

TEKİL KAZIK YÜK TRANSFER İLİŞKİSİ VE EKSENEL STATİK BASINÇ KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/B) SİMÜLASYONU

LOAD TRANSFER MECHANISM FOR SINGLE PILE AND SIMULATION OF A PILE LOADING TEST

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 uç ve shaft ayrımı belirtilerek hesaplanır. Mevcut şartnamelerde “*statik kazık hesabı*” yaklaşımı çoğu kez temelin oturmasını göz ardı etmektedir. Ancak, kazığa tatbik edilen yük, kazığın deplasmanı ve zemin oturması kazığın yük dağılımı davranışını kontrol eden ayrılmaz bileşenleridir.

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, tekil kazık yük transfer ilişkisi detaylandırılmış ve örnek bir enstrümante edilmiş statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) sonuçları değerlendirilerek “*Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin*” oluşturulması aşamaları özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyi, aletsel gözlem, performansa dayalı kazık tasarımı, kazık süreklilik/bütünlük ve çapraz kuyu ultrason deneyi

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

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

ABSTRACT

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, the pile load transfer mechanism is briefly summarized and 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.

Keywords: *integrity, crosshole logging, tension, crack, pull-out, instrumented pile loading test*

1. GİRİŞ

Yapılarda sığ temel (sömel, mütemadi, radye, v.s.) çözümlerinde mevcut zeminde müsaade edilebilir limitlerin üzerinde oturmalar olduğu takdirde, ekseriyetle derin temel (çakma prekast/çelik kazık, fore kazık, baret, v.s.) çözümlerine gidilmektedir.

Enstrümente 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 uç ve shaft ayrımı belirtilerek hesaplanır. Mevcut şartnamelerde "*statik kazık hesabı*" yaklaşımı çoğu kez temelin oturmasını göz ardı etmektedir. Ancak, kazığa tatbik edilen yük, kazığın deplasmanı ve zemin oturması kazığın yük dağılımı davranışını kontrol eden ayrılmaz bileşenleridir.

Enstrümente edilmiş statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) kazık davranışının değerlendirilmesini ve $t-z$ ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılması ve "*Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin*" oluşturulmasına imkan vermektedir. Bu sayede elde edilen etkileşim modeli "*Geoteknik Model*" e dönüştürülerek farklı kazı, su seviyesi değişimi vs durumları için kazık davranışının analiz edilmesine imkan vermektedir.

karşı izafî hareketin kazık lehine pozitif olduğu bölgede (zeminin oturmasının kazığın deplasmanından az olduğu bölgede) gelişen pozitif şaft direnci (R_s) ve kazık uç direnci (R_t) toplamı ile dengelenmektedir (Fellenius, 1984), Bu denge noktasında (denge eksen / neutral plane) oturmalar dengesi ve kuvvetler dengesi söz konusudur (Şekil 1), Performansa dayalı kazık tasarımı;

- *Kazık deplasmanını dikkate alan muhtelif kazık kapasitesi tahmin yöntemleri kullanılarak ön-tasarımın yapılması,*
- *Enstrümente 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,*

adımlarından teşekkül ettiği söylenebilir (Şekil 2),



Şekil 2. Performansa dayalı kazık tasarımı adımları

2.2. KAZIK KAPASİTESİ TAHMİN YAKLAŞIMLARI

2.2.1. Arazi Deneyleri ile Doğrudan Tahmin Yaklaşımları

Arazi deneylerinde ölçülen parametrelerin veya indeks özelliklerinin direkt korelasyonlarda kullanılarak kazık kapasite tahmini yaklaşımları;

- *SPT Korelasyonu ile “Standart Penetrasyon Deneyi / Standard Penetration Test”, (Meyerhof, 1976; Decourt, 1989;1995)*
- *CPT/CPTU Korelasyonu ile “Koni Penetrasyon Deneyi / Cone Penetration Test”, (Schmertmann v.d. 1975 ve 1978; DeRuiter v.d. 1979; Bustamante v.d. 1982; Meyerhof 1951- 1963-1976; Jardine v.d., 2005; Eslami v.d., 1997; Tümay v.d., 1981)*

- *PMT Korelasyonu ile “Presiyometre Deneyi / Pressuremeter Test”, (Abchir v.d., 2016; Gambin 1963, Frank v.d., 1982)*
- *DMT Korelasyonu ile “Dilatometre Deneyi / Dilatometer Test”, (Powell v.d., 2001; Lechowicz v.d., 2017)*

Başlıklarında özetlenebilir.

2.2.2. Analitik Tahmin Yaklaşımları

Kazık davranışının sayısal olarak modellenmesi maksadı ile analitik metodlar geliştirilmiştir.

- *Boşluk Genişleme Metodu / Cavity Expansion Method (CEM), (Hill, 1950; Gibson v.d., 1961; Vesic, 1972; Randolph v.d., 1979)*
- *Birim Deformasyon İzi Metodu / Strain Path Method (SPM), (Baligh, 1975-1985, Whittle, 1987)*

CEM, boşluk genişleme metodunda, kazık imalatı zemin kütlesinde silindirik boşluğun genişlemesi ile simüle edilmektedir. SPM, birim deformasyon izi metodunda ise kazık etrafındaki zemin iki boyutlu ideal sıvı akışı ile modellenmektedir. Gerilmeler ise, uygun bünye denklemleri kullanılarak akım ağlarının kazığın etrafındaki birim deformasyon izleri olarak modellenmesi ile hesaplanmaktadır.

2.2.3. Ampirik Tahmin Yaklaşımları

Pratik kazık tasarımı maksadı ile kazık yükleme deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında aşağıdaki ampirik metodlar geliştirilmiştir.

- *Toplam Gerilme Analiz Metodu (α Method) (Tomlinson, 1957; Peck, 1958; Meyerhof, 1976; McClelland, 1974)*
- *Lambda Metodu (λ Method) (Vijayvergiya v.d., 1972)*
- *Efektif Gerilme Metodu (β Method) (Zeevaert, 1959; Johannessen ve Bjerrum, 1965; Burland, 1973; Meyerhof, 1976)*

Drenajsız kayma mukavemeti (s_u) parametresi esasen bir zemin özelliği olmadığı, deney yönteminden kaynaklı elde edildiği için kazık kapasite tahmin yaklaşımı olarak “ α Metodu” na şüphe ile yaklaşılmaktadır. Kazık davranışı esasen efektif gerilme problemi olmasına rağmen, “ α Metodu” pratik ve zemin parametresinin kolay elde edilebilir olması hasebiyle kullanımı yaygın olarak devam etmektedir (O’Neill, 2001), “ λ Metodu” özellikle açık deniz platformlarında aşırı yüklenmiş uzun kazıklar için çok sayıda yapılan statik kazık yükleme deneyi sonuçlarının korelasyonu ile ortalama shaft direncinin kazık derinliğine bağlı bir fonksiyonla (efektif düşey gerilme ve drenajsız kayma mukavemeti parametrelerine bağlı) tanımlanmıştır (Vijayvergiya v.d., 1972),

Zemin yapısındaki kayma gerilmeleri sadece dane çatısı tarafından taşınabildiği dikkate alındığında, kazık yük transferinin zemin temel parametrelerine bağlı olarak efektif gerilme prensipleri “ β Metodu” ile kazık tasarımına yönelik Zeevaert (1959), Johannessen ve Bjerrum, (1965), Burland (1973), Meyerhof (1976) çalışmaları yayınlanmıştır. Şaft sürtünmesinin düşey efektif gerilmeye bağlı bir fonksiyon olarak hesaplanması ve kazık yükleme deneyleri ve ölçümlerin sonuçları ile ilişkileri incelemiştir. Kazık boyunca şaft direnci, efektif gerilme prensibine göre gelişir ve bu davranışı kazık gerçek davranışına en yakın olarak Beta Metodu ile analiz edebiliriz (Fellenius, 2018).

Şaft Sürtünmesi Hesabı (β Metodu ile)

Zeminde bir düzlemde, efektif gerilme olmak üzere, kayma mukavemeti (τ_f) genel formda aşağıdaki gibi formülüze edilebilir;

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (1)$$

Bütün zemin şartlarında kazık imalatı esnasında şaft çeperindeki zemin az yada çok örselenmekte ve kazık çevresinde pozitif veya negatif artık boşluksuyu basıncı oluşmaktadır.

“ β Metodu” kapsamında artık boşluksuyu basıncı sönmüldüğü ve kazık imalatı esnasında zeminin örselenme etkisiyle sıfır efektif kohezyon bileşeni ve kazık yakın çevresindeki bu ince tabakanın hızlı drene olduğu kabulü ile şaft sürtünmesi (r_s);

$$r_s = \sigma'_h \cdot \tan \delta \quad (2)$$

Şeklinde formülüze edilebilir.

Yatay efektif gerilme ve düşey efektif gerilme nispeti olan toprak basıncı katsayısı (K) ilişkisi kabulü ile Formül 2 basitleştirilerek şaft sürtünmesi (r_s),

$$r_s = \sigma'_z \cdot K \cdot \tan \delta \quad (3)$$

şekilde düzenlendiğinde ($K \cdot \tan \delta$) çarpımı beta (β) katsayısı olarak dikkate alınır ise;

$$r_s = \beta \cdot \sigma'_z \quad (4)$$

şaft sürtünmesi (r_s) formülü yukarıdaki genel formuna dönüşür.

Yüzeyden “z” derinliğine kadar şaft sürtünmeleri toplanarak elde edilen Toplam Kazık Şaft Direnci (R_s) aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Şekil 1);

$$R_s = \int A_s \cdot r_s \cdot dz = \int A_s \cdot (\beta \cdot \sigma'_z) \cdot dz \quad (5)$$

Uç Direnci Hesabı

Kazık uç direnci, uç deplasmanının bir fonksiyonu olarak mobilize olmaktadır. Hesap yöntemi sürekliliği açısından nihai birim uç direncini (r_t) kazık ucu seviyesindeki efektif gerilme ($\sigma'_{z=D}$) ile orantılı olduğu kabulü ile;

$$r_t = N_t \cdot \sigma'_{z=D} \quad (6)$$

Formülize edilebilir. Elde edilen nihai birim uç direnci (r_t) kazık taban alanı (A_t) ile çarpılarak toplam uç direnci (R_t) elde edilmektedir.

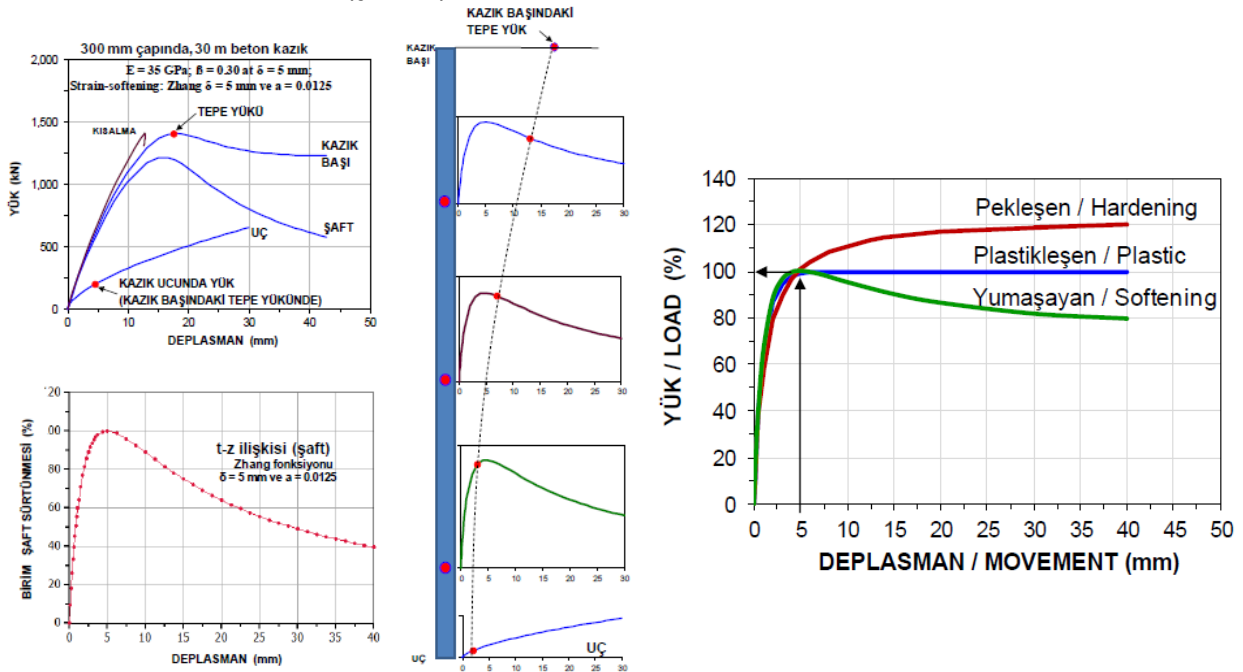
$$R_t = A_t \cdot r_t = A_t \cdot N_t \cdot \sigma'_{z=D} \quad (7)$$

Ancak, ne birim uç direncinin nihai değeri ne de efektif gerilme ilişkisi gerçek değildir (Fellenius, 2022), Esasen birim uç direnci zeminin ve kazığın deplasmanına bağlı olarak artmaktadır. Kazık ucu yük-deplasman ilişkisi kazık tabanındaki zeminin rijitliğine ve efektif gerilmeye bağlı bir fonksiyon olarak (q-z ilişkisi) davranış sergilemektedir. Uç direnci pekleşen bir karakter sergilemekte ve artan kazık uç deplasmanı nispetinde artış göstermektedir.

Yük Transferi İlişkisi

Şaft sürtünmeleri çok düşük izafi hareket mertebelerinde dahi büyük nispette mobilize olmaktadır. Üst yapıdan aktarılan yük kazık başına ilk tatbik edildiğinde ancak çok az bir kısmı kazık ucuna ulaşmaktadır. Negatif şaft sürtünmesi gelişmesine bağlı olarak, denge eksenine kadar aşağı çeken kuvvetler yapı yüküne ilave olarak kazığa aktarılır. Bu yükleme altında kazık, elastik olarak kısalarak ve hareket ederek denge eksenini mobilize olan şaft direnci ve uç direnci ile karşılık vermektedir.

Kazık şaft direnci efektif gerilmenin bir fonksiyonu ve birim şaft sürtünmesi-deplasman gelişimi (t-z ilişkisi) zemin ve kazık özelliklerine bağlı olarak genellikle elasto-plastik, yumuşama veya pekleşme davranışı sergileyerek mobilize olmaktadır. Kazık uç direnci, uç deplasmanın rijitliğe bağlı bir fonksiyonu olarak oransal olarak artan bir ilişki (q-z ilişkisi) ile mobilize olmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. t-z ve q-z ilişkisi ile yük-deplasman ilişkisinin karşılaştırılması (Fellenius, 2022)

3. BİRLEŞTİRİLMİŞ KAZIK TASARIM METODU – UNIFIED DESIGN METHOD

Geleneksel tarzda yapılan kazık veya dar/geniş kazık grubu tasarımında umumiyetle kazık kapasite ve kazık oturma hesapları müstakil olarak yapılmaktadır. Esasen en basit yaklaşımla değerlendirildiğinde bile hesap edilen “kazık taşıma kapasite” 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) çalışması ile kazık veya dar/geniş kazık grupları tasarımında “kapasite”, “rezidüel yükler”, “negatif shaft sürtünmesi” ve “oturma” münasebetlerini dikkate alacak şekilde Birleştirilmiş Kazık Tasarımı Metodunu açıklamıştır.

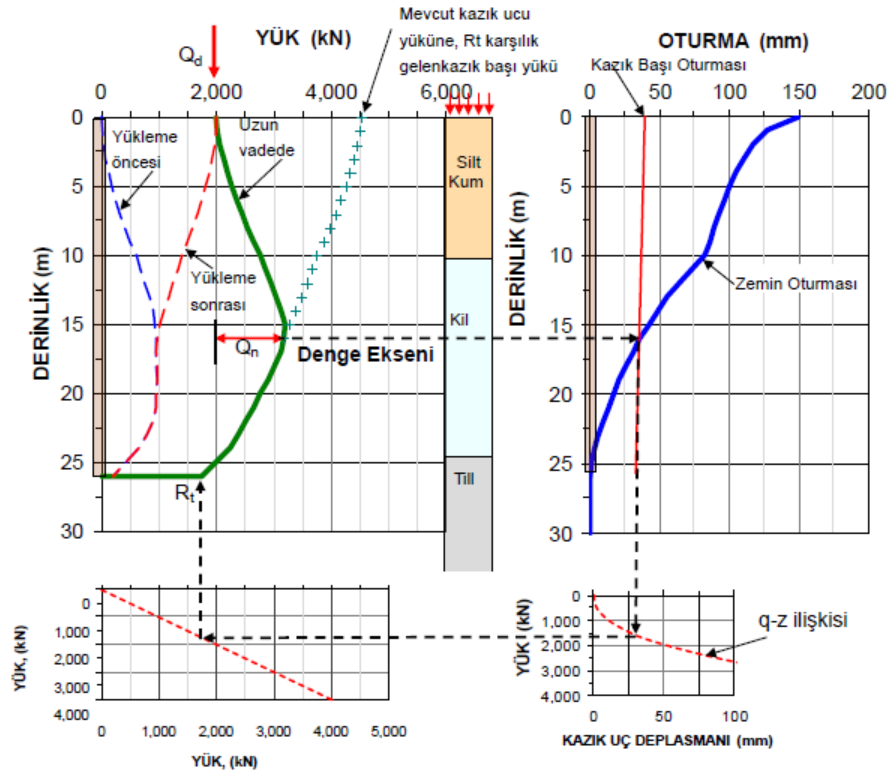
İzafî hareket istikametinin mobilize olan shaft sürtünmesine etkisi bulunmamaktadır. Basınç yada çekme veya negatif yada pozitif olması durumlarında hep aynıdır. Ayrıca, shaft sürtünmesinin mobilize olması için gerekli izafî hareket miktarı kazık çapından bağımsızdır (Fellenius, 2022).

3.1. BİRLEŞTİRİLMİŞ KAZIK TASARIM METODU; "KAPASİTE", AŞAĞI ÇEKEN KUVVETLER, OTURMA

Tekil veya dar grup kazıklardan (4 sıradan az) oluşan derin temellerin yük ve oturmaya bağlı tasarımı aşağıdaki adımlardan müteşekkildir (Fellenius 1984, 1988, 2004, 2022),

- (1) *Mevcut zemin bilgilerine bağlı olarak yukarıda bahsi geçen yaklaşımlarla yük transfer ilişkisinin tayini için statik hesap yapılması,*
- (2) *Kazığın malzeme mukavemeti açısından tahkiki; maruz kaldığı azami yükün (ölü yük ve aşağı çeken kuvvetlerin toplamı) belirlenerek kazığın yapısal olarak mukavemetinden uygun bir emniyet katsayısı (genellikle 1.5 uygundur) ile küçük olduğunun doğrulanması,*
 - (a) *Kazığın maruz kaldığı azami yük denge eksenini yerinin bir fonksiyonudur ve uç direncinin ne kadar mobilize olduğuna ve negatif/pozitif shaft sürtünmesi geçiş bölgesi genişliğine bağlıdır. Denge eksenini yeri tayininde emniyet katsayısına bölünmemiş yükler kullanımı önem arz etmektedir.*
- (3) *Oturma hesaplanması ve beklenen oturma profilinin tespit edilmesi,*
 - (a) *Kazıkların maruz kaldıkları yapı yükü (zati yük) altındaki deplasmanların ve bu yük sebebiyle kazık ucundaki zemin tabakalarında meydana gelen gerilme artışı ile oluşan oturmaların yapı için müsaade edilebilir farklı ve toplam oturma limitleri dahilinde olduğunun tetkiki gerekmektedir.*
 - (b) *Denge ekseninin yeri kazık uç hareketinin bir fonksiyonudur. Kazık ucu yük – deplasman ilişkisine (q - z eğrileri) bağlı olarak kazık kapasite tasarımında iteratif bir yaklaşımla kazık ucu yükü, kazık ucu deplasmanı ve denge eksenini lokasyonu arasında bir optimizasyon yapılmalıdır. Oturma analizi olması hasebiyle emniyet katsayılarına bölünmemiş yükler ile analiz yapılmalıdır.*
- (4) *Kazık imalat aşamalarının kontrol altında tutulması ve gözlem yapılması (kalite güvence kontrolleri ve kayıtların doğru tutulmasının temini, ekipman ve metod seçimi için gerekmesi halinde ön hesaplar – çakım tahmini analizi ve şahmerdan tercihi, kuyu stabilitesi, v.s. gibi),*
- (5) *Yapının müsaade edilebilir farklı ve toplam deplasman miktarına karşılık gelen kazık toplam direncinin, kazıkların maruz kaldıkları toplam yapı yüklerinin (zati yük ve hareketli*

olan uç direnci ve şaft sürtünmesi dağılımı birlikte değerlendirilerek kuvvet ve oturma dengesi (denge eksen) seviyesi belirlenmektedir.



Şekil 4Şekil 4’deki grafikten görüldüğü üzere kazığa aktarılan yükün veya oturmaların artması veya azalması halinde “denge eksenı” derinliğı değışmektedir. Bu mekanizmaya bağılı olarak kazık ucu deplasman miktarı değışmekte ve karşılığında kazık ucunda mobilize olan yük değışimi ile “denge eksenı” derinliğı etkilenmektedir (Şekil 4).

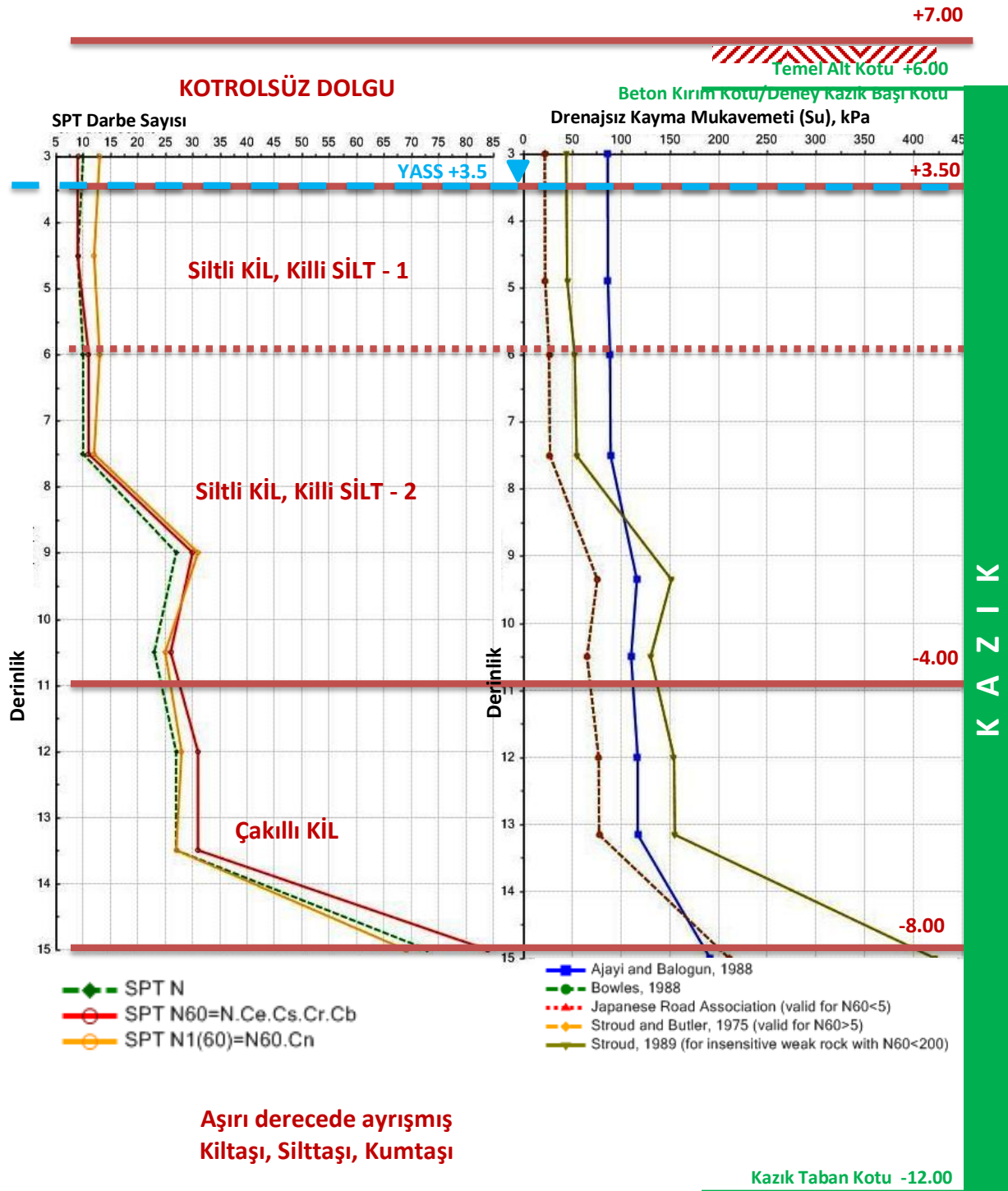
Kazık davranışı değişen yükleme ve oturma şartlarına bağlı olarak bu çevrim dahilinde bir dengeye ulaşmaktadır. Kazık tasarımı sadece tek bir güvenlik katsayısına bağlı analiz yaklaşımından ziyade, kazık zemin etkileşimindeki kuvvetler, zemindeki oturmalar ve kazık deplasman ilişkileri gibi bütün veçheleri dikkate alınarak analiz edilmelidir (Fellenius, 2022).

4. ENSTRÜMANTE EDİLMİŞ STATİK BASINÇ KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/B)

Bir proje kapsamında; OD1000mm çapında ve $L_{net}=18.00m$ (Deney Kazık Başı Kotu +6.00 ve Kazık Taban Kotu -12.00 olmak üzere) boyunda bir fore kazık üzerinde kapasitesinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümente edilmiş eksenel statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B)” yapılmıştır. Bu çalışmada deney özellikleri, deneyde ölçülen verilerinin analizi, kazık boyunca yük dağılımı hesabı ve shaft sürtünmesi dağılımı analiz edilmeye çalışılmıştır. 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.

4.1. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

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 5)



Şekil 5. Deney kazığı bölgesini temsil eden zemin profili

4.2. DENEY KAZIĞI VE ENSTRÜMANTASYON DETAYLARI

4.2.1. Deney Kazığı Detayları

Deney 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 tekniği 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 (çapraz kuyu ultrason deneyi maksadıyla da kullanılacak olan) ve donatı tipi birim deformasyon ölçerler ile enstrümante edilerek hazırlanan donatı kafesi (22nos $\Phi 25\text{mm}$ boyuna donatı ve $\Phi 12/100\text{mm}$ etriye ile teşkil edilerek) tek parça halinde kuyuya indirilmiştir (Şekil 6). Akabinde C40/50 beton sınıfı ile betonlama tremi borusu kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. Enstrümante edilmiş deney kazığı donatı kafesi kaldırma operasyonu genel görünüş

4.2.2. Kazık Bütünlük/Süreklilik Deneyi ve Çapraz Kuyu Ultrason Deneyi

Deney kazığı kırımı temelaltı kotuna (+6.00) kadar yapıldıktan sonra, Kazık bütünlük/süreklilik deneyi, zaman alanında analiz (sonic integrity test, SIT; pulse echo test, PET; pile integrity test, PIT) usûlü ile ASTM D5882.16 (2016) uyarınca Piletest marka PET-BT cihazı ile yapılmıştır. Çapraz kuyu ultrason deneyi, (Crosshole logging, CSL / Crosshole ultrasonic monitor, CHUM) ASTM D6760.16 (2016) uyarınca Piletest marka CHUM ekipmanı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 7).

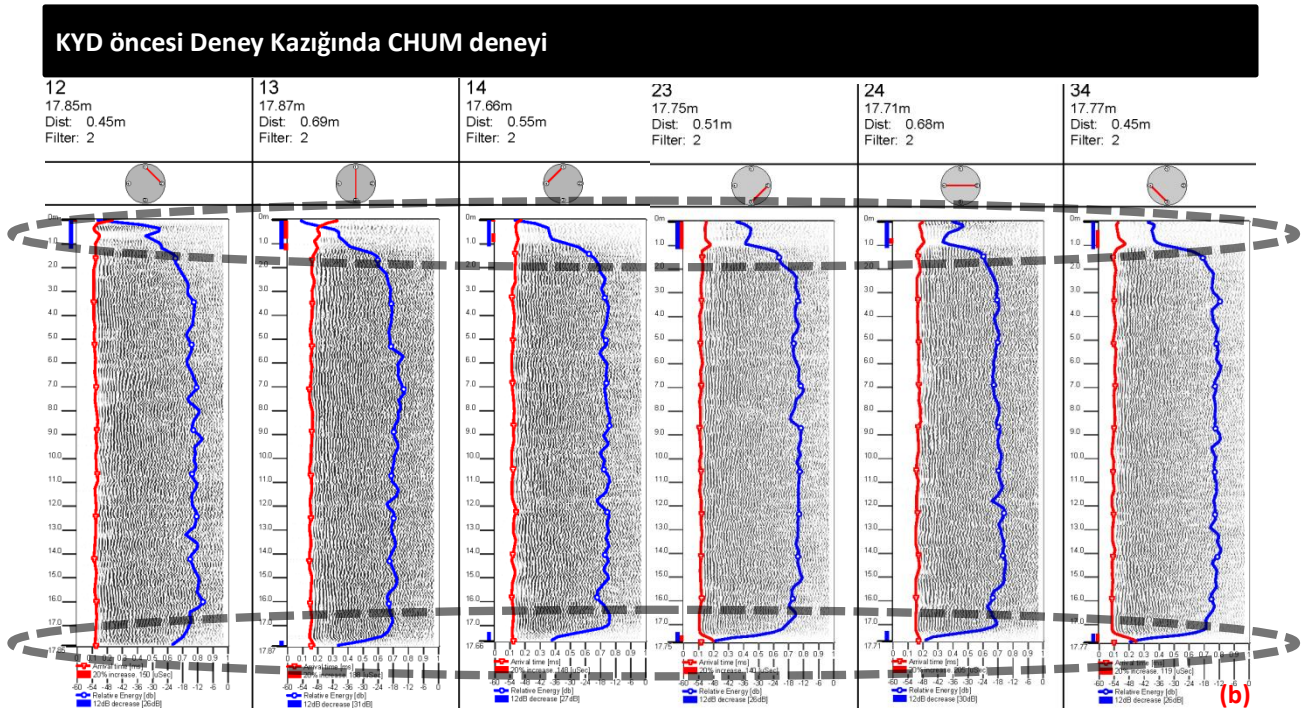
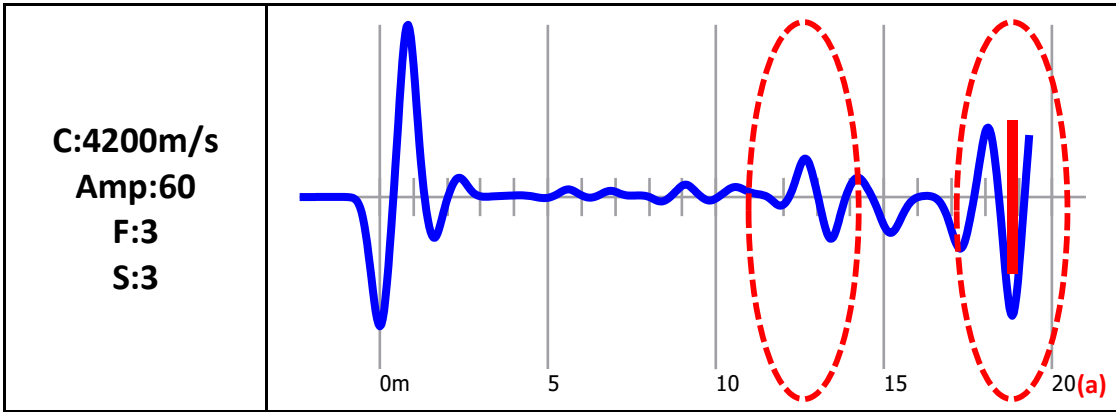
Kazık bütünlük/süreklilik deneyi kapsamında elde edilen reflectogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde 4200m/sn dalga hızı için yaklaşık 18.8m derinliğinde belirgin uç sinyali elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık 12.5m mertebelerinde derinlikte muhafaza borusunun bittiği bölgede anormallik/gariplik (anomaly) ve Sapma (flaw) sinyali görülmektedir (Şekil 8a).

Çapraz kuyu ultrason deneyi alıcı ve verici aynı seviyede olacak şekilde standart tarama usulü ile yapılmıştır. Bu şekilde yapılan deneyde kazık başında ilk yaklaşık 80-100cm ve kazık sonunda ise yaklaşık 30-60cm mertebelerinde dalga ilk varış zamanı geckmesi (>20% FAT, First Arrival Time) ve 12 dB den daha fazla Enerji azalımı tesbit edilmiştir (Şekil 8(b)).

Bu kapsamda kazık başında deney başlık imalatı öncesinde beton kırımı proje mukavemetindeki beton seviyesine kadar yapılarak deneye etkisi bertaraf edilmiştir. Kazık ucunda literatürde “yumuşak uç / soft toe” olarak bilinen sapma (flaw) veya kusur (defect) deney sonuçları değerlendirilmesinde dikkate alınmıştır.



Şekil 7. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi ve çapraz kuyu ultrason deneyi çalışmalardan genel görünüş



Şekil 8. (a) Kazık bütünlük/süreklilik deneyi reflektogram (b) çapraz kuyu ultrason deneyi grafikleri

4.2.3. Enstrümantasyon Detayları

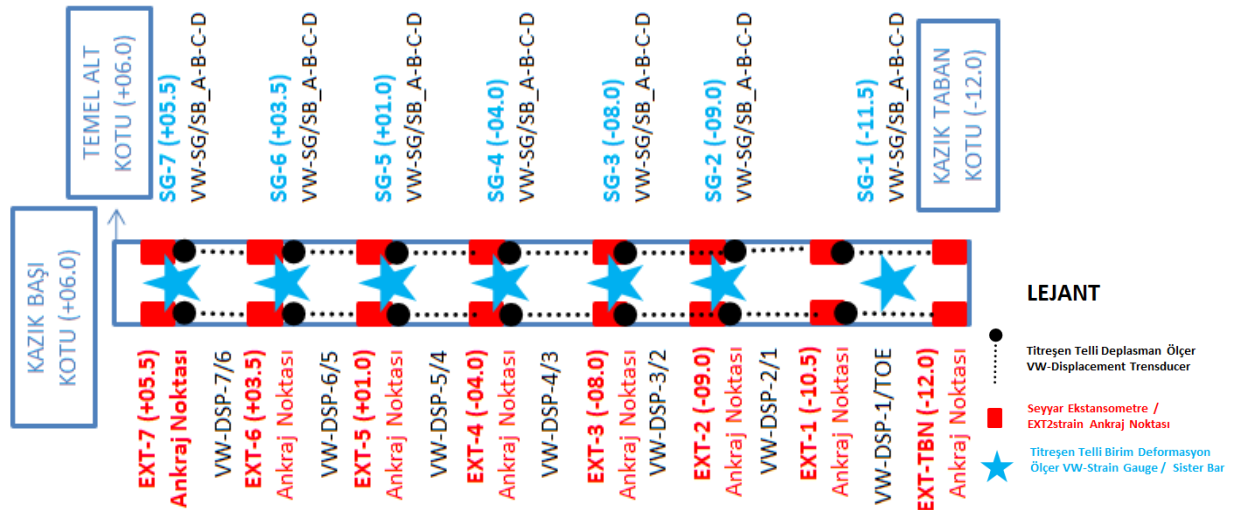
Deney kazığına yedi (7) seviyede Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçer (VWSG/SB, Vibrating Wire Sister Bar Type Strain Gauge) her seviyede karşılıklı ikişer çiftten dört (4) adet olmak üzere toplam yirmisekiz (28) adet yerleştirilmiştir. Karşılıklı kuvvet çiftlerinin 4 adet SG ile ölçülmesi ölçüm doğruluğu (accuracy) ve yedeklemesi (redundancy) açısından ehemmiyet arz etmektedir. Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için Tij tipi ekstansometre (Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deney esnasında çapraz kuyu ultrason deneyi (CSL/CHUM) kapsamında kullanılan 2" çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine seyyar ekstansometre (EXT2strain) yerleştirilmiştir. Ankraj noktaları arasında kısalma/uzama ölçülerek ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon hesaplanmaktadır. Bu maksatla 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 9'da ve yerleşim detayları ve listesi ise Şekil 10 ve Tablo 1'de verilmiştir.

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



Şekil 9. Yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş



Şekil 10. Donatı tipi birim deformasyon ölçer (VWSG/SB) ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) kazık boyunca yerleşiminin şematik gösterimi

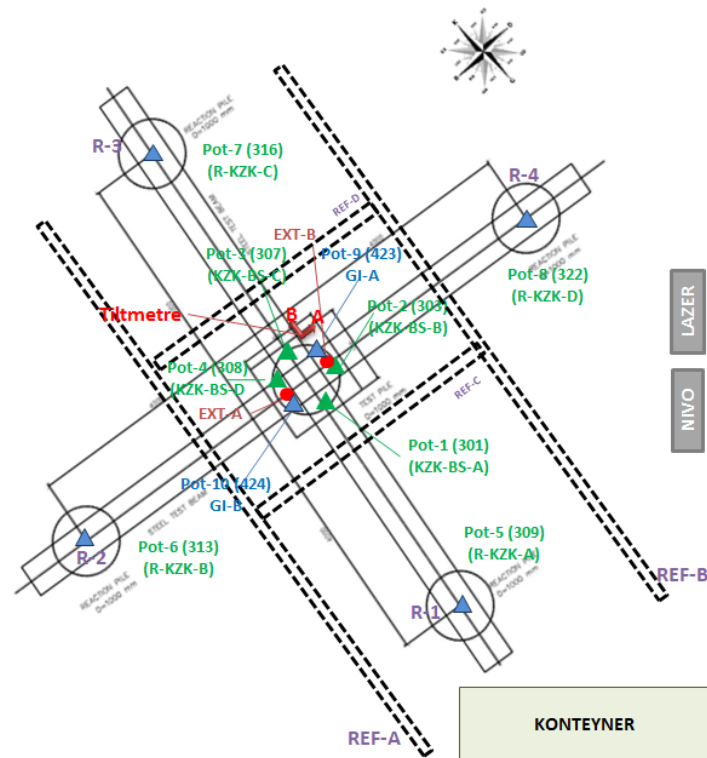
4.2.4. Kazık Yükleme Deneyi

Deney basınç kazığına yük dört (4) adet reaksiyon kazığından faydalanılarak hidrolik krikolar vasıtasıyla aktarılmıştır. Hidrolik krikolara hava tahrikli hidrolik pompa ile hidrolik basınç uygulanmıştır. Pompa hattındaki basıncı gözlemlemek 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 eksantrikliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrisite etkisinin bertaraf edilebilmesi amacıyla yarım küresel mafsalları kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirişine, tij cinsi (Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) muhafaza borularına sabitlenen deplasman ölçerler izafi hareketi ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüş Şekil 11 ve Şekil 12’de 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 krikoların 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 13). Azami deney yüküne (%100=9.959 kN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılması 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. kademedен sonra normal %5 adımlarla 15 dk bekleme ile yükleme yapılarak %100 deney yüküne ulaşılmıştır.

Tablo 1. Eksenel statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) özet bilgileri

Deney Kazığı	$D=1.000\text{mm}$, $L_{\text{net}}=18.0\text{m}$
Deney Düzeneği	Eksenel statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B) Reaksiyon kazıkları kullanılarak
Maksimum Deney Yüğü	Planlanan %200 – 9.959 kN (S-KYD/ B) Gerçekleşen %200 – 9,959 kN (S-KYD/ B)
Hidrolik Teçhizat	15.000 kN kapasiteli Hidrolik Kriko
Yük Kontrolü	Oransal Servo Valf ile Hava tahrikli hidrolik otomatik pompa kontrolü
Yük Hücresi	Encardio-Rite ELC-150S-H Elektrik Direnç Cinsi Yük Hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) 1 adet x 12.5 MN
Deplasman Ölçer	Opkon SLPS100, 100mm stroklu, direnç tipi deplasman ölçer (4 adet deney kazığının başında, 4 adet Reaksiyon Kazıklarında 1 adet krikoda — Toplam 9 adet) Opkon SLPS25, 25mm stroklu, direnç tipi deplasman ölçer (2 adet Tij cinsi =Telltale başında — Toplam 2 adet) Geokon titreşen telli deplasman ölçer (VW-DT) 25mm stroklu 2 adet / seviye x 7 seviye =14 adet VW-DT
Birim Deformasyon Ölçer	Encardio-Rite EDS-12V titreşen telli donatı cinsi birim deformasyon ölçer (Vibrating wire Sister Bar Type Strain Gauge) 4 adet/seviye x 7 seviye = 28 adet Geokon A9 Model “Retrievable Extensometer – EXT2strain” 2 adet/seviye x 8 seviye =16 adet ankraj noktali
Basınç Ölçer	WIKA HP25 Model 1 adet basınç ölçer
Veri Kayıt Ekipmanı	RST Instruments Flexdaq Model Data Logger 2 adet Campbell Scientific CR6&CR1000 Rasat Cihazı
Veri Kayıt Aralığı	60 Saniye



Şekil 11. Deney düzeneği ve ölçüm aleti yerleşimi şematik gösterimi



şekil 12. Deney düzeneği, 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	0	M/D
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	

Şekil 13. Deney yükleme programı

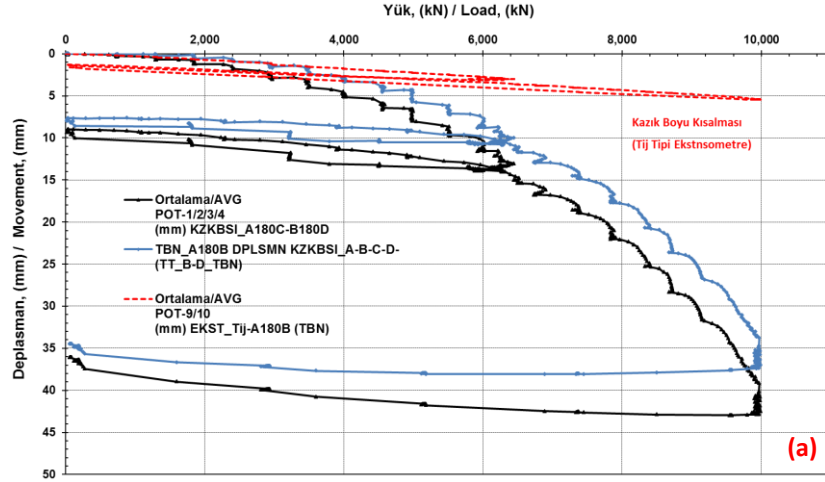
4.3. EKSENEL STATİK BASINÇ KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/B) SONUÇLARI

Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçerler (Sister Bar Type Vibrating Wire Strain Gauge, VWSG/SB) ve Tij cinsi ekstansometreler analize esas veri olarak kullanılmıştır. Bütün birim deformasyon değerleri deney başlangıcında sıfırlanarak (kazıktaki mevcut reziduel gerilmeler ihmal edilerek) relatif değişimi deney boyunca gözlenmiştir.

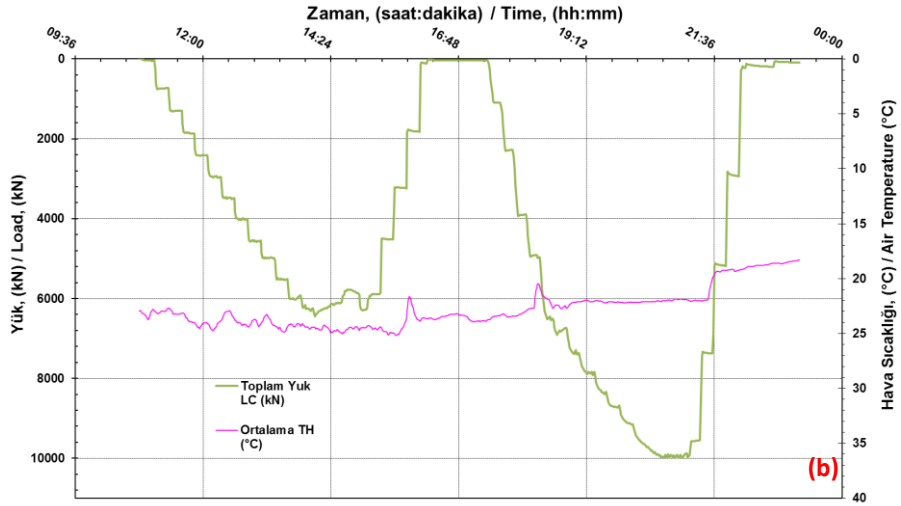
Deney sonuçlarına göre, elde edilen yük-deplasman grafiği, yük-zaman grafiği ve deplasman-zaman grafikleri Şekil 14’de verilmiştir. Deney kazık başının ve kazık ucunun deplasmanı tij cinsi ekstansometrelere (Tell-tale) bağlanan deplasman ölçerler ile ölçülmüştür. Toplam on (10) adet POT ve ondört (14) 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.

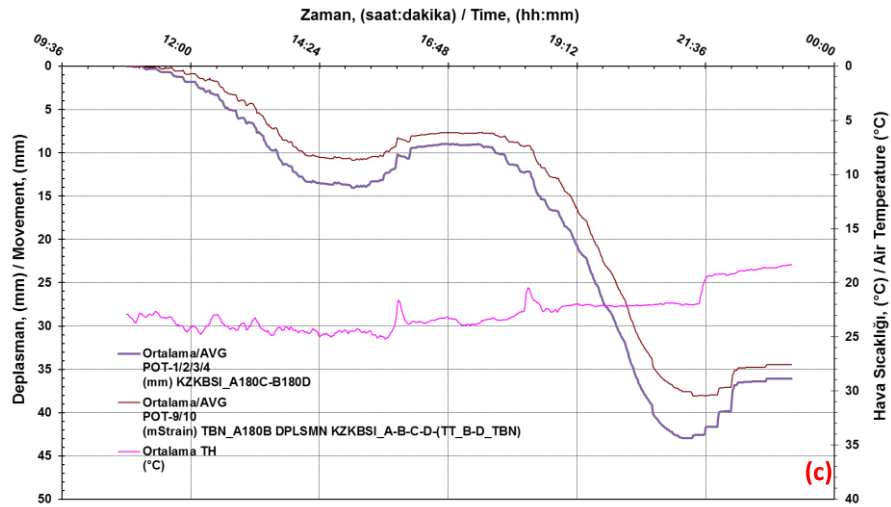
Kazık Başında Yük - Kazık Başında / Kazık Tabanında Ort. Deplasman Grafiği



Kazık Başında Yük - Zaman Grafiği



Kazık Başında / Kazık Tabanında Ortalama Deplasman - Zaman Grafiği

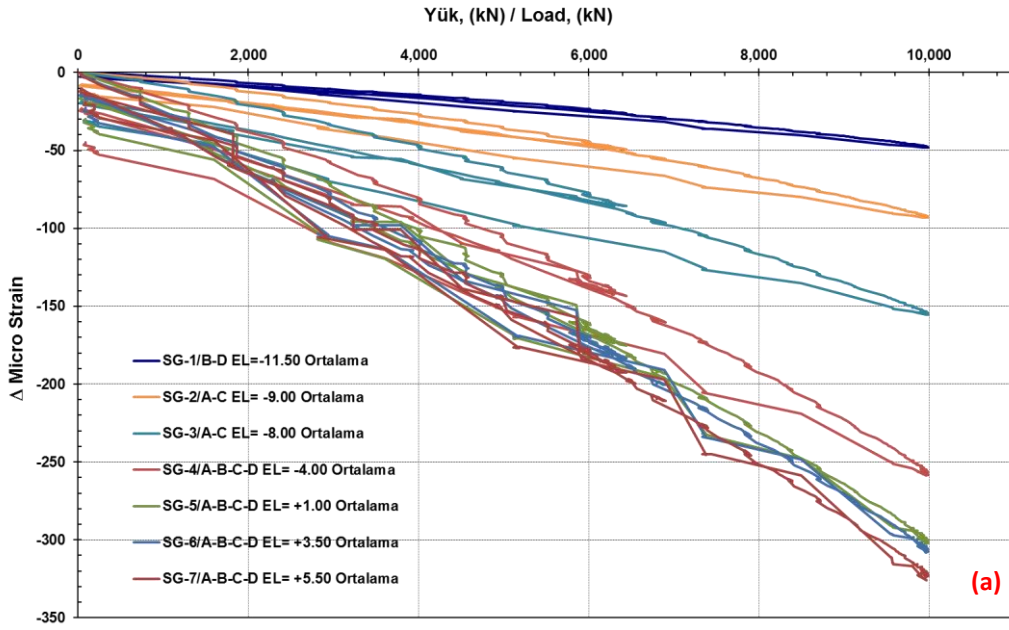


Şekil 14. (a) Kazık başında yük, kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman ve kazık boyu kısılması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında ortalama deplasman – zaman grafiği (c) Kazık başında yük – zaman grafiği

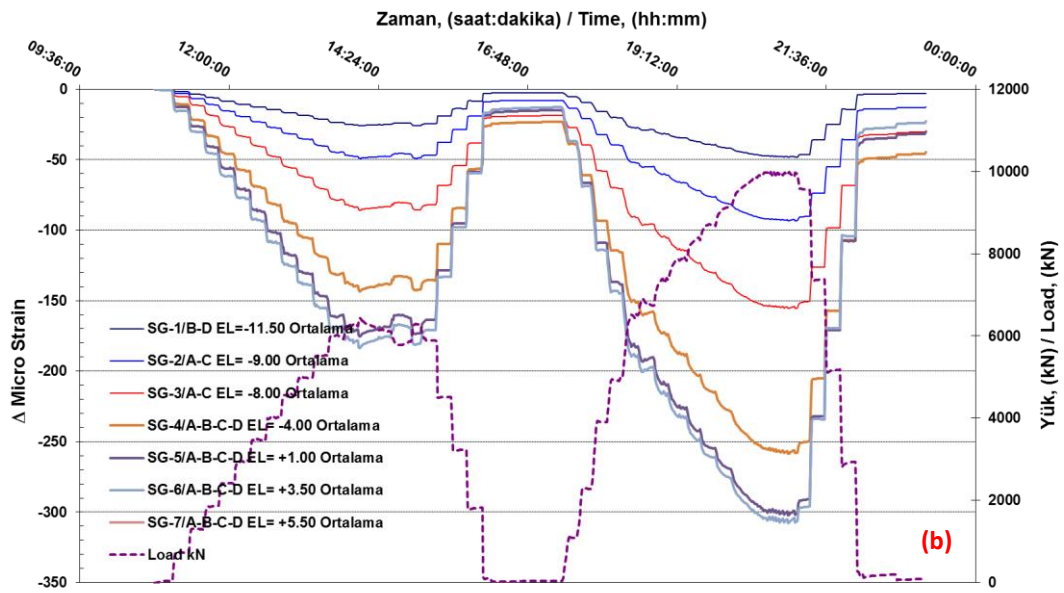
Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi Şekil 15.(a) ve Kazık Boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon – Zaman Şekil 15.(b) 'de verilmiştir.

Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı aralıklarda ölçülen (EXT2strain) birim deformasyon değişimi Şekil 16.(a) ve Kazık Başındaki Yük – Kazık Boyunca farklı aralıklarda ölçülen (EXT2strain) birim deformasyon Şekil 16.(b) 'de verilmiştir.

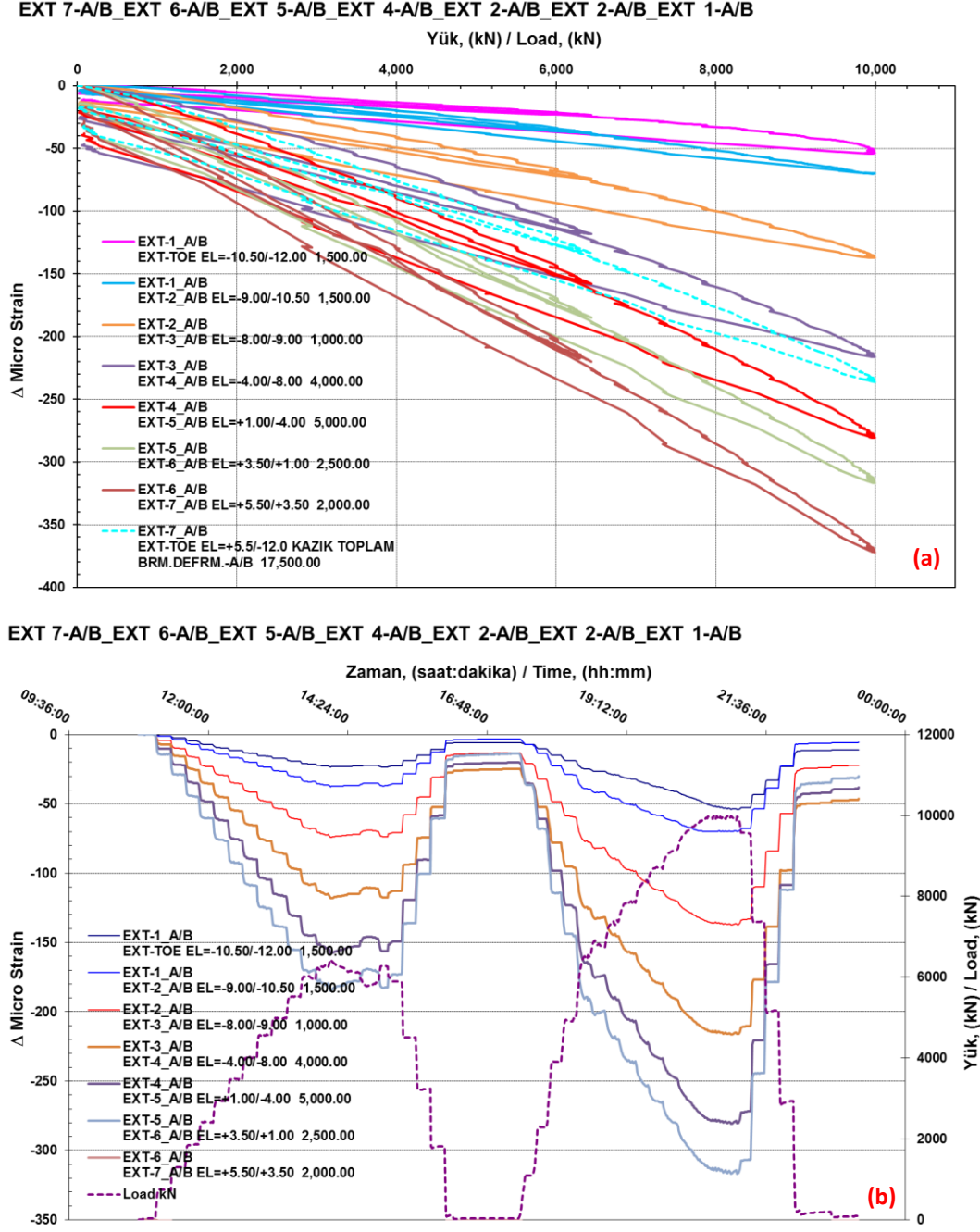
SG 1 / SG 2 / SG 3 / SG 4 / SG 5 / SG 6 / SG 7



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



Şekil 15. (a) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği (b) Kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon-zaman grafiği



Şekil 16. (a) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı aralıklarda ölçülen (EXT2strain) birim deformasyon değişimi grafiği (b) Kazık boyunca farklı aralıklarda ölçülen (EXT2strain) birim deformasyon - zaman grafiği

4.4. DENEY SONUCUNA GÖRE KAZIK BOYUNCA YÜK DAĞILIMI

Birim Deformasyon ölçerlerden elde edilen mikroStrain (μ ,%) değerlerinin kesitteki gerilmeye (σ , kN/m²), 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 baretin kriko seviyesinde üst ve alt kısmında aktarılan yükün çok etkilenmediği ilk SG seviyesinde kesitte yük birim deformasyon ilişkisinden Sekant Rijitlik Modulu ($E_s A$) elde edilebilir. Aksi taktirde, ilk olarak kazık serbest kolon gibi dikkate alınarak elde edilen tanjant modülü, sekant modülü tayini için kullanılır.

Tanjant Modülü tayini için;

$$M = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right) = a\varepsilon + b \quad (8)$$

Gerilme hesabı için integrali alınırsa;

$$\sigma = \left(\frac{a}{2} \right) \varepsilon^2 + b\varepsilon \quad (9)$$

Gerilme aynı zamanda;

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (10)$$

Böylece;

$$\sigma = E_s \varepsilon = 0.5a\varepsilon^2 + b\varepsilon \longrightarrow E_s = 0.5a\varepsilon + b \quad (11)$$

Elde edilir. Formülde kullanılan değişkenler,

M = Kompozit kazık malzemesinin tanjant modülü

E_s = Kompozit kazık malzemesinin sekant modülü

σ = gerilme (yük/kesit alanı)

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

a = tanjant modülü çizgisinin eğimi

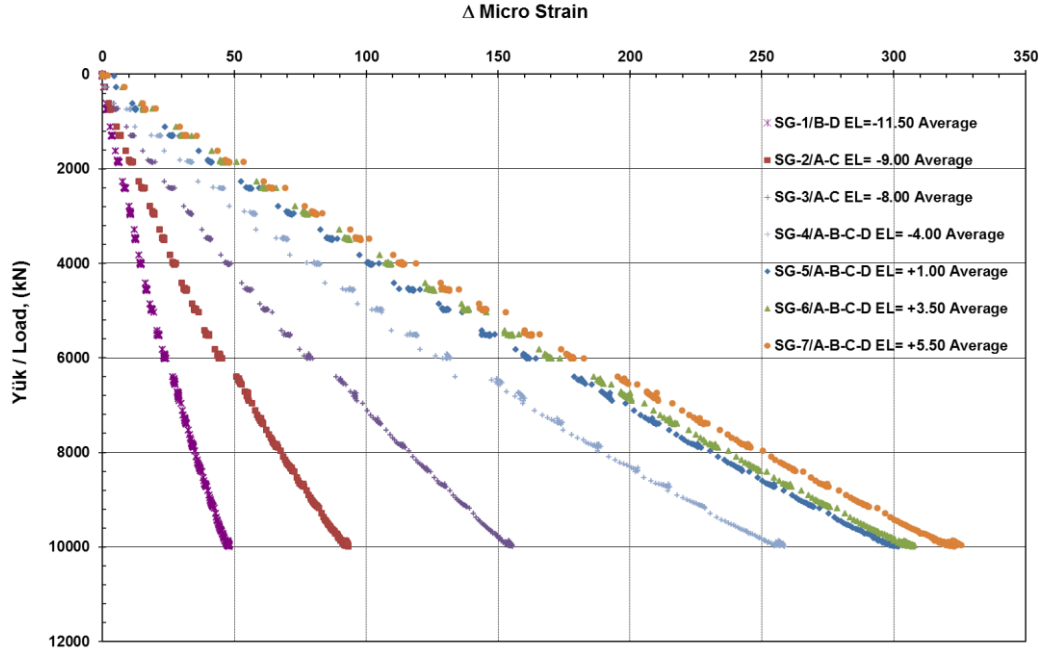
ε = ölçülen birim deformasyon

$d\varepsilon = (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_1)$ = yük kademeleri arasındaki birim deformasyon değişimi

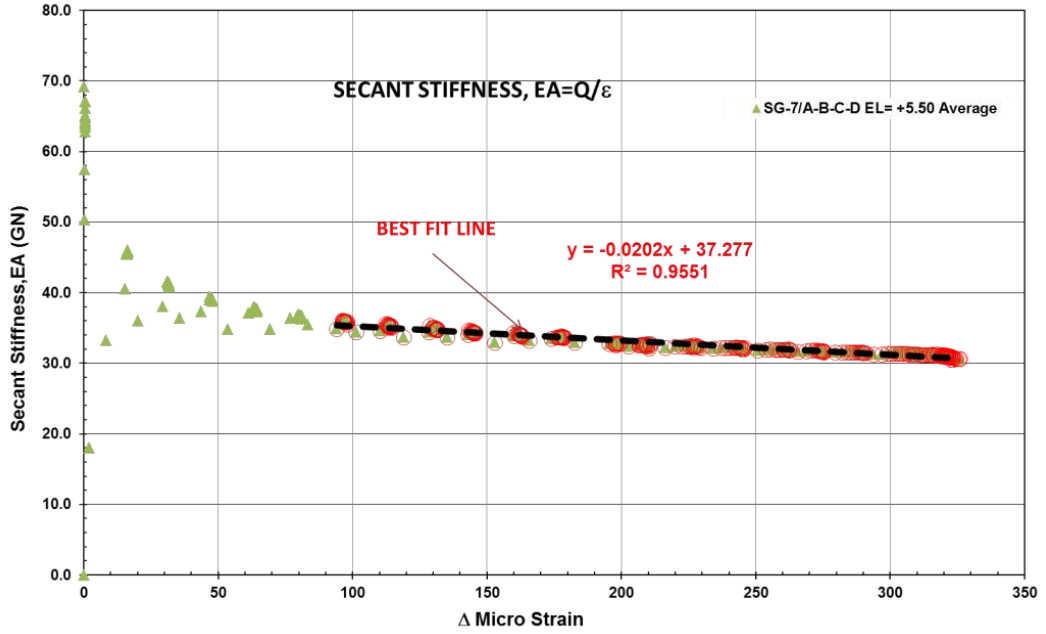
b = tanjant modül çizgisinin y-eksen kesişeni

Eksenel Rijitlik Modülü VW-SG/SB verileri, EXT2strain verileri ve beton basınç mukavemetine bağlı hesaplanan 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 (Şekil 17). Sekant Rijitlik ($E_s A$) değişimine göre başlangıç Rijitlik Modül değeri 37.3 GN ("b" sabiti Formül 8-11). Rijitlik Modül çizgisi eğimi ise ("a" sabiti Formül.8-11) -0.020 GN/ $\mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 18). Deneyde ölçülen VWSG/SB birim deformasyon ve 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 deneyinin simülasyonunda analiz dışı bırakılmasına karar verilmiştir. Hesaplanan Sekant Modülü uyarınca farklı yük kademelerinde SG okumalarına göre elde edilen yük dağılımı (yük-derinlik grafiği) ilişkisi

Şekil 19’de verilmiştir. Ayrıca, bu yük dağılımına bağlı olarak kazık boyunca mobilize olan birim shaft sürtünme grafikleri Şekil 20’de ve mobilize olan taban gerilmesi ise Şekil 21’de verilmiştir.

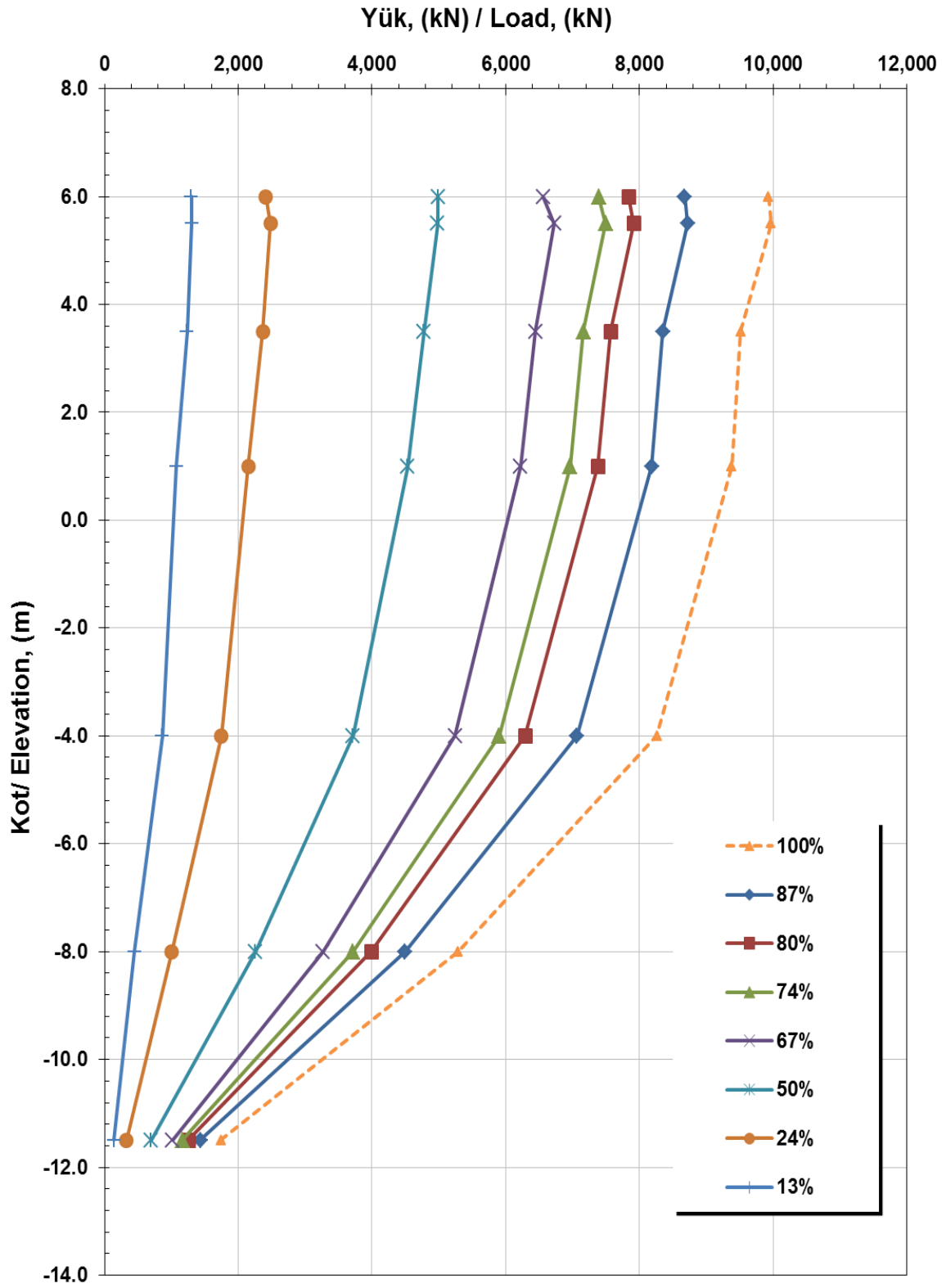


Şekil 17. Farklı kotlarda yük - SG seviyelerinde birim deformasyon değişim grafiği



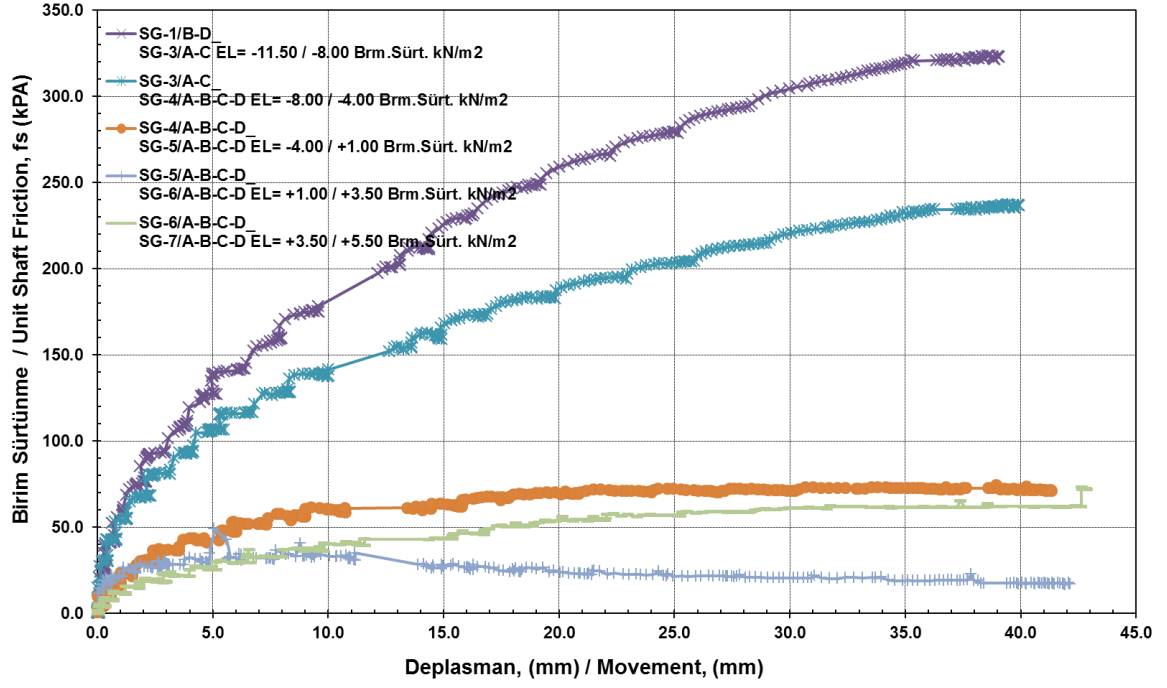
Şekil 18. VW-SG/SB birim deformasyon ölçer verileri uyarınca ölçülen mikroStrain - hesaplanan sekant rijitlik değişimi grafiği

Eksenel Yük-Derinlik İlişkisi



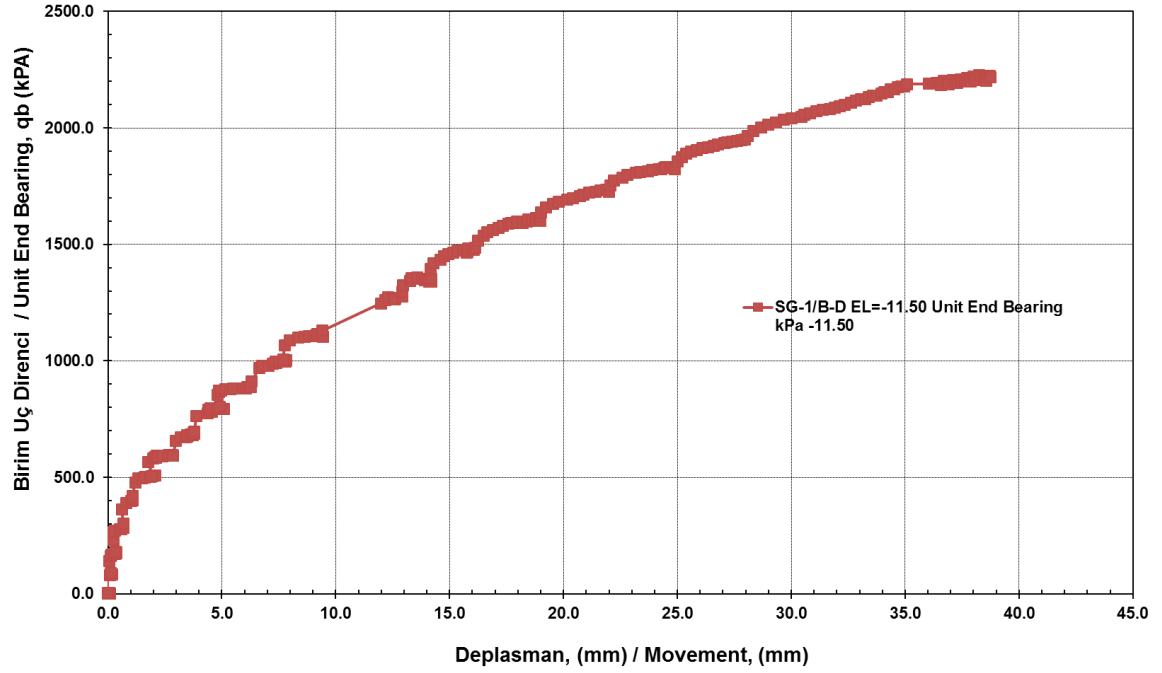
Şekil 19. Deneyde farklı yük kademelerinde ölçülen SG birim deformasyon verisine göre hesaplanan kazık boyunca yük transfer eğrisi

SG Verilerine Göre Mobilize Olan Birim Şaft Sürtünmesi



Şekil 20. Deneyde farklı derinlikler için SG verilerine göre mobilize olan birim şaft sürtünmesi grafikleri

Mobilize Olan Uç Direnci



Şekil 21. Deneyde kazık tabanına en yakın VWSG'e göre mobilize olan uç direnci grafiği

4.5. KAZIK DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

Kazık davranışının modellenmesi için UniPile 5.0 (2015, UniSoft Geotechnical Solutions Ltd.) yazılımı kullanılmıştır. Modelleme Birleştirilmiş Kazık Dizayn Metodu esasları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Fellenius, 1984; Fellenius 1988 ; Fellenius 2004; Goudreault ve Fellenius, 2014). Modelleme için

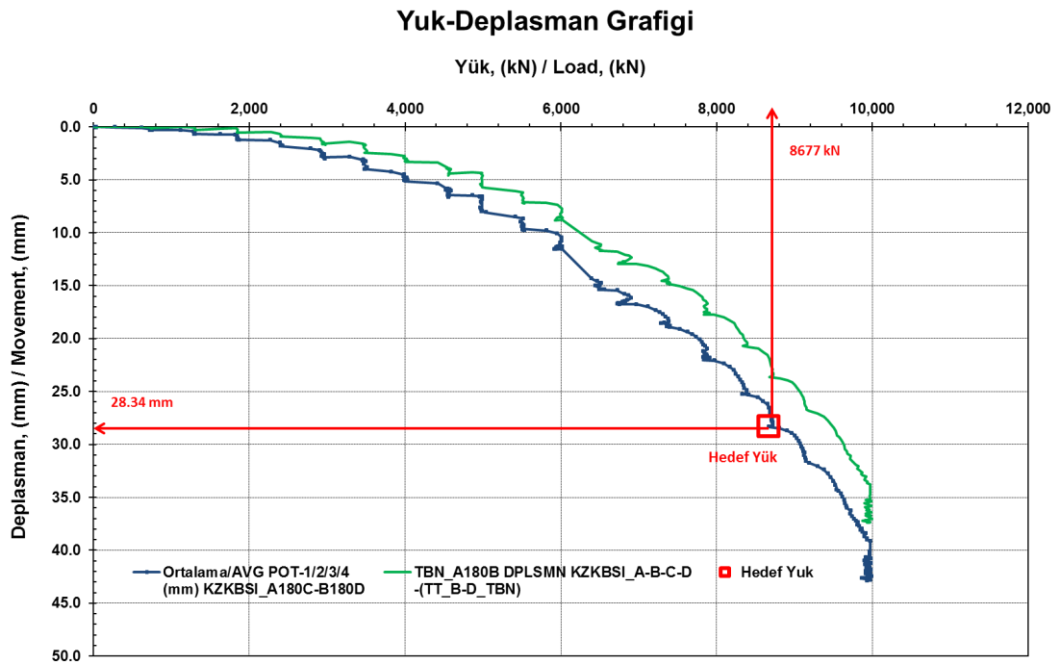
Şekil 5’de verilen ve deney bölgesini temsil eden zemin profili genel olarak dikkate alınmış ancak, parametre tahminleri deney sonucu (yük dağılımı ve yük-deplasman ilişkisi) ile eşleşecek şekilde iteratif olarak belirlenmiştir. Analizlerde kullanılan terminoloji Şekil 1’de özetlenmiştir.

Tercih edilen “Hedef Yük” (Target Point) noktası Şekil 22’deki grafikte gösterilmiştir. Bu yük t-z ilişkilerinin ekstrapolasyon yapılan kısmının ölçülen ve mobilize olan shaft sürtünmesi ile ilişkisinin daha iyi örtüştürülebilmesi için azami deney yükünden daha küçük ama yeterince shaft sürtünmesi mobilize olduğu düşünülen kademede tercih edilmiştir. Şekil 23’de verilen ve analizlerde dikkate alınan parametreler deneyde ve simülasyonda elde edilen yük-deplasman ve yük-derinlik (yük transfer) ilişkileri yeterince örtüşünceye kadar iterative olarak belirlenmiştir. Analizlerde ;

- Deneyde birim deformasyonlar sıfırlandığı ve “Rezidüel Gerilme” olmadığı,
 - Kazık boyunca kesitte (OD1000 mm) herhangi bir değişim olmadığı,
- kabul edilmiştir.

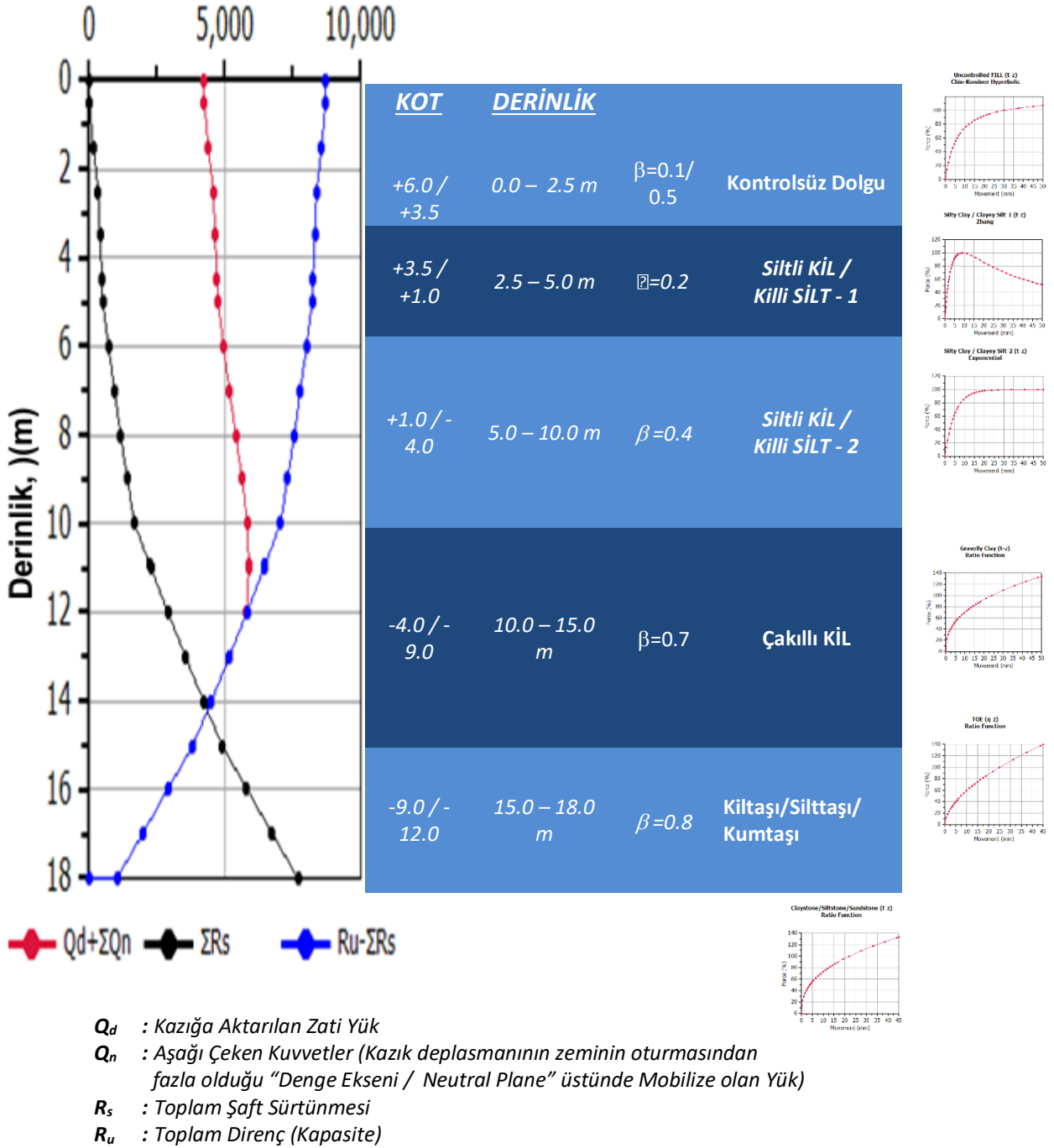
Zemin tabakalarında yük transferi için gerekli deplasman ilişkisinin analiz edilebilmesi için analizlerde zemin tabakalarına atanan t-z ilişkileri Şekil 24’de verilmiştir.

Bu şartlar altında deney simülasyonu yapılmış ve analiz sonucunda elde edilen ve ölçülen yük-deplasman kıyaslama grafikleri Şekil 25 ve Şekil 26’da, yük-derinlik kıyaslama ve shaft birim sürtünme grafikleri Şekil 27’de verilmiştir.

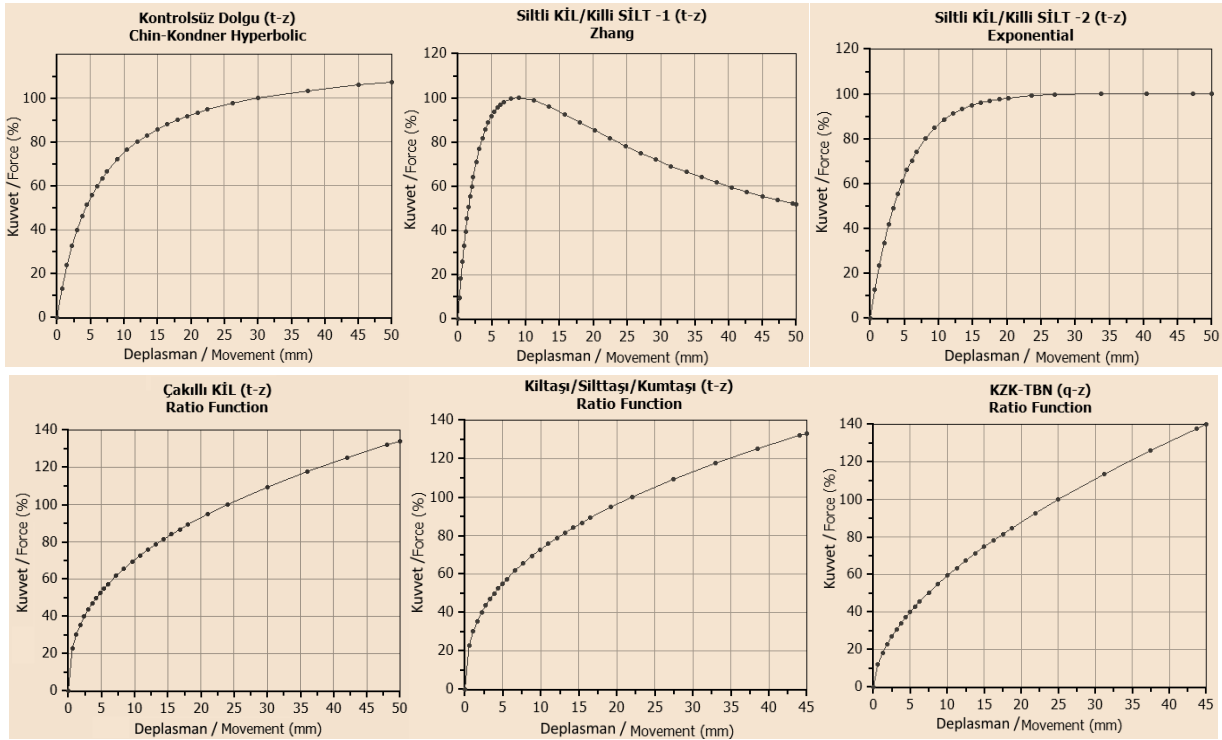


Şekil 22. Kazık yükleme deneyi simülasyonunda eşleştirme yapılmak için seçilen “Hedef Yük”

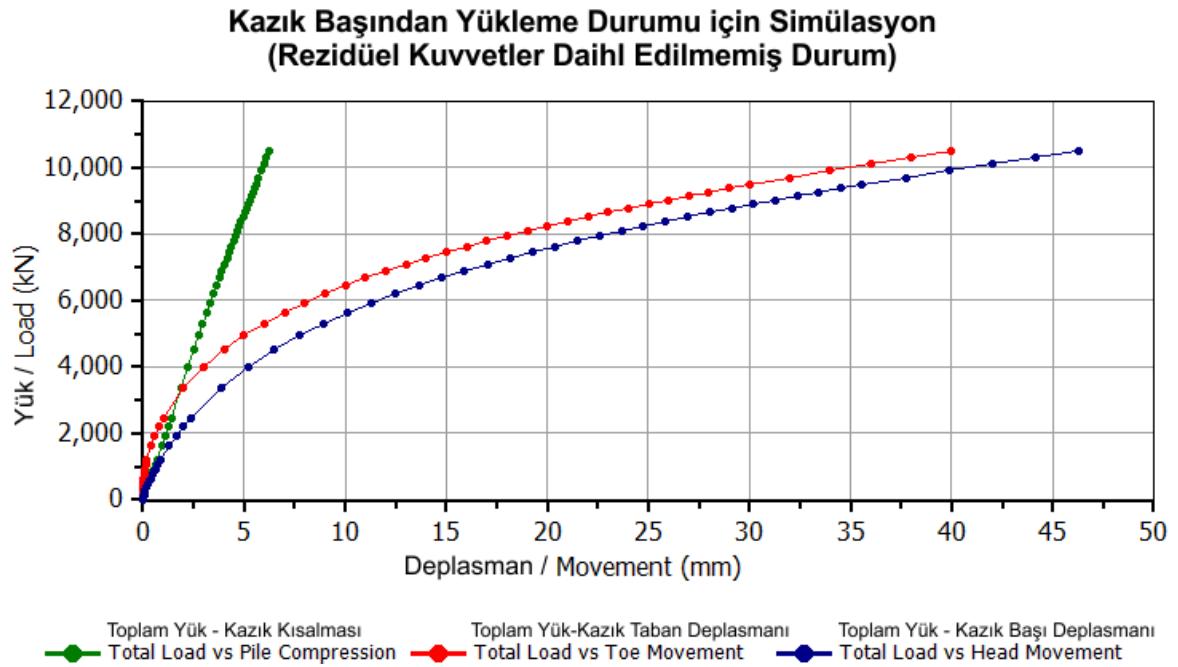
Yük ve Kazık Direnci, (kN)



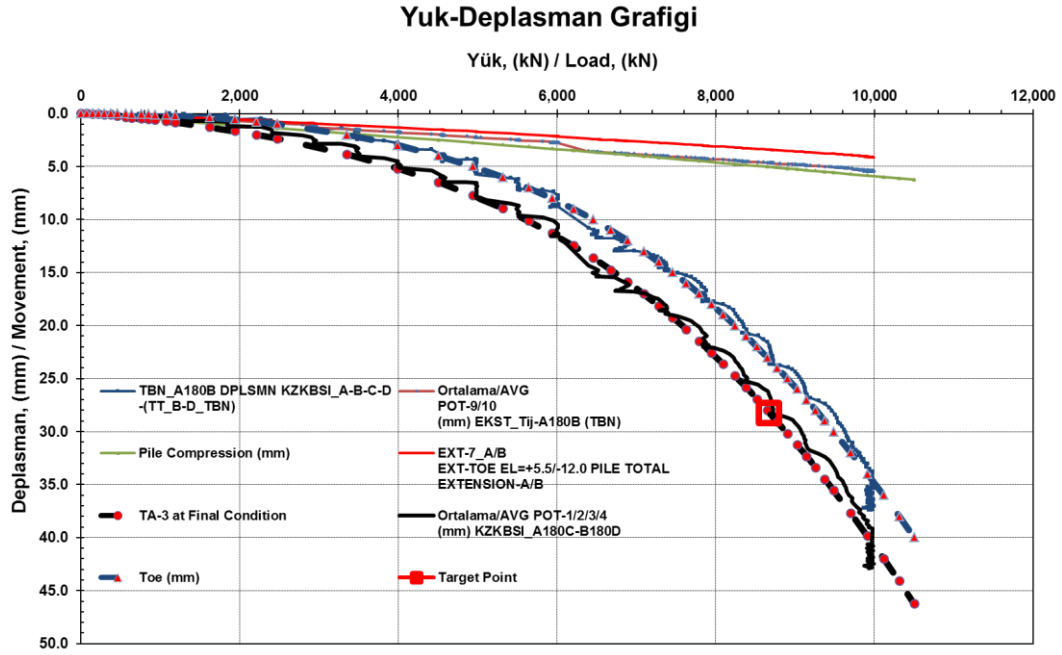
Şekil 23. Analizlerde dikkate alınan zemin tabakalanması, parametreler ve t-z/q-z ilişkileri ve analiz sonucunda elde edilen kazık direnci ve yük transfer ilişkisi



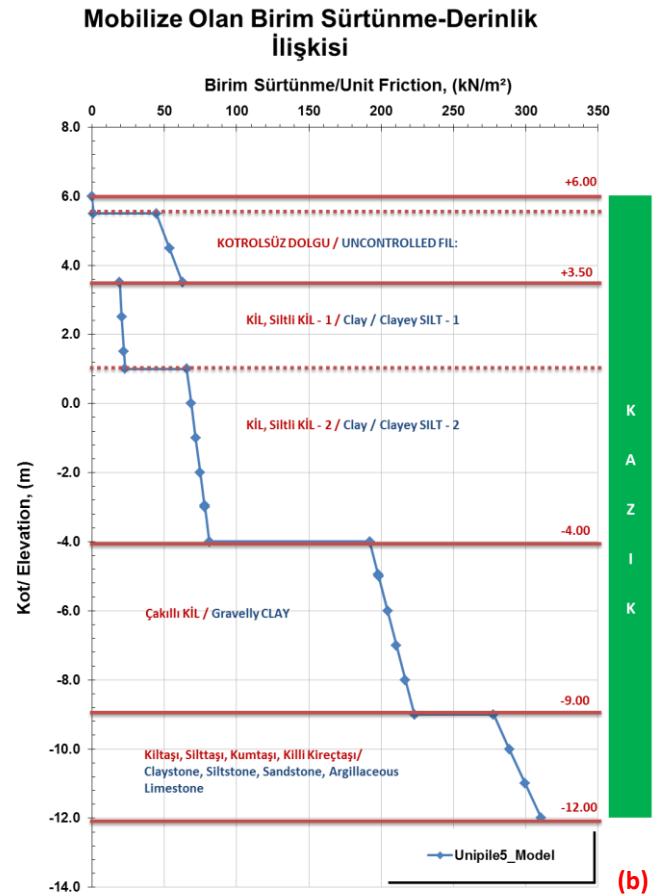
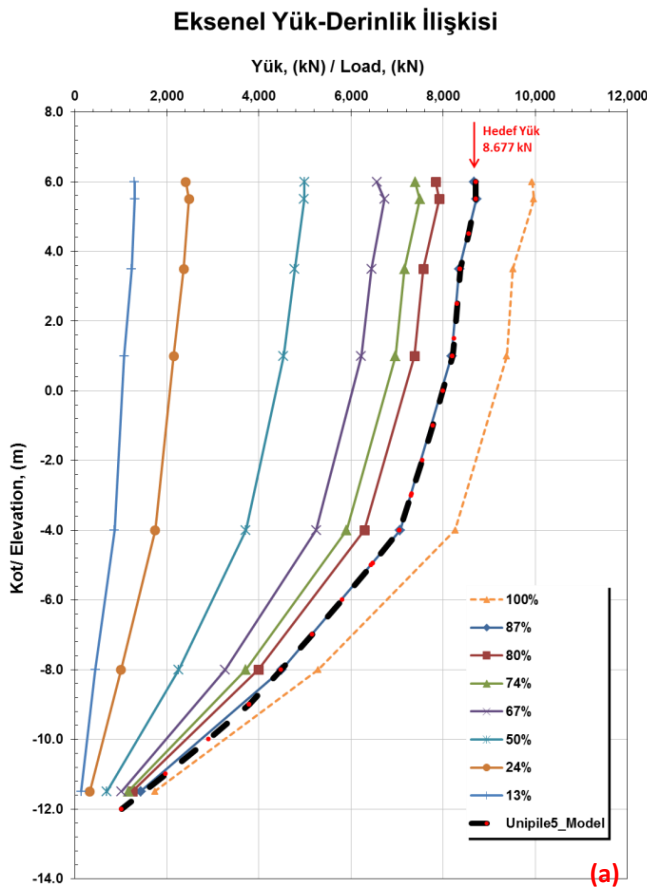
Şekil 24. Analizlerde farklı tabakalar için dikkate alınan t-z/q-z ilişkileri



Şekil 25. Analiz sonucunda elde edilen yük deplasman ilişkisi



Şekil 26. Deney ve simulasyondan elde edilen yük deplasman grafiği karşılaştırma



Şekil 27. (a) Deney ve simulasyondan elde edilen yük transfer ilişkisi karşılaştırma grafiği
(b) Deney simülasyonundan elde edilen hedef yük (~%90) için mobilize olan shaft sürtünme dağılımı grafiği

5. SONUÇ

Bir proje kapsamında; OD1000mm çapında ve $L_{net}=18.00m$ (Deney Kazık Başı Kotu +6.00 ve Kazık Taban Kotu -12.00 olmak üzere) boyunda bir fore kazık üzerinde kapasitesinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümente edilmiş eksenel statik basınç kazık yükleme deneyi (S-KYD/B)” yapılmıştır. Bu çalışmada deney özellikleri, deneyde ölçülen verilerinin analizi, kazık boyunca yük dağılımı hesabı ve shaft sürtünmesi dağılımı analiz edilmeye çalışılmıştır. 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.

Kazık davranışının modellenmesi için UniPile 5.0 (2015, UniSoft Geotechnical Solutions Ltd.) yazılımı kullanılmıştır. Modelleme Birleştirilmiş Kazık Dizayn Metodu esasları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Fellenius, 1984; Fellenius 1988; Fellenius 2004; Goudreault ve Fellenius, 2014). Modelleme için deney bölgesini temsil eden zemin profili genel olarak dikkate alınmış ancak, parametre tahminleri deney sonucu (yük dağılımı ve yük-deplasman ilişkisi) ile eşleşecek şekilde iteratif olarak belirlenmiştir.

Simülasyon sonucunda tercih edilen hedef yükte (~ 90 deney yükünün, $P_{ort}=9MN$) kazık boyunca mobilize olan shaft sürtünmesi için ortalama değerleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Simulasyonda Farklı Tabakalarda Mobilize olan Birim Shaft Sürtünme Değerleri

Tabaka	SG Seviyesi	Kot	SG Seviyesinde ~9MN Yükleme Kademesindeki Deplasman (mm)	~9MN Yükleme Kademesinde Mobilize Olan Ortalama Shaft Sürtünme Değerleri
Kontrolsüz Dolgu	SG-6/A-B-C-D_ SG-7/A-B-C-D	KOT= +5.50 / +3.50	28.34	~ 0 – 63 → ~ 50 kPa
Siltli KİL / Killi SİLT -1	SG-5/A-B-C-D_ SG-6/A-B-C-D	KOT= +3.50 / +1.00	27.71	~ 19-23 → ~ 20 kPa
Siltli KİL / Killi SİLT -2	SG-4/A-B-C-D_ SG-5/A-B-C-D	KOT= +1.00 / -4.00	27.04	~ 66-81 → ~ 70 kPa
Çakıllı KİL	SG-3/A-C_ SG-4/A-B-C-D	KOT= -4.00 / -8.00	25.88	~ 192-223 → ~ 200 kPa
Kiltaşı/ Silttaşı /Kumtaşı	SG-1/B-D_ SG-3/A-C	KOT= -8.00 / -11.50	25.16	~ 278-311 → ~ 300 kPa

Simülasyonda “Başlangıç Şartı” için yapılan analizde mevcut deney durumu dikkate alınmıştır. Deney kazığının +6.00 ile -12.00 kotları arasında 18.0m net boyunda ve OD1000mm çapında imal edilmiş olduğu ve yeraltı su seviyesinin (YASS) -3.50 kotunda olduğu durumunda efektif gerilme şartlarında “Hedef Yük / Target Point” durumu için analiz yapılmıştır. Sonuç olarak elde edilen “Tekil Kazık Zemin Etkileşim Modeli” kazık tasarımında oluşacak farklı yükleme, kazık özellikleri, yeraltı su seviyesi, kazı dolgu vb. şartlardaki değişim dikkate alınarak tekrar hesap yapılmasını mümkün kılmaktadır. Kazık yükleme deney verileri ile eşleştirilen “Tekil Kazık Zemin Etkileşim Modeli” Proje Geoteknik Modeline dönüştürülerek derin temel çözümleri ve karmaşık geoteknik analizlerin bir parçası haline gelmektedir.

KAYNAKLAR

- Abchir, Z., Burlon, S., Frank, R., Reiffsteck, P. (2016), "Prediction of pile behavior under static and bi-directional tests and comparison with field results". 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, April 27-29, Vol. 3, pp. 53 - 60.
- 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
- ASTM D5882-16, (2016), "Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM D6760-16, (2016), "Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- Baligh, M.M. (1975), "Theory of deep static cone penetration resistance". Publication No. R75-56. Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, MA.
- Baligh, M.M. (1985), "Strain Path Method", J. Geotech. Engineering, ASCE 111(9), pp. 1108-1136.
- Burland J.P. (1973), "Shaft friction of piles in clay-a simple fundamental approach", Ground Engineering 6: 30-42
- Bustamante, M., Gianselli, L. (1982), "Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT", Proc. of the Second European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II, Amsterdam, May 24-27, A.A. Balkema, Vol. 2, pp. 493-500.
- Decourt, L. (1989), "The Standard Penetration Test. State-of-the-Art report", A.A. Balkema, Proc. of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-18, Vol. 4, pp. 2405-2416.
- Decourt, L. (1995), "Prediction of load-settlement relationships for foundations on the basis of the SPT", Proc. of the Conf. in honor of Leonardo Zeevaert, Mexico City, Oct. 28-Nov. 6, pp. 87-103.
- DeRuiter, J., Beringen F.L. (1979), "Pile foundations for large North Sea structures", Marine Geotechnology, 3(3) 267-314.
- Eslami, A., Fellenius, B.H. (1997), "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories", Canadian Geotechnical Journal 34: 886-904
- Fellenius, B.H. (1984), "Negative skin friction and settlement of piles", Proc. of the Second International Seminar, Pile Foundations, Nanyang Technological Institute, Singapore, 18 p.
- 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 GeolInstitute

- Geo-TRANS 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., Ochoa, M. (2009), Testing and design of a piled foundation project. A case history. Southeast Asian Geot. Society, Bangkok, Geotechnical Engineering. Journal 40(3) 129-137.
- 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., (2022), "Basics of Foundation Design", Electronic Edition, www.Fellenius.net
- Gibson, R.E., Anderson, W.F. (1961), "Insitu measurement of soil properties with the pressure meter", Civ. Eng. Public Works Rev. Vol. 56, pp. 615-618.
- Goudreault, P.A., Fellenius, B.H. (2014), UniPile Version 5, Users and Examples Manuals. UniSoft Geotechnical Solutions Ltd. [www.UniSoftLtd.com].
- Hill, R. (1950), "The mathematical theory of plasticity", Oxford University Press, London. 356p.
- İnanır, O.E. (2018), "Eksenel Yüklü Kazıklarda Yük Transfer İlişkisi ve Çekme Yüğüne Maruz Fore Kazıklarda Süreklilik", FC-TUGM Sempozyumu `Prof.Dr. Feyza Çinicioğlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu`, İstanbul Üniversitesi, 10-05-2018, 92-106.
- Jardine, R.J., Chow, F.C., Overy, R., Standing J. (2005), "ICP design methods for driven piles in sands and clays London", Imperial College London
- Johannessen I.J., Bjerrum L. (1965), "Measurement of the Compression of a Steel Pile to Rock Due to Settlement of the Surrounding Oay". Proc., 6th ICSMFE, Montreal, Quebec, Canada, Vol. 2, 1965, pp. 261-264.
- Lechowicz, Z., Rabarijoely, S., Tetiana, K. (2017), "Determination of undrained shear strength and constrained modulus from DMT for stiff overconsolidated clays", Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW49(2) 107–116.
- McClelland, B. (1974), "Design of deep penetration piles for ocean structures", J. Geotech. Engineering. Div., ASCE, 100(7), 705–747.
- McVay, M.C., Ellis, R.D., Kim, M., Villegas, J. Kim, S.H., Lee, S (2003), "Static and Dynamic Field Testing of Drilled Shafts: Suggested Guidelines on Their Use for FDOT Structures", Final Report, US Project No: 4910-4504-725-12 / WPI No: BC354-08, University of Florida, p.57.
- Meyerhof, G.G. (1951), "The bearing capacity of foundations", Geotechnique 2(4) 301-332.
- Meyerhof, G.G. (1963), "Some recent research on bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal 1(1) 16-26.
- Meyerhof, G.G. (1976), "Bearing capacity and settlement of pile foundations". The Eleventh Terzaghi Lecture, November 5, 1975. ASCE Journal of Geotechnical Engineering 102(GT3) 195-228.
- O'Neill, M. (2001), "Side Resistance in Piles and Drilled Shafts", The Thirty-Fourth Terzaghi Lecture, Presented at American Society of Civil Engineers 1998 Annual Convention, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, January 2001.
- Peck R.B. (1958), "A study of the Comparative Behaviour of Friction Piles". Highway Research Board, Special Report No. 36.

- Powell J., Lunne T., Frank R. (2001), "Semi Empirical Design Procedures for axial pile capacity in clays", Proc. of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Istanbul
- Randolph, M.F., Carter, J.P., Wroth, C.P. (1979), "Driven piles in clay: Effects of installation subsequent consolidation", Géotechnique Vol. 29, No. 4, pp. 361-393.
- Tomlinson, M.J. (1957), "The Adhesion of Piles Driven in Clay Soils", Proc. Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng. 4, London 1957.Vol. 2, pp. 66-71.
- Vesić, A.S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE. Vol. 98, No. SM3, pp. 265-290.
- Vijayvergiya V.N., Focht J.A. (1972), "A new way to predict the capacity of piles in clay", Proc. of the Fourth Annual Off-shore Technology Conference, Houston, Texas: 269-284
- Whittle, A. J. (1987), "A constitutive model for overconsolidated clays with application to the cyclic loading at friction piles". ScD thesis, Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Zeevaert, L. (1959), "Reduction of point-bearing capacity of piles because of negative friction". Proc. 1st Panamerican Con. Soil Mech. And Found Eng., Vol. III, 1145-1152.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
ϕ'	: efektif sürtünme açısı	Q_n	: aşağı çeken kuvvetler (Drag Force)
σ'	: efektif gerilme	q_n	: negatif shaft sürtünmesi
$\sigma'_{z=n}$	: kazık ucu düşey efektif gerilme	Q_u	: kazık kapasitesi
c'	: efektif kohezyon bileşeni	r_s	: shaft sürtünmesi
σ'_h	: kazığa etki eden yatay efektif gerilme	R_s	: toplam shaft direnci
σ'_z	: düşey efektif gerilme	R_s''	: denge eksenli alt kısım shaft direnci
τ_f	: kayma mukavemeti	r_t	: birim uç direnci
A_s	: kazık derinliğince birim shaft üzey alanı	R_t	: toplam uç direnci
A_t	: kazık taban alanı	δ	: kazık shaftı/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 modül 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 eksenli bileşeni