

KAZIK YÜKLEME DENEYİ - YA SONRASI ? PERFORMANSA DAYALI KAZIK TASARIMI (PDK-T)

PILE LOADING TEST – FURTHER ? PERFORMANCE BASED PILE DESIGN

Orhan E. İNANIR¹, Müge İNANIR²

ÖZET

Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyleri ile kazık boyunca oluşan yük dağılımının belirlenmesi, Performansa Dayalı Kazık Tasarımına (PDK-T) imkan vermekte ve temel kazıklarının tasarımındaki belirsizlikleri asgari düzeye indirmektedir. Kazıklı temel tasarımı kapsamında kazık “kapasitesi” tesbiti, yükün kazık boyunca nasıl dağıldığını inceleyerek başlar ancak, çoğu zaman sadece taban ve shaft ayrımı belirtilerek hesap tamamlanır. Mevcut şartnamelerde “statik kazık hesabı” yaklaşımı çoğu kez temelin oturmasını göz ardı etmektedir. Ancak, kazığa tatbik edilen yük, kazığın deplasmanı ve zemin oturması bileşenleri kazığın yük dağılımı davranışını kontrol eden ayrılmaz unsurlardır. Enstrümante edilmiş eksenel statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) kazık davranışının değerlendirilmesini ve t-z/q-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasına ve “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin” oluşturulmasına imkan vermektedir. Bu sayede elde edilen etkileşim modeli “Geoteknik Modele” dönüştürülerek farklı kazı, su seviyesi değişimi vs durumları için kazık davranışının hesaplanmasına imkan vermektedir. Bu çalışma kapsamında, örnek bir enstrümante edilmiş statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) sonuçları Birleştirilmiş Kazık Tasarım Yaklaşımı (Unified design method) ile analiz edilerek “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin” oluşturulması aşamaları ve ilave kazı ve yeraltısuyu seviyesinin değişmesi durumunda kazık davranışının tekrar analiz edilerek performansa dayalı kazık tasarım aşamaları özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyi, aletsel gözlem, performansa dayalı kazık tasarımı

¹ Dr., GEOgrup İnşaat A.Ş., oinanir@geogrup.com.tr (Sorumlu yazar)

² İnş.Y.Müh, GEOgrup İnşaat A.Ş., minanir@geogrup.com.tr



ABSTRACT (14 PUNTO)

Instrumented pile loading tests can give a better understanding about the pile load-transfer mechanism. This might prevent under/over-estimated design of foundation piles and allows to perform Performance Based Design Method (PBD-M). Design of a piled foundation for axial load starts with an analysis of how the load is transferred to the soil, generally limited to determining only a pile "capacity", sometimes separating the "capacity" on components of shaft and toe resistances. The load-transfer analysis is often called static analysis or "capacity" analysis. The load-transfer analysis is a necessary part of a settlement analysis, because settlement analysis of a piled foundation cannot be separated from how the load from the structure is to be transferred to the soil. Instrumented axial static compression pile loading test (S-PLT/C) can provide necessary information for determining the load transfer mechanism and test simulation with t-z/q-z relations for "Single Pile - Soil Interaction Model". The interaction model can be transformed to "Geotechnical Model" for simulation of pile behaviour under various site conditions (such as excavation, ground water lowering, etc.). In this study, a sample instrumented axial static compression pile loading test (S-PLT/C) results are evaluated and "Single Pile-Soil Interaction Model" simulation approach is defined as per Unified Design Method. Moreover, the affects of additional excavation and ground water elevation change at pile performance is demonstrated.

Keywords: *instrumented pile loading test, performance based pile design,*

1. GİRİŞ

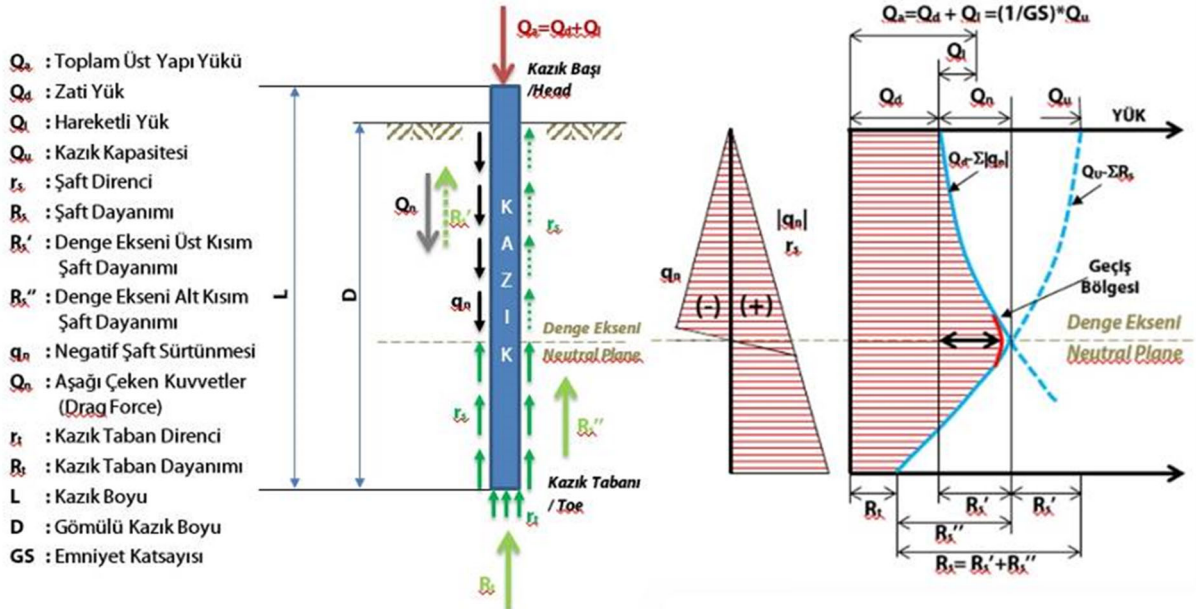
Geleneksel tarzda yapılan kazık veya dar/geniş kazık grubu tasarımında umumiyetle kazık kapasite ve kazık oturma hesapları ayrı ayrı yapılmaktadır. En basit yaklaşımla değerlendirildiğinde bile hesap edilen "kazık taşıma kapasitesi" belirli bir emniyet katsayısı nispetinde servis yükü "müsaade edilebilir yük" olarak kazığa tatbik edilmektedir. Bu yük altında kazık hareket ederek zemine yük aktarmakta ve zeminde de bu yükleme şartında elastik ve konsolidasyon oturması meydana gelmektedir. Kazık davranışının gerçek davranışa yakın modellenebilmesi için bu problemin tümleşik olarak çözülmesi gereği açıktır. Fellenius (1988) tarafından kazık veya dar/geniş kazık grupları tasarımında "kapasite", "rezidüel yükler", "negatif shaft sürtünmesi"/ "aşağı çeken kuvvetler" ve "oturma" münasebetlerini dikkate alacak şekilde Birleştirilmiş Kazık Tasarımı Yaklaşımı geliştirilmiştir.

Bu yaklaşımda düşey yüklü bir kazığın zemin ile arasındaki izafi hareketin istikametinin mobilize olan shaft direncine etkisinin bulunmadığı gerçeğini dikkate alır. Basınç yada çekme veya negatif yada pozitif olması durumlarında shaft direnci büyüklük olarak hep aynı kalır, sadece istikameti değişir. Ayrıca, shaft direncinin mobilize olması için gerekli izafi hareket miktarı kazık çapından bağımsızdır (Fellenius, 2018 ; 2024).

Bu çalışma kapsamında, enstrümante edilmiş bir kazık yükleme deneyi Birleştirilmiş Kazık Tasarımı (Unified Design Method) yaklaşımına uygulama örneği teşkil etmesi açısından adimsal olarak analiz edilmiştir. Bu örnekte deney özellikleri, deneyde ölçülen verilerinin



analizi, kazık boyunca yük dağılımı hesabı ve shaft direnci dağılımı, ilave kazı yapılması ve yarılatı su seviyesinin değişmesi durumları için analizler yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu adımsal yaklaşımda maksat kazık yükleme deneyinde kazığın maruz kaldığı azami yükün tasarımda dikkate alınan proje yüküne veya kazık kapasitesine nisbeti belirlenerek bir güvenlikle taşınıp taşımadığının kontrolü şeklinde değildir. Kazık ömrü boyunca maruz kalacağı şartlara göre yük-deplasman performansının değerlendirilmesi yaklaşımı esas alınmaktadır.



Şekil 1 Kazığa aktarılan yüklerin kazık boyunca dağılımı (Fellenius, 2001'den istifade edilerek düzenlenmiştir).

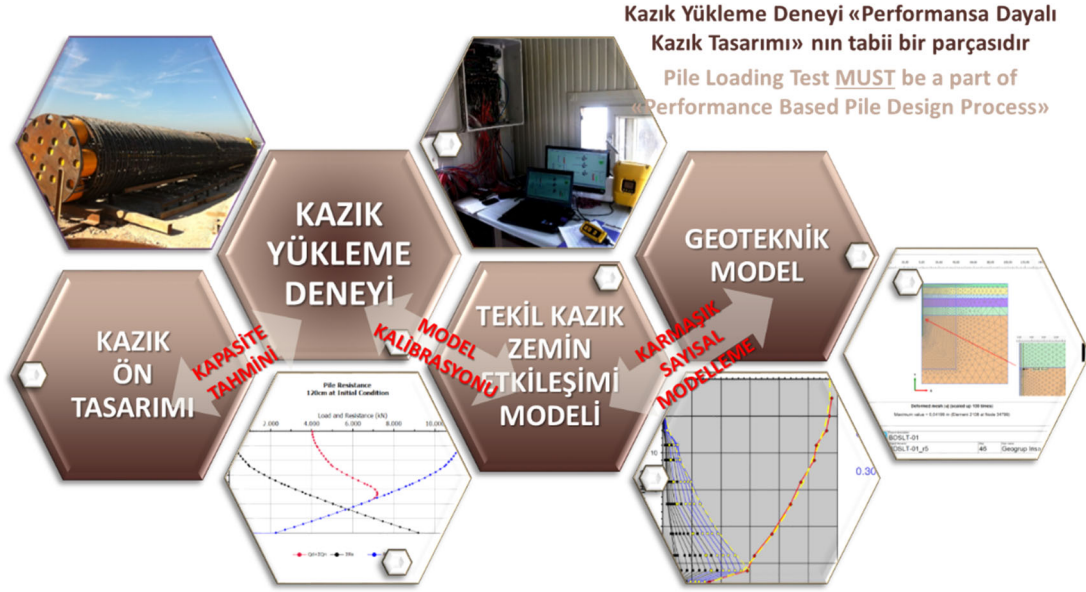
Bunun için bir proje kapsamında tekil fore kazık üzerinde gerçekleştirilen statik basınç kazık yükleme deneyi ele alınmıştır. Kazık kapasitesinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için kazık enstrümante edilmiştir. Deneyden elde edilen veriler ışığında mevcut zemin şartlarında t-z/q-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılması ve "Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin" oluşturulması için analiz adımları özetlenmiştir.

Performansa dayalı kazık tasarımında (P-DKT) aşağıdaki adımlar izlenmektedir;

- Kazık deplasmanını dikkate alan muhtelif kazık kapasitesi tahmin yöntemleri kullanılarak ön-tasarımının yapılması,
- Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyi yapılması,
- Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin yükleme deneyi sonuçları ile kalibre edilmesi,
- Tasarımda ve deney sonucunda elde edilen yük-deplasman ve kazık boyunca yük dağılımı ilişkisi eşleştirilerek elde edilen zemin parametreleri ile kazıklı temel için geoteknik modelin oluşturulması,

Bu adımlar Şekil 2 'de görsel olarak açıklanmıştır.



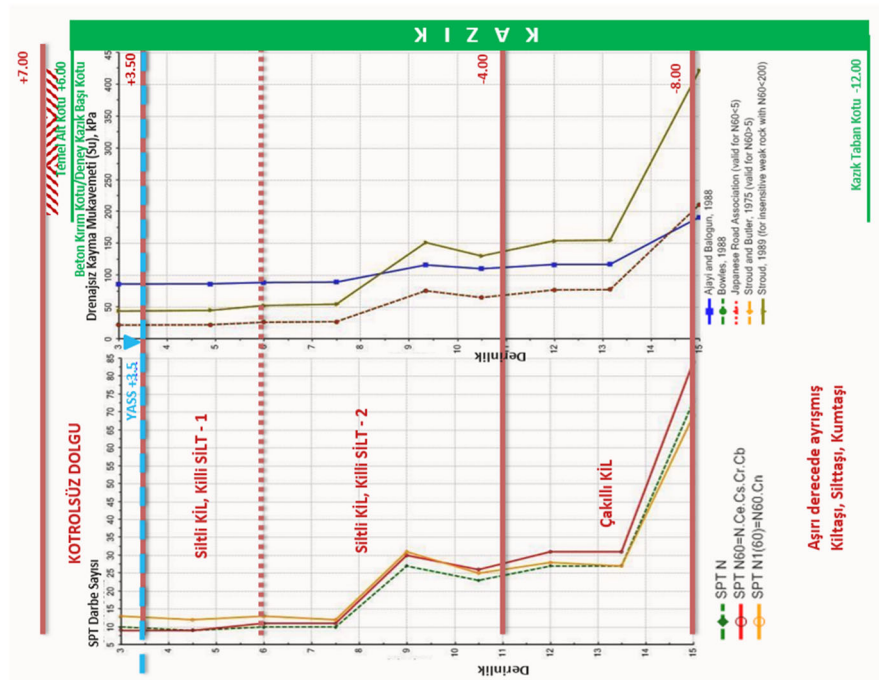


Şekil 2 Performansa dayalı kazık tasarımı adımları

2. ENSTRÜMANTE EDİLMİŞ KAZIK YÜKLEME DENEYİ

2.1. Zemin Özellikleri

Deney yapılan sahada yüzeyden (Kot +7.00) itibaren ilk 3.5m derinlikte kontrolsüz bir dolgu tabakası mevcuttur. Kontrolsüz dolgu tabakasını 7.5m kalınlığında Siltli Killi/Killi Silt tabakası takip etmektedir. Bu tabakayı 4m kalınlığında Çakıllı Kil ve altında Kiltası, Silttaşı, Kumtaşı ardalanmalı tabaka takip etmektedir (Şekil 3).



Şekil 3 Deney kazığı bölgesini temsil eden zemin profili



2.2. Deneş Kazığı Özellikleri

Deneş kazığı, OD1000mm çapında ve $L_{\text{toplam}}=19.0\text{m}$ ve $L_{\text{net}}=18.0\text{m}$ boyunda (Çalışma platformu kotu +7.00, temel alt kotu +6.00 ve kazık taban kotu -12.00 olmak üzere) fore kazık tekniğı ile kuyu stabilitesi için geçici muhafaza borusu ve su ($L=15\text{m}$, OD1080mm ve üst kotu +8.36 olmak üzere) kullanılarak imal edilmiştir. Tij tipi ekstansometre ve seyyar ekstansometre yerleştirilmesine yönelik kılıf borular (karşı kuyu ultrason deneş, K-KUD maksadıyla da kullanılacak olan) ve donatı tipi birim deformasyon ölçerler ile enstrümante edilerek hazırlanan donatı kafesi ($22\Phi 25\text{mm}$ boyuna donatı ve $\Phi 12/100\text{mm}$ etriye ile teşkil edilerek) tek parça halinde kuyuya indirilmiştir (Şekil 4). Akabinde C40/50 beton sınıfı ile betonlama tremi borusu kullanılarak yapılmıştır.



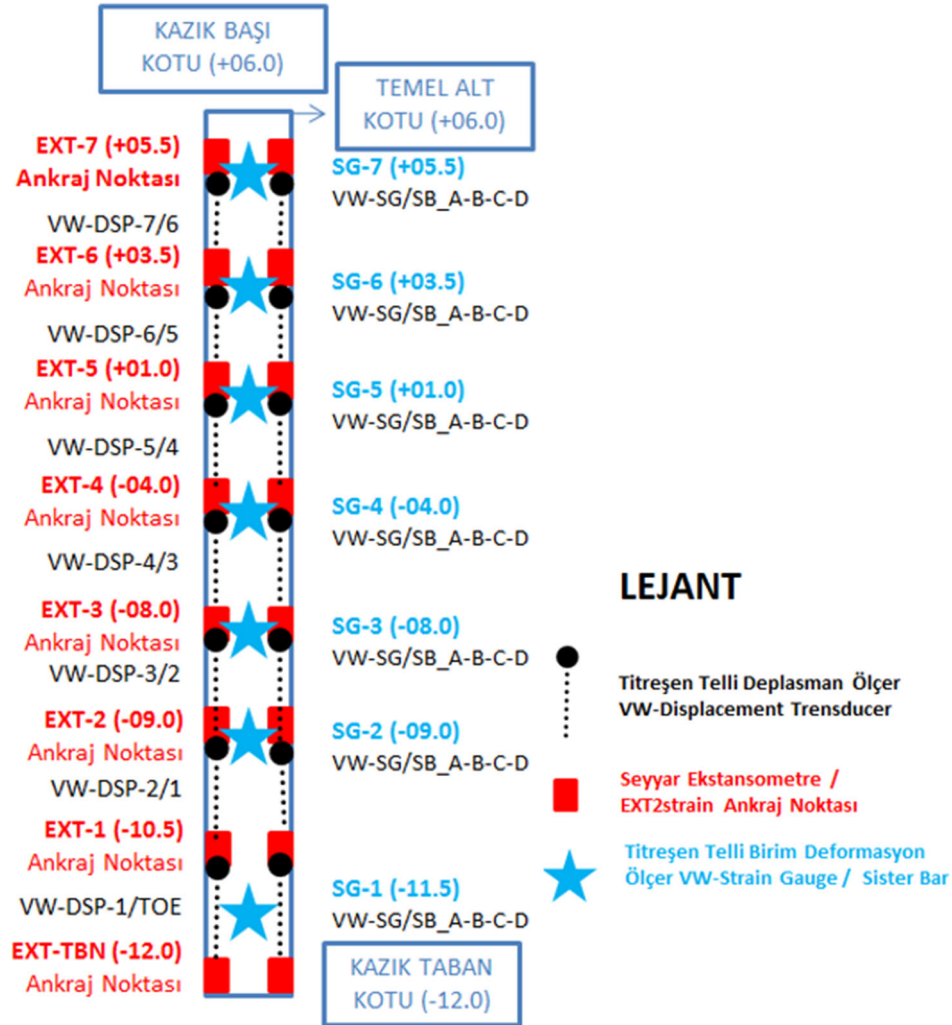
Şekil 4 Enstrümante edilmiş deneş kazığı donatı kafesi kaldırma operasyonu genel görünüş

2.3. Enstrümantasyon Özellikleri

Deneş kazığına yedi (7) seviyede Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçer (VWSG/SB, Vibrating Wire Sister Bar Type Strain Gauge) her seviyede karşılıklı ikişer çiftten dört (4) adet olmak üzere toplam yirmisekiz (28) adet yerleştirilmiştir. Karşılıklı kuvvet çiftlerinin 4 adet SG ile ölçülmesi ölçüm doğruluğı (accuracy) ve yedeklemesi (redundancy) açısından ehemmiyet arz etmektedir. Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için Tij tipi ekstansometre (T-EKST, Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deneş esnasında karşı kuyu ultrason deneş (K-KUD, CSL/CHUM) kapsamında kullanılan 2" çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine seyyar ekstansometre (S-EKST, EXT2strain) yerleştirilmiştir. Ankraj noktaları arasında kısalma/uzama ölçülerek ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon hesaplanmaktadır. Bu maksatla



Kazık Yükleme Deneyi - Ya Sonrası ?
Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T)



Şekil 5 Donatı tipi birim deformasyon ölçer (VWSG/SB) ve seygar ekstansometre (EXT2strain) kazık boyunca yerleşiminin şematik gösterimi



Şekil 6 Yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş



sekiz (8) ankraj noktası arasında yedi (7) adet olmak üzere karşılıklı iki (2) boruda toplam ondört (14) aralıkta ölçüm alınmıştır. Deney kapsamında kullanılan enstrümantasyon ölçüm sistemleri genel görünüşleri Şekil 6 'de ve yerleşim detayları ise Şekil 5 'de verilmiştir.

Bu örnek kapsamında deneyde kazık imalatı ve deney öncesi vetiresinde oluşan rezidüel gerilmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek, deney öncesinde birim deformasyonlar sıfırlanmış ve "Rezidüel Gerilmeler" dikkate alınmamıştır.

2.4. Kazık Yükleme Deneyi

Deney basınç kazığına yük dört (4) adet reaksiyon kazığından faydalanılarak hidrolik kriko vasıtası ile aktarılmıştır. Hidrolik krikolara hava tahrikli hidrolik pompa ile hidrolik basınç uygulanmıştır. Pompa hattındaki basıncı gözlemek için yüksek basınçlı bir manometre (Bourdon gauge) ile yüksek çözünürlüklü, kalibrasyonlu bir basınç ölçer (pressure transducer) kullanılmıştır. Kazık başında mobilize olan yük ise elektrik direnç cinsi yük hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) ile ölçülmüştür. Kazık başına transfer edilen yükün eksenelliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrite etkisinin bertaraf edilebilmesi maksadıyla yarım küresel mafsal kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirişine, tij cinsi (T-EKST, Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (S-EKST, EXT2strain) muhafaza borularına sabitlenen deplasman ölçerler, kazık başı ile tij alt ucunun izafi hareketinin ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüş Şekil 7 ve Şekil 8 'da verilmiştir. Referans kirişi üzerine yerleştirilen "Invar Mira Cetveli" ile referans kiriş hareketinin belirlenmesi için dış referansa sabitlenen DNA-03 Elektronik Nivo ile senkronize bir şekilde 0.01mm hassasiyette okuma alınmıştır. Deney boyunca deney kirişlerinin devrilmeye karşı güvenliği açısından boyuna ve enine istikamette deney boyunca dönme ölçümü ve kriko piston açılması güvenliği için deplasman ölçümü yapılmıştır. Deplasman, yük ve birim deformasyon ölçümü verileri 60sn aralıklarla kaydedilmiştir.

Deney kapsamında ASTM D1143/D1143M-20, (2020) Prosedür-A "Hızlı Test" (Procedure A "Quick Test") uyarınca yükleme programı takip edilmiştir (Şekil 9). Maksimum deney yüküne (%100=9.959 kN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılmaya hedeflenmiştir. Ancak, deney esnasında hidrolik pompada yaşanan bir problem sebebi ile 12. adımda (1L-12X adımı) yükleme nihayetlendirilerek 5 adımda yine 15dk bekleme ile boşaltılarak ve son aşamada 60dk bekleme ile 1. Çevrim tamamlanmıştır (1U-5X). İkinci çevrimde 12. yükleme adımına kadar boşaltmada olduğu gibi 5 kademede çıkılmış ve 12. kademeden sonra normal %5 adımlarla 15 dk bekleme ile yükleme yapılarak %100 deney yüküne ulaşılmıştır.





Şekil 8 Deney düzenegi, yük kontrol ve kumanda sistemi ve hidrolik pompa genel görünüş



Çevrim	Pompa Basıncı (Bar)	Deney Yüğü (kN)	Azami Deney Yüğüne Nisbeti (%)	Yük Tatbik Kriterleri		
				Azami Yük Tatbik Süresi (dk)	Deney Yük Tatbik Süresi Kriteri	
1	L-	0	0	0	0	
1	L-	1	49	498	5	15
1	L-	2	99	996	10	15
1	L-	3	148	1494	15	15
1	L-	4	197	1992	20	15
1	L-	5	247	2490	25	15
1	L-	6	296	2988	30	15
1	L-	7	346	3486	35	15
1	L-	8	395	3984	40	15
1	L-	9	445	4482	45	15
1	L-	10	494	4980	50	15
1	L-	11	543	5478	55	15
1	L-	12	593	5975	60	60
1	U-	1	494	4980	50	15
1	U-	2	445	4482	45	15
1	U-	3	296	2988	30	15
1	U-	4	148	1494	15	15
1	U-	5	0	0	0	60
2	L-	2	99	996	10	15
2	L-	5	247	2490	25	15
2	L-	8	395	3984	40	15
2	L-	10	494	4980	50	15
2	L-	13	642	6473	65	15
2	L-	14	692	6971	70	15
2	L-	15	741	7469	75	15
2	L-	16	791	7967	80	15
2	L-	17	840	8465	85	15
2	L-	18	889	8963	90	15
2	L-	19	939	9461	95	15
2	L-	20	988	9959	100	60
2	U-	1	939	9461	95	15
2	U-	2	741	7469	75	15
2	U-	3	494	4980	50	15
2	U-	4	296	2988	30	15
2	U-	5	0	0	0	60

M/D

Şekil 9 Deney yükleme programı

2.5. Aksel Statik Basınc Kazık Yükleme Deneyi (S-KYD/B) Sonuçları

Titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçerler (Sister Bar Type Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG/SB) ve Tij cinsi ekstansometreler (T-EKST) analize esas veri olarak kullanılmıştır. Bütün birim deformasyon değerleri deney başlangıcında sıfırlanarak (kazıktaki mevcut reziduel gerilmeler ihmal edilerek) relatif değişimi deney boyunca gözlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, elde edilen yük-deplasman grafiği, yük-zaman grafiği ve deplasman-zaman grafikleri Şekil 10 'da verilmiştir. Deney kazık başının ve kazık taban deplasmanı tij tipi ekstansometrelere (T-EKST, Tell-tale) bağlanan deplasman ölçerler ile ölçülmüştür. Toplam on (10) adet potansiyometrik deplasman ölçer, POT ve ondört (14) adet titreşen telli deplasman ölçer belirlenen konumlardaki tüm hareketleri ölçmek için kullanılmıştır.

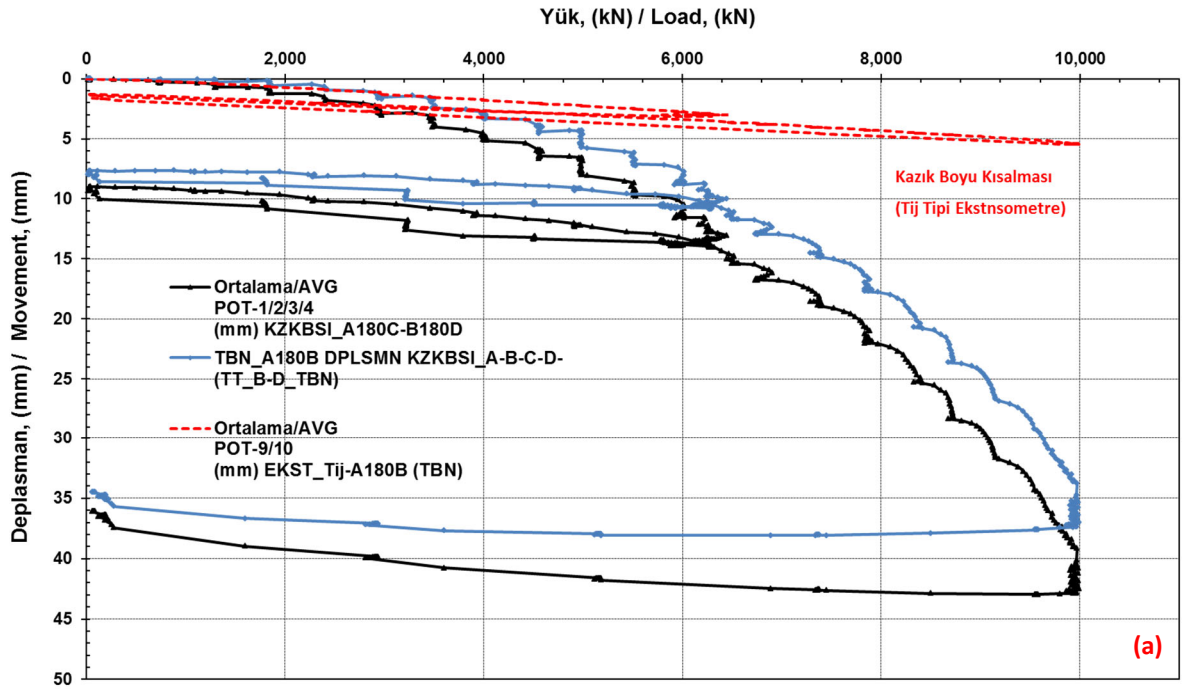


Titreşen telli donatı cinsi birim deformasyon ölçer (Vibrating wire Sister Bar Type Strain Gauge) 7 seviye olmak üzere -11.5, -9.0, -8.0, -4.0, +1.0, +3.5, +5.5 kotlarına her kesitte 4 adet olarak yerleştirilmiştir. Deneyde SG-1/C, SG-2/D ve SG-3/D okumaları kullanılmamıştır. Kuvvet çifti ortalamasının, kesit ortalama birim deformasyon hesabı açısından önem arz etmesi hasebiyle karşılıklı olan birim deformasyon ölçerlerin (SG-1/A, SG-2/B ve SG-4/B) okumaları da analize dahil edilmemiştir.

Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi Şekil 11(a) ve Kazık Boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon – Zaman Şekil 11(b) 'de verilmiştir.

Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı aralıklarda ölçülen (S-EKST, EXT2strain) birim deformasyon değişimi Şekil 12(a) ve Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı aralıklarda ölçülen (EXT2strain) birim deformasyon Şekil 12(b) 'de verilmiştir.

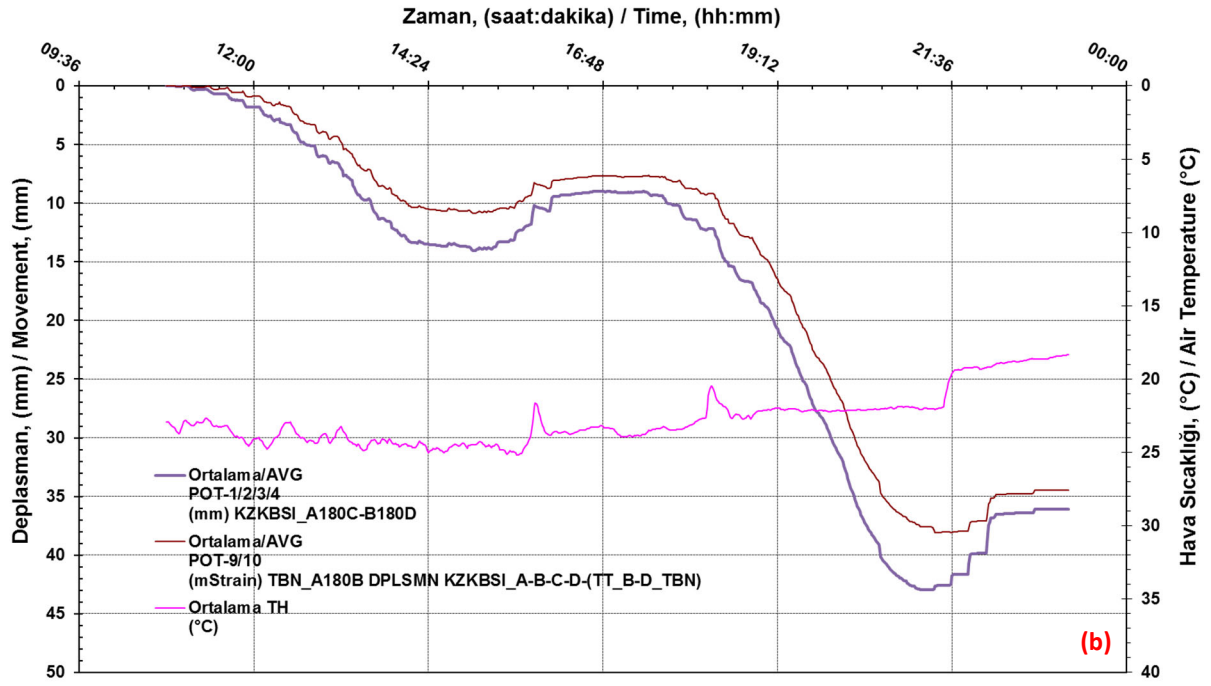
Kazık Başında Yük - Kazık Başında / Kazık Tabanında Ort. Deplasman Grafığı



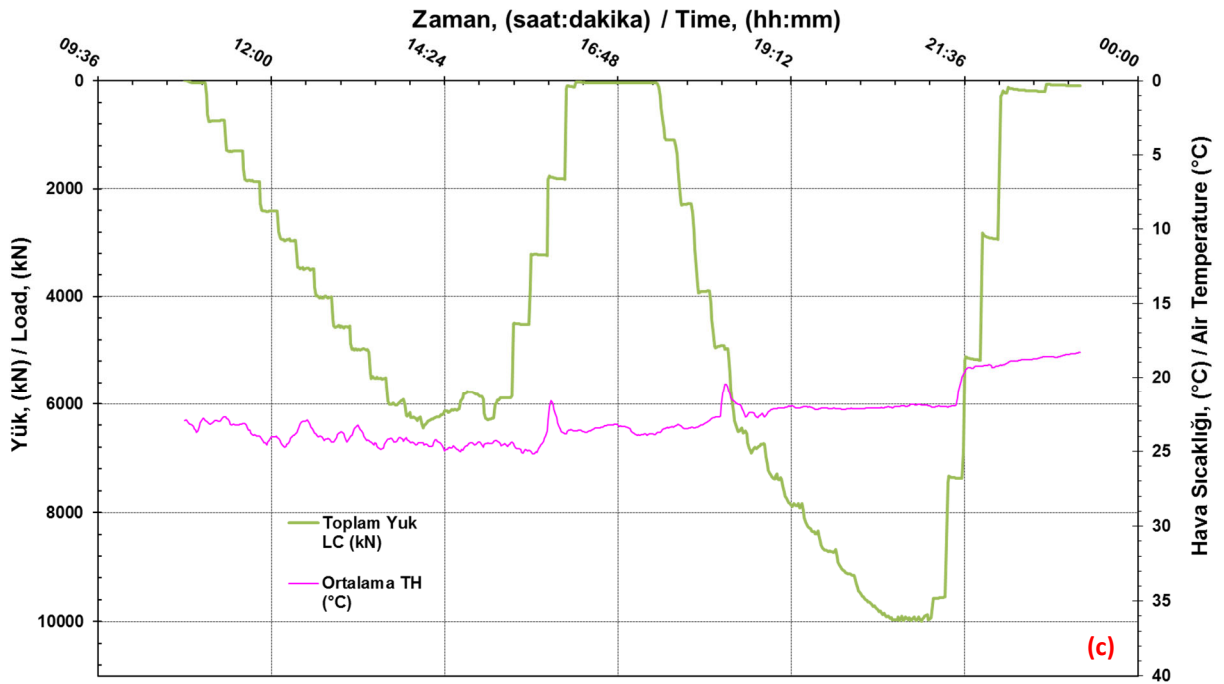
Şekil 10 (a) Kazık başında yük, kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman ve kazık boyu kısılması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman – zaman grafiği (c) Kazık başında yük – zaman grafiği



Kazık Başında / Kazık Tabanında Ortalama Deplasman - Zaman Grafiki



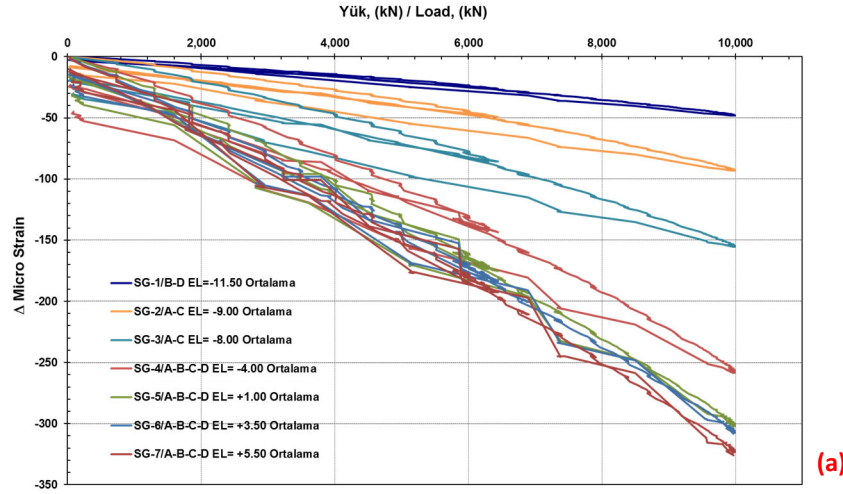
Kazık Başında Yük - Zaman Grafiki



Şekil 10 (devamı) (a) Kazık başında yük, kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman ve kazık boyu kısalması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman – zaman grafiği (c) Kazık başında yük – zaman grafiği

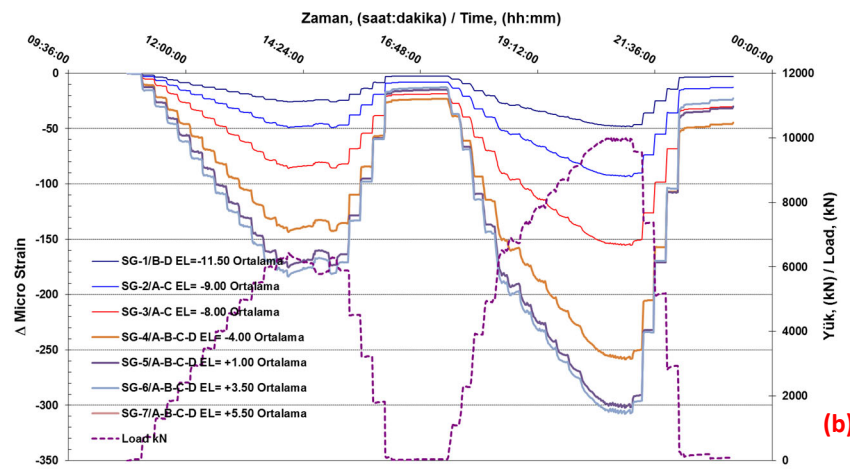


SG 1 / SG 2 / SG 3 / SG 4 / SG 5 / SG 6 / SG 7



(a)

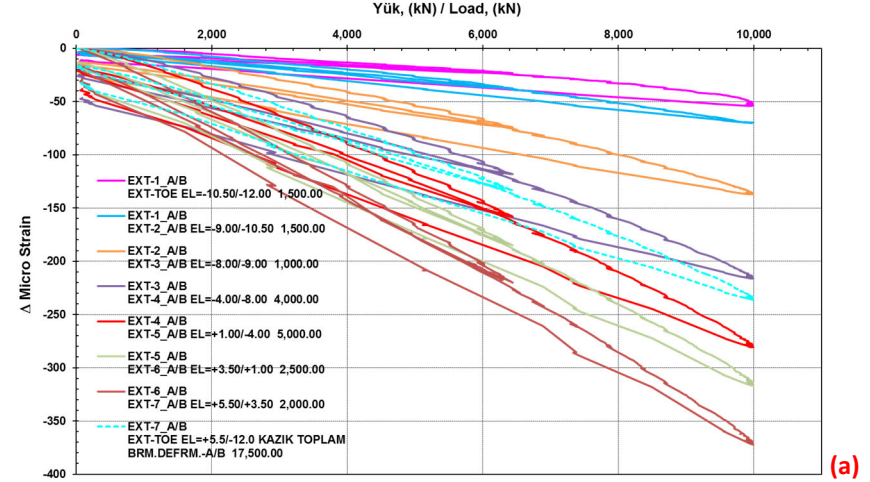
SG 1 / SG 2 / SG 3 / SG 4 // SG 5 / SG 6 / SG 7



(b)

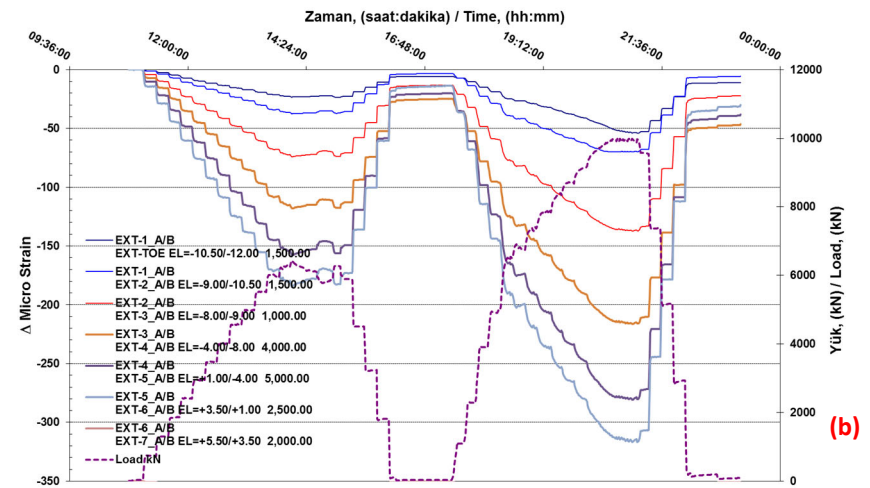
Şekil 11 (a) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği (b) Kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon ve yük-zaman grafiği

EXT 7-A/B_EXT 6-A/B_EXT 5-A/B_EXT 4-A/B_EXT 2-A/B_EXT 2-A/B_EXT 1-A/B



(a)

EXT 7-A/B_EXT 6-A/B_EXT 5-A/B_EXT 4-A/B_EXT 2-A/B_EXT 2-A/B_EXT 1-A/B



(b)

Şekil 12 (a) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı aralıklarda ölçülen (S-EKST, EXT2strain) birim deformasyon değişimi grafiği (b) Kazık boyunca farklı aralıklarda ölçülen (S-EKST, EXT2strain) birim deformasyon ve yük-zaman grafiği



3. DENEY SONUÇLARININ BİRLEŞTİRİLMİŞ KAZIK TASARIM YAKLAŞIMI (UNIFIED DESIGN METHOD) İLE ANALİZİ

3.1. Deneysel Sonuçlarına Göre Kazık Boyunca Yük Dağılımı

Birim Deformasyon ölçerlerden elde edilen mikroStrain ($\mu\epsilon, \%$) değerlerinin kesitteki gerilmeye ($\sigma, \text{kN/m}^2$), çevrilebilmesi için betonarme kesitin rijitliğinin (Deformasyon Modülünün) belirlenmesi gerekmektedir. Alet seviyesindeki betonarme kesitin Deformasyon Modülü, lokal şartlardan (kompozit kesit modülü, birim deformasyon miktarı, v.b.) etkilenmektedir ve belirlenmesi normal şartlarda oldukça zordur. Çeliğin elastisite modülüne karşılık betonun elastisite modülü sabit değildir, oluşan birim deformasyon (strain) miktarına göre değişkendir. Bu nedenle kazık yükleme deneyi süresince betondaki geniş bir gerilme aralığındaki başlangıç ve bitiş deformasyon modülündeki değişim miktarı kayda değer olabilir.

Hesaplamalarda, gerilme sekant modülü ile birim deformasyon çarpımı olarak dikkate alınabilir (Fellenius, 1989). Sekant Modülü tayini için kazık başında kazığa aktarılan yükün çok etkilenmediği ilk birim deformasyon ölçer (SG) seviyesindeki kesitte yük birim deformasyon ilişkisinden Sekant Rijitliği ($E_s A$) elde edilebilir. Aksi takdirde, ilk olarak kazık serbest kolon gibi dikkate alınarak elde edilen tanjant modülü, sekant modülü tayini için kullanılır.

Tanjant Modülü tayini için;

$$M = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \right) = a\epsilon + b \quad (1)$$

Gerilme hesabı için integrali alınırsa;

$$\sigma = \left(\frac{a}{2} \right) \epsilon^2 + b\epsilon \quad (2)$$

Gerilme aynı zamanda;

$$\sigma = E_s \epsilon \quad (3)$$

Böylece;

$$\sigma = E_s \epsilon = 0.5a \cdot \epsilon^2 + b \cdot \epsilon \Rightarrow E_s = 0.5a \cdot \epsilon + b \quad (4)$$

M = Kompozit kazık malzemesinin tanjant modülü

E_s = Kompozit kazık malzemesinin sekant modülü

σ = gerilme (yük/kesit alanı)

$\Delta\sigma$ = yük kademeleri arasındaki gerilme değişimi $\Delta\sigma = (\sigma_{n+1} - \sigma_1)$

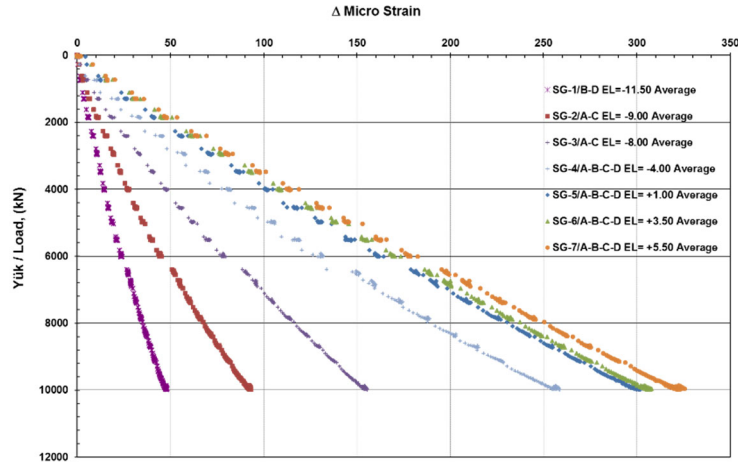
a = tanjant modül çizgisinin eğimi

b = tanjant modül çizgisinin y-eksen kesişeni

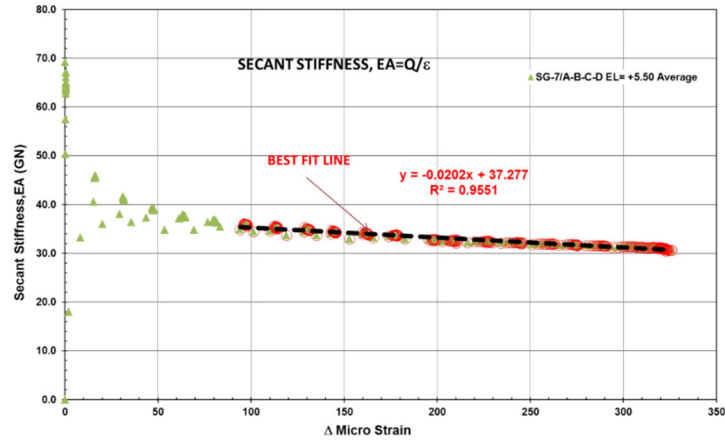
ϵ = ölçülen birim deformasyon

$\Delta\epsilon$ = yük kademeleri arasındaki birim deformasyon değişimi
 $\Delta\epsilon = (\epsilon_{n+1} - \epsilon_1)$



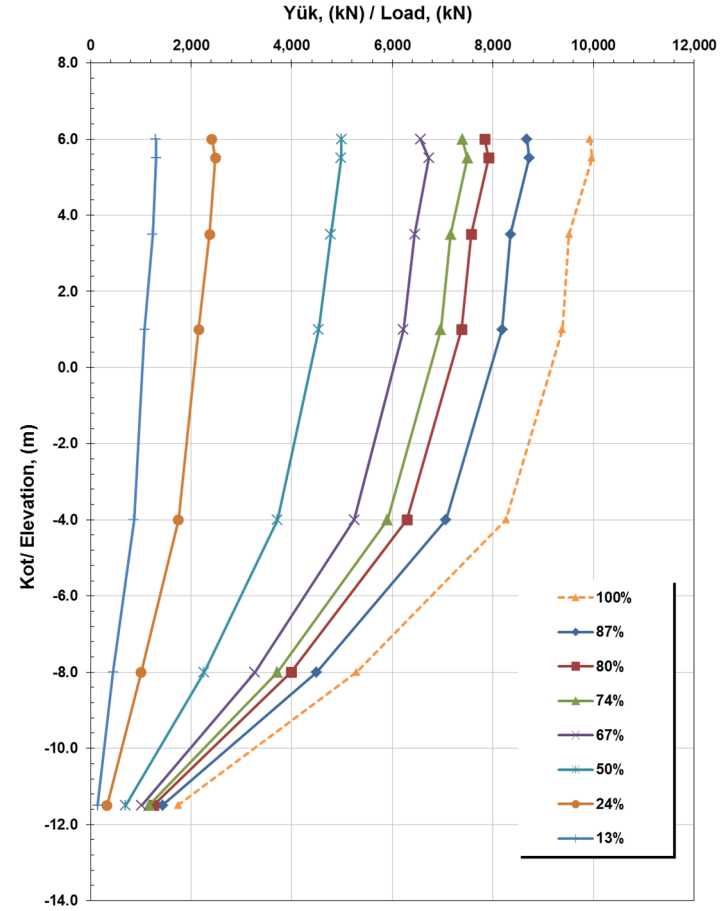


Şekil 13 Farklı seviyelerdeki SG'lerdeki birim deformasyon değerlerinin kazık başı yükü ile değişimi grafiği



Şekil 14 +5.50 kotundaki SG-7'den alınan ölçümlerden hesaplanan sekant rijitliği değişim grafiği

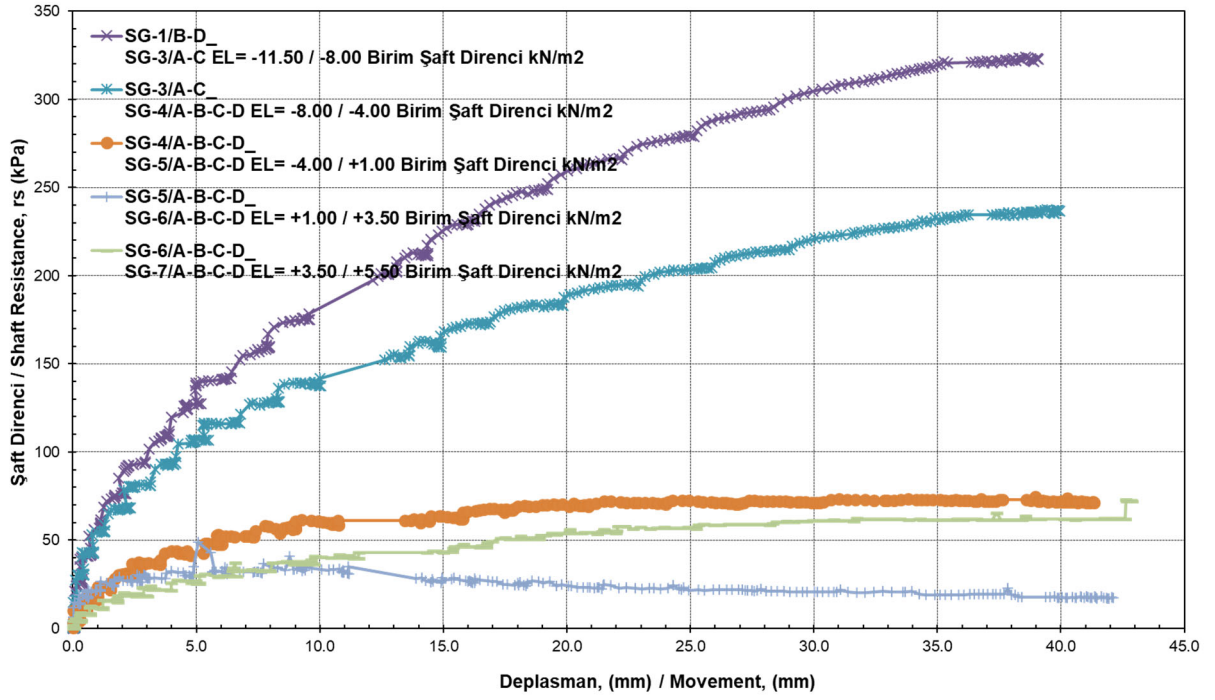
Eksenel Yük-Derinlik İlişkisi



Şekil 15 Deneyde farklı yük kademelerinde SG'lerden ölçülen birim deformasyon verilerinden hesaplanan yük transfer eğrilerinin derinlikle değişimleri

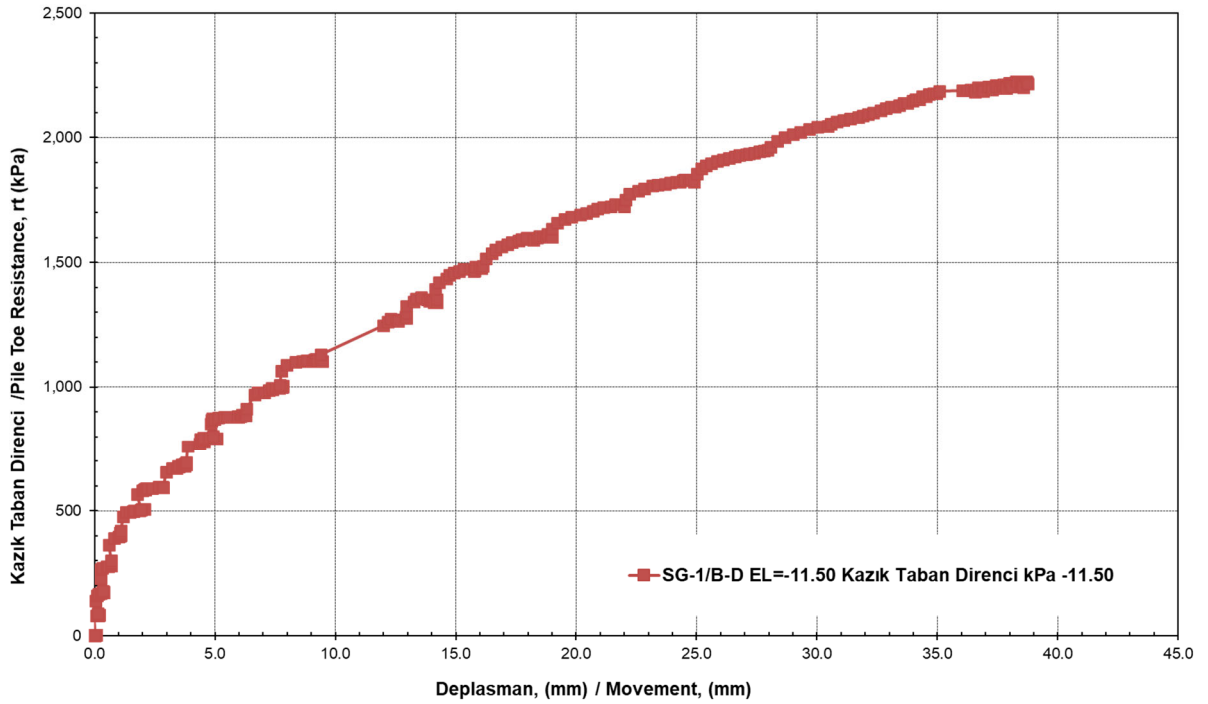


SG Verilerine Göre Mobilize Olan Şaft Direnci



Şekil 16. SG verilerinden hesaplanan farklı derinliklerde mobilize olan şaft direnci-deplasman grafikleri

Mobilize Olan Kazık Taban Direnci



Şekil 17 Deneyde kazık tabanına en yakın VWSG ölçümüne göre mobilize olan kazık taban direnci-deplasman grafiği



Eksenel Rijitlik değerleri VW-SG/SB verileri, S-EKST / EXT2strain verileri ve beton basınç mukavemetine bağlı hesaplanan elastisite modül değerlendirilerek, hesaplarda kazık başına en yakın VWSG/SB (SG-7_+5.5 Kotu) ölçümleri ile hesaplanan birim deformasyona bağlı sekant rijitlik değişimi kullanılması münasip görülmüştür. Sekant Rijitlik (E_sA) değişimine göre başlangıç rijitlik değeri 37.3 GN (“b” sabiti Denklem (1)-(4)) ve eğim (“a” sabiti Denklem (1)-(4)) -0.020 GN/ $\mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 14). Deneyde ölçülen VWSG/SB birim deformasyon ve S-EKST / EXT2strain birim deformasyon değerleri mevcut zemin şartları da dikkate alınarak değerlendirildiğinde, -9.0 kotunda yerleştirilmiş olan VWSG/SB (SG-2_-9.0 Kotu) kazık yükleme deney simülasyonunda analiz dışı bırakılmasına karar verilmiştir. Hesaplanan Sekant Rijitliği uyarınca farklı yük kademelerinde SG okumalarına göre elde edilen yük dağılımı (yük-derinlik grafiği) ilişkisi Şekil 15’de verilmiştir. Ayrıca, bu yük dağılımına bağlı olarak kazık boyunca mobilize olan shaft direnci grafikleri Şekil 16 ‘de ve mobilize olan taban direnci ise Şekil 17 ‘de verilmiştir.

3.2. Kazık Davranışının Modellenmesi

Kazık davranışının modellenmesi için UniPile 5.0 (UniSoft, 2015) yazılımı kullanılmıştır. Modelleme Birleştirilmiş Kazık Tasarım Yaklaşımı esasları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Fellenius, 1984; Fellenius 1988 ; Fellenius 2004; Goudreault ve Fellenius, 2014). Modelleme için Şekil 3 ‘de verilen ve deney bölgesini temsil eden zemin profili dikkate alınmış ancak, parametre tahminleri yük dağılımı ve yük-deplasman ilişkisi sonuçları ile eşleşecek şekilde iteratif olarak belirlenmiştir. Analizlerde Şekil 1 ‘de özetlenen terminoloji izlenmiştir.

Kazık tasarımı için tercih edilen “Hedef Yük” (Target Point) noktası Şekil 18 ‘deki grafikte gösterilmiştir. Bu yük t-z ilişkilerinin ekstrapolasyon yapılan kısmının ölçülen ve mobilize olan shaft direnci ile ilişkisinin daha iyi örtüştürülebilmesi için tatbik edilen maksimum deney yükünden daha küçük ama yeterince shaft direnci mobilize olduğu düşünülen kademede tercih edilmiştir. Şekil 20 ‘de verilen ve analizlerde dikkate alınan parametreler deneyde ve simülasyonda elde edilen yük-deplasman ve yük-derinlik (yük transfer) ilişkileri yeterince örtüşünceye kadar iteratif olarak belirlenmiştir (İnanır v.d., 2022).

Analizlerde ;

- *Kazık Deneyde birim deformasyonlar sıfırlandığı ve “Rezidüel Gerilme” mevcut olmadığı,*
- *Derinlik boyunca kazık kesitinde (OD1000 mm) herhangi bir değişiklik olmadığı,*

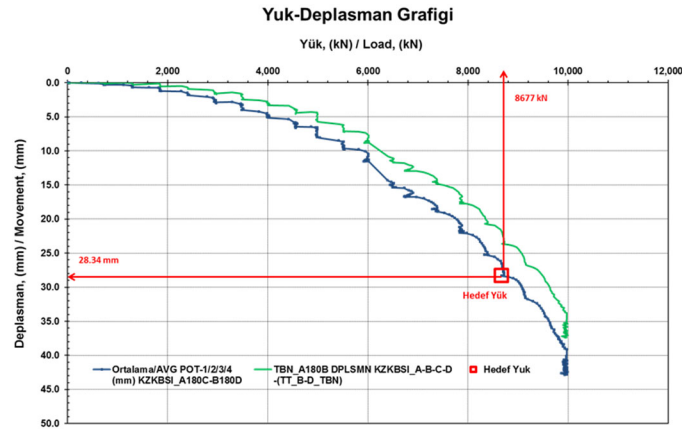
kabul edilmiştir.

Zemin tabakalarında yük transferi için gerekli deplasman ilişkisinin analiz edilebilmesi için analizlerde zemin tabakalarına atanan t-z ilişkileri Şekil 19 ‘da verilmiştir.

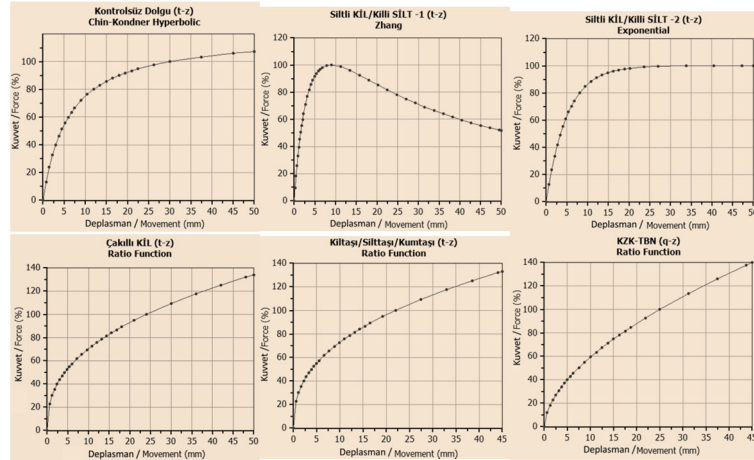
Bu şartlar altında deney simülasyonu yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen ve ölçülen yük-deplasman kıyaslama grafikleri Şekil 21 ve Şekil 22 ‘de, yük-derinlik kıyaslama ve shaft birim sürtünme grafikleri ise Şekil 23 ‘de verilmiştir.



Kazık Yükleme Deneyi - Ya Sonrası ?
Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T)

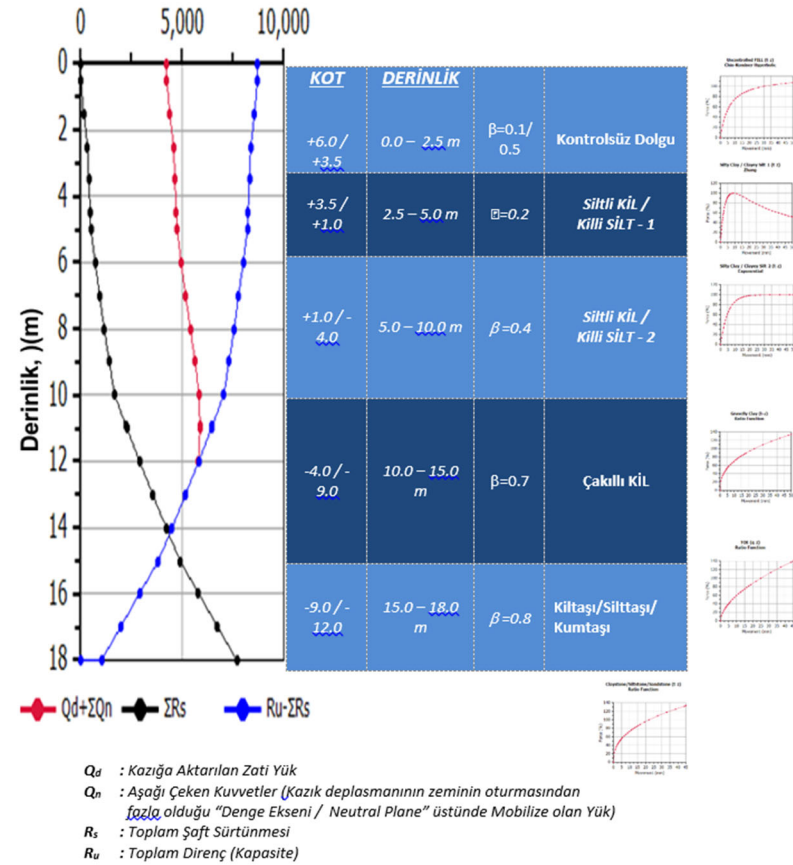


Şekil 18. Kazık yükleme deneyi simülasyonunda eşleştirme yapılmak için seçilen “Hedef Yük”



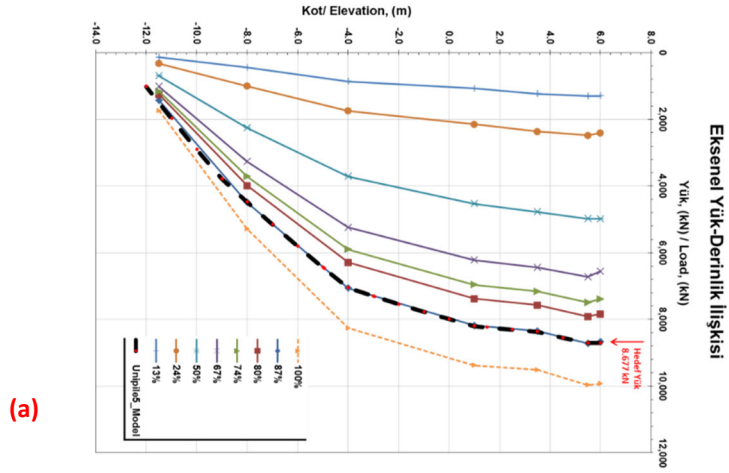
Şekil 19. Analizlerde farklı tabakalar için dikkate alınan t-z/q-z ilişkileri

Yük ve Kazık Direnci, (kN)

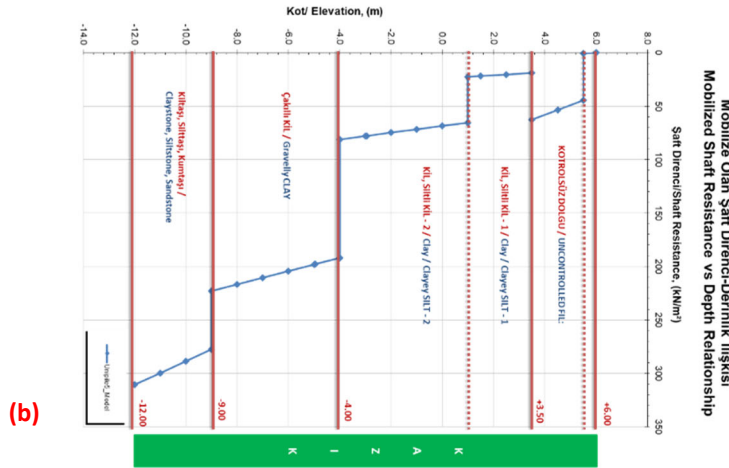


Şekil 20. Analizlerde dikkate alınan zemin tabakalanması, parametreler ve t-z/q-z ilişkileri ile analiz sonucunda elde edilen kazık direnci ve yük transfer ilişkisi





(a)

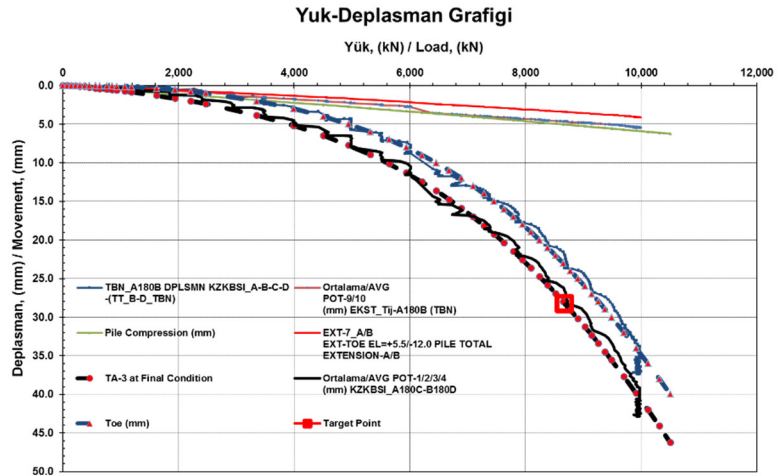


(b)

Şekil 22. (a) Deney ve simulasyondan elde edilen yük transfer ilişkisi karşılaştırma grafiği (b) Deney simulasyonundan elde edilen hedef yük (~%90) için mobilize olan şaft sürtünme dağılımı grafiği



Şekil 21. Analiz sonucunda elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisi



Şekil 23. Hesaplanan kazık yük transferi-derinlik ilişkisinin deneyden elde edilenle karşılaştırılması



3.3. Deney Sonuçlarının Birleştirilmiş Kazık Tasarım Yaklaşımı (Unified design method) ile Elde Edilen Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin Farklı Şartlar için Analizi

Kazı durumu (5m) için kazık davranışı

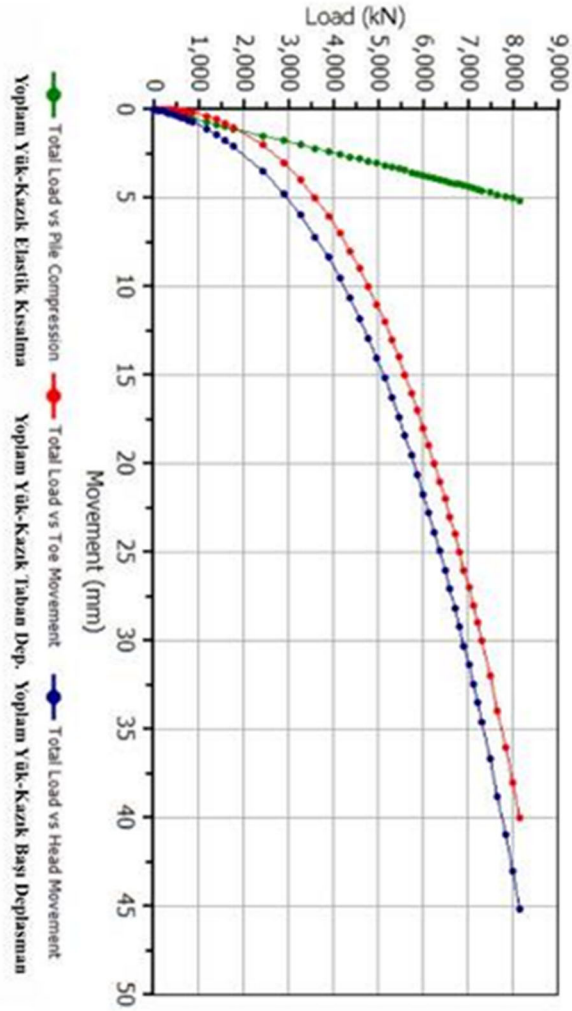
Modellenmiş deney verisindeki bütün parametreler korunarak, sahada 5m kazı (+6.0 kotundan +1.0 kotuna kadar) yapılması durumu için analizler tekrarlanmıştır. Kazı yapılmış durumdaki mevcut kazık özellikleri korunarak elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisi Şekil 24’de verilmiştir.

5m kazı yapılması durumunda kazığın ilk beş metresine takabül eden shaft dayanımı yaklaşık ~500kN mertebelerindedir. Ancak, kazık davranışına kazı yapılması münasebetiyle oluşan efektif gerilme değişimi etkisi çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Deney verisi ve yeraltı su seviyesinin 5m kazı yapılması durumunda elde edilen simulasyon sonucunda elde edilen yük transfer ilişkisinin karşılaştırılması halinde kazığın nihaî kazık direncindeki azalma yaklaşık ~2085 kN (8.708 kN ile 6.624kN farkı) mertebelerindedir (Şekil 25). Kazıdaki toplam direnç kaybı, sadece shaft direncinden gelen yük kaybının takriben 4 katı mertebesindedir.

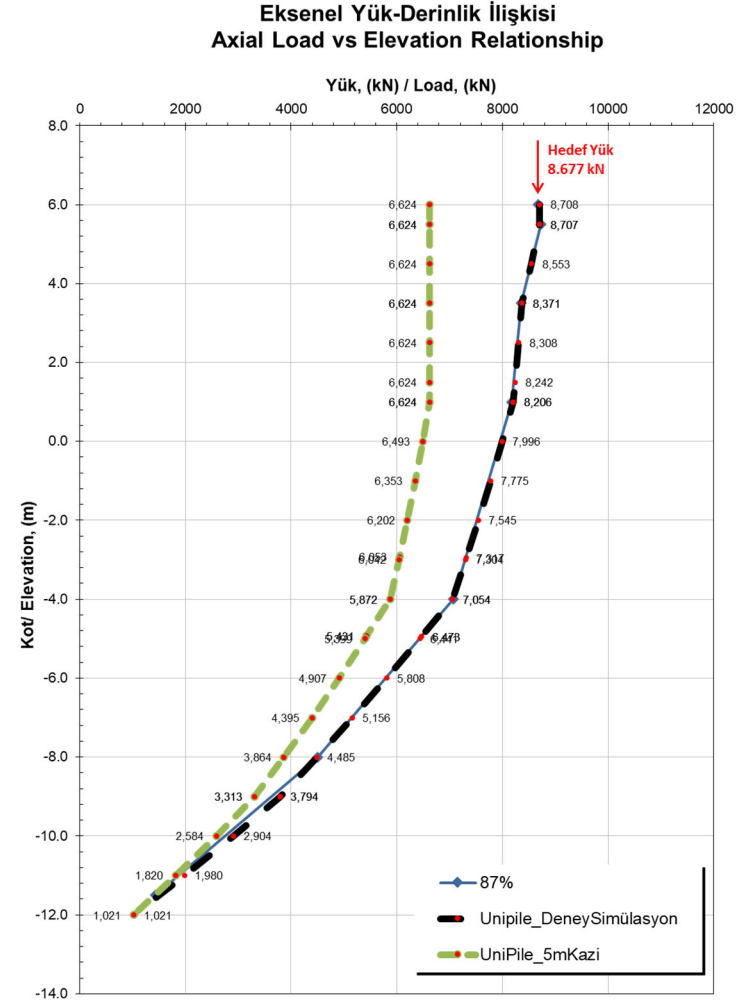
Yeraltı Su Seviyesinin İndirilmesi Durumu İçin Kazık Davranışı

Modellenmiş deney verisindeki bütün parametreler korunarak, sadece sahada 2,5m derinlikte (+3.50 kotunda) bulunan yeraltı su seviyesinin 5m aşağıya (+3.50 kotundan -1.50 kotuna) indirilmesi durumunda analizler tekrarlanmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisi Şekil 26’de verilmiştir. Ancak, yeraltı su seviyesinin değişmesi münasebetiyle artan efektif gerilmenin kazık davranışı üzerinde oldukça yüksek etkisi bulunduğu görülmektedir. Yeraltı su seviyesinin 5m indirilmesi durumu için yapılan simulasyon sonucunda elde edilen yük transfer ilişkisinin deney sonuçları ile karşılaştırılması durumunda nihaî kazık direncindeki artış yaklaşık ~1200 kN (9.906kN ile 8.708 kN farkı) mertebelerindedir (Şekil 27).





Kazık Başından Yükleme Durumu için Simülasyon
5m Kazı Yapıldığı Durum (+6.0 / +1.0 Kotu arası)
(Rezidüel Kuvvetler Dahil Edilmemiş Durum)

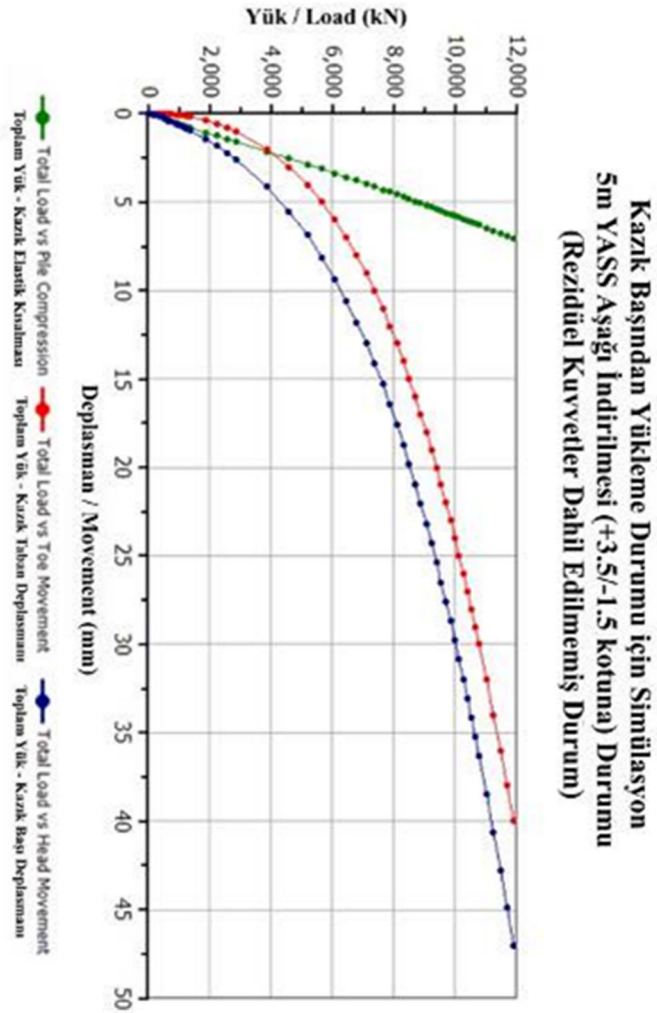


Şekil 24. 5m kazı durumu için analiz sonucunda elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisi

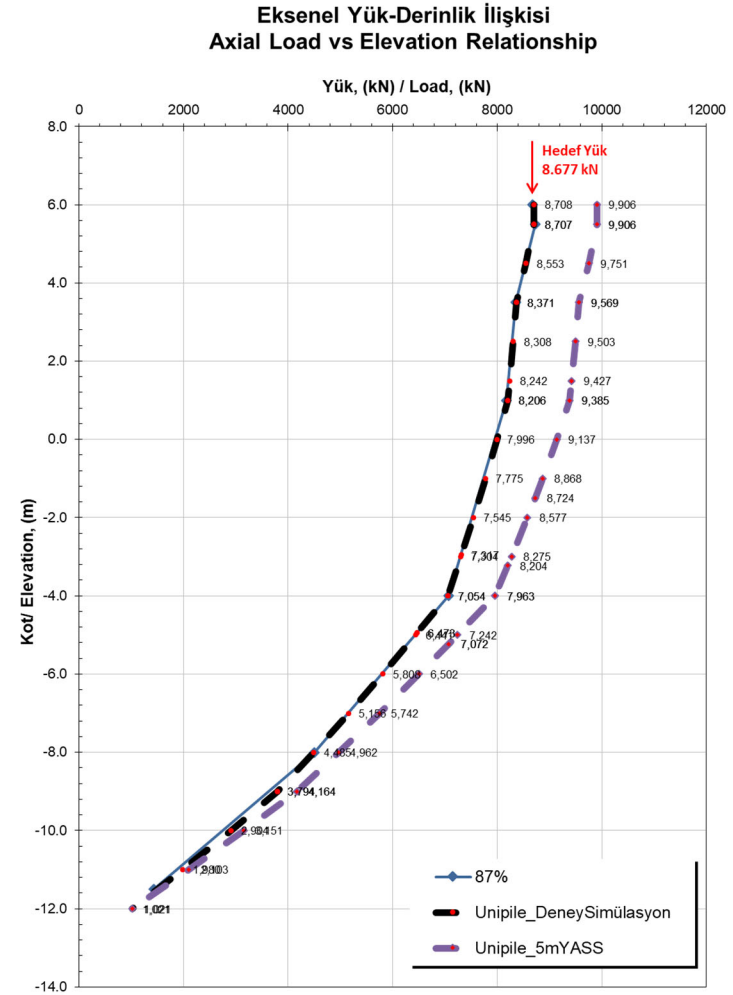
Şekil 25. Deney ve 5m kazı yapılması durumları için simülasyonda elde edilen yük transfer ilişkisinin karşılaştırma grafiği



Kazık Yükleme Deneyi - Ya Sonrası ?
Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T)



Şekil 26. Yeraltı su seviyesinin 5m indirilmesi durumunun için analiz sonucunda elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisi

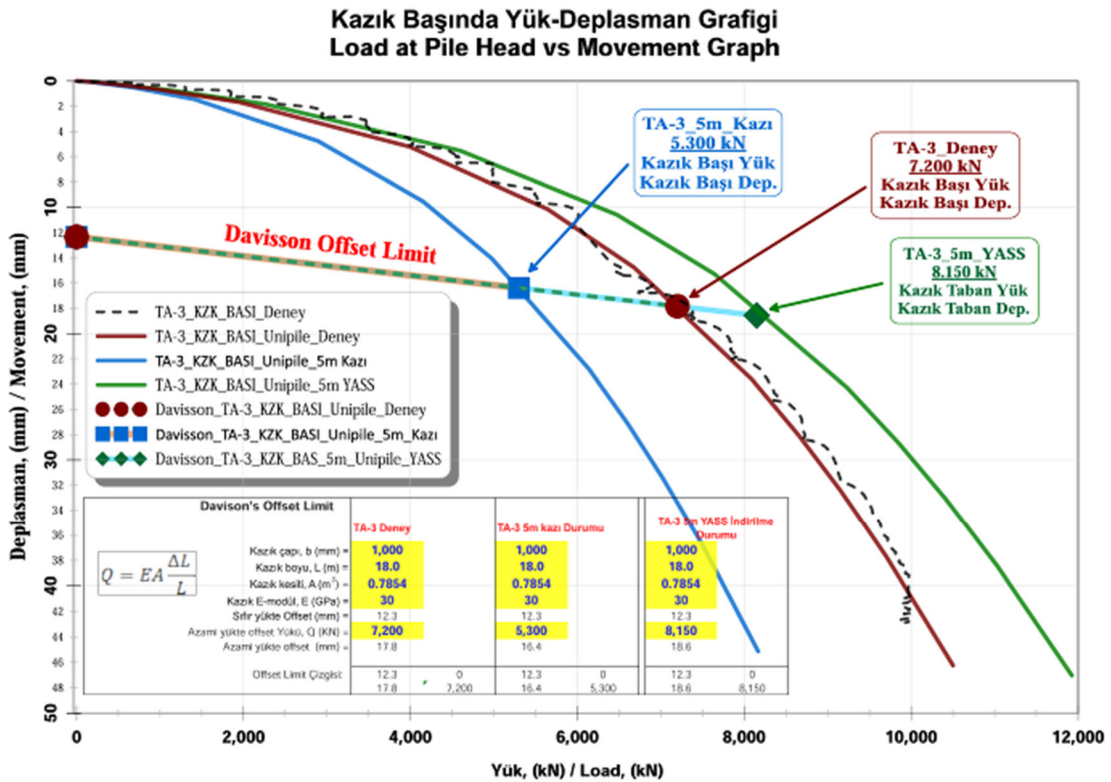


Şekil 27. Deney ve yeraltı su seviyesinin 5m indirilmesi durumları için simülasyonda elde edilen yük transfer ilişkisinin karşılaştırma grafiği



Farklı Şartlar İçin Yapılan Simulasyonların Değerlendirilmesi

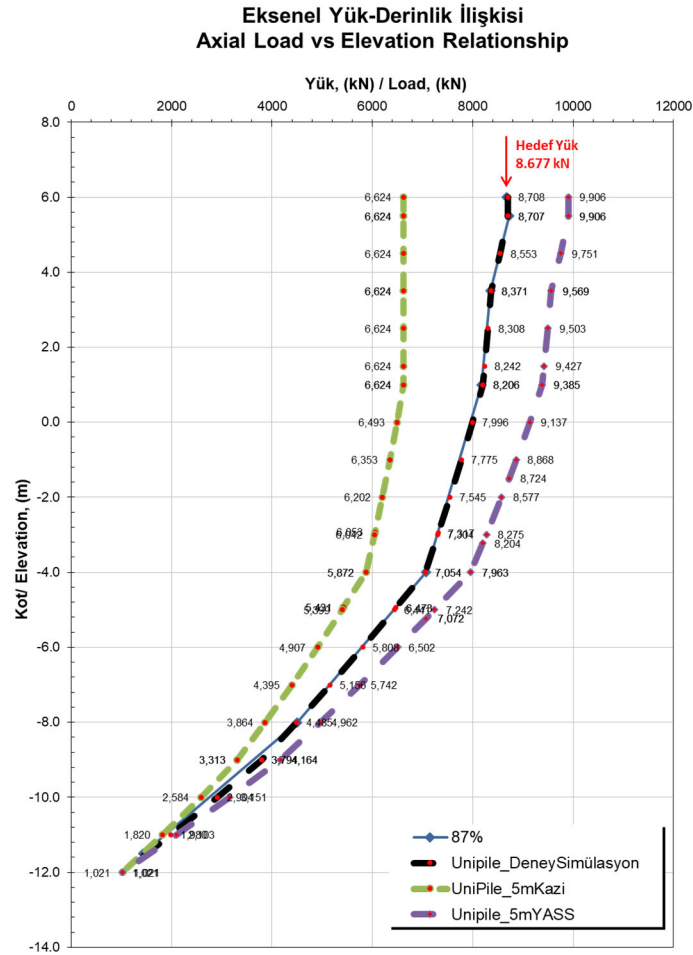
Yukarıda açıklanan 5m kazı yapılması ve mevcuttaki 2.5m derinlikteki yeraltı su seviyesinin 5m aşağı yani 7.5m derinliğe indirilmesi durumları için yapılan analizlerden elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkileri Şekil 28 'de karşılaştırılmıştır. Ayrıca, elde edilen yük transfer ilişkilerinin nihaî kazık dirençlerindeki etkisi Şekil 29 'de verilmiştir. Bu yük transferi ilişkisine bağlı olarak kazık boyunca mobilize olan shaft dirençleri değişimi ise Şekil 30 'da verilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde "Kazık Kapasitesi Kavramı", kazığın tek bir kazık kapasitesi değerinden daha ziyade kazık shaft dayanımı ve kazık taban dayanımı dikkate alınarak, kazık çapından ve geometrisinden bağımsız, deplasmana ve çevre zeminin efektif gerilme seviyesine bağlı davranış sergilediği görülmektedir. Konvansiyonel kazık kapasite yaklaşımı mantığı ile analizi yapılan 3 farklı durum için "Davisson Kapasite" değerlerinin, deney şartlarında 7.200 kN, 5m kazı yapılması durumunda 5.300 kN ve 5m YASS düşürülmesi durumunda ise 8.150 kN olarak elde edildiği görülmektedir (Şekil 28). Bunlardan hangisinin kazık kapasitesi olarak kullanılacağı konvansiyonel kapasite kavramının aciz kaldığı ve "Performansa Dayalı Kazık Tasarımının (PDK-T)" mühendislik projelerinde kazıklı temel tasarımında kullanılması gereğini ortaya koymaktadır. Bu durum ekseriyetle derin kazı yapılacak olan yapı temellerinde yüzeyden yapılan kazık yükleme deney sonuçlarına göre veya en iyi şartlarla kazı derinliği kadar shaft dayanımı minha edilerek hesap edilen kapasite üzerinden kazık tasarımı yaklaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kazı ve yeraltı su seviyesindeki değişimin kazık davranışına etkisinin kazı yapılan bölgedeki shaft dayanımı ile sınırlı olmadığı net bir şekilde bu örnekte görülmektedir (İnanır, 2024).



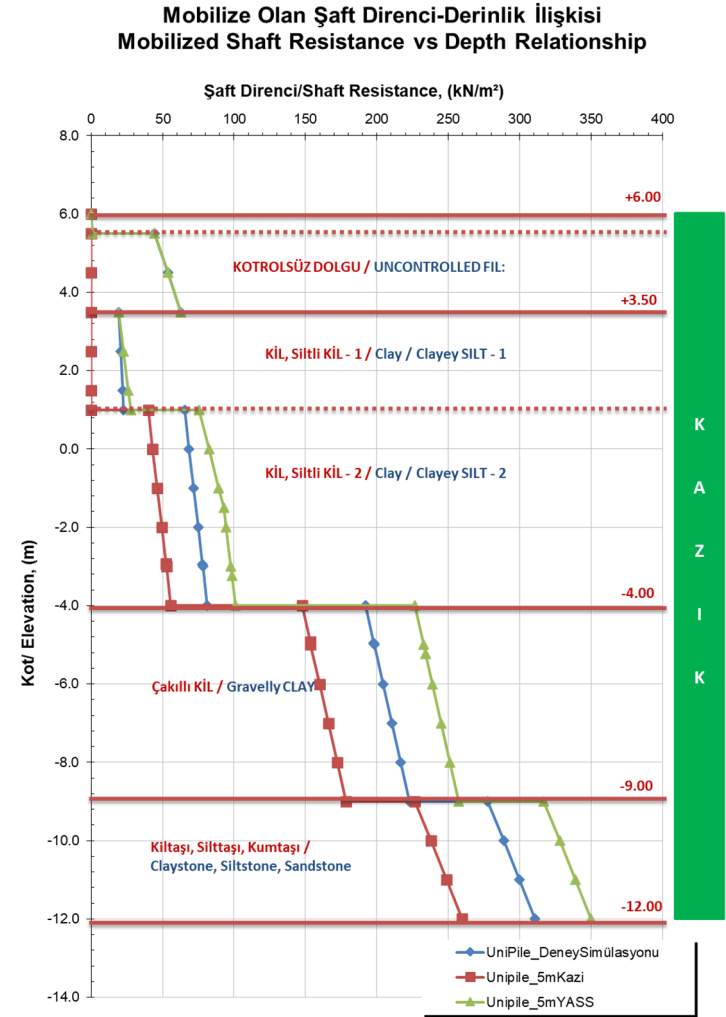
Şekil 28. Farklı çevre şartları için elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkisinden tahmin edilen "Davisson Kapasite" değerleri



Kazık Yükleme Deneyi - Ya Sonrası ?
Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T)



Şekil 29. Analiz sonucunda elde edilen kazık başı yük derinlik ilişkisi



Şekil 30. Farklı çevre şartları için elde edilen şaft direncinin tabaka ve derinlikle değişimi



4. SONUÇLAR

Geleneksel tarzda yapılan kazık veya dar/geniş kazık grubu tasarımında umumiyetle kazık kapasite ve kazık oturma hesapları ayrı ayrı yapılmaktadır. En basit yaklaşımla değerlendirildiğinde bile hesap edilen “kazık taşıma kapasitesi” belirli bir emniyet katsayısı nispetinde servis yükü “müsaade edilebilir yük” olarak kazığa tatbik edilmektedir. Bu yük altında kazık hareket ederek zemine yük aktarmakta ve zeminde de bu yükleme şartında elastik ve konsolidasyon oturması meydana gelmektedir. Kazık davranışının gerçek davranışa yakın modellenebilmesi için bu problemin tümleşik olarak çözülmesi gereği açıktır. Fellenius (1988) tarafından kazık veya dar/geniş kazık grupları tasarımında “kapasite”, “rezidüel yükler”, “negatif shaft sürtünmesi”/“aşağı çeken kuvvetler” ve “oturma” münasebetlerini dikkate alacak şekilde Birleştirilmiş Kazık Tasarımı Yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T) adımları ile taçlandırıldığında kazığın gerçek davranışının modellenmesi ve yapı-kazık-zemin etkileşiminin tasarıma dahil edilebilmesine imkan tanımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, enstrümente edilmiş bir kazık yükleme deneyi Birleştirilmiş Kazık Tasarımı (Unified Design Method) yaklaşımına uygulama örneği teşkil etmesi açısından adimsal olarak analiz edilmiştir. Bu örnekte deney özellikleri, deneyde ölçülen verilerinin analizi, kazık boyunca yük dağılımı hesabı ve shaft direnci dağılımı, ilave kazı yapılması ve yarılatı su seviyesinin değişmesi durumları için hesapları yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu adimsal yaklaşımda maksat, kazık yükleme deneyinde kazığın maruz kaldığı azami yükün tasarımda dikkate alınan proje yüküne veya kazık kapasitesine nisbeti belirlenerek bir miktar güvenle yükü taşıyıp taşımadığının kontrolü şeklinde değil, kazığın ömrü boyunca maruz kalacağı şartlara göre yük-deplasman performansının esas alınması şeklindedir.

Deney yapılan kazık bölgesinde 5m kazı yapılması ve mevcuttaki 2.5m derinlikteki yeraltı su seviyesinin 5m aşağı yani 7.5m derinliğe indirilmesi durumları için yapılan analizlerden elde edilen kazık başı yük deplasman ilişkileri karşılaştırılmıştır. Bu veriler değerlendirildiğinde “Kazık Kapasitesi Kavramı”, kazığın tek bir kazık kapasitesi değerinden daha ziyade kazık shaft dayanımı ve kazık taban dayanımı dikkate alınarak, kazık çapından ve geometrisinden bağımsız, deplasmana ve çevre zeminin efektif gerilme seviyesine bağlı davranış sergilediği görülmektedir. Konvansiyonel kazık kapasite yaklaşımı mantığı ile analizi yapılan 3 farklı durum için “Davisson Kapasite” değerlerinin, deney şartlarında 7.200 kN, 5m kazı yapılması durumunda 5.300 kN ve 5m YASS düşürülmesi durumunda ise 8.150 kN olarak elde edildiği görülmektedir.

Bunlardan hangisinin kazık kapasitesi olarak kullanılacağı konvansiyonel kapasite kavramının aciz kaldığı ve “Performansa Dayalı Kazık Tasarımının (PDK-T)” mühendislik projelerinde kazıklı temel tasarımında kullanılması gereğini ortaya koymaktadır. Bu durum ekseriyetle derin kazı yapılacak olan yapı temellerinde yüzeyden yapılan kazık yükleme deney sonuçlarına göre veya en iyi şartlarla kazı derinliği kadar shaft dayanımı minha edilerek hesap edilen kapasite üzerinden kazık tasarımı yaklaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kazı ve yeraltı su seviyesindeki değişimin kazık davranışına etkisinin kazı yapılan bölgedeki shaft dayanımı ile sınırlı olmadığı net bir şekilde bu örnekte görülmektedir.



KAYNAKLAR

- ASTM D1143/D1143M-20, (2020), "Standard Test Methods for Deep Foundation Elements Under Static Axial Compressive Load", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- Fellenius, B.H. (1988), "Unified design of piles and pile groups", Transportation Research Board, Washington, TRB Record 1169, pp. 75-82
- Fellenius, B.H. (1989), "Tangent Modulus of Piles Determined from Strain Data". ASCE, Geotechnical Engineering Division, the 1989 Foundation Congress, F.H. Kulhawy, Editor, Vol. 1, pp. 500-510.
- Fellenius, B.H. (2004), "Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis", Current Practice and Future Trends in Deep Foundations Geotechnical Institute GeOTRANS Conference, Los Angeles, July 27-30, 2004, Edited by J.A. DiMaggio and M.H. Hussein. ASCE Geotechnical Special-Publication, GSP 125, pp. 253-275.
- Fellenius, B.H. (2018), "Basics of Design of Piled Foundations (A Course) - "Capacity" and Load Transfer i.e., the response to load applied to a single pile", İstanbul, Türkiye November, 2018, p.18
- Fellenius, B.H., (2024), "Basics of Foundation Design", Electronic Edition, www.Fellenius.net
- Goudreault, P.A., Fellenius, B.H. (2014), UniPile Version 5, Users and Examples Manuals. UniSoft Geotechnical Solutions Ltd. [www.UniSoftLtd.com].
- İnanir, O.E. (2018), "Eksenel Yüklü Kazıklarda Yük Transfer İlişkisi ve Çekme Yüğüne Maruz Fore Kazıklarda Süreklilik", FC-TUGM Sempozyumu `Prof.Dr. Feyza Çiniciođlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliđi Sempozyumu`, İstanbul Üniversitesi, 10-05-2018, 92-106.
- İnanır, O.E., İnanır, M., (2022). Tekil Kazık Yük Transfer İlişkisi ve Eksenel Statik Basınç Kazık Yükleme Deneyi (S-KYD/B) Simülasyonu, Zemin Mekaniđi ve Geoteknik Mühendisliđi, 18. Ulusal Konferansı ZMGM-18, 29-30 Eylül 2022 Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- İnanır, O.E., (2024). Eksenel Statik Çekme Yüğüne Maruz Betonarme Tekil Kazık Davranışı ve Orijinal Bir Kazık Deney ve İmalat Yaklaşımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
ϕ'	: efektif sürtünme açısı	Q_n	: aşağı çeken kuvvetler (Drag Force)
σ'	: efektif gerilme	q_n	: negatif şaft sürtünmesi
$\sigma'_{z=\pi}$: kazık ucu düşey efektif gerilme	Q_u	: kazık kapasitesi
c'	: efektif kohezyon bileşeni	r_s	: şaft sürtünmesi
σ'_h	: kazığa etki eden yatay efektif gerilme	R_s	: toplam şaft direnci
σ'_z	: düşey efektif gerilme	R_s''	: denge eksenini alt kısım şaft direnci
τ_f	: kayma mukavemeti	r_t	: birim uç direnci
A_s	: kazık derinliğince birim şaft düzey alanı	R_t	: toplam uç direnci
A_t	: kazık taban alanı	δ	: kazık şaftı/zemin sürtünme açısı
D	: gömülü kazık boyu	β	: Bjerrum-Burland katsayısı
GS	: emniyet katsayısı	M	: kompozit kazık malzemesinin tanjant modülü
K	: toprak basıncı katsayısı	E_s	: kompozit kazık malzemesinin sekant modülü
K_0	: sükunetteki toprak basıncı katsayısı	σ	: gerilme (yük/kesit alanı)
L	: kazık boyu	$d\sigma$: $(\sigma_{n+1} - \sigma_1)$ yük kademeleri arasındaki gerilme değişimi
N_t	: uç "kapasite" katsayısı	a	: tanjant modülü çizgisinin eğimi
Q_a	: toplam üst yapı yükü	ϵ	: ölçülen birim deformasyon
Q_d	: zati yük	$d\epsilon$: $(\epsilon_{n+1} - \epsilon_1)$ yük kademeleri arasındaki birim deformasyon değişimi
Q_l	: hareketli yük	b	: tanjant modül çizgisinin y eksenini bileşeni

