



T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



## YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİLLİ ZEMİNLERDEKİ FORE KAZIKLARIN TAŞIMA  
KAPASİTELERİNİN YÜKLEME DENEYLERİ İLE TAHMİNİ

Ayşen ÇIRAKOĞLU BİLGİÇ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU

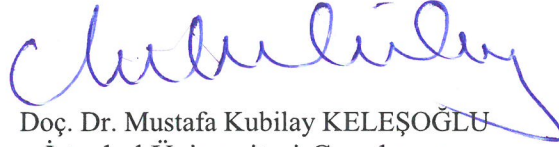
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 30.05.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ



Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK  
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi

## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında yüksek lisans eğitimime başladığım günden beri benden desteklerini ve en önemlisi zamanını esirgemeyen, sevgili danışman hocam Doç. Dr. Mustafa Kubilay Keleşoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın özellikle son döneminde aralarına katıldığım ARS Geotechnical Engineering Consultancy firmasındaki çalışma arkadaşlarıma, bu süreçteki destekleri için çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın ilk gününde karşıma çıkan, bugüne kadar hayatımın en önemli anlarında yoluma ışık tutmuş, kendi ve ailesi ile birlikte her daim yanımda olan ilkokul öğretmenim Yıldız İrican'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tanıştığımız günden itibaren bana her konuda inanan ve destek olan sevgili eşim Ömer Bilgiç'e de bana olan sabrını hiç kaybetmediği için çok teşekkür ederim.

Son olarak, bugün geldiğim noktada benden çok emeği, inancı, duası olan annem Müyesser Çırakoğlu'na, bu hayatta sahip olduğum en değerli varlığım olduğu için şükranlarımı sunarım.

Mayıs 2019

Ayşen ÇIRAKOĞLU BİLGİÇ

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	xi
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xiii
ÖZET .....	xv
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>	<b>3</b>
2.1.    KAZIKLI TEMELLER .....	3
2.2.    KAZIK TASARIM YÖNTEMLERİ .....	5
2.2.1.    STATİK KAZIK FORMÜLLERİ .....	6
2.2.2.    ŞARTNAMELER.....	10
2.2.3.    ARAZİ DENEYLERİ KULLANILARAK KAZIK TAŞIMA GÜCÜNÜN BELİRLENMESİ .....	24
2.2.4.    DİNAMİK KAZIK FORMÜLLERİ .....	30
2.3.    KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ .....	30
2.3.1.    Statik Kazık Yükleme Deneyleri .....	30
2.3.2.    Statik Kazık Yükleme Deneyi Yapım Yöntemleri .....	31
2.3.3.    Kazık Yükleme Deneyleri İle Kazık Kapasitesinin Belirlenmesi .....	32
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>35</b>
3.1.    PLAXIS 3D YAZILIMI .....	35
3.1.1.    Zemin Modelleri .....	36
3.1.2.    Gömülü Kazık Elemanı Modellenmesi .....	37
3.1.    KAZIK YÜKLEME DENEYLERİNİN 3D MODELLENMESİ.....	41
3.1.1.    Referans Çalışmanın Kapsamı .....	41
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>48</b>
4.1.    REFERANS ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRMELERİ .....	48
4.2.    KAZIK KAPASİTELERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ .....	50

4.3. ANALİTİK YÖNTEMLERLE HESAPLANAN KAZIK KAPASİTELERİNE GÖRE GERÇEKLEŞTİRİLEN 3D ANALİZLER.....	52
4.3.1. REFERANS MAKALE PLAXIS MODELİ.....	54
4.3.2. AASHTO Şartnamesi Modeli.....	58
4.3.1. AASHTO- LRFD Şartnamesi Modeli.....	67
4.3.2. SNIP Şartnamesi Modeli.....	75
4.3.3. NAVFAC Şartnamesi Modeli.....	77
4.3.4. SPT.....	84
4.3.5. CPT.....	86
4.3.6. PLAXIS.....	89
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>92</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>97</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>100</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Yükleri taşıma ve iletme şekillerine göre kazıklar; (a) uç kazığı, (b) sürtünme kazığı (Birand, 2001). ....	4
Şekil 2.2: Statik kazık formülleri ile kazık taşıma kapasitesi hesaplanması (Birand, 2001). ....	6
Şekil 2.3: Adhezyon katsayısı ve drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Birand,2001). ....	9
Şekil 2.4: Kazık tasarım şeması (AASHTO, 2007). ....	11
Şekil 2.5: Granüler birimlerde kazık taşıma kapasitesi (NAVFAC,1986). ....	20
Şekil 2.6: Kohezyonlu birimlerde kazık taşıma kapasitesi (NAVFAC,1986). ....	22
Şekil 2.7: Adhezyon / kohezyon ( $c_A/c$ ) oranı grafiği (NAVFAC,1986). ....	23
Şekil 2.8: Taşıma kapasitesi faktörü, $N_c$ (NAVFAC,1986). ....	23
Şekil 2.9: Eksenel yüklü kazıklar için nihai birim sürtünme direnci (Erol, 2014). ....	29
Şekil 2.10: Tipik Yük-Oturma Eğrisi (Birand, 2009). ....	32
Şekil 2.11: Brinch Hansen %90 kriteri (Birand,2009). ....	33
Şekil 2.12: De-Beer yöntemi (Birand,2009). ....	34
Şekil 2.13: Mazurkiewicz yöntemi (Birand,2009). ....	34
Şekil 3.1: Plaxis 3D yazılımı mohr-coulomb modeli. ....	37
Şekil 3.2: Gömülü kazık model çizimi (Engin, 2009). ....	38
Şekil 3.3: Plaxis 3D gömülü kazık elemanı veri girişi. ....	38
Şekil 3.4: Çevre sürtünmesi “linear” modeli. ....	39
Şekil 3.5: Çevre sürtünmesi “multi-linear” modeli. ....	40
Şekil 3.6: Çevre sürtünmesi “layer dependent” modeli. ....	40
Şekil 3.7: İdealize zemin profili (Comodromos ve diğ., 2009). ....	42
Şekil 3.8: Yükleme deneyi düzeneği plan görünümü (Comodromos ve diğ., 2009). ....	43

<b>Şekil 3.9:</b> Deney düzeneği A-A kesiti (Comodromos ve diğ. ,2009). .....	44
<b>Şekil 3.10:</b> Kazık yükleme deneyi ve DIN 4014 şartnamesinden elde edilen yük-deplasman grafiği (Comodromos ve diğ. ,2009). .....	45
<b>Şekil 3.11:</b> Kazık yükleme deneyi arazi sonuçları ve 3D model sonuçları (Comodromos ve diğ. ,2009). .....	46
<b>Şekil 3.12:</b> Ölçülen ve nümerik analizlerle belirlenen normal yük dağılımı (Comodromos ve diğ. ,2009). .....	47
<b>Şekil 4.1:</b> Sayısal analizlerde belirlenen normal yük-derinlik grafiği. (Comodromos ve diğ. 2009). .....	49
<b>Şekil 4.2:</b> Şartnamelere göre hesaplanan kazık kapasitelerinin derinlikle değişimi. ....	51
<b>Şekil 4.3:</b> Kazık üzerinde birim metrede oluşması beklenen sürtünme kuvvetleri. ....	52
<b>Şekil 4.4:</b> Plaxis 3D modeli. ....	53
<b>Şekil 4.5:</b> Comodromos analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	55
<b>Şekil 4.6:</b> Comodromos analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	55
<b>Şekil 4.7:</b> Comodromos analiz-2 yük derinlik grafiği. ....	56
<b>Şekil 4.8:</b> Comodromos analiz-2 yük deplasman grafiği. ....	56
<b>Şekil 4.9:</b> Comodromos analiz-3 yük derinlik grafiği. ....	57
<b>Şekil 4.10:</b> Comodromos arayüz analizleri yük deplasman grafiği. ....	57
<b>Şekil 4.11:</b> Comodromos elastisite modülü azaltma analizleri yük deplasman grafiği. ....	58
<b>Şekil 4.12:</b> AASHTO analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	59
<b>Şekil 4.13:</b> AAHSTO analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	60
<b>Şekil 4.14:</b> AASHTO analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	60
<b>Şekil 4.15:</b> AASHTO analiz-1 deplasman grafiği. ....	61
<b>Şekil 4.16:</b> AAHSTO analiz-2 yük derinlik grafiği. ....	62
<b>Şekil 4.17:</b> AASHTO analiz-2 normal kuvvet grafiği. ....	62
<b>Şekil 4.18:</b> AASHTO analiz-2 deplasman grafiği. ....	63
<b>Şekil 4.19:</b> AAHSTO analiz-2 yük deplasman grafiği. ....	63
<b>Şekil 4.20:</b> AASHTO analiz-3 normal kuvvet grafiği. ....	65

Şekil 4.21: AAHSTO analiz-3 yük derinlik grafiği. ....	65
Şekil 4.22: AASHTO analiz-3 deplasman grafiği. ....	66
Şekil 4.23: AAHSTO analiz-3 yük deplasman grafiği. ....	66
Şekil 4.24: LRFD analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	68
Şekil 4.25: LRFD analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	68
Şekil 4.26: LRFD analiz-1 deplasman grafiği.....	69
Şekil 4.27: LRFD analiz-1 yük deplasman grafiği.....	69
Şekil 4.28: LRFD analiz-2 normal kuvvet grafiği. ....	70
Şekil 4.29: LRFD analiz-2 yük derinlik grafiği. ....	71
Şekil 4.30: LRFD analiz-2 deplasman grafiği.....	71
Şekil 4.31: LRFD analiz-2 yük deplasman grafiği.....	72
Şekil 4.32: LRFD analiz-2 normal kuvvet grafiği. ....	73
Şekil 4.33: LRFD analiz-3 yük derinlik grafiği. ....	73
Şekil 4.34: LRFD analiz-3 deplasman grafiği.....	74
Şekil 4.35: LRFD analiz-3 yük deplasman grafiği.....	74
Şekil 4.36: SNIP analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	76
Şekil 4.37: SNIP analiz-1 yük derinlik grafiği.....	76
Şekil 4.38: SNIP analiz-1 deplasman grafiği. ....	77
Şekil 4.39: SNIP analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	77
Şekil 4.40: NAVFAC analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	79
Şekil 4.41: NAVFAC analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	79
Şekil 4.42: NAVFAC analiz-1 deplasman grafiği. ....	80
Şekil 4.43: NAVFAC analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	80
Şekil 4.44: NAVFAC analiz-2 normal kuvvet grafiği. ....	81
Şekil 4.45: NAVFAC analiz-2 yük derinlik grafiği.....	81
Şekil 4.46: NAVFAC analiz-2 deplasman grafiği. ....	81
Şekil 4.47: NAVFAC analiz-2 yük deplasman grafiği. ....	82



<b>Şekil 4.48:</b> NAVFAC analiz-3 normal kuvvet grafiği. ....	82
<b>Şekil 4.49:</b> NAVFAC analiz-3 yük derinlik grafiği. ....	83
<b>Şekil 4.50:</b> NAVFAC analiz-3 deplasman grafiği. ....	83
<b>Şekil 4.51:</b> NAVFAC analiz-3 yük deplasman grafiği. ....	83
<b>Şekil 4.52:</b> SPT analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	85
<b>Şekil 4.53:</b> SPT analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	85
<b>Şekil 4.54:</b> SPT analiz-1 deplasman grafiği. ....	86
<b>Şekil 4.55:</b> SPT analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	86
<b>Şekil 4.56:</b> CPT analiz-1 normal kuvvet grafiği. ....	87
<b>Şekil 4.57:</b> CPT analiz-1 yük-derinlik grafiği. ....	88
<b>Şekil 4.58:</b> CPT analiz-1 deplasman grafiği. ....	88
<b>Şekil 4.59:</b> CPT analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	89
<b>Şekil 4.60:</b> Plaxis analiz-1 yük derinlik grafiği. ....	90
<b>Şekil 4.61:</b> Plaxis analiz-1 yük deplasman grafiği. ....	90
<b>Şekil 4.62:</b> Plaxis arayüz analizleri yük derinlik grafiği. ....	91
<b>Şekil 4.63:</b> Plaxis arayüz analizleri yük deplasman grafiği. ....	91

## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1:</b> Kazık tipine göre K değerleri (Birand,2001). ....	8
<b>Tablo 2.2:</b> Kazık-zemin temas durumuna göre sürtünme açısı değerleri (Birand, 2001).....	8
<b>Tablo 2.3:</b> Adhezyon katsayısı ve drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Birand,2001).....	9
<b>Tablo 2.4:</b> Taşıma gücü katsayıları (Terzaghi, 1967).....	10
<b>Tablo 2.5:</b> Kohezyonlu zeminler için önerilen $\alpha$ ve $f_{si}$ değerleri (AASHTO,2007).....	12
<b>Tablo 2.6:</b> Granüler birimlerde imal edilen fore kazık uç dayanımı için önerilen $q_t$ değerleri (AASHTO,2007). ....	13
<b>Tablo 2.7:</b> Fore kazıklar için direnç faktörü (LRFD,2014). ....	14
<b>Tablo 2.8:</b> Granüler birimlerde kazık ucu tasarım dayanımı (SNIP,1999). ....	18
<b>Tablo 2.9:</b> Kohezyonlu birimlere göre kazık ucu tasarım dayanımı (SNIP,1999). ....	18
<b>Tablo 2.10:</b> Kazık çalışma koşulları faktörü ( $\gamma_{cf}$ ) (SNIP,1999).....	19
<b>Tablo 2.11:</b> Tasarım dayanımı ( $f_i$ ) (SNIP,1999).....	19
<b>Tablo 2.12:</b> Taşıma kapasitesi faktörleri ( $N_q$ ) (NAVFAC,1986). ....	21
<b>Tablo 2.13:</b> Kazık tipine göre zemin basıncı faktörleri (NAVFAC,1986). ....	21
<b>Tablo 2.14:</b> Kazık zemin arası sürtünme açısı ( $\delta$ ) (NAVFAC,1986). ....	21
<b>Tablo 2.15:</b> Önerilen adhezyon ( $c_A$ ) değerleri (NAVFAC,1986).....	22
<b>Tablo 2.16:</b> Yüzey sürtünmesi ve SPT-N değerleri arasındaki ilişki, $f_s=\alpha+\beta*N$ kN/m <sup>2</sup> (Schnaid,2009).....	25
<b>Tablo 2.17:</b> Uç taşıma kapasitesi ve SPT-N değerleri arasındaki ilişki, $q_b=K*N$ MN/m <sup>2</sup> (Schnaid,2009).....	26
<b>Tablo 2.18:</b> Yük kapasitesi faktörleri $k_c$ ve $\alpha$ (Schnaid,2009). ....	27
<b>Tablo 2.19:</b> Eksenel yüklü kazıklar için $K_p$ değerleri (Erol, 2014). ....	28
<b>Tablo 2.20:</b> Nihai birim sürtünme direnci ( $q_s$ ) değerleri (Erol, 2014). ....	29

<b>Tablo 3.1:</b> Geri analiz sonucu belirlenen zemin parametreleri (Comodromos ve diğ.,2009).....	46
<b>Tablo 4.1:</b> Zemin tabaklarına göre kazık üzerinde mobilize olan direnç. ....	49
<b>Tablo 4.2:</b> Analitik yöntemlerle hesaplanan kazık sürtünme ve uç kapasitesi değerleri [kN].....	50
<b>Tablo 4.3:</b> Makale test modelinde 5.5 MN yüklemesinde tabakalarda birim m de oluşan kuvvetler.....	54
<b>Tablo 4.4:</b> AASHTO şartnamesi ve makalede belirlenen ortalama zemin parametrelerine göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri. ....	59
<b>Tablo 4.5:</b> AASHTO şartnamesi ve makalede belirlenen ortalama zemin parametrelerine göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri. ....	61
<b>Tablo 4.6:</b> AASHTO şartnamesi ve D tabakası parametreleri CPT ye göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri. ....	64
<b>Tablo 4.7:</b> LRFD şartnamesi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.....	67
<b>Tablo 4.8:</b> LRFD şartnamesi ve zeminin maksimum değerleriyle hesaplanan kapasiteler.....	70
<b>Tablo 4.9:</b> LRFD şartnamesi ve CPT ile hesaplanan kapasiteler. ....	72
<b>Tablo 4.10:</b> SNIP şartnamesi ile hesaplanan kazık kapasiteleri. ....	75
<b>Tablo 4.11:</b> NAVFAC şartnamesi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.....	78
<b>Tablo 4.12:</b> SPT yöntemi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler. ....	84
<b>Tablo 4.13:</b> CPT yöntemi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.....	87
<b>Tablo 5.1:</b> Analitik yöntemlerle hesaplanan kazık sürtünme ve uç kapasitesi değerleri [kN].....	92

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$A_p$	: Kazık uç alanı
$A_s$	: Kazık çevresi yüzey alanı
$d, D$	: Kazık çapı
$E$	: Enerji
$f_i$	: Zemin tabakası birim sürtünme değeri
$K$	: Yatay toprak basıncı katsayısı
$N_\gamma, N_q, N_c$	: Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları
$p$	: Kazık kesitinin çevresi
$P_a$	: atmosfer basıncı
$P_{te}$	: Kazık ucundaki eşdeğer limit basıncı
$q_p$	: Birim uç direnci
$q_s$	: Birim çevre direnci
$R$	: Kazık ucundaki zeminin tasarım dayanımı
$R_p$	: Kazık şaftı uç direnci
$R_s$	: Kazık şaftı çevre direnci
$S_u$	: drenajsız kayma mukavemeti
$Q_s$	: Kazık sürtünme Kapasitesi
$Q_{n\text{ihai}}$	: Kazık Toplam Kapasitesi
$Q_{u\text{ç}}$	: Kazık uç kapasitesi
$W$	: Kazık elemanının ağırlığı
$\alpha_i$	: Zemin tabakası adhezyon katsayısı
$\beta$	: Yük transfer sabiti
$\Delta L$	: Tabaka kalınlığı
$\delta_i$	: Kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı
$\Delta E$	: Enerji kaybı
$\phi_{qp}$	: Şaft uç direnci faktörü
$\phi'_f$	: Kohezyonsuz zeminin sürtünme açısı
$\gamma$	: Zemin birim hacim ağırlığı
$\gamma_c$	: Çalışma koşulları faktörü

$\gamma_{cR}$	: kazık ucundaki zeminin çalışma koşulları faktörü
$\gamma_{cf}$	: kazık yüzeyindeki zeminin çalışma koşulları faktörü
$\sigma'_{vi}$	: Tabaka ortasındaki düşey efektif gerilme
$\sigma'_p$	: Düşey efektif ön konsolidasyon gerilmesi

#### **Kısaltmalar**

#### **Açıklama**

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>CPT</b>	: Cone Penetration Test
<b>FHWA</b>	: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration
<b>LRFD</b>	: Load Resistance Factor Design
<b>NAVFAC</b>	: Naval Facilities Engineering Command
<b>SPT</b>	: Standard Penetration Test
<b>TBDY</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### KİLLİ ZEMİNLERDEKİ FORE KAZIKLARIN TAŞIMA KAPASİTELERİNİN YÜKLEME DENEYLERİ İLE TAHMİNİ

Ayşen ÇIRAKOĞLU BİLGİÇ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU

Temel tasarımında üstyapı yüklerine göre yüzeysel temeller veya derin temeller tercih edilir. Yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma sınırlarında yetersiz olması durumunda derin temeller tasarlanır. Uygulamada en çok kullanılan derin temel yöntemi kazıklı temellerdir. Kazıklı temellerde genel amaç üst yapıdan gelen yüklerin derinde bulunan sağlam tabakalara aktarılmasıdır. Kazıklı temellerin tasarımında literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Özellikle yapısal şartnameler kazıklı temellerin tasarımına yönelik metotlar içermektedir. Bunlar genellikle kazığın gömülü olduğu zeminin fiziksel ve mühendislik parametrelerine bağlı olarak kazık kapasitesini belirlenmesine yöneliktir. Ayrıca güncel literatürde arazi deneylerini referans alan yöntemler de bulunmaktadır. Bunlara ilave olarak Kazık kapasitesinin belirlenmesinde en etkili yöntem kazık yükleme deneyleridir. Kazık yükleme deneyleri ile kazık kapasiteleri literatürdeki yöntemlere göre daha gerçeğe yakın olarak belirlenebilir.

Tez çalışması kapsamında kazık tasarımında genellikle kullanılan yöntemler irdelenmektedir. Öncelikle yapısal şartnameler kapsamında AASHTO, LRFD, SNIP ve NAVFAC şartnameleri

irdelenmiştir. Bunlara ilave olarak SPT, CPT ve Pressiyometre deneylerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak kazık tasarımı yapılmasına yönelik yöntemler irdelenmiştir. Kazık yükleme deneylerine bağlı olarak da kazık kapasitesinin belirlenmesine yönelik metotlar tez kapsamında incelenmiştir. Kazık tasarım yöntemlerine referans olarak Yunanistan'ın Thaessaloniki şehrinde gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi referans alınmıştır. Buna göre kazık tasarımına yönelik yapılan zemin araştırmaları, kazık yükleme deneyi sonuçları ve bu deneye yönelik yapılan üç boyutlu analizler değerlendirilerek, literatürde bulunan yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu yöntemler baz alınarak üç boyutlu Plaxis 3D modelleri hazırlanmış ve gerçekleştirilen kazık yükleme deneylerindeki yükleme koşulları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde kazık tasarım yöntemleri, kazık üzerinde yüklerin mobilize olma durumu ve deplasman değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda literatürde bulunan yöntemlerin kazık yükleme deneyleri sonuçlarına yakınlığı incelenmiştir.

Yapılan hesaplamalarda şartnamelere göre hesaplanan kazık kapasitelerinin, arazi deneyi sonucunda elde edilen kapasitelerin altında kaldığı, SPT ve CPT yöntemi ile hesaplanan kapasitelerin ise deneylerin üzerinde sonuç verdiği görülmüştür. Hesaplanan kapasite değerleri ile gerçekleştirilen üç boyutlu analizlerde ise tüm analitik çözümler arasında yükleme deneyine en yakın sonuç veren yöntemin AASHTO yöntemi olduğu görülmüştür.

Mayıs 2016, 101 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Kazık Tasarımı, Kazık Yükleme Deneyleri, AASHTO, NAVFAC, SNIP, LRFD, SPT, CPT, Plaxis 3D.

## **SUMMARY**

### **M.Sc. THESIS**

#### **PREDICTING THE BEARING CAPACITY OF PILES IN CLAYEY SOILS BY USING PILE LOAD TESTING**

**Ayşen ÇIRAKOĞLU BİLGİÇ**

**Istanbul University-Cerrahpasa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Civil Engineering**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU**

In the basic design methodology, shallow foundations or deep foundations are preferred based on superstructure loads and settlement limits. Deep foundations are designed if shallow foundations are inadequate for bearing capacity and settlement limits. In practice, the most commonly used deep foundation method is bored piles. The general purpose of bored pile foundations is to transfer superstructure loads to the soil layers below the foundation. There are different analytical methods in literature for piled foundation design. Especially structural standards includes design methodologies for bored pile design. These methods are generally based on determination of pile capacity according to physical and engineering properties of the soil. In addition, there are several methods for designing bored piles according to field test results. Most effective method for pile design is pile load tests. Bearing capacities of piles can be determined more realistic than analytical methods.



Several analytical methods are studied as a scope of this study. First of all, Pile capacities are determined according to some structural standards such as AASHTO, LRFD, SNIP and NAVFAC. In addition to standards, methods based on field tests like SPT, CPT and pressuremeter are studied. Pile load test results are taken as a reference to study pile design methods (Comodromos et. al,2009). Soil investigations, pile load test results and 3D analysis are evaluated to compare pile design methods. Also, Plaxis 3D models are prepared based on these design methods and analysis performed according to loading conditions of pile load test. As a result of analysis, pile design methods are compared according to load mobilization along the pile and displacement conditions. Purpose of this comparison is to observe proximity of pile design methods to pile load tests.

In the calculations, it was seen that pile capacities calculated according to the specifications were below the capacities obtained from pile load test. And the capacities calculated by the SPT and CPT method gave results above the pile load test. In the three-dimensional analyzes performed with the calculated capacity values, the AASHTO method was founda to be the method closest to the loading test among all analytical solutions.

May 2016, 101 pages.

**Keywords:** Pile Design, Pile Load Tests, AASHTO, NAVFAC, SNIP, LRFD, SPT, CPT, Plaxis 3D.

## 1. GİRİŞ

Temeller, üst yapıdan gelen yüklerin güvenli olarak zemine aktarılması için tasarlanan yapısal elemanlardır. Üst yapı yüklerine ve yapının oturacağı zeminin türüne göre temel tipleri farklılıklar gösterir. Temel tasarımında ilk tercih edilen yüzeysel temeldir. Fakat mevcut zemin gelen yükleri taşıyamıyorsa veya oturma miktarı izin verilebilir sınırları aşıyorsa, yüzeysel temeller yerine derin temeller tasarlanır. Uygulamada en çok kullanılan derin temel yöntemi kazıklı temellerdir. Kazıklı temeller farklı imalat yöntemleri uygulanabilen, genel amacı üst yapıdan gelen yüklerin zeminde daha sağlam tabakalara aktarılması olan temel tipidir.

Uygulamada sıklıkla kullanılan kazıklı temellerin tasarlanmasında da farklı yöntemler bulunmaktadır. Kazığın imal edilme yöntemine, imal edildiği zeminin özelliklerine bağlı olarak bu yöntemler değişiklik göstermektedir. Kazık tasarımında önemli faktörlerden biri kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesidir ve bu amaca yönelik literatürde, şartnameler veya arazi deney sonuçlarına bağlı oluşturulan ampirik ve analitik yaklaşımlarla geliştirilmiş yöntemler bulunmaktadır.

Analitik hesap yöntemleri genellikle kazığın imal edildiği zemin tabakalarının mukavemet özellikleri ve kazığın imalat yöntemi gibi etkenleri göz önünde bulundurarak sürtünme ve uç direncini hesaplamaktadır. Bu tasarım yaklaşımları arazide gerçekte elde edilen kazık kapasitesinin altında veya üzerinde sonuçlar verebilmektedir. Ayrıca zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan zemin araştırmalarının genellikle kısıtlı olması nedeniyle, belirlenen zemin parametrelerinin de arazideki zemin davranışını yansıtmaktan uzak olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Tüm bu etkenler irdelendiğinde, analitik yöntemlerle hesaplanan kazık kapasitelerinin, özellikle geniş çaplı projelerde güvenlik ve maliyet bakımından yetersiz veya abartılı tasarım yapılmasına sebep olduğu söylenebilmektedir.

Kazıklı temellerin taşıma kapasitelerinin belirlenmesindeki en etkili yöntem kazık yükleme deneyleridir. Kazık yükleme deneyleri, projeye uygun olarak tasarlanan ve kazık kapasitesinin yerinde belirlenmesini sağlayan arazi deneyleridir. Bu deneyler ile projede kullanılması planlanan kazık elemanlarının, ön tasarımda belirlenen taşıma kapasitesi sahada teyit edilebilir veya kazık üzerinde mobilize olacak yükler ve deplasmanlar belirlenebilir. Kazık yükleme

deneylerinde proje gerekliliklerine uygun olarak seçilebilecek farklı yöntemler bulunmaktadır. Bununla birlikte kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre kazığın taşıma kapasitesinin belirlenebileceği yöntemler de literatürde yer almaktadır. Tez kapsamında ilgili bölümlerde bu yöntemlerle ilgili bilgiler sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında kazık kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemler, üç boyutlu geoteknik analizlerle karşılaştırılmış ve analitik yöntemlerin gerçeğe yakınlığı irdelenmiştir. Kazık kapasitelerinin aynı zamanda arazide gerçekleştirilmiş kazık yükleme deneyleriyle de karşılaştırılabilmesi amacıyla tez çalışması kapsamında Selanik/Yunanistan'da bir köprü projesi kapsamında yapılan kazık yükleme deneyleri (Comodromos ve diğ., 2009) referans alınmıştır. Referans alınan çalışmada, arazide zemin araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiş, zemin tabakalarının fiziksel ve mukavemet özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca kazık yükleme deneyi yapılarak, kazık üzerinde farklı yükleme koşullarında mobilize olan uç ve sürtünme kuvvetleri belirlenmiş, bu yükleme koşullarına bağlı deplasman değerleri elde edilmiştir. Referans çalışma kapsamında ayrıca Flac 3D yazılımı kullanılarak kazık yükleme deneyi sayısal olarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar kazık yükleme deneyleri ile karşılaştırılmıştır.

Referans çalışmada kullanılan zemin parametreleri ve kazık yükleme deneyi geometrisi, tez çalışma kapsamında üç boyutlu olarak Plaxis 3D yazılımında modellenmiştir. Modelleme sırasında kazık sürtünme kapasitesi değerleri, AASHTO, LRFD, SNIP ve NAVFAC şartnameleri vasıtasıyla ve SPT ve CPT gibi arazi deneylerinden referans alınan yöntemlerle hesaplanmıştır. Hesapta kullanılan her yönteme uygun üç boyutlu analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler referans çalışmada elde edilen kazık yükleme deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Analizler sonucunda, şartnamelere göre hesaplanan kazık kapasitelerinin genel olarak arazi deneyleri ile elde edilen kapasitelerin altında kaldığı görülmüştür. SPT ve CPT deneylerine bağlı ampirik yöntemler kullanılarak belirlenen kapasitelerin ise şartnamelere göre daha yüksek sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

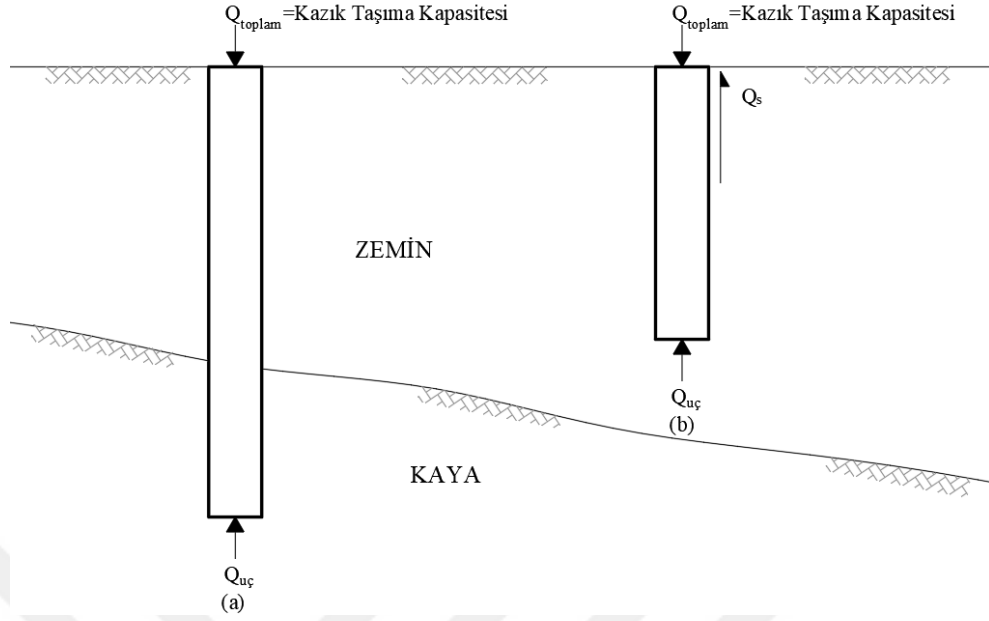
Temel sistemleri, üst yapıdan gelen yüklerin zemine aktarılmasını sağlayan yapı elemanlarıdır. Üst yapının türü, zemine aktarılacak yük, oturma koşulları vb. sınır koşullarına göre yapının temel tasarımı yapılır. Temeller tabanlarının zemin içindeki derinliğine bağlı olarak derin temeller veya yüzeysel temeller olmak üzere iki ayrı tür olarak incelenebilir. Yüzeysel temeller zemin şartlarının uygunluğuna göre tercih edilen tekil, sürekli veya radye temel türleridir. Derin temel ise genellikle, derinliği plan görünümdeki temel genişliğinin yaklaşık 2,5 misli olan temellerdir. Kazıklı temeller, kesonlar veya derin ayak temelleri derin temellerdir (Birand, 2001). Derin temel sistemlerinde yapıdan gelen yüklerin bir bölümü veya tümü zemin içerisine imal edilen yapısal eleman ile zemin yüzeyinden daha derin tabakalara aktarılır (Yıldırım, 2004).

### 2.1.KAZIKLI TEMELLER

Derin temeller içinde uygulamada en sık kullanılan temel tipi kazıklı temellerdir. Kazıklı temeller çeşitli yöntemler kullanılarak imal edilen, üst yapıdan gelen yüklerin taşıma kapasitesi daha yüksek olan daha derindeki zemin birimlere iletilmesini amaçlayan elemanlardır. Derin temel uygulaması olarak imal edilen kazık elemanlarını üç ana başlıkta incelenebilmektedir (Birand, 2001);

- 1- Yükleri Taşıma ve İletme Şekilleri
- 2- İmal Edildikleri Malzemeler
- 3- İmalat Yöntemleri

Yapıdan gelen yükleri taşıma tiplerine göre kazıklar sürtünme kazıkları ve uç kazıkları olarak ikiye ayrılabilir. Sürtünme kazıkları kazık elemanının zeminle arasındaki sürtünme direncinden faydalanarak yapıdan gelen yükleri taşımaktadır. Uç kazıkları ise kazık elemanının zeminde belli bir derinlikte bulunan sağlam zemin- kaya birimden aldığı dirençle yapıdan gelen yükleri taşımaktadır. Şekil 2.1’de uç kazıkları ve sürtünme kazıklarının çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



**Şekil 2.1:** Yükleri taşıma ve iletme şekillerine göre kazıklar; (a) uç kazığı, (b) sürtünme kazığı (Birand, 2001).

Kazıklar imal edildiklerinde kullanılan malzemelere göre; beton kazıklar, çelik kazıklar, ahşap kazıklar ve kompozit kazıklar olarak sınıflandırılabilirler. Betonarme kazıklar Türkiye’de en çok tercih edilen kazık tipidir. Betonarme kazıklar imalat yöntemlerine göre önceden dökme ve yerinde dökme kazıklar olarak ikiye ayrılabilir. Önceden dökme kazıklar veya çakma kazıklar fabrikada imal edilip vinç ve ağırlıklar yardımıyla arazide yerine çakılarak yerleştirilir. Yerinde dökülen betonarme kazıklar veya fore kazıklar, arazide delici makine kullanılarak veya boş boruların çakılmasıyla elde edilen deliklere beton doldurulmasıyla elde edilir. Gerekmesi halinde donatı da yerleştirilebilir.

Çelik kazıklar çakma kazık olarak kullanılan tipte kazıklardır. H, I profil şeklinde ya da dairesel olarak imal edilebilir. Boyunun uzatılması gerektiğinde perçin, bulon ya da kaynak yapılar ek profiller ilave edilebilir. Yüksek yük taşınmasına ihtiyaç olan projelerde kullanılabilir. Yalnız yeraltı suyunda çelik profillere zarar verecek maddeler olması halinde veya deniz içinde ömürleri kısa olabilir (Toğrol, 2009). Bu durumlarda çürümeye karşı maddelerle kaplanarak kullanılabilirler.

Ahşap kazıklar eski zamanlardan beri kullanılan kazıklardır. Çakma kazık olarak imal edilirler. Su seviyesi altında uzun ömürlüdürler. Yalnız su seviyesinin üstünde böcek, mantar vb. etkenlerden dolayı kazık malzemesi zarar görebilir. Taşıma kapasitesi çok yüksek kazıklar değildir ve sert zeminlere çakılması zordur. Ayrıca arazide uygulama sırasında karşılaşılan

problemlere göre zamanla farklı tipte kazıklar ortaya çıkmıştır. Bunlardan bazıları; mini kazıklar, zemin çivilemesi, beton kazıklar, vb.

Kazıklar zemin içinde meydana getirdikleri deformasyona göre de sınıflandırılabilirler. Deplasman kazıkları, zeminde ilerledikçe çevresindeki zeminin sıkışmasına sebep olan kazıklardır. Deplasman yaratmayan kazıklar ise genellikle fore kazık olarak adlandırılan kazıklardır. Kazık malzemesi zemine yerleştirmeden önce zemin delgi yöntemiyle hafredildiğinden dolayı imalat sırasında zeminde deplasman değişikliğine rastlanmaz.

Bunun dışında yarı deplasman kazığı olarak adlandırılan CFA (Continuous Flight Auger) kazık imalat yöntemi bulunmaktadır. CFA yönteminde boşluklu gövdeye sahip sürekli bir auger kullanılarak zeminde delgi yapılır. Auger çekilirken zemine beton ya da grout enjekte edilir ve yüzeye kadar doldurulur. Daha sonra beton priz almadan içine donatı yerleştirilir. Bu sistemde zeminin tamamı forajla dışarı alınmaz bir kısmı kazık çeperinde deplase edilir, bu nedenle yarı deplasman kazığı olarak adlandırılabilir (FHWA, 2016).

## **2.2.KAZIK TASARIM YÖNTEMLERİ**

Kazıklı temel tasarımı yapılırken, kazığın imal edileceği zemin tabakalarıyla arasındaki ilişki ve üst yapıdan gelen yüklere karşı yapacağı oturma miktarları dikkate alınır. Kazıklı temel tasarımında öncelikli konu kazığın taşıma kapasitesinin belirlenmesidir. Bu amaçla literatürde belirtilen statik veya dinamik kazık kapasitesi hesaplama yöntemleri bulunmaktadır. Ayrıca kazığın kapasitesi saha deneyleri yardımı ile de bulunabilir.

Kazığın taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik olan statik kazık formülleri, genellikle zeminin mukavemet direncine bağlı olarak, kazığın yüzeysel sürtünme direncine ve uç direncine bağlı olan hesap yöntemidir. Dinamik kazık formülleri ise çakma kazıkların imalatı sırasında zeminin gösterdiği dirence bağlı olmaktadır. Statik ve dinamik kazık formülleri ile kazık kapasitelerinin belirlenmesinin yanı sıra, belirlenen kazık kapasitelerinin güvenliğinin incelenmesi ve özellikle geniş çaplı projelerde ekonomi sağlanabilmesi amacıyla belirlenen kazık kapasitesi sahada yapılacak yükleme deneyleri ile de teyit veya kontrol edilebilir.

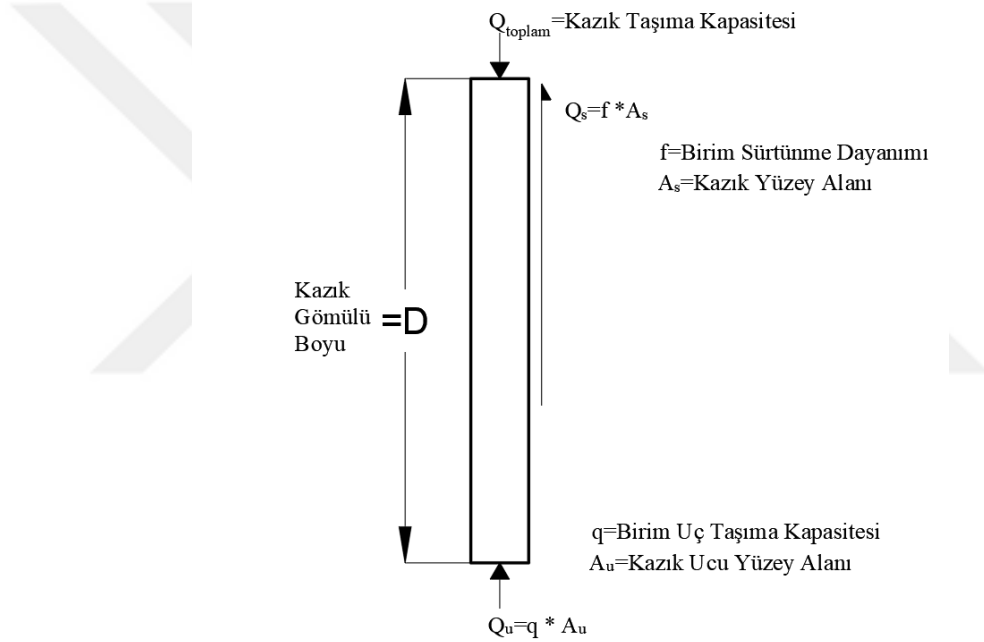
Bu başlık altında öncelikle literatürde geçerli olan statik hesaplama yöntemleri ile kazık taşıma kapasitesinin belirlenmesi irdelenecektir. Buna müteakiben farklı kurumlar tarafından hazırlanan ve günümüzde geçerli olan şartnamelere göre kazık taşıma kapasitesi hesaplama

yöntemleri ve saha deneylerine bağlı olarak yapılan kazık taşıma kapasitesi hesaplama yöntemlerine değinilecektir.

### 2.2.1. STATİK KAZIK FORMÜLLERİ

Kazığın toplam taşıma kapasitesi ( $Q_{nihai}$ ) Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi çevresindeki zeminden aldığı çevre sürtünmesi direnci ( $Q_s$ ) ve ucunun bastığı zeminden aldığı uç direnci ( $Q_{uç}$ ) bileşenlerinden oluşmaktadır. Denklem 2.1’de kazık taşıma kapasitesinin genel formülü görülmektedir.

$$Q_{nihai} = Q_s + Q_u \quad (2.1)$$



**Şekil 2.2:** Statik kazık formülleri ile kazık taşıma kapasitesi hesaplanması (Birand, 2001).

Bununla birlikte kazık elemanının bulunduğu zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak çevre ve uç direnci davranışı değişiklik göstermektedir. Granüler birimlerde zemin tabakasında mobilize olan efektif gerilmeler etkili olurken, kohezyonlu birimlerde zeminin mukavemet direnci (kohezyonu) önem kazanmaktadır. Kazık elemanının çevre ve uç direncinin genel literatürde yer alan hesaplanma yöntemleri granüler ve kohezyonlu birimler için sırasıyla açıklanmıştır.

- **Çevre Sürtünmesi Direnci**

Kazığın çevre sürtünmesi direnci kazık elemanı ile çevresindeki zemin arasında oluşan etkileşimden kaynaklanmaktadır. Kazık çevresinde oluşacak toplam çevre sürtünmesi direnci, kazığın etkileşimde olduğu tabakalardaki sürtünme direnci toplanarak elde edilir. Tabaka içerisinde kazığın sürtünme direncinin hesaplanmasında kullanılan genel denklem aşağıda görüldüğü gibidir;

$$Q_s = \sum p * \Delta L_i * f_i \quad (2.2)$$

Burada;

- p = Kazık kesitinin çevre uzunluğu
- $\Delta L$  = Tabaka kalınlığı
- $f_i$  = Zemin tabakası içindeki birim sürtünme değeri

Granüler birimlerde ve kohezyonlu birimlerde çevre sürtünmesi farklı mobilize olmaktadır. Granüler zeminlerde çevre sürtünmesi direnci zeminde oluşan efektif gerilmeler etkisiyle, kohezyonlu birimlerde ise kayma gerilmeleri etkisiyle oluşmaktadır.

Granüler zeminlerde kazık kapasitesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$Q_s = \sum \pi * d * \Delta L_i * K_i * \sigma'_{vi} * \tan \delta_i \quad (2.3)$$

Burada;

- i = Zemin tabakaları
- d = Kazık çapı
- $\Delta L_i$  = Tabaka kalınlığı
- $K_i$  = Yatay toprak basıncı katsayısı
- $\sigma'_{vi}$  = Tabaka ortasındaki düşey efektif gerilme
- $\delta_i$  = Kazık- zemin arasındaki sürtünme açısı

Formül 2.3'den de anlaşılacağı üzere kazık boyu arttıkça granüler tabakadaki efektif gerilmeler artış göstereceğinden kazık kapasitesinde de artış olması beklenmektedir. Zeminde oluşan gerilmeler ile birlikte kazık kapasitesini etkileyen farklı bir etken de kazığın yapım yöntemidir. Kazığın fore kazık ya da çakma kazık olarak imal edilmesi, kazık zemin arasındaki ilişkiyi etkilemektedir ve bu etkiyi hesaba katan yanal toprak basıncı katsayısı imalat yöntemine göre



farklılık göstermektedir. Kazık imalat yöntemine göre kabul edilebilecek efektif yanal toprak basıncı katsayısı (K) değerleri Tablo 2.1’de görülmektedir.

**Tablo 2.1:** Kazık tipine göre K değerleri (Birand,2001).

Kazık Tipi	K
Fore Kazıklar	$\approx K_o = 1 - \sin \phi$
Az Deplasman Yapan Çakma Kazıklar	$\approx K_o - 1.4 K_o$
Yüksek Deplasman Yapan Çakma Kazıklar	$\approx K_o - 1.8 K_o$

Granüler birimlerde kazık kapasitesinin hesaplanması kazık zemin arasındaki sürtünme direncine de bağlı olmaktadır. Kazık zemin arasındaki sürtünme açısı değerleri Tablo 2.2’de verilen değerlerden uygun olanı seçilmesi önerilmektedir.

**Tablo 2.2:** Kazık-zemin temas durumuna göre sürtünme açısı değerleri (Birand, 2001).

Kazık-Zemin Temas Durumu	Kazık-Zemin Sürtünme Açısı, $\delta$
Pürüzsüz veya Kaplanmış Çelik – Kum	$0.5 \phi' - 0.7 \phi'$
Kaba (ondüleli) Çelik – Kum	$0.7 \phi' - 0.9 \phi'$
Önceden Dökülmüş Beton – Kum	$0.8 \phi' - 1.0 \phi'$
Yerinde Dökülmüş Beton – Kum	$1.0 \phi'$
Ahşap – Kum	$0.8 \phi' - 0.9 \phi'$
Zemin içinde bırakılan kazıklar	$0.7 \phi' - 0.85 \phi'$

Kohezyonlu birimlerde çevre sürtünmesi direnci kilin drenajsız kayma mukavemeti değerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Ayrıca kil birimin adhezyon faktörü etkili olmaktadır. Buna göre kohezyonlu birimin çevre sürtünmesi direnci aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Q_s = \sum \pi * d * \Delta L_i * \alpha_i * c_i \quad (2.4)$$

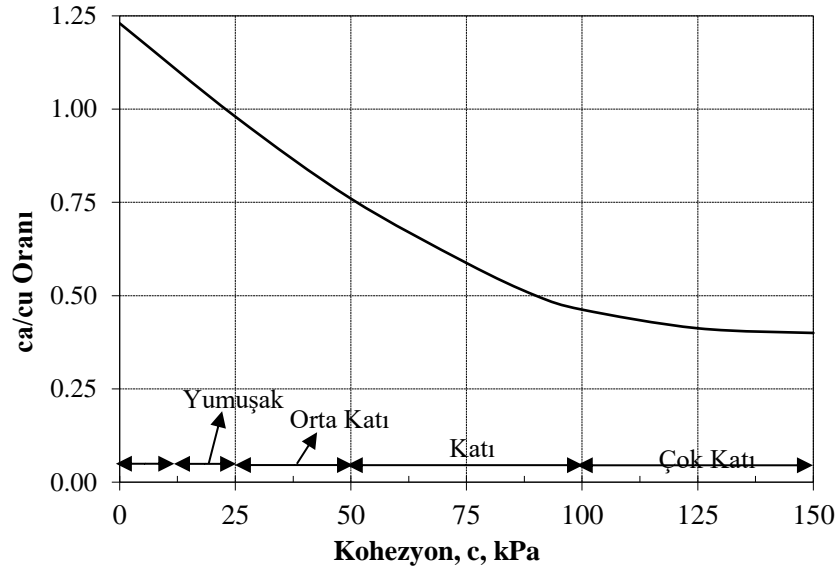
Burada;

- $\alpha_i$  =Zemin tabakasının adhezyon katsayısı
- $c_i$  =Zemin tabakasının drenajsız kayma direnci

Adhezyon katsayısı zemin tabakasının drenajsız kayma mukavemetine göre değişimi Tablo 2.3 ve Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir.

**Tablo 2.3:** Adhezyon katsayısı ve drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Birand,2001).

$c_u$ (kPa)	$\alpha$
90	0.60
100	0.58
150	0.42
200	0.35

**Şekil 2.3:** Adhezyon katsayısı ve drenajsız kayma mukavemeti ilişkisi (Birand,2001).

- **Uç Direnci**

Sürtünme kazıklarında uç direncinin hesaplanması temelde Terzaghi (1967) taşıma gücü teorisine dayanmaktadır. Buna göre dairesel kesitli kazıkların uç taşıma gücü aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$Q_u = \frac{\pi * d^2}{4} * (1.3 * c * N_c + \gamma * L * (N_q - 1) + 0.3 * \gamma * d * N_\gamma) \quad (2.5)$$

Burada;

- L = Kazığın toplam boyu,
- c = Zeminin kohezyonu
- $\gamma$  = Zeminin efektif birim hacim ağırlığı
- d = Kazık çapı

$N_\gamma, N_q, N_c$  = Zeminin içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayıları (Tablo 2.4).

**Tablo 2.4:** Taşıma gücü katsayıları (Terzaghi, 1967).

Zeminin İçsel Sürtünme Açısı	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0°	5.7	1.0	0.0
5°	7.3	1.6	0.5
10°	9.6	2.7	1.2
15°	12.0	4.4	2.5
20°	17.0	7.4	5.0
25°	25.1	12.7	9.7
30°	37.0	22.5	19.7
35°	57.8	41.4	42.4
40°	95.7	81.3	100.4

### 2.2.2. ŞARTNAMELER

Kazık kapasitesinin hesaplanmasında literatürde yer alan belli başlı kabul görmüş analitik yöntemler kullanılabilir. Bununla birlikte dünyada farklı kuruluşlar yayınladıkları şartnameler ile kazık tasarımı bölgesel olarak özelleştirmişlerdir.

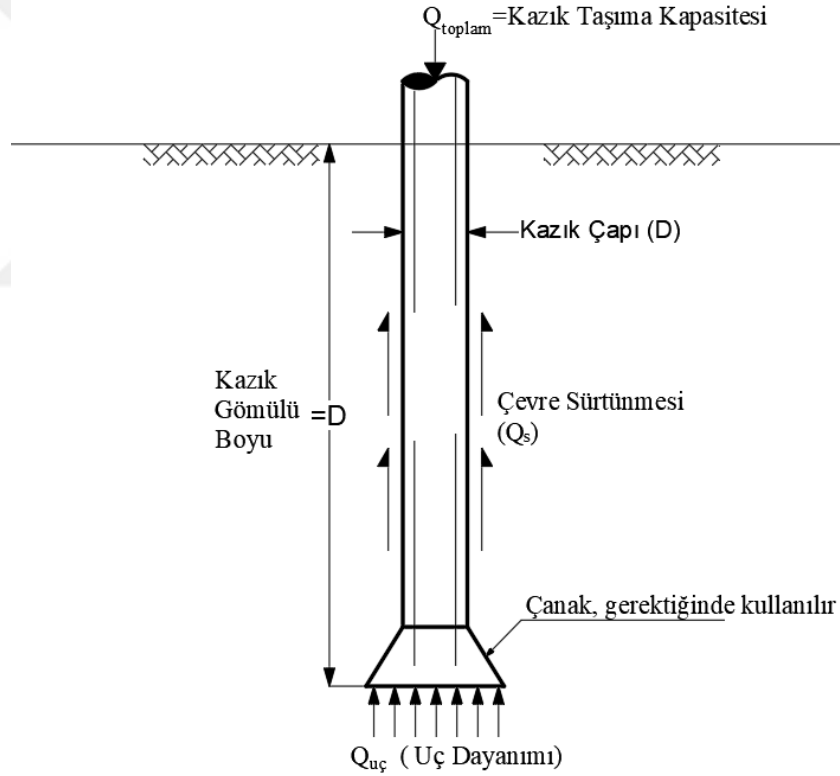
Türk standartları içinde fore kazıklar ile ilgili olarak “TS EN 1536+A1 Özel Jeoteknik Uygulamalar-Delme Kazıklar (Fore Kazıklar)” yönetmeliği içerisinde kazıkların imal edilme yöntemi, kullanılan malzeme ve metotlara değinilmiştir. Ayrıca Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2019) içerisinde belirtildiği üzere “*Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde birim çevre ve birim uç dirençleri literatüre dayanan ve genel kabul görmüş bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Taşıma gücü hesabında kazık imalat yönteminin etkisi dikkate alınmalıdır.*” Yönetmelikte ayrıca kazıklı temellerin emniyetli taşıma gücünün belirlenmesi için kullanılacak dayanım katsayıları da önerilmektedir. Bu kapsamda kazık tasarımında kullanılacak yöntemlerin irdelenmesi amacıyla literatürde kabul görmüş yöntemler irdelenmiştir.

Şartnameler ortak olarak kazığın kapasitesini çevre sürtünmesi ve uç direncinin toplamına göre belirleseler de aralarında bazı farklılıklar görülmektedir. AASHTO, LRFD, NAVFAC vb. şartnamelerde kazık tasarımı sürtünme ve uç direncini dikkate alır, bununla birlikte Rus şartnamesi olan SNIP için kazığın sürtünme direnci sınırlı kabul edilmektedir. Bu da sağlam tabakadan direnç alabilmek için kazık boylarını uzatma gerekliliğini ortaya çıkarır (Sağlamer ve diğ.,2017). Şartnameler içerisindeki hesap yöntemleri genellikle klasik taşıma kapasitesi yöntemine dayansa da kazık zemin arasındaki ilişkiyi hesaba katan katsayılar ve kabuller

nedeniyle, farklılıklar görülebilmektedir. Literatürde geçerli olan ve tasarımda kullanılan AASHTO, AASHTO LRFD, NAVFAC ve SNIP şartnamelerin kazığın düşey kapasitesinin hesaplanması için önerdiği yöntem, katsayı ve abaklar bu bölüm altında özetlenmektedir.

- **AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)**

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) tarafından yayımlanan Standard Specifications for Highway Bridges (2007) şartnamesi dünya çapında yapılan köprü tasarımlarında referans olarak kullanılmaktadır. Şartname kapsamında köprü inşaatında kullanılan elemanların tasarımında kullanılabilecek yöntemlere yer verilmiştir. Bu kapsamda yatay veya aksenal yüklenmiş kazıkların geoteknik tasarımı şartları da sunulmaktadır. Kazık tasarımı terminolojisi Şekil 2.4’de gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Kazık tasarım şeması (AASHTO, 2007).

Şartnameye göre kazığın nihai aksenal taşıma gücü formül 2.6 kullanılarak hesaplanabilir;

$$Q_{toplam} = Q_s + Q_{uç} - W \quad (2.6)$$

Burada;

$$Q_{toplam} = \text{Kazığın Nihai Aksenal Taşıma Kapasitesi}$$

$$Q_s = \text{Kazığın Sürtünme Kapasitesi}$$

$Q_{uç}$  =Kazığın Uç Kapasitesi  
 $W$  =Kazık Elemanının ağırlığı

Denkleme göre kazığın nihai eksenel taşıma kapasitesi kazık yüzeyinde oluşan sürtünme kuvveti ve kazık ucunda oluşan dirence bağlıdır. Sürtünme direnci şartnamede belirtildiği üzere kohezyonlu birimlerde toplam ve efektif gerilme metoduna göre drenajlı ve drenajsız koşullar için hesaplanabilir. Kohezyonsuz zeminlerde ise drenajsız koşullarda efektif gerilme metoduna göre hesaplanmalıdır.

### \*Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması

Kohezyonlu birimlerde çevre sürtünme kapasitesi formül 2.7 kullanılarak hesaplanması önerilmektedir;

$$Q_s = \pi * B * \sum_{i=1}^N \alpha_i * c_{ui} * \Delta Z_i \quad (2.7)$$

Burada kazık birim çevre sürtünmesi  $f_{si}$ ,  $\alpha_i$  ve  $c_{ui}$  cinsinden tarif edilmektedir.  $f_{si}$ , kazığın derinliğe bağlı çevre sürtünmesi değeri  $\alpha_i$  ve  $c_{ui}$  değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tablo 2.5’de kazık imalat koşullarına göre kabul edilecek  $\alpha_i$  ve  $f_{si}$  değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 2.5:** Kohezyonlu zeminler için önerilen  $\alpha$  ve  $f_{si}$  değerleri (AASHTO,2007).

Foraj Üzerindeki Derinlik	$\alpha$ Değeri	Limit $f_{si}$ (kPa)
Zemin yüzeyinden 1.5 m derinliğe kadar	0	-
Foraj dibinden 1 çap altı mesafeye kadar	0	-
Foraj üzerindeki diğer tüm noktalar	0.55	48

$Q_s$  hesaplanırken çevresel koşullar, uzun dönem yükleme koşulları ve imalat faktörleri düşünülerek üstteki 1.5 m kalınlığındaki kısmın ihmal edilmesi önerilmektedir.

Eğer zeminin kayma mukavemetinde zamana bağlı değişim oluyorsa (kil birimlerde şişme, zeminin konsolidasyonuna bağlı oturma) drenajlı yükleme koşullarına göre tasarım yapılmalıdır. Kohezyonlu birimlerde drenajlı yükleme koşulları için tasarım yapılırken, kohezyonsuz birimler için aşağıda açıklanan yöntem kullanılabilir;

$$Q_s = \pi * B * \sum_{i=1}^N \gamma_i' * z_i * \beta_i * \Delta_{zi} \quad (2.8)$$

Formülde kullanılan  $\beta_i$  katsayısı da derinliğe bağlı olarak aşağıda belirtildiği gibi hesaplanır;

$$\beta_i = 1.5 - 0.135 * \sqrt{z_i}; 1.2 > \beta_i > 0.25 \quad (2.9)$$

### \*Uç Direncinin Hesaplanması

Kohezyonlu birimlerde uç direnci hesaplanırken formül 2.10 kullanılır;

$$Q_{uç} = q_{uç} * A_t = N_c * c_{ut} * A_T \quad (2.10)$$

Burada kullanılan taşıma kapasitesi faktörü  $N_c$  formül 2.11 kullanılarak hesaplanabilir;

$$N_c = 6 * \left[ 1 + 0.2 * \frac{D}{B_t} \right]; N_c \leq 9 \quad (2.11)$$

Granüler birimlerde kazık uç direnci hesaplanırken;

$$Q_{uç} = q_T * A_t \quad (2.12)$$

formülü kullanılır. Formülde kullanılan birim uç taşıma kapasitesi ( $q_{uç}$ ) Tablo 2.6'da belirtildiği gibi seçilebilir.

**Tablo 2.6:** Granüler birimlerde imal edilen fore kazık uç dayanımı için önerilen  $q_t$  değerleri (AASHTO,2007).

SPT-N (düzeltilmemiş)	$q_{uç}$ (ksf)
0 -35	1.20*N
>35	90

- **AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS**

AASHTO tarafından köprü tasarımlarında referans olması amacıyla hazırlanan “Standart Specifications for Highway Bridges and Incidental Structures (2007)” şartnamesi, tasarım ve uygulamalardaki gelişmelere bağlı olarak zamanla güncellenmiştir. 2002 hazırlanmış olan AASHTO şartnamesinin ardından, yük ve dayanıma bağlı olan LRFD (Load Resistance Factor Design, 2014) şartnamesi yayınlanmıştır. Bu şartnamede yapısal elemanlarla birlikte yükleme

koşullarında da farklı varyasyonlar sunan tasarım alternatifleri incelenmiştir. Bu çalışmayla birlikte yapı tasarımcıları iki farklı şartnameyi tasarımlarına referans olarak kabul etmiştir. LRFD şartnamesine göre basınç dayanımı altındaki tekil fore kazıkların tasarımı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$R_R = \varphi * R_n = \varphi_{qp} * R_p + \varphi_{qs} * R_s = \varphi_{qp} * q_p * A_p + \varphi_{qs} * q_s * A_s \quad (2.13)$$

Burada;

- $R_p$  =Kazık shaftı uç direnci
- $R_s$  =Kazık shaftı çevre direnci
- $\varphi_{qp}$  =Şaft uç direnci faktörü (Tablo 2.7)
- $\varphi_{qs}$  =Şaft sürtünme direnci faktörü (Tablo 2.7)
- $q_p$  =Birim uç direnci
- $q_s$  =Birim çevre direnci
- $A_p$  =Kazık uç alanı
- $A_s$  =Kazık çevresi yüzey alanı

Formülde kazık için kullanılan yüzey ve uç direnci faktörleri aşağıdaki tablo vasıtasıyla belirlenebilir.

**Tablo 2.7:** Fore kazıklar için direnç faktörü (LRFD,2014).

Zemin tipi/Koşul	Direnç faktörü	
Tekil Fore Kazıklar için Eksenel Basınç Direnci	Kil birimde çevre direnci	0,45
	Kil birimde uç direnci	0,40
	Kum birimde çevre direnci	0,55
	Kum birimde uç direnci	0,50
	Kaya birimde çevre direnci	0,50-0,55
	Kaya birimde uç direnci	0,50

LRFD şartnamesine göre de kohezyonlu ve granüler birimler için shaft sürtünme ve uç dayanımı farklı metotlar kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu metotlar aşağıda sırasıyla gösterilmektedir.

#### **\*Çevre Sürtünmesinin Hesaplanması**

LRFD şartnamesine göre drenajsız koşullar altında yüklenen, kohezyonlu birimlerdeki kazık shaftı üzerinde oluşan birim çevre sürtünmesi direnci ( $q_s$ )  $\alpha$ -metodu kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$q_s = \alpha * S_u \quad (2.14)$$

Burada kullanılan  $\alpha$  katsayısı aşağıda belirtilen formüllere göre iki şekilde belirlenebilir;

$$\alpha = 0.55 \text{ for } \frac{S_u}{P_a} \leq 1.5 \quad (2.15)$$

$$\alpha = 0.55 - 0.1 * \left( \frac{S_u}{P_a} - 1.5 \right) \text{ for } 1.5 \leq \frac{S_u}{P_a} \leq 2.5 \quad (2.16)$$

Bu formüllerde;

- $S_u$  =drenajsız kayma mukavemeti
- $\alpha$  =adhezyon faktörü
- $P_a$  =atmosfer basıncı (101.5 kPa)

Kohezyonsuz zeminlerde sürtünme dayanımı  $\beta$  metodu kullanılarak aşağıdaki formüller vasıtasıyla hesaplanabilir;

$$q_s = \beta * \sigma'_v \quad (2.17)$$

Formülde kullanılan  $\beta$  faktörü aşağıdaki formül vasıtasıyla belirlenebilir;

$$\beta = (1 - \sin \phi'_f) * \tan \phi'_f * \left( \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \right)^{\sin \phi'_f} \quad (2.18)$$

Bu formülde;

- $\beta$  =Yük transfer sabiti
- $\phi'_f$  =Kohezyonsuz zeminin sürtünme açısı
- $\sigma'_p$  =Düşey efektif ön konsolidasyon gerilmesi
- $\sigma'_v$  =Zemin tabaksının ortasındaki düşey efektif gerilme

Efektif ön konsolidasyon gerilmesi aşağıdaki formül vasıtasıyla hesaplanabilir;

$$\frac{\sigma'_p}{P_a} = 0.47 * (N_{60}^m) \quad (2.19)$$

- $m$  =0,6 (temiz silisli kumlar)
- $m$  =0,8 (siltli kum ve kumlu siltler )
- $p_a$  =Atmosfer basıncı (101.5 kPa)



**\*Uç Direncinin Hesaplanması**

Kohezyonlu zeminlerde uç kapasitesi ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$q_p = N_c * S_u \leq 80.0 \text{ ksf} = 3830 \text{ kPa} \quad (2.20)$$

$N_c$  değeri aşağıdaki formül vasıtasıyla belirlenebilir;

$$N_c = 6 * [1 + 0.2 * \left(\frac{Z}{D}\right)] \leq 9 \quad (2.21)$$

Burada;

- D = kazık çapı
- Z = kazık ucunun derinliği
- $S_u$  = drenajsız kayma mukavemeti

Kazık ucunun  $2*D$  yüksekliği içerisinde drenajsız kayma mukavemeti değeri  $s_u \leq 24$  kPa değerinden daha küçük olarak belirlenirse,  $N_c$  değeri 0.67 ile çarpılarak kullanılmalıdır. Granüler zeminlerde uç kapasitesi hesaplanırken SPT deney sonuçlarına bağlı bir yöntem önerilmiştir. Buna göre eğer  $N_{60} \leq 50$  ise birim uç dayanımı aşağıdaki formül vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$q_p = 1.2 * N_{60} \quad (2.22)$$

- **SNIP 2.02.03-85, Pile Foundations (National Codes&Standards of Russia,1999)**

SNIP 2.02.03-85, Pile Foundations şartnamesi Rusya ve ilişkili olduğu ülkeler tarafından kazıklı temellerin tasarımında kullanılan şartnamedir. Şartname kapsamında fore kazıklar, çakma kazıklar, çelik kazıklar gibi farklı tiplerde uygulanan kazıkların tasarımı ve imalatında dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmektedir. Çalışma kapsamında fore kazık tasarımı ile ilgili bölümler irdelenmiştir. SNIP şartnamesine göre kazık tasarımı, kazığın imalat şekline ve çalışma şekline göre farklılıklar gösterir. Bu çalışmanın ana konusu olan sürtünmeye çalışan fore kazık tasarımı şartname içinde “Yerinde dökme ve foraj yapılmış sürtünme kazıkları ve beton dolgulu tüp kazıklar” başlığı içerisinde işlenmiştir. SNIP şartnamesine göre kazık kapasitesi genel olarak kazığın gömülü olduğu zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri, yeraltı suyu durumu ve kazık imalat yöntemlerine bağlıdır. Diğer şartnamelerden farklı olarak SNIP şartnamesinde kazığın taşıma kapasitesi kohezyonlu birimlerde likitlik indeksi ( $I_L$ ), granüler birimlerde ise sıklık ve dane boyutuna bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sağlamer ve diğ.,2017).

Buna koşullara bağlı belirlenmiş katsayılar kullanılarak kazığın çevre sürtünmesi ve uç taşıma kapasitesi hesaplanır. Kazık kapasitesi hesaplanmasında kullanılan formül;

$$F_d = \gamma_c * \underbrace{(\gamma_{cR} * R * A)}_{\text{Uç Kapasitesi}} + \underbrace{u * \sum c_f * f_i * h_i}_{\text{Çevre Sürtünmesi}} \quad (2.23)$$

Taşıma kapasitesi formülü kapsamında verilen değerler, zemin özelliklerine ve kazık imalat yöntemlerine göre tablolar halinde şartnamede sunulmaktadır. Formül içerisinde kullanılan A değeri kazık ucunun kesit alanı,  $h_i$  değeri sürtünmesi hesaplanacak kazık yüzeyinin tabaka kalınlığı ve u değeri kazık yüzeyinin bu tabaka içerisindeki çevresini ifade eder. Diğer hesap sabitleri ve tasarımda kullanılacak değerleri aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır;

1.  $\gamma_c$ =Çalışma koşulları faktörü
  - $\gamma_c=0.8$  (Kazık, nem oranı  $S_r < 0.9$  olan siltli ve killi zeminlere ve gevşek zeminlere oturduğunda)
  - $\gamma_c=1$  (Diğer durumlarda)
2.  $\gamma_{cR}$ =Kazığın ucundaki zeminin çalışma koşulları faktörü
  - $\gamma_{cR}=1$  (Tüm durumlarda)
  - $\gamma_{cR}=1.3$  (Genişletilmiş soketi olan kazıklarda)
  - $\gamma_{cR}=0.9$  (Genişletmenin su seviyesi altında yapıldığı kazıklarda)
3. R=Kazık ucunun altındaki zeminin tasarım dayanımı (kPa) granüler birimler için ve kohezyonlu birimler için farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır. Granüler birimler için Tablo 2.8'de zeminin içsel sürtünme açısı değerine bağlı değerler kullanılarak aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.
 
$$R = 0.75 * \alpha_4 * (\alpha_1 * \gamma'_1 * d + \alpha_2 * \alpha_3 * \gamma_1 * h) \quad (2.24)$$
4. Kohezyonlu birimler için R değeri, kazık ucundaki zeminin likitlik indeksi ( $I_L$ ) ye bağlı olarak Tablo 2.9'da verilen değerler kullanılarak belirlenebilir.
5.  $\gamma_{cf}$  (kazık yüzeyindeki zeminin çalışma koşulları faktörü) kazığın imalat yöntemi ve zemin koşullarına göre Tablo 2.10' da verilen değerler kullanılarak belirlenebilir.
6.  $f_i$  değeri kazık çevresindeki zeminin tasarım dayanımını ifade eder ve Tablo 2.11'de verilen değerler üzerinden zemin tipine ve tabakanın derinliğine bağlı olarak belirlenir.

**Tablo 2.8:** Granüler birimlerde kazık ucu tasarım dayanımı (SNIP,1999).

Faktörler	Zeminin İçsel Sürtünme Açısına ( $\phi_i$ ) Bağlı Tasarım Değerleri								
	23	25	27	29	31	33	35	37	39
$\alpha_1$	9.5	12.6	17.3	24.4	34.6	48.6	71.3	108.0	163.0
$\alpha_2$	18.6	24.8	32.8	45.5	64.0	87.6	127.0	185.0	260.0
$\alpha_3$ (h/d=)									
4,0	0.78	0.79	0.8	0.82	0.84	0.85	0.85	0.85	0.87
5,0	0.75	0.76	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.84	0.85
7,5	0.68	0.7	0.71	0.74	0.76	0.8	0.82	0.82	0.84
10,0	0.62	0.65	0.67	0.7	0.73	0.77	0.79	0.79	0.81
12,5	0.58	0.61	0.68	0.67	0.7	0.73	0.75	0.78	0.8
15,0	0.55	0.58	0.61	0.65	0.68	0.71	0.73	0.76	0.79
17,5	0.51	0.55	0.58	0.62	0.66	0.69	0.72	0.75	0.78
20,0	0.49	0.53	0.57	0.61	0.65	0.68	0.72	0.75	0.78
22,5	0.46	0.51	0.55	0.6	0.64	0.67	0.71	0.74	0.77
>25,0	0.44	0.49	0.54	0.59	0.63	0.67	0.7	0.74	0.77
$\alpha_4$ (d=)									
$\leq 0,8$ m	0.34	0.31	0.29	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22
4,0 m	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.2	0.19	0.18	0.17

**Tablo 2.9:** Kohezyonlu birimlere göre kazık ucu tasarım dayanımı (SNIP,1999).

Kazık ucunun derinliği(m)	Tasarım Dayanımı, R(kPa), Likitlik İndeksi $I_L$ ye bağlı olarak;						
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
3	850	750	650	500	400	300	250
5	1000	850	750	650	500	400	350
7	1150	1000	850	750	600	500	450
10	1350	1200	1050	950	800	700	600
12	1550	1400	1250	1100	950	800	700
15	1800	1650	1500	1300	1100	1000	800
18	2100	1900	1700	1500	1300	1150	950
20	2300	2100	1900	1650	1450	1250	1050
30	3300	3000	2600	2300	2000	-	-
40	4500	4000	3500	3000	2500	-	-

**Tablo 2.10:** Kazık çalışma koşulları faktörü ( $\gamma_{cf}$ ) (SNIP,1999).

Kazık Ve İmalat Yöntemi Tipi	Kazığın Çalışma Koşulları Faktörü, $\gamma_{cf}$			
	Kumlar	Kumlu Killer	Balçık	Killer
Pabuç ve yeniden kullanılabilir boru kullanılarak çakılan yerinde dökme kazıklar	0.8	0.8	0.8	0.7
Vibrasyon veya çakma yöntemiyle imal edilen yerinde dökme kazıklar	0.9	0.9	0.9	0.9
Fore Kazıklar				
*yeraltı suyu yoksa kuru metotla veya kılıfla beton dökülen kazıklar	0.7	0.7	0.7	0.6
*Suyun altında bentonit çamuru ile dökülen kazıklar	0.6	0.6	0.6	0.6
*vibrasyon ile düşük slampa sahip beton dökülen kazıklar	0.8	0.8	0.8	0.7

**Tablo 2.11:** Tasarım dayanımı ( $f_i$ ) (SNIP,1999).

Tabakanın Ortalama Kalınlığı (m)	Orta Sıkı Kumlar								
	Kaba ve orta daneli	İnce daneli	Siltli	-	-	-	-	-	-
	Siltli ve Killi Zeminler Likitlik İndeksine bağlı olarak								
$I_L$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	35	23	15	12	8	4	4	3	2
2	42	30	21	17	12	7	5	4	4
3	48	35	25	20	14	8	7	6	5
4	53	38	27	22	16	9	8	7	5
5	56	40	29	24	17	10	8	7	6
6	58	42	31	25	18	10	8	7	6
8	62	44	33	26	19	10	8	7	6
10	65	48	34	27	19	10	8	7	6
15	72	51	38	28	20	11	8	7	6
20	79	56	41	30	20	12	8	7	6
25	86	61	44	32	20	12	8	7	6
30	93	66	47	34	21	12	9	8	7
35	100	70	50	36	22	13	9	8	7



Burada;

- $Q_{ult}$  = Basınç altındaki kazığın nihai taşıma kapasitesi  
 $P_T$  =Kazık ucundaki efektif düşey gerilme  
 $N_q$  =Taşıma kapasitesi faktörü (Tablo 2.12)  
 $A_T$  = Kazık ucu kesit alanı  
 $K_{HC}$  =Basınç altındaki kazık çevresindeki zeminin yatay-düşey efektif gerilme oranı  
 (Tablo 2.13)  
 $P_O$  =Tabaka boyunca ortalama düşey gerilme  
 $\delta$  =Kazıkla zemin arasındaki sürtünme açısı (Tablo 2.14)  
 $S$  =Kazık yüzey alanı

**Tablo 2.12:** Taşıma kapasitesi faktörleri ( $N_q$ ) (NAVFAC,1986).

$\phi$	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Çakma Kazıklar	10	15	21	24	29	35	42	50	62	77	86	120	145
Fore Kazıklar	5	8	10	12	14	17	21	25	30	38	43	60	72

**Tablo 2.13:** Kazık tipine göre zemin basıncı faktörleri (NAVFAC,1986).

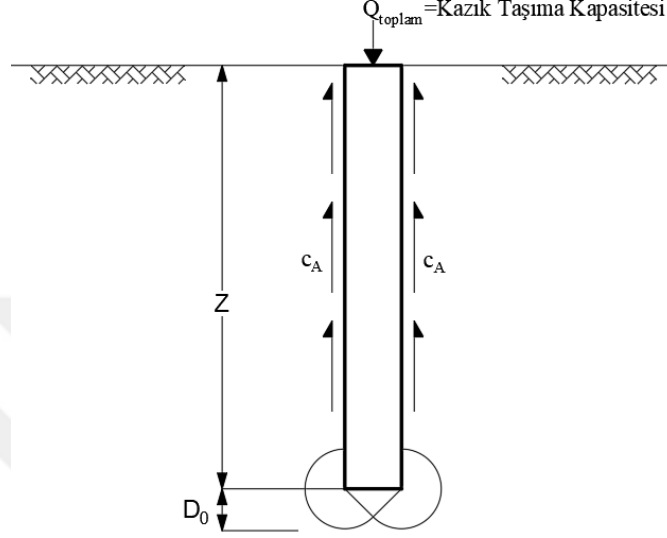
Kazık Tipi	$K_{HC}$	$K_{HT}$
Çakma Jet Kazığı	0.4-0.9	0.3-0.6
Fore Kazık	0.7	0.4

**Tablo 2.14:** Kazık zemin arası sürtünme açısı ( $\delta$ ) (NAVFAC,1986).

Kazık Tipi	$\delta$
Çelik	20°
Beton	3/4* $\phi$
Ahşap	3/4* $\phi$

Kohezyonlu zeminlerde taşıma kapasitesi zeminin kayma mukavemetine bağlı formül ve bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Kohezyonlu birimlerde yeraltı suyu seviyesinin zeminin kohezyonuna etkisi olmadığı sürece kazık kapasitesini etkilemediği göz önünde bulundurulmalıdır. Kohezyonlu zeminlerde imal edilen kazıkların nihai taşıma kapasitesi Şekil 2.6'da gösterilen şema referans alınarak hesaplanmaktadır. Bu şemaya göre kazık kapasitesi aşağıdaki denklem 2.26 kullanılarak belirlenebilir. Denklem dahilinde kullanılan katsayılar aşağıdaki tablo ve grafiklerde sırasıyla verilmektedir.

$$Q_{ult} = \underbrace{c * N_c * \pi * R^2}_{\text{Uç Kapasitesi}} + \underbrace{c_A * 2 * \pi * R * Z}_{\text{Çevre Sürtünmesi}} \quad (2.26)$$

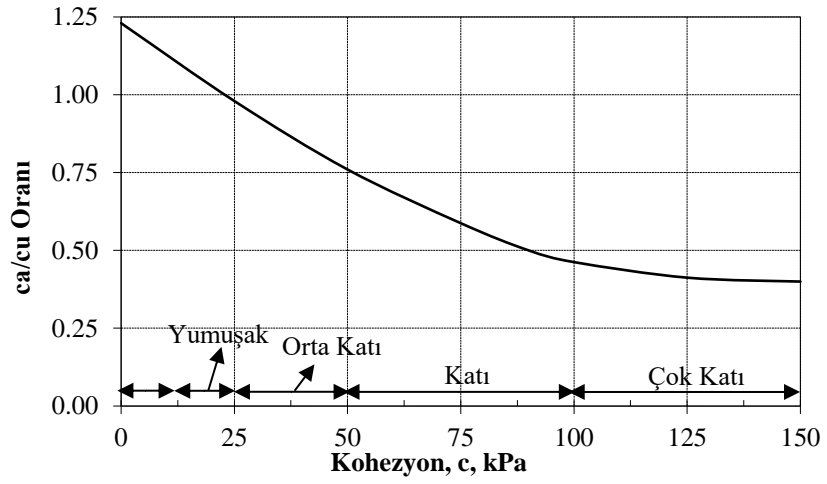


Şekil 2.6: Kohezyonlu birimlerde kazık taşıma kapasitesi (NAVFAC,1986).

Zemin çevre sürtünmesi, kazık elemanı ve zemin arasındaki adhezyon kuvvetine bağlı olarak hesaplanır. Tablo 2.15’de kazık tipi ve zeminin kohezyonuna bağlı olarak kabul edilebilecek adhezyon değerleri önerilmektedir. Ayrıca Şekil 2.7’de verilen grafik kullanılarak kohezyona bağlı olarak adhezyon belirlenebilir.

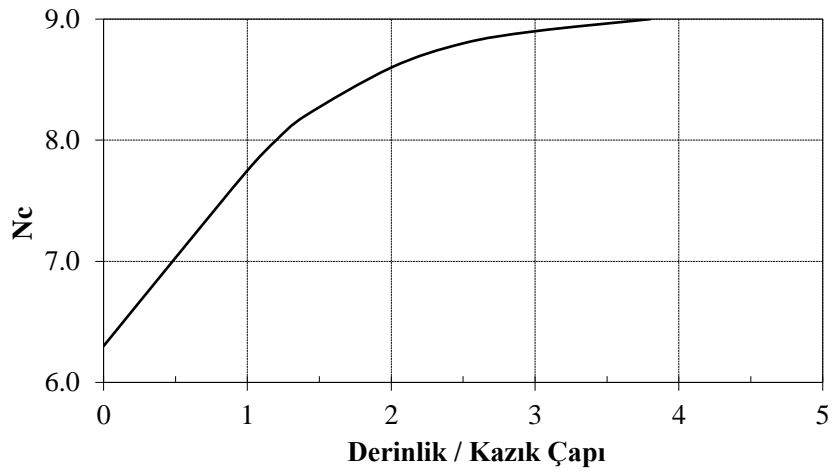
Tablo 2.15: Önerilen adhezyon ( $c_A$ ) değerleri (NAVFAC,1986).

Kazık Tipi	Zeminin Yoğunluğu	Kohezyon,c (kPa)	Adhezyon, $c_A$ (kPa)
Ahşap ve Beton	Çok Yumuşak	0-12	0-12
	Yumuşak	12-24	12-23
	Orta Sert	24-48	23-36
	Sert	48-96	36-45,5
	Çok Sert	96-192	45,5-62,2
Çelik	Çok Yumuşak	0-12	0-12
	Yumuşak	12-24	12-22
	Orta Sert	24-48	22-33,5
	Sert	48-96	33,5-34,5
	Çok Sert	96-192	34,5-36



Şekil 2.7: Adhezyon / kohezyon ( $c_a/c$ ) oranı grafiği (NAVFAC,1986).

Kazık uç kapasitesinin belirlenmesinde kullanılan taşıma kapasitesi oranı Şekil 2.8'de verilen grafik kullanılarak derinlik/kazık çapı oranına bağlı olarak belirlenebilir.



Şekil 2.8: Taşıma kapasitesi faktörü,  $N_c$  (NAVFAC,1986).



### 2.2.3. ARAZİ DENEYLERİ KULLANILARAK KAZIK TAŞIMA GÜCÜNÜN BELİRLENMESİ

Arazide zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan zemin çalışmaları sırasında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT), Pressiyometre deneyi vb. deneyler yapılmaktadır. Deneylerin sonuçlarına göre bağlı olarak arazide karşılaşılan zeminin mukavemet parametrelerini belirlemek üzere kullanılan ampirik formüller bulunmaktadır. Bu formüller vasıtasıyla zemin parametreleri belirlenebilirken, kazık tasarımı da yine bu formüllere bağlı olarak yapılabilmektedir.

- **SPT (Standart Penetrasyon Testi)**

Standart Penetrasyon Testi (SPT) arazide uygulanması kolay bir deney olması nedeniyle tüm dünyada ve özellikle Türkiye’de yaygın olarak kullanılan arazi deneylerindedir. SPT en gelen anlamda sondaj kuyusunun içerisinde yapılan, en uçtaki standart örnek alıcısının bağlı olduğu tijlerin üzerine, 63.5 kg ağırlıktaki bir şahmerdanın 76.2 cm yükseklikten tekrarlı bir şekilde bırakılarak kuyu tabanından toplamda 45 cm’lik penetrasyon sağlanana kadar çakılması ve bunun için gerekli olan darbe sayısı (SPT-N değerlerinin belirlenmesi olarak tanımlanabilir. SPT sonuçları kullanılarak kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin fiziksel ve mühendislik parametrelerinin belirlenebildiği bağıntılar güncel literatürde sıkça yer bulmaktadır. Ayrıca kazık elemanının sürtünme ve uç direncinin belirlenebilmesi için SPT deneyi sonuçlarına göre kullanılan ampirik formüller de mevcuttur. Fernando Schnaid (2009) tarafından derlenen kapasite hesaplanması yöntemi bu tez kapsamında özetlenmektedir.

Buna göre eksenel yükler altındaki kazığın nihai kapasitesi ( $Q_u$ ), kazığın uç kapasitesi ( $Q_b$ ) ve sürtünme kapasitesi ( $Q_s$ ) toplamına eşittir. Bu da aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$Q_u = Q_b + Q_s = A_b * q_b + A_s * f_s \quad (2.27)$$

Burada;

- $A_b$  =Kazık taban alanı
- $A_s$  =Kazık yüzey alanı
- $q_b$  =Birim uç-taşıma dayanımı
- $f_s$  =Ortalama yüzey dayanımı

Kazığın ortalama yüzey sürtünmesi dayanımı,  $f_s$  değeri kazığın imalat yöntemi ve zeminin tabakalarının cinsine belirlenen göre  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ve zemin tabakalarının ortalama SPT-N değerlerine göre belirlenebilir. Bu yöntemde Tablo 2.16’da önerilen katsayılar kullanılarak

aşağıdaki formül vasıtasıyla zemin tabakalarının ortalama yüzey dayanımı hesaplanabilir.

$$f_s = \alpha + \beta * N \quad (2.28)$$

**Tablo 2.16:** Yüzey sürtünmesi ve SPT-N değerleri arasındaki ilişki,  $f_s = \alpha + \beta * N$  kN/m<sup>2</sup> (Schnaid,2009).

Kazık Tipi	Zemin Tipi	$\alpha$	$\beta$	Notlar	Referans
Deplasman Kazıkları	Kohezyonsuz	0	2	* $f_s$ = shaft boyunca ortalama değer * $N$ =shaft boyunca ortalama SPT *küçük deplasman kazıkları için $f_s$ 'in yarısı	Mayerhof (1956) Shioi ve Fukui(1982)
	Kohezyonsuz-kohezyonlu	10.0	3.3	*Kazık tipi belirtilmemiş * $50 \geq N \geq 3$ * $f_s > 170$ kN/m <sup>2</sup>	Decourt(1982)
	Kohezyonlu	0	10.0		Shioi ve Fukui(1982)
Yerinde Dökme Kazıklar	Kohezyonsuz	30	2.0	* $f_s > 200$ kN/m <sup>2</sup>	Yamashita et al. (1987)
	Kohezyonlu	0	5.0		Shioi ve Fukui(1982)
	Kohezyonlu	0	5.0	* $f_s > 150$ kN/m <sup>2</sup>	Yamashita et al. (1987)
	Kohezyonlu	0	10.0		Shioi ve Fukui(1982)
Fore Kazıklar	Kohezyonsuz	0	1.0		Findlay (1984) Shioi ve Fukui(1982)
	Kohezyonlu	0	3.3		Wright and Reese (1979)
	Kohezyonlu	0	5.0		Shioi ve Fukui(1982)
	Kohezyonlu	10	3.3	*Bentonitle yapılmış kazıklar * $50 \geq N \geq 3$ * $f_s > 170$ kN/m <sup>2</sup>	Decourt(1982)
	Tebeşir	-125	12.5	* $30 \geq N \geq 15$ * $f_s > 250$ kN/m <sup>2</sup>	Fletzer and Mizon (1984)

Birim uç dayanımı  $q_b$  değeri, zemin tipi ve kazık imalat yöntemine göre belirlenen  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ve SPT-N değerlerine göre belirlenebilir. Buna göre birim uç dayanımı değeri Tablo 2.17’de önerilen değerler kullanılarak aşağıdaki formül vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$q_b = K * N \text{ MN/m}^2 \quad (2.29)$$

**Tablo 2.17:** Uç taşıma kapasitesi ve SPT-N değerleri arasındaki ilişki,  $q_b=K*N$  MN/m<sup>2</sup> (Schnaid,2009).

Kazık Tipi	Zemin Tipi	K	Notlar	Referans	
Deplasman Kazıkları	Kum	0.45	N=göçme bölgesindeki ortalama SPT	Marti et al. (1987)	
	Kum	0.4		Decourt (1982)	
	Silt, Kumlu Silt	0.35		Martin et al. (1987)	
	Buzul Kökenli İri-İnce Daneli Silt Artıkları	0.25		Thorburn ve Mac Vicar (1971)	
	Artık Kumlu Silt	0.25		Decourt (1982)	
	Artık Killi Silt	0.2		Decourt (1982)	
	Kil	0.20		Martin et al. (1987)	
	Kil	0.12		Decourt (1982)	
			0.30	L/D≥5	Shioi ve Fukui (1982)
			0.1+	L/D<5, Kapalı uçlu kazıklar	
	Tüm Zeminler	0.004 L/D	L/D<5, Açık uçlu kazıklar		
		0.06 L/D			
Yerinde Dökme Kazıklar	Kohezyonsuz	0.15	$q_b=3.0$ MN/m <sup>2</sup> $q_b \geq 7.5$ MN/m <sup>2</sup>	Shioi ve Fukui (1982) Yamashita et al. (1987)	
	Kohezyonlu	-	$q_b=0.009(1+0.16z)$ z=kazık ucunun derinliği(m)	Yamashita et al. (1987)	
Fore Kazıklar	Kum	0.1		Shioi ve Fukui (1982)	
	Kil	0.15		Shioi ve Fukui (1982)	
	Chalk	0.25	N<30	Hobbs (1977)	
		3.3	N>40		

- **CPT**

Konik penetrasyon deneyi (CPT), konik geometriye sahip bir ucun metal çukurlara monte edilerek kuyu açmaya gerek kalmaksızın hidrolik baskı ile zemine sabit bir hızla itilmesi için gerekli kuvvetin sürekli olarak ölçümünü kapsamaktadır.

Temel altı kazık tasarımında Konik penetrasyon deneyi sonuçlarına göre belirlenen korelasyonlar da kullanılmaktadır. Bustamante ve Ganeselli (1982) tarafından önerilen LCPC metodu aşağıda özetlenmektedir.

Bu metoda göre, birim uç taşıma kapasitesi ve ortalama sürtünme direnci konik uçtaki resistans ( $q_c$ ) değerine göre aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hesaplanır. Tablo 2.18'de formülde kullanılacak katsayılar zemin cinsi ve CPT deney sonuçlarına göre belirlenebilir.

$$q_b = k_c * q_{c,ortalama} \quad (2.30)$$

$$f_p = \frac{q_{c,z}}{\alpha} \quad (2.31)$$

Burada;

$q_{c,ortalama}$	=Kazık ucunun $1,5*D$ üstündeki ve altındaki zeminin ortalama $q_{c,z}$ değeri
$q_{c,z}$	=z derinliğindeki $q_c$ değeri
$k_c$ ve $\alpha$	=Kazık, zemin ve ölçülen konik dayanıma göre belirlenen faktörler
D	=Kazık çapı

**Tablo 2.18:** Yük kapasitesi faktörleri  $k_c$  ve  $\alpha$  (Schnaid,2009).

Zemin Cinsi	$q_c$ (MPa)	$k_c$	$\alpha$	$f_{p,max}$ (MPa)
Yumuşak Kil	$q_c < 1$	0.40	30	15
Orta Sıkı Kil	$1 < q_c < 5$	0.35	40	80
Sıkı- Sert Kil, Sıkı Silt	$q_c > 5$	0.45	60	80
Silt ve Gevşek Kum	$q_c < 5$	0.40	60	35
Orta Sıkı kum ve çakıl	$5 < q_c < 12$	0.40	100	120
Sıkı- Çok Sıkı kum ve çakıl	$q_c > 12$	0.30	150	150

- **Pressiyometre Testi ile Kazık Kapasitesi Hesabı**

Pressiyometre deneyi sondaj kuyusu içerisine sondaj kuyusuna düşey olarak yerleştirilen silindirik hücrenin, esnek malzeme yardımıyla sondaj kuyusu çeperine basınç uygulanması esasına dayalı bir yöntemdir (Erol ve diğ., 2014). Kuyu içerisine yerleştirilen hücre, kuyu dışında bulunan bir ölçme mekanizmasına bağlanır ve uygulanan basınçlar ve kuyu çeperindeki deformasyonlar bu sayede ölçülür. Elde edilen basınç ve deformasyon değerlerine bağlı olarak zeminin davranışını belirlemek mümkün olmaktadır. Pressiyometre aleti Fransız mühendis Louis Menard tarafından 1955 yılında geliştirilmiştir. Menard ayrıca pressiyometre deney sonuçlarına bağlı olan temel tasarımına yardımcı ampirik formüller elde etmiştir. Pressiyometre deneyinin her zemin türünde ve kaya birimlerde uygulanabilmesi deneyin avantajlarındanır. Pressiyometre deneyi sonuçlarına bağlı olarak taşıma gücü ve oturma tahminleri yapılabilmektedir. Ayrıca kazıklı temellerin taşıma gücü de pressiyometre deney sonuçlarına

göre hesaplanabilmektedir. Pressiyometre deneyine bağlı olarak kazığın birim uç direnci ( $q_p$ ) Clarke (1995) tarafından önerilen aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$q_p = k_p * (p_{Le} - \sigma_{ho}) + \sigma_{vo} \quad (2.32)$$

Formülde;

- $P_{Le}$  =Kazık ucundaki eşdeğer limit basıncı  
 $\sigma_{ho}$  =Kazık ucundaki toplam yatay gerilme  
 $\sigma_{vo}$  =Kazık ucundaki toplam düşey gerilme  
 $K_p$  =Taşıma gücü faktörü (Tablo 2.19)

**Tablo 2.19:** Eksenel yüklü kazıklar için  $K_p$  değerleri (Erol, 2014).

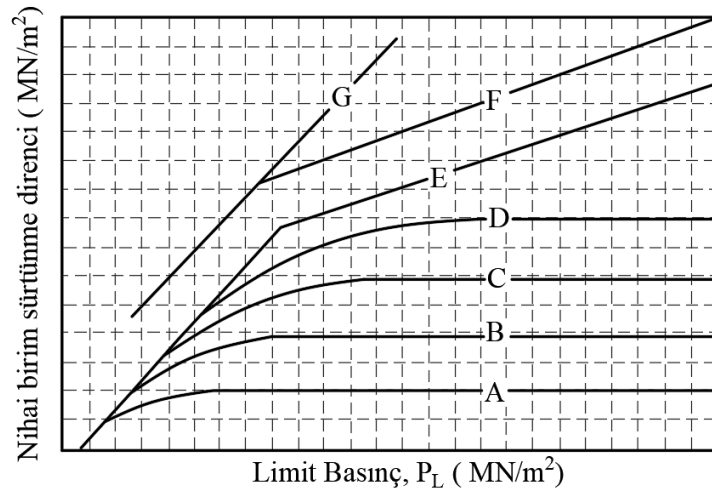
Zemin Türü	Sınıf	Ölçümlerin Aralıkları		Deplasman Yaratmayan Kazıklar için $k_p$	Deplasman Yaratan Kazıklar için $k_p$
		$P_L$ (MN/m <sup>2</sup> )	$q_c$ (MN/m <sup>2</sup> )		
Kil	A	<0.7	<3	1.1	1.4
	Yumuşak				
Silt	B Katı	1.2-2	3-6	1.2	1.5
	C Sert (kil)	>2.5	>6	1.3	1.6
Kum	A Gevşek	<0.5	8-15	1	4.2
Çakıl	B Orta Sıkı	1-2	>20	1.1	3.7
	C Sıkı	>2.5	<5	1.2	3.2
Tebeşir	A	<0.7	>5	1.1	1.6
	Yumuşak				
	B Ayrışmış				
	C Sıkı	>3	-	1.8	2.6
Marn	A	1.5-4	-	1.8	2.6
	Yumuşak				
Kalkerli Marn	B Sıkı	>4.5	-	1.8	2.6
Kaya	A Ayrışmış	2.5-4	-	1.1-1.8	1.8-3.2
	B Çatlaklı	4.5	-	-	-

Tablo 2.20’de verilmiş olan harf sistemi vasıtasıyla eksenel yüklü kazıklar için nihai birim sürtünme direnci Şekil 2.9’da verilen grafik vasıtasıyla belirlenebilir.

**Tablo 2.20:** Nihai birim sürtünme direnci (qs) değerleri (Erol, 2014).

Zemin Türü	$P_L$ (MN/m <sup>2</sup> )	Fore Kazık	Dökme ve muhafazalı		Çakma		Enjeksiyonlu	
			Beton	Çelik	Beton	Çelik	Düşük Basınç	Yüksek Basınç
Yumuşak Kil	0-0,7	A	A	A	A	A	B	
Sert Kil	1,2-2	A, (B)	A, (B)	A	A, (B)	A	B	E*
Çok Sert Kil	>2	A, (B)	A, (B)	A	A, (B)	A, B	E*	
Gevşek Kum	0-0,7	A	A	A	A	A	B	
Orta Sıkı Kum	1-2	B, (C)	A, (B)	A	B, (C)	B	C	E
Çok Sıkı Kum	>2,5	C, (D)	B, (C)	B	C,(D)	C	D	E
Tamamen Ayrışmış Tebeşir	0-0,7	A	A	A	A	A	B	
Kısmen Ayrışmış Tebeşir	>1	C,(D)	B,(C)	B	C,(D)	C	E	E
Marn	1,5-4	D,(F)	C,(D)	C	F	F	F	G
Sert Marn	>4,5	F					G	G
Ayrışmış kaya	2,5-4	G	G		G	G	G	G
Çatlaklı Kaya	>4,5	G					G	G

Not: Parantez içinde belirtilen değerler yüksek kalitede yapılan imalatlarda kullanılabilir.

**Şekil 2.9:** Eksenel yüklü kazıklar için nihai birim sürtünme direnci (Erol, 2014).

### 2.2.4. DİNAMİK KAZIK FORMÜLLERİ

Dinamik kazık tasarımı formülleri çakma kazıkların kapasitesini hesaplamak için belirlenmiş formüllerdir (Çinicioğlu, 2005). Bu formüller genellikle ampririk denklemlerden oluşmaktadır. Kazık çakımı sırasında kazığa verilen enerjinin, kazığın zemine girmesi için harcanan enerji ve kaybolan enerjinin toplamına eşit olduğu kabul edilmektedir. Bu formüller genellikle özet olarak aşağıdaki gibidir;

$$E = P_u * s + \Delta E \quad (2.33)$$

Burada;

- E =Verilen enerji
- $\Delta E$  =Enerji kaybı
- $P_u$  =Kazığın batma direnci
- s =Kazık ucunun batma miktarı

### 2.3.KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

Kazıklı temellerin tasarım ve imalat kriterlerinin belirlenmesi veya önerilen kazık servis yükünün gerçeğe uygunluğunun kanıtlanması amacıyla arazide kazık yükleme deneyleri yapılabilir. Kazık yükleme deneyleri sayesinde, kazık kapasitesinde laboratuvar ya da arazi deneylerine bağlı tasarımlara göre daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Çoğu standart kazık yükleme deneyi yapılması durumunda tasarım yüküne uygulanan güvenlik sayısını azaltmayı önerir. Bu sayede kazık adedinde ve boylarında azaltmaya gidilebilir, bu da kazık imalatı maliyetinin azalmasına yardımcı olur. (FHWA, static testing of deep foundations). Kazık yükleme deneyleri, yapılan kazık tasarımının kontrolü için faydalı olsa da, daima doğru sonuç verdikleri kabul edilmemelidir (Çinicioğlu,2005). Kazık yükleme deneylerinin amacı aşağıdaki gibi özetlenebilir (Birand,2009);

- Kazığın taşıyabileceği en büyük yük olan göçme yükünü belirlemek,
- Yük-deplasman ilişkisini belirlemek
- Kazığın imalatından sonra kabulünü yapmak.

#### 2.3.1. Statik Kazık Yükleme Deneyleri

Statik kazık yükleme deneyleri, günümüzde en çok tercih edilen ve en güvenilir kabul edilen kazık yükleme deneyleridir. Temel olarak statik kazık yükleme deneyleri, test edilecek kazık çevresinde kurulan düzenek vasıtasıyla kazığa yapılan kademeli yüklemeler karşısında, kazığın yaptığı deplasmanı ölçmeye dayanır.

Statik kazık yükleme deneyleri kanıt deneyleri ve göçme deneyleri olarak ikiye ayrılabilir. Kanıt deneylerinde kazığın ön tasarımı hesaplanan taşıma kapasitesini sağlayıp sağlamadığını belirlemek amaçlanır. Bu amaçla kazık belirlenen taşıma kapasitesinin 1,5 – 2,0 katına yüklenir. Göçme deneylerinde ise kazık göçene kadar devam eder. Kazığın göçme yükü, ufak çaplı yük arttırmalarında veya yük arttırımı durduğunda kazıkta yüksek deplasmanların meydana geldiği yük olarak tanımlanabilir (Düzceer, 2002). Pratikte kanıt deneyi daha çok tercih edilir, çünkü deney göçme gözlenene kadar sürdürülmediği için maliyeti daha düşük olmaktadır.

Kazık yükleme deneyleri, ölü yük kullanılarak, çekme (reaksiyon) kazıkları kullanılarak ya da germe (reaksiyon) kabloları kullanılarak yapılabilir. Yük mertebesinin çok yüksek olmadığı durumlarda test kazığı üzerinde oluşturulacak platform, ölü yüklerle yüklenerek yükleme deneyi gerçekleştirilebilir. Reaksiyon kazıkları kullanılması durumunda, yükleme yapılacak test kazığının çevresinde imal edilecek reaksiyon kazıklarından güç alınarak krika vb. araçlar ile kazık yüklemesi yapılır. Reaksiyon kazıklarının kullanılması durumunda, imal edilen çekme kazıkları en az 1,25 \*D kazık mesafe uzaklıkta olmalıdır (Birand,2009). Germe kabloları kullanılması durumunda ise test kazığı çevresine ankrajlanacak kablolar vasıtasıyla yükleme deneyi gerçekleştirilir.

### 2.3.2. Statik Kazık Yükleme Deneyi Yapım Yöntemleri

Kazık yükleme deneylerinin uygulanması ile ilgili güncel literatürde farklı yöntemler ile karşılaşılmaktadır. Bu yöntemler, yükün arttırılma kademesi, yüklenme süresi vb. konularda farklılık göstermektedir. Yapılacak deneyin çevresel, imalat, tasarım koşullarına göre yöntemlerden uygun olanı uzman mühendis tarafından tercih edilir. ASTM standartları D1143 ‘Standart test Methods for deep foundations under static axial compressive load,2013’’ kazık yükleme deneyleri ile ilgili prosedürleri açıklamaktadır. Standartta göre deneylerde sırasında tasarım koşullarına göre farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar içerisinde genelde tercih edilen Hızlı Yükleme Deneyi prosedüründe yükleme hesaplanan göçme yükünün %5 ine karşılık gelen mertebelerde arttırılarak yapılır. Her yük artışı kesintisiz olarak, bir önceki yük mertebesinin deplasmanının sonrasında hemen eklenir. Göçme yüküne gelene kadar yük kademeli olarak arttırılır fakat kazık, kazık grubu ya da yükleme ekipmanının güvenli yapısal kapasitesinin aşılmasına dikkat edilmelidir. Her yükleme adımında yükün 4 dakikadan az ve 15 dakikadan fazla olmayacak bir süre boyunca sabit tutulması gerekir. Her yük artışı için aynı süre beklenmelidir. Göçme yükünde oluşan sünme davranışının ve nihai sıfır yüklemesindeki

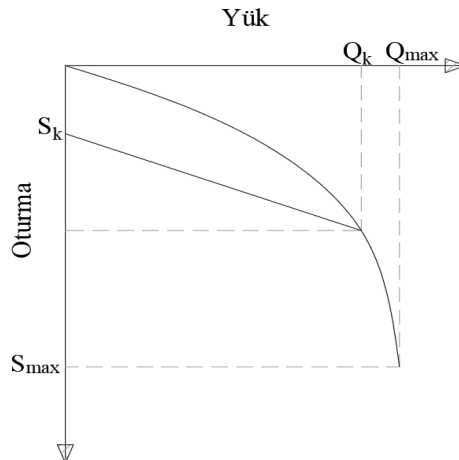


deplasman davranışının anlaşılabilmesi için bu iki yük kademesinde daha uzun zaman aralığı tercih edilmelidir.

Statik kazık yükleme deneyi için tercih edilen bir diğer yöntem Kademeli Yavaş Yükleme Deneyidir. Şartnamede belirtildiği üzere, göçme yüküne ulaşmadıkça, önceden hesaplanan servis yükünün %200 üne kadar yükleme yapılır. Eğer grup kazıkları üzerinde test yapılıyorsa hesaplanan grup tasarım yükünün %150 sine kadar yükleme yapılır. Bu prosedürde yükleme aşamaları servis yükünün %25 ine denk gelen artışlarla gerçekleştirilir. Her yük kademesinde okunan deplasman 0,25 mm/saat e düşene kadar (en fazla 2 saat) beklenir. Bu iki durumdan biri gerçekleştiğinde sonraki aşamaya geçilir. Maksimum yük kademesine geçildiğinde en az 12 saat beklenir. Bu süre içerisinde oturma oranı 0,25 mm/saat' e ulaştığında boşaltma aşamasına geçilebilir. Eğer 0,25 mm/saat oturma oranına ulaşılmazsa, yük kazık üzerinde 24 saate ya da toplam oturma kazık çapının %15 ine ulaşana kadar bırakılır. Final yükleme aşamasından sonra her kademe 1 saat beklenerek kazık üzerindeki yük %25 lik azalmalarla boşaltılabilir.

### 2.3.3. Kazık Yükleme Deneyleri İle Kazık Kapasitesinin Belirlenmesi

Kazık yükleme deneyleri sonuçlarında genellikle yük deplasman eğrileri elde edilir. Bu eğriler farklı yöntemler ile yorumlanarak, kazığın taşıyabileceği en büyük yük (göçme yükü) ve kazığın güvenle taşıyabileceği yük tayin edilebilir. Literatürde kazık yükleme deneylerinden taşıma kapasitesi belirlenmesi ile ilgili farklı yöntemler mevcuttur. Kazık yükleme deneyleri sırasında her yük kademesine gelen oturma miktarı ölçülerek kazığın yük-oturma grafiği hazırlanır. Şekil 2.10'da tipik bir yük-oturma eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Tipik Yük-Oturma Eğrisi (Birand, 2009).

Şekil 2.10’da görülen  $Q_k$ , kazığın ilk yükleme çevriminde yüklendiği yükü gösterir.  $Q_k$  yükünden sonra yük boşaltıldığında elde edilen  $s_k$  oturması, kazıkta oluşan kalıcı plastik oturmayı gösterir. Tekrar yüklendiğinde oluşan  $Q_{max}$  yükü ise kazığın göçme yüküdür. Grafikten de anlaşıldığı üzere kazık akma durumuna ulaşmıştır. Bu eğride elde edilen  $Q_{max}$  yükü kazığın nihai taşıma kapasitesidir. Belirlenen güvenlik katsayısına bölünerek kazığın emniyetli taşıma kapasitesi elde edilebilir (Birand, 2009). Hazırlanan yük-oturma grafiği esas alınarak farklı yöntemlerle kazığın taşıma kapasitesi tayin edilebilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları;

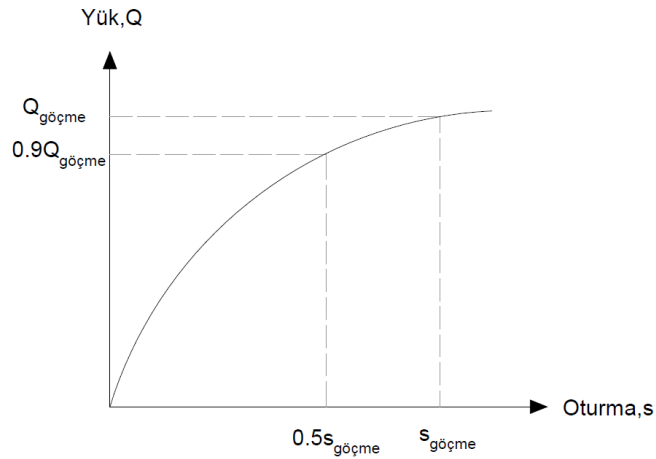
- **Terzaghi Yöntemi**

Terzaghi’ye göre kazığın taşıma kapasitesi iki ana maddeyle tanımlanmıştır.

- 1- Kazık göçme olmadan güvenli yükün 2 katına kadar taşıyabilmelidir.
- 2- Güvenli yükün %50 fazlası altındaki kalıcı oturma 0,25 mm/ton dan fazla olmamalıdır.

- **Brinch-Hansen Yöntemi**

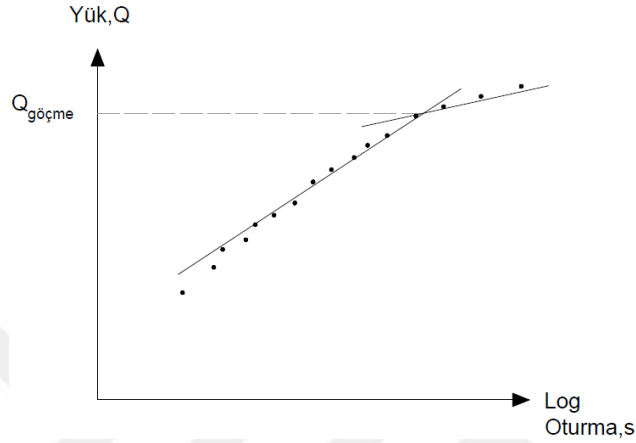
Brinch Hansen yönteminde öncelikle yük oturma eğrisinde belirlenen göçme yükünün %90 ı bulunur. Bu yükte meydana gelen oturmanın 2 katı göçme durumunda meydana gelecek oturma ve buna karşılık gelen yük de göçme yükü olarak kabul edilir. Şekil 2.11’de Brinch Hansen yöntemi grafiği görülmektedir.



Şekil 2.11: Brinch Hansen %90 kriteri (Birand,2009).

- **De Beer Yöntemi**

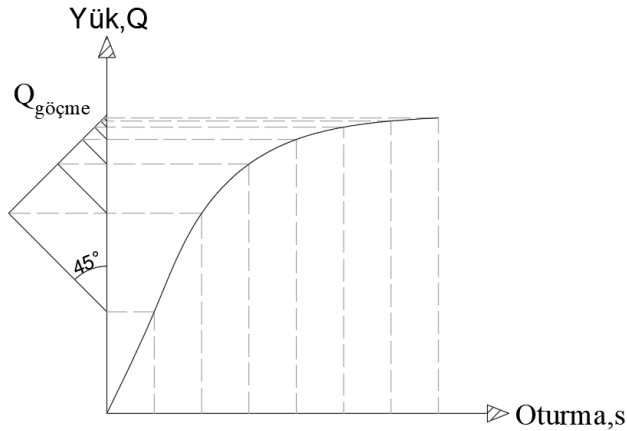
Şekil 2.12’de görüldüğü gibi kademeli yükleme deneyinden elde edilen oturma sonuçları ve yük kademeleri logaritmik olarak eksende gösterilir. Oturma değerleri iki doğru olarak birleştirilir ve doğrunun kesiştiği nokta kazığın göçme yükünü olarak kabul edilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: De-Beer yöntemi (Birand,2009).

- **Mazurkiewicz Yöntemi**

Mazurkiewicz yönteminde oturma eksenini eşit parçalara bölünür ve yük-oturma eğrisini kestiği noktalardan yük eksenine doğrular çeker. Bu doğruların yük eksenini kestiği noktalardan  $45^\circ$  açıyla doğrular çizilir ve oturma eksenine paralel çizilen doğrularla kesiştirilir. Keşisen noktaların birleştirilmesiyle oluşan doğrunun yük eksenini kestiği noktanın göçme yükü olduğu kabul edilir.



Şekil 2.13: Mazurkiewicz yöntemi (Birand,2009).

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında arazide killi zeminlerdeki fore kazıkların taşıma kapasitelerinin değerlendirilebilmesi amacıyla kil birimde imal edilmiş bir fore kazık üzerine yapılan arazi deneyi kullanılmıştır. Arazi deneyi çalışması Comodromos tarafından Yunanistan'da gerçekleştirilmiş ve deney sonucunda elde edilen veriler ve yapılan değerlendirmeler makale olarak yayınlanmıştır. Yayınlanan "Pile Foundation Analysis and Design Using Experimental Data and 3D Numerical Analysis, Comodromos, M. (2009)" makalesi tez kapsamında referans çalışma olarak adlandırılmaktadır.

Arazi deneyleri ile kazık kapasitesinin belirlenmesinin üç boyutlu incelenmesi amacıyla, referans alınan arazi deneyi Plaxis 3D yazılımı yardımıyla üç boyutlu olarak modellenmiş ve farklı geoteknik koşullarda analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılmak üzere, önceki başlıklarda da anlatılan yöntemler kullanılarak kazık kapasiteleri hesaplanmış ve bu kapasiteler üç boyutlu model analizi vasıtasıyla arazi deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan kazık kapasitesi hesapları, Plaxis 3D yazılımı ve tez kapsamında referans olarak kullanılan arazi deneyi bu başlık altında anlatılacaktır. Ayrıca farklı yöntemlerle hesaplanan ve Plaxis 3D modellerinde kullanılan kazık kapasitesi değerleri de özetlenecektir.

#### 3.1. PLAXIS 3D YAZILIMI

Plaxis 3D yazılımı, geoteknik mühendisliği alanında gerçekleştirilen deformasyon, stabilite ve yeraltı suyu akışının analizi için geliştirilen üç boyutlu sonlu eleman programıdır. Plaxis yazılımının geliştirilmesi ilk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından, yumuşak zeminler üzerinde imal edilen nehir dolgularının analizi için basit ara yüze sahip bir sonlu eleman kodu geliştirme amacıyla başlanmıştır. Program üzerinde teknolojik gelişmeler ile birlikte 2001 yılında üç boyutlu modellemeye izin veren 3D Tunnel programı ile sonlu elemanlar hesaplamalarının üç boyutlu analiz edilmesini sağlayan hesaplama çekirdeği geliştirilmiş, ardından yayınlanan 3D Foundation programı ile temel projelerinin de üç boyutlu olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Fakat yayınlanan bu yeni ara yüzlerde rastgele geometrileri modellemek mümkün olmadığından, 2010 yılında kullanımı kolay bir ara yüzü ile 3D modelleme olanaklarının birleştiği üç boyutlu bir yazılım olan Plaxis 3D programı yayınlanmıştır (Brinkgreve ve diğ. 2013).

Plaxis 3D yazılımının güncel versiyonu dahilinde, karmaşık geometrideki üç boyutlu geoteknik problemler modellenebilmektedir. Bu kapsamda arazideki zemin özelliklerine uygun zemin modelleri ve tasarlanan yapısal elemanlar modellenebilmekte ve geoteknik problem için gerilme deformasyon analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

Tez çalışması kapsamında Plaxis 3D yazılımı versiyon 2013.01 kullanılmıştır. Analizlerin modellenmesinde, kazık elemanlar “gömülü kazık (embedded pile)” modeli, zemin tabakaları ise “Mohr Coulomb” zemin modeli kullanılmıştır.

### 3.1.1. Zemin Modelleri

Zemin tabakalarının davranışı incelenirken mekanik bilimi kavramlarından faydalanmakla birlikte, zeminin inşaat mühendisliğine konu olan diğer malzemelere göre daha karmaşık bir davranış sergilediği göz önünde bulundurularak farklı modellere ihtiyaç duyulmaktadır (Laman,2007). Genel olarak malzemenin lineer elastik davrandığı kabul edilirse zemin tabakasının elasto-plastik davranış sergilediği dikkate alınmalıdır. Zemin tipi, jeolojik geçmişi, drenaj koşulları ve yükleme durumları göz önünde bulundurularak Mohr-Coulomb Modeli (Lineer Elastik-Perfectly Plastic), Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil), Hoek-Brown Modeli (Kaya Modeli) vb. modeller, zemin davranışını zemin tipine göre modellememize yardımcı olur. Plaxis yazılımı kapsamında zemin tipine göre davranışı modelleyebileceğimiz bu tarz zemin modellerini içermektedir.

Yazılım dahilinde farklı zemin türlerinde ve geoteknik problemlerde kullanılmak üzere birden fazla model bulunmakla birlikte genel olarak geoteknik analizlerde zemin modelleri için kullanılan modeller Mohr-Coulomb Modeli ve Hardening Soil Model olarak bilinmektedir.

Mohr Coulomb modeli lineer elastik tam plastik model olarak tanımlanabilir. Zemin davranışını modellemek için genel olarak kullanılan ilk yaklaşımdır. Zemin tabakası için sabit ortalama rijitlik kabulüne dayanır. Ön tasarım değerlendirmelerinde, hızlı ve yaklaşık sonuç almak için kullanılabilir. Mohr-Coulomb modelinde zemini tanımlamak için zeminin Elastisite Modülü(E), Poisson oranı ( $\nu$ ), kohezyonu (c), içsel sürtünme açısı ( $\phi$ )ve dilatasyon açısının ( $\psi$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreler arazi deneyleri ve güncel literatür yardımıyla belirlenebilir.

Soil - Mohr-Coulomb - <NoName>

General Parameters Flow parameters Interfaces Initial

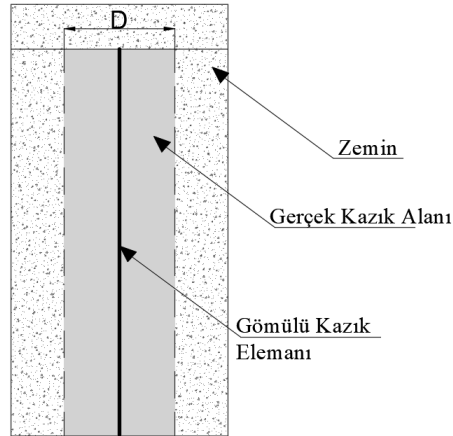
Property	Unit	Value
<b>Stiffness</b>		
$E'$	$\text{kN/m}^2$	0.000
$\nu'$ ( $\nu_u$ )		0.000
<b>Alternatives</b>		
$G$	$\text{kN/m}^2$	0.000
$E_{oed}$	$\text{kN/m}^2$	0.000
<b>Strength</b>		
$c'_{ref}$	$\text{kN/m}^2$	0.000
$\phi'$ ( $\phi_i$ )	$^\circ$	0.000
$\psi$ ( $\psi_i$ )	$^\circ$	0.000
<b>Velocities</b>		
$V_s$	m/s	0.000
$V_p$	m/s	0.000
<b>Advanced</b>		
Set to default values		<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Stiffness</b>		
$E'_{inc}$	$\text{kN/m}^2/\text{m}$	0.000
$z_{ref}$	m	0.000
<b>Strength</b>		
$c'_{inc}$	$\text{kN/m}^2/\text{m}$	0.000
$z_{ref}$	m	0.000
Tension cut-off		<input checked="" type="checkbox"/>
Tensile strength	$\text{kN/m}^2$	0.000

Next OK Cancel

Şekil 3.1: Plaxis 3D yazılımı mohr-coulomb modeli.

### 3.1.2. Gömülü Kazık Elemanı Modellenmesi

Gömülü kazık (embedded pile) eleman modeli, doğrusal olmayan yüzeysel ve uç arayüzleri içeren kiriş elemanlarından oluşmaktadır ve Plaxis 3D analizlerinde kazık-zemin etkileşimini etkili bir şekilde modellemek için geliştirilmiştir. Kazık- zemin etkileşimi kazık yüzeyindeki ve çevresindeki zemin üzerindeki düğüm noktalarının relatif deplasmanına bağlı olarak belirlenmektedir (Engin, 2009). Gömülü kazık elemanı hacimsel olarak modellenirse de kazık etrafında plastik zemin davranışının gerçekleşeceğini kabul eden bir alan oluşturur. Bu alanın boyutu, kazık modellenirken veri olarak girilen kazık boyutlarına eşdeğerdir. Bu sayede hacimsel bir eleman olarak davranmasına olanak sağlar. Şekil 3.2'de gömülü kazık elemanının davranış modeli görülmektedir.



Şekil 3.2: Gömülü kazık model çizimi (Engin, 2009).

Temel altı kazıklar Plaxis 3D yazılımında gömülü kazıklar olarak modellenirken Şekil 3.3'de görülen veri giriş arayüzü kullanılır. Bu arayüzde kazığın geometrik ve rijitlik verileri ile birlikte, sürtünme ve uç kapasitesi değerleri de analize modellenir.

Embedded pile - <NoName>

Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		<NoName>
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
<b>Properties</b>		
E	$\text{kN/m}^2$	0.000
$\gamma$	$\text{kN/m}^3$	0.000
Pile type		Predefined
Predefined pile type		Massive circular pile
Diameter	m	0.000
A	$\text{m}^2$	0.000
$I_3$	$\text{m}^4$	0.000
$I_2$	$\text{m}^4$	0.000
Rayleigh $\alpha$		0.000
Rayleigh $\beta$		0.000
<b>Skin resistance</b>		
Skin resistance		Linear
$T_{\text{top, max}}$	$\text{kN/m}$	0.000
$T_{\text{bot, max}}$	$\text{kN/m}$	0.000
Multi-linear skin resistance		
$T_{\text{max}}$	$\text{kN/m}$	0.000
<b>Base resistance</b>		
$F_{\text{max}}$	$\text{kN}$	0.000

OK Cancel

Şekil 3.3: Plaxis 3D gömülü kazık elemanı veri girişi.

Plaxis 3D modelinde gömülü kazık elemanının tanımlanabilmesi için kazığın sürtünme direnci ve uç direnci değerlerinin de veri olarak programa tanıtılması gerekmektedir. Gömülü kazık elemanı için sürtünme direnci değerlerinin modellenmesi için yazılım dahilinde farklı

varyasyonlar bulunmaktadır. Bununla birlikte uç direnci olarak yazılıma kazığın ulaşabileceği maksimum direnç girilmelidir. Yazılım kazığın kapasitesini girilen bu dirençle sınırlar. Bu değer için kazığın gömülü olacağı tabakadan mobilize olması beklenen uç direnci farklı yöntemlerle hesaplanabilir. Ayrıca model analizini etkilememesi amacıyla beklenenden daha yüksek bir değer girilip, kazıktaki yükleme koşullarına ve çevre direncine bağlı olarak mobilize olacak uç direnci de gözlemlenebilir (Marjanovic ve diğ. 2016).

Plaxis 3D yazılımında kazık üzerinde oluşan sürtünme kapasitesi değerleri üç farklı şekilde modellenebilir. Bunlardan ilki yüzey sürtünme direncinin en kolay modellendiği Linear modeldir. Bu modelde yüzey sürtünmesi kazığın üst kısmında oluşan sürtünme direnci  $T_{top,max}$ , ve ucunda oluşan sürtünme direnci  $T_{bot,max}$ , değerlerinin ortalaması vasıtasıyla belirlenir. Bu değerler birim kazık uzunluğuna denk gelen değerlerdir. Buna göre toplam kazık kapasitesi aşağıdaki formül ile belirlenir.

$$N_{kazık} = F_{max} + \frac{1}{2} * L_{kazık} * (T_{top,max} + T_{bot,max}) \quad (2.2)$$

Skin resistance		
Skin resistance	Linear	
$T_{top,max}$	kN/m	0.000
$T_{bot,max}$	kN/m	0.000
Multi-linear skin resistance		
$T_{max}$	kN/m	0.000

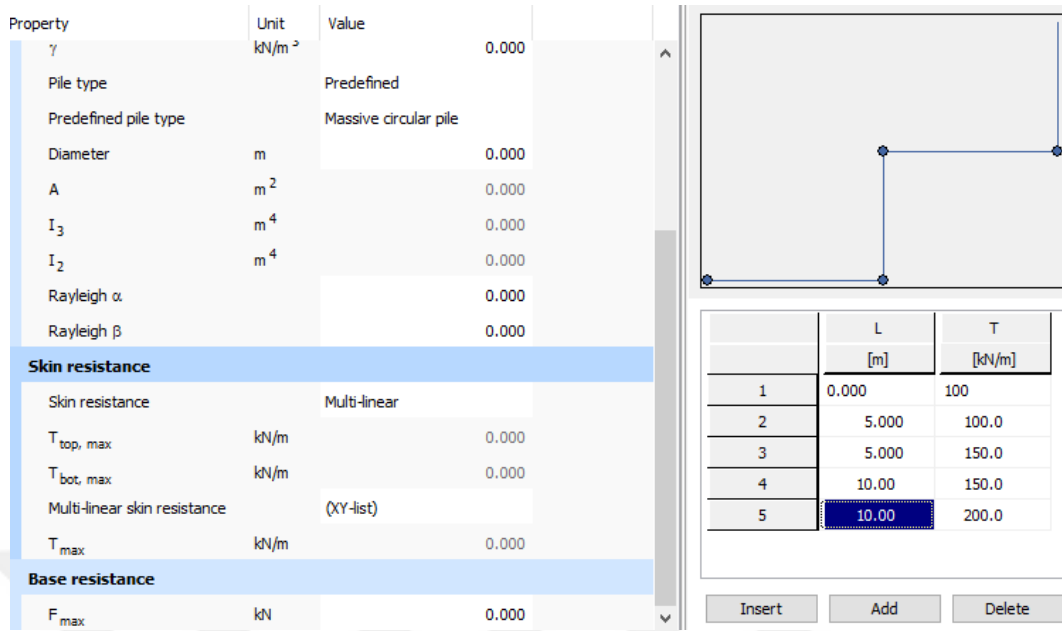
Şekil 3.4: Çevre sürtünmesi “linear” modeli.

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi “Linear” çevre sürtünmesi tercihinde, kazık başında ve ucunda mobilize olması beklenen sürtünme değerleri yazılıma modellenir ve analizlerde bu sürtünmenin kazık üzerinde linear olarak artacağı kabulü yapılır.

İkinci model Multi-Linear model, farklı özelliklere sahip zemin tabakalarında oluşacak farklı sürtünme dirençlerini modellemekte kullanılır. Buna göre kazık boyunca karşılaşılan zemin tabakalarının dirençleri tek tek modellenebilir. Bu durumda kazığın toplam kapasitesi;

$$N_{kazık} = F_{max} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} * (L_{i+1} - L_i) * (T_i + T_{i+1}) \quad (2.2)$$

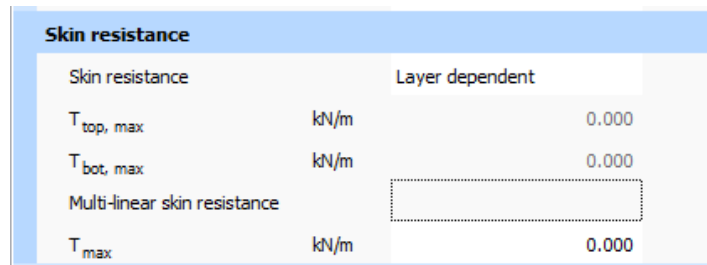




Şekil 3.5: Çevre sürtünmesi “multi-linear” modeli.

Şekil 3.5’de görüldüğü üzere “Multi-Linear” tercihinde, kazık üzerindeki farklı derinliklerde oluşması beklenen sürtünme direnci değerleri programa veri olarak girilebilir. Bu değerler, kazık tasarım yöntemlerinden belirlenebilmekle beraber, kazık yükleme deneylerinden de elde edilen sonuçlar kullanılabilir.

Kazık sürtünme direncinin modellenmesinde kullanılan üçüncü yol, Layer Dependent modelidir. Bu modelde kazığın zemin tabakası içindeki sürtünme direnci, tabakanın mukavemet parametrelerine (kohezyon ( $c$ ) ve sürtünme açısı ( $\phi$ )) ve zemin tabakası modellenirken tanımlanan arayüz elemanının dayanım azaltma faktörü ( $R_{inter}$ ) dikkate alınarak yazılım tarafından hesaplanır.



Şekil 3.6: Çevre sürtünmesi “layer dependent” modeli.

### 3.1.KAZIK YÜKLEME DENEYLERİNİN 3D MODELLENMESİ

Kazık kapasitesinin belirlenmesine yönelik literatürde bulunan hesap yöntemleri kazık kapasitesinin zemin tabakalarının fiziksel ve mühendislik özelliklerine göre kazığın taşıyabileceği yükleri belirlememize yardımcı olur. Bu yöntemler genel olarak zeminin mukavemet parametrelerine bağlı farklı değişkenler kullanılmaktadır. Yöntemlerin bu değişkenlerle sınırlı olması, arazide kazığın taşıyabileceği kapasiteni gerçeğe uygun olarak tasarlamamamızı engelleyebilmektedir. Bu nedenle bu analitik yöntemler kazığın servis yükünü ön tasarım aşamasında belirlememiz için faydalı olmakla beraber, gerçekte imal edilen kazığın kapasitesine uzak sonuçlar verebilirler. Bunun için analitik yöntemlerle hesaplanan kapasitelerin arazide yapılacak deneylerle teyit edilmesi gerekmektedir. Bu sayede kazığın zemin tabakası içindeki davranışı gerçeğe daha uygun olarak belirlenebilmektedir.

Maliyet, alan ve zaman faktörleri dikkate alındığında her proje için gerekli sayıda kazık yükleme deneyi yapılması mümkün olmamaktadır. Bu durumda geoteknik bilgisayar yazılımları alanındaki gelişmelerle birlikte problemlerin üç boyutlu modellenmesi ve yükleme ve inşaat aşamalarını dikkate alarak analiz edebilen üç boyutlu geoteknik yazılımlar, gerçeğe uygun kazık tasarımı yapılmasında faydalı olmaktadır.

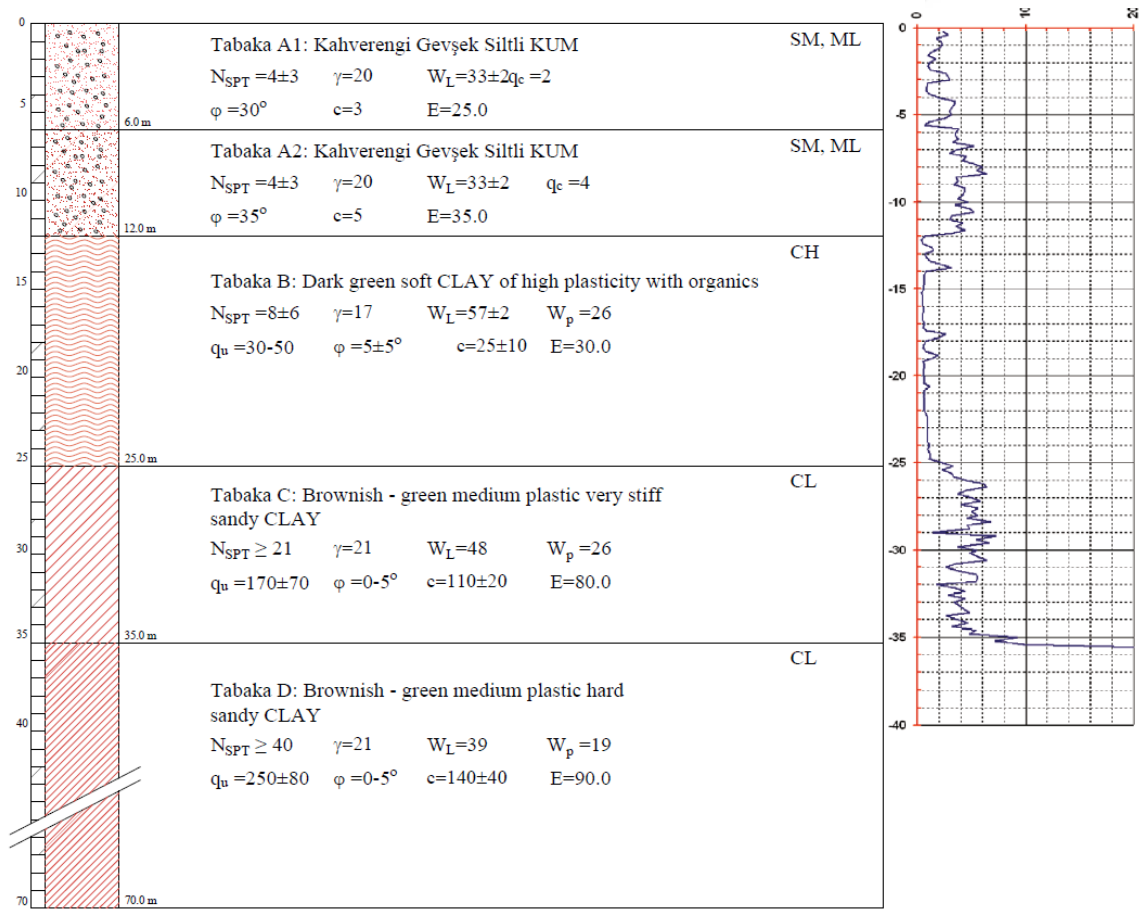
#### 3.1.1. Referans Çalışmanın Kapsamı

Tez çalışmaları kapsamında kazık yükleme deneylerinin farklı kombinasyonlarla üç boyutlu olarak modellenmesini konu olan “PILE FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN USING EXPERIMENTAL DATA AND 3-D NUMERICAL ANALYSIS, (Comodromos ve diğ.,2009)” makalesi referans olarak alınmıştır.

Çalışma kapsamında kazıklı temel tasarımının genel olarak kazık grubunun taşıma gücüne dayandırıldığı, fakat deplasman bazlı tasarımın kazıklı temeller için daha uygun olduğuna değinilmiştir. Bununla birlikte hem zeminin hem de üst yapının nonlineer özelliklerinin modellenebileceği, kazık-zemin etkileşiminin etkilerinin yansıtılabileceği üç boyutlu modellerin fazla kompleks ve zaman gerektiren çalışmalar olduğu makale kapsamında belirtilmiştir. Bu nedenle deneysel çalışmaların ve lineer olmayan üç boyutlu analizlerin birleşiminden oluşan hibrit bir yöntemin, kazıklı temellerin tasarımı için uygun olduğu belirtilmiştir. Bu fikirden yola çıkan ve arazi deneylerini baz alarak oluşturulan üç boyutlu modeller üzerinde, kazıklı temel tasarımının farklı kombinasyonlarının tasarım üzerindeki etkileri incelenmiştir.

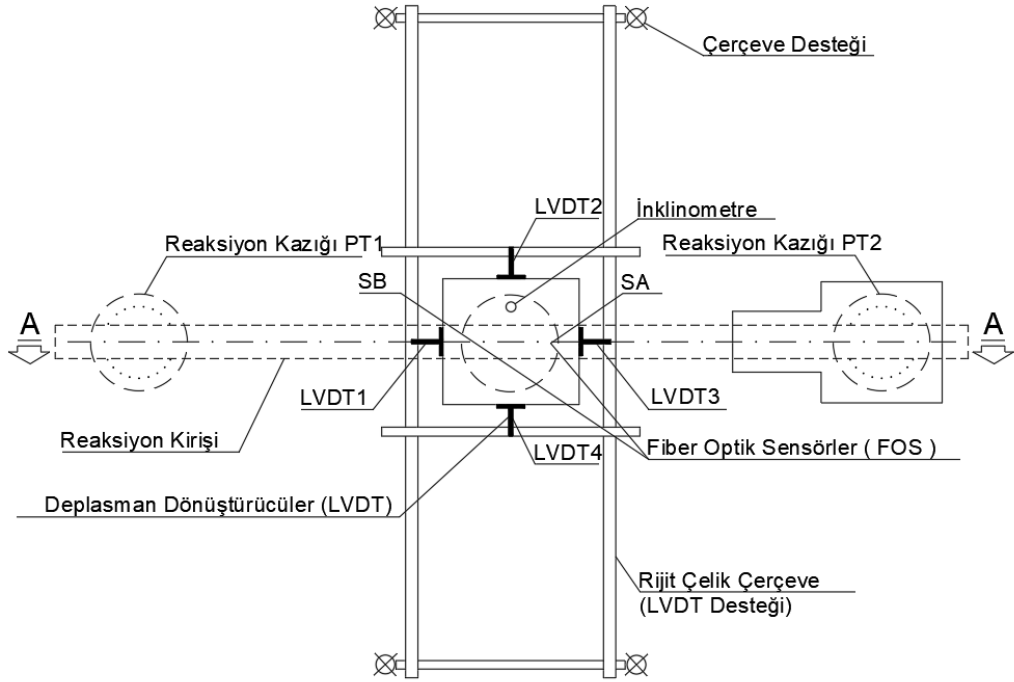
Söz konusu çalışmanın arazi deneyleri kısmı Yunanistan'ın Thaessaloniki şehrinde yapılması planlanan karayolu köprü projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tasarıma yönelik olarak gerçekleştirilen zemin araştırma çalışmaları ve kazık yükleme deneyleri kullanılmıştır.

Zemin araştırma çalışmaları kapsamında arazideki zemin profili ve zemin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sondajlar sırasında SPT ve CPT deneyleri yapılmış, ayrıca laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan zemin araştırma çalışmaları neticesinde oluşturulan zemin profili Şekil 3.7'de görülmektedir. Tez çalışması kapsamında makaleyi referans alan modellemelerde belirlenen zemin parametreleri ve yaklaşık iterasyonları kullanılmıştır.

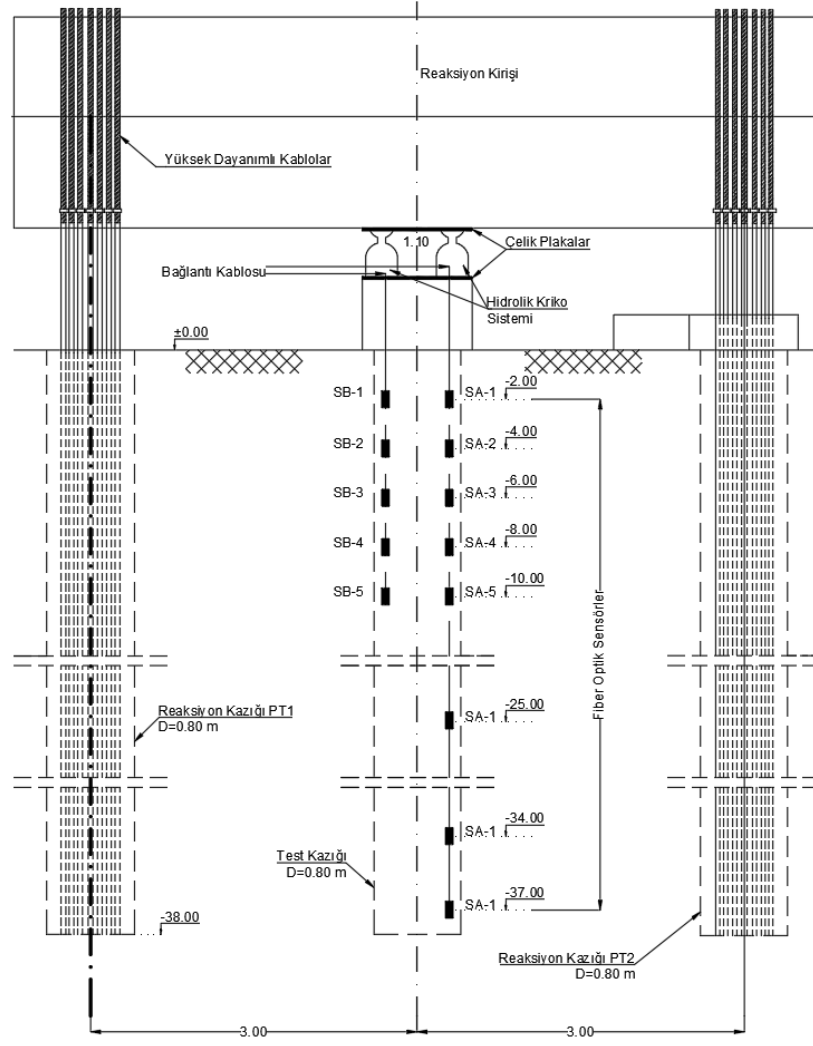


Şekil 3.7: İdealize zemin profili (Comodromos ve diğ., 2009).

Köprünün ön tasarımına göre, kazıklar üzerinde statik durumda 4400 kN, dinamik durumda ise 6750 kN mertebesinde servis yükü oluşması beklenmektedir. Makalede, bu yüklerin sağlanabilmesi için Alman şartnamesi DIN 4014'e göre %2, 2.5, 3 ve 10 çap oturma değerlerine göre yapılan tasarımda çapı 1,5 m ve boyu 45,0 m de fazla olan kazık yapılması gerektiği belirtilmiştir. Şartnamelerin ve literatür çalışmalarının genel olarak konservatif olduğu düşüncesiyle, zeminin kayma mukavemeti ve deformasyon modülünün belirlenmesi amacıyla yükleme testi yapılması planlanmıştır. Bu bağlamda yapısal gereklilikleri azaltmak için 80 cm çaplı kazık tercih edilmiş, 1 adet test kazığı ve 2 adet reaksiyon kazığı imal edilmiştir. Deney sırasında kazık üzerinde göçme yükünün mobilize olacağı düşüncesiyle deney yapılacak kazıkların köprü temelinde kullanılacak kazıklara ilave olarak imal edilmiştir. Hazırlanan deney düzeneği Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'de görülmektedir.



Şekil 3.8: Yükleme deneyi düzeneği plan görünümü (Comodromos ve diğ., 2009).

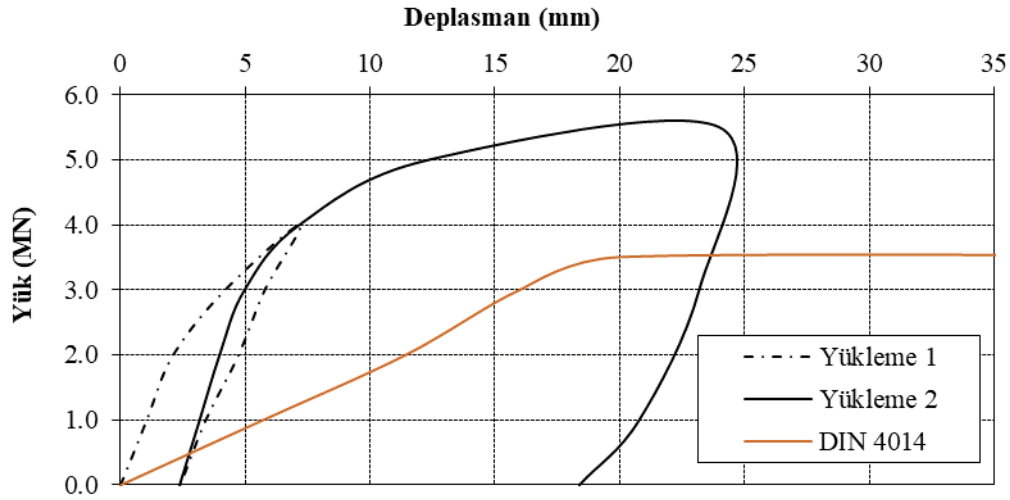


Şekil 3.9: Deney düzeneği A-A kesiti (Comodromos ve diğ. ,2009).

Yüklemeye deneyi düzeniği plan ve kesitlerinde görüldüğü üzere deney için 1 adet reaksiyon kazığı ve her biri reaksiyon kazığından 3 m uzakta olmak üzere 2 adet çekme kazığı imal edilmiştir. Yüklemeye aşamasında kazıkta mobilize olacak yüklerin ve deformasyonların tespit edilmesi amacıyla kazık içine 12 adet fiber-optik sensör yerleştirilmiştir. Ayrıca kazık başının oturmasını gözlemlemek için 4 adet elektronik deplasman çevirici (LDVT) yerleştirilmiştir.

Seçilen deney prosedürüne göre yüklemeler 1,0 MN yük artışlarıyla gerçekleştirilmiştir. Kazık üzerinde 4 kademe artış yapıldıktan sonra her adımda 2.0 MN yük boşaltılarak ilk yüklemeye çevrimi tamamlanmıştır. Ardından en fazla yük olarak belirlenen 5.5 MN yüke çıkılmış ve tekrar boşaltılmıştır. Her yüklemeye seviyesinde yük artışı saatte 0,25 mm deplasmana ulaşana kadar sabit tutulmuştur.

Yapılan kazık yükleme deneyinden elde edilen deplasman değerleri kullanılarak yük deplasman grafiği oluşturulmuştur. Deplasman grafiğine ilave olarak Alman şartnamesi DIN 4014 kullanılarak, kazık çapının %2-2.5-3-10 una denk gelen oturma değerlerine karşı kazık kapasiteleri hesaplanmıştır. Arazide elde edilen yük deplasman grafiği ve DIN 4014 şartnamesine göre yapılan tasarımda elde edilen yük ve oturma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafik Şekil 3.10'da görülmektedir.



**Şekil 3.10:** Kazık yükleme deneyi ve DIN 4014 şartnamesinden elde edilen yük-deplasman grafiği (Comodromos ve diğ., 2009).

Arazi deneyinden elde edilen sonuçlar sayısal analizler vasıtasıyla değerlendirilmiştir. Bu kapsamda FLAC<sup>3D</sup> yazılımı kullanılarak kazık yükleme deneyi üç boyutlu olarak modellenmiş ve arazideki yükleme koşulları ile geri analizler gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan üç boyutlu modelde analizlerin sınır koşullarından etkilenmemesi amacıyla model boyutu yeterli büyüklükte seçilmiştir. Analiz modelinde zemin tabakaları daha önceki bölümlerde açıklanan zemin parametreleri kullanılarak modellenmiştir. Kil birimlerde elastik- tam plastik Tresca modeli, kum ve siltli birilerde ise mohr coulomb modeli kullanılmıştır. Kazık davranışı lineer-elastik olarak modellenmiş ve beton deformasyon modülü  $E=34$  GP kullanılmıştır. Kazıkların zemin arasındaki etkileşimi modellemek amacıyla arayüz elemanları kullanılmıştır.

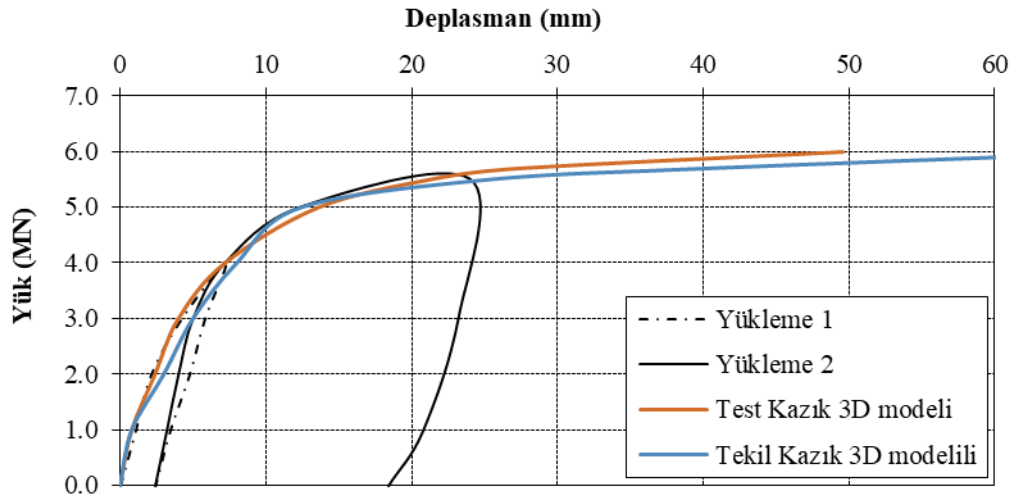
Kazık yükleme adımları için önce başlangıçtaki gerilme durumunu oluşturmak için “initial stage” oluşturulmuş, ardından 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 5.5, 5.7 ve 6,0 MN olmak üzere 7 aşamada kazık yüklenmiştir. Test kazığı modelinde, test kazığına olan yüklerin yarısı çekme yükü olarak reaksiyon kazıklarına yüklenmiştir.

Sahada elde edilen yük ve deplasman değerlerine ulaşabilmek için geri analizler gerçekleştirilmiştir. Geri analizler neticesinde tasarımda kullanılan zemin parametrelerinin teyit edilmesi amaçlanmıştır. Bu analizler sonucunda her tabaka için belirlenen zemin parametreleri Tablo 3.1’de görülmektedir.

**Tablo 3.1:** Geri analiz sonucu belirlenen zemin parametreleri (Comodromos ve diğ. ,2009).

	A1	A2	B	C	D
Tabaka Alt Kotu (m)	-6	-12	-25	-35	-70
Bulk Modülü, K (MPa)	20.8	38.9	33.3	266.7	300
Kayma Modülü, G (MPa)	9.6	12.9	11.1	27.6	31
İçsel Sürtünme Açısı ,f (derece)	30	33	5	-	-
Dilatasyon açısı	0	0	0	-	-
Kohezyon, c (kPa)	3	5	25	-	-
Drenajsız Kayma Mukavemeti,su(kPa)	-	-	-	110	140
Birim Hacim Ağırlık,g (kN/m <sup>3</sup> )	20	20	17	21	21
Interface yüzeyindeki sürtünme açısı	30	33	3	-	-
Interface yüzeyindeki kohezyon	3	5	15	45	65

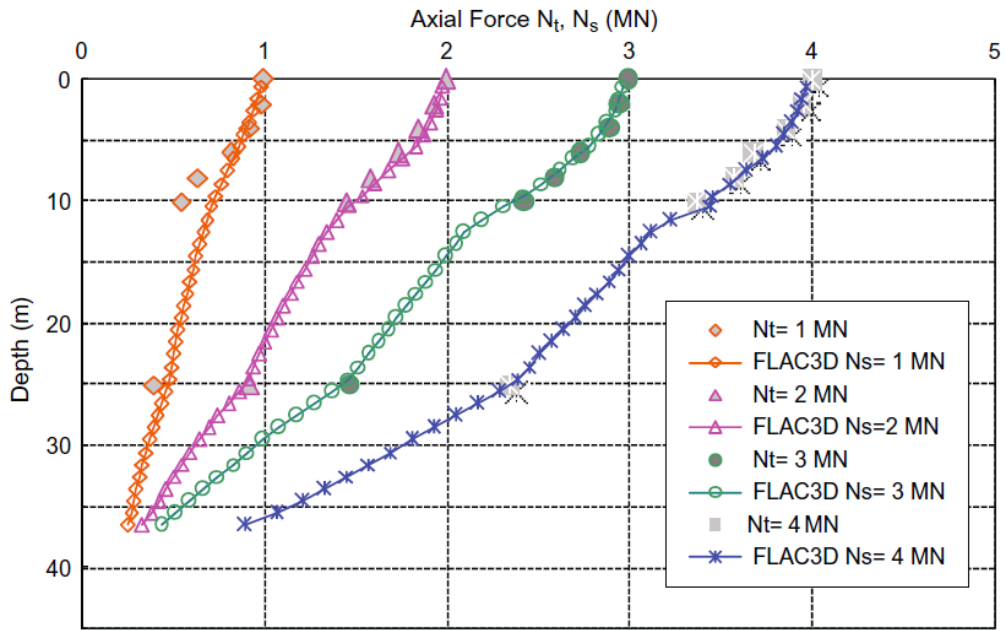
Şekil 3.11’de tekil kazık üzerinde ve test modelinde yapılan üç boyutlu analizler sonucunda elde edilen yük-deplasman sonuçları, arazide deneyinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



**Şekil 3.11:** Kazık yükleme deneyi arazi sonuçları ve 3D model sonuçları (Comodromos ve diğ. ,2009).

Şekilde de görüldüğü üzere arazideki yükleme deneyi modeli birebir üç boyutlu olarak modellenmiş ve reaksiyon kazıkları olmadan tekil kazık olarak da ayrıca modellenmiştir. Yapılan yükleme deneyi sonuçları ve üç boyutlu analiz modelleri sonuçları karşılaştırıldığında üç boyutlu analiz sonucunda arazide mobilize olan deplasmanlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Yük-deplasman grafiğine ilave olarak, deneylere yerleştirilen enstrümantasyon araçlarından elde edilen yük okumaları kullanılarak yük-derinlik grafikleri oluşturulmuş ve üç boyutlu modellerde elde edilen yük-derinlik sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan yük derinlik grafikleri incelendiğinde üç boyutlu model analiz sonuçlarında arazideki deney sonuçlarına yaklaşık değerler elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.12: Ölçülen ve nümerik analizlerle belirlenen normal yük dağılımı (Comodromos ve diğ., 2009).



## 4. BULGULAR

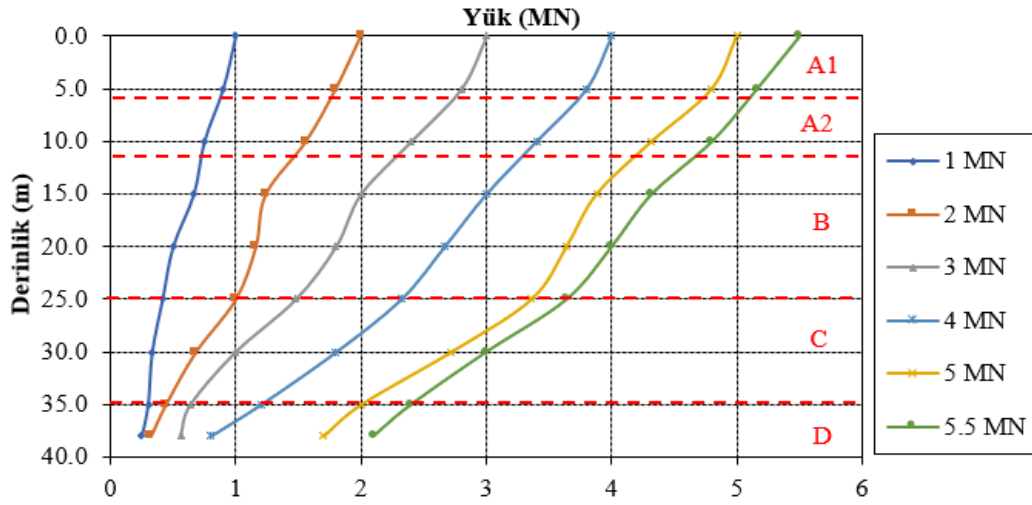
Tez çalışması kapsamında arazide gerçekleştirilen ve ayrıca sayısal olarak modellenen kazık yükleme deneyi sonuçlarından yararlanılarak, analitik yöntemlerle hesaplanan kazık kapasitelerinin gerçeğe uygunluğu incelenmiştir.

Analitik yöntemlerle kazık kapasitelerinin hesaplanması sonucunda hem yöntemlerin birbiri arasında hem de arazi deneyi sonuçlarıyla aralarında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemlerin arazi deneyleriyle karşılaştırılması amacıyla, her bir yöntemle göre hesaplanan kazık kapasitesini referans alan üç boyutlu sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla analitik yöntemlerle her bir tabaka için hesaplanan birim sürtünme kuvveti değerleri belirlenmiş ve Plaxis 3D yazılımında “gömülü kazık” olarak modellenen test ve reaksiyon kazıkları, multi-linear seçeneği kullanılarak elde edilen sürtünme ve uç kapasitesi değerleriyle modellenmiştir. Kazık yükleme deneyinde uygulanan yükleme ve yük boşaltma aşamaları da analizde inşaat aşaması olarak modellenmiş, her bir yükleme değerinde elde edilen deplasman ve yük değerleri arazi deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlarda, arazi deneylerine yakınsamak amacıyla model üzerinde farklı alternatifler denenmiştir. Bu alternatifler kapsamında, kazık kapasitesi ve zemin içerisinde oluşturacağı deplasmanları etkileyecek, zemin parametreleri ve kazık kapasiteleri üzerinde değişiklikler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçlarına etkisi gözlemlenmiştir.

### 4.1.REFERANS ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRMELERİ

Referans makale dahilinde farklı yükleme koşullarında kazıklar üzerinde oluşan normal kuvvetin derinliğe bağlı değişim grafikleri verilmektedir. Bu grafik zemin tabakalaşmasıyla birlikte Şekil 4.1’de görülmektedir. Şekilde görülen yük derinlik grafiği değerlendirilerek, kazık üzerinde her yükleme aşamasında mobilize olan kuvvetler belirlenebilmektedir. Bu kuvvetlerin değerlendirilmesi, zemin tabakalarında oluşabilecek sürtünme ve uç dirençlerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır.



**Şekil 4.1:** Sayısal analizlerde belirlenen normal yük-derinlik grafiği. (Comodromos ve diğ. 2009).

Referans çalışma ile ilgili yapılan değerlendirmelerde farklı zemin tabakalarında ve farklı yükleme koşullarında mobilize olan sürtünme direnci ve uç direncini belirlemek ve ileride yapılacak analitik ve sayısal analizlerle karşılaştırmak amaçlanmıştır. Buna göre her yükleme aşamasında zemin tabakalarında oluşan sürtünme direnci ve kazık ucunda oluşan uç direnci Tablo 4.1’de görüldüğü gibi olmaktadır.

**Tablo 4.1:** Zemin tabakalarına göre kazık üzerinde mobilize olan direnç.

Zemin Tabakaları	Tabaka Kalınlıkları		Yükleme Kademelerinde Oluşan Birim Sürtünme Kuvvetleri (kN/m)					
	$H_{\text{tabaka}}$ (m)	$L_{\text{kazık}}$ (m)	1 MN	2 MN	3 MN	4 MN	5 MN	5.5 MN
Tabaka A1	6	6	21.67	41.33	46.67	46.67	49.33	68.67
Tabaka A2	6	6	25.60	53.33	80.00	80.00	93.33	80.00
Tabaka B	13	13	23.11	33.23	58.46	70.77	60.31	74.46
Tabaka C	10	10	11.60	56.00	84.00	112.00	136.00	124.00
Tabaka D	35	3	16.67	40.00	26.67	133.33	100.00	100.00
Uç Kuvveti (kN)			250	320	560	800	1700	2100

Elde edilen sürtünme ve uç kuvvetleri ilerleyen bölümlerde hem analitik hesap yöntemleriyle elde edilen kuvvetlerle karşılaştırılacak, hem de üç boyutlu modellerde irdelenecektir.

#### 4.2.KAZIK KAPASİTELERİNİN ANALİTİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

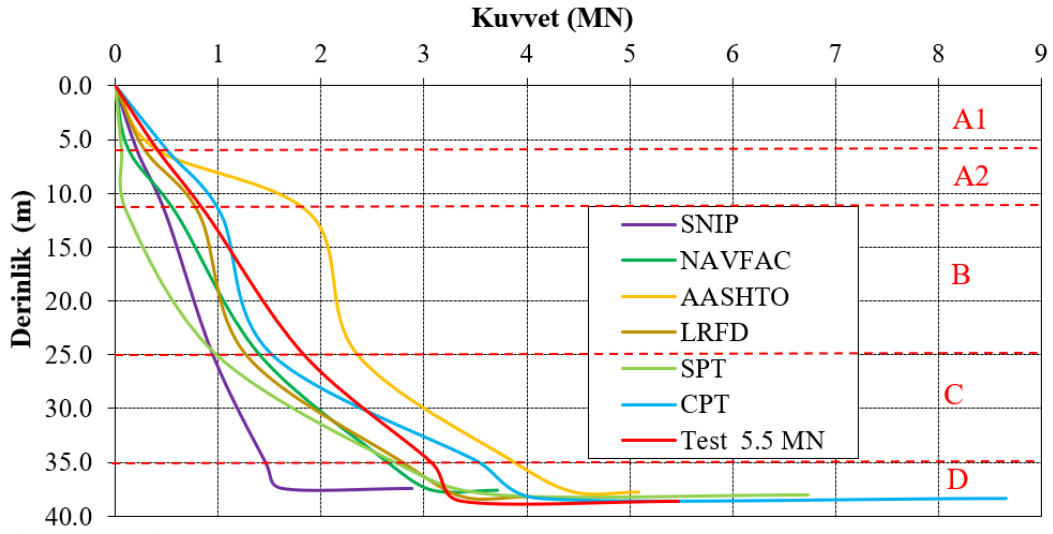
Bölüm 4.1’de arazi deneyleri sonucunda kazık üzerinde farklı tabakalarda oluşan uç ve sürtünme direnci değerleri belirlenmiştir. Bununla birlikte referans çalışma kapsamında zemin mukavemet değerleri ve geometrik tasarım verileri belirlenmiş fore kazığın taşıma kapasitesi farklı analitik yöntemlerle hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında AASHTO, LRFD, NAVFAC, SNIP şartnameleri ve SPT, CPT deney sonuçlarına bağlı olarak arazide deneyi gerçekleştirilmiş d=80 cm çapında ve L=38m boyundaki fore kazığın taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. Taşıma kapasitesi hesaplamalarında referans çalışmada verilen idealize zemin profilinde belirtilmiş mukavemet parametrelerinin ortalama değerleri kullanılmıştır.

Yukarıda ilgili başlıklarda şartnamelere ve arazi deneylerine göre kazık kapasitesinin hesaplanma yöntemi açıklanmıştır. Comodromos ve diğ. (2009) tarafından gerçekleştirilen deneyde kullanılan d=80 cm çaplı L=38,0 m boyundaki fore kazığın tercih edilen yöntemlere göre belirlenen kazık kapasitesi değerleri Tablo 4.2’de görülmektedir. Farklı yöntemlerle yapılan hesaplar detaylı olarak EK-1 de sunulmuştur. Ayrıca kazık yükleme deneyinden elde edilen kuvvet değerleri de tabloda görülmektedir.

**Tablo 4.2:** Analitik yöntemlerle hesaplanan kazık sürtünme ve uç kapasitesi değerleri [kN].

	Test 5.5						
	MN	SNIP	NAVFAC	AASHTO	LRFD	SPT	CPT
Yüklemesi							
A1	412.0	211.1	131.2	407.2	286.7	60.3	502.7
A2	480.0	282.9	468.5	1492.9	531.9	60.3	527.8
B	942.0	454.8	800.5	449.2	449.2	862.6	490.1
C	1240.0	512.7	1244.1	1520.5	1520.5	1741.7	2010.6
D	300.0	162.9	432.8	580.6	580.6	995.3	603.2
Q <sub>s_toplam</sub>	3374.0	1624.4	3077.0	4450.4	3369	3720.1	4134.3
Q <sub>uç</sub>	2100.0	1256.6	633.3	633.3	633.3	3015.9	4523.9
Q <sub>nihai</sub>	5474.0	2881.0	3710.3	5083.7	4002	6736.1	8658.2
Q <sub>s</sub> / Q <sub>nihai</sub>	%63	%57	%83	%88	%84	%56	%47
Q <sub>uç</sub> / Q <sub>nihai</sub>	%37	%43	%17	%12	%16	%54	%53

Şekil 4.2’de analitik yöntemlerle hesaplanan ve kazık boyunca oluşması beklenen kapasitenin derinlikle değişimi görülmektedir.

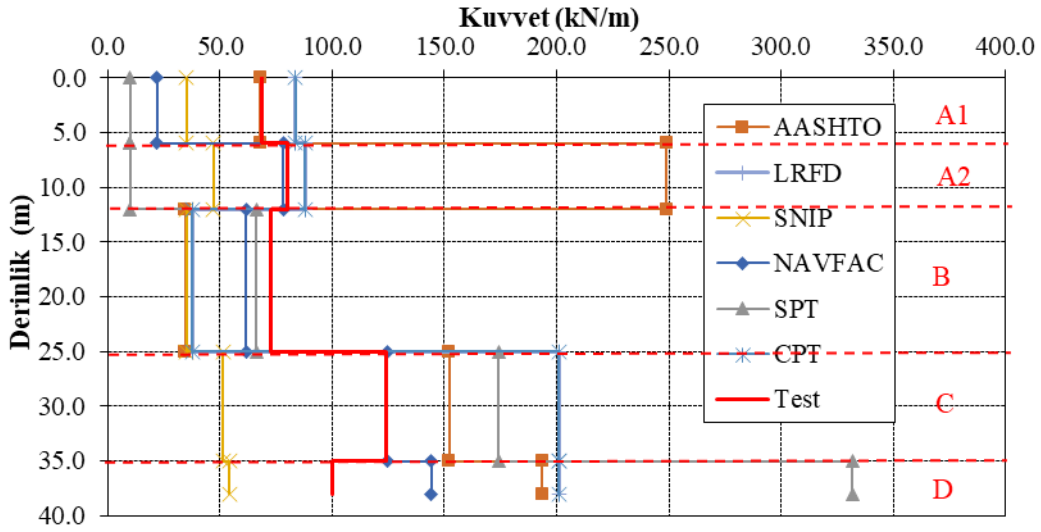


Şekil 4.2: Şartnamelere göre hesaplanan kazık kapasitelerinin derinlikle değişimi.

Makalede de belirtildiği üzere arazi deneyinde 5.5 MN, Flac 3D modelinde ise 6 MN değerine kadar kazık üzerinde yükleme yapılmıştır. Tablo 4.2’de görüldüğü üzere SNIP, NAVFAC, AASHTO ve LRFD şartnamelerine göre yapılan hesaplarda kazığın toplam kapasitesi, arazide ulaşılan değerlerin altında kalmıştır. Bununla birlikte SPT ve CPT deneylerine göre yapılan hesaplamalarda ise arazide ulaşılan kapasitenin üzerinde bir taşıma kapasitesi değeri elde edildiği görülmektedir.

Yapılan hesaplamalar değerlendirildiğinde, AASHTO, LRFD ve NAVFAC şartnamelerinde kazığın toplam kapasitesinde %80 üzerinde bir oranla sürtünme direncinin etkili olduğu görülmektedir. SNIP şartnamesi ve SPT-CPT yöntemlerinde ise kapasitesinin yaklaşık olarak yarı yarıya sürtünme ve uç direncinden oluştuğu görülmektedir.

Analitik yöntemlerle elde edilen kazık kapasiteleri, üç boyutlu analiz modelinde gömülü kazık elemanının kazık kapasiteleri modellenirken kullanılacaktır. Bu değerler vasıtasıyla analitik olarak hesaplanan kapasitelerin, arazide elde edilen kapasitelere ve deplasman değerlerine uygunluğu irdelenecektir. Üç boyutlu analizlerde kazık modellemesi yapılırken, tabakalara gelen sürtünme dirençleri tabaka kalınlıklarına bölünerek birim metrede oluşan kuvvetler yazılıma modellenmiştir. Bunun neticesinde her tabaka için kullanılan kazık kapasitesi değerleri, farklı yöntemlere göre Şekil 4.3’de görülmektedir.

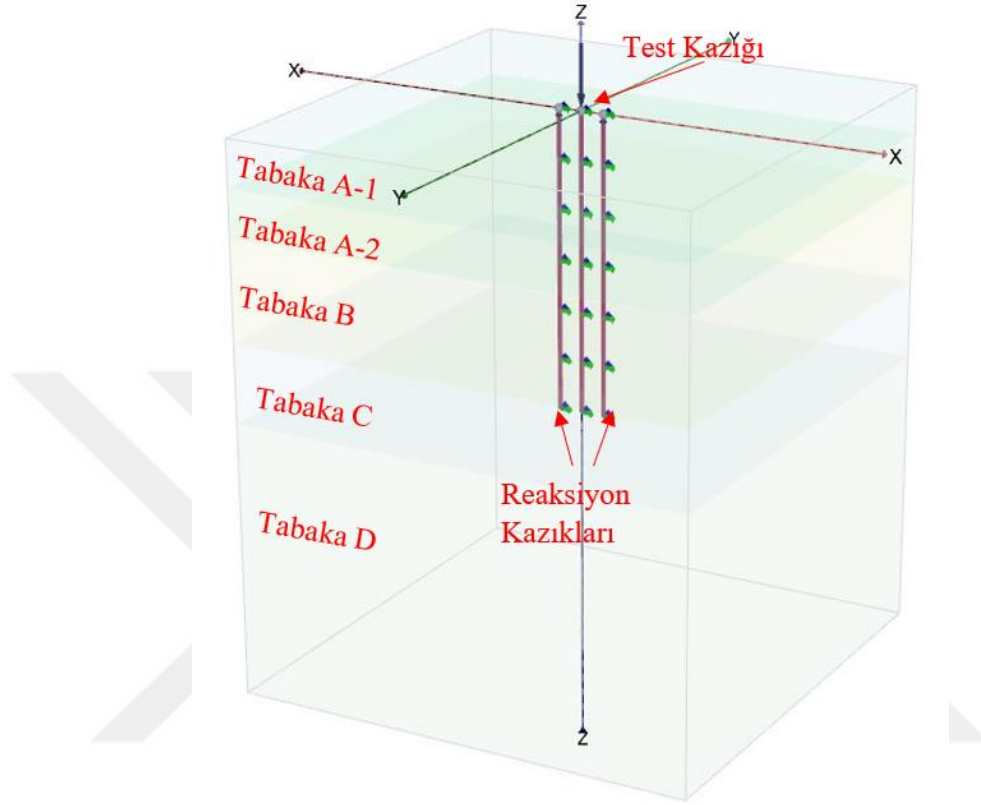


Şekil 4.3: Kazık üzerinde birim metrede oluşması beklenen sürtünme kuvvetleri.

#### 4.3. ANALİTİK YÖNTEMLERLE HESAPLANAN KAZIK KAPASİTELERİNE GÖRE GERÇEKLEŞTİRİLEN 3D ANALİZLER

Referans çalışmada gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi 3D modeli, Plaxis 3D yazılımı kullanılarak tekrar modellenmiştir. Model oluşturulurken arazi deneyinde kullanılan kazık çapı, boyları ve aralıkları dikkate alınmıştır. Buna göre  $D=80$  çaplı ve  $s=3,0$  m aralıklarla olmak üzere ortada 1 adet reaksiyon kazığı ve yanlarda 2 adet çekme kazığı modellenmiştir. Çekme kazıkları ve reaksiyon kazığı aynı rijitlik ve direnç parametreleri kullanılarak modellenmiştir. Seçilen kazık boyu, arazi deneyinde de kullanıldığı üzere  $L=38$ , m dir. Oluşturulan üç boyutlu modelde zemin tabakaları lineer elastik-perfectly plastic mohr coulomb modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda makalede belirtilen zemin parametrelerinin ortalama değerleri kullanılmıştır. Analizler üzerinde değişik varyasyonlarda zemin parametreleri de makalede önerilen maksimum-minimum değerler arasında değiştirilmiştir. Modelde kullanılan kazık elemanları ise temel altı kazık elemanları modellenmesi için kullanılan “gömülü kazık (embedded pile)” elemanı kullanılarak modellenmiştir. Kazık elemanları gömülü kazık olarak modellenirken, kazığın sürtünme dirençleri “multi-linear” seçeneği kullanılarak modellenmiştir. Bu seçenekte birim m’de mobilize olması beklenen sürtünme kapasiteleri ve kazığın uç kapasitesi değeri, AASHTO, LRFD, SNIP, NAVFAC şartnameleri ve SPT, CPT arazi deneyleri vasıtasıyla belirlenmiştir. Her bir yöntem için hesaplanan değerlerde arazi deneyi sonuçlarına yakınsamak

amacıyla farklı varyasyonlar ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde arayüz etkisinin etkin olduğu ya da olmadığı durumlar için farklı değerlendirmeler de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4: Plaxis 3D modeli.

Ayrıca Plaxis 3D yazılımı içerisinde “Layer Dependent” olarak, tabakalar üzerinde oluşacak sürtünme ve uç kapasitesi değerlerinin yazılım tarafından zemin mukavemet parametrelerine bağlı olarak hesaplandığı model seçeneği kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu analizlerde de arayüz elemanının kapasite üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir.

Şartnameler ve yazılımın hesap metodolojisine ilave olarak, arazi deneyinde kazık üzerinde olduğu tespit edilen sürtünme ve uç kapasiteleri de farklı varyasyonlarla modellenmiş ve test sonucunda elde edilen yük-deplasman ve yük-derinlik grafikleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı yöntemlerle oluşturulan analiz modellerinde, arazide gerçekleştirilen yükleme adımlarına göre yükleme gerçekleştirilmiştir. Buna göre her yük adımı için model içerisinde yeni bir “Construction Stage” tanımlanmıştır. İlk yükleme çevrimi için her biri ayrı adımda olmak üzere 1 MN, 2 MN, 3 MN, 4 MN a kadar yükleme yapılmış ve 3 MN, 2 MN, 1 MN ve 0 olmak üzere yük boşaltma gerçekleştirilmiştir. İkinci yükleme çevrimi için 1 MN, 2 MN, 3 MN, 4 MN, 5 MN ve 5,5 MN yük kademeleri ile yüklenmiş ve 3 MN, 1 MN ve 0 olmak üzere yük boşaltılmıştır.

Analizler sonucunda elde edilen sonuçlar, her bir hesaplama yöntemine göre ilgili başlık altında özetlenmektedir.

#### 4.3.1. REFERANS MAKALE PLAXIS MODELİ

Referans olarak alınan makale kapsamında, arazi yükleme deneyinden ve FLAC yazılımı ile yapılan üç boyutlu model analizinden kazık elemanı çevresinde oluşması beklenen sürtünme kuvvetleri ve uç kuvvetleri belirlenmiştir. Plaxis 3D yazılımında oluşturulan modelde bu kuvvetler kullanılarak modellenmiş ve arazide edilen deplasmanlarla karşılaştırılmıştır.

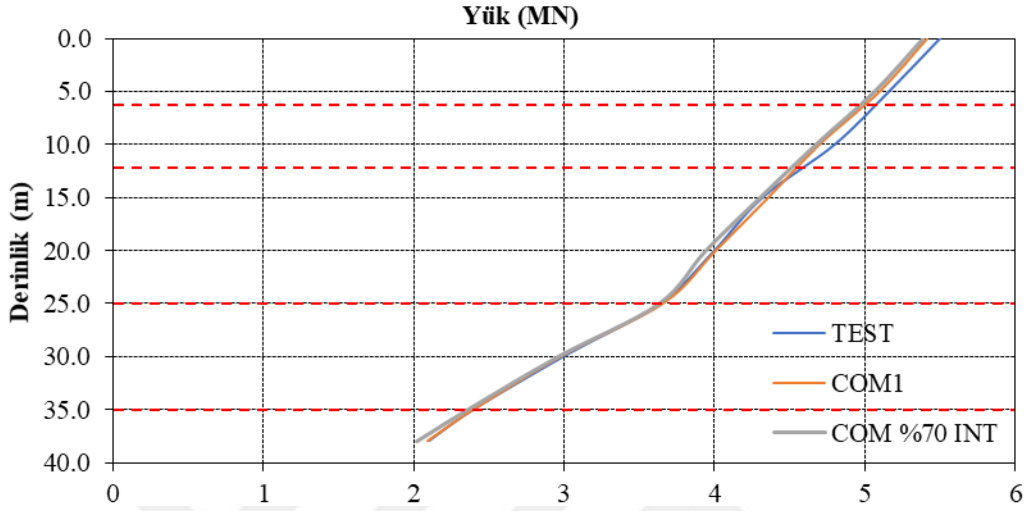
Analizlerde kazık elemanları rijit elemanlar olarak modellenmektedir. Kazık zemin arasındaki etkileşimi modellemek için ise arayüz elemanlar kullanılır. Şartnamelere göre yapılan analizlerde kazık kapasite hesapları zemindeki örselenmeyi de hesaba katacak şekilde belirli azaltma faktörleri kullanılarak yapıldığından, kazık yüzeyindeki zemin etkisini azaltmak için arayüz faktörü dahil edilmemiştir. Comodromos ve diğ. (2009) analizinde ise değerler arazi deneylerinden elde edildiği için zemin-kazık arasındaki ilişkiyi modellemeyi amaçlayarak kazık çevresinde arayüz elemanlar modellenmiştir ve diğer parametreler sabit tutularak analiz tekrar gerçekleştirildi. Zemin tabakalarındaki arayüz katsayısı  $R_{int}=0,7$  olarak kabul edilmiştir (Majeed, 2017).

İlk olarak yapılan analizlerde zemin modeli makalede belirtilen ortalama değerler kullanılarak oluşturulmuştur. Kazık elemanı ise makalede verilen grafikten 5,5 MN yüklemesine karşılık gelen birim tabaka kuvvetleri kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan kazık sürtünme ve uç kapasitesi değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Makale test modelinde 5.5 MN yüklemesinde tabakalarda birim m de oluşan kuvvetler.

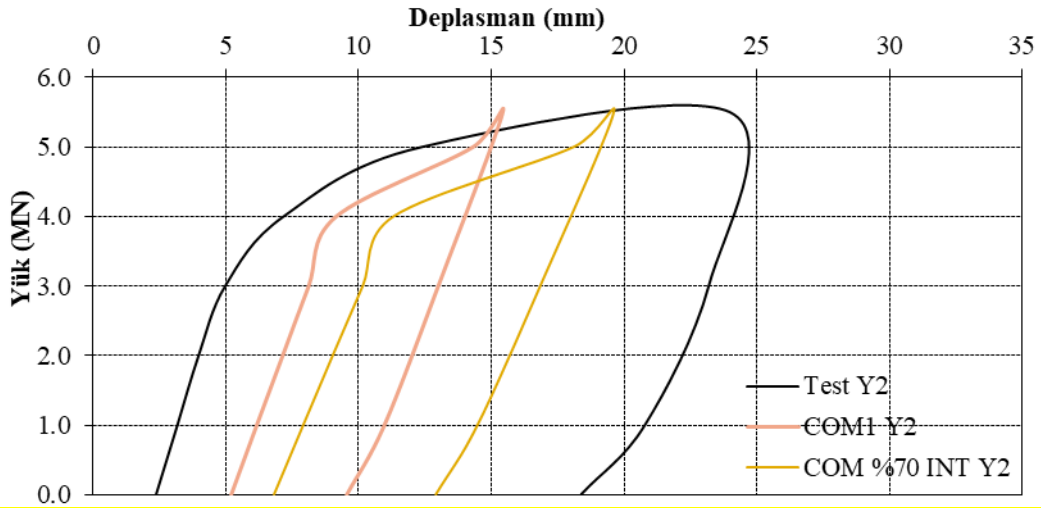
Zemin Tabakaları	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	6	68.7
A2	6	80.0
B	13	74.5
C	10	124.0
D	3	100.0
<hr/>		
$Q_{s\_toplam}$		
$Q_{uç}$		
<hr/>		
$Q_{toplam}$		

Tablo 4.3’de verilmiş olan kazık kapasiteleri ile analizler “arayüz” elemanı olmadan ve %70 arayüz oranıyla iki farklı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen yük derinlik ve yük deplasman grafikleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.5: Comodromos analiz-1 yük derinlik grafiği.

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere kazığı modellemek için girilen kuvvetler yüklemeler sonucunda aynı değerlerde kazık üzerinde mobilize olmuştur.

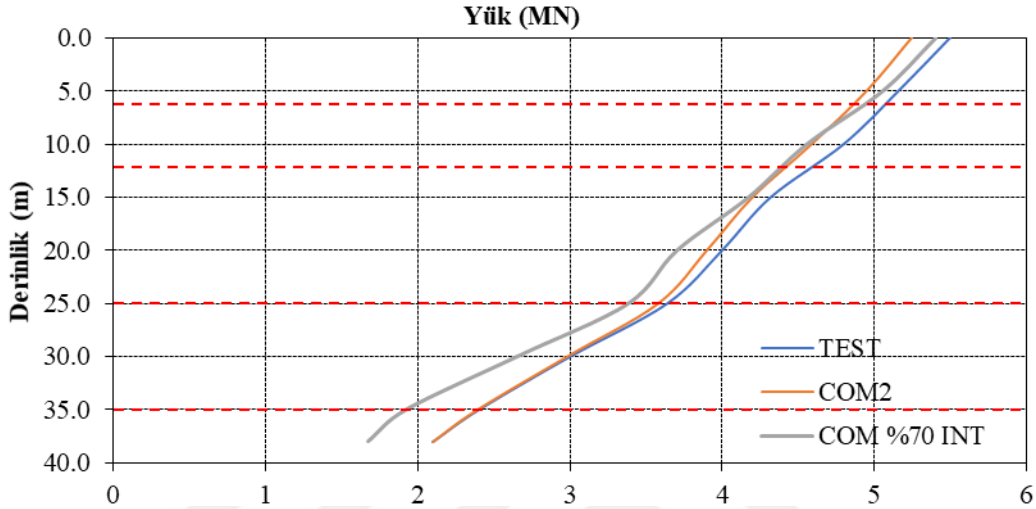


Şekil 4.6: Comodromos analiz-1 yük deplasman grafiği.

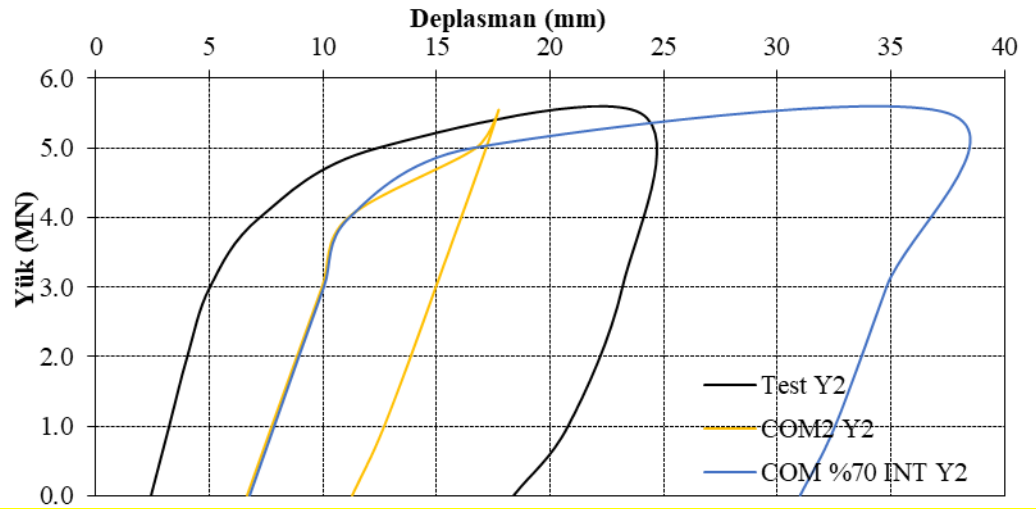
Şekil 4.6’da görülen yük deplasman grafiğine göre arayüz etkisi olmadan gerçekleştirilen analizde deplasman deney değerlerinin altında kalmıştır, %70 arayüz kullanıldığında ise arazi değerlerine yakınsamakla beraber, arazide elde edilen deplasmanlara ulaşamamıştır.



Arazide elde edilen deplasman değerlerine yakınsamak amacıyla zemin tabakaları makalede belirtilen minimum zemin değerleriyle modellenmiştir. Analiz arayüz etkisiz ve %70 arayüz değerleriyle iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yük-derinlik ve yük-deplasman grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sırasıyla verilmiştir.

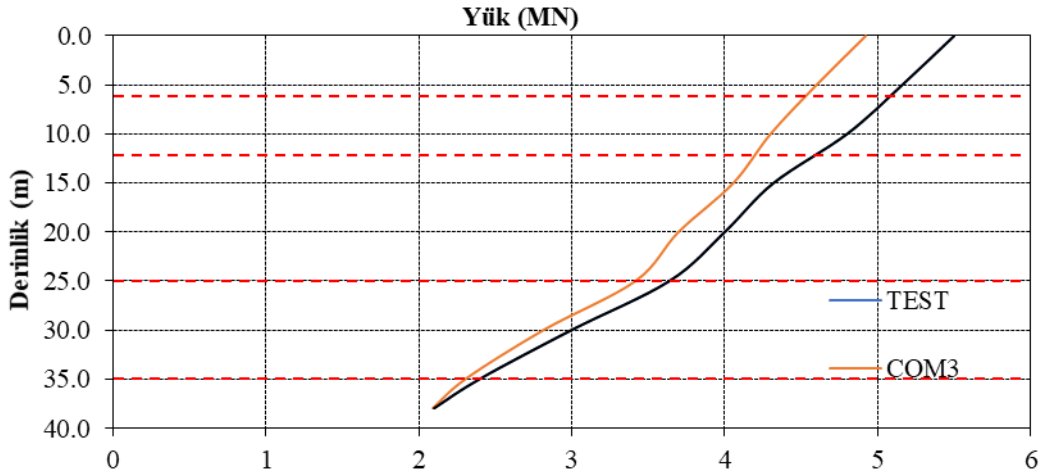


Şekil 4.7: Comodromos analiz-2 yük derinlik grafiği.

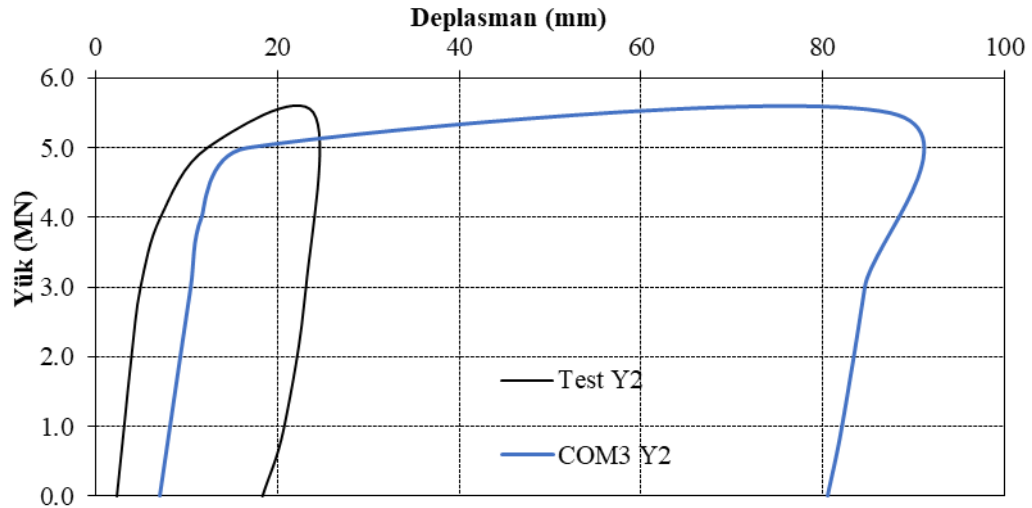


Şekil 4.8: Comodromos analiz-2 yük deplasman grafiği.

Arayüz ile yapılan analizlerde deplasmanların arazi değerlerinin üzerine çıktığı görülmektedir. Referans olarak seçilen %70 arayüz değeri dışında, analiz makalede hesaplanmış olan arayüz değerleriyle tekrar modellenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları (Analiz-3) Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’de görülmektedir.



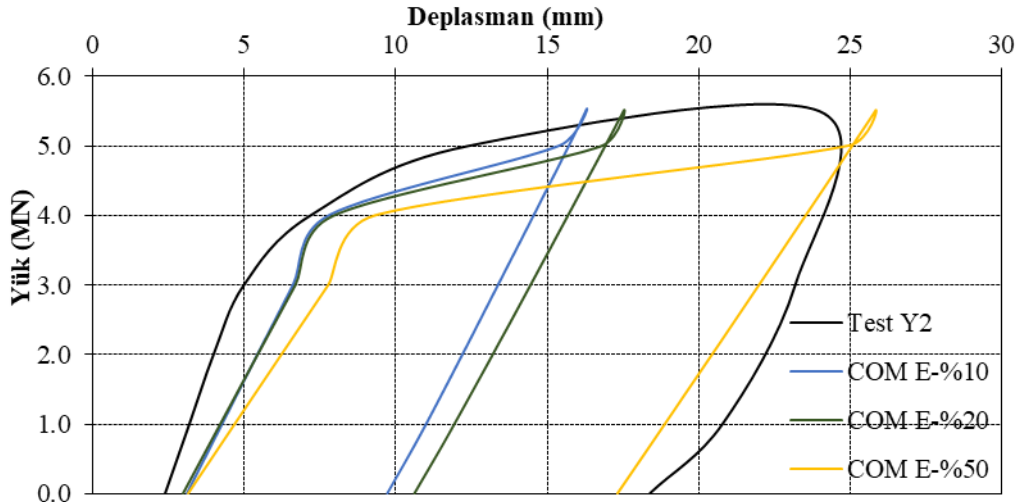
Şekil 4.9: Comodromos analiz-3 yük derinlik grafiği.



Şekil 4.10: Comodromos arayüz analizleri yük deplasman grafiği.

Deplasman sonuçları incelendiğinde analizde yüksek deplasman olduğu görülmektedir. Yük-derinlik grafiği incelendiğinde de kazığın üzerine gelen yükü almadığı ve göçmeye uğradığı gözlemlenmektedir.

Oturma grafiğinde oluşan farklılığın zeminin elastisite modülü değerlerine bağlı olduğu düşünülerek zemin tabakalarının elastisite modülü düşürülmüş ve analizler tekrarlanmıştır. Elastisite modülü tüm tabakalarda sırasıyla %10, %20 ve %50 azaltılarak analizler tekrarlanmıştır. Deplasman grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir. Buna göre zemin modellerinde elastisite modüllerini %50 mertebesinde azaltığımızda arazideki deplasman değerlerine ulaşılmıştır.



**Şekil 4.11:** Comodromos elastisite modülü azaltma analizleri yük deplasman grafiği.

#### 4.3.2. AASHTO Şartnamesi Modeli

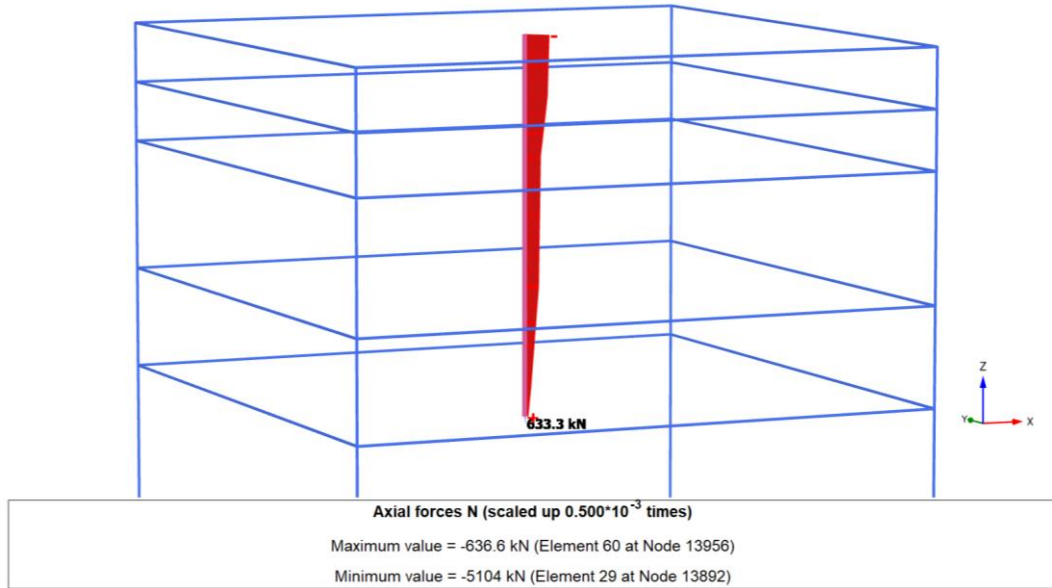
AASHTO şartnamesine göre kazık kapasitesinin hesaplanması yöntemi ilgili bölümde açıklanmıştır. Ayrıca makalede referans alınan model kazığının AASHTO şartnamesine göre taşıma kapasitesi hesapları ilgili başlık altında sunulmuştur. Arazide gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi, Plaxis 3D yazılımında modellenirken kazık parametreleri AASHTO metoduyla hesaplanarak belirlenmiştir. Model sonuçları test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve test sonuçlarına yakınsayabilmek için model parametrelerinde değişik kombinasyonlar uygulanmıştır. Uygulanan kombinasyonlar, elde edilen yük-deplasman ve yük-derinlik sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir. İlk olarak makalede belirlenen zemin parametrelerinin ortalama değerleri ile zemin tabakaları modellenmiştir ve bu değerlere göre hesaplanan kazık kapasiteleri ile kazık modellemesi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre AASHTO şartnamesindeki yöntemle kazığın sürtünme kuvveti  $Q_s=4450,4$  kN, uç kuvveti ise  $Q_{uç}=633$  kN olarak hesaplanmıştır. Buna göre toplam kazık kapasitesi  $Q_{toplam}=5083,7$  kN olmaktadır.

Ortalama zemin değerleri kullanılarak, kazıklar için hesaplanan kapasite değerleri Tablo 4.4' de verilmiştir. Buna ilaveten her tabakada oluşacak birim sürtünme kuvvetleri de tabloya eklenmiştir. Plaxis 3D modelinde kazık elemanları üzerinde oluşacak sürtünme ve uç kapasitesi değerleri, hesaplanan birim sürtünme kuvveti ve  $Q_{uç}$  değerleri kullanılarak sınırlandırılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.4:** AASHTO şartnamesi ve makalede belirlenen ortalama zemin parametrelerine göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri.

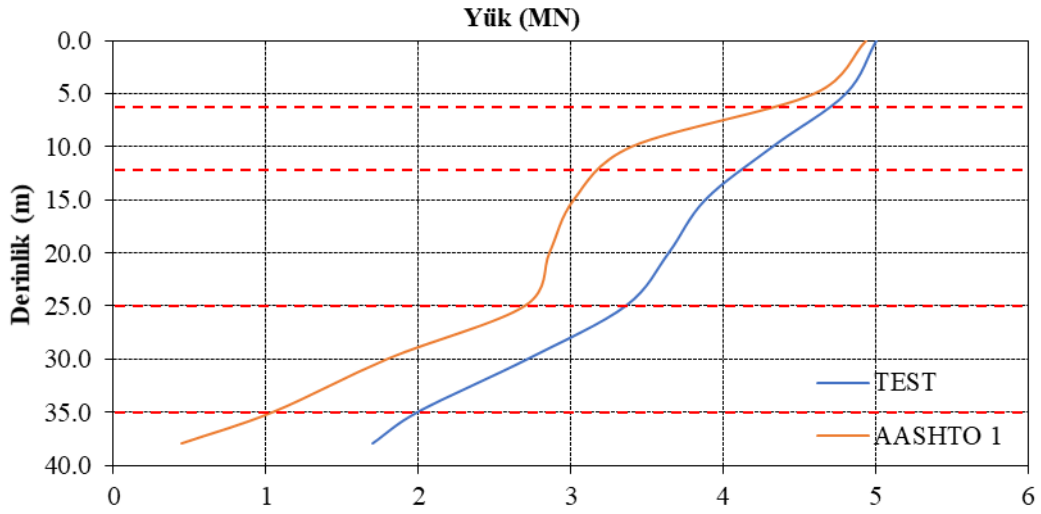
Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sirtünme kuvveti (kN/m)
A1	407.2	6	67.9
A2	1492.9	6	248.8
B	449.2	13	34.6
C	1520.5	10	152.1
D	580.6	3	193.5
$Q_{s\_toplam}$	4450.4		
$Q_{u\check{c}}$	633.3		
$Q_{toplam}$	5083.7		

Arazi deneyine göre kazık 5,5 MN a kadar yüklenmektedir. AASHTO şartnamesiyle hesaplanan kazık kapasitesi arazideki kapasitenin altında kalmaktadır. Bu durumun neticesinde Plaxis 3D analizinde de sistem 5,0 MN yükleme adımına kadar çözüm sağlayabilmiştir. şekil 4.12’de test kazığı üzerinde mobilize olan maksimum ve minimum normal kuvvet değerleri görülmektedir.



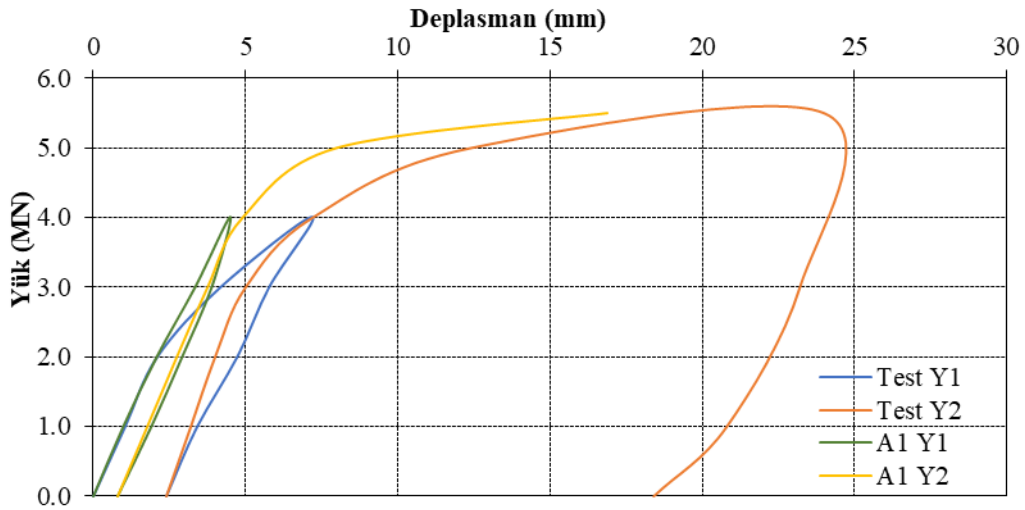
**şekil 4.12:** AASHTO analiz-1 normal kuvvet grafiği.

şekilde görüldüğü üzere analiz modeline  $Q_{u\check{c}}=633$  kN ile sınırlandırıldığından, analiz sonucunda arazide llen uç kapasitesi değeri modelde mobilize olamamıştır. 5 MN yk mertebesinde sonlanan analiz, yükleme deneyinde 5 MN mertebesindeki yk-derinlik değişimiyle karşılaştırma grafiği şekil 4.13 ‘de görülmektedir.



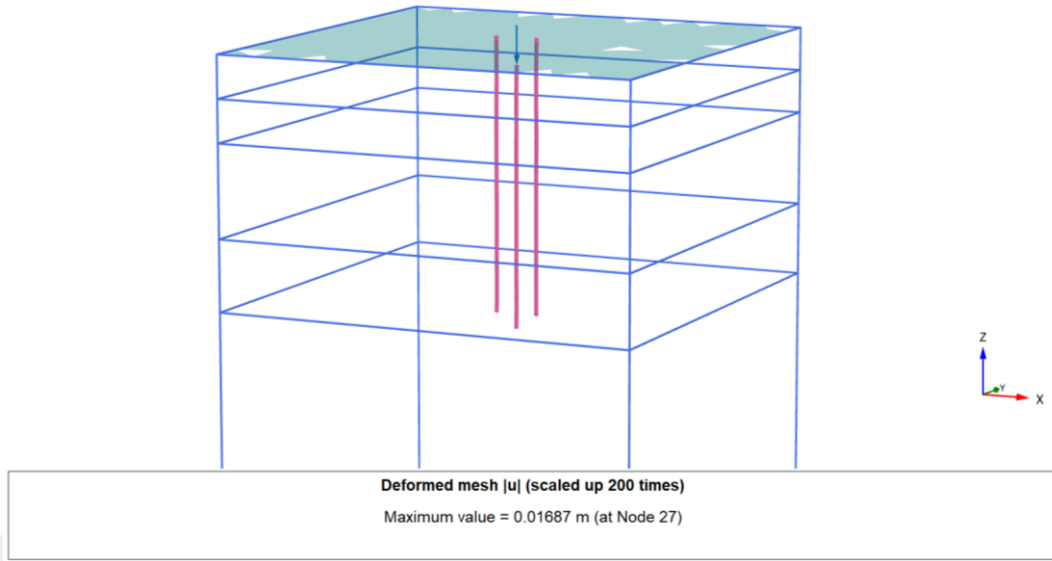
Şekil 4.13: AASHTO analiz-1 yük derinlik grafiği.

Analiz-1 sonucunda kazık kapasitesinin yetersizliğinden dolayı 2. Yükleme tamamlanamamıştır. Tamamlanan yükleme aşamalarında elde edilen deplasmanların arazi deneyiyle karşılaştırılması Şekil 4.14’de görülmektedir. Grafikte “Y1” olarak belirtilen eğri birinci yüklemeyi, “Y2” olarak belirtilen eğri ikinci yüklemeyi göstermektedir. Şekil 4.15’de 5 MN yüklemesinde elde edilen deplasman grafiği görülmektedir.



Şekil 4.14: AASHTO analiz-1 yük deplasman grafiği.

Şekil 4.15’de Analiz-1 5 MN yüklemesinde kazık üzerinde ulaşılan deplasman grafiği görülmektedir.



**Şekil 4.15:** AASHTO analiz-1 deplasman grafiği.

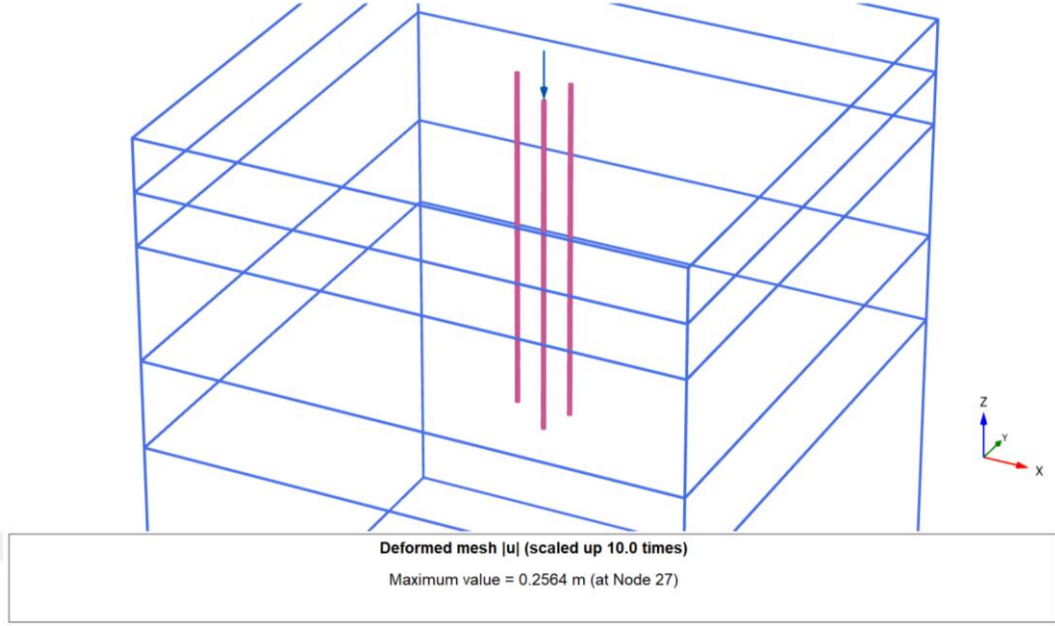
Analiz-1 sonuçları değerlendirildiğinde uç kapasitesinin yetersiz olması nedeniyle yükleme aşamalarının tamamlanamadığı görülmüştür. Bu nedenle AASHTO şartnamesine göre uç kapasitesi tekrar değerlendirilmiştir. Makalede kazık ucunda bulunan D tabakası için drenajsız kohezyon değeri  $c_u=140\pm 40$  kPa olarak belirlenmiştir. İlk analizde ise makalede belirtilen ortalama değerler kullanıldığı için  $c_u=140$  kPa olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan uç kapasitesini arttırmak için D tabakasının kohezyon değeri  $c_u=180$  kPa olarak kabul edilmiş ve kazık elemanı için kapasiteler tekrar hesaplanmıştır. Bu durumda hesaplanan ve yeni modelde kullanılan kazık kapasitesi değerleri Tablo 4.5’de verilmektedir.

**Tablo 4.5:** AASHTO şartnamesi ve makalede belirlenen ortalama zemin parametrelerine göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri.

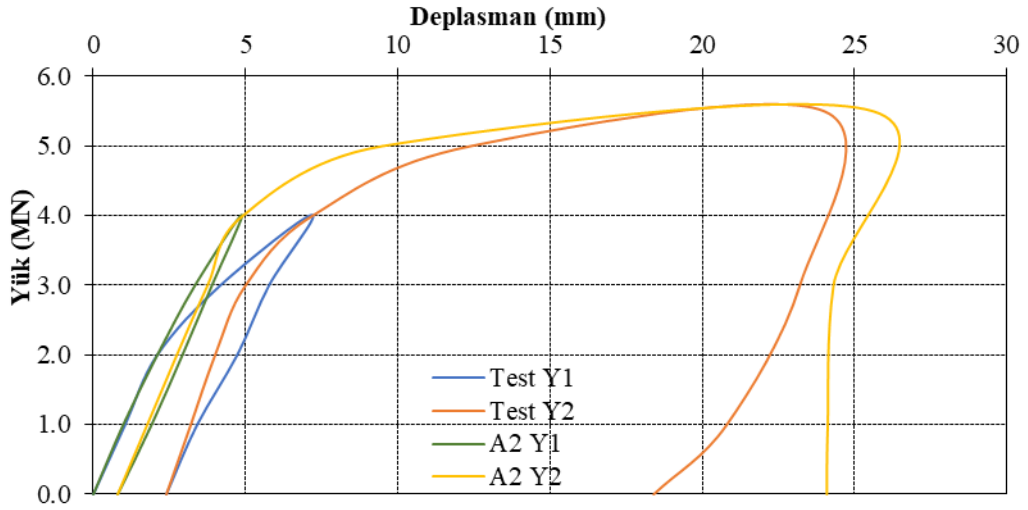
Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	407.2	6	67.9
A2	1492.9	6	248.8
B	449.2	13	34.6
C	1520.5	10	152.1
D	746.4	3	248.8
$Q_{s\_toplam}$	4616.3		
$Q_{uç}$	814.3		
$Q_{toplam}$	5430.6		







Şekil 4.18: AASHTO analiz-2 deplasman grafiği.



Şekil 4.19: AAHSTO analiz-2 yük deplasman grafiği.

Şekil 4.19’de görüldüğü üzere gerçekleştirilen analiz sonucunda yük-derinlik olarak arazi sonuçlarına yakınsanamamış olsa da yük-deplasman grafiği sonuçları arazide elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir.

Yük-deplasman grafiğinde olduğu gibi, yük-derinlik sonuçlarında da arazi deneyine yakın sonuçlar elde edebilmek amacıyla kazık uç kapasitesi değerleri irdelenmiştir. Bu amaçla zemin parametrelerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna göre kazık ucunda bulunan D tabakasının



zemin değerleri arazide yapılan CPT deneyi sonuçlarına göre tekrar değerlendirilmiştir. Şekil 3.7’de verilmiş olan idealize zemin profilinde görülen CPT grafiğine göre D tabakası için cone penetrasyon değeri  $q_c=10$  MPa olarak kabul edildi ve CPT Deneyi –  $c_u$  arasındaki ilişki vasıtasıyla D tabakası için yeni bir  $c_u$  değeri belirlenmiştir.

$$c_u = \frac{q_c - p}{N_k} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de;

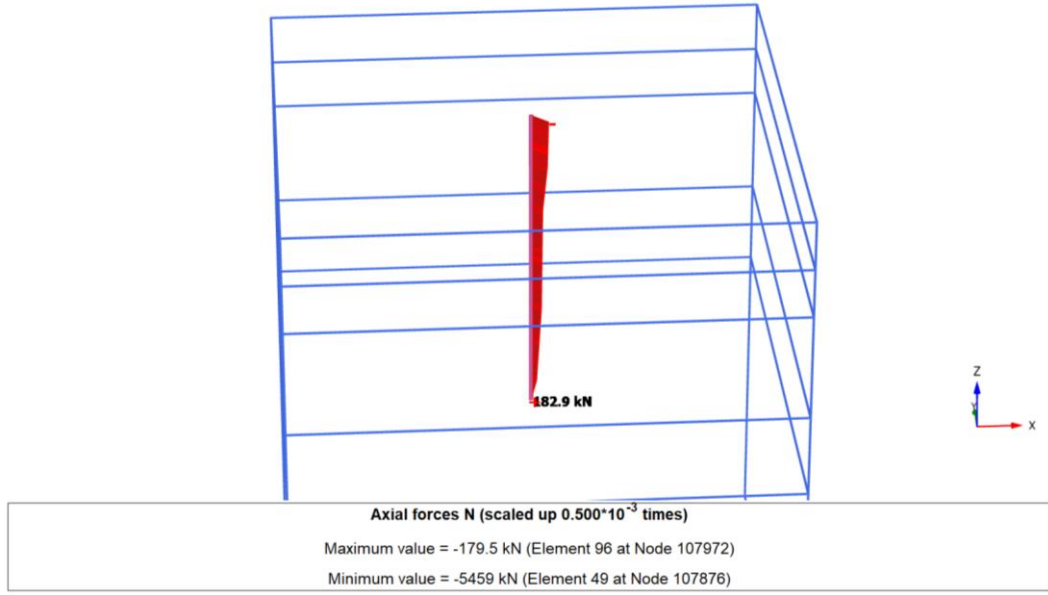
- P =Toplam Efektif Gerilme  
 $N_k$  =10-15 (normal konsolide killer için katsayı)  
 $N_k$  =15-20 (aşırı konsolide killer için katsayı)

Bu formüle göre D tabakasının kohezyon değeri  $c_u=465$  kPa olarak hesaplanmıştır ve analizlerde  $c_u=450$  kPa kabul edilmiştir. Bu durumda kazık üzerinde oluşan ve analizde kullanılan sürtünme ve uç değerleri aşağıdaki tabloda verildiği gibidir.

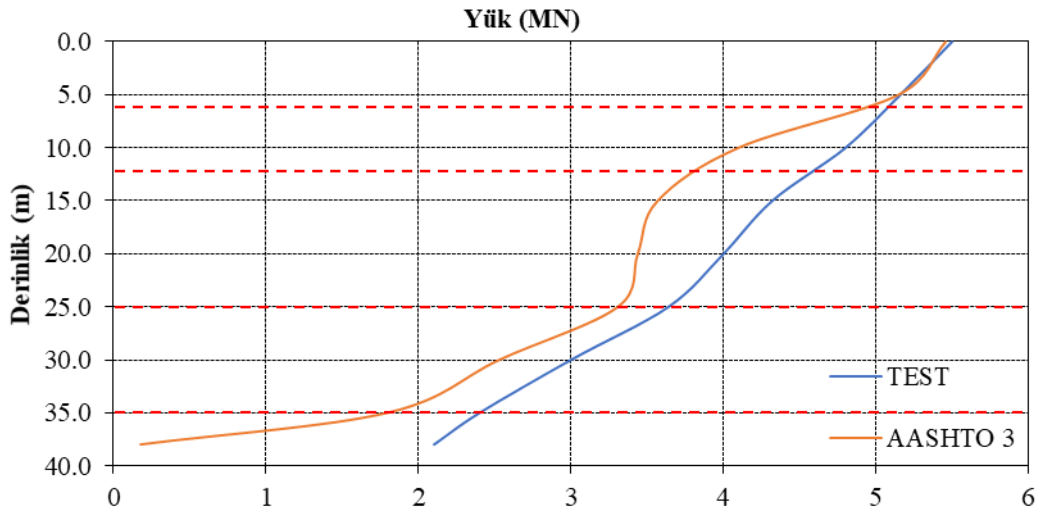
**Tablo 4.6:** AASHTO şartnamesi ve D tabakası parametreleri CPT ye göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	407.2	6	67.9
A2	1492.9	6	248.8
B	449.2	13	34.6
C	1520.5	10	152.1
D	1866.1	3	622.0
$Q_{s\_toplam}$	5735.9		
$Q_{uç}$	2035.8		
$Q_{toplam}$	7771.7		

Belirlenen yeni parametrelerle Analiz-3 gerçekleştirilmiştir. Analizde 5.5 MN yüklemesinde kazık üzerinde mobilize olan normal kuvvet grafiği Şekil 4.20’da görülmektedir. Kazık üzerinde derinliğe bağlı olarak mobilize olan kuvvetler, arazi deneylerinde elde edilen kuvvetlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.21’de verilmiştir.



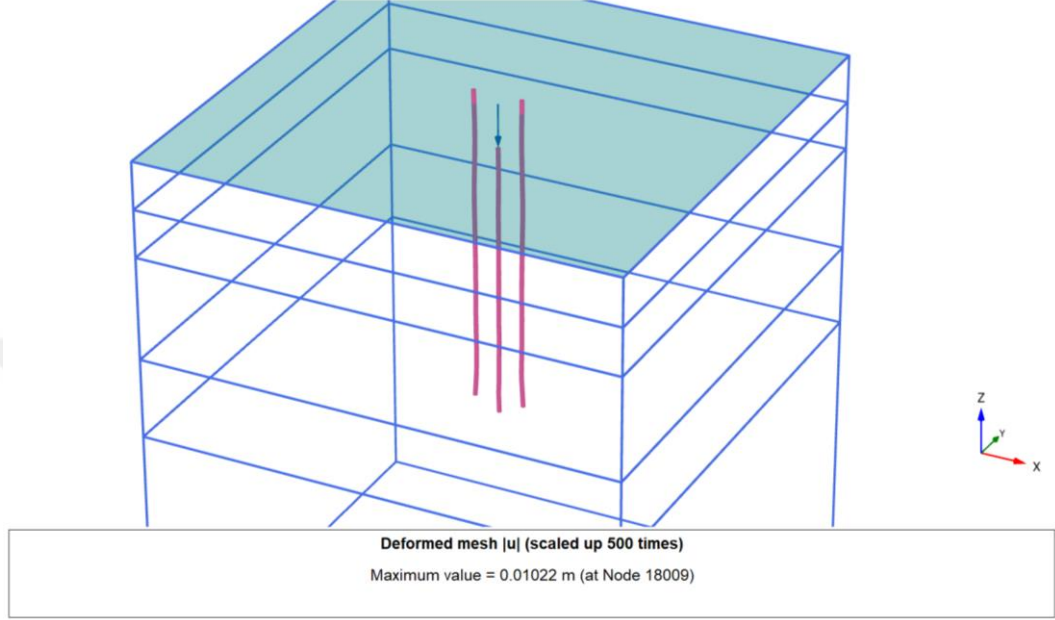
Şekil 4.20: AASHTO analiz-3 normal kuvvet grafiği.



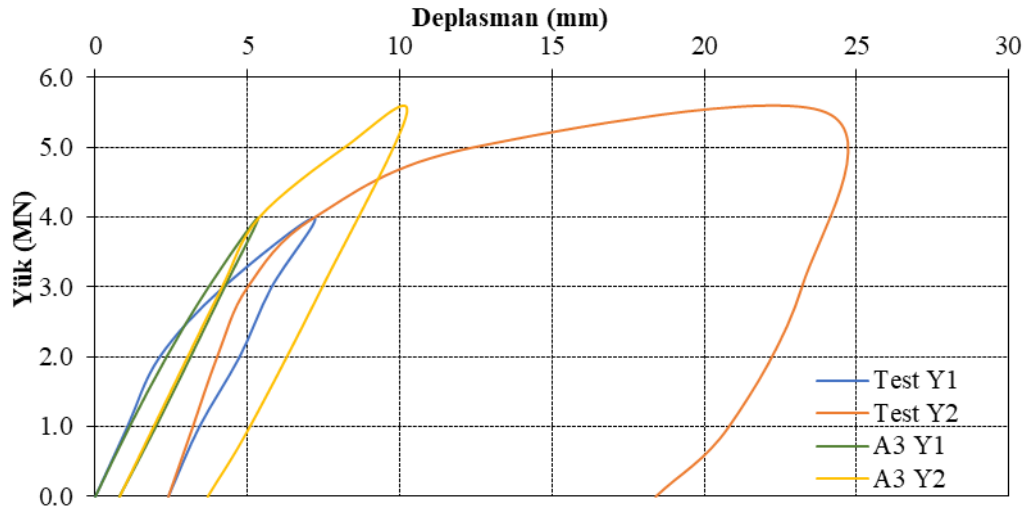
Şekil 4.21: AAHSTO analiz-3 yük derinlik grafiği.

Kazık elemanına modellenen uç kapasitesi yüksek olsa da D tabakasında mobilize olan sürtünme değeri nedeniyle uç kapasitesi bu modelde mobilize olamamıştır. Hesaplanan sürtünme kapasitesi değeri yükleme değeriyle yaklaşık olarak aynı mertebede olduğu için yapılan yükleme sonucunda yalnızca sürtünme kapasitesi mobilize olmuştur.

Deney modelinde kazıkta 5.5 MN yüklemesinde meydana gelen deplasman Şekil 4.22’de, yükleme boşaltma aşamalarında meydana gelen deplasmanların arazi deneyi sonuçları ile karşılaştırılması ise Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.22: AASHTO analiz-3 deplasman grafiği.



Şekil 4.23: AAHSTO analiz-3 yük deplasman grafiği.

Analitik yöntemle elde edilen ve analizde modellenen kazık kapasitesinin maksimum yüklemekten büyük olması nedeniyle kazık arazide elde edilen deplasman değerine ulaşamamıştır.

AASHTO şartnamesi kapsamında yapılan analizler %70 mertebesindeki arayüz faktörü ile tekrar yapılmış fakat deplasman ve yük değerlerinde dikkate değer farklılıklar gözlemlenmemiştir.

#### 4.3.1. AASHTO- LRFD Şartnamesi Modeli

LRFD şartnamesine göre kazık kapasitesinin hesaplanması yöntemi ilgili bölümde açıklanmıştır. Arazide gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi, Plaxis 3D yazılımında modellenirken kazık parametreleri AASHTO-LRFD metoduyla hesaplanarak belirlenmiştir. Model sonuçları test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve test sonuçlarına yakınsayabilmek için model parametrelerinde değişik kombinasyonlar uygulanmıştır.

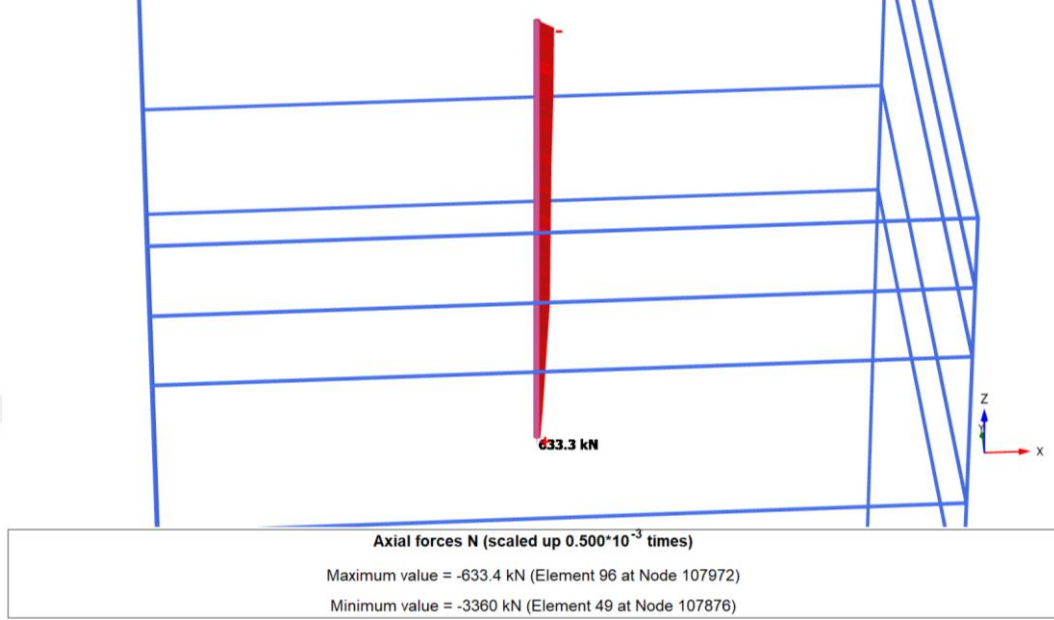
İlk olarak makalede belirlenen zemin parametrelerinin ortalama değerleri ile zemin tabakaları modellenmiştir ve bu değerlere göre hesaplanan kazık kapasiteleri ile kazık modellemesi yapılmıştır. Ortalama zemin değerleri kullanılarak, kazıklar için hesaplanan kapasite değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Buna ilaveten her tabakada oluşacak birim sürtünme kuvvetleri de tabloya eklenmiştir.

**Tablo 4.7:** LRFD şartnamesi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.

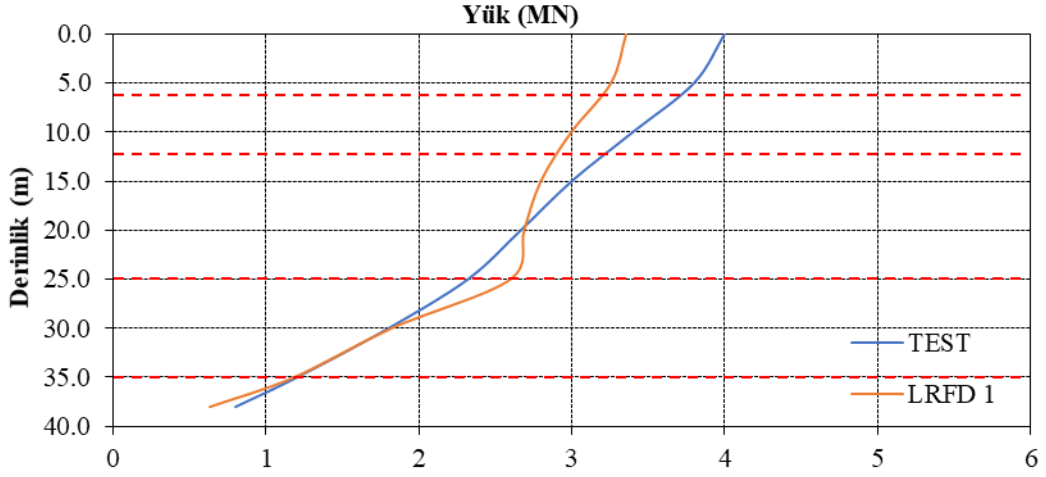
Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	286.7	6	47.8
A2	531.9	6	88.7
B	449.25	13	34.6
C	1520.5	10	152.1
D	580.6	3	193.5
$Q_{s\_toplam}$	3164.7		
$Q_{uç}$	633.3		
$Q_{toplam}$	3798.0		

Yapılan hesaplamalara göre kazığın sürtünme kuvveti  $Q_s=3164,7$  kN, uç kuvveti ise  $Q_{uç}=633$  kN olarak hesaplanmıştır. Buna göre toplam kazık kapasitesi  $Q_{toplam}=3798$  kN olmaktadır. Bu verilerle yapılan analiz 4MN yükleme sonlanmıştır. 4 MN yükleme elde edilen

normal kuvvet grafiği Şekil 4.24'te, normal kuvvetin derinlikle değişim grafiği Şekil 4.25'de sırasıyla verilmiştir.

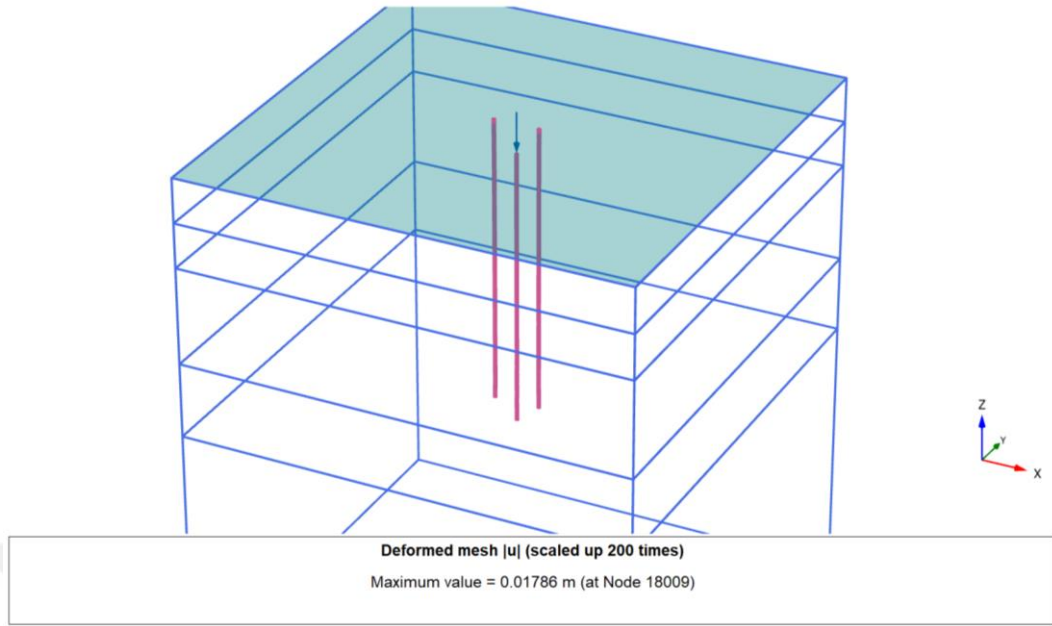


Şekil 4.24: LRFD analiz-1 normal kuvvet grafiği.

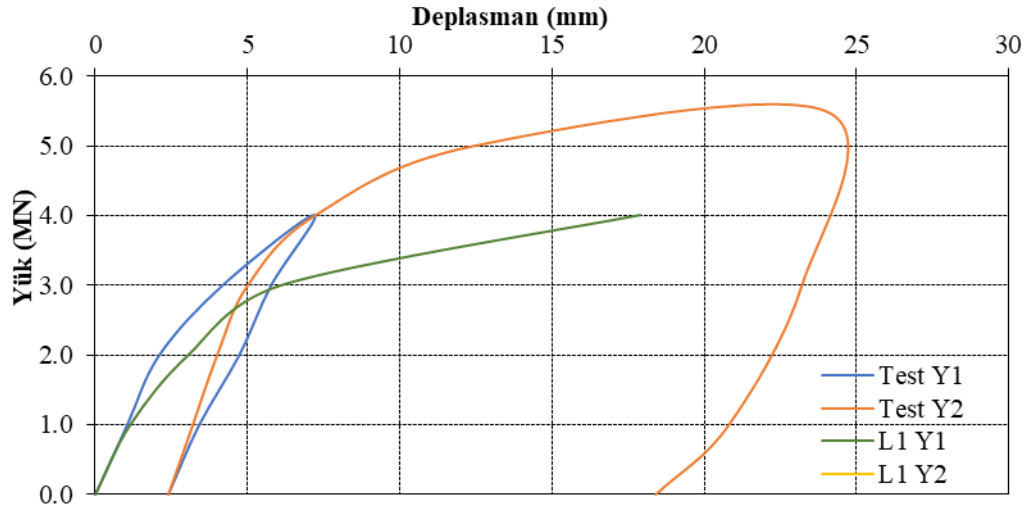


Şekil 4.25: LRFD analiz-1 yük derinlik grafiği.

Modelde analiz 4 MN yüklemede sonlandığı için, arazi deneyinde 4 MN yüklemedeki kuvvetlerle karşılaştırılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere kazık göçmeye uğradığından üzerine etkilenen tüm yükü taşıyamamıştır. Modelde sınırlanan uç kuvveti ise tamamen mobilize olmuştur. 4 MN yüklemede oluşan deplasman grafiği Şekil 4.26'da yük deplasman değişimini gösteren grafik ise Şekil 4.27'de görülmektedir.



Şekil 4.26: LRFD analiz-1 deplasman grafiği.



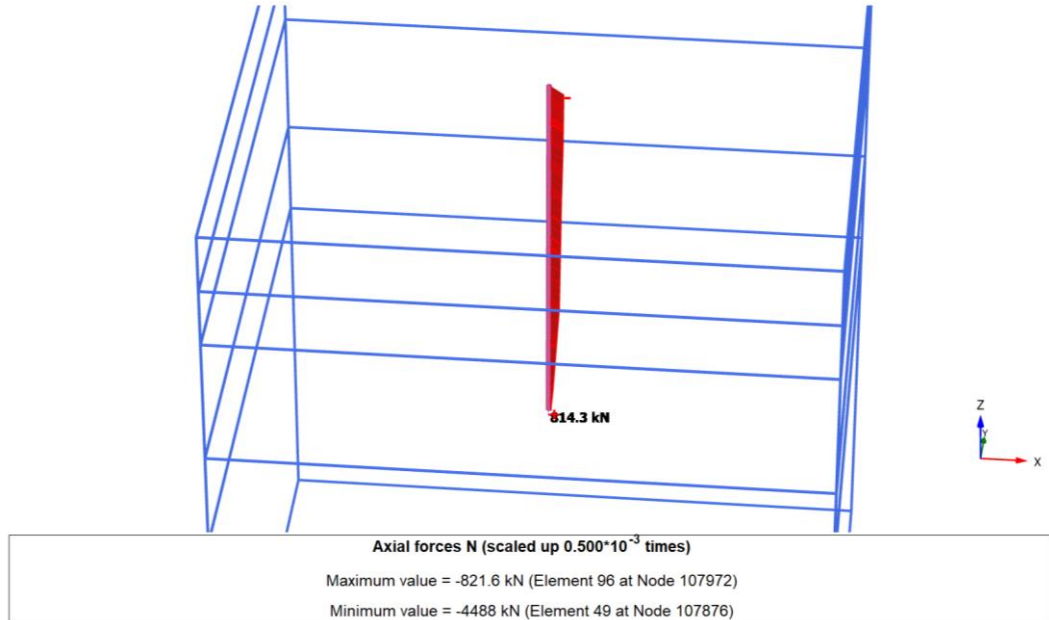
Şekil 4.27: LRFD analiz-1 yük deplasman grafiği.

Analiz-1 analizinde kazık kapasitesi yetersiz olduğundan ilk yükleme çevriminde kazık göçmeye uğramıştır. LRFD yöntemi ve ortalama zemin parametreleri ile hesaplanan kazık kapasitesi, arazide elde edilen kapasitenin altında kaldığından dolayı zemin parametreleri makalede belirtilen en yüksek değerler kullanılarak kapasite tekrar hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.8’de görüldüğü gibidir.

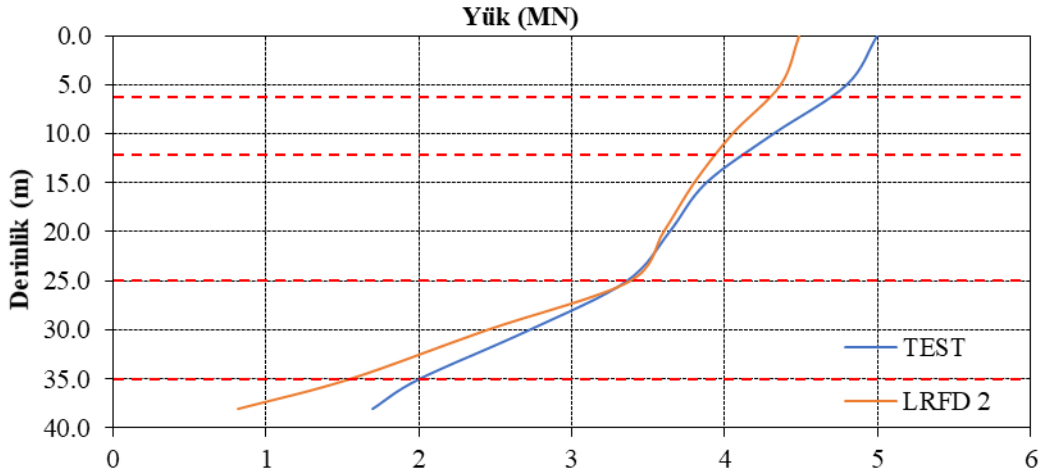
**Tablo 4.8:** LRFD şartnamesi ve zeminin maksimum değerleriyle hesaplanan kapasiteler.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	286.7	6	47.8
A2	531.9	6	88.7
B	628.9	13	48.4
C	1797.0	10	179.7
D	709.3	3	236.4
$Q_{s\_toplam}$	3749.6		
$Q_{uç}$	814.3		
$Q_{toplam}$	4563.9		

Zeminin yüksek parametreleriyle hesaplanan toplam kazık kapasitesi  $Q_{toplam}=4563.9$  kN olmaktadır. Bu değer arazide yapılan yükleme değerinden daha aşağıda kalmaktadır. Hesaplanan parametrelerle Analiz-2 gerçekleştirilmiş, 4 MN a kadar yüklenen ilk çevrim tamamlanmış fakat ikinci çevrimde 5 MN yüklemesinde kazıkta göçme meydana gelmiştir. 5 MN yüklemesinde elde edilen normal kuvvet grafiği Şekil 4.28'de, normal kuvvet derinlik grafiği ise Şekil 4.29'da görülmektedir.

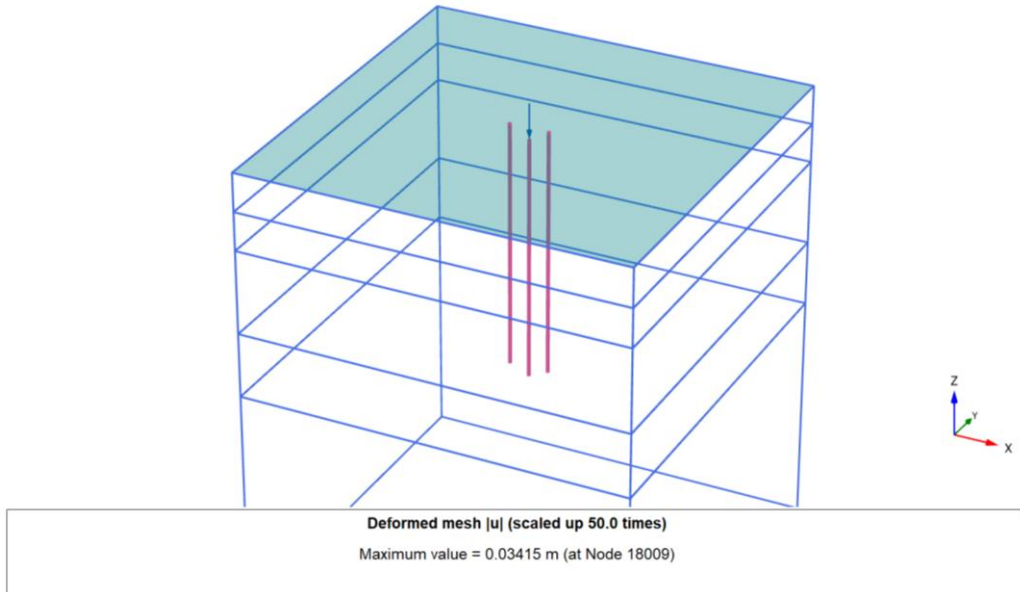
**Şekil 4.28:** LRFD analiz-2 normal kuvvet grafiği.

Model 5 MN yüklemesinde sonlandığı için makalede 5 MN yüklemesinde elde edilen yük-derinlik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kazık kapasitesi  $Q=4.5$  MN mertebesinde olduğu için 5 MN yüklemesinde kazık göçmeye uğramıştır. Kazığın göçmeye uğrama durumu Şekil 4.31'deki yük-deplasman grafiğinde görülmektedir.



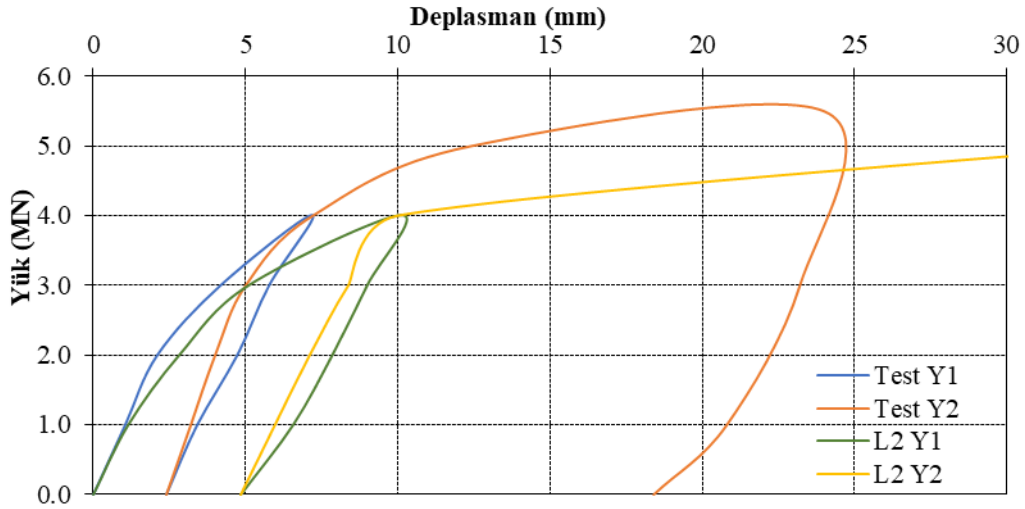
Şekil 4.29: LRFD analiz-2 yük derinlik grafiği.

Şekil 4.29'da görüldüğü üzere, kazık ucunda mobilize olan yük  $Q_{uç}=814.3$  kN ile sınırlandırıldığı için kazık ucundan gereken reaksiyon alınamamıştır. Arazi deneyine yaklaşabilmek amacıyla kazık uç kapasitesinin değeri değerlendirilmiştir. 5 MN yüklemesinde sonlanan analiz derinlik grafiği aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 4.30: LRFD analiz-2 deplasman grafiği.





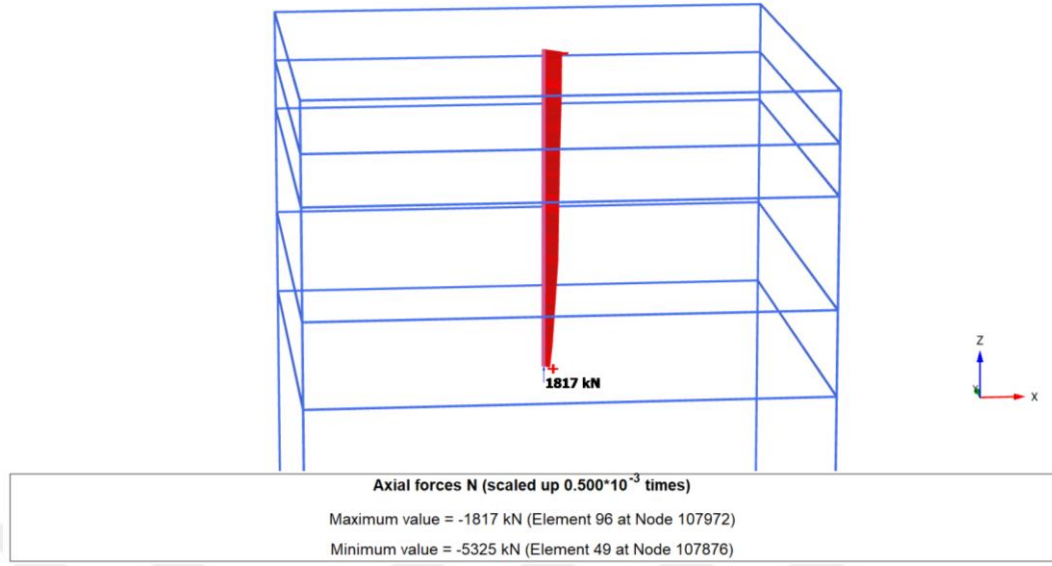
**Şekil 4.31:** LRFD analiz-2 yük deplasman grafiği.

Kazık kapasitesinin arazi deneyine yakın hesaplanabilmesi amacıyla kazık ucunda bulunan D tabakasının zemin parametreleri AASHTO modelinde olduğu gibi CPT deneyi yardımıyla hesaplanmıştır. Buna göre D tabakasının kohezyon değeri  $c_u=450$  kPa alınarak kazık kapasitesi LRFD yöntemine göre tekrar hesaplanmıştır.

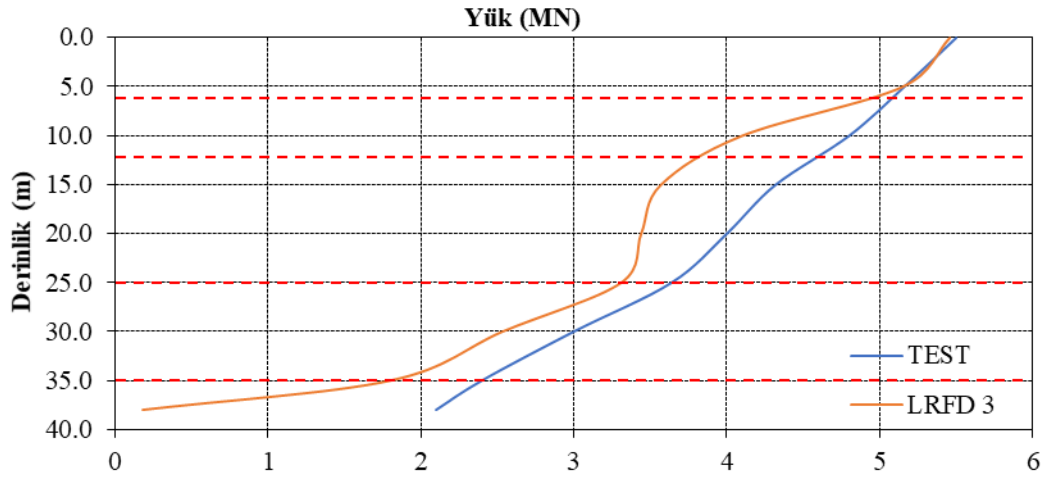
**Tablo 4.9:** LRFD şartnamesi ve CPT ile hesaplanan kapasiteler.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	286.7	6	47.8
A2	531.9	6	88.7
B	628.9	13	48.4
C	1797.0	10	179.7
D	870.8	3	290.3
$Q_{s\_toplam}$	3911.1		
$Q_{uç}$	2035.8		
$Q_{toplam}$	5946.8		

Tablo 4.9’da verilen değerlerle LRFD şartnamesi için Analiz-3 gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda 5.5 MN yüklemede elde edilen normal kuvvet diyagramı Şekil 4.32’de yükün derinlikle değişiminin görüldüğü grafik ise Şekil 4.33’de verilmiştir.

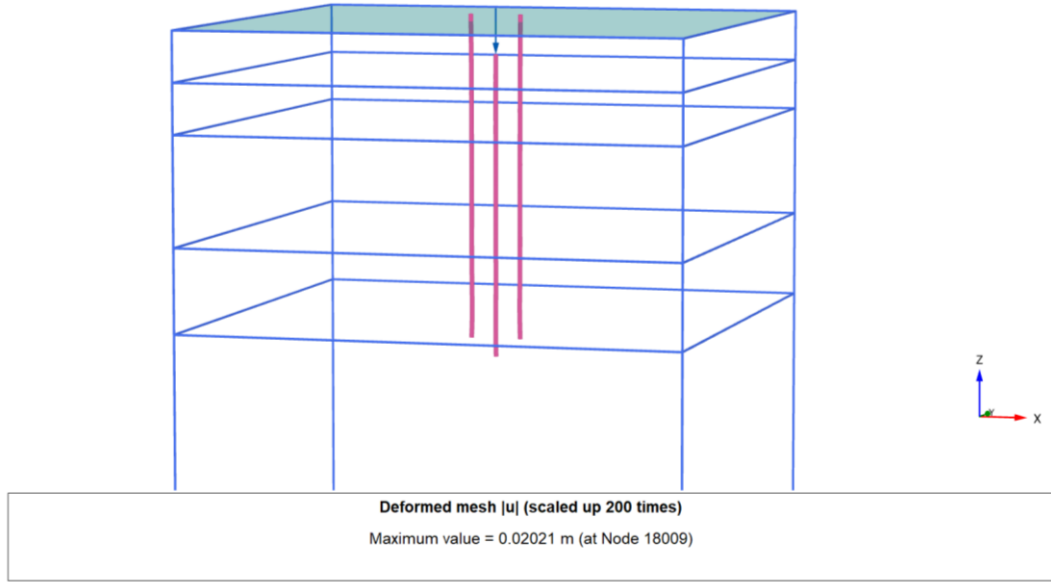


Şekil 4.32: LRFD analiz-2 normal kuvvet grafiği.

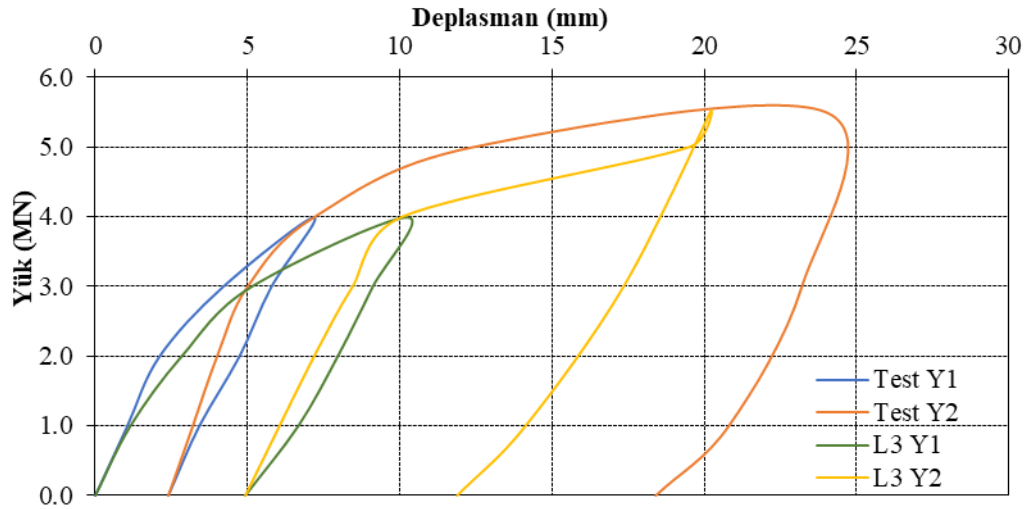


Şekil 4.33: LRFD analiz-3 yük derinlik grafiği.

Analiz-3 tamamlandığında beklenen uç kapasitesi mobilize olmamıştır. Bunun nedeninin D tabakasının sürtünme kuvvetlerinin yüksek olması olabilir. Analiz sonucunda 5.5 MN yüklemesinde oluşan deplasman grafiği Şekil 4.34’de, yük deplasman grafikleri ise Şekil 4.35’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.34: LRFD analiz-3 deplasman grafiği.



Şekil 4.35: LRFD analiz-3 yük deplasman grafiği.

Yük-deplasman grafiği incelendiğinde, deplasmanlar arasında %20 fark olduğu görülmektedir. Uç kapasitesinin değerlendirilmesi amacıyla uç tabakanın direncinin artırılması kazığın deplasmanının sınırlandırılmasına yol açmıştır.

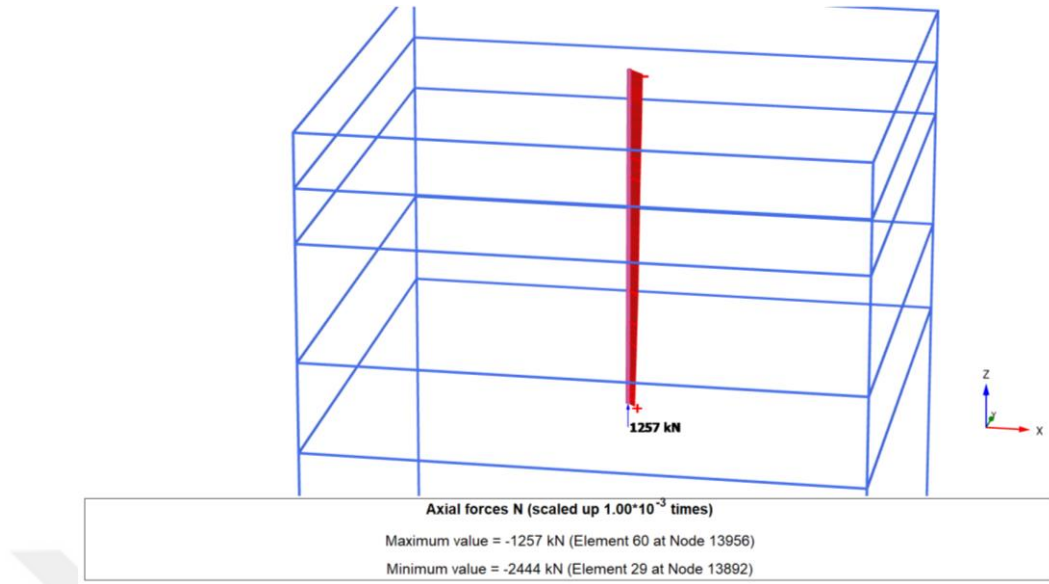
### 4.3.2. SNIP Şartnamesi Modeli

SNIP şartnamesinde sunulan kazık tasarım yöntemi kullanılarak, arazideki kazık yükleme deneyi Plaxis programında üç boyutlu olarak modellenmiştir. İlk olarak makalede belirlenen zemin parametrelerinin ortalama değerleri ile zemin tabakaları modellenmiştir ve bu değerlere bağ hesaplanan kazık kapasiteleri ile kazık modellemesi yapılmıştır. SNIP şartnamesine göre kazıklar için hesaplanan kapasite değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Buna ilaveten her tabakada oluşacak birim sürtünme kuvvetleri de tabloya eklenmiştir.

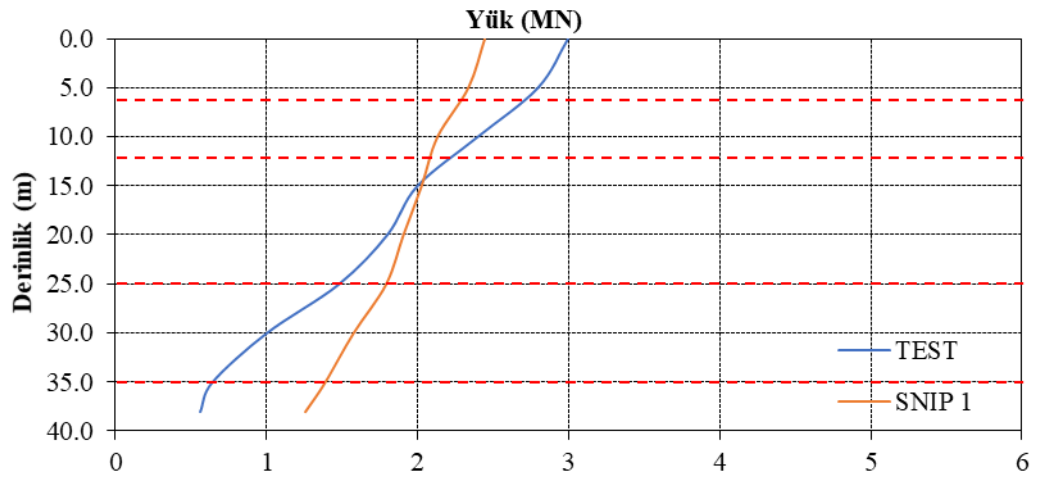
**Tablo 4.10:** SNIP şartnamesi ile hesaplanan kazık kapasiteleri.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	211.1	6	35.2
A2	282.9	6	47.1
B	454.8	13	35.0
C	512.7	10	51.3
D	162.9	3	54.3
$Q_{s\_toplam}$	1624.4		
$Q_{uç}$	1256.6		
$Q_{toplam}$	2881.0		

Yapılan hesaplamalara göre SNIP şartnamesindeki yöntemle göre kazığın sürtünme kuvveti  $Q_s=1624$  kN, uç kuvveti ise  $Q_{uç}=1256.6$  kN olarak hesaplanmıştır. Buna göre toplam kazık kapasitesi  $Q_{toplam}=2881$  kN olmaktadır. Arazi deneyine göre kazık 5,5 MN a kadar yüklenmektedir. SNIP şartnamesiyle hesaplanan kazık kapasitesi arazideki kapasitenin altında kalmaktadır. SNIP şartnamesine göre yapılan analizde zemin tabakaları makalede belirtilen ortalama değerlerle modellenmiş, kazık kapasiteleri de yukarıda verilen sürtünme ve uç kapasiteleriyle modellenmiştir. Bu durumun neticesinde Plaxis 3D analizinde de sistem 3 MN yükleme adımına kadar çözüm sağlayabilmiştir. 3 MN yük mertebesinde oluşan normal kuvvet ve deplasman grafikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir. 3 MN yük mertebesinde sonlanan analiz, yükleme deneyinde 3 MN mertebesindeki yük-derinlik değişimiyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.37). Şekil 4.36'da kazık üzerinde 3 MN yüklemesinde mobilize olan kuvvetler görülmektedir.

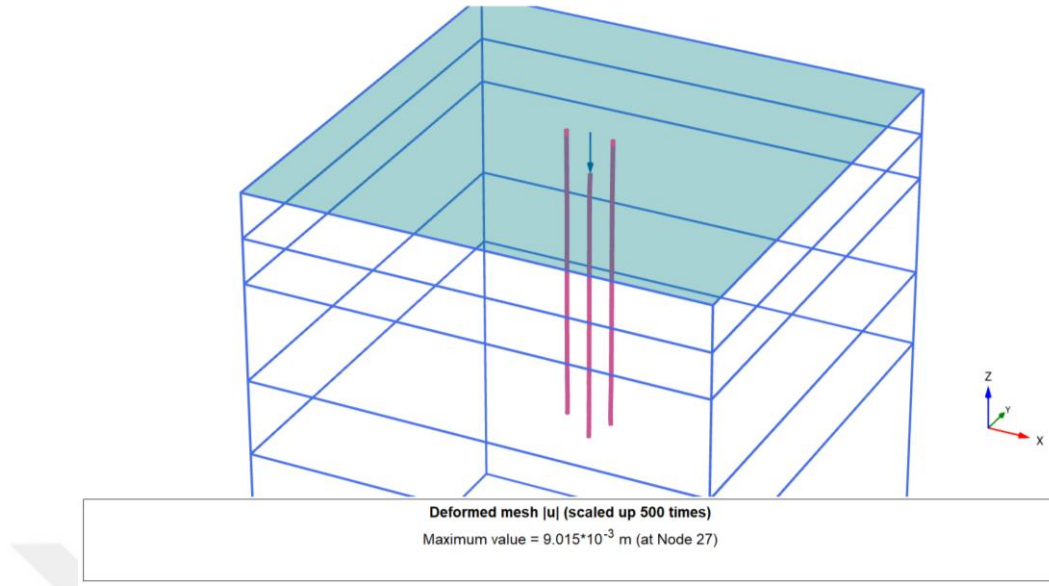


Şekil 4.36: SNIP analiz-1 normal kuvvet grafiği.

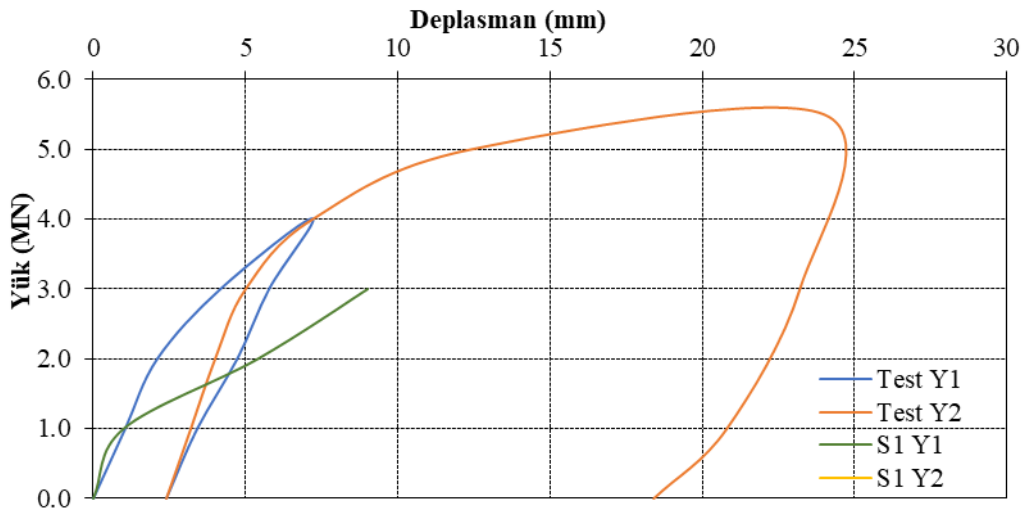


Şekil 4.37: SNIP analiz-1 yük derinlik grafiği.

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 3 MN yüklemesinde yükleme deneyinde mobilize olan uç direncinden daha yüksek bir uç direnci mobilize olmuştur. Bu da kazık tasarımında belirlenen  $Q_{uç}=1256.6$  kN değerindeki uç kapasitesinin göçme anında kazık üzerinde tamamen mobilize olduğunu göstermektedir. Kazık kapasitesi yetersiz olması nedeniyle, kazık yüzeyinde toplam kuvvet mobilize olmamış ve kazık göçmeye uğramıştır.



Şekil 4.38: SNIP analiz-1 deplasman grafiği.



Şekil 4.39: SNIP analiz-1 yük deplasman grafiği.

SNIP şartnamesine göre hesaplanan kazık kapasitesi değerleri 3 MN mertebesinin altında olduğu için modellerde 1. Yükleme tamamlanamamıştır. SNIP şartnamesinde kazık kapasiteleri genel olarak zeminlerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu da mukavemet değerleri ile ilgili farklı varyasyonlar denemeyi engellemektedir. SNIP şartnamesinde arazi deneylerine yakınsayacak farklı varyasyonlar denenmemiştir.

### 4.3.3. NAVFAC Şartnamesi Modeli

NAVFAC şartnamesine göre kazık kapasitesinin hesaplanma yöntemi ilgili bölümde açıklanmıştır. Arazide gerçekleştirilen kazık yükleme deneyi, Plaxis 3D yazılımında modellenirken kazık parametreleri NAVFAC şartnamesinde belirtilen metot ile belirlenmiştir.

Yapılan analiz sonuçları test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve test sonuçlarına yakınsayabilmek için model parametrelerinde değişik kombinasyonlar uygulanmıştır.

İlk olarak makalede belirlenen zemin parametrelerinin ortalama değerleri ile zemin tabakaları modellenmiş ve bu değerlere bağlı hesaplanan kazık kapasiteleri ile kazık modellemesi yapılmıştır. NAVFAC şartnamesine göre kazıklar için hesaplanan kapasite değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Buna ilave olarak her tabakada oluşacak birim sürtünme kuvvetleri de tabloya eklenmiştir.

**Tablo 4.11:** NAVFAC şartnamesi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	131.2	6	21.9
A2	468.5	6	78.1
B	800.5	13	61.6
C	1244.1	10	124.4
D	432.8	3	144.3
$Q_{s\_topl\text{am}}$	3077.0		
$Q_{u\text{ç}}$	633.3		
$Q_{\text{topl\text{am}}}$	3710.3		

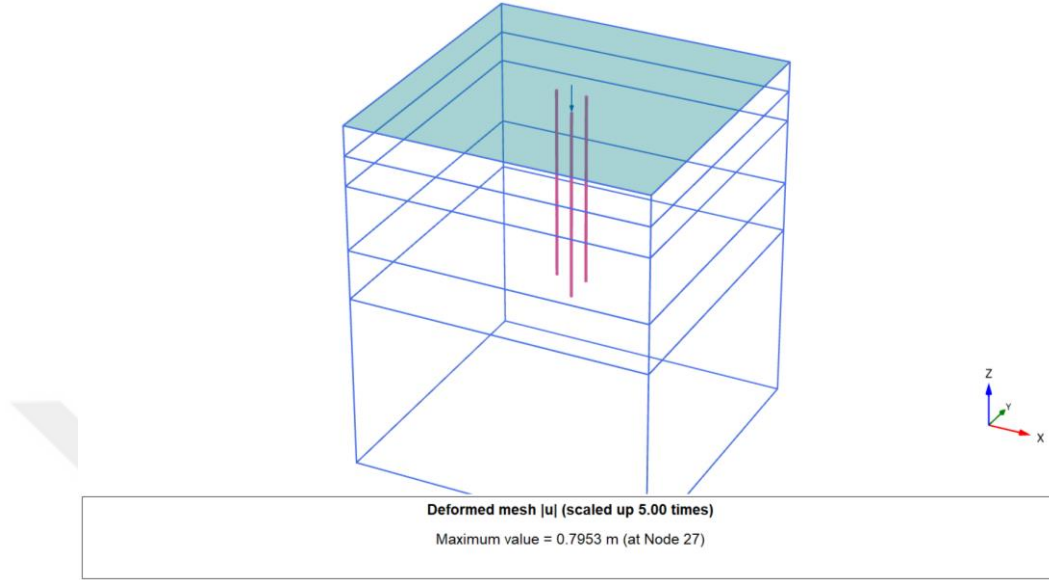
Yapılan hesaplamalara göre NAVFAC yöntemine göre kazık üzerinde oluşması beklenen toplam sürtünme kuvveti  $Q_s=3077,0\text{kN}$ , uç kuvveti ise  $Q_{u\text{ç}}=633,3\text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır. Toplam kazık kapasitesi ise  $Q_{\text{topl\text{am}}}=3710,3\text{ kN}$  mertebesinde olmaktadır.

Arazi deneyine göre kazık 5,5 MN a kadar yüklenmektedir. NAVFAC şartnamesine göre hesaplanan kazık kapasitesi arazide ulaşılan kapasitenin altında kalmaktadır. Bu durumun neticesinde Plaxis 3D modelinde belirlenen kazık kapasitesiyle yapılan analizde 5,5 MN mertebesine kadar ulaşamamıştır. Navfac şartnamesi Analiz-1 ortalama zemin değerlerine göre modellenen ve NAVFAC şartnamesinden elde edilen kazık kapasiteleri ile yapılmıştır. Analizde elde edilen yük-deplasman grafiği aşağıda görülmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere kazık 4 MN yüklemesinde göçmüş ve yaklaşık 79,0 mm mertebesinde bir deplasmana

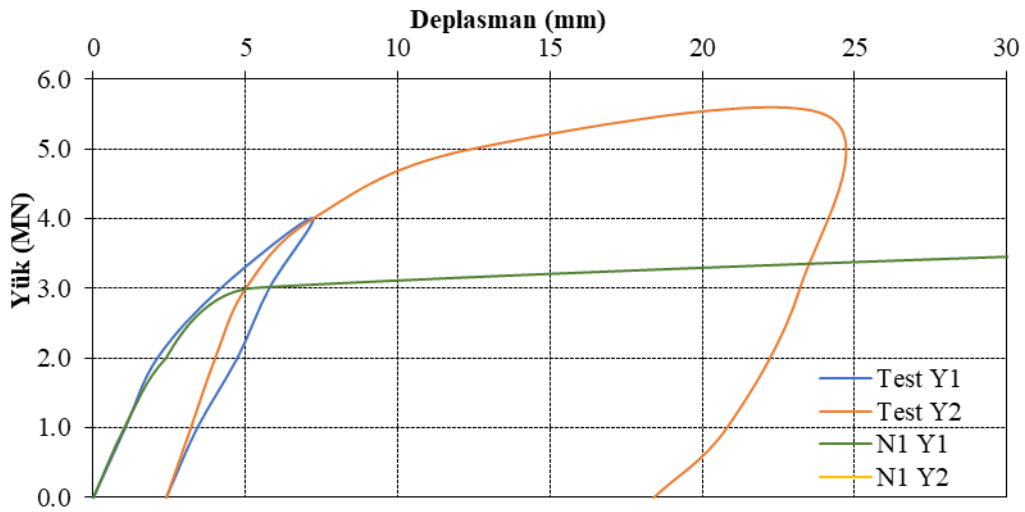




Analizde test kazığı ilk çevrimdeki 4 MN yüklemesinde göçmeye uğramıştır. Bu durum Şekil 4.43'de verilen yük-deplasman grafiğinde gözlemlenebilmektedir.

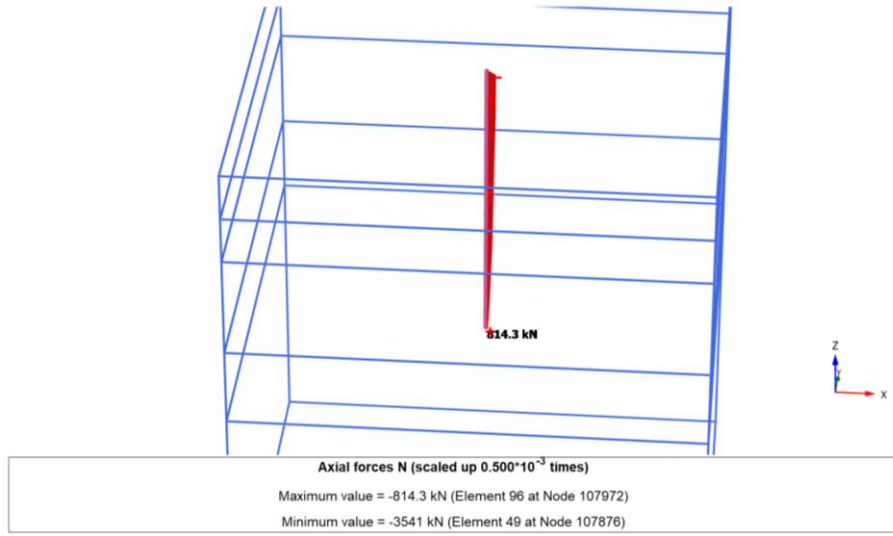


Şekil 4.42: NAVFAC analiz-1 deplasman grafiği.

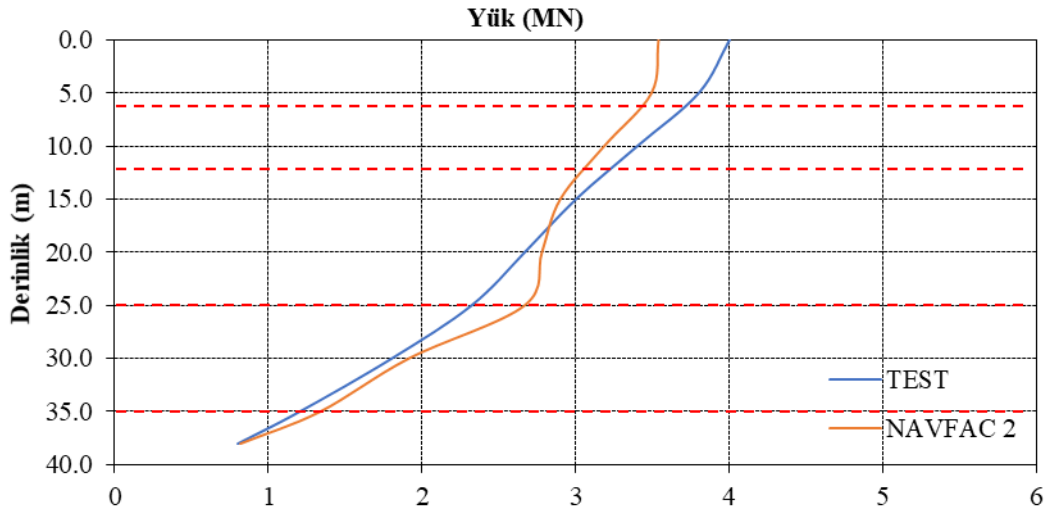


Şekil 4.43: NAVFAC analiz-1 yük deplasman grafiği.

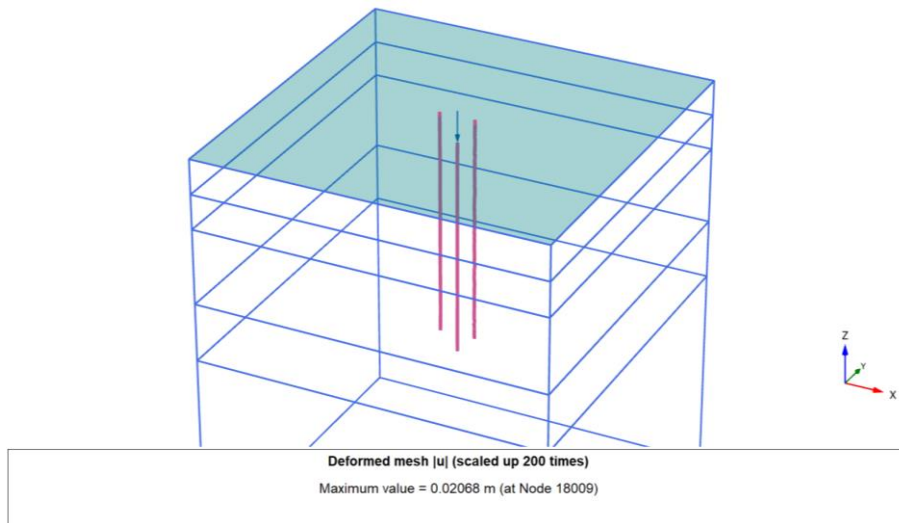
NAVFAC şartnamesine göre hesaplanan kazık kapasitesini arttırabilmek için D tabakasının drenajsız kohezyon değeri makalede belirtilen maksimum değer olan  $c_u=180$  kPa kabul edilerek kazık kapasitesi tekrar hesaplanmıştır. Toplam kapasite  $Q_{\text{toplam}}=4000$  kN ulaşmakla birlikte analiz ilk yükleme çevriminde 4 MN mertebesinde sonlanmıştır. Yük deplasman grafiği aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



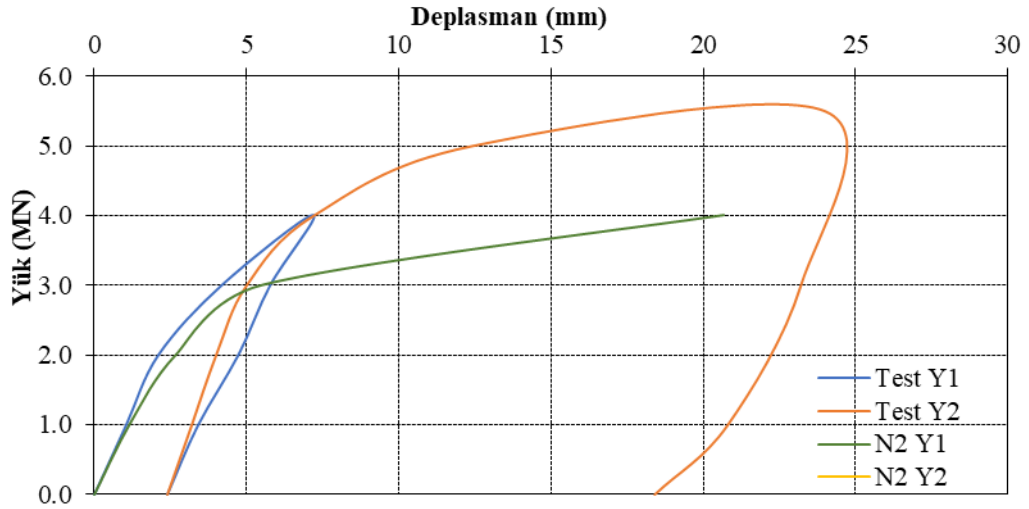
Şekil 4.44: NAVFAC analiz-2 normal kuvvet grafiği.



Şekil 4.45: NAVFAC analiz-2 yük derinlik grafiği.

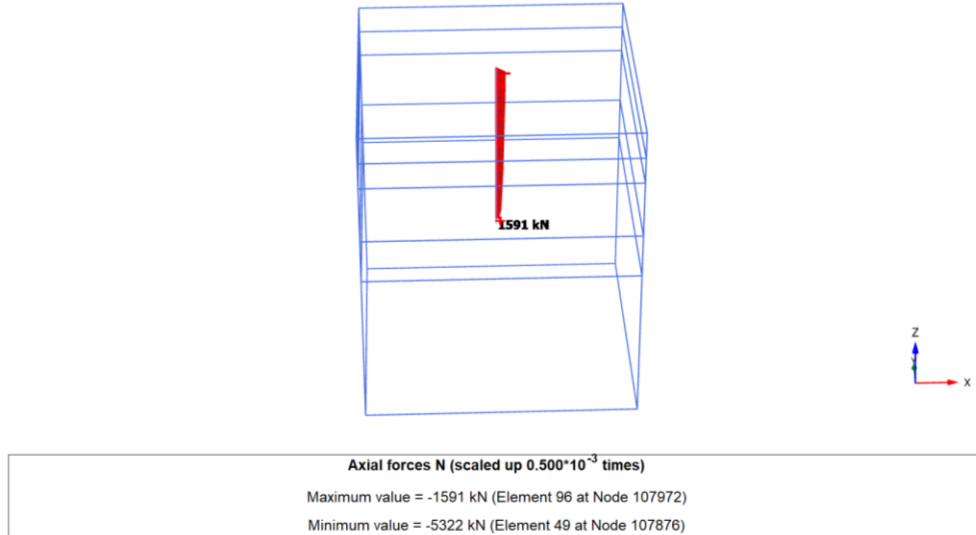


Şekil 4.46: NAVFAC analiz-2 deplasman grafiği.

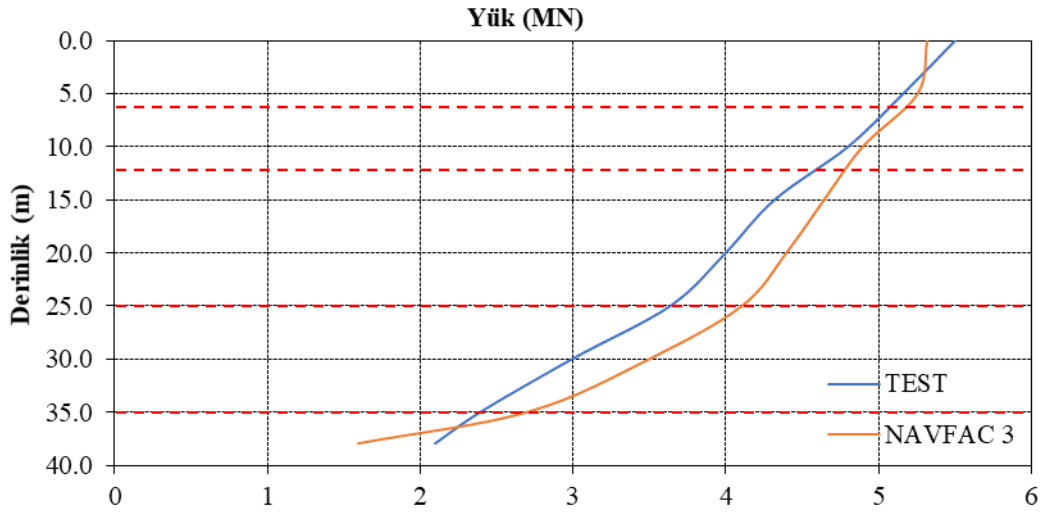


**Şekil 4.47:** NAVFAC analiz-2 yük deplasman grafiği.

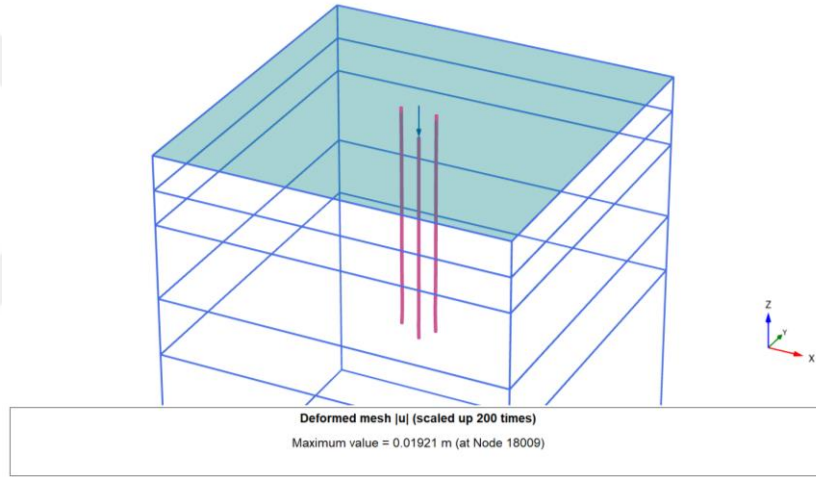
Şartnameye göre hesaplanan kapasite değerlerinin üzerinde farklı bir varyasyon olarak D tabakasının kohezyon değeri CPT deneyinden tekrar hesaplandı ve  $c_u=450$  kN olarak model tekrar analiz edildi. Sürtünme kapasitesi  $Q_s=4035$  kN ve uç kapasitesi  $Q_{uç}=2035,7$  kN olmak üzere toplam kapasite  $Q_{toplam}=6071$  kN olarak hesaplandı. Analizdeki tüm yükleme değerleri tamamlandı. Oluşan yük deplasman ve yük derinlik grafikleri aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



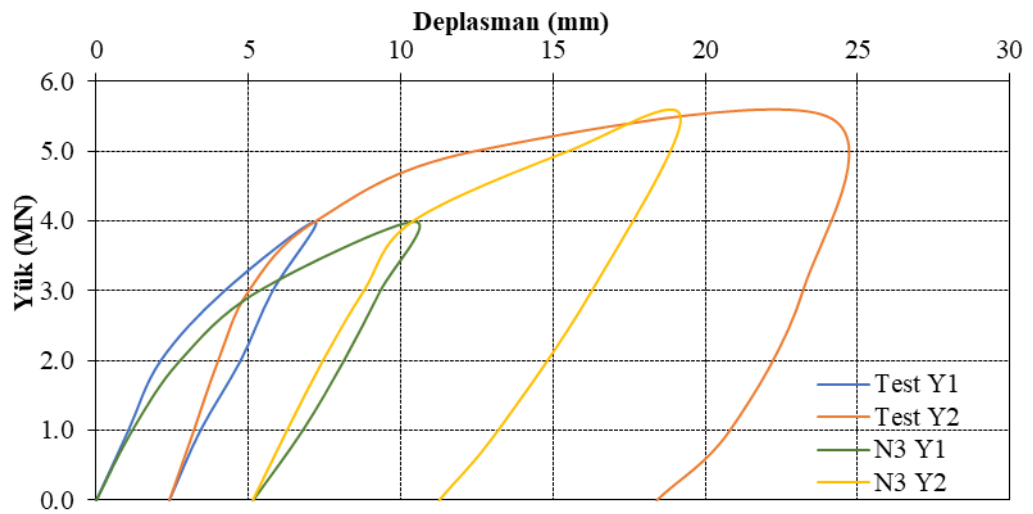
**Şekil 4.48:** NAVFAC analiz-3 normal kuvvet grafiği.



Şekil 4.49: NAVFAC analiz-3 yük derinlik grafiği.



Şekil 4.50: NAVFAC analiz-3 deplasman grafiği.



Şekil 4.51: NAVFAC analiz-3 yük deplasman grafiği.

Şekil 4.49' de görüldüğü üzere sürtünme değerleri testte elde edilen sonuçlarla yakın olmakla birlikte, testte elde edilen uç kapasitesi bu analizde mobilize olmamıştır. Ayrıca deplasman değerleri de arazi sonuçlarının aşağısında kalmaktadır.

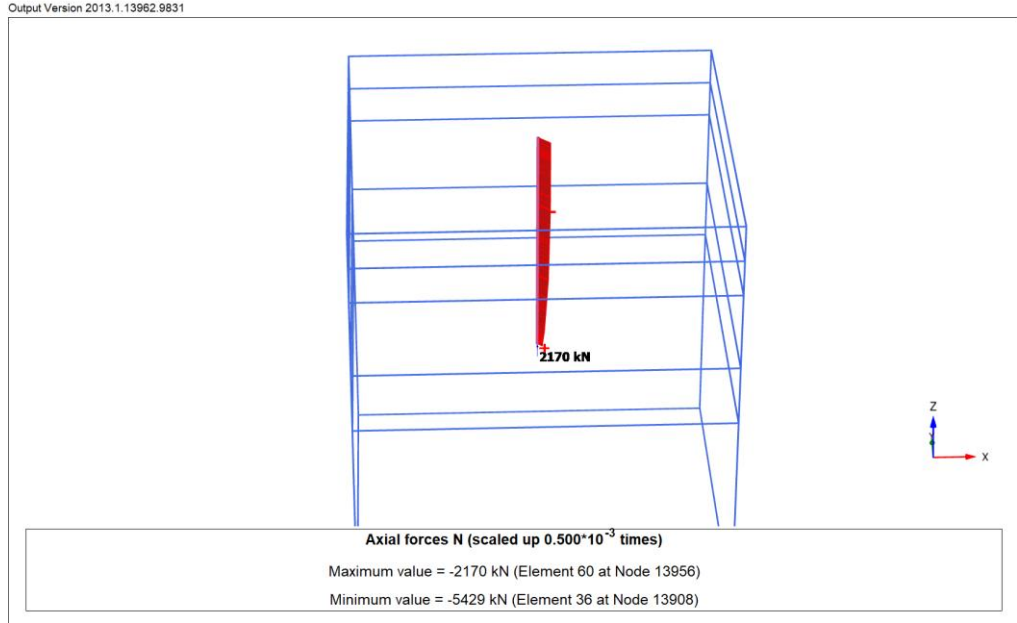
#### 4.3.4. SPT

Şartnamelere ilave olarak kazık kapasiteleri SPT deney sonuçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Makalede tabakalar için verilen SPT deneylerine göre hesaplanan sürtünme ve uç kapasitesi değerleri Tablo 4.12'da verilmiştir.

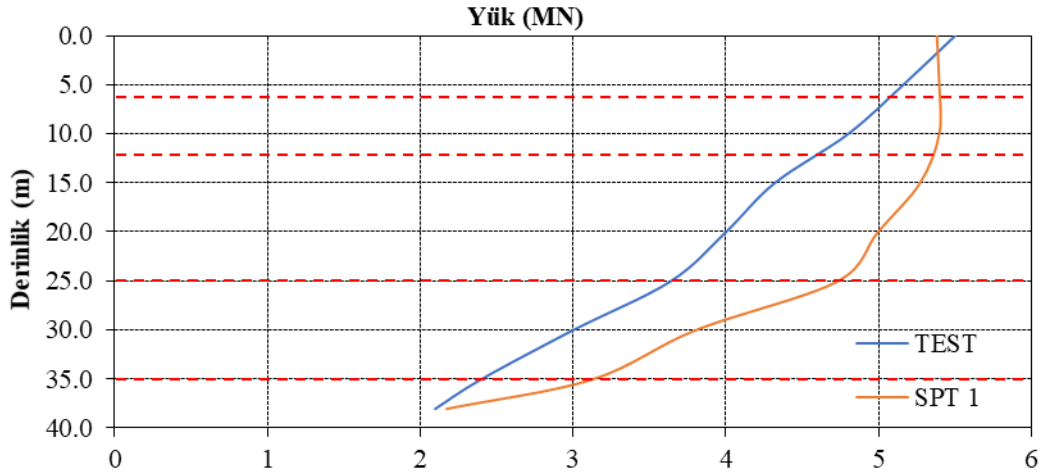
**Tablo 4.12:** SPT yöntemi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	60.3	6	10.1
A2	60.3	6	10.1
B	862.6	13	66.4
C	1741.7	10	174.2
D	995.3	3	331.8
$Q_{s\_toplam}$	3720.1		
$Q_{uç}$	3015.1		
$Q_{toplam}$	6736.1		

Buna göre kazık üzerindeki toplam sürtünme değeri  $Q_s=3720$  kN uç değeri ise  $Q_t=3015$  kN mertebesindedir. Toplam kazık kapasitesi ise  $Q_{toplam}=6736$  kN hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında elde edilen yük deplasman ve yük derinlik grafikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

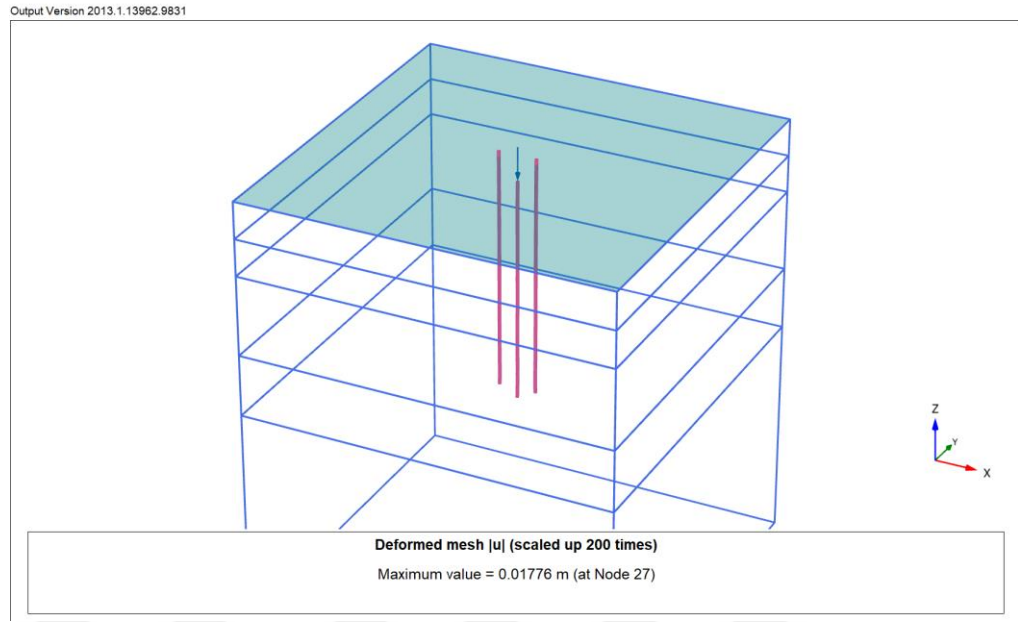


Şekil 4.52: SPT analiz-1 normal kuvvet grafiği.

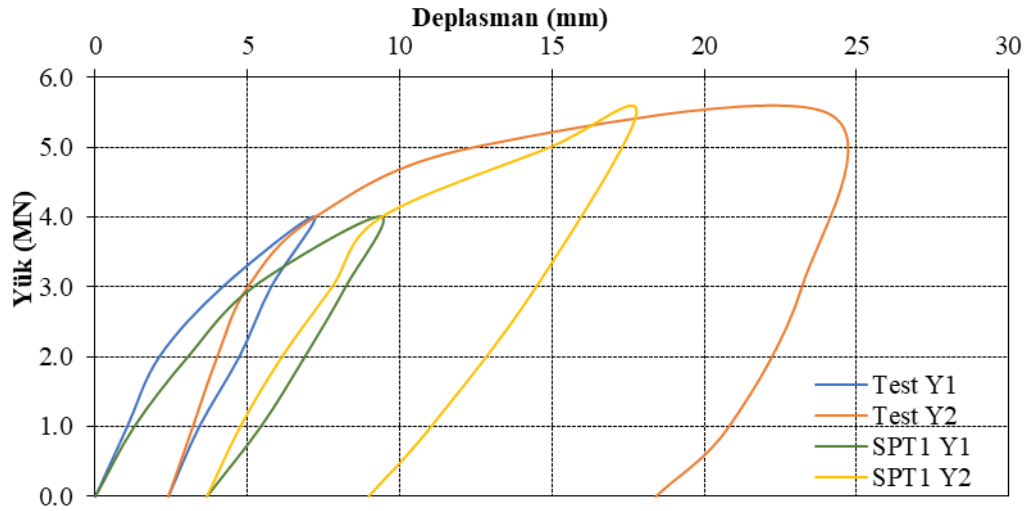


Şekil 4.53: SPT analiz-1 yük derinlik grafiği.

SPT analiz-1 sonuçlarına göre arazi deneyinde mobilize olduğu gözlenen uç kapasitesinin, analiz sonucunda da mobilize olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kazık üzerinde zemin tabakalarına göre oluşan sürtünme değerlerinde arazi deneyine göre farklılıklar gözlemlenmektedir.



Şekil 4.54: SPT analiz-1 deplasman grafiği.



Şekil 4.55: SPT analiz-1 yük deplasman grafiği.

SPT sonuçlarına göre yapılan analizde elde edilen deplasmanların arazi deneyinin altında kaldığı gözlemlenmektedir.

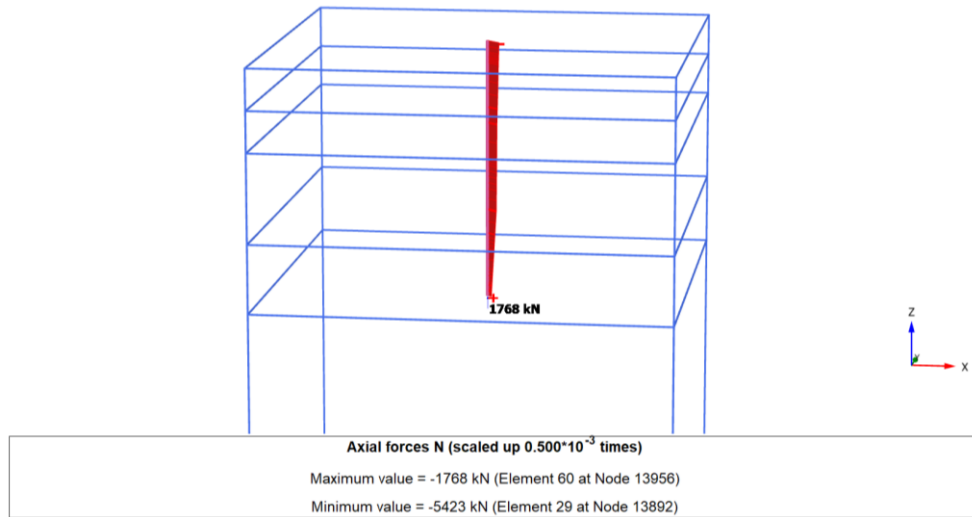
#### 4.3.5. CPT

Şartnamelere ilave olarak kazık kapasiteleri CPT deney sonuçlarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Makalede tabakalar için verilen CPT deneylerine göre hesaplanan sürtünme ve uç kapasitesi değerler Tablo 4.13'de verilmiştir.

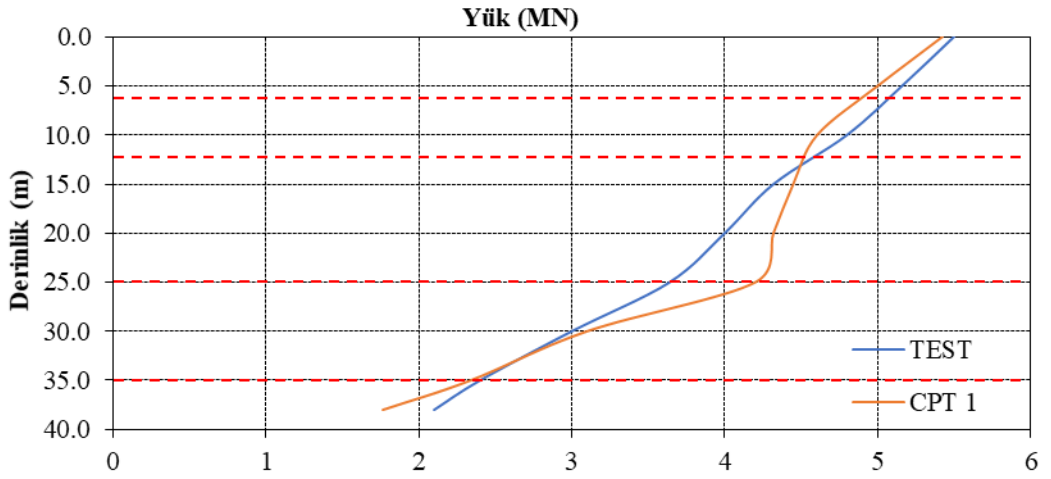
**Tablo 4.13:** CPT yöntemi ve zeminin ortalama değerleriyle hesaplanan kapasiteler.

Zemin Tabakaları	Tabakada oluşan toplam kuvvet (kN)	Tabaka Kalınlığı (m)	Tabakada oluşan birim sürtünme kuvveti (kN/m)
A1	502.7	6	83.8
A2	527.8	6	88.0
B	490.1	13	37.7
C	2010.6	10	201.1
D	603.2	3	201.1
$Q_{s\_toplaml}$	4134.3		
$Q_{uç}$	4523.9		
$Q_{toplaml}$	8658.2		

Buna göre kazık üzerindeki toplam sürtünme değeri  $Q_s=4134.3$  kN uç değeri ise  $Q_{uç}=4523.9$  kN mertebesindedir. Toplam kazık kapasitesi ise  $Q_{nihai}=8658.2$  kN hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında elde edilen yük deplasman ve yük derinlik grafikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

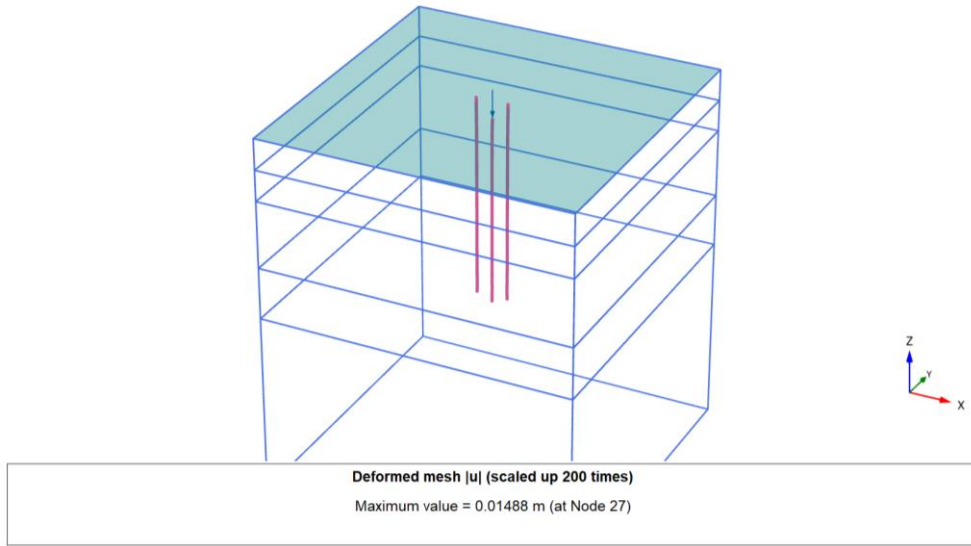
**Şekil 4.56:** CPT analiz-1 normal kuvvet grafiği.



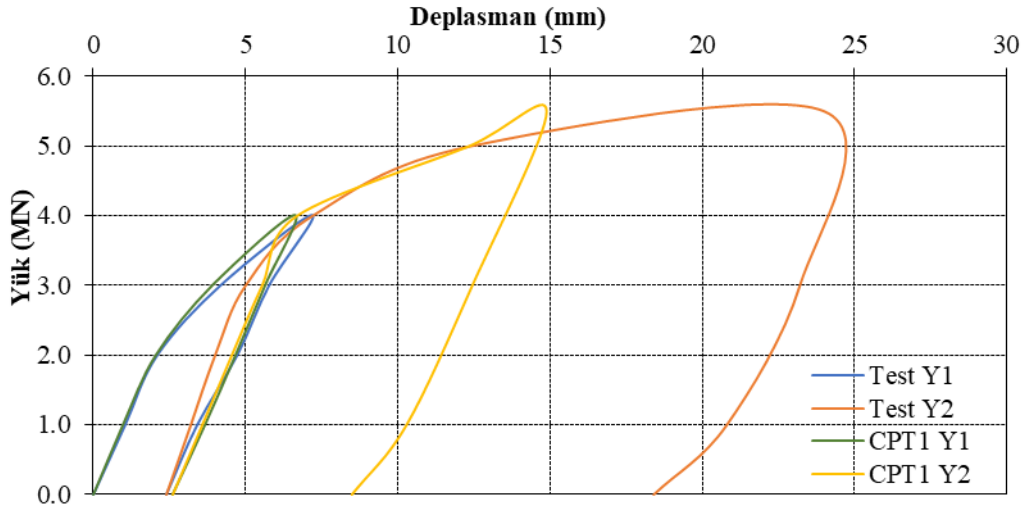


Şekil 4.57: CPT analiz-1 yük-derinlik grafiği.

CPT analizlerinde kazık üzerinde mobilize olan sürtünme kuvvetleri arazi deneyi ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte uç kuvveti tam olarak mobilize olmamıştır.



Şekil 4.58: CPT analiz-1 deplasman grafiği.



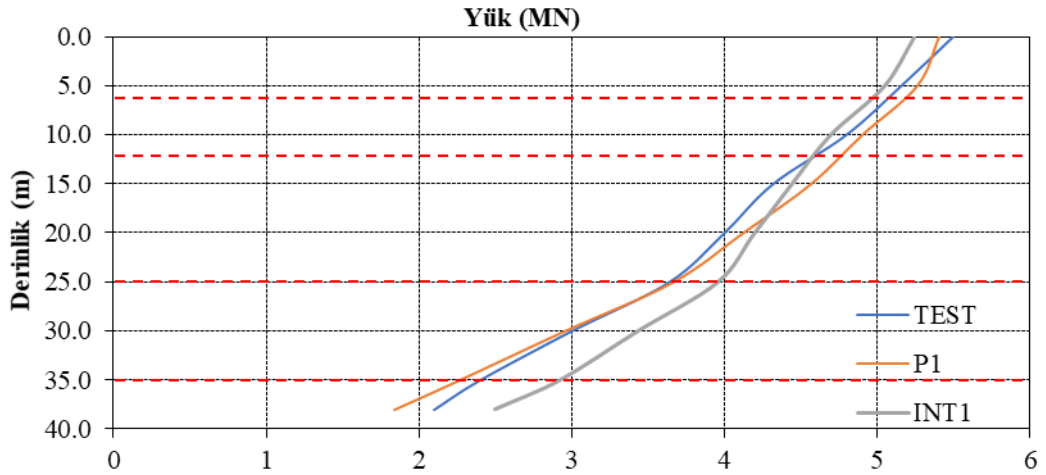
Şekil 4.59: CPT analiz-1 yük deplasman grafiği.

CPT değerlerine göre gerçekleştirilen analizde, ilk yükleme çevriminde elde edilen deplasmanlar arazi deneyiyle örtüşmekle birlikte maksimum yükleme değerinde arazide oluşan deplasmanlara ulaşamamıştır.

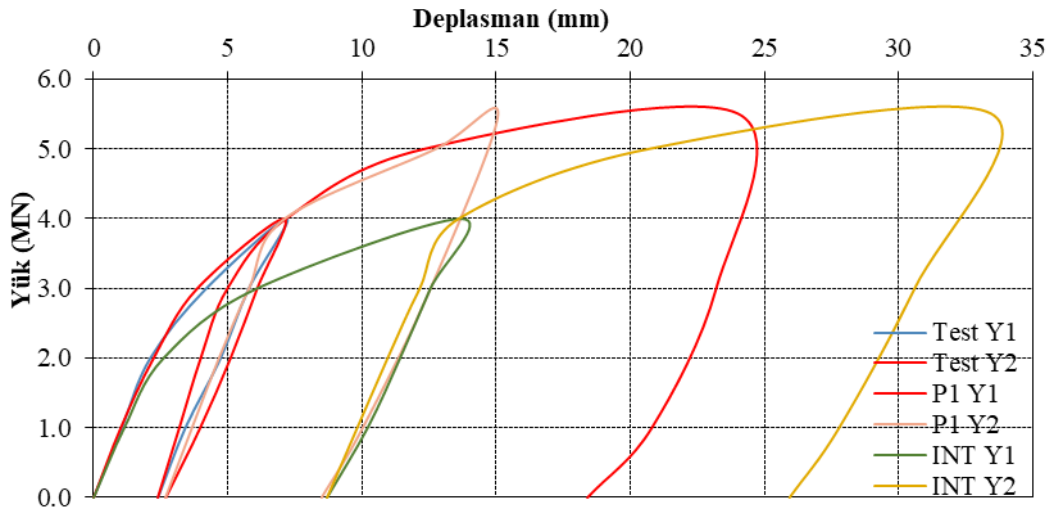
#### 4.3.6. PLAXIS

Plaxis 3D programında kazık elemanları gömülü kazık olarak modellenirken sürtünme kapasitesinin yazılım tarafından mukavemet parametrelerine bağlı olarak hesaplandığı “layer dependent” tercihi bulunmaktadır. Bu seçenekte plaxis önceki bölümlerde anlatıldığı gibi kazık kapasitesini zemin parametrelerine bağlı olarak hesaplar ve analiz eder. Makaledeki test modeli bu yol vasıtasıyla plaxis programında modellenmiş ve sonuçları test sonuçlarına yakınsamak amacıyla farklı kombinasyonlar denenmiştir.

Analiz-1 modelinde zemin tabakaları makaledeki ortalama değerlerle modellenmiş, kazık kapasitesi de layer dependent modellenmiştir. Buna karşılık modelde sürtünme ( $T_{max}$ ) ve uç kapasitesi ( $F_{max}$ ) olmak üzere modelde kazık kapasitesinin sınırlandırılması gerekmektedir. İlk modelde  $T_{max}=150$  kN/m ve  $F_{max}=2500$  kN olarak modellenmiştir. Bu model makalede hesaplanan arayüz değerleri ile de modellenmiştir. Karşılaştırmalı analiz sonuçları aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



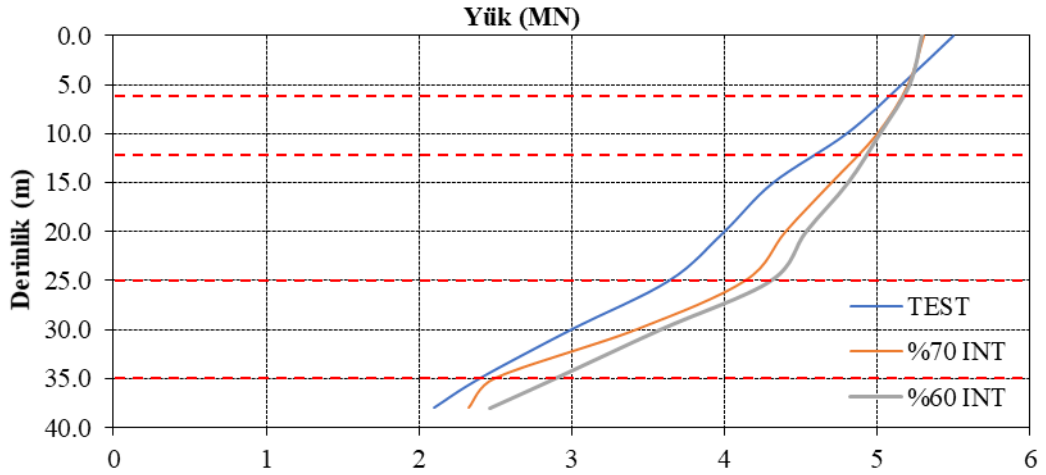
Şekil 4.60: Plaxis analiz-1 yük derinlik grafiği.



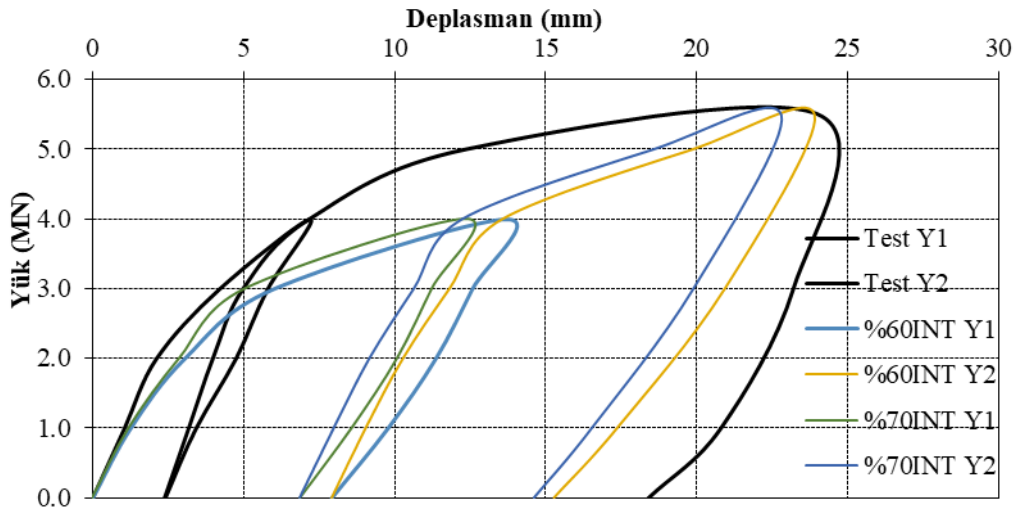
Şekil 4.61: Plaxis analiz-1 yük deplasman grafiği.

Grafikte görüldüğü üzere arayüz etkisi olmadan yapılan analizde arazideki deplasmanlara göre düşük deplasmanlar elde edilmiştir. Makalede hesaplanmış olan arayüz değerleri kullanıldığında ise arazide elde edilenden daha yüksek deplasman elde edilmiştir. Arayüz etkili analizlerde kazık üzerindeki deplasman daha yüksek olduğundan, daha yüksek uç kuvveti mobilize olduğu görülmektedir.

Bu nedenle arayüz etkisini incelemek amacıyla analizler tüm tabakalara etkiyen %70 ve %60 mertebesinde arayüz faktörleri ile tekrar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.62: Plaxis arayüz analizleri yük derinlik grafiği.



Şekil 4.63: Plaxis arayüz analizleri yük deplasman grafiği.

Yük deplasman grafiğinde görüldüğü üzere %60 arayüz değeri ile deplasmanlar arazide elde edilen değerlere yakınsamaktadır. Kazıktaki deplasman arttıkça uç kuvvetinin mobilize olma durumu arttığı için yük derinlik grafiğine %60 Arayüz değeri için daha fazla uç kuvveti elde edilmiştir. Gözlemlenen ufak farklılıklara rağmen, Plaxis “layer dependent” modeli için arazi deneylerine en yakınsayan model olduğu söylenebilmektedir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma kapsamında arazide Comodromos ve diğ. (2009) tarafından gerçekleştirilmiş kazık yükleme deneyinde kullanılan L=38 m boyunda d=80 cm çaplı fore kazığın taşıma kapasitesi farklı yöntemlerle irdelenmiştir. Kazık imalatı yapılan zemin tabakaları üstte 12 m kalınlığında granüler birim, altta ise kil birimlerden oluşmaktadır.

AASHTO, LRFD, SNIP, NAVFAC şartnameleri ve SPT, CPT arazi deneylerine göre belirlenen analitik yöntemlerle kazık kapasiteleri analitik olarak hesaplanmıştır. Her bir yöntemle göre belirlenen sürtünme kapasitesi, uç kapasitesi değerleri aşağıdaki tabloda verildiği gibidir. Ayrıca arazi deneyindeki maksimum yüklemde kazık üzerinde mobilize olan sürtünme ve uç kuvvetleri de tabloya eklenmiştir.

**Tablo 5.1:** Analitik yöntemlerle hesaplanan kazık sürtünme ve uç kapasitesi değerleri [kN].

	Test	SNIP	NAVFAC	AASHTO	LRFD	SPT	CPT
A1	412.0	211.1	131.2	407.2	286.7	60.3	502.7
A2	480.0	282.9	468.5	1492.9	531.9	60.3	527.8
B	942.0	454.8	800.5	449.2	449.2	862.6	490.1
C	1240.0	512.7	1244.1	1520.5	1520.5	1741.7	2010.6
D	300.0	162.9	432.8	580.6	580.6	995.3	603.2
$Q_{s\_nihai}$	3374.0	1624.4	3077.0	4450.4	3369	3720.1	4134.3
$Q_{uç}$	2100.0	1256.6	633.3	633.3	633.3	3015.9	4523.9
$Q_{nihai}$	5474.0	2881.0	3710.3	5083.7	4002	6736.1	8658.2
$Q_s / Q_{nihai}$	%63	%57	%83	%88	%84	%56	%47
$Q_{uç} / Q_{nihai}$	%37	%43	%17	%12	%16	%54	%53

Tabloda da görüldüğü üzere yapılan analitik hesaplamalarda aynı geometrik ve zemin özelliklerinde belirlenen kazık kapasiteleri içerisinde en düşük kapasite SNIP şartnamesine göre hesaplanmıştır. Şartnameler içerisinde en yüksek kazık kapasitesi AASHTO şartnamesi ile elde edilmiştir. SPT ve CPT deney sonuçlarına bağlı ampirik yöntemlerle hesaplanan kapasiteler ise diğer hesaplamalardan ve arazideki yükleme değerinden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Şartnamelere göre hesaplanan kazık kapasitelerinin arazi deneyinin altında kalmasının tasarımda güvenli tarafta sonuç verdiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Kazık kapasiteleri ile ilgili sürtünme ve uç kapasitelerinin oranı incelendiğinde NAVFAC, AASHTO ve LRFD şartnamelerinde toplam kazık kapasitesinin %80 inden fazlası kazık çevre sürtünmesinde mobilize olmaktadır. Kazık ucunda hesaplanan direnç ise toplam kapasitenin %12-17'si arasında kalmıştır. Hesaplanan bu değerlerin arazi deneyinde ölçülen uç kapasitesinin (2100 kN) altında kalması nedeniyle, bu yöntemlerde kazık uç kapasitesinin gerçeğe göre daha düşük hesaplandığı düşünülmektedir. Referans alınan modelde uç tabakasının KİL birimlerden oluşması da bu duruma sebep olmaktadır. İlgili yöntemlerde kil birimlerin mukavemetine uygulanan azaltma faktörleri kapasitenin düşük hesaplanmasına yol açmaktadır.

Ayrıca yöntemlerden farklı olarak belirlenen zemin parametreleri de kazık kapasitesi üzerinde etkili olmaktadır. Arazi deney verilerinde uç tabakasının kohezyon değerleri CPT değerine bağlı olarak hesaplandığında ve bu değer kazık kapasitesi hesabında kullanıldığında, NAVFAC, AASHTO ve LRFD yöntemlerinde kazık kapasitesinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu da zemin parametrelerinin belirlenmesinin önemine ışık tutmaktadır.

Diğer şartnamelerden farklı olarak SNIP şartnamesinde kazığın taşıma kapasitesi kohezyonlu birimlerde likitlik indeksi ( $I_L$ ), granüler birimlerde ise sıklık ve dane boyutuna bağlı olarak hesaplanmaktadır (Sağlamer ve diğ., 2017). Bu durum mukavemet parametrelerinin kazık kapasitesi üzerindeki etkisini azaltmaktadır.

Farklı yöntemlerle elde edilen kazık kapasitesi değerleri, Plaxis 3D yazılımında üç boyutlu modellenen kazık yükleme deneyi üzerinde analiz edilmiştir. Her bir yöntemden elde edilen kazık sürtünme kapasitesi ve uç kapasitesi değerleri Plaxis 3D modelinde gömülü kazık elemanı üzerinde mobilize olması beklenen sürtünme ve uç dirençleri olarak yazılıma modellenmiştir. Arazi deneylerine yakınsamak amacıyla da zemin parametrelerinde ve kazık kapasitelerinde farklı varyasyonlar denenmiştir.

AASHTO şartnamesine göre ortalama zemin parametrelerine göre kazık kapasitesi hesaplandığında, kazık kapasitesinin yükleme yapılacak değerlerin altında kaldığı görülmüştür ve analiz sonuçlanmamıştır. Uç kapasitesini arttırmak için D tabakasının kohezyonu makaledeki maksimum değer alındığında ise kapasite analizin tamamlanması için yeterli olmuştur. Bu analizde kazık üzerinde mobilize olan yükler elde edilememiştir fakat deplasman grafiğinde deney sonuçlarına yakın veriler elde edilmiştir. Kazığın uç kapasitesinin

arttırılabilmesi için D tabakasının kohezyonu CPT değeri ile hesaplanmış ve analiz tekrarlanmıştır. Bu analiz sonucuna kazık üzerindeki sürtünme kuvveti yenilip, beklenen uç kuvvetinin mobilize olması sağlanamamıştır ve yine aynı sebeple arazide elde edilen deplasman değerlerine ulaşamamıştır.

LRFD şartnamesine göre hesaplanan kazık kapasiteleri, ortalama ve maksimum zemin parametreleriyle ayrı ayrı hesaplandığında, arazide yüklenen değer altında kalmıştır ve analizler sonuçlanmamıştır. Uç tabakanın kohezyon değerleri CPT verilerine göre hesaplandığında ise elde edilen kapasite ile analiz sonlanmıştır. Bu analizde beklenen uç kapasitesi mobilize olmamıştır, deplasman değerleri ise arazi deneylerinin yaklaşık %20 mertebesinde aşağıda kalmıştır.

SNIP şartnamesinde mevcut zemin parametreleri ile toplam kazık kapasitesi çok düşük olduğu için analizler sonlanamamıştır. SNIP şartnamesinde kazık kapasiteleri genel olarak fiziksel parametrelere bağlı belirlendiği için mukavemet parametreleri ile ilgili yapılan değerlendirmeler SNIP şartnamesi için uygulanmamıştır.

NAVFAC şartnamesinde zeminin ortalama ve maksimum değerleriyle yapılan hesaplamalarda kazık kapasitesi deney yükünün altında kalmış ve analizler sonuçlanamamıştır. CPT ye bağlı hesaplanan kazık kapasitesinde ise analiz çevrimi tamamlanmıştır. Bu analizde kazık üzerindeki sürtünme değerleri deney sonuçlarına yakın olmakla birlikte, deneyde elde edilen uç kapasitesi değeri modelde mobilize olmamıştır. Deplasman grafiği de yine arazi deneyinin altında kalmıştır.

AASHTO, LRFD, NAVFAC için hazırlanan modellerde “arayüz” elemanları kullanılarak da analizler gerçekleştirilmiş fakat sonuçlarda dikkate değer farklılıklar gözlemlenmemiştir.

SPT ve CPT yöntemleriyle hesaplanan kazık kapasiteleri, yükleme değerinin üzerinde elde edilmiştir. SPT analizinde kazık üzerindeki uç kuvveti arazi deneyine benzer mobilize olmuştur fakat arazide elde edilen deplasmanlara ulaşamamıştır. CPT analizinde ise yük-derinlik değerleri arazi deneyine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bununla birlikte deplasmanlar arazi deneylerinin altında kalmıştır.

Sayısal olarak hesaplanan kazık kapasiteleri her bir tabaka için farklı değerlere sahiptir ve yapılan analitik analizlerle de genel farklılıklar göstermektedir. Analizi yapılan farklı

varyasyonlarda, uç kapasitesinin, kabul edilen zemin parametrelerinin analizler üzerinde çok etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Sayısal olarak yapılan hesapların yanında aynı analiz modeli Plaxis 3D yazılımında “layer dependent” kazık modeli ile tekrar modellenmiştir. Yapılan modellerde genel olarak arazide elde edilen yük-derinlik grafiğine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen deplasmanlarda ise kazık-zemin ilişkisine etkisi olan arayüz elemanının büyük ölçüde etkisi olduğu gözlemlenmiştir ve arazi deneylerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Aynı analiz modeli referans çalışmada elde edilen sürtünme ve uç kuvvetleriyle tekrar modellenmiştir. Yapılan modelde yük-derinlik değerlerinde arazide elde edilen değerlere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deplasman değerleri ise arayüz etkisi ve zeminin elastisite modülü farklı varyasyonlarla analiz edildiğinde, arazi deneylerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan analitik hesaplamalar ve üç boyutlu analizler değerlendirildiğinde, analitik hesaplamalarda şartnamelerde belirtilen yöntemler kullanıldığında genel olarak arazi deneyinde ulaşılan kazık kapasitesinin altında kaldığı ve bu yöntemlerin tasarımda güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durumdaki etkenlerin ise belirlenen zemin parametreleri ve şartnamelerde önerilen zemin ve kazık arasındaki ilişkiyi hesaba katan katsayılar olduğu söylenebilir. Bunun yanında SPT ve CPT gibi zemin araştırmalarında kullanılan arazi deneyleri sonuçlarına bağlı ampirik yöntemler ile kazık kapasitesi hesaplandığında arazi deneyinde elde edilen kapasitenin üzerinde sonuç elde edilmektedir. Bu durum ampirik yöntemlerin daha yüzeysel olarak ele alınması ve şartnamelerdeki azaltma faktörleri gibi faktörlerin etkin olmaması nedeniyle oluşmaktadır.

Plaxis 3D analizleri analitik hesaplarla elde edilen kapasitelere göre gerçekleştirilmiştir, bu sayede arazi deneyinden elde edilen yük-derinlik ve yük-deplasman sonuçlarıyla karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Şartnamelere göre hesaplanan kapasitelerin yükleme deneyi kapasitesinin altında kalması analizlerden sonuç alınamamasına yol açmış, zemin parametrelerinde farklı varyasyonlar denendiğinde analizler sonuçlandırılabilmiştir. Özellikle şartnamelerde düşük hesaplanan kazık uç kapasitesi arttırıldığında analizler sonuçlanmış fakat kazık üzerinde farklı kademelerde mobilize olan yüklerin farklılığı nedeniyle arazi deneyine yakınsanamamıştır. Arazi deneyine en yakın sonuç AASHTO şartnamesine göre elde



edilmektedir. Bunun nedeni, arazide elde edilen sürtünme kapasitesinin bu yöntemde kazık üzerinde tam olarak mobilize olması olduğu söylenebilir. Yalnız arazi deneyine yakın sonuç elde edilmesi için zemin parametreleri varyasyonuyla kazık kapasitesini yükseltmek, kazık üzerindeki sürtünme kapasitesini arttırmış ve arazideki yk-derinlik grafiğine ulaşılamamasına neden olmuştur.



## KAYNAKLAR

- AASHTO (2007), Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- AASHTO LRFD (2014), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- ASTM D1143-07, (2007). Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, American Society for Testing And Materials, Philadelphia.
- Birand, A.,2001, *Kazıkların Taşıma Gücü*, Kazıklı Temeller, Kısım 3, Teknik Yayınevi, Ankara, ISBN: 975-8201-38-7, 43-61.
- Birand, A.,2001, *Kazık Yükleme Deneyleri*, Kazıklı Temeller, Kısım 4, Teknik Yayınevi, Ankara, ISBN: 975-8201-38-7, 91-106.
- Brinkgrave, R.B.J ve diğ., 2013, Plaxis 3D 2013 Manual.
- Çinicioğlu, F., 2005, Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı, İMO İtanbul Semineri, İstanbul.
- Comodromos, M. ve diğ.,2009, Pile Foundation Analysis and Design Using Experimental Data and 3-D Numerical Analysis, *Computers and Geotechnics*, 36, 819-836.
- Düzceer, R., (2002), *Kazık Yükleme Deneyleri ile Nihai Kazık Kapasitesinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma*, Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Engin, H.K., 2009, Investigation of Pile Behaviour Using Embedded Piles, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, IOS Press, 2009.
- Erol, O. Ve Çekinmez, Z.,2014, *Presiyometre Deneyi (PMT)*, Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri, Bölüm 3, Yüksel Proje Yayınları, Ankara, 159-196.
- FHWA-NHI-16-009, (2016). Design and Construction of Driven Pile Foundations- Volume I, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington.

- Lamani M. ve diğ.,2007, Zeminlerin Mekanik Davranışının Modellenmesi, XV. Ulusal Mekanik Kongresi, 03-07 Eylül, Isparta, 583-593.
- Majeed, A. Ve Haider, O., 2018, Simulation of Bearing Capacity of Bored Piles, Matec Web Conferences 162, 2018.
- Marjanovic, M., 2016, Modelling of Laterally Loaded Piles Using Embedded Beam Elements, 4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, 22 Nisan 2016 Subotica, 349-358.
- Navfac (1986),Naval Facilities Engineering Command Foundations & Earth Structures, Virginia.
- Sağlamer, A. Ve diğ., 2017, Rus-Amerikan-Avrupa Standartlarına Göre Hesaplanan Fore Kazık Taşıma Kapasitelerinin Saha Testlerinin Sonuçları İle Karşılaştırılması, 3rd International Soil-Structure Interaction Symposium, İzmir, 329-348.
- Schnaid, F. (2009), *Standard Penetration Test (SPT)*, In Situ Testing in Geomechanics, Bölüm 2, Taylor & Francis, New York, ISBN: 0-203-93133-5, 66.
- Schnaid, F. (2009), *Cone Penetration Test (CPT)*, In Situ Testing in Geomechanics, Bölüm 3, Taylor & Francis, New York, ISBN: 0-203-93133-5, 140.
- SNIP 2.02.03-85 (1999), SNIP National Codes & Standards of Russia, Moskova.
- Toğrol, E. Ve Tan, O., 2003, *Kazık Çeşitleri ve İmal Usulleri*, Kazıklı Temeller, Bölüm 3, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN:975-511-327-4, 21-25.
- TS EN 1536+A1, (2015), Özel Jeoteknik Uygulamalar- Delme Kazıklar (Fore Kazıklar), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TBDY, 2019, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Yıldırım, S., 2004, *Kazıklı emellerin Tasarımı*, Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Bölüm 5, Birsen Yayınevi, İstanbul, ISBN:975-511-293-6, 250.

## **EKLER**

EK-1 FORE KAZIK TASARIM HESAPLARI



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ayşen ÇIRAKOĞLU BİLGİÇ
Doğum Yeri	GAZİOSMANPAŞA
Doğum Tarihi	28.06.1989
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	+90 534 849 83 19
E-Posta Adresi	<a href="mailto:cirakogluaysen@gmail.com">cirakogluaysen@gmail.com</a>
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Teknik Üniversitesi
Fakülte	İnşaat Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	08.02.2012

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği

Makale ve Bildiriler	