

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KAYAYA SOKETLİ KAZIKLARIN FARKLI YÖNTEMLERLE TAŞIMA
KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ: BİR VAKA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceren AYDIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Aralık, 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KAYAYA SOKETLİ KAZIKLARIN FARKLI YÖNTEMLERLE TAŞIMA
KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ: BİR VAKA ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ceren AYDIN
(501191315)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

Aralık, 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191315 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi Ceren AYDIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KAYAYA SOKETLİ KAZIKLARIN FARKLI YÖNTEMLERLE TAŞIMA KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ: BİR VAKA ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Berrak Teymür**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şükrü ÖZÇOBAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 7 Aralık 2022
Savunma Tarihi : 16 Aralık 2022





Sevgili aileme



ÖNSÖZ

Tarih boyunca insanlar barınma, ulaşım, tapınma gibi ihtiyaçlarını karşılamak için yapılar inşa etmiştir. Bu yapılar doğal bir inşaat malzemesi olarak tanımlanan zemin üzerine inşa edildiğinden, zemin ve yapı etkileşimi üst yapının güvenliği ve dayanıklılığı açısından önemlidir. Geçmişten bugüne üstyapıdan zemine aktarılan yüklere bağlı olarak farklı temel tipleri uygulanmıştır. Üstyapı yüklerinin zeminin taşıma kapasitesini ya da oturma sınır değerlerini aştığı takdirde, bu yüklerin daha sağlam tabakalara aktarılması için derin temel sistemleri tasarlanmaktadır.

Derin temel sistemlerinin optimum boyutlarda tasarlanması; maliyet, sınırlı kaynakların tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik ve verimli üretim açısından oldukça önemlidir. Optimum tasarım için kazık yük kapasitesinin gerçeğe olabildiğince yakın belirlenmesi gerekmektedir ve bu durum tasarım parametrelerinin uygun seçimiyle ilişkilidir.

Bu çalışmada, literatürde bulunan ampirik hesap yöntemleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile Katar'da bulunan Doha Limanı Terminal Binası altındaki kazıkların nihai düşey yük taşıma kapasiteleri hesaplanmış, sonuçlar sahada yapılan statik kazık yükleme deneylerinin sonucu olan yük- oturma grafiklerinin yorumlanması ile elde edilen nihai taşıma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, göçme davranışı göstermeyen çevrimli yükleme deneylerinin yorumlanmasında yeni bir yöntem üzerine çalışılmış, bu yöntem diğer yorumlama yöntemleri ile kıyaslanmıştır.

Tez çalışmam süresince desteğini hep hissettiğim aileme sonsuz teşekkür ederim. Akademik alandaki engin bilgi ve deneyimleri ile en önemli yol göstericim olan ve bugün olduğum konuma gelmemi sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Recep İYİSAN'a teşekkürü borç bilir, akademik alanda bana tuttuğu ışıqla ilerleyeceğimi temin ederim. Ayrıca çalışanı olduğum Zetaş Zemin Teknolojisi A.Ş.'ye vaka analizim için sağladığı veriler, bana alanımda kattığı tecrübe, yüksek lisans eğitimim boyunca gösterdikleri destek ve anlayışlı davranışları için teşekkürlerimi sunarım. Yapılan bu çalışmanın, uygulamada ya da teknik kısımda, bu konu üzerinde çalışan tüm meslektaşlarıma yardımcı olacağı inancını taşımaktayım.

Aralık, 2022

Ceren AYDIN
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	3
1.2 Kapsam	4
2. DERİN TEMELLER	5
2.1 Kazıkların Sınıflandırılması	5
2.1.1 Çalışma prensibine göre sınıflandırma	5
2.1.2 Malzemeye göre sınıflandırma	7
2.2 Yerinde Dökme Betonarme Kazıkların İmal Yöntemleri	8
2.2.1 Kılıflı yöntem	8
2.2.2 Kuru yöntem	9
2.2.3 Islak yöntem	9
2.2.4 Burgulu delgi yöntemi	9
2.3 Kazıkların Oturması ve Yük Aktarma Mekanizması	10
2.4 Kazıkların Taşıma Kapasiteleri	14
2.4.1 Statik taşıma kapasitesi formülleri	15
2.4.2 Kazık taşıma kapasitesinin arazi deneyleri ile belirlenmesi	18
2.4.3 Kayaya oturan kazıkların kapasiteleri	20
2.5 Yerinde Dökme Betonarme Kazıkların Sürekliliği	26
3. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ	27
3.1 Yükleme Deneyi Düzenekinin Kurulması ve Deneyin Yapılması	27
3.1.1 Yavaş adımlı yükleme deneyi (SM)	31
3.1.2 Çevrimli yükleme deneyi (SC)	32
3.1.3 Hızlı adımlı yükleme deneyi (QM)	32
3.1.4 Sabit penetrasyonlu yükleme deneyi (CRP)	32
3.1.5 Osterberg hücresi	33
3.2 Kazık Yükleme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	33
3.2.1 Deney sonuçlarını değerlendirme yöntemleri	35
3.2.1.1 Matematik modele dayalı yöntemler	35
Brinch Hansen %80 yöntemi	36
Chin - Kondner yöntemi	37
Cambefort - Chadeisson yöntemi	38
Housel (Creep) yöntemi	39

Van Der Veen yöntemi.....	40
Düzceer yöntemi	41
Özkan – Alku yöntemi	42
Kabaca yöntemi.....	43
3.2.1.2 Grafik yöntemler	44
De Beer yöntemi.....	44
Teğet (Mansur - Kaufman) yöntemi.....	44
Mazurkiewicz yöntemi	45
Butler - Hoy yöntemi.....	46
Brinch Hansen %90 yöntemi.....	46
Fuller - Hoy yöntemi	47
Decourt yöntemi	48
Corps of Engineers yöntemi	48
3.2.1.3 Oturmayı sınırlandıran yöntemler	49
Hirany - Kulhawy yöntemi.....	49
Davisson yöntemi.....	50
3.2.2 Güvenlik sayısı.....	51
4. SONLU ELEMENLAR METODU	53
4.1 Plaxis Yazılımı	53
4.1.1 Zemin ve yapı elemanlarının modellenmesi	54
4.1.1.1 Lineer elastik model	55
4.1.1.2 Mohr – Coulomb modeli	56
4.1.1.3 Yumuşak zemin modeli.....	56
4.1.1.4 Yumuşak zemin akma modeli (soft soil creep).....	56
4.1.1.5 Modifiye cam kili modeli	56
4.1.1.6 Eklemlı kaya (jointed rock) modeli.....	56
4.1.1.7 Pekleşen (Hardening) zemin modeli	57
4.1.1.8 Pekleşen zemin – küçük gerilme- şekil değıştirme modeli (HS- small strain, stress).....	58
4.1.1.9 Hoek Brown Modeli.....	58
4.1.2 Analiz aşamaları ve çıktıları.....	58
5. VAKA ANALİZİ: KATAR- DOHA ESKİ LİMANI PROJESİ BÜYÜK TERMİNAL BİNASI KAZIKLARI	59
5.1 Proje Temel Sistemi	60
5.2 Bölgesel ve Yerel Jeoloji.....	60
5.2.1 Yerel zemin koşulları	62
5.2.2 Sondajlar, arazi deneyleri ve zemin kesiti.....	62
5.3 Kazık Kapasitesinin Belirlemesi	63
5.3.1 Ampirik yöntemler	63
5.3.2 . Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kapasitenin Belirlenmesi.....	66
5.3.3 Kazık yükleme deneylerinin sonuçları	74
5.3.4 Kazık yükleme deneylerinin değeriendirilmesi ve tartışma.....	76
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	87
EKLER	90
ÖZGEÇMİŞ.....	1199

KISALTMALAR

ASTM:	American Society for Testing and Materials
CPT:	Koni Penetrasyon Deneyi
CRP:	Sabit Penetrasyonlu Yükleme Deneyi
O-Cell:	Osterberg Hücresi
OCR:	Aşırı Konsolidasyon Oranı
HSM:	Hardening Soil Modeli
SC:	Çevrimli Yükleme Deneyi
SEM:	Sonlu Elemanlar Metodu
SS:	Standart Sapma
SM:	Yavaş Adımlı Yükleme Deneyi
SPT:	Standart Penetrasyon Deneyi
QM:	Hızlı Adımlı Yükleme Deneyi



SEMBOLLER

A_b	: Kazık ucundaki kesit alanı
A_s	: Zeminle etkileşim halindeki kazık çevre alanı
a	: Adezyon katsayısı
α	: q_{uc} değerine bağlı azaltma faktörü
b	: Sürtünme katsayısı
β	: Kaya kütleindeki süreksizlik aralığı ile ilgili düzeltme faktörü
f_s	: Birim sürtünme direnci
$\bar{f}_c$	: CPT sonucu ortalama çevre sürtünmesi
$f_{s,em}$	: Emniyetli birim çevre sürtünmesi
ϕ'	: Zeminin efektif kayma mukavemeti açısını
C_1	: Birinci Katsayı
C_2	: İkinci Katsayı
D	: Kazık çapı
Δ	: Oturma miktarı
Δ_e	: Kazığın elastik boy kısalması
E	: Elastisite modülü
L	: Kazık boyu
L_s	: Soket boyu
m	: Deneysel katsayı
N_q	: Taşıma gücü faktörü
N	: SPT değeri
$\bar{N}$	: Kazık boyunca ortalama SPT değeri
n	: Deneysel katsayı
q_c	: CPT uç direnci
q	: Yük
Q_F	: Kazık taşıma gücü
Q_s	: Çevre sürtünmesi
Q_p	: Uç direnci
q_p	: Birim uç direnci
Q_u	: Nihai kazık taşıma kapasitesi
K_s	: Yatay toprak basıncı katsayısı
K_0	: Sükunetteki toprak basıncı
s_u	: Zeminin drenajsız kayma mukavemeti
σ'_v	: Düşey efektif zemin gerilmesi
δ	: Kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı
w	: Yük- oturma denkleminde bağlı bir katsayı
X	: Öteleme miktarı



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1: Yatay toprak basıncı katsayısı, K_s (Tomlinson, 2008).	16
Çizelge 2.2: Kazık yüzeylerine göre zemin ve kazık arasındaki sürtünme açısı (Tomlinson, 2008).	16
Çizelge 2.3: N_q ve ϕ değerleri, (Prakash & Sharma, 1990).	17
Çizelge 2.4: Kaya kalitesi değeriyle kütle faktörü ilişkisi (Tomlinson, 2008).	21
Çizelge 2.5: Çevre sürtünmesi hesabı için önerilen α , β katsayıları (Zhang, L. 2004).	25
Çizelge 3.1: Oturmayı sınırlandıran yöntemler (Düzceer, 2002).	52
Çizelge 4.1: Zemin türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).	55
Çizelge 4.2: İmalat türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).	55
Çizelge 5.1: Genelleştirilmiş zemin profili (Dar, 2019).	62
Çizelge 5.2: Kaya tabakalarının birim çevre sürtünmesi değerlerinin belirlenmesi (Zhang, L. 2004).	64
Çizelge 5.3: Ampirik yöntemlerle kazıkların nihai taşıma kapasitelerinin belirlenmesi.	65
Çizelge 5.4: Kazık yükleme deneyi ile sonlu elemanlar yöntemlerinden elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması.	69
Çizelge 5.5: Sonlu elemanlar yöntemine göre kazıkların nihai taşıma kapasiteleri. .	72
Çizelge 5.6: Ampirik yöntemlerle sonlu elemanlar yönteminin benzerliğinin incelenmesi.	73
Çizelge 5.7: Kazık yükleme deneylerinin detayları.	74
Çizelge 5.8: Kazık yükleme deneylerinin sonuçları.	76
Çizelge 5.9: Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması ile elde edilen nihai taşıma kapasiteleri.	77
Çizelge 5.10: Ampirik yöntemlerle kazık yükleme deney sonuçlarının benzerliğinin incelenmesi.	78
Çizelge 5.11: Kullanılan yöntemlerin yeni yöntem ile farklılık oranlarının karşılaştırılması.	81
Çizelge 5.12: Sonlu elemanlar yöntemi ile statik kazık yükleme deneyi sonuçlarının benzerlik oranları.	82



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 : Kullanım amaçlarına göre kazık tipleri (a, b) uç kazığı, (c, d) sürtünme kazığı, (e) çekme kazığı, (f) yanal yüklü kazık, (g) sıkıştırma kazığı (Toğrol & Tan, 2003).	6
Şekil 2.2 : Geçici borulu fore kazıkların imalat adımları (http://www.zeminarastirma.com)	8
Şekil 2.3 : Burgulu delgi kazık imalat adımları (https://www.insaatim.com)	10
Şekil 2.4 : Yük aktarma mekanizması: (a) tekil kazık, (b) yük aktarma eğrileri, (c) yük-oturma eğrisi, (d) yerinde dökme betonarme büyük çaplı kazıklar için yük-oturma ilişkisi (Tomlinson, 2001).	11
Şekil 2.5 : Kazıkların göçme türleri; zeminin dayanımının göçme türüne etkisi: (a) çok zayıf zeminde burkulma göçmesi, (b) alt kısmı güçlü zeminde genel kayma göçmesi, (c) sabit dayanımlı zeminde göçme, (d) alt kısmı zayıf zeminde sürtünme kazığı göçmesi, (e) çekme yükü etkisinde çevre sürtünmesi (Tomlinson, 2001).	13
Şekil 2.6 : Yanal yüzey tarafından taşınan yük yüzdesi ile tüm soket boyu yüzdesi ilişkisi (Tomlinson, 2008).	21
Şekil 2.7 : Tek eksenli basınç değeri ile azaltma faktörü (α) ilişkisi (Tomlinson, 2008).	22
Şekil 2.8 : Kütle faktörü ile kaya soketi düzeltme faktörü (β) ilişkisi (Tomlinson, 2008).	22
Şekil 3.1 : Basınç yükleme testi düzeneği örneği.	28
Şekil 3.2 : Çekme testi düzeneği örneği.	29
Şekil 3.3 : Tipik yük – oturma eğrisi (Tomlinson, 2008).	34
Şekil 3.4 : Brinch Hansen %80 yöntemi (Kabaca, 2018).	37
Şekil 3.5 : Chin-Kondner yöntemi.	38
Şekil 3.6 : Cambefort - Chadeisson yöntemi sünme eğrileri.	39
Şekil 3.7 : Cambefort Chadeison yöntemi sünme diyagramı.	39
Şekil 3.8 : Housel yöntemi.	40
Şekil 3.9 : Van Der Veen yöntemi.	40
Şekil 3.10 : Düzceer yöntemi uygulanması (Düzceer, 2002).	41
Şekil 3.11 : Özkan – Alku yöntemi (Alku, 2006).	42
Şekil 3.12 : Kabaca yöntemi uygulanışı (Kabaca, 2018).	43
Şekil 3.13 : De Beer yöntemi.	44
Şekil 3.14 : Mazurkiewicz yöntemi.	45
Şekil 3.15 : Brinch - Hansen %90 yöntemi.	46
Şekil 3.16 : Fuller – Hoy yöntemi (Alku, 2006).	47
Şekil 3.17 : Corps of Engineers yöntemi.	49
Şekil 3.18 : Hirany – Kulhawy yöntemi.	50
Şekil 3.19 : Davisson yöntemi.	51
Şekil 4.1 : Pekleşen zemin modelinde elastisite modülleri (Schanz v.d., 1999).	57
Şekil 5.1 : Uygulama sahasının yeri ve inşa edilecek yapının genel görünümü (Projesinden alınmıştır).	59
Şekil 5.2 : Zemin profili içinde kazık konumlarının şematik gösterimi	60

Şekil 5.3 : Katar bölge jeolojisi haritası (projesinden alınmıştır).	61
Şekil 5.4 : Kazık boyu – taşıma kapasitesi ve tabakaların katkıları.	66
Şekil 5.5 : Plaxis 3D gömülü kiriş elemanı özellikleri.	67
Şekil 5.6 : Plaxis 2D & 3D sonlu elemanlar ağı.	68
Şekil 5.7 : Yük kontrollü ve çevrimli saha deneyinin Plaxis 2D ile analiz edilmesi sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi.	70
Şekil 5.8 : Yük kontrollü ve çevrimli saha deneyinin Plaxis 3D ile analiz edilmesi sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi.	71
Şekil 5.9 : Plaxis 2D, Plaxis 3D modellerinden ve saha deneyinden elde edilen yük- oturma eğrilerinin birleştirilmesi.	71
Şekil 5.10 : 1 ve 10 numaralı testleri temsil eden Plaxis 2D modelinde oturma kontrollü analiz sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi üzerinde nihai taşıma kapasitesinin hesaplanması.	72
Şekil 5.11 : Test kazığı -1 statik kazık yükleme deneyi sonucu elde edilen yük- oturma grafiği.	75
Şekil 5.12 : Vaka analizine ait kazık yükleme testi düzeneği (projesinden alınmıştır).	75
Şekil 5.13 : Vaka analizine ait kazık yükleme test düzeneği – 2 (projesinden alınmıştır).	76
Şekil 5.14 : Test 1 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.	80
Şekil 5.15 : Test 2 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.	80
Şekil 5.16 : Test 5 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.	81
Şekil A.1 : No: 2 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	90
Şekil A.2 : No: 3 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	90
Şekil A.3 : No: 4 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	91
Şekil A.4 : No: 5 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	91
Şekil A.5 : No: 6 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	92
Şekil A.6 : No: 7 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	92
Şekil A.7 : No: 8 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	93
Şekil A.8 : No: 9 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	93
Şekil A.9 : No: 10 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	94
Şekil A.10 : No: 11 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.	94
Şekil B.1 : No: 1 & 10 (P6) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.	95
Şekil B.2 : No: 2, 4, 8 ve 9 (P5) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.	95
Şekil B.3 : No: 3 & 11 (P8) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.	96
Şekil B.4 : No: 5 (P2) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.	96
Şekil B.5 : No: 6 & 7 (P3) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.	96
Şekil C.1 : No: 1 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	97
Şekil C.2 : No : 2 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	97
Şekil C.3 : No: 3 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	98
Şekil C.4 : No: 4 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	98
Şekil C.5 : No: 5 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	99
Şekil C.6 : No: 6 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	99
Şekil C.7 : No: 7 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	100
Şekil C.8 : No: 8 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.	100

Şekil C.9 : No: 9 yükleme deneyi Chin Yöntemiyle yorumlanması	101
Şekil C.10 : No: 10 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.....	101
Şekil C.11 : No: 11 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.....	102
Şekil D.1 : No: 1 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	103
Şekil D.2 : No: 2 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	103
Şekil D.3 : No: 3 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	104
Şekil D.4 : No: 4 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	104
Şekil D.5 : No: 5 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	105
Şekil D.6 : No: 6 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	105
Şekil D.7 : No: 7 yükleme deneyi Decourt Yöntemiyle yorumlanması.....	106
Şekil D.8 : No: 8 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	106
Şekil D.9 : No: 9 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	107
Şekil D.10 : No: 10 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	107
Şekil D. 11 : No: 11 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.....	108
Şekil E.1 : No: 3 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	109
Şekil E.2 : No: 4 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	109
Şekil E.3 : No: 6 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	110
Şekil E.4 : No: 7 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	110
Şekil E.5 : No: 8 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	111
Şekil E.6 : No: 9 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	111
Şekil E.7 : No: 10 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	112
Şekil E.8 : No: 11 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.....	112
Şekil F.1 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 1.....	113
Şekil F.2 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 2.....	114
Şekil F.3 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 3.....	115
Şekil F.4 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 3.....	116
Şekil F.5 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 4.....	117
Şekil F.6 : No: 1 deneye ait yük kademeleri.	117



KAYAYA SOKETLİ KAZIKLARIN FARKLI YÖNTEMLERLE TAŞIMA KAPASİTELERİNİN BELİRLENMESİ: BİR VAKA ANALİZİ

ÖZET

Hızla artan nüfus, barınma ihtiyacının artmasına yol açmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde belli bir yer ölçümü ile maksimum insanın temel ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına çok katlı yüksek yapılar inşa edilmektedir. Üst yapının güvenliği açısından bu çok katlı ağır yapıların dayanımının yanında üzerine oturduğu zeminin de dayanımının yeterli olması gerekmektedir. Zemin de doğada bulunan her malzeme gibi yük altında şekil değiştirmekte ve göçmektedir. Zeminin taşıma kapasitesinin belirlenmesi adına geoteknik mühendisliğinde birçok çalışma yapılmış ve hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu taşıma gücü hesapları sonunda zeminin üst yapı yüklerini taşıyamayacağı ön görüldüğü takdirde zeminin taşıma kapasitesini arttırmaya yönelik ya da üstyapı yüklerini daha derinde bulunan sağlam tabakalara aktarmaya yönelik ek önlemler alınmaktadır. Bu ek yöntemlere örnek, zemin iyileştirilmesi ya da derin temel inşa edilmesidir. Kazıklar, derin temellerin uygulamada en yaygın kullanılan tipleridir.

Kazıklı temellerin tasarımı için günümüze kadar birçok farklı hesap yöntemi geliştirilmiştir. Bu hesap yöntemlerinde yapılan kabuller ve kullanılan malzeme özellikleri, derin temel sisteminin güvenliği, uygunluğu ve maliyeti açısından önem arz etmektedir. Saha koşullarının doğru modellenmesi ile kazık kapasitelerinin gerçeğe yakın bir şekilde hesaplanması, geoteknik mühendisliğinin en önemli konuları arasında gelmektedir. Bu nedenle sahada yapılan kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar hem kazık kapasitesinin belirlenmesini hem de hesaplarda yapılan kabullerin kontrolünü sağlamaktadır.

Kazıklı temeller; çok katlı yapılar, köprüler gibi ağır yapıların altında yaygın olarak kullanılırlar da yüksek olmayan yapılarda da zemin koşullarının elverişsiz olması nedeniyle uygulanmaktadır. Çok gevşek siltli, kumlu zeminlere inşa edilen alçak yapılar altında da derin temeller görülmektedir. Çöl, bataklık alanları, deniz dibinden taranarak elde edilmiş ve sıkıştırılmadan yığın haline getirilerek elde edilen dolgular bu tür zeminlere örnek olarak gösterilebilmektedir. Katar’da bulunan Doha Limanı da bu yöntemle elde edilmiş yapay bir dolgu üzerine kurulmaktadır. Limanın bir parçası olan Büyük Terminal projesinin temel kazıkları 16 metre kum tabakasından sonra zayıf ve parçalı kaya tabakasına soketlenmiştir.

Projedeki kazıkların çapları sabit olduğundan, kazık yükleme deneylerinin kullanılabilir sayıda olmasından ve zemin profilinin neredeyse uniform dağılışı göstermesinden, bir başka deyişle; değişken faktörünün azlığından dolayı Büyük Terminal Binası – Doha Limanı – Katar Projesi vaka analizi çalışması için uygun görülmüştür.

Kazıkların kapasitelerinin belirlenmesinde, kaya tabakalarının tek eksenli basınç deneyinden elde edilen mukavemet değeri kullanılarak, ampirik yöntemlerden

yararlanılmıştır. Buna ek olarak kazık yükleme deneyleri, bilgisayar ortamında Plaxis 2D ve Plaxis 3D ile modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yük altındaki şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Elde edilen yük – şekil değiştirme grafiğinden teğet yöntemi kullanılarak taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Son olarak sahada uygulanan kazık yükleme deneylerinden elde edilen yük – şekil değiştirme grafiği üzerinde yorumlama yöntemlerinden Chin ve Decourt metodu uygulanarak elde edilen kazık kapasiteleri hem ampirik yöntemlerle hem de sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kapasiteler ile kıyaslanmıştır. Ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kazık kapasiteleri de kendi içlerinde kıyaslanmıştır. Buna ek olarak göçme davranışı göstermeyen çevrimli yükleme deneylerinin yorumlanmasında yeni bir yöntem üzerine çalışılmış, bu yöntem diğer yorumlama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, yükleme arttıkça ampirik yöntemlerin ve sonlu elemanlar yönteminin yükleme deneyi sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği, yükleme azaldıkça kazık lineer elastik bölgede şekil değiştirme davranışı gösterdiğinden, yorumlama yöntemlerinin daha az kapasite hesaplamaya neden olduğu sonucuna varılmaktadır. Ampirik yöntemlerden elde edilen tüm nihai taşıma kapasiteleri incelendiğinde, mertebe farkının çok fazla olduğu gözlemlendiğinden, ön tasarım aşamasında saha koşullarını yansıtan yöntemin seçilmesinin önemi bu çalışma ile bir kez daha vurgulanmıştır. Ayrıca kazıkların optimum tasarımının yapılması için öneriler sunulmuştur.

DETERMINATION OF THE CAPACITY OF ROCK SOCKETED PILES BY DIFFERENT METHODS: A CASE ANALYSIS

SUMMARY

Rapidly increasing population leads to an increase in the need for housing. Especially in big cities, multi-storey high buildings are built in order to meet the basic needs of maximum number of people within a certain area. In terms of the safety of the superstructure, besides the strength of these multi-storey heavy structures, the strength of the ground on which they sit must be sufficient. Soil, like any material found in nature, changes shape and collapses under load. In order to determine the bearing capacity of the soil, many studies have been carried out in geotechnical engineering and calculation methods have been developed. If at the end of these bearing capacity calculations it is predicted that the ground will not be able to carry the superstructure loads, additional measures are taken to increase the bearing capacity of the ground or to transfer the superstructure loads to the deeper layers. These additional methods are soil improvement or deep foundation construction. Piles are the most widely used types of deep foundations in practice.

Many different calculation methods have been developed for the design of pile foundations. The assumptions made in these calculation methods and the material properties used are important in terms of the safety, suitability and cost of the deep foundation system. Accurate modeling of site conditions and calculation of pile capacities similar to real conditions are among the most important issues of geotechnical engineering. For this reason, the results obtained from the pile loading tests carried out in the field are extremely important in terms of both determining the pile capacity and controlling the assumptions made in the calculations.

Although pile foundations are widely used under heavy structures such as multi-storey buildings and bridges, they are also applied in low-rise structures due to unfavorable ground conditions. Deep foundations are also applicable under low structures built on very loose silty, sandy soils. Desert, swampy areas, fillings obtained by dredging from the seabed can be shown as examples of such soils. Doha Port in Qatar is also built on an artificial filling obtained by this method. The foundation piles of the Grand Terminal project, which is a part of the port, were socketed into the weak and fragmented rock layer after the 16 meters sand fill layer.

Since the diameters of the piles in the project are all the same, the number of pile loading tests are usable / enough number for a study and the soil profile is almost uniformly distributed, in other words; due to the lack of variable factor, the Grand Terminal Building - Doha Port - Qatar Project was deemed appropriate for the case study.

By using the strength value obtained from the uniaxial compression test of the rock layers, empirical methods were applied in the capacity calculation. In addition, pile loading experiments were modeled with Plaxis 2D and Plaxis 3D and strains under load were investigated using the finite element method. The bearing capacities were determined using the tangential method from the load-strain graph obtained. Finally, the pile capacities obtained by applying Chin and Decourt method, one of the interpretation methods on the load-strain graph obtained from the pile loading tests applied in the field, were compared with the capacities obtained by both empirical methods and finite element method. The pile capacities obtained by empirical methods and finite element method were also compared among themselves. In addition, a new method has been studied for the interpretation of cyclic loading tests that do not show collapse behavior, and this method has been compared with other interpretation methods.

In the application of the empirical methods, the strength value obtained from the uniaxial compression test of the rock layers was used. When the results obtained from the empirical methods are compared within each other, the extreme difference between the carrying capacities obtained from the method to the method draws attention. As a result of the calculation, the lowest capacity was determined by the Carter and Kulhawy method, and the highest capacity was determined by the Prokoso method. In the literature review part of the study, the methods of obtaining all empirical methods are summarized. Accordingly, during the application of empirical methods, the conditions under which all methods are valid should be examined and care should be taken in the selection of the method.

In the application of the finite element method, the pile loading tests were modeled with Plaxis 2D and Plaxis 3D, and the displacement was effected in the Plaxis 2D program to the extent that collapse was observed over the pile after the model was confirmed to be suitable for site conditions. In the Plaxis program, the load-strain graph of the middle top point of the test pile is output. The bearing capacities were determined using the tangential method from the load-strain graph obtained. The bearing capacities determined by the finite element method are given in Annex-B. The determined carrying capacities were compared with the capacities obtained from empirical methods. As a result of this comparison, it was observed that as the test load decreased, the similarity between the capacities obtained from the finite element method and the empirical methods decreased, and the method that gave the most similar results was the Meigh and Wolshi method.

For the interpretation of pile loading test results, 40 different methods in the literature have been mentioned. On the other hand, it was found appropriate to apply Chin and Decourt interpretation methods on the load-strain graphs obtained as a result of the static pile loading experiments. In addition, a new method has been studied in the interpretation of the static cyclic loading tests. When Chin and Decourt methods were compared with the new method, it was observed that the new method gave results closer to the Chin method. When the capacities obtained from all interpretation

methods and the capacities obtained from the finite element method are compared, it is observed that the compatibility between the capacities obtained from all interpretation methods decreases as the test load decreases. On the other hand, the highest similarity rate was achieved with the new method. In addition, the average of the capacities obtained by using Chin and Decourt methods was taken and the similarity ratios were examined with empirical methods. As a result of the examination, it was observed that the method that gave the most compatible results with the loading test was the Carter and Kulhawy method.

As a result of all comparisons, it was observed that the similarity ratios between the results obtained from pile loading tests and empirical methods were considerably less than the similarity ratios between the results obtained from the finite element method and empirical methods.

In addition, as the maximum test load increases, empirical methods and finite element methods seem to give more consistent results with field experiments. It is seen that the similarity rate of the bearing capacity obtained by the Meigh and Wolski method, which is an empirical method in piles subject to maximum test load, is up to 97%. In the pile subjected to the minimum test load, the most similar result obtained by empirical methods was 38%. Similarly, while the compatibility with finite elements increased to 99% in the maximum loaded pile, 90% similarity could be achieved in the pile subjected to the minimum test load. Based on these results, it can be said that as a result of the interpretation of the loading test results, which show behavior in the linear elastic region of the load-strain graph, lower pile capacities than the current capacity are obtained. In the aforementioned case, both the empirical methods and the finite element method give higher final pile capacity.

The suggestions that emerged as a result of the scientific research are as follows.

- 1- With any of the methods mentioned in the study, the skin friction mobilized cannot be determined clearly. Therefore, before calculating the final pile capacity, it is recommended to determine the mobilized skin friction by performing a field load test with a two-way Osterberg cell.
- 2- Continuing to increase the load until the failure behavior is observed and placing displacement gauges in the pile makes it possible to determine the skin friction to be taken into account in the pile capacity by back calculation. This method is recommended in order to control the results obtained.
- 3- When all the final bearing capacities obtained from the empirical methods are examined, it is important to choose the method that reflects the field conditions at the preliminary design stage, since the difference is observed to be too large in different methods results. In the previous sections, ground conditions, number of tests and field information regarding the tests performed during the determination of empirical methods are given. Determining the method to represent the project ground in the light of these studies helps to obtain results close to the real situation.

1. GİRİŞ

Zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliği son yüzyılda ortaya çıkmış bir bilim dalı olmasına karşın yapı tarihinde uygulamalarına rastlanmaktadır. Tarihi yapılar altında rastlanan ahşap kazıklar, Mimar Sinan'ın yapı inşaatına başlanmadan önce zeminde gözlenmesi muhtemel oturmaları gidermek amacıyla önyükleme yöntemini kullandığı söylentisi, Mısır çarşısı arkasında iki bodrum derinliğinde Haliç kilinde rastlanan muhtemelen iyileştirme amaçlı yerleştirilmiş kireçtaşı blokları gibi birçok örnek geoteknik mühendisliğinin ihtiyaçtan doğan ve 100 yıldan daha da eski bir uygulama tarihi olan bir mühendislik dalı olduğunun göstergesidir (Bozbey, 2022). Geoteknik mühendisliğinin en yaygın uygulamaları, yapı temelleri, kazı destek sistemleri ve zeminlerin iyileştirilmeleridir.

Yapı temelleri, yüzeysel ve derin temel olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yüzeysel temeller, derinliği ile genişliği oranı küçük olan temel sistemleridir. Yüzeysel temel sistemlerinin üst yapıdan gelen yükleri zemine güvenli bir şekilde aktarmaya yeterli gelmediği, bir başka deyişle, izin verilen oturma sınırlarının ya da zeminin taşıma kapasitesinin aşıldığı durumlarda derin temel sistemleri uygulanmaktadır.

Derin temeller ayaklar, kesonlar ve kazıklar olarak üç ana gruba ayrılmaktadır. Kazıklar ise kendi içerisinde, imal edildikleri malzemenin cinsine göre ahşap, betonarme, çelik, imal edilme yöntemlerine göre çakma, sürme, burgulu delgi ya da yerinde dökme olarak sınıflanabilir (Toğrol & Tan, 2003).

Kazıklar taşıyacağı yükleri imal edildiği zemin-kaya ortamına uç ve çevre sürtünme direnci ile aktarırlar. Kazıkların taşıma kapasitesi, zemin özelliklerini içeren bağıntılar ile tahmin edilebilmesine karşılık en doğru yaklaşım, yerinde kazık yükleme deneyleri uygulamaktır. Çeşitli amaçlar için uygulamada tercih edilen derin temel sistemi, deniz kumundan yapılan liman dolgularının taşıma kapasiteleri düşük olduğundan yüzeye yakın kısımlarda kaya tabakası bulunması durumunda kayaya soketlenerek uygulanması mantıklı bir çözüm yolu olmaktadır. Kazıkların kayaya yeterli uzunlukta

girmesi durumunda soketli kazıkların taşıma gücü, soket tabanından elde edilen uç direnci ile soket yüzeyi boyunca mobilize olan çevre sürtünme direncinden oluşmaktadır. Ancak uç direncinin oluşması için kazıkların yeteri kadar yer değiştirme yapması gerektiğinden, aksi durumda kapasite yalnızca sürtünme direncinden belirlenmektedir.

Kazıklı temel sistemlerinin tasarlanmasında çap seçimi, kazık boyunun ve kazıklar arasındaki mesafenin saptanması önemli hususlardır. Kazıkların kapasiteden ödün vermeyecek ve israfa neden olmayacak şekilde optimum çap ve boy belirlenerek tasarlanması, maliyet, çevreye verilen zararın azaltılması ve verimlilik açısından önem arz etmektedir.

Kazık tasarımı kazıklara etki eden yükler dikkate alınarak yapılmaktadır. Kazık başına taşınacak yük miktarı kazık çapının artması ile artırılabilir. Kazık boyu, yine bahsedilen yüklerin zeminde güvenle taşınabilecek tabakalara aktarılmasını sağlayacak şekilde ya da sağlam tabaka mevcut değilse çevre sürtünmesi yoluyla gerekli kapasiteye ulaşacak şekilde belirlenir. Kazıkların tekil olarak taşıma kapasitelerinin belirlenmesinin yanı sıra grup halindeki kapasitelerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ise kazıkların etraflarında oluşturdukları gerilme alanlarının girişim yapması sonucu birbirlerinin kapasitelerini azaltmalarıdır. Kazıkların birbirleri üzerinde yaptıkları bu etkiye grup etkisi denir. Kazık adetinin ve yerleşiminin belirlenmesi için yapılan analizlerde üstyapı yüklerine ilave olarak grup etkisi de göz önüne mutlak suretle alınmalıdır.

Optimum kazık tasarımının yapılabilmesi için zeminin gerçek koşullara olabildiğince benzer modellenmesi gerekmektedir. Zemin modelinin belirlenmesi için sahada yeterli sayıda, noktada ve derinlikte sondaj yapılmalıdır. Kullanılan farklı standartlara göre, minimum sondaj sayısı ülkeden ülkeye ve proje gereksinimlerine göre değişmektedir. Sondajlardan alınan numuneler zemin mekaniği laboratuvarlarında sınıflandırma, fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneylere tabi tutulmaktadır. Sondaj alımı esnasında standart penetrasyon deneyi, koni penetrasyon deneyi gibi arazi deneylerinin uygulanması da zemin modelinin oluşturulmasında önemlidir. Sınıflandırılan zemin katmanlarının mühendislik parametrelerinin kullanılmasıyla birçok statik kazık kapasitesi hesap yöntemi geliştirilmiştir. Kayaya soketli kazıklar için ampirik yöntemler; Horvath ve Kenney (1978), Carter ve Kulhawy

(1988), Williams (1980), Rowe ve Armitage (1984), Rosenberg ve Journeaux (1976), Reynolds ve Kaderbek (1980), Gupton ve Logan (1984), Reese ve O'Neill (1984), Toh ve diğeri (1989), Meigh ve Wolshi (1979) Horvath (1982), Prakoso (2002) gibi araştırmacılar tarafından, tek eksenli basınç deneyi sonucuna göre çeşitli katsayılar ve denklemler önerilmiştir. Ayrıca günümüzde sıkça sonlu elemanlar yöntemi uygulayarak çözüm yapan bilgisayar programları da kazık kapasitesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Laboratuvar ortamında saptanan zemin parametrelerinin gerçek ile tutarlılığı, sahada yapılan kazık yükleme deneyleri ile kontrol edilebilmektedir. Kazık yükleme deneyleri statik ve dinamik olarak ikiye ayrılır. Statik kazık yükleme deneyi bir kazığın tasarım yükünün belli bir katına kadar yüklenmesi ve bu yükleme altındaki oturma değerlerinin kaydedilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Kazıkların taşıma kapasitesinin yükleme deneyi sonuçları yorumlanarak belirlenmesi için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler matematik modele dayalı yöntemler, grafik yöntemler ve oturmayı sınırlandıran yöntemler olarak üç ana başlıkta incelenmektedir. Matematik modele dayalı yöntemler, Chin-Konder, Brinch-Hansen %80, Van der Veen yöntemleridir. Grafik yöntemler De Beer, Teğet, Mazurkiewics, Brinch-Hansen %90, Butler-Hoy, Fuller-Hoy ve Corps of Engineers yöntemleridir. Oturmayı sınırlayan yöntemler ise Davisson ve Hirany-Kulhawy yöntemleri ve ilgili şartnamelerdir.

Bu çalışmada, deniz üzerine yapay dolgu zemine inşa edilen Katar- Doha Limanı Terminal binası kazıklarının bahsedilen yöntemlerle kapasiteleri belirlenmiş ve yükleme deneyi sonucunda belirlenen kapasite değerleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kazık yükleme deneyi verilerinin yorumlanmasında yeni bir yöntem önerilmiştir.

1.1 Amaç

Dünya nüfusunun hızla artması sebebiyle doğal kaynakların dikkatli tüketilmesi gerektiği aşîkardır. Çevresel sürdürülebilirlik, gelecek nesillere sağlıklı bir yaşam alanı bırakabilmek açısından son derece önemlidir. Maalesef, inşaat sektörünün çevre kirlenmesinde en yüksek etkiye sahip olan sektörlerden biridir (Labaran, Y.H., ve diğ, 2021). Dolayısıyla her türlü inşaat projesinin yapı ömrü boyunca ancak gerekli dayanım, dayanıklılık ve güvenliği sağlayacak ve hammadde kullanımını, zamanı ve

emeği en aza indirecek şekilde tasarlanması elzemdir. Ayrıca günümüzde benzer projeler üzerine yoğunlaşmış birçok firma olduğundan, optimum tasarımın bir sonucu olarak maliyetin düşmesi, rekabetçi marketlerde  ne çıkmayı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, göçme davranışı göstermeyen kazıkların kapasitelerinin belirlenebilmesi için bir yöntem üzerine çalışılmış, zemin parametrelerinin ve yapılan kabullerin gerçeğe uygun seçilmesi ve yükleme testlerinin gerçek koşula uygun yorumlanması açısından katkı sağlamak hedeflenmiştir.

Ayrıca, literatürde bulunan ve görüntü kalitesi düşük olan bazı grafikler tekrar çizilmiş, kayaya soketli kazıkların kapasite hesabı için yapılan tüm çalışmaların bir  zeti yapılarak literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

1.2 Kapsam

Bahsedilen amaç doğrultusunda, çalışmanın kapsamı, geçmişten günümüze yapılan çalışmaların incelenmesi, kapasite hesaplama yöntemlerinin belirlenmesi, ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemleri ile kapasitelerin hesaplanması, sahada yapılan statik basınç yükleme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılması ve yorumlanması bu tezin kapsamında yer almaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında kazık  eşitleri, kazık çeşitlerinin üstünlükleri, sakıncaları, çeşitlerin uygun oldukları projeler, inşa yöntemleri ve taşıma kapasitesi hesap yöntemlerinden bahsedilmiştir. İkinci kısmında ise kazık yükleme deneyleri ve sonuçlarının yorumlanması için literatürde mevcut olan yöntemler detaylıca yer almaktadır.    nc  kısım sonlu elemanlar yönteminin anlatılması, yöntemin uygulanması için kullanılan bilgisayar programlarının çalışma prensibinden, dördüncü bölüm vaka analizinden oluşmaktadır. Vaka analizi kısmında projenin amacı, yeri, temel sistemi, zemin koşullarından bahsedildikten sonra ampirik yöntemlerden, sonlu elemanlar yönteminden ve kazık yükleme deneyi verilerinin yorumlanması sonucu elde edilen kapasiteler paylaşılmıştır. Ayrıca bu bölümde yükleme deneyi verilerinin yorumlanmasında yeni yöntem üzerine yapılan çalışmalar yer almaktadır. Son bölümde ise, tez çalışması sonucunda elde edilen çıkarımlar, bu çıkarımlardan yola çıkılarak verilen öneriler ve bu çalışmada tamamlanamamış, gelecekte yapılabilecek çalışmalarla tamamlanabilecek kısımlardan bahsedilmiştir.

2. DERİN TEMELLER

Zemin doğası gereği boşluklu bir yapıya sahiptir ve boşlukları su ya da hava ile doludur. Dolayısıyla üzerine yük etki ettiğinde zemin boşluklarından hava ve su çıkışı meydana gelir ve bu çıkış zeminde oturmalara neden olur. Farklı oturmalar üstyapıda çatlaklara neden olmaktadır. Binanın her noktası homojen şekilde oturma davranışı gösterse dahi bu oturmaların belli bir değerle sınırlandırılması hem mevcut altyapıların hem de inşa edilen projenin güvenliği için önemlidir. Yüzeysel (sığ) temellerin yapı yüklerini güvenli bir şekilde taşımada yetersiz kaldıkları, oturma sınır değerlerini aştığı durumlarda derin temel sistemleri tasarlanmaktadır. Derin temeller, uzunluğunun genişliğine oranı büyük olan temel sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Derin temeller yapı yüklerini çevre sürtünmesi ve uç direnci yoluyla zemine aktarmaktadırlar. Güvenli yük aktarımı için derin temel sistemlerinin boyutları yeterli büyüklükte belirlenmelidir. Dörtgen kesite sahip derin temel elemanları baret olarak adlandırılmaktadır. Baretler geometrilerinden dolayı kazıklardan daha fazla sürtünme kapasitesi sağlarlar. Dolayısıyla kazıkların taşıma gücünün yetmediği durumlarda ya da çok uzun kazık inşa etmek yerine daha kısa baretlerin tercih edilebileceği projelerde kullanılırlar. Bu duruma örnek olarak Dubai’de bulunan, tamamlandığında 1.3 km uzunluğuyla dünyanın en uzun binası ünvanını kazanması beklenen Creek Tower binasının temel sisteminde baretler kullanılmıştır (Pereira, ve diğ. 2019). Bu çalışmada Doha Limanında bulunan Terminal binasının kazıklarının kapasitesi üzerinde inceleme yapıldığından, kazıklarla ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

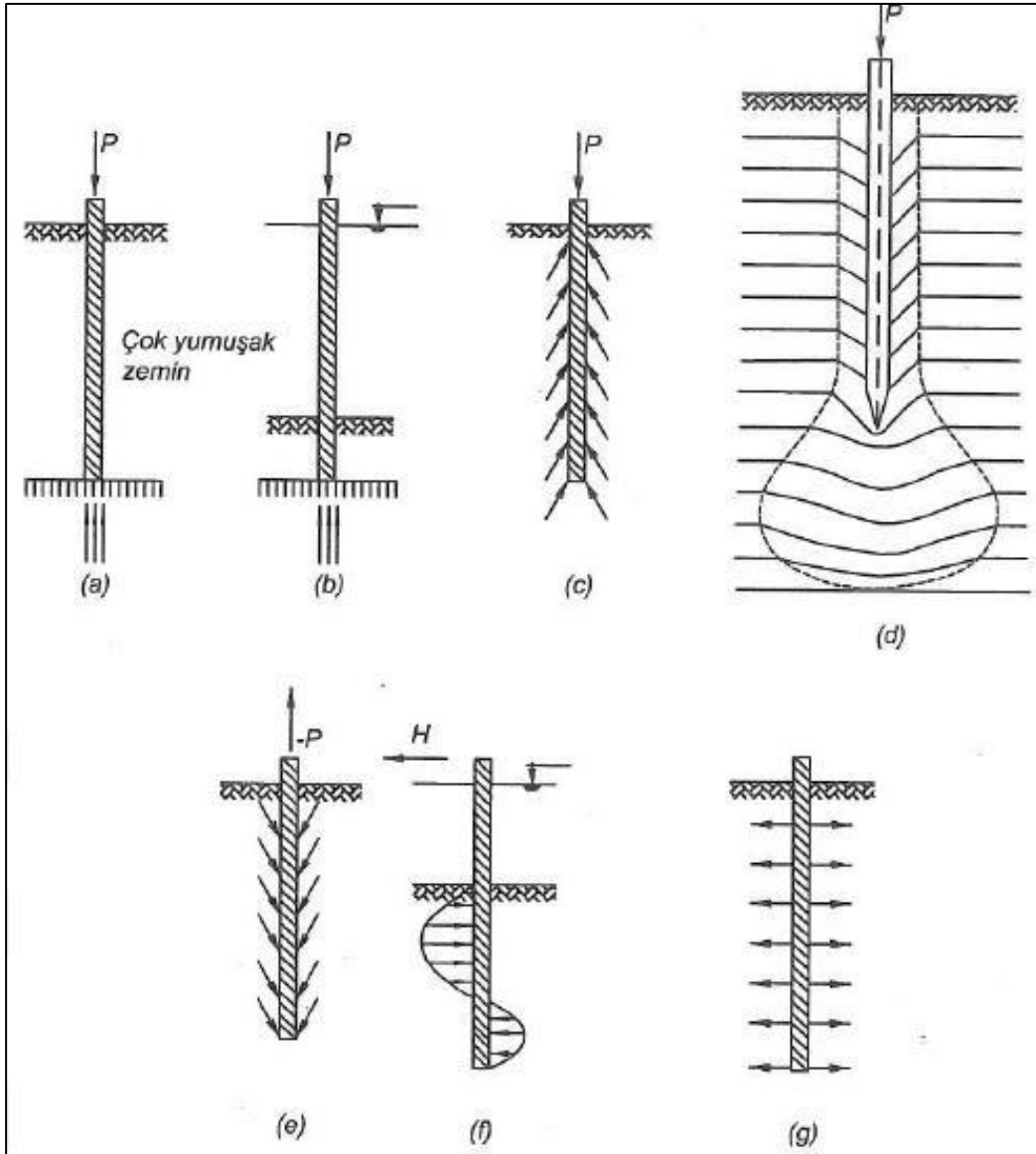
2.1 Kazıkların Sınıflandırılması

Kazıklar üretimlerinde kullanılan malzemeye, imal edilme yöntemlerine ve çalışma prensiplerine göre başlıca üç ana maddede sınıflandırılmaktadırlar.

2.1.1 Çalışma prensibine göre sınıflandırma

Çalışma prensiplerine göre kazıklar, uç kazığı, sürtünme kazığı, çekme kazığı, ankraj kazığı, sıkıştırma kazığı olarak beş gruba ayrılabilir. Uç kazığı, yapı yüklerini su veya zayıf zemin altındaki sağlam tabakaya aktarmak için kullanılan kazık tipine verilen addır. Sürtünme kazığı, ana kayanın yeterince derinde bulunduğu ya da mevcut olmadığı durumlarda yapı yüklerini kazık çevresindeki zemin ile kazık arasındaki

sürtünme yardımıyla kısmen veya tamamen taşıma prensibiyle çalışan kazıklara denmektedir. Çekme kazığı, suyun kaldırma kuvvetine maruz kalan temel sistemlerinde temelin yüzmesini çevre sürtünmesi ile engellemeye yarayan kazık türüdür. Ankraj kazığı ise yatay kuvvetlere karşı çalışan kazıklardır ve bu kazıklara gemi bağlama veya dolfen kazıkları örnek verilebilmektedir. Çalışma prensibi diğerlerinden farklı olan son kazık çeşidi ise sıkıştırma kazıklarıdır ve bu kazıklar kaba daneli zeminlerin sıkıştırılması amacıyla imal edilmektedir (Toğrol & Tan, 2003). Şekil 2.1’de kullanım amaçlarına göre kazık tipleri verilmiştir.



Şekil 2.1 : Kullanım amaçlarına göre kazık tipleri (a, b) uç kazığı, (c, d) sürtünme kazığı, (e) çekme kazığı, (f) yanall yüklü kazık, (g) sıkıştırma kazığı (Toğrol & Tan, 2003).

2.1.2 Malzemeye göre sınıflandırma

Kazıklar üretildikleri malzemeye göre ahşap, betonarme, çelik ya da kompozit olarak sınıflandırılmaktadır.

Ahşap kazıklar kullanılan en eski kazık çeşididir ve çakılma usulü ile zemine yerleştirildikleri için uçları çarık şeklinde sivridir. Organik etkenli bozuculara karşı önlem alınarak inşa edilmeleri gerekmektedir. Yeraltı suyu seviyesinde bir değişiklik olmadığı durumda yüzyıllarca sağlam kalabilmektedirler. Yeraltı suyunun çevre arsalarda susuzlaştırma işlemi gibi nedenlerle alçaldığı durumlarda ahşap kazıklarda çürüme meydana gelebilir. Bu gibi durumlarda tarihi yapılarda temel takviye yöntemleri düşünülmektedir. Süleymaniye Camii, Yeni Camii, Nur-u Osmaniye Camii, Ortaköy Camii, Küçüksu Kasrı, Dar-ül Aceze, Sveti Stefan Bulgar Kilisesi, Sant Antonio Kilisesi, Medresetü'l Kuzat yapılarının temel sisteminde ahşap kazıkların kullanıldığı bilinmektedir (Namlı, 2001).

Çelik kazıklar boru, H, I, ya da kutu kesitli olabilmektedir. Tıpkı ahşap kazıklar gibi çakılma usulüyle imal edildiklerinden uç kısımlarına güçlendirme yapılmaktadır. Çelik kazıklar imal edilirken korozyona karşı önlem alınmalıdır. Örselenmiş ya da dolgu zemine çakılan kazıkların, örselenmemiş zemine çakılan kazıklardan daha fazla korozyona maruz kaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni örselenmiş zemindeki oksijen miktarının fazlalığıdır. Çelik kazıklar uç uca kaynatılarak uzatılabilmekte ve yüksek dayanım gerektiğinde kullanılabilmektedirler.

Kompozit kazıklar çelik ve betonarmenin birlikte kullanıldığı, proje gereksinimlerine göre şekillenen kazıklardır.

Betonarme kazıklar çakma ve yerinde dökme olarak ikiye ayrılmaktadır. Betonarme kazıkları çakma işlemi genelde inşaat sahası beton dökme işlemi için yeterince geniş olmadığına uygulanan, yumuşak ve gevşek zeminlerde yükü derin tabakalara aktarma konusunda oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Betonarme çakma kazıklar kare, daire ya da sekizgen gibi kesit geometrilerine sahip olabilirken, aynı zamanda içleri boş şekilde de imal edilebilmektedirler. Bu kazıkların tasarımında taşıma ve kaldırılmaları sırasında maruz kalacakları eğilme momenti dikkate alınmaktadır. Çakma kazıklar öngermeli olarak da inşa edilebilmektedirler. Öngirme sayesinde

ağırlıklarına göre mukavemet değerleri yükselmekte ve çakma sırasındaki çatlamların önüne geçilebilmektedir (Toğrol & Tan, 2003).

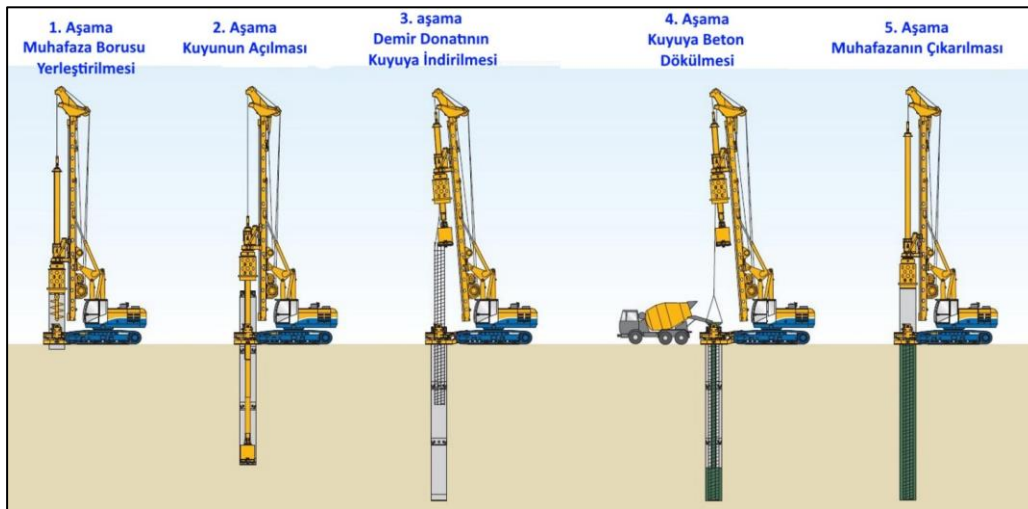
Yerinde dökme betonarme kazıkların uzunluklarına göre bir minimum çap gereksinimi doğmaktadır. Boyu 10 metre ve daha kısa kazıkların minimum çapının 300 mm, boyu 15 metre ve 10 metre arasında olan kazıklarda minimum çapının 350mm, 15 metreden 20 metreye kadar olan uzunluklarda minimum çapın 400 mm ve 20 metreden 30 metreye kadar olan kazıklarda ise minimum 500mm olması uygundur (TS EN 1536, 2010).

2.2 Yerinde Dökme Betonarme Kazıkların İmal Yöntemleri

Yerinde dökme betonarme kazıklar, zeminde açılan bir kuyunun içerisine donatı kafesinin indirilip betonlanması ile inşa edilmektedir. Kuyu açılması esnasında kuyu çeperlerinde stabilitenin sağlanması için zemin özelliklerine göre değişiklik gösteren yöntemler geliştirilmiştir.

2.2.1 Kılıflı yöntem

Kuyu çeperlerinin içe göçmesinin önlenmesi için kullanılan yöntemlerden birisi kılıflı yöntemdir. Bu yöntemde geçici ya da kalıcı, çift cidarlı ya da tek cidarlı bir çelik kılıf kullanılmaktadır. Bu kılıf bir şahmerdan, hidrolik ya da titreşimli bir çekiç kullanarak zemine itilir ya da çakılırlar. Kılıflı yöntemin imalat adımları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Geçici borulu fore kazıkların imalat adımları
(<http://www.zeminarastirma.com>)

Kılıf uzunluğu kazık boyu kadar ya da kohezyonsuz tabakayı bir miktar geçecek kadar olabilmektedir. Kum zeminlerde tek cidarlı kılıfın titreşim ile zemine çakılması işlemi hızlı bir üretim sağlamaktadır. Geçici kılıflı yöntemde kılıf betonlama işleminin sonuna kadar zeminden çıkarılmamalıdır. Geçici kılıf çıkarılırken kazık çevresinde meydana gelebilecek bozulmalar kazığın kapasitesini doğrudan etkilemektedir (Camp, Brown, & Mayne, 2002).

2.2.2 Kuru yöntem

Fore kazıkların yapım yöntemlerinden biri olan kuru yöntem, kohezyonlu zeminlerde yeraltı suyuna rastlanmadığı durumlarda uygulanan, herhangi bir destek elemanı kullanılmayan yöntemdir. Kuyuya su sızdığı durumlarda çeperlerin içe göçme riski bulunmaktadır ve betonla karışan zemin kazığın kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yöntemin imalat adımları ilk ve son aşamalar dahil olmadan Şekil 2.2.'ye benzer olmaktadır.

2.2.3 Islak yöntem

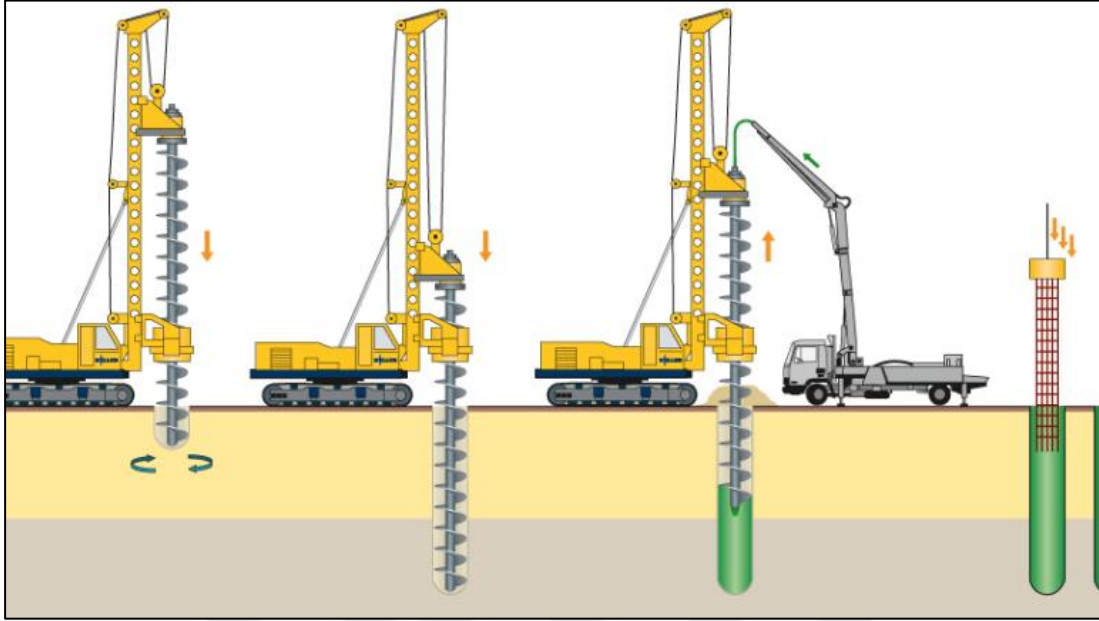
Yeraltı suyunun derinliğinin sık olduğu zeminlerde sudan daha yoğun bir destek sıvısı kullanılarak kuyu çeperinin stabilitesinin sağlandığı yöntemdir. Kullanılan destek sıvılarını mineral bulamaçlar, sentetik bulamaçlar ve doğal bulamaçlar olarak ayırmak mümkündür.

Mineral bulamaçlar, bentonit mineralinden ya da atapulgit mineralinin suyla karışımından elde edilmektedir. Sentetik bulamaçlar bir polimerin suda çözülmesi ile elde edilmektedir. Sentetik bulamaçlar yeraltı suyu seviyesinin 1.75-2.00m üstünde kalacak şekilde kullanılmalıdır. Doğal destek sıvılarının kullanılması ise, zararlı suların bulunduğu zeminlerde kesinlikle önerilmemekte, yeraltı suyunun sık olduğu kendini tutabilen zemin türlerinde ise verimli bir yöntem olmaktadır. Doğal destek sıvısı kullanıldığında kuyu içerisindeki sıvının yeraltı suyudan 2.5-3.0 metre yukarıda olmasına dikkat edilmelidir (Das, 2018).

2.2.4 Burgulu delgi yöntemi

Burgulu delgi imalatı adımları Şekil 2.3.te verilmiştir. Bu yöntemde, şekilde görüldüğü gibi burgulu bir delgi ucu gevşek zemini delerek ilerlemekte ve geri

çıkarken betonlama işlemi yapmaktadır. Daha önceden hazırlanmış donatı kafesi ise beton henüz prizini almamışken içerisine indirilmektedir.

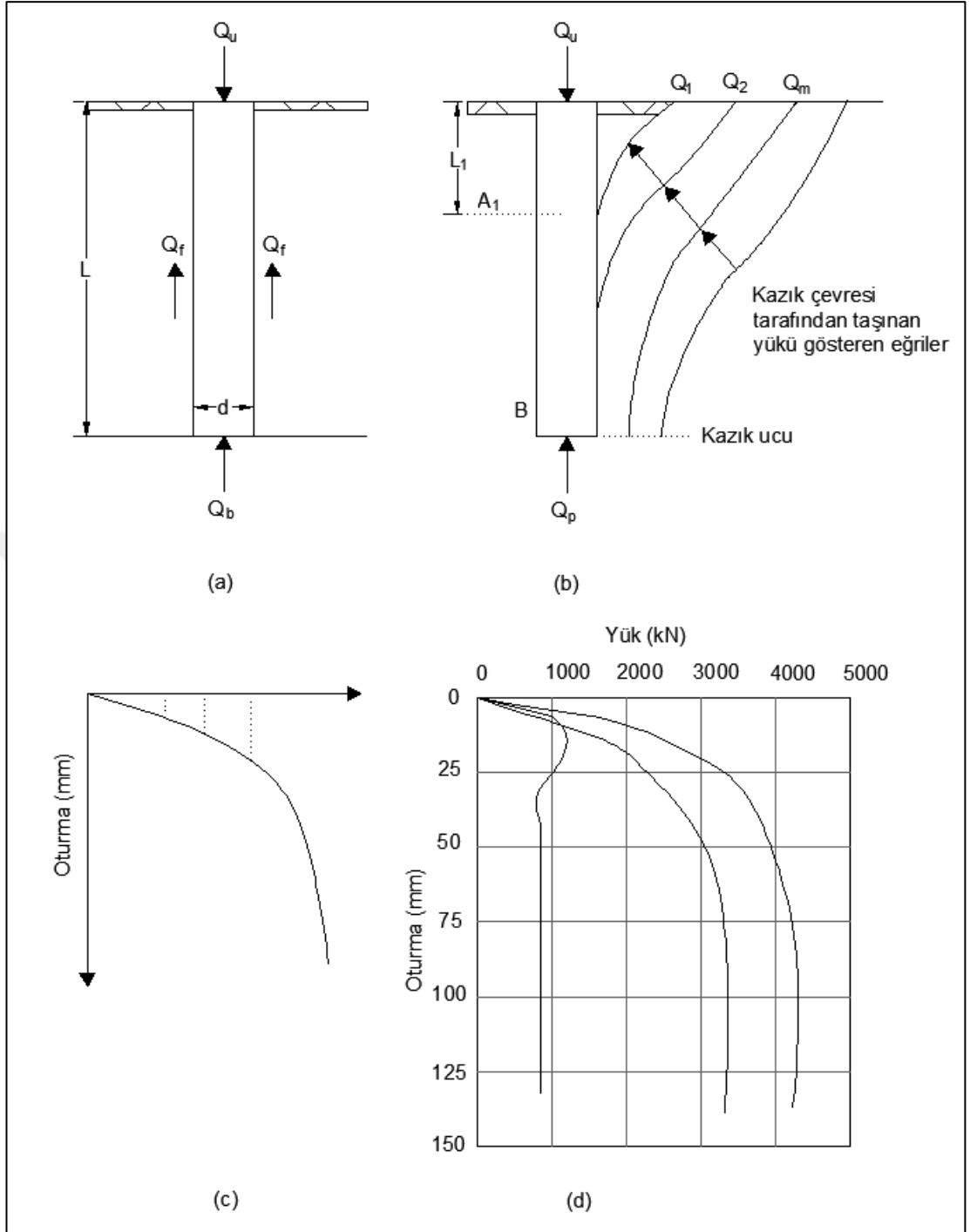


Şekil 2.3 : Burgulu delgi kazık imalat adımları (<https://www.insaatim.com>)

2.3 Kazıkların Oturması ve Yük Aktarma Mekanizması

Malzemelerin doğal davranışlarından biri yük altında şekil değiştirmeleridir. Zemin de tüm malzemeler gibi kazığın aktardığı yük etkisinde şekil değiştirmektedir. Basınç etkisi altındaki kazıkların gösterdiği şekil değiştirme davranışının oturma olacağı aşikardır. Kazıkların çevre sürtünmesinin ve uç direncinin mobilize olması için bir miktar yer değiştirmeleri gerekmektedir ancak kazık kapasitesi belirlenirken oturma miktarının sınırlandırılması önem arz etmektedir.

Kazıklar üzerlerine etkiyen yükü, bulundukları zemine çeperlerinde oluşan çevre sürtünmesi ve kazık ucunda zeminin oluşturduğu tepki kuvveti ile aktarmaktadırlar. Şekil 2.4'te, göçme gözlenene kadar etki eden yükün kademeli olarak arttırıldığı bir durumda zemine yük aktarma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Yüklemenin her kademesinde kazık başının yer değiştirme miktarı ölçüldüğünde, yük ve oturma eğrisi (c)'de gösterildiği gibi olmaktadır. Kazığa gerekli ekipmanların bağlantısı yapıldıysa, kazığın uzunluğu boyunca farklı yük kademelerinde yük dağılımı belirlenebilmektedir. Bu durumda (d)'deki gibi bir eğri elde edilmektedir.



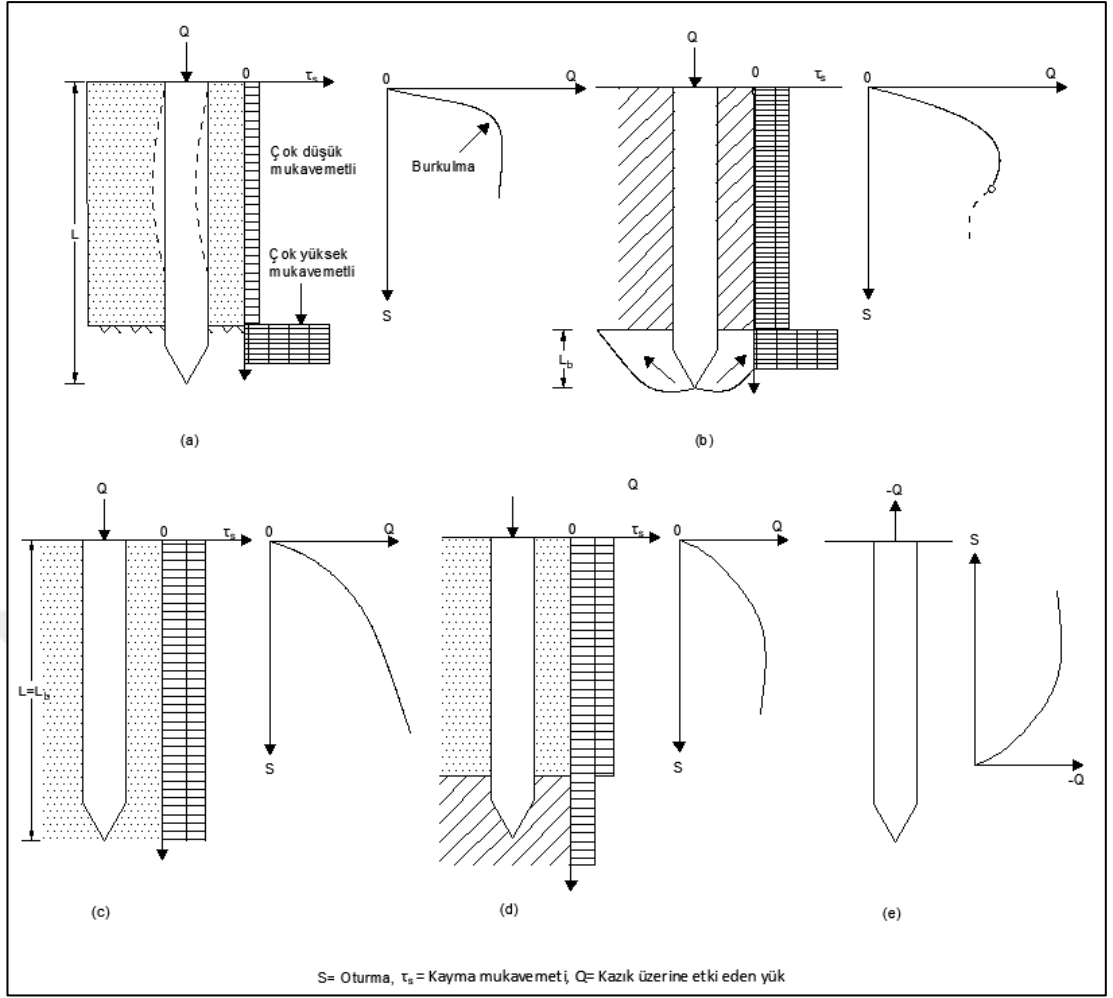
Şekil 2.4 : Yük aktarma mekanizması: (a) tekil kazık, (b) yük aktarma eğrileri, (c) yük-oturma eğrisi, (d) yerinde dökme betonarme büyük çaplı kazıklar için yük-oturma ilişkisi (Tomlinson, 2001)

Q_1 yükü kazık başına etki ettiğinde, bu yük zemin seviyesinden uygulanan eksenel yüke eşit olmaktadır. Ancak, A seviyesinde eksenel yük sıfırdır [Şekil 2.4. (b)]. Toplam Q_1 yükü, L_1 kazık uzunluğu içinde sürtünme yükü olarak dağılmaktadır.

Kazığın alt (A₁-B) kısmı bu Q₁ yükünden etkilenmemektedir. Kazık başındaki yük Q₂ yüküne yükseltildiğinde, kazık tabanındaki eksenel yük sıfır olmaktadır. Toplam Q₂ yükü tüm kazık uzunluğu boyunca sürtünme yükü olarak dağıtılmaktadır. Kazığa etkiyen yük Q₂ yük değerinden büyükse, bu yükün bir kısmı zemine kazığın ucu tarafından aktarılmaktadır. Kazık başına uygulanan Q yükü arttırıldıkça hem sürtünme yükünde hem de noktasal yüklerde artış devam etmektedir. Sürtünme yükü, Q_m gibi belirli bir yük seviyesinde nihai bir Q_f değerine ulaşır ve Q_m'ye eklenen herhangi bir yük artışı, Q_f değerini arttırmaz. Bununla birlikte, nokta yükü Q_p, zemin zımbalama kesme kırılması ile göçene kadar artmaya devam etmektedir.

Çevre sürtünmesi ve uç direnci tarafından taşınan yüklerin birbirlerine göre oranları, zeminin kesme mukavemetine ve elastisitesine bağlıdır. Genel olarak, tam uç direncinin mobilize olması için kazığın gereken dikey hareketi, tam yüzey sürtünmesinin mobilize olması için gerekenden çok daha fazladır. Geçmişte yapılan incelemeler, fore kazıklarda tam sürtünme yükünün kazık çapının yüzde 0.5 ila 1'ine eşit bir oturmada mobilize olduğunu ve tam uç direncinin, kazık çapının yüzde 10 ila 20'si oranında oturma gözlemlendiğinde aktifleştüğünü göstermektedir. Ancak, bu nihai yük kriteri kil içindeki büyük çaplı kazıklara uygulanırsa, çalışma yükündeki oturma aşırı olabilir. Kilde büyük çaplı bir fore kazık için sürtünme yükü ve uç direncinin tipik bir yük-oturma ilişkisi Şekil 2.4 (d)'de gösterilmektedir. Bu şekilde, tam sürtünme direnci sadece 15 mm'lik bir oturmada mobilize olurken, tam uç direncinin ve tüm kazıkların nihai kapasitesinin 120 mm'lik bir oturmada mobilize olduğu görülmektedir. 15 mm'lik bir oturma değerinde kazık yükü, uç direncinin yaklaşık yüzde 25'i olan yalnızca 1.000 kN'dir. Tasarım için 15 mm oturmada 2.000 kN'luk bir çalışma yükü kullanılırsa, bu çalışma yükünde, taban direncinin sadece %50'si mobilize olurken, tam sürtünme direnci tamamen mobilize olmuş olacaktır. Bu durum, kazıkların toplam kırılma yükünün üçte birine eşit bir çalışma yükünü taşıyacak şekilde tasarlanması durumunda, sürtünme direncinin çalışma yükünde tamamen mobilize olma olasılığının olduğu anlamına gelir. Bu tasarım üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir kazık için yük oturma eğrisinin tipi, çevreleyen ve alttaki zeminin bağl dayanım değerlerine bağlıdır.

Şekil 2.5, göçme türlerini vermektedir. Bu göçme türleri aşağıda sıralanmıştır (Murthy, 2007).



Şekil 2.5 : Kazıkların göçme türleri; zeminin dayanımının göçme türüne etkisi: (a) çok zayıf zeminde burkulma göçmesi, (b) alt kısmı güçlü zeminde genel kayma göçmesi, (c) sabit dayanımlı zeminde göçme, (d) alt kısmı zayıf zeminde sürtünme kazığı göçmesi, (e) çekme yükü etkisinde çevre sürtünmesi (Tomlinson, 2001).

- Şekil 2.5 (a), ucu çok sert bir tabakaya (kayaya) dayanan çakılmış bir kazığı (ahşap veya betonarme) göstermektedir. Kazık etrafındaki zemin, herhangi bir sınırlayıcı basınç veya yanal direnç uygulamak için çok zayıf olduğundan kazık, aynı malzemeden yapılmış sıkıştırılmış, ince bir sütun gibi kırılır; az ya da çok elastik bir sıkıştırmadan sonra burkulma meydana gelmektedir.
- Şekil 2.5 (b), uygulamada genel olarak karşılanan göçme tipini temsil etmektedir. Kazık, düşük kesme dayanımına sahip zemin katmanlarından yüksek dayanıma sahip zemin katmanlarına kadar uzanmaktadır. Nihai yük Q'da, üst tabaka bir göçme yüzeyinin oluşumunu engellemediğinden, kazık ucunda bir genel kesme göçmesi meydana gelmektedir. Altteki sağlam zemin tabakası aşırı oturmaların oluşmasını engellediği için çevre sürtünmesinin

etkisi oldukça azdır. Bu nedenle, kazık boyunca kayma gerilmelerinin mobilizasyon derecesi düşük olmaktadır.

- Şekil 2.5 (c), kazığı çevreleyen zeminin kesme dayanımının tek düze olduğu durumu göstermektedir. Bu durumda delme göçmesi meydana gelmesi muhtemeldir. Yük-oturma diyagramının dikey bir teğeti yoktur ve kesin bir kırılma yükü yoktur.
- Şekil 2.5 (d), alt katmanın daha zayıf olduğu nadir bir durumdur. Bu gibi durumlarda yük esas olarak çevre sürtünmesi ile taşınacaktır ve uç direnci neredeyse sıfırdır. Yük - oturma eğrisi, çevre sürtünmesi tamamen aktifleştiği durumdaki yükü temsil eden dikey bir teğet davranışı gösterir.
- Şekil 8.5 (e), bir çekme kuvvetinin kazığa etki ettiği durumu göstermektedir. Uç direnci bu durumda da sıfır olduğundan, Şekil 8.5 (d)'deki ile aynı diyagram, davranışı karakterize etmektedir, ancak bu durumda kabarma meydana gelmektedir.

2.4 Kazıkların Taşıma Kapasiteleri

Üstyapı yüklerinden kazıklara aktarılan yükler, çevre sürtünmesi ve uç direnci ile zemine aktarılmaktadır. Kazığa etki eden ve derinlik arttıkça artan yanal toprak basıncı ve kazığın bir miktar yer değiştirmesi, kazıkta çevre sürtünmesini yaratmaktadır. Kazık boyunca oluşan direncin, kazığın ucundaki zemine iletilerek bir tepki kuvveti oluşturması ile de uç direnci oluşmaktadır. Kazıklarda meydana gelen ve kazıklara yük taşıma kapasitesi kazandıran bu iki etken, kazık boyutlarına, kazığın zemine yerleştirilme yöntemine, zemin profiline ve zeminin fiziksel özelliklerine bağlıdır (Ezeldin, 2004). Kazıkların tekil ve grup halindeki kapasiteleri farklıdır ancak grup halindeki kazık kapasitesinin belirlenebilmesi için tekil kazık kapasitelerinin de bilinmesi gereklidir. Tekil kazık kapasitesi, göçme yükünün bir güvenlik katsayısıyla artırılması ile elde edilen ve izin verilen oturma sınırını aşmayan değerdir. Dikey kuvvet etkisi altındaki kazıklar için taşıma kapasitesi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$Q_u = Q_s + Q_p \rightarrow f_s \times A_s + q_p \times A_b \quad (2.1)$$

Burada Q_u nihai kazık taşıma kapasitesi, Q_s çevre sürtünmesi, Q_p uç direnci, f_s birim sürtünme direnci, A_s zeminle etkileşim halindeki kazık çevre alanı, q_p birim uç direnci, A_p kazık ucundaki kesit alanıdır.

Taşıma kapasitesinin belirlenmesinde zemin özelliklerine bağlı olan taşıma gücü denklemleri, SPT, CPT gibi arazi deneyleri, dinamik çakma direnci ve saha yükleme deneyleri yardımcı olmaktadır.

2.4.1 Statik taşıma kapasitesi formülleri

Statik kapasite formülleri kum, çakıl gibi kaba daneli ve kil, silt gibi ince daneli zeminler için birbirinden farklıdır. Kaba daneli zeminlerde su çıkışı mümkün olduğundan drenajlı şartlar geçerlidir ve efektif gerilmeler kullanılır. İnce daneli zeminlerde ise su çıkışı ihmal edilebilecek kadar yavaş olduğundan drenajsız koşullar geçerli olduğundan toplam gerilmeler kullanılmaktadır.

- Kohezyonsuz zeminlerde çevre sürtünmesi,

$$f_s = \sigma'_v \times K_s \times \tan \delta \quad (2.2)$$

Şeklinde yazılmaktadır. Burada, σ'_v düşey efektif zemin gerilmesi, K_s yanal toprak basıncı katsayısını, δ kazık ile zemin arasındaki sürtünme açısı anlamına gelmektedir.

K_s yatay toprak basıncı katsayısı, kazık malzemesine, kazığın inşa edilme yöntemine ve zeminin sıkılık derecesine bağlıdır ve bu katsayı, sükunetteki yanal toprak basıncı katsayısına bağlı olarak verilmektedir.

Sükunetteki toprak basıncı,

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (2.3)$$

Denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada ϕ' : zeminin efektif kayma mukavemeti açısını ifade etmektedir.

Kazıkların inşa edilme yöntemine göre K_s 'in belirlenmesi için kullanılan tablo, Çizelge 2.1'de verilmiştir. Normal konsolide killeri için sükunetteki yanal toprak basıncı izafi sıkılığın gevşek olduğu durumlarda 0.5, orta sıkı olduğu durumlarda 0.45 ve sıkı olduğu durumlarda 0.35 olarak önerilmiştir (Tomlinson, 2008).

Çizelge 2.1 : Yatay toprak basıncı katsayısı, K_s (Tomlinson, 2008).

Kazık İnşa Edilme Yöntemi	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 sondaj kazıkları	0.75 ~ 1.00
Su jeti kullanılarak imal edilmiş kazıklar	0.50 ~ 0.70

Kazığın yapıldığı malzemenin cinsine göre yüzey sürtünmesi değişmektedir. Örneğin çelik kazığın yüzeyi betonarme bir kazığın yüzeyinden daha pürüzsüzdür. Çeşitli kazık yüzeyleri için verilen kazık ve zemin arasındaki sürtünme açısı değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Kazık yüzeylerine göre zemin ve kazık arasındaki sürtünme açısı (Tomlinson, 2008).

Kazık ve Zemin Arayüzü	Kazık ve Zemin sürtünme açısı
Pürüzsüz (veya kaplanmış) çelik/kum	$0.5\phi' \sim 0.7\phi'$
Pürüzlü (veya nervürlü) çelik/kum	$0.7\phi' \sim 0.9\phi'$
Betonarme çakma kazık/kum	$0.8\phi' \sim 1.0\phi'$
Yerinde dökme betonarme kazık/kum	$1.0\phi'$
Ahşap kazık / kum	$0.8\phi' \sim 0.9\phi'$

Kazık kapasitesi belirlenirken çevre sürtünmesinin gevşek kumlarda kazık çapının 10 katına kadar, orta sıkı kumlarda 15 katına kadar ve sıkı kumlarda 20 katına kadar doğrusal arttığı ancak sonrasında değişmediği kabul edilmektedir ve bu derinliğe kritik derinlik denmektedir (Das, 2018).

- Kaba daneli zeminlerin uç direnci,

$$q_b = \sigma'_v \times N_q \quad (2.4)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Burada, σ'_v kazık ucundaki efektif zemin gerilmesini, N_q taşıma gücü faktörünü belirtmektedir.

Kazık kapasitesi için yapılan çalışmalar Toğrol ve Tan'ın 2003 yılında basılan kitabında aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Prakash ve Sharma, 1990 yılında farklı araştırmacıların elde ettikleri sonuçları derleyerek fore kazık ve çakma kazıklar için ayrı ayrı, farklı sürtünme açısı değerlerine karşılık gelen taşıma gücü faktörlerini bir tablo halinde sunmuşlardır. Aşağıdaki tabloda fore kazıklar için değerler verilmiştir.

Çizelge 2.3 : N_q ve ϕ değerleri, (Prakash & Sharma, 1990).

$\phi(^{\circ})$	20	25	28	30	32	34	36	38	40	42	45
N_q	4	5	8	12	17	22	30	40	60	80	115

Tomlinson ise uç mukavemetinin zeminin sıkılığından bağımsız olarak en fazla 5 MN/m² alınması gerektiğini vurgulamıştır.

- İnce daneli zeminlerde taşıma kapasitesini sağlayan çevre sürtünmesi,

$$f_s = \alpha \times s_u \quad (2.5)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde α , adezyon katsayısını, s_u ise zeminin drenajsız kayma mukavemetini ifade etmektedir.

Adezyon katsayısı kazığın inşa edilme evresinde zeminin örselenme derecesine, aşırı konsolide olmuş kil zeminlerde kazığı sarmasına ve kazığın yer değiştirmesine bağlı olup, genellikle 1'den küçüktür.

Fleming, 1983 yılında yaptığı çalışmada drenajsız kayma mukavemeti (s_u) ve zeminin efektif gerilmesine (σ'_v) bağlı olarak aşağıdaki bağıntıları elde etmişlerdir.

$$\frac{s_u}{\sigma'_v} < 1 \rightarrow \alpha = \frac{0.5}{\left(\frac{s_u}{\sigma'_v}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

$$\frac{s_u}{\sigma'_v} > 1 \rightarrow \alpha = \frac{0.5}{\left(\frac{s_u}{\sigma'_v}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.7)$$

Burland, yaptığı araştırmaların sonucunda, kil zeminlerde çevre sürtünmesinin hesaplanması için aşağıdaki bağıntıyı elde etmiştir.

$$f_s = K_s \times \sigma'_v \times \tan \delta = \beta \times \sigma'_v \quad (2.8)$$

Bu denklemde K_s , toprak basıncı katsayısını, β ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir. Sürtünme katsayısı değeri normal konsolide killeri için,

$$\beta_{nc} = (1 - \sin\phi') \tan\phi' \quad (2.9)$$

olarak verilmiştir. Aşırı konsolide killerde ise çevre sürtünmesi normal konsolide killerde daha büyük olduğundan, Meyerhof, aşırı konsolide killeri için, aşırı konsolidasyon oranına (OCR) bağlı olarak aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$\beta = \beta_{nc} \sqrt{OCR} \quad (2.10)$$

- İnce daneli zeminlerin uç direncinin hesaplanmasında,

$$q_b = s_u \times N_c \quad (2.11)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada bağıntısı kullanılmaktadır. Burada s_u , kazığın soketlendiği zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemeti, N_c ise taşıma gücü faktörüdür ve bu faktör, kazığın çapının en az 5 katı uzunluğa kadar taşıyıcı tabakaya soketlendiği durumda 9 alınabilir. Kazık, taşıyıcı tabaka üzerine oturtulmuş vaziyette ise bu değer maksimum 6 alınmalıdır (Toğrol & Tan, 2003).

2.4.2 Kazık taşıma kapasitesinin arazi deneyleri ile belirlenmesi

Kazıkların kapasiteleri standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT), pressiometre deneyi gibi sahada sıkça uygulanan deneyler yoluyla elde edilebilmektedir.

- Standart Penetrasyon Deneyi

63.5 kg ağırlığındaki tokmağın 0.76m yükseklikten üç aşamada toplam 0.45m çakılacak şekilde düşürülmesi ile yapılmaktadır. Sonuç olarak tokmağın zemine 0.45m nüfuz etmesi için kaç kez düşürüldüğü sayılmakta ve ilk 0.15 cm girmesi için yapılan vuruşlar ihmal edilmektedir. Elde edilen sayı SPT sonucudur ve bu sonuç üzerinde birçok düzeltme yapılarak SPT_N değeri elde edilmektedir. SPT verileri yardımıyla taşıma kapasitesi hesaplamaya yarayan aşağıdaki denklemi kullanılabilmektedir (Das, 2018).

$$Q_F = m \times N \times A_b + n \times \bar{N} \times D \times A_s \quad (2.12)$$

Bu denklemde Q_F : kazık taşıma gücü, m : deneysel bir katsayı (fore kazıklar için 120 alınabilir.), N : kazık ucu derinliğindeki SPT değeri, A_b : kazık ucu kesit alanı, n : deneysel bir katsayı (fore kazıklar için 1 alınabilir.), $\bar{N}$: kazık boyunca ortalama SPT değeri, D : kazık çapı, A_s : kazık çevre alanıdır.

- Koni Penetrasyon Deneyi

Sahada en sık uygulanan bir diğer deneydir. Bu deney mekanik ve piezo-elektrikli olarak iki tipe ayrılmaktadır. Mekanik olan deneyde 35.7 mm çapındaki 60° konik bir uç ve aynı çapta 133.7 mm boyunda, çevre sürtünmesini ayrı olarak ölçmeye yarayan silindirik bir gömlek bulunmaktadır. İlk adım konik ucun 200 mm derinliğe kadar 20 mm/s hızda statik kuvvet uygulanarak ilerlemesi esnasında uç direncinin ölçülmesidir. Sonraki adım ise kılıfın aynı hızda ilerlemesi esnasında sürtünme katsayısının ölçülmesidir. Piezoelektrik tipi deneyde bu sürtünme değerleri piezo-elektrik elemanlar ile ölçülür. CPT deneyi SPT deneyinin aksine zemin içerisinde sürekli sonuç vermektedir ancak yakın bir tarihe kadar CPT deneyinden numune alınamamakta idi. Ayrıca CPT deneyi çakıllı zeminlerde yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Canadian Geotechnical Society, koni penetrasyon deneyi sonuçları ile silt ve kum zemindeki kazıkların taşıma kapasiteleri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve aşağıdaki denklemi elde etmişlerdir. (Das, 2018)

$$Q_F = q_c \times A_b + \bar{f}_c \times A_s \times L \quad (2.13)$$

Bu denklemde, Q_F : nihai kazık kapasitesi, q_c : CPT uç direnci (çapları 0.5 metreden büyük kazıklar için ortalama değer yerine minimum değer alınmalıdır.), A_b : kazık uç kesit alanı, $\bar{f}_c$: CPT sonucu ortalama çevre sürtünmesi, A_s : kazık çevre alanı, L : kazık çakma boyunu ifade etmektedir.

- Pressiyometre Deneyi

Kazık taşıma kapasitesinin tahmin edilmesinde kullanılan son deney, pressiyometre deneyidir. Bu deneyde sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen bir hücre, zemine yatay kuvvet uygulayarak yer değiştirme değerlerini ölçmekte ve zeminin yatay yönde göçme yükünü elde belirlemektedir. Bu deney sonuçlarından çevre sürtünmesi ve uç

direnci parametrelerini tahmin etmek güçtür ancak diğer deneylerin yapılamadığı durumlarda zeminin mukavemeti hakkında fikir vermektedir. (Burlon, 2014)

2.4.3 Kayaya oturan kazıkların kapasiteleri

Kayaların delinmesiyle imal edilen ve bu kayaların içinde sonlanan fore kazıklar, kısmen sürtünme ve kısmen de uç direncinden kapasite almaktadırlar.

Kaya soketi boyunca çevre sürtünmesinin oluşumunu etkileyen etkenler aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Toğrol & Tan, 2003).

- Soketin uzunluk-çap oranı
- Soket çevresindeki ve altındaki kayanın mukavemeti ve elastik modülü
- Yan duvarların pürüzlülüğü, bentonit bulamacının varlığı
- Sondaj kuyusunda döküntü varlığı, kuyu tabanının durumu
- Kayanın farklı mukavemet ve modüllere sahip zeminlerle katmanlanması
- Kazığın çeper duvarının mukavemetinin elastik sınırı ile ilgili olarak oturması
- Zamanla artan oturma ile sonuçlanan kaya/beton ara yüzeyinde malzemenin sürünmesi.

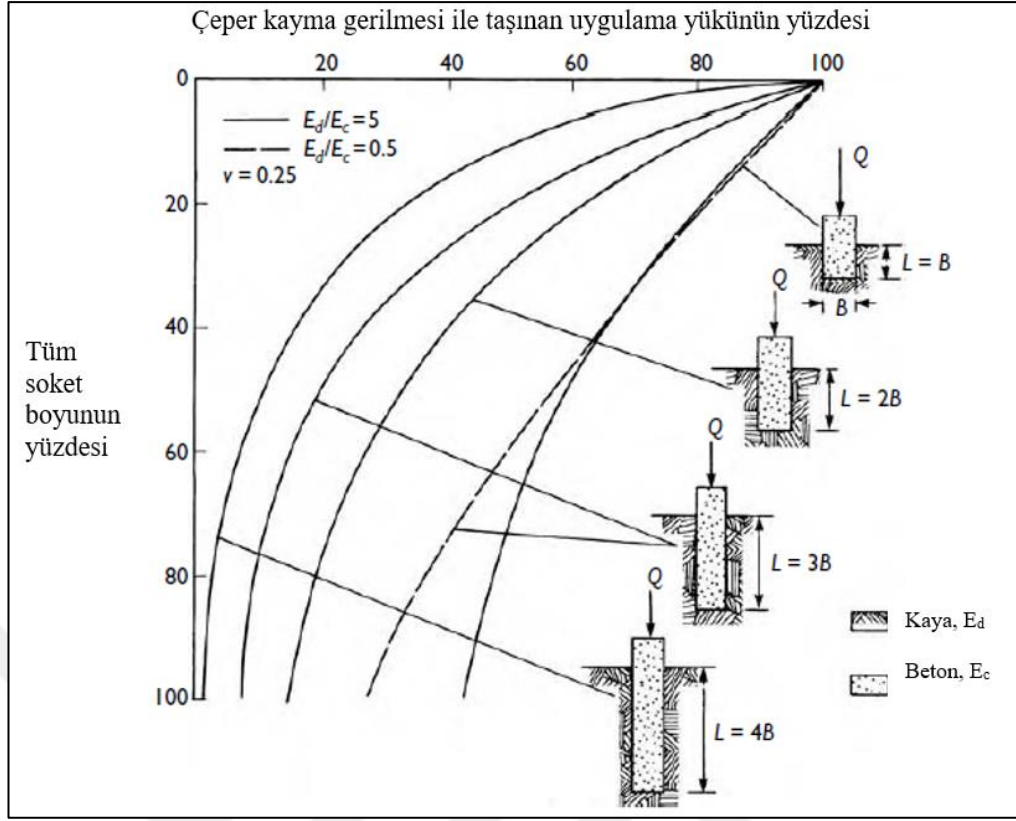
Soketin uzunluk/çap oranının etkisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Çevre sürtünmesinin yanı sıra taban direncinden faydalanılmak isteniyorsa, soket uzunluğunun kazık çapının dört katından az olması gerektiği görülmektedir.

Yan duvarların durumu kapasite açısından önemli bir faktördür. Zayıf bir kayada, delgi işlemleri sırasında sondaj kuyusunu çeperlerinde yumuşama ve çamurlaşma gözlenmektedir. Daha güçlü ve parçalanmış kayalarda bu çamurlaşma aynı ölçüde gerçekleşmemekte, aksine sondaj deliği genişlemektedir. Bu durum betonun kayaya daha iyi bağlanmasına neden olmaktadır.

Nihai bağ gerilimi, f_s , aşağıdaki denklemle belirlenmektedir.

$$f_s = \alpha\beta q_{uc} \quad (2.14)$$

Burada, α : q_{uc} değerine bağlı azaltma faktörü β : kaya kütleindeki süreksizlik aralığı ile ilgili düzeltme faktörüdür. α faktörü, tek eksenli basınç değerine göre Şekil 2.7'deki gibi belirlenmektedir.

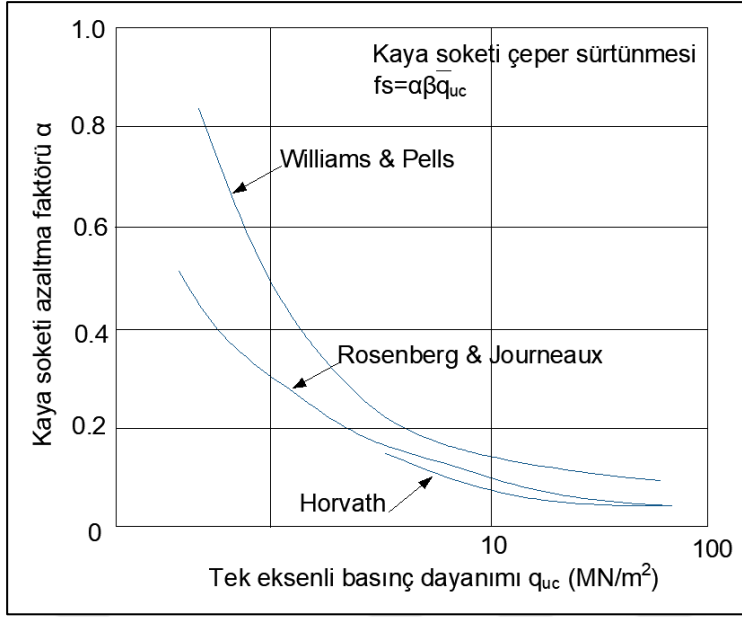


Şekil 2.6 : Yanal yüzey tarafından taşınan yük yüzdesi ile tüm soket boyu yüzdesi ilişkisi (Tomlinson, 2008).

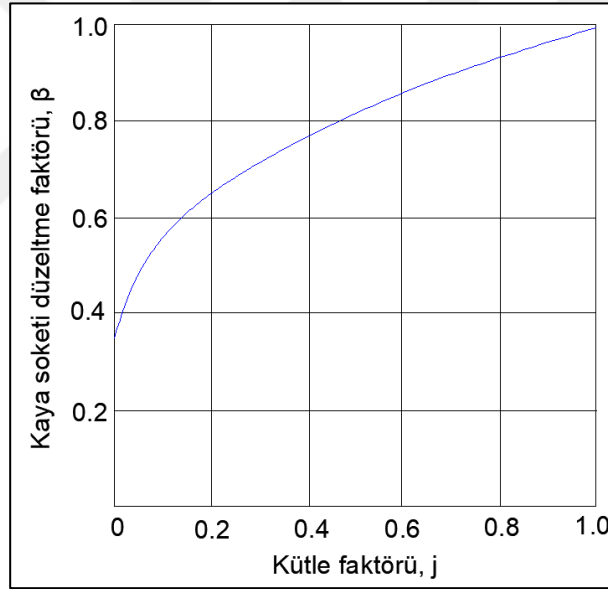
β faktörü, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi kaya kütesinin elastik modülünün sağlam kayaninkine oranı olan kütle faktörü olan j ile ilişkilidir. Kütle faktörü, yükleme testleri veya sismik hız ölçümlerinden bulunmadıysa, yaklaşık olarak kaya kalitesi değerinden (RQD) ile ilişkisinden de elde edilebilmektedir. RQD değeri ve kütle faktörü arasındaki ilişki Çizelge 2.4'te verilmiştir .

Çizelge 2.4 : Kaya kalitesi değeriyle kütle faktörü ilişkisi (Tomlinson, 2008).

RQD (%)	Kütle faktörü
0-25	0.2
25-50	0.2
50-75	0.2-0.5
75-90	0.5-0.8
90-100	0.8-1



Şekil 2.7 : Tek eksenli basınç değeri ile azaltma faktörü (α) ilişkisi (Tomlinson, 2008).



Şekil 2.8 : Kütle faktörü ile kaya soketi düzeltme faktörü (β) ilişkisi (Tomlinson, 2008).

Kayaya soketli kazıkların tasarımı için ilk çalışmalar, Çamurtaşları üzerinde doğrusal olmayan kazık tasarımını inceleyen Williams, Johnston ve Donald (1980) tarafından Avustralya'da yapıldı. Rowe ve Pells (1980) tarafından yapılan Kumtaşı ve Şeyl üzerinde elastik kazık tasarımını da diğer erken çalışmalardan biridir. Horvath ve Kenny (1979), Kanada'daki çamurtaşları üzerinde benzer saha ve laboratuvar testleri yapmışlardır. Meigh ve Wolshi (1979) ise Avrupa'da karşılaştırmalı bir çalışma

yürütmüştür. Yanal kayma tasarımı daha sonra Rowe ve Armitage (1987) tarafından detaylandırılmıştır. Kulhawy ve Phoon (1993), killer ve yumuşak kayalar (şeyller, çamurtaşları ve kireçtaşı) arasındaki çevre sürtünmesinin süreksizliğini göstermiştir. Seidel ve Haberfield (1995) bu çalışmayı, kaya soketi performansının büyük ölçüde shaft pürüzlülüğüne ve çapına bağlı olduğunu göstermek için genişletmiş; bu sayede kazık çapı arttıkça kazık shaft sürtünmesi azaldığını göstermiştir.

Tasarım çevre sürtünmesi kapasitesini “karakteristik” bir basınç kaya dayanım (q_{uc}) değeri ile korelasyona dayalı olarak sık sık hesaplayan çeşitli kazıklı kaya soketi tasarım prosedürleri bulunmaktadır. Çeşitli araştırmacılar tarafından türetilen çevre sürtünmesi denklemlerinin iyi bir özetini Kulhawy ve diğerleri. (2005) yayınlamıştır. Bu yayında, yöntemler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

-Rosenberg and Journeaux, 1976: Çizdikleri eğri q_u/P_a oranı 5-340 arasında değişen yalnızca 6 veriye dayanmakta. Bu 6 veriden 2 tanesi göçme davranışı göstermemekte. 2 tanesi ise tahmini q_u değerlerine sahip. Kapasite ve q_u değerlendirmesinde belirgin bir tutarlılık gözlenmemekte.

- Horvath, 1978: Soket çevre direncinin belirlenmesi için yapılan ilk sistematik çalışma olarak değerlendirilebilmekte. Veri tabanları, sahadaki çeşitli çapa sahip kuyuları ve laboratuvarındaki küçük çaplara sahip kuyuları içermekte idi. Rapor edilen 87 saha testinden 50 tanesi şeyl ailesi olmak üzere 75 tanesi tortul kayalarlardı. Göçme yükü, uygulanan maksimum test yükü olarak tanımlanırken, q_u orjinal kaynakta verildiği gibi rapor edilmişti. Ayrıca betonun ve kayanın daha zayıf olanının çevre direnci konusunda belirleyici olacağını öne sürmüşlerdi. Bu nedenle q_u/P_a oranının 1-400 arasında olacağını belirttiler. Horvath ve diğerleri, çalışmalarını ileriye taşıyarak, soketin pürüzlendirildiğinde kazık kapasitesinin iyileştirilebileceği konusunu gündeme getirdi.

- Meigh ve Wolshi, 1979: Kendilerinden önce yapılmış 2 çalışmayı inceleyerek yaptıkları 13 testle kıyasladılar. Ancak test sonuçlarının yarısının belirsiz veriler sunduğu belirtildi. q_u/P_a aralığı ise 2-200 arasında idi. Bu çalışmada ayrıca zayıf kayalar için bir alt sınır verilmiştir.

- Williams ve diğ. 1980: Melbourne çamurtaşında yapılmış 4 farklı sahada yapılmış 18 adet yükleme deneyi veri tabanını kullandılar. q_u/P_a oranı 5-800 arasında

değişmekteydi. Testleri için yük-şekil değiştirme eğrilerinden çevre direncinin tepe değerlerini elde ettiler. Ancak, q_u değerleri su muhtevası ve drenajlı mukavemet parametrelerinin korelasyonu ile elde edilmişti.

- Rowe ve Armitage, 1984: 20'den fazla sahada yapılmış 80'den fazla deney verisi kullandılar. q_u/P_a oranı 4-400 arasında değişmekteydi. Testlerin önemli bir yüzdesi göçme davranışı göstermemekteydi. Bu verileri kullanarak pürüzlü soketler için daha yüksek bir katsayı önerdiler.

- Carter ve Kulhawy, 1988: Rowe ve Armitage verilerini inceleyip yaklaşık bir alt sınır belirlediler. Ayrıca 12 saha testini değerlendirerek korelasyonların ve alt sınırın uygunluğunu incelediler. Sonuç olarak $0.15q_u$ değerini aşan sürtünme değerlerinde, yerinde yük testi, yerel deneyim ile makul oldukları kanıtlandığında kullanılması gerektiğini, önerilen denklemden tasarım sürtünme değeri elde edildikten ve bu değere bir güvenlik faktörü uygulandıktan sonra beton bağı değeri olan $0.05f_c$ 'nin kontrolü yapılması gerektiğini ve son olarak yük testleri aksini göstermediği sürece düşük değer kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

- Reese and O'Neill, 1988- 1999: Kendilerinden önce açıklanan ilişkilerin bazılarını kullanarak $q_u/P_a > 17$ olan kayalar için tasarım önerileri sunmuşlardır. $q_u/P_a > 19$ kayalar için Hovarth ve Kenney denklemini 0.65 katsayı ile kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır ancak zaten daha önce bir alt sınır belirlendiği için bu yaklaşım fazla güvenli sonuçlar vermektedir. Ayrıca q_u/P_a oranı 17-19 olan kazıklar için Carter ve Kulhawy $f = 0.15q_u$ tasarım kontrolünün bir $f = 0.15q_u$ şeklinde bir tasarım önerisine dönüşmesini önermişlerdir. Bu yaklaşım Meigh ve Wolski'den alt sınırından dahi düşük değerler vermektedir. Araştırmacılar 1999 yılında bu tavsiyeyi yenilemiştir. Revizyonlarında kayayı $q_u/P_a > 50$ olarak tanımlamış ve Hovath & Kenny denklemini $c=0.65$ katsayısı ile kullanmayı hala önermektedirler.

- Kulhawy ve Phoon, 1993: Önceki çalışmaların veri tabanını ve Florida'da 23 sahadan 47 yükleme testi ile kireçtaşlarındaki delgilerden alınan numuneleri kullandılar. Bu veriler diğer verilerle aynı sınırlamalara sahipti. Çevre sürtünmesi için iki grafik elde edildi. Bu grafikte koşul durumu, aynı sahada birden fazla testin neden olduğu saha yanlışlığını ortadan kaldırmaktadır. Sonuç olarak baskın verilerden Rowe ve Armitage yönteminin saha koşullarını yansıttığını belirtmişlerdir.

- Zhang ve Einstein, 1998 – 1999: Mevcut verileri ve önerilen ilişkileri incelediler ve sonuç olarak Carter ve Kulhawy alt sınırına ulaştılar.

- Prokoso, 2002: Mevcut verileri yeniden incelerken daha tutarlı bir şekilde değerlendirmeye çalıştı. Öncelikle, yalnızca göçme davranışı gözlenen test eğrileri dikkate aldığından yük kapasiteleri tutarlı bir şekilde değerlendirildi. Ancak q_u değerlerinin tutarlılığından emin olmak mümkün olmadı. Sonuç olarak, daha önce belirtilen 0.63'lük alt sınır, verilerin %90'ı için geçerli olup, mutlak alt sınıf için yaklaşık 0.25 olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Tüm bu çalışmalara rağmen farklı yöntemlerle tasarlanan kazıkların boylarının geniş çapta değiştiği gözlenmiştir. Bu yöntemlerden en uzun kazık boyunu veren yöntem Carter ve Kulhawy (1988) olmuştur. Rowe ve Armitage (1987) ve Williams ve diğerleri. (1980) prosedürleri soket uzunluklarını %40-60 oranında azaltmıştır. Ng ve diğerleri (2001), Rowe ve Armitage (1987) yönteminin tortul kayaçlar için, Hovarth ve arkadaşlarının yönteminin ise (1983) volkanik kayaçlar için uygun olduğunu belirtmiştir. Çizelge 2.5'te tüm ampirik yöntemlerin katsayıları verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Çevre sürtünmesi hesabı için önerilen α , β katsayıları (Zhang, L. 2004).

Yöntem	α	β
Rosenberg ve Journeaux (1976)	0.34	0.51
Horvath ve Kenney (1978)	0.21	0.50
Meigh ve Wolshi (1979)	0.22	0.60
Williams ve diğ. (1980)	0.44	0.36
Rowe ve Armitage (1984)	0.40	0.57
Carter ve Kulhawy (1988)	0.20	0.50
Reese ve O'Neill (1987)	0.15	1.00
Reynolds ve Kaderbek (1980)	0.30	1.00
Gupton ve Logan (1984)	0.20	1.00
Toh ve diğ. (1989)	0.25	1.00
Horvath (1982)	0.20-0.30	0.50
Prokoso (2002)	0.98	0.50

2.5 Yerinde Dökme Betonarme Kazıkların Sürekliliği

Yerinde dökme betonarme kazıkların sürekliliğini bozan bazı etkenler bulunmaktadır. Bunlar, düşük kaliteli betonun yerleşirken ayrışmaya uğraması, betonun içerisine istenmeyen bir madde karışması, kılıfın çekilmesi esnasında oluşabilecek etkilerin neden olduğu beklenmeyen kesit geometrilerinin oluşması, kazı ucunda meydana gelen örselenme sonucu kuyunun kazı döküntüleri ile dolması, donatı kafesinin uygun yerleştirilememesi olarak sayılabilmektedir. Bu nedenle fore kazık yapımı esnasında, kazı çevresinin durağanlığının sağlanması, betonlama işleminden önce kuyunun zemin döküntülerinden iyice temizlenmesi, kuyunun hazırlanmasıyla betonlama süresinin kısa tutulması, betonun donatı kafesini sarmasına engel olacak sıklıkta donatı kullanılmaması ve kılıfla donatının birbirine temasının önlenmesi amacıyla pas payı bırakılması gibi hususlara dikkat edilmelidir (Cameron, G. & Chapman, 2004).

Fore kazıklarda kullanılan beton ayrışmaya karşı dirençli, yüksek plastisiteli, yeterli işlenebilirlik düzeyine sahip ve kendi kendine sıkışabilir olmalıdır. Bu şartlara uygun olmayan beton kullanıldığında kazıklarda sürekliliğin bozulması söz konusu olabilmektedir.

Kazıklar inşa edildikten sonra zemin içerisinde gömülü olduklarından gözlem yapılması için kazılması gerekmektedir. Kazı, dolgu maliyeti ve çevresinde meydana gelecek örselenme dikkate alınırsa bu yöntem yaygın kullanıma uygun değildir. Dolayısıyla kazıkların kalite kontrolünün yapılabilmesi için çeşitli deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deneylerden başlıcası kazık sürekliliği testidir. Kazık sürekliliğinde çatlak, kırık gibi herhangi bir bozukluk bu test ile hızlı bir şekilde belirlenebilmektedir. Deney yöntemi, kazığa vurulan bir tokmağın yarattığı gerilme dalgasının kazık ucuna varıp geri yansması ile kazık başında bulunan bir ivme ölçer tarafından algılanması şeklindedir. Elde edilen gerilme dalgasından kazığın sürekliliği hakkında yorum yapmak mümkün olmaktadır (ASTM-D5882-95).

Kazık sürekliliği testinin yanı sıra, kuyu içi sonik testi de benzer amaca hizmet etmektedir. Bu testin uygulanabilmesi için kazık üretimi sırasında kuyuya kazık çapıyla orantılı olarak birden çok boru indirilmekte, bu borulara indirilen alıcı ve vericiler sayesinde betonun sürekliliği araştırılmaktadır.

3. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

Kazık yükleme deneyleri, kazık taşıma gücü kapasitesinin doğru tahmin edilmesi için yaygın uygulanan saha deneyleridir. Bu deneyde kazık üzerine yük uygulanmakta ve kazığın yaptığı yer değiştirme miktarı ölçülmektedir. Yükleme, kazık göçene kadar, bir diğer deyişle, aynı yük kademesinde aniden artan yer değiştirme gözlenene kadar, ya da kazığın tasarlanan servis yükünün belli bir katına kadar yapılmaktadır. Göçene kadar yüklenen kazıklarda nihai kazık kapasitesi direkt olarak elde edilmiş olur. Yükleme testi boyunca göçme davranışı göstermemiş kazıklarda ise nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Kazık yükleme deneyleri araştırma kazığı ve kontrol kazığı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Araştırma kazığı, projeye başlanmadan önce tasarıma yardımcı olması için yapılmaktadır. Kontrol kazığı ise kazıklar inşa edildikten sonra, kapasitelerinin kontrol edilmesi amacı ile yapılmaktadır. Araştırma kazıkları genelde göçme yüküne kadar ya da şartnamelere göre servis yükünün 2 katına kadar, kontrol kazıkları ise servis yükünün 1.5 katına kadar yüklenmektedir. Kontrol kazıkları deneyden sonra projede kullanılmaktadırlar.

Araştırma kazığı ile yapılan yükleme testinde, kazık başına en büyük deney yükü yüklenerek oturma miktarı ölçülmektedir. Kontrol kazığı ile yapılan yükleme testinde ise tasarım yükünün güvenli taşıdığı ve tasarım yüküne karşı gelen oturma miktarlarının izin verilebilir sınırlar içerisinde olduğu gösterilmektedir.

Deneye hazırlık evresinde ölçme aletleri kazığın rijitliğini değiştirmeyecek şekilde özenle monte edilmektedir ve kazık başlığı belli bir yerden kesilip 25 mm kalınlığında çelik levha kaynaklanmaktadır. Kazık yükleme deneyleri, yükleme çeşidine göre ise basınç, çekme ve yanal yükleme deneyleri olarak üçe ayrılmaktadır.

3.1 Yükleme Deneyi Düzeneklerinin Kurulması ve Deneyin Yapılması

Deney düzeneklerinde sabit bir kiriş ya da yapı ve hidrolik krikolar bulunmaktadır. Kiriş, üzerindeki yükü hidrolik krikoya, hidrolik krikolar ise kazığa yükü aktarmaktadır. Şekil 3.1. ve 3.2’te örnek düşey yükleme testi düzeneklerine ait plan ve kesit görüntüleri verilmiştir.

edilmesi, yeterli değilse uzatılması, krikonun deney sırasında maruz kalacağı yükleri taşıyabilecek kadar rijit olması, reaksiyon kazıkları ile test kazığı arasında yeterli mesafenin bulunmasıdır. Bu mesafenin nedeni kazıkların kazık çapının 5 katından daha yakın olduğu durumlarda gerilme alanlarının etkileşim içerisine girmesidir. Özellikle sürtünme kazıkları için bu mesafenin artırılması önerilmektedir.

Düzenek kurulduktan sonra yükün ölçülebilmesi amacıyla yük hücreleri kullanılmaktadır. Yer değiştirmelerin ölçülebilmesi için ise ölçme saatleri kullanılmaktadır.

Test kazığının çapının genelde projede kullanılacak çapla aynı olması önerilmektedir ancak büyük çaplı kazıklarda deney maliyeti yüksek ve şartları zorlu olduğundan daha küçük çaplarda deney yapmak tercih edilebilmektedir. Büyük çaplı kazıkların projelendirildiği durumlarda çevre sürtünmesi ve uç direncinin ayrı olarak belirlenmesi için farklı deneyler yapılması önerilmektedir.

Yükleme deneyleri yükün uygulanma biçimine göre sabit yük altında ya da sabit hızla olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uç direnci ile çalışan ve kil zeminde bulunan kazıkların yük – oturma özelliklerinin elde edilebilmesi için sabit yük uygulanarak yapılan deneyler, nihai taşıma gücünün belirlenmesi içinse sabit hızla yük uygulanan deneyler daha uygun olmaktadır.

Sabit yük uygulanarak yapılan deneylerde her yük kademesinde ölçülen deformasyon değeri 0.25 mm/saat hıza kadar düştüğünde sonraki yük kademesine geçilmektedir. Bu deneyler, inşa edilmiş kazıkların taşıma kapasitelerinin kontrol edilmesi için tasarım yükünün 1.5 katı yük (çekme ya da basınç) uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Sabit yük uygulanan deneylerin yapım yöntemi ASTM 1994'te yer almaktadır. Bu şartnameye göre, yük kademeleri sekize bölünmeli, her yük kademesi maksimum 2 saat uygulanmalı, oturma değeri 0.25 mm değerinden daha az olana kadar beklenmeli, deney yükü 24 saat etkitilmeli, boşaltma işlemi yine sekiz kademe halinde gerçekleştirilmeli ve deney yükünün yarısı 20 dakika aralıklarla tekrar yüklenip boşaltılmalıdır (ASTM, 1994). Bu deneyde sekizinci kademe hala taşıma kapasitesine ulaşamamışsa, maksimum deney yükünün 0.05 katı eklenerek kademeler halinde yük artırılabilir. Konuyla alakalı bir diğer şartnameye göre yük, altı kademe halinde uygulanmalıdır ve oturma hızı oturma hızı 20 dakikada 0.1mm'nin altına düştükçe diğer kademeye geçilmelidir (EN1536, 1999).

Sabit hızla yükleme deneyinde basınç ve çekme deneyleri için farklı zeminlerde farklı itme hızı uygulanmaktadır. Killi zeminlerde yapılan basınç deneylerinde kazığın dakikada 0.25-1.25mm, kaba daneli zeminlerde uygulanan basınç deneylerinde kazığın dakikada 0.75-2.50 mm yer değiştirmesi sağlanmaktadır. BS8004 şartnamesi ince daneli zemin içerisinde bulunan çevre sürtünmesi sayesinde kapasite kazanan kazıklarda dakikada 0.75 mm, kaba daneli zeminde bulunan ve uç direnci sayesinde kapasite kazanan kazıklarda dakikada 1.50 mm hızlarını önermektedir ve bu deney, kazıkta oturma gözlenmeyinceye kadar devam ettirilmektedir (BS8004, 1986). EN 1536:1999 şartnamesi ise kazığın zemin içerisine nüfuz etme hızının dakikada 1.0 mm olmasını önermiştir (EN1536, 1999). Tomlinson, sabit hızlı çekme deneyi uygulanan kazık, tekrarlı yüklere maruz kalıyorsa deneyin de tekrarlı yüklerle yapılması gerektiğini önermiştir. Tekrarlı çekme deneyinde ASTM-D3689-90 şartnamesine göre, kazığın maksimum kapasitesine kadar yüklenmesi, kapasite belirlendikten sonra başka iki kazığın tekrarlı çekme yüküne maruz bırakılması şeklinde uygulanmaktadır (ASTM, 1995).

3.1.1 Yavaş adımlı yükleme deneyi (SM)

ASTM D 1143 / D1143M - 07'de standart yükleme deneyi olarak adlandırılmaktadır. Kazık, tasarım yükünün 2 katına kadar kademeli şekilde yüklenmektedir. Yükleme işlemi tasarım yükünün %25, %50, %75, %100, %125, %150, %175, %200'ü olacak şekilde eşit aralıklarla arttırılır. Her yük seviyesinde, yer değiştirme 0.25 mm/saat hızının altına düşünceye dek ya da en fazla 2 saat olana dek beklenmektedir. Tasarım yükünün 2 katında ise 0.25 mm/saat yer değiştirme koşulu sağlanıyorsa 12 saat sonra, sağlanmıyorsa 24 saat sonra yük yine %25'lik kademeler ile her yük seviyesinde birer saat beklenerek boşaltılmaktadır.

Tasarım yükünün 2 katına ulaşılamaadan göçme gözlenmesi durumunda, kazığın göçmenin olduğu yük seviyesinde kazık çapının %15'i kadar oturma yapması beklenmeli ve ardından yük boşaltılmaya başlanmalıdır.

Bu deney türünde deney süresinin çok uzun olması dezavantaj iken elde edilen verilerle yorum yapmanın kolaylığı ve yaygın kullanılan bir yöntem olması avantajlarındandır (Alku, 2006).

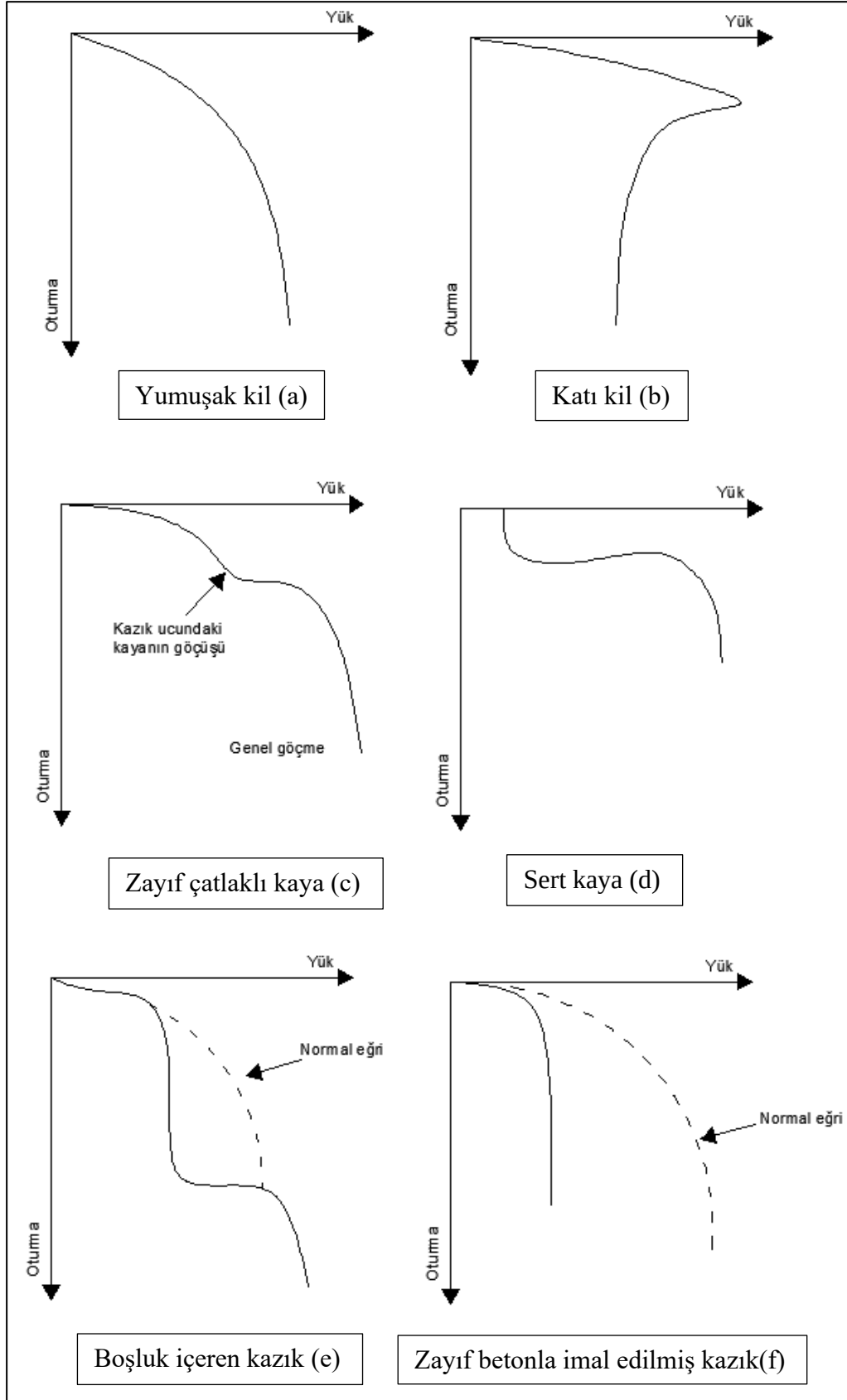
deney yükü ve diğer verilerin kaydına devam edilmektedir. Yük tamamen boşaltıldıktan sonra ve bir saat sonra son veriler de kayıt altına alınarak deney sonlandırılmaktadır. Bu deneyin süresi genelde bir saati aşmamaktadır. Sürtünme kazıklarının nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi için uygun bir yöntemdir. Buna karşın, uç kazıkları için sabit oturma hızını sağlayabilecek reaksiyon sisteminin büyük olması gerektiğinden uç kazıklarında uygulanması pratik değildir (Dalkılıç, 2020).

3.1.5 Osterberg hücresi

Osterberg hücresi, reaksiyon sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldıran, yüksek yüklere kadar uygulanabilen bir yükleme deneyi türüdür. Bu yöntemde kazık imalatı esnasında donatı kafesinin içerisine yerleştirilen bir kriko sistemi ile kazığın alt ucundan çift yönlü olarak yüklenmektedir. Yükleme sonucu kazığın ve Osterberg hücresinin hareketi ile aktifleşen çevre sürtünmesi ve uç direnci, kazık içerisine farklı derinliklerde yerleştirilmiş enstrümanlar ile ölçülmektedir. Çevre sürtünmesin ve uç direncinin maksimum değerine ulaşıldığında deney sonlandırılmaktadır. Deney sonunda çevre sürtünmesi ve uç direnci için iki ayrı yük - oturma grafiği elde edilmektedir. Deney tamamlandığında kullanılan Osterberg hücresi kazık içinden çıkarılamamaktadır. Buna rağmen çoğu zaman diğer yükleme deneyi yöntemlerinden daha uygun fiyata yapılabilmektedir (Dinç, 2010).

3.2 Kazık Yükleme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı zeminlerde ve yük çeşitlerinde uygulama yöntemi anlatılmış olan deneylerin sonucunda, her yük değerine karşılık gelen oturma değerlerinin grafiği elde edilmektedir. Bu grafikte, yük sabit kaldığı halde yer değiştirmenin artmaya başladığı noktadaki yük değeri maksimum kazık kapasitesini ifade etmektedir. Çoğu zaman kontrol kazıkları üzerinde yapılan deneylerde bu değere ulaşılamamaktadır. Bu gibi durumlarda deney belli bir yük ya da oturma değerine kadar devam etmektedir. Belli bir yük değerinin sınır olarak kabul edildiği deneylerde taşıma kapasitesi, deneyde uygulanan maksimum yüke eşit olmaktadır. Belli bir oturma değerinin sınır olarak kabul edildiği deneylerde ise kazık çapının %10'u kadar oturma gözlemlendiğinde deney sonlandırılır ve uygulanan maksimum deney yükü taşıma kapasitesine eşit olmaktadır.



Şekil 3.3 : Tipik yük – oturma eğrisi (Tomlinson, 2008).

Kazık yükleme deney sonuçlarından elde edilen yük – oturma grafiği elastik ya da plastik olabilmektedir. Yükleme- boşaltma ile yapılan deneylerde elde edilen yük- oturma eğrisinden elastik ve plastik oturmalar belirlenebilmektedir.

Yükleme boyunca zeminde ve kazıkta meydana gelen şekil değiştirmelerin deney sonucunda elde edilen yüke bağlı şekil değiştirme eğrilerine etkileri Şekil 3.3'te verilmiştir.

Bu şekilde,

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

3.2.1 Deney sonuçlarını değerlendirme yöntemleri

Kazık yükleme deney sonuçlarının yorumlanması konusunda birçok bilim insanı tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiş olduğundan, yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi ve en uygun yöntemin belirlenmesi gerekmektedir.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi için kullanılan yöntemler, matematik modele dayanan yöntemler, grafik yöntemler ve oturmayı sınırlayan yöntemler olarak üçe ayrılabilir.

3.2.1.1 Matematik modele dayalı yöntemler

Sık kullanılan matematik modele dayalı yöntemler Brinch - Hansen %80, Chin – Kondner, Van der Veen, Cambefort – Chadeison ve son olarak creep yöntemleridir. Bu yöntemlerde yük – oturma grafiğinin asimptotu matematiksel bağıntılar ile elde

edilmekte ve göçme yüküne ekstrapolasyon ile ulaşılmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemlerin yük – oturma eğrisinin asimptota doğru yöneldiği koşulda kullanılması uygundur. Asimptota yaklaşmayan eğriler gözlemlendiği durumlarda uygulandığında, gerçekte olduğundan daha yüksek göçme yükü elde edilmektedir.

Brinch Hansen %80 yöntemi

Bu yöntemde yükün %80'ine denk gelen oturmanın 4 katı kadar oturmaya neden olan yük göçme yükü olarak tanımlanmıştır. Her oturma değerinin karekökünün, etki etmekte olan yük değerine bölünmesiyle elde edilen değer ve oturma değeri eksenleri oluşturarak $\frac{\sqrt{\Delta}}{Q} - \Delta$ grafiği çizilmektedir. Grafiği oluşturan noktalar, belirli bir oturma değerinden sonra doğru oluşturmaya başlarlar. Bu doğrunun eğimi C_1 katsayısını, $\frac{\sqrt{\Delta}}{Q}$ eksenini ile kesiştiği nokta ise C_2 katsayısını vermektedir. Bu katsayılar yardımıyla kazığın taşıma kapasitesi 3.2 numaralı denklemden gibi, bu yüke karşılık gelen oturma miktarı ise denklem 3.3teki gibi elde edilebilir.

$$Q_{ult} = \frac{1}{2\sqrt{C_1 \times C_2}} \quad (3.1)$$

$$\Delta_{ult} = C_1/C_2 \quad (3.2)$$

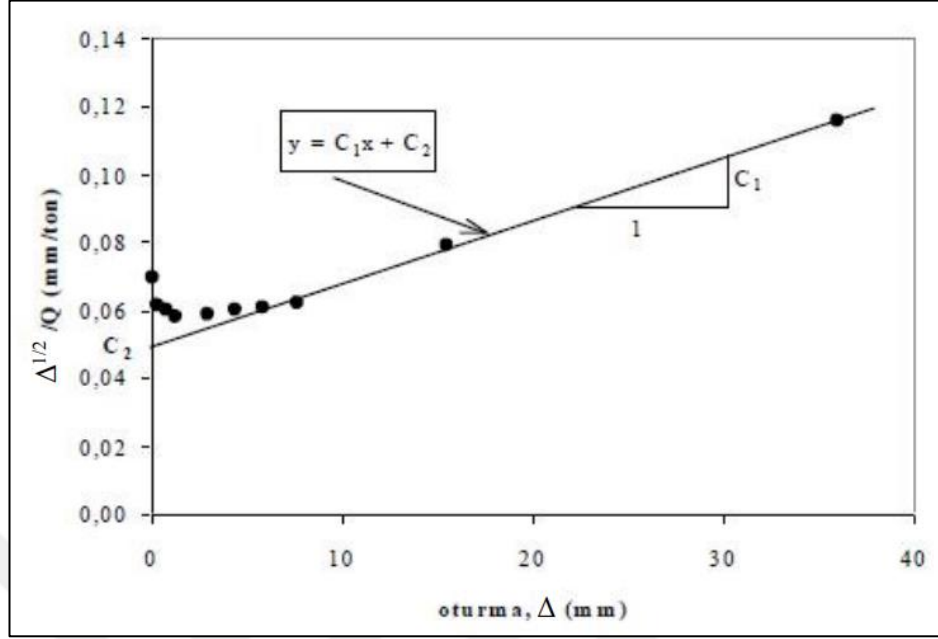
Grafiğin doğrusal olduğu bölüm için ideal yük-oturma eğrisi,

$$\sqrt{\frac{\Delta}{Q}} = C_1\Delta + C_2 \quad (3.3)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Bu ideal eğri taşıma kapasitesinin uygunluğunu kontrol etmeye yaramaktadır.

Elde edilen göçme yükünde ve bu göçme yükünün %80'inde, yük - oturma eğrisi ve ideal eğri yakınlık göstermelidir. Bu iki eğrinin yakınlık göstermediği durumlarda deneyde uygulanan maksimum yük, kazık taşıma kapasitesi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem, yük - oturma eğrisinin bir parabol eğrisi olduğu varsayımında bulunmaktadır. Ayrıca yavaş adımlı yükleme deneyleri ve hızlı adımlı yükleme

deneylerinde kullanılması uygunken çevrimli yükleme deneylerinde kullanılması uygun olmamaktadır. Brinch Hansen yönteminin uygulanması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Brinch Hansen %80 yöntemi (Kabaca, 2018).

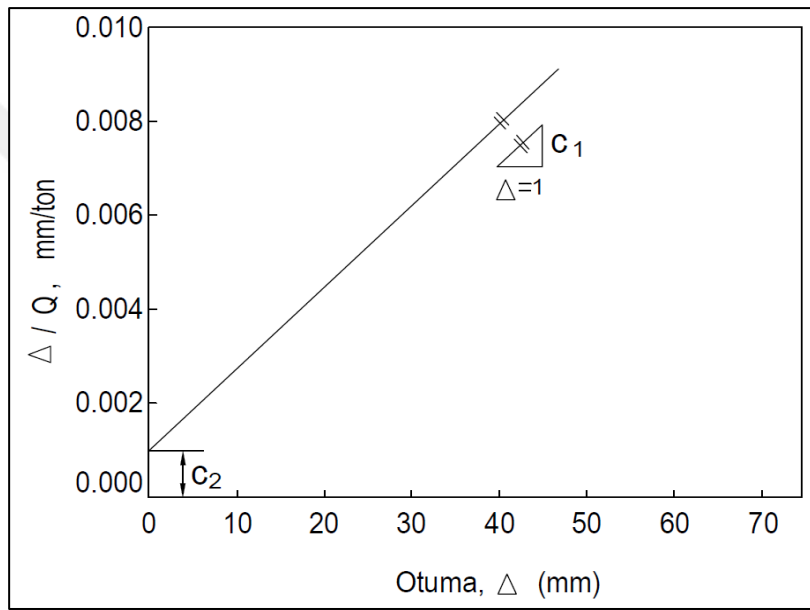
Chin - Kondner yöntemi

Chin - Kondner yöntemine göre her yük (Q) kademesinde meydana gelen oturma (Δ) miktarları, ilgili yüke bölünüp Δ/Q - Δ grafiği çizilmektedir. Grafikte bulunan noktalar, bir değerden sonra doğru davranışı göstermeye başlamaktadır. Bu doğrunun eğimi C_1 değerinin çarpma işlemine göre tersi taşıma kapasitesini vermektedir

$$Q_{ult} = 1/C_1 \quad (3.4)$$

Doğru üzerinde olmayan noktalar olması deneyde bazı hatalar olduğu anlamına gelmektedir. Yöntemin kullanılmasının sağladığı önemli avantajlardan biri de deney sırasında eş zamanlı olarak oluşturulan Chin - Kondner grafiğinin deney gidişatının kontrol edilmesi ve beklenmeyen bir durum ile karşılaşıldığında müdahale fırsatı vermesidir. Yöntemin diğer avantajı, deney tamamlanmadan da taşıma kapasitesinin hesaplanabilmesine olanak sağlamasıdır. Bilindiği üzere iki nokta bir doğru oluşturmakta ve üçüncü noktanın da bahsedilen doğru üzerinde olması doğrunun uygunluğunu kanıtlamaktadır. Deneyin başında elde edilen noktaların oluşturduğu doğru yanıltıcı olabildiğinden, oturma değerleri Davisson limitini geçtikten sonra elde

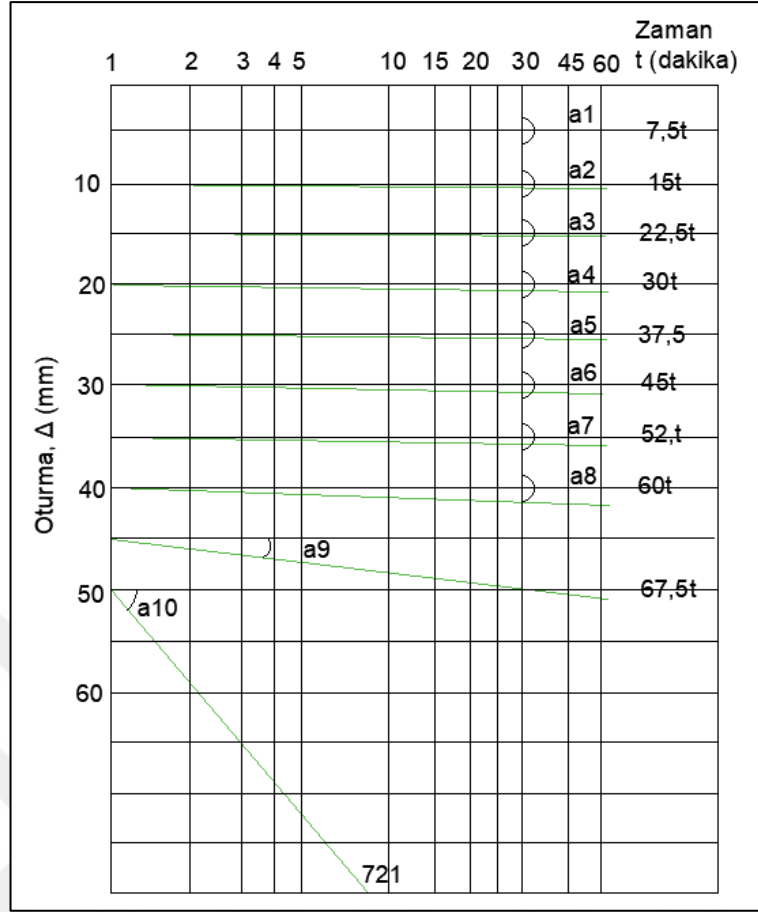
edilen noktaların oluşturduğu grafik yorumlama için dikkate alınmalıdır. Yöntemin doğru sonuçlar verebilmesi için her yük kademesinde geçen zamanın sabit olması gerekmektedir. Oturmaların elastik kısmı geçmediği, kazıkta plastik davranışın gözlenmediği deneylerde gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılamamaktadır. Yük kademelerinin az olduğu deneylerde de nokta sayısının yeterli olmaması nedeniyle doğru sonuçlar vermemektedir. Bu yöntem uygulandığında diğer yöntemlerin verdiği sonuçlardan göre çok daha fazla taşıma kapasitesi elde edildiği unutulmamalı, yalnızca bu yönetime bağlı kalınmamalı ve başka yöntemlerle de kapasite hesabı yapılmalıdır. Chin yönteminin uygulanması Şekil 3.5’te verilmiştir.



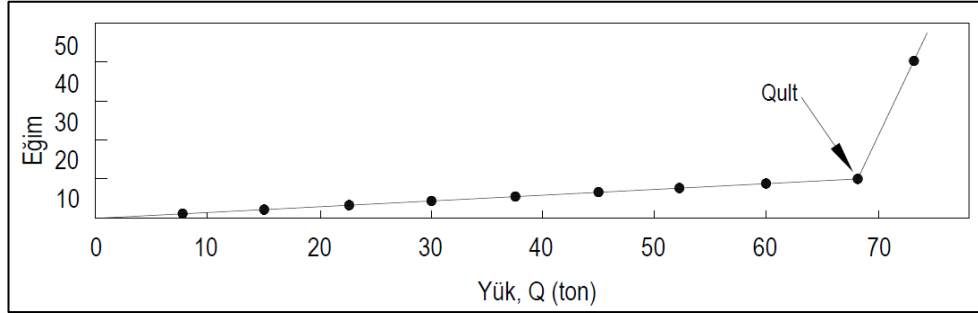
Şekil 3.5 : Chin-Kondner yöntemi.

Cambefort - Chadeisson yöntemi

Cambefort ve Chadeisson yönteminde, her yük artırım kademesi için, zaman eksenini logaritmik ölçek iken, oturma - zaman grafikleri çizilmektedir. Bu oturma - zaman grafiklerindeki eğrilerin eğimi hesaplanmaktadır. Hesaplanan eğimler zamana bağlı oturma artışını ifade etmektedir. Tüm yük kademeleri için hesaplanan eğimler ile bir eğim - yük grafiği oluşturulmaktadır. Bu eğim - yük grafiğinin ilk bölümü doğrusal iken, bir noktadan sonra doğrunun kırıldığı gözlenmektedir. Doğrunun kırıldığı bu noktaya karşılık gelen yük, kazık taşıma kapasitesini temsil etmektedir. Cambefort – Chadeisson yönteminin uygulamasını anlatan görseller Şekil 3.6 ve 3.7’de gösterildiği gibidir.



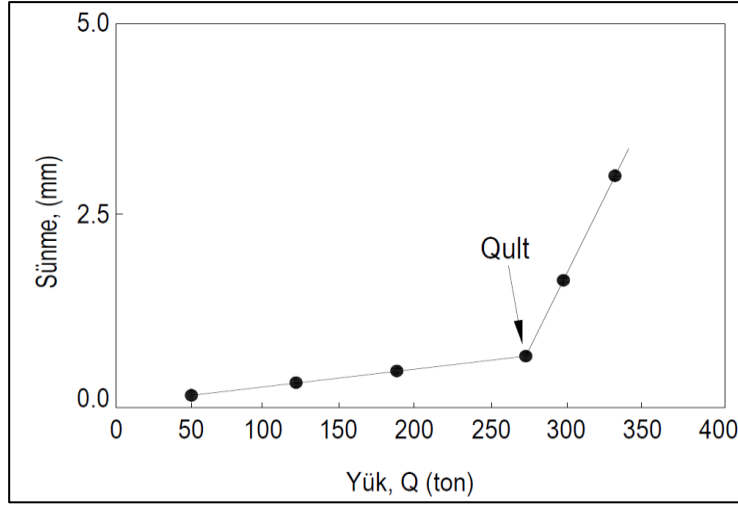
Şekil 3.6 : Cambefort - Chadeisson yöntemi sünme eğrileri.



Şekil 3.7 : Cambefort Chadeison yöntemi sünme diyagramı.

Housel (Creep) yöntemi

Housel (Creep) yöntemi, eşit zaman aralıkları ile uygulanan kazık yükleme deneyleri için geliştirilmiştir. Bu yöntemde her yük kademesinin sonundaki belirli sürelerde oluşan oturma miktarı - yük grafiği çizilip noktalar birleştirildiğinde iki doğru elde edilmektedir. Bu iki doğrunun kesişimine karşılık gelen, bir diğer değişle doğrunun kırılmaya başladığı yük değeri, kazık taşıma kapasitesini temsil etmektedir. Creep yönteminin uygulanması Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 : Housel yöntemi.

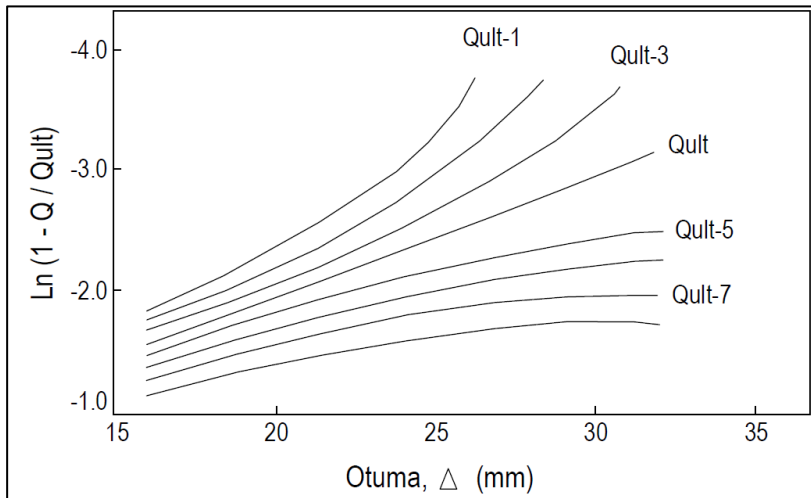
Van Der Veen yöntemi

Van Der Veen yöntemine göre kazık taşıma kapasitesi, yük kademeleri ve bu yüklere karşılık gelen oturma değerlerine bağlı olarak,

$$\ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right) = -w\Delta \quad (3.5)$$

denklemini ile elde edilmektedir. Burada; Q : yük, Q_{ult} : kazık taşıma kapasitesi, w : Yük-oturma denkleminde bağlı bir katsayı ve Δ : oturmayı ifade etmektedir.

3.5 denklemini kullanılarak hesaplanan farklı taşıma kapasitesi değerlerine karşılık gelen $\ln(1 - Q/Q_F)$ grafikleri çizilmektedir.

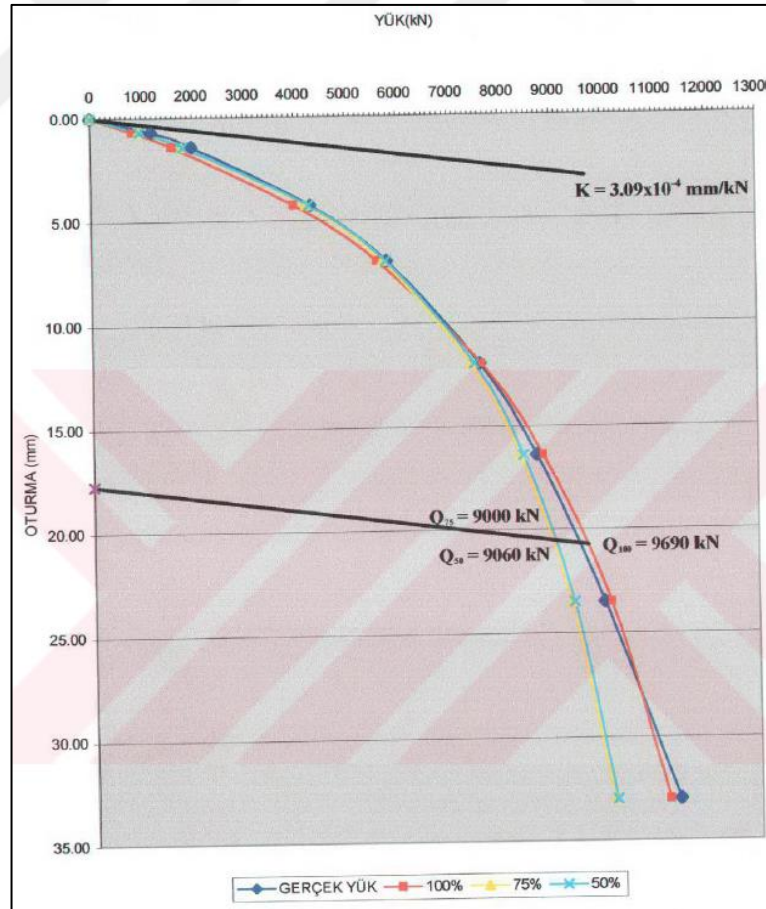


Şekil 3.9 : Van Der Veen yöntemi.

Deneme yanılma yöntemi ile grafiğin bir doğruya dönüşmesini sağlayan QF değeri elde edilmekte ve bu değer kazık taşıma kapasitesini ifade etmektedir. Yöntemin uygulandığı Şekil 3.9'daki gibidir.

Düzceer yöntemi

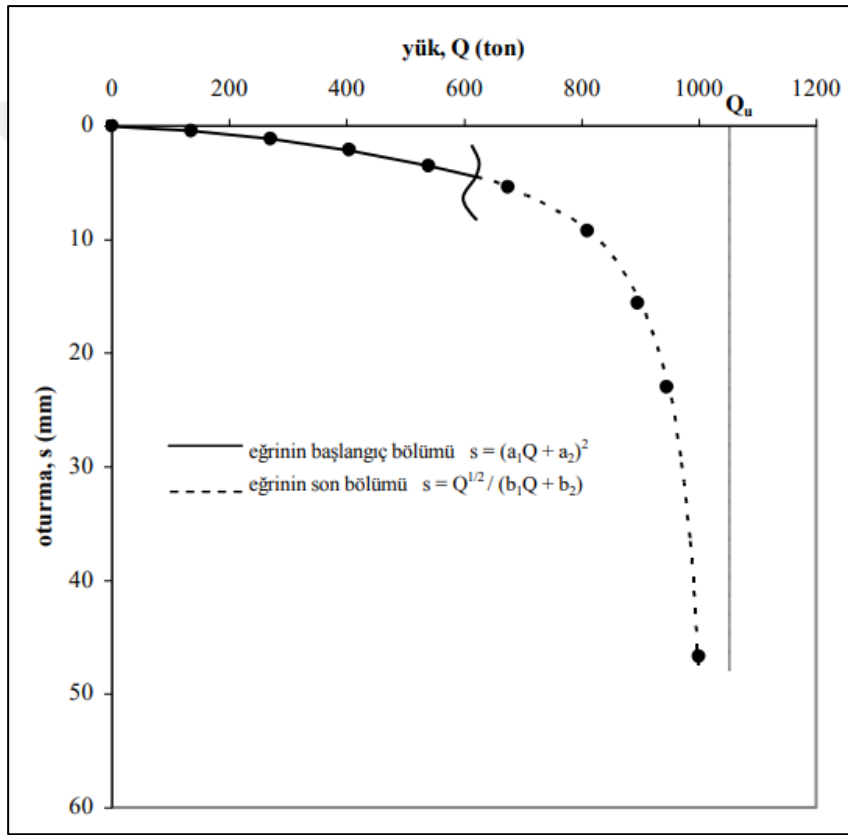
Bu yöntemin ilk adım Chin yöntemine benzer olarak $\frac{\Delta}{Q} - \Delta$ grafiğinin çizilmesidir. İkinci adım verilerin regresyon analizine tabi tutulmasıdır. Üçüncü adım, regresyon katsayısı 0.8'den büyük olan değerler ile bir doğru çizilmesi, dördüncü adım ise bu doğrunun denkleminin $\frac{\Delta}{Q} - a\Delta + b$ şeklinde ifade edilmesidir. Bu denklem, $\Delta = \frac{b}{\frac{1}{Q} - a}$ şeklinde de ifade edilebilmektedir. Elde edilen denklemde yük değerleri %100, %75 ve %50 yüklemeleri için yerine konarak oturmalar elde edilmektedir. Oturmalar karşılıklı bu yüzdelerle karşı gelen yük değerleri ile yük – oturma eğrileri elde edilmektedir. Son aşamaya ise Davisson kriterinin kullanılarak taşıma kapasitesinin belirlenmesidir. Yöntemin uygulandığı Şekil 3.10'daki gibidir.



Şekil 3.10 : Düzceer yöntemi uygulanması (Düzceer, 2002).

Özkan – Alku yöntemi

Bu yöntemin belirlenebilmesi için 40 farklı deney incelenmiş, yük – şekil değiştirme grafiğinin başlangıç ve bitiş doğruları için iki ayrı doğru denklemi belirlenmiştir. İlk denklem, oturmanın kareköküne karşı yük çizilmesi ile elde edilmekte, ikinci denklem ise yükün karekökünün oturmaya oranına karşı yük grafiğinin çizilmesi ile elde edilmektedir. Bitiş doğrusunun düşey eksenini kestiği değerin doğrunun eğimine bölünüp negatifinin alınması ile göçme yükü hesaplanmaktadır. Grafik üzerinde yorumlanırsa, bitiş eğrisinin asimptotu kazık taşıma kapasitesini vermektedir. Özkan Alku yönteminin uygulanışı Şekil 3.11’deki gibidir.



Şekil 3.11 : Özkan – Alku yöntemi (Alku, 2006).

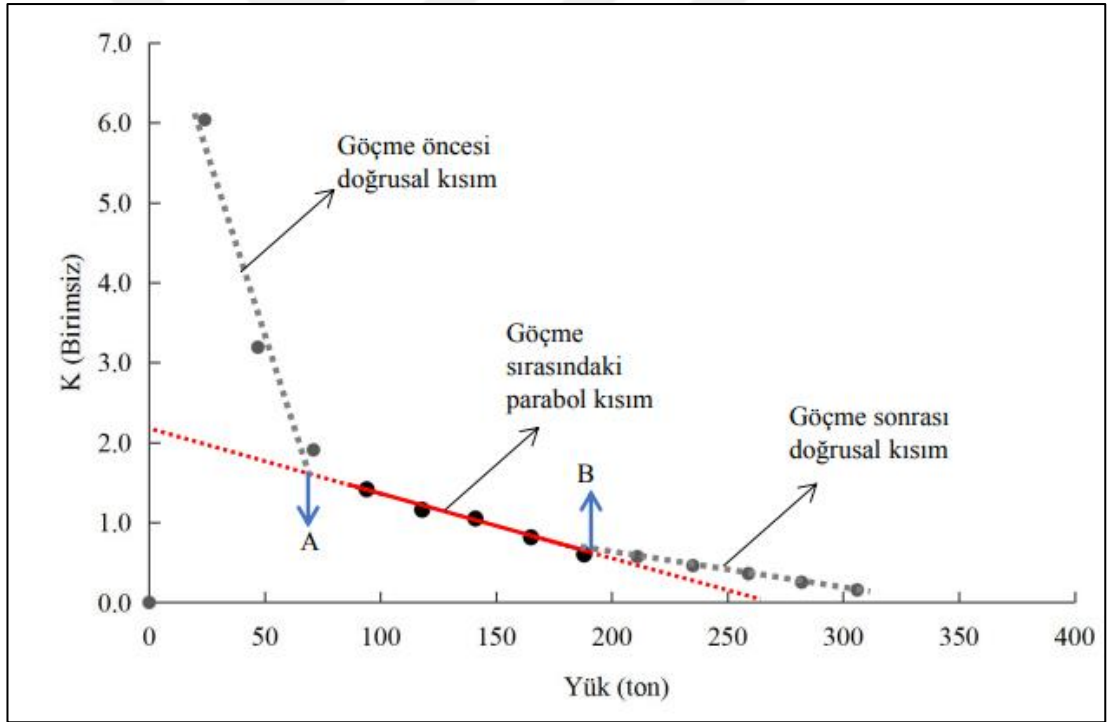
Yöntem sonucunda elde edilen ideal eğriyle deney sonucu elde edilen eğri çakışmadığı durumda, veriler gözden geçirilmelidir. Göçme davranışının net gözlenemediği verilerde bu durumla karşılaşılması olasıdır.

Özkan – Alku yönteminde, küçük oturma değerleri gözlenen, kazığın göçme davranışı göstermediği durumlarda yük – oturma eğrisinin tamamlanarak taşıma gücünün belirlenmesi amaçlanmıştır.

Kabaca yöntemi

Kabaca, 2018 yılında taşıma kapasitesinin belirlenmesi için yeni bir matematiksel yöntem önerilmiştir. Yöntemin uygulanışı aşağıdaki adımlarda belirtilmiştir ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

- Her yük – oturma noktası için logaritma yük tabanında oturma ($\log_{Q_i}^{\Delta_i}$) belirlenir
- Belirlenen logaritmik değerlerin ortalaması alınır.
- Her yük kademesi için $K = \frac{\sum_{i=1}^n \log_{Q_i}^{\Delta_i}}{n}$ hesaplanıp K – Q grafiği çizilir.
- Oluşan grafikte, göçme grafiğindeki parabol bölümü oluşturan noktaların dağılımı bir doğru üzerinde birleştirilip doğrunun x eksenine ile kesiştiği nokta nihai taşıma gücü olarak belirlenir.



Şekil 3.12 : Kabaca yöntemi uygulanışı (Kabaca, 2018).

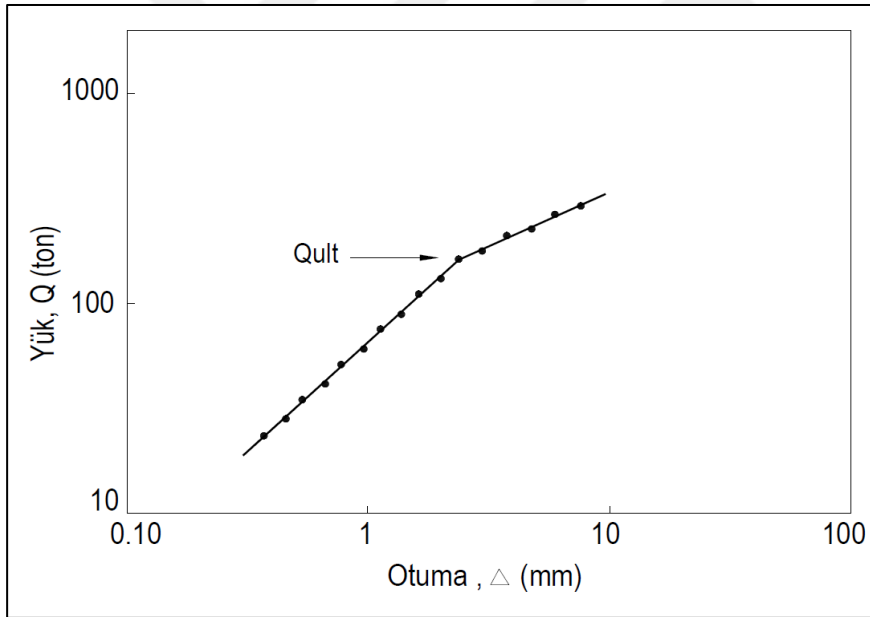
Yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırılması sonucu Decourt yönteminin 1.59 katı, Chin Kondner yönteminin 1.57 katı, Özkan Alku yönteminin ise 1.17 katı nihai taşıma kapasitesi verdiğiinden söz edilmiştir. (Kabaca, 2018)

3.2.1.2 Grafik yöntemler

Göçme yükünün elde edilmesinde yaygın kullanılan grafiğe dayalı yöntemler De Beer, Teğet, Mazurkiewicz, Brinch Hansen %90, Butler & Hoy, Fuller & Hoy, Corps of Engineers ve Decourt yöntemleridir. Bu yöntemlerle yapılan değerlendirmelerin dezavantajı, grafiği inceleyen kişinin öznel yorumundan etkilenmesi ve kazık çapı, kazık boyu faktörlerinin dikkate alınmamasıdır.

De Beer yöntemi

De Beer yönteminde deney sonucu elde edilen yük - oturma grafiği, her iki eksen de logaritmik ölçek olacak şekilde çizilmektedir. Çizilen bu grafikteki noktalardan eğimleri farklı iki doğru elde edilmektedir. Bu iki doğrunun kesiştiği noktadaki yük değeri, kazığın taşıma kapasitesidir. Bu yöntemin yavaş adımlı yükleme deneylerinde kullanılması önerilmektedir. Yöntemin uygulanmasına dair görsel Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13 : De Beer yöntemi.

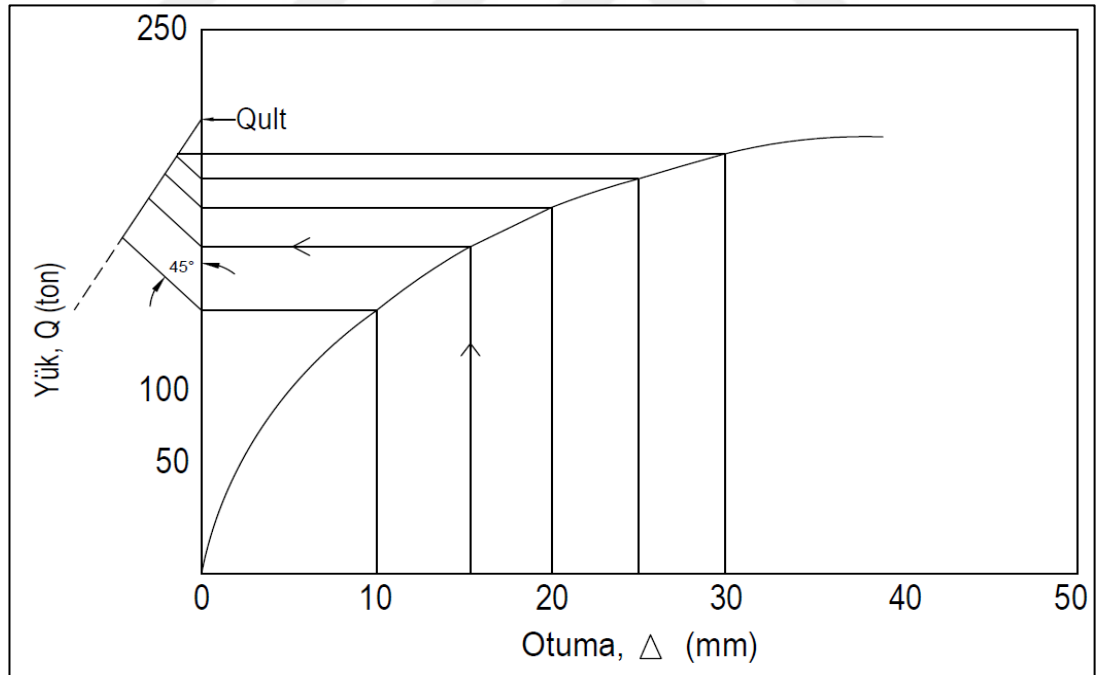
Teğet (Mansur - Kaufman) yöntemi

Teğet (Mansur- Kaufman) yönteminde, yük - oturma eğrisinin elastik kısmı ve plastik oturmaların belirginleştiği kısımdan birer teğet çizilip bu teğetlerin kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeri kazık taşıma kapasitesi olarak belirlenmektedir. Bu yöntem, yük - oturma eğrisinin asimptota yaklaştığı durumlarda iyi sonuçlar vermektedir.

Plastik oturmaların belirgin olmadığı durumlarda ise beklenenden daha düşük taşıma kapasiteleri vermektedir. Yöntemin basitliği bir avantaj olmasına karşın, yük - oturma eğrisinin asimptota yaklaşmadığı durumlarda, eğrinin tam olarak oluşmamış plastik kısmına çizilecek teğetin kişisel yoruma açık olması önemli bir dezavantajdır.

Mazurkiewicz yöntemi

Mazurkiewicz yönteminde yük - oturma eğrisinin parabolik olduğu kabul edilmektedir. Bu yöntemde ilk olarak yük - oturma grafiğinin oturma eksenini eşit aralıklarla işaretlenmekte ve bu oturma değerlerinden, yük - oturma eğrisini kesecek şekilde dik doğrular çizilmektedir. İkinci olarak, doğruların eğriyi kestiği noktaya karşılık gelen yük değerlerine yeni doğrular çizilmektedir. Ardından, bu yük değerlerinden 45 derecelik açılar ile çizilen doğruların, bir sonraki doğruyu kestiği noktalar işaretlenmektedir. İşaretlenen noktalar birleştirildiğinde bir doğru oluşmaktadır ve bu doğrunun yük eksenini kestiği değer, taşıma kapasitesini temsil etmektedir. Mazurkiewicz yönteminin uygulanması işlemi Şekil 3.14'te gösterildiği gibidir.



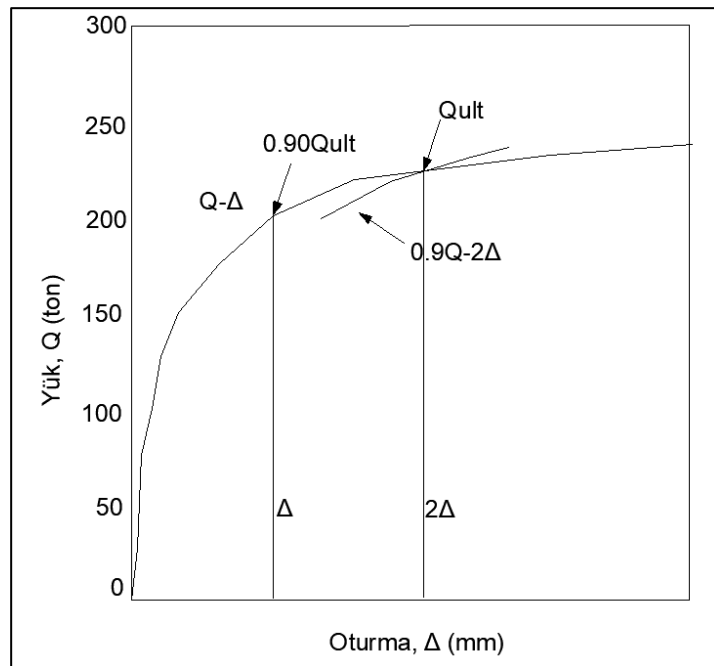
Şekil 3.14 : Mazurkiewicz yöntemi.

Butler - Hoy yöntemi

Butler ve Hoy yöntemine göre ilk adım yük - oturma eğrisinin elastik kısmına bir teğet çizilmesidir. İkinci adım ise eğrinin asimptota yaklaştığı bölüme 1.3 mm / ton eğim ile bir teğet çizilmektedir. Çizilen iki teğetin kesişim noktası kazık taşıma kapasitesi değerini vermektedir.

Brinch Hansen %90 yöntemi

Brinch Hansen %90 yöntemine göre taşıma kapasitesinde oluşan oturma miktarı, taşıma kapasitesinin %90'ında meydana gelen oturmanın iki katıdır. Bu yöntem yük - oturma grafiğinin hiperbolik olduğu kabulüne dayanmaktadır. İlk adım her yük kademesi için $0.90Q$ ve ilgili $0.90Q$ değerlerinde meydana gelen oturmaların bulunmasıdır. Sonraki adımda ise $Q - 2\Delta(0.90Q)$ eğrisi ile $Q - \Delta$ eğrisi üst üste çizdirilerek eğrilerin kesiştiği nokta belirlenmekte ve bu noktanın kazık taşıma kapasitesi olduğu kabul edilmektedir. Bu yöntemin sabit penetrasyonlu yükleme deneylerinde kullanılması uygundur. Yöntemin gerçeğe yakın sonuçlar vermesi için yük - oturma eğrisindeki plastik bölümün net bir şekilde gözlenebilmesi gerekmektedir. Plastik kısmın gözlenemediği durumlarda eğriler kesişmemekte ve maksimum deney yükü, kazık taşıma kapasitesi olarak belirlenmektedir. Brinch Hansen yönteminin uygulanması Şekil 3.15'te verilmiştir.

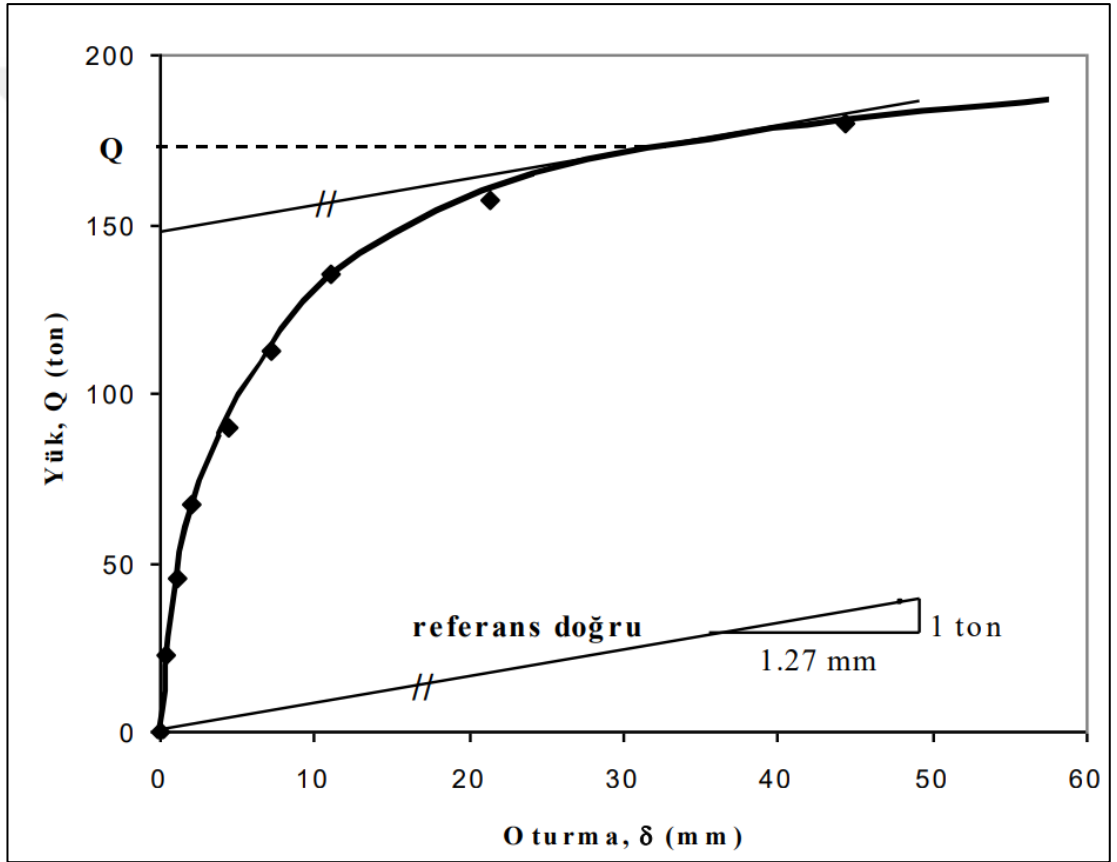


Şekil 3.15 : Brinch - Hansen %90 yöntemi.

Fuller - Hoy yöntemi

Fuller ve Hoy yöntemi, Butler - Hoy yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde göre, yük-oturma eğrisinin asimptota yaklaştığı kısmında eğimin 1.3 mm/ton olduğu noktaya karşılık gelen yük, kazığın taşıma kapasitesini temsil etmektedir.

Derinliği fazla olan kazıkların yük - oturma grafiklerindeki elastik bölge, kısa kazıklardan daha uzun olmaktadır. Bu yöntemde kazık boyu dikkate alınmadığından, uzun kazıklar için beklenenden daha düşük taşıma kapasiteleri elde edilebilmektedir. Fuller Hoy yöntemi, hızlı adımlı (QM) yükleme deneyleri için kullanıma uygundur. Yönteminin uygulanması Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 : Fuller – Hoy yöntemi (Alku, 2006).

Decourt Yöntemi

Decourt yöntemi, Brinch-Hansen %80 ve Chin - Kondner yöntemleri ile benzerlik göstermektedir. Öncelikle her yük kademesindeki Q değeri, karşılık gelen oturmaya (Δ) bölünerek Q/Δ - Q grafiği çizilmektedir. Grafiği oluşturan noktalar, belirli bir kısımdan sonra noktalar doğrusal bir davranış göstermektedir. Bu doğrunun eğimi olan C_1 değerinin, Q/Δ eksenini kestiği değer C_2 olmaktadır ve kazığın taşıma kapasitesi,

$$Q_{ult} = C_2/C_1 \quad (3.6)$$

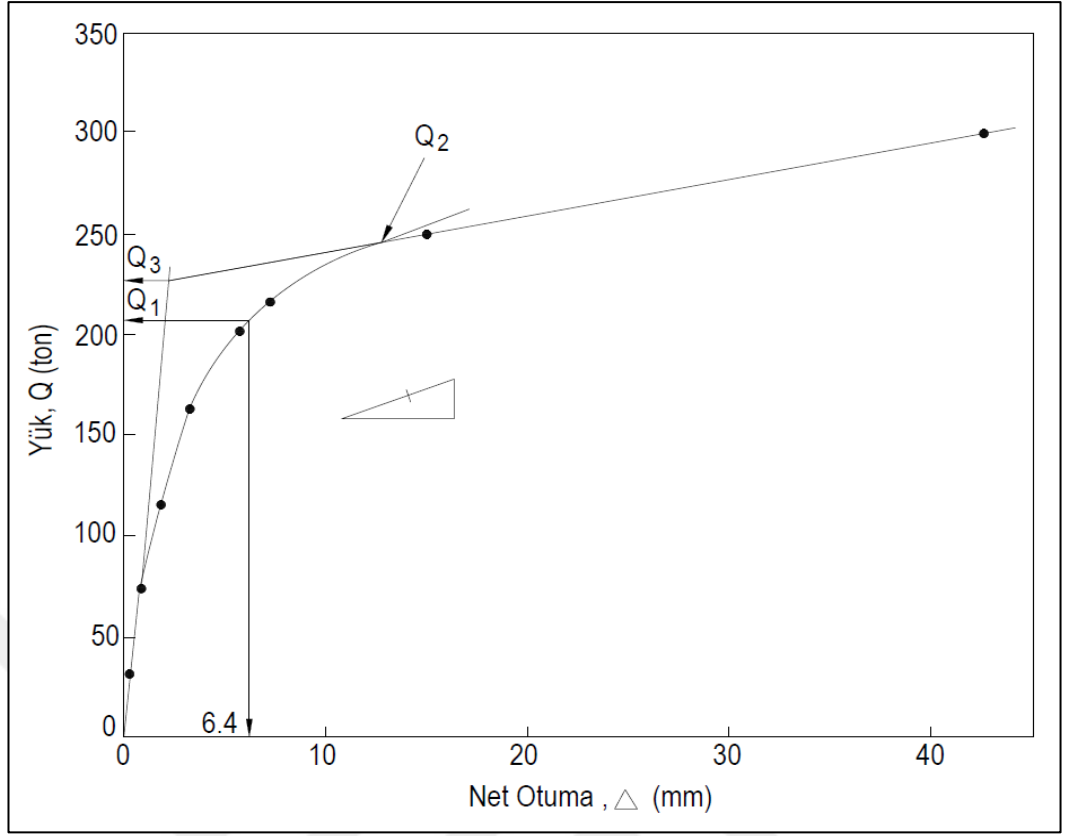
denklemleri ile elde edilmektedir. Bu yöntemle hesaplanan kazık taşıma kapasitesinin Chin - Kondner yöntemi ile elde edilen kapasiteye yakın olması beklenmektedir. Decourt yöntemi eğrinin parabolüğünden yararlanmadığından, göçme davranışını gözlenmeyen yük – oturma grafiklerinin yorumlanmasında da kullanılabilir.

Corps of Engineers yöntemi

Corps of Engineers yöntemine göre, yük - oturma grafiği üzerinde üç farklı yük hesaplanmaktadır. İlk yük; 6.4 mm oturmaya karşılık gelen yük (Q_1), ikinci yük; Mansur – Kaufman yöntemi ile elde edilen noktaya karşılık gelen yük (Q_2), üçüncü yük; yük-oturma eğrisinin asimptota yaklaştığı kısmının, eğimi 0.28 mm/ton olan doğruya teğet olduğu noktaya karşılık gelen yük (Q_3) ve bahsedilen üç yükün ortalaması taşıma kapasitesini ifade etmektedir. Denklem 3.7’de bu bağıntı verilmiştir.

$$Q_{ult} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} \quad (3.7)$$

Elde edilen üç farklı yükten biri, diğer iki yükten önemli derecede farklıysa ortalamaya katılmayabilir. Bu durumda diğer iki yükün ortalaması kazık taşıma kapasitesini vermektedir. Şekil 3.17’de Corps of Engineers yönteminin kullanılması gösterilmiştir.



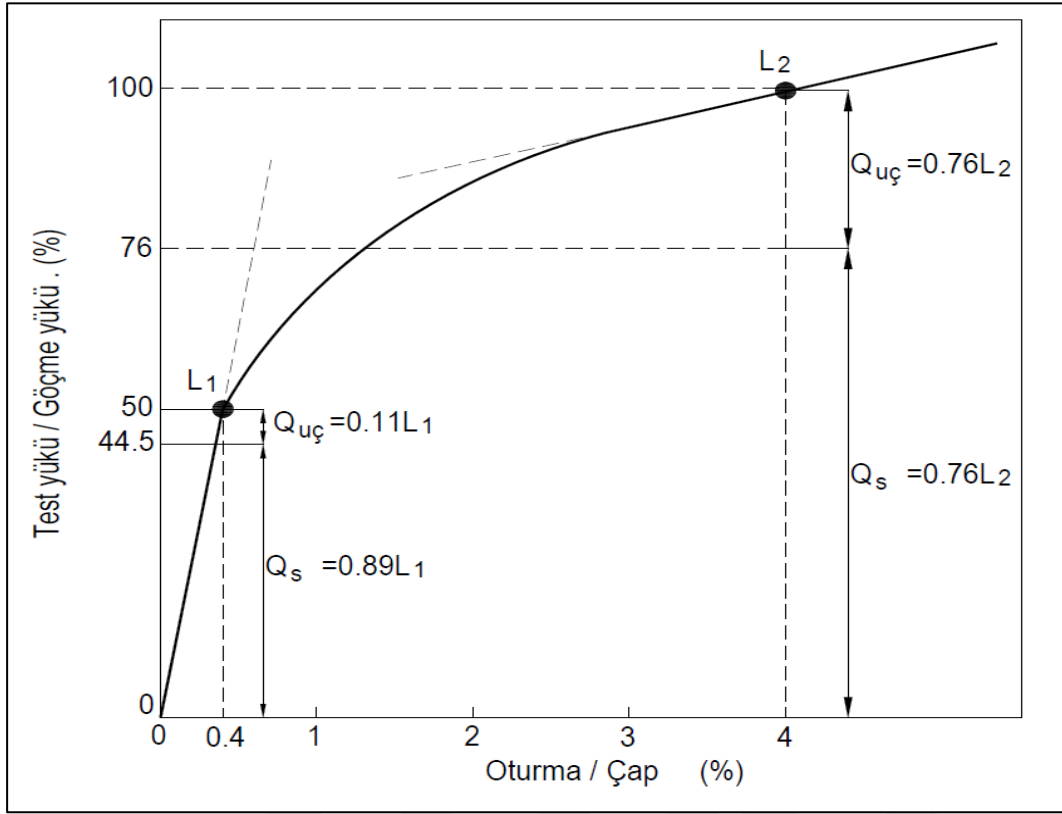
Şekil 3.17 : Corps of Engineers yöntemi.

3.2.1.3 Oturmayı sınırlandıran yöntemler

Bu yöntemler grafik yöntemlerin aksine öznel yorumdan dolayı ve çizim ölçeğinden dolayı yapılabilecek hatalara kapalıdır. Buna rağmen bu yöntemlerde de kazık çapı ve uç direncinin kazığın bir miktar hareketinden sonra aktifleşeceğini dikkate alınmamaktadır.

Hirany - Kulhawy yöntemi

Hirany ve Kulhawy yönteminde, kazık çapının %4'ü oranındaki oturma değerine karşılık gelen yük, kazık taşıma kapasitesine eşit olmaktadır. Bu yöntem; birçok kazık yükleme testi sonucu elde edilen veriler yardımıyla geliştirilmiş olsa dahi, büyük çaplı uç kazıklarında kazık çapının %4'ü kadar oturma çoğu zaman meydana gelmemektedir. Ayrıca farklı çaptaki test kazıkları üzerinde uygulanan yükleme deneyi sonucunda elde edilen yük - oturma eğrileri birebir aynı olması durumunda dahi, büyük çaplı kazığın taşıma kapasitesinin daha fazla hesaplanması da bir başka dezavantajdır. Şekil 3.19'da Hirany- Kulhawy yönteminin uygulanışı verilmiştir.



Şekil 3.18 : Hirany – Kulhawy yöntemi.

Davisson yöntemi

Davisson yöntemine göre, yük - oturma grafiği üzerinde kazığın elastik boy kısalmasını temsil eden bir doğru çizilip, çizilen doğru kazık çapına bağlı bir X değeri kadar ötelenmekte ve Davisson limit doğrusu elde edilmektedir. Bu doğrunun yük - oturma eğrisini kestiği noktadaki yük, kazık taşıma kapasitesini ifade etmektedir. Kazığın elastik boy kısalması ve X, öteleme miktarı aşağıdaki denklemler yardımıyla elde edilmektedir. Denklem 3.8 ve 3.9, Davisson yönteminde kullanılan denklemlerdir.

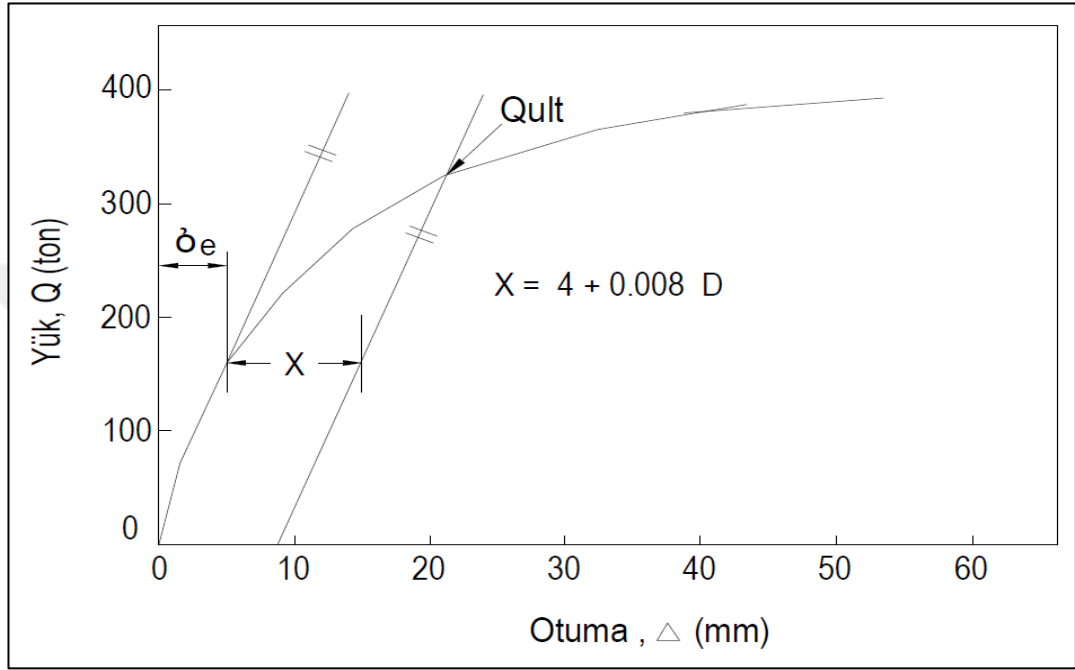
$$\Delta_e = \frac{QL}{EA} \quad (3.8)$$

$$X = 3.81 + \left(\frac{D}{120}\right) \quad (3.9)$$

Δ_e = Kazığın elastik boy kısalması, Q = Yük, L = Kazık boyu, E = Elastisite modülü

A = En kesit alanı, D = Kazık çapı, X = Öteleme miktarı

Davisson yöntemi çakma kazıklar için geliştirilmiş bir yöntem olup diğer yöntemlere kıyasla fore kazıklarda daha düşük taşıma kapasitesi vermektedir. Hızlı adımlı yükleme deneylerinde daha doğru sonuç verdiği varsayılmaktadır. Bu yöntemde, kazığın fiziksel özelliklerini dikkate alarak Davisson sınır doğrusunun deney başlamadan çizilebilmesi ve deney sırasında bu doğru ile kıyaslayarak yorum yapabilme olanağı sunması yöntemin sağladığı önemli bir avantajdır.



Şekil 3.19 : Davisson yöntemi.

3.2.2 Güvenlik sayısı

Kazık yükleme testinden elde edilen verilerin yorumlanmasında kullanılan yöntemle göre belirlenecek güvenlik katsayıları değişmektedir. Örnek olarak; genelde daha yüksek taşıma kapasitelerine ulaşılan Chin - Kondner yönteminde daha yüksek güvenlik katsayısı, daha düşük taşıma kapasitelerine ulaşılan De Beer yönteminde ise daha düşük güvenlik katsayısı kullanılmaktadır. Buna göre, kazığın emniyetli taşıma kapasitesi belirlenmesi sırasında tek yöntemle bağlı kalınmamalı, elde edilen sonuçların kıyaslanmalıdır.

Oturmayı sınırlandıran yöntemler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Oturmayı sınırlandıran yöntemler (Düzceer, 2002).

Sıra	Oturma	Açıklama	Ülke - Şartname veya Kurum
Toplam Oturmayı Sınırlandıran Yöntemler			
1	25.4 mm (1")		Hollanda
2	D/10		Indian Standart IS-2911 ISSMFE BS-8004
3	Elastik Oturma + (4.0+0.008D)	(D<610 mm)	Kanada, ABD
4	Elastik Oturma + (D/30)	(D>610 mm)	FHWA
5	Elastik Oturma + 20 mm		TCK Otoyollar Teknik Şartnamesi
6	12 mm (1/2")		Indian Standart IS-2911
7	50 mm		Australian Standart AS-2159
8	38 mm (3/2")	Test yükünde	National Building Code of Canada
9	19 mm (3/4")	Proje yükünde	National Building Code of Canada
10	20 mm	Fore kazık	DIN 1054, TS 3167
11	D/12,5	Ucu genişletiliş kazık	Indian Standart, IS 2911
12	Elastik Oturma + 20 mm + D/20		Norway Pile Committee
13	D/5	Fore kazık	İsveç
14	D/10	Çakma kazık	İsveç
15	25 mm		İsveç
16	D/25	Fore kazık	ABD
17	15 mm	Test yükünde	Geotechnical Control Office Hong-Kong
Plastik Oturmayı Sınırlandıran Yöntemler			
18	6.35 mm (1/4")		AASHTO, NY. State, Department of Public Works, Louisiana Depart. Of Highways
19	12.7 mm (1/2")		Boston Building Code
20	10 mm		TCK Otoyollar Teknik Şartnamesi
21	19 mm (3/4")		National Building Code of Canada
22	D/40	Çakma kazıklar	DIN 1054, TS 3167
Plastik/ Elastik Oturma Oranını Sınırlandıran Yöntemler			
23	$\delta_p/\delta_e = 1.5$		Christiani and Nielson
Toplam Oturma / Birim Yük Oranını Sınırlandıran Yöntemler			
24	Toplam: 0.01 in/ton (0.28 mm/ton)		Uniform Building Code, Department Public Works State of California, Chicago Building Code
25	Artışlı: 0.03 in/ton (0.84 mm/ton)		Bureau of Bridges, State of Ohio
26	Artışlı: 0.05 in/ton (1.4 mm/ton)		Raymond International
Plastik Oturma / Birim Yük Oranını Sınırlandıran Yöntemler			
27	0.01 in/ton (0.28 mm/ton)		N.Y. State
28	0.4 (0.84 mm/ton)		Raymond International

4. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu (SEM), yapısal analizde yaygın kullanılan ve gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yöntemde yapısal analizi yapılmak istenen bir ortam sonlu sayıda küçük elemanlara (mesh) ayrılır. Ardından birbirlerini etkileyen her bir eleman ikilisi için etkileşim denklemleri ifade edilir. Oluşturulan denklemler ortak bir sonlu elemanlar matrisinde çözülür. Yapılan bu işlem sonucunda her bir elemanın üzerinde oluşan fiziksel büyüklükler (şekil değiştirme, gerilme vs.) belirlenmiş olur. Sonlu elemanlar yöntemi, iksa sistemi, şev stabilitesi analizi, temel sistemlerinin tasarımı, oturma tahmini gibi birçok geoteknik problemin çözülmesinde kullanılmaktadır.

Doğru sonuçlar elde etmek için elemanlara ayırma işlemi problem geometrisine uygun olarak yapılmalıdır. Örneğin incelenmesi istenen yapı etrafında daha sık küçük elemanlar atanabilir. Tek boyutlu elemanlar bir doğru şeklinde, iki boyutlu elemanlar üçgen veya dörtgen şeklinde, üç boyutlu elemanlar ise dört veya altı yüzlü elemanlar olarak tasarlanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan gerilme – şekil değiştirme problemlerinin sonlu elemanlarla çözümünde, birincil bilinmeyenler genellikle ortamda yer alan her düğüm noktasının yer değiştirmesi olarak kabul edilmektedir.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerin sonucunda gerilme, yanal ve düşey yer değiştirme, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı vb. belirlenebilmektedir. Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme davranışı lineer olmadığından analizlerde zeminin modellenmesi gerekmektedir (Yankı, O., 2015).

4.1 Plaxis Yazılımı

Plaxis, farklı geoteknik problemler için, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak problemi modellemeye ve çözüme ulaştırmaya yarayan bir bilgisayar yazılımıdır. İlk olarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından 1987 yılında yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Plaxis, geoteknik tasarımda gereksinim duyulan, gerilme –

şekil değiştirme, zemin – yapı etkileşimi, akım ağı, taşıma gücü, konsolidasyon oturması, zemin dinamiği problemlerinde kullanılabilmektedir.

Zeminlerin lineer olmayan, zamana bağlı ve anizotropik davranışının modellenebilmesi için gelişmiş modeller gerekmektedir. Zeminin çok fazlı yapısına ek olarak, zeminin içerisindeki hidrostatik ve hidrostatik olmayan boşluk suyu basıncı ilişkisinin belirlenmesi için özel prosedürler gerekmektedir.

Analizi yapılacak her problemin, saha koşullarına uygun olarak modelinin oluşturulması önemlidir. Model sınırları, analiz edilen yapının elde edilecek sonuçları üzerinde etkisi olmayacak şekilde yeterince büyük seçilmelidir. Model içerisinde sınırları, tabakları, yükleri, destek elemanlarını, geoteknik yapıları modellemek için noktalar ve çizgi elemanlar kullanılmaktadır.

Zemin davranışının modellenmesinde birbiriyle düğüm noktaları (node) ile bağlantılı iki boyutlu üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Her bir elemandaki yer değiştirmeler direkt olarak düğüm noktalarındaki şekil değiştirmelerle, bu şekil değiştirmeler ise düğüm noktalarında meydana gelen gerilmelerle ilişkilidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile her bir düğüm noktasındaki şekil değiştirme ve gerilmeler çözülerek yapı elemanlarının fiziksel büyüklükler altındaki davranışı modellenmektedir. Yapı – zemin etkileşiminin modellenebilmesi için ise ara yüzeyler (interface) kullanılmaktadır.

4.1.1 Zemin ve yapı elemanlarının modellenmesi

Yapı ve zemin tipine göre uygun modeli kullanmak, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Zemin modellemek için kullanılan, Plaxis programında mevcut modeller; lineer elastik, Mohr Coulomb, eklemlili kaya (jointed rock), pekleşen zemin (hardening soil), pekleşen zemin- küçük gerilme – şekil değiştirme (HS small stress strain), Hoek-Brown, NGI-ADP ve yumuşak zemin akma (soft soil creep) modelleridir. Plaxis 2D programının 2015 versiyonu ile yayınlanan manuelinin malzeme modelleri kısmında zemin modellerinin gerçek zemin tiplerine uygunluğu önerilmiştir. Çizelge 4.1’de modelin zemin türüne uygunluk derecesi harflerle ifade edilmiştir. Bu ifade türünde A, modelin zemin türüne en uygun olduğu, B ikinci en uygun, C uygun olmayan derecedir. İmalat türlerine göre seçilmesi gereken en uygun modelle ilgili bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Zemin türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).

Model	Beton	Kaya	Çakıl	Kum	Silt	A.K. Kil	N.K. Kil	Balçık
Lineer elastik	C	C						
Mohr-Coulomb	A	B	C	C	C	C	C	C
Pekleşen Zemin			B	B	B	B	B	
PZ Küçük şekil değ.			A	A	A	A	A	
Yum. Zem. Akma							A*	A*
Yumuşak zemin							A*	A*
Eklemlı Kaya		A**						
Modifiye Cam-Clay							C	C
NGI-ADP							A*	A*
Hoek-Brown		A**						

A*, yumuşak zemin modelinin zamana bağlı analizlerde, NGI – ADP ise kısa dönem analizlerde uygun olduğunu tanımlamaktadır. A** olarak tanımlanan eklemlı kaya modeli, tabakalanma ve anizotropinin mevcut olduğu durumda en uygun seçim olup, Hoek Brown modeli ise genel olarak tüm kaya modeli için en iyi çözümdür.

Çizelge 4.2 : İmalat türlerine uygun zemin modelleri (Plaxis, 2015).

Model	Temel	Kazı	Tünel	Dolgu	Şev	Baraj	Kıyı- dan uzak	Diğer
Lineer elastik			C					
Mohr-Coulomb	C	C	C	C	C	C	C	C
Pekleşen Zemin	B	B	B	B	B	B	B	B
Pekleşen Z. Küçük	A	A	A	A	A	A	A	A
Yum. Zemin Akma	B	B	B	A	A	B	B	B
Yumuşak Zemin	B	B	B	A	A	B	B	B
Eklemlı Kaya	B	B	B	B	B	B	B	B
ModifiyeCam Kili	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

4.1.1.1 Lineer elastik model

Linear elastik modelde, Hooke yasasının izotropik lineer elastik davranışı programlanmıştır. Genellikle zemin içinde inşa edilen rijit yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır.

4.1.1.2 Mohr – Coulomb modeli

Mohr – Coulomb modeline göre zemin önce malzeme özelliklerine bağlı olan belli bir noktaya kadar sabit elastisite modülü ile lineer elastik davranış göstermekte, ardından yük sabit kalmasına rağmen şekil değiştirmelerin devam ettiği mükemmel plastik davranış göstermektedir. Bu modelde rijitlik modülünün sabit olması ve zeminin göçtüktan sonra sonsuz yer değiştirmesi şeklinde iki kabul yapılmaktadır.

4.1.1.3 Yumuşak zemin modeli

Bu modelin uygun olduğu zeminler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu tür zeminlerin ortak özelliği yüksek oranda sıkışabilir olmasıdır. Killi, yumuşak zeminler son derece sıkışabilir olduğundan, zemin modelinin oluşturulmasında zeminin sıkışma ve şişme özelliği göz önünde bulundurulmaktadır.

4.1.1.4 Yumuşak zemin akma modeli (soft soil creep)

Pekleşen zemin modeli ve yumuşak zemin modeli, sıkışabilen yumuşak zeminler için kullanıma uygun olmasına karşın, iki modelde de zeminin ikincil sıkışma özelliği dikkate alınmamaktadır. Özellikle mevcut zeminlerin üzerine yapılan dolgularda büyük miktarda oturmalar ve bu oturmalara bağlı olarak yumuşak zemin tabakalarında akmalar (creep) gözlenmektedir. Soft soil creep model, zemin davranışında gerilmeye bağlı rijitliği (logaritmik sıkışma özelliğini), ilk yükleme, boşaltma ile geri yükleme durumundaki ayrımı, zamana bağlı sıkışmayı, ön konsolidasyon gerilmesine bağlı yaşlanmayı ve Mohr Coulomb göçme kriterini dikkate almakta, ayrıca soft soil modelden farklı olarak Modifiye akma indisini içermektedir.

4.1.1.5 Modifiye cam kili modeli

Bu model normal konsolide killer için kullanılma uygundur. İzotropik, elasto-plastik şekil değiştirme ve pekleşme davranışını temsil etmektedir.

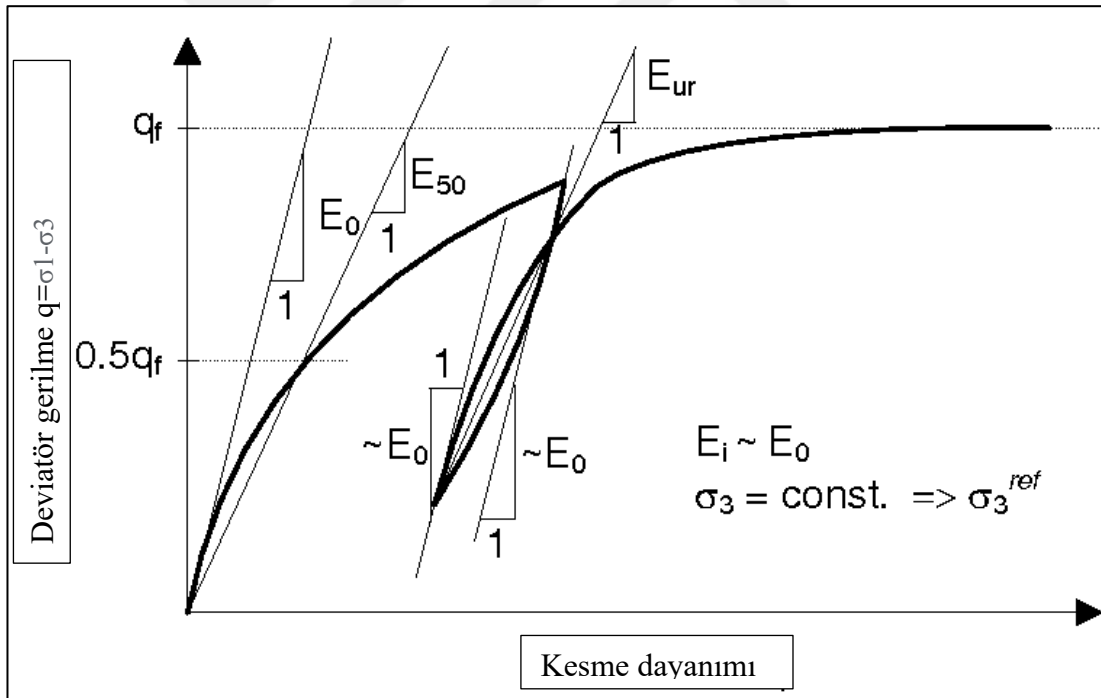
4.1.1.6 Eklemlı kaya (jointed rock) modeli

Bu model, anizotropik elastik – plastik modeli temsil etmektedir. Bu model kullanılırken kaya katmanlarındaki tabakalanmanın ve fay hatlarının modellenmesi amaçlanmaktadır. Elastik anizotropi farklı yönlerdeki farklı elastisite modüllerinin tanımlanmasına, plastik anizotropi ise farklı yönlerdeki rijitliklerin kullanılmasını

sağlamaktadır. Yöntemde kullanılan elastik parametreler, kayanın elastisite modülü ve kayanın poisson oranı iken, anizotropik elastik parametreler ise tabakalanma düzlemine dik elastisite modülü, tabakalanma düzlemine dik kayma modülü ve poisson oranıdır.

4.1.1.7 Pekleşen (Hardening) zemin modeli

Bu modelde, farklı tiplerdeki yumuşak ve sert zeminlerin davranışını modellenenmektedir. HS modeli, drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilmekte olan eksenel deformasyon - deviatorik gerilme grafiğinin hiperbol şeklinde olduğunu kabul etmektedir. Mohr Coulomb modeline benzer olarak, zeminin modellenmesinde kohezyon ve kayma mukavemeti açısı parametrelerinden yararlanılır. Modellenen zemin için 3 farklı elastisite modülü tanımlanır. Bunlar, üç eksenli deneyin yükleme esnasındaki modül (E_{50}), boşaltma esnasındaki modül (E_{ur}) ve ödometre yükleme modülü (E_{eod})'dir. Bu modüller Şekil 4.1'de açıklanmıştır.



Şekil 4.1 : Pekleşen zemin modelinde elastisite modülleri (Schanz v.d., 1999).

4.1.1.8 Pekleşen zemin – küçük gerilme- şekil değiştirme modeli (HS- small strain, stress)

Bu model, boşaltma - yükleme altındaki elastik malzeme davranışını temsil etmektedir. Bu modele göre minimum gerilme düzeylerinde zemin, tamamen elastik davranmaktadır. Gerilmenin sürekli artması durumunda zemin rijitliği lineer olmayan bir şekilde azalmaktadır. Bu modeli pekleşen zemin modelinden ayıran iki parametre bulunmaktadır. Bu parametreler başlangıçtaki ve çok küçük gerilmelerdeki kayma modülü (G_0) ile çok küçük gerilme sınırını belirten G_s eşik kayma gerilmesidir.

4.1.1.9 Hoek Brown Modeli

Bu model ayrılmış kayaların izotropik elastik ve tam plastik davranışını temsil etmektedir. Bu yöntemde yük artışı altında kayaların rijitliği sabit olarak kabul edilmektedir. Kayalar çekme dayanımına sahip olduklarından, Hoek Brown göçme kriteri kayaların dayanımının lineer olmayan davranışını en iyi şekilde temsil etmektedir. (Yankı, 2015)

4.1.2 Analiz aşamaları ve çıktılar

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde, gerçek saha koşullarını, imalat adımlarını programa işlemek için elemanlar aktif ve aktif olmayan duruma getirilebilmektedirler. Bu sayede, yapının inşa aşamaları gerçeğe yakın modellenebilmekte ve her imalat adımı ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Analiz adımlarında ilk olarak başlangıç koşullarındaki model kendi ağırlığıyla yüklenmektedir. Sonraki analiz adımları imalat adımları ile uyumlu olmaktadır. Programda genel stabilite tahkiki ve güvenlik faktörünün belirlenmesi, deprem kuvvetlerinin etkilmesi gibi işlemler de yapılabilmektedir. İşlemler sonucunda yapıların içsel kuvvetleri (moment, kesme kuvveti, normal kuvvet), elemanların yer değiştirme miktarı, modeldeki su basınçları ve su hareketi gibi çıktılar alınabilmekte ve bu çıktılar grafiklerle, çizimlerle, tablolarla elde edilebilmektedir.

5. VAKA ANALİZİ: KATAR- DOHA ESKİ LİMANI PROJESİ BÜYÜK TERMİNAL BİNASI KAZIKLARI

Katar, Basra Körfezi'nde bulunan yarımada coğrafi yapısına sahip ticaret açısından önemli bir ülkedir. Dünya'nın en zengin ülkelerinden biri olan bu yarımadanın terminalinin terminalinin de bu zenginliği yansıtmaları amaçlanarak başkent Doha'da liman üzerine inşa edilen Büyük Terminal Projesi, 2022 FIFA kupası ve devamında meydana gelecek tüm global aktiviteler için bir karşılama yeri olması planlanmaktadır. Limanın bir parçası olan Büyük Terminal, aynı anda 6000 yolcu kapasiteli 2 mega gemiye ev sahipliği yapabilecek kapasitede olacaktır.

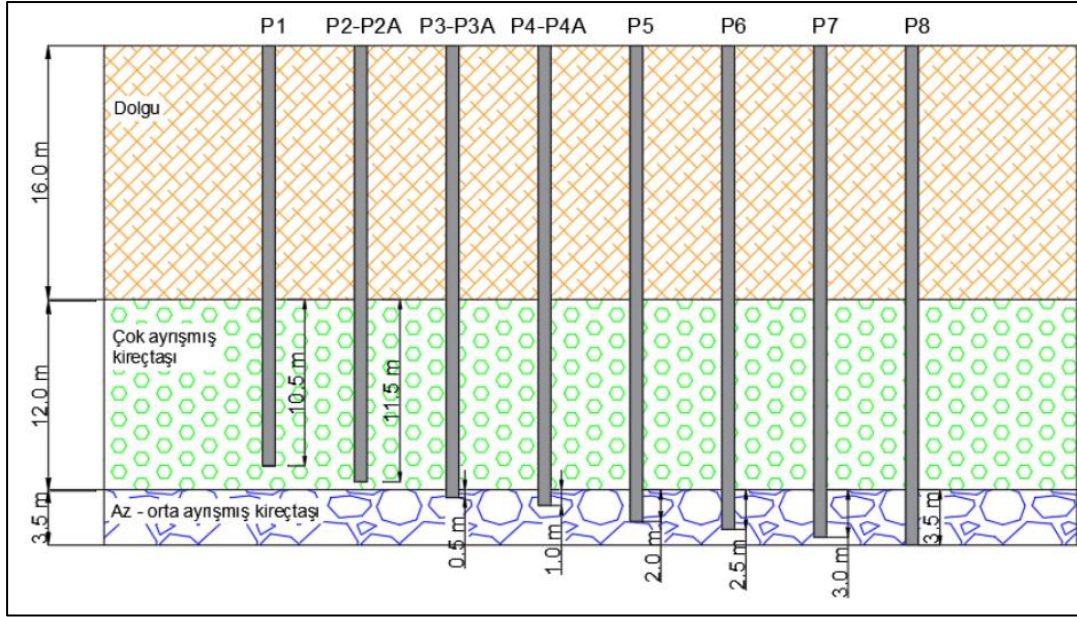
Terminal binası, dörtgen geometriye ve 12 metre yüksekliğe sahip 2 katlı bir bina olarak tasarlanmıştır.



Şekil 5.1 : Uygulama sahasının yeri ve inşa edilecek yapının genel görünümü (Projesinden alınmıştır)

5.1 Proje Temel Sistemi

Proje, yapay bir dolgu üzerine kurulmuş limanda inşa edilecektir. Temel sistemi kazıklardan oluşmaktadır. Toplamda projede 470 adet kazık bulunmaktadır. Bu kazık tiplerinin genelleştirilmiş zemin profili içerisindeki konumlarını gösteren şematik çizim Şekil 5.2’te verilmiştir. Tüm kazıkların çapı 80 cm olup kazık tiplerinin farkı kaya soketi uzunluklarıdır. Kazık boyları 27.5 ile 31.5 arasında değişmektedir.

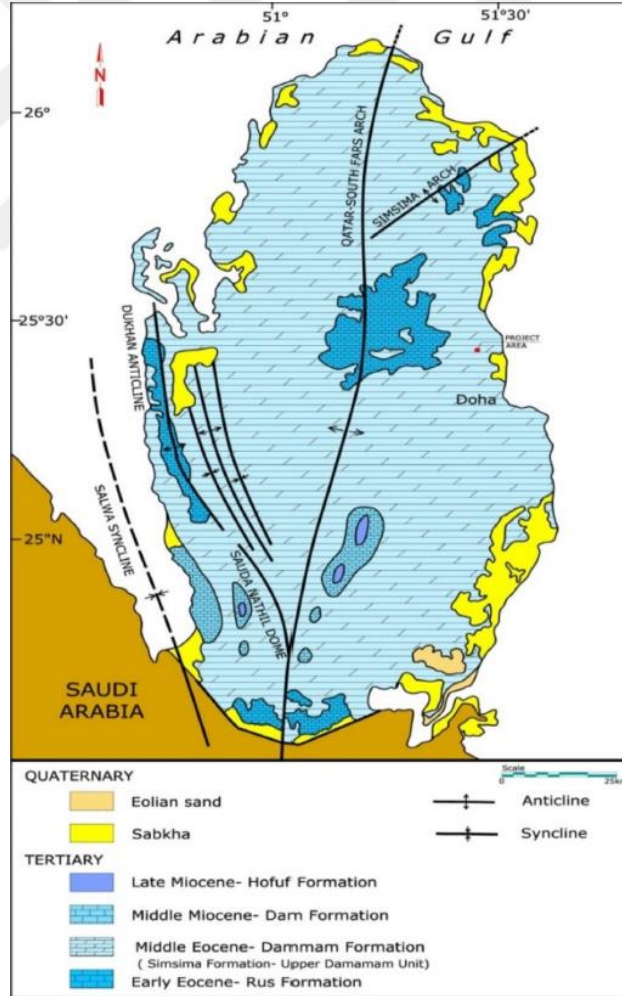


Şekil 5.2 : Zemin profili içinde kazık konumlarının şematik gösterimi

5.2 Bölgesel ve Yerel Jeoloji

Katar, Arap levhasının sabit plakasında yer almakta ve Fanerozoik dönemde 14 km'den fazla tortu biriktirerek doğuya doğru derinleşen Arap Körfezi Havzası'nın bir parçasını oluşturmaktadır. Katar'daki yüzey mostrası esas olarak tortul kayalardan oluşur ve yaşları Erken Eosen'den Kuvaterner'e kadar değişmektedir. Bu mostraların çoğu, özellikle proje sahasının çevresi, iç kısımda Kuvaterner kırıntılı çökelleri ile değişken bir şekilde örtülen Dammam ve Rus Formasyonlarının karbonat kayalarından ve kıyı hatlarına yakın sabkhalardan oluşmaktadır. Dammam Formasyonu (Erken-Orta Eosen) Rus Formasyonunu uyumlu olarak örtmekte ve Katar'ın çoğunu kaplayan baskın kaya mostralarını temsil etmektedir. Alt Dammam Birimi, Midra Şeyl Üyesi (jipsli şeyl) ve Dukhan Üyesi'nden (fosil kireçtaşı) oluşmakta, Üst Dammam Birimi Simsima Üyesi (tebeşirli kireçtaşı, yer yer dolomitleşmiş veya silisleşmiş) ve Abarug

Üyesi'nden (marn ve silisleşmiş dolomit) oluşmaktadır. Simsima Üyesi yaklaşık 30 m kalınlığındadır ve Katar'daki yüzey kayaçlarının çoğunu kaplar. Bu üye, ince ila orta daneli kirli beyaz ila soluk kahverengi, zayıf tabakalı, kireçli kireçtaşı ve çok sayıda oyuk ve genellikle düzensiz eklemlere sahip dolomitik kireçtaşı içermektedir ve daha zayıf sedimanlarla dolmuştur. Kireçtaşı istifi aralarda ince uçuk yeşil veya kırmızı kahverengi killere sahiptir. Simsima Üyesi'nin kireçtaşı boyunca çört bantları görülmüştür, ancak özellikle üyenin tabanına yakın ve tepesinde belirgindir. Katar düdenlerinin çoğunun Yukarı Dammam Birimi'nin kalker kayaları içinde gözlenmektedir. Rus Formasyonu, üstte marn ve dolomitik kireçtaşı, altta ise kireçli kireçtaşı ile marn ve kil aralanmasından oluşmaktadır. Katar'ın yapısal jeolojisine faylanmadan ziyade kıvrım hakimdir, oysa çok geniş bir KG eliptik şekilli antiklinal ve küçük sıkı KKB-GGD yönelimli kıvrımlar Dammam Formasyonunun kayalarını etkilemektedir. Şekil 5.3'te bölge jeolojisi verilmiştir.



Şekil 5.3 : Katar bölge jeolojisi haritası (projesinden alınmıştır).

5.2.1 Yerel zemin koşulları

Proje sahası, deniz dibinden taranarak yeniden kazanılmış kum dolgu alanının üzerinde yer almaktadır. Dolgu malzemesinin kalınlığı 5m-17m arasında değişmektedir. Bunların altında topluca Simsima Üyesi'ne ait, kalınlıkları yer yer 25-30 m derinliğe kadar ulaşabilen kalker ve dolomitik kalkerler bulunmaktadır. Simsima Üyesinin üst katmanlarında aşırı ayrışma gözlenmiştir.

5.2.2 Sondajlar, arazi deneyleri ve zemin kesiti

Zemin incelemelerinin sonuçlarına göre, sahada aşağıdaki tabakalara rastlanmaktadır: Genelleştirilmiş zemin katmanlarının mühendislik parametreleri Çizelge 5.1'de verildiği gibi belirlenmiştir.

- Dolgu Malzemesi: Çok gevşek ila yoğun, kremi ila açık kahverengi, ince ila iri taneli, bazı kabuk parçalarıyla karışmış, siltli Kireçtaşı Kum ve Çakıl.
- Kalkarenit: Çok gevşekten sıkıya kum, çok yumuşak - sert silt, çok ayrılmış son derece zayıf Kalkarenit ile iç içe geçmiştir.
- Ayrılmış Simsima Kireçtaşı: Çok ayrılmış, kirli beyazdan açık griye, çok zayıftan zayıfa Simsima Kireçtaşı. Bazı sondajlarda bu tabaka maksimum delinecek derinliğe kadar uzanmaktadır.
- Simsima Kireçtaşı: Hafif ila orta derecede ayrılmış, kirli beyaz ila açık gri, zayıf ila kuvvetli Simsima Kireçtaşı. Bu katmana tüm sondajlarda rastlanmamıştır ancak karşılaşıldığı sondajlarda, maksimum delinmiş derinliğe kadar uzanmaktadır.

Çizelge 5.1 : Genelleştirilmiş zemin profili (Dar, 2019).

Üst ve alt kot	Zemin	SPT (N)	q_u MPa	c kPa	γ kN/m ³	ϕ (°)	E MPa
.0 -10.0	Dolgu	13	-	0	17	30	11
-10.0 -16.0		8					
-16.0 -28.0	Çok ayrılmış Kireçtaşı	41	2.5*	50*	20	23*	100
-28 -30.0	Az-orta ayrılmış Kireçtaşı	50	14	250	21	33	500

q_u : tek eksenli basınç dayanımı, c: kohezyon, γ : birim hacim ağırlık, ϕ : kayma mukavemeti açısı, E: elastisite modülü,

Çok ayrıışmış kireçtaşının mühendislik parametreleri, 2016 yılına ait Nicholas K. Ve diğerlerinin yayımladığı çalışma dikkate alınarak güvenli bir yaklaşımla seçilmiştir (Karagkounis v.d, 2016).

5.3 Kazık Kapasitesinin Belirlemesi

Kazıklar üzerlerine etkiyen yükü, bulundukları zemine çeperlerinde oluşan çevre sürtünmesi ve kazık ucunda zeminin oluşturduğu tepki kuvveti ile aktarmaktadırlar. Geçmiş tecrübeler, fore kazıklarda tam sürtünme yükünün kazık çapının yüzde 0.5 ila 1'ine eşit bir oturmada mobilize olduğunu ve tam uç direncinin, kazık çapının yüzde 10 ila 20'si oranında oturma gözlemlendiğinde aktifleştğini göstermektedir (Tomlinson, 2008).

Proje kazıklarında uç direncinin mobilize olmasına imkân verecek derecede oturmaya gözlenmeyeceği öngörüldüğünden, kapasite hesabında yalnızca çevre sürtünmesi dikkate alınmıştır. Bu kısımda hesaplar ampirik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Ardından elde edilen sonuçlar sahada uygulanan statik kazık yükleme deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

5.3.1 Ampirik yöntemler

Kayaya soketli kazıkların taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerde kullanılan katsayılar kazık yükleme deneyleri sonucunda elde edilen verilerden yararlanılarak belirlenmiştir. Çizelge 5.4'te verilen ve kapasite hesabında kullanılan tüm yöntemlere dair özet bilgiler önceki bölümlerde verilmiştir. Ampirik yöntemlerin uygulanarak kayaya soketli kazıkların kapasitelerinin belirlenmesinde tek eksenli basınç deneyi sonucu parametre olarak kullanılmaktadır. Yöntemlere dair katsayıların ve tabakalara ait tek eksenli basınç dayanımının denklem 5.1'de yerine konmasıyla elde edilen birim çevre sürtünmeleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Üstteki tabakanın ilk 5 metresi çok ayrıışmış olduğundan, güvenlik nedeniyle ihmal edilmiştir.

$$f_s = \alpha \times q_{uc}^{\beta} \quad (5.1)$$

Örneğin, Rosenberg ve Journeaux yönteminde $\alpha = 0.34$, $\beta = 0.51$ olarak verilmiştir. Çok ayrıışmış kireçtaşına ait tek eksenli basınç mukavemeti= 2.5 MPa, ayrıışmış kireçtaşına ait tek eksenli basınç mukavemeti= 14 MPa olarak verilmiştir.

$$f_{s1} = 0.34 \times 2.5^{0.51} = 0.54 \text{ MPa}$$

$$f_{s2} = 0.34 \times 14^{0.51} = 1.31 \text{ MPa}$$

Kapasite hesapları 5.2 numaralı denklem ile yapılmıştır.

$$Q_p = \pi D L_s f_{s,em} \quad (5.2)$$

Burada D: kazık çapı, L_s : soket boyu, $f_{s,em}$: emniyetli birim çevre sürtünmesidir.

$$Q_{p1} = \pi \times 0.8 \times 7.7 \times 540 = 10,450 \text{ kN}$$

$$Q_{p2} = \pi \times 0.8 \times 2.05 \times 1310 = 6,749 \text{ kN}$$

$$Q_{nihai} = Q_{p1} + Q_{p2} = 10,450 + 6,749 = 17,200 \text{ kN}$$

$$Q_{güvenli} = \frac{17,200}{2.5} = 6,880 \text{ kN}$$

Çizelge 5.2 : Kaya tabakalarının birim çevre sürtünmesi değerlerinin belirlenmesi (Zhang, L. 2004).

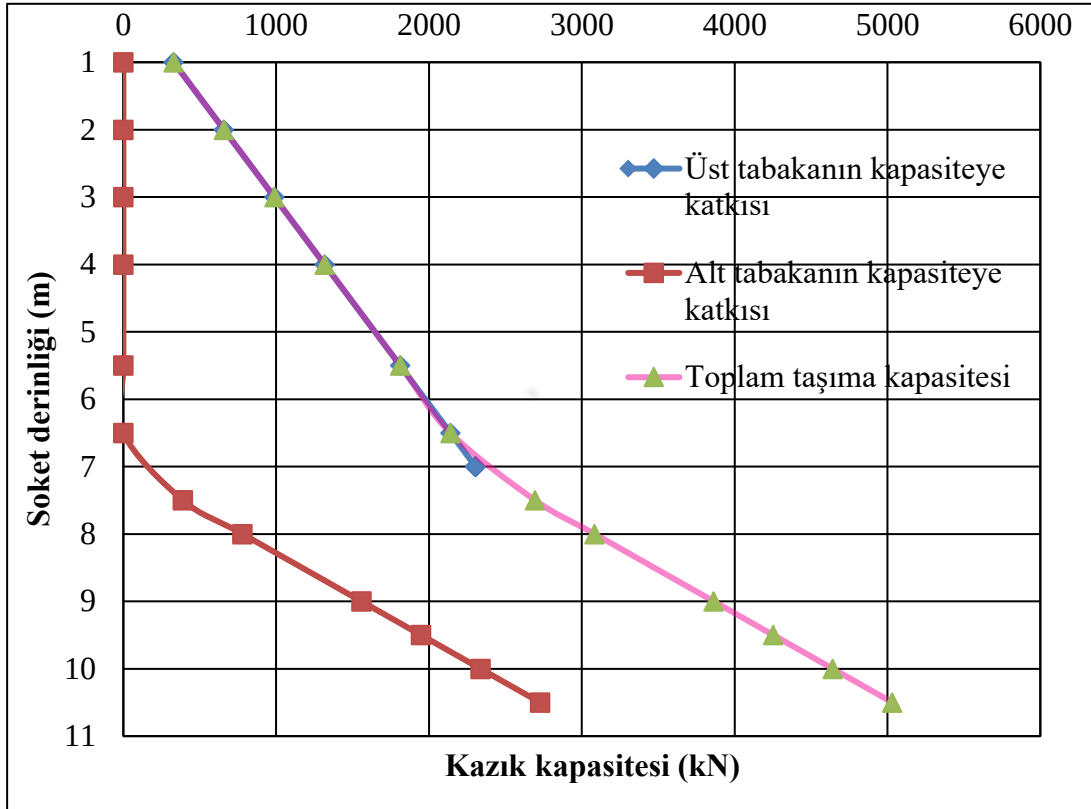
Yöntem	α	β	Çok Ayrıışmış Kireçtaşına ait f_s (MPa)	Ayrıışmış Kireçtaşına ait f_s (MPa)
Rosenberg ve Journeaux (1976)	0.34	0.51	0.54	1.31
Horvath ve Kenney (1978)	0.21	0.50	0.33	0.79
Meigh ve Wolshi (1979)	0.22	0.60	0.38	1.07
Williams ve diğ. (1980)	0.44	0.36	0.61	1.14
Rowe ve Armitage (1984)	0.40	0.57	0.67	1.80
Carter ve Kulhawy (1988)	0.20	0.50	0.32	0.75
Reese ve O'Neill (1987)	0.15	1.00	0.38	2.10
Reynolds ve Kaderbek (1980)	0.30	1.00	0.75	4.20
Gupton ve Logan (1984)	0.20	1.00	0.50	2.80
Toh ve diğ. (1989)	0.25	1.00	0.63	3.50
Horvath (1982)	0.20	0.50	0.32	0.75
Prokoso (2002)	0.98	0.50	1.55	3.67

Çizelge 5.3 : Ampirik yöntemlerle kazıkların nihai taşıma kapasitelerinin belirlenmesi.

kazık tipi	Kazık boyu (m)	Rosenberg ve Journeaux (1976) (kN)	Horvath ve Kenney (1979) (kN)	Meigh ve Wolshi (1979) (kN)	Williams ve diğ. (1980) (kN)	Rowe ve Armitage (1984) (kN)	Carter ve Kulhawy (1988) (kN)	Reese ve O'Neill (1987) (kN)	Reynolds ve Kaderbek (1980) (kN)	Gupton ve Logan (1984) (kN)	Toh ve diğ. (1989) (kN)	Horvath (1982) (kN)	Prakoso (2002) (kN)
P6	30.5	17200	10515	12867	17678	22240	10057	18173	36153	24102	30225	10057	49846
P5	30.0	13857	8479	10302	14389	17843	8114	14134	28101	18734	23501	8114	40199
P8	31.5	18826	11486	14272	18917	24565	10974	21390	42600	28400	35590	10974	54440
P5	30.0	14220	8711	10495	14945	18219	8340	13886	27588	18392	23082	8340	41302
P2	27.5	8984	5540	6322	10149	11147	5324	6322	12478	8319	10482	5324	26288
P3	28.5	19922	12190	14814	20681	25656	11665	20341	40444	26962	33822	11665	57792
P3	28.5	18131	11085	13554	18658	23433	10603	19081	37955	25304	31732	10603	52551
P5	30.0	21239	12984	15890	21828	27465	12419	22452	44666	29777	37341	12419	61552
P5	30.0	20581	12587	15352	21255	26560	12042	21397	42555	28370	35582	12042	59672
P6	30.5	19167	11684	14618	19059	25113	11158	22474	44779	29853	37401	11158	55372
P8	31.5	18159	11084	13722	18347	23643	10593	20284	40387	26925	33747	10593	52538

Tüm yöntemler kullanılarak elde edilen tüm nihai kazık kapasitesi sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Buna göre en düşük kapasiteyi veren heaplama yönteminin Horvath (1982), en yüksek kapasiteyi veren yönteminse Prokoso (2002) yöntemi olduğu görülmektedir.

Kazıkların kaya soketi arttıkça taşıma kapasitelerinde beklendiği gibi bir artış söz konusu olmaktadır. Soket boyu ve kazık kapasitesi arasındaki ilişki Şekil 5.4'te verilmiştir. Üstte bulunan zayıf kaya tabakasının kapasite artışına katkıda bulunduktan sonra tabaka geçildiğinde sabit kaldığı, soket alttaki daha dayanımlı kayaya girdiğinde aynı boy uzamasında bu tabakanın kapasiteye katkısının daha fazla olduğu, taşıma kapasitesi artışının hızlandığı grafikten yorumlanmaktadır.

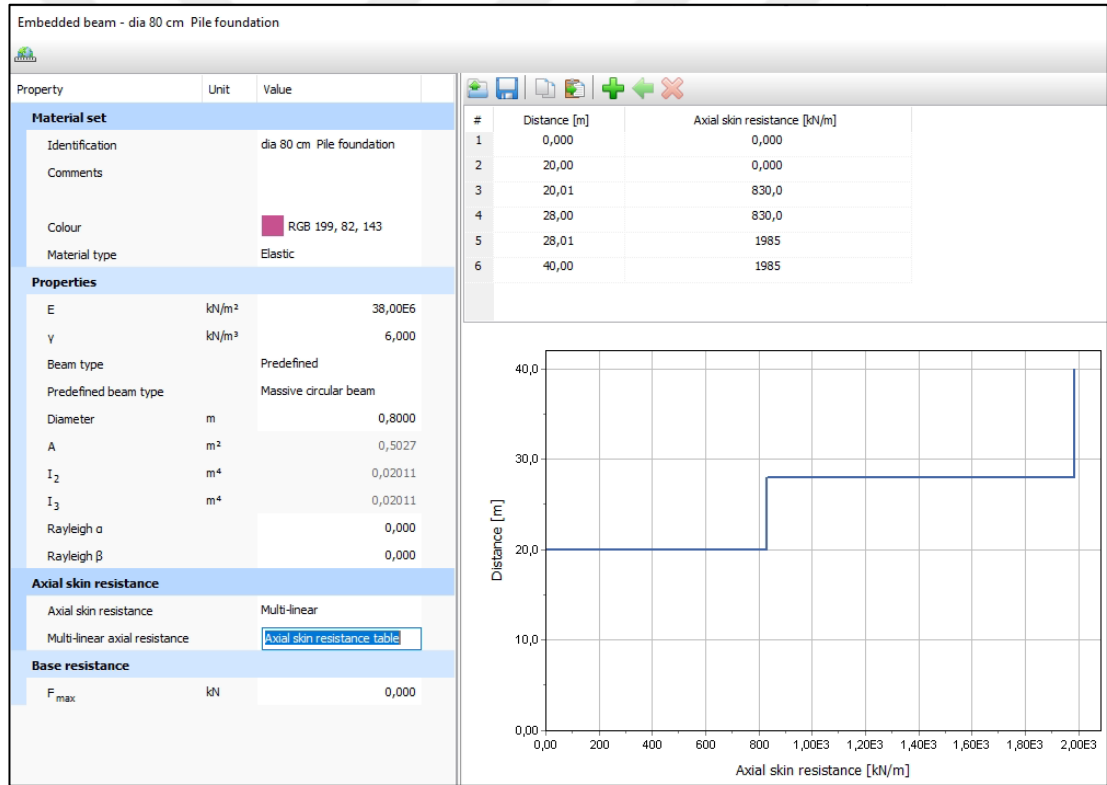


Şekil 5.4 : Kazık boyu – taşıma kapasitesi ve tabakaların katkıları.

5.3.2 . Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kapasitenin Belirlenmesi

Zemin modellenmesi için kullanılan Plaxis programında kum dolgu tabakası pekleşen zemin modeli ile temsil edilmiştir. Kayaların modellenmesinde en uygun bünye modeli Plaxis manuel'inde eklemlili kaya modeli olmasına karşın, sahadaki kaya tabakasının çatlaklarının boyutları, süreksizliği gibi bilgiler araştırılmamış olduğundan, en uygun ikinci yöntem olan Mohr Coulomb bünye modeli tercih edilmiştir. Literatürde kayaların ve zeminlerin modellenmesinde bu yöntemlerin sıkça kullanıldığı bilinmektedir.

Tekil kazık kapasitesi için aksisimetrik model kullanılmıştır. Aksisimetrik modelde eksen etrafında 360 derece dönerek hacme dönüştüğü yaklaşımlı olduğundan kazık çapının yarısı modele girilmiştir. Kazık kapalı geometride lineer elastik, boşluksuz malzeme olarak modellenmiş, C60 betona uygun olacak şekilde elastisite modülü 38,000 MPa alınmıştır. 3D modelde ise kazık gömülü kiriş elemanı olarak tanımlanmış, eleman tanımlanırken uç direnci sıfır olarak, çevre sürtünmesi ise ampirik yöntemlerin uygulanması sırasında yapılan kabullerle uygun şekilde çok ayrılmış tabakanın 5 metresinin taşıma kapasitesi ihmal edilmiş, Horvath ve Kenney yönteminden elde edilen birim çevre sürtünmeleri değerlerinin kazık yüzey alanı ile çarpılması ile kN/m birimine uygun hale getirilerek yazılıma tanıtılmıştır. Bahsedilen şekilde yapılan hesap sonucu ortaya çıkan gömülü kazık eleman özellikleri Şekil 5.5'teki gibidir.



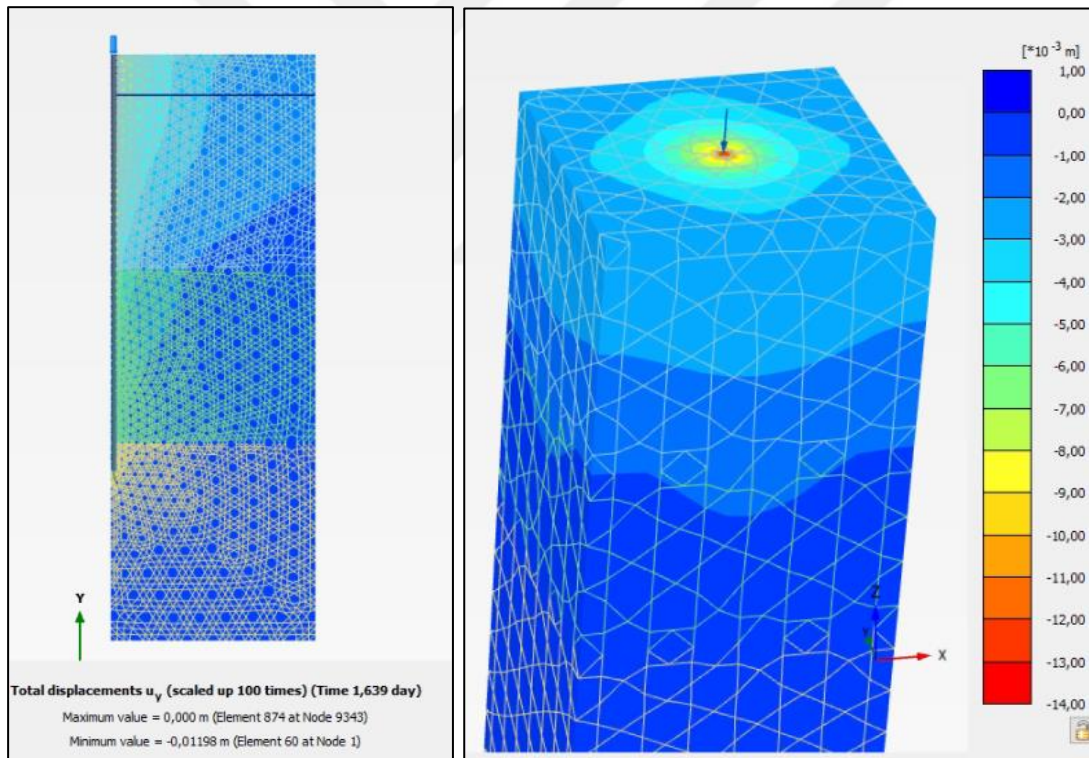
Şekil 5.5 : Plaxis 3D gömülü kiriş elemanı özellikleri.

Plaxis'te kazıkların modellenmesi sırasında kullanılan parametrelerin saha ile uygunluğunun araştırılması amacıyla hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu programda kazık yükleme deneyi modeli, yük kademeleri tam olarak sahada yapılan deneyin kendisini yansıtacak şekilde fazlara bölünmüştür. Bunun için adım adım yükleme ve

adım adım boşaltma işlemleri ile toplam 29 faz kullanılmıştır. 1 numaralı deneye ait yük kademeleri Ek D’de sunulmuştur.

2D modelde sınır koşulları yüzeyde serbest, en derinde tamamen tutulu, yanlarda ise yanal yönde tutulu şekilde seçilmiştir ve model genişliğinin sınır koşullarından etkilenmeyecek kadar geniş seçilmesine dikkat edilmiştir. Genişlik belirlenmesi sırasında 5m, 10m, 15m ve 20m genişlik denenmiş, 15 metreden sonra oluşan düşey deformasyonların değişmediği gözlenmiştir. Bu nedenle model genişliği 15m olarak belirlenmiştir.

Plaxis 2D modelinde her kademedeki test yükü kazık kesit alanına bölünmüş ve yayılı yük olarak modele girilmiştir. Plaxis 3D modelinde ise kazığın ortasından tekil yük etkilmiştir. Plaxis 2D ve 3D programları kullanılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar ağları Şekil 5.6’da verildiği gibidir.



Şekil 5.6 : Plaxis 2D & 3D sonlu elemanlar ağı.

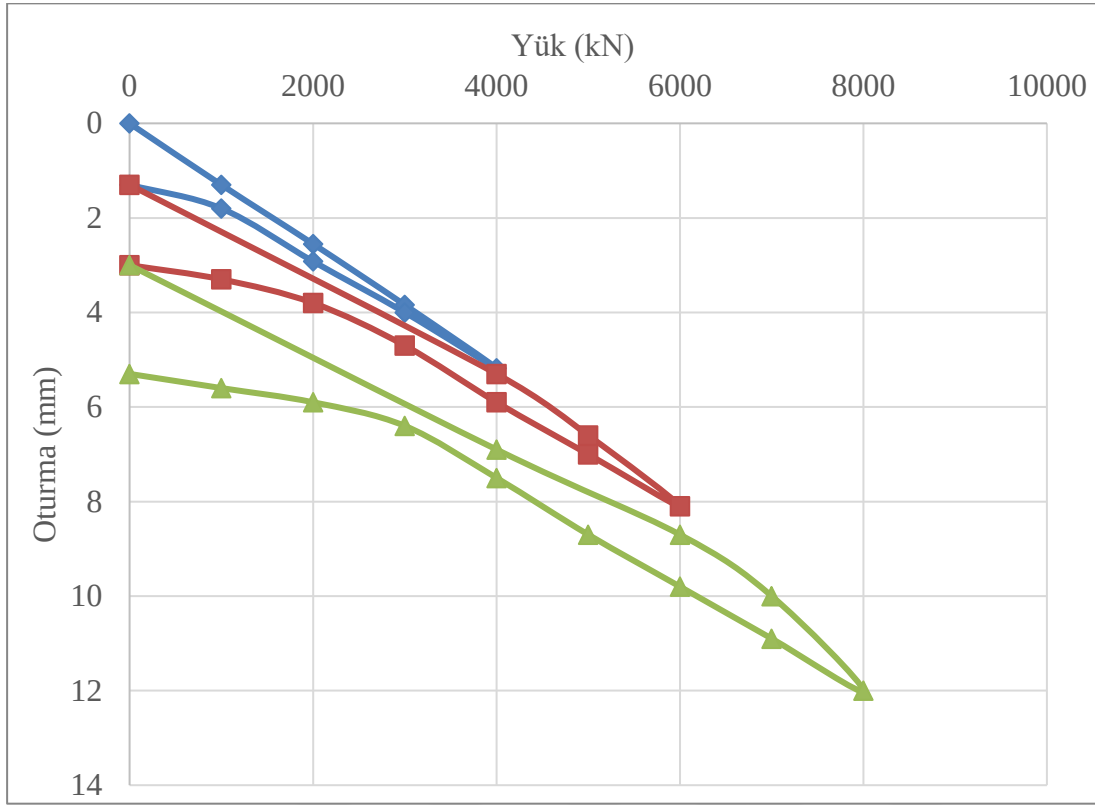
Plaxis 2D ve 3D modellerin birbirinden farklılıkları, 2D modelin eksen simetrik tanımlanmış, 3D modelin ise kendiliğinden üç boyutlu olması, 2D modelde kazığın lineer elastik malzeme ve zemin poligonu olarak tanımlanırken 3D modelde gömülü kiriş elemanı olarak tanımlanmış olmasıdır. Bu değişikliklere rağmen sonuçlar arasında maksimum 3 mm fark gözlenmiştir. Plaxis 2D sonucu elde edilen yük-

deformasyon eğrisi Şekil 5.7’de, Plaxis 3D sonucu elde edilen yük- deformasyon eğrisi ise Şekil 5.8’deki gibidir.

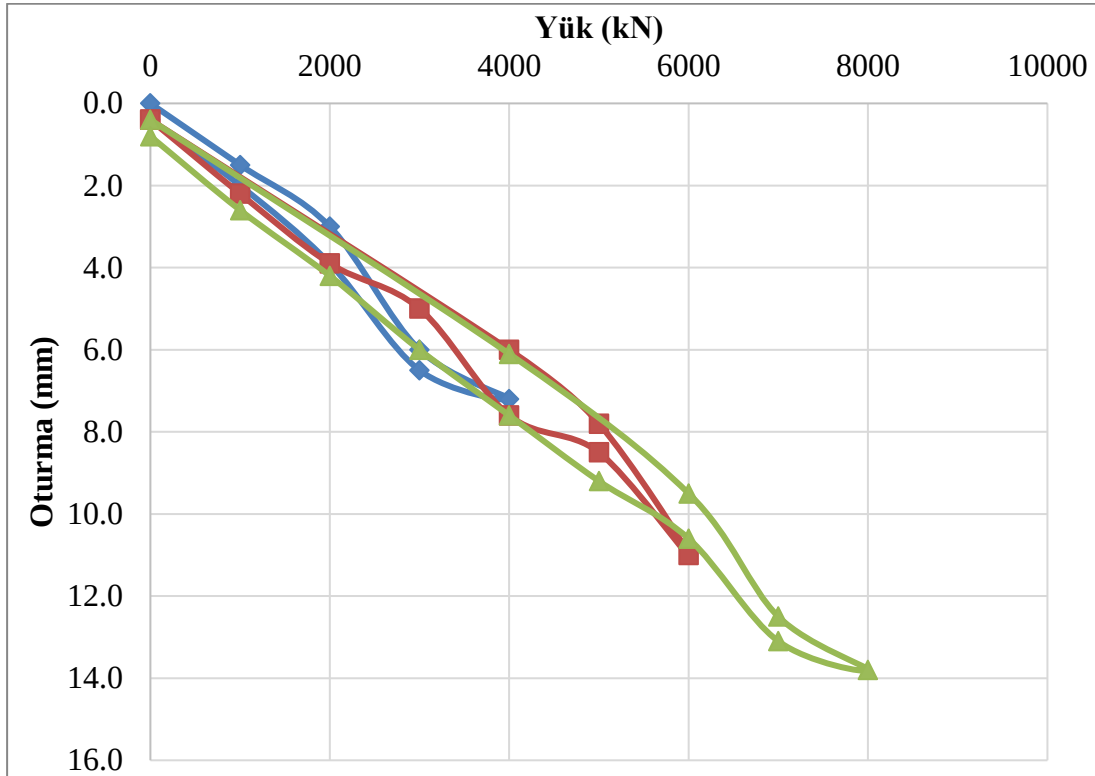
1 ve 10 numaralı P6 tipindeki test kazıkları için, kazık yükleme deneyi sonucunda elde edilen deformasyon değerleri, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çeşitli analizlerin sonucunda elde edilen deformasyon ve yük değerleri Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kazık yükleme deneyi ile sonlu elemanlar yöntemlerinden elde edilen oturma değerlerinin karşılaştırılması.

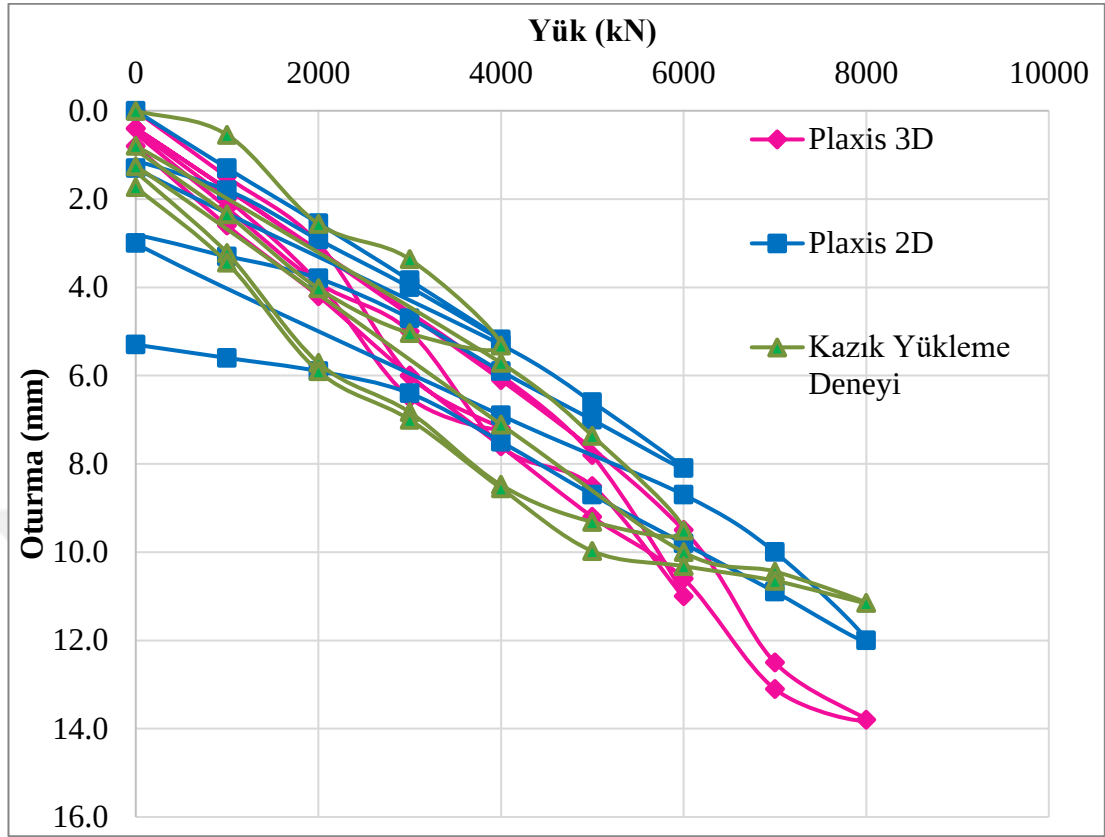
Test No: 1 ve 10 (P6 tipi)					
Saha Okumaları		Plaxis 2D Yük Kontrollü		Plaxis 3D Yük Kontrollü	
Yük (kN)	Oturma (mm)	Yük (kN)	Oturma (mm)	Yük (kN)	Oturma (mm)
-	0	-	0	-	0.0
1,000	0.545	1,989	1.3	1,000	1.5
2,000	2.563	3,979	2.55	2,000	3.0
3,000	3.363	5,968	3.84	3,000	6.0
4,000	5.323	7,958	5.18	4,000	7.2
3,000	5.04	5,968	3.5	3,000	6.5
2,000	4.023	3,979	2.92	2,000	3.9
1,000	2.345	1,989	1.79	1,000	2.0
-	0.797	-	1.2	-	0.4
4,000	5.713	7,958	5.27	4,000	6.0
5,000	7.363	9,947	6.58	5,000	7.8
6,000	9.513	11,937	8.11	6,000	11.0
5,000	9.313	9,947	6.99	5,000	8.5
4,000	8.478	7,958	5.86	4,000	7.6
3,000	6.83	5,968	4.72	3,000	5.0
2,000	5.71	3,979	3.59	2,000	3.9
1,000	3.22	1,989	3	1,000	2.2
-	1.255	-	2.75	-	0.4
4,000	7.108	7,958	6.5	4,000	6.1
6,000	10	11,937	8.2	6,000	9.5
7,000	10.438	13,926	9.7	7,000	12.5
8,000	11.15	15,915	12	8,000	13.8
7,000	10.648	13,926	11	7,000	13.1
6,000	10.318	11,937	9.8	6,000	10.6
5,000	9.975	9,947	8.7	5,000	9.2
4,000	8.555	7,958	7.5	4,000	7.6
3,000	7	5,968	6.4	3,000	6.0
2,000	5.903	3,979	5.5	2,000	4.2
1,000	3.443	1,989	5.3	1,000	2.6
-	1.73	-	5	-	0.8



Şekil 5.7 : Yük kontrollü ve çevrimli saha deneyinin Plaxis 2D ile analiz edilmesi sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi.



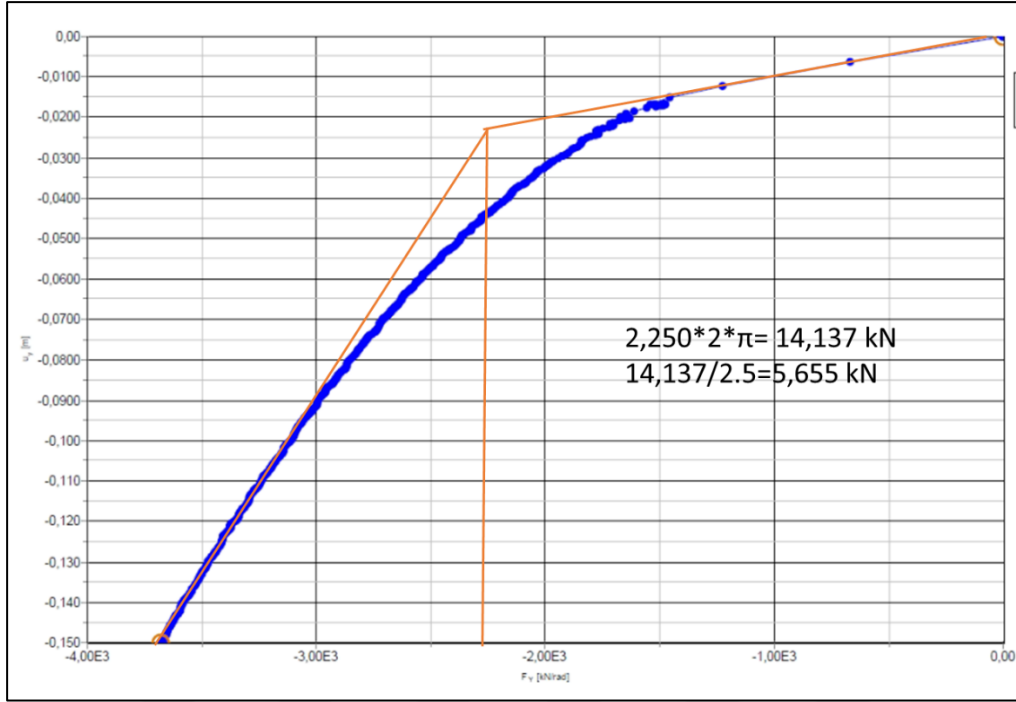
Şekil 5.8 : Yük kontrollü ve çevrimli saha deneyinin Plaxis 3D ile analiz edilmesi sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi.



Şekil 5.9 : Plaxis 2D, Plaxis 3D modellerinden ve saha deneyinden elde edilen yük- oturma eğrilerinin birleştirilmesi.

Elde edilen grafikler karşılaştırıldığında Plaxis 2D sonucu elde edilen grafiğin daha düzenli bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. İki analiz sonucunda da kazık yükleme deneyi ile oldukça uyumlu sonuçlar elde edildiği Şekil 5.9’da görülmektedir.

Modelde dikkate alınan sınır koşulları, model genişliği, zemin, kaya ve malzeme parametreleri gibi girdilerin saha koşulları ile uygunluğu kanıtlandıktan sonra, aynı kabuller yapılarak nihai kazık kapasitelerinin belirlenmesi için kazık üst noktasından 15 cm yer değiştirme uygulanmıştır. Çözüm yapıldıktan sonra kazık tepesinin ortasındaki düğüm noktasının yük, şekil değiştirme grafikleri Ek C’deki gibi elde edilmiştir. Şekil 5.10’da 1 ve 10 numaralı test için deplasman uygulanarak elde edilen yük- oturma grafiği ve teğet yönteminin uygulanması örnek olarak verilmiştir. Bu yöntemde eğrinin başladığı ve sonlandığı kısımlardan birer teğet çizilerek, teğetlerin kesiştiği dirsek bölgesindeki noktanın yük karşılığının nihai taşıma kapasitesi olduğu dikkate alınmaktadır.



Şekil 5.10 : 1 ve 10 numaralı testleri temsil eden Plaxis 2D modelinde oturma kontrollü analiz sonucu elde edilen yük- oturma eğrisi üzerinde nihai taşıma kapasitesinin hesaplanması.

2 boyutlu Plaxis modelinde eksenel simetrik model kullanıldığı için grafikten elde edilen sonuç kN/radyan cinsinden olmaktadır. Bu sonucun kN'a dönüştürülmesi için 2π ile çarpılması gerekmektedir. P6 kazık tipini temsil eden 1 ve 10 numaralı deneyin modellenmesi ile elde edilen grafik üzerinden kazığın nihai taşıma kapasitesi 14,137 kN olarak hesaplanmıştır. Nihai taşıma kapasitesi ise güvenlik sayısı olan 2.5 değerine bölünerek kazığın emniyetli taşıma kapasitesi 5,655 kN olarak elde edilmiştir. Diğer kazık tipleri için de aynı yöntem ile taşıma kapasiteleri belirlenmiştir.

Çizelge 5.5 : Sonlu Elamanlar Yöntemine göre kazıkların nihai taşıma kapasiteleri.

Test No	1, 10	2, 4, 8, 9	3, 11	5	6, 7
Kazık Tipi	P6	P5	P8	P2	P3
Kazık boyu (m)	30.5	30	31.5	27.5	28.5
Plaxis 2D (kN)	14137	12560	14451	9110	13345

Çizelge 5.5'te özetlenmiş olan analiz sonuçlarından, kazık boyu, dolayısıyla kaya soketi arttıkça kazık kapasitesinin beklendiği gibi artış gösterdiği gözlenmektedir. Çizelge 5.6'da ampirik yöntemlerden elde edilen nihai taşıma kapasitelerinin Plaxis 2D ile elde edilenler ile benzerlik oranı verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile en benzer sonuçlar veren yöntemin Meigh ve Wolshi yöntemi olduğu gözlenmiştir

Çizelge 5.6 : Ampirik yöntemlerle sonlu elemanlar yönteminin benzerliğinin incelemesi.

kazık tipi	Kazık boyu (m)	Rosenberg ve Journeau x (1976) (kN)	Horvath ve Kenney (1979) (kN)	Meigh ve Wolshi (1979) (kN)	Williams ve diğ. (1980) (kN)	Rowe ve Armitage (1984) (kN)	Carter ve Kulhawy (1988) (kN)	Reese ve O'Neill (1987) (kN)	Reynolds ve Kaderbek (1980) (kN)	Gupton ve Logan (1984) (kN)	Toh ve diğ. (1989) (kN)	Horvath (1982) (kN)	Prakoso (2002) (kN)	Benzerlik oranı (%)
P6	30.5	82	74	91	80	64	71	78	39	59	47	71	28	91
P5	30.0	91	68	82	87	70	65	89	45	67	53	65	31	91
P8	31.5	77	79	99	76	59	76	68	34	51	41	76	27	99
P5	30.0	88	69	84	84	69	66	90	46	68	54	66	30	90
P2	27.5	99	61	69	90	82	58	69	73	91	87	58	35	99
P3	28.5	67	91	90	65	52	87	66	33	49	39	87	23	91
P3	28.5	74	83	98	72	57	79	70	35	53	42	79	25	98
P5	30.0	59	97	79	58	46	99	56	28	42	34	99	20	99
P5	30.0	61	100	82	59	47	96	59	30	44	35	96	21	100
P6	30.5	74	83	97	74	56	79	63	32	47	38	79	26	97
P8	31.5	80	77	95	79	61	73	71	36	54	43	73	28	95

5.3.3 Kazık yükleme deneylerinin sonuçları

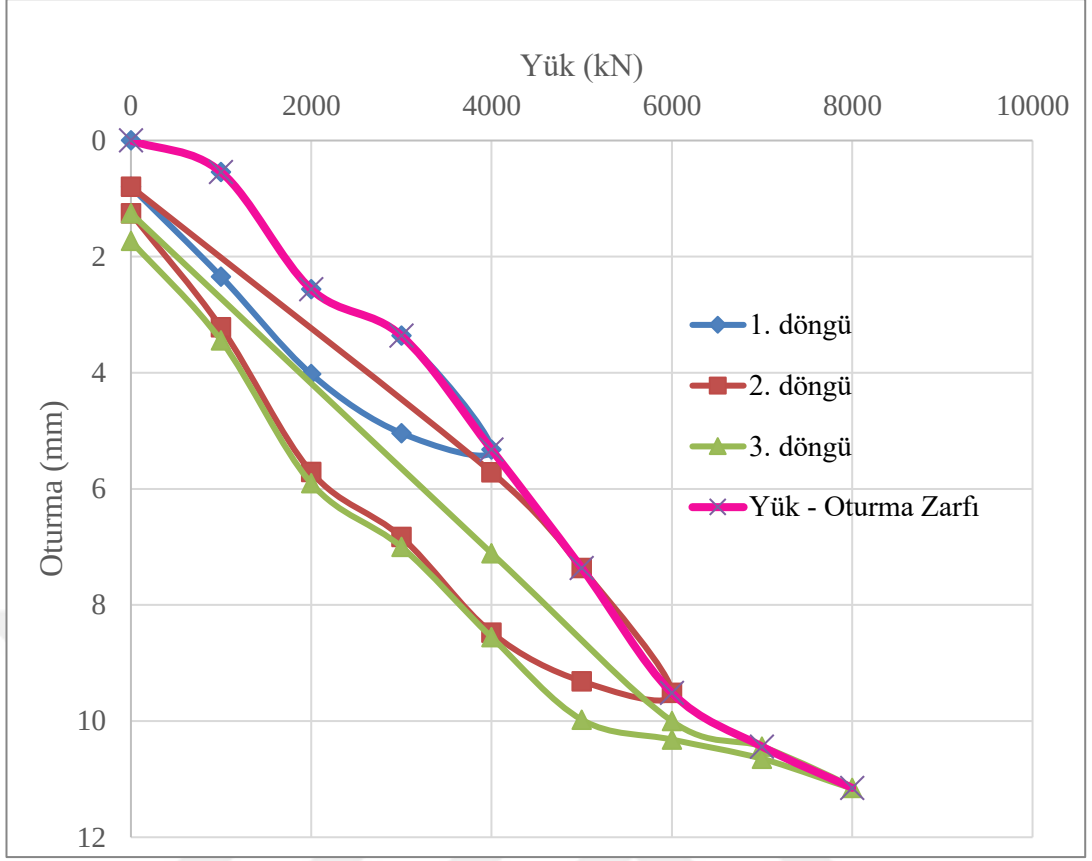
Yükleme deneyleriyle ilgili detaylar önceki bölümlerde verilmiştir. Şekil 5.12 ve 13'te sahada uygulanan statik kazık yükleme deneyi düzeneğine ilişkin görseller verilmiştir. Sahada 4 adet araştırma kazığı yükleme deneyi, 7 adet de proje kazıkları üzerinde ispat yükleme deneyi yapılmıştır. Bu deneylere ait detaylar Çizelge 5.7'de sunulmaktadır. Tüm kazıkların çapı 800mm'dir ve tüm kazıklarda C60 beton kullanılmıştır. Deneylerde ASTM D 1143-07 & OCS 2014 Bölüm 4, Kısım 4 şartnameleri uygulanmıştır.

Çizelge 5.7 : Kazık yükleme deneylerinin detayları.

Deney	Kazık boyu (m)	Soket boyu (m)	Beton döküm tarihi	Test tarihi	Proje yükü (kN)
1	30.5	15	11.11.19	21-23.12.19	4,000
2	30.0	14.5	13.11.19	14-16.01.20	3,500
3	31.5	15.5	14.11.19	25-27.01.20	5,000
4	30.0	14.0	12.12.19	29-31.12.19	3,500
5	27.5	11.5	04.01.20	04-05.02.20	1,500
6	28.5	12.5	07.01.20	03-04.02.20	2,500
7	28.5	12.5	09.01.20	10-11.01.20	2,500
8	30.0	14	08.01.20	06-07.02.20	3,500
9	30.0	14	08.01.20	08-09.02.20	3,500
10	30.5	14.5	11.02.20	11-12.05.20	4,000
11	31.5	15.5	11.02.20	13-14.05.20	5,000

Araştırma kazığı deneylerinde proje yükünün 2 katına 3 döngü halinde, proje kazığı deneylerinde proje yükünün 1.5 katına ise 2 döngü halinde erişilmiş, bu döngü sonuçlarında elde edilen maksimum ve rezidüel oturma sonuçları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

1 numaralı deneye ait yük- oturma grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir. Tüm yükleme deneylerine ait yük- oturma grafikleri Ek A'da yer almaktadır. Grafiklerde, her döngünün en yüksek yük ve oturma değerleri kullanılarak elde edilen zarf eğrisi pembe ile gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : Test kazığı -1 statik kazık yükleme deneyi sonucu elde edilen yük-oturma grafiği.



Şekil 5.12 : Vaka analizine ait kazık yükleme testi düzeneği (projesinden alınmıştır).



Şekil 5.13 : Vaka analizine ait kazık yükleme test düzeneği – 2 (projesinden alınmıştır).

Çizelge 5.8 : Kazık yükleme deneylerinin sonuçları.

Test	1. döngü			2. döngü			3. döngü		
	Test yükü (kN)	Maks. Oturma (mm)	Rezidüel Oturma (mm)	Test yükü (kN)	Maks. Oturma (mm)	Rezidüel Oturma (mm)	Test yükü (kN)	Maks. Oturma (mm)	Rezidüel Oturma (mm)
1	4,000	5.32	0.8	6,000	9.44	1.25	8,000	11.55	1.73
2	3,500	0.72	0.08	5,250	1.56	0.20	7,000	2.43	0.16
3	5,000	1.6	0.11	7,500	3.01	0.19	10,000	4.6	0.32
4	3,500	0.75	0.4	5,250	1.54	0.2	7,000	2.38	0.14
5	1,500	0.37	0.15	2,250	1.17	0.23			
6	2,500	0.52	0.08	3,750	1.26	0.20			
7	2,500	1.11	0.14	3,750	1.90	0.29			
8	3,500	0.75	0.04	5,250	1.54	0.20			
9	3,500	1.14	0.18	5,250	1.99	0.33			
10	4,000	0.90	0.07	6,000	1.75	0.13			
11	5,000	1.18	0.11	7,500	2.06	0.20			

5.3.4 Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi ve Tartışma

Kazık yükleme deney sonuçlarının yorumlanması konusunda birçok bilim insanı tarafından çeşitli yöntemler geliştirilmiş olduğundan, yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinin değerlendirilmesi ve en uygun yöntemin belirlenmesi gerekmektedir.

Kazıklar Göçme davranışı gösterene kadar yüklenmediklerinden Chin ve Decourt dışındaki yöntemlerin değerlendirme işleminde kullanılması uygun olmamıştır (Birid, 2017). Ek C ve D’de Chin ve Decourt yöntemlerine ait grafikler verilmiştir. Hesaplamalar önceki bölümlerde anlatıldığı gibi yapılmıştır.

Çizelge 5.9 : Kazık yükleme deneylerinin yorumlanması ile elde edilen nihai taşıma kapasiteleri.

Test no	Kazık tipi	Kazık boyu (m)	Chin Yöntemi (kN)	Decourt Yöntemi (kN)	Ortalama (kN)
1	P6	30.5	14286	12259	13273
2	P5	30.0	8333	7324	7829
3	P8	31.5	14085	12429	13257
4	P5	30.0	9615	8596	9106
5	P2	27.5	2950	2820	2885
6	P3	28.5	4739	4071	4405
7	P3	28.5	6250	5804	6027
8	P5	30.0	7407	6735	7071
9	P5	30.0	7353	6575	6964
10	P6	30.5	9174	8467	8821
11	P8	31.5	14706	14768	14737

Chin ve Decourt yöntemleri sonucu elde edilen kapasiteler Çizelge 5.9’da verilmiştir. Bu değerlerin ortalaması, ampirik yöntemlerden elde edilen nihai kazık kapasitesi ile karşılaştırılmak amacıyla alınmıştır. Karşılaştırma sonucu hesaplanmış olan benzerlik oranları Çizelge 5.10’da verilmiştir. Tüm ampirik yöntemler kıyaslandığında saha ile en uyumlu sonuçlar veren yöntemin Carter ve Kulhawy yöntemi olduğu gözlenmiştir. Meigh ve Wolshi yöntemi ile Horvath ve Kenney yöntemlerinin de benzerlik oranlarının diğer yöntemlerden daha fazla olduğu gözlene de bazı yöntemlerin sahada yapılan deney sonucu elde edilen kapasiteler ile benzerlik oranının %10’un altına düştüğü gözlenmektedir.

Çizelge 5.10 : Ampirik yöntemlerle kazık yükleme deney sonuçlarının benzerliğinin incelenmesi.

kazık tipi	Kazık boyu (m)	Rosenberg ve Journeaux (1976) (kN)	Horvath ve Kenney (1979) (kN)	Meigh ve Wolshi (1979) (kN)	Williams ve diğ. (1980) (kN)	Rowe ve Armitage (1984) (kN)	Carter ve Kulhawy (1988) (kN)	Reese ve O'Neill (1987) (kN)	Reynolds ve Kaderbek (1980) (kN)	Gupton ve Logan (1984) (kN)	Toh ve diğ. (1989) (kN)	Horvath (1982) (kN)	Prakoso (2002) (kN)	Benzerlik oranı (%)
P6	30.5	77	79	97	75	60	76	73	37	55	44	76	27	97
P5	30.0	56	92	76	54	44	96	55	28	42	33	96	19	96
P8	31.5	70	87	93	70	54	83	62	31	47	37	83	24	93
P5	30.0	64	96	87	61	50	92	66	33	50	39	92	22	96
P2	27.5	32	52	46	28	26	54	46	23	35	28	54	11	54
P3	28.5	22	36	30	21	17	38	22	11	16	13	38	8	38
P3	28.5	33	54	44	32	26	57	32	16	24	19	57	11	57
P5	30.0	33	54	45	32	26	57	31	16	24	19	57	11	57
P5	30.0	34	55	45	33	26	58	33	16	25	20	58	12	58
P6	30.5	46	75	60	46	35	79	39	20	30	24	79	16	79
P8	31.5	81	75	93	80	62	72	73	36	55	44	72	28	93

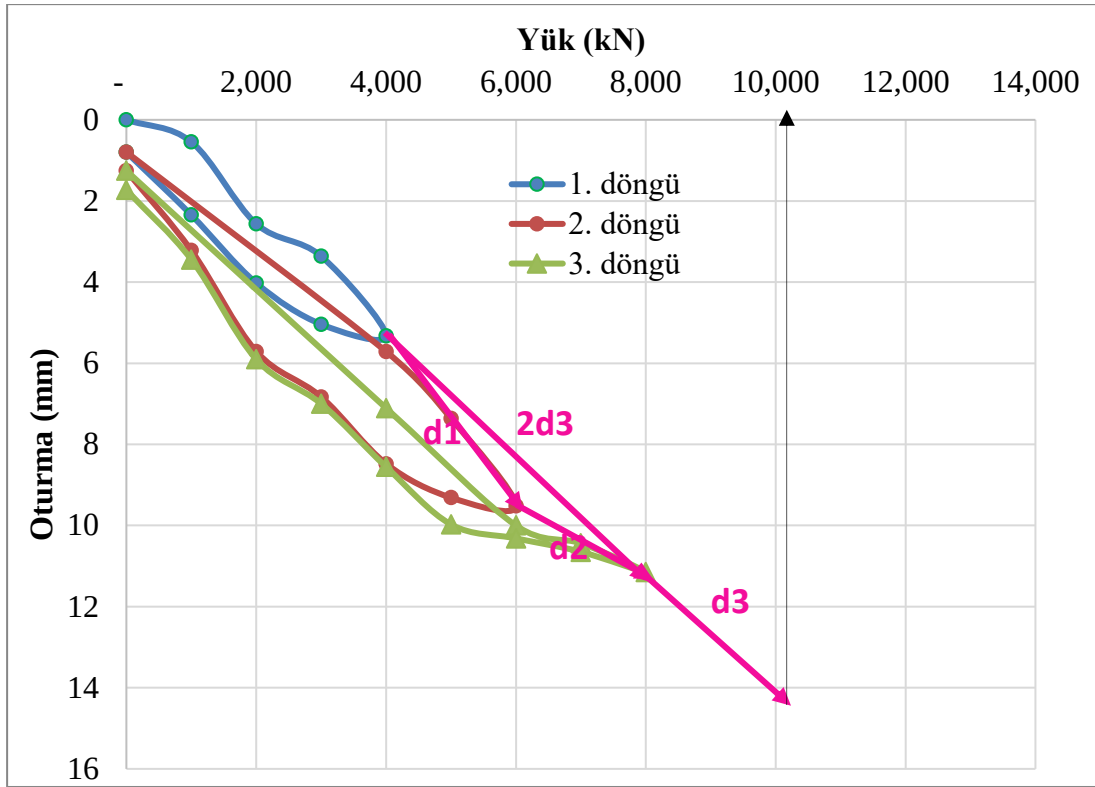
Yük – Oturma eğrisinin lineer elastik bölgesinde kalan, parabolik davranış göstermeyen yükleme deneylerinde kullanıma uygun olan yöntemlerin sınırlılığından dolayı, bu çalışmada alternatif bir yöntem elde edilmek amaçlanmıştır. Bu yöntem, grafik üzerinde yorumlamaya dayalı bir yöntemdir. Yöntemde ilk döngülerde gözlenen grafik davranışından yararlanılarak fiktif ek döngüler düşünülmektedir ve bu fiktif döngülerin maksimum yüküne eşit yük, kazığın nihai düşey yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Üç döngülü ve iki döngülü deneylerde yöntemin uygulanmasına ilişkin görseller sırasıyla Şekil 5.14 ve 15’te verilmiştir.

Üç döngü halinde proje yükünün 2.0 katı yüke kadar yükleme yapılan testlerde yöntemin uygulanışı Şekil 5.12’de açıklandığı gibi, 1. Döngü ile 2. Döngünün maksimum noktalarının ilk vektör, 2. Döngü ile 3. Döngünün maksimum noktalarının ikinci vektör olarak tanımlandıktan sonra bu iki vektörün vektörel ortalamasının fiktif bir döngü olarak eklenmesi şeklindedir.

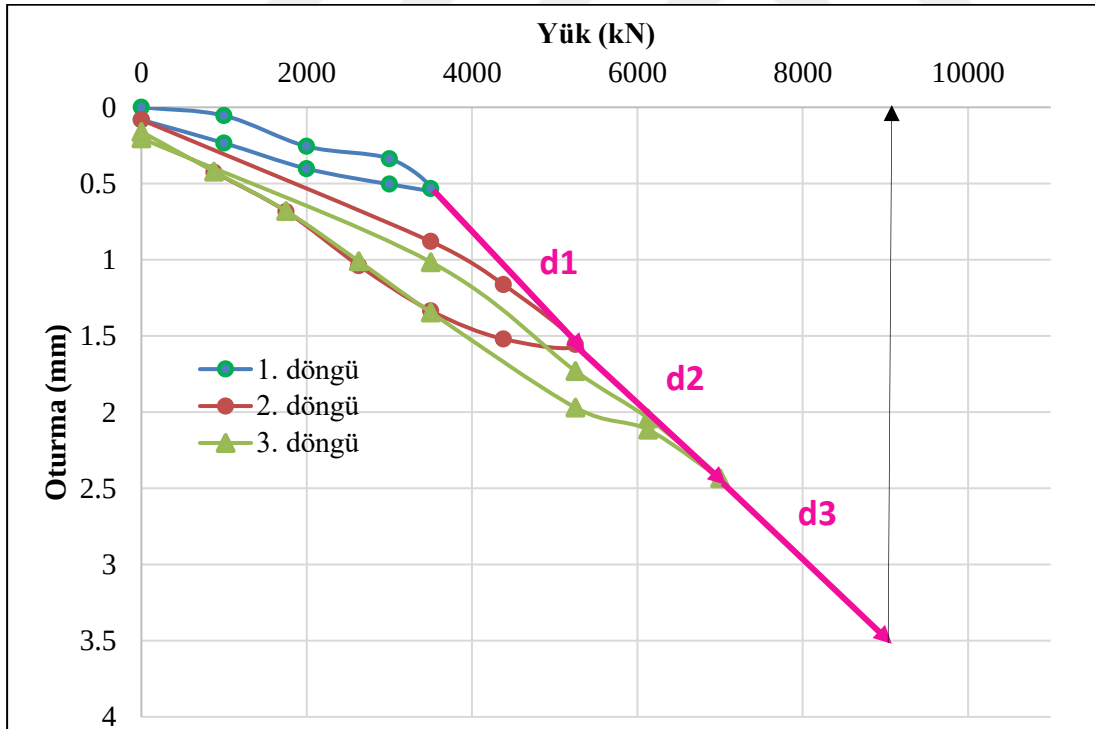
İki döngü halinde proje yükünün 1.5 katı yüke kadar yükleme yapılan testlerde ise yöntemin uygulanışı, birinci döngü ve ikinci döngülerin maksimum noktalarından çizilen vektörün 2 ek döngü olarak yansıtılması şeklindedir. İki döngülü, proje yükünün 1.5 katına kadar yüklenen proje kazıklarının yük – oturma grafiklerine eklenen ilk fiktif döngü vektörü ile grafik 3 döngülü hale getirildikten sonra ikinci vektör eklenerek aynı yaklaşım sağlanmış olmaktadır.

Yöntemin bilimsel bir temele oturması için malzeme davranışının teorisine inmek gerekmektedir. Ancak bu çalışmada, çalışma verilerine bağlı olarak Çizelge 5.13’te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Daha fazla test verisi kullanılarak yöntemin geliştirilmesi mümkündür.

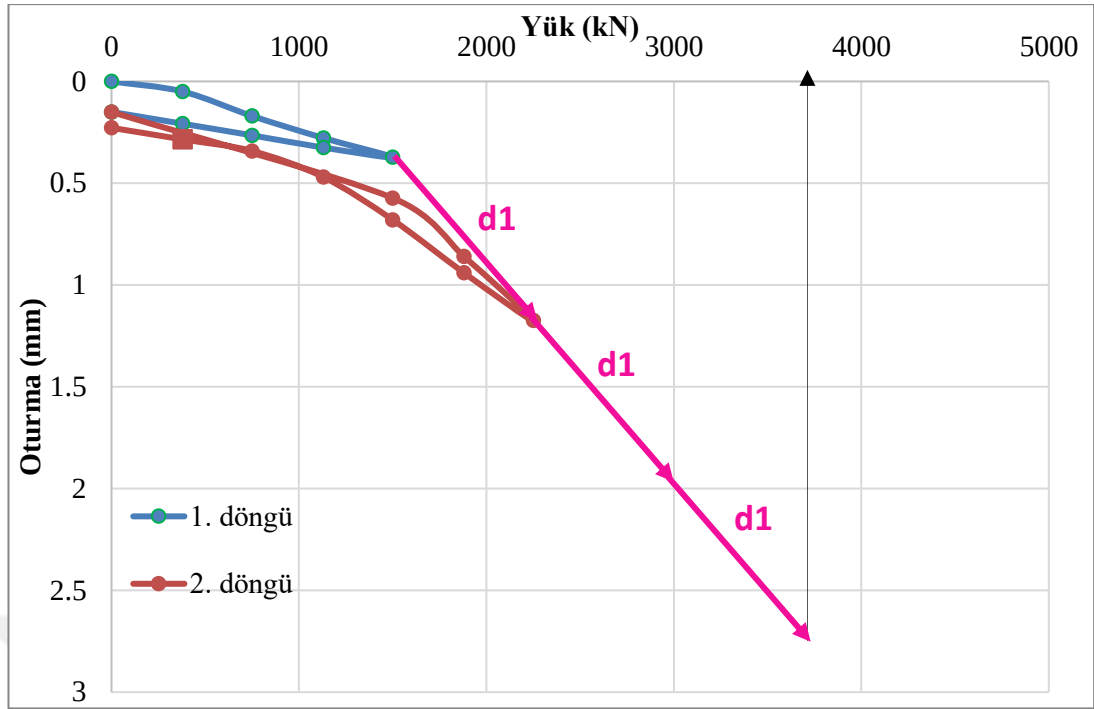
Kapasitelerinin belirlenmesinde daha önce yapılan çalışmalarda farklı sahalardan ve farklı kazık çaplarından yararlanıldığı gözlemlendiğinden, tek sahanın yanlış bir önyargı oluşturacağı düşünülmüştür. Literatürde, eski çalışmaların bazıları için bu eleştiriye rastlanmıştır. (Kulhawy ve diğ., 2005). Buna rağmen, bu çalışmada kullanılan vaka analizi verileri bir veri tabanı oluşturmaktadır.



Şekil 5.14 : Test 1 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



Şekil 5.15 : Test 2 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



Şekil 5.16 : Test 5 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.

Bahsedilen yöntemle elde edilen nihai kazık kapasiteleri ve diğer yorumlama yöntemleri ile aralarındaki benzerlik oranları Çizelge 5.13'te verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda yeni yöntemin Chin Yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği sonucu çıkmaktadır.

Çizelge 5.11. Kullanılan yöntemlerin yeni yöntem ile farklılık oranlarının karşılaştırılması.

Deney no	Kazık Tipi	Kazık boyu (m)	Chin Yöntemi (kN)	Decourt Yöntemi (kN)	Yeni Yöntem (kN)	Chin Yöntemi Benzerlik Oranı (%)	Decourt Yöntemi Benzerlik Oranı (%)
1	P6	30.5	14286	12259	10050	70	82
2	P5	30.0	8333	7324	9000	93	81
3	P8	31.5	14085	12429	12500	89	99
4	P5	30.0	9615	8596	8700	90	99
5	P2	27.5	2950	2820	3750	79	75
6	P3	28.5	4739	4071	6100	78	67
7	P3	28.5	6250	5804	6250	100	93
8	P5	30.0	7407	6735	8900	83	76
9	P5	30.0	7353	6575	8900	83	74
10	P6	30.5	9174	8467	9900	93	86
11	P8	31.5	14706	14768	12100	82	82

Son olarak, sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile bahsedilen 3 yorumlama yönteminden elde edilen kapasiteler karşılaştırılmış ve benzerlik oranları Çizelge 5.14'te verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda deney yükü azaldıkça yeni yöntemin sonlu elemanlar yöntemi ile daha benzer sonuç verdiği gözlenmiştir. Ancak tüm yorumlama yöntemlerinde deney yükü azaldıkça benzerlik oranı düşmektedir.

Çizelge 5.12 : Sonlu elemanlar yöntemi ile statik kazık yükleme deneyi sonuçlarının benzerlik oranları.

Test no	Kazık tipi	Kazık boyu (m)	Deney Yüğü (kN)	Chin Yöntemi (%)	Decourt Yöntemi (%)	Yeni Yöntem (%)
1	P6	30.5	8000	99	87	71
2	P5	30.0	7000	66	58	72
3	P8	31.5	10000	97	86	86
4	P5	30.0	7000	77	68	69
5	P2	27.5	2250	32	31	41
6	P3	28.5	3750	36	31	48
7	P3	28.5	3750	47	43	48
8	P5	30.0	5250	59	54	69
9	P5	30.0	5250	59	52	69
10	P6	30.5	6000	65	60	70
11	P8	31.5	7500	98	98	86

Bu çalışmada tamamlanamamış, çalışmaya ek olarak devamında yapılabilecek incelemeler aşağıdaki gibi önerilmektedir.

- Sonlu elemanlar yöntemi uygulanmasında Plaxis 3D ve 2D sonuçları arasındaki farklılıklar incelenip nedenleri araştırılabilir.
- Plaxis 2D ve 3D modellerinin yük kontrollü olanlarının üzerinde, yeni önerilen yöntemle uygun şekilde ek döngüler eklenip davranış incelenebilir. Ek yüklemelerden sonra göçme davranışı göstermeye başlayacağından, diğer yorumlama yöntemleri ile de taşıma kapasiteleri belirlenebilir.
- Bu çalışmada önerilen yöntemde iki döngü arasındaki ortalama vektör, fiktif döngüyü temsil edecek şekilde eklenmektedir. İki döngülü olanlarda ise bir ve ikinci döngü arasındaki noktaları birleştiren vektör iki kez eklenmektedir. Bu şekilde yöntem ilkel kalmıştır. Ancak malzeme davranışının teorisine inilip, grafikteki eğimleri de içeren bir denklem gelecekte yapılacak çalışmalarda üretilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biri olan kazık kapasitesinin belirlenmesi konusunda bir vakayı analiz etme yöntemiyle literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır. Kayaya soketli kazıkların kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla ampirik yöntemlerden, sonlu elemanlar yönteminden ve kazık yükleme deneylerinin yorumlanmasından yararlanılmıştır.

Ampirik yöntemlerin uygulanmasında, kaya tabakalarının tek eksenli basınç deneyinden elde edilen mukavemet değeri kullanılmıştır. Ampirik yöntemlerden elde edilen sonuçlar birbiri içinde kıyaslandığında yöntemden yonteme elde edilen taşıma kapasiteleri arasındaki farkın aşırılığı dikkat çekmiştir. Hesaplama sonucu en düşük kapasite Carter ve Kulhawy yöntemi ile, en yüksek kapasite ise Prokoso yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmanın literatür taraması kısmında tüm ampirik yöntemlerin elde edilme yöntemleri özetlenmiştir. Buna göre, ampirik yöntemlerin uygulanması sırasında tüm yöntemlerin geçerli olduğu koşullar incelenmeli ve yöntem seçiminde dikkatli olunmalıdır.

Sonlu elemanlar yöntemi uygulanmasında ise, kazık yükleme deneyleri, bilgisayar ortamında Plaxis 2D ve Plaxis 3D ile modellenmiş ve modelin saha koşulları ile uygunluğu teyit edildikten sonra Plaxis 2D programında kazık üzerinden göçme gözlenecek kadar deplasman etkitilmiştir. Plaxis programında test kazığının orta en üst noktasının yük- şekil değiştirme grafiği çıktı olarak alınmıştır. Elde edilen yük- şekil değiştirme grafiğinden teğet yöntemi kullanılarak taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen taşıma kapasiteleri Ek- B’de verilmiştir. Belirlenen taşıma kapasiteleri ampirik yöntemlerden elde edilen kapasitelerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, iki yöntem arasında en benzer sonuçları veren yöntemin Meigh ve Wolshi yöntemi olduğu gözlenmiştir.

Kazık yükleme deney sonuçlarının yorumlanması için literatürde yer alan 40’a yakın farklı yöntemden bahsedilmiştir. Buna karşın, deneyler sonucunda elde edilen yük – şekil değiştirme grafikleri üzerinde Chin ve Decourt yorumlama yöntemlerinin uygulanması uygun bulunmuştur. Ayrıca deney sonuçlarının yorumlanmasında yeni bir yöntem üzerinde çalışılmıştır. Yeni yöntemle Chin ve Decourt yöntemleri karşılaştırıldığında, yeni yöntemin Chin yöntemine daha yakın sonuçlar verdiği

gözlenmiştir. Tüm yorumlama yöntemleri ile elde edilen kapasiteler ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen kapasiteler karşılaştırıldığında, test yükü azaldıkça tüm yorumlama yöntemlerinden elde edilen kapasiteler ile aralarındaki uyumun azaldığı gözlenmiştir. Buna karşın en yüksek benzerlik oranı yeni yöntem ile yakalanmıştır. Ayrıca Chin ve Decourt yöntemleri kullanılarak elde edilen kapasitelerin ortalaması alınıp ampirik yöntemlerle benzerlik oranları incelenmiştir. İnceleme sonucunda yükleme deneyi ile en uyumlu sonuçlar veren yöntemin Carter ve Kulhawy yöntemi olduğu gözlenmiştir.

Tüm karşılaştırmalar sonucunda, kazık yükleme deneylerinden ve ampirik yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlik oranlarının, sonlu elemanlar yöntemi ve ampirik yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlik oranlarından oldukça az olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca maksimum deney yükü arttıkça ampirik yöntemlerin ve sonlu elemanlar yöntemlerinin saha deneyleri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Maksimum deney yüküne tabi kazıkta ampirik bir yöntem olan Meigh ve Wolshi yöntemi ile elde edilen taşıma kapasitesinin benzerlik oranının %97'ye kadar çıktığı görülmektedir. Minimum deney yüküne tabi tutulmuş kazıkta ise ampirik yöntemlerle elde edilen en benzer sonuç %38 oranında kalmıştır. Benzer şekilde, maksimum yüklenmiş kazıkta sonlu elemanlarla uyum %99'a yükselirken minimum deney yüküne tabi tutulan kazıkta %90 benzerlik yakalanabilmiştir. Bu sonuçlara istinaden, yük- şekil değiştirme grafiğinin lineer elastik bölgesinde davranış gösteren yükleme deneyi sonuçlarının yorumlanması sonucunda mevcut kapasiteden daha düşük kazık kapasiteleri elde edildiği söylenebilmektedir. Bahsedilen durumda ampirik yöntemler de sonlu elemanlar yöntemi de daha yüksek nihai kazık kapasitesi vermektedir.

Yapılan bilimsel araştırma sonucu ortaya çıkan öneriler aşağıdaki gibidir.

- 1- Çalışmada bahsedilen yöntemlerden hiçbiri ile mobilize olan çevre sürtünmesi net bir şekilde belirlenememektedir. Dolayısıyla nihai kazık kapasitesi hesabı yapılmadan önce, iki yönlü Osterberg hücresi ile sahada yükleme deneyi yapılarak mobilize olan çevre sürtünmesinin belirlenmesi önerilmektedir.
- 2- Göçme davranışı gözlenene dek yük artırımına devam edilmesi ve kazık içerisinde deplasman ölçerler yerleştirilmesi kazık kapasitesinde dikkate

alınacak çevre sürtünmesinin geri hesaplara belirlenmesini mümkün kılmaktadır.

Elde edilen sonuçların kontrol edilmesi açısından bu yöntem önerilmektedir.

- 3- Ampirik yöntemlerden elde edilen tüm nihai taşıma kapasiteleri incelendiğinde, mertebe farkının çok fazla olduğu gözlendiğinden, n tasarım aşıamasında saha koşıullarını yansıtan yöntemin seçilmesi önem arz etmektedir. nceki bölümlerde ampirik yöntemlerin belirlenmesi sırasında yapılan testlere dair testin yapıldığı zemin koşıulları, test adeti ve saha bilgileri verilmiştir. Proje zeminini temsil edecek yöntemin bu çalışmalar ışığında belirlenmesi, gerçek duruma yakın sonuçlar elde etmeye yardımcı olmaktadır.





KAYNAKLAR

- ASTM. (1994).** *Standard Test for Piles Under Static Axial Compressive Load*. D1143-81: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (1995).** *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimen*. American Society for Testing and Materials
- ASTM-D5882-95. (1995).** *Standard Test Method For Low Strain Integrity Testing of Piles*.
- Alku, Y. (2006).** Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi ile İlgili Bir İnceleme (Doctora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Birid, K. C. (2017, July).** Evaluation of ultimate pile compression capacity from static pile load test results. In *International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"* (pp. 1-14). Springer, Cham.
- Bozbey, İ., (2022, Eylül 29).** Konferans sunumu. *Zemin İyileştirmesi: Türkiye’de dün, bugün ve yarın*. 18. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Konferansı, Kayseri
- BS8004. (1986).** *Foundations*. British Standards Institutions.
- Burlon, S., Frank, R., Baguelin, F., Habert, J., & Legrand, S. (2014).** Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results–Eurocode 7 approach. *Géotechnique*, 64(7), 513-525.
- Cameron, G., & Chapman, T. (2004).** Quality assurance of bored pile foundations. *Ground Engineering*, 37(2), 35-40.
- Camp, W. M., Brown, D. A., & Mayne, P. W. (2002).** Construction method effects on axial drilled shaft performance. In *Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance* (pp. 193-208).
- Dalkılıç, B. (2020).** Göçme Durumuna Ulaşmamış Kazık Yükleme Deneylerinde Nihai Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 7-11.
- DAR. (May 2019).** *Basis of Design / Concept Design REV T0*.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018).** *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- Düzceer, İ. R. (2002).** Kazık yükleme deneyleri ile nihai kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi üzerine bir çalışma (Doctora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Dinç, H. (2010).** Osterberg Hücresi ile Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi. 113-136.
- EN1536. (1999).** *Execution of Special Geotechnical Work- Bored Piles* . European Standard.
- Ezeldin, A. S. (2004).** Practical Foundation Engineering Handbook: Pile Foundations.
- Kabaca, H. (2018).** Kazıkların taşıma gücü ve oturma parametrelerinin incelenmesi, taşıma gücü için yeni bir metot önerisi (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Karagkounis, N., Latapie, B., Sayers, K., & Mulinti, S. R. (2016).** Geology and geotechnical evaluation of Doha rock formations. *Geotechnical Research*, 3(3), 119-136.
- Kulhawy, F. H., Akbas, S. O., & Prakoso, W. A. (2005, June).** Evaluation of capacity of rock foundation sockets. In *Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. OnePetro.
- LABARAN, Y. H., MATHUR, V. S., & FAROUQ, M. M. (2021).** The carbon footprint of construction industry: A review of direct and indirect emission. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 6(3), 101-115.
- Murthy, V. N. S. (2007).** *Advanced foundation engineering*. New Delhi: CBS publishers & distributors.
- Namlı, M. (2001).** *Tarihi yapıların temel sistemleri ve temel takviyesi yöntemleri* (Doctora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Pereira, G., Rodriguez Quet, F., Voster, T. E. B., & Wojtowicz, G. (2019).** Overview of the dual foundation system of the Dubai Creek Tower. In *ECSMGE 2019–XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Plaxis. (2015).** Material Models Manuel, Delft University of Technology & Plaxis bv The Netherlands.
- Prakash, S., & Sharma, H. D. (1991).** *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Schanz, T. (1999).** Formulation and verification of the Hardening-Soil Model. RBJ Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, 281-290.
- TS EN 1536. (2010).** *Özel Jeoteknik Uygulamalar, Delme (fore) Kazıklar – Yerinde dökme betonarme kazıklar*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Toğrol, E., & Oğuz, T. (2003).** *Kazıklı Temeller*. İstanbul: Birsan Yayınevi.

Tomlinson, M., & Woodward, J. (2008). *Pile design and construction practice*. CRC press.

Tomlinson, M. J., & Boorman, R. (2001). *Foundation design and construction*. Pearson education.

Yankı, O. (2015). *İki yönlü statik yükleme deneyi ve nümerik analizlerle kazık davranışının incelenmesi* (Doctora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

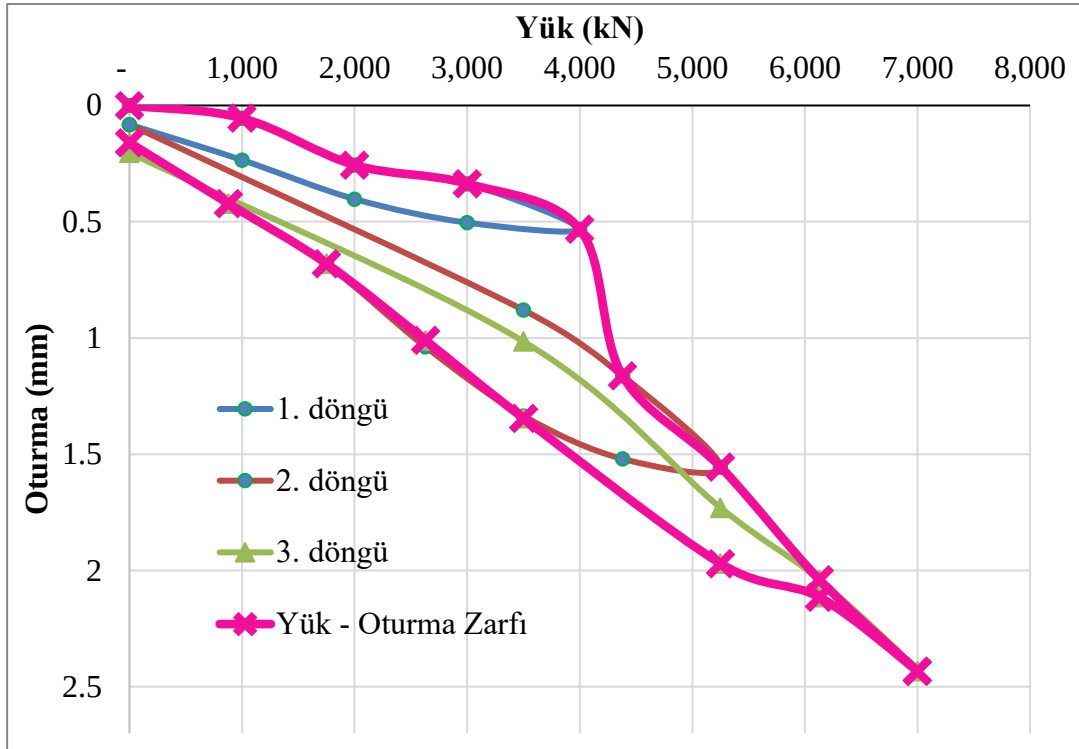
Zhang, L. (2004). *Drilled shafts in rock: analysis and design*. CRC press.

Url-1 < <https://www.insaatim.com/fore-kazik-uygulamasi/>>, 19.12.2022 tarihinde alındı.

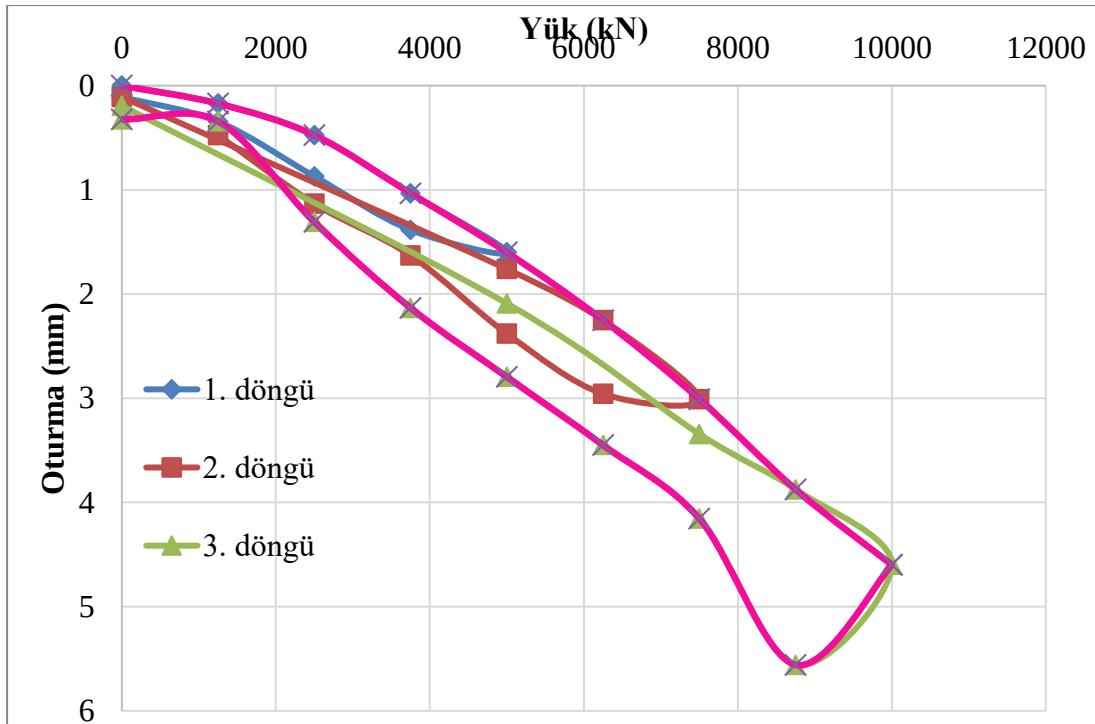
Url-2 < <http://www.zeminarastirma.com/referanslar/fore-kazik-yapim-asamalari/>>, 19.12.2022 tarihinde alındı.

EKLER

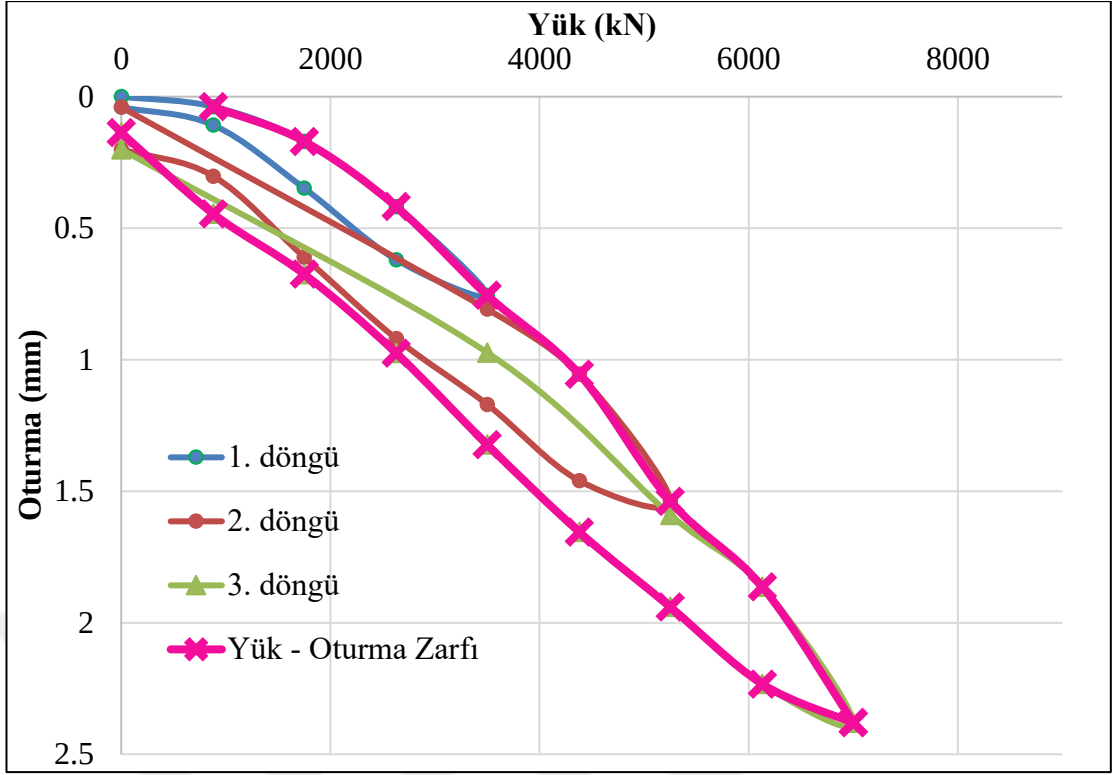
EK A:Yüklemeye Testi sonuçları



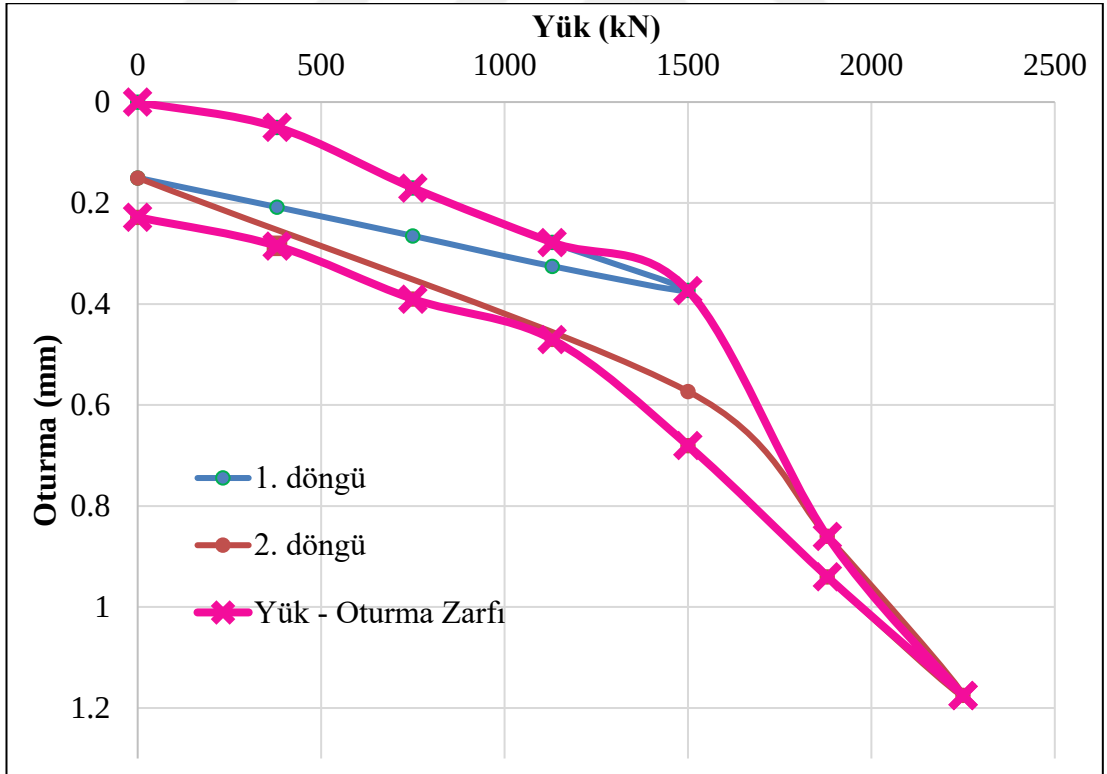
Şekil A. 1 : No: 2 yüklemeye deneyi yük – oturma grafiği.



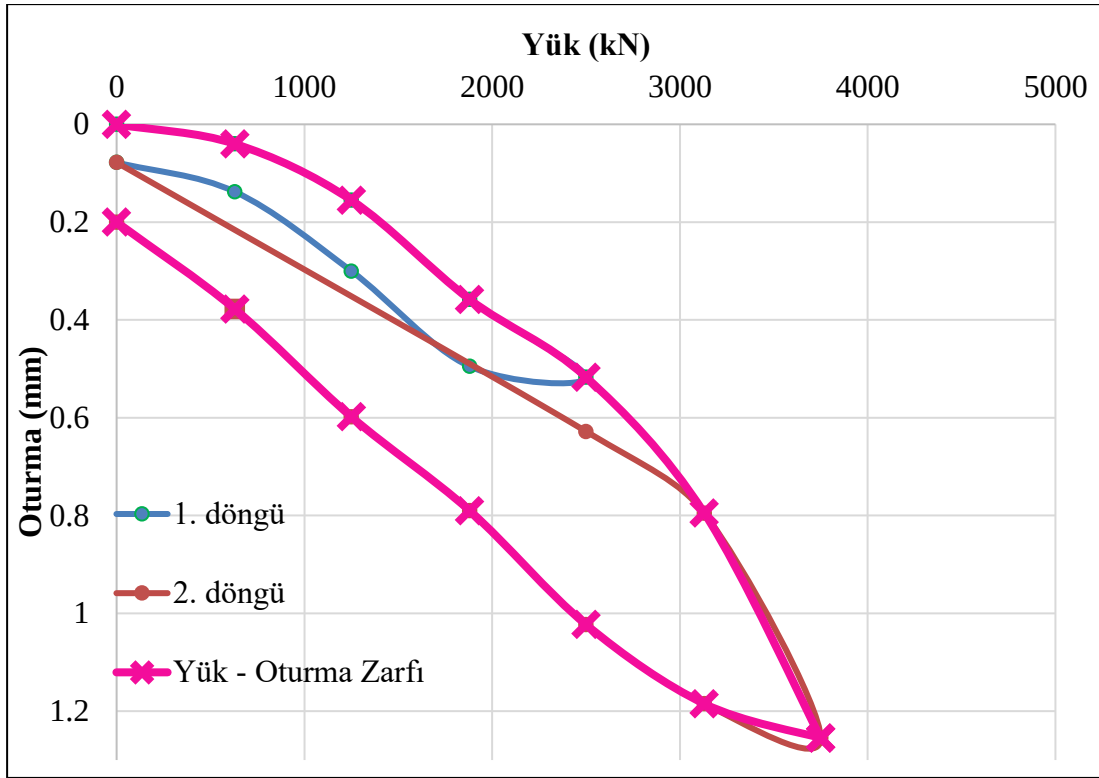
Şekil A.2 : No: 3 yüklemeye deneyi yük – oturma grafiği.



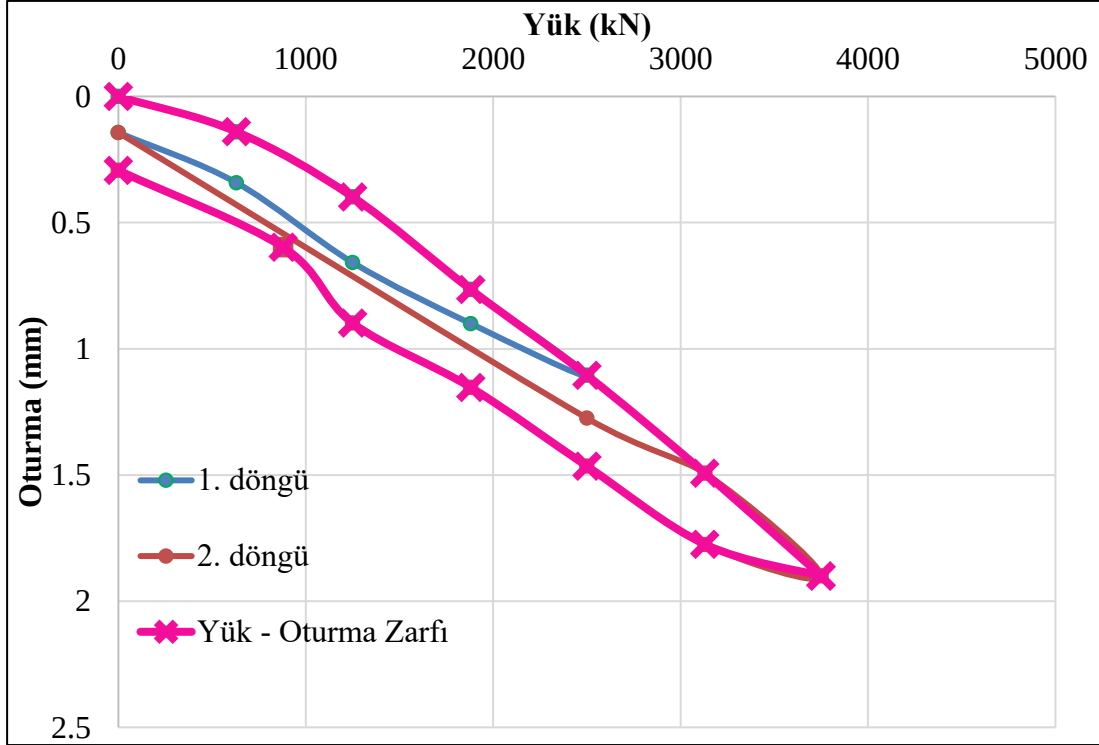
Şekil A.3 : No: 4 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.



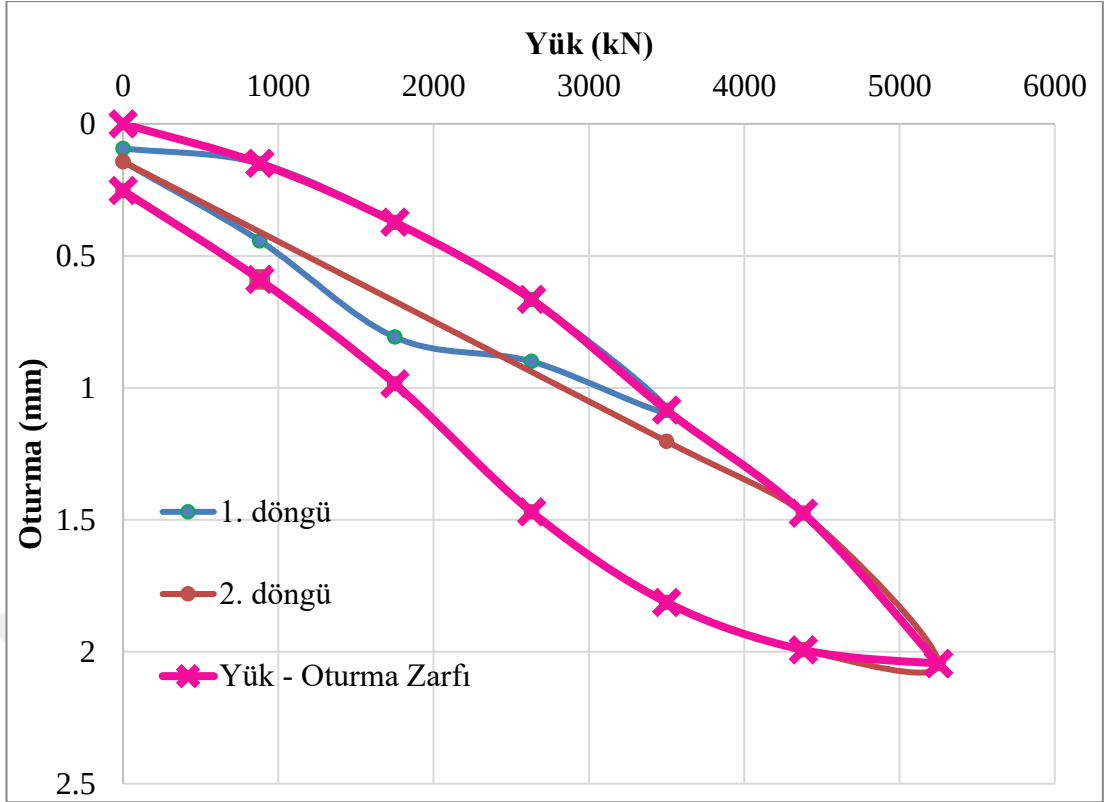
Şekil A.4 : No: 5 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.



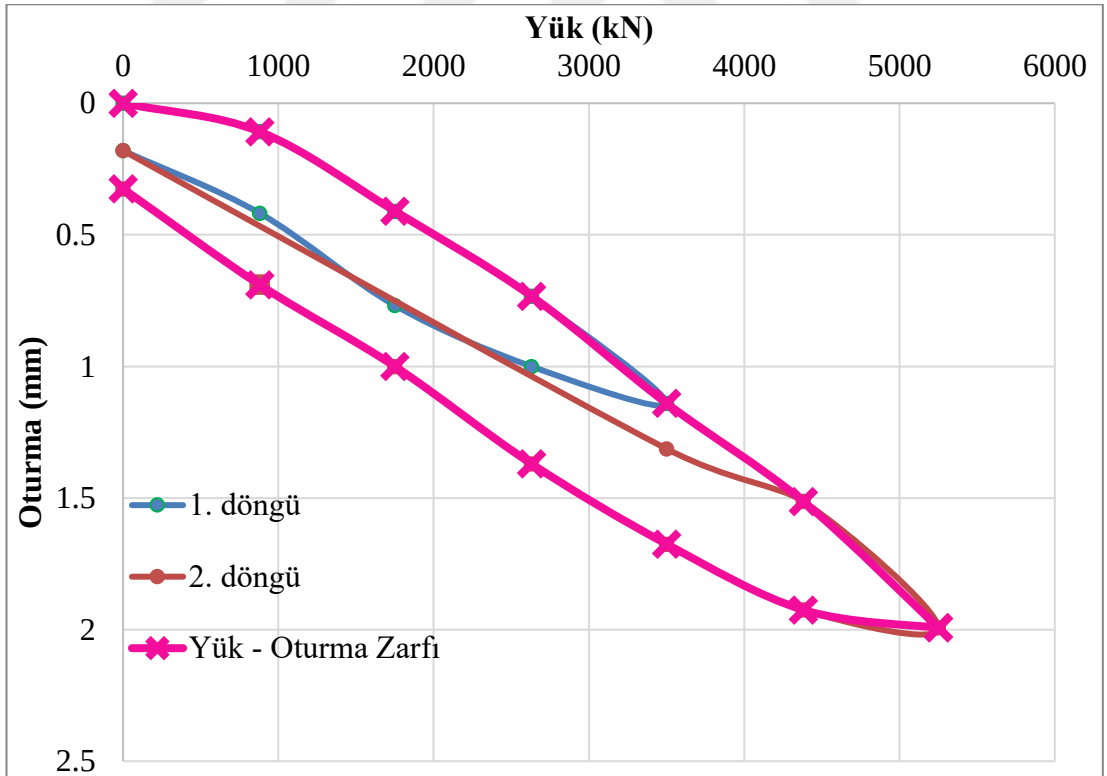
Şekil A.5 : No: 6 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.



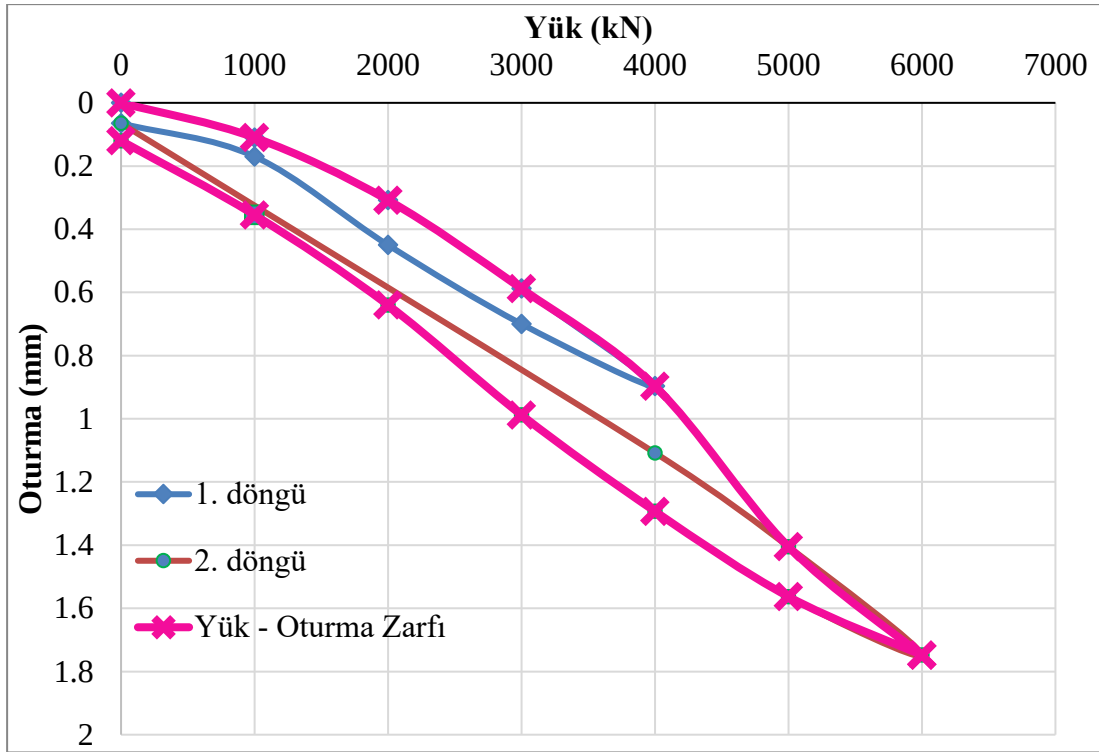
Şekil A.6 : No: 7 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.



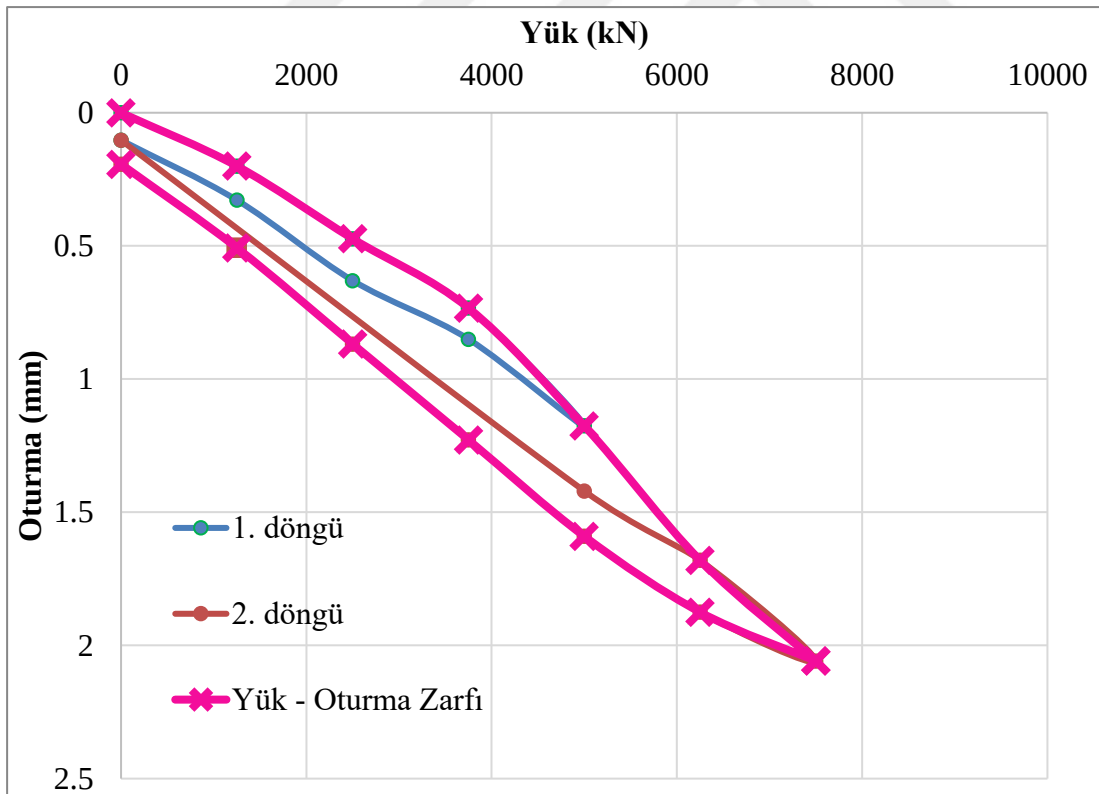
Şekil A. 7 : No: 8 yükleme deneyi yük – oturma grafiği



Şekil A.8 : No: 9 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.

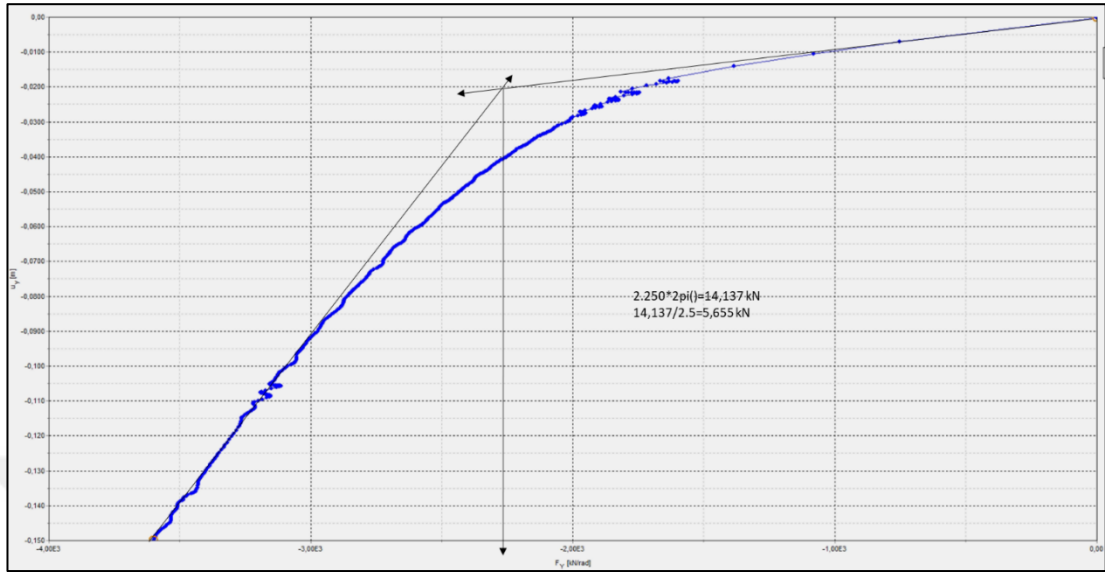


Şekil A.9 : No: 10 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.

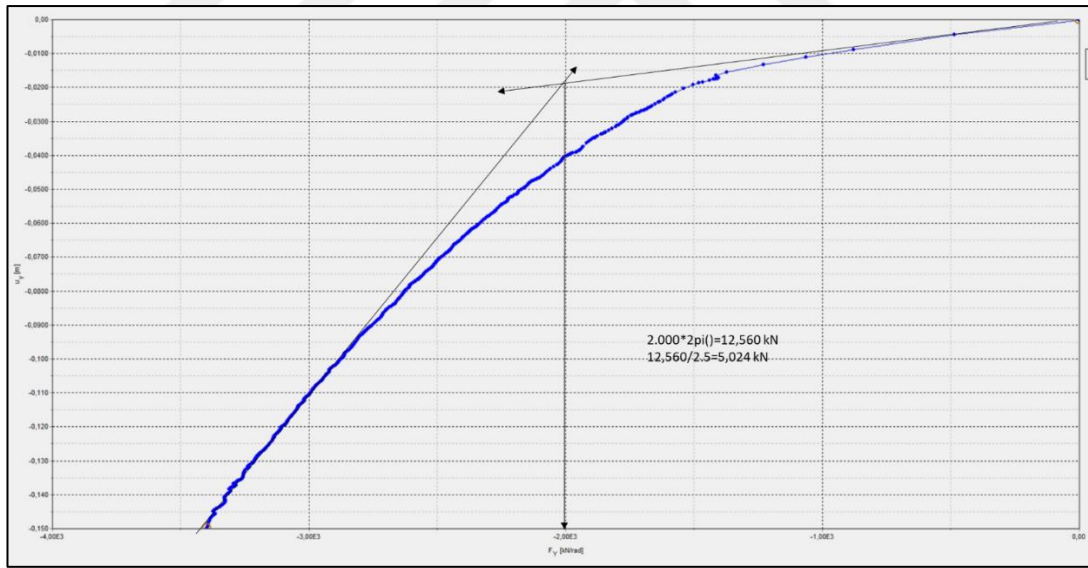


Şekil A. 10 : No: 11 yükleme deneyi yük – oturma grafiği.

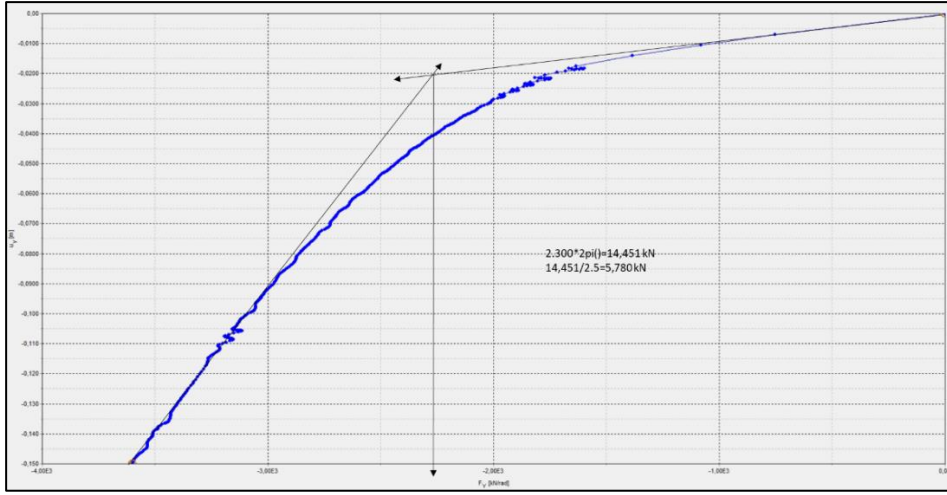
EK B: 2D Plaxis sonuçları



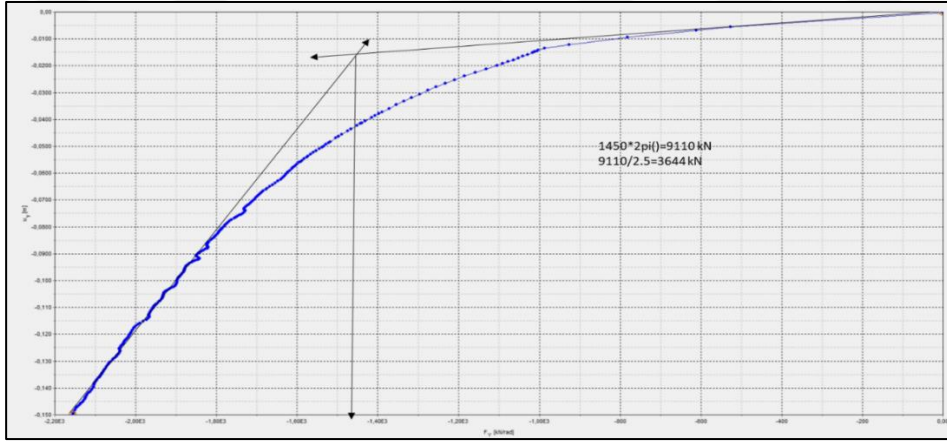
Şekil B.1 : No: 1 & 10 (P6) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.



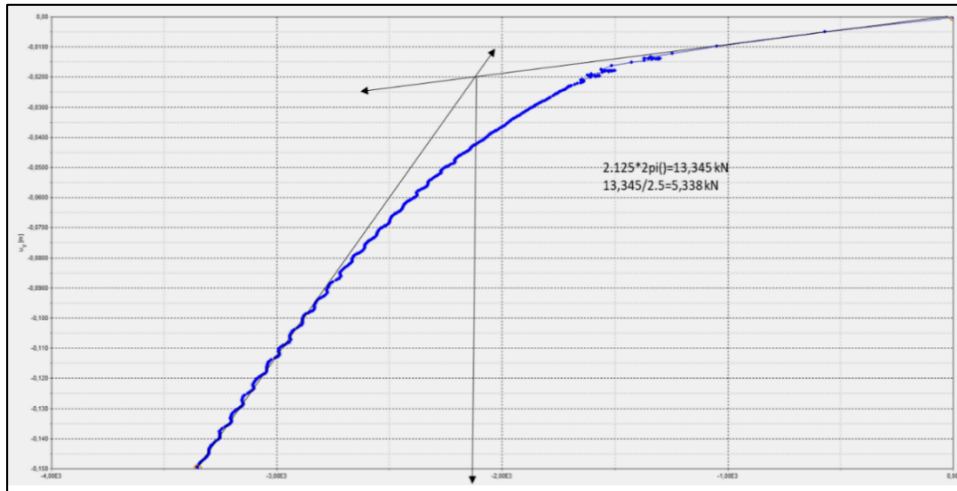
Şekil B.2 : No: 2, 4, 8 ve 9 (P5) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.



Şekil B. 3 : No: 3 & 11 (P8) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.

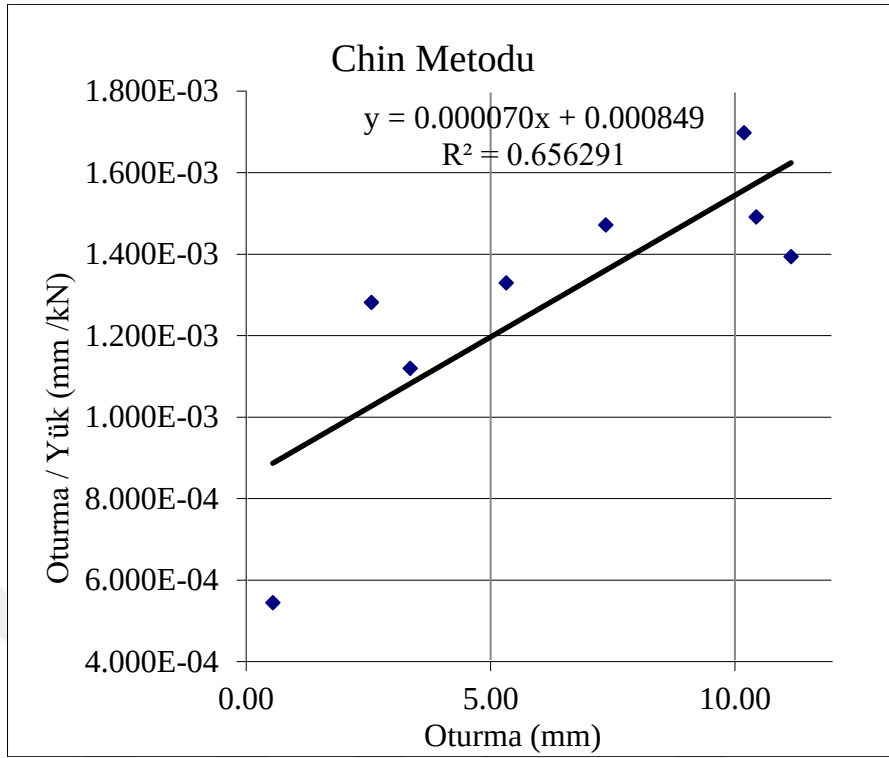


Şekil B.4 : No: 5 (P2) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.

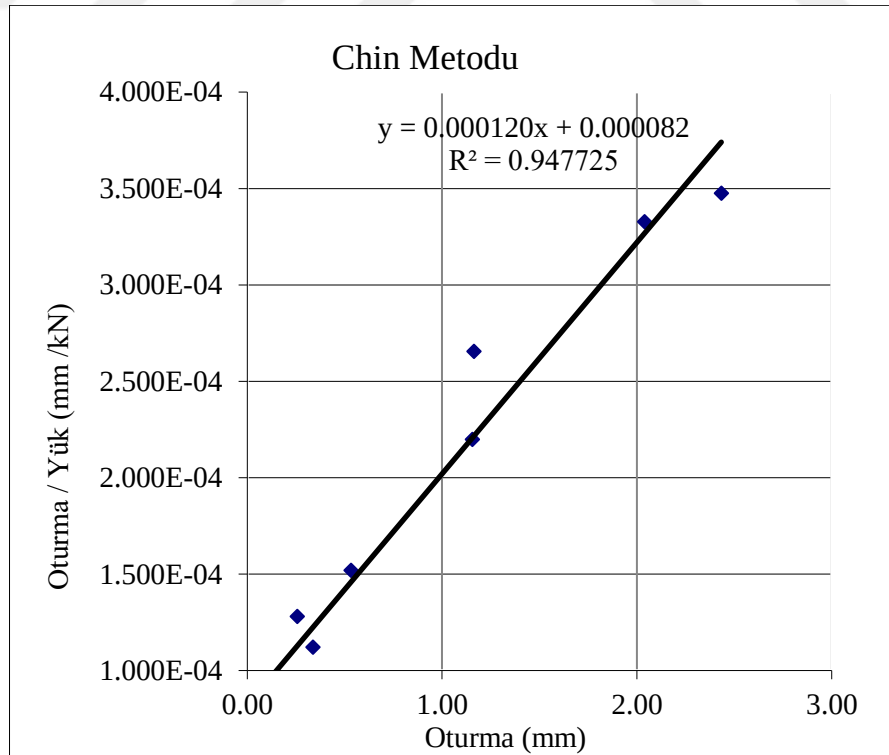


Şekil B. 5 : No: 6 & 7 (P3) yükleme deneyleri sonlu elemanlar yöntemi ile nihai taşıma kapasitesi hesap sonucu.

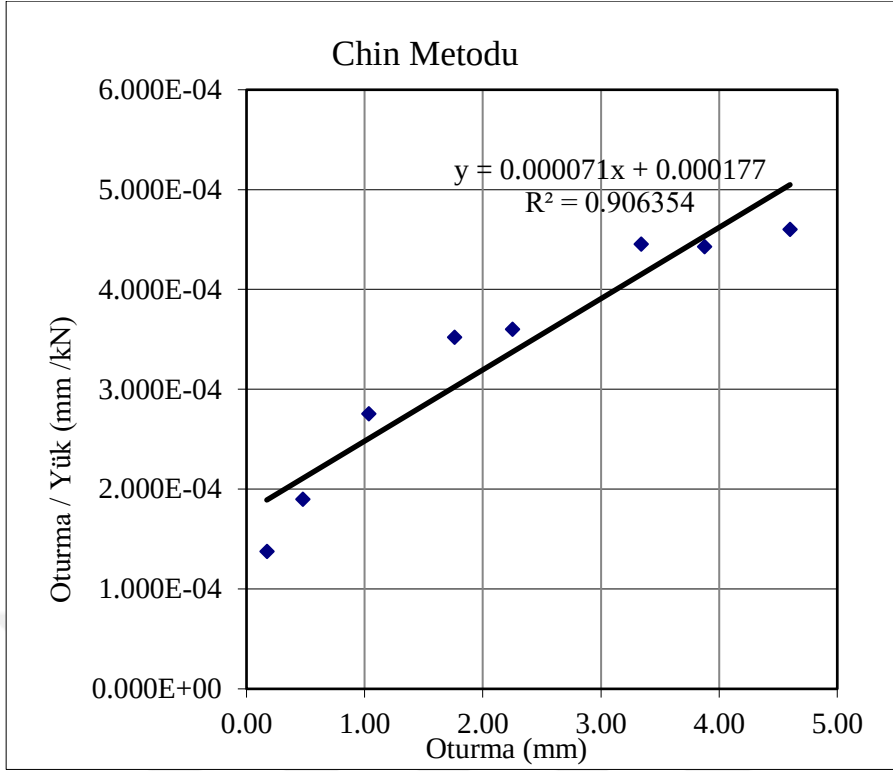
EK C: Chin yöntemi grafikleri



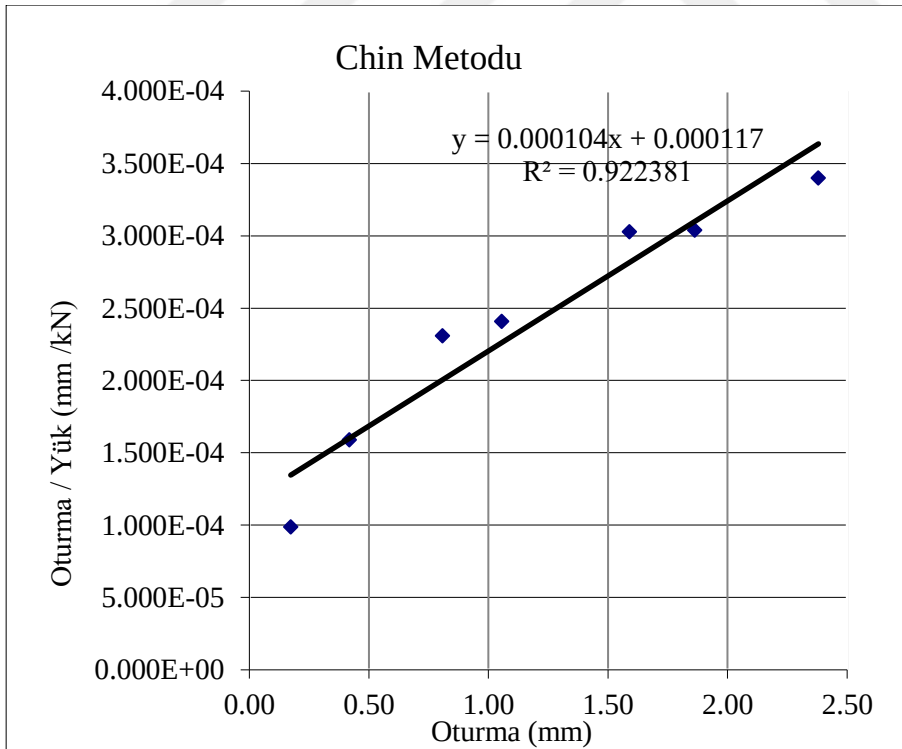
Şekil C.1 : No: 1 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



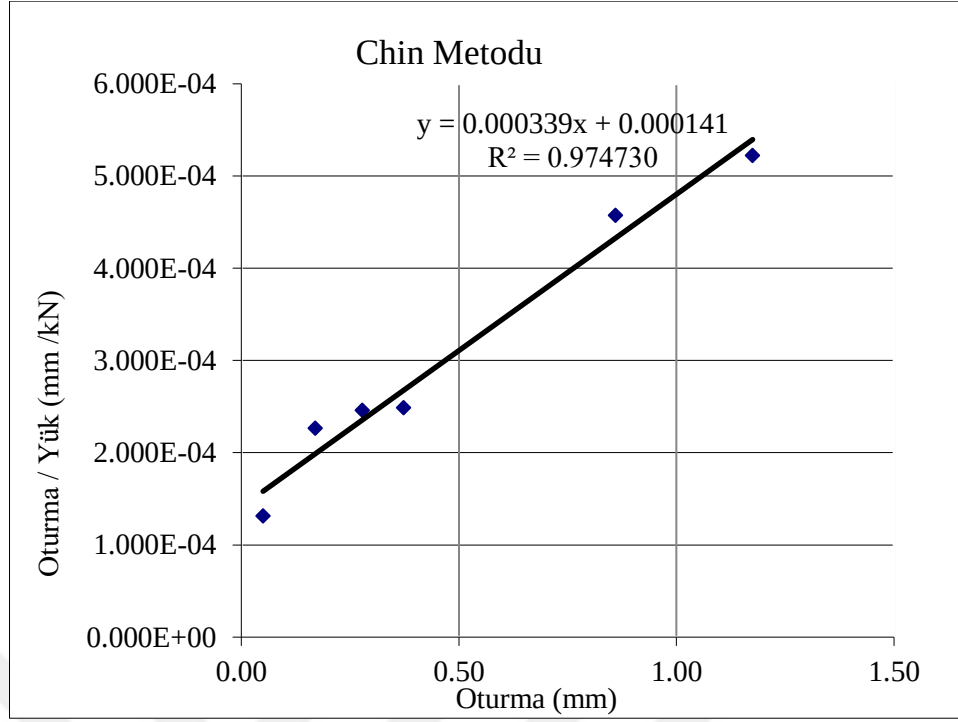
Şekil C.2 : No : 2 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



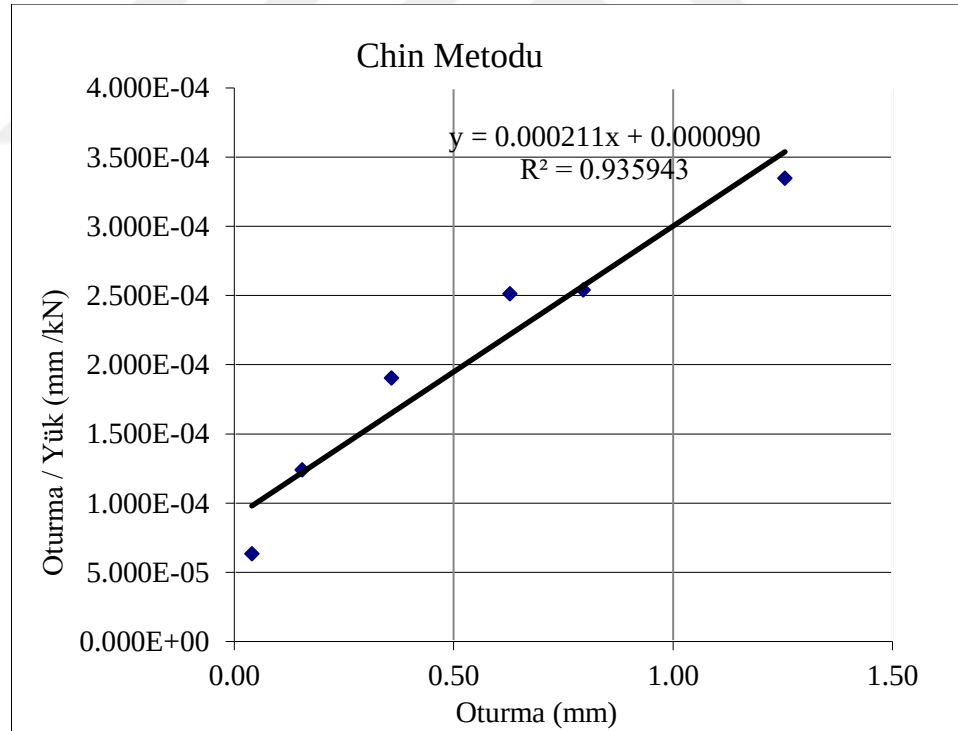
Şekil C.3 : No: 3 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



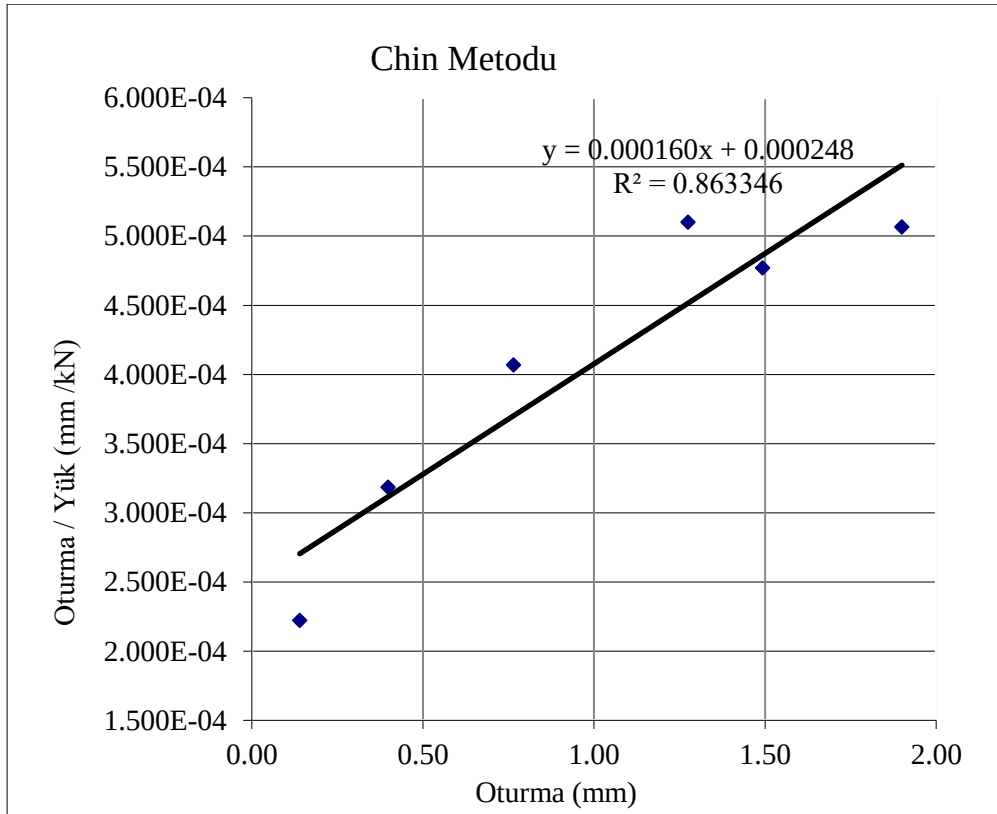
Şekil C.4 : No: 4 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



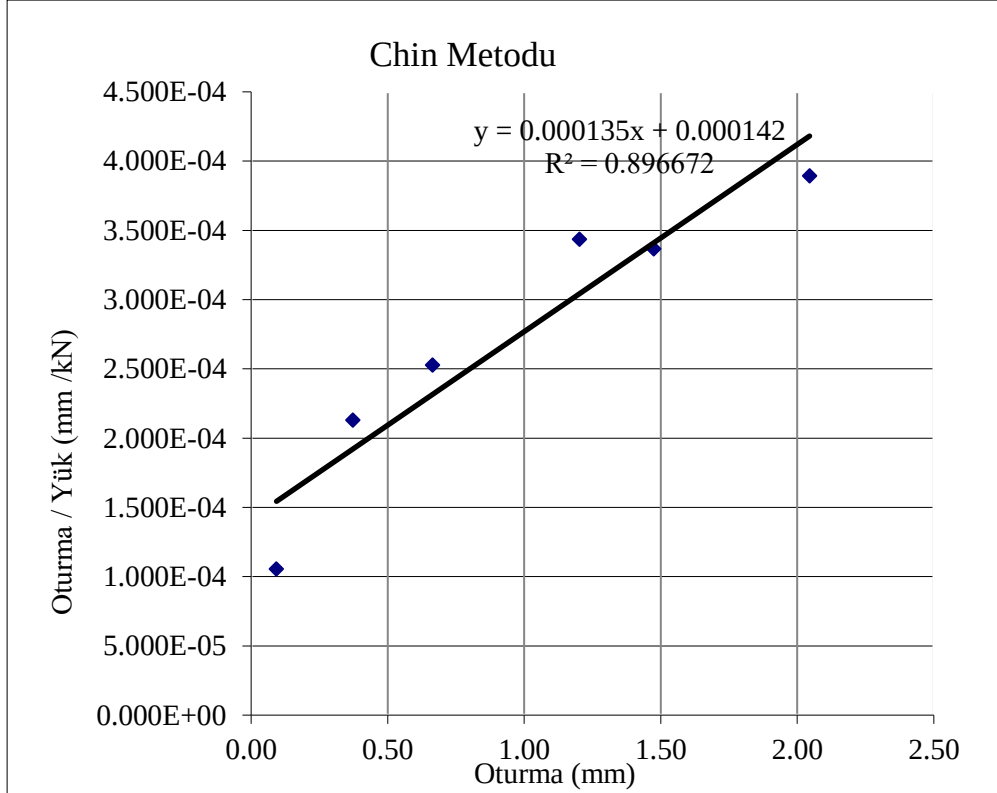
Şekil C.5 : No: 5 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



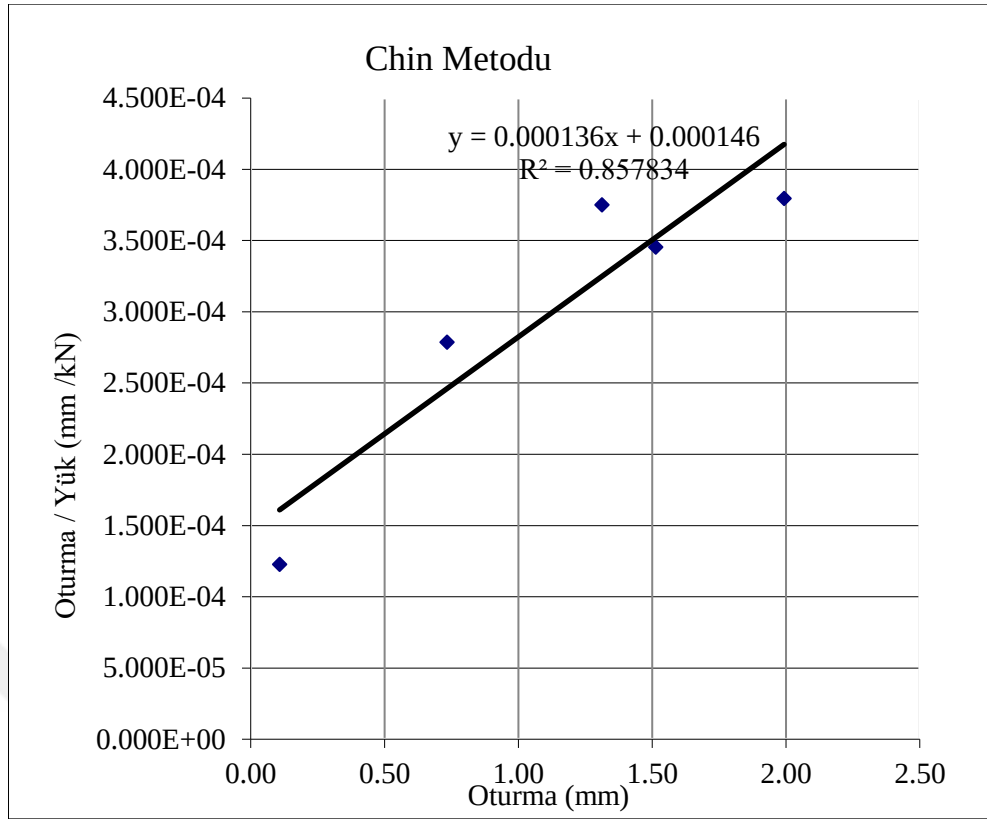
Şekil C.6 : No: 6 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



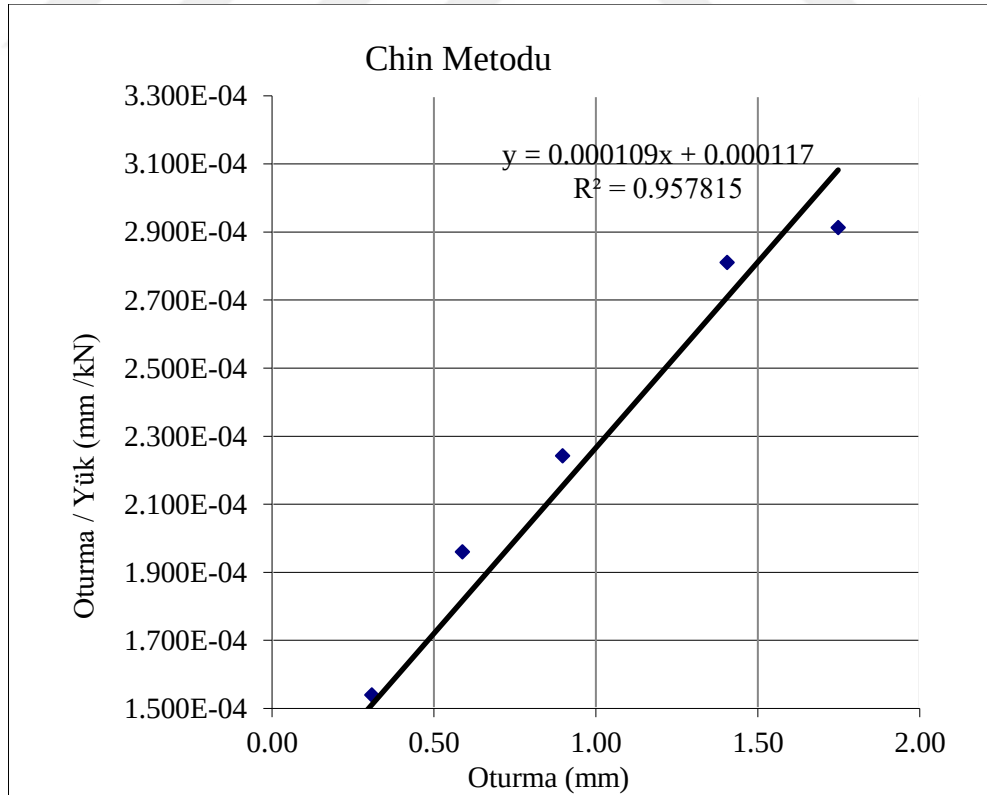
Şekil C. 7 : No: 7 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



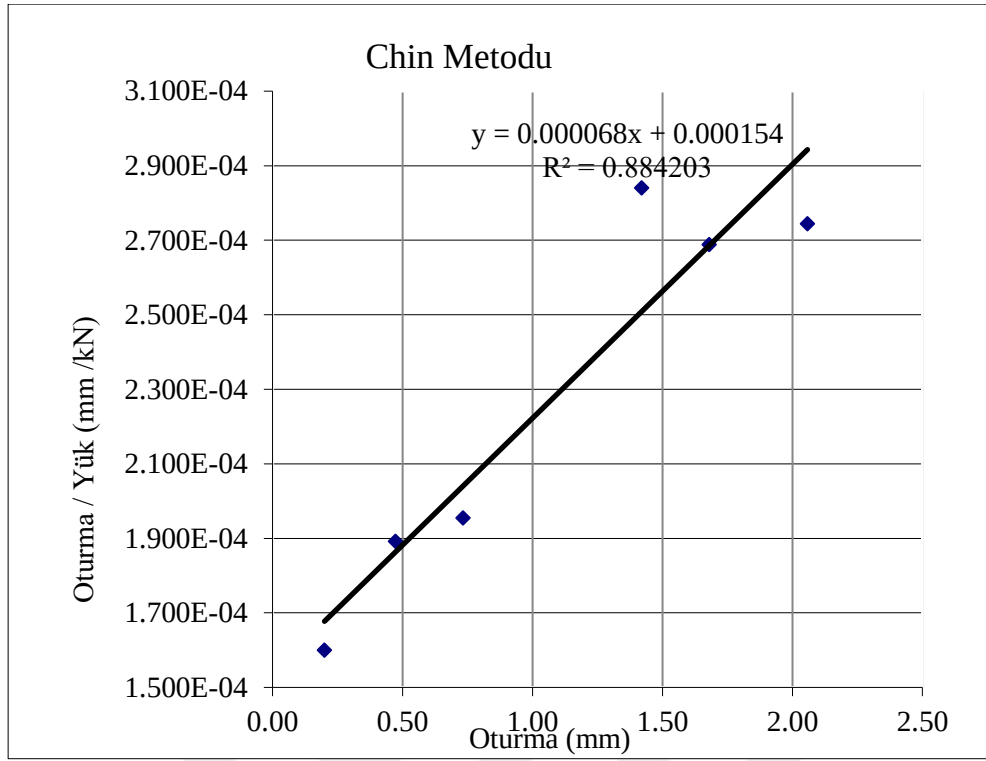
Şekil C.8 : No: 8 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.



Şekil C.9 : No: 9 yükleme deneyi Chin Yöntemiyle yorumlanması

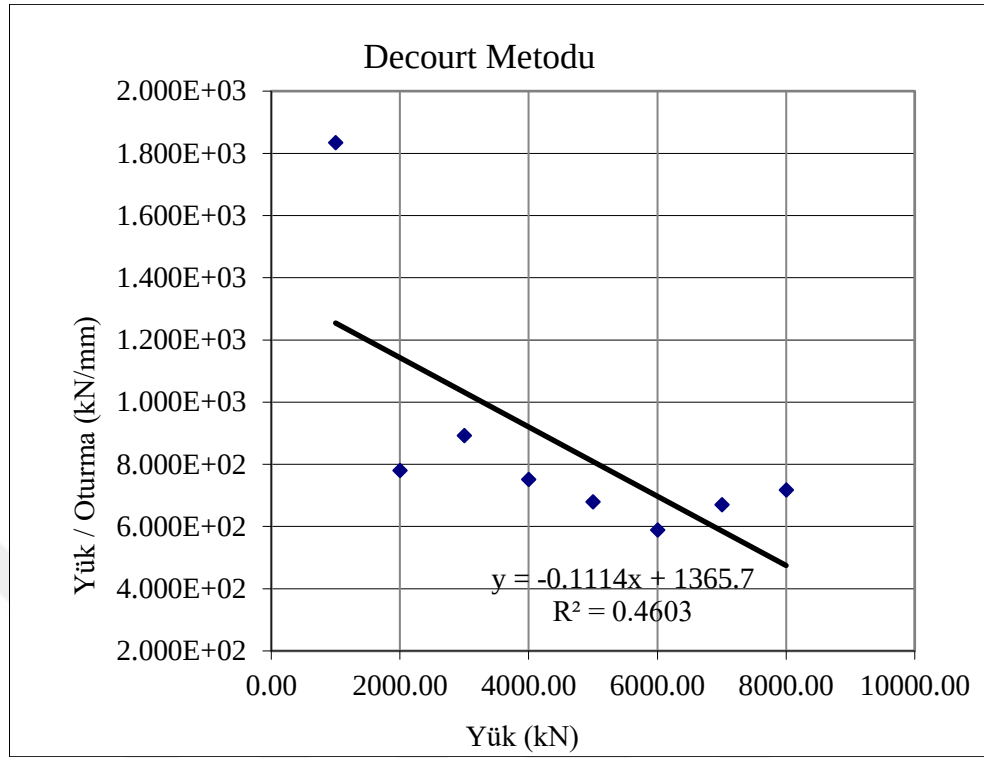


Şekil C.10 : No: 10 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması

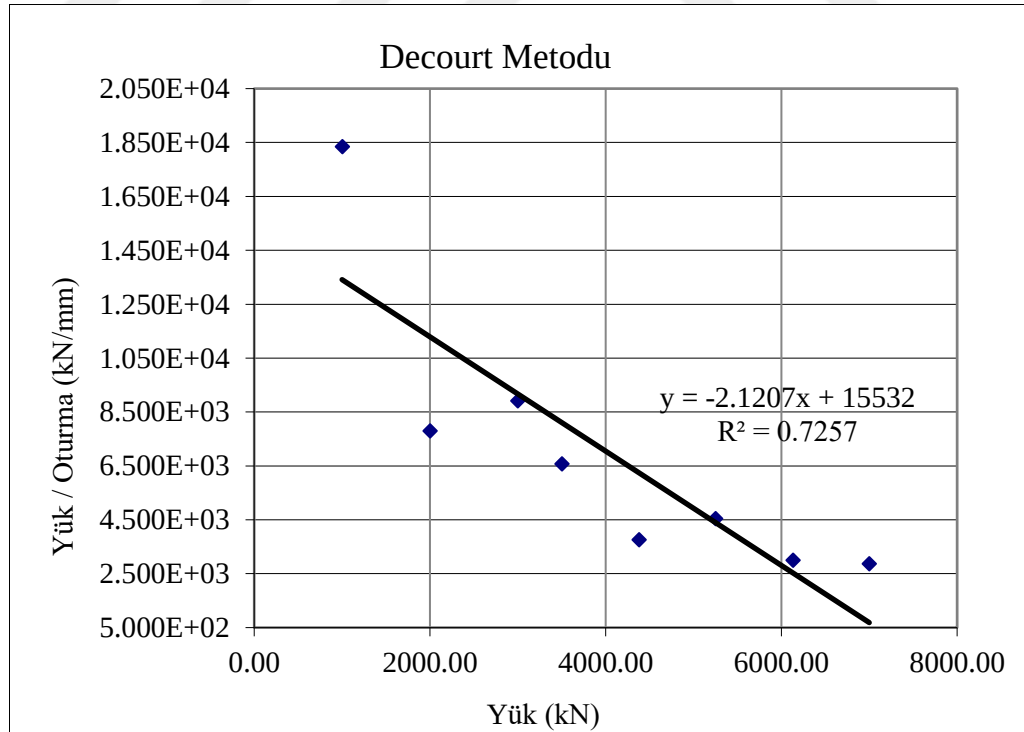


Şekil C.0.11 : No: 11 yükleme deneyi Chin yöntemiyle yorumlanması.

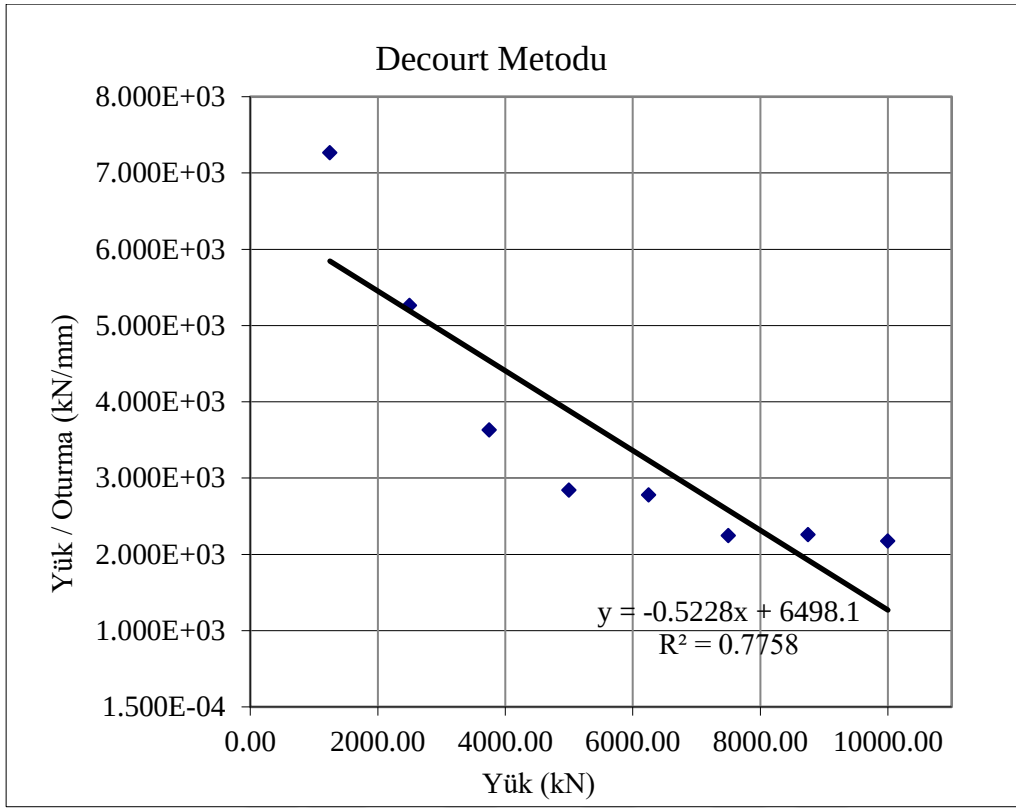
EK D:Decourt yöntemi grafikleri



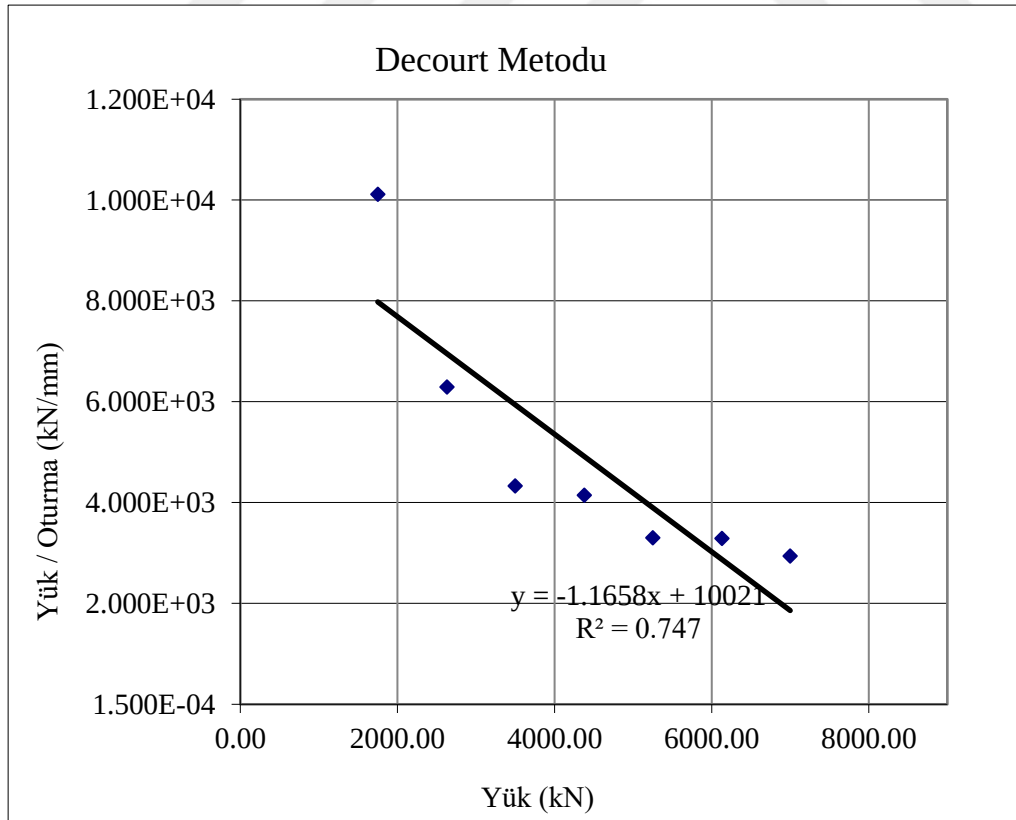
Şekil D.1: No: 1 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



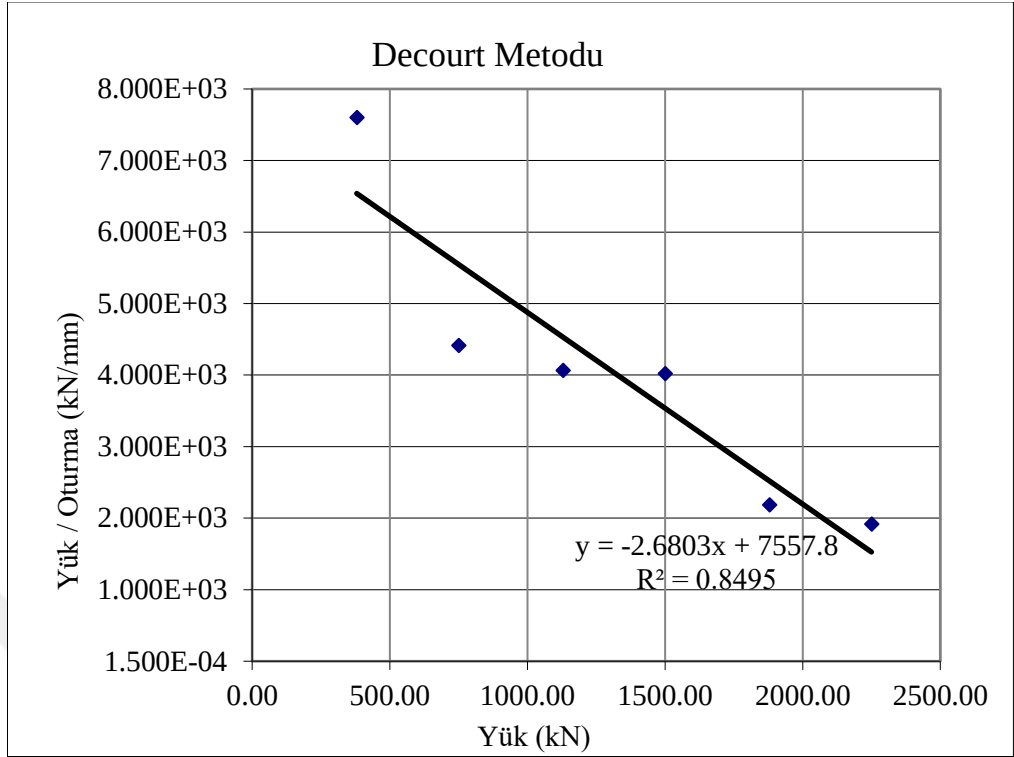
Şekil D.2 : No: 2 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



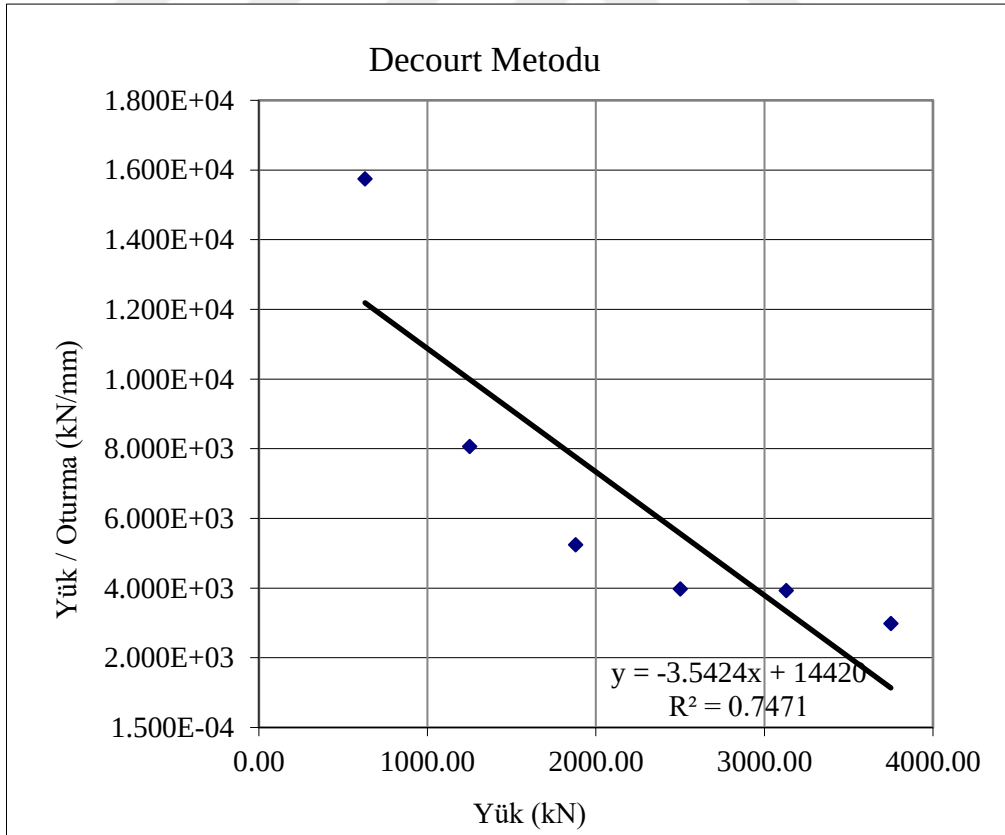
Şekil D.3 : No: 3 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



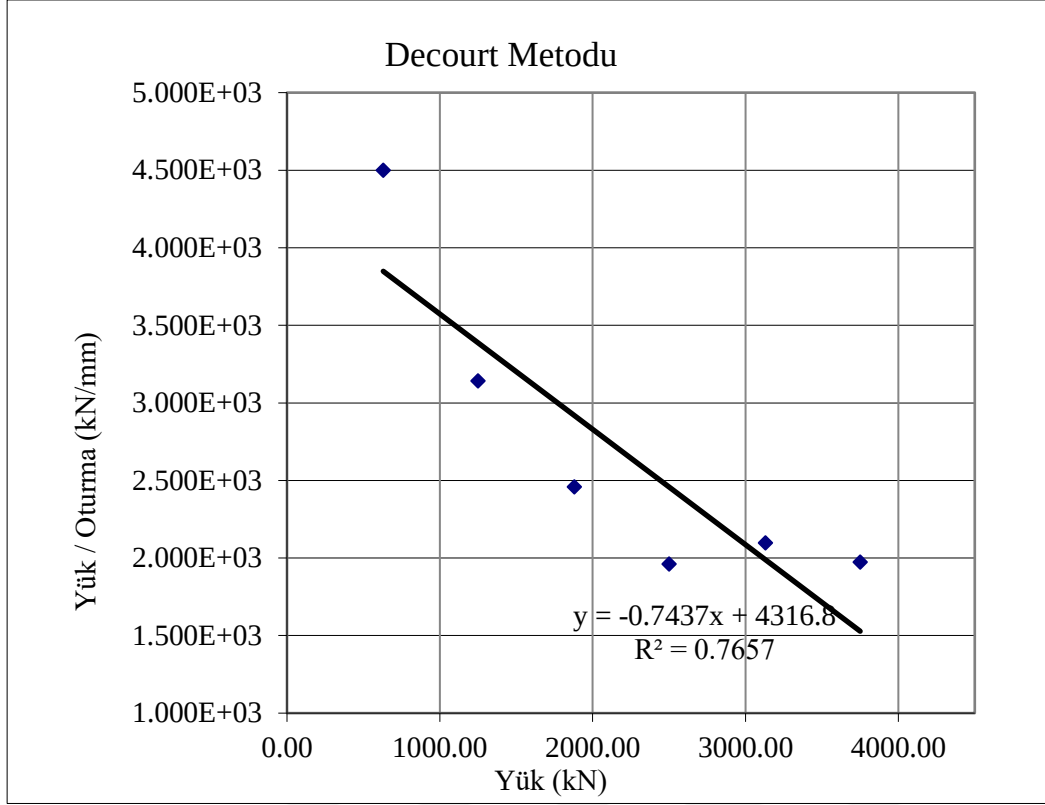
Şekil D.4 : No: 4 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



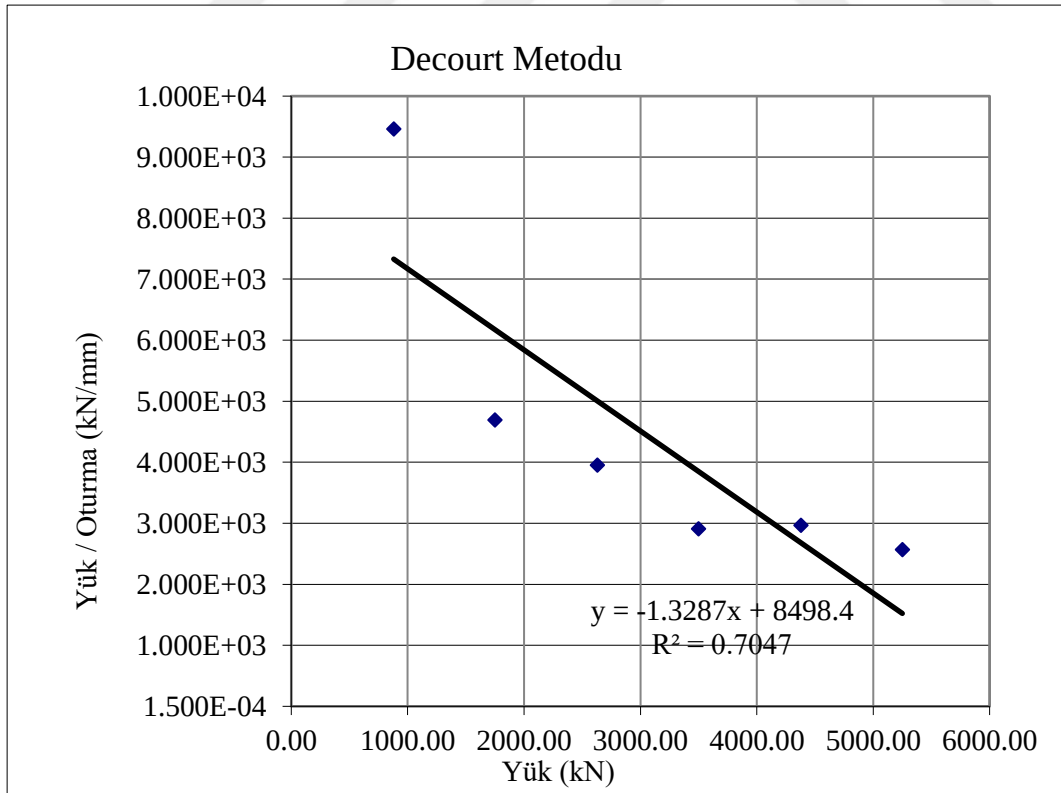
Şekil D.5 : No: 5 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



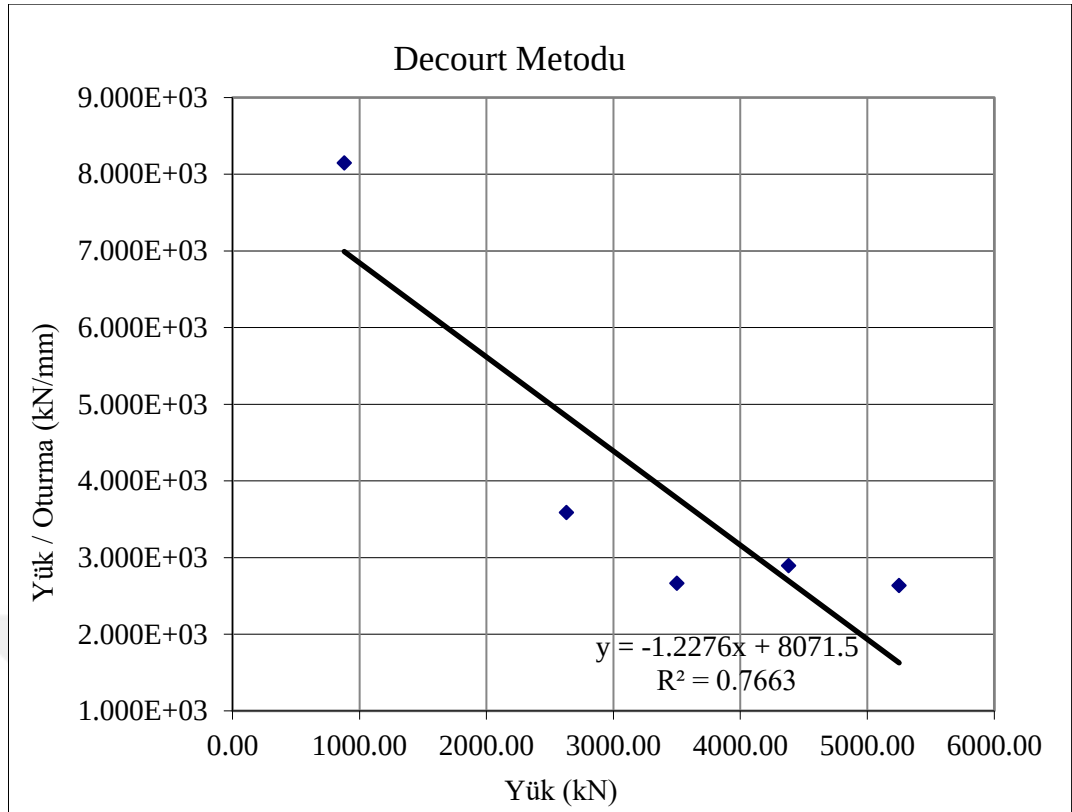
Şekil D.6 : No: 6 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



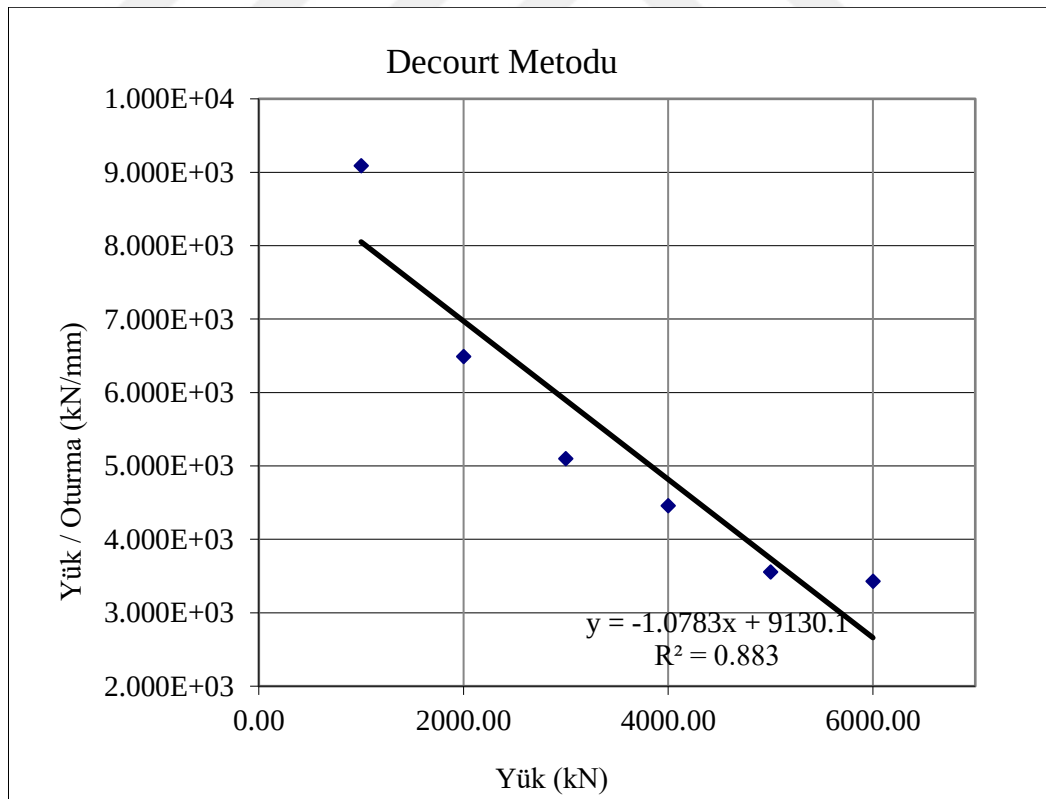
Şekil D.7 : No: 7 yükleme deneyi Decourt Yöntemiyle yorumlanması



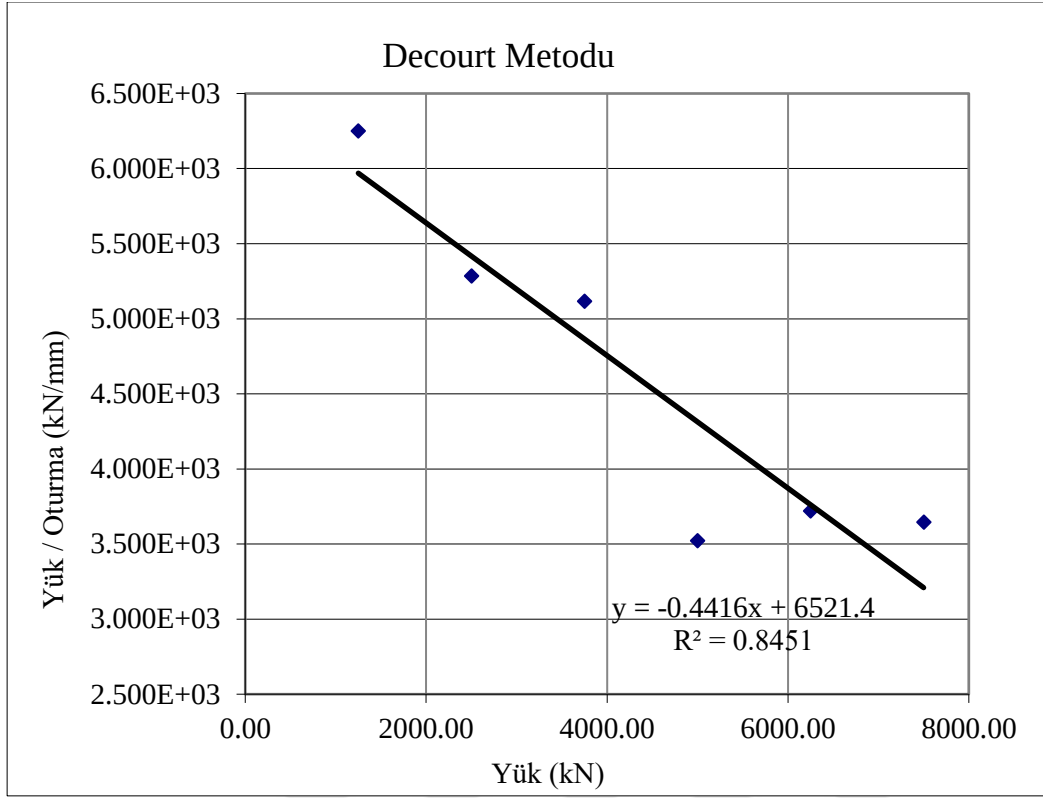
Şekil D.8 : No: 8 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.



Şekil D.9 : No: 9 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.

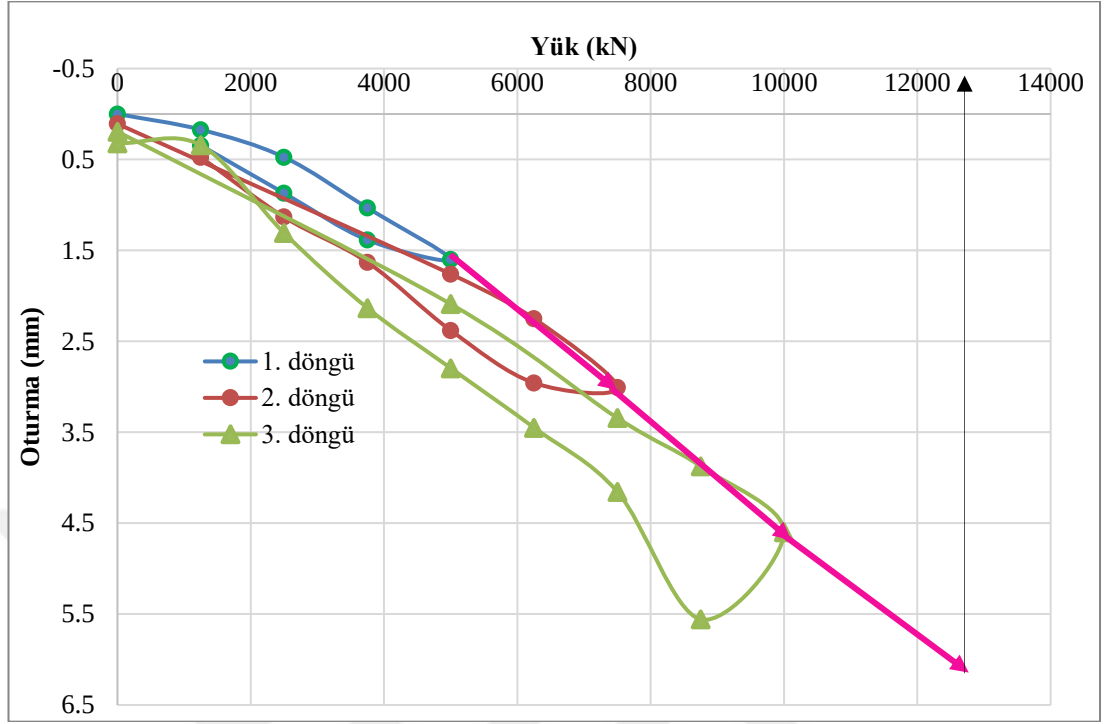


Şekil D.10 : No: 10 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.

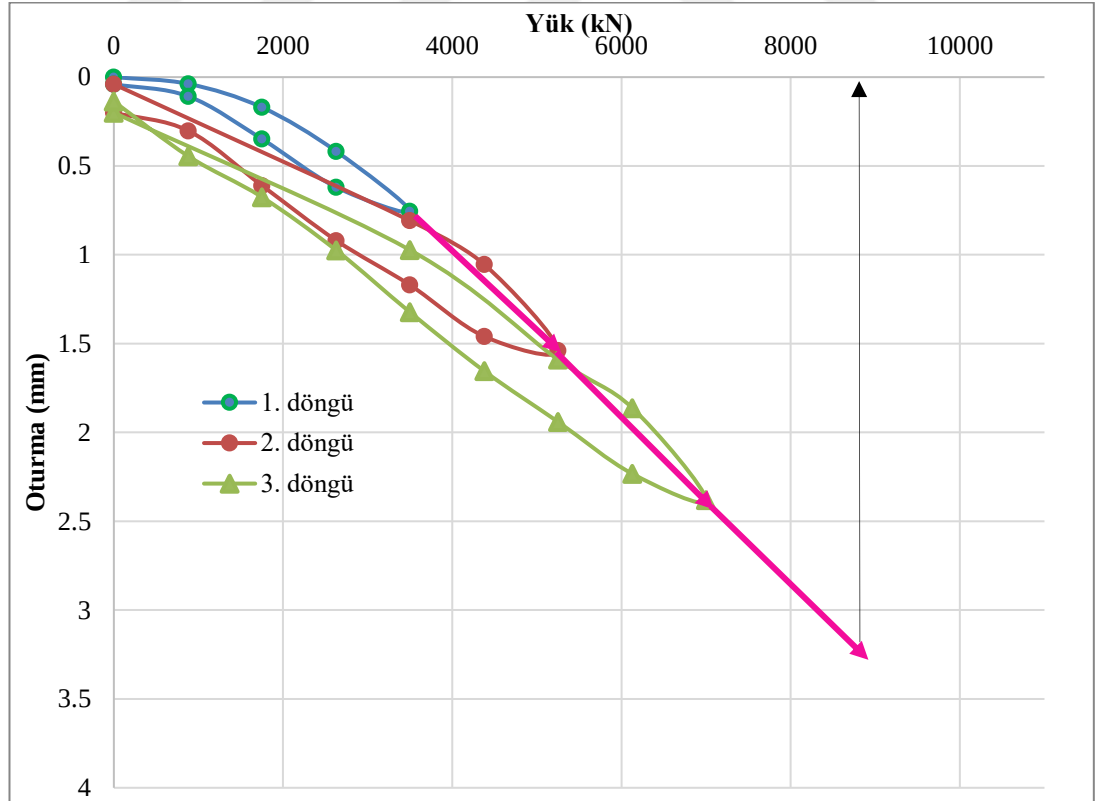


Şekil D. 11. No: 11 yükleme deneyi Decourt yöntemiyle yorumlanması.

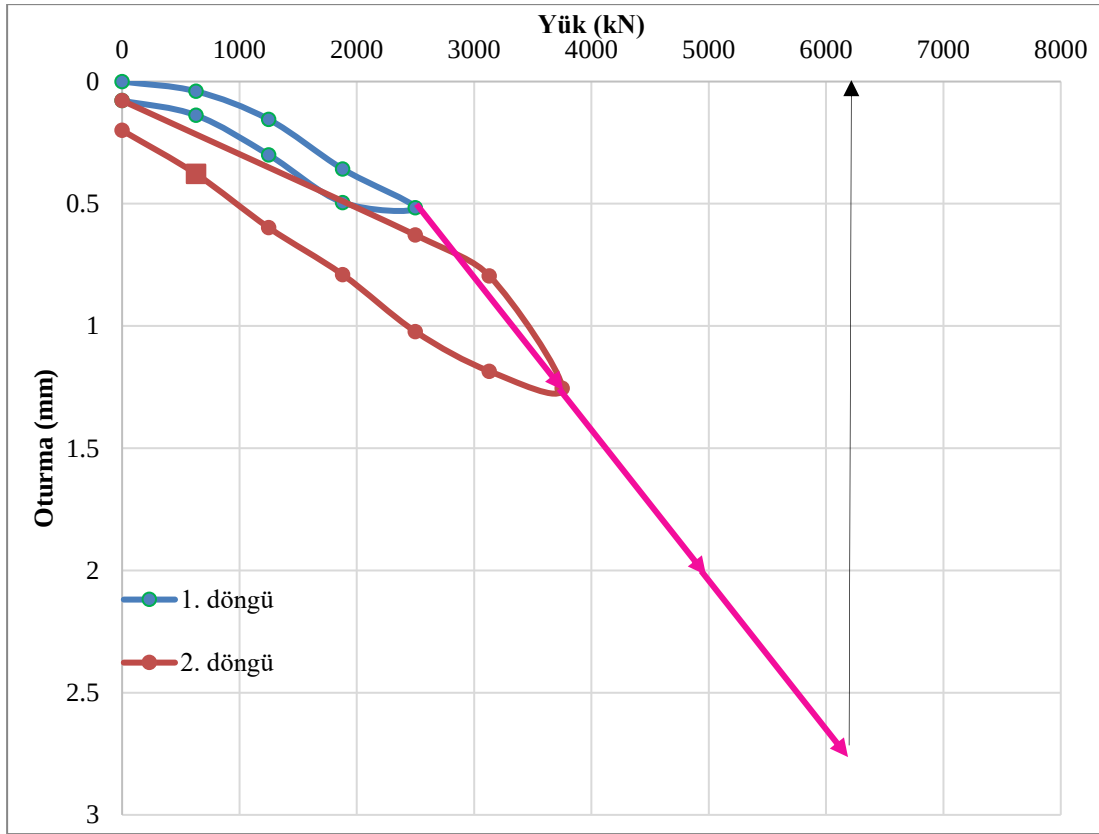
Ek E: Önerilen yöntemin testlere uygulanışı



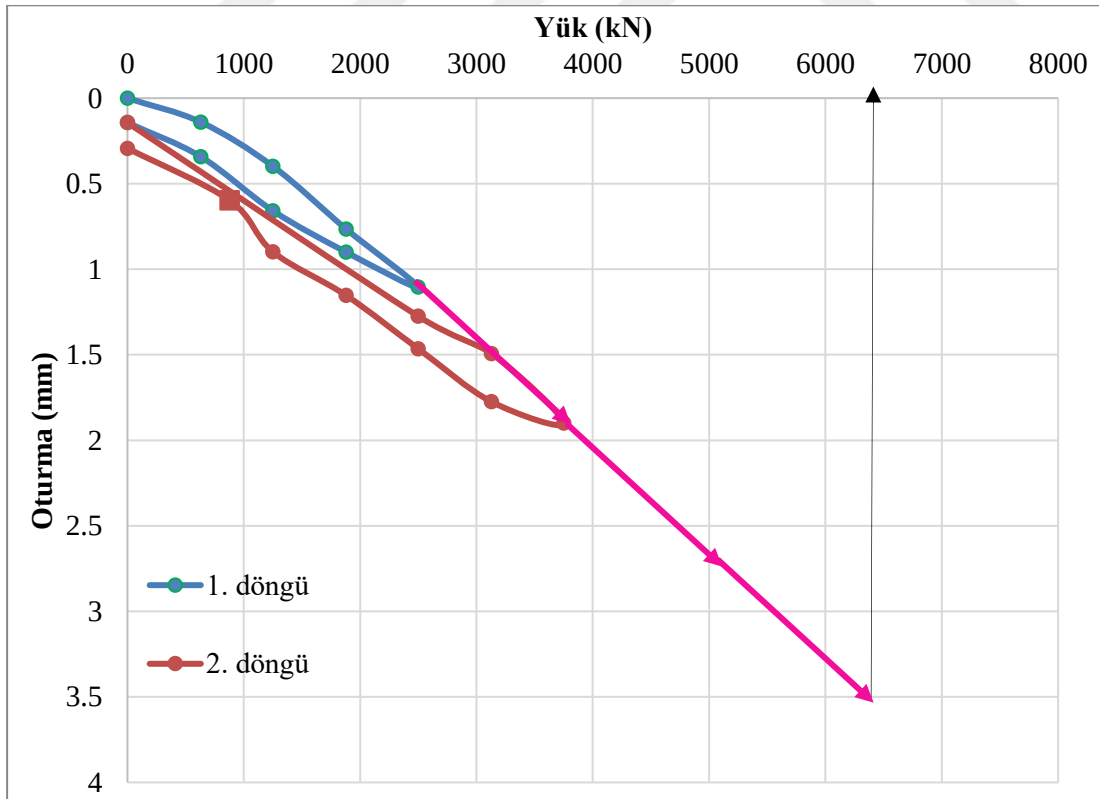
Şekil E.1: No: 3 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



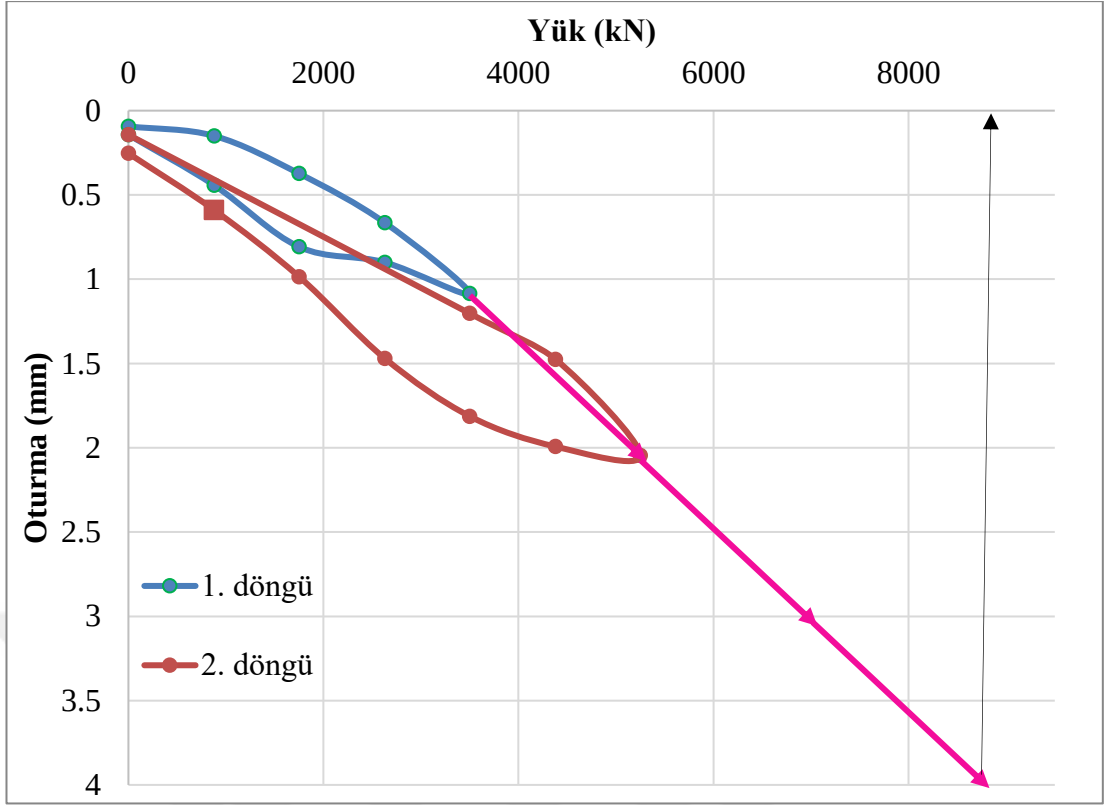
Şekil E.2 : No: 4 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



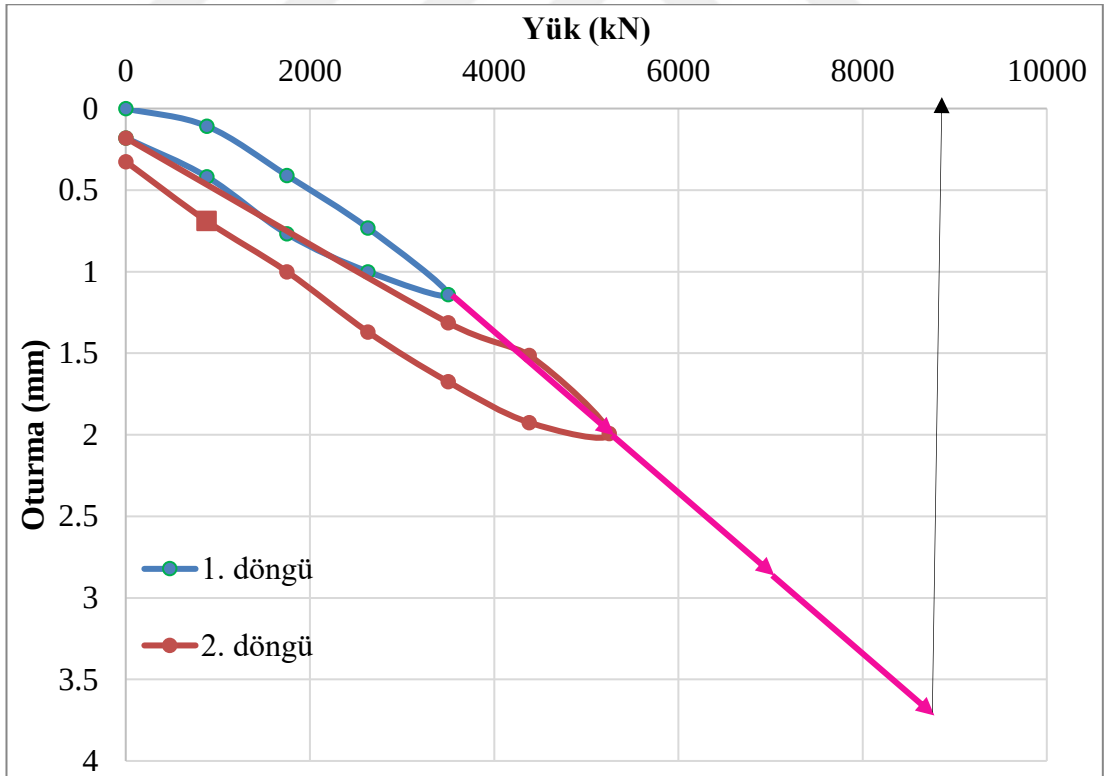
Şekil E.3 : No: 6 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



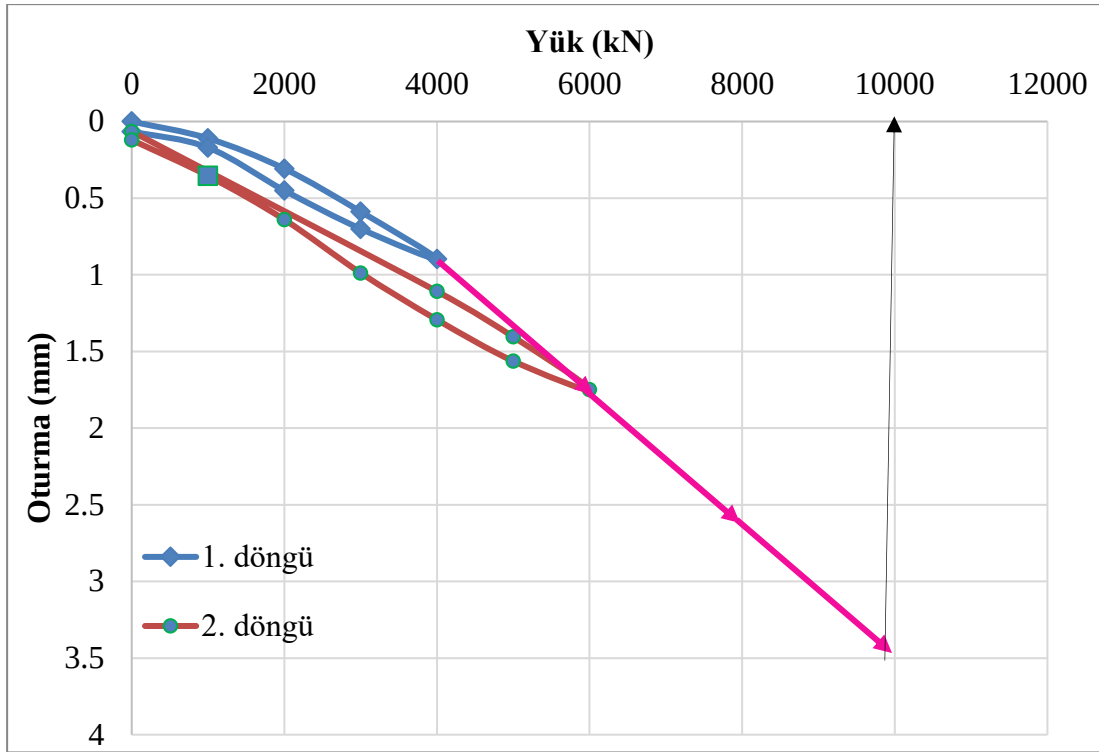
Şekil E.4 : No: 7 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



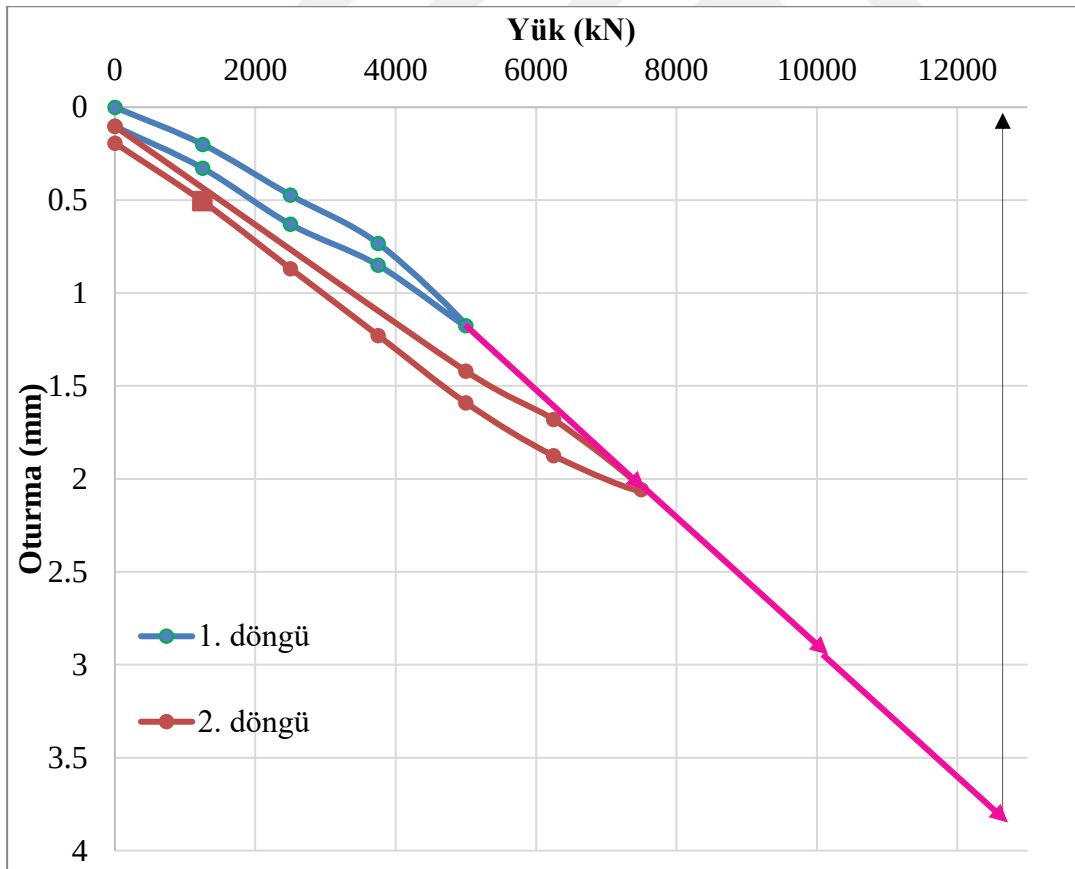
Şekil E.5 : No: 8 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



Şekil E.6 : No: 9 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



Şekil E.7 : No: 10 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.



Şekil E.8 : No: 11 yükleme deneyinin yeni yöntemle kapasite hesabı.

Ek F: 1 numaralı kazık yükleme deneyine ait yük kademeleri ve alınan okumalar

Date	Time	Load (kN)	Dial Gauge Readings (mm)					Settlement (mm)
			Gauge1	Gauge2	Gauge3	Gauge4	Avg	
December 21, 2019	14:20	0.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.000
December 21, 2019	14:20	1,000.00	5.91	5.69	5.16	5.35	5.53	0.528
December 21, 2019	14:25		5.91	5.70	5.16	5.38	5.54	0.538
December 21, 2019	14:30		5.91	5.70	5.16	5.38	5.54	0.538
December 21, 2019	14:35		5.91	5.70	5.16	5.38	5.54	0.538
December 21, 2019	14:50		5.91	5.70	5.16	5.38	5.54	0.538
December 21, 2019	15:05		5.91	5.71	5.16	5.38	5.54	0.540
December 21, 2019	15:20		5.91	5.72	5.17	5.38	5.55	0.545
December 21, 2019	15:20	2,000.00	8.86	8.09	6.18	6.98	7.53	2.528
December 21, 2019	15:25		8.86	8.09	6.18	6.98	7.53	2.528
December 21, 2019	15:30		8.89	8.11	6.18	6.98	7.54	2.540
December 21, 2019	15:35		8.90	8.12	6.18	6.99	7.55	2.548
December 21, 2019	15:50		8.90	8.12	6.19	7.00	7.55	2.553
December 21, 2019	16:05		8.90	8.12	6.19	7.00	7.55	2.553
December 21, 2019	16:20		8.91	8.12	6.20	7.02	7.56	2.563
December 21, 2019	16:20	3,000.00	9.25	9.26	6.81	7.84	8.29	3.291
December 21, 2019	16:25		9.29	9.29	6.82	7.86	8.32	3.315
December 21, 2019	16:30		9.32	9.31	6.84	7.89	8.34	3.340
December 21, 2019	16:35		9.34	9.32	6.85	7.89	8.35	3.350
December 21, 2019	16:50		9.35	9.33	6.85	7.89	8.36	3.355
December 21, 2019	17:05		9.35	9.34	6.85	7.89	8.36	3.358
December 21, 2019	17:20		9.35	9.34	6.86	7.90	8.36	3.363
December 21, 2019	17:20	4,000.00	12.56	11.23	7.84	9.25	10.22	5.220
December 21, 2019	17:25		12.60	11.26	7.86	9.28	10.25	5.250
December 21, 2019	17:30		12.65	11.26	7.86	9.30	10.27	5.268
December 21, 2019	17:35		12.67	11.27	7.86	9.30	10.28	5.275
December 21, 2019	17:50		12.70	11.31	7.88	9.33	10.31	5.305
December 21, 2019	18:05		12.72	11.33	7.89	9.33	10.32	5.318
December 21, 2019	18:20		12.72	11.34	7.90	9.33	10.32	5.323
December 21, 2019	18:20	3,000.00	12.50	11.08	7.80	9.12	10.13	5.125
December 21, 2019	18:25		12.45	11.00	7.69	9.10	10.06	5.080
December 21, 2019	18:30		12.42	10.98	7.68	9.08	10.04	5.040
December 21, 2019	18:30	2,000.00	11.11	9.89	7.00	8.29	9.07	4.073
December 21, 2019	18:35		11.08	9.86	6.95	8.27	9.04	4.040
December 21, 2019	18:40		11.06	9.85	6.93	8.25	9.02	4.023
December 21, 2019	18:40	1,000.00	9.50	7.70	5.80	6.60	7.40	2.400
December 21, 2019	18:45		9.46	7.68	5.77	6.55	7.37	2.365
December 21, 2019	18:50		9.44	7.66	5.76	6.52	7.35	2.345

Şekil F.1: No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 1.

Date	Time	Load (kN)	Dial Gauge Readings (mm)					Settlement (mm)
			Guage1	Guage2	Guage3	Guage4	Avg	
December 21, 2019	18:50	0.00	6.57	6.21	5.30	5.65	5.93	0.933
December 21, 2019	18:55		6.56	6.16	5.28	5.61	5.90	0.903
December 21, 2019	19:00		6.55	6.16	5.26	5.59	5.89	0.890
December 21, 2019	19:05		6.54	6.12	5.26	5.57	5.87	0.873
December 21, 2019	19:20		6.50	6.09	5.25	5.56	5.85	0.850
December 21, 2019	19:35		6.45	6.05	5.23	5.53	5.82	0.815
December 21, 2019	19:50		6.43	6.03	5.22	5.51	5.80	0.797
December 21, 2019	19:50		13.38	11.50	7.92	9.36	10.54	5.540
December 21, 2019	19:55	4,000.00	13.40	11.53	7.93	9.38	10.56	5.560
December 21, 2019	20:00		13.41	11.54	7.94	9.39	10.57	5.570
December 21, 2019	20:05		13.42	11.55	7.95	9.39	10.58	5.578
December 21, 2019	20:20		13.42	11.56	7.95	9.40	10.58	5.583
December 21, 2019	20:35		13.42	11.57	7.97	9.42	10.60	5.595
December 21, 2019	20:50		13.42	11.59	7.98	9.44	10.61	5.608
December 21, 2019	21:20		13.42	11.60	7.98	9.45	10.61	5.613
December 21, 2019	21:50		13.42	11.62	7.98	9.45	10.62	5.618
December 21, 2019	22:20		13.44	11.63	7.99	9.46	10.63	5.630
December 21, 2019	22:50		13.49	11.64	8.01	9.47	10.65	5.653
December 21, 2019	23:20		13.52	11.64	8.01	9.47	10.66	5.660
December 21, 2019	23:50		13.56	11.67	8.03	9.48	10.69	5.685
December 22, 2019	0:50		13.60	11.69	8.05	9.50	10.71	5.710
December 22, 2019	1:50		13.60	11.69	8.06	9.50	10.71	5.713
December 22, 2019	1:50	5,000.00	15.72	13.52	9.04	10.86	12.29	7.285
December 22, 2019	1:55		15.75	13.56	9.06	10.88	12.31	7.313
December 22, 2019	2:00		15.77	13.58	9.07	10.89	12.33	7.328
December 22, 2019	2:05		15.77	13.59	9.07	10.90	12.33	7.333
December 22, 2019	2:20		15.77	13.60	9.08	10.90	12.34	7.338
December 22, 2019	2:35		15.80	13.63	9.08	10.91	12.35	7.350
December 22, 2019	2:50		6.27	13.65	9.08	10.92	12.36	7.363
December 22, 2019	2:50		18.70	15.04	10.04	12.34	14.03	9.030
December 22, 2019	2:55	6,000.00	18.74	15.08	10.06	12.37	14.06	9.063
December 22, 2019	3:00		18.77	15.10	10.08	12.40	14.09	9.088
December 22, 2019	3:05		18.80	15.12	10.09	12.42	14.11	9.108
December 22, 2019	3:20		18.84	15.15	10.10	12.43	14.13	9.130
December 22, 2019	3:35		18.88	15.18	10.10	12.45	14.15	9.153
December 22, 2019	3:50		18.92	15.21	10.10	12.45	14.17	9.170
December 22, 2019	4:20		18.96	15.23	10.10	12.46	14.19	9.188
December 22, 2019	4:50		19.01	15.27	10.10	12.46	14.22	9.215
December 22, 2019	5:20		19.05	15.29	10.10	12.48	14.23	9.230
December 22, 2019	5:50		19.06	15.30	10.10	12.48	14.24	9.235
December 22, 2019	6:20		19.06	15.30	10.10	12.48	14.24	9.238
December 22, 2019	6:50		19.06	15.32	10.10	12.49	14.24	9.243
December 22, 2019	7:50		19.19	15.45	10.21	12.49	14.39	9.388
December 22, 2019	8:50		19.29	15.58	10.36	12.70	14.51	9.513

Şekil F.2 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 2.

Date	Time	Load (kN)	Dial Gauge Readings (mm)					Settlement (mm)
			Guage1	Guage2	Guage3	Guage4	Avg	
December 22, 2019	8:50	5,000.00	19.25	15.36	10.15	12.58	14.34	9.335
December 22, 2019	8:55		19.25	15.35	10.13	12.56	14.32	9.323
December 22, 2019	9:00		19.24	15.34	10.12	12.55	14.31	9.313
December 22, 2019	9:00	4,000.00	18.92	14.10	9.40	11.57	13.50	8.498
December 22, 2019	9:05		18.91	14.09	9.39	11.56	13.49	8.488
December 22, 2019	9:10		18.90	14.08	9.38	11.55	13.48	8.478
December 22, 2019	9:10	3,000.00	16.02	12.45	8.54	10.39	11.85	6.850
December 22, 2019	9:15		16.01	12.44	8.53	10.38	11.84	6.840
December 22, 2019	9:20		16.00	12.43	8.52	10.37	11.83	6.830
December 22, 2019	9:20	2,000.00	14.11	11.89	7.63	9.29	10.73	5.730
December 22, 2019	9:25		14.10	11.88	7.62	9.28	10.72	5.720
December 22, 2019	9:30		14.09	11.87	7.61	9.27	10.71	5.710
December 22, 2019	9:30	1,000.00	10.57	8.91	6.23	7.25	8.24	3.240
December 22, 2019	9:35		10.56	8.90	6.22	7.24	8.23	3.230
December 22, 2019	9:40		10.55	8.89	6.21	7.23	8.22	3.220
December 22, 2019	9:40	0.00	7.10	6.09	5.91	6.10	6.30	1.300
December 22, 2019	9:45		7.10	6.08	5.91	6.10	6.30	1.298
December 22, 2019	9:50		7.09	6.07	5.90	6.09	6.29	1.288
December 22, 2019	9:55		7.08	6.06	5.89	6.08	6.28	1.278
December 22, 2019	10:10		7.05	6.06	5.88	6.07	6.27	1.265
December 22, 2019	10:25		7.05	6.06	5.88	6.07	6.27	1.265
December 22, 2019	10:40		7.04	6.05	5.87	6.06	6.26	1.255
December 22, 2019	10:40	4,000.00	16.35	12.45	8.40	10.44	11.91	6.910
December 22, 2019	10:45		16.36	12.46	8.41	10.45	11.92	6.920
December 22, 2019	10:50		16.36	12.46	8.41	10.45	11.92	6.920
December 22, 2019	10:55		16.37	12.47	8.42	10.46	11.93	6.930
December 22, 2019	11:10		16.39	12.49	8.44	10.48	11.95	6.950
December 22, 2019	11:25		16.40	12.50	8.45	10.49	11.96	6.960
December 22, 2019	11:40		16.41	12.51	8.45	10.51	11.97	6.970
December 22, 2019	12:10		16.41	12.51	8.45	10.51	11.97	6.970
December 22, 2019	12:40		16.44	12.55	8.47	10.53	12.00	6.998
December 22, 2019	13:10		16.47	12.56	8.48	10.54	12.01	7.013
December 22, 2019	13:40		16.46	12.57	8.50	10.55	12.03	7.025
December 22, 2019	14:10		16.48	12.58	8.54	10.56	12.04	7.040
December 22, 2019	14:40		16.49	12.60	8.57	10.58	12.06	7.060
December 22, 2019	15:40		16.50	12.64	8.59	10.62	12.09	7.088
December 22, 2019	16:40		16.52	12.66	8.60	10.65	12.11	7.108

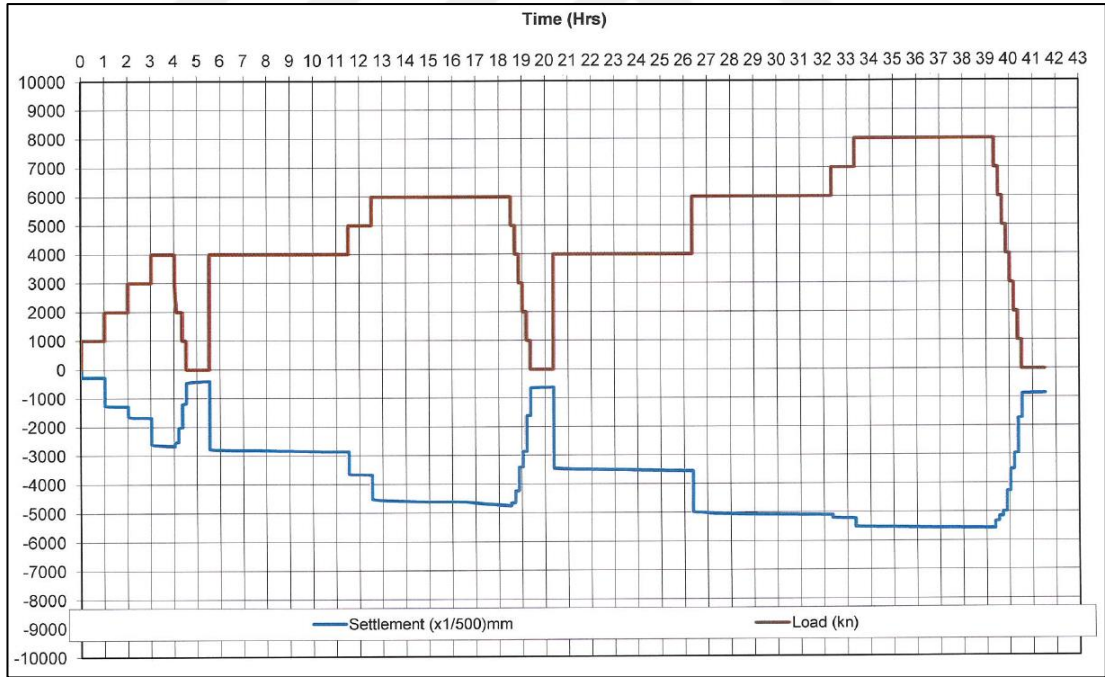
Şekil F.3 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 3.

Date	Time	Load (kN)	Dial Gauge Readings (mm)					Settlement (mm)
			Gauge1	Gauge2	Gauge3	Gauge4	Avg	
December 22, 2019	16:40	6,000.00	20.95	15.60	10.40	12.89	14.96	9.960
December 22, 2019	16:45		20.97	15.64	10.41	12.94	14.99	9.990
December 22, 2019	16:50		20.97	15.65	10.42	12.95	15.00	9.998
December 22, 2019	16:55		20.97	15.66	10.42	12.95	15.00	10.000
December 22, 2019	17:10		20.98	15.68	10.42	12.96	15.02	10.015
December 22, 2019	17:25		21.05	15.69	10.42	13.02	15.07	10.065
December 22, 2019	17:40		21.06	15.70	10.42	13.04	15.08	10.080
December 22, 2019	18:10		21.07	15.72	10.42	13.05	15.09	10.093
December 22, 2019	18:40		21.11	15.73	10.42	13.07	15.12	10.115
December 22, 2019	19:10		21.12	15.75	10.42	13.08	15.13	10.130
December 22, 2019	19:40		21.13	15.76	10.42	13.09	15.14	10.140
December 22, 2019	20:10		21.13	15.76	10.42	13.09	15.14	10.140
December 22, 2019	20:40		21.14	15.80	10.42	13.11	15.16	10.155
December 22, 2019	21:40		21.16	15.79	10.42	13.14	15.18	10.180
December 22, 2019	22:40		21.17	16.03	10.64	13.15	15.19	10.190
December 22, 2019	22:40	7,000.00	21.49	16.02	10.75	13.34	15.40	10.400
December 22, 2019	22:45		21.49	16.03	10.76	13.34	15.41	10.405
December 22, 2019	22:50		21.50	16.04	10.78	13.35	15.42	10.418
December 22, 2019	22:55		21.50	16.04	10.78	13.35	15.42	10.418
December 22, 2019	23:10		21.51	16.05	10.79	13.36	15.43	10.428
December 22, 2019	23:25		21.51	16.06	10.80	13.36	15.43	10.433
December 22, 2019	23:40		21.52	16.07	10.80	13.36	15.44	10.438
December 22, 2019	23:40	8,000.00	22.40	16.75	11.15	13.83	16.03	11.033
December 22, 2019	23:45		22.40	16.75	11.15	13.83	16.03	11.033
December 22, 2019	23:50		22.41	16.75	11.16	13.84	16.04	11.041
December 22, 2019	23:55		22.41	16.75	11.16	13.84	16.04	11.040
December 23, 2019	0:10		22.42	16.76	11.17	13.85	16.05	11.050
December 23, 2019	0:25		22.42	16.76	11.18	13.86	16.06	11.055
December 23, 2019	0:40		22.43	16.78	11.20	13.86	16.07	11.068
December 23, 2019	1:10		22.43	16.78	11.20	13.86	16.07	11.068
December 23, 2019	1:40		22.44	16.79	11.21	13.87	16.08	11.078
December 23, 2019	2:10		22.45	16.80	11.23	13.88	16.09	11.090
December 23, 2019	2:40		22.47	16.82	11.24	13.90	16.11	11.108
December 23, 2019	3:10		22.48	16.83	11.26	13.91	16.12	11.120
December 23, 2019	3:40		22.48	16.84	11.27	13.91	16.13	11.125
December 23, 2019	4:40		22.50	16.85	11.29	13.93	16.14	11.143
December 23, 2019	5:40		22.50	16.85	11.30	13.95	16.15	11.150
December 23, 2019	5:40	7,000.00	21.73	16.30	11.05	13.61	15.67	10.673
December 23, 2019	5:45		21.71	16.28	11.04	13.60	15.66	10.658
December 23, 2019	5:50		21.70	16.27	11.03	13.59	15.65	10.648
December 23, 2019	5:50	6,000.00	21.39	15.95	10.70	13.27	15.33	10.328
December 23, 2019	5:55		21.38	15.94	10.69	13.26	15.32	10.318
December 23, 2019	6:00		21.38	15.94	10.69	13.26	15.32	10.318

Şekil F.4 : No: 1 deney ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 3.

Date	Time	Load (kN)	Dial Gauge Readings (mm)					Settlement (mm)
			Guage1	Guage2	Guage3	Guage4	Avg	
December 23, 2019	6:00	5,000.00	20.79	15.66	10.50	13.06	15.00	10.003
December 23, 2019	6:05		20.77	15.63	10.49	13.05	14.99	9.985
December 23, 2019	6:10		20.76	15.62	10.48	13.04	14.98	9.975
December 23, 2019	6:10	4,000.00	18.82	13.99	9.70	11.75	13.57	8.565
December 23, 2019	6:15		18.82	13.99	9.70	11.75	13.57	8.565
December 23, 2019	6:20		18.81	13.98	9.69	11.74	13.56	8.555
December 23, 2019	6:20	3,000.00	16.81	12.32	8.57	10.54	12.06	7.060
December 23, 2019	6:25		16.79	12.30	8.56	10.52	12.04	7.043
December 23, 2019	6:30		16.77	12.29	8.55	10.51	12.03	7.030
December 23, 2019	6:30	2,000.00	14.62	11.95	7.75	9.41	10.93	5.933
December 23, 2019	6:35		14.60	11.93	7.73	9.39	10.91	5.913
December 23, 2019	6:40		14.59	11.92	7.72	9.38	10.90	5.903
December 23, 2019	6:40	1,000.00	11.08	8.50	6.65	7.65	8.47	3.470
December 23, 2019	6:45		11.06	8.48	6.64	7.63	8.45	3.453
December 23, 2019	6:50		11.05	8.47	6.63	7.62	8.44	3.443
December 23, 2019	6:50	0.00	8.50	6.30	6.09	6.22	6.78	1.778
December 23, 2019	6:55		8.49	6.29	6.08	6.21	6.77	1.768
December 23, 2019	7:00		8.47	6.28	6.07	6.20	6.76	1.755
December 23, 2019	7:05		8.47	6.28	6.07	6.20	6.76	1.755
December 23, 2019	7:20		8.46	6.27	6.06	6.19	6.75	1.745
December 23, 2019	7:35		8.45	6.27	6.06	6.18	6.74	1.740
December 23, 2019	7:50		8.44	6.26	6.05	6.17	6.73	1.730

Şekil F.5 : No: 1 deneye ait yük altında alınan oturma değerleri – Sayfa 4.



Şekil F.6 : No: 1 deneye ait yük kademeleri.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ceren Aydın

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 Ocak / 2020 Ağustos - Zetaş Zemin Teknolojisi A.Ş. Merkez Ofis- Teknik Ofis Mühendisi
- 2020 Ağustos / Halen – Zetaş Zemin Teknolojisi A.Ş. – Dubai Şubesi – Tasarım ve İhale Departmanı - Teknik Ofis Mühendisi

YAYINLAR:

- Aydın, C., Akçakal, O., Kayahan, İ., Sevim, O., İyisan, R. (2022), Kazık Kapasite Hesaplarıyla Kazık Yükleme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması: Doha Limanı Terminal Binası -Katar, 18. Ulusal Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Kongresi Erciyes Üniversitesi, 28-29 Eylül 2022, Kayseri, TR