

Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazık Davranışının Orijinal Bir Kazık Yükleme Deneyi ve İmalat Yaklaşımı ile İncelenmesi

Orhan Esat İNANIR^{1*}
Aykut ŞENOL²
Mehmet M. BERİLGİN³



ÖZ

Enstrümanite 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. Ancak, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda (fore kazık, prekast çakma kazık, yerinde dökme çakma kazık Vibreks, vs.) oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Bu makalede çekme yüküne maruz betonarme kazık davranışının kazıklar ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ara mesafesi yaklaşık 6m olan komşu iki kazık üzerinde eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) gerçekleştirilmiştir. Kazık çekme deneylerinde birinci tip TK-2 (TİP-A) deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi ve ikinci tip ise TK-3 (TİP-B) ise özel bir tertibat ile kazık tabanından çekilecek şekilde imal edilmiştir. Kazık başından çekilmesi durumu (TİP-A) için deneyde uygulanan eksenel çekme yükü altında betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişimi birim deformasyon ölçümlerinde tespit edilmiş ve tahribatsız deney uygulamalarıyla da teyit edilmiştir. Bu durum yaklaşık 70-120 mikroStrain mertebelerinde gözlenmiş olup literatürdeki eksenel yük ve momente maruz beton kesitindeki çatlak gelişimini inceleyen çalışmalar ile uyumludur. Bu menfi etkilerin bertaraf edildiği betonda çekme gerilmesinin oluşmadığı tarzda orijinal bir düzenek tasarlanmıştır. Bu düzenek vasıtası ile aynı şartlardaki komşu kazık, tabandan yukarı istikamette çekilerek betonda basınç gerilmesi mobilize edilerek çekme yükü altında test edilmiştir. Bu geliştirilen orijinal deney ve imalat usulü konvansiyonel olarak kazık

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30 Aralık 2023 günü ulaşmıştır. 13 Mart 2024 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Eylül 2024 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1412047>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
oinanir@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-7883-5428>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
senol@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1832-3919>

3 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
berilgen@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-6544-011X>

* Sorumlu yazar

başından çekilerek tatbik edilen çekme yükleme durumundaki problemleri bertaraf ettiği kazığın yük deplasman performansında ve yük transfer ilişkisinde hatırı sayılır bir şekilde performans artışı sağladığı gözlemlenmiştir. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktasının farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla, kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Yöntemi ile kazık başı yükü ve kazık başı deplasmanı için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman için yapılan analizde ise TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir. Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisine göre “Davisson Kazık Kapasitesi Tahmin Yöntemi” ile ~%146 mertebelerinde yine TİP B için kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisi kıyaslamasına göre ise ~%120 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme çekme kazıkları, enstrümente edilmiş kazık yükleme deneyi, aletsel gözlem, çatlak, performansa dayalı kazık tasarımı, kazık süreklilik/bütünlük deneyi.

ABSTRACT

Investigation the Behaviour of Cast In-Situ Piles which are Subjected to Tension / Uplift Load with A Novel Pile Constructing / Testing Approach

Instrumented pile loading tests can give a better understanding of the pile load-transfer mechanism. It also allows for assessing the integrity and durability issues of the bored piles under tension. When a reinforced concrete pile is subjected to high tension forces, it might reach the tensile stress capacity of concrete, and cracking occurs at the weakest section. In this study, the results of an instrumented axial static tensile pile loading test (S-KYD/Ç) were evaluated regarding crack development and propagation. It has been determined that crack development occurs when the tensile deformation capacity of the concrete is reached under the axial tensile load applied during the test. This phenomenon was observed at approximately 70-120 microStrain levels and is consistent with similar studies in the literature. With a novel approach, that prevents tensile stress development in the reinforced concrete body, the problems mentioned above are targeted to be eliminated. Dywidag-made GEWIPlus bars were used to transfer the pile head load to the pile toe. This mechanism ensures the development of compression stresses in the pile during pull-out upward loading. Loading from the pile toe contributes considerably to the load-displacement behavior of the piles that are under tension load. TİP-A and TİP-B different load application points normally don't provide a chance for direct comparison. However, for a general understanding, the comparison might be done with the “Davisson Pile Capacity Estimation Method” for TİP-A and TİP-B pile loading test results as per pile head load - pile head movement relations. 6.1MN for TİP-A and 8.9MN for TİP-B estimated with the Davisson Method as per pile head behavior. These figures represent a ~%146 capacity increase for piles under tension load. Moreover, because the load application point is from the pile toe, comparing pile toe load - pile toe movement for TİP-B might be worthwhile. 7.3MN for TİP-B resulting ~%120 capacity increase.

Keywords: Integrity, crosshole logging, tension, crack, pull-out, instrumented pile loading test.

1. GİRİŞ

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. Ayrıca, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi, kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Betonarme kazıklara kazık başından yukarı istikamette yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Çatlak gelişimi kazığın çekme yükü altında deplasman davranışını etkilemektedir. Bu durum kazık çekme deneylerinde kazık davranışının değerlendirilmesini ve t-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasını zora sokmaktadır. Esasen, “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modeli” sıhhatli bir şekilde oluşturulamamaktadır. Bu durum daha çok araştırmacılar tarafından mobilize olan şaft direncinin istikamete bağlı olması ile açıklanmaya çalışılmıştır. Ancak, literatürde şaft direncinin kazığın hareket istikameti ile değişip değişmediği hususunda farklı görüşler mevcuttur. England [9] ve Fellenius [11] çalışmalarında deplasman doğrultusunun şaft direnci üzerinde bir etkisi olmadığını, diğer bir deyişle kazık şaftında mobilize olan kayma gerilmesinin kazığın basınç veya çekme yüküne maruz kalmasından bağımsız olduğunu raporlamışlardır. Bu görüşe karşılık bazı araştırmacılar çekme yüküne maruz kazıkların şaft dirençlerinin, basınç yüküne maruz kazıklardan daha düşük olduğunu raporlamaktadırlar [16] [17].

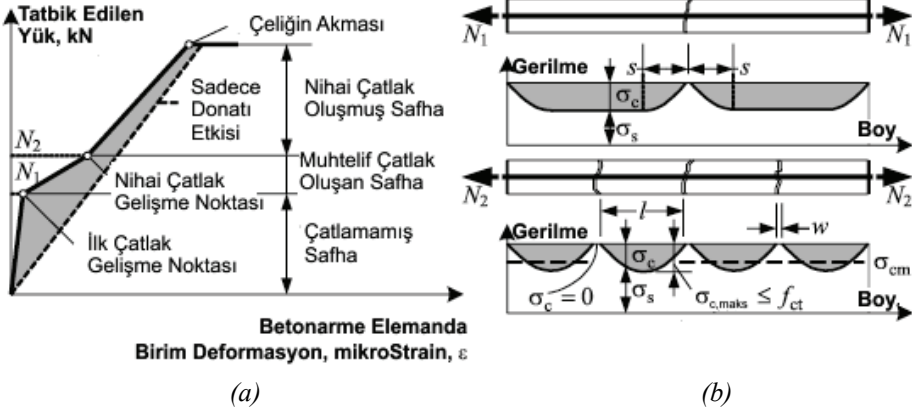
Jardine ve Chow [16] tarafından yapılan çalışmada çekme yüküne maruz kazıklarda şaft etkileyen radyal efektif gerilmelerin ve kazık boyunca etkileyen pik lokal kayma gerilmesinin kum birimlerde basınç yüküne maruz kazıklara nisbeten daha düşük olduğu ancak kilde bir farklılık oluşmadığı belirtilmektedir. Liew vd [17] ise çekme yüküne maruz kazıklarda şaft direncindeki azalmanın kazığın Poisson oranı etkisi sebebiyle geometrik büzülmesinin etkili olduğunu belirtilmektedir. Ayrıca, yaptıkları karşı kuyu ultrason deneyinde statik çekme kazık yükleme deneyi esnasında oluşan çatlak gelişimine bağlı olarak ilk varış zamanında (FAT) gecikme ve sinyal enerjisinde (E) azalma tesbit ettiklerinden de bahsetmektedirler.

Bu çalışma kapsamında enstrümente edilmiş bir aksel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) sonuçları çatlak gelişimi ve yayılımı açısından değerlendirilmiştir. Çekme yüklemesi sonucunda betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişmektedir [7] [8]. Enstrümente edilmiş aksel kazık çekme deneylerinde farklı beton malzemesi karakteristikleri ve donatı miktarları için İnanır [13] tarafından çatlak gelişimi açısından 50-150 mikroStrain sınır değerleri gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bicocchi [7] çalışmasında ise eğilme momentine maruz pasif kazıklarda birim deformasyon ölçer verileri ile çatlak gelişimi sınır değerleri için benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Beton aderansı ve donatı sıyrılmaya mekanizması Somayaji [20] tarafından incelenmiş ve çekme yüküne maruz bir betonarme elemanın yük-birim deformasyon eğrisinde üç bölge tanımlanmıştır (Şekil 1a). Birinci bölge çatlama safhaya kadar ilk çatlak gelişme noktasına kadar elemanın elastik davranış sergilediği bölge, ikinci bölge ilk çatlak gelişiminden nihai çatlak gelişimi noktasına kadar olan muhtelif çatlak oluşma safhasındaki deformasyon davranışı sergilediği bölge ve üçüncü bölge ise nihai çatlak gelişimi noktasından donatı akma noktasına kadar olan deformasyon davranışı sergilediği bölgedir.

Fields ve Bischoff [12] ise çekme yüküne maruz betonarme eleman için aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını Şekil 1.b'deki gibi tanımlamaktadır. Çatlak gelişimi betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ilk ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlak gelişimi sonrasında bu noktada betondaki gerilme sifira düşmektedir.

Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça donatı beton aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen gerilme değerine kadar artar. Çatlayan kesitte donatı ile beton aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere sebep olur ve çatlak genişler. Nisbeten küçük bir yük artımı bile mevcut çatlağın biraz ilerisinde başka bir çatlak oluşumuna sebebiyet verebilir. Yük artımı ile birlikte betonarme eleman boyunca belirli aralıklarla (nisbeten nizami aralıklarla, $s < l \leq (2 \cdot s)$) ilk çatlak patern gelişimi tamamlanmış olur (Şekil 1.b). Bu çatlak paterninde betondaki çekme gerilmesi her çatlak noktasında sifira düşer, tekrar beton çekme mukavemeti σ_{ct} değerine kadar artar, ancak tabii olarak hiçbir zaman betonun çekme mukavemetini aşamaz. Beton çekme mukavemetini artırıcı tedbir olarak rastgele donatı kullanımının araştırıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur [2].



Şekil 1 - Çekme yüküne maruz betonarme çekme elemanı: (a) çatlak gelişme safhaları [20] (b) aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını [12]

Burada izah edilen davranış aksel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) birim deformasyon ölçer (VWSG) verisinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu gözleme ilave olarak çatlak gelişimini doğrulamak için kazık çekme deneyi öncesinde, maksimum deney yükünde ve deney yükü boşaltıldıktan sonra deney kazığında tahribatsız kazık deney yöntemlerinden kazık bütünlük/süreklilik deneyleri, KBD (Sonic Integrity Test-SIT, Pulse Echo Test-PET, Pile Integrity Test-PIT) ve karşı kuyu ultrason deneyleri, K-KUD (CrossHole Sonic Logging-CSL, CrossHole Ultrasonic Method-CHUM) yapılmıştır. Karşılaştırmalı inceleme neticesinde çatlak gelişimi gözlemini destekleyici bulgular elde edilmiştir.

2. ZEMİN VE KAZIK ÖZELLİKLERİ

2.1. Zemin Durumu

Deney yapılan sahada yüzeyden (Kot +2.70) yaklaşık 4m kalınlığında kontrolsüz dolgu tabakası mevcuttur. Kontrolsüz dolgu tabakasını müteakip kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması sondaj sonuna kadar (Kot -24.5) devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi yüzeye yakın bulunmaktadır (~+2.5). Deney kazığı -13.10 kotunda teşkil edilen çalışma platformundan imal edilmiş ve yüzeye yakın bulunan yeraltı su seviyesi yaklaşık çalışma platformunun altında kalacak şekilde çalışmalar süresince pompaj yapılmıştır. Zemin tabakalanması ile ilgili özet bilgi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 - Deney lokasyonunda zemin özellikleri

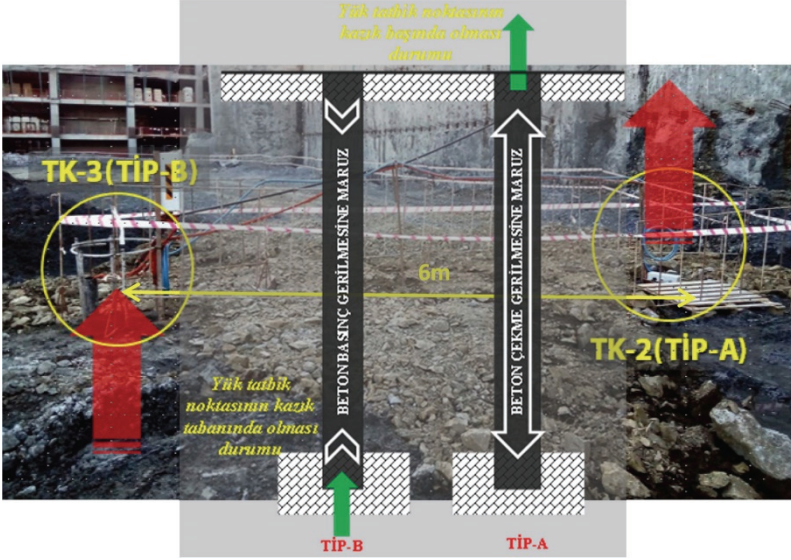
Kot/ [GRS 80]	Zemin Tanımlaması
+02.7 / +00.0	Kontrolsüz Dolgu: İri çakıllı Kum ve Kil
+00.0 / -00.7	Kontrolsüz Dolgu: Kumlu Kil kaya blok parçaları mevcut
-00.7 / -01.2	Kontrolsüz Dolgu: Kaya blokları
-01.2 / -09.6	Kumtaşı
-09.6 / -12.4	Çamurtaşı
-12.4 / -20.2	Kumtaşı
-20.2 / -23.3	Çamurtaşı
-23.3 / -23.8	Konglemera
-23.8 / -24.5	Kumtaşı

2.1. Kazık Özellikleri

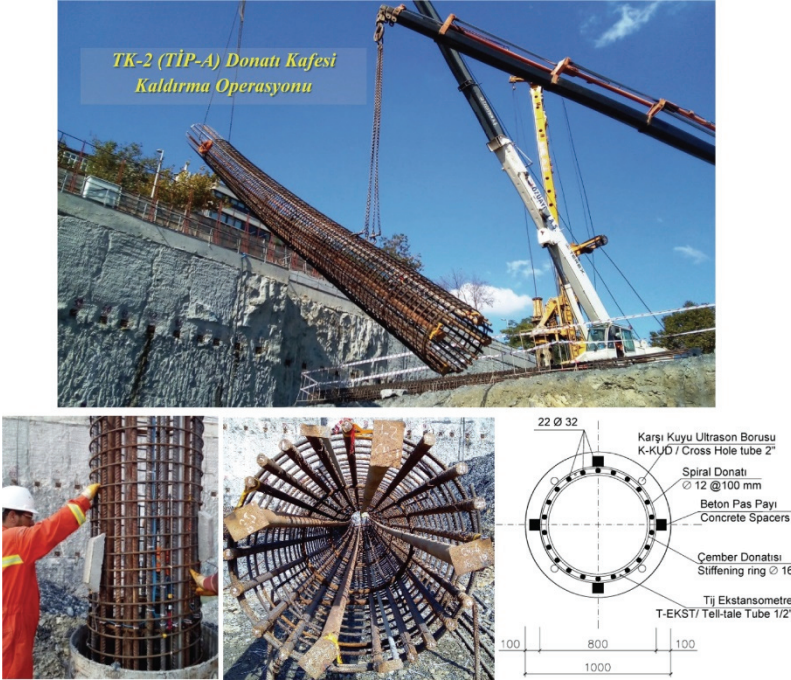
TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), Deney kazıkları OD1000mm dış çapında ve $L_{toplam}=10.4m$ ve $L_{net}=10.1m$ boyunda (Deney Platform Kotu -13.10, Temel Alt Kotu -13.40 ve Kazık Taban Kotu -23.50 olmak üzere) fore kazık tekniği ile kaya augeri kullanılarak ve kuyu stabilitesi için geçici muhafaza borusu (TK-2 için OD1080mm ve boru alt kotu -13.5 olmak üzere, TK-3 için OD1080mm ve boru alt kotu -20.6) kullanılarak imal edilmiştir. Tij tipi ekstansometre ve seyyar ekstansometre yerleştirilmesine yönelik kılıf borular (karşı kuyu ultrason deneyi maksadıyla da kullanılacak olan) ve donatı tipi birim deformasyon ölçerler ile enstrümante edilerek hazırlanan donatı kafesi (22nos Φ 32mm boyuna donatı ve Φ 12/100mm etriye ile teşkil edilerek) tek parça olarak kuyuya indirilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).

Bunun ardından tremi borusu kullanılarak C35/45 sınıfı beton dökülmüş ve muhafaza borusu çekilerek imalat tamamlanmıştır.

TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), Deney kazıkları ara mesafesi 6m olmak üzere kapasitelerinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümante edilmiş eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç)” yapılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2 - TK-2 Çekme deney kazığı için konvansiyonel olarak kazık başından yükleme durumu (TİP-A), TK-3 Çekme deney kazığı için kazık tabanından yükleme durumu (TİP-B) yerleşimi



Şekil 3 - Enstrümente edilmiş TK-2 deney kazığı (TİP-A) donatı kafesi kaldırma operasyonu, donatı kafesi genel ve detay görünüşü.



Şekil 4 - Enstrüman edilmiş TK-3 deney kazığı (TIP-B) donatı kafesi genel ve detay görünüşü.

3. ENSTRÜMANTE EDİLMİŞ EKSENEL STATİK ÇEKME KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/Ç)

3.1. Ölçüm Ekipmanları

Deney kazığına dört (4) seviyede Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçer (VWVG/SB, Vibrating Wire Sister Bar Type Strain Gauge) her seviyede karşılıklı ikişer çiftten dört (4) adet olmak üzere toplam onaltı (16) adet olarak yerleştirilmiştir. Karşılıklı kuvvet çiftlerinin 4 adet SG ile ölçülmesi ölçüm doğruluğu (accuracy) ve yedeklemesi (redundancy) açısından önem arz etmektedir. Birim deformasyon ölçer kodları SG-1/-14.3, SG-2/-16.8, SG-3/-20.0 ve SG-4/-22.5 şeklindedir. Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için tij tipi ekstansometre (T-EKST, Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deney esnasında karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD, CSL/CHUM) amacıyla kullanılan 2" çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine 6 ankraj noktalı seyyar ekstansometre (S-EKST, EXT2strain) yerleştirilmiştir. Bu sayede yaklaşık SG derinliklerinde oluşan deplasman doğrudan ölçülmüş ve ankraj noktaları arasında ölçülen

kısalma/uzama değerleri kullanılarak ortalama birim deformasyon hesaplanmıştır. Deney kapsamında kullanılan enstrümantasyon ölçüm sistemleri genel görünüşleri Şekil 5’de, listesi ise Tablo 2’de verilmiştir.

Deneyde kazık imalatı ve deney öncesi rezidüel gerilmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek, deney öncesinde birim deformasyonlar sıfırlanmış ve “Rezidüel Gerilmeler” dikkate alınmamıştır.



Şekil 5 - TK-2 ve TK-3 Deney Kazıklarında (TİP-A ve TİP-B) yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş

3.2. Kazık Yükleme Deneyi

Yükleme deneyinde çekme kazığına yük, TK-2 (TİP-A) deney kazığında kazık ana donatılara kaynaklanan “yük aktarma borusu” ile / TK-3 (TİP-B) de ise yük aktarma borusuna özel tij somunları ile kilitlenen D=63.5mm Dywidag GEWIplus Tijler (akma yükü $F_{yk}=2.122kN$) ile ve iki (2) adet reaksiyon kazığına mesnetlenen deney girişinden faydalınarak hidrolik kriko vasıtası ile tatbik edilmiştir. Deneylerde hidrolik krikolara hava tahrikli hidrolik pompa ile

Tablo 2 - TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) deney kazıklarında gerçekleştirilen aksenal statik çekme kazık yüklenme deneyi (S-KYD/C) özet bilgileri

Açıklama		TK-2 (TİP-A) / TK-3 (TİP-B)
Deney Kazığı	$D=1.000\text{mm}$, $L_{toplam}=10.4\text{m}$	
Deney Dizeneği	Eksenal statik çekme kazık yüklenme deneyi (S-KYD/C) Reaksiyon kazıkları mesnet olarak kullanılarak	
Maksimum Deney Yükü	Planlanan %100 – 6,975 kN (S-KYD/C) Gerçekleşen ~%110 – ~7,6 MN (S-KYD/C) -----TK-2 (TİP-A) Gerçekleşen ~%110 – ~7,6 MN (S-KYD/C) -----TK-3 (TİP-B)	
Hidrolik Teçhizat	15.000 kN kapasiteli Hidrolik Kriko	
Yük Kontrolü	Oransal Servo Yalıtımlı Hava Tahrikli Hidrolik pompa kontrolü Encardio-Rite ELC-150S-H High Capacity-Resistive Type Solid Load Cell 1adet x 12,5 MN Dong-A Geovan Co. GV-2409 Vibrating Wire Load Cell 4adet x 1,5 MN	
Yük Hücresi		
Deplasman Ölçer	Opkon SLPS100, 100mm stroklu, direnç tipi deplasman ölçer (4 adet deney kazığının başında, 4 yük aktarma borusunda, 2 adet Teiltale başında \ 1 adet brikoda — Toplam 11 adet) Geokon titreşen telli deplasman ölçer (VW-DT) 2,5mm stroklu 2 adet / seviye x 5 seviye =10 adet VW-DT	
Birim Deformasyon Ölçer	Encardio-Rite EDS-12V titreşen telli donanı tipi birim deformasyon ölçer (Vibrating wire Sister Bar Type Strain Gauge) 4 adet/seviye x 4 seviye = 16 adet Geokon A9 Model “Retrievable Extensometer – EXT2strain” 2 adet/seviye x 6seviye =12 adet ankraj noktali	
Basınç Ölçer	Wika S-10 Model 1 adet basınç ölçer	
Veri Kayıt Ekipmanı	RST Instruments Flexdaq Model Data Logger 1 adet Campbell Scientific CR6 Otomatik Rasat Cihazı	
Veri Kayıt Aralığı	60 Saniye	

Tablo 3 - TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) KYD için yüklenme programı

Çevrim	Pompa Basma Yolu (Bar)	Deney Yolu (MN)	Kedeme Yükleme Oranı (%)	Yüklenme Kriteri	
				Azami Yükleme Sürresi (s)	Kriter
1	0	0	0	0	
1	1	34	349	5	15
1	2	69	698	10	15
1	3	104	1046	15	15
1	4	138	1395	20	15
1	5	173	1744	25	15
1	6	207	2093	30	15
1	7	242	2443	35	15
1	8	277	2790	40	15
1	9	311	3139	45	15
1	10	346	3488	50	15
1	11	381	3836	55	15
1	12	415	4185	60	15
1	13	450	4534	65	15
1	14	484	4883	70	15
1	15	519	5231	75	15
1	16	554	5580	80	15
1	17	588	5929	85	15
1	18	623	6278	90	15
1	19	658	6626	95	15
1	20	692	6975	100	15
1	21	727	7324	105	15
1	22	761	7673	110	60
1	U-1	892	6975	100	15
1	U-2	554	5580	80	15
1	U-3	415	4185	60	15
1	U-4	277	2790	40	15
1	U-5	138	1395	20	15
1	U-6	0	0	0	60

basınç uygulanmış ve pompa hattındaki basıncı gözlemlemek için yüksek basınçlı bir manometre (Bourdon gauge) ile yüksek çözünürlüklü ve kalibrasyonlu bir basınç ölçer (pressure transducer) kullanılmıştır. Kazık başında mobilize olan yükler ise elektrik direnç cinsi yük hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) ile ölçülmüştür. Ayrıca, TK-3 (TİP-B) deney kazığında kazık tabanına aktarılan yükler tabanda yük transfer plakasına kilitlenen Dywidag GEWIPlus noktasına yerleştirilen 4 adet 15 MN (%150 Yük Aşımı) kapasiteli Titreşen Telli Yük Hücresi VWLC kullanılarak ölçülmüştür. Kazık başına transfer edilen yükün eksenelliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrisite etkisinin bertaraf edilebilmesi amacıyla yarım küresel mafsallı kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirişine sabitlenen deplasman ölçerler, tij tipi (T-EKST / Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (S-EKST / EXT2strain) tijlerinin izafi hareketlerini ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüş Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Referans kirişi üzerine yerleştirilen “Barkodlu Invar Mira” ile referans kiriş hareketinin belirlenmesi için dış referansa sabitlenen DNA-03 Elektronik Nivo ile diğer sensörlerden alınan ölçümlerle senkronize bir şekilde 0.01mm hassasiyette otomatik olarak okuma alınmıştır. Ayrıca, deney boyunca deney kirişlerinin devrilmeye karşı güvenliği açısından boyuna ve enine istikamette kirişlerde dönme ölçümü yapılmıştır.



Şekil 7 - Deney düzeneği, yük kontrol ve kumanda sistemi ve hidrolik pompa genel görünüşü

TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), deneyleri kapsamında ASTM D3689-07, (2013) Prosedür-A “Hızlı Test” (Procedure A "Quick Test") uyarınca yükleme programı uygulanmıştır (Tanlo 3). Nihai deney yüküne (%100 = 7 MN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılması hedeflenmiştir. Ancak, nihai yükte deney sistemi kapasitesinin imkan vereceğine kanaat getirilerek arttırılmış nihai yüke (%110 = 7.6 MN) 2 kademe daha yükleme

yapılarak (1L-22X adımı) 22 adımda çıkmıştır. Artırılmış nihai yükte 60 dk bekleme sonrası 5 adımda yine 15dk bekleme kademeleri ile boşaltılarak ve son aşamada sıfır yükte yine 60dk bekleme ile deney tamamlanmıştır (1U-5X). Deney boyunca deplasman, yük, basınç, birim deformasyon ölçümü verileri ve diğer veriler 60s aralıklarla otomatik veri toplama sistemi ile yedekli olarak kaydedilmiştir.

3.3. Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları

3.3.1. Deney Kazığı Yük-Deplasman Davranışı

TİP-A ve TİP-B, aksenal statik çekme kazık yükleme deneyleri (S-KYD/Ç) kazık imalatından yaklaşık 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Gerçekleşen nihai deney yükünde (1L-22-X) kazık başı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -34.73mm / TİP-B için ise -8.17mm ve kazık tabanı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -30.42mm / TİP-B için -9.44mm olarak ölçülmüştür (Şekil 8 (a)-(c)). Kazık Başında Yük - Zaman ve Kazık Başında / Kazık Tabanında Yukarı İstikamette Ortalama Deplasman - Zaman Grafikleri Şekil 8 (b)-(d)'de kıyaslamalı olarak ise (Şekil 9 (a)-(b)) verilmiştir. Kazık tabanında hesaplanan deplasman değerleri, tij tipi ekstansometre ölçümleri kullanılarak ve kazık taban yükü ise doğrudan tabandaki yük hücresi ölçümleri ile elde edilmiştir.

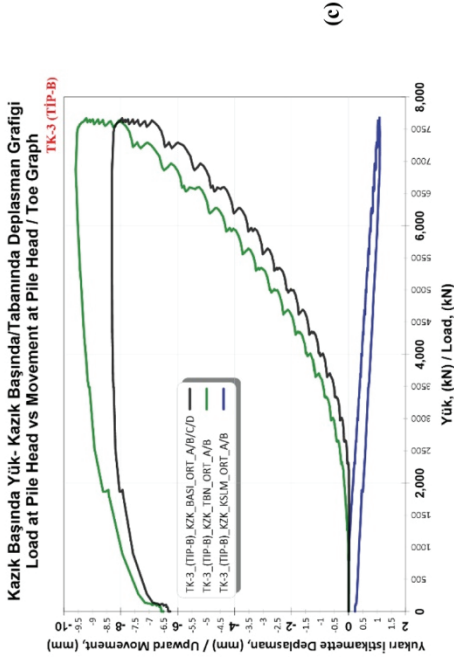
3.3.2. Kazık Boyunca Farklı Seviyelerde Ölçülen Birim Deformasyonlar

Kazık boyunca farklı seviyelerde ölçülen birim deformasyonlar Kazık başına tatbik edilen çekme yükü altında kazık boyunca farklı seviyelerde birim deformasyon ölçerlerden (VWSG/SB) elde edilen ve seygar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafeler için ortalama birim deformasyon grafikleri Şekil 10 (a) ve (b)'de verilmiştir.

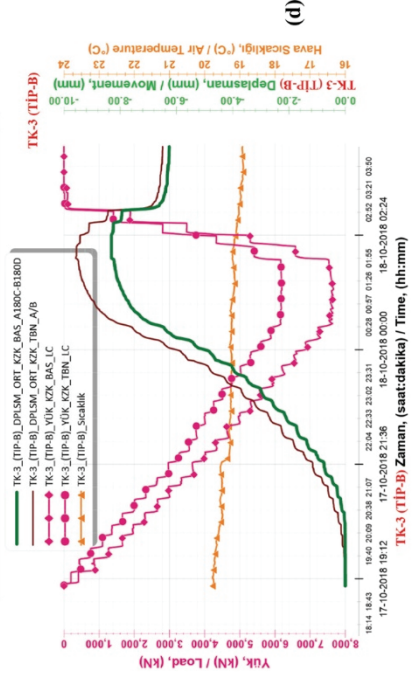
TİP-A ve TİP-B gerek seygar ekstansometre gerekse SG deney birim deformasyon verileri incelendiğinde farklı davranış göstermektedir. Nihai deney yükünde;

- *TK-2 (TİP-A) deneyinde VWSG birim deformasyon değerleri -1.356 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon değerleri maksimum -2.083 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*
- *TK-3 (TİP-B) deneyinde VWSG birim deformasyon maksimum değerleri +218 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon maksimum değerleri +212 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*

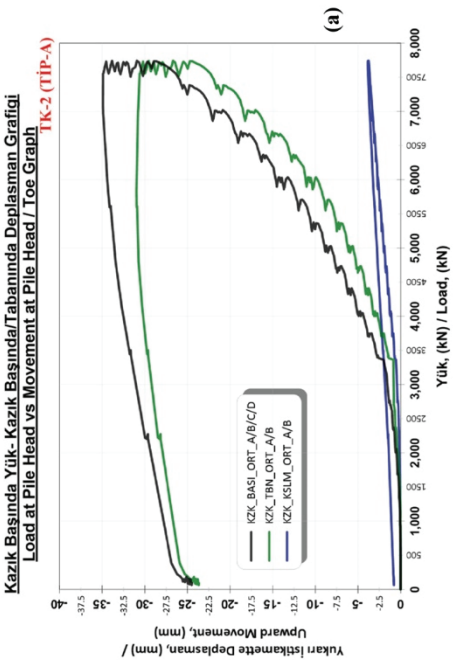
ölçülmüştür Şekil 11 (a)-(b)-(c)-(d). Benzer zemin durumlarında ve yük mertebelerinde ancak farklı yükleme durumunda betonarme kazık elemanının iç gerilmeleri açısından çok farklı davranış sergilediği net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, TİP-A betonarme kazık elemanın çekmeye çalışıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim uzama) verisinde S-EKST ortalama birim deformasyon (birim uzama) verisine kıyasla tabii olarak ani birim uzama değişimi gayet belirgindir ve grafikteki ani sıçrama kazık kesitinde betonun çekme mukametinin aşıldığı kesitteki ilk çatlak gelişimi olarak değerlendirilmektedir. Bu anomali TİP-B betonarme kazık elemanın basınca çalıştırıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim kısalma) verisinde ve S-EKST ortalama birim deformasyon (birim kısalma) verisinde görülmemektedir (Şekil 11 (a)-(b)-(c)-(d)).



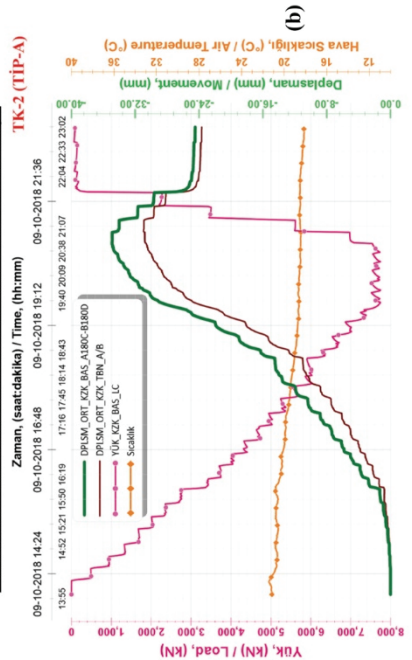
Kazık Başında Yük / Kazık Tabanında Deplasman - Zaman Grafiki
Load at Pile Head / Movement at Pile Head / Pile Toe vs. Time Graph

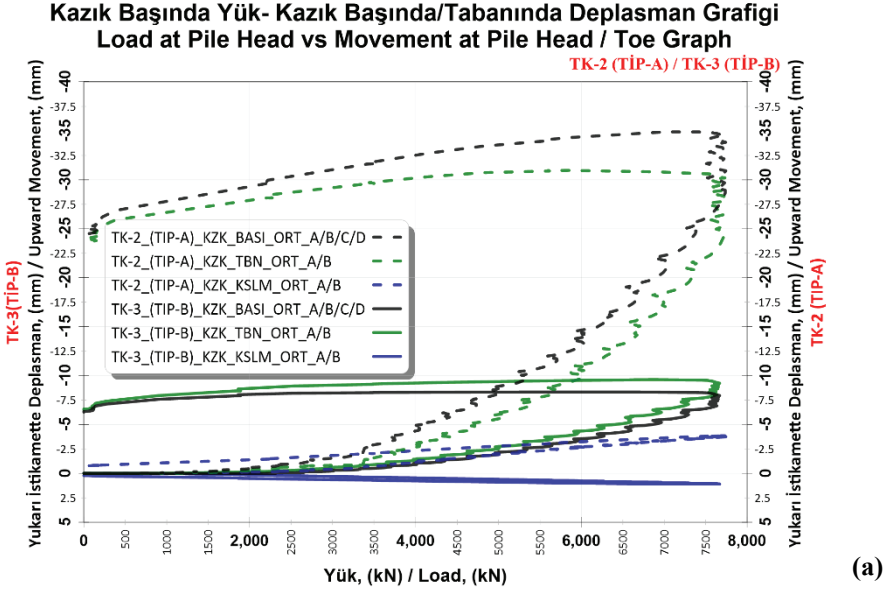


Şekil 8 - TK-2 (TIP-A) için (a) / TK-3 (TIP-B) için (c) Kazık başında yük - kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman ve kazık uzaması grafiki TK-2 (TIP-A) için (b) / TK-3 (TIP-B) için (d) Kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman / kazık başında yük - zaman grafiki.

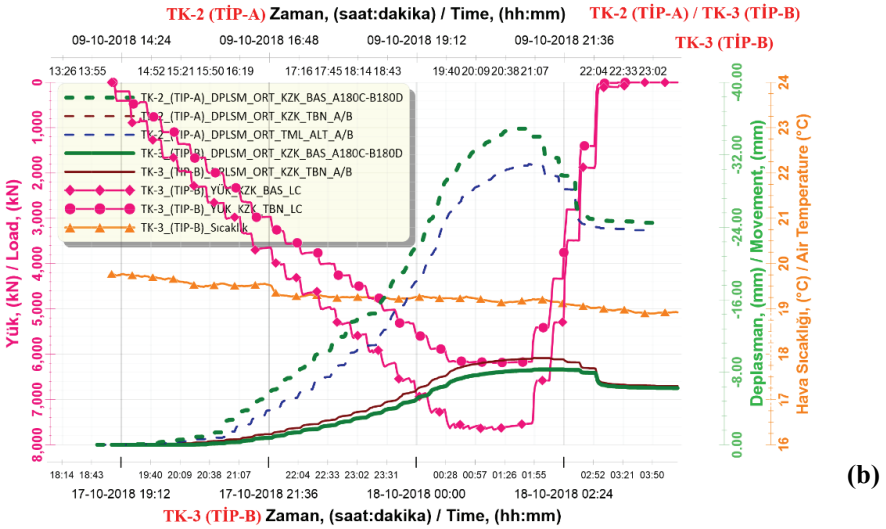


Kazık Başında Yük / Kazık Tabanında Deplasman - Zaman Grafiki
Load at Pile Head / Movement at Pile Head / Pile Toe vs. Time Graph

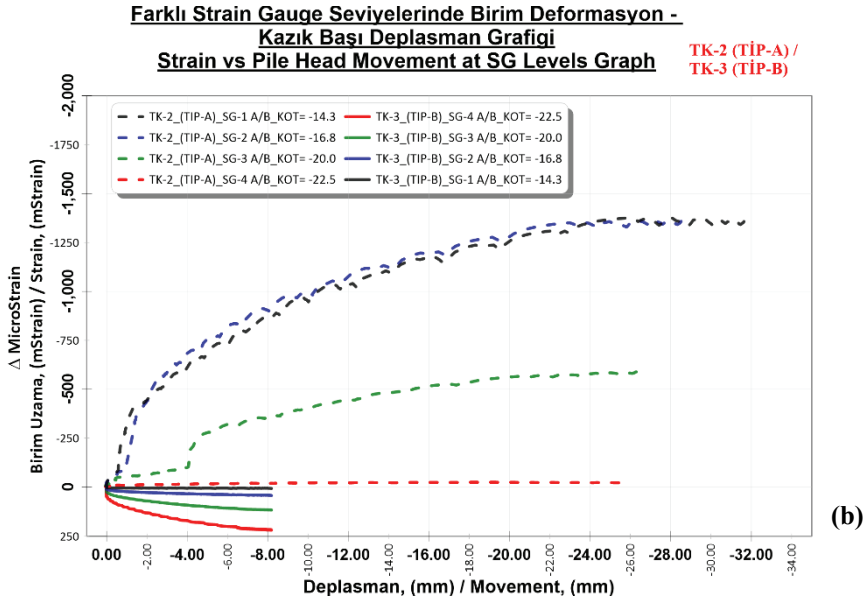
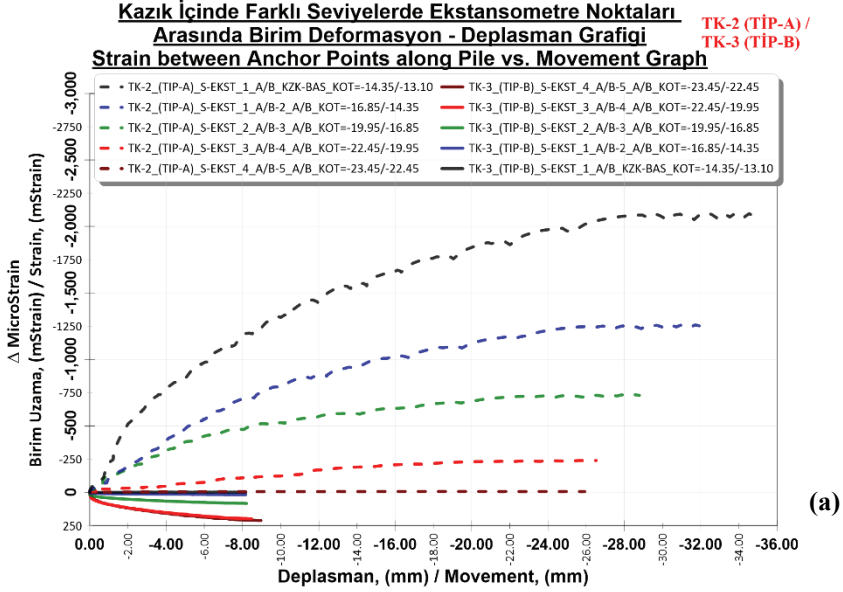




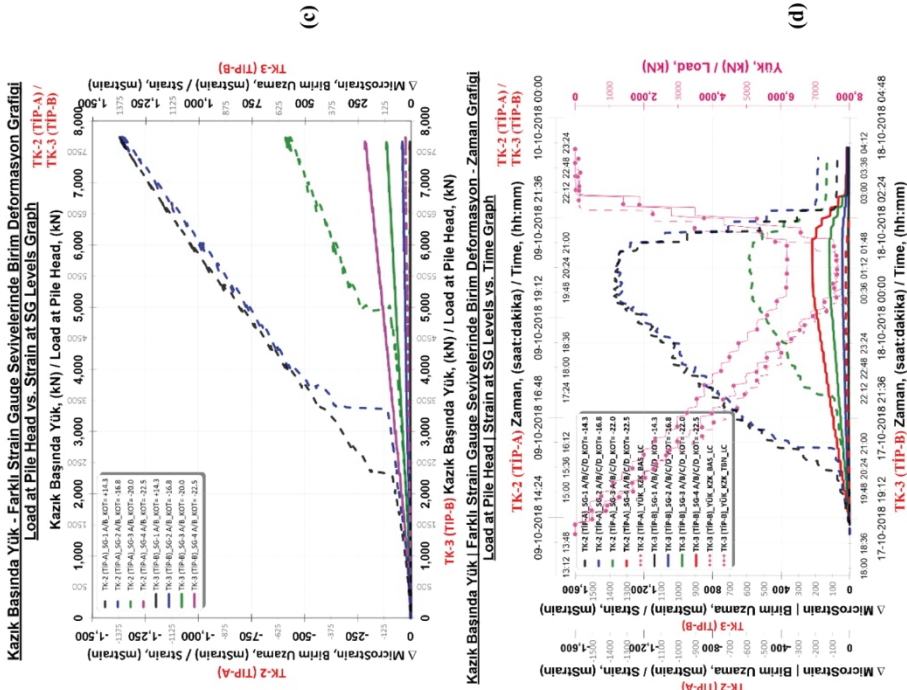
Kazık Başında Yük | Kazık Başında / Kazık Tabanında Deplasman - Zaman Grafiği
Load at Pile Head / Movement at Pile Head / PileToe vs. Time Graph



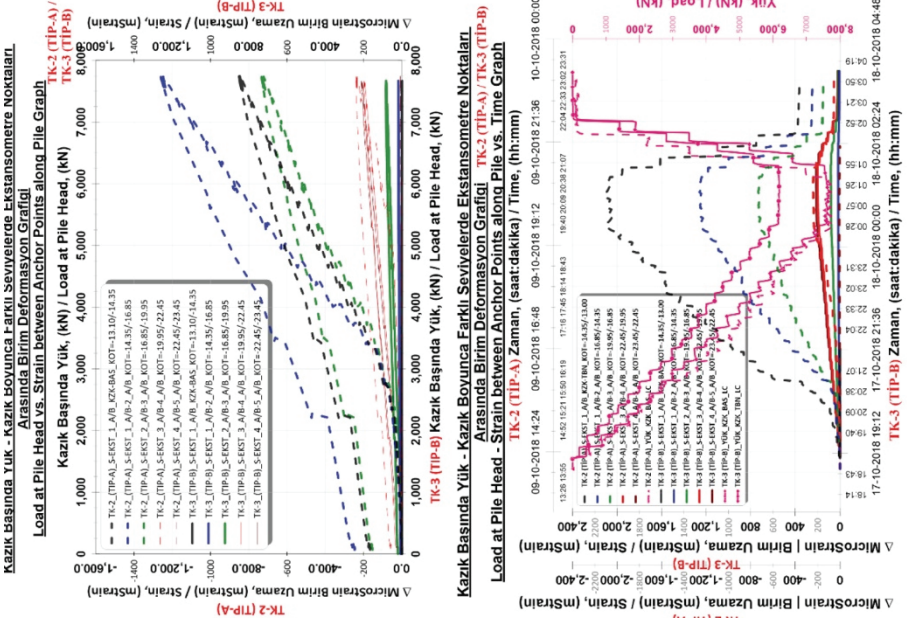
Şekil 9 - TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Kazık başında yük - kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman ve kazık uzaması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman / kazık başında yük - zaman grafiği



Şekil 10 - TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve ankraj noktalarındaki deplasman grafiği (b) VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve VWSG seviyelerindeki deplasman grafiği

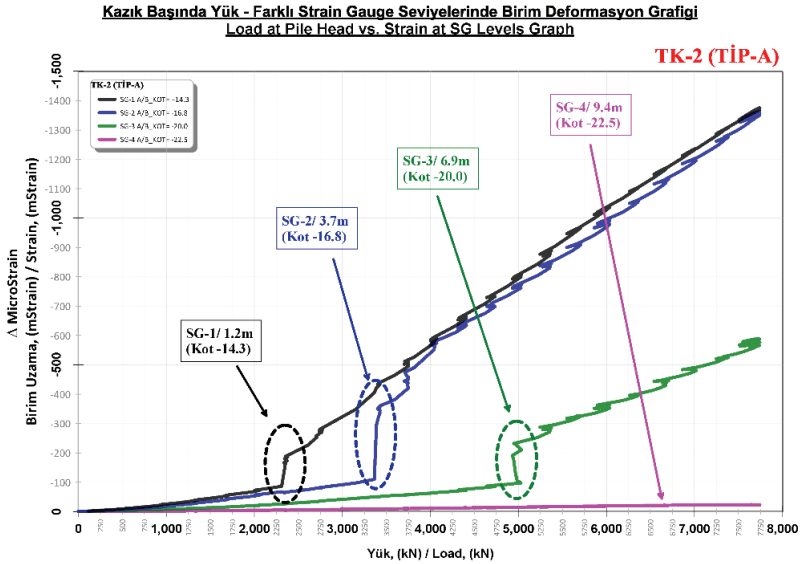


Şekil 11 - TK-2 (TIP-A) / TK-3 (TIP-B) için karşılaştırmalı (a) Kazık başında yük / Ankrāj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (b) Kazık başında / tabanında yük / Ankrāj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon - zaman grafiği, (c) Kazık başında yük - VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (d) Kazık başında / tabanında yük / VWSG seviyelerindeki birim deformasyon - zaman grafiği.



Şekil 12 - TK-2 (TIP-A) / TK-3 (TIP-B) için karşılaştırmalı (a) Kazık başında yük / Ankrāj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (b) Kazık başında / tabanında yük / Ankrāj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon - zaman grafiği, (c) Kazık başında yük - VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (d) Kazık başında / tabanında yük / VWSG seviyelerindeki birim deformasyon - zaman grafiği.

TİP-A yükleme durumunda SG-1 seviyesinde (1.2m derinlik) ilk çatlak gelişimi kazık başında ~2.3 MN yükleme kademesine ve ~70 mikroStrain çekme birim deformasyon mertebesine tekabül etmektedir. Tahmin edilebileceği üzere en yüksek birim deformasyon SG-1 seviyesinde gözlenmekte ve daha derindeki birim deformasyon ölçer seviyelerinde ise azalarak gözlemlenmektedir. Çatlak gelişiminin SG-2 ve SG-3 seviyelerinde (3.7m ve 6.9m mesafede) yaklaşık sırasıyla ~3.4 MN ve ~5.0 MN kazık başı yükleme kademelerinde ve ~120 ve ~70 mikroStrain çekme birim uzama mertebelerinin gözlemlenmektedir. Bu durum çatlak gelişiminin derinlikle aşağı istikamette ilerlediğinin göstermektedir (Şekil 12). Ancak, bu tespit seygar ekstansometre verisinde çok net olarak ayırt edilememektedir. Çatlayan ve geçiş zonuna yakın kesitte yerleştirilmiş bulunan bir birim deformasyon ölçer (SG) verisinde, seygar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafede oluşan ortalama birim uzama değerlerine nazaran ani çok daha yüksek birim deformasyon değişim değerlerinin ölçülmesi gayet tabiidir. Çatlak gelişimi maksatlı değerlendirilmelerde, ortalama birim deformasyon verisinden (S-EKST) ziyade noktasal bazda olan birim deformasyon ölçer (SG) verisinin dikkate alınmasının daha sağlıklı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 12 - Kazık başında yük - kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği

3.3.3. Deney Kazıklarında Tahribatsız Kalite Kontrol Deneyleri

Betonarme deney kazıklarının süreklilik durumu çekme deneyi öncesi, nihai yükte ve deney sonrası Kazık Bütünlük/Süreklilik Deneyi (KBD) ve Karşı Kuyu Ultrason Deneyi (K-KUD) deneyleri yapılmıştır. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) öncesinde gerçekleştirilen kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında reflektogram incelendiğinde çekiç darbesinin kazık başında mobilize olan süresinin nisbeten uzun (~2m) olduğu görülmektedir. Daha küçük bir çekiç kullanılarak daha kısa süreli darbe (0.5 - 1m)

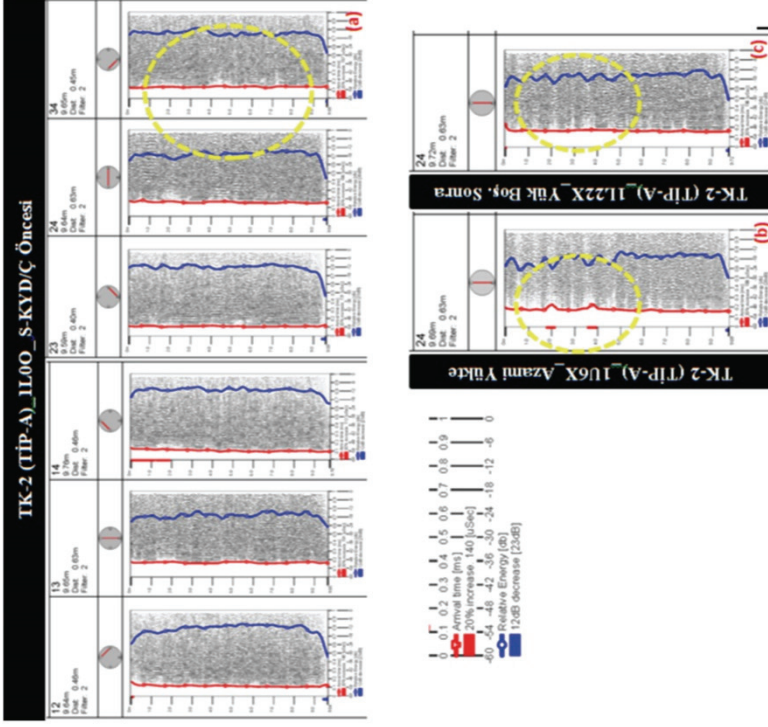
oluşturulabilmesi halinde kazık başına yakın olan çatlakların tesbitinin daha sağlıklı olabileceği [19] çalışmasında da raporlanmıştır.

Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında elde edilen reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde 4.000m/sn dalga hızı için yaklaşık 10.5m derinliğinde belirgin bir uç sinyali elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık 5.5m mertebelerindeki bir derinlikte muhafaza borusunun bittiği bölgede anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali görülmektedir (Şekil 3). Nihai yükte yapılan KBD deneyinde ise mobilize olan yüksek şaft direnci ve mevcut olduğu düşünülen çatlak gelişimi birçok sinyal yansımalarına sebebiyet vermekte ve reflektogramın sıhhatli bir şekilde değerlendirilebilmesine mani olmaktadır. Yükün boşaltılması akabinde yapılan KBD deneyinde ise kazık şaftında kilitli kalan bir miktar rezidüel gerilmelerin mevcut olduğu aşikârdır ancak nihai yükteki şaft direnci ile kıyas-ı kabül değildir. Reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde kazık başından yaklaşık 1.5m de “Serbest Uç” yansıması görülmekte ve takip eden 3.0m, 4.5m vb tekrarlı sinyal tepe noktaları anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali olarak değerlendirilebileceği ve muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu düşünülmektedir.

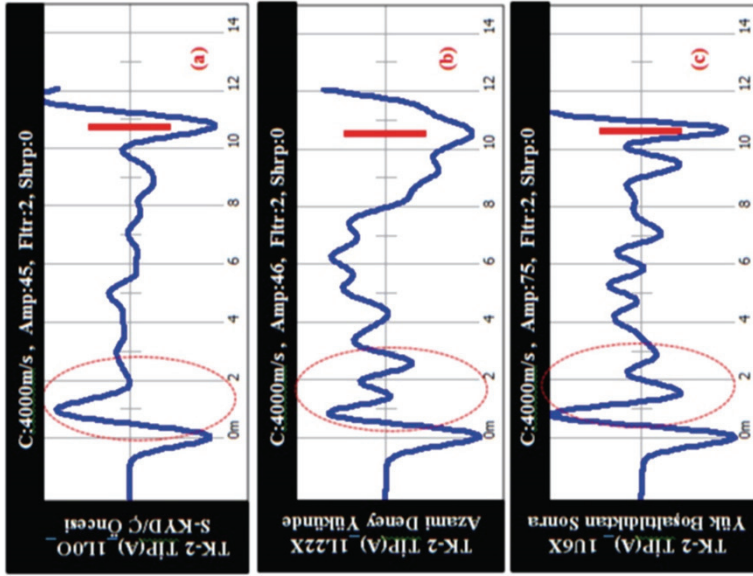
Karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) alıcı ve verici aynı seviyede olacak şekilde “standart tarama usulü” ile yapılmıştır. Alıcı ve vericinin farklı seviyelerde konumlandırılarak “offset tarama usulü” ile veya 3B tomografi yapılması halinde kazıktaki çatlak gelişiminin daha net görülebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çatlak gelişimi olan SG seviyelerinde dalga ilk varış zamanında >%20 gecikme (FAT, First Arrival Time, sinyal genliğine hassas olmayan özel FAT tespit algoritması ile, [3] ve ~7dB ($6\text{dB} < E_{\text{azalımı}} < 9\text{dB}$) Enerji azalımı tespit bu değerler, [18] tarafından tavsiye edilen şaft değerlendirme skalasına göre P/F (zayıf beton/sapma, Poor/Flaw) kategorisine tekabül etmektedir. Bütün bu anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici yöndedir.

3.4. Kazık Yükleme Denei Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çatlak oluşumunun iki ana aşaması bulunmaktadır: (1) ilk çatlak gelişimi ile başlayan “muhtelif çatlak oluşma safhası” ve (2) “nihai çatlak oluşmuş safha” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1). İlk safhada çatlak gelişimi rastgelelik arz ederek betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlamış kesitte beton-donatı aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere ve çatlak genişlemesine sebebiyet vermektedir. Çatlak gelişimi akabinde bu kesitte betondaki gerilme sifıra düşmektedir [8]. Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça beton-donatı aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen çekme gerilme değerine kadar artış göstermektedir. “Muhtelif çatlak oluşma safha” sında, gelişen çatlaklarda birbirinden bağımsız olarak beton-donatı aderansı ilişkisi geçerli olmaktadır. Yük artışı ile çatlaklar gelişmekte ve ortalama çatlak mesafesi azalmaktadır. “Nihai çatlak oluşmuş safhaya” ulaşıldığında artık ilave yük altında çatlak ara mesafeleri asgari değere ulaştığı için yeni çatlak oluşumu gerçekleşmemekte ve bu safhada artık çatlak ara mesafesi sabit kalmakta ve de ilave yük artışı tamamen çatlak genişliğinin artmasına sebebiyet vermektedir [8]. Bu duruma ilave olarak tatbik edilen bütün çekme gerilmelerinin tamamen donatılar tarafından taşındığı şeklinde de ifade edilebilmektedir.



Şekil 14 - Karşı kıyı ultrason deneyi (K-KUD) grafikleri
(a) S-KYD/Ç öncesi (b) azami yükte (c) yük boşalıldıktan sonra.



Şekil 13 - TIP A DeneY Kazığı bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) reflektogramları (a) S-KYD/Ç öncesi (b) azami deneY yükünde (c) yük boşalıldıktan sonra

TİP-A deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumu için birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi hususunda birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/garıplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Kazık başı yük - birim deformasyon ilişkisinde Şekil 15’de görülebileceği üzere kazıkta ilk çatlak gelişimi yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon değerlerinde oluşmaktadır.

ACI 318-14 Manual [1] uyarınca normal ağırlıkta bir beton için elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi;

$$E_{beton} = 4.700 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

E_{beton} = Beton için elastisite modül

f'_c = Silindir beton numunesi için serbest basınç mukavemeti

formülüyle hesaplanmaktadır. Deney kazık betonu silindir numunesi için raporlanan ortalama serbest basınç mukavemeti (28 günlük) 29.9 MPa’dır. Buradan beton elastisite modülü 25.7 GPa olarak hesaplanmıştır. Kazık net beton kesiti dikkate alındığında beton için eksenel rijitlik, EA_{beton} 19.7 GN elde edilmiştir. Benzer yaklaşımla kazık boyuna donatı alanı dikkate alındığında ($E_{donatı}=210\text{GPa}$, $22\Phi 32\text{mm}$ için $A_{donatı}=17.693\text{mm}^2$ olmak üzere), donatı için eksenel rijitlik $EA_{donatı}=3.7$ GN elde edilmektedir. Kompozit kazık kesiti için toplam kazık eksenel rijitliği (beton ve donatı için) $EA_{kazık}=23.4$ GN olarak hesaplanmaktadır.

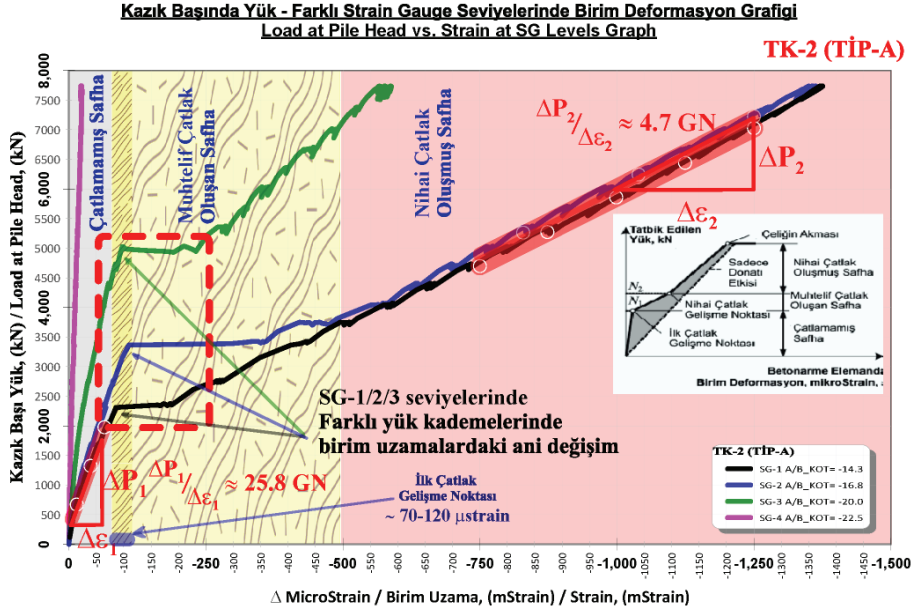
SG-1 seviyesinde (1.2m derinlikte) shaft direnci etkisi ihmal edilerek kazık başı yükünün değişmediği kabul edilmiştir. Kazık başı yükünün kademeli olarak artmasına karşılık benzer şekilde SG seviyelerinde shaft direncine bağlı olarak yük azalarak kazık boyunca transfer edilmektedir. Aktarılan yük kademesinde birim yük artışına bağlı gelişen birim deformasyon artışı kazık eksenel rijitliğine nisbetle artmaktadır. Bu da ilgili kesitteki yük ve birim deformasyon grafiğinin eğimine takabül etmektedir. Bu kapsamda Şekil 15’den takip edilebileceği üzere SG-1 seviyesinde birim kazık başı yükü değişimi - birim deformasyon değişimi grafiğinin çatlama safhadaki eğimi için

$$EA_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta \varepsilon_1} = 25.8 \text{ GN} \quad (EA_{kazık} \approx 23.4 \text{ GN})$$

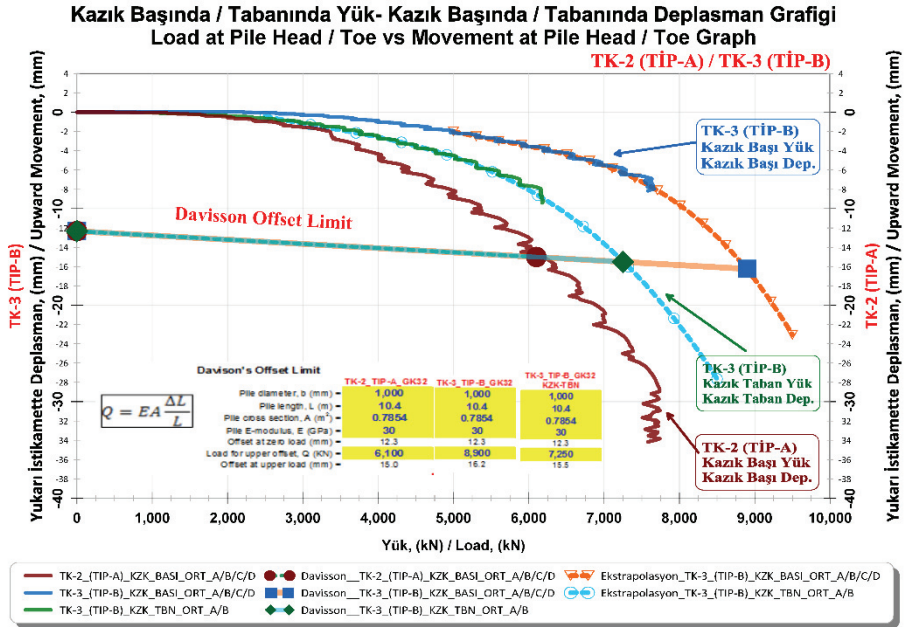
ve nihai çatlak oluşmuş safhadaki eğimi için ise

$$EA_2 = \frac{\Delta P_2}{\Delta \varepsilon_2} = 4.7 \text{ GN} \quad (EA_{donatı} \approx 3.7 \text{ GN})$$

değerleri elde edilmektedir. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) ölçülen SG verilerinden elde edilen bu değerler kompozit kesit için hesaplanan kazık eksenel rijitlik ve donatı için eksenel rijitlik değerleri ile kıyaslanabilir mertebelerde olduğu görülmektedir. Buradan “çatlama safha” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “nihai çatlak oluşmuş safha” da ise donatı ile taşındığı söylenebileceği düşünülmektedir.



Şekil 15 - Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi - kazık başı yükü grafiği



Şekil 16 - Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi - kazık başı yükü grafiği

Bu mekanizma çekme yüküne maruz betonarme kazıkların deneyde elde edilen yük-deplasman ilişkisinde bir akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir Şekil 16. TİP-A deney kazığında konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisinde yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde bu etki görülmektedir. TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeble deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır.

TİP-A deney kazığı malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını şaft direncinden kaynaklı olmamasına rağmen sun'î bir şekilde etkilemektedir. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktası farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla, kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Metodu [11] ile kazık başı yük ve kazık başı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kazık tabanı yük ve kazık tabanı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir (TİP-B deneyinde kazık deplasmanı sınırlı miktarda olduğundan kazık kapasite tahmini yapılabilmesi için yük-deplasman eğrileri ekstrapole edilmiştir). Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasmanı ilişkisine göre Davisson Metodu ile $> \sim 146$ mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Betonarme kazıklarda konvansiyonel olarak kazık başından çekme yükü tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme mukavemetine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Bu makalede birim deformasyon ölçer verisi çatlak gelişimi için birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi ve karşı kuyu ultrason deneyi kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/garıplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tespit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilmiştir. Kazık eksenel rijitlik hesapları da bu ölçüm sonuçları ile uyumaktadır. Bu durum değerlendirildiğinde “Çatlamamış safha” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “nihai çatlak oluşmuş safha” da ise donatı ile taşındığı sonucuna ulaşılmaktadır.

TİP-A deney kazığında konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisinde akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir ve bu mekanizma yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde görülmektedir. Kazık malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını şaft direncinden kaynaklı olmamasına rağmen etkilemektedir. Yapılmış olan TİP-A deneyinde, bu hadisenin yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon mertebelerinde gözleendiği, literatürdeki muhtelif çalışmalarda ise 50-150 mikroStrain mertebelerinde olduğu rapor edilmiştir [7] [13].

TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük - kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeble deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır.

TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktasının farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi Davisson Yöntemi ile kazık başı yükü ve kazık başı deplasmanı için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN ve kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman için yapılan analizde ise TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir. Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük - kazık başı deplasman ilişkisine göre “Davisson Kazık Kapasitesi Tahmin Yöntemi” ile ~%146 mertebelerinde yine TİP B için kazık tabanı yük - kazık tabanı deplasman ilişkisi kıyaslamasına göre ise ~%120 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

Konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda elde edilen bu sonuçlara göre çekme yüküne maruz betonarme kazık tasarımında kazık boyunca oluşacak nihai birim deformasyon değeri tahdidi, faydalı bir kazık tasarım sınır şartı olarak tavsiye edilebileceği düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, kazıkta mobilize olan maksimum birim deformasyonun 50-100 mikroStrain metebelerinde sınırlandırılması ile çatlaksız bir kazık tasarımı yapılabilecektir (mevcut şartnamelerdeki çatlamış kesit tasarımı çatlak gelişimine mani olmamaktadır). Ayrıca hesaplanan kazık kapasitesinin daha düşük tahmin edilmesinin önüne geçecek ve malzeme durabilitesini artıracaktır. Ancak, bu kadar düşük birim deformasyon değerlerinin kazık tasarımında esas alınması beton çekme kapasitesi açısından gerekli iken, donatının çekme kapasitesinin çok sınırlı mertebelerde kalmasının ekonomik bir yaklaşım olmadığı dikkate alınmalıdır.

Çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda, “kazık kapasite hesaplarına” ve “kazık çekme deney verilerine göre kazık kapasitesi tahmin yaklaşımlarına” çatlak gelişiminin ve çekme birim deformasyon etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi ve bu probleme çözüm üretilebilmesi için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır.

TİP-B uygulamasında kullanılan özel düzenek ile kazık tabanından çekilmesi durumu uygulama pratiği ve betonarme çekme kazık tasarımı hususunda çekme kapasitesi ve uzun vadede durabiliteye etkisi açısından faydalı bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Semboller

$E_{donatı}$: Donatı için elastisite modül
$A_{donatı}$: Donatı kesit alanı
L_{net}	: Net kazık boyu
L_{toplam}	: Toplam kazık boyu
E_{beton}	: Beton için elastisite modül
A_{beton}	: Beton kesit alanı
f'_c	: Silindirik beton numunesi için serbest basınç mukavemeti
σ_{et}	: Beton çekme mukavemeti
EA	: Eksenel rijitlik

P	: Kazık başı yükü
ϵ	: Birim deformasyon
F_{yk}	: GEWIPlus için akma yükü
TİP-A	: Konvansiyonel olarak kazık başından yukarı istikamette çekilmesi
TİP-B	: Özel bir tertibat ile kazık tabanından yukarı istikamette çekilmesi
PDK-T	: Performansa Dayalı Kazık Tasarımı
KBD	: Kazık bütünlük/süreklilik deneyi
K-KUD	: Karşı kuyu ultrason deneyi (CrossHole Sonic Logging-CSL, CrossHole Ultrasonic Method-CHUM)
FAT	: İlk varış zamanı (First Arrival Time)
S-EKST	: Seyyar ekstansometre (EXT2strain)
T-EKST	: Tij tipi ekstansometre (Tell-tale)
S-KYD/Ç	: Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi
SG	: Birim deformasyon ölçer
VW	: Titreşen telli
VWSG/SB	: Titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçer

Kaynaklar

- [1] ACI Committee, American Concrete Institute, International Organization for Standardization (2014), “Building Code Requirements for Structural Concrete” (ACI 318-14) and Commentary. American Concrete Institute.
- [2] Akçay Aldanmaz, B. (2020). Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi. Teknik Dergi, 31(1), 9773-9787. <https://doi.org/10.18400/tekderg.419819>
- [3] Amir, E.I and Amir J.M. (1998), “Recent Advances in Ultrasonic Pile Testing”, Proc. 3rd Intl’ Geotechnical Seminar on Deep Foundation On Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 181-185
- [4] ASTM D3689/D3689M-07, (2013) e1., “Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [5] 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

- [6] 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
- [7] Bicocchi, N., (2011), “Structural and Geotechnical Interpretation of Strain Gauge Data from Laterally Loaded Reinforced Concrete Piles”, PhD Thesis, University of Southampton.
- [8] Borosnyoi, G. and Balazs, G. (2005), “Models for flexural cracking in concrete: the state of the art”, *Structural Concrete* 6 No 2: 53-62.
- [9] England, M.G. (2012), “On the Subject of Piles in Tension”. 680-693. 10.1061/9780784412084.0047.
- [10] 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.
- [11] Fellenius, B.H., (2021). “Basics of Foundation Design”, Electronic Edition, www.Fellenius.net.
- [12] Fields, K. and Bischoff, P. H. (2004), “Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members”, *ACI Structural Journal* 101(4): 447-456.
- [13] İnanir, O.E. (2018), “Eksenel Yüklü Kazıklarda Yük Transfer İlişkisi ve Çekme Yüküne Maruz Fore Kazıklarda Süreklilik”, FC-TUGM Sempozyumu ‘Prof.Dr. Feyza Çinicioğlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu’, İstanbul Üniversitesi, 10-05-2018, 92-106.
- [14] İnanır, O.E., İnanır, M. (2022), “Integrity of Bored Piles Under Tension”, 11th International Stress Wave Conference, September 20-23 2022 Rotterdam The Netherlands,
- [15] İnanır, O.E., Berilgen, M.M., Şenol, A. (2022), “Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazıklarda Çatlak Gelişimi”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, 29-30 Eylül 2022 Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- [16] Jardine, R.J. and Chow, F.C.(1996), “New design methods for offshore piles”, MTD Publication 96/103, MTD, London.
- [17] Liew, S.S., Khoo, C.M. and Tan, S.T. (2011), “Pile Performance in Weathered MetaSedimentary Formation and KL Limestone”, Corpus ID: 198924708, Malaysia.
- [18] Likins, G. E., Rausche, F., Webster, K. and Klesney, A. (2007), “Defect Analysis for CSL Testing”. Geo-Denver 2007 New Peaks in Geotechnics.
- [19] Middendorp, P., Schellingerhout, J., (2006), “Pile Integrity Testing in the Netherlands”, 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, DFI, Amsterdam.
- [20] Somayaji, S. and Shah, S. P. (1981), “Bond stress versus slip relationships and cracking response of tension members”, *ACI Journal Proceedings* 78(3): 217-225.

