taşıyabileceği yükü azaltır ya da tasarımcıyı üstyapı yüklerini taşıyabilmek için aslında aşırı güvenli olan ve ekonomik olmayan bir tasarım yapmak durumunda bırakır (Seidel, 2000).

Kayaya soketli kazık ve baretin çevre sürtünmesi, soket çevresinde beton ile kayanın bağlanması ve dolayısıyla bu bağın mukavemeti, kayanın mukavemetine bağlıdır. Maksimum bağ mukavemetinin ortalama tek eksenli basınç dayanımıyla olan ilişkisi aşağıdaki denklem ile verilmektedir:

$$f_c = \alpha q_u^\beta \quad (3.21)$$

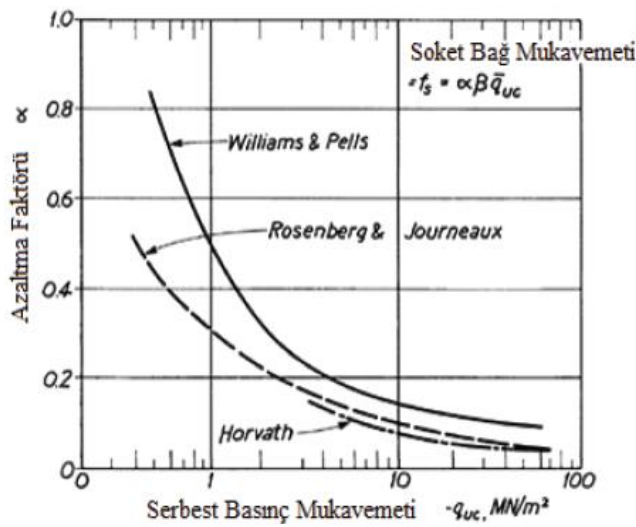
f_c : Soket bağ mukavemeti

q_u : Tek eksenli basınç dayanımı

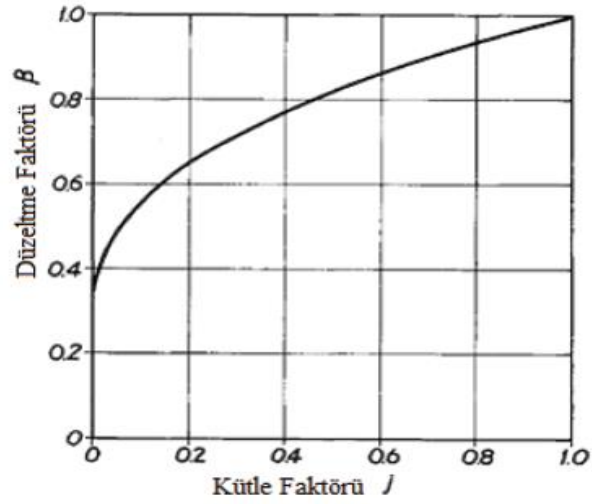
α : Şekil 3.1'den elde edilen azaltma faktörü

β : Kayadaki süreksizlik düzlemlerine ilişkin düzeltme faktörü (Şekil 3.2)

β düzeltme faktörü, “j” kütle faktörüne bağlıdır. Kütle faktörü, soket bölgesindeki kaya kütlelerinin elastisite modülünün, ana kayanın elastisite modülüne oranıdır (Şekil 3.3).

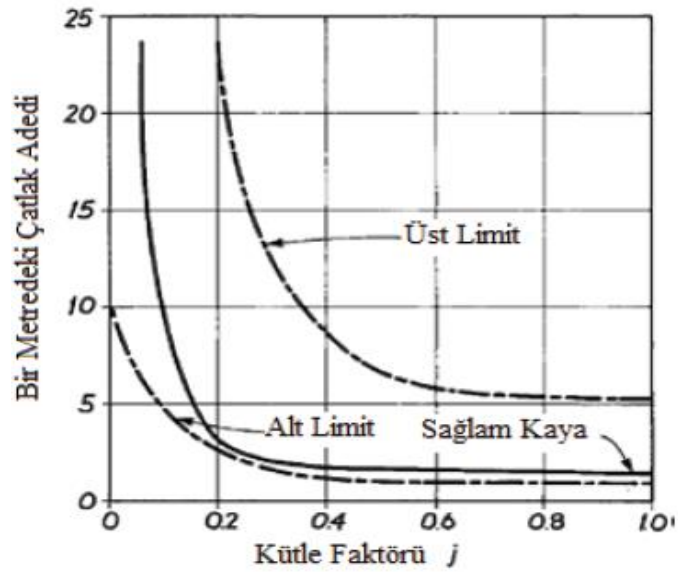


Şekil 3.1 : Kayaya soketlenen kazıklar için azaltma faktörleri, (Tomlinson, 2004).



Şekil 3.2 : Kayadaki süreksizlik düzlemlerine ilişkin düzeltme faktörü, (Tomlinson, 2004).

Eğer kütle faktörü laboratuvar deneylerinden veya sismik ölçümlerden elde edilmemişse, Çizelge 3.7'de verilen RQD (bir metre karot numunesinde yer alan 10 cm uzunluğundaki karot numune uzunlukları toplamının toplam karot boyuna oranı) ya da süreksizlik düzlem sıklığı ile yaklaşık olarak elde edilebilir..



Şekil 3.3 : Kütle faktörü değerleri, (Tomlinson, 2004).

Çizelge 3.7 : RQD – kütle faktörü ilişkisi, (Tomlinson, 2004).

RQD (%)	Her bir metredeki çatlak adedi	j
0 - 25	15	0.2
25 - 50	15 - 8	0.2
50 - 75	8 - 5	0.2 - 0.5
75 - 90	5 - 1	0.5 - 0.8
90 - 100	1	0.8 - 1.0

Goodman (1980) tarafından, kayaya soketlenen kazık için birim uç direnci bağıntısı:

$$q_p = q_u (N_\phi + 1) \quad (3.22)$$

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi'/2) \quad (3.23)$$

ile ifade edilmektedir.

Canadian Geotechnical Society (1985), kayaya soketlenen fore kazıklar için emniyetli taşıma gücü q_a 'nın tahmini için:

$$q_p = q_u (N_\phi + 1) \quad (3.24)$$

q_a : emniyetli uç taşıma gücü,

K_{sp} : 0.1 – 0.4 arasında değişen katsayı,

d : derinlik katsayısı

bağıntısını vermektedir.

$$K_{sp} = \frac{3 + c/D}{10\sqrt{1 + 100\delta/c}} \quad (3.25)$$

c : çatlak aralığı

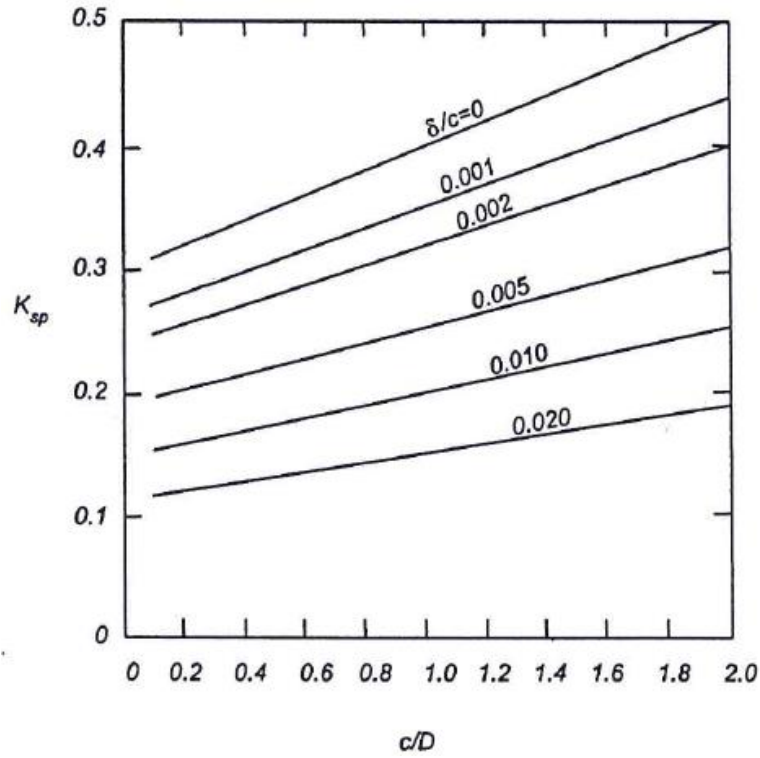
δ : çatlak açıklığı

$K_{sp} - c/D$ ilişkisi Şekil 3.4'te verilmektedir. d , derinlik katsayısı (3.26) bağıntısında elde edilmektedir.

$$d = 1 + 0.4 \frac{L_s}{D_s} \leq 3.4 \quad (3.26)$$

L_s : kaya içindeki soket derinliği

D_s : soket (kazık) çapı



Şekil 3.4 : $K_{sp} - c/D$ ilişkisi, (Toğrol ve Tan, 2003).

3.2 Arazi Deneylerinden Elde Edilen Veriler Yardımıyla Kapasite Hesabı

Projenin yapılacağı bölgenin, zemin koşullarının belirlenmesinde arazi deneyleri önemli bir kanıt oluşturmaktadır. Belirli bir bölgede, arazi deneylerinden elde edilen parametreler ile arazi deneyleri sırasında zeminden alınan numunelerin laboratuvar deneylerinde kullanılması sonucu elde edilen parametrelerin korelasyonları, çeşitli yöntemlerle elde edilen sonuçların tutarlılığının kontrolü açısından önem arz etmektedir. Günümüze kadar gelen süreçte, kazık kapasitesi hesabında genel olarak kullanılan arazi deneyleri; SPT, CPT ve MPT olup, deney sonuçlarından elde edilen mühendislik parametrelerine bağlı olarak kapasite bağıntıları literatürde yer almaktadır.

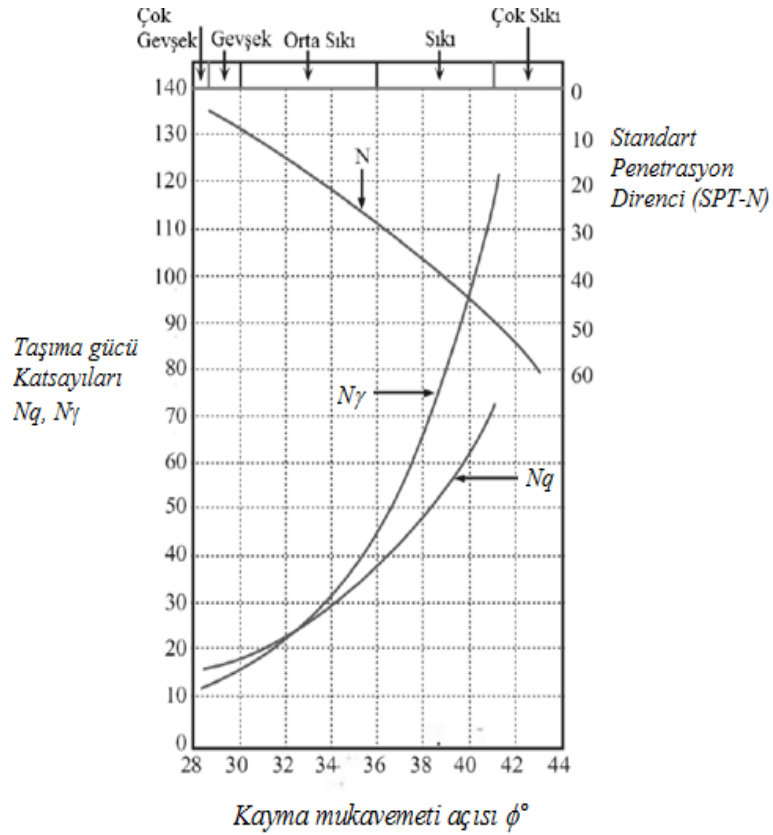
3.2.1 Standart Penetrasyon Deney Verileri ile Kapasite Hesabı

Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de kullanılan arazi deneylerinden bir tanesidir. Hemen hemen her zemin incelemesi için Standart Penetrasyon Testi uygulanabilmektedir. Deney esas olarak ucu açık, standart boyutlardaki bir numune alıcının zemine çakılması ile yapılmaktadır. Deney, ASTM D1586 - 08a (Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils, 1999)'da detaylı olarak tariflenmektedir. Numune

Çizelge 3.8 : Kohezyonsuz zeminlerde rölatif sıklık – N_{30} – ϕ – sıklık bağıntısı.

Sıklılık	SPT-N	Φ	Dr (%)
Çok Gevşek	< 4	< 30	< 15
Gevşek	4 - 10	30 - 32	15 - 35
Orta Sıkı	10 - 30	32 - 35	35 - 65
Sıkı	30 - 50	35 - 38	65 - 85
Çok Sıkı	> 50	> 38	85 - 100

Peck, Hanson ve Thorburn (1974) tarafından önerilen taşıma gücü katsayıları ile SPT-N bağıntısı Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Taşıma gücü katsayıları ve SPT direnci arasındaki bağıntıyı gösteren eğriler, (Peck, Henson ve Thorburn, 1974).

Canadian Geotechnical Society (1985), SPT sonuçlarından kazığın taşıma gücünün tahmini için:

$$Q_u = mnA_p + n\bar{N}DA_s \quad (3.27)$$

m : deneysel katsayı (Çakma kazıklar için 400, Sondaj kazıkları için 120)

n : deneysel katsayı (Çakma kazıklar için 2, sondaj kazıkları için 1)

$N_{uç}$: Kazık ucu seviyesindeki SPT değeri

\bar{N} : Kazık boyunca ortalama SPT değeri

bağıntısını vermektedir. Standard penetrasyon deneyi sonucu uygulanan düzeltme faktörleri göz önünde bulundurularak, deneyin olası hatalarını en az seviyeye indirmek amacıyla güvenlik faktörünün en az 4.0 alınması önerilmektedir.

Meyerhof (1976), SPT-N değerleri ile kazık taşıma gücü arasındaki ilişkileri Çizelge 3.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 3.9 : SPT-N değerleri – kazık uç ve çevre direnci ilişkisi (Meyerhof, 1976).

Kazık - Zemin Cinsi	Çevre Sürtünmesi, f_s (kPa)	Uç Direnci, q_c (kPa)
Çakma Kazık- Kum	$2\bar{N}$	$40(L/D)N_{uç} \leq 400N$
Çakma Kazık- Kil	$2\bar{N}$	$30(L/D)N_{uç} \leq 400N$
Fore Kazık - Kum	\bar{N}	$13(L/D)N_{uç} \leq 130N$
Fore Kazık - Silt	\bar{N}	$10(L/D)N_{uç} \leq 100N$

Peck ve diğ. (1974) tarafından önreilen, kohezyonlu zeminlerde yapılan SPT sonucu elde edilen SPT-N değerlerine bağlı drenajsız kayma mukavemeti değerleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : SPT-N ile q_u ilişkisi, (Peck ve diğ., 1974).

Kıvam	SPT-N	q_u (kPa)*
Çok Yumuşak	< 2	< 25
Yumuşak	2 - 4	25 - 50
Orta Katı	4 - 8	50 - 100
Katı	8 - 15	100 - 200
Çok Katı	15 - 30	200 - 400
Sert	> 30	> 400

Terzaghi, Sowers, Broms ve diğerleri tarafından kil zeminlerde yapılan çalışmalar kapsamında, SPT-N değerine bağlı olarak drenajsız kayma mukavemeti aşağıda verilen bağıntılardan elde edilebilmektedir. Terzaghi, Peck ve Mesri (1996),

$$c_u = \frac{N}{80} \text{ MPa} \quad (3.28)$$

Sowers,

$$c_u = 0.5KN \text{ MPa} \quad (3.29)$$

K : ($K=0.1-0.2$, düşük plastisiteli killerde; $K=0.15$, ortalama)

($K=0 - 0.005$, çok siltli veya kumlu killeri; $K=0.10$, ortalama)

Broms (1981),

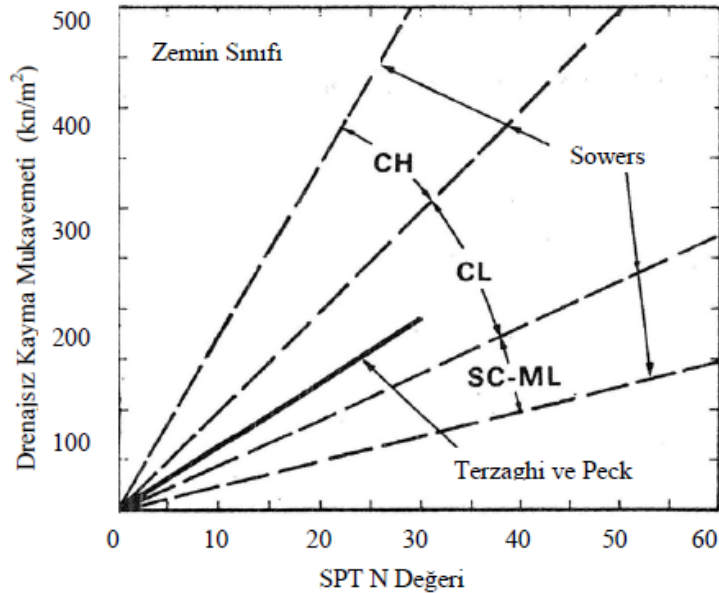
$$c_u = \frac{N}{50} \text{ MPa} \quad (3.30)$$

eşitliklerinin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Kilin drenajsız kayma mukavemeti, serbest basınç direnci değerlerinden de hesaplanabilir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan korelasyonlardan birisi Sowers (1979) tarafından Şekil 3.7'de grafiksel olarak gösterildiği üzere şu formda verilmiştir:

$$c_u = (4-6)N_{30} \text{ MPa} \quad (3.31)$$

c_u/N oranı orta plastisiteli killer için yaklaşık 4 – 5 kN/m²'dir. Plastisite indisi 20'den büyükse bu oran, 6 – 7 kN/m² veya daha büyük olabilir (Fleming, 1986).



Şekil 3.7 : SPT-N ile c_u ilişkisi, (Sowers, 1979).

3.2.2 Koni penetrasyon deney verileri yardımıyla kapasite hesabı

Koni penetrasyon deneyi arazide gerçekleştirilen en önemli deneylerden biridir. Koni penetrasyon deneyi genel olarak yumuşak kil, yumuşak silt ve ince - orta kum zeminlerde gerçekleştirilen statik bir deneydir. Çakıl ve sert zeminlerde uygulanamamaktadır.

Koni penetrasyon deneyi, esas olarak konik uçlu bir sondanın, sabit bir hızla zemine itilmesi ile gerçekleştirilir. Sondanın zemin içinde aralıksız olarak sabit hızla itilmesi sayesinde detaylı bir zemin profil incelemesi gerçekleştirilir. Deney,

ASTM D3441 – 05 (Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil)'te detaylı olarak tariflenmektedir. 35.7 mm çapındaki uç (Alan = 10cm²) zemine sabit bir hızla (10 – 20 mm/s) itilerek deney yapılır. Sondanın ucunda ve çevresinde oluşan koni direnci ve lokal çevre sürtünmesi sürekli olarak kaydedilir.

CPT deneyi sonucunda zeminden elde edilen birim uç direnci (q_c) ve birim çevre sürtünme direnci (f_s) kazık taşıma gücünün belirlenmesinde çok önemlidir. Kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesinde geliştirilen analitik yöntemler sayesinde, konik uç direnci (q_{cpt}) net uç temas direncine (q_c'), koni çeper sürtünmesi (f_{sc}) de birim çevre sürtünme direncine (f_s) çok yakındır. CPT aslında kazığın taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan kazık yükleme deneyinin minyatürü olmasına rağmen, belirli ampirik yöntemlerle kullanılarak, kazığın kapasitesinin belirlenmesinde daha kesin sonuçlar vermektedir (Coduto, 2001).

CPT verileri kullanılarak, kazık taşıma kapasitesi hesabi için birçok araştırma çeşitli bağıntılar geliştirmiştir (Fellenius, 2006). Aşağıda CPT verilerine dayalı yöntemler özetlenmektedir

Alsamman (1995), CPT verilerini kullanarak kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde imal edilecek sürtünme kazıklar için korelasyonlar geliştirmiştir. Çevre sürtünmesi hesabını, kohezyonsuz zeminleri; çakıllı kum ve killi kum olarak iki farklı kategoriye ayırarak gerçekleştirmiştir. Çevre sürtünmesini, kohezyonsuz zeminlerde, koni uç direncine (q_c) bağlı korelasyonlarla, kohezyonlu zeminlerde ise toplam düşey gerilme (σ_{vo}), değerine bağlı olarak elde etmektedir. Çizelge 3.11'de CPT verilerinden elde edilen çevre sürtünme direnci bağıntıları verilmektedir.

Çizelge 3.11 : CPT - çevre sürtünme direnci bağıntıları (Alsamman, 1995).

Zemin Tipi	Nihai çevre sürtünme direnci, q_s (tsf)	
Çakıllı Kum/Çakıl	$f_s = 0.02q_c$	$q_c \leq 50$ tsf
	$f_s = 0.0019q_c + 0.9 \leq 1.4$	$q_c > 50$ tsf
Kum/ Siltli Kum	$f_s = 0.015q_c$	$q_c \leq 50$ tsf
	$f_s = 0.0012q_c + 0.7 \leq 1.0$	$q_c > 50$ tsf
Kil	$f_s = 0.023 (q_c - \sigma_{vo}) \leq 0.9$	

Çizelge 3.12’de Alsamman (1995), kazık uç direncini hesaplamak amacıyla, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için CPT verilerini kullanarak elde ettiği bağıntılar yer almaktadır.

Çizelge 3.12 : CPT – Uç direnci bağıntıları, (Alsamman, 1995).

Zemin tipi	Nihai Kazık Uç Direnci, q_c (tsf)
Kohezyonsuz zeminler	$q_c = 0.15 q_{c_{cpt}}$ $q_{c_{cpt}} \leq 100$ tsf
	$q_c = 0.05 q_{c_{cpt}} + 10 \leq 30$ $q_{c_{cpt}} > 100$ tsf
Kohezyonlu Zeminler	$q_c = (q_{c_{cpt}} - \sigma_{v0}) \leq 25$

Canadian Geotechnical Society (1985), koni penetrasyon deneyi ile kazık taşıma gücünün tahmini için silt ve kum zeminlere uygun olarak (3.32) bağıntısını vermektedir:

$$Q_u = q_c A_p + \bar{f}_s A_s L \quad (3.32)$$

q_c : Koni penetrasyon uç direnci ($D > 500$ mm olan kazıklar için ortalama değer, yerinde ölçülen en küçük değer alınması önerilmektedir.),

\bar{f}_s : Koni penetrasyon deneyinde ortalama çevre sürtünmesi

Eslami ve Fellenius (1997), piyezokon (CPTU) kullanarak zemin içerisindeki boşluk suyu basıncını, hidrostatik boşluk suyu basıncı ile zemin içinde ilerleyen koninin neden olduğu aşırı boşluk suyu basıncı toplamı olarak ifade etmiştir. Kumlu zeminlerde aşırı boşluk suyu basıncı çok küçük olmakla birlikte killi zeminlerde büyük olabilmektedir. Piyezokon kullanılırken düzeltilmiş koni direncini (q_T) elde etmek için, boşluk basıncı verileri ölçülen q_c ile birleştirmiştir.

Eslami ve Fellenius yöntemi, q_T değerlerine aşağıda (3.33) denkleminde verilen ilave boşluk suyu basıncı düzeltilmesi yapılmasını gerektirmektedir:

$$q_E = q_T - u_2 \quad (3.33)$$

q_E : Efektif koni penetrasyon direnci

q_T : Düzeltilmiş koni penetrasyon direnci

u_2 : konik uç gerisinde ölçülen boşluk suyu basıncı

Buna göre Eslami ve Fellenius, uç kapasitesini net birim uç temas direnci (q_t') ile efektif konik direncini (q_E) ilişkilendirmiştir. Kazık, zayıf bir tabakadan geçerek sağlam bir tabakaya giriyorsa; kazık ucunun 4D aşağısından 8D yukarısına kadar bir kısımda, kazık sağlam tabakadan geçip zayıf bir tabakaya giriyorsa; kazık ucunun 4D aşağısından 2D yukarısına kadar olan kesimde ölçülen efektif koni uç dirençlerinin geometrik ortalaması alınarak (q_{Eg}) elde edilir. D kazık çapını ifade etmektedir. Buna göre q_{Eg} (3.34) denklemi kullanılarak hesaplanır:

$$q_{Eg} = \frac{(q_E)_1 (q_E)_2 (q_E)_3 \dots (q_E)_n}{n} \quad (3.34)$$

Net birim uç temas direnci, deney verileri kullanılarak (3.35) bağıntısı yardımıyla deneysel olarak q_{Eg} ile ilişkilendirilmiştir.

$$q_t' = C_t q_{Eg} \quad (3.35)$$

q_t' : Net birim uç temas direnci

C_t : Uç temas katsayısı,

q_{Eg} : Geometrik ortalama efektif koni penetrasyon direnci

Eslami ve Fellenius kazık birim çevre sürtünme direncini, (3.36) bağıntısı yardımı ile hesaplamaktadır:

$$f_s = C_s q_E \quad (3.36)$$

C_s : Koni penetrasyon deneyi çevre sürtünme katsayısı

(3.36) bağıntısında yer alan çevre sürtünme katsayısı Çizelge 3.13'te yer alan zemin tipine göre seçilmelidir.

Çizelge 3.13 : Çevre sürtünme katsayısı, C_s (Eslami ve Fellenius, 1997).

Zemin türü	C_s	
	Aralık	Tipik Tasarım Değeri
Yumuşak, hassas zeminler	0.0737 - 0.0864	0.08
Kil	0.0462 - 0.0556	0.05
Katı kil veya kil ile siltin karışımı	0.0206 - 0.0280	0.025
Silt ile kumun karışımı	0.0087 - 0.0134	0.01
Kum	0.0034 - 0.0060	0.004

Schmertmann (1975) tarafından önerilen yöntemde, ayrıık daneli zeminlerde ve killerde, kazık ucu seviyesinin $6D - 8D$ kadar üstünden, $0.7D - 4D$ kadar altına kadar olan bölgede ölçülen koni uç dirençleri ortalaması \bar{q}_{ccpt} , kazığın uç direncine eşit olarak kabul edildiği (3.37) bağıntısında verilmektedir.

$$q_c = \bar{q}_{ccpt} \quad (3.37)$$

Birim çevre sürtünme direnci ise:

$$f_s = Kf_c \quad (3.38)$$

ifadesi ile verilmektedir. Buradaki boyutsuz K katsayısı, kazığın şekline, malzemesine ve derinliğine bağılı olarak kumlarda $0.8 - 2.0$ arasında, killerde $0.2 - 1.25$ arasında değişmektedir.

Tümay ve Fakhroo (1981), uç direncini Schmertmann'ın bağıntısına benzer şekilde hesaplamakta, yalnız (3.38) bağıntısındaki K katsayısının hesaplanması için (3.39) ifadesini vermektedir.

$$K = 0.5 + 9.5e^{-90f_c} \quad (3.39)$$

(3.39) bağıntısında çevre sürtünmesi MN/m^2 cinsinden hesaplanmalıdır. Koni penetrasyon deneyi çevre sürtünmesinin (f_c) $10 - 50$ kN/m^2 arasındaki değeri için K katsayısının değeri $4.5 - 6.0$ arasında değişmektedir.

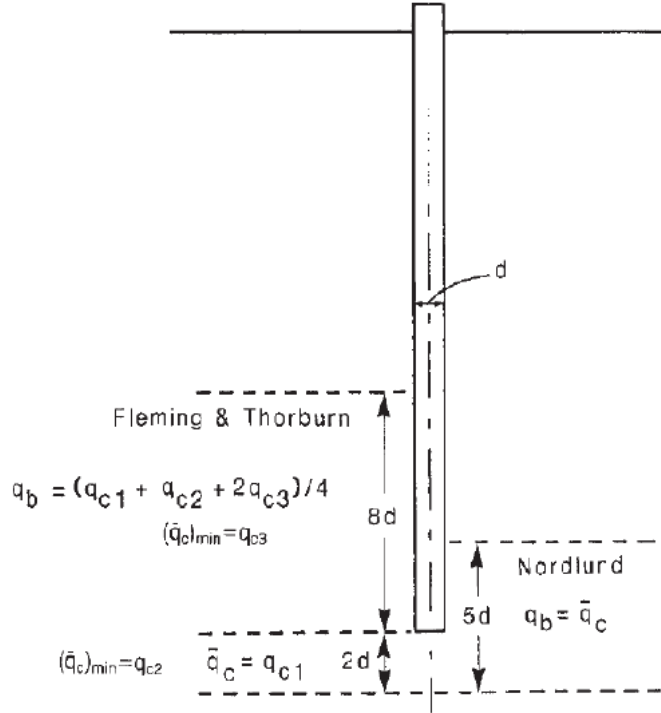
Kazık birim uç mukavemeti hesaplarında kullanılacak ortalama koni penetrasyon uç direnci için farklı penetrasyon derinlikleri önerilmektedir. Norlund (1963), kazık ucundan $3D$ yukarda ve $2D$ aşağıda bir derinlik boyunca q_c değerlerinin ortalamasının alınmasının gerektiğini savunmaktadır (Fleming ve diğ. 2009). Buna karşın Fleming ve Thorburn (1983), koni okumalarının ortalaması için daha detaylı olarak:

$$q_{c,tasarım} = (q_{c1} + q_{c2} + 2q_{c3})/4 \quad (3.40)$$

- q_{c1} : Kazık ucundan aşağıda $2D$ boyunca ortalama koni penetrasyon direnci
- q_{c2} : Kazık ucundan aşağıda $2D$ boyunca minimum koni penetrasyon direnci
- q_{c3} : Kazık ucundan $8D$ yukarıdaki bir mesafede q_{c1} 'den daha küçük minimum

değerlerin ortalaması

eşitliğini önermektedirler. Araştırmacıların önerdikleri metotların çizimleri Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8 : Kazık birim uç direncini veren koni penetrasyon verilerinin ortalamasının alınması, (Fleming ve diğ., 2009)

Genel olarak Hollanda'da kabul gören bir metot ise Meigh (1987) tarafından tariflenmektedir. Bu yöntemde, kazık alt ucunun 4D aşağısından başlayıp, yine kazık alt ucundan 8D kadar yukarısına çıkan bir bölgedeki ortalama koni penetrasyon dirençleri dikkate alınmaktadır (Tomlinson, 2004). Bağıntı şu şekildedir:

$$q_u = \frac{\bar{q}_{c-1} + \bar{q}_{c-2}}{2} \quad (3.41)$$

\bar{q}_{c-1} : Kazık ucundan yukarıda 4D boyunca ortalama koni penetrasyon direnci

\bar{q}_{c-2} : Kazık ucundan aşağıda 8D boyunca ortalama koni penetrasyon direnci

\bar{q}_{c-1} değerini saptamak için kazık ucu altındaki derinliğin seçiminden önce koni penetrasyon direnci diyagramı incelenir. Eğer koni direnci alt ucundan 4D derinliğe kadar sürekli artıyorsa, ortalama \bar{q}_{c-1} değeri uç seviyesinden yalnızca 0.7D'ye kadar ki derinlik boyunca belirlenir. Eğer 0.7D ile 4D arasındaki bölgede, dirençte ani bir azalış gözlenirse, bu aralıktaki en küçük değer \bar{q}_{c-1} değeri için seçilmelidir.

Söz konusu yöntem için kullanılacak güvenlik katsayıları ahşap kazıklar için 1.7, prekast kazıklar içinse 2.0 ilâ 2.5 olarak verilmektedir (Tomlinson, 2004).

3.2.3 Menard pressiometre deney verileri yardımıyla kapasite hesabı

Pressiometre deneyi, zemin içine açılan sondaj kuyusuna düşey yönde yerleştirilen ölçme hücresinin içine basınçlı hava tatbik edilerek, ölçme hücresinin zemine uyguladığı yatay yük ile zeminin yatay yönde nihai taşıma gücü ve deformasyon özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneydir. Genel olarak yumuşak kil, ince-orta kumlarda uygulanmaktadır. Ayrıca yumuşak kaya, iri çakıllı zeminlerde imal edilen kazıkların taşıma kapasitesi zeminin taşıma gücü ve deformasyon özellikleri ile ilişkilendirilerek bulunabilmektedir. Deney, ASTM D4719 (Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils)'de detaylı olarak tariflenmektedir.

Yapılan birçok deneysel ve teorik çalışma, kazık imalatı sonucunda aşırı derecede örselenmemiş zeminlerde uygulanacak pressiometre deneylerinin, kohezyonlu ya da kohezyonsuz zeminlerdeki sürtünme kazıklarının izin verilebilir taşıma güçlerinin tahmin edilmesinde yakın bir hata oranı ile kullanılabileceğini işaret etmektedir.

Pressiometre deneyi ile zeminin yatay yöndeki deformasyon modülleri bulunabilmektedir. Bu yüzden, arazi vane deneyinde veya üç eksenli basınç deneyinde olduğu gibi Mohr-Coulomb kırılma hipotezindeki kayma mukavemeti parametrelerini doğrudan belirlemek mümkün değildir. Pressiometre verisini, geoteknik tasarımda ancak ampirik bağıntılarla kullanmak mümkündür (Sağlam, 1996). Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15, killi ve kumlu zeminlerde Baguelin v.d. (1978) ve Briaud (1992) tarafından yapılan değerlendirmeleri göstermektedir.

Çizelge 3.14 : Killi zeminlerde p_L^* - E_M - c_u bağıntısı.

p_L^* (kPa)	E_M (kPa)	Zemin Kıvamı	c_u (kPa)
0 - 75	200 - 500	Çok yumuşak	< 20
75 - 200	500 - 2500	Yumuşak	20 - 40
200 - 400	2500 - 5000	Orta Katı	40 - 75
400 - 800	5000 - 12000	Katı	75 - 150
800 - 1600	12000 - 25000	Çok Katı	> 150
> 1600	> 25000	Sert	> 250

Çizelge 3.15 : Kumlu zeminlerde p_L^* – rölatif sıkılık – E_M ve SPT- N_{30} bağıntısı.

p_L (kPa)	E_M (kPa)	Rölatif Sıkılık	SPT- N_{30}
0 - 200	500 - 2000	Çok gevşek	0 - 4
200 - 500	2000 - 3500	Gevşek	4 - 10
500 - 1500	3500 - 12000	Orta Sıkı	10 - 30
1500 - 2500	12000 - 22500	Sıkı	30 - 50
> 2500	> 22500	Çok sıkı	> 50

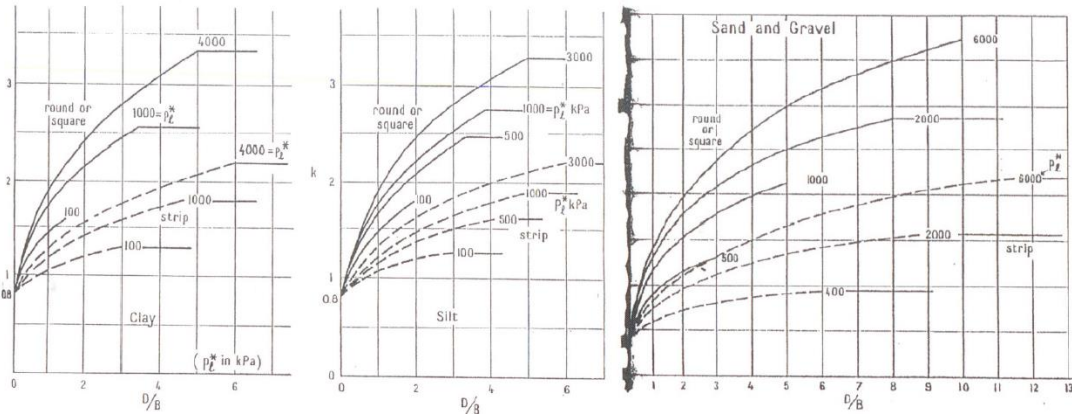
Kazıklı temelerde, nihai ve emniyetli birim uç direnci, net limit basınç yardımıyla şu formülle bulunur (Sağlamer, 1996):

$$q_p = \sigma_v' + k p_L^* \quad (3.42)$$

k : Taşıma kapasitesi faktörü

p_L^* : Net limit basınç

(k) taşıma kapasitesi faktörü zemin cinsi, temel derinliği, temel şekli ve zemin direnci gibi değişkenlerin fonksiyonudur. Kil, silt ve kum-çakıl birimler için (k) taşıma kapasitesi faktörleri sırasıyla Şekil 3.9'da gösterilmiştir. İzin verilebilir kapasitenin hesabı için nihai direnç 3'e bölünmelidir (Baguelin ve diğ., 1978).



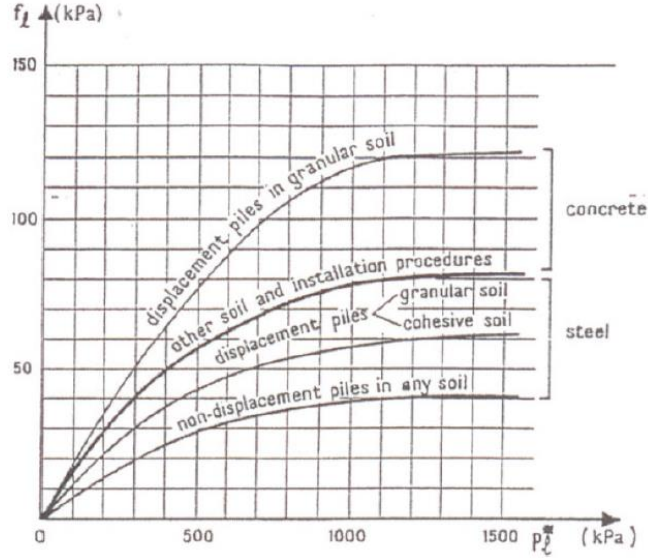
Şekil 3.9 : Kil, silt ve kum-çakıl birimler için k değerleri, Baguelin ve diğ. (1978).

Kazık çevresinde oluşan çevre sürtünmesinin belirlenmesinde ise Şekil 3.10'dan yararlanılmaktadır. Şekil 3.10'da görülebileceği gibi, birim çevre sürtünmesi, net limit basıncın, kazık yapım yönteminin ve kazık malzemesinin bir fonksiyonudur. Kaya içerisine soketlenen kazıklarda, soket bölgesinde ölçülen net limit basınç değeri $p_L^* > 1500\text{kPa}$ ise soket bölgesindeki birim çevre sürtünmesi şu şekilde hesaplanır:

$$f_i = (p_L^*/30) + 30 \text{ (kPa)} \quad (3.43)$$

f_i : Soket bölgesindeki birim çevre sürtünmesi

Kazık çevresinde mobilize olacağı düşünülen birim çevre sürtünmesine $F_s = 2$ güvenlik sayısı uygulanarak emniyetli birim çevre sürtünmesi belirlenmelidir (Sağlamer, 1996).



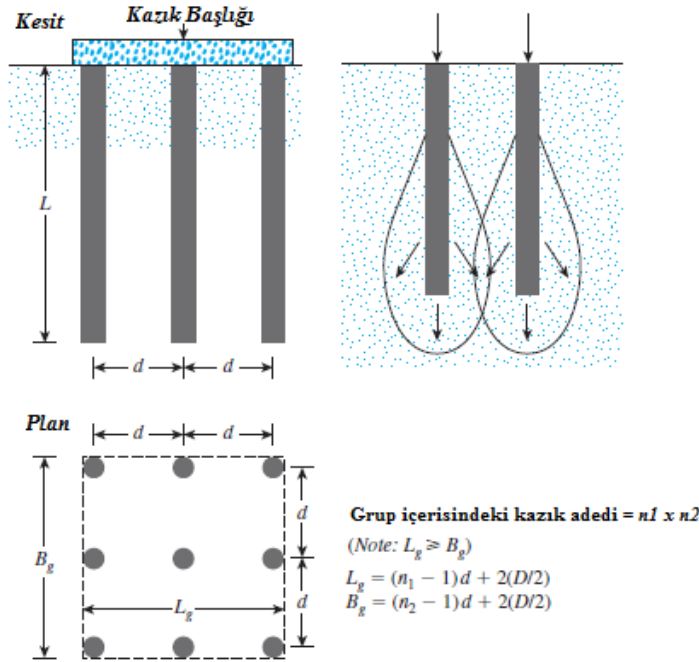
Şekil 3.10 : Kazıklarda çevre sürtünmesi – limit basınç bağıntısı.

3.3 Kazık Gruplarının Taşıma Kapasitesi

Yapısal yüklerin taşınması amacıyla inşa edilen kazıklar, üst yapıdan gelecek yükleri eksantrite oluşturmayacak şekilde zemine aktarılması amacıyla geometrik gruplar halinde inşa edilmektedirler. Geniş alana yayılan yüklerin karşılanması, yatay yük taşıyan ve moment alan yapı temellerinde kazık gruplarından yararlanılmaktadır.

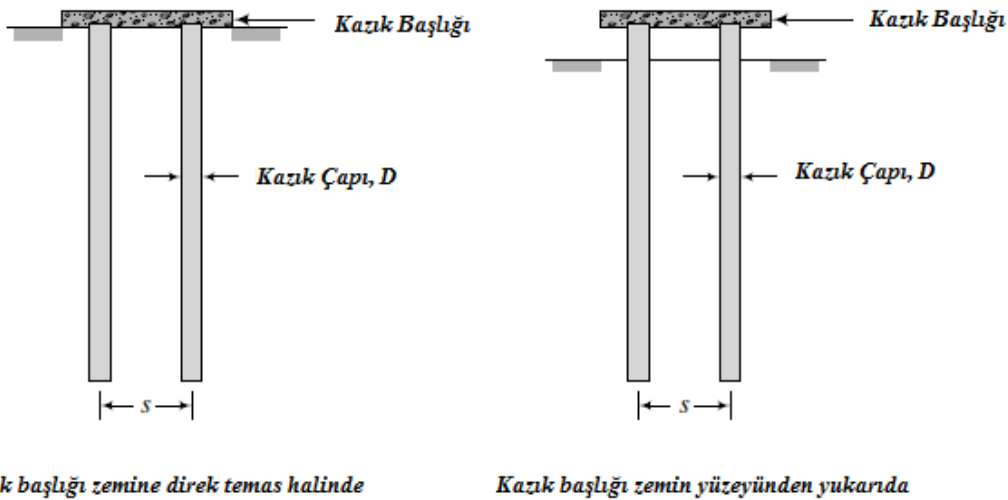
Yapılan deneysel çalışmalarda ve teoride, kil zeminlerde inşa edilen kazık gruplarının toplam taşıma gücünün, tek kazığın taşıma gücünün kazık grubunda yer alan kazık adedi ile çarpılmasıyla elde edilen taşıma gücünden düşük olduğunu göstermektedir. Grup kazıklarının taşıma gücündeki azalma, kazık çap, uzunluğu ve kazık ara mesafesine bağlı olmaktadır. Kazık gruplarının taşıma kapasitesinin belirlenmesi tam olarak çözümlenememiş olsa da, yapısal yükleri taşımak amacıyla tasarlanan grup kazıklarının ara mesafelerinin (s) yeterince uzak olmaması, Şekil 3.11'de gösterilen kazık çevresinde oluşan gerilme dağılımlarının iç içe geçmesine ve taşıma kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır. Taşıma kapasitesinin en uygun

şekilde belirlenmesi için kazık merkezleri arası mesafenin kazık çapının en az 3 katı kadar olması önerilmektedir (Das, 2004).



Şekil 3.11 : Kazıklarda grup etkisi, (Das, 2004).

Grup içinde yer alan kazıklar, kazık başlığı yapılarak birbirine bağlanılmaktadır. Kazık başlığı kimi zaman zemine direk temas ederken, kimi zaman da temas etmemektedir. Eğer kazık başlığı zemine temas ediyorsa, üst yapıdan gelen yükün bir kısmı doğrudan zemine aktarılmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Kazık başlığı-zemin ilişkisi, (Budhu, 2007).

Killi zeminlerde, kazık grubu içerisinde yer alan kazıkların dış kısmında kalan kazıklar merkezde yer alan kazıklara göre daha çok yük taşıma eğiliminde,

kohezyonsuz zeminlerde ise kazık merkezinde yer alan kazıklar dış kısımda yer alan kazıklara göre daha fazla yük taşıma eğilimindedirler (Budhu, 2007).

Grup kazıklarının nihai eksenel yük kapasitesini hesaplamakta kullanılan grup etki faktörü (η):

$$\eta = \frac{Q_{gd(u)}}{\sum Q_d} \quad (3.44)$$

η : grup etki faktörü

$Q_{gd(u)}$: kazık grubunun nihai taşıma kapasitesi

Q_d : kazık grubunda yer alan her bir kazığın nihai taşıma kapasitesi

olarak ifade edilmektedir.

Uç kazıkları için grup etkisinden ötürü taşıma gücü kaybı söz konusu olmamaktadır. Hem uç hem de sürtünme kazığı olarak çalışan kazıklarda ise taşıma gücü kaybı sadece sürtünme direncinde dikkate alınmaktadır. Çizelge 3.16'da sürtünme kazıklarında, grup etki faktörünü bulmak için kullanılan çeşitli bağıntılar verilmektedir.

Çizelge 3.16 : Sürtünme kazıkları için grup etki faktörü bağıntıları, (Das, 2004).

Bağıntı ismi	Eşitlik
Converse - Labarre Eşitliği	$\eta = 1 - \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta$ $\theta(\text{deg}) = \tan^{-1}(D/d)$
Los Angeles Grup Etkisi Eşitliği	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi dn_1n_2} [n_1(n_2 - 1) + n_2(n_1 - 1) + \sqrt{2}(n_1 - 1)(n_2 - 1)]$
Seiler - Keeney Eşitliği (Seiler ve Keeney, 1944)	$\eta = \left\{ 1 - \left[\frac{11d}{7(d^2 - 1)} \right] \left[\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0.3}{n_1 + n_2}$ <p style="text-align: center;">d is in ft</p>

Kazık gruplarının taşıma kapasitesini belirlemede kullanılan iki çeşit zemin göçmesi mevcuttur. Bunlar tekil göçme ve blok göçme olarak adlandırılmaktadır. Blok göçme durumunda, kazık grubunda yer alan kazık aralarının yetersiz olmasına bağlı olarak zemin kazıklarla beraber göçer. Grup göçme olması durumunda, grup kazıklarının taşıma kapasitesi efektif ve toplam gerilme analizleriyle aşağıda verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanır.

$$\text{EGA } (Q_{\text{ult}})_{\text{gb}} = \sum_{i=0}^j \{\beta_i (\sigma_v)^i x(D)_{ig} x L_i\} + N_q (\sigma_v)_p A_p \quad (3.45)$$

$$\text{TGA } (Q_{\text{ult}})_{\text{gb}} = \sum_{i=0}^j \{\alpha_{u_i} (c_u)^i x(D)_{ig} x L_i\} + N_c (c_u)_p A_p \quad (3.46)$$

Tekil göçme durumunda ise kazık çevresindeki zeminden sıyrılarak göçmektedir. Bu durumda göçen kazık tamamen mobilize olmaktadır.

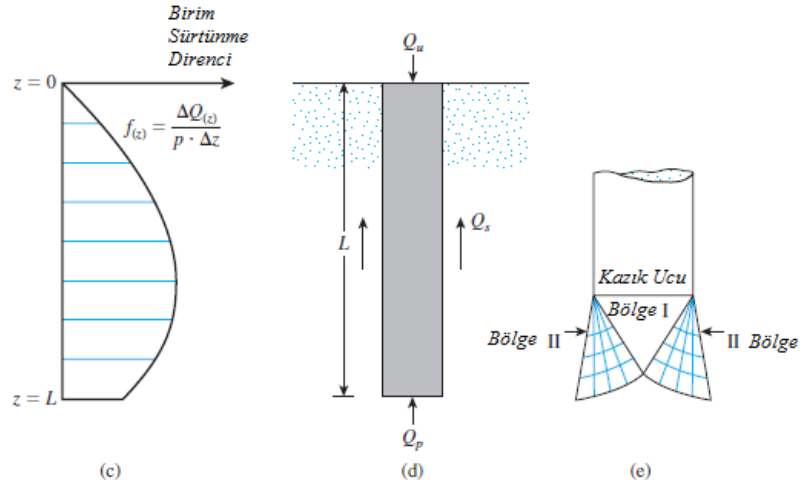
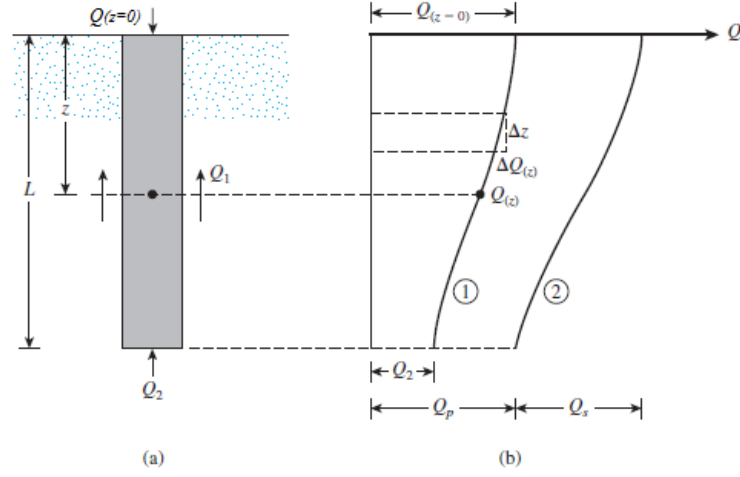
Diğer yandan grup kazıklarda, her bir kazık için çalışma yükünü azaltmak yerine kazık boyunu artırarak kazık kapasitesini arttırmak ve azaltma faktörü uygulandığında istenilen kazık kapasitesine ulaşmak genellikle daha ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır (Leonards, 1962; Das, 2004).

3.4 Kazıkların Oturması

Kazıklar maruz kaldığı yükler altında zemin içerisinde belirli miktarlarda yer değiştirme yapmaktadırlar. Kazıkların yüklere karşı oluşturdukları direnç sayesinde, üst yapıdan gelen yükler, kazığın bulunduğu zemin cinsine bağlı olarak sürtünme, uç direnci veya uç ve sürtünme direncinin kümülatifi ile sağlanmaktadır. Kazıklar, bulunduğu zemin içerisinde mobilize olması için belirli sınırlar içerisinde yer değiştirme yapması gerekmektedir. Yer değiştirme, kazığın veya kazık gruplarının elastik veya konsolidasyon oturması ile oluşmaktadır. Bu kapsamda, kazığın yük transfer mekanizması, elastik ve konsolidasyon oturması aşağıdaki başlıklar altında incelenmektedir.

3.4.1 Kazık yük aktarma mekanizması

Kazıkların zemin içerisinde yük aktarma mekanizması karmaşık bir yapıya sahiptir. Yük aktarma mekanizmasını belirleyen (L) kazık boyu, Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Kazık başlığında yük genellikle sıfır olup, yükleme ile birlikte $Q_{(z=0)}$ olmaktadır.



Şekil 3.13: Kazık yük aktarma mekanizması, (Das, 2004).

Uygulanan yükün bir kısmı kazık gövdesinde oluşan çevre sürtünmesi Q_1 , bir kısmı da kazık alt kotundaki zemin tarafından uç direnci Q_2 tarafından karşılanmaktadır. Eğer hesaplamalarda, kazık başındaki yük kazık gövdesi tarafından karşılanıyorsa, $Q_{(z)}$, her hangi bir z derinliğinde, Şekil 3.13 (b)'de yer alan 1 no'lu eğri de gösterildiği şekilde yük dağılımı oluşmaktadır. Herhangi bir z derinliğindeki birim alana etkiyen sürtünme direnci:

$$f_{(z)} = \frac{\Delta Q_z}{(p)(\Delta z)} \quad (3.47)$$

Şekil 3.13(c) $f_{(z)}$ fonksiyonunun derinlikle dağılımını göstermektedir. Eğer kazık başına uygulanan Q yükü artarsa, maksimum çevre direncinin kazık gövdesinde oluşması için kazık ile zemin arasında gözlemlenebilir deplasman değeri kazık çapı D ve kazık boyu L 'ye bağımsız olarak 5 ile 10 mm arasında olmalıdır. Bununla birlikte maksimum uç direncinin oluşabilmesi için kazık ucunun, kazık çapının %10

ila %25'i kadar deplasman yapması gerekmektedir. Bu durumdaki taşınabilir yük Q_d (Şekil 3.13(d) ve Şekil 3.13 (b)'de yer alan 2 no'lu eğride):

$$Q_{(z=0)} = Q_d \quad (3.48)$$

$$Q_1 = Q_s \quad (3.49)$$

$$Q_2 = Q_u \quad (3.50)$$

ifadesini oluşturmaktadır.

Kazık gövdesinde, çevre sürtünmesinin oluşması için gerekli olan deplasman miktarı, uç direncinin oluşması için gerekli deplasman miktarından daha küçüktür.

3.4.2 Kazıkların elastik oturması

Kazıklarda oturma hesabı yapılması zordur. Ayrıca elde edilen değerler kesin sonuçlar vermez fakat yüzeysel ve derin temeller oturmaları kontrol etmek için inşa edilir ve temel tasarımında oturma analizlerinin önemi detaylı incelenememektedir.

Bir kazığın toplam oturması (Das, 2004);

$$s = s_e + s_p + s_s \quad (3.51)$$

s_e : Kazığın elastik sıkışması

s_p : Kazık uç direncinden kaynaklanan oturma

s_s : Kazık sürtünme direncinden kaynaklanan oturma

Kazık malzemesi elastik sınırlar içerisinde kaldığı durumda (Das, 2004);

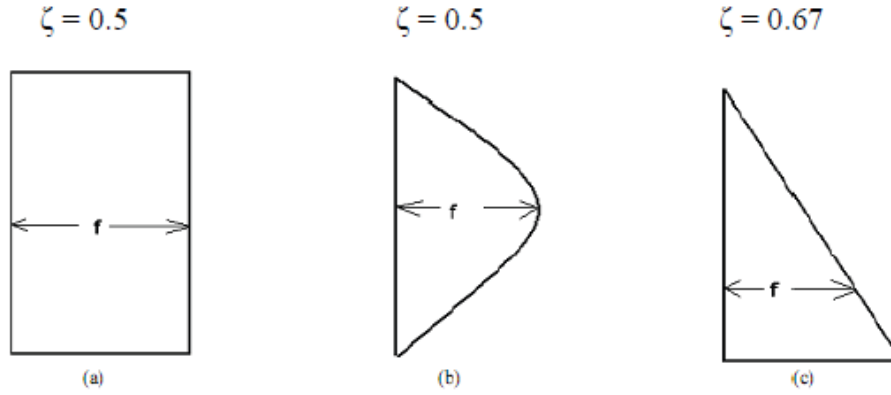
$$s_e = \frac{(Q_p + \zeta Q_s) L}{A_p E_p} \quad (3.52)$$

ζ : 0 - 0.5 veya 0 - 0.67 (Şekil 3.14'te verilen sürtünme direnci dağılımına göre)

E_p : Kazık elastisite modülü (21-210 GPa).

Çeliğin elastisite modülü 200 – 210 GPa arasında, betonun elastisite modülü 21 – 32 GPa arasında ve betonarmenin elastisite modülü 23 – 35 GPa arasında

değişmektedir. Kısa kazıkların elastik sıkışma değerleri çok küçük olup ihmal edilebilmektedir.



Şekil 3.14 : Kazık boyunca çevre sürtünmesi direnci dağılımı, (Das, 2004).

Kazık uç direncinden kaynaklanan oturma şöyle hesaplanabilir (Das, 2004):

$$s_p = \frac{q_p D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (3.53)$$

E_s : Kazık ucundaki zeminin elastisite modülü

μ_s : Zeminin poisson oranı (0.15 – 0.40)

I_{wp} : Etki faktörü (~0.85)

Kazık sürtünme direncinden kaynaklanan oturma şöyle hesaplanabilir (Das, 2004):

$$s_s = \left(\frac{Q_s}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (3.54)$$

I_{ws} : Etki faktörü

Eğer kazıklarda meydana gelecek oturma miktarı çok yüksek değerlerde ise, aşağıdaki yöntemlerden biri ya da birkaçı aracılığıyla azaltılmalıdır (Tomlinson, 2004):

- Kazığın servis yükü,
- Kazık sürtünme mukavemeti artırılarak kazık ucuna gelen yük azaltılmalıdır. Bu durum kazık çapının artırılmasıyla sağlanabilir,
- Kazık boyu artırılarak kazık sürtünme direncinin artması sağlanırken, kazık ucunun daha az sıkışabilir zemin tabakalarına ulaştırılması sağlanmalıdır.

Uç ve sürtünme direnci ile yük taşıyan bir kazığın oturması aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Buradaki toplam oturma, kazık boyunca gerçekleşen elastik kısalma ve kazık ucundaki zemin tabakasında meydana gelen sıkışmadır.

$$s = \frac{(Q_s + 2Q_p)L}{2A_s E_p} + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{Q_p}{A_c} \cdot \frac{D(1-\mu^2)I_p}{E_s} \quad (3.55)$$

- Q_s : Kazık çevresindeki yük
 Q_p : Kazık ucundaki yük
 I_p : L/D oranına bağlı etki faktörü
 E_u : Kazık ucundaki zeminin elastisite modülü

3.4.3 Kazık grubunun elastik oturması

Genel olarak, kazık gruplarının oturması, kazık grubu içerisinde yer alan her bir kazığa etkiyen çalışma yükünün, grup genişliğinin (B_g), kazık merkezleri arasındaki mesafenin (d) artmasıyla birlikte artmaktadır. Literatürde kazık gruplarının elastik oturması ile ilgili birçok araştırma mevcuttur.

Vesic (1977), kazık gruplarının oturmasını basit bir ilişki ile şu şekilde belirtmektedir:

$$s_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}} s_e \quad (3.56)$$

- $s_{g(e)}$: kazık grubunun elastik oturması
 B_g : kazık grubu kesit alanı genişliği
 s_e : çalışma yüküne bağlı olarak kazığın elastik oturması

Meyerhof (1976), kum ve çakıllı zeminlerde yer alan kazık gruplarının elastik oturma bağıntısını aşağıdaki gibi ifade etmektedir.

$$s_{g(e)} \text{ mm} = \frac{0.69q\sqrt{B_g I}}{N_{60}} \quad (3.57)$$

$$q = Q_g / (L_g B_g) \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (3.58)$$

- L_g ve B_g : kazık grup kesitinin uzunluğu ve genişliği (m)
 SPT- N_{60} : oturma sınır değerleri içindeki ortalama standart penetrasyon sayısı
 I : etki faktörü = $1 - L/8B_g \geq 0.5$

Koni penetrasyon direnci kullanılarak grup kazıkların elastik oturması:

$$s_{g(e)} = \frac{qB_g I}{2q_c} \quad (3.59)$$

q_c : oturma sınırı içerisindeki koni penetrasyon direnci ifadesinden bulunmaktadır.

3.4.4 Kazık grubunun konsolidasyon oturması

Killi zemin içerisindeki kazık gruplarının konsolidasyon oturması 2:1 gerilme dağılım metodu yaklaşımıyla hesaplanabilmektedir. Şekil 3.15'te görülen kazık grupları konsolidasyon oturması hesabı aşağıdaki adımlar takip edilip yapılmaktadır.

- L , zemin içerisinde yer alan kazık boyu belirlenir. Kazık grupları Q_g toplam yüke maruz kalır. Eğer kazık grubu başlığı örselenmemiş zemin yüzeyine temas ediyorsa, Q_g , kazık gruplarına üst yapıdan etkiyen toplam yükten kazıkların üst kısmında yer alan zeminin efektif ağırlığının farkına eşittir.
- Q_g , zemin içerisinde kazık boyunun $2L/3$ 'ünden itibaren Şekil 3.15'te gösterildiği gibi aktarılmaktadır. Q_g , zemin içerisinde derinlikle 2:1 eğimle artarak yayılmaktadır. aa' ve bb' eğrileri kazık grubunun iki yanında oluşmaktadır.

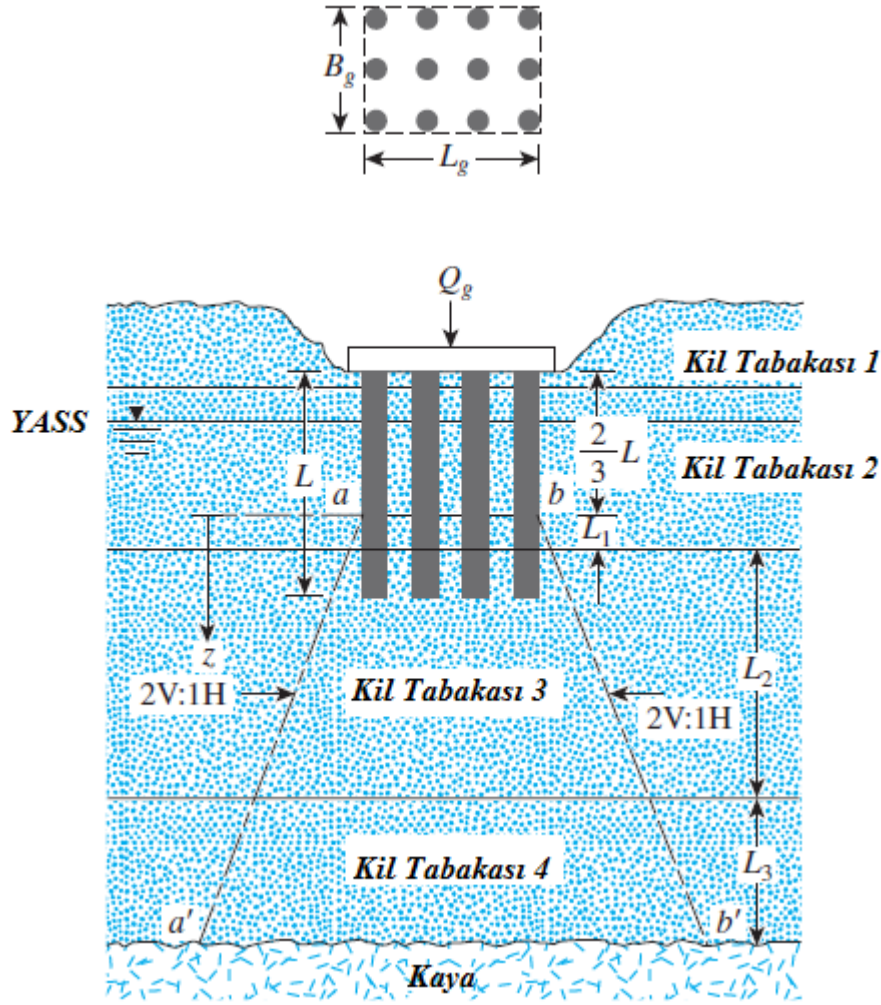
Her tabakanın ortasında Q_g yükünün neden olduğu efektif gerilme artışı hesaplanmalıdır. Bu formül:

$$\Delta\sigma_i' = \frac{Q_g}{(B_g+z_i)(L_g+z_i)} \quad (3.60)$$

$\Delta\sigma_i'$: i. tabakasının ortasında efektif gerilmedeki artış

L_g, B_g : kazık gruplarının uzunluğu ve genişliği

z_i : $z = 0$ dan i. tabakanın ortasına olan uzaklığı.



Şekil 3.15 : Kazık gruplarının konsolidasyon oturması, (Das, 2004).

- Gerilme artışının sebep olduğu her tabakadaki konsolidasyon oturması aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır.

$$\Delta s_{c(i)} = \left[\frac{\Delta e_{(i)}}{1 + e_{0(i)}} \right] H_i \quad (3.61)$$

- $\Delta s_{c(i)}$: i tabakasındaki konsolidasyon oturması
- $\Delta e_{(i)}$: i. tabakada gerilme artışının sebep olduğu boşluk oranındaki değişme
- $e_{0(i)}$: i. tabakanın başlangıç boşluk oranı(yapıdan önce)
- H_i : tabaka kalınlığı

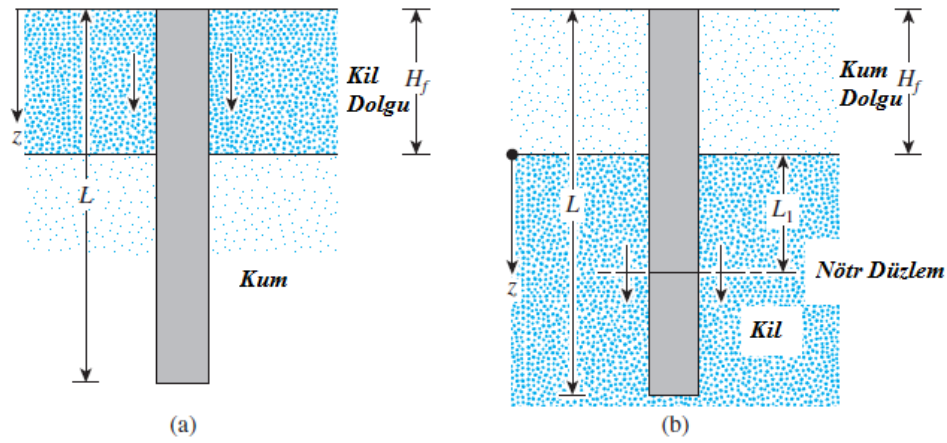
- Grup kazıklarının toplam konsolidasyon oturması aşağıdaki (3.62) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta s_{c(g)} = \sum \Delta s_{c(i)} \quad (3.62)$$

3.4.5 Negatif sürtünme direnci

Negatif sürtünme direnci, kazık etrafında var olan zeminin aşağıya doğru hareket etmesi sonucu oluşmaktadır. Bu direnç aşağıdaki durumlarda oluşmaktadır:

- Çakma kazıkların yer aldığı kohezyonsuz zemin üzerine kil dolgu yapılması durumunda, dolgu zamanla konsolide olacaktır. Konsolidasyon süresinde kazık, aşağı doğru kuvvetlerin etkisiyle Şekil 3.16 (a)'da gösterildiği şekilde yer değiştirme yapmaktadır.
- Eğer yumuşak kil tabakanın üzerine kohezyonsuz zemin dolgusu yapılırsa, Şekil 3.16 (b)'de gösterildiği gibi konsolidasyon sürecine sebep olacak ve hatta kazığın aşağı yönde deplase olmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.16 : Negatif sürtünme direnci, (Das, 2004).

- Su seviyesinin altında yer alan herhangi bir derinlikte efektif gerilmenin artışıyla birlikte, kil tabakasında konsolidasyon oturmasına sebep olmaktadır. Eğer kazık kil tabakası içerisinde yer almaktaysa, aşağı yönlü sürükleyici kuvvete maruz kalmaktadır.

3.4.5.1 Granüler zemin üzerine kil dolgu yapılması (Şekil 3.16 a)

β metoduyla kazık üzerine etkiyen negatif sürtünme direnci:

$$f_s = K' \sigma_0' \tan \delta' \quad (3.63)$$

K' : yanal toprak basıncı katsayısı = $K_0 = 1 - \sin \phi'$

σ_0' : efektif düşey gerilme

δ' : zemin ile kazık arasındaki sürtünme açısı $\approx 0.5-0.7\phi'$

Kazığın aşağı yönlü hareketine sebep olan toplam yük:

$$Q_n = \int_0^{H_1} (pK'\gamma_f' \tan \delta') z dz = \frac{pK'\gamma_f'H_f^2 \tan \delta'}{2} \quad (3.64)$$

H_f : tabaka kalınlığı

bağıntısından bulunur.

3.4.5.2 Kil zemin üzerine granüler dolgu yapılması (Şekil 3.16 b)

Eş derinlik olarak belirtilen, $z = 0$ kotundan $z = L_1$ kotuna kadar olan seviyede oluşan negatif sürtünme direnci, kil zemin üzerinde yer alan granüler dolgunun varlığının en büyük kanıtıdır (Vesic, 1977). Eş değer derinlik aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmaktadır:

$$L_1 = \frac{(L-H_f)}{L_1} \left[\frac{L-H_f}{2} + \frac{\gamma_f'H_f}{\gamma'} \right] - \frac{2\gamma_f'H_f}{\gamma'} \quad (3.65)$$

γ_f' : dolgunun su altındaki birim hacim ağırlığı

γ' : dolgu altında yer alan kilin birim hacim ağırlığı

L_1 derinliği bulunduktan sonra, kazığın aşağı yönlü hareketine sebep olan kayma yükü:

$$Q_n = (pK'\gamma_f'H_f \tan \delta')L_1 + \frac{L_1^2 pK'\gamma' \tan \delta'}{2} \quad (3.66)$$

bağıntısından bulunur.

4. KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTESİNİN YERİNDE BELİRLENMESİ

Kazığın veya baretin nihai kapasitesi ve oturma hesabı için kullanılan formüller ve teoriler hakkındaki detaylı bilgiler önceki bölümlerde yer almaktadır. Kazık imalat yöntemleri ve saha koşulları düşey yük taşıma kapasitesini doğrudan etkilemekte olup, bağıntılara ve modellemeye dayalı analizler tamamen güvenli sonuçlar vermemektedir. Bu sebeple, arazi deneyleri ile elde edilen zeminlerin mühendislik parametreleri ve kazık imalatında kullanılan malzeme cinsi dikkate alınarak, ampirik bağıntılar ve teoriler yardımıyla yüksek güvenlik faktörleri kullanılarak yapılan nihai kapasite hesabının saha koşullarında tatbiki için arazide geleneksel kazık yükleme ve Osterberg yük hücresi ile iki yönlü statik yükleme deneyi yapılmaktadır.

Kazık yükleme deneyleri, kazık tasarımında ve zemin incelemeleri sırasında gözlemlenen belirsizliklerin kontrolünü sağlamaktadır. Kazık yükleme deneylerinden, aşağıda belirtilen temel bilgiler elde edilebilir.:

- Tekil kazığın nihai taşıma kapasitesi,
- Kazığın yük-deplasman ilişkisi,
- Deney kazığının yapısal bütünlüğü.

Kapasitesi ampirik bağıntılarla belirlenen kazığın test sonrasında gözlenen yük – deplasman eğrileri yardımıyla izin verilen yer değiştirme miktarı ve bu yer değiştirme miktarına karşılık gelen mobilize olmuş çevre ve uç direnci gözlemlenerek tasarımın doğruluğu kontrol edilebilmektedir. Deney sırasında, arazi deneyleri ve laboratuvarında yapılan deneyler sonrasında belirlenen zemin tabakalarının mühendislik parametreleri ile belirlenen kazık kapasitesi, test yükü altında gösterdiği performans ile kazığın yapısal bütünlüğü (imalat hataları) gözlemlenebilmektedir. Kazık kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan belli başlı yöntemler; statik yükleme deneyi, Osterberg yük hücresi deneyi, dinamik deneyler, yarı statik deneylerdir. Bu yöntemlerin bir kısmı için literatürde ve uluslararası kurumlarca yayımlanan standartlar bulunmaktadır. Bir kısım deney yöntemleri için ise standart bulunmamasına rağmen deney yapım ve değerlendirme kriterleri, deneyi geliştiren firmalar tarafından ayrıntılarıyla tarif edilmektedir. Bu bölümde, kazık

kapasitesinin yerinde belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyi ve Osterberg yük hücresi ile yapılan iki yönlü statik yükleme deneyi hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

4.1 Geleneksel Kazık Yükleme Deneyi

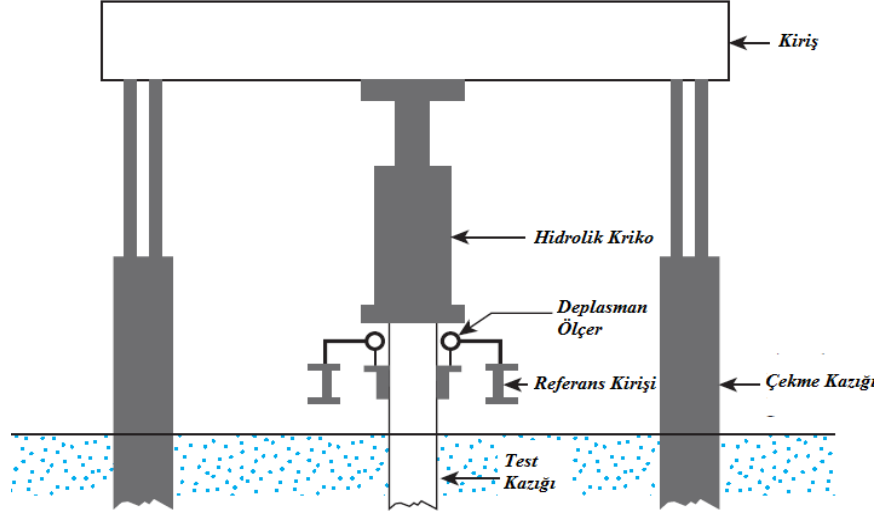
Geleneksel kazık yükleme deneyi, kazıkların taşıma kapasitesinin arazi koşullarında belirlenmesi için kullanılan en güvenilir yöntemlerden bir tanesidir. Geleneksel kazık yükleme deneyi, uluslararası şartnamelerde belirlenen standartlara uygun olarak belirli bir zaman dilimi içerisinde, kazığın yüklenerek yükleme sırasında oluşan yer değiştirmelerin ölçülmesi şeklinde yapılmaktadır. Geleneksel kazık yükleme deneyi genellikle iki tip kazıkta gerçekleştirilmektedir. Test kazığı olarak eğer proje kazığı kullanılıyorsa, kazık proje tasarım yükünün en fazla 1.5 katına kadar yüklenmektedir. Deney, proje kazığından hariç bir kazıkta gerçekleştiriliyorsa test kazığı, taşıma kapasitesinin 2.0 – 2.5 katına kadar ya da göçene kadar yüklenerek taşıma kapasitesi belirlenmektedir.

Geleneksel kazık yükleme deneyinin amaçları aşağıdaki gibi özetlenmektedir (Tomlinson, 2004):

- Arazi deneyleri ve laboratuvar sonuçları dikkate alınarak hesaplanan kazık kapasitesi ile saha koşullarındaki kapasitesini karşılaştırmak,
- Uç ve sürtünme direncinin gerçek değerlerini hesaplamak,
- Tasarım yükü altında zeminin deformasyon modülünü hesaplamaktır.

4.1.1 Deney ekipmanları

Kazık kapasitesinin arazide belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi yapımında kullanılacak olan deney ekipmanları, kazıkta eksantrisite oluşturmayacak şekilde yerleştirilmelidir. Bu sebeple, kazığa uygulanacak yükün, kazığa uniform olarak etki etmesi amacıyla kazık üst kotuna dayanımı yüksek beton sınıfı kullanılarak kazık başlığı yapılmalıdır. Referans kirişleri, çekme kazıkları, test kirişi, hidrolik kriko, hidrolik pompa ve deplasman ve basınç ölçerler kazık yükleme deneyinin temel ekipmanlarını oluşturmaktadır. Test düzeneğini oluşturan deney ekipmanları Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1 : Geleneksel kazık yükleme deney düzeneği, (Das, 2007).

Deney sırasında yükün kazığa uniform olarak etkimesi amacıyla başlık yapılırsa da, kazık imalatı sırasında tolerans limitleri içerisinde yer alan kazık eksenindeki yatay sapmaların, kazığın yüklenmesi sırasında daha detaylı gözlenebilmesi amacıyla deplasman okumaları kazık başlığının 4 kenarına koyulan deplasman ölçerler ile yapılmalıdır.

4.1.2 Yük uygulama yöntemi

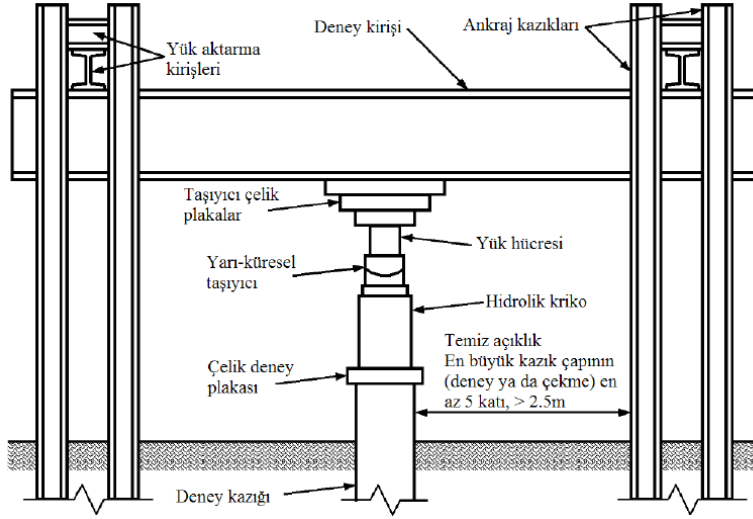
Statik kazık yükleme deney yapımı için seçilen yükleme şekline göre, deney düzeneği farklı şekillerde kurulmakta ve deneyin gerçekleştirilebilmesi için farklı ekipmanlar gerekmektedir. Uluslararası standartlar kapsamında seçilen yükleme şekli ve prosedüre göre, deney öncesi çeşitli imalatların yapılması da gerekmektedir.

Geleneksel kazık yükleme deneyinde aşağıdaki yöntemlerle yükleme yapılmaktadır (Zhang, 2004):

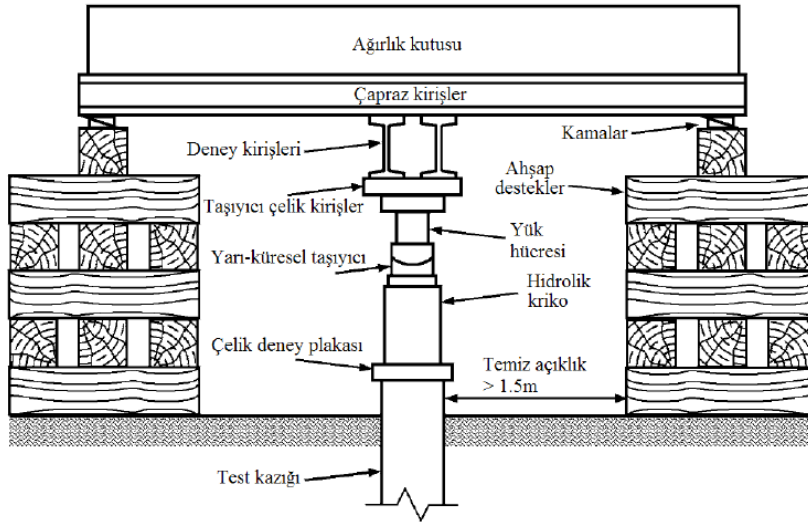
Hidrolik kriko vasıtasıyla ankrajdan ya da çekme kazıklarından reaksiyon olarak yükleme yapılması Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, uygulanacak deney yüküne uygun seçilen bir reaksiyon sisteminden ve bunları birbirine bağlayan reaksiyon kirişlerinden oluşmaktadır. Ankraj kazıklarının, deney kazığına mesafesi en büyük kazık çapının (deney kazığı ya da ankraj kazığı) beş katı veya en az 2.0m olmalıdır (ASTM D 1143-07, 2007).

Hidrolik kriko vasıtasıyla bir ağırlık kutusu ya da platformundan reaksiyon olarak yükleme yapılması Şekil 4.3’te görüldüğü gibi, uygulanacak deney yüküne uygun

olarak teşkil edilen bir ağırlık sisteminden, yükü aktaran çapraz kirişlerden ve deney kirişinden oluşmaktadır. Deney kirişine paralel yerleştirilen ağırlık sistemi, kenarlarından desteklenmeli; destekler ağırlığın oturmasını önlemeli ve deney kazığından en az 1.5 m uzaklıkta bulunmalıdır. Reaksiyon amacıyla oluşturulacak ağırlık sisteminde zemin, kaya, beton, çelik ya da su dolu tanklar kullanılabilir. Ağırlık sistemi, deney yükünün 1.1 katı kapasitesini taşıyacak şekilde olmalıdır.



Şekil 4.2 : Reaksiyon kirişleri ve hidrolik kriko ile yapılan yükleme deneyi (ASTM D 1143-07, 2007).



Şekil 4.3 : Ağırlık kutusu yada platform ile birlikte hidrolik kriko ile yapılan yükleme deneyi (ASTM D 1143-07, 2007).

Ağırlık kutusu ya da platform kullanılarak yapılan kazık yükleme deneyinde kullanılacak yüklerin şekli ve konumlandırılması çok önemlidir. Özellikle yükleme sırasında uniform bir dağılım oluşturabilmek için dikdörtgenler prizması şeklinde

için ankraj konumuna temel ve temellerden yükü aktarabilecek reaksiyon elemanları inşa edilmelidir (Zhang, 2004).

4.1.3 Yükleme yöntemleri

Geleneksel kazık yükleme deneyinde yükleme, genelde uluslararası standartlara bağlı olarak iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilir. Bunlardan birincisi kontrollü gerilme deneyi (sürdürülen yük veya ML deneyleri olarak da bilinir), ikincisi ise kontrollü deformasyon deneyidir (CRP deneyi olarak bilinir). Kontrollü gerilme deneyinde ise sabit yük kademelerinde kazığın oturma davranışı gözlenmektedir. Kontrollü deformasyon deneyinde kazık yada zemin göçene kadar yüklenirken her yük kademesinde meydana gelen oturma artışı sabit tutulmaktadır.

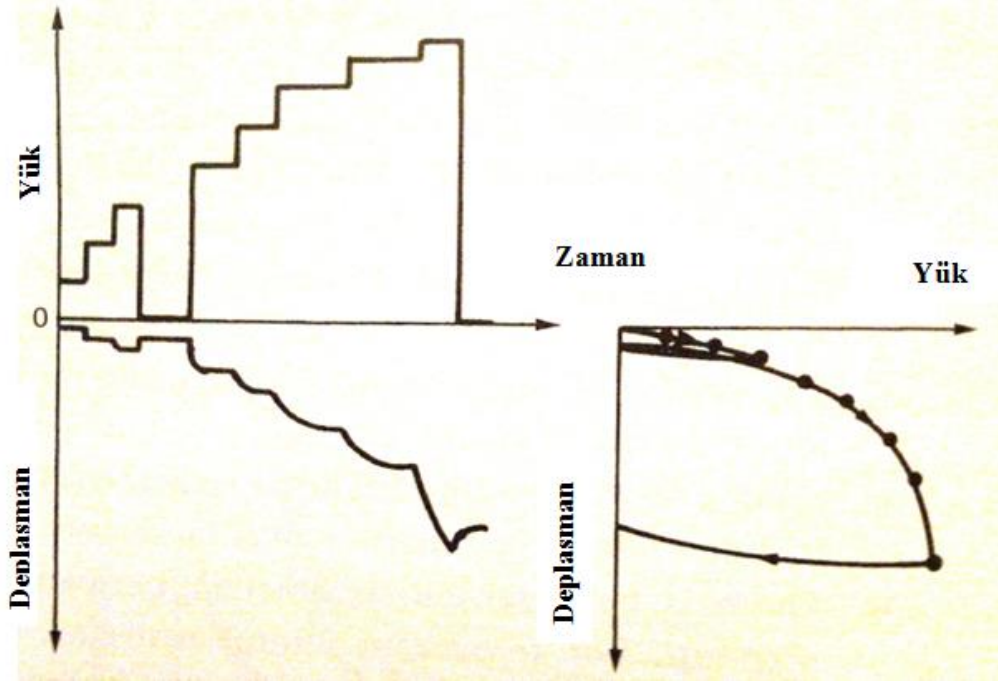
4.1.3.1 Sabit yük kademesi artışına göre yükleme deneyi

Testin temeli kazığın göçme yüküne kadar yüklenmesi sırasında elde edilen deplasman değerleri ile elde edilen yük - deplasman grafiğinden göçme yükünün bulunmasına dayanmaktadır. Bu kazık yükleme deneyinde, tekil kazıklarda tasarım yükünün 2.0 katına kadar, grup kazıklarda ise grup tasarım yükünün 1.5 katına kadar kazık yüklenmektedir. Yük kademeleri ise hesaplanan kazık tasarım yükünün % 25' i oranında arttırılır. Uygulanan yük altında deney kazığındaki oturma hızı 0.25 mm/sa'dan daha küçük değere ulaştığında bir sonraki yük kademesine geçilir. Her bir yük kademesinde en fazla 2 saat beklenir.

Maksimum yük kademesine ulaşıldığında, kazıkta oluşan oturma bir saatte 0.25 mm değerinden küçük olursa 12 saat sonra yük boşaltma kademelerine başlanabilir. Boşaltma kazığın maksimum yükte yüklenmesinden sonra 4 ya da 5 eşit kademede gerçekleştirilir. Eğer maksimum yük kademesindeki oturma saatte 0.25 mm' den fazla olursa bu durumda yükün boşaltılması için 24 saat beklenmelidir. Maksimum yükte bekleme süresi dolduktan sonra, % 25' lik kademeler halinde yük boşaltma işlemi başlatılır. Her boşaltma kademesi arasında bir saat olmalıdır. Eğer deney esnasında kazık göçerse, oturmalar kazık çapının % 15' ine ulaşana kadar deneye devam edilir.

Süre, yük ve oturma değerleri her yükleme ve boşaltma kademesinden önce ve sonra kaydedilir. Yükleme esnasında, kazık göçmediği sürece her 10 dakikada bir okuma alınmalıdır. Maksimum yük kademesine kadar yüklenmiş ve göçmemiş bir kazık

için, ilk 2 saat boyunca her 20 dakikada bir ve takip eden 10 saat boyunca her saatte bir kez okumalar alınmalıdır. Eğer kazık göçerse, ilk yük boşaltma kademesinden önceki değerler hemen okunmalıdır. Daha sonra boşaltma süresince her 20 dakikada bir ölçüm alınmalıdır. Kazık üzerindeki yük tamamen kaldırıldıktan 12 saat sonra son okumalar alınır ve deney bitirilir (ASTM D-1143). Testin tamamlanması, 30 ila 70 saat arasında olmaktadır. Test sırasında elde edilen verilerle Şekil 4.5'te gösterilen yük - deplasman, zaman - deplasman ve zaman - yük eğrileri çizilebilmektedir.



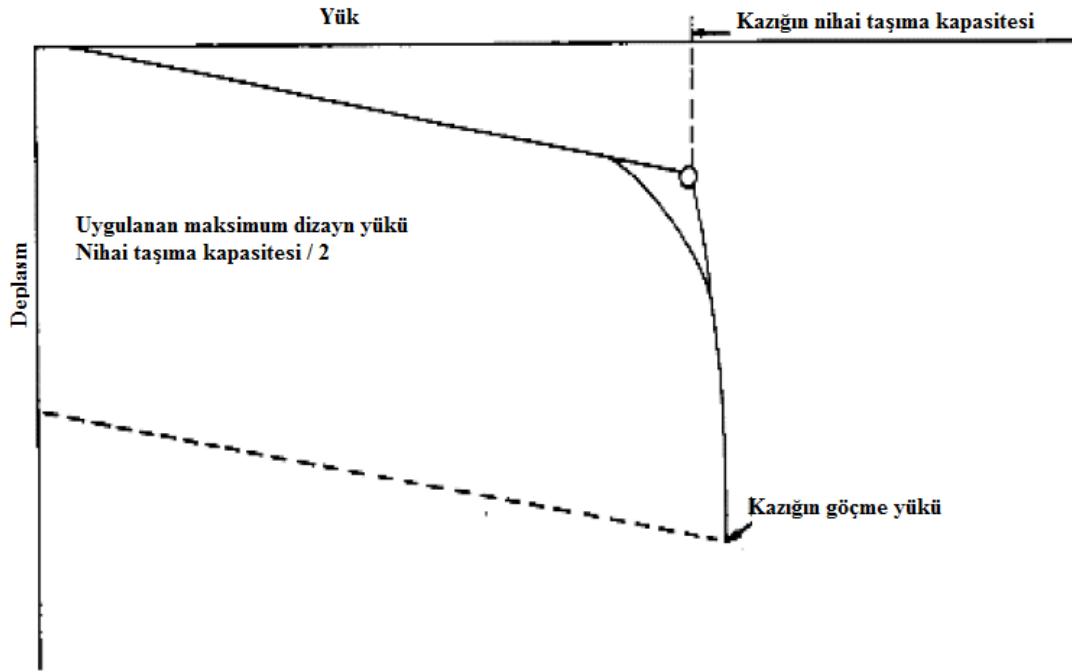
Şekil 4.5 : Sabit yük kademe artışı yöntemiyle yapılan yükleme deneyi yük-deplasman eğrisi, (Simons ve Menizes, 2004).

4.1.3.2 Sabit oturma artışına göre yükleme deneyi

Bu yükleme prosedürüne göre yapılan deneyde, kazığın oturma hızı belirli bir aralıkta olacak şekilde deney kazığı yüklenir. Oturma hızı, kohezyonlu zeminlerde 0.25 - 1.25 mm / dk, iri daneli zeminlerde ise 0.75 - 2.5 mm / dk arasındadır. Deney kazığında sabit oturma devam ederken her yük kademesinde oturma artışı sonlanana kadar yük, o yük kademesinde sabit tutulur. Uygulanan yük sabit iken, kazıkta meydana gelen toplam oturma miktarı kazık çapının en az %15' i olana kadar kazık yük altında tutulmaya devam edilir.

Yük ve oturma okumaları en fazla 30 saniyede bir mutlaka alınmalıdır. Eğer otomatik veri toplama sistemine bağlı elektronik aletlerle ölçümler yapılıyorsa, yani okumalar kazık etrafına yerleştirilen doğrusal voltaj yer değiştirme dönüştürücüleri

ile yapılıyorsa deney süresince sürekli kayıt alınabilmektedir. Yükleme tamamlandıktan sonra yük boşaltma esnasında da zaman, yük, oturmalarındaki geri dönüş değerleri alınmalı ve kaydedilmelidir. Kazık üzerindeki yük tamamen kaldırıldıktan bir saat sonra son okumalar alınır ve deney bitirilir (ASTM D-1143). Deney, test yükünde gerçekleştirilirken elde edilen deplasman değerleri zamana bağlı olarak kaydedildikten sonra Şekil 4.6'da gösterilen eğriselliğe benzer formasyonda çizilen yük - deplasman eğrisi matematiksel, grafik ve oturmayı sınırlayan yöntemler ile kazığın nihai kapasitesi de belirlenebilmektedir. Sabit oturma artışına göre gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi zaman açısından avantaj sağlamaktadır. Deney süresinin kısa olması sebebiyle arazi şartlarında drenajsız koşulları ile değerlendirme yapma imkanı sunmaktadır. Sınırlayıcı yanı sıra ise, yöntemin uygulanabilmesi için büyük reaksiyon sistemi kurulmalıdır. Killi zeminlerde CRP yöntemi ile yapılan yükleme deneylerinin yorumlanması kolaydır, ancak proje yükü altındaki elastik oturma hakkında bilgi vermemektedir.



Şekil 4.6 : Sabit oturma artışına göre yapılan yükleme deneyi eğrisi, (Aygül, 2011).

4.1.4 Yük lm

Kazık yükleme deneyini gerçekleştirmek için kurulan reaksiyon sisteminin altına, kazık merkez aksına oturacak ve eksantrisite oluşturmayacak Őeklide konumlandırılan hidrolik krikoyu, yükleme prosedürüne ve prosedürde belirlenen yk artımlarına uygun Şekilde beslemek amacıyla genellikle elektrikli hidrolik pompalar kullanılmaktadır. Hidrolik pompalar ile yapılan yükleme sırasında, hidrolik kriko aracılığıyla kazığa etkiyen yükün kontrolü için hidrolik pompa ve hidrolik krikonun besleme bağlantısına manometreler konulmaktadır.

Kullanılan manometreler, deney öncesinde test yüküne denk gelen basınç değerinin daha fazlasını karşılayacak kapasitede olması gerekmektedir. Test yüküne uygun Şekilde seçilen manometreler, üretici ve üretici dışındaki bağımsız firmalarca kalibre edilmiş olması gerekmektedir. Çünkü, kazığa uygulanan yük takibinin manometre üzerindeki basınç değerinden gerçekleştirilmesi ve bu değere denk gelen yükün kalibrasyon belgesindeki iki yük kademesi arasında interpolasyonla bulunması sebebiyle farklı okunan en ufak bir basınç değeri kazığa etkiyen yükün, yükleme prosedürüne uygun olmamasına sebep olmaktadır.

Bu yüzden, yükleme kademelerinde kabul edilebilir doğrulukta değerler veren basınç saatleri, boşaltma kademelerinin nonlinear olmasından dolayı hatalı değerler verebilmektedir. Dolayısıyla yk ölçümü günümüzde genellikle hidrolik kriko üzerine yerleştirilen yk hücreleri ile yapılmaktadır. Yük hücrelerinin de diğer deney ekipmanlarında olduğu gibi kalibrasyonunun yapılmasına dikkat edilmelidir. Kalibrasyonla ilgili olarak detaylı bilgiler ASTM D 1143-07, TS EN 1997-1, BS 8004, DIN 1054 standartlarında verilmektedir.

Kazığa aktarılan yükler, farklı seviyelere yerleŐtirilmiŐ deformasyon ölçerler (strain gauge) aracılığıyla hesaplanabilir. Ölçülen deformasyon değerleri aksel rijitlik ile çarpılarak, kazığın ilgili derinlikteki yükü hesaplanır. Kazık ucuna yerleştirilen basınç hücreleriyle de uç direncinin çalışmaya başladığı yk, diğer bir deyiŐle sürtünme direnci belirlenmiş olur. Basınç hücrelerinden alınan basınç değerleri ile kazık kesit alanının çarpılmasıyla kazık ucuna aktarılan yk hesaplanabilir.

4.1.5 Kazığın yer değiştirme miktarının ölçümü

Kazık yükleme deneylerinde, reaksiyon sisteminin doğru bir şekilde kurulmasından sonra, deney sırasında ölçülen yük ve yüke bağlı oturma miktarları deneyin doğru şekilde yorumlanabilmesi için çok önemlidir. Bu kapsamda yük hücresi tarafından kazığa etki edilen yükler sonrasında kazıkta gözlemlenen düşey deplasmanlar komparatör (deplasman ölçer) ve LVDT'ler (doğrusal voltaj yerdeğiştirme dönüştürücüleri) kullanılarak ölçülmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Komparatör ve komparatör standı, (teknikel.com).

Şekil 4.7'de verilen deplasman ölçerler, en az iki adet olmalıdır. Kazık üst kotunda imal edilen kazık başlığının zeminle teması, test sırasında kazıkta oluşan minimetrik deplasmanları etkilememesi ve zeminden direnç kazanmaması için kesilmelidir. Deplasman ölçerler, komparatör standı kullanılarak, kazık başlığına değilde kazık başlığının hemen altında kazık üst kotunda kazığının dört tarafına mesnetlenen ankrajlar üzerine kaynaklanan yüzeyi düzgün plakalara sabitlenmelidir. Kazık imalatı sırasında, en fazla kazık boyunun %2'si oranında sınırlar içerisinde kalan düşeyden sapmalar, kazık başlığında yükleme sırasında x ve y eksenini boyunca farklı deformasyonlar gözlemlenmesine sebep olmakla birlikte okunan deplasman değerlerinin yanlışlığına sebep olmaktadır (ACI, 1980).

Kazık etrafına kurulan referans kirişleri standartlara bağlı kalarak deney kazığından belirli bir mesafeye koyulmalıdır. Kazığın etrafına yerleştirilen referans kirişleri ortam sıcaklığından etkilenmemesi amacıyla bir ucu hareketli mesnetli olmalıdır.

Referans kirişlerine, deplasman ölçerlerin denk gelidiği bölgelere düz yüzey oluşturmak amacıyla silikon ile cam yerleştirilerek ölçümlerin daha sağlıklı olması sağlanmalıdır. Kazığa mesnetlenen 4 adet deplasman ölçerden, her yük kademesinde değerler okunarak ortalaması alınır. Ortalaması alınan bu değerler yükleme prosedürüne uygun olarak değerlendirilerek, bir sonraki yük kademesine geçilerek deney tamamlanır.

Kazık yükleme deneyi sırasında kazıkta oluşan deplasmanları daha hassas, detaylı ve sürekli şekilde gözlemlemek amacıyla elektronik deplasman ölçerler, veri alma aralığı ayarlanıp kullanılmaktadır. Ayrıca kazıkta meydana gelen deplasman kontrolü için, kazığa yerleştirilen referans ölçerden nivo yardımıyla 0.5 mm hassasiyetle okuma alınabilmektedir.

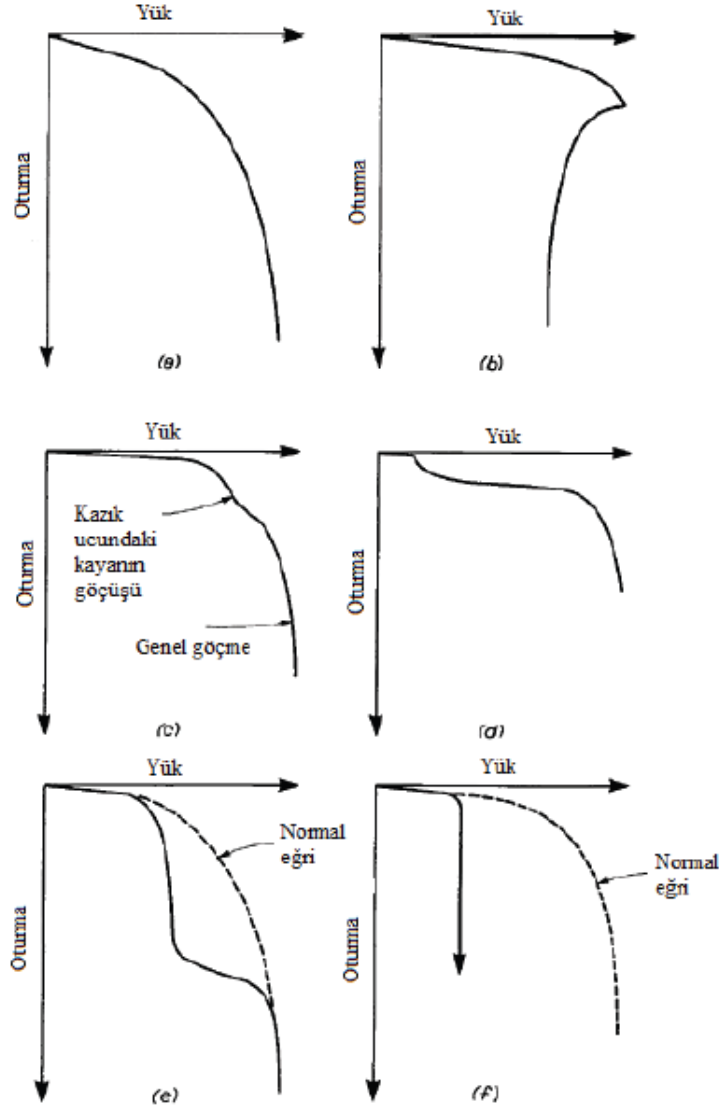
4.1.6 Kazık yükleme deney verilerinin değerlendirilmesi

Geleneksel statik kazık yükleme deneyinde, yukarıda belirtilen yük uygulama yöntemlerine bağlı olarak yük, zaman, oturma değerleri elde edilir. Buna göre, kayıt altına alınan veriler yardımıyla yük - deplasman, zaman - deplasman ve yük - zaman eğrileri çizilebilmektedir. Deneyin sorunsuz bir şekilde tamamlanması ve kazık kapasitesinin standartlarda belirtilen (1.5 - 2) katında yapılan test yüküne ulaşmadan önce yaşanan sorunlar; kazığın test yüküne ulaşmadan göçmesi, enstrümental sorunların yaşanması deney sonrasında çizilen eğrilerden görülebilir. Bu sebeple, çizilen eğrilerin yorumlanması kazık kapasitesinin tespiti açısından önem arz etmektedir.

En bilinen grafik olan yük - oturma grafiği, kazıkta meydana gelen elastik oturmaya, plastik oturmaya ve uç direncini verir. Kazığın göçme yükü, Tomlinson (2004), Chellis (1961), Broms (1981) ve Fleming ve diğ., (2009) tarafından aşağıda özetlenmiştir.

- a. Kazık çapının %10'u kadar oturmaya neden olan yük.
- b. Deney sırasında yük sabit iken oturmaların devam etmesine neden olan yük.
- c. Yükte meydana gelen ufak bir artışta aşırı oturmaya neden olan yük.
- d. Sabit yük artışında oturmaların sabit hızla devam etmesine sebep olan yük olarak belirtilmiştir.

Tomlinson (2004) tarafından, yükleme sırasında zeminde ve kazığın stabilitesinde oluşan deformasyonların deney sonucunda elde edilen yük - deformasyon eğrisine olan etkileri Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8 : Tipik yük – oturma eğrisi, (Tomlinson, 2004).

Şekil 4.8’e göre:

- Yumuşak kilde veya gevşek kumdaki sürtünme kazığında gözlenen yük-oturma eğrisi,
- Katı kilde sürtünme kazığında gözlenen yük-oturma eğrisi,
- Zayıf çatlaklı kayada uç kazığının göçmesini tanımlayan yük-oturma eğrisi,
- Zemin kabarması nedeniyle yukarı yönlü yer değiştirme yapmış ve deney yükü ile oturmaya başlamış sert kaya üzerindeki kazığın yük-oturma eğrisi,
- İçerisindeki boşluk deney yükü ile kapanmış olan kazığa ait yük-oturma eğrisi,
- Zayıf beton ile imal edilmiş ve deney yükü ile göçmüş kazığa ait yük-oturma eğrisidir.

Yükleme deneyi sonuçlarının değerlendirilme yöntemlerini üç ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür (Fellenius, 2004).

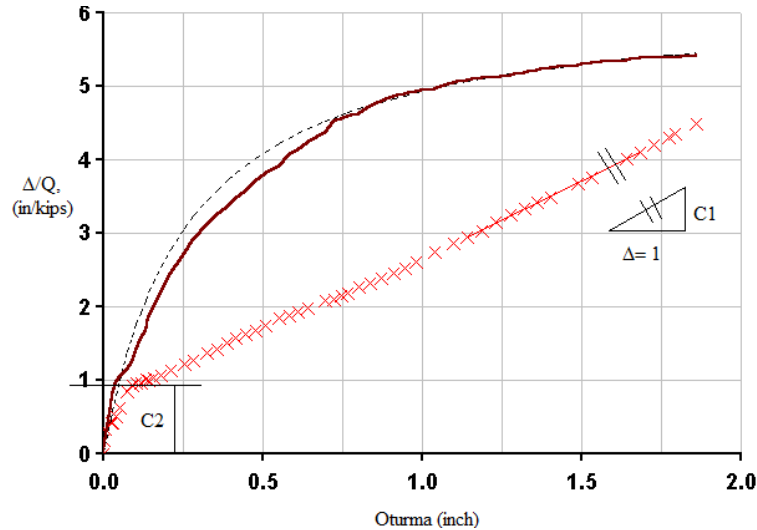
1. Matematik modele dayalı yöntemler
2. Grafik yöntemler
3. Oturmayı sınırlandıran yöntemler

4.1.6.1 Matematik modele dayalı yöntemler

Matematik modele dayanan yöntemler genel olarak, yük – oturma eğrisinin asimptotunun matematiksel bağıntılar ile elde edilmesine ve göçme yükünün de ekstrapolasyonla bulunmasına dayanmaktadır. Yapılan genel kabul, uygulanan deney yükünün elde edilen asimptot değerine yakınsamasıdır. Bu sebeple matematik modele dayalı yöntemlerin, yük – oturma eğrisinin asimptotik özellik gösterdiği koşullarda kullanılması önerilmektedir. Aksi takdirde ekstrapolasyonla bulunan göçme yükü kabul edilebilir olmayan bir değer olabilir (Hirany ve Kulhawy, 1989).

a. Chin – Kondner yöntemi

Chin (1970) tarafından önerilen yöntemde her yük (Q) kademesindeki oturma (Δ) değerlerine karşılık gelen Δ/Q değerleri kullanılarak çizilen grafikteki noktalar yaklaşık olarak bir doğru üzerinde bulunur. Doğrunun Δ/Q eksenini kestiği değer C_2 , eğimi C_1 olmak üzere; doğrunun eğiminin tersi, kazığın göçme yükünü verir. Chin – Kondner yönteminin gösterimi Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Chin – Kondner yöntemi, (Hudson, 2008).

$$Q_{ult} = 1 / C_1 \quad (4.1)$$

Doğrunun denklemi:

$$\Delta / Q = C_1 \Delta + C_2 \quad (4.2)$$

$$Q = Q_{ult} \Delta / (\Delta + Q_{ult} C_2) \quad (4.3)$$

- C_1 : Oluşturulan doğrunun eğimi
 C_2 : Oluşturulan doğrunun Δ/Q eksenini kestiği değer
 Δ : Oturma miktarı

Chin – Kondner yöntemi, sabit penetrasyon oranı ile yükleme deneyi (CRP), yavaş (SML) ve hızlı (QML) kademeli yükleme deneyleri sonuçlarının yorumu için uygundur. ASTM standart deney prosedürünün yorumunda yük artırım sayısı az olduğu için Chin yönteminin kullanılması önerilmemektedir.

Chin – Kondner yöntemindeki (4.3) eşitliği ile deneyin herhangi bir safhasında göçme yükünü hesaplamak mümkün olmaktadır. Ancak, yükleme deneyinin başlangıcında az sayıda noktanın birleştirilmesiyle elde edilen doğru, yanlış değerlendirmelere yol açabilir.

Fellenius (1975)'e göre oturma alt başlıklarda daha sonra belirtilecek olan Davisson limitini geçmeden önce gerçek doğru oluşmaz. Genel olarak Chin – Kondner yöntemi ile elde edilen göçme yükü Davisson limiti ile belirlenen yükten %20 - %40 daha fazladır. Sonuçlar bundan farklı ise veriler bir kez daha gözden geçirilmelidir.

Tomlinson (2004)'e göre, hem sürtünme, hem de uç kazığı olarak davranan kazıkların göçme yükleri Chin – Kondner yöntemine göre belirlendiğinde eğimleri farklı, iki ayrı doğru oluşmaktadır. Her doğrunun eğiminin tersi, o durum için göçme yükünü vermektedir.

b. Brinch – Hansen %80 yöntemi

Brinch – Hansen (Fellenius, 1975; Bearing Capacity of Soils, 1993) tarafından önerilen yöntemde göre her yük (Q) kademesindeki oturma (Δ)'ya karşılık, o kademelere ait ($\Delta^{0.5}/Q$) değerleri kullanılarak çizilen grafikteki noktalar bir doğru üzerinde bulunurlar. Bu doğrunun eğimi C_1 , ($\Delta^{0.5}/Q$) eksenini kestiği değer C_2 olmak üzere kazığın nihai taşıma kapasitesi:

$$Q_{ult} = 1 / (2 \sqrt{C_1 C_2}) \quad (4.4)$$

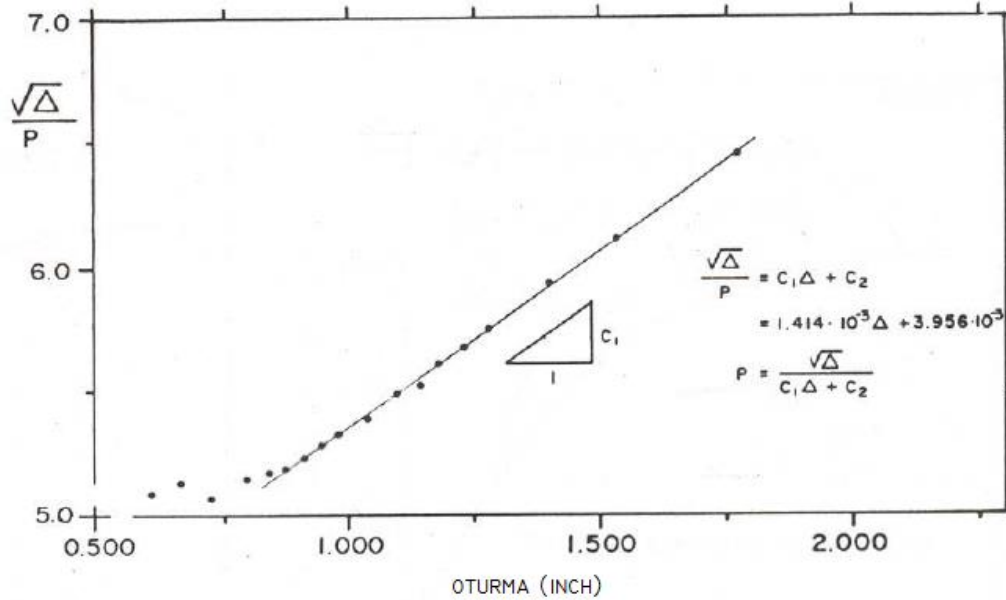
$$\Delta_{ult} = C_2 / C_1 \quad (4.5)$$

Doğrunun denklemi:

$$\sqrt{\Delta} / Q = C_1 \Delta + C_2 \quad (4.6)$$

Brinch – Hansen yöntemine göre kazık göçme yükünün %80'inde meydana gelen oturmanın 4 katına neden olan yük, o kazığın göçme yükünü verir. Brinch – Hansen yönteminin grafik gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.

Yük – oturma eğrisinin parabolik olduğu kabulünün yapıldığı Brinch – Hansen yöntemi ile uygun göçme yükü değerleri elde edilebilir. Ayrıca bu kriter hem yavaş, hem de hızlı kademeli yükleme deneyleri için kullanılabilir. Brinch – Hansen göçme yüküne, ancak $0.80 \times 4Q_u \times \Delta_u$ değerinin yük – oturma eğrisi üzerine düşmesi halinde ulaşılmış olur. Aksi takdirde göçme yüküne ulaşılmamış demektir. Bu durumda, maksimum deney yükü, göçme yükü olarak kabul edilmeli, ekstrapolasyonla elde edilen göçme yükü değerleri dikkate alınmamalıdır.



Şekil 4.10 : Brinch – Hansen yöntemi.

c. Van der Veen yöntemi

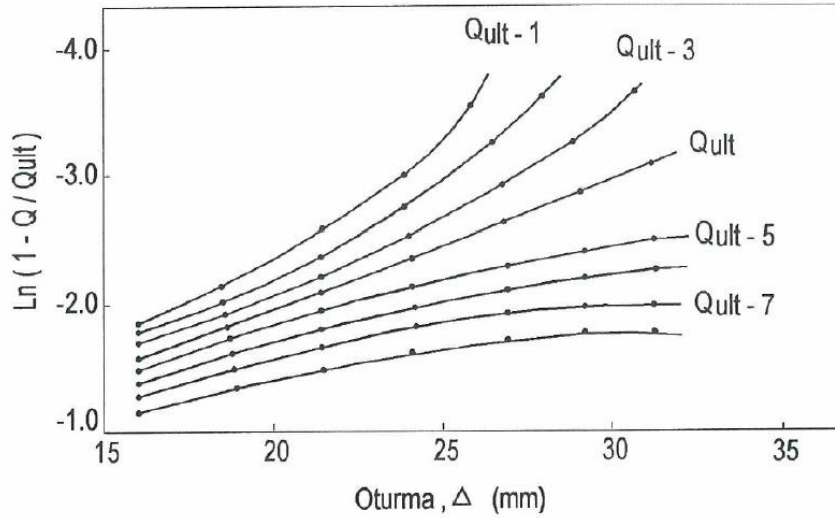
Van der Veen, kazığın göçme yükünün, test yükü ile kazığın yer değiştirmesi arasında aşağıda verilen bağıntı ile bulunduğunu belirtmiştir (Tomlinson, 2004).

$$\ln(1-Q/Q_{ult})=-\omega\delta \quad (4.7)$$

ω : Yük – deformasyon bağıntısının şekline bağlı katsayı

δ : Kazığın yer değiştirmesi

(4.7) bağıntısı yardımıyla seçilen göçme yükü ile hesaplanan $\ln(1 - Q/Q_{ult})$ değerlerine karşılık gelen oturma değerlerinin grafiği çizilir. Van der Veen'e göre grafiği bir doğru haline getiren sadece bir Q_{ult} değeri vardır ve bu değer göçme yükü olarak kabul edilebilir. Yöntemin grafik gösterimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



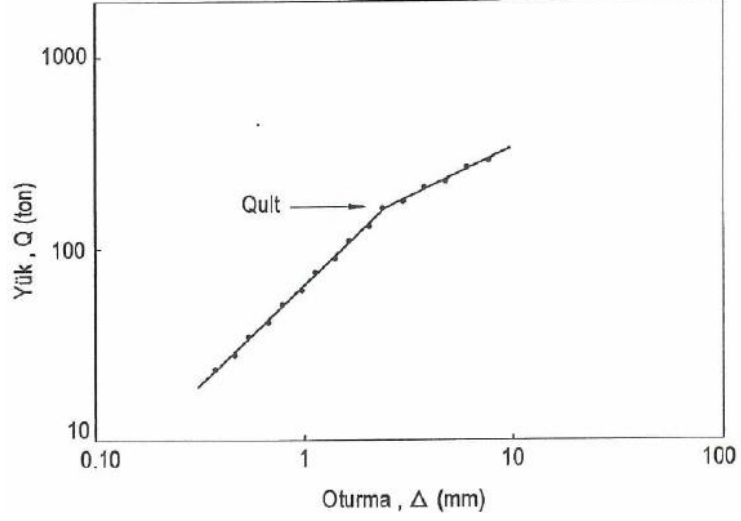
Şekil 4.11 : Van der Veen yöntemi.

4.1.6.2 Grafik yöntemler

Yük – oturma eğrisi üzerinde grafiksel yöntemler yardımıyla yapılan değerlendirmeler, kişisel yoruma açık olması, yük – oturma grafiğinin ölçeğinden bağımsız olmaması ve kazık boyu ile çapını dikkate almaması sebebiyle belirsizliklerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Aşağıda kazık kapasitesinin ya da göçme yükünün belirlenmesinde kullanılan grafik yöntemler yer almaktadır.

a. De Beer yöntemi

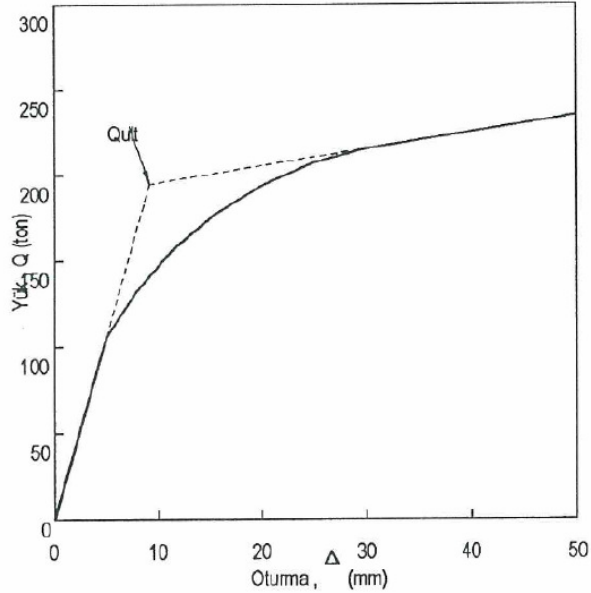
De Beer, yük – oturma grafiğinin Şekil 4.12'de görüldüğü gibi logaritmik ölçekte çizilmesi halinde, iki doğrunun kesişme noktasının göçme yükü olarak tanımlanabileceğini ifade etmiştir (Fellenius, 1975).



Şekil 4.12 : De Beer yöntemi.

b. Teğet yöntemi

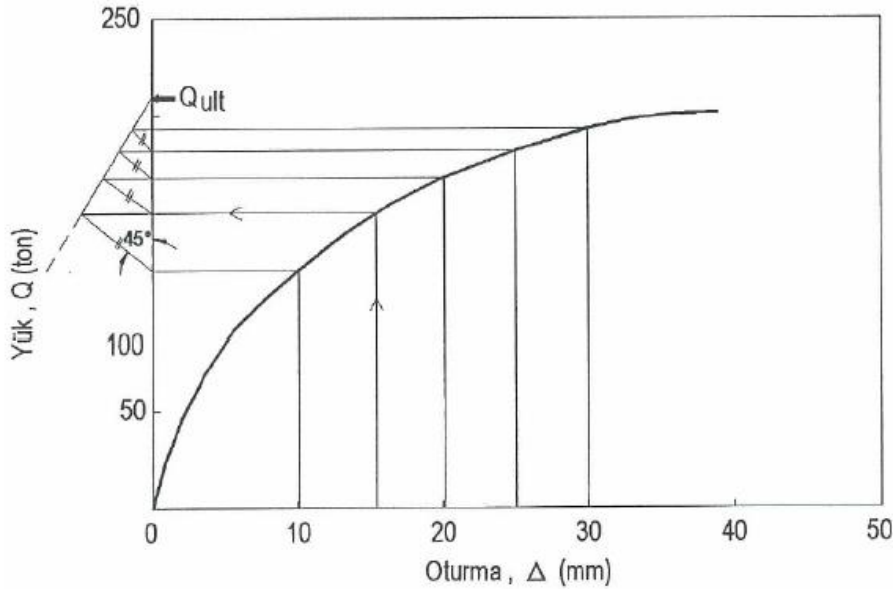
Bu yöntemde göçme yükü, yük – oturma eğrisinin elastik ve plastik bölümlerine çizilen teğetlerin kesişme noktası olarak tanımlanmaktadır. Teğet yöntemi asimptota yaklaşan yük – oturma eğrilerinde makul sonuçlar vermektedir. Yük – oturma eğrisinin ölçeğine bağlı olması ve kişisel değerlendirmelere açık olması, bu yöntemin sınırlayıcı yanındır (Fellenius, 1975; Hirany ve Kulhawy, 1989). Göçme yükünün elde edilmesi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : Teğet yöntemi.

c. Mazurkiewicz yöntemi

Mazurkiewicz (1972) tarafından önerilen bu yöntemde, yük – oturma grafiğinin oturma eksenini eşit aralıklara bölünerek yük eksenine paralel doğrular çizilir. Paralel doğruların yük – oturma eğrisini kestiği noktalardan, yük eksenine çıkılan diklerin, eksenini kestiği noktalar belirlenir. Bu kesişim noktaları yeni bir doğru meydana getirir. Oluşan yeni doğrunun yük eğrisini kestiği nokta göçme yükünü verir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere, bu yöntem yük – oturma eğrisinin parabolik olduğu kabulüne dayanmaktadır.

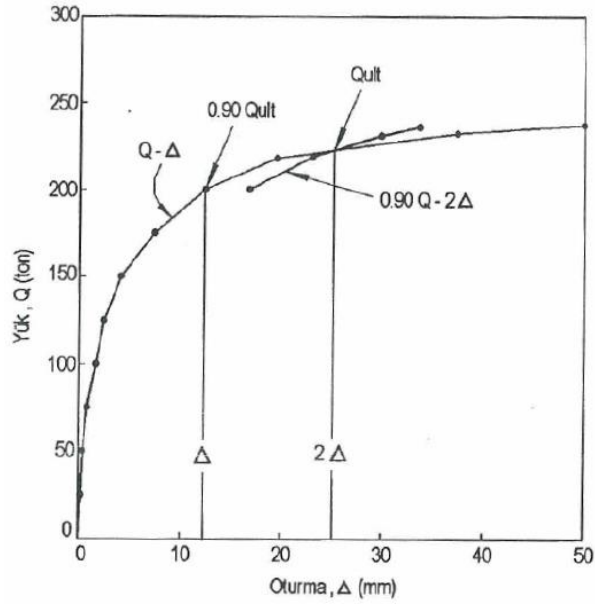


Şekil 4.14 : Mazurkiewicz yöntemi.

d. Brinch – Hansen %90 yöntemi

Brinch – Hansen tarafından tavsiye edilen %90 kriteri, yük – oturma eğrisinin hiperbolik olduğu kabulüne dayanmaktadır. Brinch – Hansen göçme yükünü; yükün %90'ında meydana gelen oturmanın 2 katı oturmaya neden olan yük olarak tanımlamaktadır (Fellenius, 1975; Bearing Capacity of Soils, 1993).

Her yük kademesi için $0.90Q$ değeri hesaplanarak, yük – oturma eğrisinde bu değerlere karşılık gelen Δ değerleri bulunur. Daha sonra 2Δ değerleri belirlenerek $0.90Q - 2\Delta$ eğrisi oluşturulur. $Q - \Delta$ eğrisinin $0.90Q - 2\Delta$ eğrisini kestiği nokta Şekil 4.15'te görüldüğü gibi göçme yükünü verir.

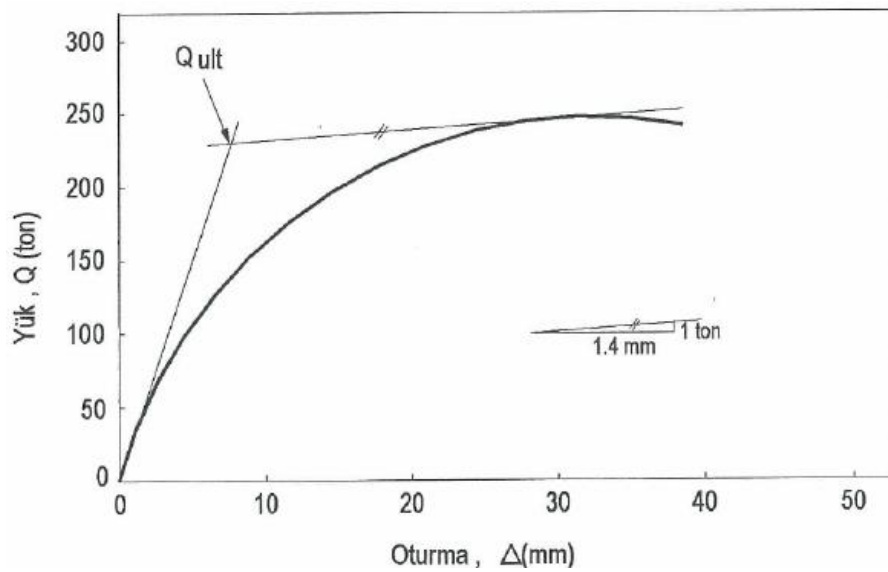


Şekil 4.15 : Brinch – Hansen %90 yöntemi.

Brinch – Hansen %90 yönteminde genellikle göçme yükü, maksimum test yükü olarak elde edilir. Zemin cinsinden bağımsız olarak kullanılabilir.

e. Butler – Hoy yöntemi

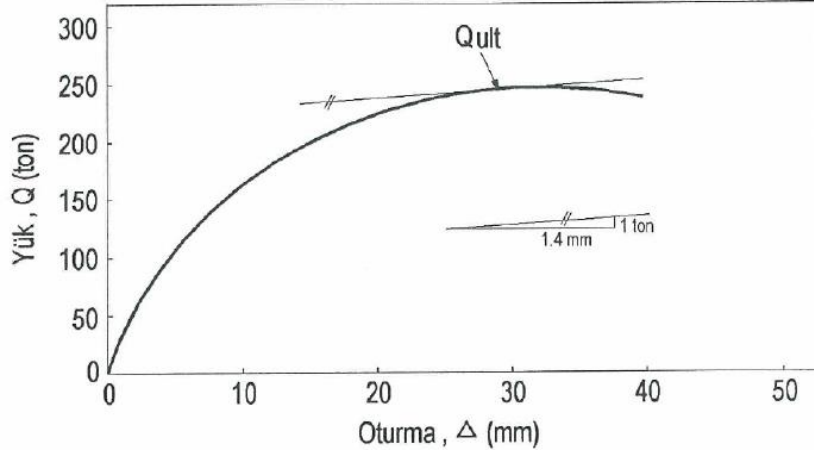
Butler – Hoy tarafından geliştirilen bu yöntemde, yük – oturma eğrisine orijinden geçen ve eğrinin elastik davranış gösteren başlangıç kısmına teğet olan bir doğru çizilir. Eğrinin dikleşmeye başladığı bölüme ise Şekil 4.16’da gösterildiği biçimde 0.14 mm/kN eğimle bir teğet çizilir. İki teğetin kesişme noktası, göçme yükü olarak kabul edilir (Fellenius, 1975; Butler ve Hoy, 1976; Bearing Capacity of Soils, 1993).



Şekil 4.16 : Butler – Hoy yöntemi.

f. Fuller – Hoy yöntemi

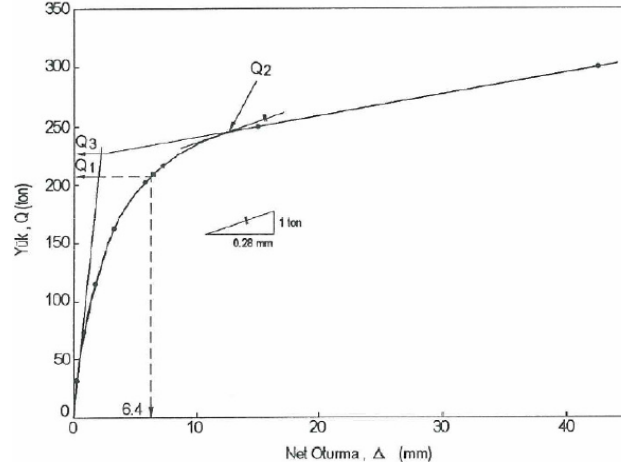
Fuller – Hoy, Şekil 4.17’de gösterilen yöntemlerinde yük – oturma eğrisine 0.14 mm/kN eğimle çizilen doğrunun teğet olduğu noktaya karşılık gelen yükün göçme yükü olduğunu ifade etmişlerdir (Fellenius, 1975; Chellis, 1961). Bu yöntemde kazık boyu dikkate alınmadığı için, uzun kazıklarda daha büyük olan elastik boy kısalması, kısa kazıklara göre daha küçük göçme yükü elde edilmesine neden olur (Fellenius, 1975).



Şekil 4.17 : Fuller – Hoy yöntemi.

g. Corps of Engineers yöntemi

Corps of Engineers tarafından kullanılan bu yöntemde ilk olarak yük – net oturma eğrisinde 6.4mm oturmaya karşılık gelen yük değeri bulunur. İkinci olarak eğimi 0.28mm/ton olan doğrunun yük oturma eğrisine teğet olduğu noktadaki yük belirlenir. Üçüncü aşamada ise, teğet yöntemi ile yük – oturma eğrisinin eğiminin dikleşmeye başladığı noktadaki yük bulunur. Bu üç aşama ile bulunan değerlerin ortalaması o kazık için göçme yükünü verir (Design of Pile Foundations, 1991). Metodun grafik gösterimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



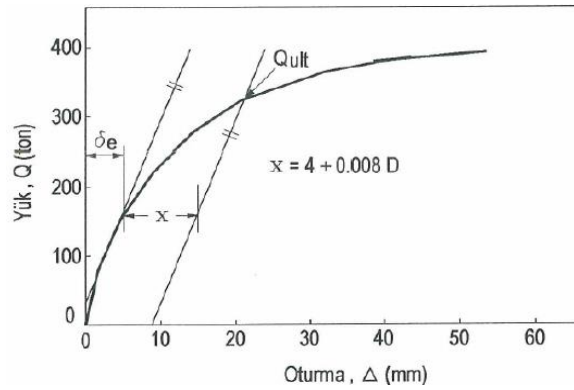
Şekil 4.18 : Corps of Engineers yöntemi.

4.1.6.3 Oturmayı sınırlandıran yöntemler

Oturmanın sınırlandırılmasını esas alan yöntemler, genel itibariyle kişisel değerlendirmelere kapalı olan ve yük – oturma eğrisinin ölçeğinden bağımsız yöntemlerdir. Ancak, bu değerlendirme yöntemlerinin birçoğu, kazık uç mukavemetinin kazık çapına bağlı olduğunu ve kazık çapının belirli bir oranında hareketinden sonra mobilize olabileceğini dikkate almamaktadır (Düzceer, 2001).

a. Davisson yöntemi

Davisson kazıklarda limit bir oturma (Δ) değerine karşılık gelen yükün nihai taşıma kapasitesi olarak kabul edilebileceğini ifade etmiştir (Davisson, 1972). Buna göre Şekil 4.19’da verilen yük – oturma eğrisi elde edildikten sonra uygulanan yükte kazığın elastik yerdeğiştirmesi hesaplanır. Elastik bölgedeki yük – oturma eğrisinin doğrusal uzantısının belli bir miktar ötelenerek elde edildiği paralel doğrunun yük – oturma eğrisini kestiği yük değeri kazığın nihai taşıma kapasitesi olarak nitelendirilir.



Şekil 4.19 : Davisson yöntemi.

$$\Delta = \delta_e + \delta_s + \delta_{sp} \quad (4.8)$$

δ_e : Kazığın elastik boy kısalması

δ_s : Kazığın ucundaki zeminin elastik sıkışması

δ_{sp} : Kazığın ucundaki zeminin limit plastik sıkışması (=3.81 mm)

Değerler yerine konulduğunda (4.8) Davisson kriteri (4.9) halini almaktadır:

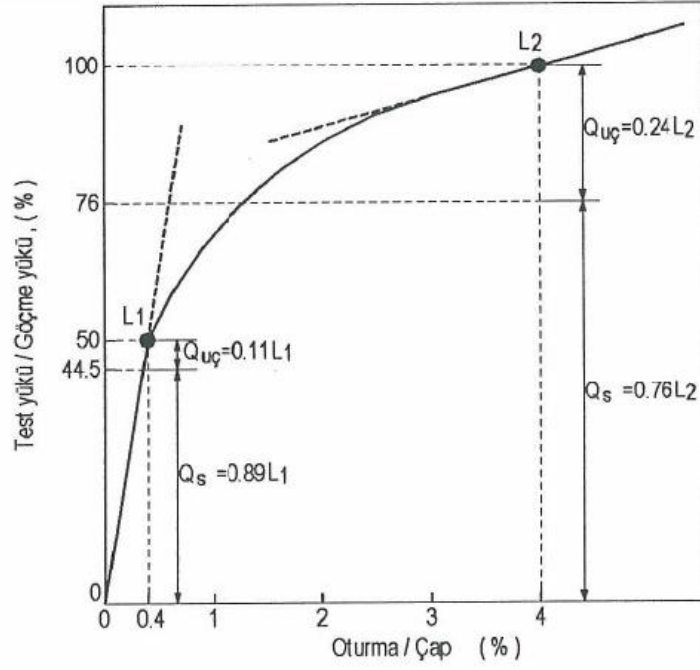
$$\Delta = \delta_e + 4 + 0.0083D \quad (4.9)$$

$$\delta_e = (Q_p + \alpha_s Q_s) L / AE \quad (4.10)$$

Davisson yöntemi ile elde edilen limit yük, her zaman nihai taşıma gücünü vermeyebilir. Metot, belirli küçüklükte bir uç hareketinde göçme yüküne ulaşıldığı kabulüne ve bu küçük hareketin kazığın rijitliği ile ilişkilendirilerek tahmin edilmesine dayanmaktadır (Fellenius, 2001). Yöntem, yapılan kazık yükleme deney verilerinin korelasyonu ile elde edilmiştir.

b. Hirany – Kulhawy yöntemi

Hirany ve Kulhawy (1989), çok sayıda fore kazık üzerinde yapılan yükleme deneylerine ait sonuçları değerlendirmişler ve kazık çapının %4'ü oranında oturmanın gerçekleştiği yükü göçme yükü olarak tariflemişlerdir. Şekil 4.20'de gösterilen yöntem, kazık uç ve çevre dirençlerinin tayininde de başvurulmaktadır. Araştırmacılar, söz konusu yöntemin basit ve kullanışlı olduğunu, yük – oturma diyagramının ölçeğinden bağımsız olduğunu ve kazık çapının dikkate alındığını ifade etmiştir.



Şekil 4.20 : Hirany – Kulhawey yöntemi.

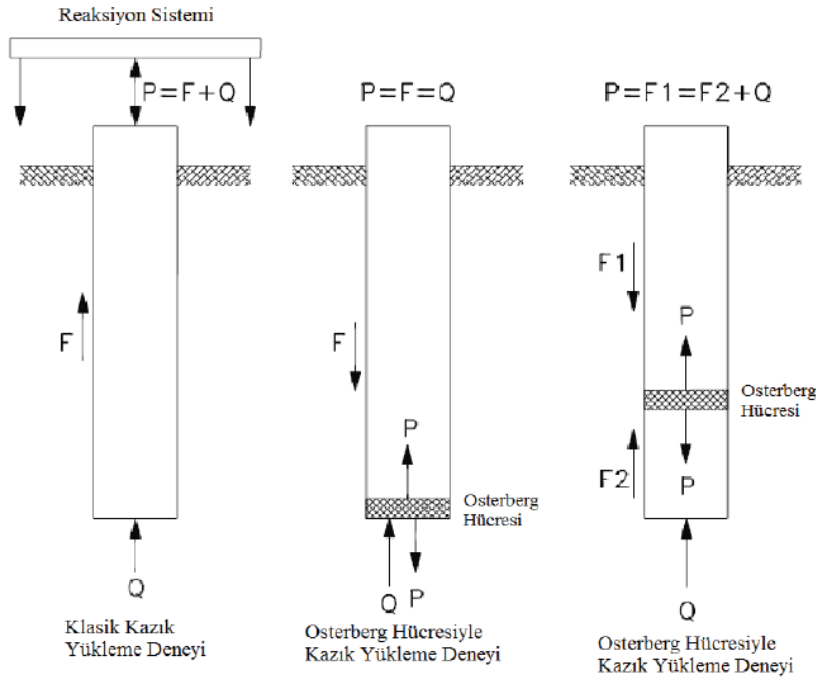
4.2 Osterberg Yük Hücresi Deneyi

Osterberg (1984) tarafından tasarlanan Osterberg yük hücresi (O-cell) kullanılarak kazık kapasitesinin belirlenmesi ilk olarak, Case Foundation Inc. tarafından deney kazığında gerçekleştirilmiştir. O-cell ile kazık kapasitesinin belirlenmesi amacıyla günümüze kadar birçok deney gerçekleştirilmiştir. Bu açıdan baktığımızda bu tez kapsamında arazide gerçekleştirilen kazık kapasite hesaplarında, O-cell ile yapılan eksenel yükleme deneylerinin kazık kapasitesinin belirlenmesinde etkinliği ve sonuçlarının, arazi deneylerinden elde edilen zemin parametrelerine bağlı olarak yapılan kapasite hesaplarıyla birlikte yapılan numerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması tez konusunu oluşturmaktadır.

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi için başvurulan en güvenilir ve gerçekçi yöntemlerin başında kazık yükleme deneyleri gelmektedir. Kazık yükleme deneyleri, gerek tam ölçekli olarak yapılmaları, gerekse temel zeminini gerçeğe çok yakın biçimde temsil ettiği için tasarımda ve kontrolde oldukça sık kullanılmaktadır.

Kazık yükleme deneyleri, eksenel yükün kazığa etkilmesi açısından çeşitlilik arz etmektedir. 4.1 başlığı altında bahsedildiği üzere geleneksel kazık yükleme deneylerinde, kazıklara yükün etkilmesinde reaksiyon kazıklarından, zemin

ankrajlarından veya ağırlık sistemlerinden faydalanılmaktadır. Bu kapsamda O-cell testinin geoteknik mühendisliği açısından getirdiği en önemli avantaj, geleneksel kazık yükleme deneyi için gerekli olan reaksiyon sistemlerinin (çekme kazığı, reaksiyon kirişi) gerekmeşidir. Bununla birlikte Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü kazık yükleme deneyi ekonomi ve zaman açısından geleneksel kazık yükleme deneyine göre daha avantajlıdır. Geleneksel kazık yükleme deneyi, yüksek kapasitede yük uygulanması gereken test kazıklarında büyük reaksiyon sistemleri gerektirdiği için maliyetlidir. Fakat, o-cell testinde kazık kapasitesinin yüksek olmasına bağılı olarak seçilen yük hücresi ile istenilen yüklere kolayca erişilebilir. Şekil 4.21’de geleneksel kazık yükleme deneyi ile O-cell testi yükleme şekilleri verilmektedir.



Şekil 4.21 : Geleneksel yükleme deneyi ile Osterberg hücresiyle yükleme deneyi yük dağılımı, (England, 2003b).

3. bölümde anlatılan şekilde kazığın; uç, sürtünme veya hem uç, hemde sürtünme direncine göre kapasite hesabı yapıldıysa, Osterberg yük hücresinin seviyesi kazığın çalışma prensibine göre yerleştirilmelidir. Osterberg yük hücresi ile kazık yükleme deneyinde hem uç direncinde hem de sürtünme direncinde maksimum değeri elde etmek için Osterberg yük hücresi kazık ucuna veya uca yakın bir bölgeye yerleştirilir (Osterberg, 1999).

Osterberg yük hücresi, kazığın betonarme hesabı sonrasında tasarlanan donatı yerleşimine paralel olarak, test prosedüründe belirlenen seviyeye yerleştirilir. Alt ve üst plaka ile birlikte kaynaklanan yük hücreleri, deney ekipmanları başlığı altında anlatılan şekilde kuyuya indirilerek betonlanır. Yük hücresinin yerleşimi sonrasında, deney kazığı iki kazık olarak çalışmaktadır. Uygulanan basınçla birlikte iki yönlü çalışmaya başlayan yük hücresinin yukarı doğru hareketine karşı üst çevre direnci, aşağı yönlü hareketine karşılık olarakta uç direnci ve aşağı yönlü çevre direnci oluşmaktadır. Yük hücresi, aşağı ve yukarı yönlü nihai taşıma kapasitesine erişmesi halinde veya maksimum kapasitesine ulaşması durumunda deney tamamlanır.

O-cell testinde doğrudan elde edilen veriler, yük hücresinin açılımı, gövde sıkışmasını ve kazık gövdesinin yukarı yönlü hareketini kapsamaktadır. Osterberg deney verileri, genellikle donatı kafesi ile birlikte aralıklarla yerleştirilen gerilme ölçerlerden alınan, kazık gövdesindeki gerilme değerlerini de içermektedir. Yük hücresinin yukarı yönlü hareketiyle, yük hücresinin üst kotundaki kazık gövdesinde oluşan yük-deplasman eğrileri, yük hücresinin aşağı yönlü açılmasıyla kazık ucunda gözlemlenen yük-deplasman eğrileri elde edilmektedir. O-cell test ile kazığın uç ve sürtünme direncinin ayrı ayrı bulunması sağlanır (Loadtest, 2013).

4.2.1 İki yönlü statik yükleme deneyi yapım yöntemi

Osterberg hücresi ile yapılan kazık yükleme deneyi, test kazığının reaksiyon sistemi olmadan içerden yüklenmesi ile gerçekleştirildiği için deney yapım yöntemi, kurulumunuda kapsamaktadır. Bu kapsamda aşağıdaki başlıklarda; deney ekipmaları, deneyin enstrümantasyonu, test prosedürü ve elde edilen veriler kapsamında sonuçların değerlendirilmesi hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

4.2.1.1 Deney kazığının hazırlanması

Deneyin gerçekleştirileceği test kazığı, saha içerisinde proje kazık ve baretinden ayrı bir bölgede imal edilmelidir. Bu kapsamda danışman ve mühendisler tarafından belirlenen bölgede, projede kapasite hesaplarıyla belirlenen boy ve çapta, zemin şartlarına uygun olarak; tez kapsamında yer alan O-cell ve geleneksel yükleme deneylerinin yapıldığı yer altı su seviyesinin yüksek olduğu kil zeminlerde bentonit süspansiyonu ile yapılan forajın tamamlanmasından sonra kuyu dibinde çöküntü kalmayacak şekilde kuyu temizliği gerçekleştirilir.

Bentonit süspansiyonu ile gerçekleştirilen kazı sonrasında, kuyu cidarında filtre tabakası (filter cake) oluşmayacak şekilde, belirli bir süre kuyu içerisinde temiz bentonit sirkülasyonu sağlanarak kuyunun temizlenmesinden sonra, bentonit içerisindeki kum muhtevası ve viskozite kontrolleri yapıp kazı teslim alınır. Projesinde belirlenen donatı detaylarına ve danışman firmalarca gerçekleştirilecek olan O-cell testi için, ölçümlerde ve test yapımında kullanılacak ekipman detayları yerleşim planına göre yerleştirilmelidir.

Osterberg hücresi montajı, deney sahasında ya da mümkün olduğu durumda donatı hazırlama bölgesinde yapılır. Osterberg hücreleri, deney yüküne ve kazık ya da baret olmasına göre et kalınlıklarının değişkenlik gösterdiği dairesel veya dikdörtgen çelik plakalar arasına yerleştirilir. Her iki çelik plakanın üzerinde, betonlama sırasında tremie borusunun ve betonun geçeceği iki büyük delik bulunur. Tremie borusunun güvenle geçmesi ve deney ekipmanlarının zarar görmemesi amacıyla yük hücresinin üst plakasında yer alan delik ağzına donatılarla huni şeklinde imalat yapılır. Üst plakada ise beton ve tremie deliklerinin yanı sıra, sayıları kullanılan Osterberg hücresi sayısına bağlı olarak değişen ve Osterberg hücrelerine basıncın hortumlarla gönderilip toplandığı 2, 4 veya 8 adet küçük delik daha vardır.

Osterberg hücreleri düzgün ve plakalara tam temas edecek biçimde alt ve üst plakalara kaynaklanır. Oluşturulan Osterberg birleşimi, öngörülen kota denk gelecek şekilde ve donatı kafesinin uzunlamasına yer alan aksını tam dik kesecek biçimde donatı kafesine ya da donatı kafesi parçalarından birine kaynaklanarak sabitlenir. Oluşturulan Osterberg hücresi birleşiminin taşıma ve yerleştirme işlemi sırasında ayrılmaması için, alt ve üst plakaların arasına 3 veya daha fazla çelik donatı parçası ya da çelik köşebent geçici olarak yerleştirilir ve kaynaklanır.

Kazık boyuna bağlı olarak, kazık donatıları projesine uygun olarak 12.00 m lik boy donatıları halinde birleştirilerek imal edilir. Donatı kafesinin içerisine, donatının kaldırılması sırasında hasar görmemesi amacıyla, çapraz donatıları atılmalıdır. Donatı kafesi kuyu içerisine indirildikten sonra bindirme boyu kadar olan kısmı kuyu içerisinde askıda kalacak şekilde sabitlenir. Daha sonra, imalat alanında hazırlanan diğer donatılar askıda bırakılan donatı ile kaynaklanarak birlikte kuyu içine indirilir. Bu imalat, son donatı kafesinin kuyuya indirilmesi ve test ekipmanları için bir miktar donatının dışarda bırakılmasına kadar devam edilir. Kazığın deney ekipmanları ile enstrümantasyonu aşağıda detaylı olarak belirtilmektedir.

Test kazığının betonlanması kapasite hesaplarında belirtilen beton dayanım sınıfına göre gerçekleştirilmektedir. Betonlama işlemi, kazık alt kotundan başlayarak üst kotuna kadar devam ettirilir. Kazığın alt kotundan başlanan betonlama tremi boruları yardımıyla yapılmaktadır. Yük hücresinin alt kısmında kalan kısmının betonlanması, yük hücrelerinin arasında yer alan boşluk çapından geçecek kadar, küçük çapta tek parça tremi borusu kullanılarak gerçekleştirilir. Beton kotu yükseldikçe, tremi boruları ek yerlerinden çıkartılarak betonlama kazık üst kotuna gelene kadar devam ettirilir. Betonlama sırasında kazık bütünlüğünü bozacak segregasyonun oluşmaması için Türk standartlarında belirtilen kurallara uygun olarak akışkanlaştırıcılar kullanılır.

4.2.1.2 Deney ekipmanları

Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen yükleme deneyinde, geleneksel kazık yükleme deneyinden farklı olarak; gerilme ölçerler, deplasman ölçerler ve donatı kafesine teşkil edilmiş yük hücresi kullanılmaktadır. Betonlama işleminden önce kuyuya indirilen deney ekipmanlarından deney sırasında sürekli olarak elektronik okumalar alınabilmektedir. Kazık içerisinde yer alan ekipmanlarla kazığın çevre sürtünme direnci ve uç direnci elde edilir. Deney öncesinde, deneyde kullanılan tüm ekipmanların kalibrasyonu yapılmış olmalıdır.

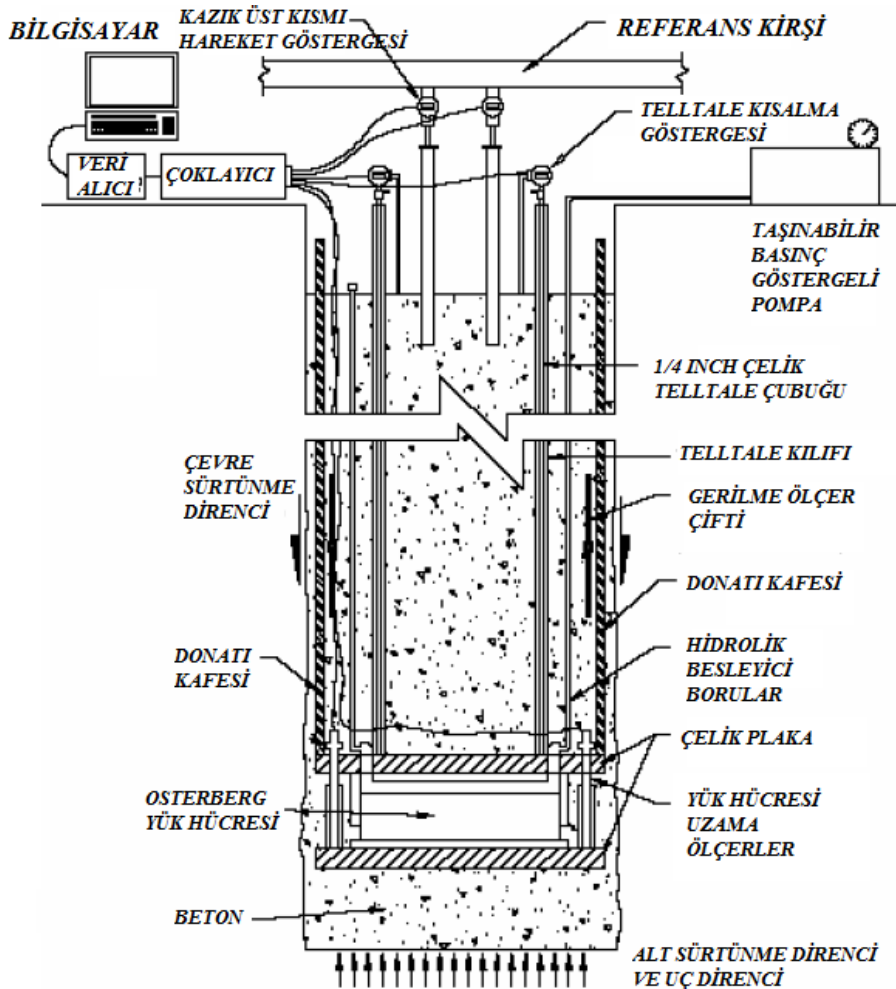
2 adet *Telltale (deplasman göstergesi)* kılıfı ve çubuk tipi ekstansometre, Osterberg hücresi birleşiminin üzerinden kazık üst kotuna kadar ulaşmakta ve Osterberg hücresinin oluşturduğu düzlemin üst kısmında kalan kazık parçasının sıkışmasını ölçmekte kullanılmaktadır.

2 adet *Telltale (deplasman göstergesi)* kılıfı ve çubuk tipi ekstansometre (veya O-cell ile kazık alt ucu arasına yerleştirilen gömülü basınç *telltale*'ları) ise, Osterberg hücresi birleşiminin altından kazık üst kotuna kadar ulaşmakta ve Osterberg hücresinin oluşturduğu düzlemin alt kısmında kalan kazık parçasının sıkışmasını ve kazık ucunun gerçek yerdeğiştirmesini ölçmekte kullanılmaktadır. Gerekli olduğu durumlarda, O-cell birleşiminin genişlemesine müsaade etmek için *telltale*'lar uzatma manşonları ile tesis edilmektedir.

3 adet *LVWDT* (Linear Vibrating Wire Displacement Transducer – Lineer Titreşimli Telli Yerdeğiştirme Dönüştürücü)'ler, Osterberg hücrelerinin altında ve üstünde bulunan çelik plakaların arasına yerleştirilmektedir ve doğrudan Osterberg

hücrelerinin genişlemesini ölçmekte kullanılmaktadır. LVWDT'ler birbirlerine en uzak mesafede kalacak şekilde, aralarında 120° açı bulunacak şekilde yerleştirilmektedir.

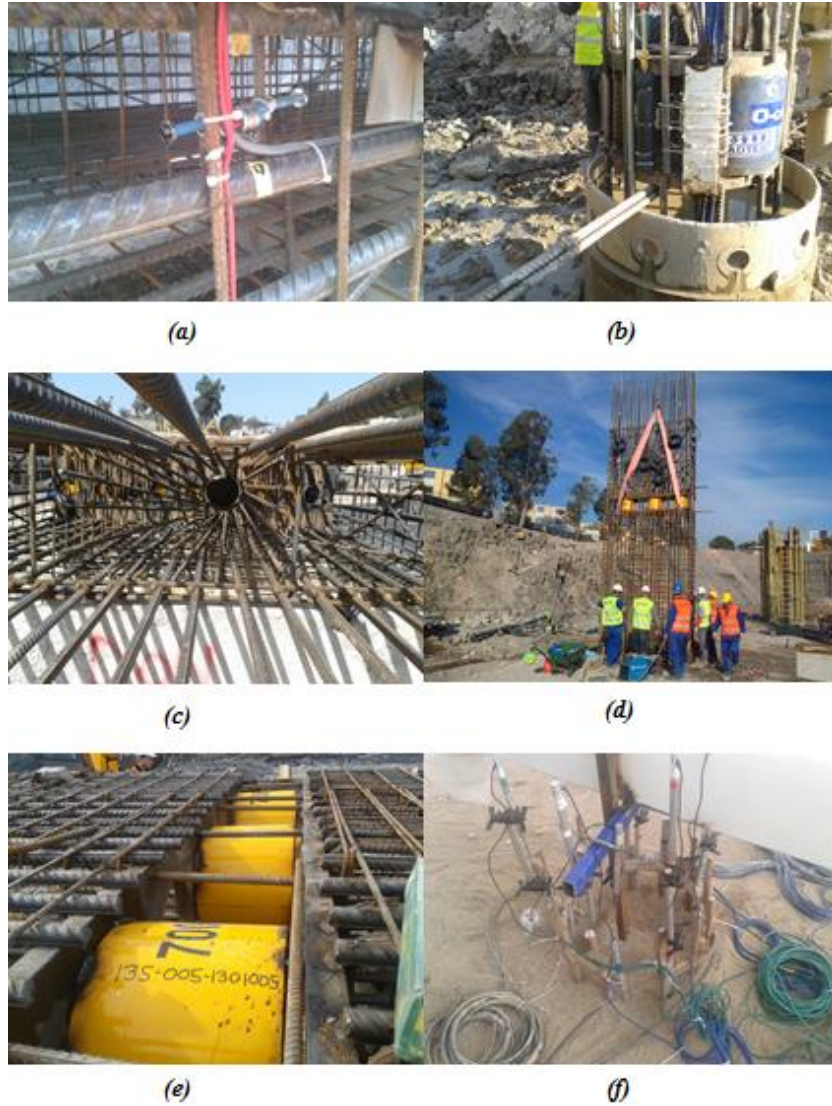
Muhtelif sayıda *Strain Gauge* (deformasyon ölçer), gerekli olduğu veya istendiği takdirde, Osterberg hücresinin altında ya da üstündeki kazık alt ve üst parçası boyunca mobilize olan sürtünme direncinin ölçülmesinde kullanılmaktadır. Prensip olarak deformasyon ölçerler, her kademede karşılıklı olacak şekilde tesis edilmektedir. O-cell deney enstrümantasyonu şematik gösterimi ve deney düzeneği Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilmektedir. Şekil 4.24'te deney ekipmalarının görseli yer almaktadır.



Şekil 4.22 : O-cell test ekipmanları şematik gösterimi, (Dai ve Gong, 2011).



Şekil 4.23 : O-cell test deney düzeneği ve veri alıcı, (Saha - 1, 2013).



Şekil 4.24 : O-cell test ekipmanları, (Saha - 1, 2013).

(a) Gerilme ölçer (strain gage), (b) uzama ölçer (expansion gage), (c) tremi klavuzu, (d) donatı kafesinin indirilmesi, (e) yük hücresi, (f) kazık üst kotu ölçüm ekipmanları.

4.2.2 Kazık yükleme prosedürü

O-cell test ve geleneksel kazık yükleme deneyi için deney kazığının yukarıda belirtilen başlıklar altında anlatılan şekilde imalatı gerçekleştirildikten sonra, TS 500 standardında belirtilen şekilde küp numuneler üzerinde 7, 14 ve 28 günde gerçekleştirilen basınç deneyleri ile gerekli beton dayanımı kontrolü gerçekleştirildikten sonra deney gerçekleştirilir.

Loadtest (2013), test kazığının imalatından sonra kazık ile zemin arayüzünde aderansın oluşması için deneyin en az 21 günlük sürenin geçmesinden sonra yapılmasını uygun görmektedir. Deney yükleme programı, yüklemenin aşamalı olarak 12 eşit kademede test yüküne ya da maksimum O-cell kapasitesine kadar yapılmasını tariflemektedir. Her yük kademesinde minimum 30 dakika ya da tariflenen oturma oranı elde edilinceye kadar beklenir. Oturma oranının elde edilmesi için gereken bekleme süresi 3 saat ile sınırlandırılmıştır. Oturma oranı, her 10 dakika için 0.05mm olarak belirtilmektedir.

Oturma oranı, kazık alt ve üst yarılarındaki aşağı ve yukarı yöndeki deplasmanların bir kombinasyonu olarak, O-cell'in genişlemesini doğrudan ölçen *LVWDT*'ler veya alt ve üst plakaların kotlarının farkının elde edildiği telltale (ekstansometre) çubukları yardımıyla elde edilmektedir. Bu yöntemlerin kazık içinde yapılıyor olması ölçümlerin olabilecek en hassas şekilde ve dış etkilerden azami derecede yalıtılmış olarak alınmasına imkân sağlamaktadır.

Boşaltma işlemi ise maksimum deney yüküne ya da maksimum O-cell kapasitesine ulaşıldıktan sonra her birinde yaklaşık 10 dakikalık bekleme süresinin uygulandığı 4 eşit kademede yapılmaktadır. Yük tamamen boşaltıldıktan sonra, sıfır yükü en az 1 saat süreyle gözlenmektedir.

Straininstall (2012), deney prosedürünü ASTM D1143-07 prosedür A'ya uygun olarak yapılmasını Çizelge 4.1'de gösterilen şekilde tariflemektedir. ASTM D1143-07 standardına uygun olarak kazık tasarım kapasitesinin 2 katına ulaşıncaya kadar yüklenir. Yük artışı, hidrolik hortumlar aracılığıyla tasarım yükünün %5'i oranında artımı sağlayacak basınç artışı ile sağlanır. Her yükleme kademesinde, yük minimum 4, maksimum 15 dakika sabit tutularak oturma değerleri kaydedilir. Tasarım yükünün 2 katında, yük sabit tutularak 4 saatlik süre diliminde kazık davranışı gözlenir. Yükleme %20'lik azalışlarla, her yükleme kademesinde yukarıda belirtilen süre

zarfında bekletilerek boşaltılır. Yükün boşaltılmasından sonra 2 saat süreyle beklenecek kazıkta meydana gelen oturmalar kaydedilerek deney sonlandırılır.

Çizelge 4.1 : O-cell test yükleme prosedürü.

Yük Kademesi	Servis Yükünün Yüzdesi (%)	Bekleme Süresi
1	5	12 dakika
2	10	
3	15	
4	20	
5	25	
6	30	
7	35	
8	40	
9	45	
10	50	
11	55	
12	60	
13	65	
14	70	
15	75	
16	80	
17	85	
18	90	
19	95	
20	100	
21	105	
22	110	
23	115	
24	120	
25	125	
26	130	
27	135	
28	140	
29	145	
30	150	
31	155	
32	160	
33	165	
34	170	
35	175	
36	180	
37	185	
38	190	
39	195	
40	200	4 saat
41	180	12 dakika
42	160	
43	140	
44	120	
45	100	
46	80	
47	60	
48	40	
49	20	
50	0	1 saat

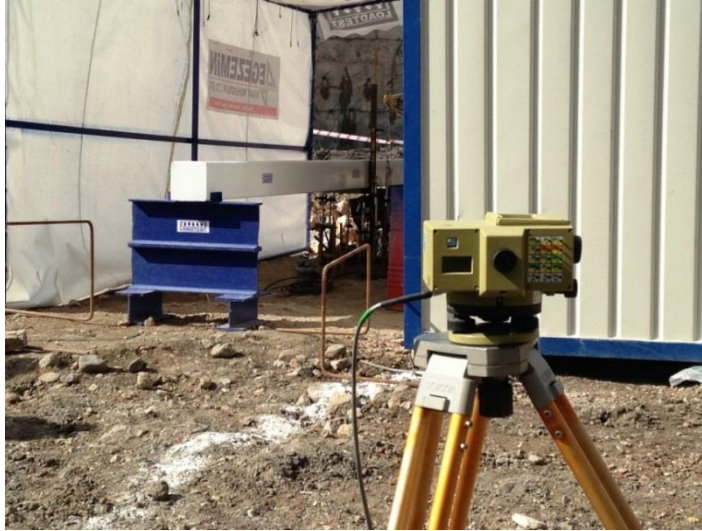
Birden fazla sayıda Osterberg hücresinin kullanıldığı deneylerde, hücreler eşzamanlı olarak yüklenir ve etkitilen yük her bir O-cell'den kazığa etkitilen yükün toplamı olarak elde edilir.

Deney aşağıda belirlenen durumlardan herhangi birinin oluşması ile sonlandırılmaktadır (Strainstall 2012; Loadtest 2013)

- Test prosedüründe belirlenen deney yüküne ulaşılması.
- Deney kazığının Osterberg hücresi altında ya da üstünde kalan kısmın nihai kapasitesine ulaşması.
- O-cell'in önceden belirlenen maksimum açılma seviyesine (100 – 150 mm) ulaşması, kazığın alt kısmının göçmesi veya üst sürtünme direncini engelleyen durumun oluşması.

4.2.3 Deney sırasında yapılan ölçümler

Deney sırasında Osterberg hücresine basıncın iletilmesiyle birlikte kazıkta meydana gelen değişimler 4.2.1 başlığında belirtilen ve kazığa enstrümante edilen ekipmanlarla gözlemlenir. Test düzeneğinin kurulmasından sonra, kazık üst kotunda meydana gelen hareketler ayrıca Şekil 4.25'te gösterilen kazıktan 3D kadar uzağa yerleştirilen elektronik deplasman ölçer ile kayıt altına alınır.



Şekil 4.25 : Elektronik deplasman ölçer.

Loadtest (2013) ve Straininstall (2012) tarafından, deney sırasında yapılan ölçümler aşağıda belirtilmektedir.

Deney sırasında hidrolik pompa ile sağlanan basınç değişimlerinin Osterberg hücresi birleşiminde meydana getirdiği değişimlerin ölçümü, *LVWDT*'ler (Linear Vibrating Wire Displacement Transducer – Lineer Titreşimli Telli Yerdeğiştirme Dönüştürücü) kullanılarak sağlanır. Ölçümler en yakın değere 0.01mm'lik hassasiyetle yuvarlanır.

Deney kazığının başlık kısmının yukarı yöndeki hareketi, referans kirişine bağlanan iki adet LVDT veya LVWDT'nin, kazık üst kısmına yerleştirilen geleneksel telltale çubuklarındaki boy değişiminin ölçülmesiyle elde edilir. Yapılan ölçümler en yakın 0.01mm'lik değere yuvarlanmaktadır. Ölçüm yapılan göstergeler, doğru okumaların elde edilebilmesi için terazisinde konumlandırılmaktadır

Yük etkisinde kazığın sıkışması ise, kazık üst kısmına yerleştirilen en az iki adet LVDT veya LVWDT'nin, Osterberg birleşiminin üst plakasından başlayarak kazık üstüne kadar uzanan geleneksel *telltale* çubuklarının boy değişiminin ölçülmesiyle belirlenir. Yapılan ölçümler en yakın değere 0.01mm'lik hassasiyetle yuvarlanmaktadır. Ölçüm yapılan göstergeler, doğru okumaların elde edilebilmesi için tam terazisinde yerleştirilir.

Yük etkimesi sonucu kazık ucunun hareketi, kazık üst kısmına yerleştirilen en az iki adet *LVDT* veya *LVWDT*'nin, kazık alt ucundan başlayarak kazık üstüne kadar uzanan geleneksel *telltale* çubuklarının boy değişiminin ölçülmesiyle ya da doğrudan sıkışma (basınç) *telltale*'larından alınan ölçümlerle tespit edilir. Ölçülen sıkışma değerinin O-cell'in aşağı yöndeki hareketinden çıkarılması ile gerçek uç hareketi elde edilir.

Kazık yüzeyi boyunca mobilize olan birim çevre sürtünmesi, kazık dış cidarına yerleştirilen deformasyon ölçerler vasıtasıyla elde edilir.

Bu kapsamda deney sırasında ölçülen deplasmanlar aşağıdaki durumların belirlenmesinde kullanılır (Loadtest, 2013).

1. Kazığın sıkışması (O-cell üzerinden geleneksel *telltale*'lar ile yapılan ve kazık başlığının referans alındığı okumalar).
2. Kazık başlık bölgesinin hareketi (kazık betonu üzerinden geleneksel *telltale*'lar ile yapılan ve referans kirişinin baz alındığı okumalar).

3. O-cell plakasının üstündeki bölgenin yukarı yöndeki hareketi (kazık sıkışması ile kazık başlık bölgesinin hareketinin toplamı).
4. O-cell genişlemesi ile kazığın sıkışması arasındaki fark (O-cell plakalarının altına yerleştirilen *telltale*'lar ile yapılan ve kazık başlığının referans alındığı okumalar).
5. O-cell plakasının altındaki bölgenin aşağı yöndeki hareketi (ölçülen O-cell genişlemesi ve kazık başlık bölgesindeki hareketin toplamı ile ölçülen kazık sıkışmasının farkı).
6. Kazık gövdesindeki kuvvet dağılımı (deformasyon ölçerler vasıtasıyla doğrudan ölçülen deformasyon değerleri ile hesaplanan kazık rijitliğinin türetilmesi ile elde edilir).

Okunan tüm veriler, Şekil 4.22'de şematik gösterimde yer alan çoklayıcı ile veri kaydediciye aktarılır. Okumalar, her 0.5 dakkada otomatik kaydedilir. Her yük kademesinde, veri kaydediciler sıcaklık ölçümü gerçekleştirmektedir. Ayrıca, kayıt sisteminin elektronik olması sebebiyle yedekleme yapılmalı ve güç paneli ile desteklenmelidir.

4.2.4 Deney sonuçlarının sunumu ve yorumu

Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen yükleme testi sonucunda, çevre sürtünmesi ve uç direnci için ayrı ayrı yük - deplasman eğrileri elde edilir. Bu sebeple yükleme sırasında her bir yük kademesinde, yükün ne kadarlık bir kısmının çevre sürtünmesine ve ne kadar bir kısmının uç direncini mobilize ettiğini gözlemleyebiliriz. Çevre sürtünme direncini oluşturan nihai yükün oluşturduğu deplasmanlar ile kazığın nihai uç direncine ulaşması gereken deplasmanları karşılaştırdığımızda kazık gövdesinde meydana gelen deplasmanlar küçüktür. Bunun yanı sıra birçok testte, kazığın nihai sürtünme direnci tasarım değerinden daha büyük olmakta, eğer küçükse bunun nedeni inşaat sırasında yapım yönteminden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, kazığa üst kısmından etki eden çalışma yükünün çoğu sürtünme direnci ile karşılanırken bir kısmı ucu tarafından karşılanarak daha ekonomik bir tasarım yapılmış olur (Osterberg, 1994).

Baret ve fore kazık üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sırasında alınan veriler yardımıyla, kazığın aşağı ve yukarı yönlü hareketi ile mobilize olan uç ve çevre dirençleri elde edilir. Osterberg yük hücresi deneyinin

neticesinde elde edilen yük – oturma eğrileri ise uç direnci ve çevre sürtünmesi için elde edilen iki ayrı grafikten oluşmaktadır. Bu sebeple Osterberg deneyinde elde edilen yük – oturma eğrilerinin belirli kabuller ve ekstrapolasyon yöntemleri ile yukardan yükleme durumundaki eğriye çevrilmesi gerekir.

4.2.4.1 Eşdeğer üstten yükleme yük – deplasman eğrisinin oluşturulması

StrainStall (2012), eşdeğer yukardan yükleme eğrisinin elde edilmesi için yapılan kabulleri ve başlıca iki prosedürü şu şekilde ifade etmektedir:

- Yukardan yükleme durumu için elde edilen “yük – oturma” eğrisinde, belirli bir deplasman değerine karşılık gelen yük, iki-yönlü yükleme durumu için elde edilen net uç direnci yükü (O-cell seviyesi üzerindeki kazık kısmının zati ağırlığının toplam kazık ağırlığından çıkarılması halinde) – oturma eğrisinde aynı deplasman değerine karşılık gelen yüke eşittir.
- Yukardan yükleme durumu için elde edilen “çevre sürtünmesi yükü – oturma” eğrisinde, belirli bir deplasman değerine karşılık gelen net çevre sürtünmesinin bir F düzeltme faktörü ile çarpılmış hâli, iki yönlü yükleme durumunda aynı deplasman değerine karşılık gelen net çevre sürtünmesi değerine eşittir. Bu eşitlik, deney kazığının alt ve üst kısımlarında oluşan, aşağı ve yukarı yöndeki deplasmanların her biri için ayrı ayrı geçerlidir. Aksi belirtilmediği müddetçe kullanılan düzeltme faktörleri şu şekildedir:

$F = 1.00$ kayaya soketli tüm kazıklarda ve basınç yüklemesi durumundaki kohezyonlu zeminlerde

$F = 0.95$ kohezyonsuz zeminlerde

$F = 0.80$ üstten çekme yüklemesi durumundaki tüm zeminlerde

- Kazık, rijit bir eleman gibi davranır. Ancak Osterberg deneyi esnasında ölçülen kazık hareketinin bir kısmını elastik sıkışmalar oluşturur.
- O-cell altındaki kazık parçasının deney esnasında üstten yüklenen tekil bir kazık gibi davrandığı varsayılır. Bu parçanın yük – oturma davranışı, tüm deney kazığının yük – oturma davranışı ile aynıdır.

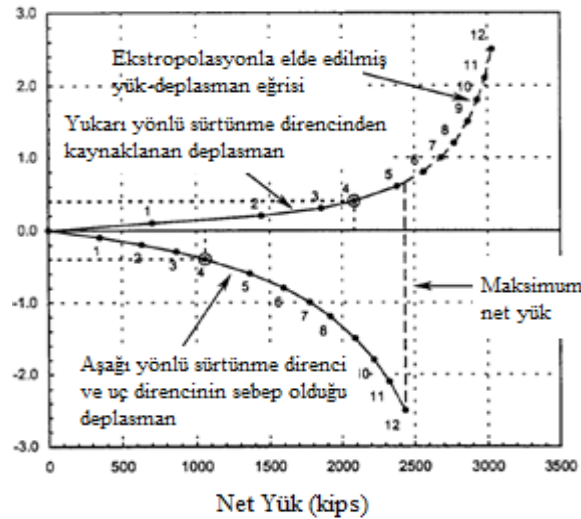
Strainstall (2012), deney sırasında O-cell yük hücresinin açılmasıyla elde edilen yük – deplasman eğrisinin, krikonun üst kısmını ve alt kısmını içeren iki eğriden

oluşturduğunu ve kazıkta oluşan toplam deplasmanın bu iki eğrinin toplamı ve kazıkta oluşan elastik sıkışmanın üstten yükleme deneyine göre dönüştürülerek etkiltilmesiyle bulunduğunu belirtmektedir. Bu iki prosedür aşağıda özetlenmiştir.

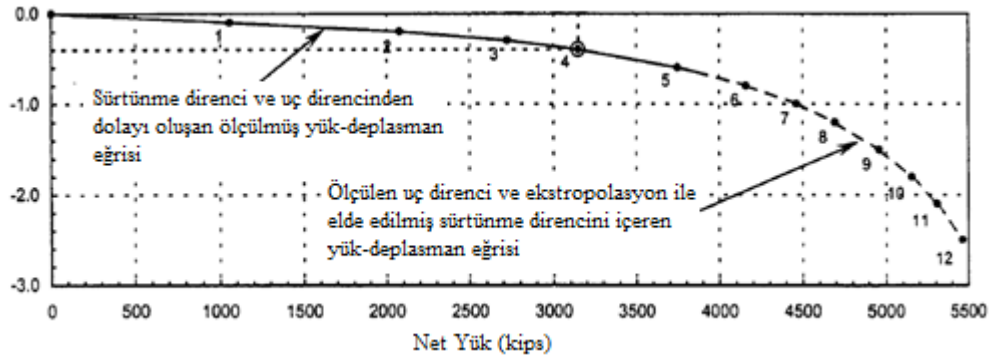
Prosedür I

Verilen kabuller doğrultusunda, seçilen herhangi bir deplasman değerine karşılık gelen yük Şekil 4.26'da verilen "ölçülen çevre sürtünmesi yük – oturma eğrisi" kullanılarak belirlenir ve kaydedilir. Benzer şekilde aynı deplasman değerine karşılık gelen yük, bu kez yine Şekil 4.26'da verilen "ölçülen uç direnci yük – oturma eğrisi" yardımıyla belirlenir ve kaydedilir. Kaydedilen bu değerlerin toplamı, yukardan yükleme durumunda belirlenen deplasmanı meydana getiren yük olarak elde edilir (Şekil 4.27). Eşdeğer eğri bu şekilde oluşturulmaya başlanır ve "ölçülen çevre sürtünmesi yük – oturma eğrisi"nin ölçülen 5 noktasına kadar devam edilir.

Şekil 4.26'da verilen örnek kapsamında, yük hücresinin üst kısmında test yükünde, çevre sürtünmesinin mobilize olmasıyla ilgili veriler yeterli değildir. Yük hücresinin alt kısmında ölçülen mobilize olmuş çevre sürtünme direnci ölçüm adedi kadar veri gerekmektedir. Bu yüzden, çevre sürtünmesine ait yük – oturma grafiğinin 6 ~ 12 noktaları için değerlerinin belirlenmesi ekstrapolasyon yöntemi ile yapılır. Bunun için kullanışlı ve uygun bir hiperbolik eğri yerleştirme yöntemi yada numerik analizler ile veri elde etme yöntemi uygulanır ve eğrinin kalan kısmı tamamlanır.



Şekil 4.26 : O-cell deneyinde elde edilen yük – oturma eğrisi, (Strainstall, 2012).

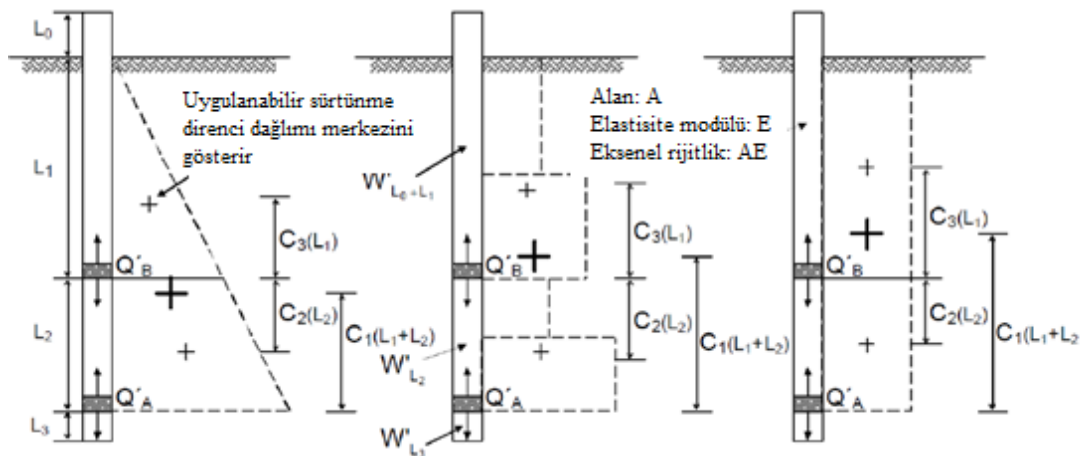


Şekil 4.27 : Örnek eşdeğer yukardan yükleme durumundaki yük – oturma eğrisi, (Strainstall, 2012).

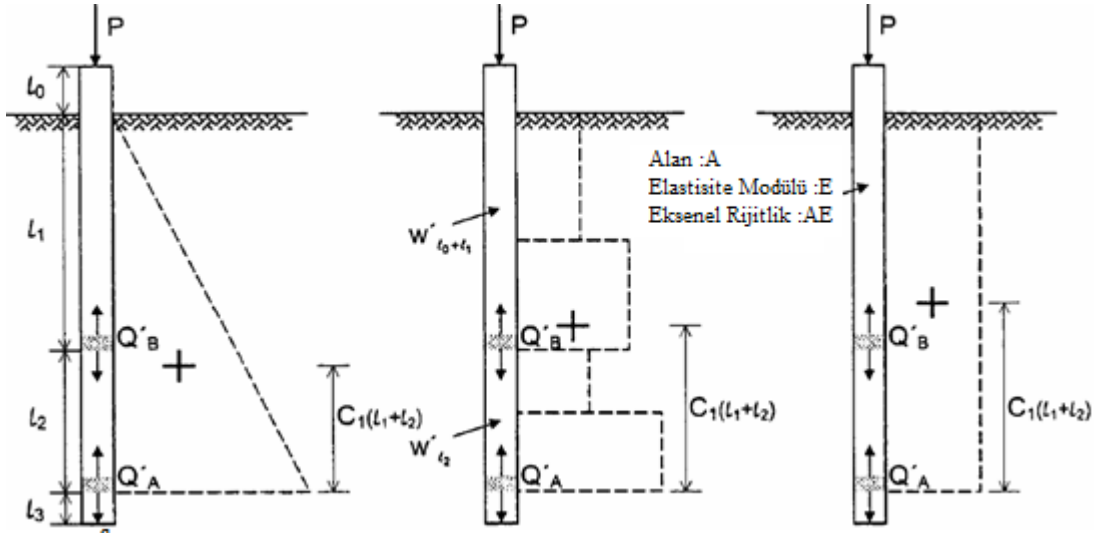
Prosedür II

Yukardan yükleme yapılan kazıklarda elastik sıkışma, Osterberg deneyinde elde edilen elastik sıkışmadan oldukça fazladır. Ayrıca bu durum, yalnızca oturmanın değil, ilave çevre sürtünmesi gerilmelerinin de mobilize olmasına sebep olmaktadır. Bu yük aktarma davranışının analiz edilmesi ve hesaplara dahil edilebilmesi için kazık boyunca oldukça fazla noktadaki çevre sürtünmesi – düşey deplasman (t-y) eğrilerinin elde edilmesi, ve bu eğrilerden elde edilen eşitliklerin çözülmesi ya da sonlu elemanlar veya sonlu farklar simülasyonları ile bu eşitliklerin yaklaşık çözümlerinin bulunması gerekir. Yaklaşık çözüm şu şekilde bulunabilir:

Kazığın çevre sürtünmesinin derinliğe bağlı olarak değişimi, Şekil 4.28’de ve Şekil 4.29’da verildiği gibi tek seviyeli Osterberg deneyi ve geleneksel yukardan yükleme deneyi için sırasıyla çizilir.



Şekil 4.28 : O-cell yük hücresiyle yükleme durumunda kazıkta oluşan örnek çevre sürtünme direnci dağılımı, (Strainstall, 2012).



Şekil 4.29 : Üstten yükleme durumunda kazıkta oluşan örnek çevre sürtünme direnci dağılımı, (Strainstall, 2012).

Örnek çevre sürtünme dirençlerinin hesaplanmasında, yan yana üç farklı etkime modeli gösterilmiştir. Tek seviyeli O-cell hücresi ile yapılan deneyde oluşacak elastik sıkışma değerleri, gösterilen Q'_B değeri dikkate alınmayarak ve her bir çevre direnci modeli için şekillerde gösterilen ve Çizelge 4.2'de verilen eşitliklerle hesaplanabilir:

$$\delta_{OLT} = \delta_{\uparrow(L_1+L_2)} \quad (4.11)$$

δ_{OLT} : Osterberg deneyindeki toplam elastik sıkışma

$\delta_{\uparrow(L_1+L_2)}$: L1 ve L2 boyunca toplam elastik sıkışma

Çizelge 4.2 : O-cell deneyinde farklı çevre sürtünmesi değerleri için teorik elastik sıkışma hesabı, (Strainstall, 2012).

$C_1 = \frac{1}{3}$	Ağırlık merkezi faktörü = C_1	$C_1 = \frac{1}{2}$
$\delta_{\uparrow(L_1+L_2)} = \frac{1}{3} \frac{Q'_{\uparrow A} (L_1 + L_2)}{AE}$	$\delta_{\uparrow(L_1+L_2)} = C_1 \frac{Q'_{\uparrow A} (L_1 + L_2)}{AE}$	$\delta_{\uparrow(L_1+L_2)} = \frac{1}{2} \frac{Q'_{\uparrow A} (L_1 + L_2)}{AE}$

$$Q'_{\uparrow A} = Q_{\uparrow A} + W'_{L_0+L_1+L_2} \quad (4.12)$$

C_1 : Ağırlık merkezi faktörü

$Q_{\uparrow A}$: Yukarı yönde O-cell yükü

$Q'_{\uparrow A}$: Yukarı yönde net O-cell yükü

$W'_{L_0+L_1+L_2}$: L_0 , L_1 ve L_2 boyunca kazık ağırlığı

Teorik elastik sıkışma miktarının yukardan yükleme ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilmesi ise Çizelge 4.3'te verilen eşitliklerle elde edilir.

Çizelge 4.3 : Geleneksel kazık yükleme yönteminde farklı çevre sürtünme modelleri için teorik elastik sıkışma, (Straininstall, 2012).

$\delta_{\downarrow L_0} = \frac{PL_0}{AE}$	$\delta_{\downarrow L_0} = \frac{PL_0}{AE}$	$\delta_{\downarrow L_0} = \frac{PL_0}{AE}$
$C_1 = \frac{1}{3}$	Ağırlık merkezi faktörü = C_1	$C_1 = \frac{1}{2}$
$\delta_{\downarrow L_1+L_2} = \frac{(Q'_{\downarrow A} + 2P)(L_1 + L_2)}{3AE}$	$\delta_{\downarrow L_1+L_2} = \frac{[(C_1)Q'_{\downarrow A} + (1 - C_1)P](L_1 + L_2)}{AE}$	$\delta_{\downarrow L_1+L_2} = \frac{(Q'_{\downarrow A} + P)(L_1 + L_2)}{2AE}$

$$\delta_{TLT} = \delta_{\downarrow L_0} + \delta_{\downarrow (L_1+L_2)} \quad (4.13)$$

δ_{TLT} : Yukardan yükleme deneyindeki toplam elastik sıkışma
 $\delta_{\downarrow L_0}$: L_0 boyunca aşağı yönlü sıkışma
 $\delta_{\downarrow L_1+L_2}$: L_1 ve L_2 boyunca aşağı yönlü sıkışma

$$\delta_{TLT} = \delta_{\downarrow L_0} + \delta_{\downarrow (L_1+L_2)} \quad (4.14)$$

$$Q'_{\downarrow A} = Q_{\downarrow A} - W'_{L_3} \quad (4.15)$$

$Q'_{\downarrow A}$: Aşağı yöndeki net O-cell yükü
 $Q_{\downarrow A}$: Aşağı yöndeki O-cell yükü
 W'_{L_3} : L_3 boyunca kazığın ağırlığı
 P : Eşdeğer yukardan etki ettirilen yük
 C_1 : Ağırlık merkezi faktörü

Bu tez kapasamında yer alan tek seviyeden gerçekleştirilen O-cell testlerinde her iki yükleme hâlinde de kazığın L_3 uzunluğu boyunca elastik kışalması aynıdır. Bu sebeple iki eşitlik grubunda da hesaplamalara dâhil edilmemiştir ($L_3 = 0$). Elde edilen δ_{OLT} değerinin δ_{TLT} değerinden çıkarılması ile, Osterberg deneyinde görülmeyen ancak eşdeğer yukardan yükleme eğrisinde hesaba katılacak ilave elastik sıkışma miktarı hesaplanmış olur. Prosedür I'de elde edilen “rijit eşdeğer yukardan yükleme eğrisi”ne ilave elastik sıkışmanın eklenmesi ile “düzeltilmiş eşdeğer yük – oturma eğrisi” elde edilmiş olur.

Son çizilen bu eğri, Osterberg deneyinden elde edilen verilerle kazığın adeta yukardan yüklenmiş gibi değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 4.4'te gösterilen örnek hesap tablosu ile Şekil 4.30'da verilen grafikler sonuçların elde

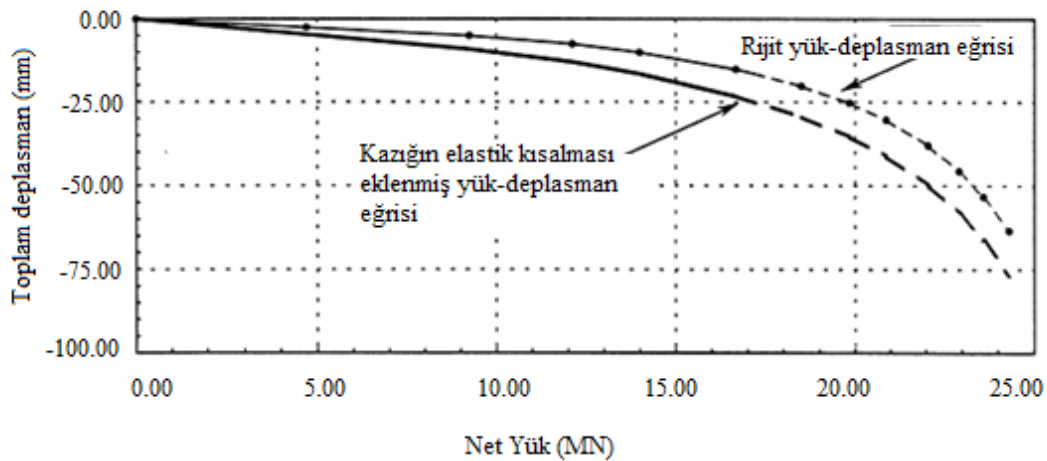
edilmesini ve elde edilen “düzeltilmiş eşdeğer yük – oturma eğrisi” ile düzeltilmemiş haldeki eğrinin karşılaştırmasını göstermektedir.

Çizelge 4.4 : OLT ve TLT için elastik sıkışma örnek hesap tablosu, (Straininstall, 2012).

$C_1 =$	0.441	Ağırlık merkezi faktörü	
$AE =$	1700 MN	Eksenel Rijitlik	
$L_0 =$	1.80 m	Zeminin üstünde kalan kazık boyu	
$L_1 =$	14.69 m	Yük hücresi üstünde kalan gömülü kazık boyu	
$L_2 =$	0.00 m	Yük hücresi altında kalan kazık boyu	
$L_3 =$	0.00 m	İkinci yük hücresi altında kalan kazık boyu	

Δ_{BDSLTL} (mm)	$Q'_{\downarrow A}$ (MN)	$Q'_{\downarrow B}$ (MN)	$Q'_{\uparrow B}$ (MN)	P (MN)	δ_{TLT} (mm)	δ_{BDSLTL} (mm)	$\Delta_{BDSLTL} + \Delta_{\delta}$ (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.54	1.57	3.14	4.71	3.37	1.20	2.17	4.71
5.08	2.82	6.43	9.25	6.52	2.45	4.07	9.15
7.62	3.86	8.27	12.12	8.61	3.15	5.46	13.08
10.16	4.72	9.29	14.01	10.05	3.54	6.51	16.67
15.24	6.08	10.60	16.68	12.14	4.04	8.10	23.34
20.32	7.11	11.40	18.50	13.60	4.34	9.26	29.58
25.40	7.90	11.94	19.85	14.70	4.55	10.15	35.55
30.48	8.55	12.33	20.88	15.55	4.70	10.85	41.33
38.10	9.30	12.75	22.05	16.53	4.86	11.67	49.17
45.72	9.88	13.05	22.93	17.27	4.97	12.29	58.01
53.34	10.34	13.27	23.61	17.84	5.06	12.79	66.13
63.50	10.83	13.48	24.31	18.44	5.14	13.30	76.80

Δ_{BDSLTL} : İki yönlü statik yükleme deneyi toplam deplasmanı
 $Q'_{\downarrow A}$: Yük hücresinin aşağı yönlü net yükü
 $Q'_{\downarrow B}$: Yük hücresinin aşağı yönlü net yükü
 $Q'_{\uparrow B}$: Yük hücresinin yukarı yönlü net yükü
P : Üstten yükleme durumunda uygulanan yük
 δ_{TLT} : Üstten yükleme durumunda oluşan deplasmanlar
 δ_{BDSLTL} : İki yönlü statik yükleme deneyi deplasmanı



Şekil 4.30 : Kazığın elastik sıkışması ilave edilmiş eşdeğer yük deplasman eğrisi, (Straininstall, 2012).

4.2.5 O-cell testin üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları

Osterberg yük hücresiyle gerçekleştirilen yükleme deneylerinin sağladığı üstünlükler arasında maliyet, zaman, yüksek test kapasitesi ve kazık davranışının yük hücresi tarafından iki yönlü yüklenerek ayrı ayrı elde edilen veriler ışığında değerlendirilmesi yer almaktadır.

Özellikle deneyin yapılışı için belirlenen uluslararası standartlarda geleneksel kazık yükleme deneyi için reaksiyon sistemlerinin gerektiği önceki bölümlerde belirtilmiştir. Deney kazığına yükleme yapılması ve deney kazığının reaksiyon aldığı çevre sistemlerden etkilenmemesi amacıyla kazık çapının belirli oranlarında uzağa yapılması gerekmektedir. Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen deneyde ise reaksiyon sistemine gerek olmayıp kazık davranışı kazık üst kotunda kurulan otomatik veri alıcılar ve reaksiyon kirşi üzerinden yapılmaktadır.

Osterberg yük hücresi ile tarihte gerçekleştirilen ve bu kapsamda detaylı bilgiyi literatürde yer alan makalelerde bulabileceğimiz çeşitli yükler altında testler gerçekleştirilmiştir. İstenilen test yüküne, seçilecek uygun Osterberg yük hücresiyle güvenli bir şekilde ulaşılır.

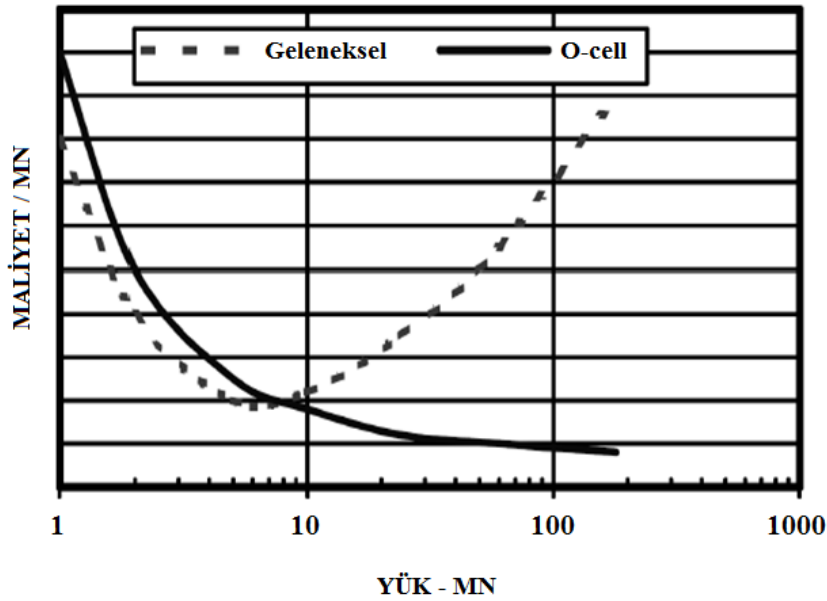
Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen kazık yükleme deneyini kazık göçmeden tamamlandıysa, yük hücresinin açıldığı bölge, yük hücresine kadar indirilen enjeksiyon boruları ile betonlanarak kullanılabilir. Geleneksel kazık yükleme deneyinde kazık üst kotundan yüklenirken kazık üst kotlarında deformasyonlar meydana gelebilir. Yapısal stabilitede meydana gelen bozulmalar, kazığın proje kazığı olması durumunda kullanımına engel durum teşkil etmektedir. Bu sebeple İngiltere’de yapılan uygulamaların birçoğunda çalışma yükünün 1.5 katına test edilen kazıkların üst yapı ile yeniden irtibatlandırılması uygun bulunmamaktadır (England, 2003a).

Geleneksel yükleme deneyi sırasında elde edilen veriler, sadece kazık başlığına yerleştirilen deplasman ölçerler ve kazık içerisine belirli aralıklarla yerleştirilen gerilme ölçerler ile olmaktadır. O-cell test ile kazığın mobilize olan çevre sürtünmesi ve alt kısmındaki uç direnci ve çevre sürtünmesi ayrı ayrı elde edilir. Fakat, literatürde yer alan deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan metodlar sadece üstten yükleme deneyinden elde edilen net yük – toplam oturma değerlerine göre yapılmaktadır. Bu sebeple deney sonuçları, kazıkta yükleme sırasında meydana

gelen elastik sıkışma teorik formüllerle hesaplanır, O-cell testinden elde edilen yük – oturma değerinden çıkarılarak eşdeğer yukardan yükleme eğrisine dönüştürülerek değerlendirilir. Osterberg deney sonuçları sonrası elde edilen eşdeğer yukardan yükleme eğrisi konservatif yaklaşımları içermektedir (Arda, 2009).

O-cell testi için seçilen ekipman, imalat sırasında donatı kafesine monte edilip kuyuya indirileceği için, hazırlanması zaman alabilir. İmalatın tamamlanmasından sonra, uygulama yükünün revizyonu ve ekipman değişimi gerçekleştirilmez. Bu sebeple deney öncesi zemin parametreleri ile kazık kapasitesi hesabı detaylı bir şekilde gerçekleştirilmeli, kazığın çalışma prensibine göre yük hücresinin yeri doğru tayin edilmelidir. Ayrıca, deney sırasında alınan veriler elektronik olduğu için gerek gerilme ölçer (strain gage), gerekse deplasman ölçer (telltale) bağlantıları kontrol edilip kuyuya dikkatlice indirilmelidir.

Geleneksel yöntemler ile Osterberg hücresi yönteminin deney maliyeti açısından karşılaştırılması England (2003a) tarafından yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.31’de verilmiştir. Geleneksel kazık yükleme ve O-cell deneylerinin eğrileri incelendiğinde 10 MN test yüküne kadar gerçekleştirilen deneylerde, kesikli çizgi ile temsil edilen geleneksel kazık yükleme deneyi daha az maliyetle yapılmaktadır. Test yükünün 10 MN’den daha fazla olması durumunda ise geleneksel kazık yükleme deney eğrisi maliyet açısından artış marjinde olup O-cell deneyi maliyet açısından daha üstün olmaktadır.



Şekil 4.31 : Geleneksel yükleme deneyi ve Osterberg yükleme deneyinin maliyetinin karşılaştırılması, (England, 2003a).

5. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ

5.1 Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

Sonlu elemanlar metodu, çok geniş kapsamdaki problemlerin tam ve tam olmayan diferansiyel eşitliklerle çözümünü sağlayan en güçlü matematiksel yaklaşım metodudur. SEM, inşaat mühendisliğinin çoğu uygulamalarında hem araştırma amaçlı, hem de problemlerin çözümü amacıyla gerçekleştirilen tasarımın kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir sayısal analiz tekniğidir. Genel anlamda sonlu elemanlar yöntemi, iksa sistemlerinin stabilite analizlerinde, şevlerin duyarlılığının ve stabilitesinin kontrolünde, barajlarda, tünellerde, kazıklı temellerin deplasmanlarının ve kapasitelerinin kontrolünde, yüzeysel temellerin oturma analizlerinde kullanılmaktadır.

SEM, gerilme, yer değiştirme gibi herhangi bir sürekli büyüklüğün, küçük ve sürekli parçaların birleşmesinden oluşan bir modele dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Yöntemde öncelikle problemin geometrisi oluşturulmakta ve sistem, düğüm noktaları ile birbirine bağlanan sonlu sayıda elemanlara ayrılmaktadır. Elemanlara ayırma işleminin doğru biçimde yapılması çözümün doğruluğu açısından oldukça önemlidir (Poulos, 1994). Eleman boyutları ve sayıları, sistemi en iyi şekilde temsil etmeli ve aynı zamanda hesaplama süresi de minimum seviyede olmalıdır. Değişkenin ani değişim gösterdiği yerlerde elemanlar genellikle daha küçük seçilmektedir. Tek boyuttaki elemanlar bir doğru şeklinde, iki boyutlu elemanlar üçgen veya dörtgen şeklinde, üç boyutlu elemanlar ise üçgen piramit, dikdörtgenler prizması, daha genel bir ifadeyle de dört veya altı yüzlü elemanlar olarak tasarlanmaktadır. Oluşturulan sistemin sonlu elemanlara ayrılmasının ardından ele alınan büyüklüğün ortamdaki değişimini gösterecek yaklaşım fonksiyonu seçilmektedir. Çözümlerdeki yakınsama ve sonuçlardaki doğruluk, seçilen yaklaşım fonksiyonun gerçeğe yakınlığına bağlı olmaktadır. Yaklaşım fonksiyonu, problemin yapısına ve çözüm bölgesine göre belirlenmektedir. Fonksiyon, derecesi ve katsayıları belirlenen polinomlar veya seriler şeklinde tanımlanmaktadır. Tanımlanan büyüklükler arasındaki ilişki, bünye denklemleri olarak ifade edilmektedir. Bünye denklemleri, bir elemanın davranışını

gösteren denklemlerdir. Bünye denklemlerinin birleştirilmesiyle tüm sistemin denklemi elde edilebilmektedir. Elde edilen sistem denklemi, sınır koşulları uygulanarak çözülmekte ve birincil bilinmeyenler ve buna bağlı olarak da ikincil bilinmeyenler hesaplanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan gerilme-şekil değiştirme problemlerinin sonlu elemanlarla çözümünde, birincil bilinmeyenler genellikle ortamda yer alan her düğüm noktasının yer değiştirmesi olarak kabul edilmektedir (Azizi, 2000).

SEM, bilgisayar kapasitesine bağımlı (bellek ve cpu hızı) olarak kullanılması, yaklaşık bir yöntem olması ve gerçek çözüme çok yakın sonuçların ancak yeterli eleman kullanılarak elde edilebiliyor olması sonlu elemanlar yönteminin sınırlayıcı yanları arasında yer almaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde malzeme davranışı, toplam gerilme ve şekil değiştirmeler arasındaki değişimlerle ilişkilendirilerek tanımlanırken, geoteknik problemlerinde toplam gerilme tensörü, efektif gerilmeler ve boşluk suyu basınçlarının bileşimi olarak tanımlanmakta ve malzeme davranışı genellikle efektif gerilmeler cinsinden ifade edilmektedir. Geoteknik problemlerin bir çoğunda yapı ile zemin etkileşim içerisinde olduğu bilinmektedir. Bu durumda bu tip problemlerin analizinde, yapı ile zemin arasında ara yüzey kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, problemin doğru çözümlenebilmesi için daha geniş bir aralıkta sınır koşullarının tanımlanmasına ihtiyaç vardır (Cheung ve diğ, 1991). Bu sebeplerden dolayı, sonlu elemanlar yönteminin geoteknik mühendisliğinde gerçekçi bir biçimde uygulanabilmesi için değişiklikler yapılması zorunluluk arz etmektedir (Potts ve Zdravković, 1999; Keskin, 2009). Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar analizleri sonucunda gerilmeler, yanal ve düşey hareketler, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenebilmektedir. Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme davranışı lineer olmadığından analizlerde bu davranışın modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapımdan önceki başlangıç gerilme durumu, zeminin lineer olmayan gerilme şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri ile yükleme aşamaları arasındaki bekleme süreleri analizlerde gerçek duruma yakın olarak belirlenmelidir (Kılıç, 2000).

Bu bölüm kapsamında, teze konu olan killi zeminlerde imal edilen fore kazık ve baretlerin kapasitelerinin belirlenmesi ve yük altındaki davranışının gözlenmesi amacıyla gerçekleştirilen Oseterberg yük hücresi ile iki yönlü statik yükleme deneyi ile geleneksel kazık yükleme deneyi bilgisayar ortamında, sonlu elemanlar yöntemini

kullanan PLAXIS 2D paket programı ve programın çalışma metodu olan sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. SEM ile yapılan analize ait sonuçlar vaka analizi bölümünde verilmiştir.

5.2 Plaxis 2D

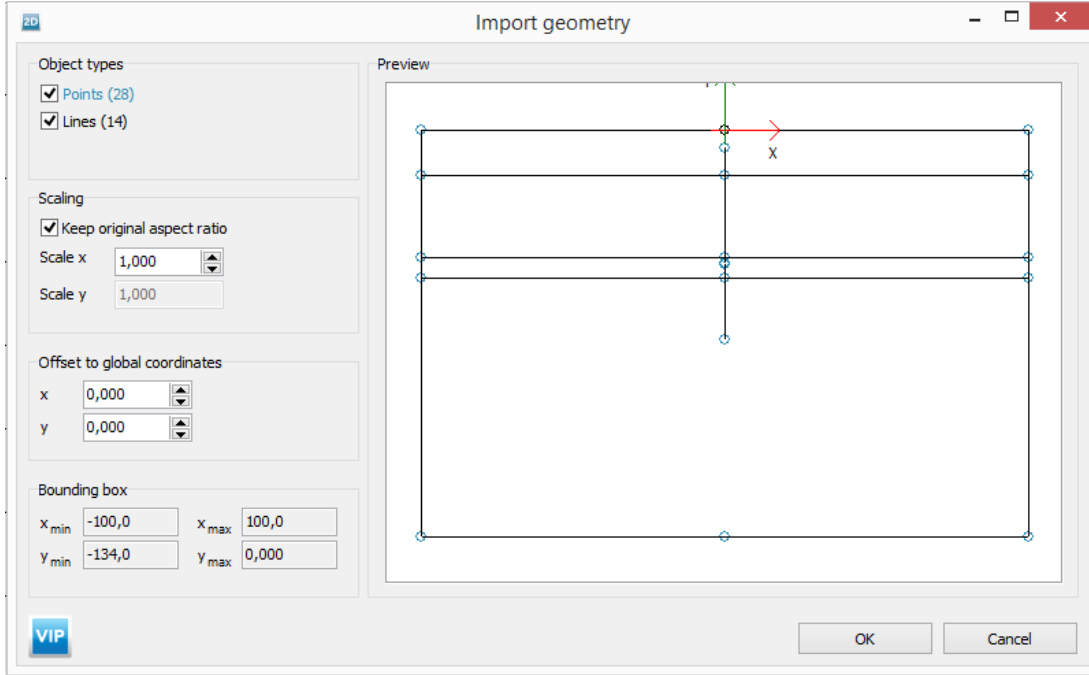
Plaxis 2D, değişik geoteknik problemler için, sonlu elemanlar yöntemiyle, deformasyon ve stabilite analizleri gerçekleştirebilen bir bilgisayar programıdır. Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından 1987 yılında ilk olarak yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Program, geoteknik mühendisliği projelerinin tasarımında ihtiyaç duyulan, gerilme – şekil değiştirme, zemin – yapı etkileşimi, akım ağı, taşıma gücü, konsolidasyon, zemin dinamiği konularında ve malzeme farklılığı olan durumlarda kullanılabilir.

Geoteknik uygulamaların gerçekleştirildiği kaya ve zeminlerin lineer olmayan, zamana bağlı ve anizotropik davranışının modellenmesi için gelişmiş temel modeller gerekmektedir. Zeminin çok fazlı yapısına ek olarak, zeminin içerisindeki hidrostatik ve hidrostatik olmayan boşluk suyu basıncı ilişkisinin belirlenmesi için özel prosedürler gerekmektedir. Bununla birlikte, zeminin kendi başına modellenmesi Plaxis içinde en önemli konulardan biri olmakla birlikte, birçok uygulamada yapı ve yapı – zemin arasındaki sürtünme ilişkisi de sonuçlar için önem göstermektedir (Brinkgreve, 2010).

5.2.1 Geometrik model

Analizi yapılacak her yeni projenin, saha koşullarına uygun olarak modelinin oluşturulması, SEM için önem arz etmektedir. Genel olarak geometrik model; farklı tabakalar içerisinde yer alan yapıları, yükleri ve yapım aşamalarını saha koşullarına eş değer olacak şekilde oluşturulmalıdır. Model sınırları, modellenmesi yapılan yapının analiz sonuçlarını etkilemeyecek şekilde yeteri kadar büyük seçilmelidir. Model içerisinde, sınırları ve tabakaları belirtmek için nokta elemanlar kullanılmaktadır. Model içerisinde kullanılan nokta elemanlar, tekil yükün, ankrajın ve saplamaların yerlerinin belirlenmesi ve bununla birlikte sonlu elemanlar ağının lokal genişletmesi için kullanılmaktadır. Çizgi elemanlar, fiziksel sınırların

tanımlanması, geometri içerisinde yer alan süreksizliklerin ya da yapım aşamalarında örneğin diyafram duvar önündeki kazı sınırının tanımlanması amacıyla kullanılır. Kümeler içerisinde yer alan alanlar tamamıyla çizgi elemanlarla doludur. Kümeler içerisinde yer alan zemin özellikleri homojen dağılım göstermektedir (Brinkgreve, 2010). Şekil 5.1’de analizi yapılacak olan kazık yükleme deneyinin modelinin oluşturulmasında kullanılan çizgi elemanlar, nokta elemanlar ve düğüm noktalarını kapsayan model geometrisi yer almaktadır.



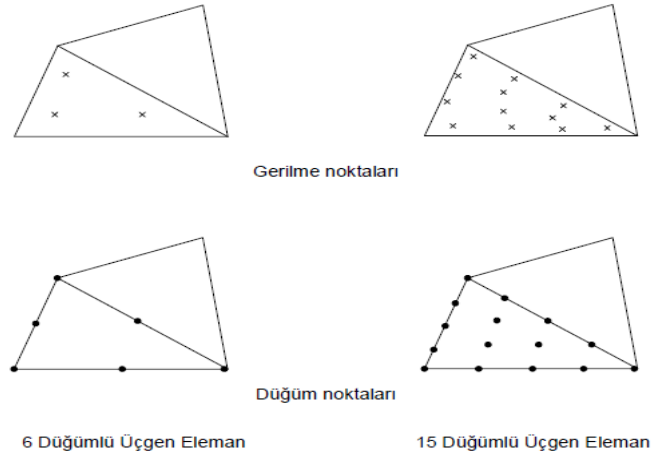
Şekil 5.1 : Geometrik model.

Şekil 5.1’de verilen model geometrisi, toplam 28 nokta eleman ve 14 çizgi eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Sahada gerçekleştirilen kazık yükleme deneyinin 2 boyutlu düzlem sınırları belirlenerek deney kazığının yerleşimi çizgi elemanlar ile belirlenmiştir.

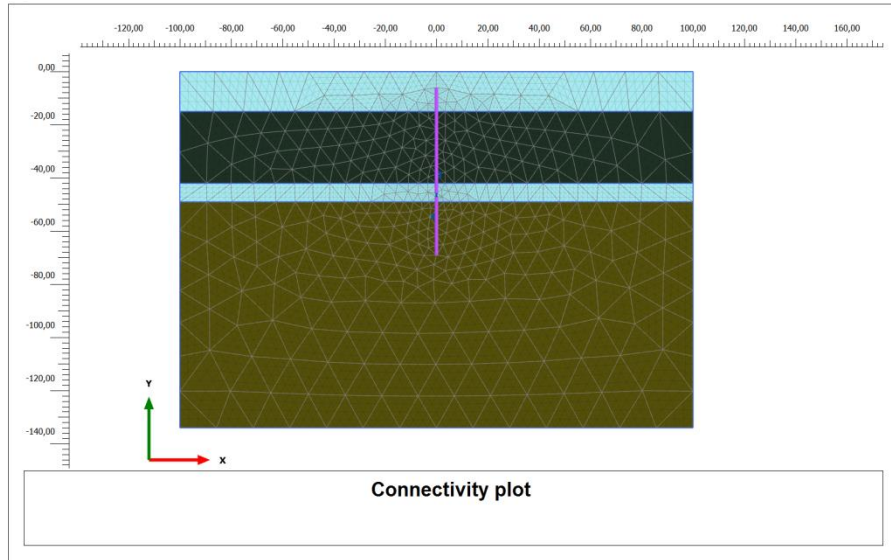
5.2.2 Kümeler (Clusters)

Zemin ortamı genelde iki boyutlu üçgen elemanlar ile tanımlanmaktadır. Üçgen elemanlar ile tanımlanana zemin ve yapı elemanları kendi içersinde homojenik dağılımı ile sonlu sayıda elemana bölünür. Malzemenin üçgen elemanlara bölünmesiyle birlikte lineer davranışı modellenmeye çalışılır. Bu elemanlar belirli noktaları ile birbirine bağlanırlar. Bu noktalara düğüm (node) denilmektedir. Her bir elemendeki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle

ilişkilidir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. SEM bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır (Moaveni, 1999). Programda, 6 ve 15 düğüm noktalı iki farklı üçgen eleman bulunmaktadır. 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar, 15 düğüm noktasından ve 12 gerilme noktasından oluşmaktadır. 15 düğüm noktalı üçgen elemanlı analizlerde sonuçların elde edilmesi daha uzun sürmektedir. Şekil 5.2’de 6 ve 15 düğüm noktalı üçgen eleman yapıları yer almaktadır. Gerilme izi ya da yük – gerilme diyagramları oluşturmak için yapı üzerinde özel gerilme noktaları seçilebilmektedir. Analiz sonuçlarında, oluşan gerilme ve yük kayıplarının daha hassas tayin edilmesi amacıyla 15 düğüm noktalı üçgen eleman moduyla çalışma imkanı sağlamaktadır.



Şekil 5.2 : Gerilme noktaları ve düğüm noktaları (Brinkgreve, 2010).

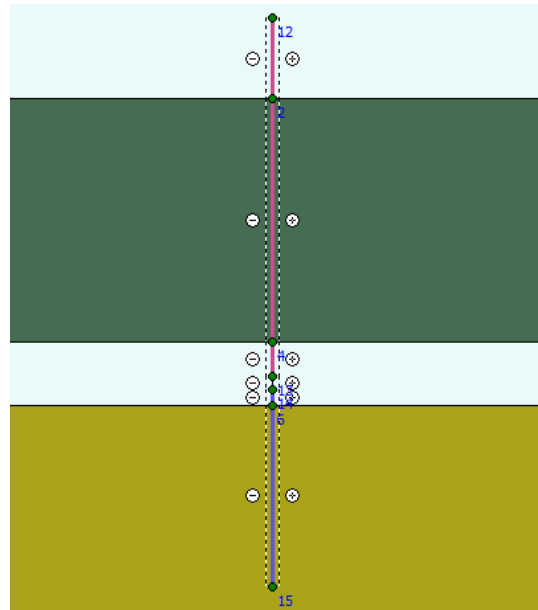


Şekil 5.3 : Kümeleri oluşturulmuş zemin modeli.

Şekil 5.3'te verilen zemin modelinde sonlu elemanlar ağı, program tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Kazık olarak tanımlanan yapı elemanı etrafında sonlu elemanlar ağı sıklıklandırılarak gerilme deformasyon davranışının daha detaylı irdelenmesini sağlamaktadır.

5.2.3 Arayüzeyler (Interfaces)

Ara yüzeyler modelleme sırasında yapı – zemin etkileşimini modellemek için kullanılmaktadır. Ara yüzeyler kullanılarak, zemin ile yapı arasında izin verilen görece deplasmanlar ve ayrılmaların oluşması sağlanmaktadır. Şekil 5.4'te arayüzeyi oluşturulmuş yapı – zemin modeli yer almaktadır.



Şekil 5.4 : Kazık – zemin arayüzeyi.

Yapı – zemin etkileşimini modellemek amacıyla kullanılan ara yüzeyler başlangıçta tamamen pürüzlü ve düzgün yapıya sahiptirler. Yapı ile zemin veya donatı ile zemin arasındaki etkileşim, ara yüzey elemanı için uygun bir mukavemet azaltma faktörü (R_{inter}) seçilerek modellenmektedir. Bu faktör, ara yüzey mukavemeti (çeper sürtünmesi ve adhezyon) ve zemin mukavemeti (sürtünme açısı ve kohezyon) ile ilişkilidir (Brinkgreve, 2010).

5.2.4 Gömülü kazık elemanı (embedded pile rows)

Kazıklar gerçekte 3 boyutlu yapılar olmasına rağmen sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde iki boyutlu olarak modellenmektedir. Kazığın ya da baretin sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde gömülü kazık elemanı olarak

modellenmesi, kazığın hem plak eleman hemde iki düğüm noktası arasında oluşan ankraj elemanı olarak modellenmesi sağlanmaktadır. Kazık veya baret modellemek için kullanılan plak eleman ve iki düğüm noktası arası ankraj elemanının üstünükleri ve sınırlayıcı yanları Plaxis 2013 bülteninde aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Plak eleman

- Tasarımcı tarafından aksel rijitlik girilmesine olanak sağlar,
- Arayüzey elemanı ile yapı – zemin etkileşimi oluşturulur, fakat zeminin plak elemana doğru hareketi gözlenemez (süresiz ağ),
- Eğilme rijitliğinin girilmesine olanak taşır ve kazıkta oluşan kuvvetler gözlenebilir,
- Arayüzey kullanılarak gerçekçi olmayan kayma düzlemi tanımlanır.

İki düğüm arası ankraj elemanı

- Tasarımcı tarafından aksel rijitliğin girilmesine olanak sağlar,
- Yapı – zemin etkileşimi oluşmaz, zemin sadece ankraj elemanına doğru akar (sürekli ağ).
- Eğilme rijitliğinin girilmesine olanak taşımaz ve kazıkta oluşan kuvvetler gözlenemez.

Gömülü kazık elemanı kullanılarak modellenmesi yapılan kazık ya da baret yukarıda bahsedilen özelliklerin kombinasyonuna sahip olmaktadır (Sluis, 2012).

Gömülü kazık (embedded pile) elemanı

- Tasarımcı tarafından aksel rijitliğin girilmesine olanak sağlar.
- Yapı – zemin etkileşimi iki çizgi arayüzey elemanı arasında gözlenip, zemin gömülü kazık elemanına doğru akış gösterir (sürekli ağ).
- Eğilme rijitliğinin girilmesine olanak taşır ve kazıkta oluşan kuvvetler gözlenebilir.
- Gerçekçi olmayan kayma düzlemi tanımlanmaz.
- Kazığın gömülü boyunca, kazık çevresinde oluşan sürtünme direnci ayrıca tanımlanabilir.
- Baret ya da kazıkların planda yer alan aralığı, model ile düzlem dışına doğru gerçek aralığında tanımlanması sağlanır.

Kazık ya da baretin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde gömülü kazık elemanı olarak modellenmesi sırasında Şekil 5.5'te verilen parametreler girilerek analizleri gerçekleştirilir.

Embedded pile row - Gömülü kazık elemanı

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Gömülü kazık elemanı
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Properties		
E	kN/m ²	41,00E6
γ	kN/m ³	25,00
Pile type		User-defined
A	m ²	2,240
I	m ⁴	1,460
L _{spacing}	m	1,000
Rayleigh α		0,000
Rayleigh β		0,000
Skin resistance (linear)		
T _{top, max}	kN/m	575,0
T _{bot, max}	kN/m	3546
Base resistance		
F _{max}	kN	0,000
Interface stiffness factor		
Default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Axial skin stiffness factor		6,022
Lateral skin stiffness factor		6,022
Pile base stiffness factor		60,22

OK Cancel

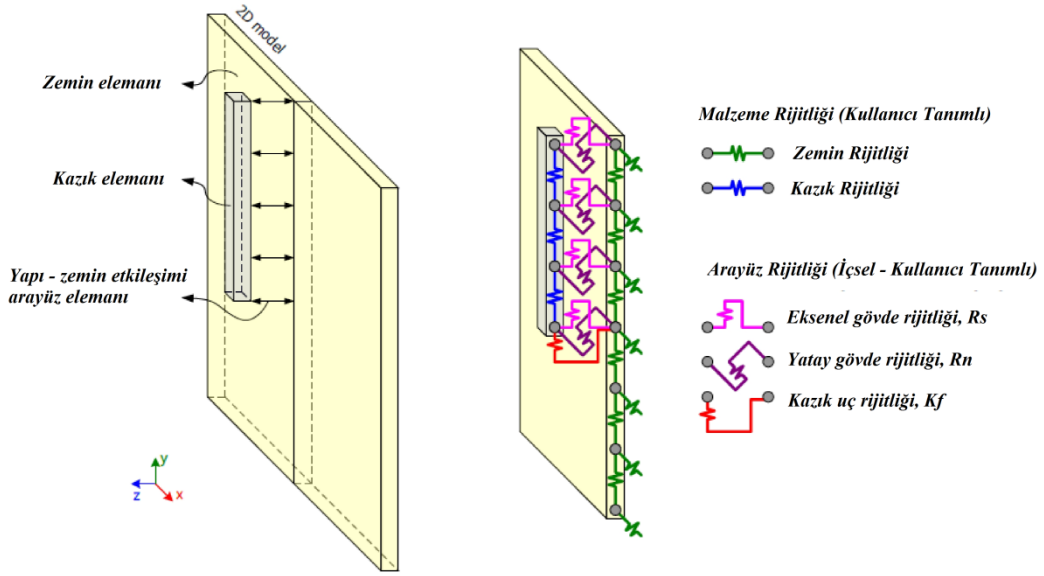
Şekil 5.5 : Gömülü kazık elemanı model parametreleri.

Şekil 5.5'te verilen gömülü kazık elemanı model parametrelerini kazık ya da baretin elastisite modülü E, betonarme malzemenin birim hacim ağırlığı γ , kesit alanı A, atalet momenti I, kazık ya da baretin zemin içerisindeki çevre sürtünme kapasitesi T_{top,maks} ve T_{bot,maks} ile kazık ya da baretin uç kapasitesi F_{maks} oluşturmaktadır.

5.2.4.1 Gömülü kazık elemanı çalışma prensibi

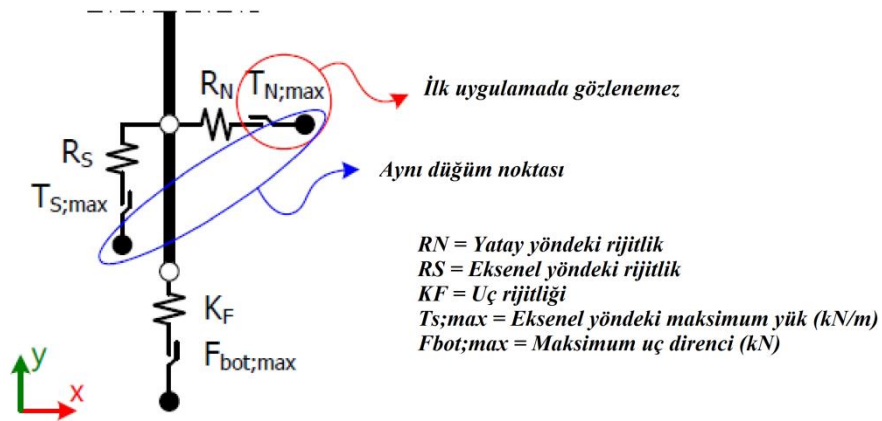
Plaxis 2D ile gömülü kazık elemanı (embedded pile) modeli kullanılarak tasarlanan baret ve kazıklar iki çizgi elemandan oluşmaktadır. Birincisi çizgisel geometri, bir diğeri de gömülü kazık elemanıdır. Program içerisinde ağ elemanların oluşturulmasıyla birlikte, çizgisel geometri etrafında elemanlar meydana gelmektedir. Oluşan elemanların köşeleri ve düğüm noktaları çizgisel geometri boyunca tekrar edilir. Orijinal ve tekrar edilen düğüm noktaları ara yüzey elemanları ile birbirlerine bağlantılıdır. Kazık boyunca, çizgisel hat üzerinde oluşan ara yüzey

yatay ve düşey yönde numerik rijitliğe sahip yay elemanlar (R_S ve R_N) ile tanımlanır. Eksenel yönde tanımlanan yay elemanlar plastik deformasyonlarla sınırlandırılmış olup, kazık ya da baret gövde kapasitesini göstermektedir. Kazık ya da baret alt kotunda oluşan noktasal arayüz, yaylar ve plastik mafsal ile tanımlanmış olup, kazığın uç taşıma kapasitesini vermektedir. Modelde oluşan arayüzler Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Gömülü kazık elemanı çalışma prensibi, (Sluis, 2012).

Şekil 5.6'da verilen arayüzelerin çalışma prensibine daha yakından bakıldığında, eksenel yaylar kazığa uygulanan maksimum yükte, uç ve gövdenin aşağı yönlü kayma hareketini sağlamaktadır.



Şekil 5.7 : Arayüzey çalışma prensibi, (Sluis, 2012).

Zemin ile kazık arasındaki deformasyon davranışı, Şekil 5.7’de verilen kazık, zemin ve arayüz rijitliği ile ifade edilir. Arayüz rijitlikleri R_s , R_N ve K_F zeminin kayma modülü G_s , düzlem dışında kazık merkezleri arasındaki mesafeye L_s ve kazık çapı r ’ye bağlıdır.

$$R_s = ISF_{RS} = \frac{G_s}{L_s} \quad (5.1)$$

$$R_N = ISF_{RN} \times \frac{G_s}{L_s} \quad (5.2)$$

$$K_F = ISF_{KF} \times \frac{G_s}{L_s} \quad (5.3)$$

ISF_{xx} birimsiz arayüz rijitlik faktörü olup, deformasyon davranışını etkilemektedir. Plaxis içerisinde kullanıcı tarafından belirlenip, düzlem dışındaki kazık ara mesafesi L_s ve kazık çapı $D_{eş}$ ile bağıntılıdır (Sluis, 2012).

$$ISF_{RN} = ISF_{RS} = 2.5 \cdot \left(\frac{L_s}{D_{eş}} \right)^{-0.75} \quad (5.4)$$

$$ISF_{KF} = 25 \cdot \left(\frac{L_s}{D_{eş}} \right)^{-0.75} \quad (5.5)$$

Kazık ya da baretin gerçekçi davranışını belirlemek ya da gözlemlemek amacıyla, çizgisel arayüz rijitliği değerlerinin zemin biçimine uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ancak bu durumda gömülü kazık elemanı ile zemin arasındaki göreceli deplasman değeri gerçeğe yakın oluşmaktadır.

5.2.5 Zemin ve yapı elemanlarının modellenmesi

SEM ile gerçekleştirilen analizlerde çeşitli yapı ve zemin elemanları için belirlenen malzeme modelleri yer almaktadır. Yapı ve zemin çeşidine göre uygun modeli seçerek analiz yapmak sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu modeller; linear elastik model, Mohr – Coulomb model, Jointed rock model, Hardening soil model, HS small strain model, Soft soil model, Modifiye CAM kili model, Hoek – Brown model, NGI – ADP model ve soft soil creep modelidir. Plaxis içerisinde yer alan zemin modellerinin SEM ile yapılan analizlerde sahadaki zemin kesitine uygun olarak seçilmesi ile ilgili Plaxis 2015 Material models manuel önerisi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Zemin türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).

Model	Beton	Kaya	Çakıl	Kum	Silt	AK Kil	NK Kil	Balçık (organik)
Linear elastik	C	C						
Mohr-Coulomb	A	B	C	C	C	C	C	C
Hardening Soil			B	B	B	B	B	
HS Small			A	A	A	A	A	
Soft Soil Creep							A*	A*
Soft Soil							A*	A*
Jointed Rock		A**						
Modified Cam-Clay							C	C
NGI-ADP							A*	A*
Hoek-Brown		A**						

Çizelge 5.1’de analizler sırasında kullanılması önerilen zemin modelleri uygunluğuna göre A, B ve C olarak adlandırılmıştır. A, SEM ile yapılan analizlerde zemin türüne göre en uygun modeli tanımlamaktadır. B, makul bir yaklaşım olduğunu, C ise en basit yaklaşımı tanımlamaktadır. A*, soft soil zemin modelinde zamana bağlı analizlerde, NGI – ADP ise kısa dönem analizlerde uygun olduğunu tanımlamaktadır. A** olarak tanımlanan jointed rock model, tabakalanma ve anizotropinin mevcut olduğu durumda en uygun seçim olup, Hoek Brown model ise genel olarak tüm kaya modeli için en iyi çözümdür (Plaxis, 2015).

Ayrıca Plaxis 2015 Material models manuel, sahada gerçekleştirilen yapısal uygulamaya uygun modeli Çizelge 5.2’deki gibi sınıflandırmıştır.

Çizelge 5.2 : İmalat türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).

Model	Temel	Kazı	Tünel	Dolgu	Şev	Baraj	Kıyıda uzak	Diğer
Linear elastik			C					
Mohr-Coulomb	C	C	C	C	C	C	C	C
Hardening Soil	B	B	B	B	B	B	B	B
HS Small	A	A	A	A	A	A	A	A
Soft Soil Creep	B	B	B	A	A	B	B	B
Soft Soil	B	B	B	A	A	B	B	B
Jointed Rock	B	B	B	B	B	B	B	B
Modified Cam-Clay	C	C	C	C	C	C	C	C
NGI-ADP	B	B	B	A	A	B	A	B
Hoek-Brown	B	B	B	B	B	B	B	B

SEM ile analizlerde kullanılan zemin modelleri aşağıda kısaca özetlenmektedir. Tez kapsamında vaka analizinde yer alan zemin türleri siltli ve killi zeminler olup SEM ile analizlerde zeminin deformasyon davranışının daha kapsamlı ele alan hardening

soil modeli kullanılmıştır. Bu sebeple, Hardening soil model hakkında detaylı bilgi aşağıda verilmektedir.

5.2.5.1 Linear elastik model

Bu model, Hooke yasasının izotropik linear elastisitesini temsil etmektedir. Model elastisite modülü ve poisson oranı gibi iki elastik rijitlik parametresini içermektedir. Linear elastik model iki adet rijitlik modülünün girişine olanak sağladığı için zemin ve kaya gibi malzemelerinin davranış özelliklerinin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Genellikle zemin içerisinde inşası yapılan rijit yapıları modellemekte kullanılmaktadır. Şekil 5.8'de linear elastik modelde kullanılan parametreler verilmiştir.

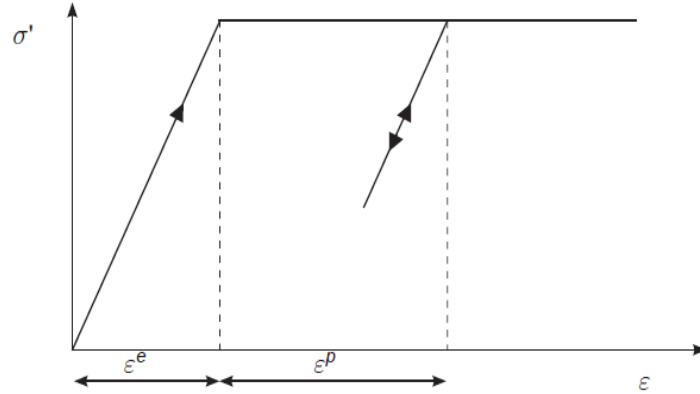
Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	42,00E6
ν' (nu)		0,2000
Alternatives		
G	kN/m ²	17,50E6
E'ced	kN/m ²	46,67E6
Velocities		
V _s	m/s	2673
V _p	m/s	4365
Advanced		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
E'inc	kN/m ² /m	0,000
γ _{ref}	m	0,000

Şekil 5.8 : Linear elastik model parametreleri.

5.2.5.2 Mohr – Coulomb model (Linear elastik tam plastik davranış)

Mohr – Coulomb model genel olarak linear elastik mükemmel plastik davranışı temsil etmekle birlikte zeminlerin davranışının modellenmesinde ilk yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Mohr – Coulomb modelde malzemin linear elastik davranışı Hooke yasasının izotropik elastisitesine dayanmaktadır. Mükemmel plastik davranışı ise Mohr – Coulomb göçme kriterine uygun olarak formülize edilir (Hill, 1950). Modelde iki basitleştirme yapılmıştır. Birincisi sabit bir rijitlik modülünün kullanılması, ikincisi ise zeminin göçtüktan sonra sınırsız genişleme eğiliminde

olmasıdır. Şekil 5.9’da malzemenin temel olarak linear elastik mükemmel plastik davranışı verilmiştir.



Şekil 5.9 : Linear elastik mükemmel plastik model (Plaxis, 2015).

Modelde zemin davranışını modellemek amacıyla 5 ana parametre tanımlanmıştır. Kullanılan parametreler Şekil 5.10’da verilmiştir.

Soil - Mohr-Coulomb -		
Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	150,0E3
v' (nu)		0,000
Alternatives		
G	kN/m ²	75,00E3
E _{oed}	kN/m ²	150,0E3
Strength		
s _{u,ref}	kN/m ²	100,0
φ _u (phi)	°	0,000
ψ (psi)	°	0,000

Şekil 5.10 : Mohr – Coulomb model parametreleri.

Elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) zeminin elastik davranışını, kayma mukavemeti (c), genişleme açısı (ψ) ve kayma muavemeti açısı (φ) zeminin plastik davranışını tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır.

5.2.5.3 Soft soil model

Soft soil zemin modeli normal konsolide killeri, siltli killeri ve balçık zeminleri için kullanılmaktadır. Bu zeminlerin ortak özelliği yüksek oranda sıkışabilir olmasıdır. Ödometre deney verileri yardımıyla bu durumu en iyi örnekleyen Janbu (1985) dur. Janbu (1985), kil zeminlerin 100 kPa referans ödometre testinde normal konsolide killerin tanjant elastisite modülünü $E_{oed} = 1-4$ MPa olarak gözlemlemiştir. Konsolide killerin ödometre testindeki davranışı normal konsolide kumlara göre 10 kat daha yumuşak olduğunu bulmuştur. Yumuşak zeminlerin son derece sıkışabilir olduğunu nitelendirip zemin modelinin oluşturulmasında zeminin sıkışma ve şişme özelliğinin göz önünde bulundurulması gerektiğini ifade etmiştir. Bu kapsamda Soft soil model Şekil 5.11’de belirtilen zemin parametrelerini kapsamaktadır.

Property	Unit	Value
Stiffness		
λ^* (lambda*)		1,000E-9
κ^* (kappa*)		0,1000E-9
Alternatives		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
C_c		3,450E-9
C_s		0,1725E-9
e_{init}		0,5000
Strength		
c_{ref}	kN/m ²	100,0
ϕ (phi)	°	0,000
ψ (psi)	°	0,000
Advanced		

Şekil 5.11 : Soft soil model parametreleri.

Mohr – Coulomb’daki gibi göçme kriteri parametreleri c , ϕ , ψ , modifiye sıkışma indisi λ^* , modifiye şişme indisi κ^* ve boşaltma – tekrar yükleme poisson oranı ν_{ur} ’dir.

5.2.5.4 Soft soil creep model

Hem hardening soil model hemde soft soil model sıkışabilen yumuşak zeminler için kullanılabilir. Fakat her iki zemin modelinde zeminin ikincil sıkışma gibi akma

(creep) özelliğini dikkate almamaktadır. Her zemin ilk yükleme sonrasında oluşan ikincil yükleme (10 – 30 yıl sonrası) durumunda akma özelliği göstermektedir. Özellikle mevcut zemin kotu üzerine yapılan dolgularda büyük oranda oturmalar ve buna bağlı yumuşak zemin tabakalarında akmalar (creep) gözlenmektedir. Buisman (1963), ilk olarak yumuşak kil zemin tabakalarında meydana gelen oturmaları gözlemleyerek kil zeminler için akma yasasını açıklamaya çalışmış fakat bunu klasik konsolidasyon teorisi ile açıklayamamıştır. Soft soil creep modelin zemin davranışında dikkate aldığı bazı temel karakteristik özellikler aşağıda verilmiştir (Vermeer, Stolle ve Bonnier, 1998).

- Gerilmeye bağlı rijitlik (logaritmik sıkışma özelliği),
- İlk yükleme, boşaltma – geri yükleme durumundaki ayırım,
- Zamana bağlı sıkışma,
- Ön konsolidasyon gerilmesine bağlı yaşlanma,
- Mohr – Coulomb göçme kriteri

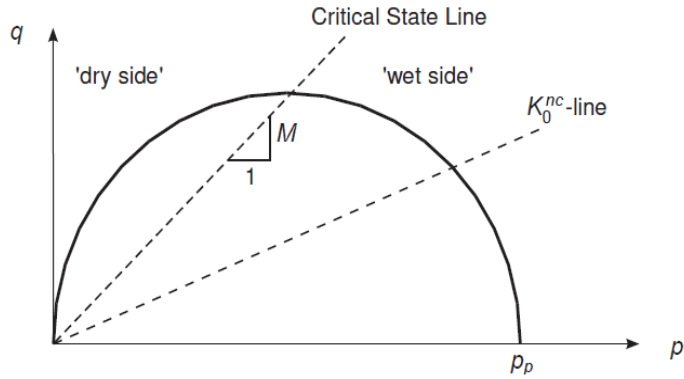
Modelde kullanılan parametreler Şekil 5.12’de verilmiştir. Soft soil modelden farklı olarak modifiye akma indisi μ^* içermektedir.

Property	Unit	Value
Stiffness		
λ^* (lambda*)		1,000E-9
κ^* (kappa*)		0,1000E-9
μ^*		0,000
Alternatives		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
C_c		3,450E-9
C_s		0,1725E-9
C_α		0,000
e_{init}		0,5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	100,0
ϕ' (phi)	°	0,000
ψ (psi)	°	0,000

Şekil 5.12 : Soft soil creep model parametreleri.

5.2.5.5 Modifiye Cam kili modeli

Modifiye Cam kili modeli genel olarak kritik durum zemin mekaniğinde Wood (1990) tarafından tanımlanmaktadır. Modifiye Cam kili modeli normal konsolide killer için kullanılmaktadır. İzotropik, elasto-plastik şekil değiştirme içeren pekleşmeli zemin modelidir. Herhangi bir düzlemde akma fonksiyonu izotropik gerilmelere göre elips şeklindedir (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 : Modifiye Cam kili modelinde $p' - q$ düzleminde akma yüzeyi.

Modelde kullanılan parametreler Şekil 5.14'te verilmiştir. Mohr – Coulomb'daki gibi göçme kriteri parametreleri c , ϕ , ψ , modifiye cam kili sıkışma indisi λ , cam kili şişme indisi κ , M kritik durum eğrisinin eğimi ve boşaltma – tekrar yükleme poisson oranı ν_{ur} 'dir.

Soil - Modified Cam-Clay - Yumuşak kil

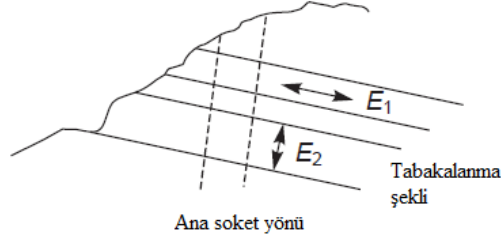
Property	Unit	Value
Stiffness		
λ (lambda)		1,500E-9
κ (kappa)		0,1500E-9
ν (nu)		0,1500
e_{init}		0,5000
Strength		
M		0,000
K_0^{nc}		1,000

Next OK Cancel

Şekil 5.14 : Modifiye Cam kili model parametreleri.

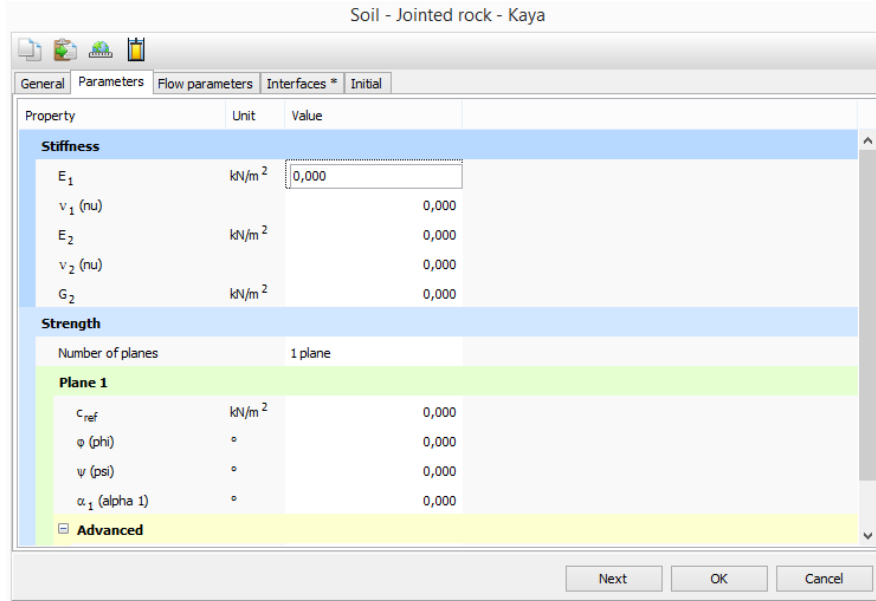
5.2.5.6 Jointed rock model

Jointed rock model özellikle anizotropik elastik – plastik model olarak bilinmektedir. Modelin kullanımındaki esas amaç ise kaya katmanlarının tabakalanmasını ve özellikle fay yönlerinin modellenmesini sağlamaktır. Plastik davranış kayma düzleminde sadece üç yönde oluşmaktadır.



Şekil 5.15 : Jointed rock modelin kapsamı (Plaxis, 2015).

Şekil 5.15'te verilen kaya tabakalarındaki yapılanma ve soketlenme yönü temel olarak jointed rock modelin çalışma prensibini oluşturmaktadır. Ayrıca tabakaların fay yönleride belirtilmiştir. Anizotropik modelleme ile elastik anizotropi ve plastik anizotropi ayrımı yapılabilmektedir. Elastik anizotropi farklı yönlerdeki farklı elastisite modüllerinin tanımlanmasına olanak sağlar. Plastik anizotropi ise farklı yönlerdeki rijitliklerin kullanılmasını sağlar (Plaxis, 2015). Modelde kullanılan parametreler Şekil 5.16'da verilmektedir.



Şekil 5.16 : Jointed rock model parametreleri.

Elastik parametreler Mohr – Coulomb modele bağılı olarak kayanın elastisite modülü E_1 , kayanın poisson oranı ν_1 kapsamaktadır. Anizotropik elastik parametreler tabakalanma düzlemine dik elastisite modülü E_2 , tabakalanma düzlemine dik kayma modülü G_2 , poisson oranı ν_2 kapsamaktadır. Kayanın sükunetteki eğim açısı α_1 dir.

5.2.5.7 Hardening soil model

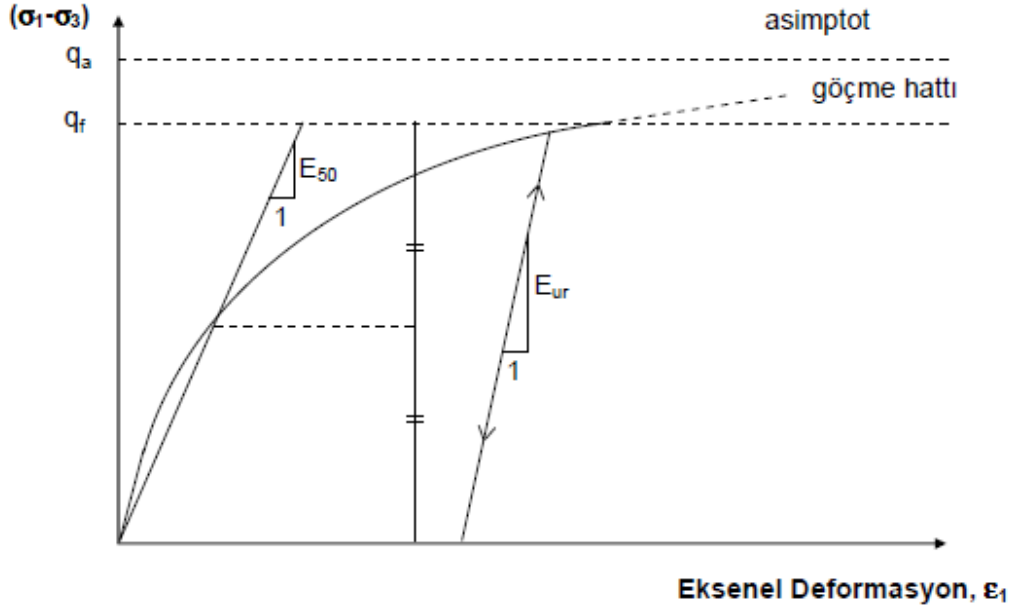
Hardening soil (HS) model, farklı tiplerdeki yumuşak ve sert zeminlerin davranışını modellemekte kullanılan ve Mohr – Coulomb (MC) zemin modeline göre çok daha gelişmiş bir zemin modelidir. MC modelde olduğu gibi gerilme seviyesi kayma mukavemeti (c), kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) ile sınırlandırılmıştır. HS zemin modeli, gerilme bağımlı rijitlik modülünü dikkate almaktadır. Yani, zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır. HS zemin model, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon - deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanır (Şekil 5.18). Bu ilişki ilk olarak Kondner (1963) tarafından formüle edilmiştir. Daha sonra Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilerek hiperbolik zemin modeli olarak adlandırılmıştır. HS model, hiperbolik zemin modelinin yerini almış olmakla beraber arasında önemli farklar vardır. Bu farklardan ilki, modelde elastisite teorisinden çok plastisite teorisinin kullanılmasıdır. İkinci fark, modelin zemin dilatasyonunu da kapsaması, üçüncü fark ise, bir akma başlığı (yield cap) içermesidir. Modelde kullanılan temel zemin parametreleri Şekil 5.17’de verilmektedir.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	40,00E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	40,00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	120,0E3
power (m)		0,5000
Alternatives		
Use alternatives		<input type="checkbox"/>
C_c		8,625E-3
C_s		2,587E-3
e_{init}		0,5000
Strength		
$s_{u,ref}$	kN/m ²	160,0
ϕ_u (phi)	°	0,000
ψ (psi)	°	0,000
Advanced		

Şekil 5.17 : HS model zemin parametreleri.

Gerilme bağımlı rijitlik parametresi (m), deviatörük yükleme nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar E_{50}^{ref} , sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar E_{eod}^{ref} , elastik boşaltma/yükleme elastisite modülü E_{ur}^{ref} , poisson oranı ν_{ur} , Mohr-Coulomb modeline göre göçme kriteri parametreleri c , ϕ , ψ yi kapsamaktadır.

Deviatör Gerilme



Şekil 5.18 : Standart drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme - şekil değiştirme ilişkisi.

HS model formülasyonundaki temel düşünce, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon (ϵ_1) ve deviatörük gerilme (q) arasındaki hiperbolik ilişkidir (Şekil 5.18). Modelde bu hiperbol denklemini;

$$-\epsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1-q/q_a} \quad (5.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki q_a , kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değerdir. E_{50} parametresi ise denklem (5.6)'da verilen, ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülüdür.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (5.7)$$

Buradaki E_{50}^{ref} , referans çevre basıncı, p^{ref} , değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı olan küçük asal gerilme, σ_3' değerine bağlıdır. Basınç olması nedeniyle σ_3' değerinin işareti

negatiftir. Modelde gerilme seviyesi üs değeri m ile kontrol edilmektedir. Göçme anındaki deviatörük gerilme q_f ve deviatörük gerilmenin asimptot kaldığı q_a değeri modelde aşağıdaki bağıntılarla tanımlanmaktadır.

$$q_f = (c \cot \phi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5.8)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (5.9)$$

q_f değeri, c ve ϕ değerleri kullanılarak Mohr-Coulomb göçme kriterinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $q = q_f$ olduğunda Mohr-Coulomb modeline göre göçme meydana gelir ve tam plastik akma oluşur. q_f ve q_a arasındaki oran ise göçme oranı (R_f) olarak tanımlanmıştır. R_f değerinin her zaman için 1'den küçük olduğu açıkça görülmektedir.

Modelde, boşaltma – yükleme rijitlik modülü için ise, aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

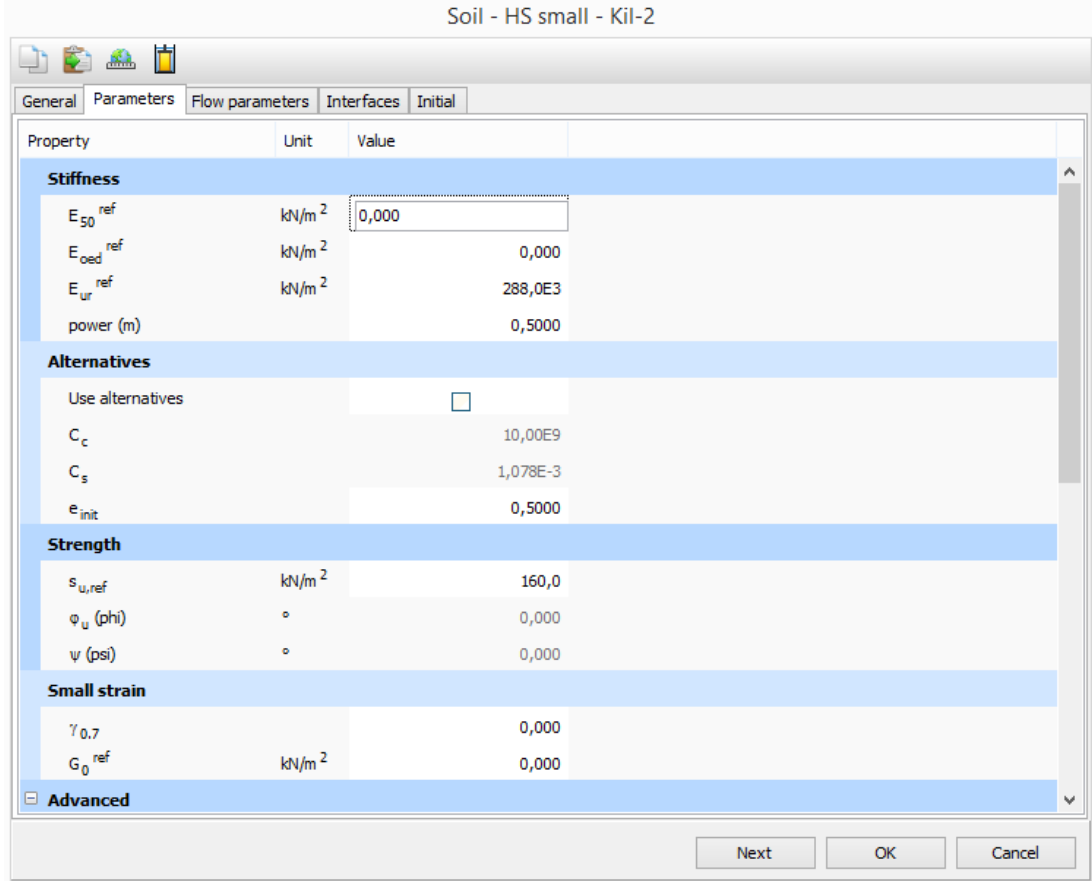
$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (5.10)$$

E_{ur}^{ref} : Referans çevre basıncı, p_{ref} , değerindeki referans elastisite modülü.

5.2.5.8 Hardening soil small strain – stiffness model

Orijinal HS model, boşaltma ve geri yükleme durumundaki elastik malzeme davranışını dikkate almaktadır. Çok küçük gerilme seviyelerinde zeminler tamamen elastik davranış göstermekle birlikte, bu gerilme seviyelerinde malzeme ilk durumdaki davranışını geri kazanmaktadır. Gerilme artışının sürekli olması durumunda ise zemin rijitliği non – linear olarak azalmaktadır. Hardening soil small strain - stiffness model çok küçük gerilmelerdeki zemin rijitliği ve gerilme artışında zeminin non-linear davranışını dikkate almaktadır (Benz, 2006).

HS modelden farklı olarak, gerilmeye bağlı rijitliği tanımlayan iki adet parametre içermektedir. Bunlar, başlangıç ya da çok küçük gerilmelerdeki kayma modülü G_0 ve çok küçük gerilme sınırını açıklayan eşik kayma gerilmesi $G_s = 0.722G_0$. Şekil 5.19'da model parametreleri verilmektedir.



Şekil 5.19 : HS small strain – stiffness model parametreleri.

5.2.5.9 Hoek Brown model

Hoek Brown (HB) model, ayrılmış kayaların izotropik elastik ve tam plastik davranışını Hoek – Brown göçme kriterine uygun olarak modellemek için kullanılmaktadır (Hoek, 2006). Kayaların gerilme seviyelerindeki rijitlik değişimi göz ardı edilerek, rijitliği sabit olarak kabul edilir. Kayaların gerilme seviyelerindeki davranışında kayma dayanımı çok önemlidir. Kayalar önemli derecede çekme dayanımına sahiptirler. Bu yüzden HB göçme kriteri kayaların dayanımının non – linear davranışı için en iyi yaklaşımdır (Hoek, Carranza-Torres ve Corkum, 2002).

Model parametreleri Şekil 5.20’de verilmiştir. Modelde kayanın elastisite modülü E , poisson oranı ν , sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı σ_{ci} , sağlam kaya parametresi m_i , jeolojik dayanım indisi GSI, örselenme faktörü D olarak tanımlanmaktadır.

Soil - Hoek-Brown - Kaya

Property	Unit	Value
Stiffness		
E	kN/m ²	240,0E3
ν (nu)		0,000
Hoek-Brown parameters		
σ_{ci}	kN/m ²	0,000
m_i		0,000
GSI		0,000
D		0,000
Dilatation angle		
ψ_{max}	°	0,000
σ_{ψ}	kN/m ²	0,000

Next OK Cancel

Şekil 5.20 : Hoek - Brown model parametreleri.

5.2.6 Analiz adımları ve sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak analizlerde tanımlanan zemin ve yapılar, gerçek koşullardaki imalat durumuna göre yapılacak olan analizler kapsamında aktif ve inaktif olarak seçilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece yapıda ve raksiyon sisteminde oluşan değişimlerin gerçeğe yakın ve doğru olarak modellenmesi sağlanır. Program, ayrıca her yükleme adımında malzeme özelliği ve boşluk suyu basıncı dağılımının değişimine olanak sağlar. Analiz adımları sırasında ilk olarak arazi başlangıç koşullarında model kendi ağırlığında yüklenmektedir. Program, ayrıca yapısal stabilite güvenlik faktörü tahkiki için imalat sonrası analiz adımı oluşturma imkanı sağlar. Her analiz adımı sonrasında, output menüsünden modelde tanımlanan yapısal elemanda oluşan deplasman, moment, kesme kuvveti ve modelde oluşan gerilme ve deformasyonlar gözlenebilmekte ve tablo halinde verilmektedir. Zemin tabakaları ya da yapı elemanlarından kesit alınabilmekte ve herhangi bir noktada istenilen grafikler çizilebilmektedir.

6. VAKA ANALİZLERİ

Bu çalışma kapsamında, kazık davranışı ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi amacıyla geleneksel kazık yükleme ve Osterberg yük hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü statik kazık yükleme deneylerinin sonuçları ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla, iki yönlü statik yükleme ve geleneksel kazık yükleme deneyinin gerçekleştirildiği kazık ve baret, arazi deneylerinden elde edilen zemin parametreleri dikkate alınarak sonlu elemanlar metodu ile modellenmiş, sahada yapılan deneyler sonucunda elde edilen deplasman değerleri göz önünde bulundurularak nümerik analizler sırasında parametrik yaklaşımlar yapıp kazık ve baret için seçilen modelin uygunluğu kontrol edilmiştir. Kapasite hesapları yapılan kazık ve barette yük altında oluşan teorik deplasman değerleri, sahada gerçekleştirilen Osterberg yük hücresi kullanılarak yapılan iki yönlü statik yükleme ve geleneksel kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen mobilize sürtünme direnci, deplasman değerleri ile nümerik analizlerle elde edilen sürtünme direnci ve deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Sahada gerçekleştirilen deneyler sonucunda gözlenen deplasman ve kazık gövdesi boyunca mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri ve nümerik analizler sonucunda elde edilen verilere etki eden faktörler irdelenmiştir.

6.1 Saha-1, Proje Bilgileri

Proje sahası, konut, ofis, alışveriş merkezinden oluşan yapı kompleksidir. İnşası planlanan yapı, 3 bodrum kat, zemin kat, 3 çarşı katı, çarşı üstü 3 kat konut otoparkı, 1 tesisat katı ve bu yapı üzerinde yükselen 27 kattan oluşan B Blok ofis yapısı ve 39 kattan oluşan A Blok konut yapısından oluşmaktadır.

Proje sahası 18.392 m^2 olup, yapının oturma alanı 14.110 m^2 'dir. Yapının 3 bodrum katlı olması sebebiyle temel üstü mimari kotu -12.75 m olup alışveriş merkezinin en üst kotu ise $+23.00 \text{ m}$ olarak tasarlanmıştır. 39 katlı kulede en üst mimari kot $+179.60 \text{ m}$, 27 katlı kulede ise en üst mimari kot $+136.30 \text{ m}$ olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapı sahasına ait vaziyet planı Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Saha – 1 vaziyet planı.

6.1.1 Arazi araştırmaları ve deneyler

Proje alanında yapılan sondajlarda zemin yüzeyinden itibaren 2.5 m - 4.5 m arasında kontrolsüz dolgu ile karşılaşmıştır. Bu seviyenin hemen altında ise çakıl, kum, silt ve killerle temsil edilen kuvaterner yaşlı alüvyon bulunmaktadır. Kum birimler, gri-kahverengi, ince orta taneli, yuvarlak-yarı yuvarlak-yarı köşeli, nemli-ıslak, çakıllı,

siltli, killi üst seviyelerde çok gevşek-orta sıkı, alt seviyelerde (20.0 m'den derinde) sıkı-çok sıkıdır. Silt birimler, gri, nemli-ıslak, orta plastisiteli, çok yumuşak killi, kokusuz, ince taneli kum içeriklidir. Kil birimler ise koyu yeşil-gri-kahverengi, az nemli, kokusuz, ince-iri taneli, yarı yuvarlak çakıllı, ince taneli kumlu, düşük - orta plastisiteli, üst seviyelerde yumuşak-katı, alt seviyelerde (12.0 m'den derinde) çok katı-sert özellik göstermektedirler.

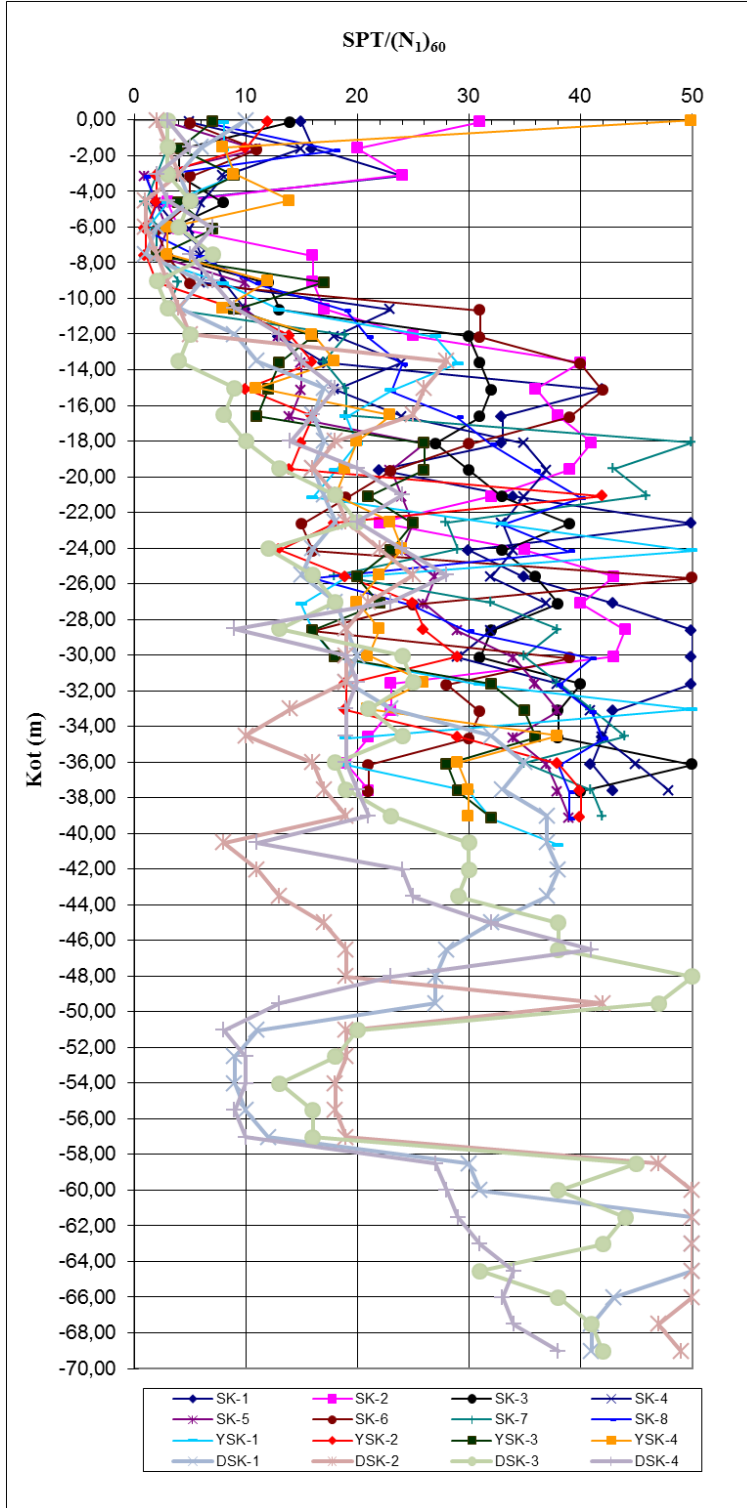
Sondajlar sırasında yeraltı su seviyesi ölçümü de gerçekleştirilmiştir. Zemin incelemeleri ve geoteknik değerlendirme raporu kapsamında farklı yıllarda yapılan su seviyesi ölçümlerinde yeraltı su seviyesi $h_w = 1.8$ m ile $h_w = 7.5$ m arasında değiştiği gözlenmiştir. Mevsim koşullarına göre su seviyesi yükselmektedir. Ölçümlerde tespit edilen yükselme Ekim – Aralık ayı arasında olup, projenin yapılacağı bölgenin 20 – 30 m uzağında yer alan Çay kısmında kontrolsüz dolgunun altında yer alan gevşek kumlu birimlerde gözlenmektedir. Çizelge 6.1'de proje sahasında zemin incelemeleri kapsamında açılan sondaj kuyularına ait bilgiler verilmektedir.

Çizelge 6.1 : Saha - 1 sondaj bilgileri.

Sondaj No	Derinlik (m)	Kot (m)	Koordinatlar		Başlangıç Tarihi	Bitiş Tarihi	Yeraltısu Seviyesi Kasım-Aralık, 2007 (m)	Yeraltısu Seviyesi Ekim, 2008 (m)	Yeraltısu Seviyesi Ağustos, 2010 (m)
			X	Y					
SK-1	40.0	1.61	515443.335	4257313.592	12.12.2007	14.12.2007	6.5	7.2	-
SK-2	40.0	1.63	515358.393	4257275.353	14.12.2007	16.12.2007	5.2	7.4	-
SK-3	40.0	1.59	515328.106	4257344.026	10.12.2007	11.12.2007	5.9	4.3	-
SK-4	40.0	1.61	515296.928	4257348.373	7.12.2007	8.12.2007	5.8	1.8	-
SK-5	41.0	1.59	515276.859	4257301.167	26.11.2007	28.11.2007	6.1	7.5	-
SK-6	40.0	1.55	515261.879	4257387.093	2.12.2007	4.12.2007	6.0	4.6	-
SK-7	41.0	1.67	515207.432	4257379.777	28.11.2007	30.11.2007	6.1	7.0	-
SK-8	40.0	1.52	515206.805	4257312.686	4.12.2007	6.12.2007	6.1	7.4	-
YSK-1	42.5	1.57	515270.512	4257382.883	18.10.2008	20.10.2008	-	5.7	-
YSK-2	41.0	1.64	515282.313	4257318.541	15.10.2008	17.10.2008	-	6.0	-
YSK-3	41.0	1.61	515333.111	4257292.754	21.10.2008	23.10.2008	-	7.3	-
YSK-4	41.0	1.70	515333.782	4257317.679	23.10.2008	25.10.2008	-	2.5	-
DSK-1	150.0	1.70	515319.801	4253358.652	13.8.2010	18.8.2010	-	-	7.6
DSK-2	150.0	1.70	515274.803	4257382.243	19.8.2010	24.8.2010	-	-	7.8
DSK-3	201.0	1.70	515335.303	4257315.719	25.8.2010	1.9.2010	-	-	7.7
DSK-4	153.0	1.70	515326.503	4257279.079	25.8.2010	30.8.2010	-	-	7.3

Çizelge 6.1'de belirtilen sondajlarda zemin koşullarına bağlı olarak, sistematik 1.5 m ara ile ASTM D-1586 uyarınca Standart Penetrasyon deneyleri gerçekleştirilerek gerekli düzeltmeler yapılarak SPT - N_{60} darbe sayıları belirlenmiş olup temsili ve örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. Refü kriteri ise 50 mm ilerleme için 100 darbeden fazla gerekmesi durumu için tariflenmiştir. Söz konusu alüvyon birimler

içerisinde elde edilen düzeltilmiş SPT - $(N_1)_{60}$ değerlerinin kot ile değişim grafiği Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 : Düzeltilmiş SPT- $(N_1)_{60}$ değerlerinin kot ile değişimi.

Farklı yıllarda gerçekleştirilen zemin incelemeleri sırasında alınan örselenmiş zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerle su muhtevası, elek analizi ve Atterberg

limitleri belirlenmiş, örselenmemiş zemin (UD) numuneleri üzerinde ise özgül ağırlık, üç eksenli basınç (UU) deneyi ile drenajsız kayma mukavemeti (kısa vadeli davranış) ve konsolidasyon deneyleri ile killi zeminlerin sıkışabilirliği (kompresibilite indeksi) ölçülmüştür. Yapılan deneylerde zemin tabakalarından alınan numulardan elde edilen sonuçların değer aralıkları Çizelge 6.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.2 : Laboratuvar deney sonuçları.

Doğal su muhtevası	ω_n (%)	9 – 57
Likit Limit	w_L (%)	29 – 81
Plastik Limit	w_p (%)	14 – 28
Plastisite İndisi	I_p (%)	10 – 55
Drenajsız kayma mukavemeti	c_u (kN/m ²)	13 – 115
Doğal birim hacim ağırlık	γ_n (t/m ³)	1.68 - 2.27
Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması	(USCS)	GP-GM, SP-SM, SW, SM, SC, ML, CL, CI, CH
Konsolidasyon	c_c	0.028 - 0.454
	c_r	0.009 - 0.097
	P_0 (kPa)	65 – 100
	e_0	0.43 - 1.51
	AKO	0.3 - 0.9

c_c : sıkışma indisi, c_r : yeniden yükleme sıkışma indisi, P_0 : referans basıncı, e_0 : başlangıç durumu boşluk oranı, AKO : aşırı konsolidasyon oranı.

Zemin tabakalarının geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen zemin incelemeleri 2007, 2008 ve 2010 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan etüdümler sırasında alınan numulardan elde edilen sonuçları Çizelge 6.3, Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’te özetlenmektedir. Ayrıca proje sahasında önceki yıllarda var olan yapılar sebebiyle yapılamayan koni penetasyon deneyi, yapıların yıkılmasıyla birlikte projede yer alan konut ve ofis bloklarının altında yer alan zemin profilini daha iyi temsil etmesi amacıyla uygun görülen bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Toplamda 6 adet CPT ve su seviyesinin takibi için 3 adet sondaj kuyusu açılmıştır. CPT sonucunda elde edilen veriler yardımıyla zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti değerleri 3 farklı yaklaşıma göre hesaplanmış ve derinliğe bağlı kayma mukavemeti dağılımı Şekil 6.3’te özetlenmiştir.

Çizelge 6.3 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2007).

Sondaj Kuyusu No	Numune No	Derinlik	Su muhtevası W _n (%)	Atterberg limitleri			Elek analizi		UU c _u (kPa)	Konsolidasyon	Sınıflandırma
		(m-m)		W _L	W _P	I _p	+No.10 (%)	-No.200 (%)			USCS
SK- 1	SPT-1	1.50 - 1.95	8				77	9			GP-GM
	SPT-3	3.00 - 3.45	16				35	13			SM
	SPT-5	7.50 - 7.95	48	60	25	35	*	*			-
	UD-2	10.00 - 10.50	41	70	24	46	5	94			CH
	SPT-8	12.00 - 12.45	33	38	16	22	16	47			SC
	SPT-10	15.00 - 15.45	21	31	14	17	1	70			CL
	SPT-14	21.00 - 21.45	35	34	16	18	3	74			CL
	SPT-19	28.50 - 28.95	14	37	14	23	37	22			SC
SK- 2	SPT-23	34.50 - 34.95	30	49	19	30	1	78			CI
	SPT-2	3.00 - 3.45	28	53	20	33	15	54			CH
	SPT-4	6.00 - 6.45	52	58	22	36	0	99			CH
	SPT-9	13.50 - 13.95	22	41	17	24	0	86			CI
	SPT-17	25.50 - 25.95	24	43	16	27	16	62			CI
	SPT-20	30.00 - 30.45	28	64	20	44	0	98			CH
SK- 3	SPT-26	39.00 - 39.45	18				15	37			SM
	SPT-3	4.50 - 4.95	18				42	3			SW
	SPT-6	9.00 - 9.45	55	62	28	34	0	98			CH
	UD-2	9.50 - 10.00	28				29	26			SM
	SPT-9	13.50 - 13.95	28	46	21	25	13	80			CI
	SPT-13	19.50 - 19.95	23	29	14	15	0	91			CL
	SPT-17	25.50 - 25.95	24	34	15	19	12	67			CL
SK- 4	SPT-21	31.50 - 31.95	27	40	18	22	12	66			CI
	SPT-3	4.50 - 4.95	16				37	11			SP-SM
	SPT-7	10.50 - 10.95	37	49	20	29	17	38			SC
	SPT-11	16.50 - 16.95	26	50	20	30	0	97			CH
	SPT-21	31.50 - 31.95	20	33	16	17	0	89			CL
SK- 5	SPT-23	34.50 - 34.95	25	32	21	11	17	46			SC
	SPT-3	4.50 - 4.95	47	42	18	24	0	84			CI
	UD-1	5.50 - 6.00	39	35	15	20	1	82			CI
	SPT-6	9.00 - 9.45	53	68	28	40	0	99			CH
	UD-2	14.50 - 15.00	24	44	18	26	0	93		✓	CI
	SPT-15	22.50 - 22.95	23	35	18	17	13	59			CI
	SPT-19	28.50 - 28.95	31	55	23	32	0	95			CH
SK- 6	SPT-24	36.00 - 36.45	30	37	18	19	6	70			CI
	SPT-1	1.50 - 1.95	12				77	9			GP-GM
	SPT-3	4.50 - 4.95	23				15	22			SM
	SPT-7	6.00 - 6.45	51	66	23	43	0	99			CH
	UD-2	22.00 - 22.50	15	29	19	10	3	90	26		CL
	SPT-15	22.50 - 22.95	27	33	16	17	0	78			CL
	SPT-17	25.50 - 25.95	22				14	28			SM
SK- 7	SPT-22	33.00 - 33.45	27	45	19	26	8	68			CI
	SPT-3	4.50 - 4.95	34				1	70			ML
	SPT-6	9.00 - 9.45	42	45	21	24	0	94			CI
	UD-2	10.00 - 10.50	51	67	26	41	0	99	28	✓	CH
	SPT-10	15.00 - 15.45	53	52	20	32	0	96			CH
	SPT-16	24.00 - 24.45	23	37	17	20	1	84			CI
SK- 8	SPT-25	37.50 - 37.95	26	49	26	23	0	85			CI
	SPT-3	4.50 - 4.95	37	43	18	25	16	74			CI
	SPT-8	12.00 - 12.45	26	45	18	27	0	100			CI
	SPT-10	15.00 - 15.45	24	44	19	25	0	87			CI
	SPT-16	24.00 - 24.45	22	37	17	20	9	67			CI
SPT-20	30.00 - 30.45	30	54	26	28	20	61			CH	

+No.10(%) : 10 no.lu eleğin üzerinde kalan malzemenin ağırlıkça yüzdesi
-No.200(%) : 200 no.lu elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesi
LL(%) : Likid limit
PL(%) : Plastik limit
NP : Plastik olmayan numune
PI(%) : Plastisite indisi
USCS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sistemi

* Numune az olduğundan deney yapılamamıştır

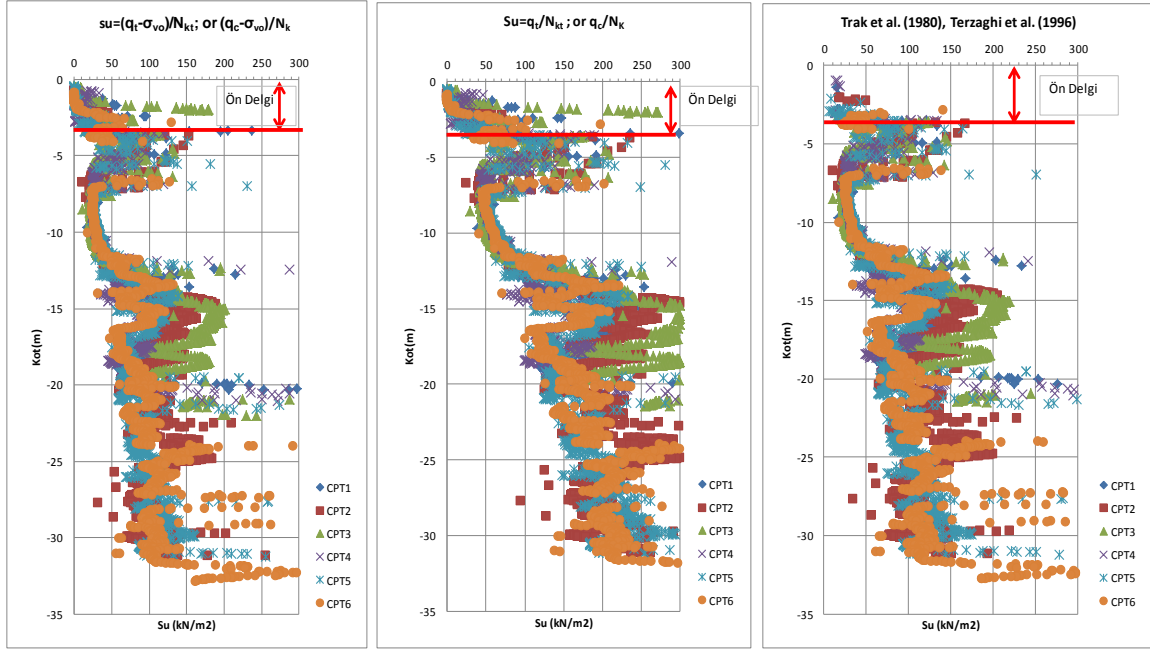
Çizelge 6.4 : Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2008).

Sondaj Kuyusu No	Numune No	Derinlik (m-m)	Su muhtevası Wn (%)	Atterberg limitleri			Elek analizi		Doğal Birim Hacim Ağırlığı (t/m ³)	Üç Eksenli Basınç Test (UU) cu (kPa)	Konsolidasyon	Sınıflandırma USCS
				W _L	W _P	I _p	+No.10 (%)	-No.200 (%)				
YSK- 1	SPT-3	4.50-4.95	21	NP	NP	NP	24	19				SM
YSK- 1	UD-1	7.00-7.50	41	81	26	55	0	100	1.71	15	√	CH
YSK- 1	UD-2	8.50-9.00	49	75	26	49	0	100	1.73	15		CH
YSK- 1	UD-3	13.00-13.50	38	57	20	37	3	91	2.06	79		CH
YSK- 1	UD-4	16.00-16.50	37	70	23	47	2	96	1.94	115		CH
YSK- 1	UD-5	20.50-21.00	26	41	16	25	1	89	2.1	67		CI
YSK- 1	SPT-18	27.00-27.45	24	44	17	27	4	83				CI
YSK- 1	SPT-27	40.50-40.95	22	NP	NP	NP	3	46				SM
YSK- 2	SPT-2	3.00-3.45	28	NP	NP	NP	3	33				SM
YSK- 2	UD-1	7.00-7.50	57	67	27	40	0	100	1.73	13		CH
YSK- 2	UD-2	11.50-12.00	28	55	19	36	0	93	2.02	75	√	CH
YSK- 2	UD-3	19.00-19.50	23	31	17	14	0	93	2.08	50		CL
YSK- 2	SPT-16	24.00-24.45	20	35	15	20	16	55				CI
YSK- 2	SPT-23	34.50-34.95	26	46	21	25	20	46				SC
YSK- 3	SPT-1	1.50-1.95	9	NP	NP	NP	71	9				GP-GM
YSK- 3	UD-1	7.00-7.50	52	69	26	43	0	100	1.68	32		CH
YSK- 3	UD-2	10.00-10.50	49	70	25	45	0	100	1.73	47		CH
YSK- 3	UD-3	13.00-13.50	26	44	19	25	2	90	2.27	91		CI
YSK- 3	UD-4	16.00-16.50	25	42	16	26	0	93	2.2	100	√	CI
YSK- 3	UD-5	19.00-19.50	21	NP	NP	NP	1	62	2.15	48		ML
YSK- 3	SPT-19	28.50-28.95	31	41	20	21	0	80				CI
YSK- 3	SPT-23	34.50-34.95	32	48	21	27	0	84				CI
YSK- 3	SPT-26	39.00-39.45	27	39	20	19	12	74				CI
YSK- 4	UD-1	7.00-7.50	43	68	26	42	34	66	1.8	31		CH
YSK- 4	UD-2	10.00-10.50	49	75	24	51	0	99	2.04	30		CH
YSK- 4	UD-3	17.50-18.00	22	33	15	18	0	100	2.23	70	√	CL
YSK- 4	UD-4	20.50-21.00	22	34	16	18	1	81	2.23	86		CL
YSK- 4	SPT-18	27.00-27.45	23	54	17	37	1	84				CH
YSK- 4	SPT-23	34.50-34.95	31	57	22	35	0	89				CH
YSK- 4	SPT-25	37.50-37.95	32	50	21	29	4	65				CH

+No.10(%) : p10 no.lu eleğin üzerinde kalan malzemenin ağırlıkça yüzdesi
-No.200(%) : 200 no.lu elekten geçen malzemenin ağırlıkça yüzdesi
cu : Drenajsız Kayma Mukavemeti, kPa
γ_m : Birim Hacim Ağırlık, t/m³
LL(%) : Likid limit
PL(%) : Plastik limit
NP : Plastik olmayan numune
PI(%) : Plastisite indisi
USCS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sistemi

Çizelge 6.5 : Derin sondajlar zemin mekaniği laboratuvar deneyleri (2010).

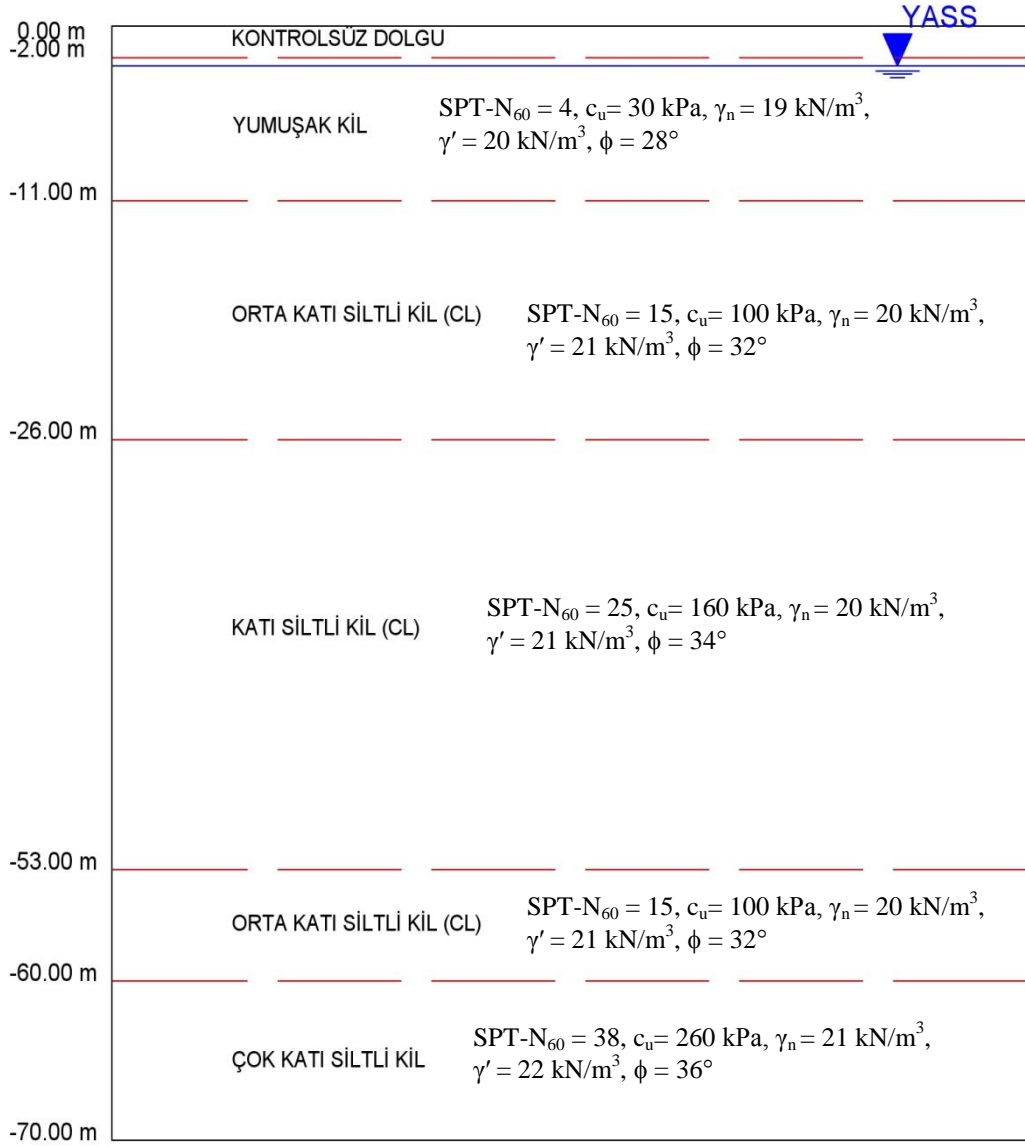
Sondaj Kuyusu No	Numune No	Derinlik (m-m)	Su muhtevası Wn (%)	Atterberg limitleri			Elek analizi		Sınıflandırma USCS
				W _L	W _P	I _p	+No.10 (%)	-No.200 (%)	
DSK- 1	SPT-32	48.00 - 48.45	18	32	19	13	0	56	CL
DSK- 1	SPT-38	57.00 - 57.45	20	NP	NP	NP	0	25	SM
DSK- 1	SPT-46	69.00 - 69.45	27	34	18	16	14	51	CL
DSK- 2	SPT-28	42.00 - 42.45	14	NP	NP	NP	12	25	SM
DSK- 2	SPT-34	51.00 - 51.45	20	50	25	25	0	90	CH
DSK- 2	SPT-44	67.50 - 67.95	13	40	29	11	10	55	MI
DSK- 3	SPT-28	42.00 - 42.45	24	39	21	18	4	82	CI
DSK- 3	SPT-32	48.00 - 48.45	17	27	16	11	9	52	CL
DSK- 3	SPT-44	66.00 - 66.45	20	29	20	9	7	42	SC
DSK- 3	UD-2	44.50 - 45.00	26	46	20	26	11	68	CI
DSK- 4	SPT-28	42.00 - 42.45	17	NP	NP	NP	20	18	SM
DSK- 4	SPT-30	45.00 - 45.45	18	NP	NP	NP	30	28	SM
DSK- 4	SPT-34	51.00 - 51.45	17	56	21	35	2	93	CH
DSK- 4	SPT-38	57.00 - 57.45	16	34	18	16	14	72	CL
DSK- 4	SPT-46	69.00 - 69.45	15	35	21	14	4	50	CI



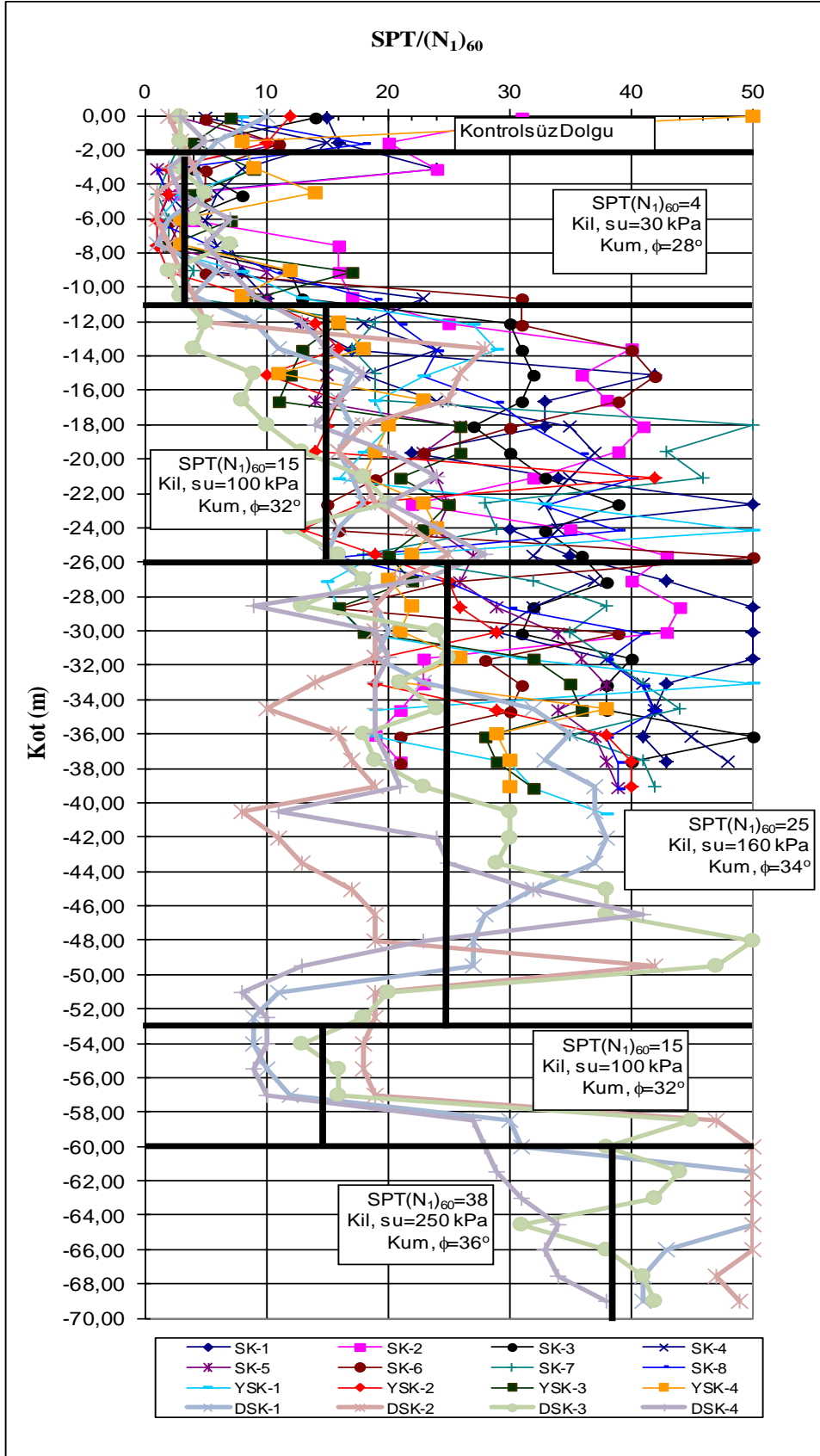
Şekil 6.3 : CPT sonuçlarından elde edilen drenajsız kayma mukavemetinin derinliğe bağlı değişimi.

6.1.2 Zemin türleri ve geoteknik model

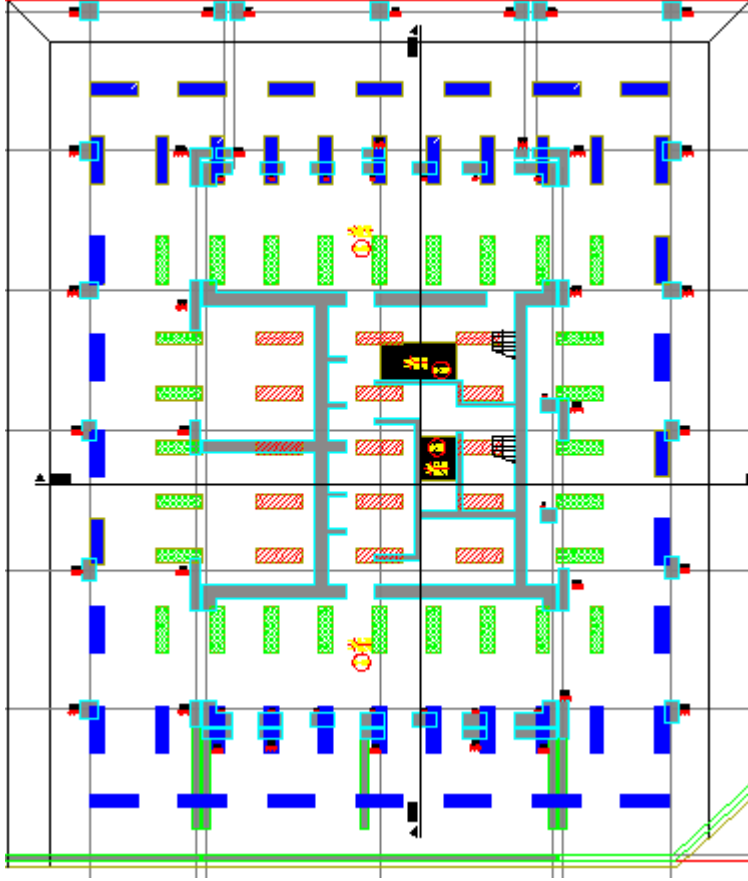
Proje sahasında belirlenen bölgelerde gerçekleştirilen sondajlar sonrasında yapılan arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen veriler dikkate alınarak oluşturulan derinliğe bağlı zemin profili Şekil 6.4'te özetlenmektedir. Temel altı projesi dikkate alındığında, ofis yapısı altında yer alan fore kazıklı radye temel sisteminin temel alt kotu -14.25 m kotunda, konut yapısı altında taşıyıcı görev üstlenen baret radye temel sisteminin temel alt kotu -15.675 m ve podyum yapılarını taşıması planlanan fore kazıklı radye temel sisteminin temel alt kotu ise -13.25 m olarak gözlenmektedir. Proje kapsamında tasarlanan radye temel, bütün olarak imal edilecektir. Deniz seviyesine göre - 0.85 m kotu projede 0.00 m kotu olarak dikkate alındığında, 3 bodrum katlı imal edilecek yapı Şekil 6.4'te özetlenen zemin profilinde çok katı - sert kil tabakası içerisinde imal edilecek olup, -15.675 m kotu üstünde kalan SPT değeri çok düşük olan yumuşak kil tabakası kaldırılacaktır. Kazık ve baretler, alt kotlarına kadar yer yer kum içeren çok – katı, sert kil tabakaları içerisinde yer alacaktır. Derinliğe bağlı değişim gösteren SPT değerleri ve CPT sonucunda elde edilen derinliğe bağlı değişim gösteren drenajsız kayma mukavemeti değerleri dikkate alındığında zemin modelinin geoteknik özellikleri Şekil 6.5'te özetlenmiştir.



Şekil 6.4 : Zemin kesiti.



Şekil 6.5 : Zemin tabakalarının mühendislik parametreleri.



Şekil 6.7 : 80 cm x 280 cm boyutlarında tasarlanan baret temel sistemi planı.

6.1.3.1 Baret ve kazık kapasite hesabı

Temel altındaki yerleşim planı Şekil 6.6'da verilen 80 cm çapındaki fore kazıkların ve yerleşim planı Şekil 6.7'de verilen 80 cm x 280 cm boyutlarındaki baretin taşıma kapasitesinin tamamının çevre sürtünme direnci tarafından karşılanacağı düşünülerek, taşıma kapasiteleri 3.13 formülü yardımıyla hesaplanmıştır. 6.1.4 başlığı altında anlatılan ve üzerinde iki yönlü statik yükleme deneyi yapılan 80 cm x 280 cm boyutlarında ve $L = 63$ m boyundaki test baret taşıma kapasitesi $GS = 2$ kabul edilerek 2000 t olarak hesaplanmıştır. 6.1.5 başlığı altında anlatılan ve üzerinde iki yönlü statik yükleme deneyi gerçekleştirilecek $L = 51.70$ m boyunda imal edilen 80 cm çapındaki fore kazığın taşıma kapasitesi $GS = 2$ kabul edilerek 450 t olarak hesaplanmıştır. 6.1.6 başlığı altında anlatılan ve sahada üzerinde geleneksel kazık yükleme deneyi gerçekleştirilen 80 cm çapında ve $L = 47.8$ m boyundaki fore kazığın taşıma kapasitesi $GS = 2$ kabul edilerek 435 t olarak hesaplanmıştır. Baret ve fore kazık taşıma kapasitesi hesap föyleri Ek A'da yer almaktadır.

6.1.3.2 Baret ve kazıkların oturması

Proje kapsamında deneylerin gerçekleştirileceği baret ve fore kazıklarda meydana gelmesi muhtemel oturmalara ilişkin hesaplar Das (1998) tarafından önerilen 3.51 eşitliği yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Barette oluşması beklenen muhtemel oturma hesabı Çizelge 6.6'da verilmektedir.

Çizelge 6.6 : L = 63 m, baret oturma hesabı.

Hesap yöntemi : B. M. DAS, Principles of Foun. Eng, 1998, 9.17 Settlement of Piles p: 615-618	
80cm x 280cm Baret, L=63 m P= 19800 kN GS= 2 P desigr 39600 kN Qtotal a 19800 kN Qws= 19800 kN Qwp= 0 kN Qwp.all 0 kN $s=s_e+s_s+s_p$	Hesaplanan çevre sürtünme kapasitesi Baretin uç taşıma kapasitesi Nihai uç taşıma kapasitesi
$s_e=(Qwp+\epsilon \times Qws) \times L / (E_p A_p)$ Qwp= 0 kN $\epsilon= 0.67$ Qws= 19800 kN L= 63 m R= 1.69 m A= 2.24 m ² E= 34.000.000 t/m ² $s_1= 11 \text{ mm}$	Baret elastik deformasyonu Baret yük dağılımına bağlı olarak 0.5 - 0.67 arasında değişen katsayı Eş değer kazık çapı alınarak hesaplarda kullanılmıştır. $(2.8 \times 0.8 = 2.24 \text{ m}^2, D=(2.24 \times 4/\pi)^{0.5}$
$s_p= qwp \times D / Es \times (1-\mu_s^2) \times Iwp$ Iwp= 0.85 qwp= 0 kPa D= 1.69 m $\mu_s= 0.3$ Es= 26.000 kN/m ² $s_2= 0 \text{ mm}$	Baret ucunda taşınan yükten dolayı meydana gelen oturmalar Önerilen değer 0.85 Birim alana gelen uç yükü (Qwp/A) Kazık çapı (eşdeğer kazık çapı alınmıştır) Zeminin poisson oranı Baret ucu altında yer alan zeminin elastisite modülü
$s_s= (Qws/pL) \times D / Es \times (1-\mu_s^2) \times Iws$ p= 5.31 m Es= 18.000 kN/m ² $\mu_s= 0.3$ Iws= 4.14 $s_3= 20.92 \text{ mm}$	Çevre sürtünme kapasitesinden kaynaklı baret ucunda meydana gelen oturma. Baret çevresi Baret gövdesi boyunca yer alan zemin tabakalarının ortalama elastisite modülü Baret çevresinde yer alan zemin tabakalarının poisson oranı ortalaması Sürtünmeye bağlı katasyı, $Iws=2+0.35(L/D)^{0.5}$
s_e+s_s 32 mm s_p 0 mm $s= 31.88 \text{ mm}$	Baret elastik deformasyonu ve baret elastik kılınmasından kaynaklanan oturmalar toplamı Baret uç oturması Toplam oturma

P : nihai taşıma kapasitesi, P_{design} : taşıma kapasitesi, GS : güvenlik sayısı, Qtotal a : nihai uç ve çevre taşıma kapasitesi toplamı.

Çizelge 6.6'da verilen oturma hesabında, barette yük altında oluşacak elastik deformasyon miktarı 11 mm, baretin çevre sürtünme direncinin tamamının mobilize

olması durumunda baret ucunda oluşacak oturma miktarı 20.92 mm olarak hesaplanmıştır. Baret toplam oturma miktarı 31.88 mm olarak hesaplanmıştır.

L = 51.7 m boyunda imal edilen fore kazık oturma hesabı Çizelge 6.7'de verilmektedir.

Çizelge 6.7 : L = 51.7 m, fore kazık oturma hesabı.

Hesap yöntemi : B. M. DAS, Principles of Foun. Eng, 1998, 9.17 Settlement of Piles p: 615-618	
80cm Fore kazık, L=51.70 m P= 4500 kN GS= 2 P desigr 9000 kN Qtotal a 4500 kN Qws= 4500 kN Qwp= 0 kN Qwp.all 0 kN s=s _e +s _s +s _p	Hesaplanan çevre sürtünme kapasitesi Kazık uç taşıma kapasitesi Nihai uç taşıma kapasitesi
s_e=(Qwp+ε x Qws) x L / (Ep Ap) Qwp= 0 kN ε= 0.67 Qws= 4500 kN L= 51.7 m R= 0.8 m A= 0.50 m ² E= 34.000.000 t/m ² s_e= 9.12 mm	Kazık elastik deformasyonu Kazık yük dağılımına bağlı olarak 0.5 - 0.67 arasında değişen katsayı Kazık çapı
s_p= qwp x D /Es x (1-μs²) x Iwp Iwp= 0.85 qwp= 0 kPa D= 0.8 m μs= 0.3 Es= 26.000 kN/m ² s_p= 0 mm	Kazık ucunda taşınan yükten dolayı meydana gelen oturmalar Önerilen değer 0.85 Birim alana gelen uç yükü (Qwp/A) Kazık çapı Zeminin poisson oranı Kazık ucu altında yer alan zeminin elastisite modülü
s_s= (Qws/pL) x D /Es x (1-μs²) x Iws p= 2.51 m Es= 16.000 kN/m ² μs= 0.3 Iws= 4.81 s_s= 7.59 mm	Çevre sürtünme kapasitesinden kaynaklı kazık ucunda meydana gelen oturma. Kazık çevresi Kazık gövdesi boyunca yer alan zemin tabakalarının ortalama elastisite modülü Kazık çevresinde yer alan zemin tabakalarının poisson oranı ortalaması Sürtünmeye bağlı katasyı, Iws=2+0.35(L/D) ^{0.5}
s _e +s _s 16.71 mm s _p 0 mm s= 16.71 mm	Kazık elastik deformasyonu ve kazık elastik kısılmasından kaynaklanan oturmalar toplamı Kazık uç oturması Toplam oturma

P : nihai taşıma kapasitesi, P_{design} : taşıma kapasitesi, GS : güvenlik sayısı, Qtotal a : nihai uç ve çevre taşıma kapasitesi toplamı.

Çizelge 6.7'de verilen oturma hesabında, kazıkta yük altında oluşacak elastik deformasyon miktarı 9.12 mm, kazık çevre sürtünme direncinin tamamının mobilize olması durumunda kazık ucunda oluşacak oturma miktarı 7.59 mm olarak hesaplanmıştır. Kazık toplam oturma miktarı 16.71 mm olarak hesaplanmıştır.

Tasarımda kazığın uç kapasitesinin olmadığı düşünülmesi için, uç kapasitesinden kaynaklanan oturma olmayacağı düşünülmektedir.

L = 47.8 m boyunda imal edilen fore kazık oturma hesabı Çizelge 6.8'de verilmektedir. Kazık toplam oturma miktarı 17.01 mm olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.8 : L = 47.8 m, fore kazık oturma hesabı.

Hesap yöntemi : B. M. DAS, Principles of Foun. Eng. 1998, 9.17 Settlement of Piles p: 615-618	
80cm Fore kazık, L=47.80 m P= 4350 kN GS= 2 P desigr 8700 kN Qtotal a 4350 kN Qws= 4350 kN Qwp= 0 kN Qwp.all 0 kN s=s_e+s_s+s_p	Hesaplanan çevre sürtünme kapasitesi Kazık uç taşıma kapasitesi Nihai uç taşıma kapasitesi
s_e=(Qwp+ε x Qws) x L / (Ep Ap) Qwp= 0 kN ε= 0.67 Qws= 4350 kN L= 47.8 m R= 0.8 m A= 0.50 m ² E= 34.000.000 t/m ² s_e= 8.15 mm	Kazık elastik deformasyonu Kazık yük dağılımına bağlı olarak 0.5 - 0.67 arasında değişen katsayı Kazık çapı
s_p= qwp x D /Es x (1-μs²) x Iwp Iwp= 0.85 qwp= 0 kPa D= 0.8 m μs= 0.3 Es= 9.750 kN/m ² s_p= 0 mm	Kazık ucunda taşınan yükten dolayı meydana gelen oturmalar Önerilen değer 0.85 Birim alana gelen uç yükü (Qwp/A) Kazık çapı Zeminin poisson oranı Kazık ucu altında yer alan zeminin elastisite modülü
s_s= (Qws/pL) x D /Es x (1-μs²) x Iws p= 2.51 m Es= 14.000 kN/m ² μs= 0.3 Iws= 4.71 s_s= 8.86 mm	Çevre sürtünme kapasitesinden kaynaklı kazık ucunda meydana gelen oturma. Kazık çevresi Kazık gövdesi boyunca yer alan zemin tabakalarının ortalama elastisite modülü Kazık çevresinde yer alan zemin tabakalarının poisson oranı ortalaması Sürtünmeye bağlı katasyı, Iws=2+0.35(L/D) ^{0.5}
s _e +s _s 17.01 mm s _p 0 mm s= 17.01 mm	Kazık elastik deformasyonu ve kazık elastik kışalmasından kaynaklanan oturmalar toplamı Kazık uç oturması Toplam oturma

P : nihai taşıma kapasitesi, P_{design} : taşıma kapasitesi, GS : güvenlik sayısı, Qtotal a : nihai uç ve çevre taşıma kapasitesi toplamı.

6.2 Deney – 1, Baret O-cell Deneyi

Proje sahasında yukarıda detayı verilen baret kapasitesinin belirlenmesi ve saha koşullarında yükleme sırasında meydana gelen deplasmanların gözlemlenmesi amacıyla proje baretinden ayrı olarak imal edilen test bareti üzerinde Osterberg yük hücresi ile iki yönlü statik yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde, 80 cm x 280 cm boyutlarında test baretinin imalat detayı, enstrümantasyonu, yükleme deneyi, deney sonuçları, sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen numerik analizlere yer verilmiştir.

6.2.1 Test bareti özellikleri

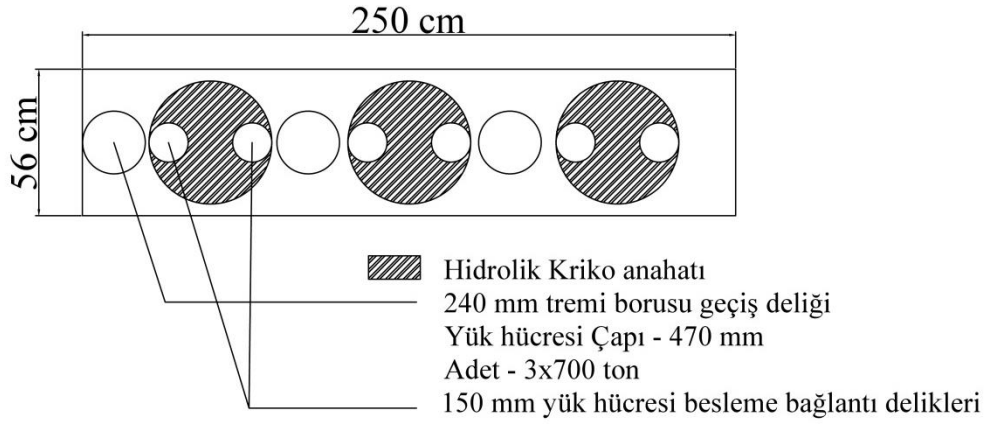
Deney bareti, -17.55 m kotundan başlayarak kayma mukavemeti değerleri farklı olan katı ve sert kil birimlerinden geçerek -80.55 m kotuna ulaşmaktadır. Test bareti imalatı için kullanılan platform kotu -11.55 m olup, deney bareti üst kotundan platform kotuna kadar olan kısmı C8 betonla doldurularak zemindeki çökmelerin ve deney ekipmanlarının etkilenmemesi amacıyla önlem alınmıştır. Test bareti 80 cm x 280 cm boyutlarında ve L = 63 m boyunda imal edilmiştir. İmalat sırasında C40 beton kullanılmıştır. Test baretinin özellikleri Çizelge 6.9’da verilmektedir.

Çizelge 6.9 : Test bareti özellikleri.

Baret Özellikleri		
Baret boyutları		80 cm x 280 cm
O-cell hücreleri		3 x 470 mm
O-cell seviyesi üstündeki baret parçasının boyu		38.80 m
O-cell seviyesi altındaki baret parçasının boyu		24.20 m
O-cell seviyesi üstündeki baret parçasının sütünme yüzey alanı		279.36 m ²
O-cell seviyesi altındaki baret parçasının sütünme yüzey alanı		174.24 m ²
Baret uç alanı		2.24 m ²
O-cell seviyesinin üzerindeki baret parçasının ağırlığı		2.2 MN
Baret betonu üst kotu		-17.55 m
Tasarlanan baret betonu üst kotu		-17.55 m
Platform kotu		-11.55 m
Yerlatı su seviyesi kotu		-12.00 m
O-cell alt plakası kotu		-56.35 m
Baret taban kotu		-80.55 m
Deplasman Göstergeleri (Telltale) kotları		
Baret üst bölgesinin sıkışmasını ölçen telltale'ların üst kotu		-10.55 m
Baret üst bölgesinin sıkışmasını ölçen telltale'ların alt kotu		-55.85 m
Baret tabanı hareketini ölçen telltale'ların üst kotu		-10.55 m
Baret tabanı hareketini ölçen telltale'ların alt kotu		-80.55 m
Gerilme ölçer kotları		
1. seviye gerilme ölçer kotu		-18.00 m
13. seviye gerilme ölçer kotu	Her 3.00 m'de bir (toplam 11 adet)	-54.00 m
14. seviye gerilme ölçer kotu		-59.00 m
21. seviye gerilme ölçer kotu	Her 3.00 m'de bir (toplam 6 adet)	-80.00 m
Diğer Bilgiler		
Donatı çapı (mm)		φ 32 mm
Etriye çapı (s=15 cm)		φ 10 mm
Betonun birim hacim ağırlığı		2400 kg/m ³
Betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı		52.5 MPa
Üst Plaka boyutu (t=50 mm)		56 cm x 250 cm
Alt Plaka boyutu (t=50 mm)		56 cm x 256 cm

6.2.2 Test bareti enstrümantasyonu ve imalatı

Baret kapasitesinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilecek olan iki yönlü statik yükleme deneyi ekipmanlarının donatı kafesinin hazırlanmasından sonra montajına başlanmıştır. L = 63 m boyunda imal edilecek olan test baretinin, baret üst kotundan 38.80 m aşağıya her biri 700 ton kapasiteye sahip 3 adet yük hücresi montajı yapılmıştır. Yük hücreleri 56 cm x 250 cm boyutlarında 50 mm kalınlığında çelik plakalara Şekil 6.8’de gösterildiği gibi kaynaklanmıştır.



Şekil 6.8 : O-cell deneyi yük hücresi yerleşim planı.

Sahada gerçekleştirilen yük hücresi montajı Şekil 6.9’da gösterilmektedir. Yük hücrelerinin donatı kafesine montajının tamamlanmasından sonra, betonlama işlemi için kullanılacak tremi borusunun yük hücresinin arasından geçmesi ve geçerken yük hücrelerine zarar vermemesi amacıyla donatılarla Şekil 6.10’da göstereilen huni şeklinde kılavuz imalatı yapılarak yük hücresi plakasının üst kısmına kaynatılmıştır.



Şekil 6.9 : Yük hücresi montajı, (Saha – 1, 2013).



Şekil 6.10 : Huni şeklinde tremi borusu kılavuz imalat detayı, (Saha – 1, 2013).

Yük hücresi açılımını ölçmek amacıyla, yük hücresinin alt ve üst plakası arasına 6 adet TOKYO SOKKI Model SDP-100C model maksimum 100 mm açılıma sahip deplasman ölçerler tesis edilmiştir. Baret alt kısmının hareketinin belirlenmesi amacıyla, baret tabanından baret betonu üst kotuna kadar çıkan ve karşılıklı olarak baret boy donatılarına tesis edilen 2 adet *telltale* kılıfı içerisine 6.0 mm çapa sahip *telltale* çubukları yerleştirilmiştir. Benzer şekilde kazık üst kısmının sıkışmasının tespiti için, O-cell üst plakasından kazık betonu üst kotuna kadar çıkan ve karşılıklı olarak kazık boy donatılarına tesis edilen 2 adet *telltale* kılıfı içerisine 6.0 mm çapa sahip *telltale* çubukları yerleştirilmiştir.

Osterberg yük hücresinin altında ve üstünde kalan kısımlarda deney yapım yönteminde belirtilen noktalarda mobilize olan çevre sürtünmesinin ölçülebilmesi amacıyla, her seviyede toplam 4 adet gerilme ölçer (strain gauge) olacak şekilde 21 seviyede toplamda 84 adet GEOKON 4200 model titreşim telli gerilme ölçerler tesis edilmiştir. Gerilme ölçerlerin montajı Şekil 6.11’de yer almaktadır.

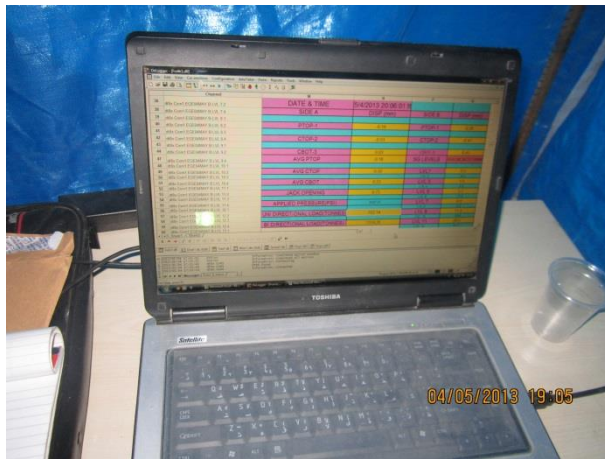
Yükleme sırasında, her yük kademesinde oluşan hücre basıncı Şekil 6.12’de gösterilen bir Bourdon manometresi ve GEOKON Model 4500HH-10,000 model titreşim telli basınç ölçerler ile ölçülmüştür. Deney sırasında yukarıda belirtilen basınç ölçer, deplasman ölçerler ve gerilme ölçerlerden alınan verileri Şekil 6.13’te gösterilen 2 dakika aralıklı veri alan DATATAKER DT80g model veri kaydediciye bağlanılarak diz üstü bilgisayar yardımıyla veri alımı gerçekleştirilmiştir. Deney ekipmanlarının genel enstrümantasyonu Şekil 6.14’te verilmiştir.



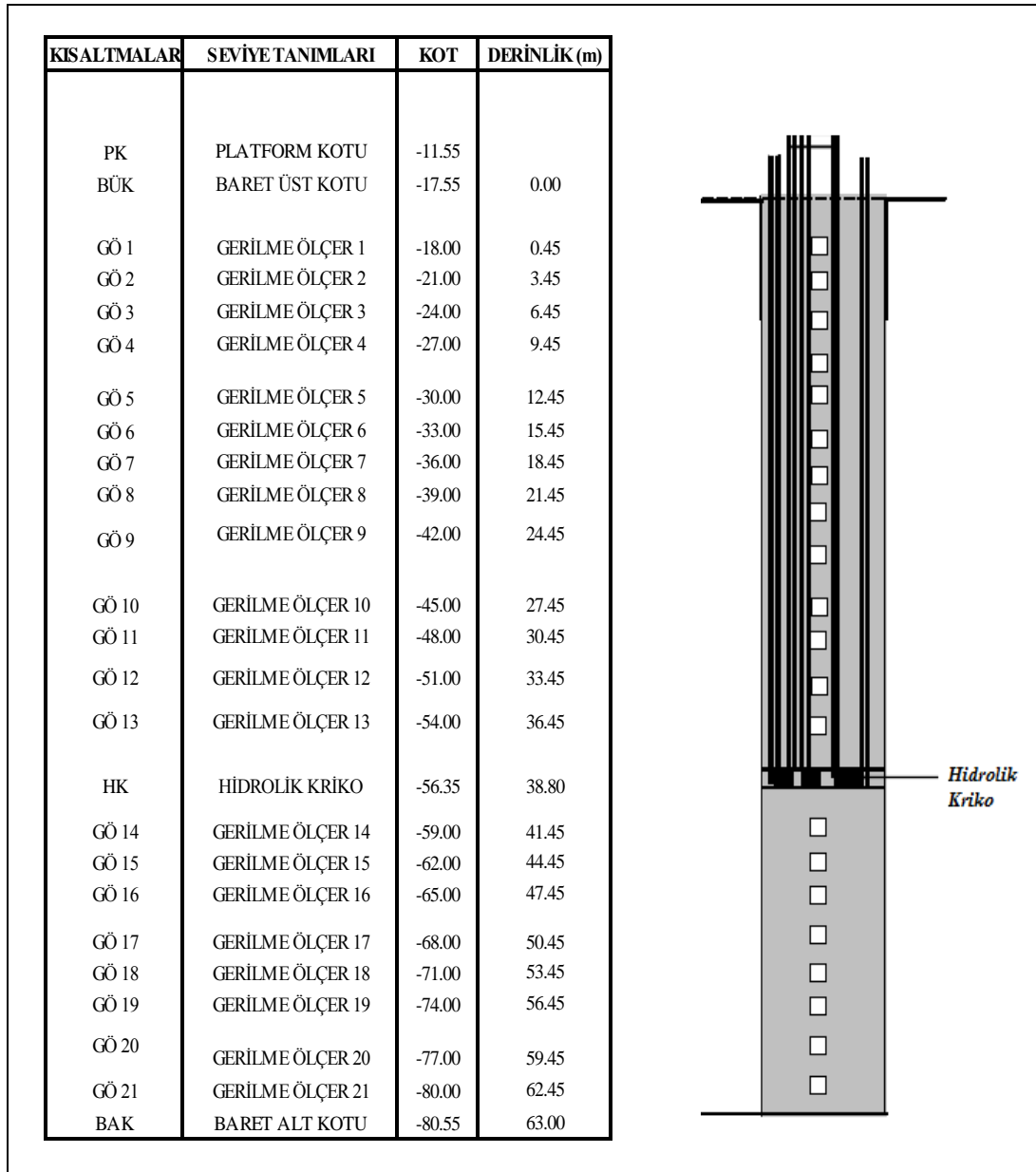
Şekil 6.11 : Gerilme ölçer.



Şekil 6.12 : Bourdon manometresi.



Şekil 6.13 : Veri kaydedici program ara yüzü.



Şekil 6.14 : Test bareti enstrümantasyon kesiti.

Baret kapasitesinin belirlenmesi amacıyla proje sahasında belirlenen bölgede, L = 63.00 m boyundaki test baretinin enstrümantasyonunun tamamlanmasından sonra kuyu forajına 09.04.2013 tarihinde başlanmış ve 10.04.2013 tarihinde kuyu içerisine donatının indirilmesi ve ardından betonlama işleminin bitirilmesiyle birlikte imalat tamamlanmıştır. Test bareti betonunun dayanım kazanması için gereken süre ile ilgili, TS 500 standardı ve deney yapım yöntemi dikkate alınarak 28 günlük sürenin geçmesinin ardından betonlama sırasında alınan küp numunelerinin kırımı yapılarak basınç dayanımları kontrol edilmiş ve ardından deney gerçekleştirilmiştir.

6.2.3 İki yönlü statik yükleme deneyinin yapılışı

Test bareti üzerinde yapılacak olan iki yönlü statik yükleme deneyi, 04.05.2013 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Test bareti üzerinde gerçekleştirilen yükleme, test yapımından önce verilen deney yapım yöntemine uygun olarak tamamlanmıştır. Donatının taşınması sırasında Osterberg hücrelerinin bağlı olduğu plakaları bir arada tutan montaj donatılarının plakalardan ayrıldığını kontrol etmek amacıyla ön yükleme gerçekleştirilip yük boşaltılmış ve ardından sıfır okumaları kayıt altına alınmıştır.

Ön yükleme işleminin tamamlanmasından sonra, baret tabanından 24.20 m yukarıya yerleştirilen 3 adet 470 mm çapındaki Osterberg hücresi Çizelge 6.10'da gösterilen yük kademelerine uygun olarak yüklenmiştir. Baret test yükünün %5'lik artımlarıyla yüklenmiştir. Her yükleme kademesinde yük, 12 dakika boyunca sabit tutulmuş ve dijital veri kaydedici tarafından 12 dakikalık bekleme süresince 8 adet okuma alınmıştır. Yükleme sırasında baret kapasitesinin 2 katına 40 yük kademesinde ulaşılmıştır. Maksimum yükleme seviyesinde yük 4 saat sabit tutularak okumalar kayıt altına alınmıştır. Deney sırasında, baretin O-cell seviyesinin hemen üstünde, O-cell seviyesinin altında ve baret üst kotunda meydana gelen deplasmanlar dikkate alınarak, baret kapasitesinin 2.6 katına kadar yükleme devam ettirilmiştir. Yük, tek kademe boşaltılarak 2 saat boyunca kazıkta meydana gelen deplasmanlar kayıt altına alınmıştır.

İki yönlü kazık yükleme deneyi sırasında, deney enstrümantasyonu için kullanılan telltale (deplasman göstergeleri), strain gauge (gerilme ölçer) ve yük hücrelerinin açılımını gösteren seviye ölçer sayesinde gerekli veriler kaydedilmiştir.

Deplasman ölçerlerden elde edilen veriler ile, Osterberg hücrelerinin üst kısmında ve alt kısmında meydana gelen deplasmanların yüke bağlı grafikleri oluşturulmuştur. Deney yapım yönteminde belirtilen kotlara teşkil edilen gerilme ölçerlerden, yük kademelerinde alınan okumalar ile mobilize olan çevre sürtünme dirençlerinin yük ile değişimini belirten grafikler elde edilmiştir.

Aynı zamanda literatürde yer alan, baret kapasitesinin değerlendirmesinde kullanılan metodlar göz önünde bulundurularak, deney sonucunun değerlendirilmesi amacıyla barette meydana gelen elastik kısalmalar yük – deplasman eğrisine eklenerek “eşdeğer üstten yükleme – oturma eğrisi” oluşturulmuştur.

Çizelge 6.10 : Deney - 1 baret yükleme prosedürü.

Yük Kademesi	Servis Yükünün Yüzdesi (%)	Bekleme Süresi
1	5	12 dakika
2	10	
3	15	
4	20	
5	25	
6	30	
7	35	
8	40	
9	45	
10	50	
11	55	
12	60	
13	65	
14	70	
15	75	
16	80	
17	85	
18	90	
19	95	
20	100	
21	105	
22	110	
23	115	
24	120	
25	125	
26	130	
27	135	
28	140	
29	145	
30	150	
31	155	
32	160	
33	165	
34	170	
35	175	
36	180	
37	185	
38	190	
39	195	
40	200	4 saat
41	180	12 dakika
42	160	
43	140	
44	120	
45	100	
46	80	
47	60	
48	40	
49	20	
50	0	1 saat

6.2.4 İki yönlü statik yükleme deney sonuçları ve yorumlanması

Deney kapsamında Osterberg yük hücreleri test prosedüründe belirlenen şekilde, barette yapısal hasar meydana getirmeyecek şekilde baret kapasitesinin 2.6 katına kadar yüklenmiştir. Daha sonra yük tek kademede boşaltılarak deney sonlandırılmıştır.

O-cell ile eşit miktarda çift yönlü etkitilen yük, aşağı ve yukarı yönde uç ve çevre dirençlerinin mobilize olmasını sağlamıştır. Osterberg hücresi, baret ağırlığını dengeleyecek ilave bir yükün, yukarı yönde etkitilmesine müsaade etmemektedir. Bu sebeple, yukarı yönde mobilize olan çevre sürtünmesinin hesaplanmasında ve “eşdeğer üstten yükleme – oturma” eğrisinin oluşturulmasında, baret ağırlığının yukarı yönde etkitilen O-cell yükünden çıkarılması ile bulunan net yük dikkate alınmaktadır. Test baretinin O-cell seviyesi üzerindeki kısmının ağırlığı 2.2 MN olarak hesaplanmıştır. Deney baretini betonundan alınan küp numunelerden elde edilen, betonun karakteristik basınç dayanımı 52.4 MPa olarak rapor edilmiştir.

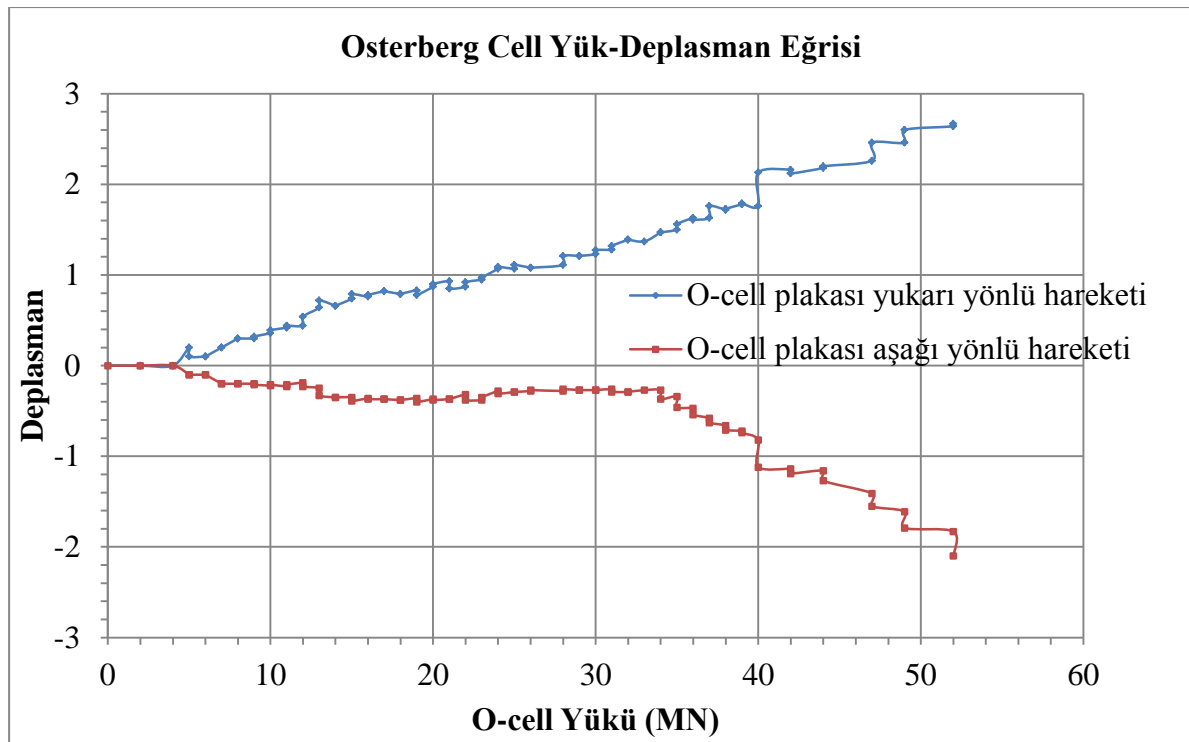
Yükleme sırasında gerilme ölçer seviyelerinde ölçülen mobilize çevre sürtünme dirençleri Çizelge 6.11’de verilmektedir.

Çizelge 6.11 : Gerilme ölçer seviyelerinde mobilize olan çevre sürtünme değerleri.

NİHAİ ÇEVRE SÜRTÜNMESİ (kN/m ²)					
Seviye	(10000 kN)	(20000 kN)	(30000 kN)	(40000 kN)	(52000 kN)
	50%	100%	150%	200%	260%
1 - 2	7	4	5	10	26
2 - 3	8	14	30	32	39
3 - 4	8	18	24	49	65
4 - 5	10	6	14	24	40
5 - 6	18	6	8	22	45
6 - 7	13	21	52	83	110
7 - 8	13	42	66	121	154
8 - 9	26	37	69	115	159
9 - 10	52	96	152	227	254
10 - 11	104	122	208	291	405
11 - 12	153	255	433	654	816
12 - 13	243	776	869	928	943
13 - Yük hücresi	105	112	372	493	985
14 - Yük hücresi	253	287	615	783	1331
14 - 15	264	860	1047	1262	1306
15 - 16	89	138	222	323	388
16 - 17	18	19	43	60	96
17 - 18	44	75	130	228	321
18 - 19	42	54	93	160	229
19 - 20	34	48	86	151	206
20 - 21	13	21	33	52	69

Yük hücresinin üst kısmında yükün 2.6 katında mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri 26 kN/m^2 ile 943 kN/m^2 arasında değişmektedir. Yük hücresinin alt kısmında baret uç kapasitesi ve çevre sürtünme direnci 69 kN/m^2 ile 1306 kN/m^2 arasında değişmektedir.

Yapılan ölçümlerde test yükünün 2.6 katında yük hücresinin üst kısmında gözlenen deplasman değeri 2.7 mm, yük hücresinin hemen altında gözlenen deplasman değeri 2.1 mm olarak kaydedilmiştir. Baret üst kotunun deplasman değeri 0.5 mm olarak gözlenmiştir. Deney sırasında her yük kademesinde yük hücresinin üst ve alt kısmında meydana gelen deplasman grafiği Şekil 6.15'te verilmiştir.

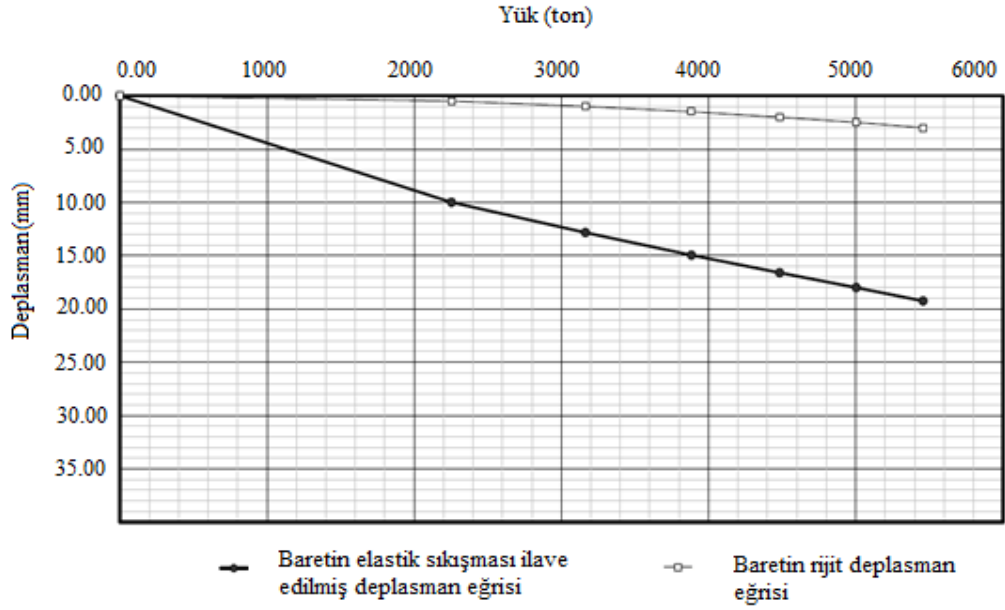


Şekil 6.15 : Deney – 1, yük – deplasman grafiği.

Deney esnasında ölçülen, baret başlığında oluşan yukarı yöndeki deplasman ile baret alt ucundaki aşağı yöndeki deplasman değerlerinin, önceki paragraflarda tariflenen prosedürler ile değerlendirilmesi neticesinde eşdeğer yukardan yükleme hâli için yük – oturma grafiği elde edilmiştir. Elde edilen eşdeğer yük – oturma grafiğinden hareketle, baretin üstten yüklenmesi durumunda yapması beklenen deplasman değerleri, PL/AE formülü yardımıyla hesaplanarak ilave elastik sıkışma miktarlarını da içerecek biçimde oluşturulmuştur.

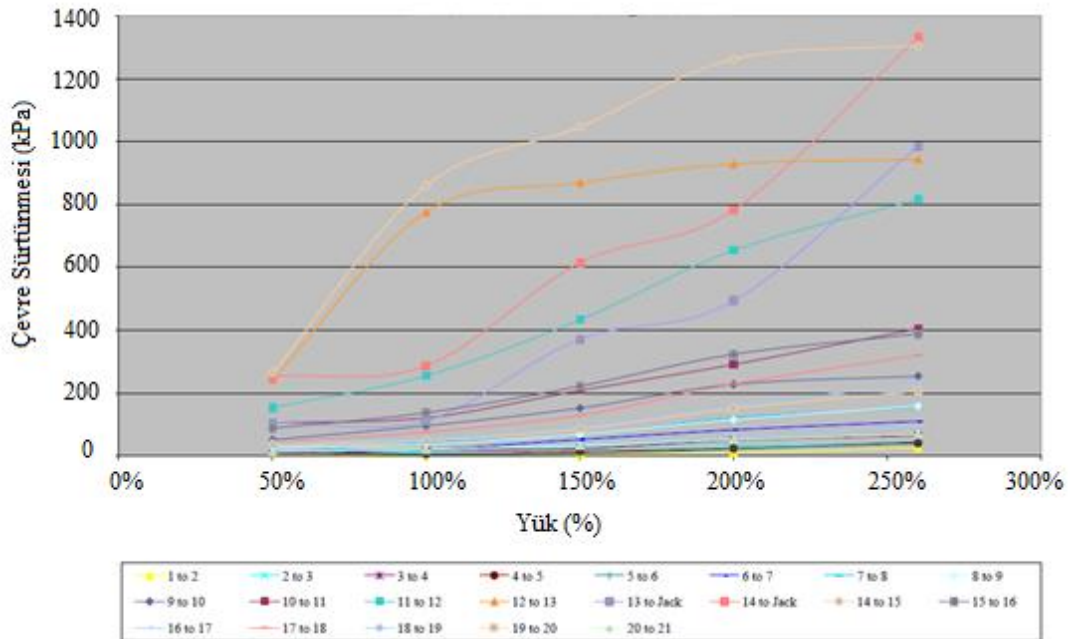
Barete servis yükünün %150 ve %200'ünde rijit deplasmanlar sırasıyla 1.00 mm ve 2.70 mm olarak gözlenirken, elastik sıkışma 12.20 mm ve 19.00 mm olarak

hesaplanmıştır. Elastik sıkışmanın eklenerek elde edildiği eşdeğer üstten yükleme – deplasman eğrisi Şekil 6.16’da verilmiştir.

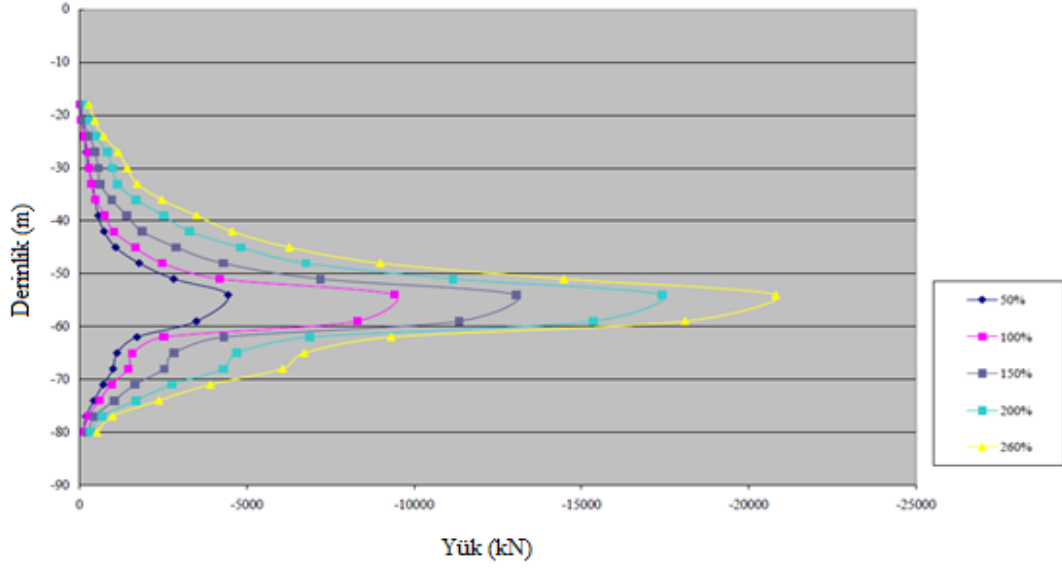


Şekil 6.16 : Eşdeğer üstten yükleme durumu yük – deplasman grafiği.

O-cell yükleme deneyi sırasında, gerilme ölçer seviyeleri arasında kazık shaftında oluşan mobilize çevre sürtünme direnci değerlerinin test yüküne bağlı olarak değişimi Şekil 6.17’de verilmiştir. Ayrıca baret gövdesi boyunca derinliğe bağlı yük dağılımı Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6.17 : Baret gövdesinde mobilize olan çevre sürtünmesi dağılımı.



Şekil 6.18 : Uygulanan yükün baret boyunca dağılımı.

6.2.5 Baret üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizi

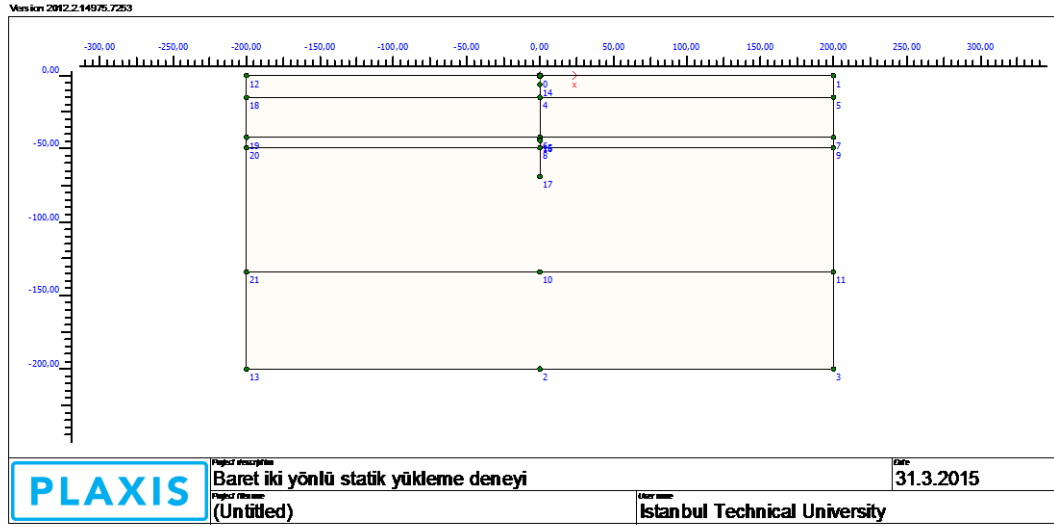
Bu bölümde, arazide test bareti üzerinde Osterberg hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar ile analizi yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen veriler ışığında sahada gerçekleştirilen teste yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Analizler, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Testin programda modellenmesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması
- Malzeme parametrelerinin (zemin ve baret) tanımlanması
- Zemin ve baret elemanın modele atanması
- Sonlu elemanlar ağının oluşturulması
- Analiz adımlarına geçilmesi

6.2.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması

Modelin oluşturulması sırasında, sahada gerçekleştirilen deneydeki yük kademelerine uygun olarak barete etkiyen yük ile kazıkta ve kazık çevresinde meydana gelen gerilmelerin modelden etkilenmemesi amacıyla model geometrisi x eksenini boyunca 400 m, y eksenini doğrultusunda ise 200 m olarak tanımlanarak test bareti modelin tam ortasına yerleştirilmiştir. Sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik

kazık yükleme deneyine uygun olarak yük hücresinin bulunduğu - 56.35 m kotunda 0.50 m genişliğinde aralık bırakılarak kazığın alt ve üst parçalarına yükün etkilmesi sağlanmıştır. Sahadaki mevcut platform kotu - 11.55 m, baret betonu üst kotu - 17.55 m, kazık üst parçası alt kotu - 56.00 m, kazık alt parçası üst kotu - 56.50 m ve kazık alt kotu - 80.55 m olarak modelde tanımlanmıştır. Zemin tabakaları Şekil 6.4'e uygun olarak modelde tanımlanmıştır. Oluşturulan iki boyutlu model Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19 : Deney – 1, geometrik model.





Şekil 6.19'da verilen geometrik modelde çizgi ve nokta elemanlar kullanılarak model sınırları, baret elemanı başlangıç ve bitiş kotları, zemin profilinde yer alan zemin tabakalarının kalınlıkları belirlenmiştir.

6.2.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve baret) tanımlanması

Sahada gerçekleştirilen arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile zemin kesitinde yer alan killi tabakaların mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Arazi araştırmaları sırasında zemin kesitinde 0.00 m kotundan başlayarak 2.5 m kalınlığa ulaşan niteliksiz dolgu ve - 2.5 m kotundan başlayarak 9 m kalınlığa ulaşan yumuşak kil tabakası temel tasarımında temel alt kotunun - 14.25 m olarak tasarlanması sebebiyle kaldırılmıştır. Bu sebeple modelde, - 11.55 m platform kotundan başlayarak zemin kesitinde yer alan orta katı, sert kil tabakaları pekleşen zemin (hardening soil) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Pekleşen zemin modelinin temel üstünlüğü, gerilme izi ve gerilme izinin zemin davranışı ve zemin rijitliğindeki etkisini kapsamaktadır (Lebeau, 2008). Modelde yer alan zemin

tabakalarının mühendislik parametrelerinin tanımlanmasında literatürde yer alan amprik bağıntılardan yararlanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri 5 farklı yaklaşıma göre hesaplanmış ve pekleşen zemin modelinde kullanılan zemin parametreleri Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.

Zemin Cinsi		Orta-katı kil	Orta-katı kil	Katı kil	Sert kil
Zemin Modeli		Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil
Drenaj durumu		Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)
Renk					
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	19.00	20.00	21.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00	20.00	21.00	22.00
E_{50}^{ref}	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
c_u	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
ν_{ur}		0.30	0.30	0.30	0.30
p_{ref}	kN/m ²	100.0	100.0	100.0	100.0



$\gamma_{unsat} = \gamma_d$; zeminin kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{sat} = \gamma_{doy}$; zeminin suya doymun birim hacim ağırlığı, E_{50}^{ref} ; deviyörük yüklemeye sonucu oluşun plastik deformasyon elastisite modülü, E_{oed}^{ref} ; sıkışma nedeniyle oluşun plastik deformasyon elastisite modülü, E_{ur}^{ref} ; elastik boşaltma geri yüklemeye elastisite modülü, c_u ; drenajsız kayma mukavemeti, p_{ref} ; referans basıncı, ν_{ur} ; poisson oranı.

HS modelde belirtilen elastisite modülleri ve drenajsız kayma mukavemeti, sahada meydana gelen deplasmanlar ve yüklemeye sırasında gerilme ölçer seviyelerinde ölçülen mobilize çevre sürtünme dirençlerinin, analiz sonuçlarında oluşun deplasman ve elde edilen mobilize çevre sürtünme direnci değerlerinin karşılaştırılması amacıyla yapılan parametrik çalışmalarda SEM-1, SEM-2, SEM-3, SEM-4 ve SEM-5 olarak adlandırılmıştır. Her analizde zeminin mühendislik parametreleri için yaklaşım yapılmış ve buna bağılı zemin parametreleri literatürde yer alan amprik bağıntılar yardımıyla oluşturulmuştur. Elde edilen zemin parametre değerleri her analizde farklı olduğu için Çizelge 6.12’de yer alan drenajsız kayma mukavemeti ve elastisite modülü değerleri analizde yapılan yaklaşımlara göre verilmiştir.

Baret kapasitesinin tamamının çevre sürtünmesi ile sağlandığı dikkate alınarak sürtünme baretini olarak tasarlanan test baretini modelde gömülü kazık elemanı olarak tanımlanmıştır. 80 cm x 280 cm boyutlarında ve 63.00 m boyundaki test baretinin, alt ve üst parçalarının birim çevre sürtünme kapasiteleri ayrı ayrı girilerek yük altındaki

davranışı gözlenmiştir. Analizlerde tanımlanan gömülü kazık elemanı özellikleri Çizelge 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.13 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.

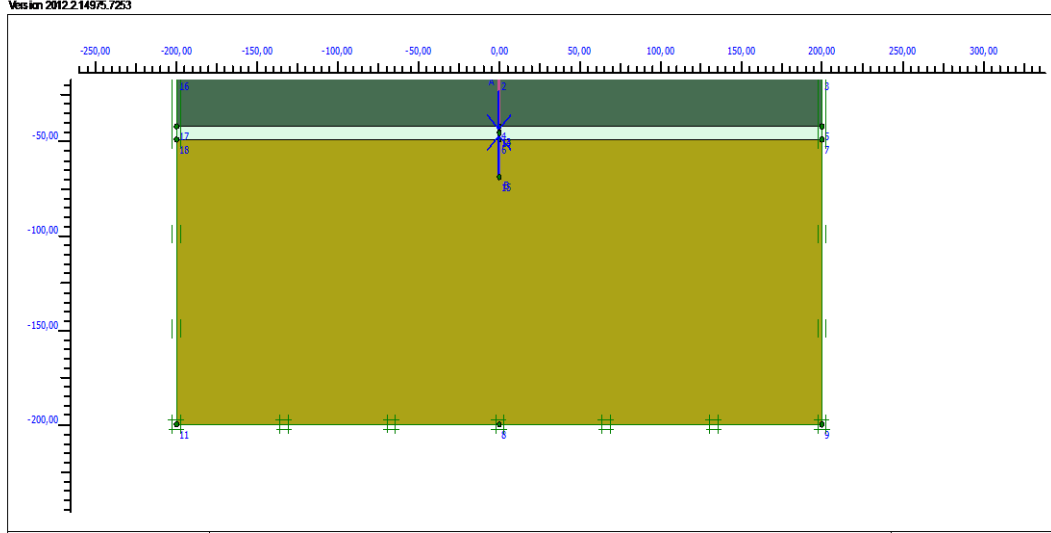
Gömülü kazık elemanı		Baret alt parça	Baret üst parça
Renk			
E	kN/m ²	34,00E6	34,00E6
γ	kN/m ³	25,00	25,00
Kazık tipi		Kullanıcı tanımlı	Kullanıcı tanımlı
A	m ²	2.24	2.24
I	m ⁴	1.46	1.46
T _{üst, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
T _{alt, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
T _{maks}	kN/m	0.00	0.00
F _{maks}	kN	0.00	0.00

E: baret elemanı elastisite modülü, γ ; baret elemanı birim hacim ağırlığı, A ; baret kesit alanı, I ; atalet momenti, T_{üst, maks} ; baret elemanı üst kotu maksimum çevre sürtünme kuvveti, T_{alt, maks} ; baret elemanı alt kotu maksimum çevre sürtünme kuvveti, F_{maks} ; baret uç kuvveti.

Model oluşturulduktan sonra sınır koşulların verilebilmesi ve sonlu elemanlar ağı oluşturulabilmesi için zemin parametrelerinin atanması gerekmektedir. Modelde çizgi elemanlar ile tanımlanan zemin tabakaları ve baret parçalarına malzeme parametreleri atandıktan sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur.

6.2.5.3 Zemin ve baret elemanın modele atanması

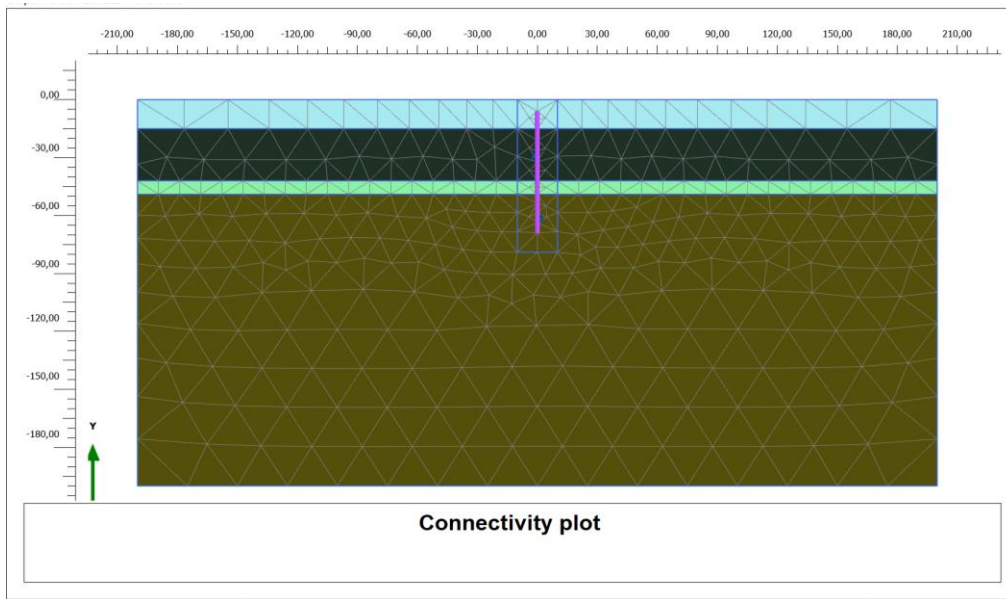
Analizin gerçekleştirilebilmesi amacıyla tanımlanan zemin ve baret elemanları, sınırları çizilen zemin modeline atanmadan sınır koşulları tanımlanamamaktadır. Bu sebeple belirlenen zemin modeline, saha koşullarına uygun olarak zemin ve baret elemanları atandıktan sonra modelin sınır koşulları belirlenir. Sınır koşullarının belirlenmesi ve barete test sırasında etkiyen yük, modelde baret alt ve üst parçasına etkitildikten sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir. Şekil 6.20'de zemin ve baret elemanları tanımlanmış ve sınır koşulları oluşturulmuş analiz modeli verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde sahada -2.50 m kotundaki su seviyesi yapılan kazı sırasında düşürüldüğü için platform kotu olan -11.55 m kotunun 1 m altında tanımlanmıştır.



Şekil 6.20 : Deney – 1, zemin ve baret parametreleri atanmış analiz modeli.

6.2.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması

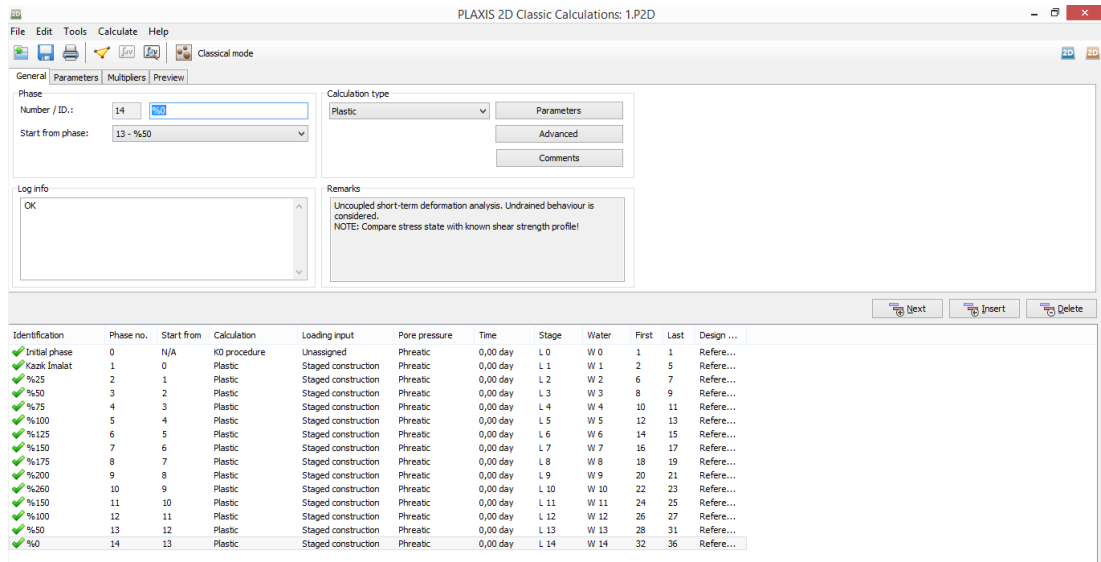
Modelde zemin ve baret elemanlarının atanması, barete etkiyen test yükünün oluşturulması ve sınır koşullarının tamamlanmasından sonra sonlu elemanlar ağı oluşturularak analiz aşamasına geçilmiştir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken kazığın merkezinden $-x$ ve $+x$ yönünde baret uzun kenarının 3 katı (8.4 m) mesafede ve kazık alt kotundan 3 katı mesafede (8.4 m) mesafede gerilmelerin daha fazla olacağı düşünülerek sonlu elemanlar ağı sıklaştırılmış ve optimum sonlu elemanlar ağı ile etkin çözüme ulaşılması sağlanmıştır. Modelde oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21 : Deney – 1, sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model.

6.2.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasından sonra iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla hesap adımlarına geçilmiştir. Analiz adımlarında ilk olarak zeminin başlangıç koşullarında kendi ağırlığı altında yüklenmiş ve sonucunda oluşturduğu deformasyonlar sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Initial phase*” olarak tanımlanmıştır. Daha sonra sahada imalatı gerçekleştirilen test bareti, modelde tanımlanarak imalat sırasında kazığın kendi ağırlığı altında oluşan deformasyonlar hesaplanarak sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Kazık imalat*” olarak tanımlanmıştır. Kazık yükleme deneyinde kazığa etkiyen yük, analizler sırasında da yükleme prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 52.0 MN’luk test yükü 9 eşit yük kademesinde kazığa etkilmiş ve test yükü 4 eşit kademede boşaltılarak elde edilen deplasmanlar gözlenmiştir. Analizlerde gerçekleştirilen hesap adımları Şekil 6.22’de verilmiştir.



The screenshot shows the PLAXIS 2D Classic Calculations: 1.P2D software interface. The 'Calculation type' is set to 'Plastic'. The 'Phase' section shows 'Number / ID.: 14' and 'Start from phase: 13 - %50'. The 'Log info' section shows 'OK'. The 'Remarks' section contains the text: 'Uncoupled short-term deformation analysis. Undrained behaviour is considered. NOTE: Compare stress state with known shear strength profile!'. Below the interface is a table with the following columns: Identification, Phase no., Start from, Calculation, Loading input, Pore pressure, Time, Stage, Water, First, Last, Design ...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Pore pressure	Time	Stage	Water	First	Last	Design ...
Initial phase	1	N/A	KB procedure	Unassigned	Pneatic	0,00 day	L 0	W 0	1	1	Refer...
Kazık İmalat	1	0	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 1	W 1	2	5	Refer...
%25	2	1	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 2	W 2	6	7	Refer...
%50	3	2	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 3	W 3	8	9	Refer...
%75	4	3	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 4	W 4	10	11	Refer...
%100	5	4	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 5	W 5	12	13	Refer...
%125	6	5	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 6	W 6	14	15	Refer...
%150	7	6	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 7	W 7	16	17	Refer...
%175	8	7	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 8	W 8	18	19	Refer...
%200	9	8	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 9	W 9	20	21	Refer...
%250	10	9	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 10	W 10	22	23	Refer...
%150	11	10	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 11	W 11	24	25	Refer...
%100	12	11	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 12	W 12	26	27	Refer...
%50	13	12	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 13	W 13	28	31	Refer...
%0	14	13	Plastic	Staged construction	Pneatic	0,00 day	L 14	W 14	32	36	Refer...

Şekil 6.22 : Deney – 1, analiz adımları.

6.2.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi

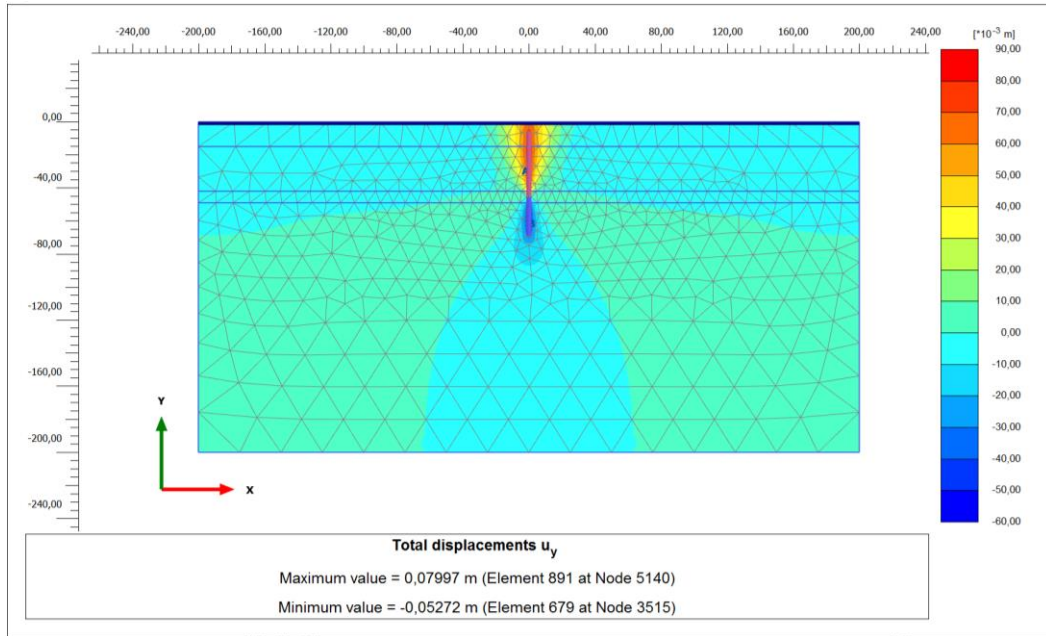
Sahada baret üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D’de modellenerek analiz edilmiştir. Modellenen kazığa iki yönlü statik yükleme deneyinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma kademeleri uygulanarak oluşan deplasmanlar kayıt altına alınmıştır. İlk olarak, kazık kapasitesi hesabında kullanılan zemin parametreleri yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. SPT-(N₁)₆₀ değerlerinin derinlikle değişimine bağlı olarak zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir. Zemin kesitinde yer alan

kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü hesabında $E = 400.c_u$ (Poulos ve Davis, 1980) önerisi kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizler SEM-1 olarak adlandırılmıştır. SEM-1’de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.14’te verilmiştir.

Çizelge 6.14 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	Tabaka Adı	c_u (kPa)	SEM-1					Deplasman (mm)		
			E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Baret Üstü
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19	360	576	81.60	52.70	79.80
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	160	64.000	192.000	20					
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19	576	900			
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	100.000	300.000	21					

SEM-1 analiz sonucunda, test yükünde (52.0 MN) baret alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 52.7 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan baret üst parçasında ise 81.60 mm deplasman gözlenmiştir. Baret üst kotunda meydana gelen deplasman 79.80 mm’dir. Test yükü altında baret alt ve üst parçasında analizeler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.23’te verilmiştir.



Şekil 6.23 : SEM – 1, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.

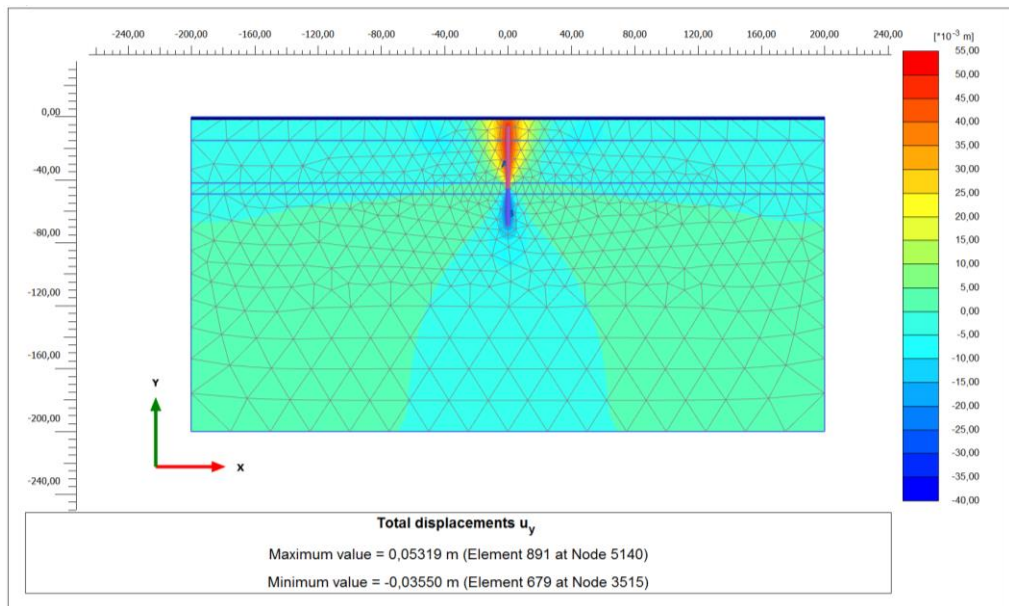
SEM-1 analizi sonucunda barette oluşan deplasman değeri, sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda gözlenen deplasman değerinden daha büyüktür. Baret üst parçasında, sahada gerçekleştirilen iki yönü statik yükleme

deneyinde 2.67 mm deplasman gözlenirken, SEM-1 analizi sonucunda oluşan deplasman 81.60 mm'dir. Bu duruma sebep olarak modelde tanımlanan zemin parametrelerinin gerek saha koşullarında gerekse literatür değerlerine göre düşük olmasıdır. SEM-1 analizine göre daha yüksek zemin parametreleri ile SEM-2 analizi gerçekleştirilmiştir. Zemin kesitinde yer alan kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü değerleri için $E = 600c_u$ (Bowles, 1988) önerisi kullanılmıştır. SEM-2'de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.

Kot (m - m)	Tabaka Adı	c_u (kPa)	SEM-2					Deplasman (mm)		
			E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum Yükte O-cell altı	Baret Üstü
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19	360	576	54.86	35.50	53.06
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	160	96.000	288.000	20					
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19	576	900			
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	150.000	450.000	21					

SEM-2 analiz sonucunda, test yükünde (52.0 MN) baret alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 35.50 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan baret üst parçasında ise 54.86 mm deplasman gözlenmiştir. Baret üst kotunda meydana gelen deplasman 53.06 mm'dir. Test yükü altında baret alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.24 : SEM – 2, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.

SEM-2 analizi sonucunda baret üst parçasında meydana gelen deplasman değeri (54.86 mm), sahada gerçekleştirilen iki yönü statik yükleme deneyinde gözlenen deplasman (2.67 mm) değerinden daha fazla oluşmuştur. SPT-(N₁)₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi dikkate alınıp (Şekil 6.5) drenajsız kayma mukavemeti değeri için (Sowers, 1979) tarafından önerilen SPT-(N₁)₆₀ - c_u ilişkisi dikkate alınarak tabakaların drenajsız kayma mukavemeti parametreleri artırılarak SEM-3 ve SEM-4 analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM-3 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı E =400.c_u (Poulos ve Davis, 1980) önerisi ile yapılmıştır. SEM-3 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.16'da verilmiştir.

Çizelge 6.16 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.

Kot (m - m)	SEM-3							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c _u (kPa)	E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	T _{üst,maks} (kN/m)	T _{alt,maks} (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Baret Üstü
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	160	64.000	192.000	19	576	810	53.48	47.90	52.95
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	225	90.000	270.000	20					
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19	810	972			
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	108.000	324.000	21					

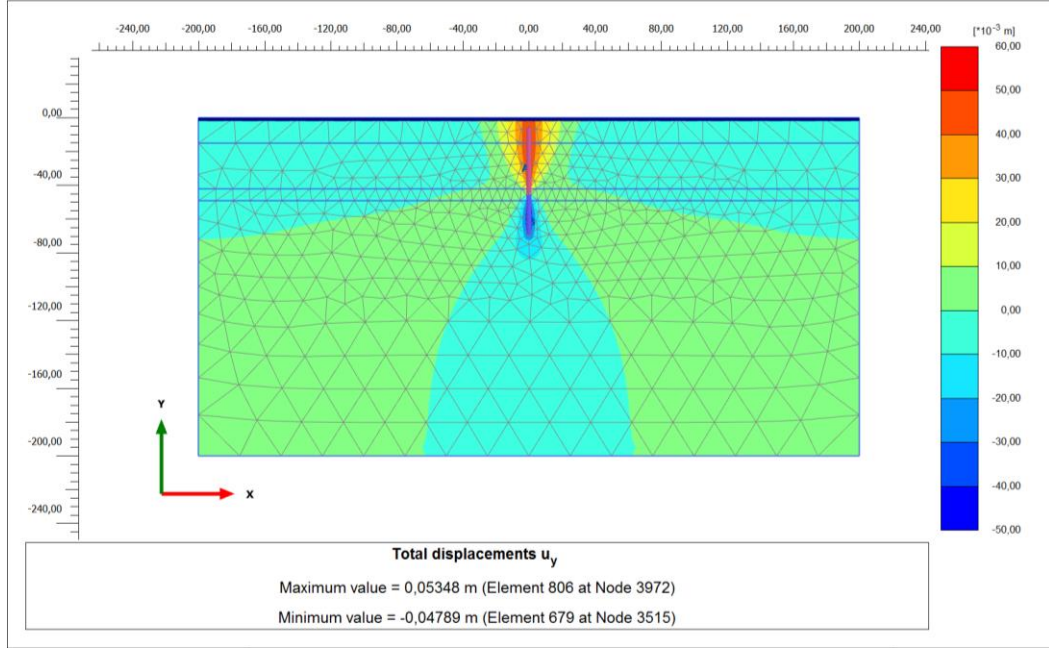
SEM-3 analiz sonucunda, test yükünde (52.0 MN) baret alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 47.90 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan baret üst parçasında ise 54.87 mm deplasman gözlenmiştir. Baret üst kotunda meydana gelen deplasman 52.95 mm'dir. Test yükü altında baret alt ve üst parçasında analizeler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.25'te verilmiştir.

SEM-4 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı E =600.c_u (Bowles, 1988) önerisi ile yapılmıştır. SEM-4 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.17'de verilmiştir.

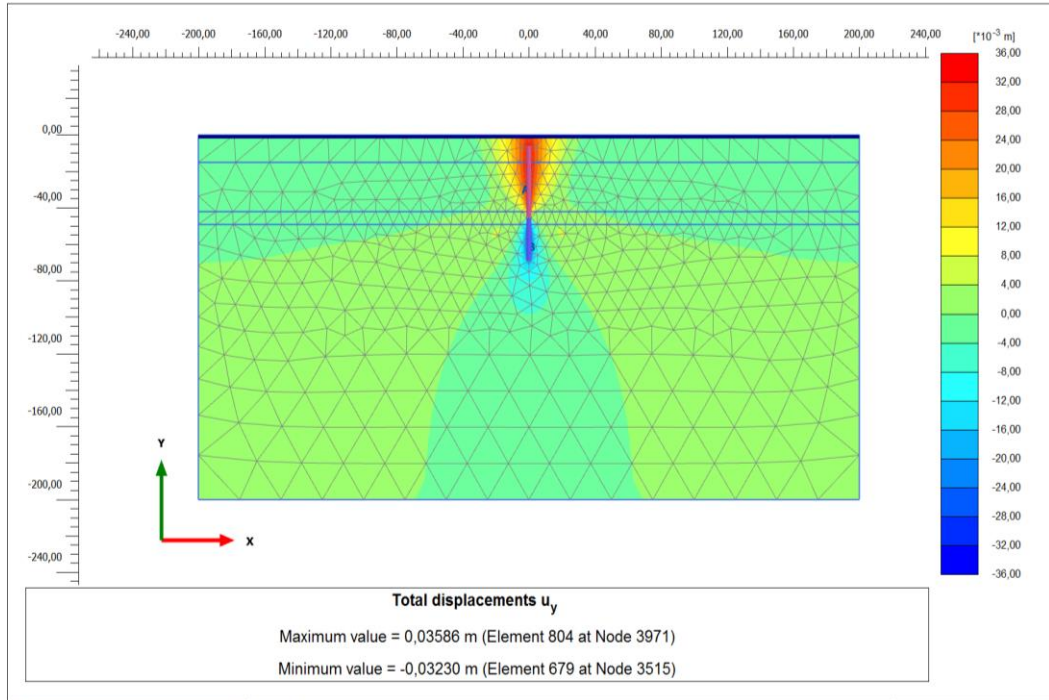
Çizelge 6.17 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.

Kot (m - m)	SEM-4							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c _u (kPa)	E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	T _{üst,maks} (kN/m)	T _{alt,maks} (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Baret Üstü
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	160	96.000	288.000	19	576	810	37.00	32.30	35.16
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	225	135.000	405.000	20					
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19	810	972			
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	162.000	486.000	21					

SEM-4 analiz sonucunda, test yükünde (52.0 MN) baret alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 32.30 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan baret üst parçasında ise 37.0 mm deplasman gözlenmiştir. Baret üst kotunda meydana gelen deplasman 35.16 mm'dir. Test yükü altında baret alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.26'da verilmiştir.



Şekil 6.25 : SEM – 3, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.



Şekil 6.26 : SEM – 4, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.

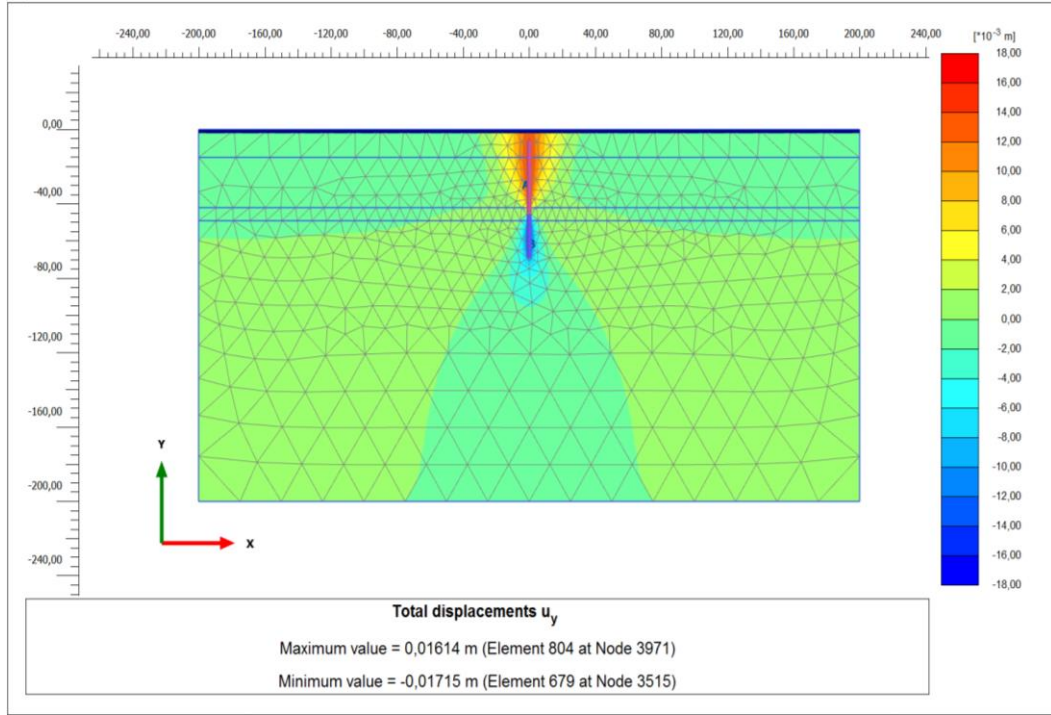
Parametrik yaklaşımlar ile yapılan analizler sonucunda elde edilen deplasman değerleri ile sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde elde edilen deplasman değerleri karşılaştırıldığında, sahada gerçekleştirilen deneyde test yükünde barette meydana gelen deplasman değeri oldukça düşük kalmaktadır. Sahada oluşan deplasman değerine numerik analizler ile elde etmek amacıyla zemin tabakalarının elastisite modülünün arttırılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda, Bowles (1988) killi zeminler için plastisite indisi değerinin $I_p < 30$ olması durumunda, elastisite modülü değerinin drenajsız kayma mukavemetine bağlı olarak $E = (500 - 1500)c_u$ olarak alınabileceği önermektedir. Sahada yapılan SPT sırasında alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerde - 11.0 m kotundan sonra yer alan zemin tabakalarında $I_p < 30$ olduğu Çizelge 6.3, 6.4 ve 6.5'te görülmektedir. Bu sebeple saha deplasman değerini elde etmek amacıyla elastisite modülü değeri için $E = 1500c_u$ yaklaşımı dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler, SEM - 5 olarak adlandırılmıştır. SEM - 5 analizi parametreleri ve analiz sonucu elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.18'de verilmektedir.

Çizelge 6.18 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.

Kot (m - m)	SEM-5							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c_u (kPa)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum Yükte O-cell altı	Baret Üstü
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	160	240.000	720.000	19	576	810	17.10	17.15	15.20
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	225	337.500	1.012.500	20					
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	150.000	450.000	19	810	972			
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	405.000	1.215.000	21					

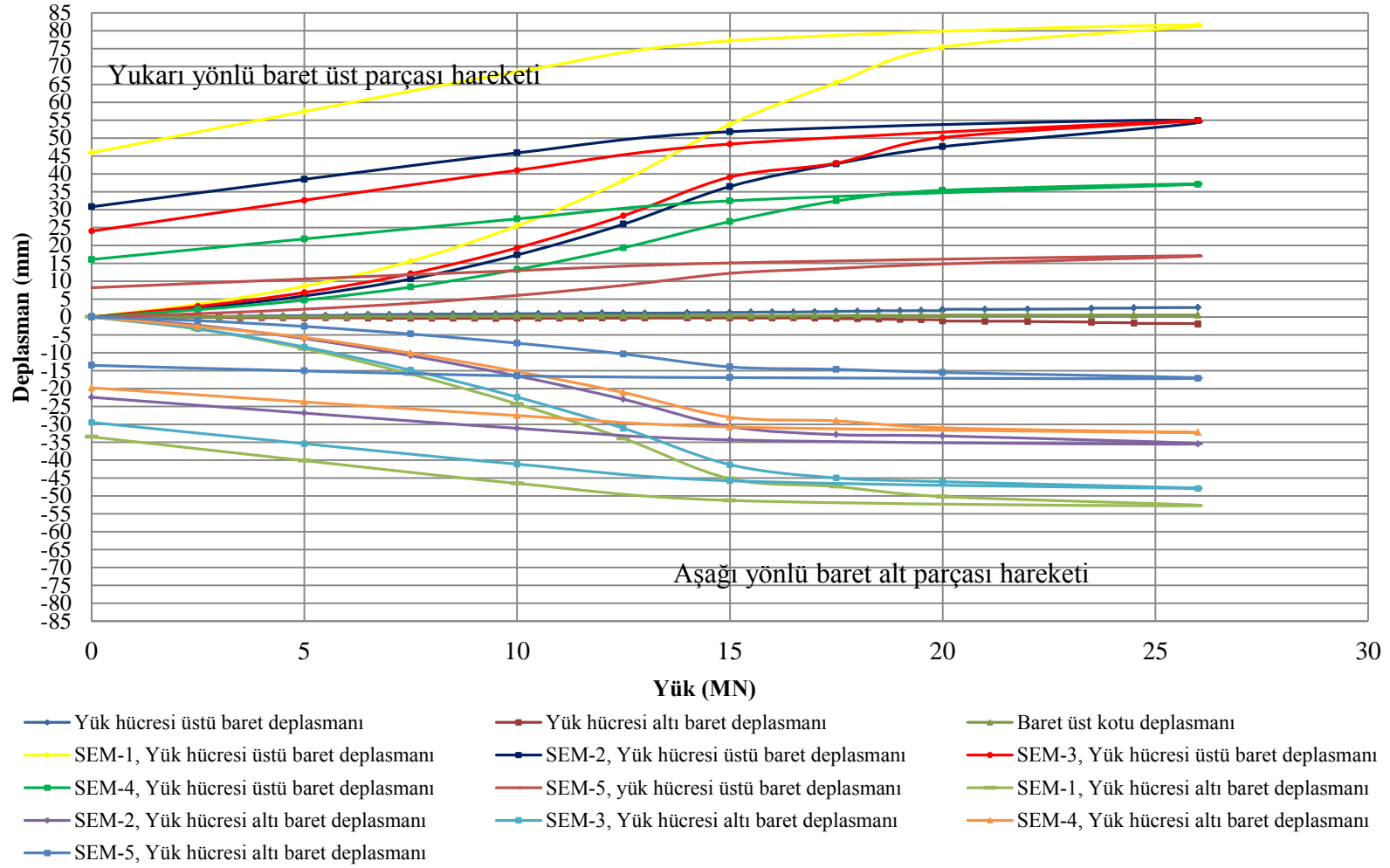
SEM-5 analiz sonucunda, test yükünde (52.0 MN) baret alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 17.15 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan baret üst parçasında ise 17.10 mm deplasman gözlenmiştir. Baret üst kotunda meydana gelen deplasman 15.20 mm'dir. Test yükü altında baret alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.27'de verilmektedir. SEM ile yapılan analizler sonucunda baret boyunca test yükünde elde edilen deplasman, yük ve çevre sürtünme kuvveti dağılımı Plaxis çıktıları Ek B'de verilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük - deplasman eğrisi Şekil 6.28'de verilmektedir.



Şekil 6.27 : SEM – 5, test yükünde (%260) oluşan deplasmanlar.

Şekil 6.28’de görüldüğü üzere, SEM ile yapılan analizler sonucunda baret üst ve alt parçasında gözlenen değerler, arazide baret üzerinde gerçekleştirilen O-cell deneyinde elde edilen deplasman değerlerine yaklaşımaktadır. Elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri için, SPT değerlerinin derinlikle dağılımına göre yapılan yaklaşımlarda baret üst parçası deplasmanı 81.6 mm ile 17.1 mm arasında değiştiği, baret alt parçasında gözlenen deplasmanların ise 52.7 mm ile 17.15 mm arasında değiştiği Şekil 6.28’de görülmektedir.



Şekil 6.28 : Analiz ve test sonucu elde edilen yük –deplasman eğrileri.

Sahada baret imalatı sırasında belirlenen kotlara teşkil edilen gerilme ölçerler yardımıyla deney sırasında gözlenen mobilize olan çevre sürtünme değerleri modelde aynı kotlarda tanımlanarak baret alt ve üst parçasında da gözlenmiştir. Plaxis 2D, yapı elemanı üzerinde en fazla on noktada çevre sürtünme direnci değerinin elde edilmesine izin vermektedir. Bu sebeple, baret alt ve üst parçasında zemin tabakalarının kalınlıkları da dikkate alınarak beş eşit nokta seçilerek mobilize çevre sürtünme direnci, yük dağılımı ve baret boyunca yük altındaki deformasyon dağılımı elde edilmiştir. SEM – 1’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.19’da verilmektedir.

Çizelge 6.19 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 1										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	1.07	3.06	8.07	17.17	54.93	62.78	67.89	54.44	59.50	60.28
100%	22.14	20.06	31.36	51.53	125.72	131.94	137.56	104.17	108.17	84.44
150%	46.97	37.51	57.31	88.63	156.53	166.67	177.92	156.49	158.06	169.17
200%	73.39	54.72	84.28	126.67	156.53	166.67	177.92	200.84	221.94	244.94
260%	98.44	72.26	111.22	138.33	156.53	166.67	177.92	200.84	224.72	244.94
Deplasman (mm)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	7.92	7.94	8.00	8.14	8.48	8.78	8.66	8.48	8.36	8.31
100%	24.00	24.05	24.20	24.52	25.27	24.10	23.85	23.50	23.21	23.09
150%	51.50	51.60	51.80	52.30	53.50	44.91	44.52	43.92	43.51	43.34
200%	73.20	73.60	74.20	74.80	75.30	50.15	50.03	49.82	49.14	48.97
260%	79.81	79.84	80.02	80.44	81.34	52.54	52.26	51.81	51.50	51.38
Yük (kN)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	244.00	464.00	1092.00	2066.00	4099.00	4301.00	3740.00	2768.00	1877.00	392.00
100%	636.00	1069.00	2326.00	4308.00	8501.00	8769.00	7594.00	5369.00	3414.00	626.00
150%	1016.00	1671.00	3637.00	6743.00	12975.00	13266.00	11586.00	8102.00	4967.00	802.00
200%	1428.00	2302.00	5029.00	9305.00	17405.00	17671.00	15548.00	10966.00	6531.00	962.00
260%	1832.00	2930.00	6396.00	11861.00	22203.00	22427.00	19657.00	13829.00	8192.00	1215.00

Çizelge 6.19’da verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyelerinde test yükünde (%200) baret alt parçasında tamamen mobilize olduğu görülmektedir. 19 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci (224.72 kPa), sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde 19 no’lu gerilme ölçer seviyesinde gözlenen değere (229 kPa) yakındır. Baret üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 13) sahada mobilize olan birim sürtünme direnci 985 kPa iken, numerik analizlerde 156.63 kPa olarak elde edilmiştir. Baret alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 14) sahada

mobilize olan birim sürtünme direnci 1306 kPa iken, numerik analizlerde 166.67 kPa olarak elde edilmiştir.

SEM – 2’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.20’de verilmektedir.

Çizelge 6.20 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 2										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	0.69	2.69	7.65	17.10	56.22	72.50	68.89	54.44	58.89	59.72
100%	21.51	19.64	30.98	51.50	127.22	133.61	139.44	104.17	107.22	84.44
150%	46.14	37.11	56.96	88.67	156.53	166.67	178.06	156.67	161.67	164.44
200%	72.33	54.44	84.00	126.72	156.53	166.67	178.06	200.83	220.56	239.72
260%	97.50	71.78	110.83	138.33	156.53	166.67	178.06	200.83	224.72	250.00
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	5.23	5.24	5.30	5.44	5.78	5.95	5.83	5.66	5.54	5.48
100%	15.88	15.91	16.05	16.37	17.12	16.31	16.06	15.70	15.42	15.3
150%	34.15	34.2	34.43	34.94	36.12	30.33	29.95	29.34	28.94	28.76
200%	45.31	45.38	45.59	45.79	47.32	33.2	32.54	32.06	31.85	31.74
260%	53.09	53.13	53.31	53.72	54.62	35.33	35.05	34.60	34.29	34.17
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	235.80	451.34	1067.00	2030.00	4085.00	4288.00	3715.00	2733.00	1850.00	185.00
100%	627.30	1055.00	2297.00	4270.00	8489.00	8755.00	7565.00	5324.00	3379.00	1244.00
150%	1007.00	1656.00	3606.00	6704.00	12965.00	13252.00	11559.00	8059.00	4935.00	1600.00
200%	1420.00	2289.00	5001.00	9270.00	17394.00	17656.00	15523.00	10927.00	6504.00	1898.00
260%	1819.00	2911.00	6359.00	11817.00	22188.00	22410.00	19627.00	13784.00	8159.00	2416.00

Çizelge 6.20’de verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyelerinde test yükünde (%200) baret alt parçasında tamamen mobilize olduğu görülmektedir. 19 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci 224.72 kPa olarak elde edilmiştir. Baret üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 13), 156.63 kPa olarak elde edilmiştir. Baret alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 14), 166.67 kPa olarak elde edilmiştir.

SEM – 3’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.21’de verilmektedir.

Çizelge 6.21 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 3										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	0.45	2.94	8.33	18.06	46.11	67.78	69.17	55.28	59.72	60.28
100%	22.78	20.83	31.67	52.22	101.67	123.06	132.50	105.83	109.17	87.50
150%	48.61	40.28	57.78	89.17	158.61	172.50	201.94	158.61	164.72	170.83
200%	78.61	60.56	84.72	125.56	208.33	223.89	233.89	212.50	222.22	264.72
260%	108.61	80.83	111.94	165.28	221.11	228.33	233.89	245.28	257.22	270.00
Deplasman (mm)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	6.15	6.16	6.23	6.37	6.73	8.28	8.16	7.98	7.85
100%	17.80	17.80	17.99	18.32	19.10	22.20	21.95	21.56	21.29	21.17
150%	36.69	36.74	37.00	37.53	38.75	41.00	40.60	40.00	39.60	39.37
200%	43.92	44.03	45.18	47.56	50.09	45.87	45.32	44.86	44.70	44.48
260%	53.00	53.04	53.25	53.69	54.63	47.71	47.42	46.96	46.65	46.52
Yük (kN)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	226.00	443.00	1075.60	2067.00	4170.00	4342.00	3781.00	2782.00	1881.00
100%	672.00	1116.00	2378.00	4366.00	8619.00	8865.00	7688.00	5439.00	3450.00	1270.00
150%	1111.00	1799.00	3768.00	6869.00	13217.00	13442.00	11737.00	8236.00	5057.00	1680.00
200%	1607.00	2554.00	5284.00	9521.00	17792.00	17980.00	15818.00	11079.00	6648.00	1954.00
260%	2118.00	3328.00	6815.00	12229.00	22811.00	22917.00	20084.00	14103.00	8346.00	2460.00

Çizelge 6.21’de verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyelerinde test yükünde (%200) mobilize olmamıştır. 19 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim çevre sürtünme direnci 257.22 kPa olarak elde edilmiştir. Baret üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 13), 221.11 kPa olarak elde edilmiştir. Baret alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 14), 228.33 kPa olarak elde edilmiştir.

SEM – 4 ve SEM - 5’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.22 ve Çizelge 6.23’te verilmektedir.

SEM – 4’te 19 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim çevre sürtünme direnci 257.50 kPa, SEM – 5’te ise 250.56 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 4’te baret üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 13), 221.25 kPa, baret alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 14), 228.33 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 5’te baret üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 13) 197.78 kPa, baret alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 14), 205.28 kPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.22 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 4										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	1.31	2.45	7.79	17.92	47.67	69.17	70.56	55.28	58.89	59.72
100%	21.72	20.28	31.03	52.14	103.44	125.00	134.44	105.83	108.06	87.22
150%	47.33	39.47	57.08	89.25	160.69	174.44	204.17	158.61	163.33	146.67
200%	76.89	59.75	84.28	125.83	210.00	226.11	233.89	212.50	220.83	267.50
260%	108.06	80.28	111.67	165.56	221.25	228.33	233.89	245.56	257.50	270.00
Deplasman (mm)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	4.05	4.06	4.13	4.27	4.62	5.62	5.50	5.32	5.20
100%	11.74	11.77	11.92	12.25	13.02	15.05	14.79	14.40	14.13	14.01
150%	24.28	24.34	24.58	25.11	26.32	27.72	27.33	26.71	26.30	26.11
200%	33.72	33.82	33.91	34.79	35.24	30.92	30.42	29.67	29.26	29.04
260%	35.20	35.24	35.45	35.90	36.83	32.12	31.84	31.40	31.06	30.93
Yük (kN)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	214.00	424.00	1040.40	2019.00	4154.00	4329.00	3755.00	2744.00	1851.00
100%	656.00	1092.00	2333.00	4309.00	8603.00	8850.00	7657.00	5388.00	3410.00	1259.00
150%	1093.00	1771.00	3717.00	6807.00	13204.00	13428.00	11706.00	8158.00	5020.00	1674.00
200%	1593.00	2530.00	5236.00	9464.00	17777.00	17965.00	15791.00	11034.00	6616.00	1948.00
260%	2077.00	3285.00	6752.00	12161.00	22794.00	22896.00	20049.00	14049.00	8308.00	2451.00

Çizelge 6.23 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 5										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
50%	0.00	0.48	5.70	17.67	54.83	77.86	73.69	55.28	55.89	62.50
100%	18.18	18.08	29.31	52.07	117.78	143.19	138.11	105.39	103.63	110.00
150%	43.06	37.78	55.64	88.33	176.11	205.28	203.06	156.11	156.11	164.17
200%	72.78	59.31	83.06	123.33	197.78	205.28	213.89	206.94	210.00	241.94
260%	103.33	80.00	109.44	161.67	197.78	205.28	213.89	231.67	250.56	265.83
Deplasman (mm)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	1.54	1.56	1.61	1.74	2.07	2.56	2.45	2.27	2.16
100%	4.58	4.61	4.75	5.06	5.81	7.14	6.89	6.51	6.26	6.15
150%	9.88	9.93	10.16	10.68	11.87	13.70	13.31	12.72	12.32	12.15
200%	13.82	13.97	14.16	14.32	14.76	15.43	15.09	14.84	14.53	14.29
260%	15.23	15.28	15.50	15.93	16.86	16.97	16.70	16.25	15.95	15.82
Yük (kN)										
Test yükü	GÖ-2	GÖ-3	GÖ-6	GÖ-9	GÖ-13	GÖ-14	GÖ-15	GÖ-17	GÖ-19	GÖ-21
	50%	166.40	352.40	902.20	1834.00	4075.00	4243.00	3618.00	2574.00	1711.00
100%	597.00	1003.00	2176.00	4114.00	8487.00	8675.00	7427.00	5135.00	3205.00	1203.00
150%	1054.00	1707.00	3589.00	6634.00	13013.00	13132.00	11355.00	7844.00	4781.00	1679.00
200%	1584.00	2512.00	5163.00	9315.00	17475.00	17521.00	15241.00	10583.00	6344.00	2015.00
260%	2060.00	3263.00	6653.00	11939.00	22447.00	22314.00	19381.00	13479.00	7996.00	2481.00

Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde seçilen gerilme ölçer seviyelerinde test yükünün %50, 100, 150 ve 200'ünde mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin grafikleri Ek C'de verilmektedir.

Literatürde kil zeminler için önerilen elastisite modülü değerleri ve kil zemin tabakalarının SPT değerleri dağılımı göz önünde bulundurularak literatürde SPT değerlerine bağlı olarak önerilen drenajsız kayma mukavemeti parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen numerik analizler sonucunda elde edilen deplasman değeri ile saha deplasman değerlerinin karşılaştırdığımızda analizde elde edilen minimum deplasman değeri sahada elde edilen değerden 6 – 7 kat daha fazla olmuştur. Buna sebep olarak, Çizelge 6.11'e bakıldığında yük hücresine yakın kotta yer alan gerilme ölçerlerde gözlenen mobilize birim çevre sürtünme direnci değerlerinin (985 kPa – 1331 kPa) katı kil tabakası için oldukça yüksek olduğu ve sahada ölçülen baret alt ve üst parçası deplasmanları dikkate alındığında yük hücresine yakın kotlarda baret imalatı sırasında kesitte genişleme olabileceği kanaatini oluşturmaktadır. Ayrıca, sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sırasında uygulanan yükün, yer altı su seviyesinin yüksek olması sebebiyle aşırı boşluk suyu basıncından dolayı sönmülenebileceği ve bunun sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizlerde tanımlanamaması sebebiyle test yükünde gözlenen deplasman değerlerinin yüksek olabileceği kanısını oluşturmaktadır.

6.3 Deney – 2, Fore Kazık O-cell Deneyi

Proje kapsamında ofis yapısı altında, üst yapıdan gelen yükler ve temel altında oluşan gerilmeler dikkate alınarak yukarıda detayı verilen $\phi 80$ cm çapında yapılması planlanan fore kazıkların taşıma kapasitesinin belirlenmesi ve aynı zamanda saha koşullarındaki performansının gözlenmesi amacıyla Osterberg yük hücresi kullanılarak iki yönlü statik yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Bu bölüm kapsamında, $\phi 80$ cm çapındaki test kazığının, imalat detayı, enstrümantasyonu, yükleme deneyi, deney sonuçları ve sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlere yer verilmiştir.

6.3.1 Test kazığı özellikleri

Deney kazığı, -16.35 m kotundan başlayarak kayma mukavemeti değerleri farklı olan katı ve sert kil birimlerinden geçerek -68.05 m kotuna ulaşmaktadır. Test kazığı imalatı için kullanılan platfom kotu -8.00 m olup, deney bareti üst kotundan platform kotuna kadar olan kısmı C8 betonla doldurularak zemindeki çökmelerin ve

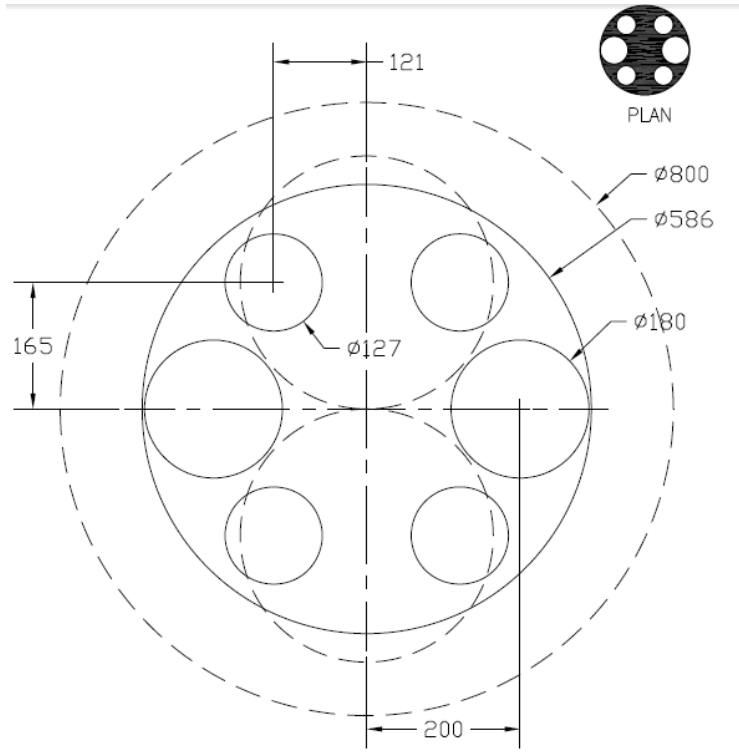
deney ekipmanlarının etkilenmemesi amacıyla önlem alınmıştır. Test kazığı $\phi 80$ cm çapında ve $L = 51.70$ m boyunda imal edilmiştir. İmalat sırasında C40 beton kullanılmıştır. Test kazığının özellikleri Çizelge 6.24'te verilmiştir.

Çizelge 6.24 : $\phi 80$ cm test kazığı özellikleri.

Kazık Özellikleri	
Kazık Çapı	800 mm
O-cell hücreleri	2 x 330 mm
O-cell seviyesi üstündeki kazık parçasının boyu	30.65 m
O-cell seviyesi altındaki kazık parçasının boyu	21.05 m
O-cell seviyesi üstündeki kazık parçasının sütünme yüzey alanı	78.00 m ²
O-cell seviyesi altındaki kazık parçasının sütünme yüzey alanı	52.9 m ²
Kazık uç alanı	0.5 m ²
O-cell seviyesinin üzerindeki kazık parçasının ağırlığı	0.3 MN
Yaklaşık kazık eksenel rijitliği	17.400 MN
Kazık betonu üst kotu	-16.35 m
Tasarlanan kazık betonu üst kotu	-16.35 m
Platform kotu	-11.00 m
Yerlatı su seviyesi kotu	-12.00 m
O-cell alt plakası kotu	-47.00 m
Kazık taban kotu	-68.05 m
Delgi Kılıfı	
Kılıf üst kotu	-10.30 m
Kılıf alt kotu	-20.30 m
Telltale (Deplasman Göstergeleri) kotları	
Kazık üst kotunun sıkışmasını ölçen telltale'ların üst kotu	-10.50 m
Kazık üst kotunun sıkışmasını ölçen telltale'ların alt kotu	-16.35 m
Kazık üst bölgesinin sıkışmasını ölçen telltale'ların üst kotu	-10.50 m
Kazık üst bölgesinin sıkışmasını ölçen telltale'ların alt kotu	-48.66 m
Kazık tabanı hareketini ölçen telltale'ların üst kotu	-10.50 m
Baret tabanı hareketini ölçen telltale'ların alt kotu	-68.05 m
Gerilme Ölçer Kotları	
16 no'lu gerilme ölçer kotu	-20.00 m
15 no'lu gerilme ölçer kotu	-26.00 m
14 no'lu gerilme ölçer kotu	-29.00 m
13 no'lu gerilme ölçer kotu	-33.00 m
12 no'lu gerilme ölçer kotu	-37.00 m
11 no'lu gerilme ölçer kotu	-40.00 m
10 no'lu gerilme ölçer kotu	-43.00 m
9 no'lu gerilme ölçer kotu	-45.00 m
8 no'lu gerilme ölçer kotu	-49.00 m
7 no'lu gerilme ölçer kotu	-51.00 m
6 no'lu gerilme ölçer kotu	-53.00 m
5 no'lu gerilme ölçer kotu	-55.00 m
4 no'lu gerilme ölçer kotu	-57.00 m
3 no'lu gerilme ölçer kotu	-60.00 m
2 no'lu gerilme ölçer kotu	-63.00 m
1 no'lu gerilme ölçer kotu	-66.00 m
Diğer Bilgiler	
Donatı çapı (mm)	ϕ 22 mm
Etriye çapı (s=15 cm)	ϕ 10 mm
Betonun birim hacim ağırlığı	2400 kg/m ³
Betonun 28 günlük ortalama basınç dayanımı	52.5 MPa
Üst Plaka çapı (t=50 mm)	590 mm
Alt Plaka çapı (t=50 mm)	590 mm

6.3.2 Test kazığı enstrümantasyonu ve imalatı

Kazık kapasitesinin kontrolü ve yük altında kazık davranışının gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilecek olan iki yönlü statik yükleme deneyi ekipmanlarının donatı kafesinin hazırlanmasından sonra montajına başlanmıştır. $L = 51.70$ m boyunda imal edilen test kazığının, kazık üst kotundan 30.65 m aşağıya her biri 5 MN kapasiteye sahip 2 adet yük hücresi montajı yapılmıştır. Yük hücreleri 586 mm çapında 50 mm kalınlığında çelik plakalara Şekil 6.29'da gösterildiği gibi kaynatılmıştır. Plakalarda, yük hücrelerini besleyen hidrolik hortumlar için 127 mm çapında 4 adet, tremi borusunun geçmesi için 180 mm çapında 2 adet delik açılmıştır.



Şekil 6.29 : $\phi 80$ cm test kazığı Osterberg yük hücresi yerleşim planı.

Sahada gerçekleştirilen yük hücresi imalatı Şekil 6.30'da gösterilmektedir. Yük hücrelerinin donatı kafesine montajının tamamlanmasından sonra, betonlama işlemi için kullanılacak tremi borusunun yük hücresinin arasından geçmesi ve geçerken yük hücrelerine zarar vermemesi amacıyla donatılarla Şekil 6.31'de gösterilen huni şeklinde kılavuz imalatı yapılarak yük hücresi plakasının üst kısmına kaynatılmıştır.



Şekil 6.30 : Osterberg yük hücrelerinin donatı kafesine montajı.



Şekil 6.31 : Tremi borusu geçişi için kılavuz huni detayı.

Test sırasında, basıncın arttırılmasıyla birlikte uygulanacak yük kademelerinde alt ve üst plaka arasında yer alan yük hücrelerinin açılım miktarını ölçmek amacıyla 4 adet Geokon Model 4450 serisinde maksimum 150 mm açılıma sahip lineer titreşim telli deplasman ölçerler yerleştirilmiştir.

O-cell yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık parçasının yük uygulama sırasında sıkışmasını gözlemlemek amacıyla yük hücrelerinin üst kısmındaki plakadan başlayarak kazık üst kotuna kadar uzanan, iki adet 13 mm çapındaki kılıf içerisine 6 mm çapında uzama ölçer çubukları (rod extensometer) yerleştirilmiştir.

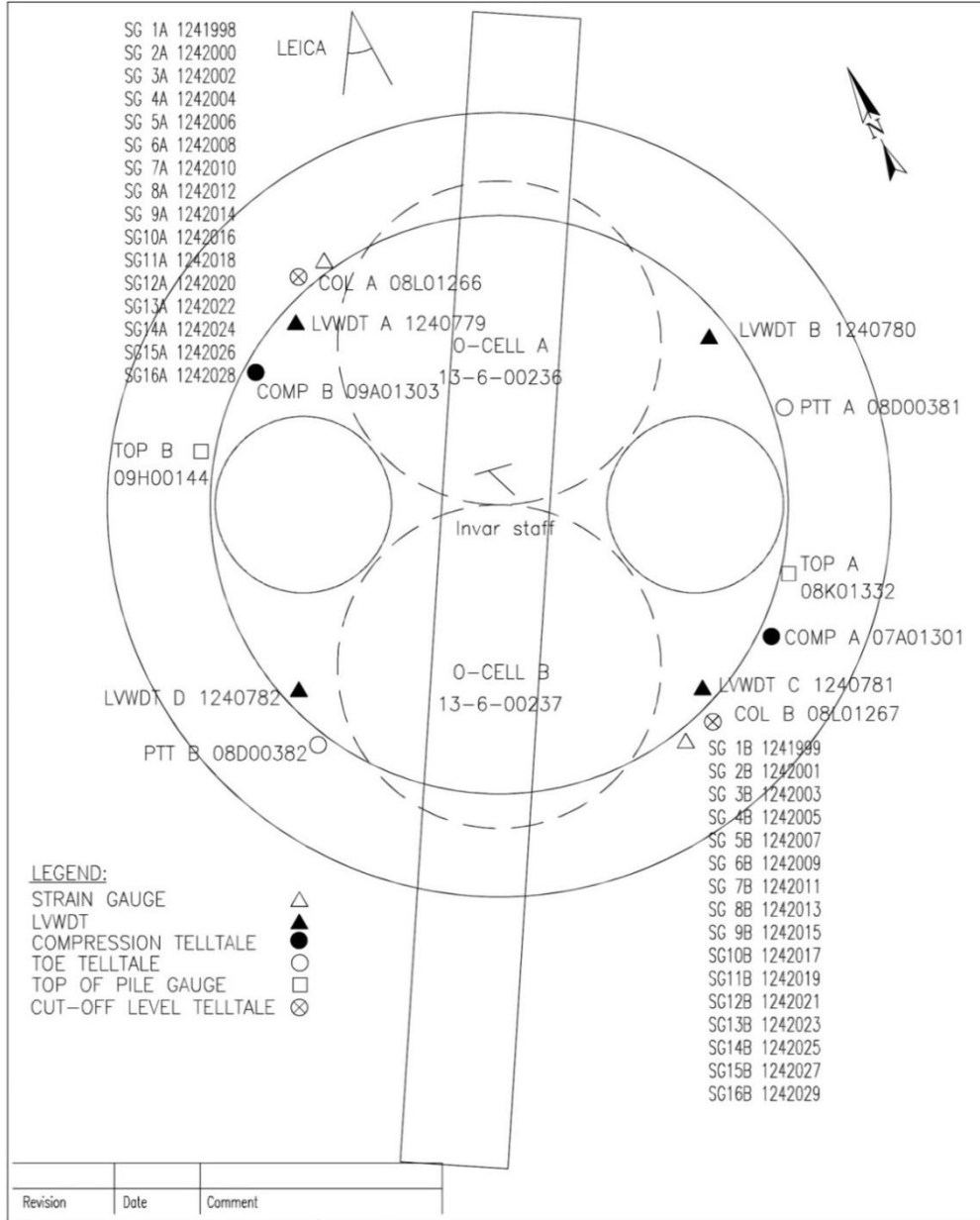
O-cell yük hücresinin alt kısmında yer alan kazık parçasının yük uygulama sırasında sıkışmasını gözlemlemek amacıyla kazık alt kotundan başlayarak kazık üst kotuna kadar uzanan, iki adet 13 mm çapındaki kılıf içerisine 6 mm çapında uzama ölçer çubukları (rod extensometer) yerleştirilmiştir. Kazık üst kotunun deplasmanını gözlemlemek amacıyla, referans kirişine linear votaj değişimli deplasman ölçerler tesis edilmiştir.

Deney yapım yönteminde belirtilen noktalarda, kazık çevresinde oluşan gerilmelerin ölçümü amacıyla, her seviyede iki adet olmak üzere Geokon 4911 serisi titreşim telli gerilme ölçerler; 8 seviye yük hücresinin üst kısmındaki kazık donatısına, 8 seviye yük hücresinin alt kısmındaki kazık donatısına karşılıklı olacak şekilde toplam 16 seviyede tesis edilmiştir. Tesis edilen gerilme ölçerler Şekil 6.32'de gösterilmektedir. Kazıkta yükleme sırasında oluşan deplasman ölçümlerini ve çevre sürtünme direncinin ölçümünü sağlayan gerilme ölçerlerin yerleşim planı Şekil 6.33'te yer almaktadır.



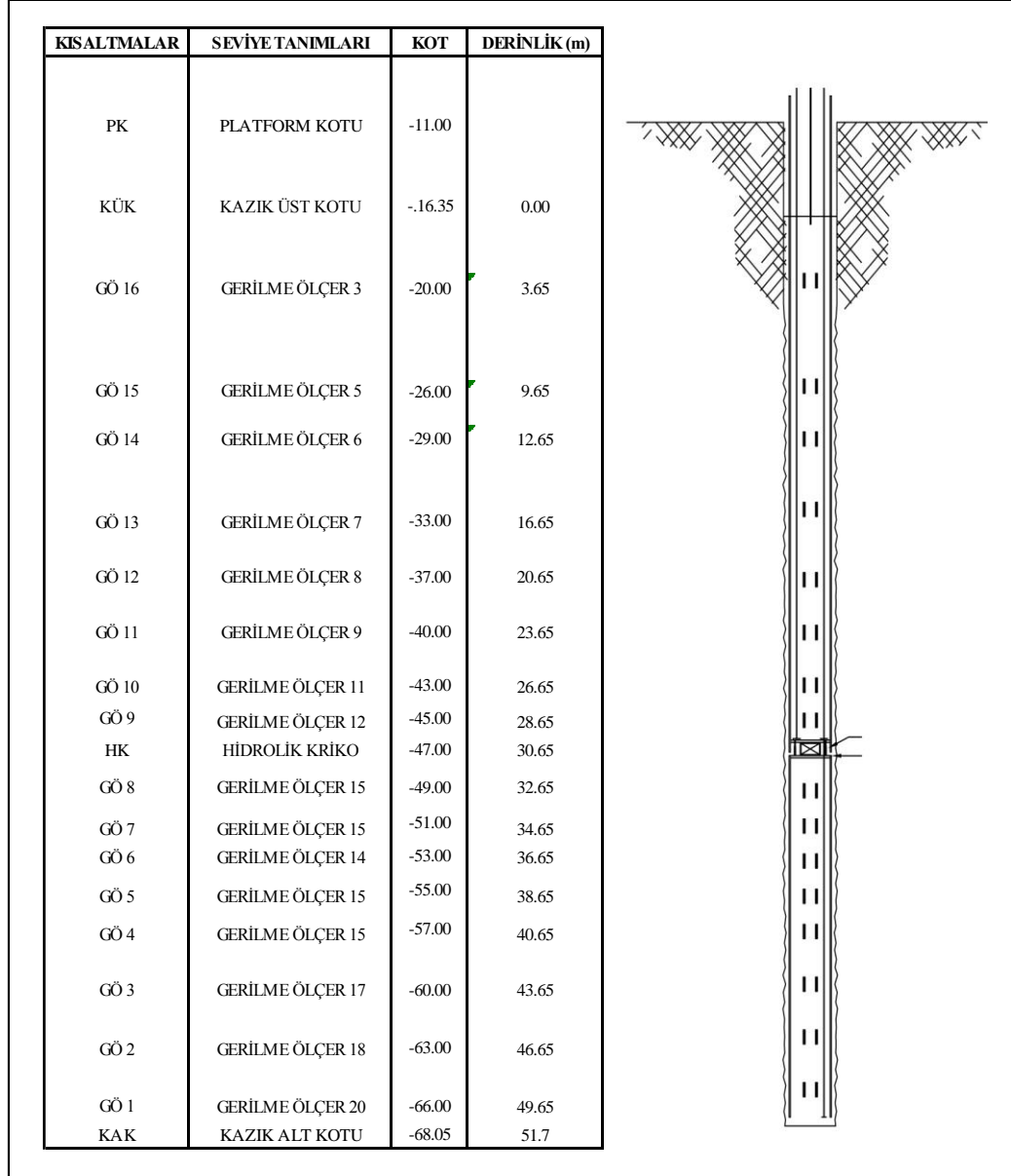
Şekil 6.32 : Geokon 4911 model gerilme ölçerlerin donatıya montajı.

Yükleme sırasında, her yük kademesinde oluşan hücre basıncı bir Bourdon manometresi ve titreşim telli basınç ölçerler ile ölçülmüştür. Deney sırasında yukarıda belirtilen basınç ölçer, deplasman ölçerler ve gerilme ölçerler, 30 saniyede bir veri alan Data Electronics 515 Geologger marka veri kaydediciye bağlanılarak diz üstü bilgisayar yardımıyla veri alımı gerçekleştirilmiştir. Deney ekipmanlarının kazık kesitinde yerleşimi Şekil 6.34'te verilmiştir.



Şekil 6.33 : $\phi 80$ cm test kazığı deney ekipmanları enstrümantasyonu.

Kazık kapasitesinin belirlenmesi amacıyla, $L = 51.70$ m boyundaki test kazığının enstrümantasyonunun tamamlanmasından sonra 04.03.2013 tarihinde kuyu forajına başlanmış ve 05.04.2013 tarihinde kuyu içerisine donatının indirilmesi ve ardından betonlama işleminin bitirilmesiyle birlikte imalat tamamlanmıştır. Test bareti betonunun dayanım kazanması için gereken süre ile ilgili, TS 500 standardı ve deney yapım yöntemi dikkate alınarak 28 günlük sürenin geçmesinin ardından betonlama sırasında alınan küp numunelerinin kırımı yapılarak basınç dayanımları kontrol edilmiş ve ardından deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.34 : $\phi 80$ cm test kazığı deney ekipmanları şematik kesiti.

6.3.3 İki yönlü statik yükleme deneyinin yapılışı

Test kazığı üzerinde yapılan iki yönlü statik yükleme deneyi 22.04.2013 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Test kazığı üzerinde gerçekleştirilen yükleme, test yapımından önce verilen deney yapım yöntemine uygun olarak tamamlanmıştır. Donatının taşınması sırasında Osterberg hücrelerinin bağlı olduğu plakaları bir arada tutan montaj donatılarının plakalardan ayrılmasını ve kazığa etkiyen yük miktarının etkilenmemesi amacıyla donatı kafesi kuyuya indirilirken yük hücresinin alt ve üst plakaları arasındaki donatılar oksijen kaynağı yardımıyla bir miktar kesilmiştir.

Kazık tabanından 21.05 m yukarıya yerleştirilen 2 adet 330 mm çapındaki Osterberg hücreleri Çizelge 6.25'te gösterilen yük kademelerine uygun olarak yüklenmiştir. Yükleme işlemi, deney yapım yönteminde verilen kalibrasyon belgesinde belirtilen, yük – basınç değerlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme deneyi, ASTM D 1143D – 2007 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme tek çevrimli olarak gerçekleştirilip, 12 yükleme kademesinde test yüküne (900 ton) ulaşılması hedeflenmiştir. Her yükleme kademesinde 30 dakika beklenmiş, yük kademesinde 20 dakkikada okunan deplasman değerlerindeki farkın 0.1 mm'den küçük olması durumunda bir sonraki yük kademesine geçilmiştir. Aksi durumda deplasman değerinin sabitlenmesi en fazla 3 saat beklenerek sonraki yük kademesine geçilmiştir. Deney sırasında o-cell yük hücresinin altındaki kazık parçasının deplasman değeri 11. seviye yüklemesinde (4.14 MN), sınır değerleri aşmış ve yük 3 eşit seviyede boşaltılmıştır. İki yönlü yükleme deneyi sırasında, deney enstrümantasyonu için kullanılan telltale (deplasman göstergeleri), strain gauge (gerilme ölçer) ve yük hücrelerinin açılımını gösteren seviye ölçer ile gerekli veriler kaydedilmiştir.

Deplasman ölçerlerden elde edilen veriler ile, Osterberg hücrelerinin üst kısmında ve alt kısmında meydana gelen deplasmanların yüke bağlı grafikleri oluşturulmuştur. Deney yapım yönteminde belirtilen kotlara teşkil edilen gerilme ölçerlerden, yük kademelerinde alınan okumalar ile mobilize olan çevre sürtünme dirençlerinin yük ile değişimini belirten grafikler elde edilmiştir.

Aynı zamanda literatürde yer alan kazık kapasitesinin değerlendirmesinde kullanılan metodlar göz önünde bulundurularak, deney sonucunun değerlendirilmesi amacıyla kazıkta meydana gelen elastik kısalmalar yük – deplasman eğrisine eklenerek “eşdeğer üstten yükleme – oturma eğrisi” oluşturulmuştur.

Çizelge 6.25 : Deney – 2, kazık yükleme prosedürü.

Kazık Çapı:					0.8 m	
O-cell yük hücresi sayısı ve çapı					2x330 mm	
Toplam O-cell Yük Kapasitesi					7.80 MN	
O-cell yük hücresi üzerindeki kazık parçasının ağırlığı:					0.44 MN	
Net test yükü:					15.16 MN	
Yük Kademesi No	Basınç		Toplam O-cell Yüğü (MN)	Test Yüğü Yüzdesi (%)	Yük Kademesi Bekleme Kriteri	
	(psi)	(MPa)			Minimum Bekleme Süresi	Yük kademesi geçme kriteri
0	0	0.0	0.00	0.0	10	n/s
1	540	3.7	0.84	5.5	30	< 0.1 mm/ 20 dak deplasmanlardaki değişme miktarı, aksi halde 3 saat
2	1080	7.4	1.67	11.0	30	
3	1620	11.2	2.51	16.6	30	
4	2160	14.9	3.34	22.0	30	
5	2700	18.6	4.18	27.6	30	
6	3240	22.3	5.01	33.1	30	
7	3780	26.1	5.85	38.6	30	
8	4320	29.8	6.68	44.1	30	
9	4860	33.5	7.52	49.6	30	
10	5400	37.2	8.35	55.1	30	
11	5940	41.0	9.19	60.6	30	
12	6480	44.7	10.03	66.2	30	
13	7020	48.4	10.86	71.6	30	
14	7560	52.1	11.70	77.2	30	
15	8100	55.8	12.53	82.7	30	
1	4860	33.5	7.52	49.6	10	n/a
2	3420	22.3	5.01	33.1	10	
3	1620	11.2	2.51	16.6	10	
4	0	0	0.0	0.0	60	

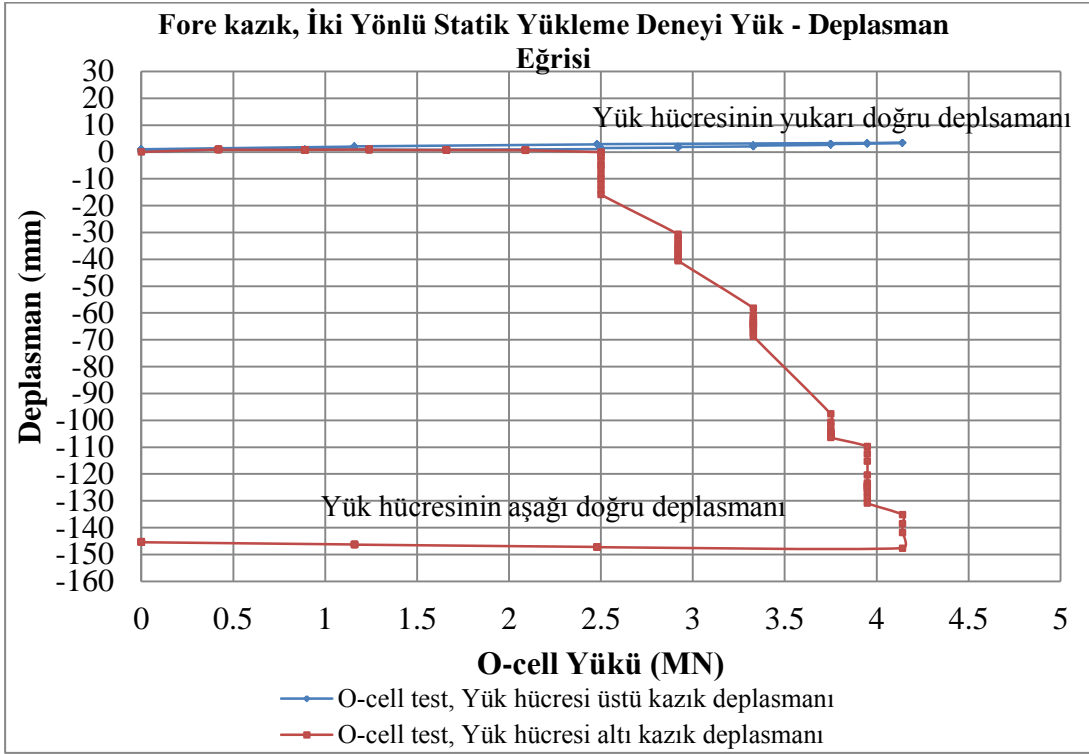
6.3.4 İki yönlü statik yükleme deney sonuçları ve yorumlanması

İki yönlü statik yükleme deneyine başlamadan önce, Osterberg yük hücrelerinin montajının yapıldığı 50 mm kalınlığındaki alt ve üst plakaların, donatı kafesinin taşınması sırasında zarar görmemesi amacıyla bağlantısı yapılan donatıların, kazığa etkileyen yükün test prosedürüne uygun olarak etkimesi için 2 MN ön yükleme ile ayrılması sağlanmış ve ardından yük sıfıra indirilerek, sıfır okumaları gerçekleştirilmiştir.

Yük, Çizelge 6.25'te belirtilen yükleme adımlarından 11. seviye yük kademesine kadar arttırılmıştır. 11. yük seviyesinde, yük hücresinin altında kalan parçasına etkileyen maksimum yük 4.14 MN olarak gözlenmiştir. Bu yük altında, O-cell yük hücresinin hemen altında kazık parçasının aşığı yönlü ortalama deplasmanı 147.63 mm olarak gözlenmiştir. O-cell yük hücresi altında kalan 21.05 m boyundaki kazık parçasının 2.54 MN yük kapasitesindeki 1. seviye gerilme ölçerdeki nihai sürtünme direnci 48.1 kPa olarak gözlenmiştir.

Kazık parçasının 11. yük seviyesinde üst kısmına etkileyen, yukarı yönlü maksimum net yük 3.89 MN olarak tespit edilmiştir. Bu yük altında o-cell yük hücresinin üst

kısımında gözlenen deplasman değeri 3.40 mm'dir. O-cell yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük – deplasman grafiği Şekil 6.35'te verilmiştir.



Şekil 6.35 : Deney – 2, iki yönlü statik yükleme deneyi yük – deplasman eğrisi.

Yükleme deneyi yapımından bir gün önce, beton döküm sırasında alınan küp numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinde, betonun ortalama basınç dayanımı 52.4 MPa olarak tespit edilmiştir. Betonun küp dayanımlarınının 0.8 katı alınarak 15 x 30 cm boyutlarındaki karakteristik silindir dayanım değerleri elde edilmiştir. Betonun elastisite modülü $E_p = 4700\sqrt{f'_c}$ formülü yardımıyla hesaplanarak, kazığın ortalama kesit alanı belirlenerek, aksel rijitliği (AE) 19.900 MN olarak hesaplanmıştır. Kazığın aksel rijitliği yardımıyla 11. yük seviyesinde gerilme ölçer seviyelerinde mobilize olan nihai birim sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.26'da verilmiştir.

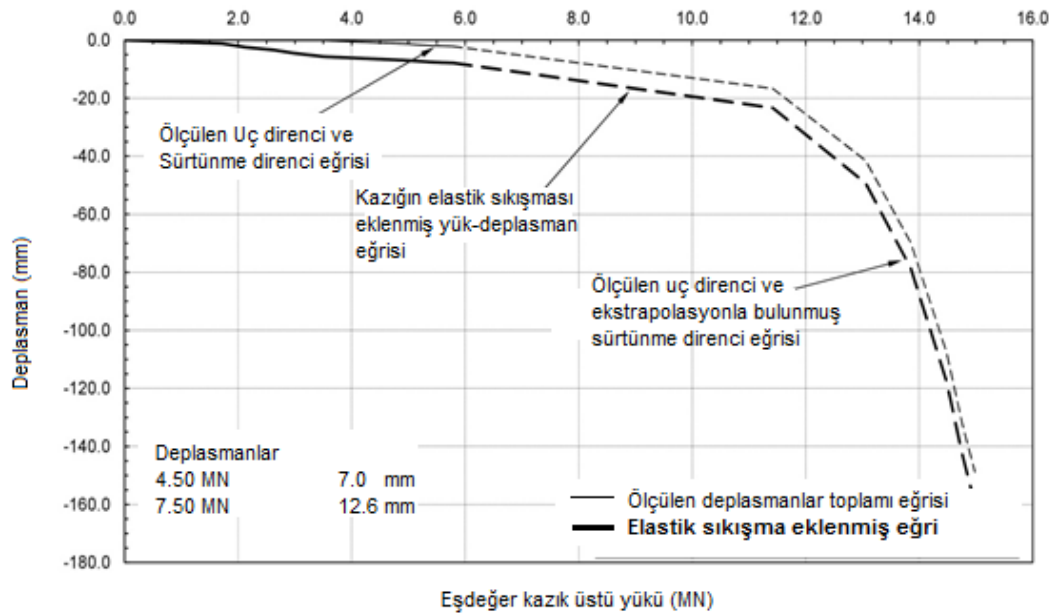
Şekil 6.36'da eşdeğer üstten yükleme yük – deplasman eğrisi verilmiştir. Eşdeğer üstten yükleme eğrisi üst başlıklarda belirtilen prosedürler yardımıyla yükleme sırasında Osterberg hücrelerinin altında ve üstünde okunan deplasmanlardan elde edilmiştir. Elde edilen egride, kazığın üst kısmından yüklenmesi durumunda elde edilen 147.63 mm'lik deplasman değeri, ekstrapolasyon yardımıyla elde edilmiştir.

Eşdeğer üstten yükleme yük – deplasman eğrisi kazığın elastik kısılmalarını da içermektedir.

Kazıkta yükleme sırasında mobilize olan, sürtünme direnci ve uç direnci yükü 14.89 MN olarak yük – deplasman davranışından hesaplanmıştır. Kazığın üstten 5.00 MN yük ile yüklenmesi durumunda kazıkta oluşan deplasman değerinin 7.00 mm, 7.50 MN yük ile yüklenmesi durumunda oluşacak deplasman değerinin 12.60 mm tahmin edilmektedir.

Çizelge 6.26 : Göçme seviyesinde gözlenen deplasman ve net birim sürtünme direnci değerleri.

Yük Transfer Bölgesi	Deplasman (mm)	Net birim sürtünme direnci (kPa)
16 - 15 gerilme ölçer seviyesi	↑ 1.10	11.2
15 - 14 gerilme ölçer seviyesi	↑ 1.19	3.7
14 - 13 gerilme ölçer seviyesi	↑ 1.30	16.7
13 - 12 gerilme ölçer seviyesi	↑ 1.50	74.8
12 - 11 gerilme ölçer seviyesi	↑ 1.82	89.6
11 - 10 gerilme ölçer seviyesi	↑ 2.24	75.0
10 - 9 gerilme ölçer seviyesi	↑ 2.69	127
9 - yük hücresi seviyesi	↑ 3.15	160
Yük hücresi - 8 gerilme ölçer seviyesi	↓ 147.48	90.3
8 - 7 gerilme ölçer seviyesi	↓ 147.18	54.8
7 - 6 gerilme ölçer seviyesi	↓ 146.90	51.9
6 - 5 gerilme ölçer seviyesi	↓ 146.94	53.8
5 - 4 gerilme ölçer seviyesi	↓ 146.41	58.1
4 - 3 gerilme ölçer seviyesi	↓ 146.16	60.6
3 - 2 gerilme ölçer seviyesi	↓ 145.90	69.3
2 - 1 gerilme ölçer seviyesi	↓ 145.70	48.1



Şekil 6.36 : Eşdeğer üstten yükleme, yük – deplasman eğrisi.

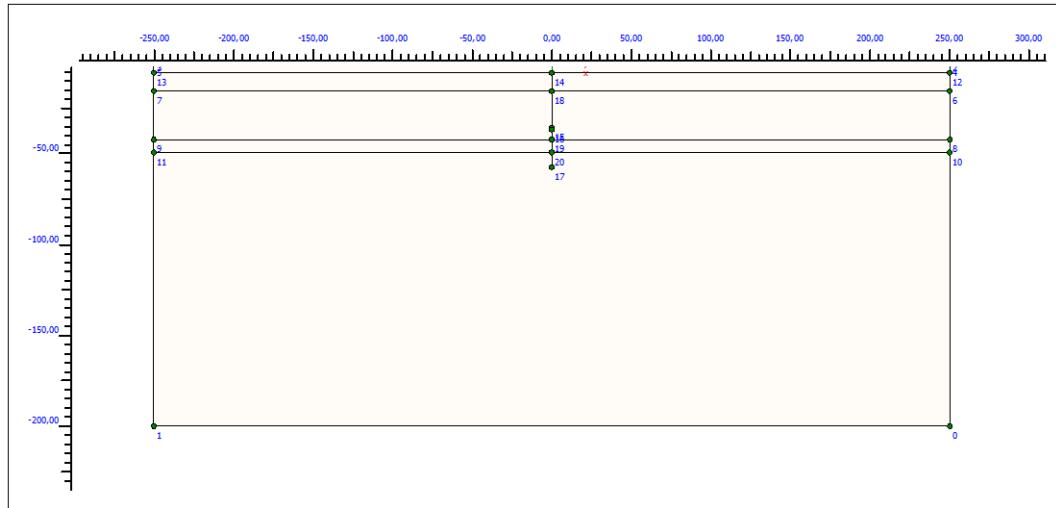
6.3.5 Test kazığı üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizi

Bu bölümde, arazide test kazığı üzerinde Osterberg hücresi ile gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar ile analizi yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen veriler ışığında sahada gerçekleştirilen teste yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Analizler, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Testin programda modellenmesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- Modelin iki boyutlu oluşturulması
- Malzeme parametrelerinin (zemin ve kazık) tanımlanması
- Zemin ve kazık elemanın modele atanması
- Sonlu elemanlar ağının oluşturulması
- Analiz adımlarına geçilmesi

6.3.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması

Modelin oluşturulması sırasında sahada gerçekleştirilen deneydeki yük kademelerine uygun olarak gerçekleştirilen yükleme adımlarında kazığa etkiyen yük ile kazıkta ve kazık çevresinde meydana gelen gerilmelerin modelden etkilenmemesi amacıyla model geometrisi x eksenini boyunca 500 m, y eksenini doğrultusunda ise 200 m olarak tanımlanarak test kazığı modelin tam ortasına yerleştirilmiştir. Sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik kazık yükleme deneyine uygun olarak yük hücresinin bulunduğu - 47.00 m kotunda 0.50 m genişliğinde aralık bırakılarak kazığın alt ve üst parçalarına yükün etkilmesi sağlanmıştır. Sahadaki mevcut platform kotu - 11.00 m, kazık betonu üst kotu - 16.35 m, kazık üst parçası alt kotu - 46.75 m, kazık alt parçası üst kotu - 47.25 m ve kazık alt kotu - 68.05 m olarak modelde tanımlanmıştır. Zemin tabakaları Şekil 6.4'e uygun olarak modelde tanımlanmıştır. Oluşturulan iki boyutlu model Şekil 6.37'de verilmiştir.








Şekil 6.37 : Deney – 2, modelin iki boyutlu oluşturulması (x-y düzlemi).

6.3.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve kazık) tanımlanması



Sahada gerçekleştirilen arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile zemin kesitinde yer alan killi tabakaların mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Modelde, zemin kesitinde yer alan katı, sert kil tabakaları pekleşen zemin modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Pekleşen zemin modelinin temel üstünlüğü, gerilme izi ve gerilme izinin zemin davranışı ve zemin rijitliğindeki etkisini kapsamaktadır (Lebeau, 2008). Modelde yer alan zemin tabakalarının mühendislik parametrelerinin tanımlanmasında literatürde yer alan amprik bağıntılardan yararlanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri 5 farklı yaklaşıma göre hesaplanmış ve pekleşen zemin modelinde kullanılan zemin parametreleri Çizelge 6.27’de verilmiştir.

Çizelge 6.27 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.

Zemin Cinsi		Orta-katı Kil	Yumuşak Kil	Orta katı Kil	Katı Kil	Sert Kil
Zemin Modeli		Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil
Drenaj durumu		Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)
Renk						
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	18.50	19.00	20.00	21.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00	19.50	20.00	21.00	22.00
E_{50}^{ref}	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
c_u	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
v_{ur}		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
p_{ref}	kN/m ²	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Sürtünme kazığı olarak tasarlanan test kazığı modelde gömülü kazık elemanı olarak tanımlanmıştır. $\phi 80$ cm çapında ve 51.70 m boyundaki test kazığının, alt ve üst parçalarının birim çevre sürtünme kapasiteleri ayrı ayrı girilerek yük altındaki davranışı gözlenmiştir. Analizlerde tanımlanan gömülü kazık elemanı özellikleri Çizelge 6.28’de verilmiştir.

Çizelge 6.28 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.

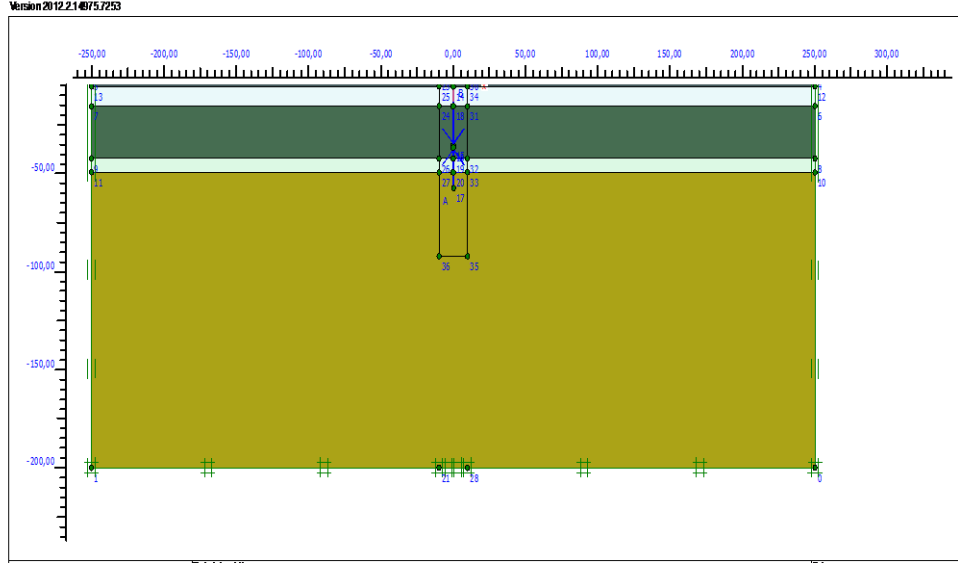
Gömülü kazık elemanı		Kazık alt parça	Kazık üst parça
Renk			
E	kN/m ²	34,00E6	34,00E6
γ	kN/m ³	25,00	25,00
Kazık Tipi		Ön tanımlı	Ön tanımlı
Ön Tanımlı Kazık Tipi		Betonarme dairesel kazık	Betonarme dairesel kazık
D	m	0.80	0.80
A	m ²	0.5027	0.5027
I ₃	m ⁴	0.02011	0.02011
I ₂	m ⁴	0.02011	0.02011
T _{üst, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
T _{alt, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
T _{maks}	kN/m	0.00	0.00
F _{maks}	kN	0.00	0.00

D: kazık çapı, I₂- I₃ : atalet momenti.

Model oluşturulduktan sonra sınır koşulların verilebilmesi ve sonlu elemanlar ağı oluşturulabilmesi için zemin parametrelerinin atanması gerekmektedir. Zemin parametreleri tanımlanmadan sonlu elemanlar ağı oluşturulamamaktadır.

6.3.5.3 Zemin ve kazık elemanın modele atanması

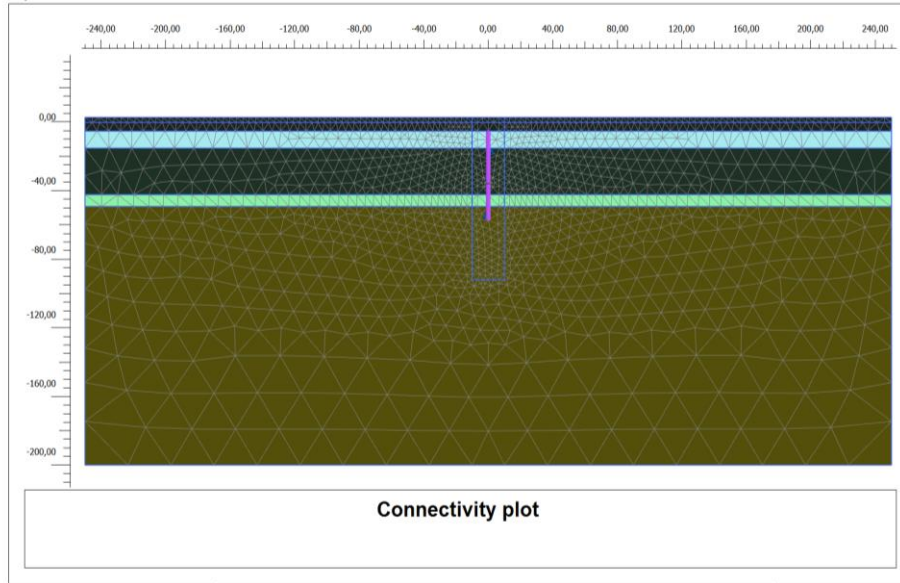
Analizin gerçekleştirilebilmesi amacıyla tanımlanan zemin ve kazık elemanları, sınırları çizilen zemin modeline atanmadan sınır koşulları tanımlanamamaktadır. Bu sebeple belirlenen zemin modeline, saha koşullarına uygun olarak zemin ve kazık elemanları atandıktan sonra modelin sınır koşulları belirlenir. Sınır koşullarının tanımlanması ve kazığa test sırasında etkiyen yük, modelde kazık alt ve üst parçasına etkitildikten sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir. Şekil 6.38’de zemin ve kazık elemanları tanımlanmış ve sınır koşulları oluşturulmuş analiz modeli verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde sahada -2.50 m kotundaki su seviyesi yapılan kazı sırasında düşürüldüğü için platform kotu olan -11.00 m kotunun 1 m altında tanımlanmıştır.



Şekil 6.38 : Deney – 2, zemin ve kazık elemanı atanmış analiz modeli.

6.3.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması

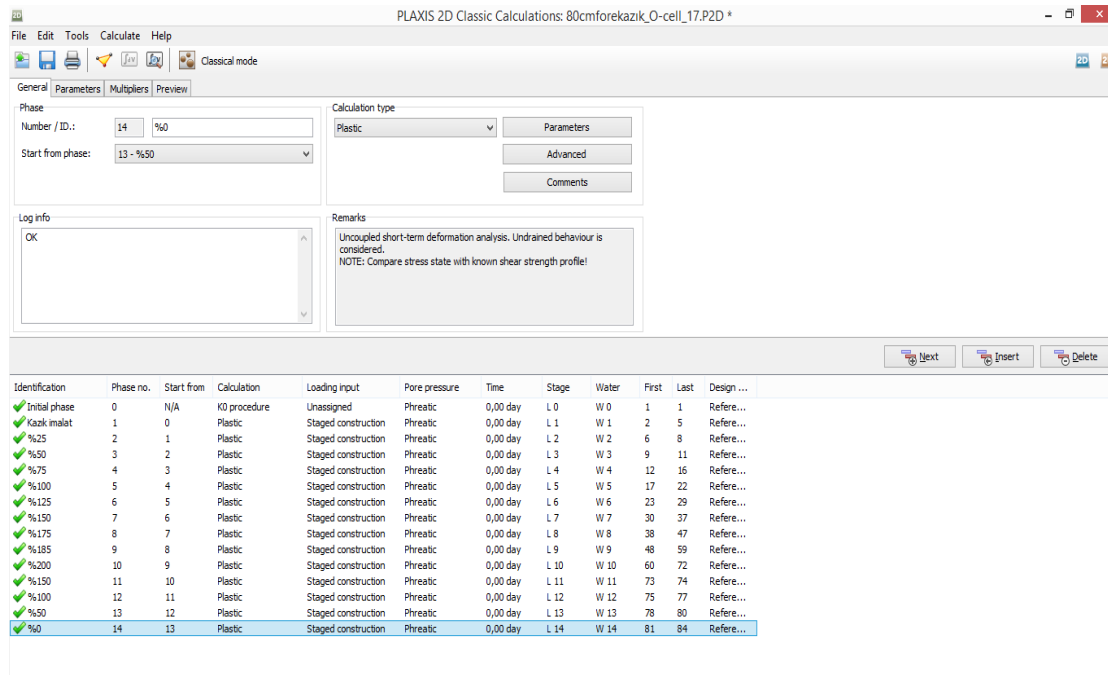
Modele zemin ve kazık elemanlarının atanması, kazığa etkiyen test yükünün oluşturulması ve sınır koşullarının tamamlanmasından sonra sonlu elemanlar ağı oluşturularak analiz aşamasına geçilmiştir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken kazığın merkezinden $-x$ ve $+x$ yönünde 10 m mesafede ve kazık alt kotundan 30 m mesafede gerilmelerin daha fazla olacağı düşünülerek sonlu elemanlar ağı sıklaştırılmış ve optimum sonlu elemanlar ağı ile etkin çözüme ulaşılması sağlanmıştır. Modelde oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı Şekil 6.39’da verilmiştir.



Şekil 6.39 : Deney – 2, sonlu elemanlar ağı.

6.3.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasından sonra iki yönlü statik yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla hesap adımlarına geçilmiştir. Analiz adımlarında ilk olarak zeminin başlangıç koşullarında kendi ağırlığı altında yüklenmiş ve sonucunda oluşturduğu deformasyonlar sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Initial phase*” olarak tanımlanmıştır. Daha sonra sahada imalatı gerçekleştirilen test kazığı, modelde tanımlanarak imalat sırasında kazığın kendi ağırlığı altında oluşan deformasyonlar hesaplanarak sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Kazık imalat*” olarak tanımlanmıştır. Kazık yükleme deneyinde kazığa etkiyen yük, analizler sırasında da yükleme prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 9.0 MN’luk test yükü 9 eşit yük kademesinde kazığa etkilmiş ve test yükü 4 eşit kademede boşaltılarak elde edilen deplasmanlar gözlenmiştir. Analizlerde gerçekleştirilen hesap adımları Şekil 6.40’ta verilmiştir.



Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Pore pressure	Time	Stage	Water	First	Last	Design ...
Initial phase	0	N/A	K0 procedure	Unassigned	Phreatic	0,00 day	L 0	W 0	1	1	Refere...
Kazık imalat	1	0	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 1	W 1	2	5	Refere...
%25	2	1	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 2	W 2	6	8	Refere...
%50	3	2	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 3	W 3	9	11	Refere...
%75	4	3	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 4	W 4	12	16	Refere...
%100	5	4	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 5	W 5	17	22	Refere...
%125	6	5	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 6	W 6	23	29	Refere...
%150	7	6	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 7	W 7	30	37	Refere...
%175	8	7	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 8	W 8	38	47	Refere...
%185	9	8	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 9	W 9	48	59	Refere...
%200	10	9	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 10	W 10	60	72	Refere...
%150	11	10	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 11	W 11	73	74	Refere...
%100	12	11	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 12	W 12	75	77	Refere...
%50	13	12	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 13	W 13	78	80	Refere...
%60	14	13	Plastic	Staged construction	Phreatic	0,00 day	L 14	W 14	81	84	Refere...

Şekil 6.40 : Deney – 2, hesap adımları.

6.3.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi

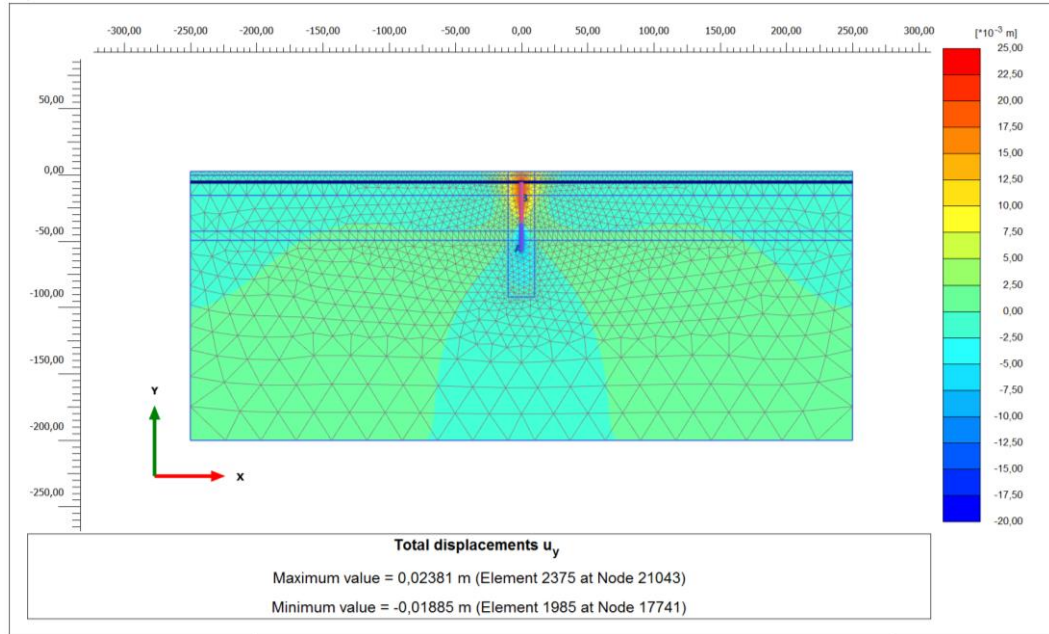
Sahada fore kazık üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D’de modellenerek analiz edilmiştir. Modellenen kazığa iki yönlü statik yükleme deneyinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma kademeleri uygulanarak oluşan deplasmanlar kayıt altına alınmıştır. İlk olarak, kazık kapasitesi hesabında kullanılan zemin parametreleri yardımıyla analizler

gerçekleştirilmiştir. $SPT-(N_1)_{60}$ değerlerinin derinlikle değişimine bağlı olarak zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir. Zemin kesitinde yer alan kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü hesabında $E = 400 \cdot c_u$ (Poulos ve Davis, 1980) önerisi kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizler SEM-1 olarak adlandırılmıştır. SEM-1’de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.29’da verilmiştir.

Çizelge 6.29 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz deplasmanları.

Kot (m - m)	SEM-1							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c_u (kPa)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Kazık Üstü
(-2.5) - (-11.00)	Yumuşak Kil	30	10.000	30.000	18.5	200	280	26.50	18.85	23.81
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19					
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	160	64.000	192.000	20	280	340			
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19					
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	100.000	300.000	21					

SEM-1 analiz sonucunda, test yükünde (9.0 MN) kazık alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 18.85 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık üst parçasında ise 26.50 mm deplasman gözlenmiştir. Kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 23.81 mm’dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.41’de verilmiştir.



Şekil 6.41 : SEM-1, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.

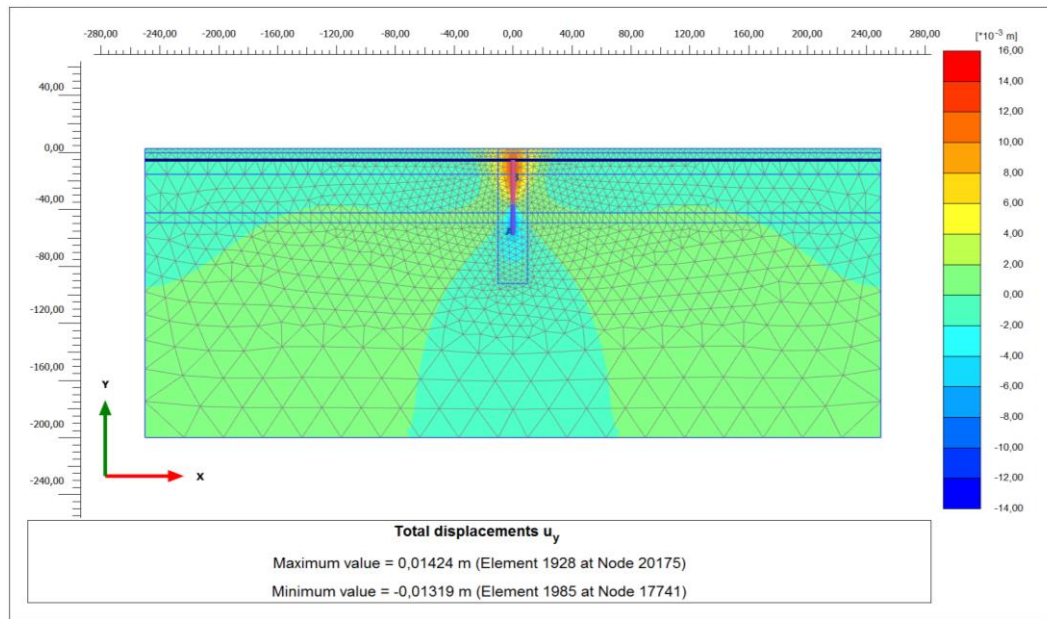
SEM-1 analizi sonucunda kazıkta oluşan deplasman değeri, sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda gözlenen deplasman değerinden daha

büyükür. Kazık üst parçasında, sahada gerçekleştirilen iki yönü statik yükleme deneyinde 3.64 mm deplasman gözlenirken, SEM-1 analizi sonucunda oluşan deplasman 26.50 mm'dir. Bu duruma sebep olarak modelde tanımlanan zemin parametrelerin gerek saha koşullarında gerekse literatür değerlerine göre düşük olmasıdır. SEM-1 analizine göre daha yüksek zemin parametreleri ile SEM-2 analizi gerçekleştirilmiştir. Zemin kesitinde yer alan kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü değerleri için $E = 600c_u$ (Bowles, 1988) önerisi kullanılmıştır. SEM-2'de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.30'da verilmiştir.

Çizelge 6.30 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	Tabaka Adı	c_u (kPa)	SEM-2					Deplasman (mm)		
			E_{s0}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Kazık Üstü
(-2.5) - (-11.00)	Yumuşak Kil	30	10.000	30.000	18.5	125	200	16.78	13.19	14.02
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19					
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	160	96.000	288.000	20	200	314			
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19					
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	150.000	450.000	21					

SEM-2 analiz sonucunda, test yükünde (9.0 MN) kazık alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 13.19 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık üst parçasında ise 16.78 mm deplasman gözlenmiştir. Kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 14.02 mm'dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.42'de verilmiştir.



Şekil 6.42 : SEM-2, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.

SEM-2 analizi sonucunda kazık üst parçasında meydana gelen deplasman değeri (16.78 mm), sahada gerçekleştirilen iki yönü statik yükleme deneyinde gözlenen deplasman (3.64 mm) değerinden daha fazla oluşmuştur. SPT-(N₁)₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi dikkate alınıp (Şekil 6.5) drenajsız kayma mukavemeti değeri için (Sowers, 1979) tarafından önerilen SPT-(N₁)₆₀ - c_u ilişkisinde tabakaların drenajsız kayma mukavemeti parametreleri arttırılarak SEM-3 ve SEM-4 analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM-3 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı E =400.c_u (Poulos ve Davis, 1980) önerisi ile yapılmıştır. SEM-3 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.31’de verilmiştir.

Çizelge 6.31 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	SEM-3							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c _u (kPa)	E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	T _{üst,maks} (kN/m)	T _{alt,maks} (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Kazık Üstü
(-2.5) - (-11.00)	Yumuşak Kil	30	10.000	30.000	18.5	200	280	15.18	12.90	12.80
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	160	64.000	192.000	19					
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	225	90.000	270.000	20	280	340			
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	40.000	120.000	19					
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	108.000	324.000	21					

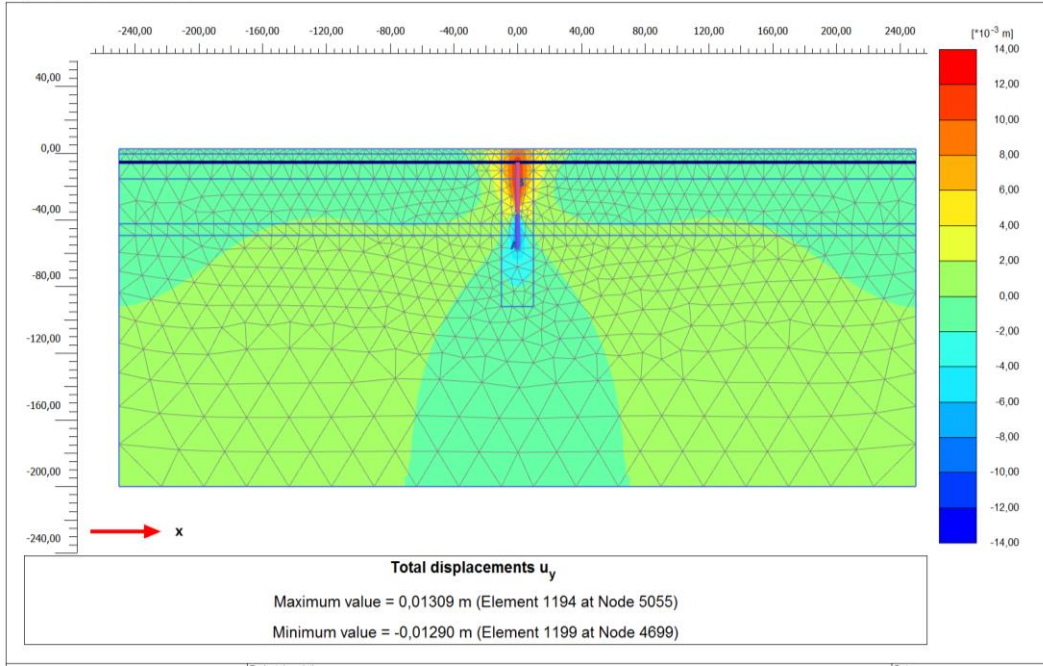
SEM-3 analiz sonucunda, test yükünde (9.0 MN) kazık alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 12.90 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık üst parçasında ise 15.18 mm deplasman gözlenmiştir. Kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 12.80 mm’dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizeler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.43’te verilmiştir.

SEM-4 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı E =600.c_u (Bowles, 1988) önerisi ile yapılmıştır. SEM-4 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.32’de verilmiştir.

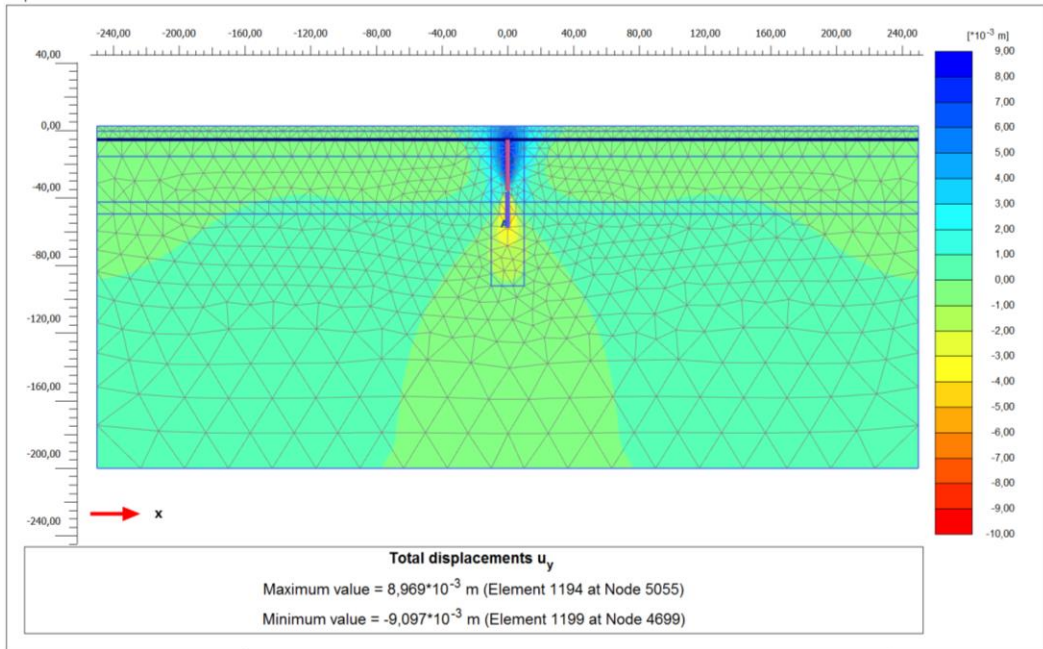
Çizelge 6.32 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	SEM-4							Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c _u (kPa)	E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	T _{üst,maks} (kN/m)	T _{alt,maks} (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Kazık Üstü
(-2.5) - (-11.00)	Yumuşak Kil	30	10.000	30.000	18.5	200	280	10.80	9.10	8.46
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı Kil	160	96.000	288.000	19					
(-26.00) - (-53.00)	Katı Kil	225	135.000	405.000	20	280	340			
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı Kil	100	60.000	180.000	19					
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	162.000	486.000	21					

SEM-4 analiz sonucunda, test yükünde (9.0 MN) kazık alt parçasında meydana gelen deplasmanlar 9.1 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık üst parçasında ise 10.80 mm deplasman gözlenmiştir. Kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 8.46 mm'dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.44'te verilmiştir.



Şekil 6.43 : SEM-3, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.



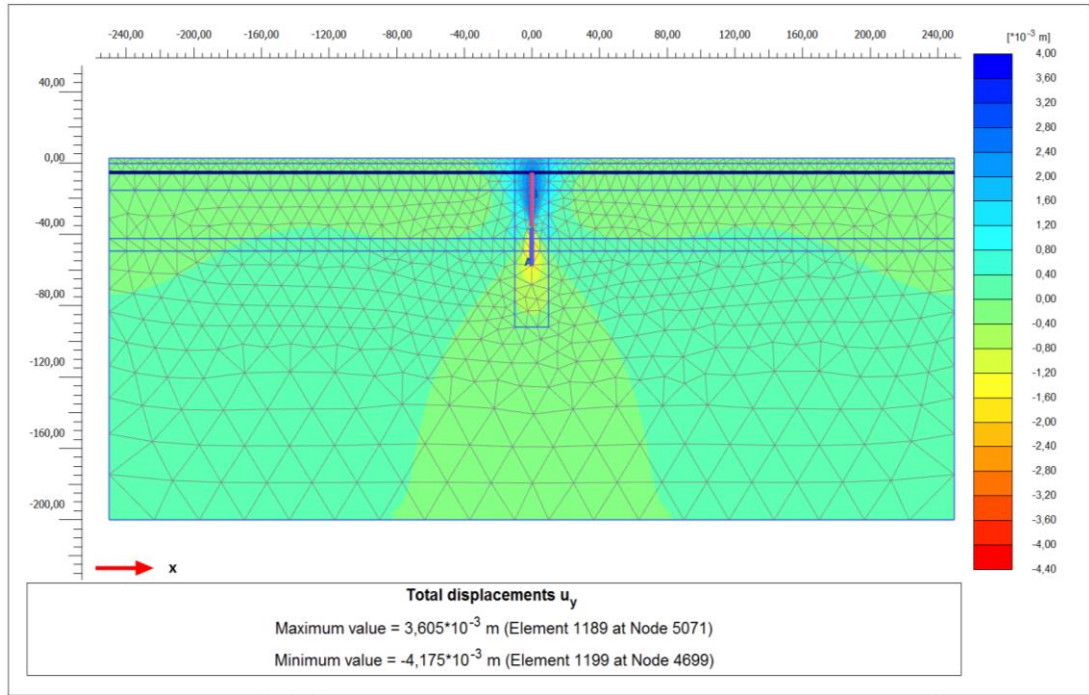
Şekil 6.44 : SEM-4, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.

SEM – 5 analizinde, sahada gözlenen deplasman değerlerine ulaşmak için Bowles (1988) tarafından önerilen kil zeminlerde $I_p < 30$ olması durumunda $E = 1500c_u$ yaklaşımı dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. SEM – 5 analizi parametreleri ve analiz sonucu elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.33'te verilmektedir.

Çizelge 6.33 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

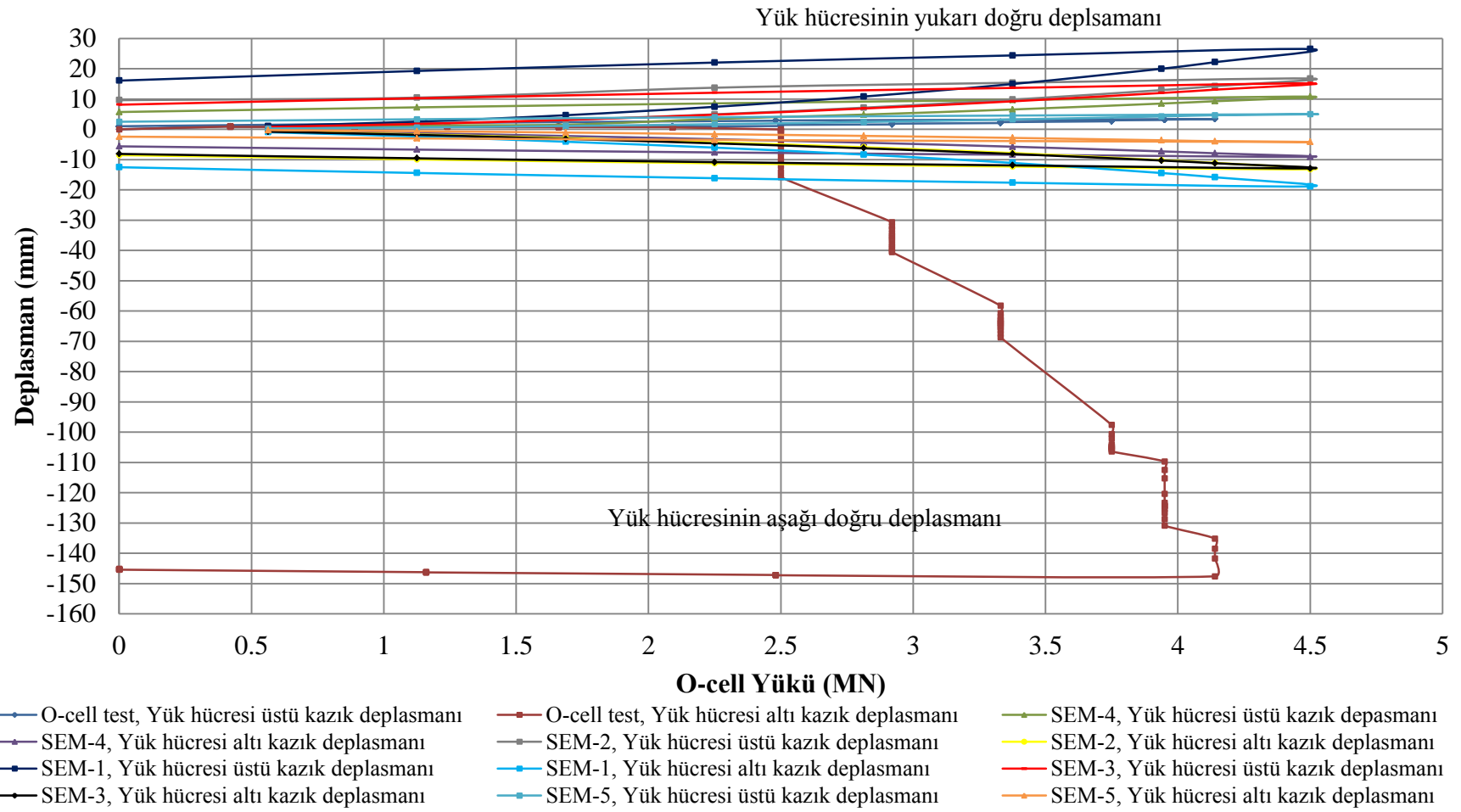
Kot (m - m)	Tabaka Adı	SEM-5						Deplasman (mm)		
		c_u (kPa)	E (kN/m ²)	E_{50} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{skin\ top}$ (kN/m)	$T_{skin\ bot}$ (kN/m)	Maksimum Yükte O-cell üstü	Maksimum yükte O-cell altı	Kazık Üstü
(-2.5) - (-11.00)	Yumuşak kil	30	10000	30000	18.5	200	280	5	4.176	2.91
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	160	240000	720000	19					
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	225	337500	1012500	20	280	340			
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	150000	450000	19					
(-60.00) - (-80.00)	Sert Kil	270	405000	1215000	21					

SEM-5 analiz sonucunda, test yükünde (9.0 MN) kazık alt parçasında meydana gelen deplasman 4.18 mm olarak gözlenmiştir. Yük hücresinin üst kısmında yer alan kazık üst parçasında ise 5 mm deplasman gözlenmiştir. Kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 2.91 mm'dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.45'te verilmiştir. SEM ile yapılan analizler sonucunda kazık boyunca test yükünde elde edilen deplasman, yük ve çevre sürtünme kuvveti dağılımı Plaxis çıktıları Ek B'de verilmektedir.



Şekil 6.45 : SEM-5, test yükünde (%200) oluşan deplasmanlar.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük – deplasman eğrisi Şekil 6.46'da verilmiştir. Şekil 6.46'da görüldüğü üzere, SEM ile yapılan nümerik analizler sonucunda kazık üst ve alt parçasında gözlenen değerler, arazide kazık üzerinde gerçekleştirilen O-cell deneyinde elde edilen deplasman değerlerine yaklaşmaktadır. Elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri için, SPT değerlerinin derinlikle dağılımına göre yapılan analizler sonucunda kazık üst parçasının deplasmanı 26.5 mm ile 5 mm arasında değişmektedir. Fore kazık üzerinde arazide gerçekleştirilen deney sonucunda kazık üst parçası deplasmanı maksimum 4.14 MN yük altında 4.76 mm olarak gözlenmiştir. SEM ile yapılan analizlerde ise maksimum 4.5 MN yük altında elde edilen deplasman değerleri Şekil 6.46'da verilmektedir. SEM ile yapılan nümerik analizlerde kazık alt parçası deplasmanı 18.85 mm ile 4.18 mm arasında değişmektedir. Fore kazık üzerinde arazide gerçekleştirilen deneyde kazık alt parçasının 147.63 mm deplasman yaptığı görülmektedir. Arazide elde edilen bu deplasman değeri kazık alt parçasının göçtüğüne işaret etmektedir.



Şekil 6.46 : Test ve analiz sonucu elde edilen yük – deplasman eğrileri.

Sahada kazık imalatı sırasında belirlenen kotlara teşkil edilen gerilme ölçerler yardımıyla deney sırasında gözlenen mobilize olan çevre sürtünme değerleri modelde de aynı kotlarda tanımlanarak analizler sırasında kazık alt ve üst parçasında da gözlenmiştir. SEM – 1’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.34’te verilmektedir.

Çizelge 6.34 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM-1										
Test Yüğü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	60.85	24.67	25.15	49.86	64.09	2.16	3.95	11.57	26.18	68.07
100%	121.55	46.58	48.31	94.91	113.39	14.49	16.01	36.24	70.34	155.70
150%	168.87	70.43	74.46	152.02	192.16	31.15	32.38	69.33	125.18	155.70
200%	168.87	117.71	107.15	215.31	241.23	55.89	56.22	124.15	146.47	155.70
Test yüğü (%)	Deplasman (mm)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	2.293	2.180	2.136	2.028	1.954	2.086	2.117	2.181	2.315	2.462
100%	5.838	5.583	5.484	5.234	5.064	6.400	6.470	6.617	6.922	7.252
150%	10.772	10.353	10.189	9.773	9.496	13.217	13.339	13.594	14.126	14.686
200%	18.414	17.801	17.561	16.952	16.571	23.864	24.057	24.470	25.330	26.146
Test yüğü (%)	Yük (kN)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	796.16	618.51	584.51	482.18	197.79	65.92	169.93	321.86	571.65	871.73
100%	1697.82	1298.14	1212.48	956.44	374.28	148.53	354.50	673.50	1220.41	1879.70
150%	2719.87	2093.59	1950.77	1508.83	520.66	249.20	593.86	1140.28	2071.53	3006.66
200%	3827.05	3034.18	2820.10	2153.05	595.25	383.33	935.34	1825.11	3190.24	4133.13

Çizelge 6.34’te verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 8) test yükünde (%200) kazık alt parçasında tamamen mobilize olduğu görülmektedir. 9 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci (155.70 kPa), sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde 9 no’lu gerilme ölçer seviyesinde gözlenen değere (160 kPa) yakındır. Kazık üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 9) sahada mobilize olan birim sürtünme direnci 160 kPa iken, numerik analizlerde 155.70 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 8) sahada mobilize olan birim sürtünme direnci 90 kPa iken, numerik analizlerde 168.87 kPa olarak elde edilmiştir.

GÖ – 9 seviyesinde, sahada gerçekleştirilen deney sırasında test yükünde gözlenen kazık üst parçası deplasmanı 3.15 mm iken SEM – 1 analizi sonrasında elde edilen kazık üst parçası deplasmanı 26.15 mm’dir. GÖ – 8 seviyesinde kazık alt parçasında sahada 147.48 mm deplasman gözlenirken analizler sonrasında kazık alt parçasının

18.41 mm deplasman değerine ulaştığı Çizelge 6.31’de görülmektedir. Sahada kazık alt parçasının test yükünde (9.0 MN) yapmış olduğu 147.48 mm’lik deplasman değeri kazık alt parçasının göçtüğünü kanıtlamaktadır. Kazık alt parçasının yapmış olduğu deplasman hem yük hücresinin maksimum açılımına (150 mm) ulaşmış, hem de kabul edilebilir oturma sınırını (%10D) aşmıştır.

SEM – 2’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.35’te verilmektedir.

Çizelge 6.35 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM-2										
Test Yüğü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	63.15	25.04	25.40	49.45	61.58	1.56	5.09	10.93	26.12	70.31
100%	125.53	47.47	49.07	95.05	110.07	15.23	21.98	34.46	69.51	155.70
150%	168.87	71.91	75.47	152.08	186.82	33.80	44.69	65.72	122.48	155.70
200%	168.87	123.84	109.21	215.24	241.23	60.64	76.93	111.26	146.47	155.70
Test Yüğü	Deplasman (mm)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	1.60	1.49	1.45	1.34	1.27	1.27	1.30	1.36	1.50	1.64
100%	4.10	3.84	3.75	3.50	3.33	3.90	3.98	4.14	4.45	4.78
150%	7.55	7.09	6.93	6.52	6.25	8.00	8.14	8.42	8.96	9.52
200%	12.76	12.14	11.90	11.30	10.92	14.08	14.29	14.73	15.56	16.42
Test Yüğü	Yük (kN)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	784.09	600.07	565.36	462.86	189.05	61.17	166.36	312.28	558.2	862.83
100%	1690.77	1278.67	1191.3	932.39	362.62	157.14	377.88	684.84	1217.19	1879.65
150%	2468.84	2068.66	1926.15	1496.92	510.56	274.88	652.87	1176.67	2075.78	3006.77
200%	3822.81	3027.61	2807.8	2137.8	595.16	428.99	1032.66	1864.04	3190.21	4133.05

Çizelge 6.35’te verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 8) test yükünde (%200) kazık alt parçasında tamamen mobilize olduğu görülmektedir. Kazık üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 9) mobilize olan birim sürtünme direnci 155.70 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 8) mobilize olan birim sürtünme direnci 168.87 kPa olarak elde edilmiştir.

SEM – 2 analizi sonrasında GÖ – 9 seviyesinde elde edilen kazık üst parçası deplasmanı 16.42 mm’dir. GÖ – 8 seviyesinde kazık alt parçası deplasmanı 12.76 mm olduğu Çizelge 6.32’de görülmektedir. SEM – 2 sonucunda elde edilen kazık üst parçası deplasmanı sahada gözlenen kazık üst parçası deplasman değerinden yüksek olduğu için daha yüksek parametreler seçilerek SEM – 3, 4 ve 5 analizleri gerçekleştirilmiştir.

SEM – 3’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.36’da verilmektedir.

Çizelge 6.36 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM-3										
Test Yüğü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	65.73	20.07	21.56	50.22	58.16	0.00	2.98	10.26	25.95	75.11
100%	134.79	37.73	41.07	95.06	101.50	11.40	14.13	31.47	67.31	167.76
150%	200.57	55.24	62.51	151.18	161.89	25.44	28.32	58.74	116.11	219.13
200%	227.93	74.88	86.62	222.98	243.93	43.51	46.18	92.56	175.96	219.13
Test Yüğü	Deplasman (mm)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	1758.00	1659.00	1622.00	1529.00	1465.00	1350.00	1378.00	1435.00	1557.00	1696.00
100%	4440.00	4216.00	4132.00	3918.00	3771.00	3880.00	3945.00	4076.00	4350.00	4654.00
150%	7848.00	7485.00	7347.00	6996.00	6757.00	7681.00	7789.00	8010.00	8472.00	8978.00
200%	12491.00	11965.00	11765.00	11251.00	10906.00	12886.00	13048.00	13383.00	14079.00	14873.00
Test Yüğü	Yük (kN)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	718.13	522.98	496.46	413.07	180.11	52.27	145.20	283.37	524.51	835.89
100%	1539.92	1100.65	1029.83	813.70	337.03	130.71	313.88	594.17	1102.80	1765.32
150%	2437.06	1756.77	1637.63	1266.54	483.34	218.57	515.65	979.26	1818.10	2867.53
200%	3444.87	2524.27	2350.85	1796.40	636.35	325.60	768.15	1462.19	2702.67	3993.80

Çizelge 6.36’da verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, yük hücresine yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 8) test yükünde (%200) kazık alt parçasında tamamen mobilize olduğu görülmektedir. Kazık üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 9) mobilize olan birim sürtünme direnci 219.13 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 8) mobilize olan birim sürtünme direnci 227.93 kPa olarak elde edilmiştir.

SEM – 3 analizi sonrasında GÖ – 9 seviyesinde elde edilen kazık üst parçası deplasmanı 14.87 mm’dir. GÖ – 8 seviyesinde kazık alt parçası deplasmanı 12.49 mm olduğu Çizelge 6.36’da görülmektedir.

SEM – 4 ve SEM – 5’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.37 ve Çizelge 6.38’de verilmektedir.

Çizelge 6.37 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM-4										
Test Yüğü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	68.27	20.16	21.58	49.20	55.32	0.00	2.93	9.53	26.46	79.04
100%	139.40	37.96	41.28	93.70	96.91	9.86	18.15	30.50	68.87	176.43
150%	207.59	55.66	62.98	149.30	154.52	23.27	37.64	57.98	119.86	219.13
200%	227.93	76.14	87.60	221.63	236.15	40.76	62.66	92.77	187.44	219.13
Test Yüğü	Deplasman (mm)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	1.21	1.11	1.08	0.99	0.93	0.86	0.88	0.94	1.05	1.18
100%	3.07	2.85	2.77	2.57	2.43	2.50	2.56	2.68	2.95	3.25
150%	5.45	5.09	4.95	4.61	4.38	5.02	5.12	5.33	5.78	6.28
200%	8.69	8.17	7.97	4.74	7.13	8.51	8.66	8.98	9.67	10.50
Test Yüğü	Yük (kN)									
	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9
50%	701.54	500.54	473.87	406.25	170.29	45.79	131.63	260.62	500.30	821.90
100%	1517.37	1066.33	994.85	779.95	320.59	120.18	291.83	560.8	1070.33	1757.23
150%	2416.6	1716.36	1598.1	1227.99	469.18	204.13	485.83	936.48	1785.96	2867.00
200%	3432.67	2470.26	2315.98	1759.52	621.19	308.13	734.04	1416.71	2690.87	3994.00

Kazık üst parçasında yük hücreğine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 9) mobilize olan birim sürtünme direnci 219.13 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt parçasında yük hücreğine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 8) mobilize olan birim sürtünme direnci 227.93 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 4 analizi sonrasında GÖ – 9 seviyesinde elde edilen kazık üst parçası deplasmanı 10.50 mm’dir. GÖ – 8 seviyesinde kazık alt parçası deplasmanı 8.69 mm olduğu Çizelge 6.37’de görülmektedir.

Çizelge 6.38 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM-5										
Test Yüğü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1
50%	3.26	1.10	6.46	27.45	93.11	77.19	19.89	21.49	45.36	45.36
100%	4.77	12.12	26.74	74.25	218.04	156.77	38.99	42.18	89.13	81.17
150%	16.23	29.64	54.75	135.28	218.84	227.59	58.09	65.25	143.24	126.53
200%	28.73	49.19	86.26	209.29	218.84	227.59	80.37	89.13	204.51	189.39
Test Yüğü	Deplasman (mm)									
	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1
50%	0.28	0.30	0.34	0.43	0.55	0.54	0.46	0.43	0.36	0.31
100%	0.88	0.92	1.02	1.24	1.52	1.42	1.22	1.15	0.97	0.86
150%	1.84	1.92	2.10	2.50	3.00	2.54	2.20	2.08	1.78	1.57
200%	2.94	3.06	3.32	3.92	4.64	3.79	3.30	3.12	2.68	2.39
Test Yüğü	Yük (kN)									
	GÖ-16	GÖ-15	GÖ-13	GÖ-11	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-3	GÖ-1
50%	27.90	91.00	191.00	416.50	771.00	641.00	421.00	394.00	318.00	137.00
100%	88.00	222.80	451.80	958.40	1739.00	1441.00	947.00	872.00	660.00	264.00
150%	161.80	393.40	797.00	1681.00	2867.00	2343.00	1577.00	1450.00	1082.00	417.00
200%	241.00	580.00	1177.00	2502.00	3913.00	3615.00	2211.00	2060.00	1521.00	538.00

Kazık üst parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 9) mobilize olan birim sürtünme direnci 218.84 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt parçasında yük hücresine en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 8) mobilize olan birim sürtünme direnci 227.59 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 5 analizi sonrasında GÖ – 9 seviyesinde elde edilen kazık üst parçası deplasmanı 4.64 mm'dir. GÖ – 8 seviyesinde kazık alt parçası deplasmanı 3.79 mm olduğu Çizelge 6.38'de görülmektedir.

Sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde yük hücresi tarafından kazığa etkiyen yük 4.14 MN'a ulaştığında yük artımı olmaksızın kazık alt parçasında deplasmanların sabitlenmediği gözlenmiştir. Bu sebeple deney, 4.14 MN deney sonlandırılmıştır. 4.14 MN yük altında kazık alt parçasının deplasmanı 147.63 mm olarak gözlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen numerik analizlerde ise kazık alt parçasında göçme gözlenmemiş ve kazık alt parçasının maksimum deplasmanı 18.85 mm olarak bulunmuştur. Sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde kazık alt parçasında yük artımı olmaksızın deplasman değerlerinin artmasına sebep olarak kazık alt kotunda zemin ile foraj sırasında kullanılan bentonitin çökmesi sonucu karışması ve buna bağlı olarak betonlama işlemi sırasında kazık ucunda düşük dayanımlı betonarme yapının oluştuğu düşüncesini kanıtlar niteliktedir. Ayrıca, Osterberg yük hücresinin alt kısmında kalan kazık parçasının imalatı sırasında kazı çeperinde meydana gelebilecek göçükler kazık bütünlüğünü bozmuş ve dolayısıyla kazığın taşıma kapasitesinin düşmesine sebep olabileceği kanaati oluşmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D'de yapılan numerik analizler ile kazık kapasitesinin iki katına kadar gerçekleştirilen yükleme sonucunda kazık üst parçasında oluşan deplasman değerleri sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinden elde edilen (3.64 mm) deplasman değerlerinden büyüktür. Zemin parametreleri için yapılan yaklaşımlara bağlı olarak gerçekleştirilen 4 adet analiz sonucunda elde edilen deplasman değeri sahada gerçekleştirilen deney sonucu elde edilen deplasman değerinden 2 - 3 kat daha fazla olup yükleme deneyinde göçme kriterini tanımlayan (%10D) limit değerden daha düşüktür. Daha yüksek elastisite modülü değerleri ile yapılan 5. analiz sonucu elde edilen deplasman değerleri sahada yapılan deney sonucu gözlenen deplasmanlara yakın değerler vermektedir.

6.4 Deney – 3, Fore Kazık Geleneksel Statik Kazık Yükleme Deneyi

Proje kapsamında ofis yapısı altında, üst yapıdan gelen yükler ve temel altında oluşan gerilmeler dikkate alınarak yukarıda detayı verilen $\phi 80$ cm çapında yapılması planlanan fore kazıkların taşıma kapasitesinin belirlenmesi ve aynı zamanda saha koşullarındaki performansının gözlenmesi amacıyla geleneksel statik kazık yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Bu bölüm kapsamında, $\phi 80$ cm çapındaki test kazığının, imalat detayı, enstrümantasyonu, yükleme deneyi, deney sonuçları ve sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizlere yer verilmiştir.

6.4.1 Test kazığı özellikleri

Deney kazığı, -11.75 m kotundan başlayarak kayma mukavemeti değerleri farklı olan katı ve sert kil birimlerinden geçerek -59.60 m kotuna ulaşmaktadır. Test kazığı $\phi 80$ cm çapında ve $L = 47.80$ m boyunda imal edilmiştir. Test kazığı imalatı için kullanılan platform kotu -11.35 m'dir. Test kazığının eksenine dik olacak şekilde ve test kazığı ile merkezleri arasında 3D mesafe olan 4 adet, -11.75 m kotundan başlayarak $L = 33.00$ m boyunda $\phi 80$ cm reaksiyon kazıkları imal edilmiştir. Kazıkların imalat sırasında C40 beton kullanılmıştır.

6.4.2 Test kazığı enstrümantasyonu ve imalatı

Geleneksel statik kazık yükleme deneyinin gerçekleştirileceği test kazığı FK-160 no'lu proje kazığı olup reaksiyon kazıkları ise test kazığına merkezleri arası mesafe 3D olacak şekilde proje kazıklarından ayrı olarak imal edilmiştir. Test kazığı ve referans kazıkların planda yerleşimi Şekil 6.47'de verilmiştir.

Deney kazığının gövdesi boyunca, kazık çeperinde meydana gelen gerilmelerin ölçülmesi amacıyla Şekil 6.48'de belirtilen seviyelerde her seviyede üç adet olacak şekilde toplamda 30 adet titreşim telli birim deformasyon ölçerler kazık donatısına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen deformasyon ölçerlerin kazığın betonlanması sırasında zarar görmemesi amacıyla koruma palakaları Şekil 6.49'da gösterildiği gibi kaynatılmıştır.



Şekil 6.49 : Gerilme ölçer ve koruma levhası.

Yükleme sırasında kazığa etkileyen yükün uniform dağılması ve yükün eksantrisine oluşturmada kazığa etkimesi amacıyla 1 m x 1 m boyutlarında kazık üst kotundan itibaren 1 m yüksekliğinde kazık başlığı imal edilmiştir. Kazığın deney sırasında, yük – deplasman davranışının daha doğru gözlenmesi amacıyla kazık başlığının altında yer alan zemin bir miktar kazılarak kazık başlığının yer ile teması kesilmiştir. Hidrolik krikonun düzgün bir yüzey üzerine oturmasını sağlamak amacıyla kazık başlığının üzerine kazık başlığının boyutlarında metal plaka kesilmiştir. HDA-100015 model 1385 cm² çapında 1000 ton kapasiteye sahip hidrolik kriko kazık aksının merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Hidrolik krikonun üzerine test sırasında uygulanan yükün kontrolü için ELC-150S-H model 1000 ton okuma kapasiteli yük hücresi monte edilmiş ve böylece yük okumalarının elektronik olarak alınması sağlanmıştır. Hidrolik kriko ve yük hücresinin deney düzeneğindeki yerleşimi Şekil 6.50’de verilmiştir.

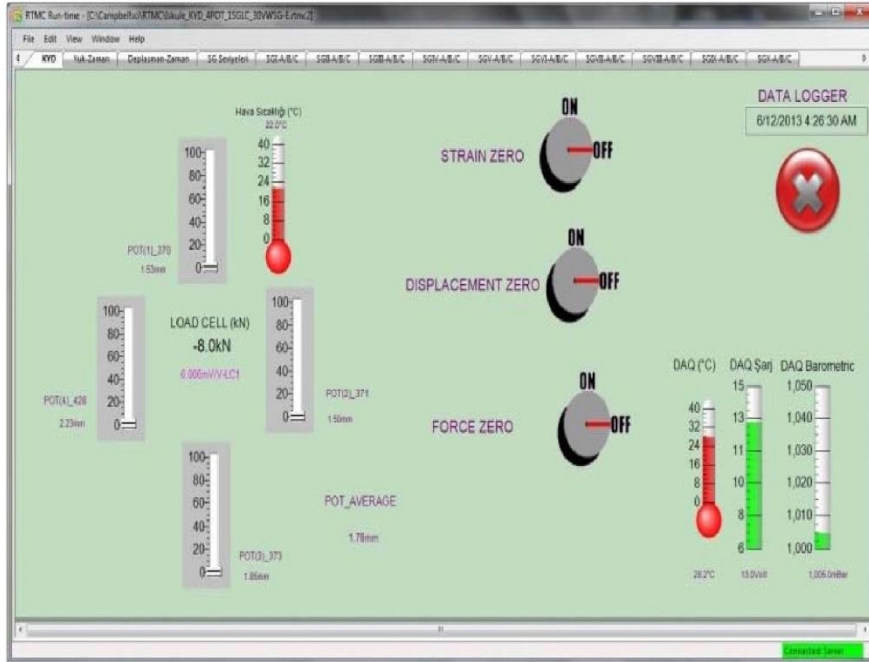


Şekil 6.50 : Hidrolik kriko ve yük hücresi yerleşimi.

Hidrolik kriko ve yük hücresinin montajından sonra test kirişleri yerleştirilmiştir. Test kirişleri, 4 adet referans kazığına kazık imalatı sırasında kazık üst kotundan 2D daha uzun bırakılan kazık donatısına kaynatılarak sabitlenmiştir.

Kazık başlığının 4 kenarına, yükleme sırasında kazıkta meydana gelecek deplasmanların gözlenmesi amacıyla elektronik deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kazık başlığının iki kenarına, bir kenarı sabit diğer kenarı ise hareketli mesnetli rijit çelik profiller ile referans kirişi oluşturulmuştur. 4 adet deplasman ölçer referans kiriş sistemine temas edecek şekilde ayarlanarak okumaların alınması sağlanmıştır.

Kazık donatısına montajı yapılan gerilme ölçerler, elektronik deplasman ölçerler, yük hücresi ve elektrikli pompa elektronik kontrol sistemine bağlanarak deneyin enstrümantasyonu tamamlanmıştır. Şekil 6.51’de ara yüzü gösterilen otomatik veri toplama sistemi her 30 saniyede bir hava sıcaklığı, deplasman ve yük verilerini alarak kaydetmiştir. Deney düzeneği Şekil 6.52’de verilmiştir.



Şekil 6.51 : Elektronik veri toplama sistemi ara yüzü.

Kazık başlığına yerleştirilen referans metreden nivo ile yükleme kademelerinde okumaların alınması sağlanmıştır. Deney düzeneğini oluşturan gerilme ölçer, deplasman ölçer, yük hücresi, hidrolik kriko ve basınç göstergesinin (manometre) kalibrasyon kontrolleri gerçekleştirildikten sonra deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.52 : Deney düzeneği genel görünüşü.

6.4.3 Geleneksel kazık yükleme deneyinin yapılışı

Geleneksel kazık yükleme deneyi, test kazığı ve referans kazıkların yeterli beton dayanımını kazanmasından sonra (28 gün, TS 500) deney yapım yöntemine uygun olarak 11.06.2013 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Deney kazığı, taşıma kapasitesinin (435 ton) 2 katına (870 ton) kadar yüklenmiştir. Yükleme, ASTM D 1143/D 1143M-07 “Procedure A – Quick test” standardına göre Çizelge 6.39’da verilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Yükleme prosedürüne göre test kazığı, taşıma kapasitesinin %5 oranında yük artımlarıyla test yüküne kadar (%200) yüklenmiştir. Her yük kademesinde, yük 10 dk süresince sabit tutularak deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kazık başlığında bulunan 4 adet elektronik deplasman ölçerlerden, otomatik veri alma sistemi her 30 sn’de bir okuma almıştır. Kazık başlığına yerleştirilen referans metreden nivo okumaları alınmıştır. Test yükünde (%200), oturma hızı < 0.25 mm/saat olacak şekilde 60 dakika boyunca yük sabit tutularak deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Test yüküne ulaşıldıktan sonra yük, 10 eşit kademe boşaltılmıştır. Her yük kademesinde 10 dk süresince yük sabit tutularak deplasman okumaları alınmıştır. Yük boşatıldıktan sonra 60 dk. süresince deplasman okumaları elektronik veri ölçer tarafından kaydedilmiştir.

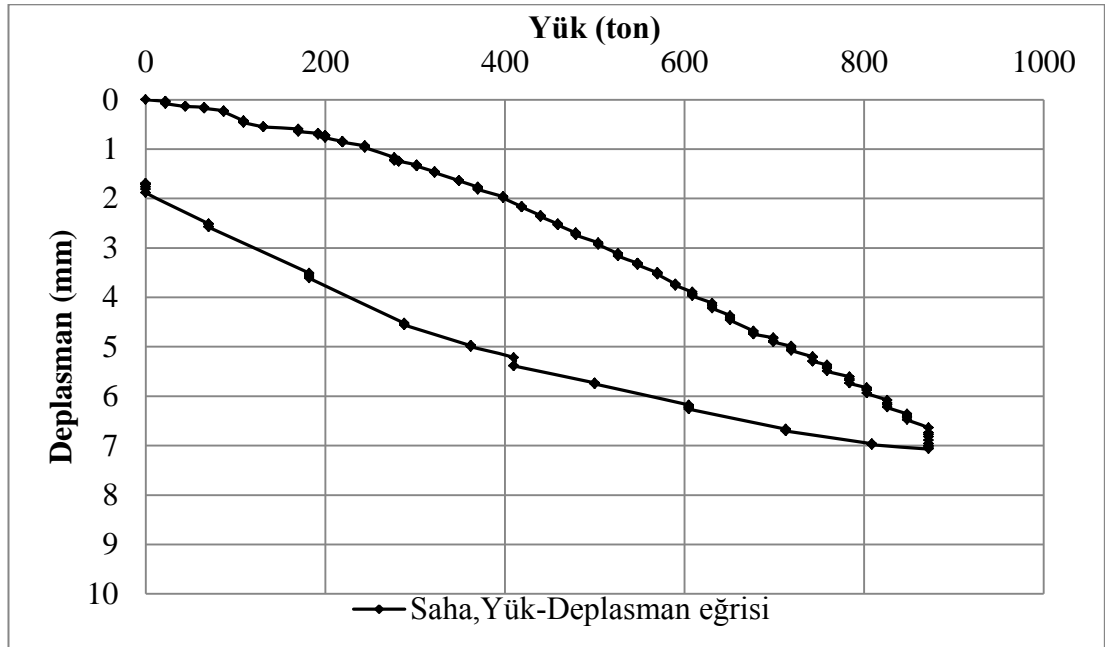
Çizelge 6.39 : Deney - 3, kazık yükleme prosedürü.

Kazık Çapı:		0.8 m				
Kazık boyu		47.80 m				
Nihai taşıma kapasitesi		435 ton				
Test yükü:		870 ton				
Yük Kademesi	No	Basınç (Bar)	Test Yükü (MN)	Test Yükü Yüzdesi (%)	Yük Kademesi Bekleme Kriteri	
					Minimum Bekleme Süresi	Yük kademesi geçme kriteri
L-	0	0	0.00	0	10	N/A
L-	1	16	0.22	5		
L-	2	32	0.44	10		
L-	3	48	0.65	15		
L-	4	64	0.87	20		
L-	5	79	1.09	25		
L-	6	95	1.31	30		
L-	7	111	1.52	35		
L-	8	127	1.74	40		
L-	9	143	1.96	45		
L-	10	159	2.18	50		
L-	11	175	2.39	55		
L-	12	191	2.61	60		
L-	13	207	2.83	65		
L-	14	223	3.05	70		
L-	15	238	3.26	75		
L-	16	254	3.48	80		
L-	17	270	3.70	85		
L-	18	286	3.92	90		
L-	19	302	4.13	95		
L-	20	318	4.35	100		
L-	21	334	4.57	105		
L-	22	350	4.79	110		
L-	23	366	5.00	115		
L-	24	382	5.22	120		
L-	25	397	5.44	125		
L-	26	413	5.66	130		
L-	27	429	5.87	135		
L-	28	445	6.09	140		
L-	29	461	6.31	145		
L-	30	477	6.53	150		
L-	31	493	6.74	155		
L-	32	509	6.96	160		
L-	33	525	7.18	165		
L-	34	540	7.40	170		
L-	35	556	7.61	175		
L-	36	572	7.83	180		
L-	37	588	8.05	185		
L-	38	604	8.27	190		
L-	39	620	8.48	195		
L-	40	636	8.70	200	60	Oturma hızı < 0.25 mm/sa
U-	1	572	7.83	180	10	N/A
U-	2	509	6.96	160		
U-	3	445	6.09	140		
U-	4	382	5.22	120		
U-	5	318	4.35	100		
U-	6	254	3.48	80		
U-	7	191	2.61	60		
U-	8	127	1.74	40		
U-	9	640	0.87	20		
U-	10	0	0.00	0		

Deney sırasında deplasman ölçerlerden alınan okumalar ile yük – deplasman eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca kazığın imalatı sırasında Şekil 6.48’de belirtilen seviyelere yerleştirilen gerilme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla mobilize olan çevre sürtünme dirençlerinin yük ile değişimini belirten grafikler elde edilmiştir.

6.4.4 Deney sonuçlarının sunumu ve yorumlanması

Deney, Çizelge 6.39’da verilen yükleme adımlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kazık başlığının 4 kenarına yerleştirilen dijital deplasman ölçerlerden alınan veriler ile kazığın yük altındaki davranışı gözlenmiştir. Test süresince alınan deplasman verileri ile Şekil 6.53’te verilen kazığın üstten yükleme durumundaki yük – deplasman grafiği oluşturulmuştur.



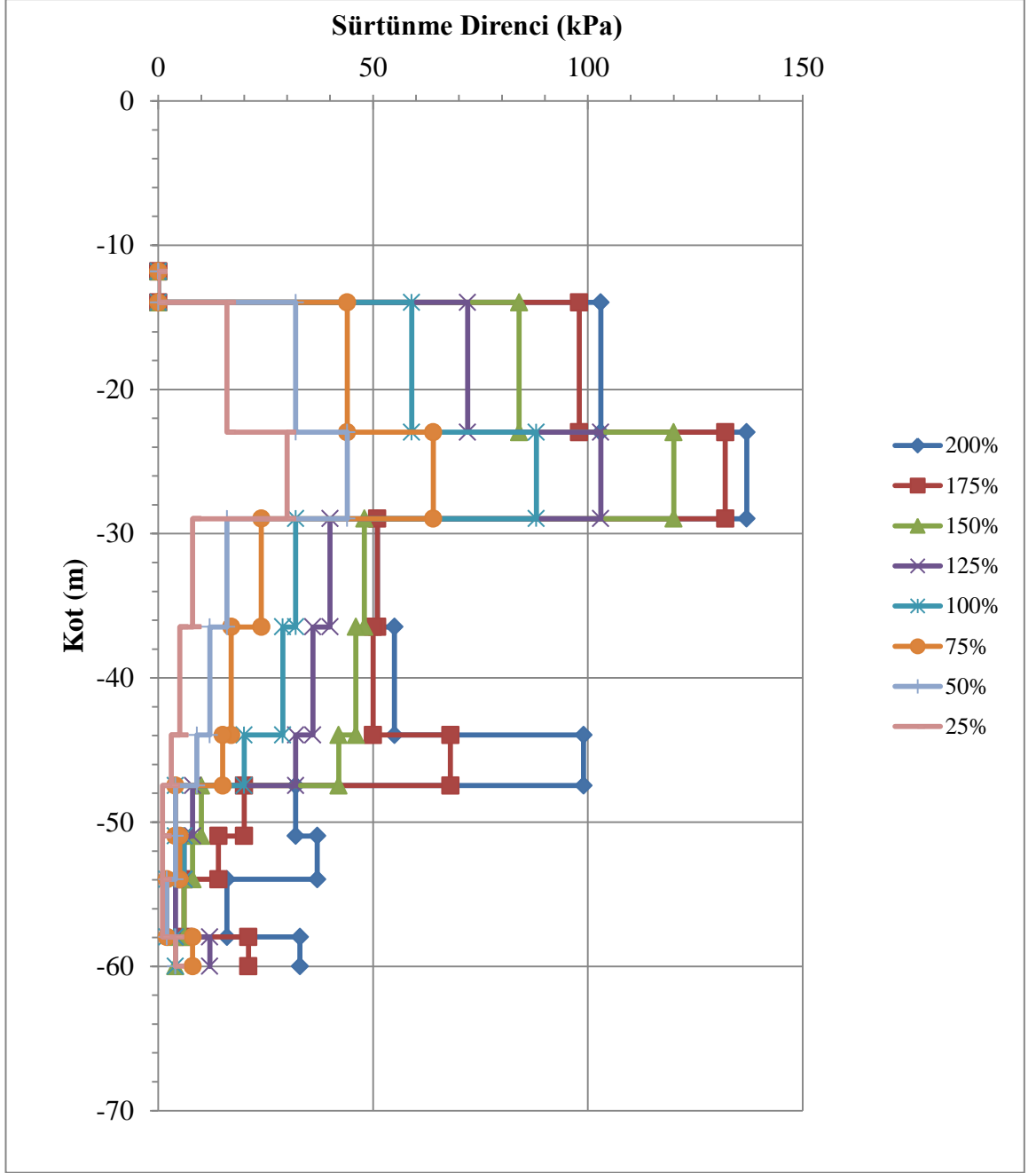
Şekil 6.53 : Deney – 3, yük – deplasman eğrisi.

Test yükünde (8.7 MN), kazık başlığında gözlenen deplasman değeri 7.24 mm’dir. Deney sırasında, test yükünde 60 dakika boyunca yük sabit tutularak deplasmanlar gözlenmiş ve ardından yükün boşaltılma işlemine geçilmiştir. Yük, 5 eşit kademede boşaltılmıştır. Yükün boşaltılmasından sonra, kazıkta gözlenen kalıcı deplasman değeri 1.86 mm olmuştur (Şekil 6.53). Deney kazığının enstrümantasyonu sırasında 10 seviyede toplam 30 adet yerleştirilen gerilme ölçerlerden, kazığın yüklenmesi sırasında oluşan birim çevre sürtünme değerleri kaydedilmiştir. Test yükünde (8.7 MN) gerilme ölçer seviyelerinde gözlenen birim sürtünme değerleri Çizelge 6.40’ta verilmiştir.

Çizelge 6.40 : Maksimum yükte gerilme ölçer seviyelerinde gözlenen birim sürtünme değerleri.

Gerilme Ölçer No	Kot (m - m)	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)
GÖ-10 - GÖ-8	-11.83 / -22.96	100
GÖ-8 - GÖ-7	-22.96 / -28.96	140
GÖ-7 - GÖ-6	-28.96 / -36.46	50
GÖ-6 - GÖ-5	-36.46 / -43.96	50
GÖ-5 - GÖ-4	-43.96 / -47.46	100
GÖ-4 - GÖ-3	-47.46 / -50.96	30
GÖ-3 - GÖ-2	-50.96 / -54.46	30
GÖ-2 - GÖ-1	-54.46 / -57.96	15

Kazık yükleme deneyi sırasında -13.96 m kotunda yer alan gerilme ölçerden veri aktarımı gerçekleşmediği için -11.83 m ile -13.96 m kotu arasında mobilize olan çevre sürtünme değerleri gözlenememiştir. Maksimum yükte, GÖ – 10 ile GÖ – 7 arasında çevre sürtünme direnci tamamen mobilize olmuştur. Kazığın üstten yüklenmesi sebebiyle kazık boyunca aktarılan yük azalmaktadır. Bu sebeple kazık alt kotuna doğru mobilize olan çevre sürtünme değerleri azalmıştır. Deney sırasında kazık boyunca mobilize olan çevre sürtünme değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 6.54’te verilmiştir. Şekil 6.54’te görüldüğü üzere, kazık üst kotunda gerilme ölçer seviyelerinde ölçülen yük değerinin fazla olmasına bağlı olarak mobilize olan sürtünme direnci değerleri fazladır. Zemin kesitinde, kazık alt kotunda mukavemeti düşük zemin tabakasının yer alması sebebiyle mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri çok düşüktür. Test yükünde - 22.96 m ve - 28.96 m kotunda yer alan GÖ – 7 ve GÖ – 6 gerilme ölçerlerde mobilize olan sürtünme direnci değeri 137 kPa olup, kazık kapasite hesabında kullanılan sürtünme direnci değerine (160 kPa) yakındır.



Şekil 6.54 : Mobilize olan sürtünme direnci değerlerinin derinlikle değişimi.

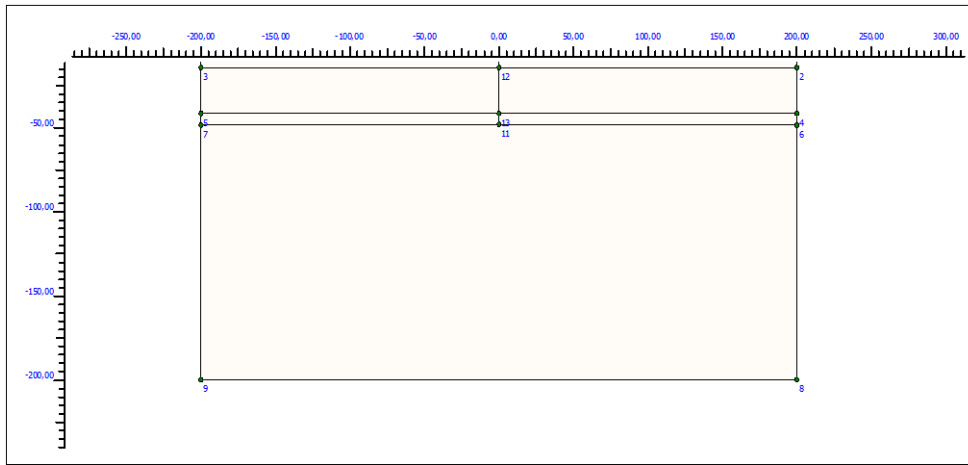
6.4.5 Fore kazık üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinin sonlu elemanar yöntemiyle analizi

Bu bölümde, arazide test kazığı üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizi yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen veriler ışığında sahada gerçekleştirilen teste yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Analizler, Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilmiştir. Testin programda modellenmesinde aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması
- Malzeme parametrelerinin (zemin ve baret) tanımlanması
- Zemin ve baret elemanın modele atanması
- Sonlu elemanlar ağının oluşturulması
- Analiz adımlarına geçilmesi

6.4.5.1 Modelin iki boyutlu olarak oluşturulması

Modelin oluşturulması sırasında, sahadaki gerçekleştirilen deneydeki yük kademelerine uygun olarak kazığa etkiyen yük ile kazıkta ve kazık çevresinde meydana gelen gerilmelerin modelden etkilenmemesi amacıyla model geometrisi x eksenini boyunca 400 m, y eksenini doğrultusunda ise 200 m olarak tanımlanarak test kazığı modelin tam ortasına yerleştirilmiştir. Sahadaki mevcut platform kotu -11.35 m, kazık betonu üst kotu -11.75 m, ve kazık alt kotu -59.60 m olarak modelde tanımlanmıştır. Zemin tabakaları Şekil 6.4'e uygun olarak modelde tanımlanmıştır. Oluşturulan iki boyutlu model Şekil 6.55'te verilmiştir.







Şekil 6.55 : Deney – 3, geometrik model.

Şekil 6.55'te verilen geometrik modelde çizgi ve nokta elemanlar kullanılarak model sınırları, kazık elemanı başlangıç ve bitiş kotları, zemin profilinde yer alan zemin tabakalarının kalınlıkları belirlenmiştir.

6.4.5.2 Malzeme parametrelerinin (zemin ve kazık) tanımlanması

Sahada gerçekleştirilen arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile zemin kesitinde yer alan killi tabakaların mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Arazi araştırmaları sırasında zemin kesitinde 0.00 m kotundan başlayarak 2.5 m kalınlığa ulaşan niteliksiz dolgu ve - 2.5 m kotundan başlayarak 9.0 m kalınlığa ulaşan yumuşak kil tabakası temel tasarımında temel alt kotunun - 14.25 m olarak tasarlanması sebebiyle kaldırılmıştır. Bu sebeple modelde, - 11.35 m platform kotundan başlayarak zemin kesitinde yer alan orta katı, katı ve sert kil tabakaları pekleşen zemin (hardening soil) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Pekleşen zemin modelinin temel üstünlüğü, gerilme izi ve gerilme izinin zemin davranışı ve zemin rijitliğindeki etkisini kapsamaktadır (Lebeau, 2008). Modelde yer alan zemin tabakalarının mühendislik parametrelerinin tanımlanmasında literatürde yer alan amprik bağıntılardan yararlanılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri 5 farklı yaklaşıma göre hesaplanmış ve pekleşen zemin modelinde kullanılan zemin parametreleri Çizelge 6.41’de verilmiştir.

Çizelge 6.41 : Analizlerde kullanılan zemin parametreleri.

Zemin Cinsi		Orta-katı Kil	Orta-katı Kil	Katı Kil	Sert Kil
Zemin Modeli		Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil
Drenaj durumu		Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)	Undrained (B)
Renk					
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	19.00	20.00	21.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00	20.00	21.00	22.00
E_{50}^{ref}	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
c_u	kN/m ²	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5	SEM-1-2-3-4-5
ν_{ur}		0.3	0.3	0.3	0.3
p_{ref}	kN/m ²	100.0	100.0	100.0	100.0

$\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_k$; zeminin kuru birim hacim ağırlığı, $\gamma_{\text{sat}} = \gamma_{\text{doy}}$; zeminin suya doymun birim hacim ağırlığı, E_{50}^{ref} ; deviatörük yükleme sonucu oluşan plastik deformasyon elastisite modülü, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$; sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyon elastisite modülü, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$; elastik boşaltma geri yükleme elastisite modülü, c_u ; dreajsız kayma mukavemeti, p_{ref} ; referans basıncı, ν_{ur} ; poisson oranı.

HS modelde belirtilen elastisite modülleri, sahada meydana gelen deplasmanlar ve yükleme sırasında gerilme ölçer seviyelerinde ölçülen mobilize çevre sürtünme dirençlerinin, analiz sonuçlarında oluşan deplasman ve elde edilen mobilize çevre sürtünme direnci değerlerinin karşılaştırılması amacıyla yapılan parametrik

çalışmalar SEM-1, SEM-2, SEM-3, SEM-4 ve SEM-5 olarak adlandırılmıştır. Her analizde zeminin mühendislik parametreleri için yaklaşım yapılmış ve buna bağlı olarak zemin parametreleri literatürde yer alan amprik bağıntılar yardımıyla oluşturulmuştur. Elde edilen zemin parametre değerleri her analizde farklı olduğu için Çizelge 6.41’de yer alan drenajsız kayma mukavemeti ve elastisite modülü değerleri analizde yapılan yaklaşımlara göre verilmiştir.

Kazık kapasitesinin tamamının çevre sürtünmesi ile sağlandığı dikkate alınarak sürtünme kazığı olarak tasarlanan test kazığı modelde gömülü kazık elemanı olarak tanımlanmıştır. ϕ 80 cm çapında ve 47.80 m boyundaki test kazığının, alt ve üst kotunda yer aldığı zemin tabakası içerisindeki birim çevre sürtünme kapasiteleri ayrı ayrı girilerek yük altındaki davranışı gözlenmiştir. Analizlerde tanımlanan gömülü kazık elemanı özellikleri Çizelge 6.42’de verilmiştir.

Çizelge 6.42 : Gömülü kazık elemanı malzeme özellikleri.

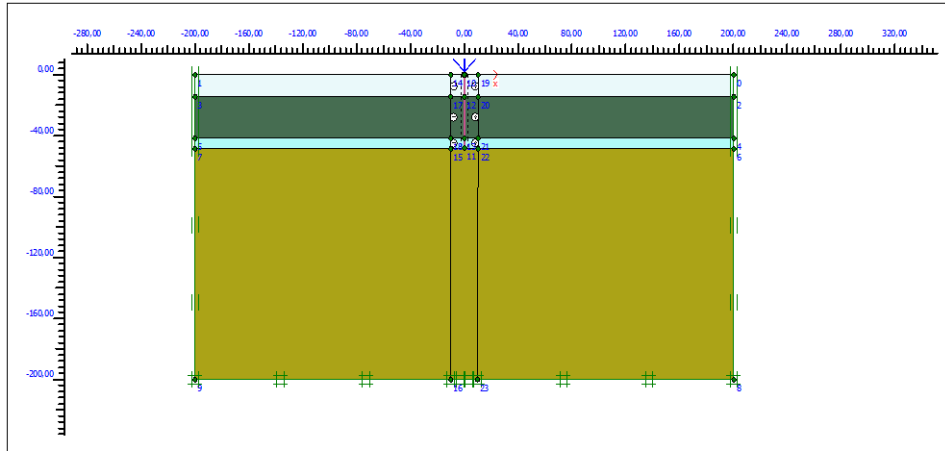
Gömülü kazık elemanı		Fore Kazık
Renk		
E	kN/m ²	34,00E6
γ	kN/m ³	25,00
Kazık tipi		Ön tanımlı
Ön tanımlı kazık tipi		Betonarme dairesel kazık
D	m	0.80
A	m ²	0.5027
I ₃	m ⁴	0.02011
I ₂	m ⁴	0.02011
T _{üst, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5
T _{alt, maks}	kN/m	SEM-1-2-3-4-5
T _{maks}	kN/m	0.00
F _{maks}	kN	0.00

E: kazık elemanı elastisite modülü, γ : kazık elemanı birim hacim ağırlığı, D: kazık çapı, A : kazık kesit alanı, I₃-I₂ : atalet momenti, T_{üst, maks} ; kazık elemanı üst kotu maksimum çevre sürtünme kuvveti, T_{alt, maks} : kazık elemanı alt kotu maksimum çevre sürtünme kuvveti, F_{maks} ; kazık uç kuvveti.

6.4.5.3 Zemin ve kazık elemanın modele atanması

Analizin gerçekleştirilebilmesi amacıyla tanımlanan zemin ve kazık elemanları, sınırları çizilen zemin modeline atanmadan sınır koşulları tanımlanamamaktadır. Bu sebeple belirlenen zemin modeline, saha koşullarına uygun olarak zemin ve kazık elemanları atandıktan sonra modelin sınır koşulları belirlenir. Sınır koşullarının belirlenmesi ve kazığa test sırasında etkiyen yük, modelde kazığın üst kotunda

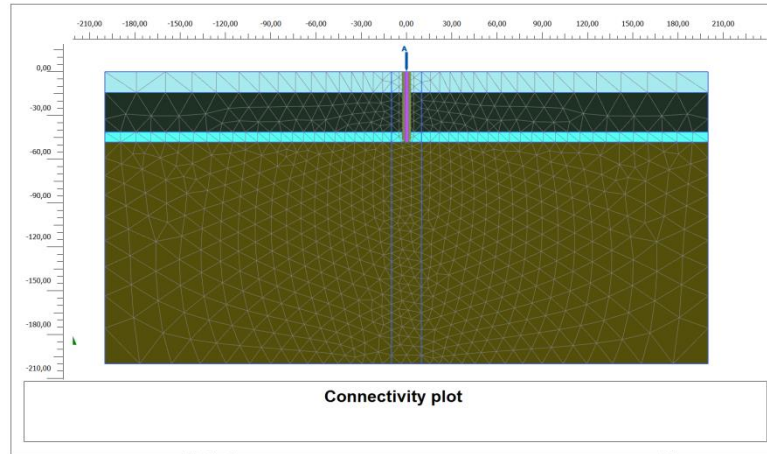
oluşturulduktan sonra sonlu elemanlar ağı oluşturulabilir. Şekil 6.56’da zemin ve kazık elemanı tanımlanmış ve sınır koşulları oluşturulmuş analiz modeli verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde, sahada -2.50 m kotundaki su seviyesi yapılan kazı sırasında düşürüldüğü için platform kotu olan -11.35 m kotunun 1 m altında tanımlanmıştır.



Şekil 6.56 : Deney – 3, zemin ve kazık parametreleri atanmış analiz modeli.

6.4.5.4 Sonlu elemanlar ağının oluşturulması

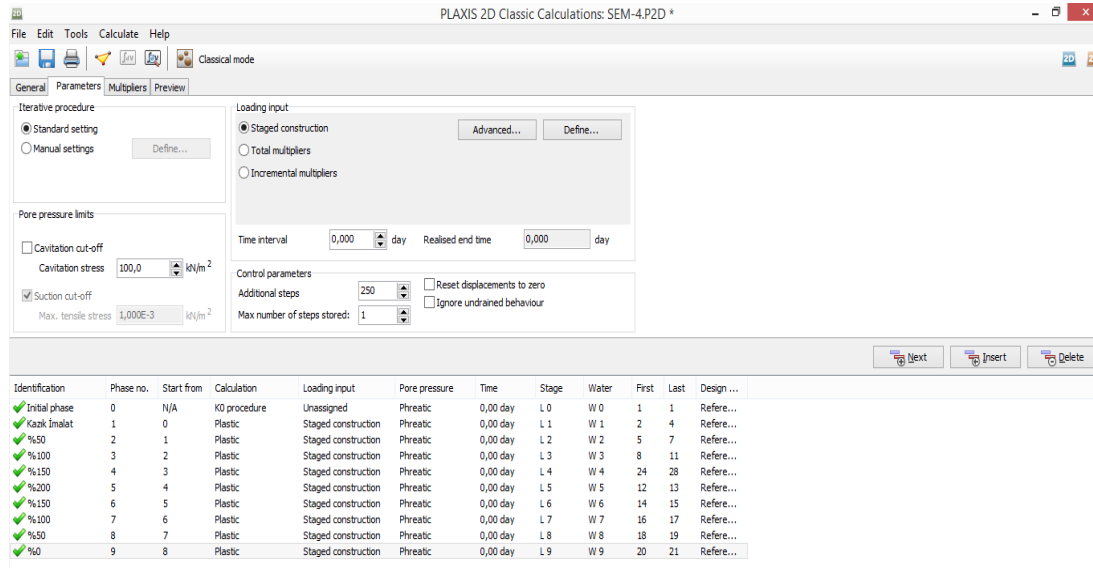
Modele zemin ve kazık elemanlarının atanması, kazığa etkiyen test yükünün oluşturulması ve sınır koşullarının tamamlanmasından sonra sonlu elemanlar ağı oluşturularak analiz aşamasına geçilmiştir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken kazığın merkezinden $-x$ ve $+x$ yönünde 10.0 m mesafede gerilmelerin daha fazla olacağı düşünülerek sonlu elemanlar ağı sıklaştırılmış ve optimum sonlu elemanlar ağı ile etkin çözüme ulaşılması sağlanmıştır. Modelde oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı Şekil 6.57’de verilmiştir.



Şekil 6.57 : Deney – 3, sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş model.

6.4.5.5 Analiz adımlarına geçilmesi

Sonlu elemanlar ağının oluşturulmasından sonra geleneksel kazık yükleme deneyinin sonlu elemanlar metodu ile analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla hesap adımlarına geçilmiştir. Analiz adımlarında ilk olarak zeminin başlangıç koşullarında kendi ağırlığı altında yüklenmiş ve sonucunda oluşturduğu deformasyonlar sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Initial phase*” olarak tanımlanmıştır. Daha sonra sahada imalatı gerçekleştirilen test bareti, modelde tanımlanarak imalat sırasında kazığın kendi ağırlığı altında oluşan deformasyonlar hesaplanarak sıfırlanmıştır. Analiz adımlarında bu işlem “*Kazık imalatı*” olarak tanımlanmıştır. Analizlerde test yüküne 4 eşit yük artım kademesiyle ulaşılmıştır. 8.70 MN’luk test yükü 4 eşit kademede boşaltılarak elde edilen deplasmanlar gözlenmiştir. Analizlerde gerçekleştirilen hesap adımları Şekil 6.58’de verilmiştir.



Şekil 6.58 : Deney – 3, analiz adımları.

6.4.5.6 Analiz sonuçları ve değerlendirilmesi

Sahada kazık üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyi sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D’de modellenerek analiz edilmiştir. Modellenen kazığa geleneksel kazık yükleme deneyinde gerçekleştirilen yükleme ve boşaltma kademeleri benzer şekilde uygulanarak oluşan deplasmanlar kayıt altına alınmıştır. İlk olarak, kazık kapasitesi hesabında kullanılan zemin parametreleri yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. SPT-(N₁)₆₀ değerlerinin derinlikle değişimine bağlı olarak zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti belirlenmiştir. Zemin kesitinde yer alan kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü hesabında

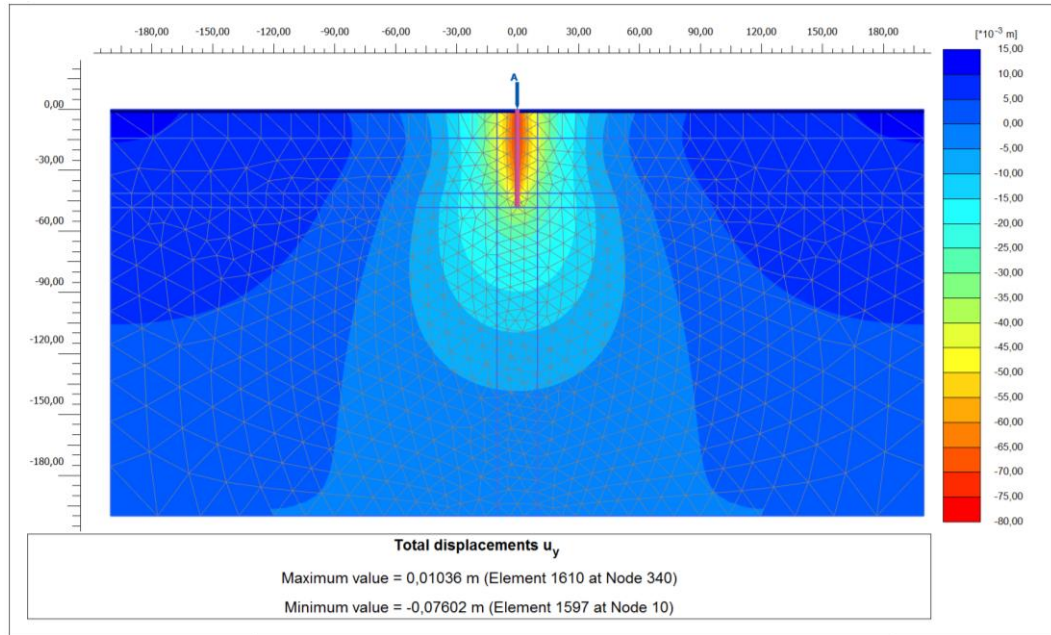
$E = 400.c_u$ (Poulos ve Davis, 1980) önerisi kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizler SEM-1 olarak adlandırılmıştır.

SEM-1’de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.43’te verilmiştir.

Çizelge 6.43 : SEM-1, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	SEM-1							Deplasman (mm)	
	Tabaka Adı	c_u (kPa)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum yükte kazık üstü	Maksimum yükte kazık altı
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	100	40.000	120.000	19	125	314	91.60	80.50
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	160	64.000	192.000	20				
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	40.000	120.000	19				
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	100.000	300.000	21				

SEM-1 analiz sonucunda, test yükünde (8.7 MN) kazıkta meydana gelen deplasman 91.6 mm olarak gözlenmiştir. Test yükü altında kazıkta analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.59’da verilmiştir.



Şekil 6.59 : SEM-1, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.

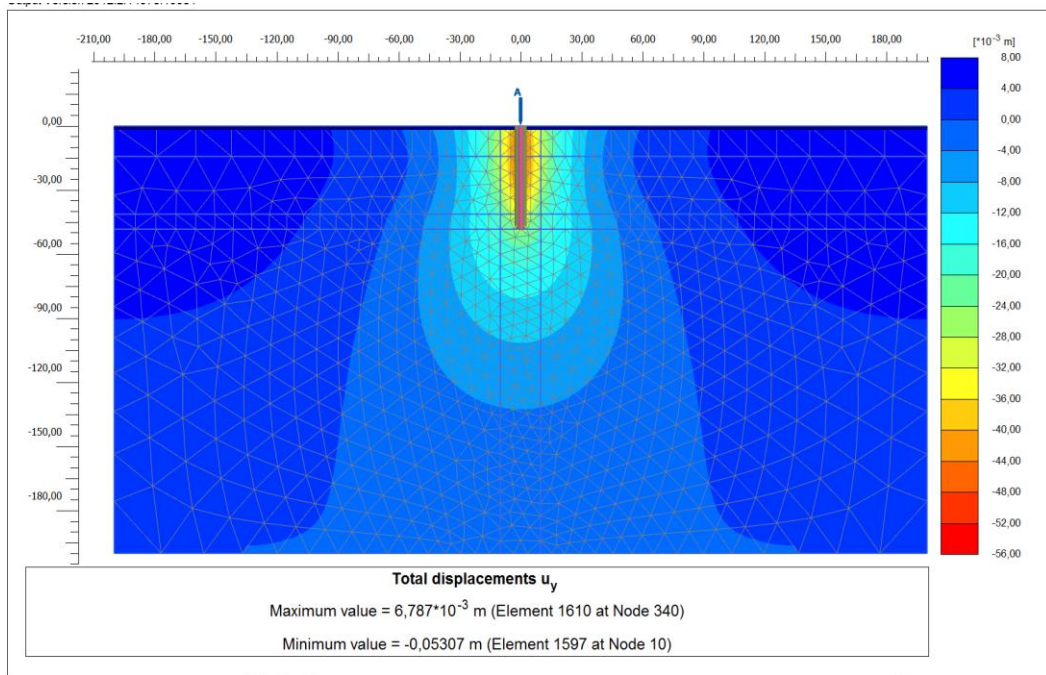
SEM-1 analizi sonucunda kazıkta oluşan deplasman değeri, sahada gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyi sonucunda gözlenen deplasman değerinden daha büyüktür. Kazıkta, sahada gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinde 7.24 mm deplasman gözlenirken, SEM-1 analizi sonucunda oluşan deplasman 91.60 mm’dir. Bu duruma sebep olarak modelde tanımlanan zemin parametrelerin

gerek saha koşullarında gerekse literatür değerlerine göre düşük olmasıdır. SEM-1 analizine göre daha yüksek zemin parametreleri ile SEM-2 analizi gerçekleştirilmiştir. Zemin kesitinde yer alan kohezyonlu zemin tabakalarının elastisite modülü değerleri için $E = 600c_u$ (Bowles, 1988) önerisi kullanılmıştır. SEM-2’de kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.44’te verilmiştir.

Çizelge 6.44 : SEM-2, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	Tabaka Adı	c_u (kPa)	SEM-2				Deplasman (mm)		
			E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum yükte kazık üstü	Maksimum yükte kazık altı
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	100	60.000	180.000	19	125	314	70.60	59.80
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	160	96.000	288.000	20				
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	60.000	180.000	19				
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	250	150.000	450.000	21				

SEM-2 analiz sonucunda, test yükünde (8.7 MN) kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 70.6 mm olarak gözlenmiştir. Test yükü altında kazık alt ve üst kotunda analizeler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.60’ta verilmiştir.



Şekil 6.60 : SEM-2, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.

SEM-2 analizi sonucunda kazık üst kotunda meydana gelen deplasman değeri (70.60mm), sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde gözlenen deplasman (7.24 mm) değerinden daha fazla oluşmuştur. SPT- $(N_1)_{60}$ değerlerinin

derinlikle değişimi dikkate alınıp (şekil 6.5) drenajsız kayma mukavemeti değeri için (Sowers, 1979) tarafından nerilen $SPT-(N_1)_{60} - c_u$ ilişkisinde tabakaların drenajsız kayma mukaveti parametreleri arttırılarak SEM-3 ve SEM-4 analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM-3 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı $E = 400.c_u$ (Poulos ve Davis, 1980) nerisi ile yapılmıştır. SEM-3 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar izelge 6.45'te verilmiştir.

Çizelge 6.45 : SEM-3, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	SEM-3						Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c_u (kPa)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{\u00fcst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum yükte kazık st	Maksimum yükte kazık altı
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	160	64.000	192.000	19	200	339	73.00	62.80
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	225	90.000	270.000	20				
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	40.000	120.000	19				
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	108.000	324.000	21				

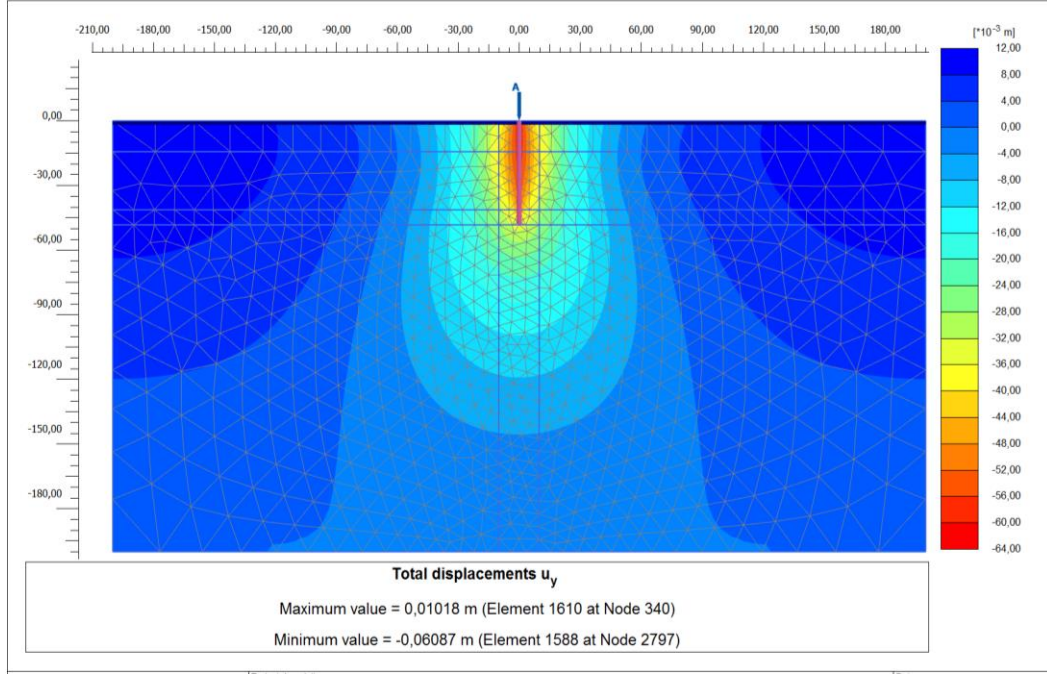
SEM-3 analiz sonucunda, test yükünde (8.7 MN) kazık st kotu deplasmanı 73.0 mm olarak gözlenmiştir. Test yükü altında kazıkta analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar şekil 6.61'de verilmiştir.

SEM-4 analizinde kohezyonlu zeminlerin elastisite modülü hesabı $E = 600.c_u$ (Bowles, 1988) nerisi ile yapılmıştır. SEM-4 analizinde kullanılan zemin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar izelge 6.46'da verilmiştir.

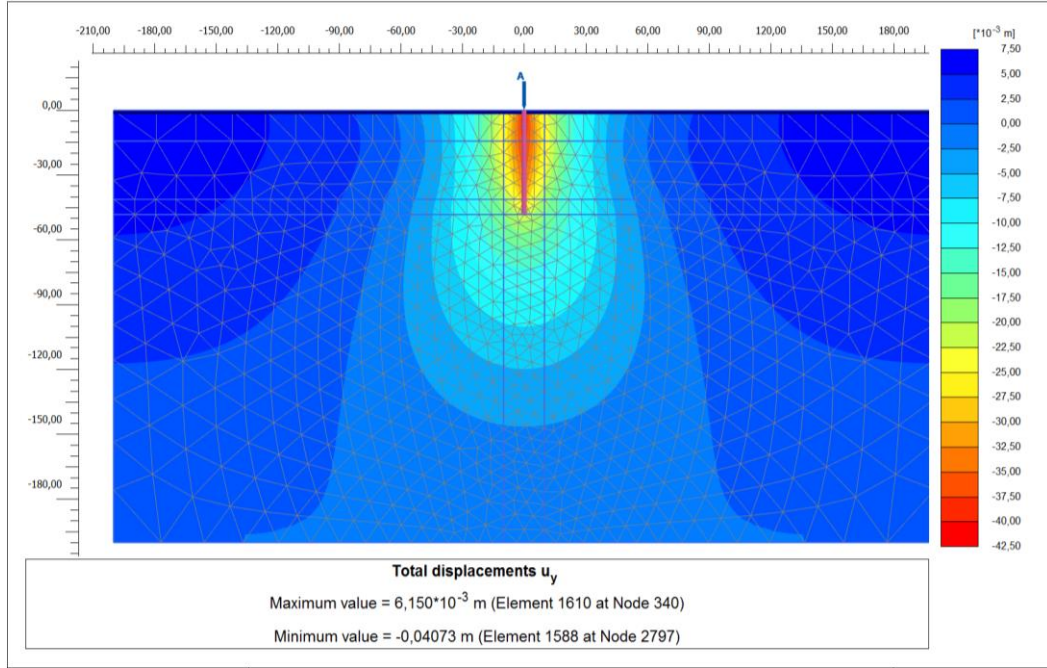
Çizelge 6.46 : SEM-4, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	SEM-4						Deplasman (mm)		
	Tabaka Adı	c_u (kPa)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{\u00fcst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum yükte kazık st	Maksimum yükte kazık altı
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	160	96.000	288.000	19	200	339	50.00	40.00
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	225	135.000	405.000	20				
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	60.000	180.000	19				
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	162.000	486.000	21				

SEM-4 analiz sonucunda, test yükünde (8.7 MN) kazık st kotunda meydana gelen deplasman 50 mm'dir. Test yükü altında kazık st kotunda analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar şekil 6.62'de verilmiştir.



Şekil 6.61 : SEM-3, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.



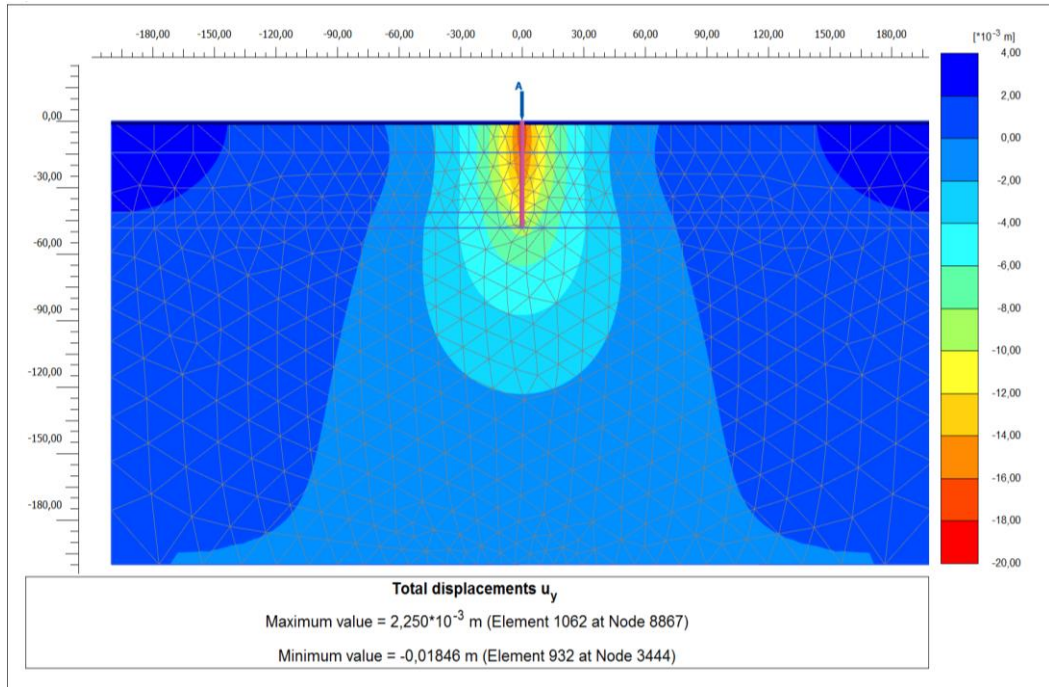
Şekil 6.62 : SEM-4, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.

SEM – 5 analizinde, sahada gözlenen deplasman değerlerine ulaşmak için Bowles (1988) tarafından, kil zeminlerde $I_p < 30$ olması durumunda elastisite modülü için önerilen $E = 1500c_u$ yaklaşımı dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. SEM – 5 analizi parametreleri ve analiz sonucu elde edilen deplasmanlar Çizelge 6.47’te verilmektedir.

Çizelge 6.47 : SEM-5, zemin parametreleri ve analiz sonucu deplasmanlar.

Kot (m - m)	Tabaka Adı	c_u (kPa)	SEM-5					Deplasman (mm)	
			E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	$T_{üst,maks}$ (kN/m)	$T_{alt,maks}$ (kN/m)	Maksimum yükte kazık üstü	Maksimum yükte kazık altı
(-11.00) - (-26.00)	Orta Katı kil	160	240.000	720.000	19	200	339	24.57	15.16
(-26.00) - (-53.00)	Katı kil	225	337.500	1.012.500	20				
(-53.00) - (-60.00)	Orta Katı kil	100	150.000	450000	19				
(-60.00) - (-200.00)	Sert Kil	270	405.000	1.215.000	21				

SEM-5 analiz sonucunda, test yükünde (8.7 MN) kazık üst kotunda meydana gelen deplasman 24.57 mm'dir. Test yükü altında kazık alt ve üst parçasında analizler sonrasında elde edilen deplasmanlar Şekil 6.63'de verilmiştir.

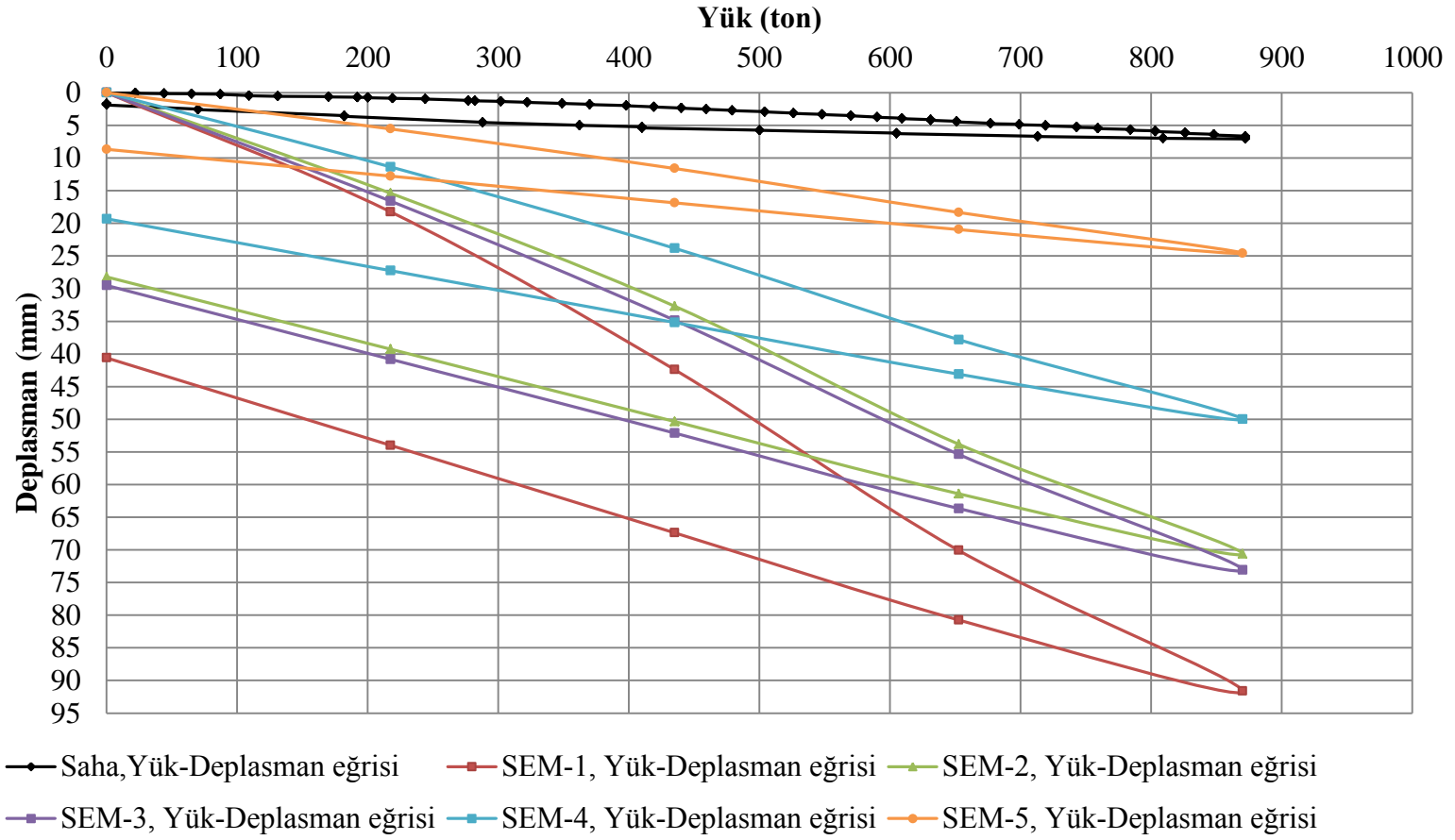


Şekil 6.63 : SEM-5, test yükünde (8.7 MN) oluşan deplasmanlar.

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizler sonucunda kazık boyunca test yükünde elde edilen deplasman, yük ve çevre sürtünme kuvveti dağılımı Plaxis çıktıları Ek B'de verilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler ile sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük – deplasman eğrisi Şekil 6.64'te verilmektedir. SEM ile yapılan nümerik analizler sonucunda kazıkta gözlenen deplasman değerleri, arazide kazık üzerinde gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinde elde edilen deplasman değerine

yaklaşmaktadır. Elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerleri için, SPT değerlerinin derinlikle dağılımına göre yapılan analizler sonucunda kazık deplasmanı 91.6 mm ile 24.57 mm arasında değişmektedir. Fore kazık üzerinde arazide gerçekleştirilen deney sonucunda kazık deplasmanı 8.7 MN yük altında 7.24 mm olarak gözlenmiştir.



Şekil 6.64 : Test ve analiz sonucu elde edilen yük – deplasman eğrileri.

Sahada kazık imalatı sırasında belirlenen kotlara teşkil edilen gerilme ölçerler yardımıyla deney sırasında gözlenen mobilize olan çevre sürtünme değerleri modelde de aynı kotlarda tanımlanarak analizler sırasında kazık alt ve üst parçasında da gözlenmiştir. SEM – 1’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.48’de verilmektedir.

Çizelge 6.48 : SEM – 1, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 1										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	44.80	35.17	31.21	44.64	46.03	50.93	55.94	64.40	47.19	60.56
100%	83.08	61.05	54.85	78.21	81.41	90.34	99.92	116.42	87.97	120.49
150%	99.47	85.31	78.93	113.05	118.41	130.83	143.46	166.44	127.32	180.64
200%	99.47	110.69	105.30	149.26	155.45	171.73	189.16	219.18	166.71	234.13
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	18.24	17.89	17.25	16.65	16.22	15.88	15.73	15.63	15.58	15.54
100%	42.40	41.69	40.39	39.18	38.30	37.62	37.31	37.08	36.98	36.90
150%	70.01	69.00	67.05	65.22	63.89	62.86	62.40	62.05	61.90	61.78
200%	91.64	90.21	87.59	85.13	83.35	81.96	81.33	80.88	80.69	80.52
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	2172.00	2046.00	1843.00	1571.00	1274.00	951.00	730.00	477.00	320.00	98.00
100%	4342.00	4088.00	3667.00	3118.00	2531.00	1892.00	1459.00	964.00	648.00	176.00
150%	6526.00	6148.00	5514.00	4678.00	3788.00	2822.00	2174.00	1443.00	972.00	263.00
200%	8700.00	8258.00	7373.00	6247.00	5048.00	3754.00	2888.00	1909.00	1286.00	342.00

Çizelge 6.48’de verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, kazık üst kotuna yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 10) test yükünde (%200) tamamen mobilize olduğu görülmektedir. 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci (99.47 kPa), sahada gerçekleştirilen kazık yükleme deneyinde 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde gözlenen değere (100 kPa) yakındır.

SEM – 2’de gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.49’da verilmektedir.

Çizelge 6.49 : SEM – 2, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 2										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	44.01	36.21	32.39	46.63	47.33	51.04	55.19	62.07	44.44	55.14
100%	80.41	64.31	57.71	82.86	84.30	91.04	98.64	111.47	80.70	102.58
150%	99.47	89.57	82.33	118.82	121.95	131.96	142.96	161.77	118.90	157.01
200%	99.47	110.61	110.42	157.05	161.65	174.48	188.93	213.59	156.31	181.74
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	15.39	15.04	14.39	13.80	13.38	13.06	12.92	12.82	12.78	12.75
100%	32.68	31.97	30.68	12.49	28.64	28.00	27.70	27.50	27.42	27.35
150%	53.81	52.74	50.80	48.99	47.70	46.71	46.27	45.96	45.82	45.72
200%	70.61	69.18	66.57	64.15	62.42	61.10	60.52	60.11	59.94	59.81
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	2173.00	2044.00	1830.00	1542.00	1231.00	900.68	681.65	435.90	288.00	85.80
100%	4345.00	4080.00	3631.00	3043.00	2424.00	1769.00	1338.00	858.00	563.27	149.75
150%	6527.00	6138.00	5467.00	4586.00	3655.00	2668.56	2020.55	1302.11	855.10	214.71
200%	8700.00	8235.11	7301.83	6118.00	4853.00	3520.00	2467.00	1681.00	1085.45	261.88

Çizelge 6.49’da verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, kazık üst kotuna yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 10) test yükünde (%200) tamamen mobilize olduğu görülmektedir. 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci (99.47 kPa), sahada gerçekleştirilen kazık yükleme deneyinde 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde gözlenen değere (100 kPa) yakındır.

SEM – 2 analizi sonrasında GÖ – 10 seviyesinde elde edilen kazık deplasmanı 70.61 mm olduğu Çizelge 6.49’da görülmektedir. SEM – 2 sonucunda elde edilen kazık üst kotu deplasmanı sahada gözlenen kazık üst kotu deplasman değerinden yüksek olduğu için daha yüksek parametreler seçilerek SEM – 3, 4 ve 5 analizleri gerçekleştirilmiştir.

SEM – 3’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.50’de verilmektedir.

Çizelge 6.50 : SEM – 3, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 3										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	56.82	42.73	36.11	44.87	45.55	49.93	55.17	64.78	35.36	46.74
100%	104.99	76.61	64.52	79.82	81.08	88.79	98.21	115.88	64.32	87.39
150%	153.43	107.55	92.17	114.59	117.05	128.16	141.65	167.47	94.39	131.30
200%	159.16	142.52	121.25	150.01	152.85	167.30	184.93	218.55	122.98	170.52
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	16.59	16.23	15.61	15.05	14.64	14.34	14.21	14.12	14.08	14.05
100%	34.84	34.14	32.89	31.75	30.94	30.33	30.06	29.88	29.80	29.74
150%	55.38	54.32	52.43	50.72	49.49	48.55	48.15	47.87	47.75	47.66
200%	73.06	71.65	69.13	66.84	65.21	63.96	63.42	63.04	62.89	62.77
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	2171.00	2004.30	1747.52	1452.94	1157.32	840.10	624.80	372.70	233.90	77.09
100%	4340.00	4006.10	1476.54	2876.18	2283.82	1653.23	1229.22	741.16	463.40	132.26
150%	6509.00	6016.95	5229.11	4327.13	3436.53	2488.30	1855.66	1127.41	706.70	193.37
200%	8700.00	8040.00	6970.76	5758.11	4568.08	3304.26	2462.70	1496.54	937.80	253.98

Çizelge 6.50’de verilen mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerlerinin, kazık üst kotuna yakın olan gerilme ölçer seviyesinde (GÖ - 10) test yükünde (%200) tamamen mobilize olduğu görülmektedir. Saha deplasmanlarını elde etmek amacıyla zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti değeri ve buna bağlı olarak elastisite modüllerinin artırılması sebebiyle 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde maksimum yükte mobilize olan birim sürtünme direnci (159.16 kPa), sahada gözlenen mobilize birim sürtünme direnci (100 kPa) değerinden daha fazladır. SEM – 3 analizi sonrasında GÖ – 10 seviyesinde elde edilen kazık deplasmanı 73.06 mm’dir.

SEM – 4 ve SEM – 5’te gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen yük, deplasman ve mobilize olan birim çevre sürtünme direnci değerleri Çizelge 6.51 ve Çizelge 6.52’de verilmektedir.

Çizelge 6.51 : SEM – 4, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 4										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	62.05	45.97	37.66	45.21	44.71	48.25	53.12	62.40	34.16	45.34
100%	114.74	82.36	67.27	80.45	79.58	85.78	94.70	111.73	62.19	84.81
150%	159.16	115.16	95.89	115.55	115.09	124.28	136.98	162.21	91.69	128.12
200%	159.16	154.82	126.81	151.78	150.65	162.42	178.94	211.74	119.48	166.35
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	11.36	11.01	10.40	9.85	9.46	9.17	9.05	8.96	8.92	8.89
100%	23.82	23.12	21.89	20.78	20.00	19.41	19.15	18.97	19.00	18.84
150%	37.80	36.75	34.89	33.20	32.01	31.11	30.71	30.44	30.33	30.24
200%	50.00	48.57	46.07	43.82	42.23	41.03	40.50	40.13	39.98	39.87
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	2170.70	1986.29	1708.68	1404.41	1111.11	804.70	598.30	358.10	225.48	75.24
100%	4340.00	3973.60	3407.31	2789.75	2201.77	1590.59	1184.69	715.10	448.30	128.82
150%	6512.00	5978.70	5141.90	4216.10	3330.81	2407.98	1797.18	1094.31	687.58	188.84
200%	8700.00	8016.06	6871.59	5621.30	4433.50	3201.36	2387.71	1454.04	913.41	248.42

Kazık üst kotuna en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 10) mobilize olan birim sürtünme direnci 159.16 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt kotuna en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 1) mobilize olan birim sürtünme direnci 166.35 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 4 analizi sonrasında GÖ – 10 seviyesinde elde edilen kazık deplasmanı 50.0 mm'dir.

Çizelge 6.52 : SEM – 5, gerilme ölçer seviyelerinde elde edilen değerler.

SEM - 5										
Test yükü	Mobilize olan çevre sürtünme direnci (kPa)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	86.94	59.71	43.74	46.19	41.18	41.52	44.91	52.94	29.25	39.61
100%	123.47	107.31	77.99	82.11	73.08	73.55	79.77	94.78	53.19	74.20
150%	159.16	156.22	112.42	118.97	106.87	107.99	117.38	140.18	79.68	113.92
200%	159.16	167.40	155.91	161.16	142.71	142.77	154.54	183.96	104.36	149.02
Test yükü	Deplasman (mm)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	5.55	5.21	4.64	4.16	3.83	3.59	3.48	3.43	3.38	3.36
100%	11.60	10.92	9.76	8.77	8.10	7.60	7.39	7.24	7.18	7.12
150%	18.33	17.29	15.51	13.99	12.94	12.17	11.82	11.59	11.49	11.41
200%	24.57	23.16	20.73	18.64	17.23	16.18	15.72	15.40	15.27	15.16
Test yükü	Yük (kN)									
	GÖ-10	GÖ-9	GÖ-8	GÖ-7	GÖ-6	GÖ-5	GÖ-4	GÖ-3	GÖ-2	GÖ-1
50%	2166.00	1909.18	1545.75	1205.46	924.25	662.10	495.00	299.12	191.63	68.17
100%	4334.90	3828.27	3108.06	2426.69	1861.64	1331.31	994.90	607.10	385.90	115.40
150%	6533.00	5851.27	4773.30	3744.45	2882.73	2066.00	1547.85	952.36	606.41	171.18
200%	8698.00	7971.00	6518.72	5075.83	3888.17	2775.39	2075.48	1276.73	812.57	227.13

Kazık üst kotuna en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 10) mobilize olan birim sürtünme direnci 159.16 kPa olarak elde edilmiştir. Kazık alt kotuna en yakın gerilme ölçer seviyesinde (GÖ – 1) mobilize olan birim sürtünme direnci 149.02 kPa olarak elde edilmiştir. SEM – 5 analizi sonrasında GÖ – 10 seviyesinde elde edilen kazık deplasmanı 24.57 mm'dir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis 2D'de yapılan numerik analizler ile kazık kapasitesinin iki katına kadar gerçekleştirilen yükleme sonucunda kazık üst kotunda oluşan deplasman değeri sahada gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinde elde edilen (7.24 mm) deplasman değerlerinden büyüktür. Zemin parametreleri için yapılan yaklaşımlara bağlı olarak gerçekleştirilen 4 adet analiz sonucunda elde edilen deplasman değeri, sahada gerçekleştirilen deney sonucu elde edilen deplasman değerinden daha fazladır. SEM-1 analizinde elde edilen kazık deplasmanı (91.64 mm) dışındaki diğer analizler sonucu elde edilen deplasmanlar, yükleme deneyinde göçme kriterini tanımlayan (%10D) limit değerden daha düşüktür. Daha yüksek elastisite modülü değerleri ile yapılan 5. analiz sonucu elde edilen deplasman değeri sahada yapılan deney sonucu gözlenen deplasmandan 3 – 4 kat daha büyüktür.

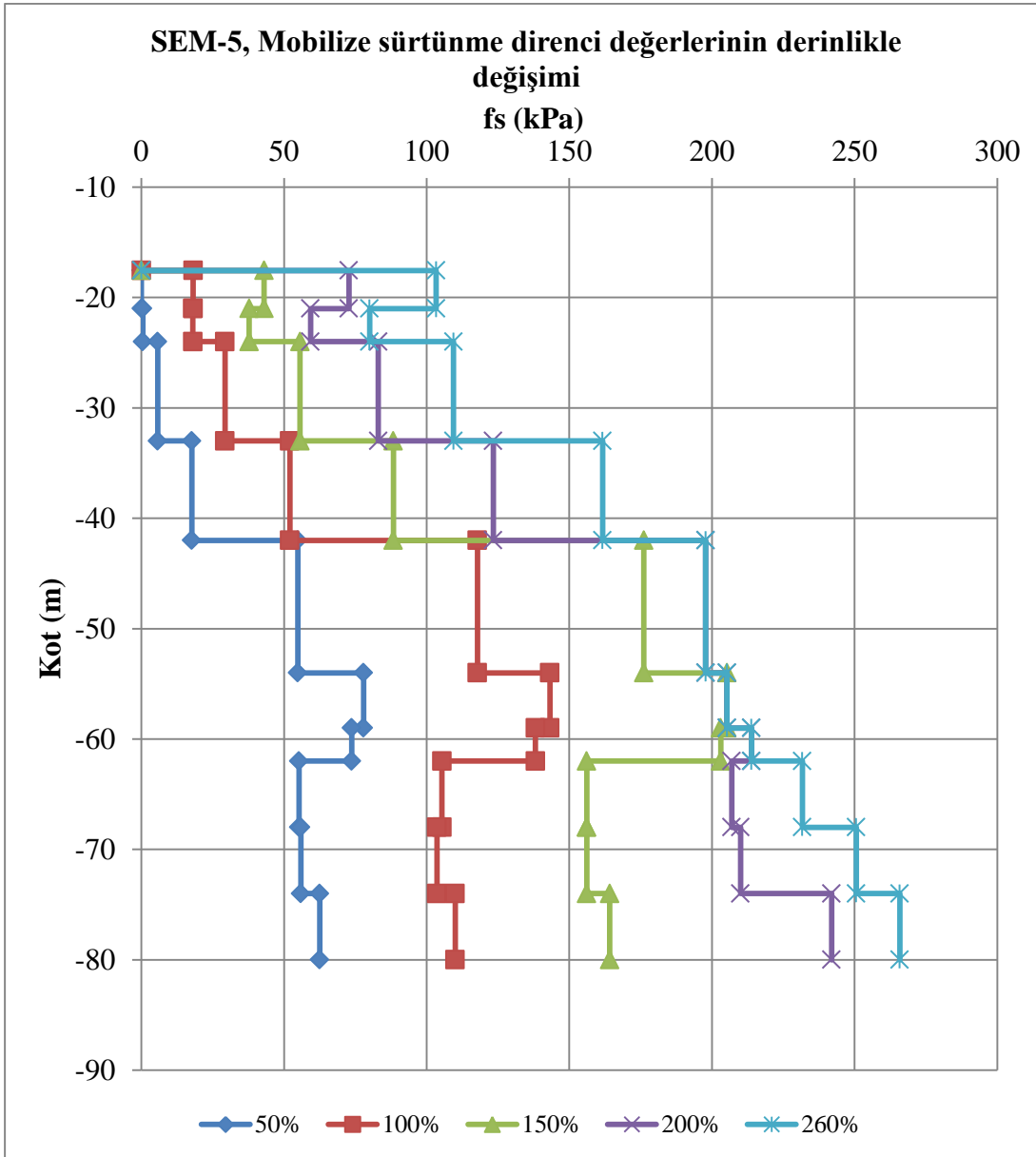
7. TARTIŞMA

Bu çalışmada, fore kazık ve baret temel sistemlerinin düşey yükler altında taşıma gücü mekanizması ve oturma davranışına yönelik geçmiş ve güncel kaynaklar detaylı incelenerek literatür taraması yapılmıştır. Fore kazık ve baretlerin saha uygulamaları, diğer kazıklı sistemlere göre üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları ele alınmıştır. Sahada imalatı yapılan baret ve fore kazıkların kapasitesinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme ve Osterberg hücresi ile yapılan iki yönlü statik yükleme deneyi detaylı olarak incelenmiştir. Fore kazık ve baretin düşey yükler altındaki taşıma kapasitesi ve teorik oturması statik bağıntılar ile hesaplanmıştır. Son bölümde fore kazık ve baret temel sisteminin uygulandığı bir proje detaylı olarak incelenmiştir. Taşıma kapasitesi belirlenen fore kazık ve baretin arazi koşullarındaki davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi ve geleneksel kazık yükleme deneyi sonuçları ile statik hesaplarla belirlenen kapasiteleri ve yük altındaki davranışı karşılaştırılmıştır. İki yönlü statik yükleme deneyi ile geleneksel kazık yükleme deneyi Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile modellenmiş ve test performansı değerlendirilmiştir.

Deney – 1 başlığı altında sahada 80 cm x 280 cm boyutlarındaki baret üzerinde Osterberg yük hücresi yardımıyla gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi ele alınmıştır. Sondaj logları verileri ile oluşturulan idealize zemin profili dikkate alınarak tasarlanan 63 m boyundaki baretin taşıma kapasitesi 20 MN olarak bulunmuştur. Test bareti, saha koşullarındaki davranışını belirlemek amacıyla taşıma kapasitesinin 2.6 katına kadar yüklenmiştir. Test yükünde baret üst parçası deplasmanı 2.7 mm, baret alt parçası deplasmanı 2.1 mm olarak elde edilmiştir.

Sahada gerçekleştirilen deneyin, sonlu elemanlar metodu ile 5 farklı parametrik yaklaşıma göre numerik analizleri gerçekleştirilerek teste yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. İdealize zemin profili dikkate alınarak literatürde zeminlerin mühendislik parametreleri için önerilen değerler kapsamında belirlenen elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti değerlerinin baretin yük altındaki davranışını doğrudan etkilediği ortaya çıkmıştır. Taşıma kapasitesinin tamamının çevre sürtünme direnci

tarafından karşılandığı düşünülerek tasarlanan baretin imalatı sırasında belirlenen kotlara yerleştirilen gerilme ölçer seviyelerinden yük hücrelerine yakın kotta yer alan GÖ -13 ve GÖ -14 numaralı gerilme ölçerlerinde test yükünde mobilize olan çevre sürtünme direnci değerlerinin (156.63 – 228.33 kPa) , SPT(N₁)₆₀ değerleri dikkate alınarak 100 kPa olarak belirlenen drenajsız kayma mukavemeti değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Saha deplasmanına daha yakın değerlerin elde edildiği SEM-5 analizi sonucu baret boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri Şekil 7.1’de verilmektedir.



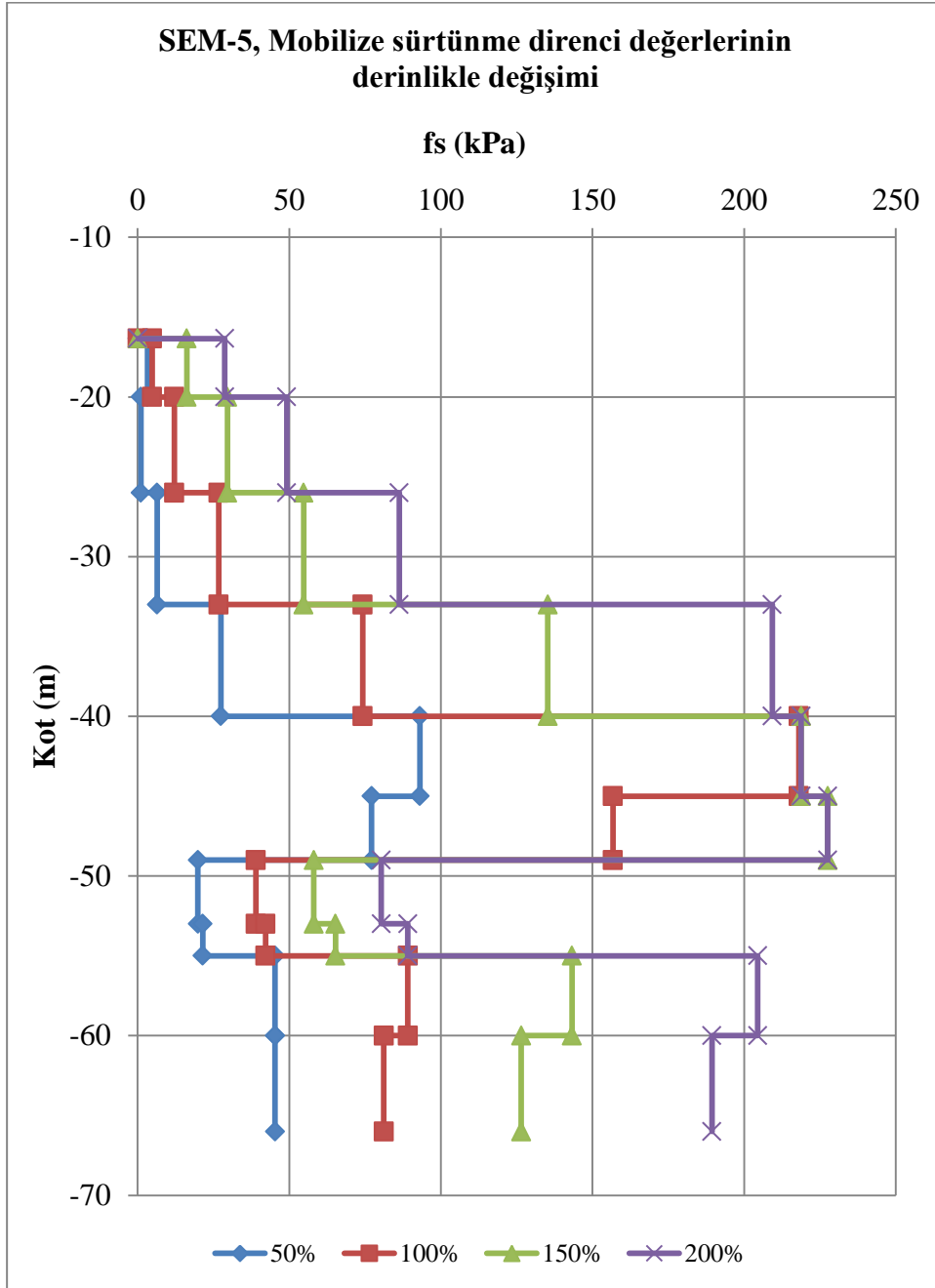
Şekil 7.1 : Deney – 1, test yükünde SEM-5 analizi sonucu baret boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.

Analiz sonuçlarında baret üst parçasında elde edilen en düşük deplasman değeri 17.1 mm, baret alt parçasında ise 17.15 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu deplasman değerleri, literatürde kil zemin tabakalarının eleastisite modülü için önerilen en yüksek değerlerin kullanılması ile gerçekleştirilen SEM – 5 analizi ile sağlanmıştır. Oturma hesaplarında ise, baretin elastik kısılmasıyla oluşan oturma ve sürtünme kapasitesi sebebiyle oluşan baret ucunda oluşan oturmaların toplamı 31.88 mm olarak bulunmuştur. Deney sırasında baret alt ve üst parçasında gözlenen deplasman değerlerinin numerik analiz ve bağıntılarla bulunan deplasman değerlerinden küçük çıkması, tasarımda idealize zemin profilinde yük hücresinin yer aldığı kotta yer alan zemin tabakasının saha koşullarında daha rijit davranmasının sebep olabileceği kanaatini oluşturmuştur. Ayrıca deney sırasında yük hücresine yakın seviyedeki gerilme ölçerlerde gözlenen mobilize sürtünme direnci değerleri dikkate alındığında, literatürde kil zeminler için önerilen drenajsız kayma mukavemeti parametreleri değerinden çok büyük olduğu ve bu değerlerin numerik analizler sırasında gözlenmediği ve buna sebep olarak ise yük hücresinin bulunduğu kotta beton kesitinde genişleme meydana gelebileceği kanısını oluşturmaktadır.

Deney – 2 başlığı altında, 80 cm çapındaki ve $L= 51.70$ m boyunda imal edilen fore kazığın kapasitesi, baret taşıma kapasitesi hesabında kullanılan zemin profili dikkate alınarak 4.5 MN olarak hesaplanmıştır. Fore kazık üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyi sonucunda 11. yük kademesinde yük 4.14 MN iken kazık alt parçasında yük artımı olmaksızın deplasman değerlerinin arttığı ve buna bağlı olarak kazık alt parçası deplasmanı 147.63 mm değerine ulaşmıştır. 11. yük kademesinde kazık üst parçası deplasmanı 3.15 mm olarak gözlenmiştir. - 45.0 m kotunda yer alan 9 no'lu gerilme ölçerde mobilize olan birim çevre sürtünme direnci 160 kPa, - 49.0 m kotunda yer alan 8 no'lu gerilme ölçerde ise 90 kPa olarak gözlenmiştir.

Sahada 80 cm çapındaki fore kazık üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinin de sonlu elemanlar metodu ile 5 farklı parametrik yaklaşıma göre numerik analizleri gerçekleştirilerek teste yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Parametrik yaklaşımlar ile yapılan analizlerde 8 ve 9 no'lu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize olan çevre sürtünme direnci idealize zemin profilinde tanımlanan zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemeti değerine bağlı olarak 155.70 kPa – 227.93 kPa arasında değişmektedir. 5 parametrik yaklaşımda da çevre sürtünme direncinin %95'i

mobilize olmuştur. Şekil 7.2’de SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri verilmektedir.

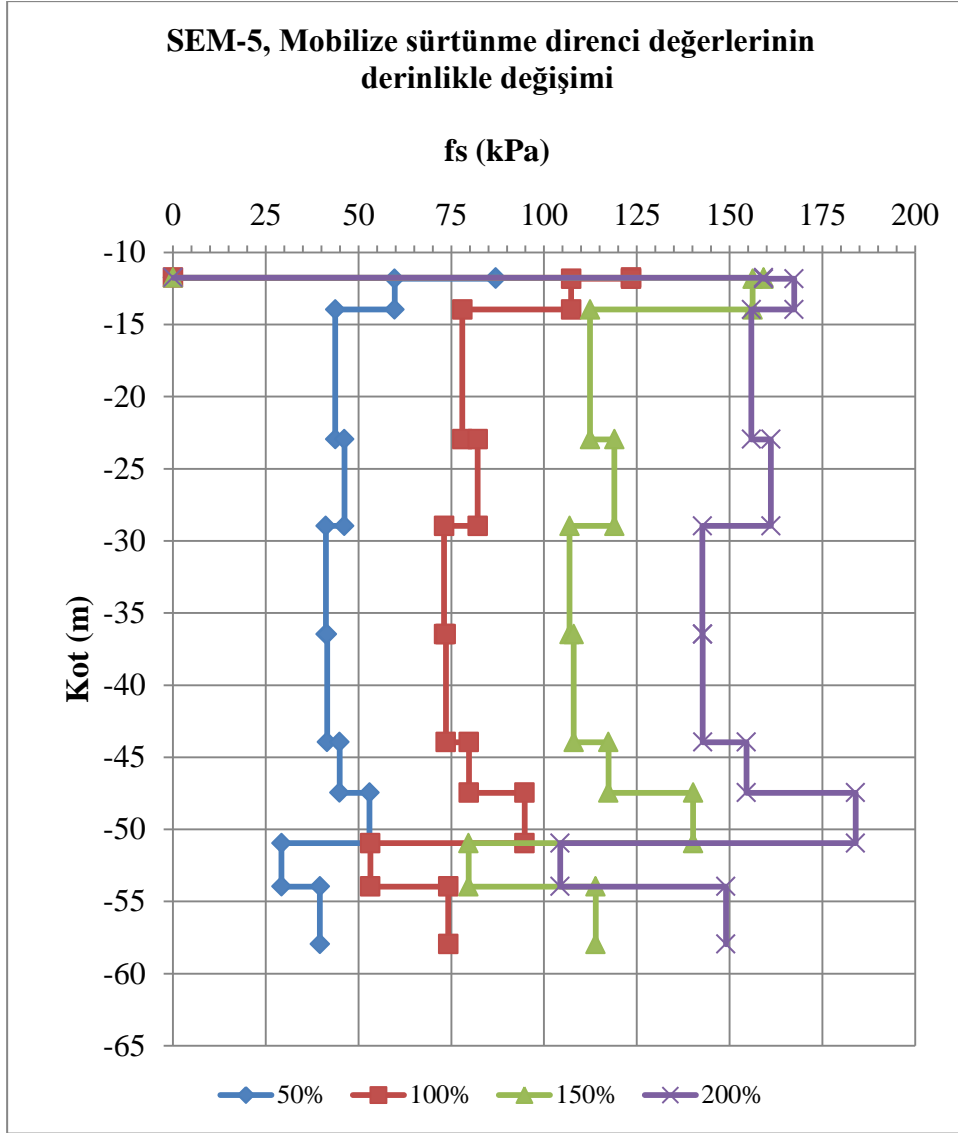


Şekil 7.2 : Deney – 2, test yükünde SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.

Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizlerde kazık üst parçası deplasmanı en fazla 26.5 mm (SEM – 1), kazık alt parçası deplasmanı ise en fazla 18.85 mm (SEM – 1) olarak elde edilmiştir. Elde edilen deplasman değerleri kazık kapasitesinin 2 katında (9 MN) gözlenmiştir. Sahada gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme deneyinde kazık üst ve alt parçasına etkileyen yük 4.14 MN iken kazık alt parçasında

sabitlenmeyen oturma davranışı, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde meydana gelmemiştir. Sahada kazık alt parçasında oluşan bu davranışa sebep olarak test kuyusunun uç kısmının tam olarak temizlenememesi ve bir miktar zemin/bentonit çamuru karışımının taban betonunu olumsuz olarak etkimesi sebebiyle meydana geldiği düşüncesini kanıtlar niteliktedir. Oturma hesaplarında, kazığın elastik kısılmasıyla oluşan oturma ve sürtünme kapasitesi sebebiyle kazık ucunda oluşan oturmaların toplamı 16.71 mm olarak bulunmuştur. Literatürde kil zemin tabakalarının elastisite modülü için önerilen en yüksek değerlerin kullanılması ile SEM – 5 analizi sonucunda kazık üst parçası deplasmanı 5 mm, kazık alt parçası deplasmanı ise 4.18 mm olarak elde edilmiştir.

Geleneksel kazık yükleme deneyinin gerçekleştirildiği ve Deney – 3 olarak adlandırılan 80 cm çapındaki ve $L= 47.80$ m boyunda imal edilen fore kazığın kapasitesi, baret taşıma kapasitesi hesabında kullanılan zemin profili dikkate alınarak 4.35 MN olarak hesaplanmıştır. Sahada gerçekleştirilen yükleme deneyinde kazık üst kotuna en yakın seviyede orta katı kil tabakasında – 11.83 m kotunda yer alan 10 no’lu gerilme ölçer ve katı kil tabakası içerisinde -28.96 m kotunda yer alan 7 no’lu gerilme ölçer seviyelerinde çevre sürtünme direnci değerlerinin %95’i mobilize olmuştur. 10 no’lu gerilme ölçer seviyesinde mobilize olan çevre sürtünme direnci 100 kPa, 7 no’lu gerilme ölçer seviyesinde ise 140 kPa olarak elde edilmiştir. Parametrik yaklaşımlar yardımıyla gerçekleştirilen analizler sonucunda 10 no’lu gerilme ölçerde mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri 99.47 kPa – 159.16 kPa arasındadır. Şekil 7.3’te SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri verilmektedir.



Şekil 7.3 : Deney – 3, test yükünde SEM-5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize olan sürtünme direnci değerleri.

Sahada gerçekleştirilen geleneksel kazık yükleme deneyinde test yükünde gözlenen kazık deplasmanı 7.24 mm'dir. Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizlerde kazık kapasitesinin iki katı yükte (8.7 MN) en fazla 91.6 mm (SEM – 1) olarak elde edilmiştir. Oturma hesaplarında, kazığın elastik kısalmasıyla oluşan oturma ve sürtünme kapasitesi sebebiyle kazık ucunda oluşan oturmaların toplamı 17.0 mm olarak bulunmuştur. Literatürde kil zemin tabakalarının elastisite modülü için önerilen en yüksek değerlerin kullanılması ile SEM – 5 analizi sonucunda kazık üst parçası deplasmanı 24.57 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen deplasman değeri izin verilen oturma değerinden (%10D) düşük olup sahada oluşan deplasman değerinden 3 – 4 kat daha fazla olmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde elde edilen deplasman değerleri ile sahada gözlenen deplasman değerleri karşılaştırıldığında, parametrik yaklaşımlarla yapılan analizler sonucu elde edilen deplasman değerleri sahada gözlenen deplasman değerinden daha fazla olmaktadır. Analizler sırasında sondaj loglarından yararlanılarak oluşturulan idealize zemin profili sahada mevcut durumda yer alan zemin tabakaları dağılımını tam olarak yansıtmayabilmektedir. Özellikle sahada belirli noktalarda gerçekleştirilen sondajlar, deneyin yapıldığı bölgenin tabakalanma özelliklerini ve zemin tabakalarının karakteristik yapısını tam yansıtmayabilmektedir. Diğer taraftan zemin davranışını modelde etkileyen birçok parametre olmasına rağmen belirli parametreler üzerinde yapılan yaklaşımlar analiz sonuçlarını etkilemektedir.

Sahada mevcut durumda yeraltı su seviyesinin yüksek olması sebebiyle, yapılan deneylerde yük kademelerinde ve test yükünde kazığa etkiyen yükün bir kısmının aşırı boşluk suyu basıncı tarafından sönmülenererek deplasman değerlerinin düşük olmasına sebep olacağı kanaati oluşmaktadır. Ayrıca kazık ve baret taşıma kapasitesi hesaplarında -57.0 m ile -60.0 m kotu arasında yer alan SPT-N değeri düşük tabaka deneyler sırasında tasarım değerinden daha rijit davranış gösterip oluşan kazık deplasmanlarının düşük değerde kalmasını sağlayabilmektedir. Parametrik yaklaşımlar ile gerçekleştirilen analiz sonuçları dikkate alındığında, zeminlerin elastisite modülü değerleri için literatürde verilen üst limit değerleri alındığı takdirde deplasman değerleri sahada gerçekleştirilen deneylerde elde edilen deplasman değerlerine yakınsamaktadır.

Kazık ve baret tasarımında belirlenen zemin parametreleri ile yapılan kapasite hesaplarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan numerik analizler sonucu elde edilen veriler eşliğinde değerlendirilerek tasarımın güvenliği desteklenmektedir. Sahada gerçekleştirilen deneyler ve nümerik analizler, imalat öncesi tasarımın kontrolü için çok önemli olduğunu göstermektedir. Sahada gerçekleştirilen deneylerin doğru değerlendirilebilmesi için imalatın da yeteri kadar özenli olması gerekmektedir. Bu sebeple yüksek yapı yükleri altında tasarlanan derin temel sistemlerin arazi – proje koşullarında davranışının irdelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyler ve numerik analizler, fayda – maliyet ilişkisini doğrudan etkilemektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kazık ve baret temellerin taşıma gücü ve arazideki davranışı, yükleme deneyleri ve nümerik analizlerle incelenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Arazi deneyleri ve nümerik analizler sonucu elde edilen deplasman ve mobilize olan çevre sürtünme direnci değerleri dikkate alınarak kazık ve baret temel tasarımı değerlendirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Sahada gerçekleştirilen kazık yükleme deneylerinden elde edilen deplasman değerleri, aynı zemin parametreleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan nümerik analizler sonucu elde edilen deplasman değerlerinden daha küçük elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak kazık ve baretin sürtünme kapasitesi hesabında kullanılan α adhezyon katsayısının saha koşullarında analizlerde kabul edilen değerden daha fazla olduğu düşünülmektedir.
- Sahada kazık üzerinde gerçekleştirilen iki yönlü statik yükleme (O-cell) deneyinde, test yüküne ulaşmadan kazık alt parçasında yük artımı olmaksızın deplasman artışı gözlenmiş ve kazık alt parçası göçmüştür. Ancak nümerik analizlerde bu durum gözlenmemiştir. Arazi deneyinde gözlenen bu durumun sebebi kazık ucunun yeterince temizlenmemesi ve betonlama sırasında kazık ucunda zemin – bentonit karışımının dayanımı olumsuz etkilemesi olarak açıklanabilmektedir. İmalat sırasında kalite kontrolünün yeterince sağlanamaması, kazık kapasitelerinin azalmasına neden olmaktadır.
- Baret üzerinde arazide gerçekleştirilen O-cell deneyi sonucunda elde edilen deplasman değerleri nümerik analizler sonucunda elde edilen deplasman değerlerinden daha azdır. Yük hücresinin yer aldığı zemin tabakasının daha rijit davrandığı veya yük hücresinin yer aldığı derinlikte imalat sırasında kesitte genişleme olma olasılığı bu duruma neden olabilmektedir.
- Geleneksel kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen deplasman değerleri, nümerik analizler sonucu elde edilen değerlerin altında kalmaktadır. Sahada

elde edilen deplasman değerlerinin nümerik analizlerden az olmasına sebep olarak kazık alt ucunda ve üst kotunda yer alan zemin tabakalarının daha rijit davranışı ile açıklanabilmektedir. Bu nedenle deneylerin yapılacağı bölgelerde ilave sondajların yapılması, sahada deney öncesi yük hücreleri yerleşimi ve imalatında aşırı özen gösterilmesi tavsiye edilmektedir.

- Nümerik analizler sonucunda elde edilen deplasman değerlerinin model sınırlarından etkilendiği, model sınırlarının yeterince büyük seçilmemesi durumunda kazık – baret elemanı ve zemin tabakalarında yük altında oluşan gerilmelerin arttığı ve buna bağlı olarak deplasman değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle, nümerik analizlerde kazık ve baret boyunun en az 3 katı derinliğinde ve en az 2 kat genişliğinde model geometrisi oluşturulması gerekmektedir. Arazide su seviyesi yüksek olup nümerik analizlerde de efektif parametrelerle çalışılacağı göz önünde bulundurularak su seviyesinin zeminin hemen altında tanımlanması sonuçların doğruluğu açısından önemlidir.
- Nümerik analizlerde zemin tabakalarının drenajsız kayma mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinin artırılmasıyla fore kazık ve barette elde edilen deplasmanların azaldığı ve arazi deneylerinde gözlenen deplasman değerlerine yakınsadığı gözlenmiştir.
- Nümerik analizlerde, literatürde kil zeminlerin elastisite modülü ve drenajsız kayma mukavemeti için önerilen değerlerin üst limitleri alındığında arazi davranışına yakın davranış gözlenmiştir. Zemin tabakalarının dayanımı için seçilen üst limit değerleri, düşük güvenlik faktörü kullanarak analizlerin yapıldığını ifade etmektedir. Elde edilen sonuçların sınır değerler içerisinde kaldığı göz önünde bulundurulduğunda zemin tabakalarının mühendislik parametreleri için ortalama değerler alınarak taşıma gücü daha doğru değerlendirilebilir.
- Bu sonuçlar, hesap ve tasarım aşamasında zemin parametrelerinin doğru seçilerek çalışılmasının çok önemli olduğunu göstermektedir. Bu amaçla, laboratuvarında zemin kesitinde yer alan tabakaların zemin cinsine uygun deneyler gerçekleştirilerek parametreler bulunmalıdır.

- Nümerik analizlerde, arazi deneylerinde fore kazık üzerinde yük hücresine yakın kotlarda yer alan gerilme ölçerlerde elde edilen mobilize çevre sürtünme direnci değerlerine yakın değerler elde edilmiştir.
- Nümerik analizlerde, kazık ve baret gövdesinde elde edilen mobilize çevre sürtünme direnci değerleri arazide elde edilen deneylerden daha fazladır. Bunun sebebi, analizlerde kazık ve baret zemin ara yüzünün tam rijit olarak modellenmesi ve sahada kazı sırasında kuyu çeperinde oluşan örselenmelerin nümerik analizlerde modellenememesi olarak açıklanabilmektedir.
- Nümerik analizlerde, arazide baret üzerinde gerçekleştirilen deneyde yük hücresine yakın kotta yer alan gerilme ölçerlerde elde edilen sürtünme direncinden, daha düşük sürtünme direnci değeri elde edilmiştir. Sahada elde edilen mobilize sürtünme direnci değerleri incelendiğinde, gerilme ölçerlerin yer aldığı kottaki zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemetinden yüksek olduğu ve bu durum beton kesitinde genişleme olduğuna işaret etmektedir.
- Arazide gerçekleştirilen deneylerde test yükü altında kazık ve baret davranışı göz önünde bulundurulduğunda, statik kazık formülleri yardımı ile yapılan kapasite hesaplarının sahada yeterli taşıma gücünü sağladığı gözlenmiştir. Nümerik analizlerde zeminlerin mühendislik parametreleri için ortalama değerlerin alınması durumunda gözlenen deplasman değerleri sınır değerlerin altında olup taşıma kapasitesi yeteri güvenlikle sağlanabilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde, parametrik yaklaşımlarla yapılan analiz sayısının arttırılması, farklı zemin ve malzeme modeli kullanarak analizlerin çoğaltılması, analizlerin kum zeminlerde de tekrarlanması ile O-cell deneyi ve geleneksel kazık yükleme deneyinde gözlenen baret ve kazık davranışı genellenebilir. Analizlerde sondaj loglarından yararlanarak oluşturulan idealize zemin kesiti, sahada mevcut durumda zemin tabakalarının dağılımını tam olarak yansıtmadığı düşünülerek deney bölgesine yakın noktalarda yapılan sondajlar dikkate alınarak yapılacak modellemeler saha davranışına yakın değerlerin elde edilmesini sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI**, (1980). Recommendations for Design, Manufacture and Installation of Concrete Piles, ACI 543R-74, American Concrete Institute, Detroit.
- Alén, C.** (2012) Pile foundations - Short handbook (Educational material in Geotechnics), Gothenburg: Chalmers University of Technology.
- Alkaya, D. ve Yeşil, B.** (2013). “Kazık Temellerin Bilgisayar Destekli Analizi”, Akademik Bilişim, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Akdeniz Üniversitesi.
- Alsamman, O. M.**, (1995). “The use of CPT for calculating axial capacity of drilled shafts”, Doktora Tezi, Illinois Üniversitesi, Urbana-Campaign.
- Arda, Ç.**, (2009). “*Vertical Load Capacity and Quality Assessments of Bored Piles*”, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- ASTM D1586 –08a**, (2008). Standard Test Method for Split-Barrel Sampling of Soils American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D3441–05**, (2005). Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Tests of Soil, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D4719-07**, (2007). Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Azizi, F.**, (2000). *Applied Analyses in Geotechnics*, E&FN Spon, New York.
- Aygül, T.**, (2011). “Finite Element Study on Axially Static and Bidirectional Static Osterberg Cell Pile Load Testing”, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Baguelin, F., Jézéquel, J.-F. ve Shields, D.H.**, (1978). *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, TransTech Publications, Clausthal, Germany.
- Bearing Capacity of Soils.**, (1993). U.S. Army Corps of Engineers, Engineering Manual, EM 1110-1-1905.
- Benz, T.**, (2006). “Small-Strain stiffness of Soils and its Numerical Consequences”, Doktora Tezi, Stuttgart Üniversitesi.
- Bowles, J. E.**, (1996). *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Company, New York, USA.
- Briaud, J. L. ve Miran, J.**, (1992). *The Cone Penetrometer Test*, Report FHWA-SA-91-043, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M., Engin, E.**, (2010). Plaxis 2D, Delft University of Technology, Plaxis bv, The Netherlands.

- Broms, B. B.**, (1981). *Precast Piling Practice*, Thomas Telford Ltd., London.
- Brown, D., Thompson, R., & Nichols, S.** (2006). "Performance Specifications for Drilled Piles" *Proceedings of 10th International Conference on Deep Foundations*, Amsterdam, Netherlands Retrieved February 10, 2008. Adres: <http://danbrownandassociates.com/publications>.
- Budhu, M.**, (2011). *Soil mechanics and Foundation 3rd Edition*, John Wiley and Sons Inc., 111 River Street, Hoboken, New Jersey.
- Burland, J.B.**, (1973) "Shaft Friction of Piles in Clay", *Ground Engineering*, Vol. 6, No.3, pp.30 – 42.
- Canadian Foundation Engineering Manual**, (1985). Canadian Geotechnical Society, Bi Tech. Publication.
- Camp, W.M., Brown, D.A., and Mayne, P.W.**, (2002). "Construction Method Effects on Axial CIDH pile Performance." *DEEP FOUNDATIONS 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, O'Neill, M.W. and Townsend, F.C. (ed.), ASCE, Geo-Institute, Publication No. 116, Vol. 1, pp 193-208.
- Cheung, Y. K., Lee, P. K. K., ve Zhao, W. B.**, (1991). "Elastoplastic analysis of soil – pile interaction", *Computers and Geotechnics*, Vol. 12: pp 115–132.
- Chellis, R. D.**, (1961). *Pile Foundations*, McGraw-Hill, New York.
- Chin, F. K.**, (1970). Estimation of the Ultimate Load of Pile Not Carried to Failure, *Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, pp. 81-09, Singapore.
- Coduto, D. P.**, (2001). *Foundation Design: Principles and Practices 2nd Edition*, Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Dai, G., ve Gong, W.**, (2011). "Application of bi-directional static loading test to deep foundations", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*, 4 (3): 269–275.
- Das, M. B.**, (2004). *Advanced Soil Mechanics*, Taylor & Francis, USA.
- Das, M. B.**, (2007). *Principles of Foundation Engineering*, 7th Edition, Brooks/Cole, California, USA.
- Davisson, M. T.**, (1972). High capacity piles. *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, American Society of Civil Engineers, ASCE, Illinois Section, Chicago, March 22, pp. 81 - 112.
- Duncan, M. ve Chang, C.Y.**, (1970). "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils" *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, 96, SM5, 1629-1653.
- Durgunoğlu, H. T.**, (2011). "Baret Temeller", İMO Meslekiçi seminerleri. Alındığı tarih: 05.03.2015, adres: http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/52446e15ad3ec1f_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=16
- Düzceer, R.**, (2002). "Kazık Yükleme Deneyleri ile Nihai Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi. İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

- England, M.,** (2003a). "Bi-directional Static Load Testing – State of the Art", *Loadtest Inc., UK*.
- England, M.,** (2003b). Bi-directional Static Load Testing – State of the Art. Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium. June 2-4.
- Eslami, A., Fellenius, B. H.,** (1997). Pile Capacity by Directed CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, sf. 886-904.
- Ezeldin, S.,** (2004). *Practical Foundation Engineering Handbook*, Digital Engineering Library @ McGraw-Hill.
- Fathi, M. S.** (2012). "Deep Foundation", UTM RAZAK School of Engineering & Advanced Technology, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kuala Lumpur. Alındığı tarih: 05.02.2015, adres: <http://faculty.mu.edu.sa/public>.
- Fellenius, B. H.,** (1975). Test Loading of Piles and New Proof Testing Procedure, *ASCE J.G.E.* Vol. 101, No. GT9, pp. 855-869.
- Fellenius, B. H.,** (2004). "Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis", *Geo-Institute Geo-TRANS Conference*, Los Angeles, 253-275.
- Fellenius, B. H.** (2006). "*Basics of Foundation Design*", Calgary.
- FHWA HI 97-013,** (1998) Design and Construction of Driven Pile Foundations, Workshop Manual, Vol.1, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Fleming, W. G. K. ve Thorburn, S.,** (1983). "Recent piling advances", State of the Art Report, Proceedings of Conference on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, ICE, London.
- Fleming, W. G. K. ve diğ.,** (1986). *Piling Engineering* 1st edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Fleming, W. G. K. ve diğ.,** (2009). *Piling Engineering* 3rd edition, Taylor & Francis, London.
- Hill, R.,** (1950). "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, London, UK.
- Hirany A., ve Kulhawy, F. H.,** (1989). Interpretation of load tests on drilled shafts, *Foundation Engineering: Current Principles and Practices*. Proceedings of the Congress Geotechnical Engineering Division and the Construction Division of ASCE, Vol.2, pp. 1132-1149.
- Hoek, E., Carranza – Torres, C., Corkum, B.,** (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Volume 1, 267 – 273.
- Hudson, M. J.,** (2008). "A Comparison of Load Test Data and Predicted Behavior of Auger Cast Piles in Layered Soils", Yüksek Lisans Tezi, Central Florida Üniversitesi, İnşaat ve Çevre Mühendisliği, Orlando Florida.
- Janbu, N.,** (1985). "Soil models in offshore engineering (25th rankine lecture)". *Geotechnique*, 35, 241-280.

- Keskin, M.S.**, (2009). “Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi” Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kılıç, H.**, (2000). Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Deneysel ve Nümerik Yöntemlerle Belirlenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 278s.
- Lei, G.**, (2001). “Behaviour of Excavated Rectangular Piles (barrettes) in Granitic Saprolites”, Doktora Tezi, Hong Kong Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hong Kong.
- Leonards, G. A.**, (1962). Foundation Engineering, McGraw-Hill, New York, USA.
- McCarthy, P. E. and David, F.** (2007). Essentials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics 7th Edition. Prentice Hall.
- Meigh, A.C.**, (1987). *Cone Penetration Testing - Methods and Interpretation*, CIRIA, Butterworth, London.
- Meyerhof, G.G.** (1976). “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations”, *Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol.102*
- Moaveni, S.**, (1999). Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, New Jersey Prentice Hall, Inc.
- Muir Wood, D.**, (1990). “Soil behaviour and Critical State Soil Mechanics”. Cambridge University Press.
- NAVFAC DM-7.2**, (1982). Foundations and Earth Structures Design Manual 7.2, Department of The Navy, Alexandria, VA, May.
- Norlund, R.L.**, (1963). Bearing capacity of piles in cohesionless soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 89(SM3), pp. 1-35.
- O’Neill M. W. ve Reese L. C.** (1999). “Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods”, Technical Manual, Publication No. FHWA-IF-99-025.
- Osterberg, J. O.**, (1984). A New Simplified Method for Load Testing Drilled Shafts, Foundation Drilling, Vol. XXIII, No.6 (July/August), ADSC, pp. 9.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H.**, (1974). *Foundation Engineering*, 2d ed., Wiley, New York.
- Plaxis**, (2015). Material Models Manuel, Delft University of Technology & Plaxis bv The Netherlands .
- Potts, D.M., ve Zdravkovic, L.**, (2001). “Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Application” Thomas Telford Publishing.
- Prakash, S. ve Sharma, H.D.** (1990). Pile Foundations in Engineering Practice, A Wiley – Interscience Publication, Canada.
- Reese, L. C., Isenhower, W. M. ve Wang, S.**, (2006) Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.

- Schmertmann, J. H.**, (1975). "Measurement of *in situ* Shear Strength," *Proceedings, Specialty Conference on in situ Measurement of Soil Properties*, ASCE, Vol. 2, 57–138.
- Seidel, J. P.**, (2000). "A Brief Outline of the Rocket Micromechanical Approach", *Rock Socket Design Software Manual*, Monash University, Australia.
- Simons, N. ve Menzies, M.**, (2004). "Soil Structure Engineering of Deep Foundations, Excavations and Tunnels" Thomas Telford, London.
- Sluis, J.J.M.**, (2012). "Validation of Embedded Pile Row in PLAXIS 2D", Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology.
- Sowers, G.F.**, (1979). *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*, 4th edition, Macmillan, New York.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. ve Mesri, G.**, (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Toğrol, E. ve Tan, O.**, (2003). *Kazıklı Temeller*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Tomlinson, M. J.**, (2004). *Pile Design and Construction in Practice*, E & FN Spon, London, UK.
- TS EN 1536** (2010). *Özel Jeoteknik Uygulamalar, Delme (fore) Kazıklar – Yerde dökme betonarme kazıklar*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1538** (2010). *Özel Jeoteknik Uygulamalar, Diyafram duvarlar*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tumay, M. T., Fakhroo, M.**, (1981). "Pile Capacity in Soft Clay Using Electric QCPT Data", *Cone Penetration Testing and Experience*, Sesion at the ASCE National Convention, St. Louis, ASCE, sf. 325-342.
- Vermeer, P. A., Stolle, D. F. E., Bonnier, P. G.**, (1998). "From the classical theory of secondary compression to modern creep analysis", *Proc. 9th Int. Conf. Meth. And Adv. Geomech.*, Wuhan, China, 4, 2469-2478.
- Vesic, A.S.**, (1977). "Design of Pile Foundations", *National C Highway Research Program S of Practice*, Transportation Research Board, Washington DC, USA.
- Yıldız, K.**, (2011). "Baret Kazıklı Temellerde Düşey Taşıma Kapasitesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yi, L.**, (2004) *Finite Element Study on Static Pile Load Testing*, Yüksek Lisans Tezi, National University of Singapore.
- ZETAŞ**, (2014). *Zetaş Katalog*, Alındığı tarih: 01.12.2014, adres: <http://zetas.com.tr>
- Zhang, L.**, (2004). "Reliability Verification Using Pile Tests", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, Vol. 130, No. 11, November, pp.1203-1213.
- Url – 1** < <http://www.teknikel.com/urunlerimiz/urun/80>>, alındığı tarih: 10.02.2015.
- Url – 2** < <http://projects.soundtransit.org/>>, alındığı tarih 16.03.2011.
- Url – 3** < <http://www.bauer.de>>, alındığı tarih: 05.11.2014.
- Url – 4** < <http://www.zmakina.com.tr>>, alındığı tarih 05.11.2014.

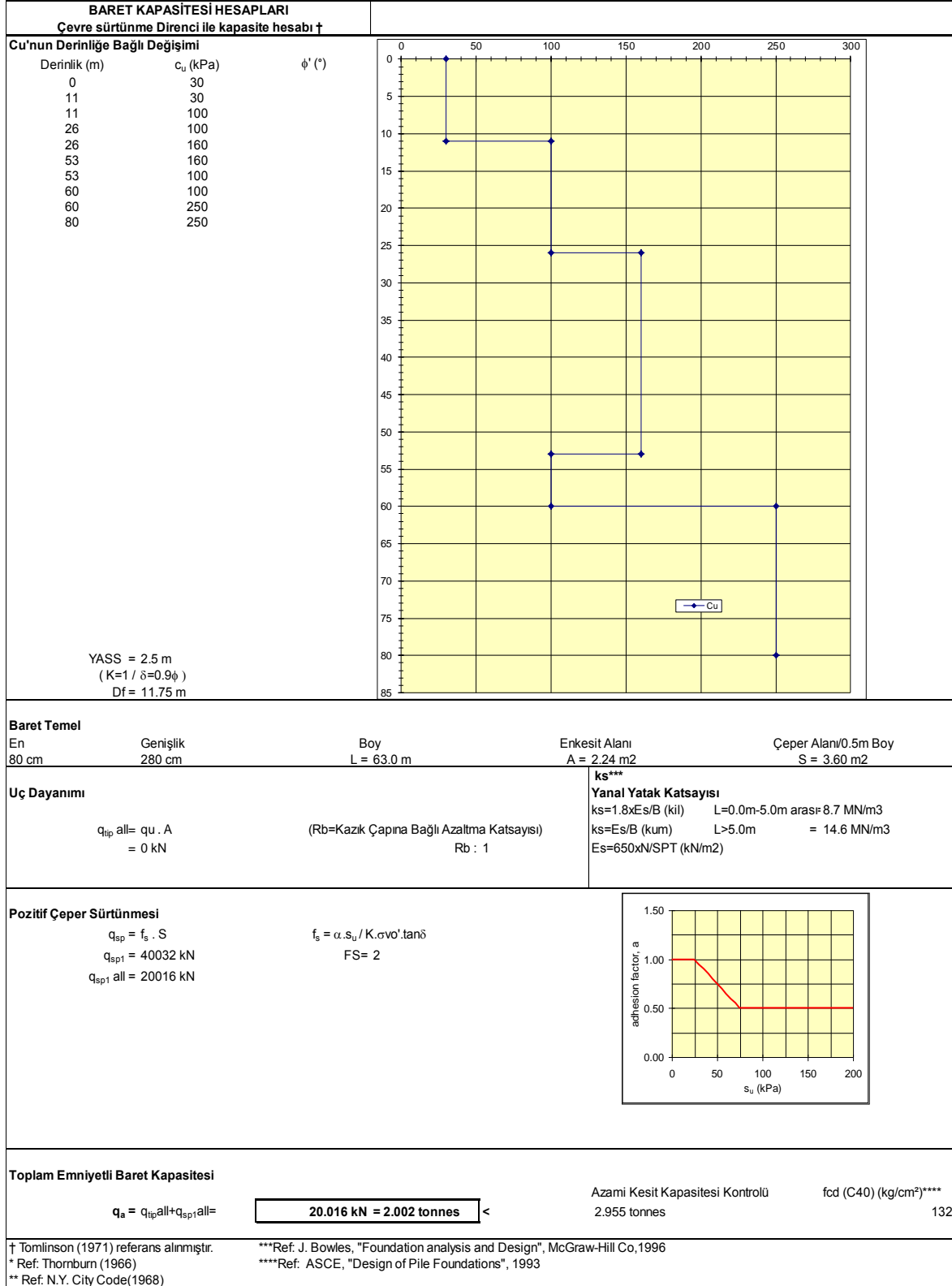
EKLER

EK A: Kazık ve Baret Kapasite Hesap Föyleri

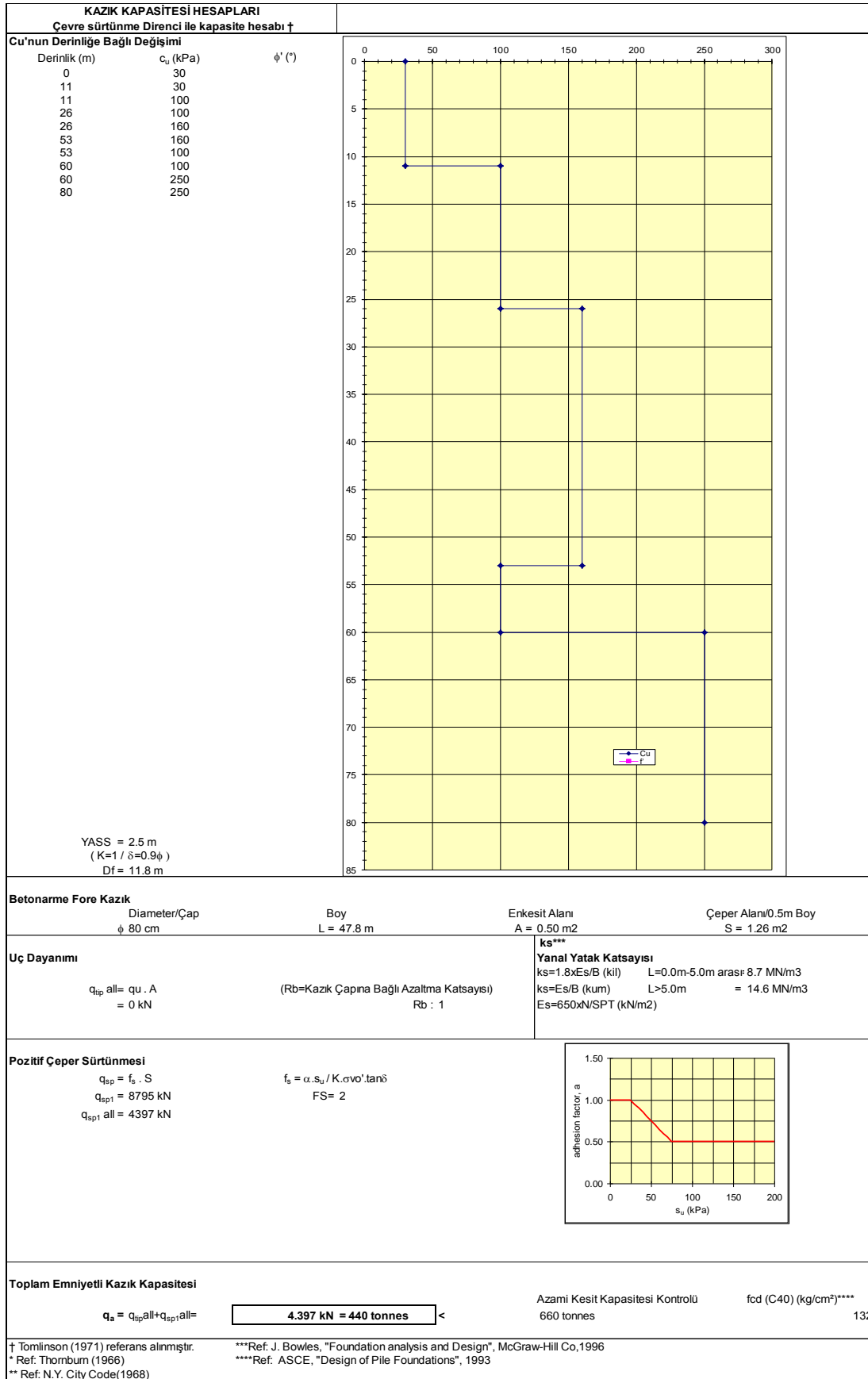
EK B: SEM Analizleri Plaxis Çıktıları

EK C: SEM Analizleri Sonucu Mobilize Sürtünme Direnci Grafikleri

EK A

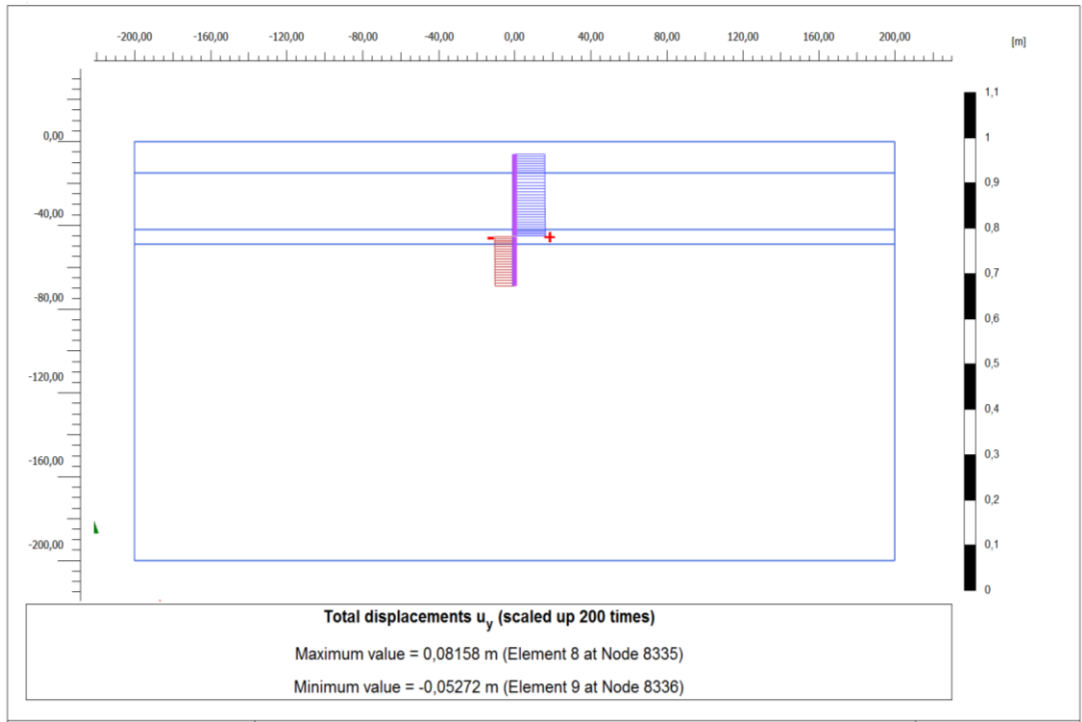


Şekil A.1 : L = 63 m baret taşıma kapasitesi hesap föyü.

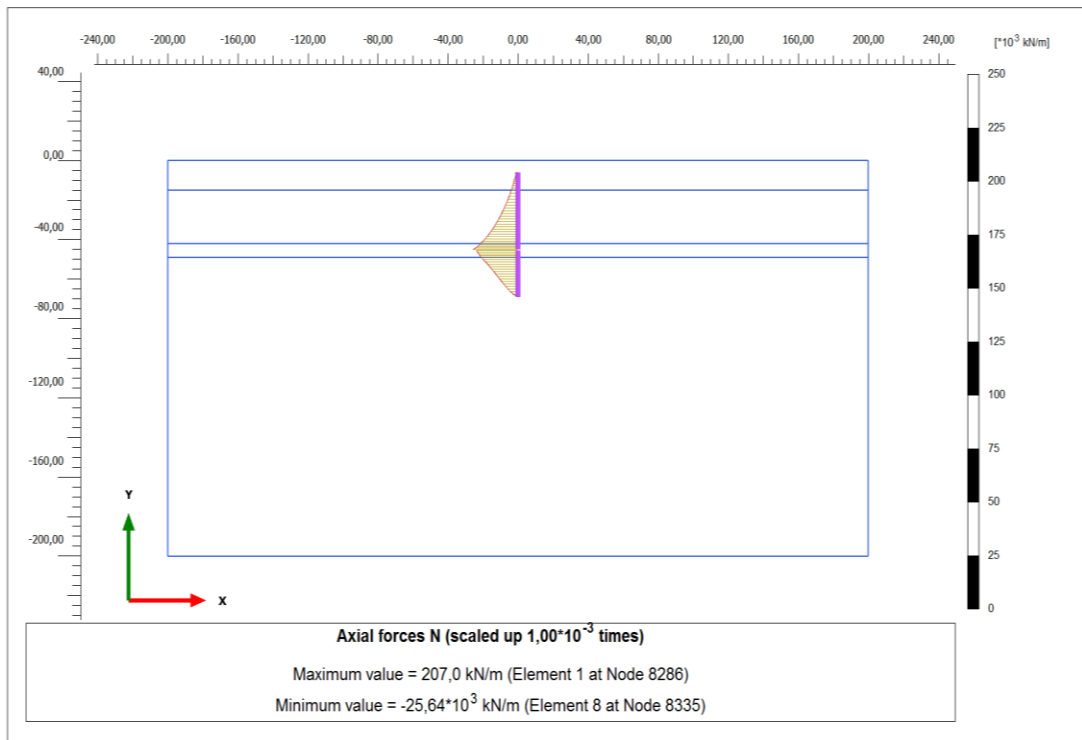


Şekil A.3 : L = 47.8 m kazık taşıma kapasitesi hesap föyü.

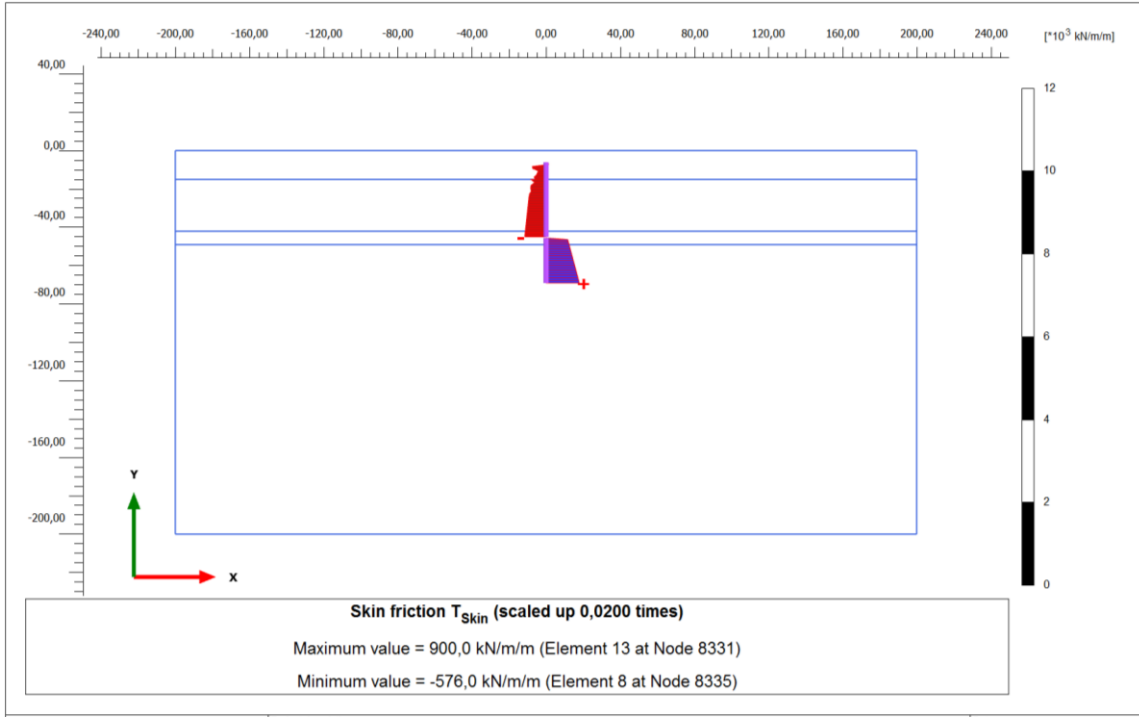
EK B



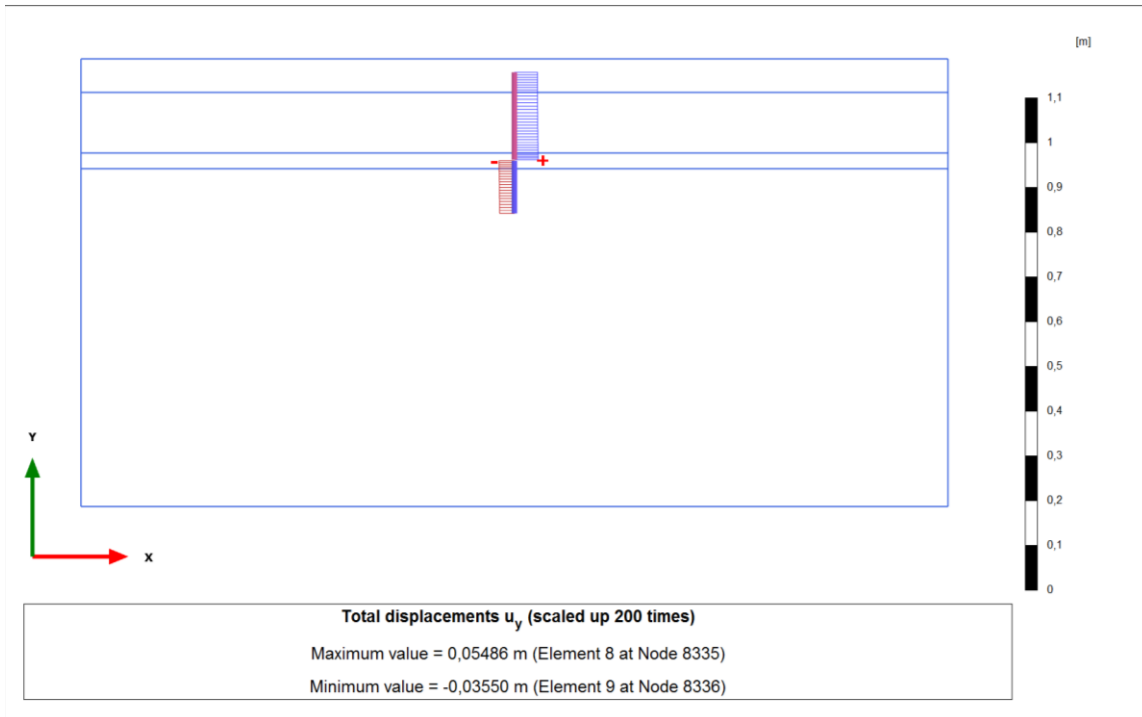
Şekil B.1 : Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



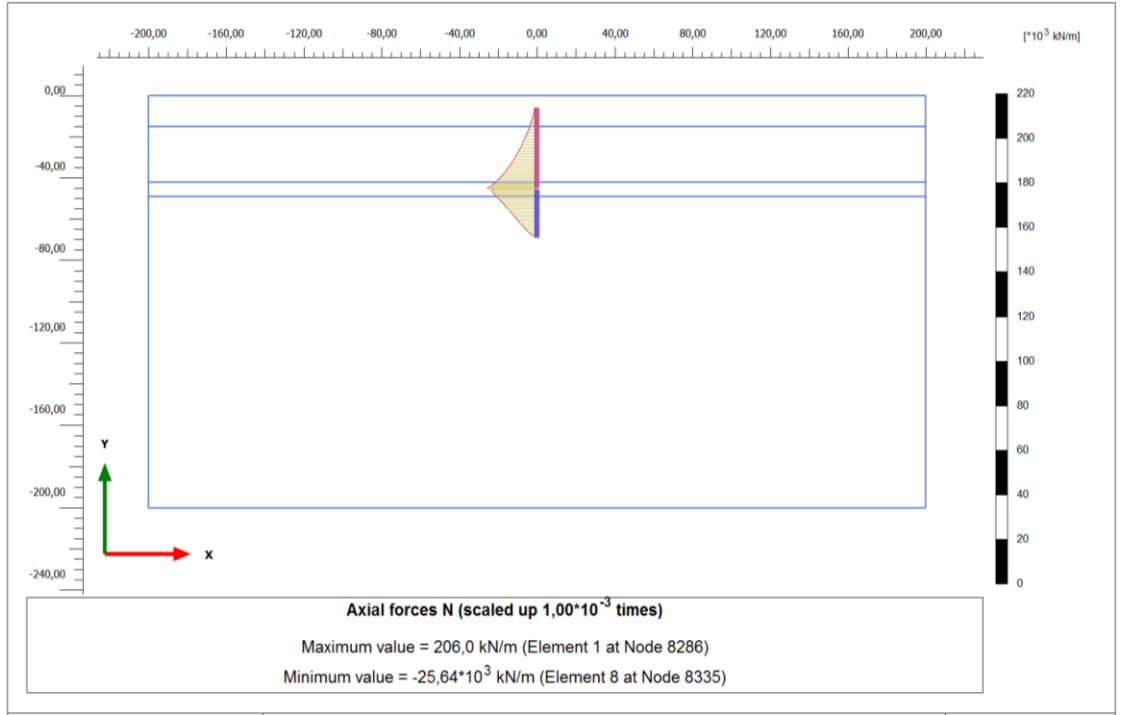
Şekil B.2 : Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.



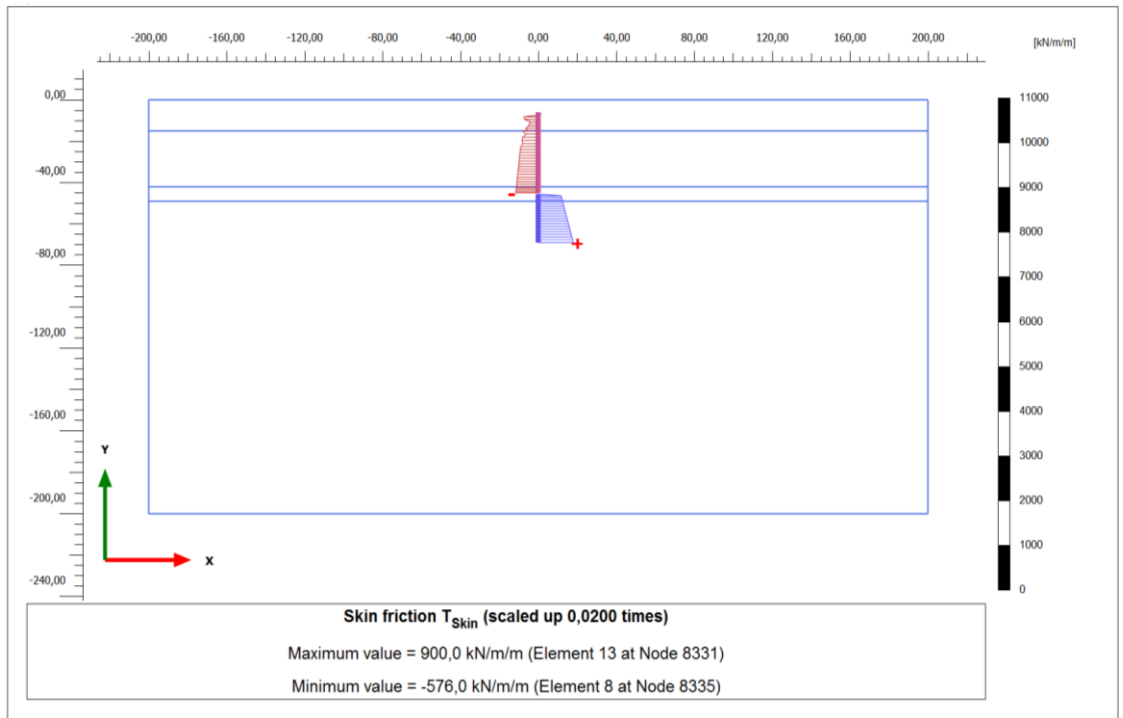
Şekil B.3 : Deney – 1, SEM – 1 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı



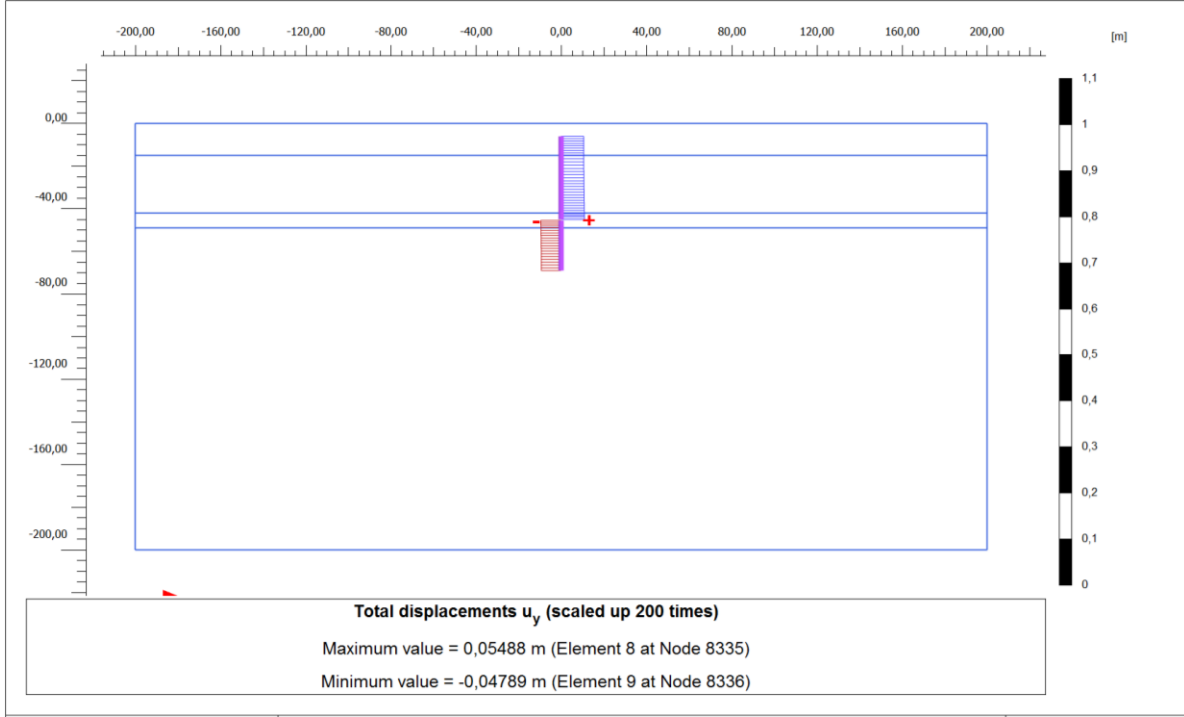
Şekil B.4 : Deney – 1, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



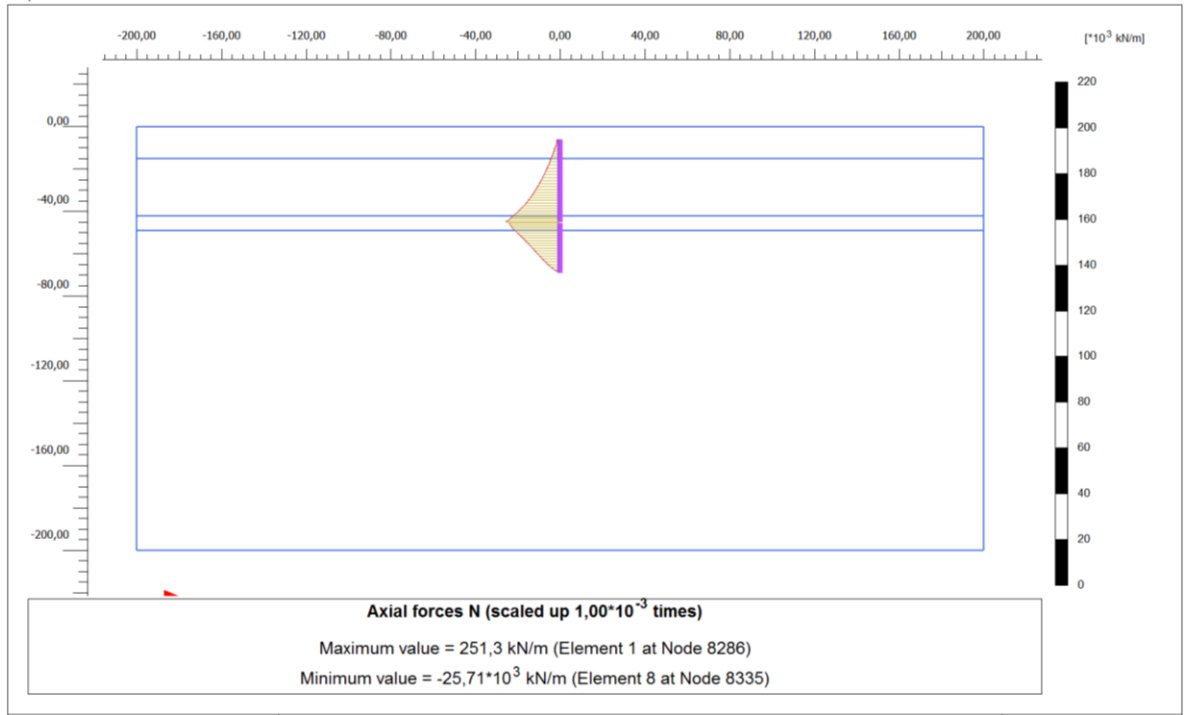
Şekil B.5 : Deneý – 1, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.



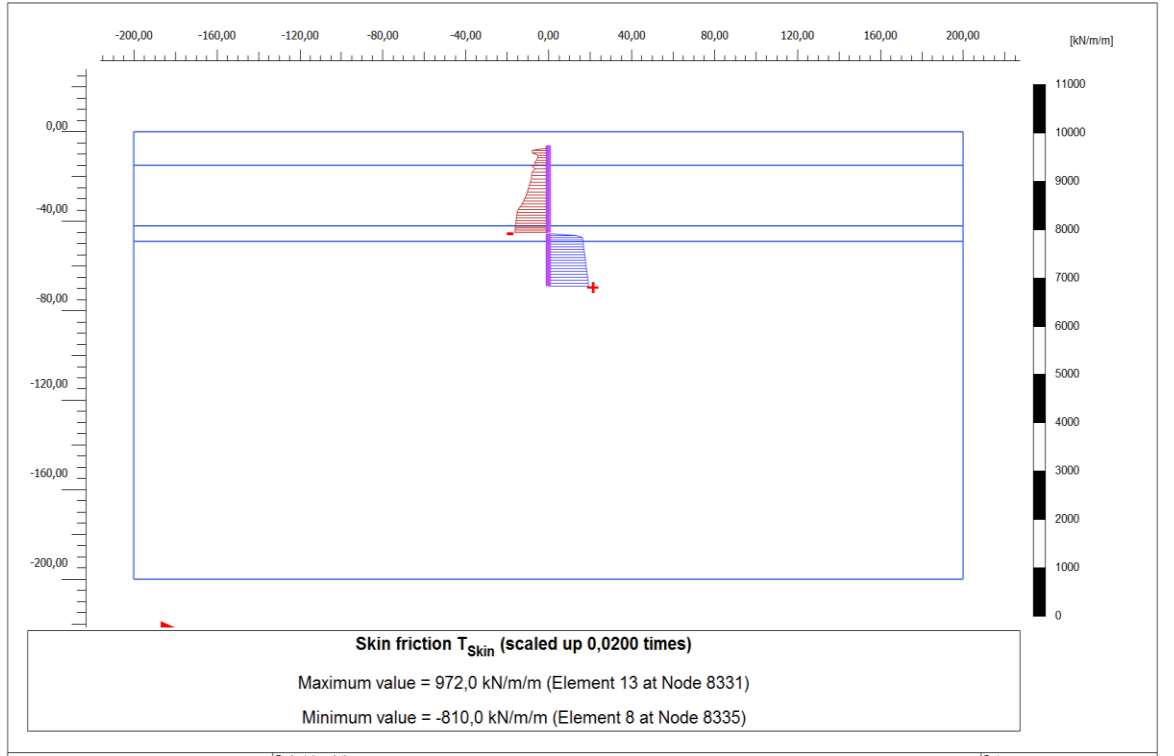
Şekil B.6 : Deneý – 1, SEM – 2 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



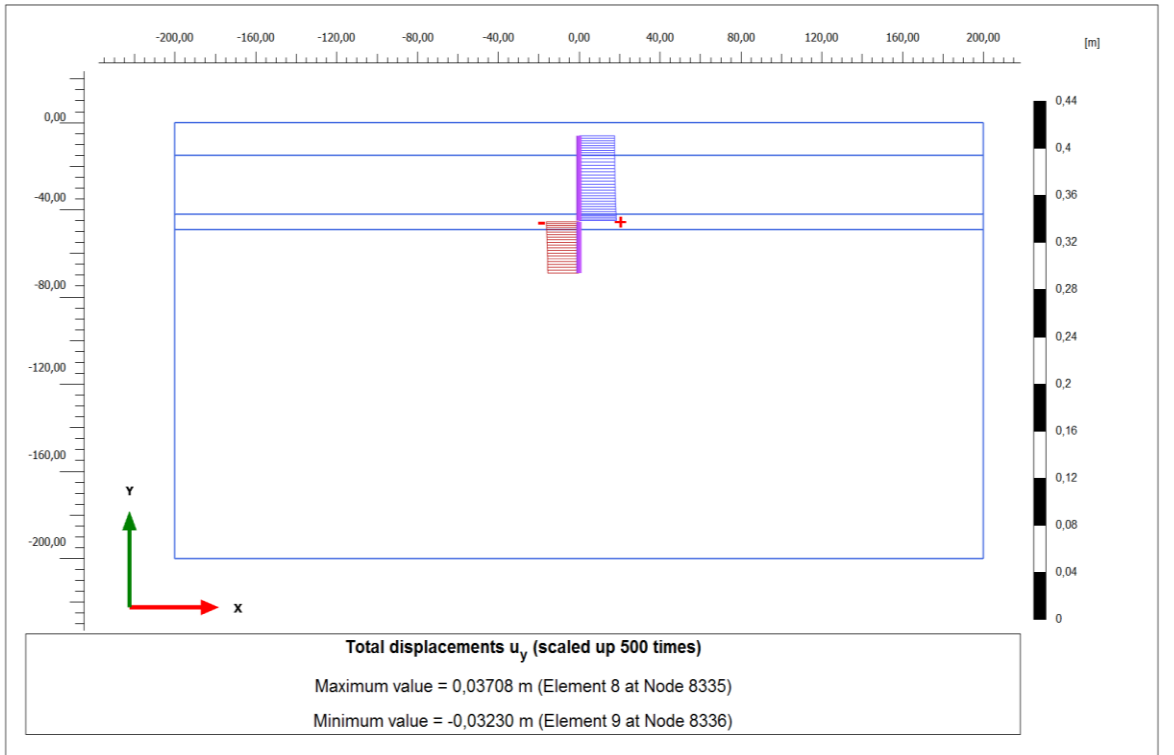
Şekil B.7 : Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



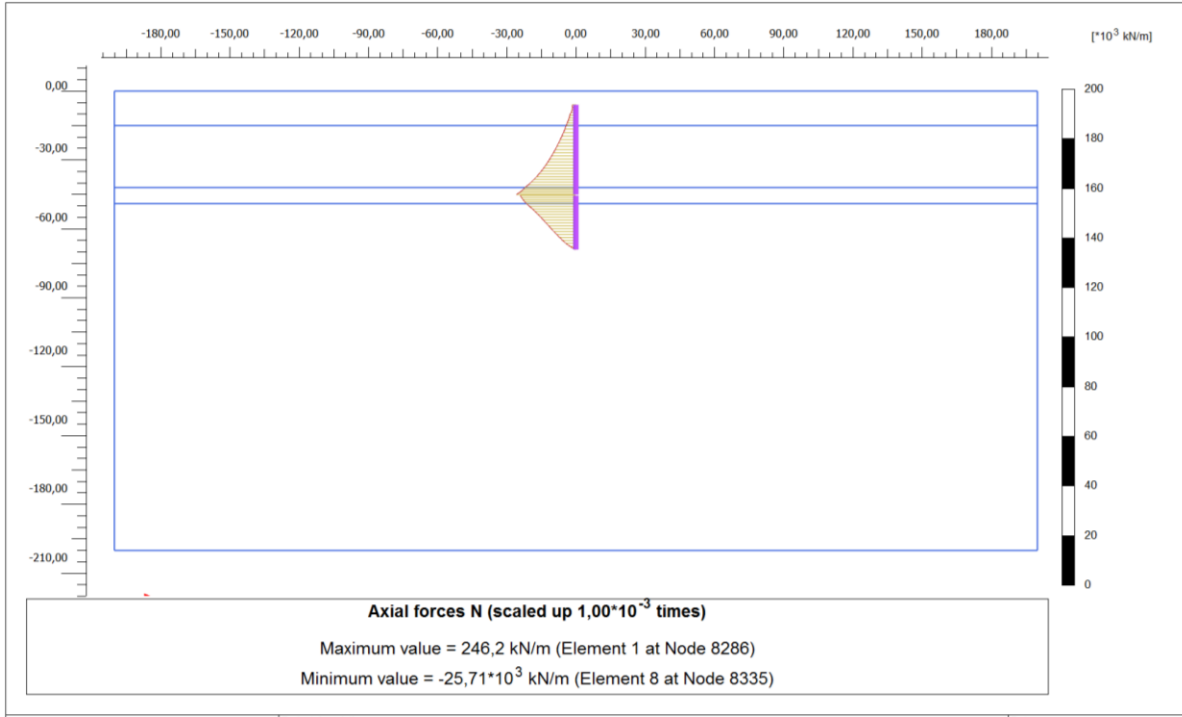
Şekil B.8 : Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.



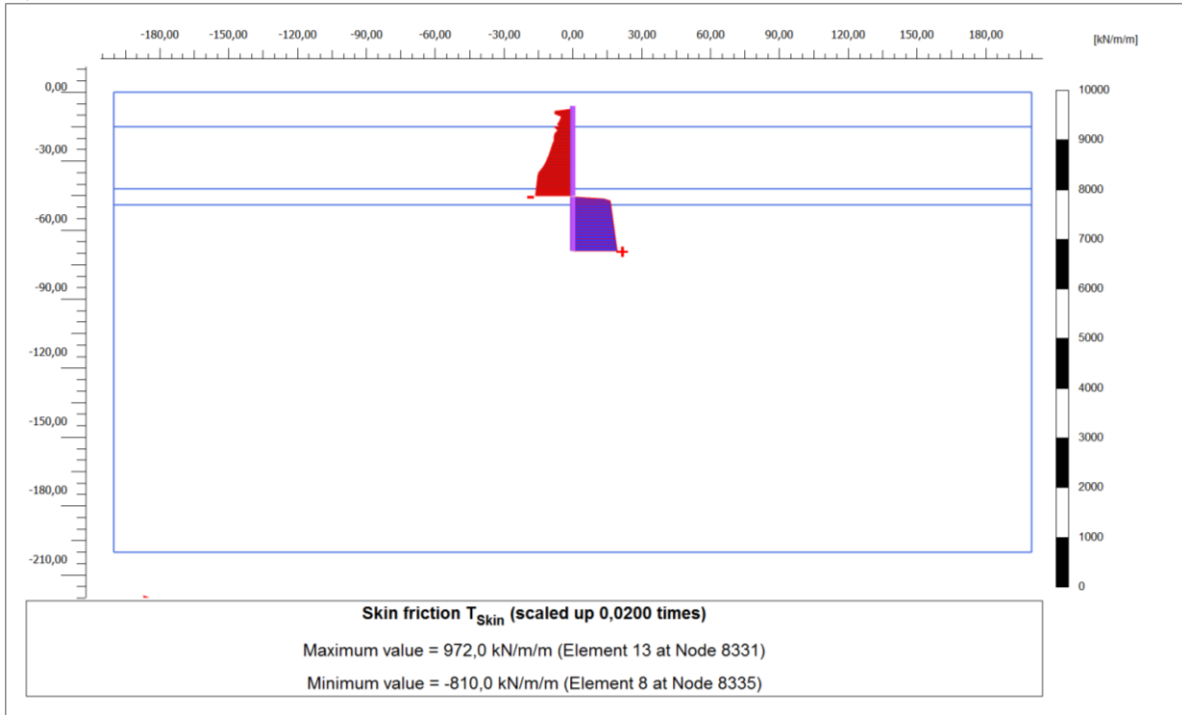
Şekil B.9 : Deney – 1, SEM – 3 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



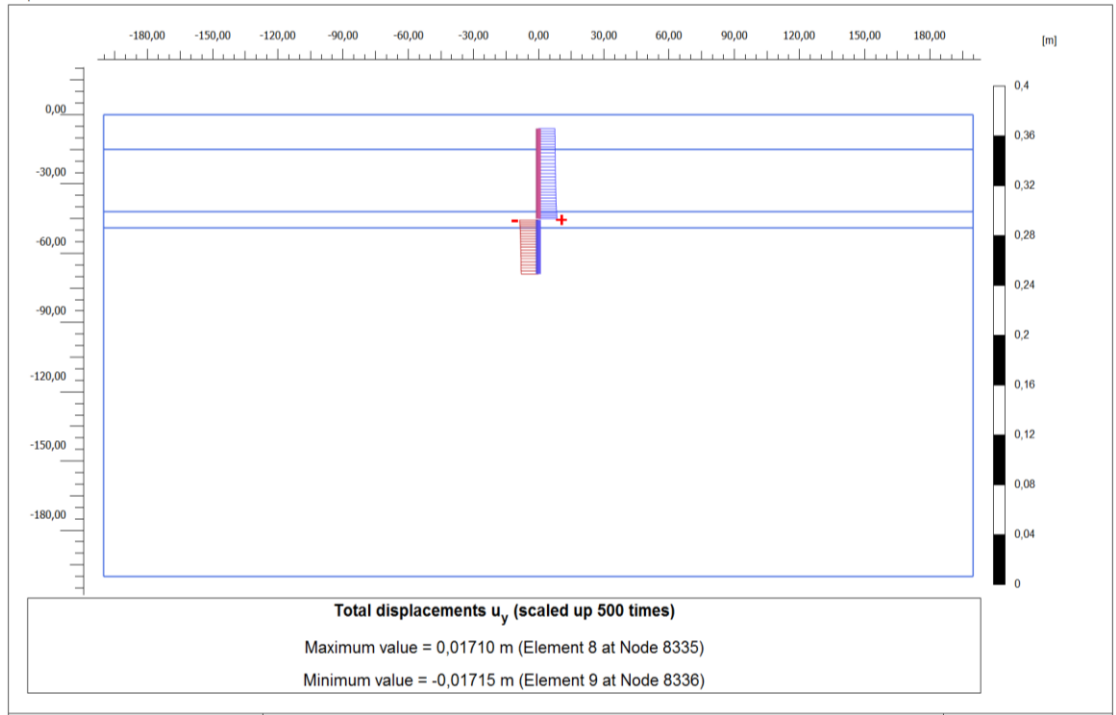
Şekil B.10 : Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



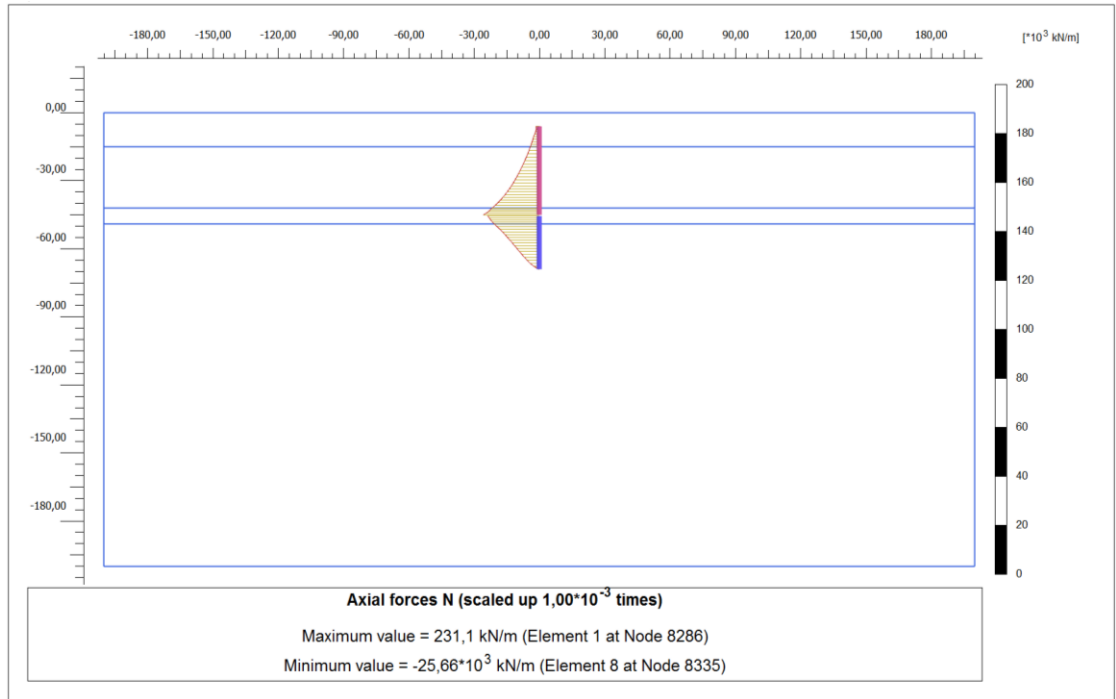
Şekil B.11 : Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.



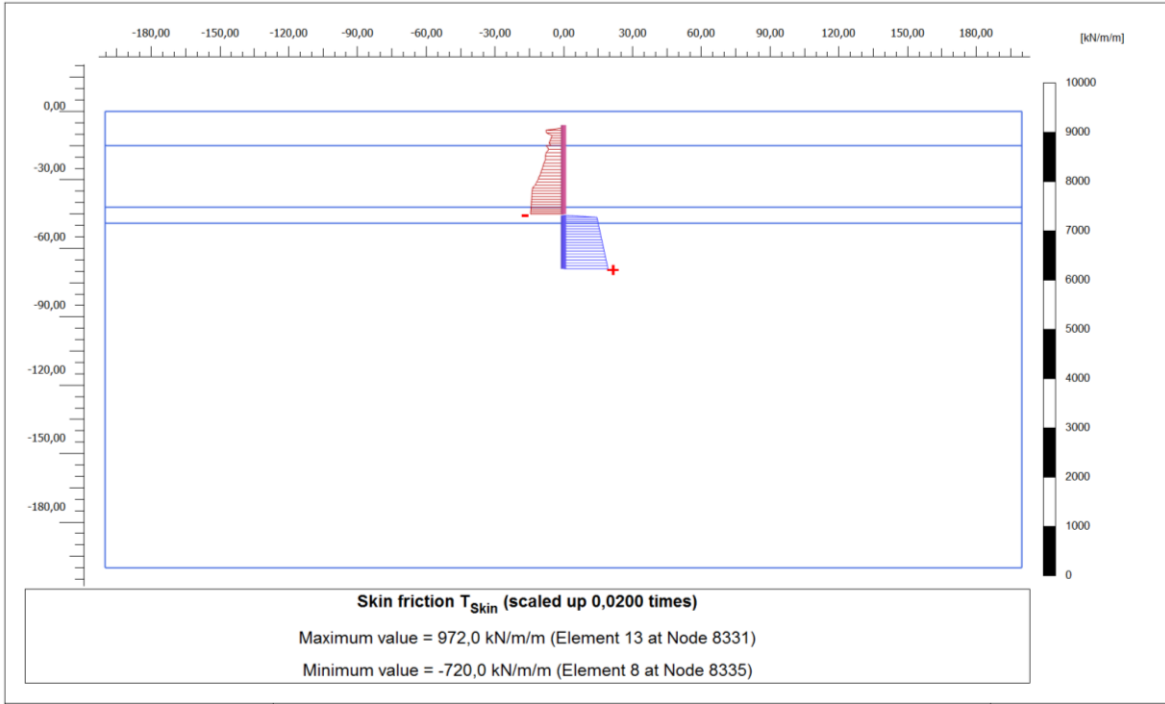
Şekil B.12 : Deney – 1, SEM – 4 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



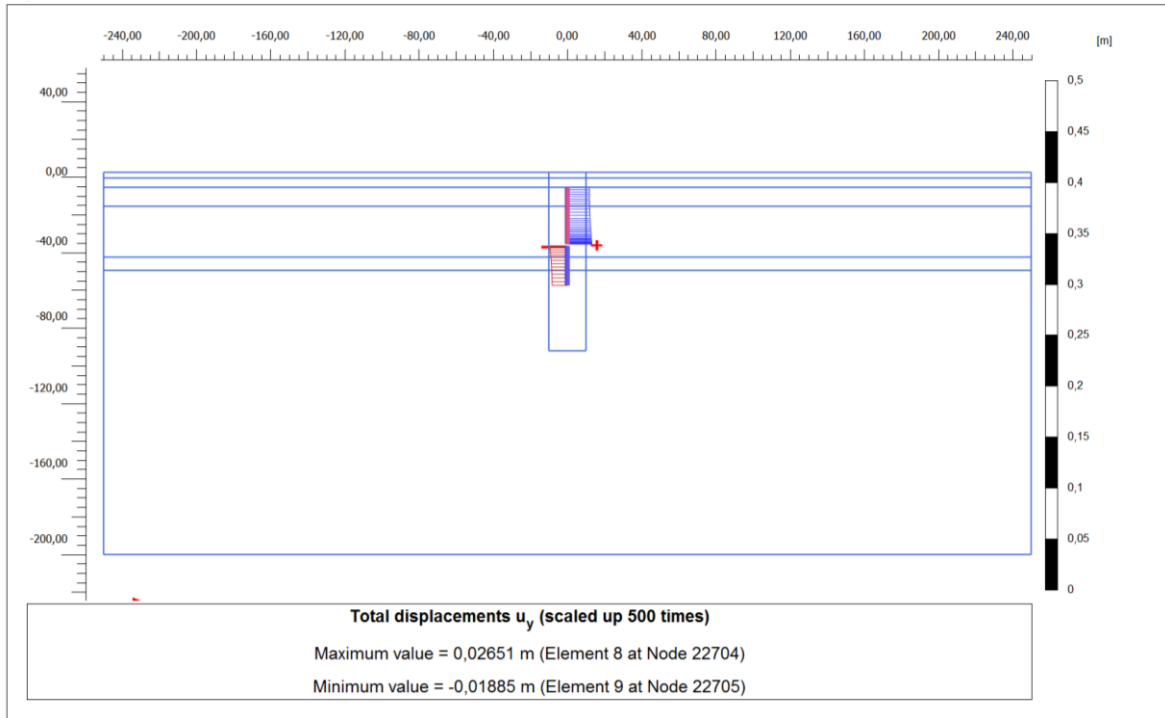
Şekil B.13 : Deney – 1, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



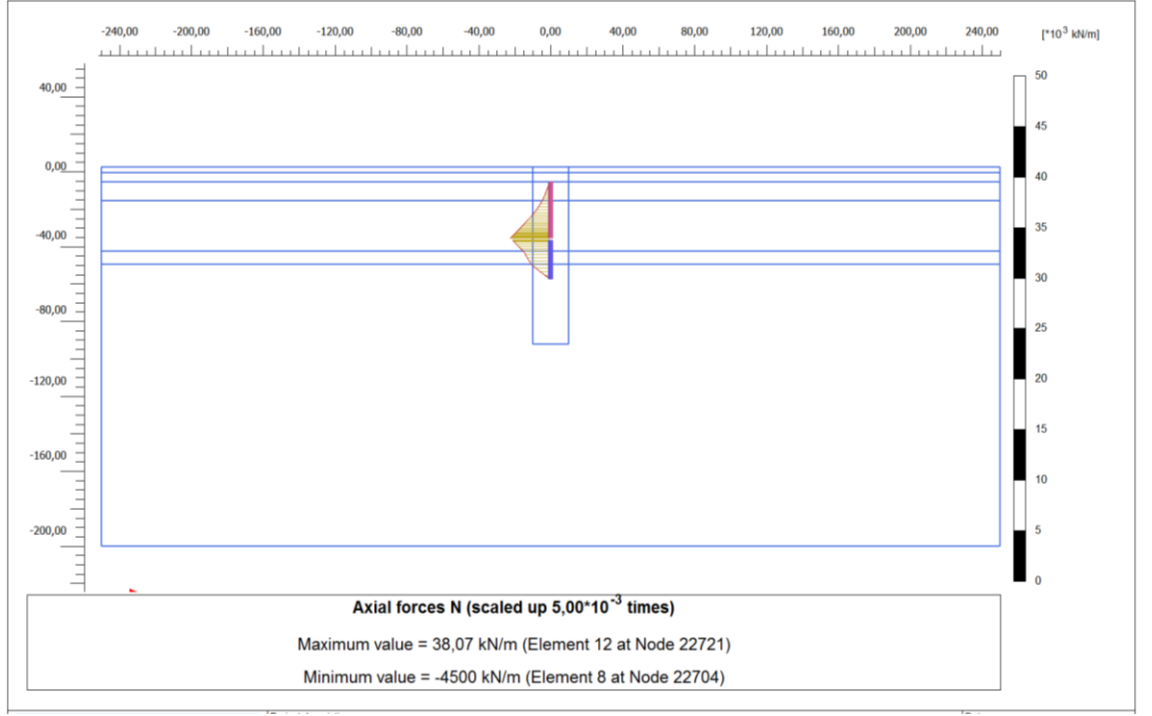
Şekil B.14 : Deney – 1, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında yük dağılımı.



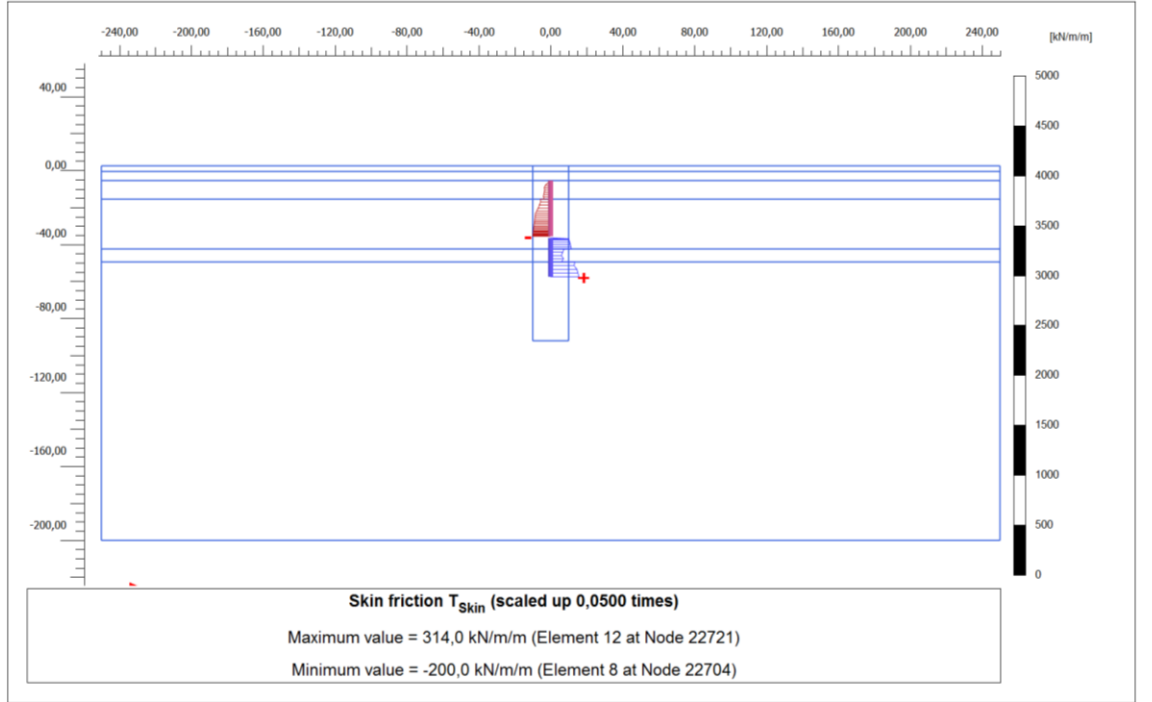
Şekil B.15 : Deneý – 1, SEM – 5 analizi sonucu baret alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



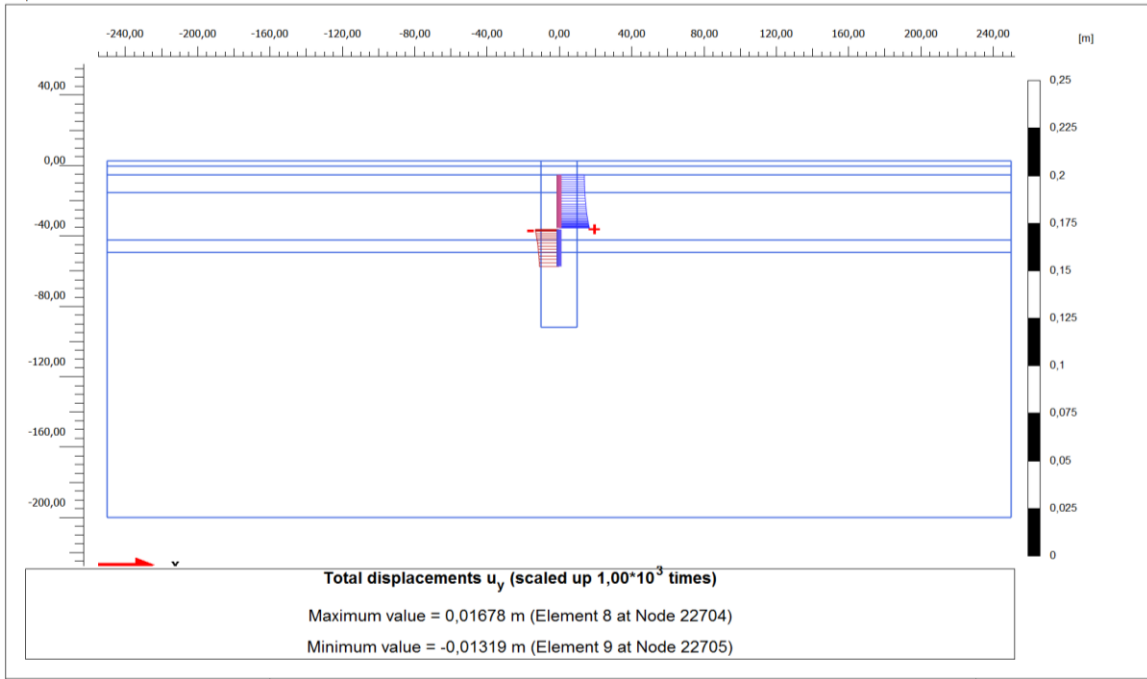
Şekil B.16 : Deneý – 2, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



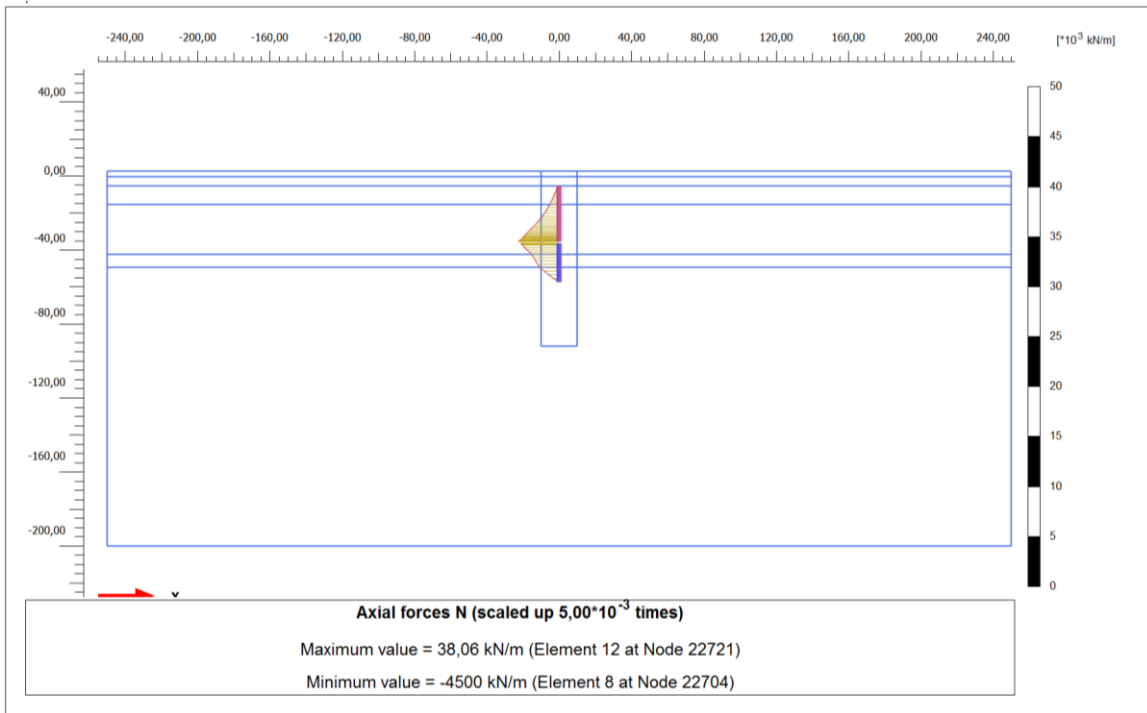
Şekil B.17 : Deney – 2, SEM – 1 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında yük dağılımı.



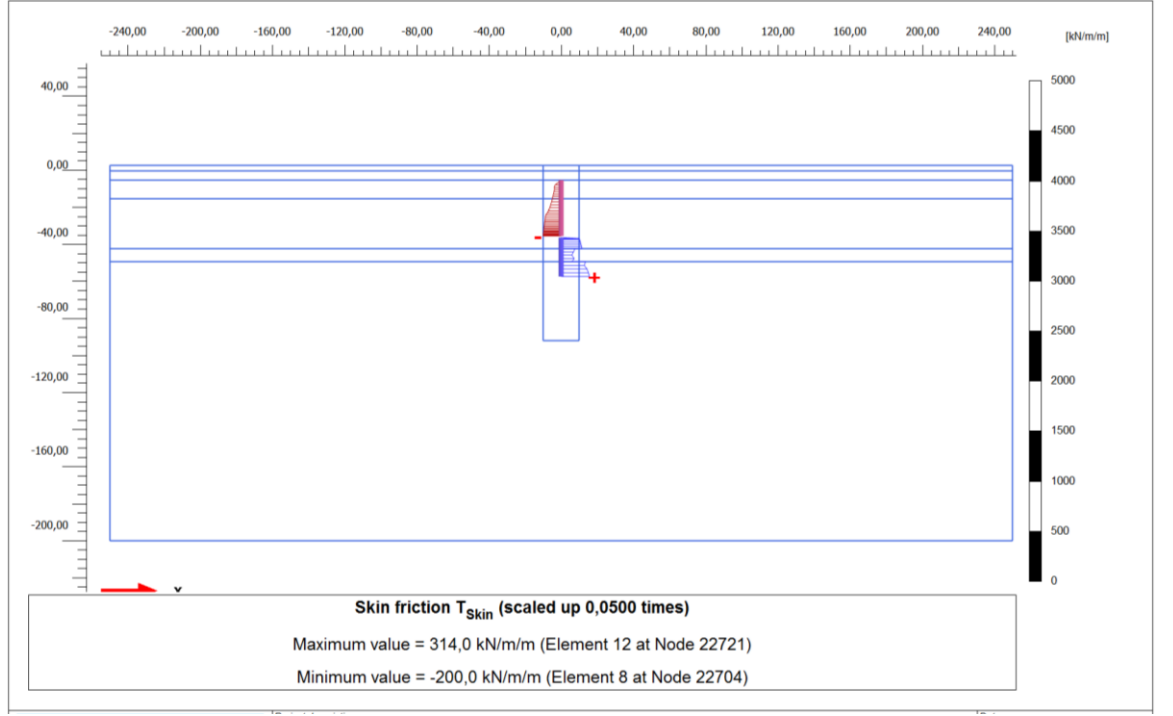
Şekil B.18 : Deney – 2, SEM – 1 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



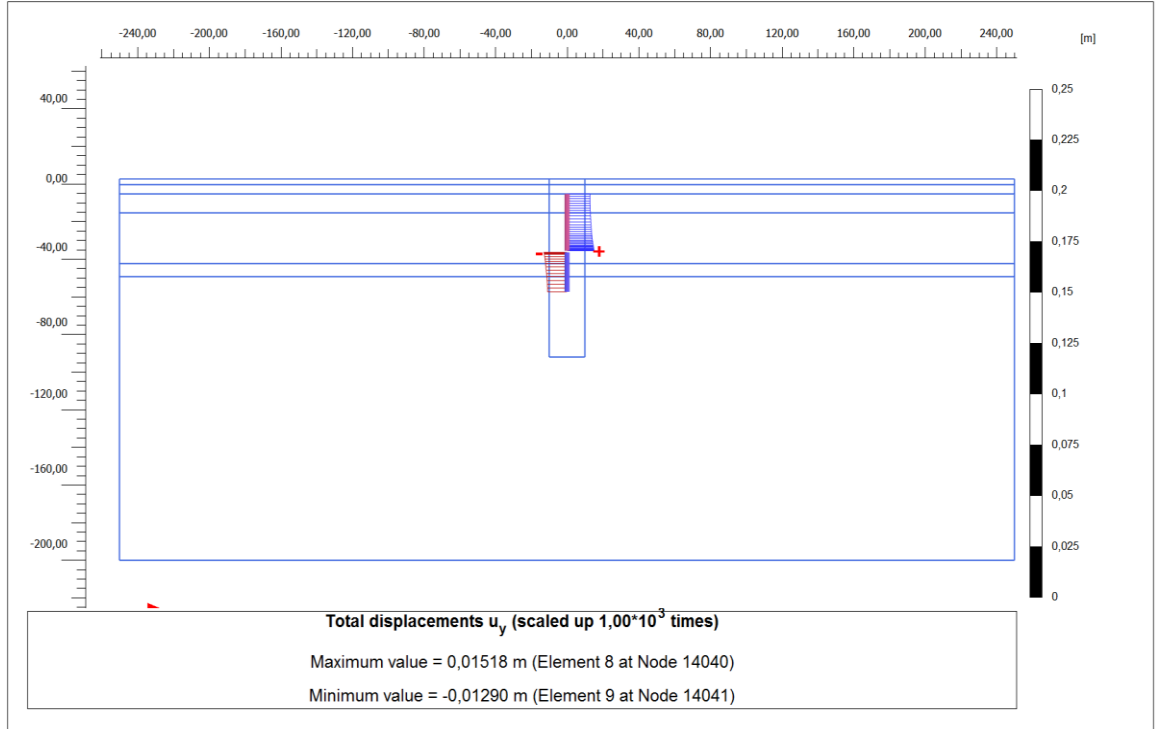
Şekil B.19: Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



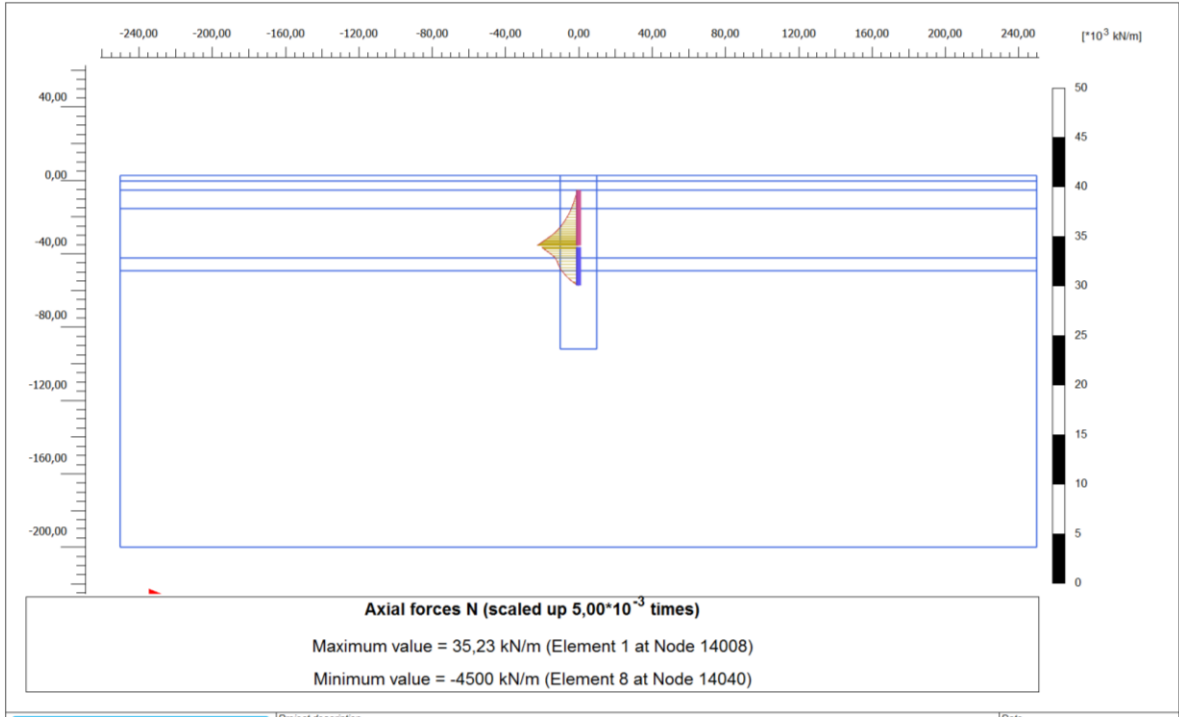
Şekil B.20 : Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında yük dağılımı.



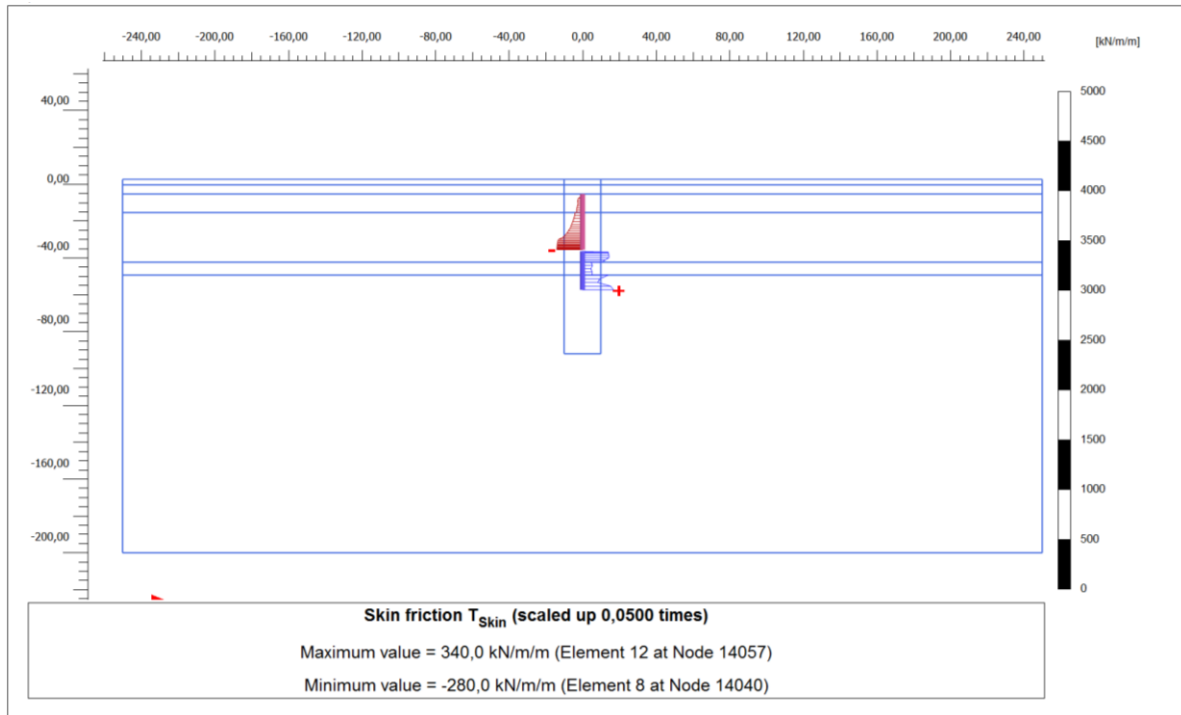
Şekil B.21 : Deney – 2, SEM – 2 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



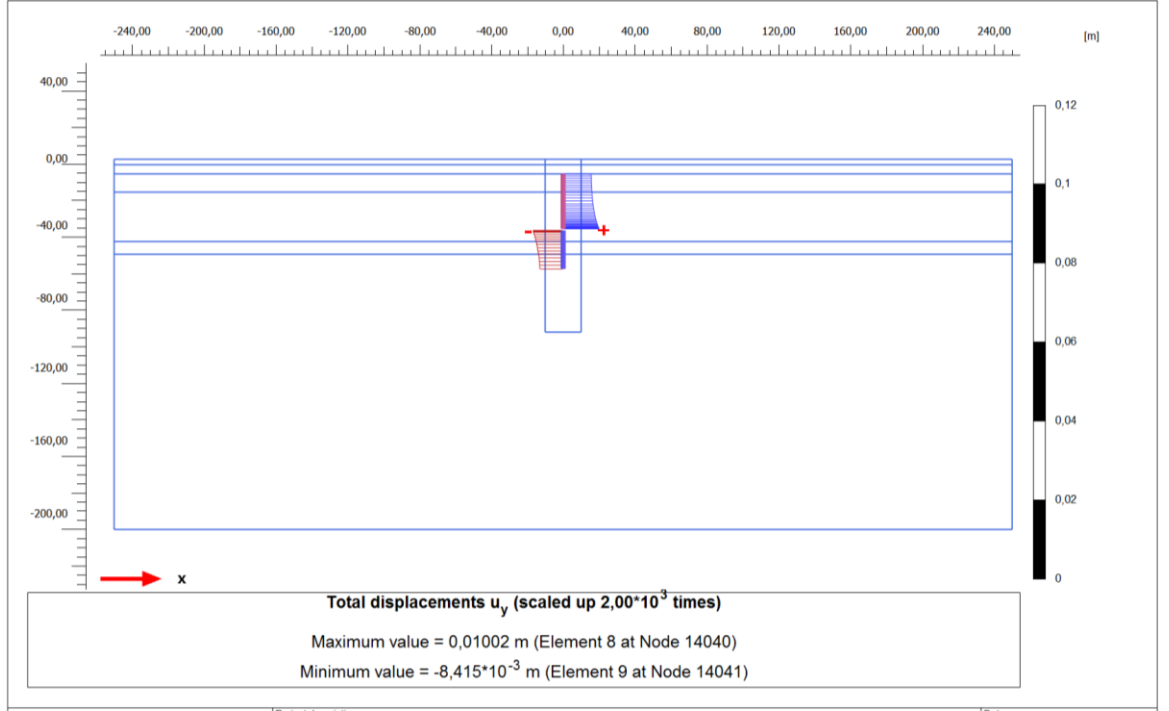
Şekil B.22: Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



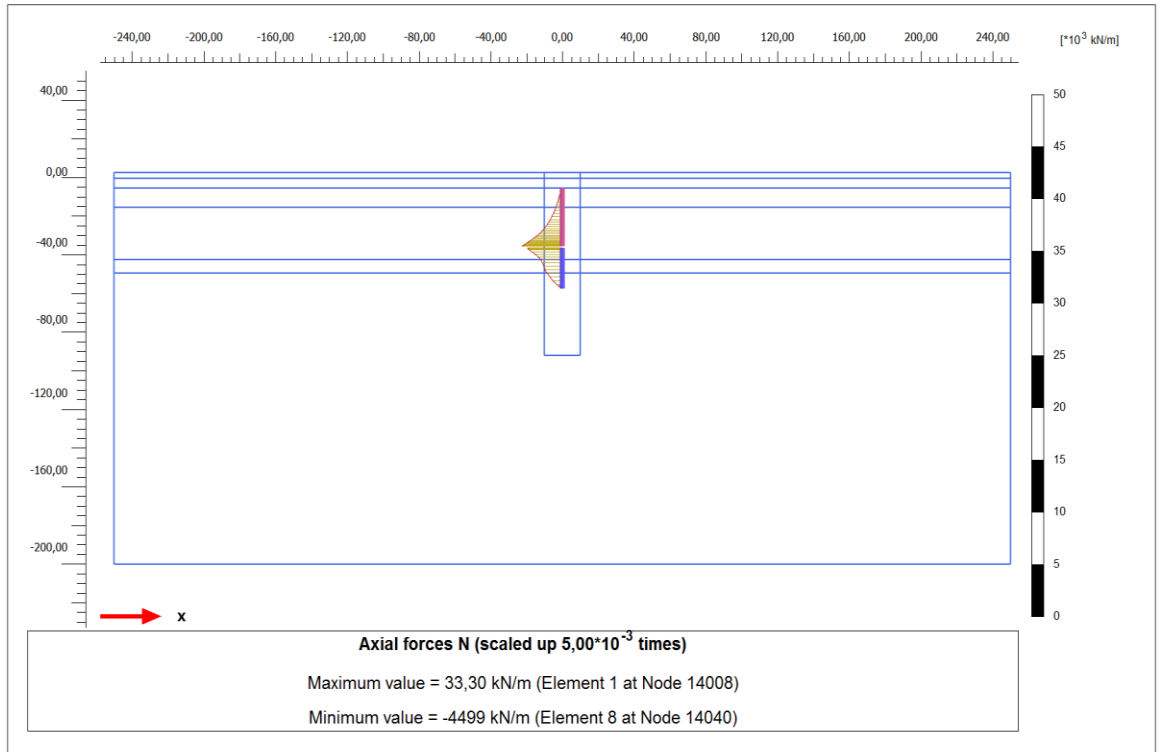
Şekil B.23 : Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında yük dağılımı.



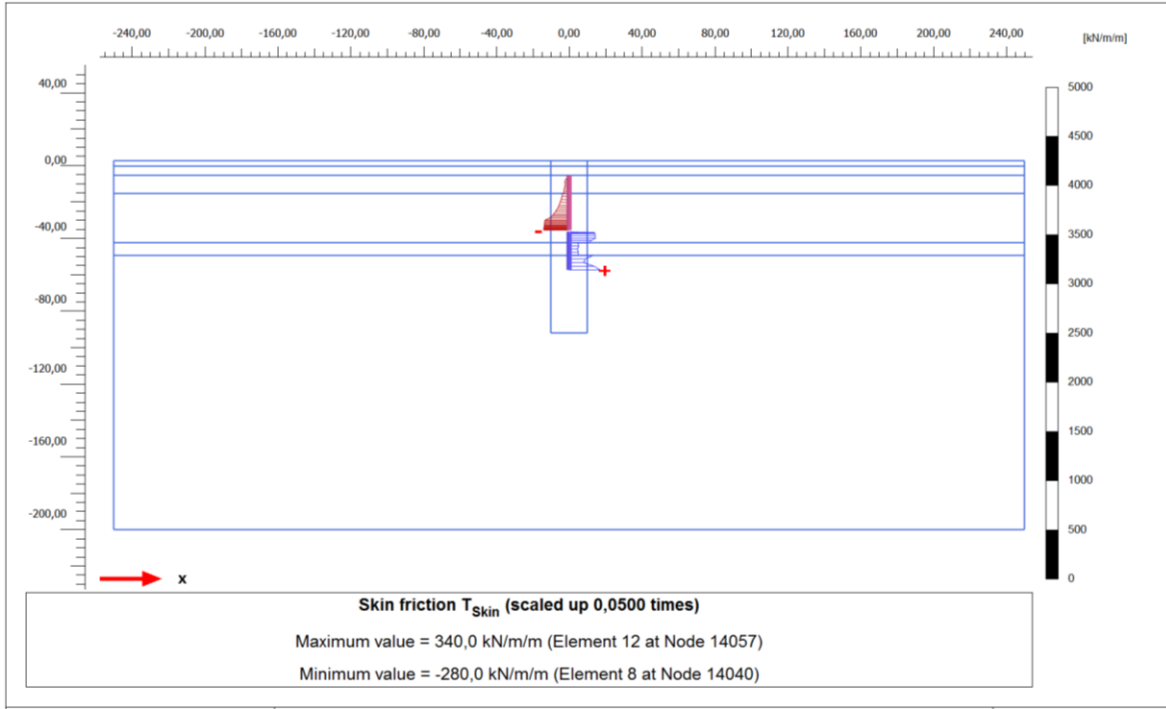
Şekil B.24 : Deney – 2, SEM – 3 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



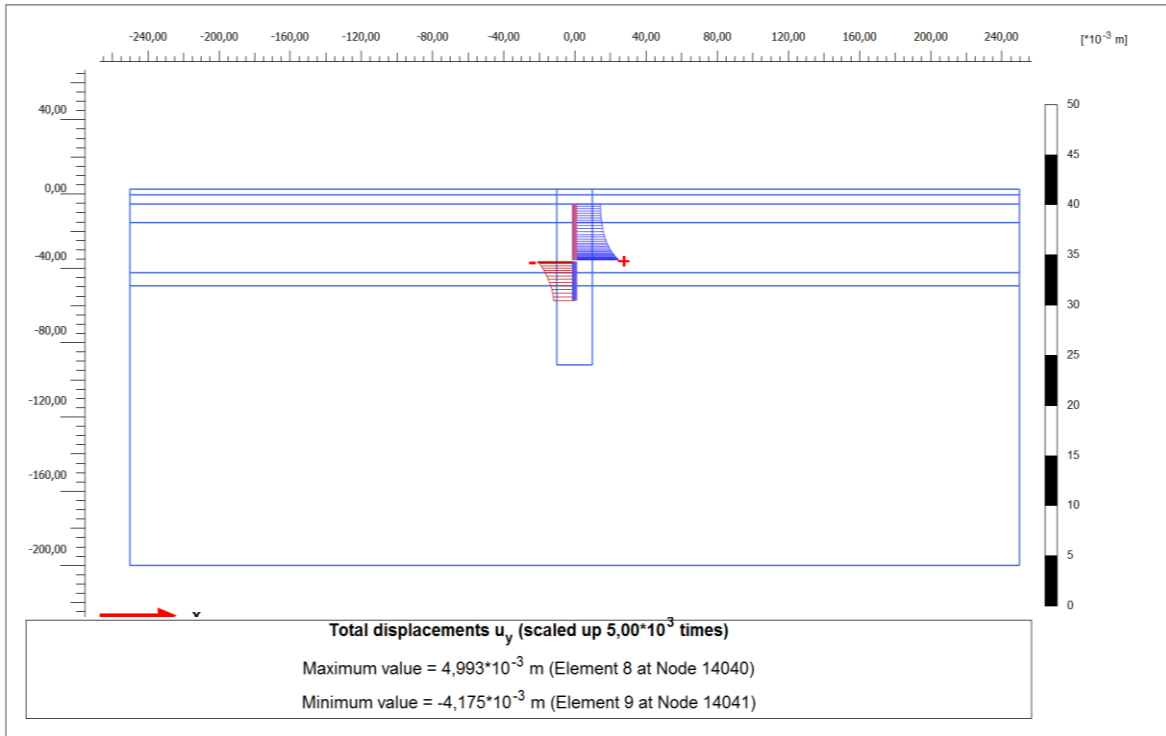
Şekil B.25 : Deney – 2, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



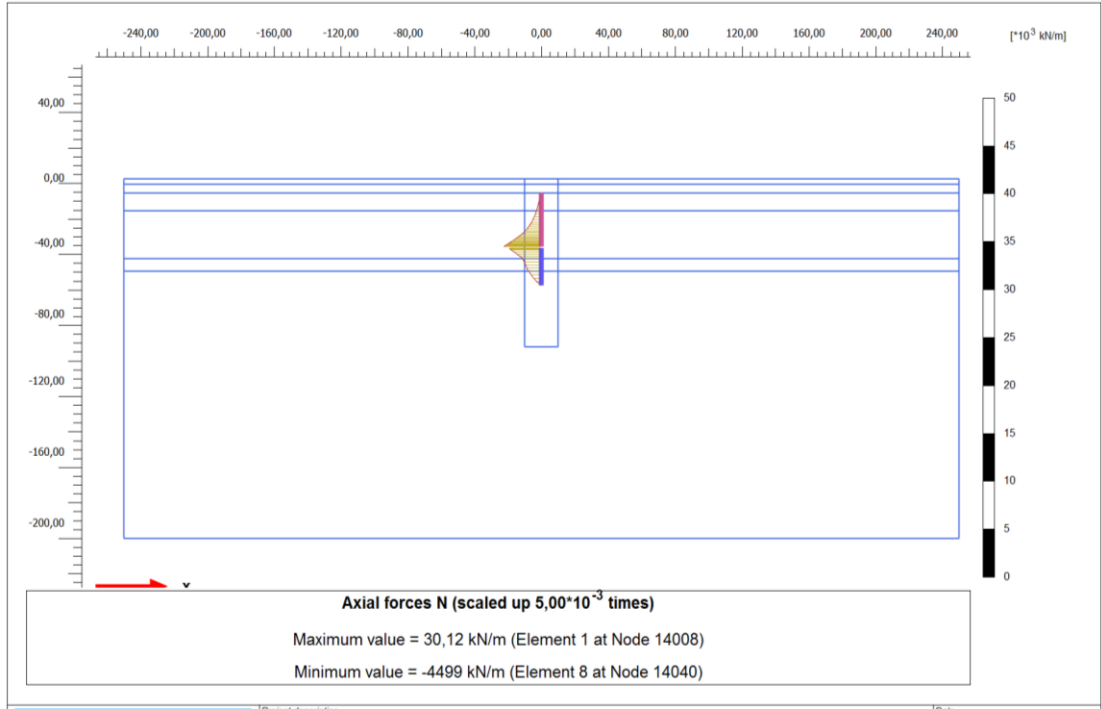
Şekil B.26 : Deney – 2, SEM – 4 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında yük dağılımı.



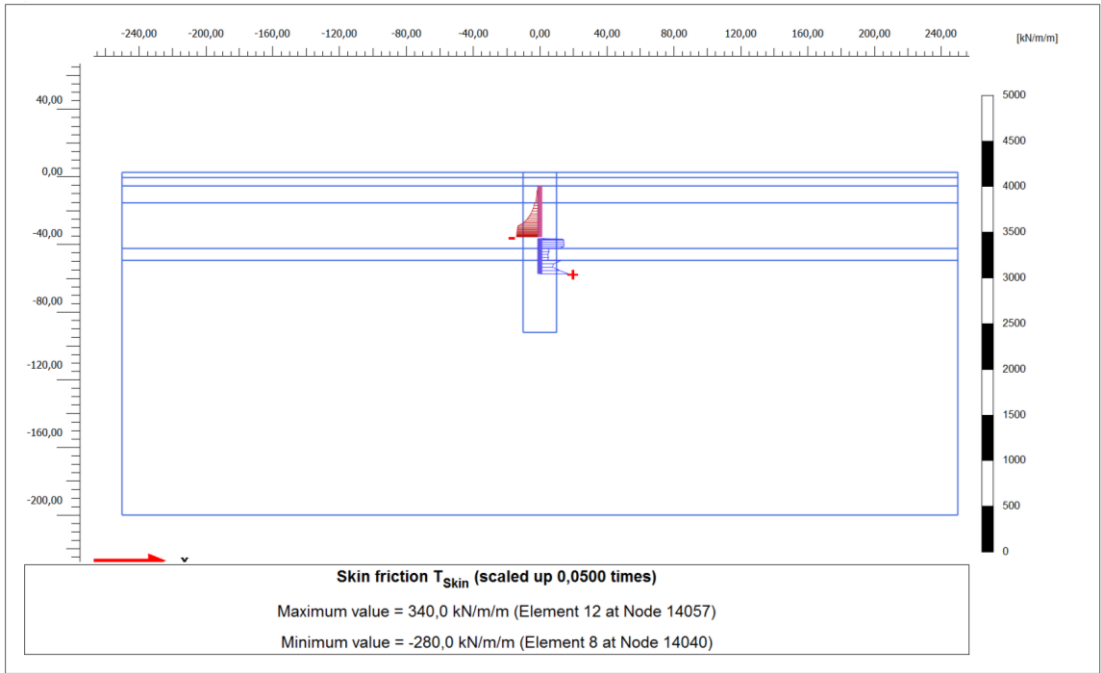
Şekil B.27 : Deneý – 2, SEM – 4 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



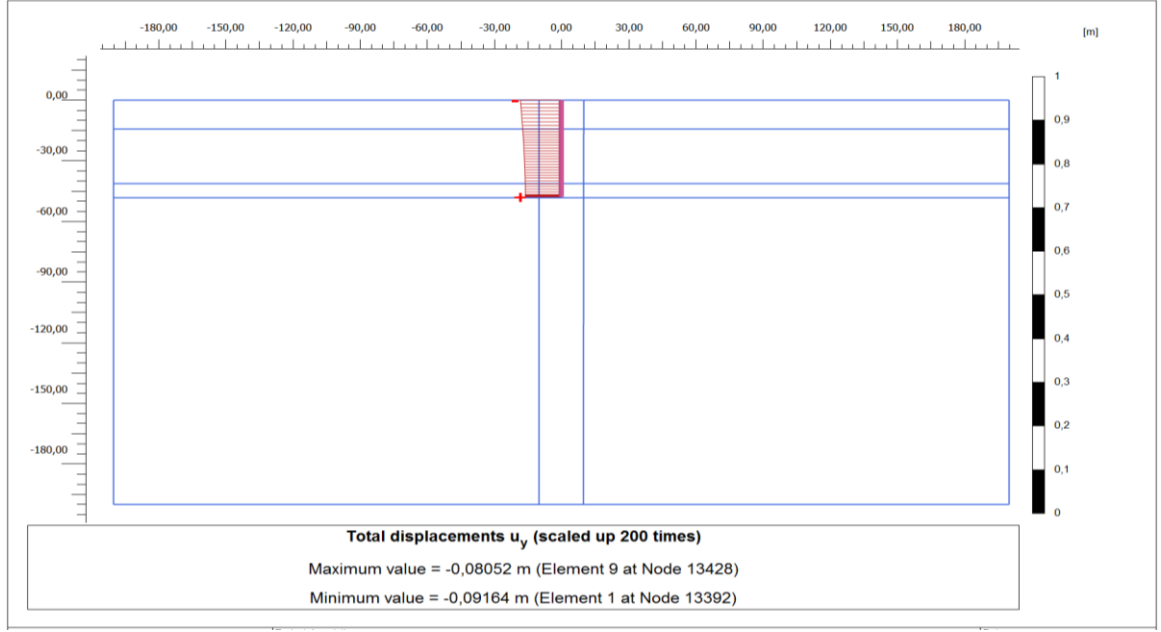
Şekil B.28 : Deneý – 2, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



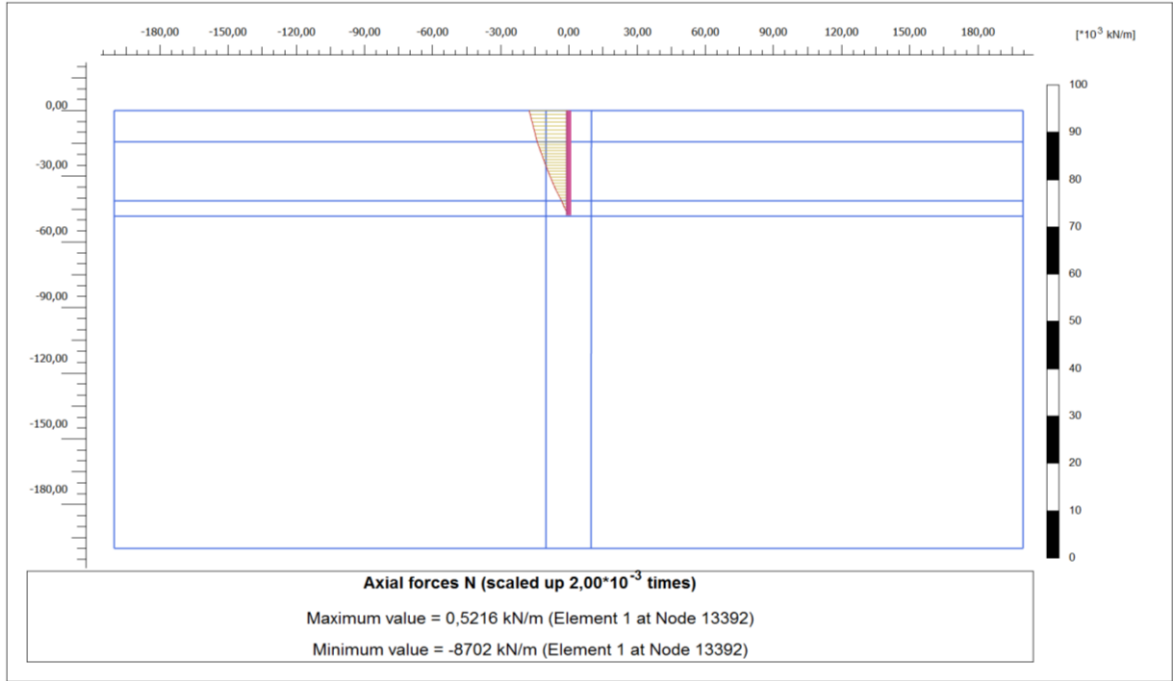
Şekil B.29 : Deney – 2, SEM – 5 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında yük dağılımı.



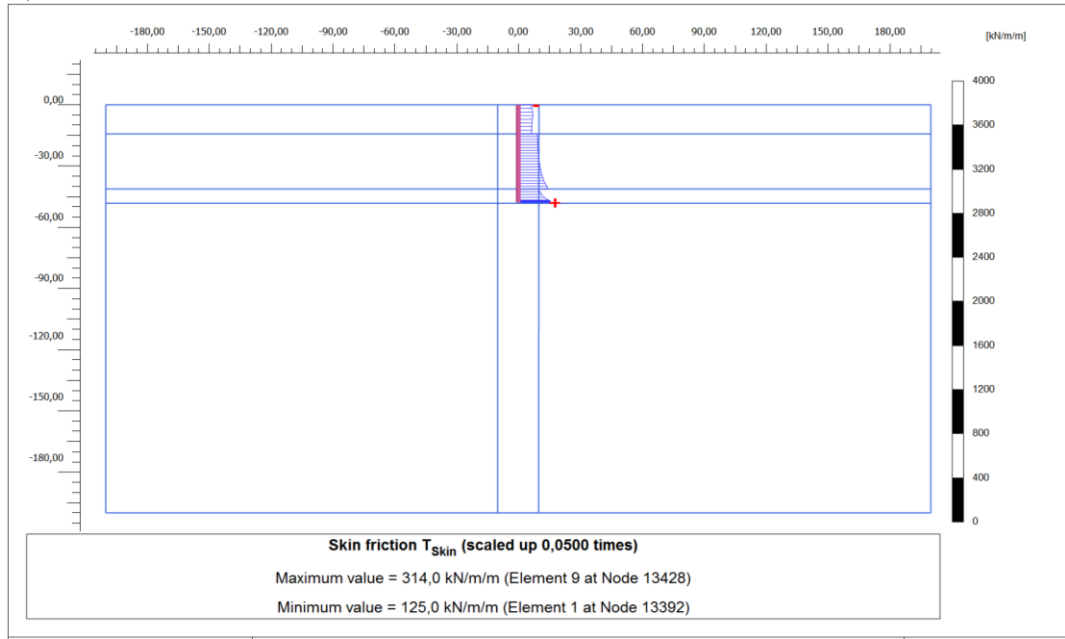
Şekil B.30 : Deney – 2, SEM – 5 analizi sonucu kazık alt ve üst parçasında mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



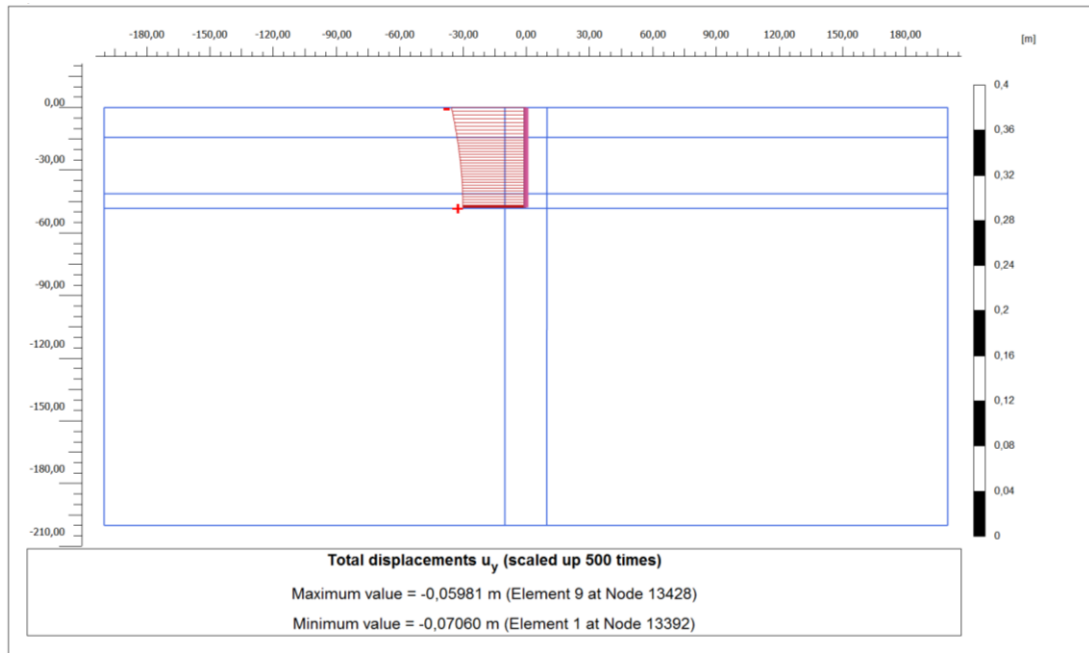
Şekil B.31 : Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



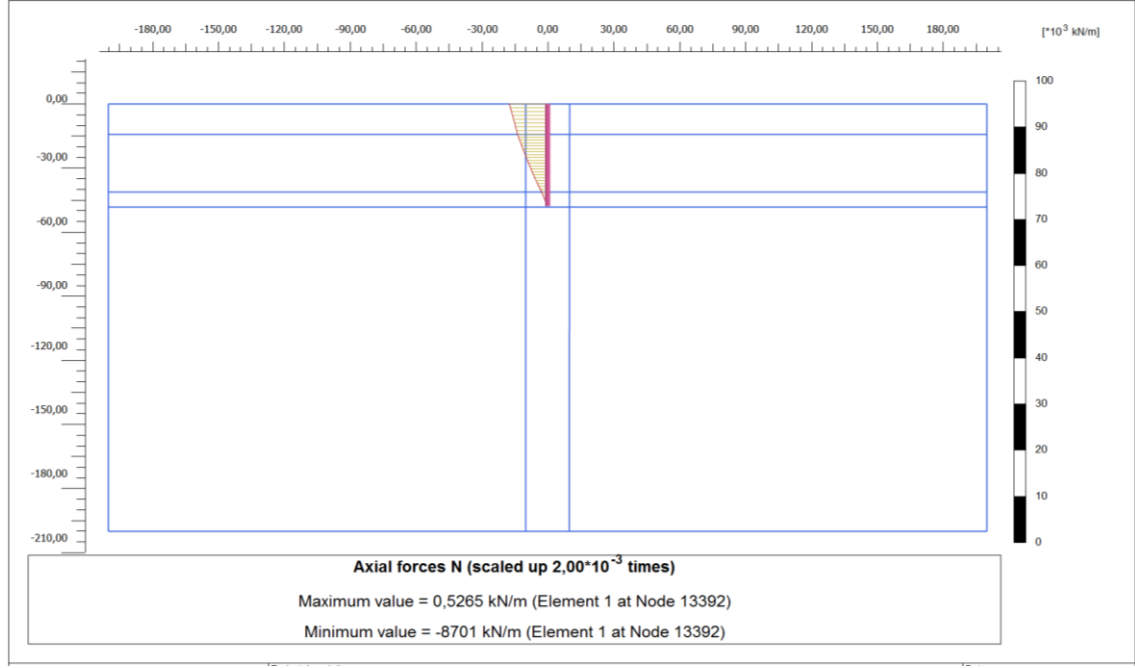
Şekil B.32 : Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.



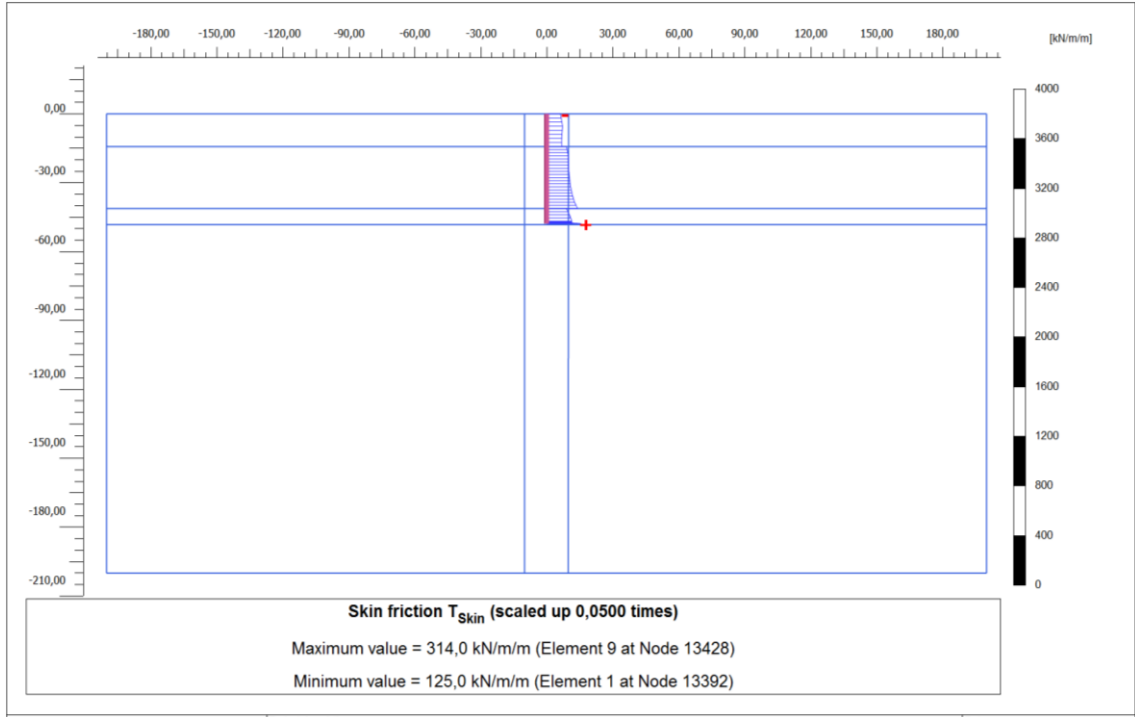
Şekil B.33 : Deney – 3, SEM – 1 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



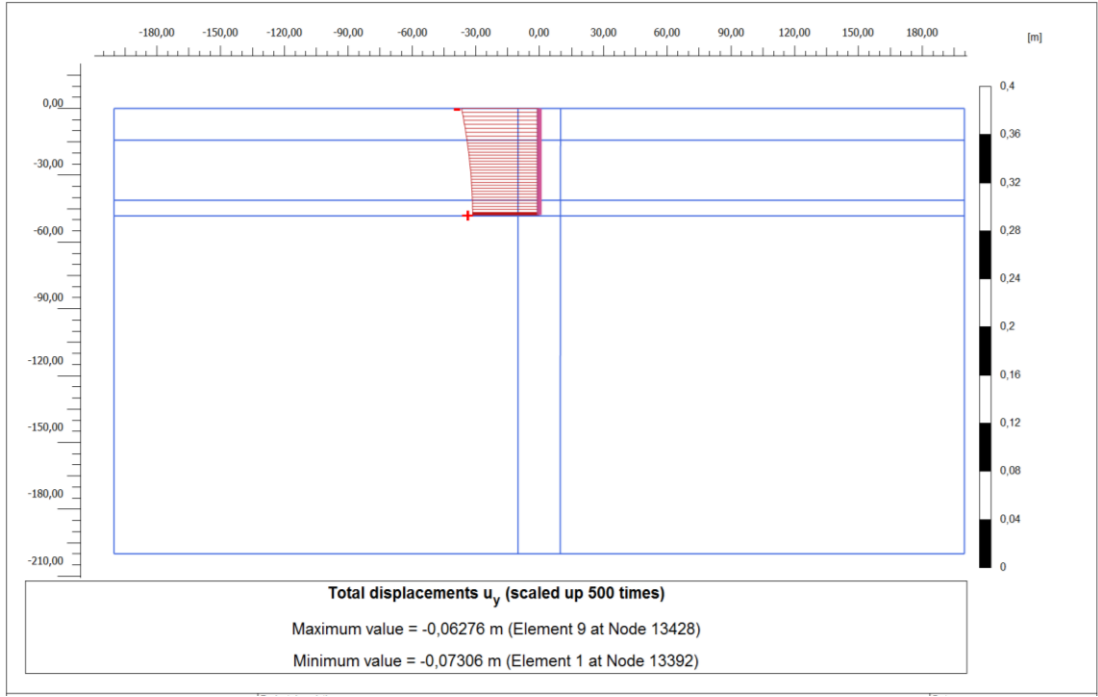
Şekil B.34: Deney – 3, SEM – 2 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



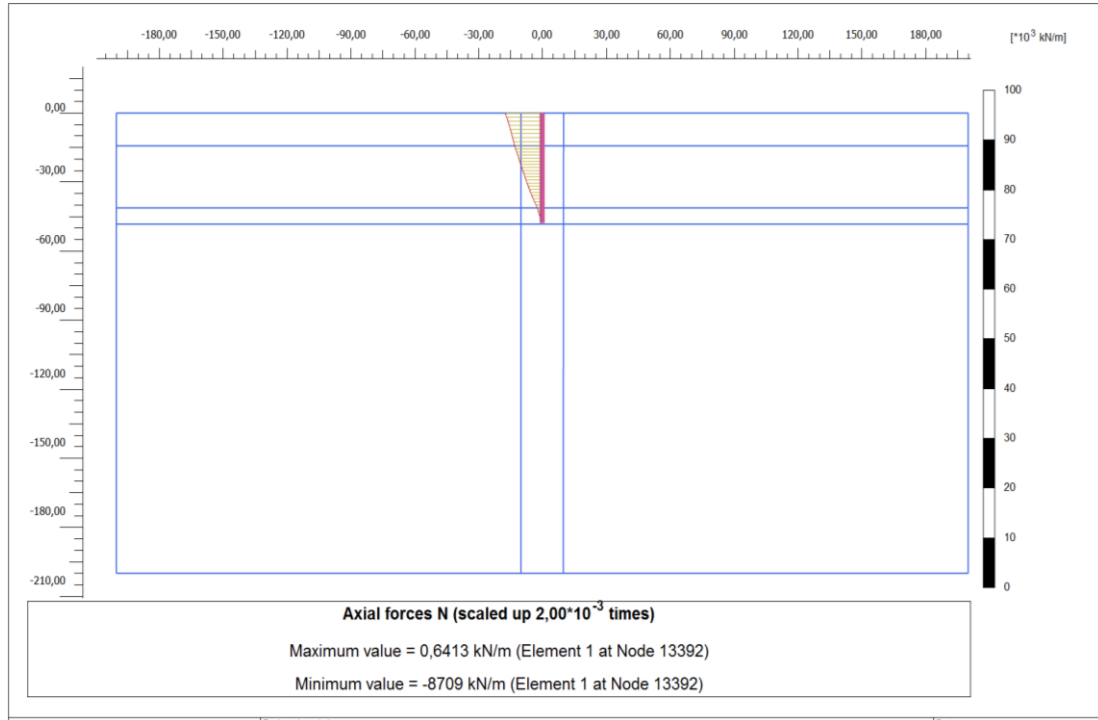
Şekil B.35 : Deneý – 3, SEM – 2 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.



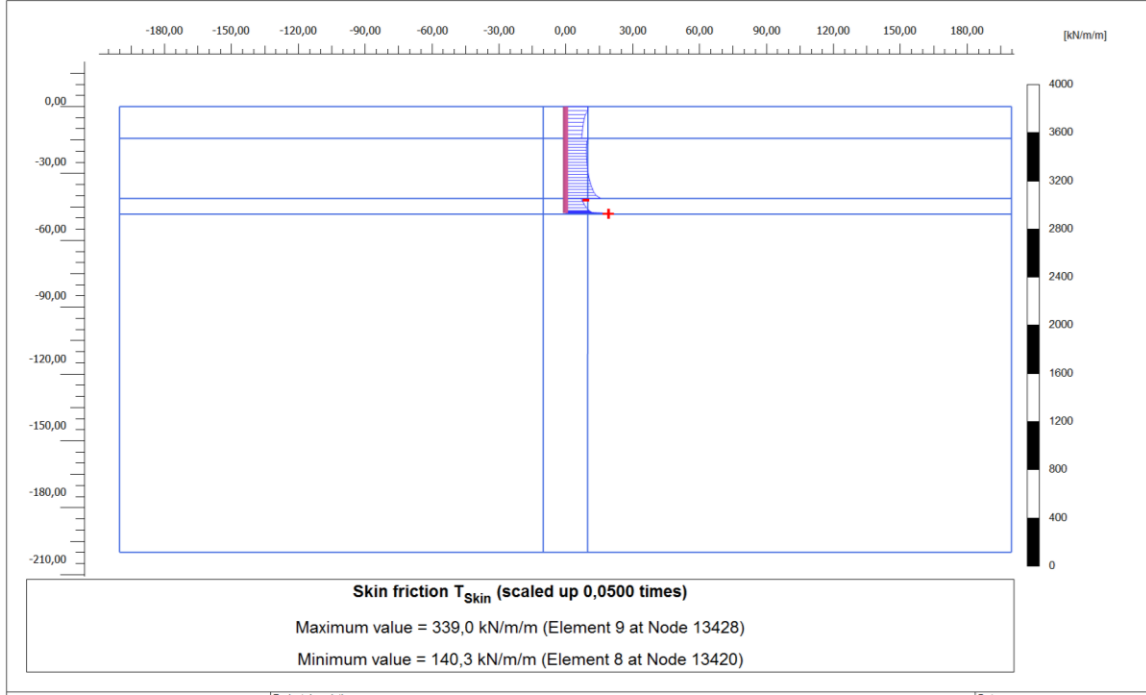
Şekil B.36 : Deneý – 3, SEM – 2 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



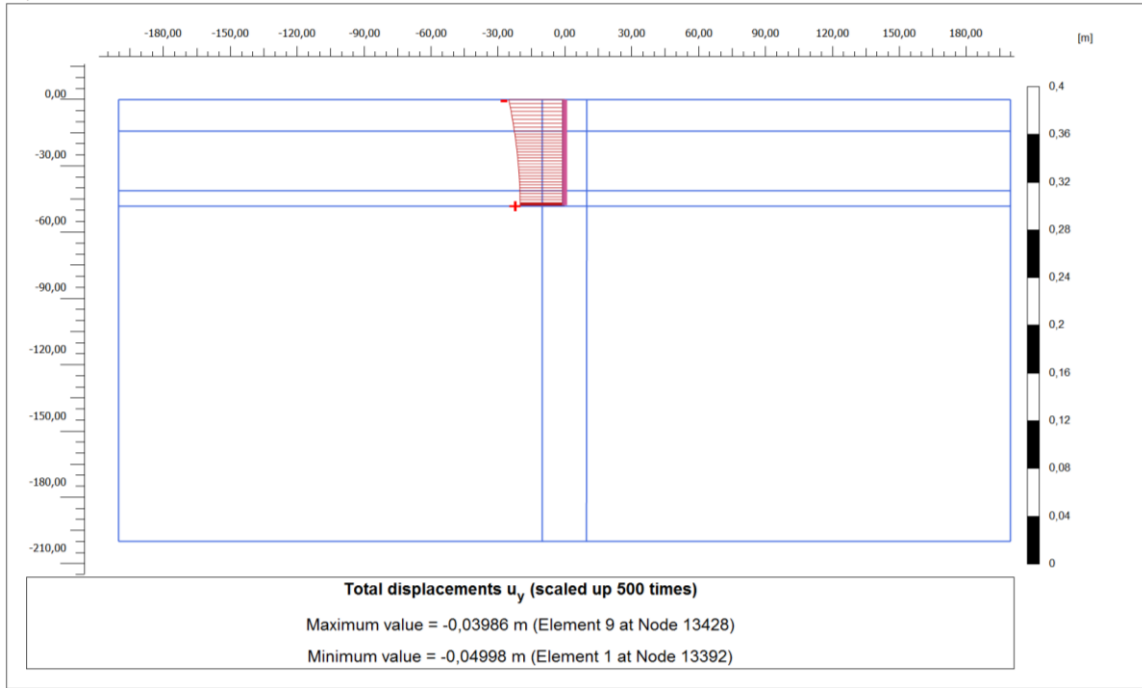
Şekil B.37: Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



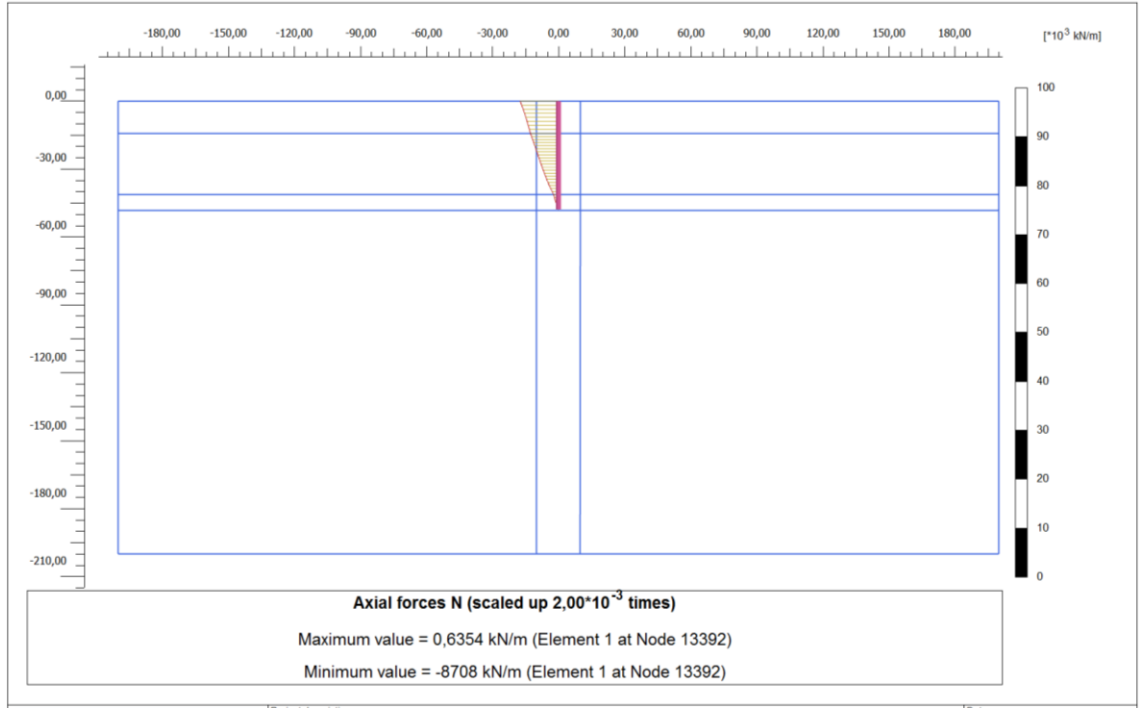
Şekil B.38 : Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.



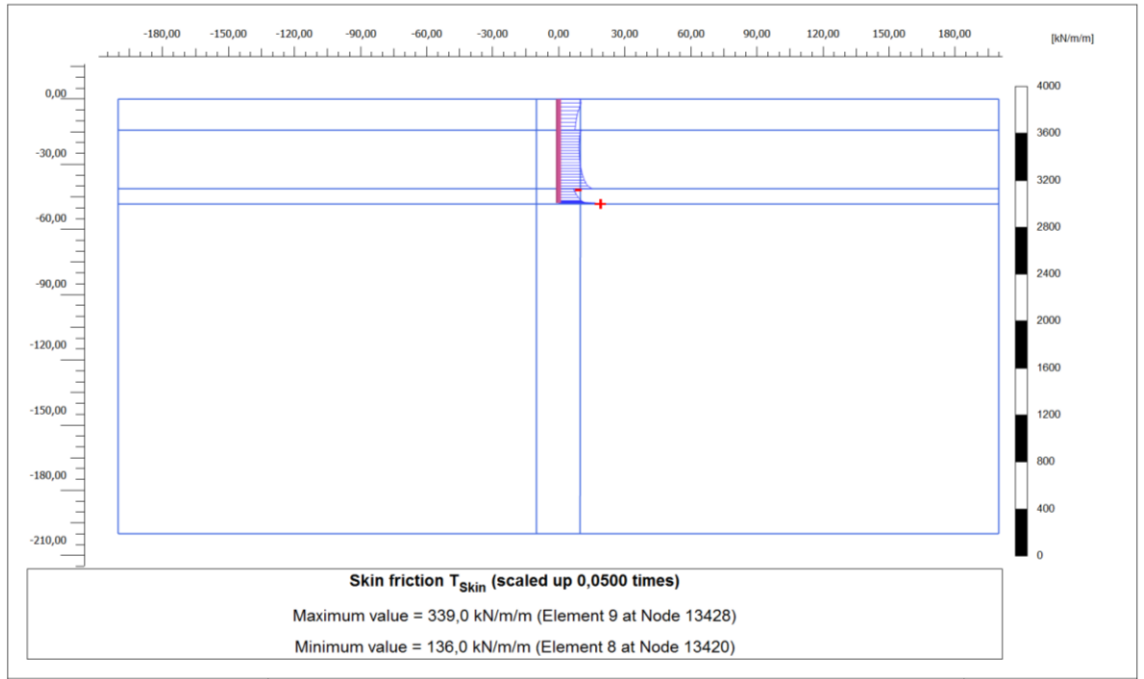
Şekil B.39 : Deney – 3, SEM – 3 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



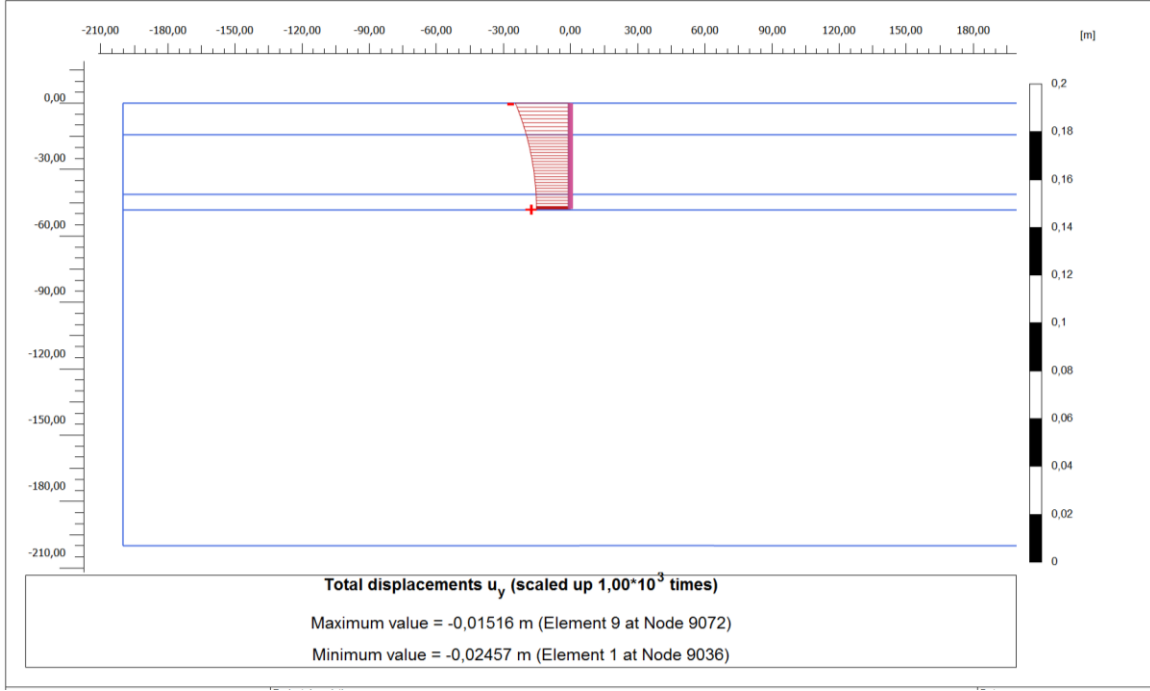
Şekil B.40: Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.



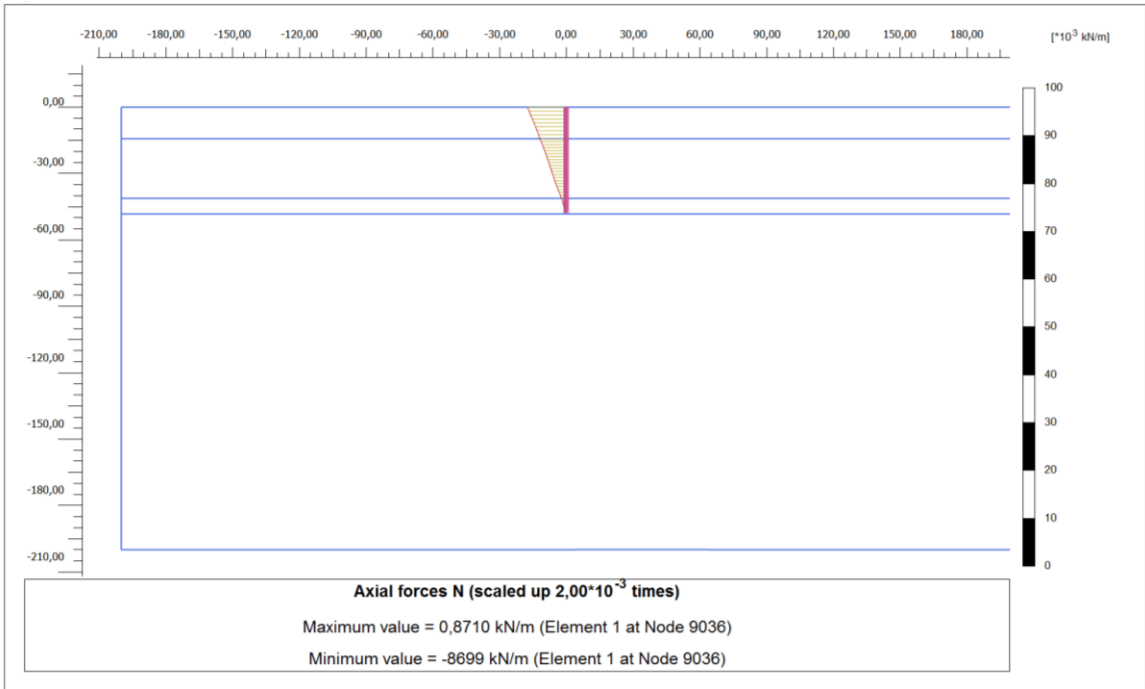
Şekil B.41 : Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.



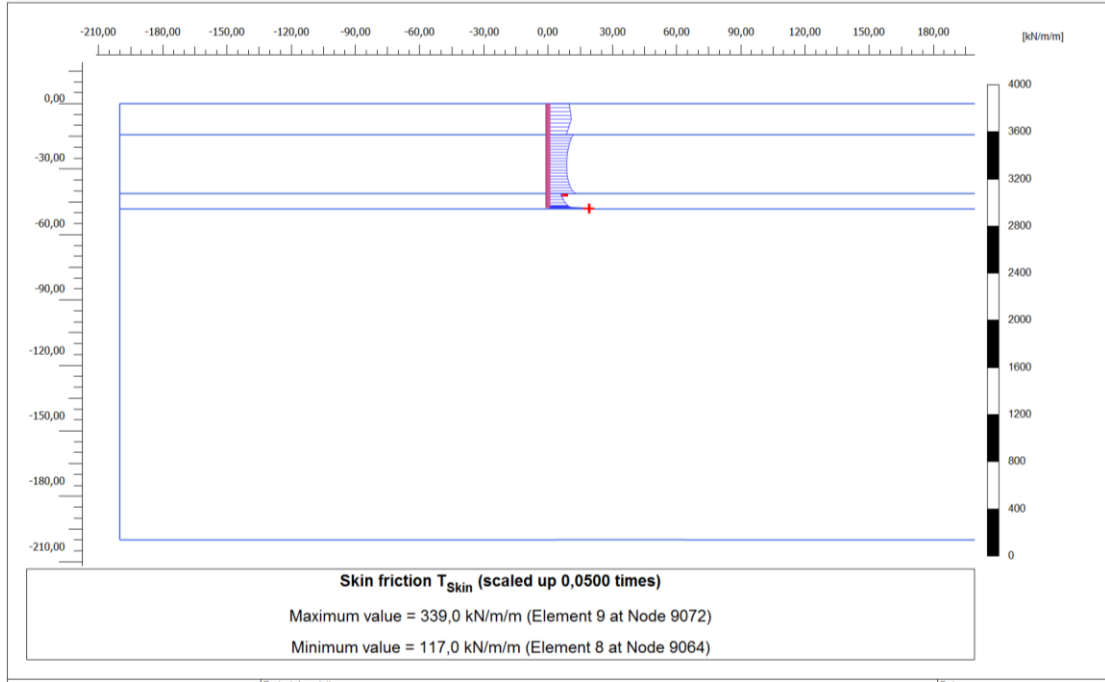
Şekil B.42 : Deney – 3, SEM – 4 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.



Şekil B.43: Deney – 3, SEM – 5 analizi sonucu elde edilen deplasmanlar.

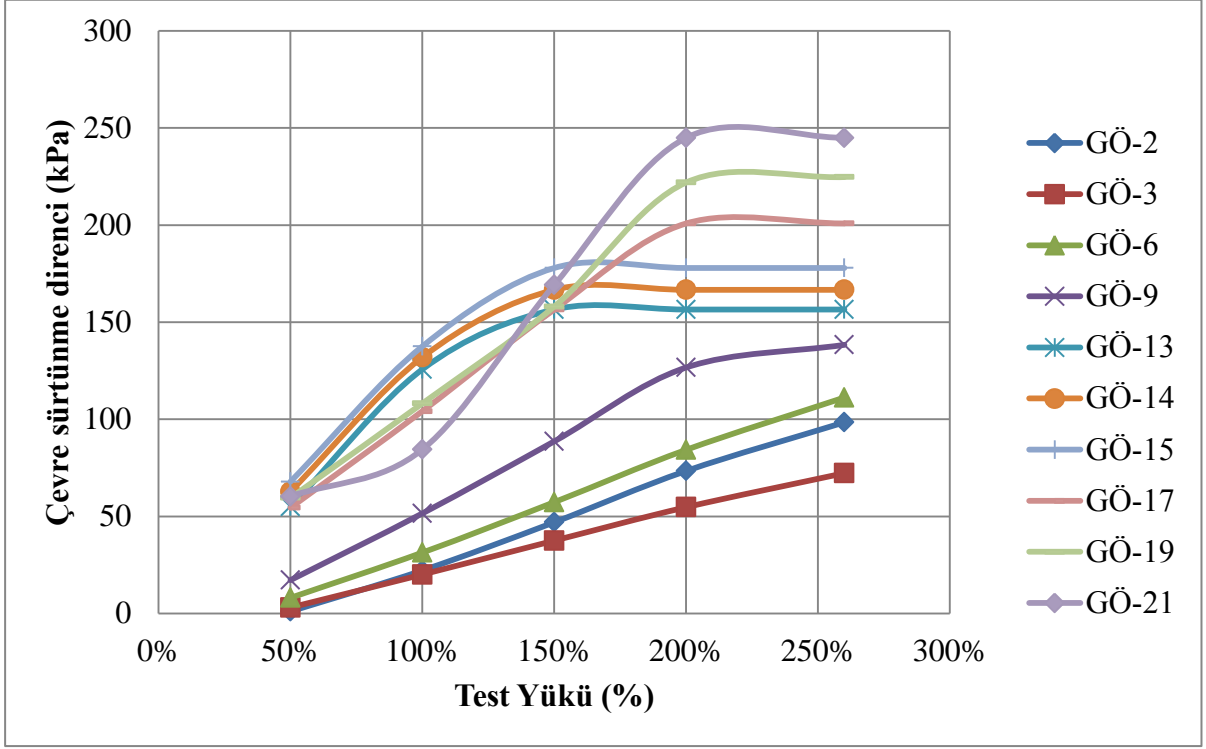


Şekil B.44 : Deney – 3, SEM – 5 analizi sonucu kazık boyunca yük dağılımı.

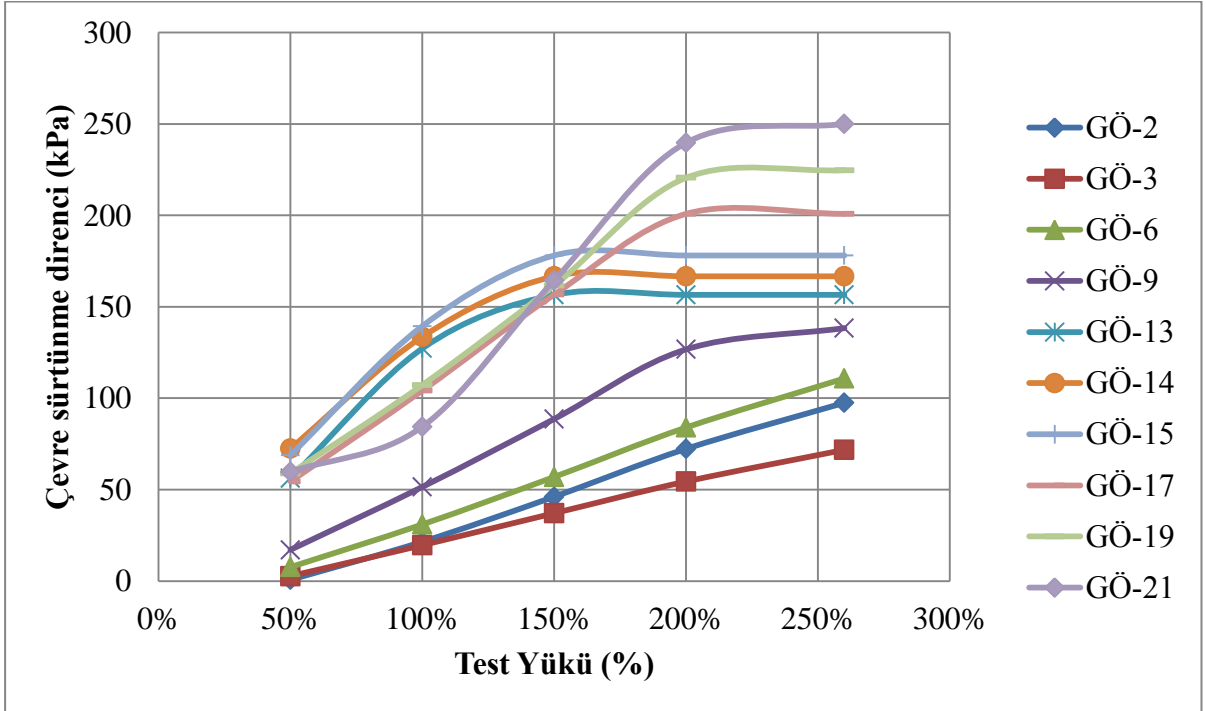


Şekil B.45 : Deneý – 3, SEM – 5 analizi sonucu kazık boyunca mobilize çevre sürtünme kuvveti dağılımı.

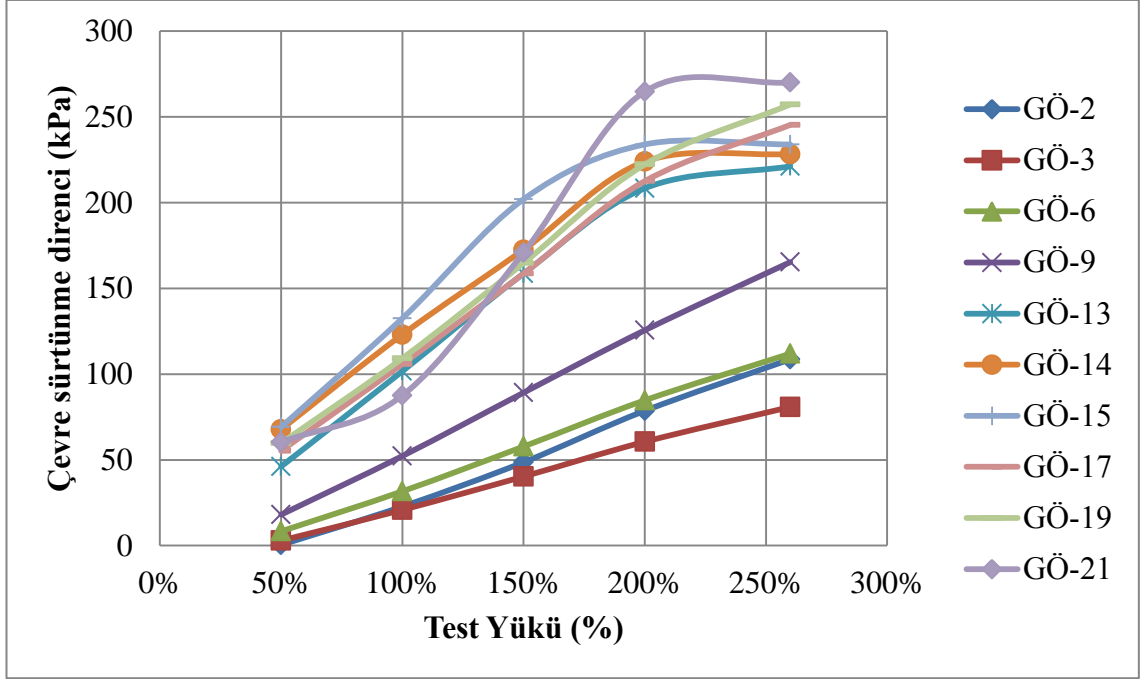
EK C



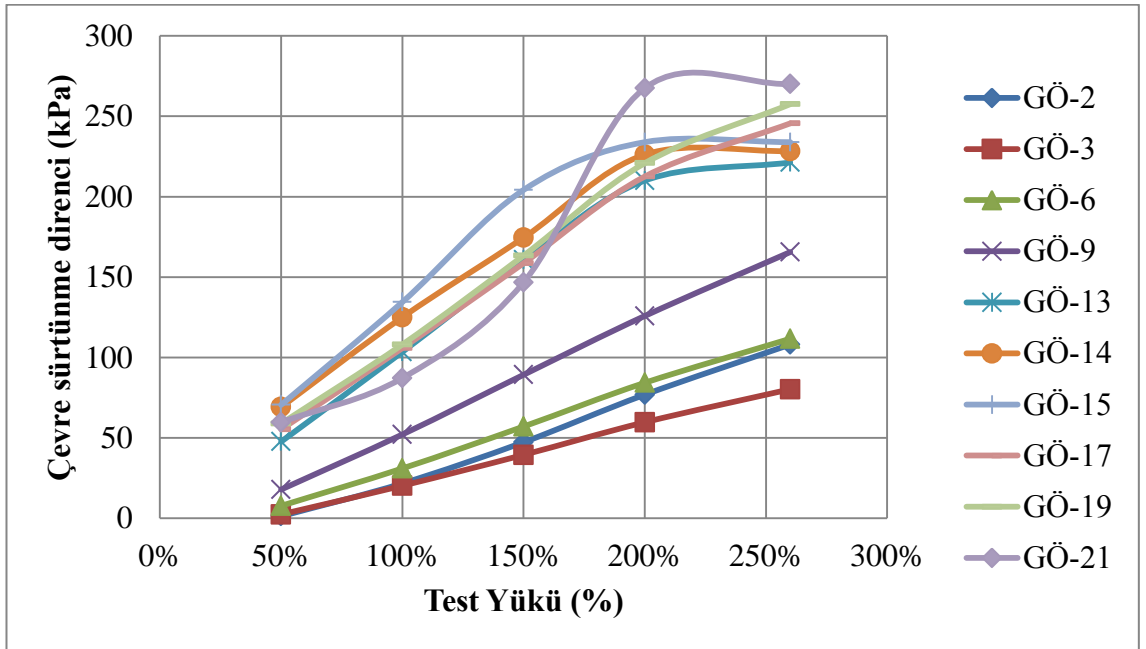
Şekil C.1 : Deney – 1, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



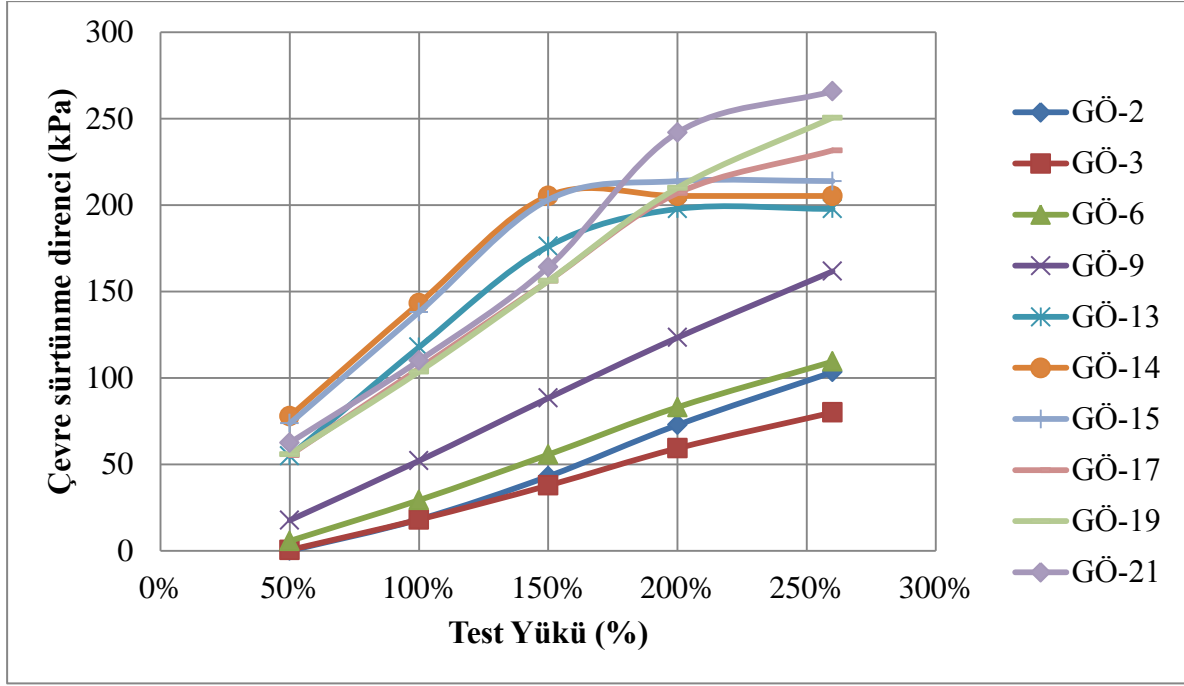
Şekil C.2 : Deney – 1, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



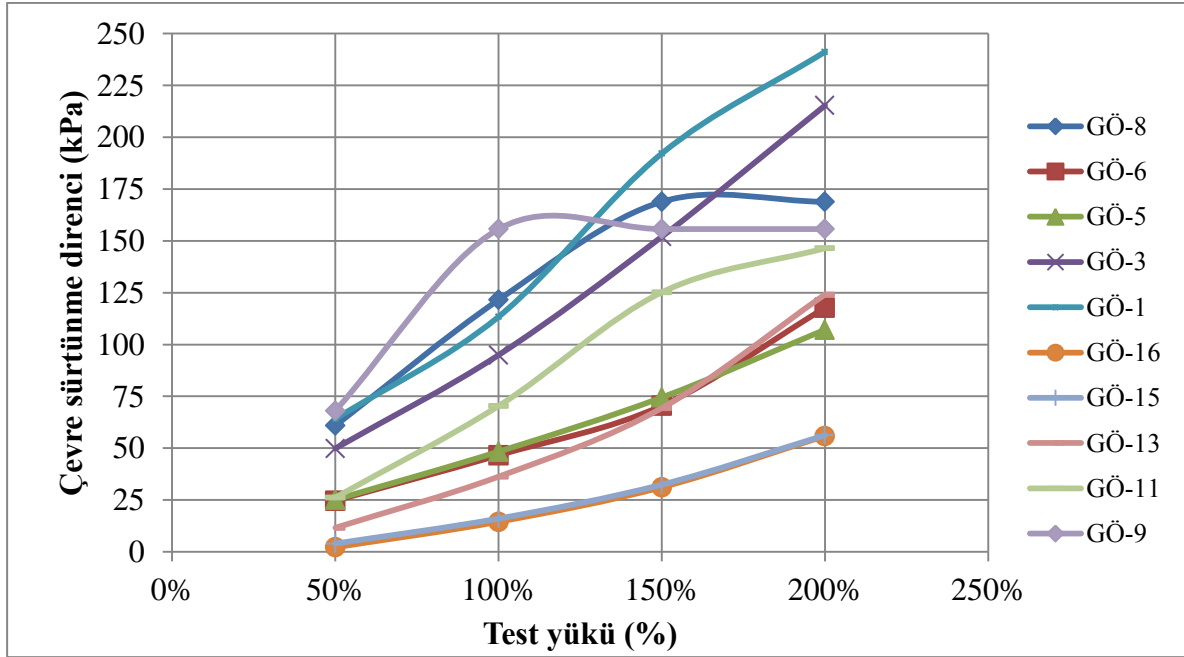
Şekil C.3 : Deney – 1, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



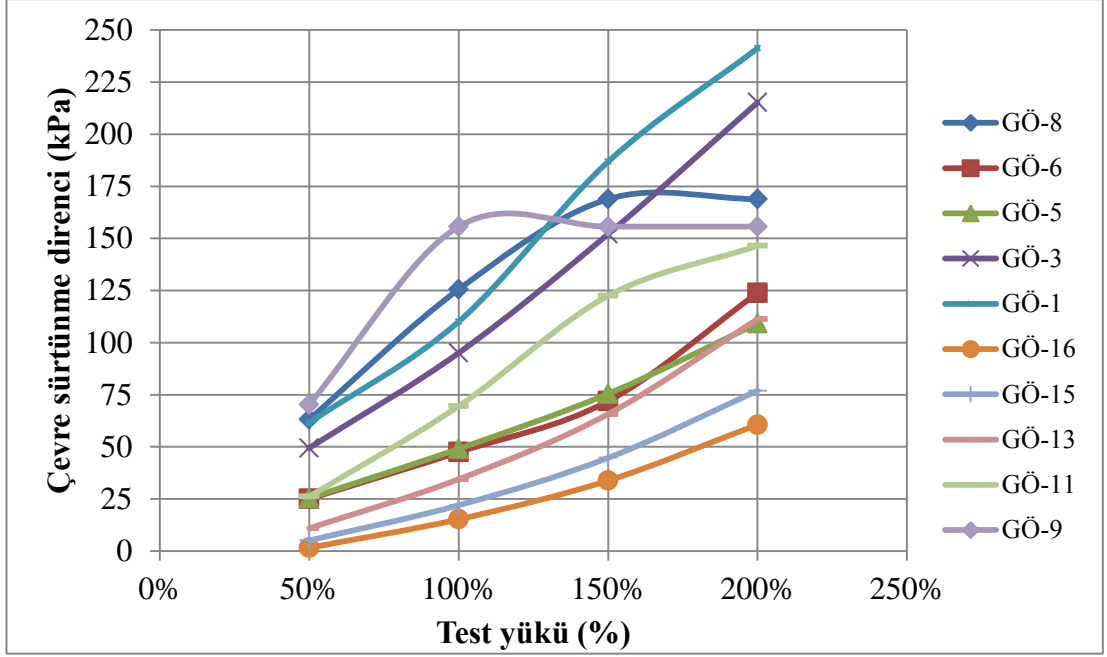
Şekil C.4 : Deney – 1, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



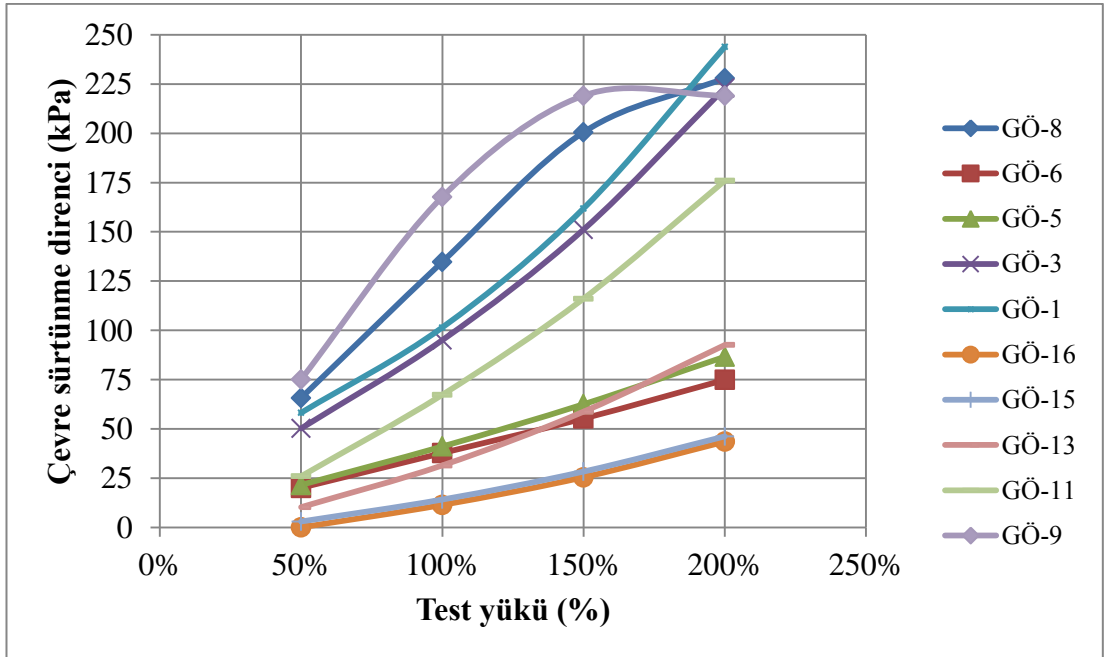
Şekil C.5 : Deney – 1, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



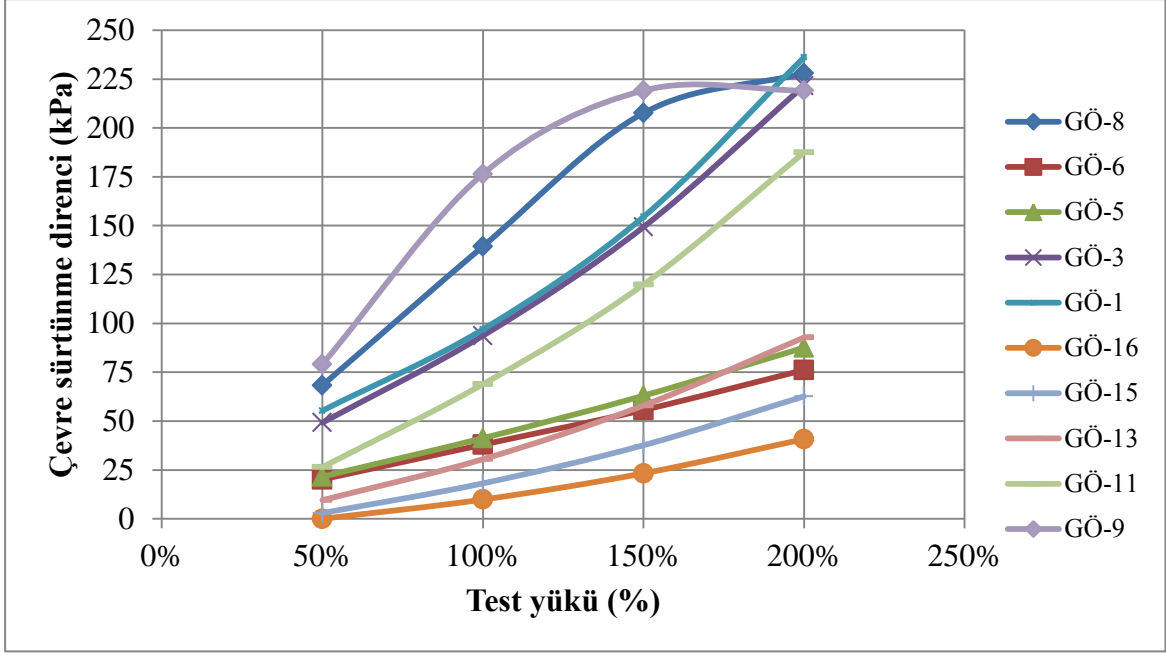
Şekil C.6 : Deney – 2, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



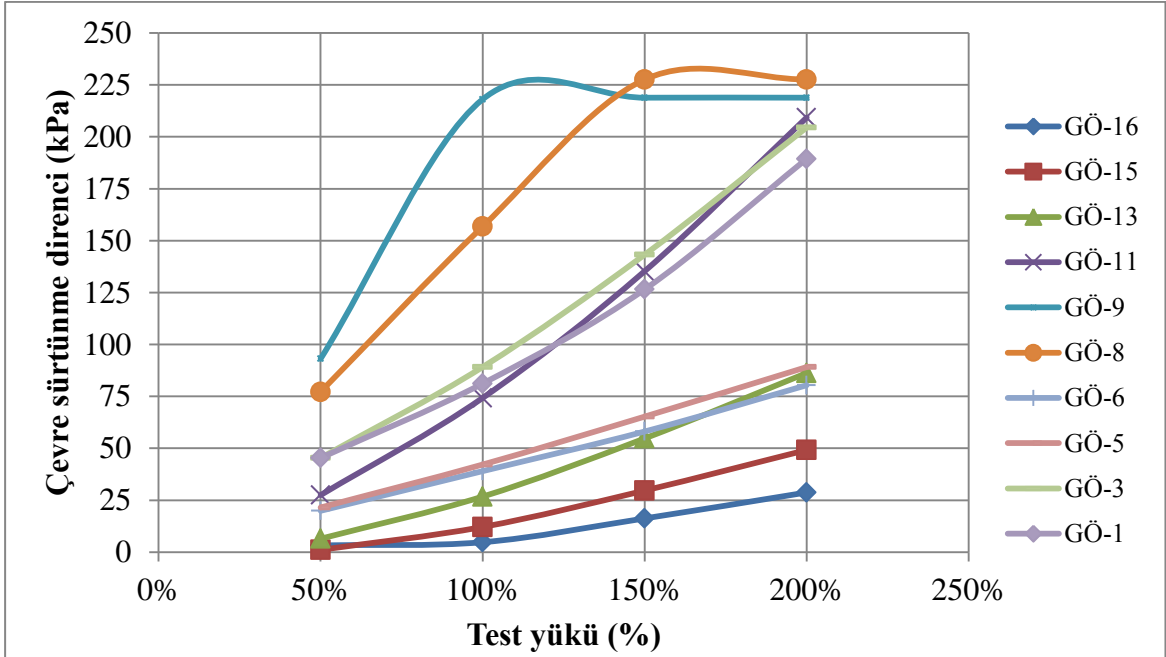
Şekil C.7 : Deney – 2, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



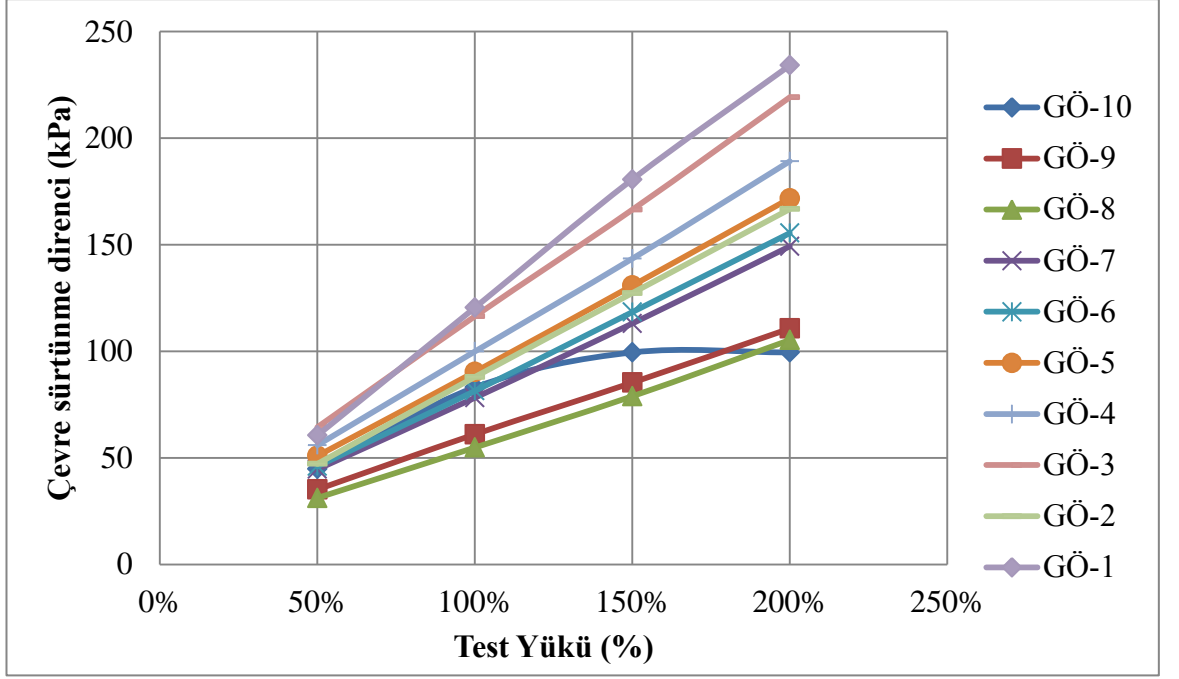
Şekil C.8 : Deney – 2, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



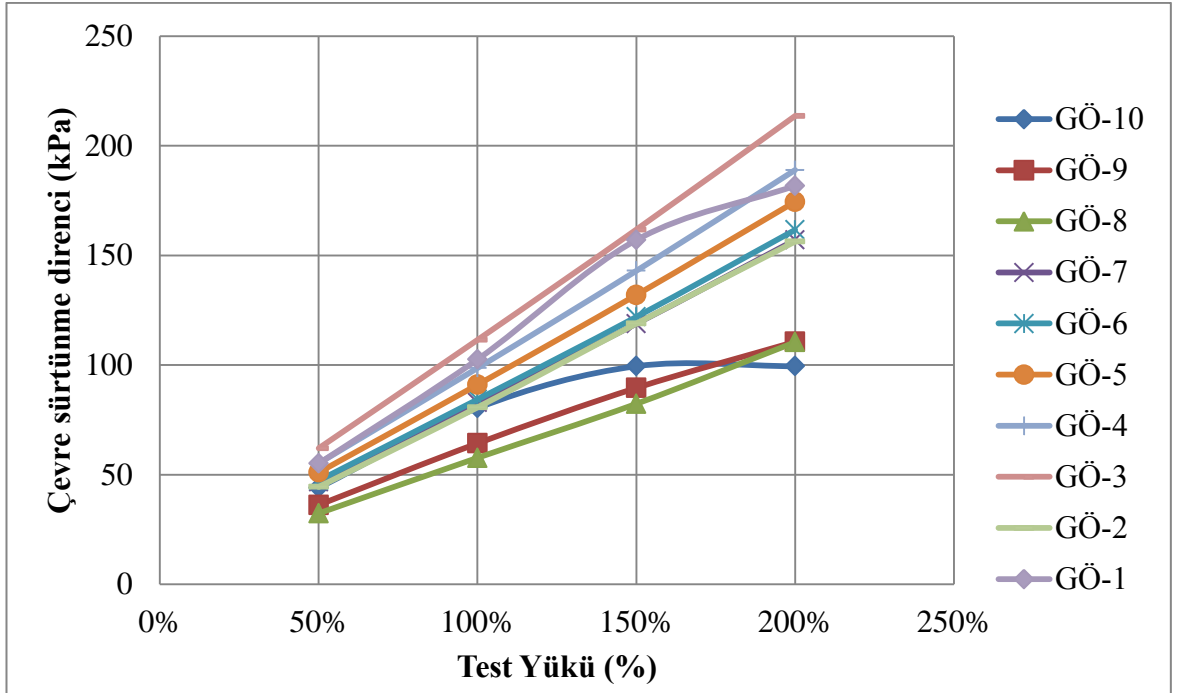
Şekil C.9 : Deney – 2, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



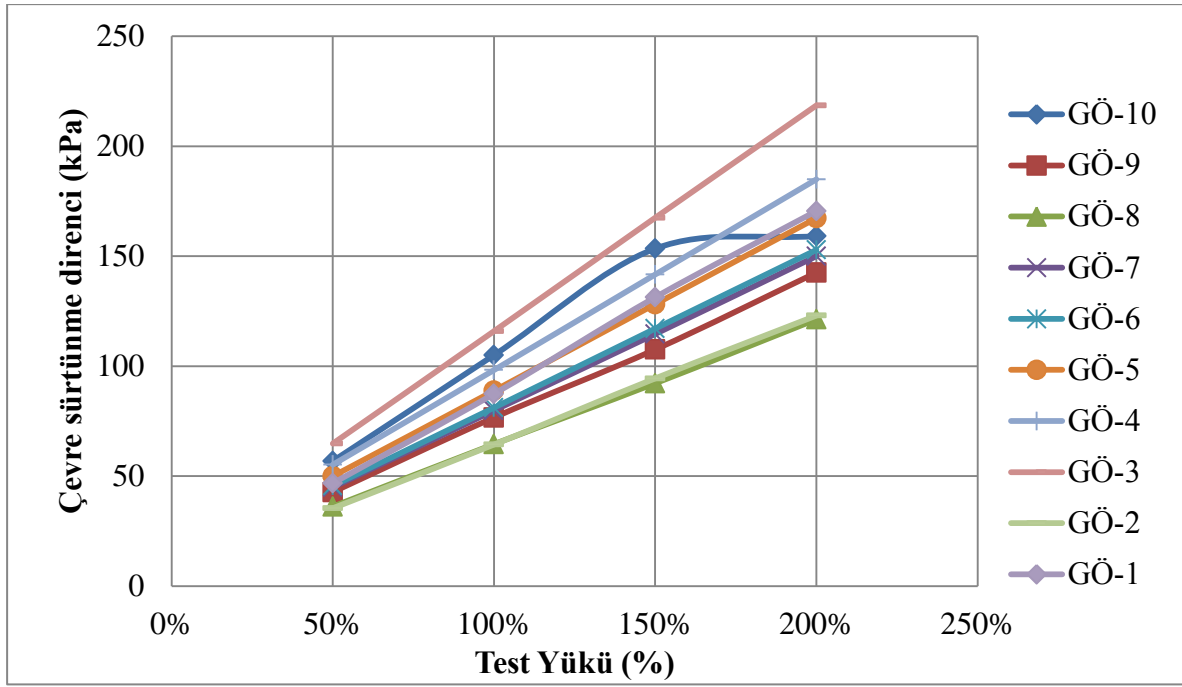
Şekil C.10 : Deney – 2, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



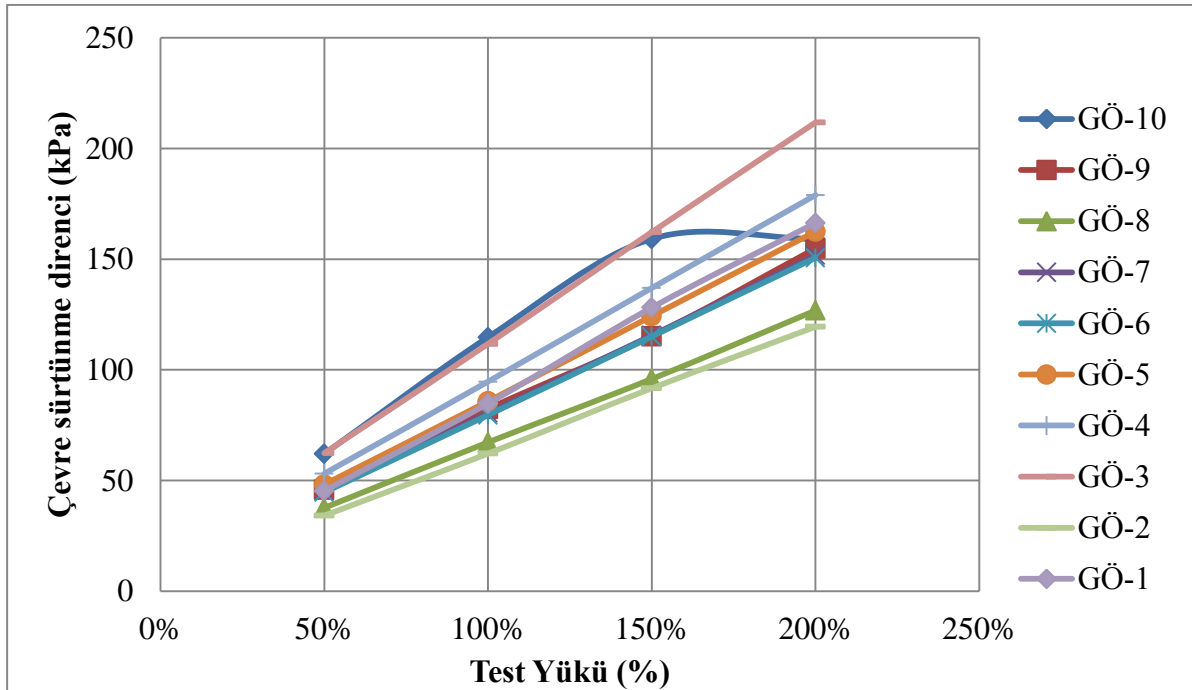
Şekil C.11 : Deney – 3, SEM – 1 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



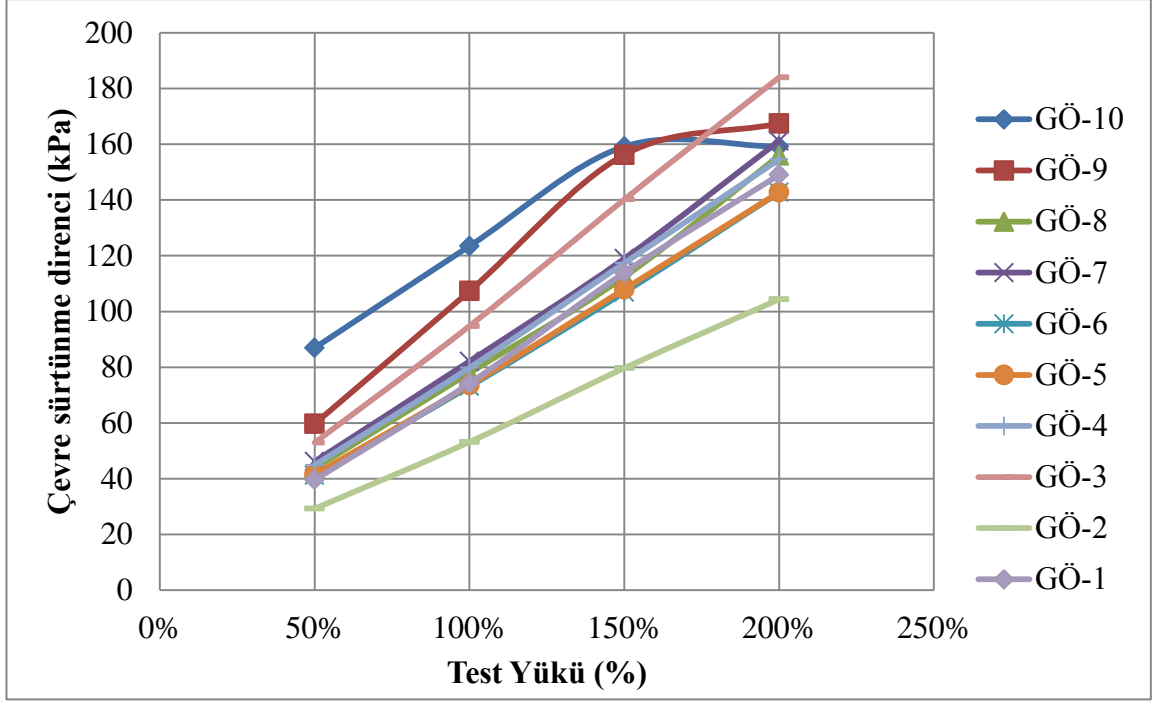
Şekil C.12 : Deney – 3, SEM – 2 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



Şekil C.13 : Deney – 3, SEM – 3 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



Şekil C.14 : Deney – 3, SEM – 4 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.



Şekil C.15 : Deney – 3, SEM – 5 sonucu gerilme ölçer seviyelerinde mobilize çevre sürtünme direnci dağılımı.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Onur YANKI
Doğum Yeri ve Tarihi : ÇORLU / 1987
Adres : Kazimiye Mah. No: 17 D: 3 Çorlu / TEKİRDAĞ
E-Posta : onur.yanki@corlu.bel.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği.