Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

RIHTIM KAZIKLARINDA DİNAMİK TEST–STATİK TEST KORELASYONU VE ZAMAN BAĞIMLI KAPASİTE ARTIŞI

CORRELATION OF DYNAMIC AND STATIC TESTS AND TIME-DEPENDENT CAPACITY INCREASE IN QUAY PILES

Caner KALDI[1], Halil MERT[2]

ÖZET

Bu çalışma, alüvyon ve sıvılaşma potansiyeli yüksek zemin koşullarında inşa edilen bir rıhtımda kullanılan çelik boru kazıkların taşıma kapasitesinin zamanla değişimini ve dinamik test sonuçları (Restrike PDA) ile statik yükleme testleri arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Projemizde Ø1320.8 mm, 22 mm et kalınlıklı, ortalama 70 m boyundaki kazıklar yüzer duba üzerinde Delmag D100 dizel şahmerdan ile çakılmıştır. Saha programı kapsamında 41 adet PDA (Kazık Çakım Analizi) ve 3 adet statik yükleme testi gerçekleştirilmiş. PDA verileri CAPWAP analizleri ile değerlendirilmiş ve statik yükleme testleri Chin-Kondner yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Sonuçlar, belirli kazıklarda Dinamik Kazık Yükleme (Restrike PDA) testlerinde zamana bağlı setup etkisi ile kapasite artışı göstermektedir. Dinamik Kazık Yükleme Testi (Restrike PDA) sonuçları ve Statik Kazık Yükleme Testi kapasite sonuçları arasında korelasyon gözlemlenmiştir. Bulgular, deniz yapılarında kalite güvencesi, test zamanlaması ve tasarım güvenlik katsayılarının seçimi için uygulamaya dönük öneriler sunmaktadır.
Anahtar Kelimeler: *PDA, Statik yükleme testi, Zamana bağlı kazık taşıma kapasitesi*

ABSTRACT

This study investigates the time-dependent variation in the load-bearing capacity of steel pipe piles installed in a wharf constructed on alluvial soils with high liquefaction potential, as well as the relationship between dynamic test results (Restrike PDA) and static load tests. In the project, steel pipe piles with a diameter of 1320.8 mm, a wall thickness of 22 mm, and an average length of approximately 70 m were driven from a floating platform using a Delmag D100 diesel hammer. As part of the field testing program, 41 PDA (Pile Driving Analyzer) tests and 3 static pile load tests were conducted. The PDA data were evaluated through CAPWAP analyses, while the static load test results were interpreted using the Chin-Kondner method. The results indicate that certain piles exhibited a time-dependent increase in bearing capacity due to the setup effect, as observed in the Restrike PDA tests. A correlation was identified between the capacities obtained from Restrike PDA tests and those derived from static pile load tests. The findings provide practical recommendations regarding quality assurance procedures, test timing, and the selection of design safety factors for marine structures.
Keywords: *PDA, Static load test, Time-dependent pile capacity*

1. GİRİŞ

Deniz yapılarında kullanılan çelik boru kazıkların taşıma kapasitesinin doğru ve güvenilir şekilde belirlenmesi hem tasarım güvenliği hem de ekonomik optimizasyon açısından kritik

[1] İnşaat Yük. Müh., Erdemir Mühendislik Yön. Ve Dan. Hiz. A.Ş., ckaldi@erdemir.com.tr (Sorumlu yazar)
[2] İnşaat Teknikeri, Erdemir Mühendislik Yön. Ve Dan. Hiz. A.Ş., hamert@erdemir.com.tr

öneme sahiptir. Özellikle alüvyonal ve heterojen zemin koşullarında inşa edilen rıhtım yapılarında kazık davranışı, yalnızca zemin türüne değil, aynı zamanda zamana bağlı zemin-kazık etkileşimine de duyarlıdır.

Bu çalışmada, ilk çakım sırasında gerçekleştirilen ölçümler "Initial PDA ", çakım sonrasında belirli bekleme süreleri sonunda gerçekleştirilen yeniden darbe testleri ise " Restrike PDA" olarak adlandırılmıştır. Bununla birlikte, restrike testleri literatürde dinamik yükleme deneyi (DLT) kapsamında da değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada terminolojik bütünlük sağlamak amacıyla "Restrike PDA" ifadesi kullanılmıştır. Ayrıca kazıkların çakım sonrasında bekleme süresine bağlı olarak taşıma kapasitesinde meydana gelen artış "set-up etkisi" olarak tanımlanmaktadır.

Dinamik kazık yükleme testleri (Restrike PDA), sahada hızlı ve ekonomik veri sağlamakta olup yaygın bir kalite kontrol aracı olarak kullanılmaktadır. Ancak bu testler, zemin-kazık etkileşiminin tam mobilize olmadığı durumlarda nihai taşıma kapasitesini konservatif olarak tahmin edebilmektedir. Buna karşılık statik yükleme testleri, kazık kapasitesinin doğrudan belirlenmesinde referans yöntem olup tam ölçekli test olmasından ötürü daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, alüvyonal zemin koşullarında inşa edilen bir rıhtım yapısında uygulanan çelik boru kazıklara ait PDA (initial ve restrike) testleri ile statik yükleme test sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı;

- Zamana bağlı set-up etkisinin ortaya konulması,
- PDA ve statik test sonuçları arasındaki korelasyonun belirlenmesi,
- Zemin koşullarının kazık davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bulguların, özellikle deniz yapılarında test planlaması, zaman yönetimi, tasarım güvenlik katsayılarının seçimi ve PDA sonuçlarının yorumlanması açısından uygulamaya yönelik önemli katkılar sağlaması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, İskenderun Demir Çelik Fabrikası Limanı Rıhtım inşaatı kapsamında çakılan çelik boru kazıklara ait statik ve dinamik yükleme test verileri kullanılmıştır. Rıhtım yapısının temel sistemi kapsamında, dış çapı Ø1320,8 mm, et kalınlığı 22 mm olan, boyları 67-69 m arasında değişen ve S355J0H kalite çelikten imal edilmiş toplam 240 adet açık uçlu çelik boru kazığın çakımı gerçekleştirilmiştir. Kazık taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla projede 41 adet kazığa PDA (Kazık Çakım Analizi) ve 3 adet kazığa statik yükleme testi yapılmıştır. Çalışma kapsamında ilk çakım sonu (InitialPDA) ve tekrar çakım (RestrikePDA) verileri bulunan 16 adet kazık analiz edilmiştir. Geoteknik değerlendirmelerde saha zemin etüt raporları, sondaj logları, düzeltilmiş SPT-$(N_1)_{60}$ değerleri ve proje kapsamında hazırlanan geoteknik tasarım raporları kullanılmıştır. Kazık çakımında ve PDA testlerinde tablo1 'de özelikleri verilen dizel çekiç kullanılmıştır.

Tablo 1. Çekiç Özellikleri

Çekiç Özellikleri	
Çekiç Tipi ve Modeli	Dizel Çekiç /Delmag 100-13
Ram Ağırlığı	10.000 Kg
Darbe Enerjisi	334-360 kNm
Refusal Kriter	60 darbe /100 mm
Blow Count	36-45 darbe/dakika
Son Penetrasyon Değeri	3 mm/darbe

İlk çakım (initial) ve tekrar çakım (restrike) testlerinde elde edilen toplam taşıma kapasitesi (Ru), çevre sürtünme direnci (Rs), uç direnci (Rb) ve tekrar çakım zamanları veri setini oluşturmuştur. Ayrıca kazıkların bulunduğu bölgelerdeki zemin profilleri ve geoteknik parametreler değerlendirilerek kapasite artışlarının zemin koşulları ile ilişkisi incelenmiştir.

Çalışmada çakma kazıkların zamanla meydana gelen taşıma kapasitesi değişimleri, dinamik yükleme testlerinden elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Dinamik testler ASTM D4945 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir, kazık başına yerleştirilen gerinim ölçerler ve ivmeölçerler yardımıyla darbe sırasında oluşan kuvvet ve hız sinyalleri kaydedilmiştir. Elde edilen sinyaller CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) yazılımında analiz edilerek kazıkların eksenel taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. CAPWAP analizlerinde kazık, elastik özelliklere sahip segmentler halinde modellenmiş, zemin ise elastik-plastik yay ve sönüm elemanlarından oluşan bir sistem olarak kabul edilmiştir. Analiz sonucunda toplam taşıma kapasitesi (Ru), çevre sürtünme direnci (Rs) ve uç direnci (Rb) ayrı ayrı elde edilmiştir.

Kazıklardaki zaman bağımlı kapasite değişiminin belirlenmesi amacıyla ilk çakım sonu kapasitesi Initial PDA (Qinitial) ve tekrar çakım kapasitesi Restrike PDA (Qrestrike) sonuçları karşılaştırılmıştır. Kapasite artış oranı (Set-Up oranı (S_u)) aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır:

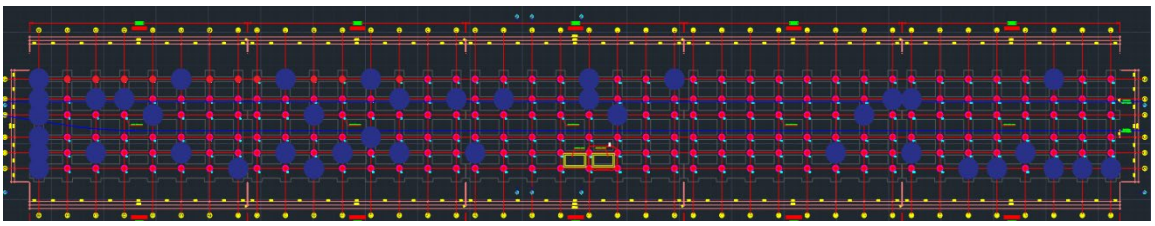
$$S_u = \frac{Q_{restrike}}{Q_{initial}}$$

Ayrıca kazıkların taşıma kapasitesinin doğrulanması ve PDA testleri ile karşılaştırmak amacıyla statik yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, ilgili proje teknik şartnameleri ile ASTM D1143 standardında tanımlanan eksenel basınç yükleme prosedürlerine uygun şekilde uygulanmıştır. Yükleme sırasında kazık başına kademeli olarak yük uygulanmış ve her yük kademesine karşılık gelen oturma değerleri ölçülmüştür. Ölçümler, referans kiriş sistemine bağlanan deformasyon komparatörleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Statik yükleme testlerinden Chin-Kondner yöntemi ile elde edilen tahmini taşıma kapasiteleri (Q_{SLT}), dinamik yükleme testlerinden elde edilen toplam taşıma kapasiteleri (Ru) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile CAPWAP analizlerinin güvenilirliği ve tekrar çakım sonrasında meydana gelen taşıma kapasitesi artışlarının doğrulanması amaçlanmıştır.

3. ÇELİK KAZIKLARDA DİNAMİK TEST (RESTRIKE PDA)

PDA (Kazık Çakım Analizi), kazık başında ölçülen kuvvet ve hız verilerini kullanarak dalga mekaniği temelli analiz yapan ve kazığın taşıma kapasitesi, gerilmeleri ve zemin direncini belirleyen dinamik bir test sistemidir.



Şekil 1. PDA Test Dağılımı

Bu çalışma kapsamında Şekil 1 ‘de test dağılım planı verilen toplam 41 adet kazık üzerinde PDA testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk ölçümler sonucunda 16 adet kazığın taşıma kapasitesinin hedeflenen tasarım değerlerine ulaşmadığı tespit edilmiş ve bu kazıklar üzerinde belirli bekleme süreleri sonrasında Restrike PDA testleri uygulanmıştır. Bu doğrultuda, Restrike PDA testine tabi tutulan 16 adet kazığın zamana ve zemin özelliklerine bağlı taşıma kapasitesi değişimi incelenerek set-up etkisi değerlendirilmiştir.

3.1. Yapı Bölgesinin Zemin Durumu

Rıhtım yapısında 5 noktada DS13,DS14,DS16,DS17 ve DS18 deniz sondajları yapılmıştır. Tablo 2 ‘de ilgili sondaj logları verilmiştir.

Tablo 2. Sondaj Logları

Derinlik (m)	DS13	DS14	DS16	DS17	DS18
0–10	Deniz+dolgu ($(N_1)_{60}\approx18$)	Deniz+dolgu ($(N_1)_{60}\approx20$)	Deniz+dolgu ($(N_1)_{60}\approx22$)	Deniz+dolgu ($(N_1)_{60}\approx35$)	Deniz ($(N_1)_{60}\approx14$)
10–20	Kum-çakıl+silt ($(N_1)_{60}\approx17$)	Kum-çakıl+silt ($(N_1)_{60}\approx23$)	Kil+silt+çakıl ($(N_1)_{60}\approx34$)	Siltli kum+çakıl ($(N_1)_{60}\approx26$)	Çakıl+kil ($(N_1)_{60}\approx24$)
20–30	Siltli kum ($(N_1)_{60}\approx15$)	Siltli kum ($(N_1)_{60}\approx28$)	Siltli kum+kil ($(N_1)_{60}\approx37$)	Siltli kum+kil ($(N_1)_{60}\approx28$)	Siltli kum+çakıl ($(N_1)_{60}\approx27$)
30–40	Gevşek-orta siltli kum ($(N_1)_{60}\approx18$)	Çakıl+kum ($(N_1)_{60}\approx40$)	Kil+konglomera geçişi ($(N_1)_{60}\approx42$)	Plastik kil+silt ($(N_1)_{60}\approx22$)	Çakıl+kum ($(N_1)_{60}\approx38$)
40–60	Orta sıkı kum/silt ($(N_1)_{60}\approx30$)	Siltli kum ($(N_1)_{60}\approx25$)	Sıkı kum ($(N_1)_{60}\approx42$)	Kum+silt (iyi derecelenmiş) ($(N_1)_{60}\approx28$)	Sıkı-çok sıkı siltli kum ($(N_1)_{60}\approx45$)
60+	Kum ağırlıklı ($(N_1)_{60}\approx35$)	Siltli kum (derin) ($(N_1)_{60}\approx27$)	Sıkı kum ($(N_1)_{60}\approx48$)	Çok sıkı kum ($(N_1)_{60}\approx42$)	Çok sıkı siltli kum ($(N_1)_{60}\approx50$)

Sondaj verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, yüzeyde homojen dolgu ve deniz ortamını takiben, orta derinliklerde heterojen kum–çakıl–silt ardalanmaları gözlenmiş, daha derin seviyelerde ise genel olarak granüler zeminlerin hâkim olduğu belirlenmiştir. DS16 ve DS17 sondajlarında belirgin kil içerikleri gözlenirken, DS13 ve DS14’te granüler zeminlerin

ağırlıkta olduğu, DS18'de ise daha homojen bir siltli kum profilinin hâkim olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca, zemin tabakalarının göreli sıkılık ve kıvam özelliklerinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamak amacıyla, standart penetrasyon deneylerinden elde edilen ve enerji ile örtü yükü düzeltmeleri uygulanmış düzeltilmiş SPT-$(N_1)_{60}$ değerleri de tabloda sunulmuştur.

3.2. PDA (Initial PDA ve Restrike PDA)Testlerinin Zamana Bağlı Değişimi

Tablo 3'te Restrike PDA testi yapılan 16 adet kazığın zamana bağlı taşıma kapasiteleri , bekleme süreleri ve set-up katsayıları verilmiştir. Bekleme süresi, Initial PDA test ile Restrike PDA test arasında geçen süreyi ifade etmektedir.

Tablo 3. PDA Test Değerleri ve Set-Up Katsayıları

K.N.	INITIAL-PDA (Qinitial)			Bek. Süresi	RESTRIKE-PDA (Qrestrike)			Set-Up Katsayısı (Su)
	Uç (Rb) (Ton)	Yüzey (Rs) (Ton)	Toplam(Ru) (Ton)		Uç (Rb) (Ton)	Yüzey (Rs) (Ton)	Toplam(Ru) (Ton)	
1	249	240	489	34	650	570	1220	2,49
6	174	714	888	49	473	610	1083	1,21
9	112	622	734	29	184	759	943	1,29
33	392	268	660	10	390	593	983	1,48
41	298	550	848	39	295	622	917	1,08
48	394	256	650	20	191	803	994	1,52
50	383	273	656	16	393	577	970	1,47
53	260	494	754	50	293	520	813	1,07
104	91	730	821	53	137	951	1088	1,32
118	324	344	668	35	363	426	789	1,18
160	274	293	567	5	225	692	917	1,61
167	221	511	732	22	219	541	760	1,03
201	363	245	608	4	243	734	977	1,60
229	101	350	451	11	145	936	1081	2,39
235	383	300	683	11	273	708	981	1,43
239	160	327	487	11	191	966	1157	2,37

Set-up katsayılarının dağılımı incelendiğinde, verilerin büyük çoğunluğunun 1.2–1.6 aralığında yoğunlaştığı, ancak bazı kazıklarda 2.0'nin üzerinde değerler elde edildiği görülmüştür. Bu durum, sahada genel bir set-up davranışı bulunmakla birlikte, yerel zemin koşullarına bağlı olarak önemli farklılıklar oluştuğunu göstermektedir.

Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda, kazıkların bekleme süresi ile (birlikte) taşıma kapasitesinde artış meydana geldiği ve buna bağlı olarak set-up etkisinin zamanla geliştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, zemin koşullarındaki değişkenliğin set-up davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve aynı bekleme sürelerine karşılık farklı set-up katsayılarının elde edildiği gözlenmiştir.

Kazık yerleşim planı ile sondaj noktalarına ait zemin profilleri birlikte değerlendirilerek, farklı zemin koşullarının kazık davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, DS13, DS14, DS16, DS17 ve DS18 sondajlarına ait zemin logları ile kazıklara ait set-up katsayıları karşılaştırılmış ve zemin özellikleri ile zamana bağlı kapasite artışı arasındaki ilişki ortaya konulmaya çalışılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, farklı zemin tiplerinin set-up davranışı üzerindeki etkisi Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Kazık-Zemin ve Set- Up Değerleri Arasındaki İlişki

S. No	Kaz. No	Zemin Özelliği (0–70 m)	Hakim Tabaka	Hâkim Tabakaya Ait Ort. $(N_1)_{60}$	φ' (°)	c' (kPa)	Beklenen Set-up	Saha Set-up (Su)	Yorum
DS13	41, 53, 167	Kum + çakıl ağırlıklı	Granüler	≈ 23	35	0	Düşük	1.08 – 1.20	Set-up sınırlı, uç dayanım yüksek
DS14		Kum + silt + çakıl	Granüler (orta)	≈ 30	35	0	Düşük–orta	1.10 – 1.30	Kısmi set-up, orta davranış
DS16	48, 50	Kil + silt + kum geçişleri	Kohezyon.	≈ 39	27 - 33	0.5+0.2z	Yüksek	1.60 – 1.62	Güçlü set-up etkisi
DS17	1, 229, 239	Plastik kil + silt	Kohezyon.	≈ 31	21 - 27	0.5+0.2z	Çok yüksek	1.6 – 2.4	Maksimum set-up zonu
DS18	160, 201	Siltli kum (homojen)	Granüler (homojen)	≈ 35	≈ 35	Orta	Orta	1.3 – 1.5	Stabil ve öngörülebilir

İncelenen sondajlarda hâkim tabakalara ait ortalama düzeltilmiş SPT değerleri ($(N_1)_{60}$) DS13 için yaklaşık 23, DS14 için 30, DS16 için 39, DS17 için 31 ve DS18 için 35 olarak belirlenmiştir. Buna karşın set-up davranışının SPT direnci ile doğrudan ilişkili olmadığı görülmektedir. Örneğin, DS16 ve DS18 sondajlarında düzeltilmiş SPT değerleri DS17'ye göre daha yüksek olmasına rağmen, en yüksek set-up katsayıları DS17 sondajında elde edilmiştir. Bu durumun temel nedeni, DS17 profilinde hâkim olan plastisiteli kil ve silt tabakalarının düşük drenaj kapasitesi, yüksek konsolidasyon potansiyeli ve zamanla gelişen efektif gerilme artışıdır. Nitekim DS17 için belirlenen düşük içsel sürtünme açısı ($\varphi' \approx 21$-$27°$) ve kohezyon varlığı ($c' = 0.5+0.2z$), çakım sırasında oluşan fazla boşluk suyu basıncının zamanla sönümlenerek çevre sürtünmesini artırmasına olanak sağlamıştır. Buna karşılık DS13, DS14 ve DS18 sondajlarında hâkim olan granüler zeminler yüksek içsel sürtünme açılarına ($\varphi' \approx 35°$) sahip olmalarına rağmen drenajın hızlı gerçekleşmesi nedeniyle ilave set-up kazanımları daha sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak set-up davranışının yalnızca düzeltilmiş SPT direnci ($(N_1)_{60}$) ile değil, zeminin ince dane içeriği, kohezyon özellikleri ve konsolidasyon potansiyeli ile de yakından ilişkili olduğu görülmektedir.

Bu kapsamda, zamanın kazık kapasitesi üzerindeki etkisinin daha net ortaya konulabilmesi amacıyla, zemin koşullarının nispeten homojen ve sabit olduğu proje sahasının son kazığı olan 240 numaralı kazık üzerinde belirli aralıklarla tekrarlı Restrike PDA testleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıda söz konusu testlerin sonuçları Tablo 5' te sunulmaktadır.

Tablo 5. 240 Numaralı Kazık PDA Test Sonuçları

240 Nolu Çelik Kazık PDA Test Sonuçları					
Kazık No	Test No	Toplam Geçen Süre(Gün)	Rb (Ton)	Rs (Ton)	Ru (Ton)
R3-240	Initial PDA	0	306	304	610
R3-240	Restirek PDA-1	25	362	539	901
R3-240	Restirek PDA-2	40	249	621	870
R3-240	Restirek PDA-3	55	296	680	976
R3-240	Restirek PDA-4	70	230	725	955
R3-240	Restirek PDA-5	85	257	750	1007

DS-17 -DS18 sondaj bölgesinde bulunan 240 numaralı kazık üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı PDA testleri (Restrike PDA), zemin koşullarının homojen olduğu durumda set-up etkisinin zamana bağlı olarak düzenli ve öngörülebilir bir şekilde geliştiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre toplam taşıma kapasitesi yaklaşık %65 oranında artış göstermiş olup, bu artışın büyük ölçüde yüzey dayanımındaki gelişimden kaynaklandığı belirlenmiştir. Kapasite artışının zamanla azalarak plato davranışı sergilediği görülmüştür.

240 numaralı kazıkta gerçekleştirilen Restrike PDA testlerinin analizi sonucunda, set-up katsayısı ile logaritmik zaman arasında orta seviyede bir korelasyon ($R^2 \approx 0.65$) elde edilmiştir.

3.3. PDA Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 6. Eurocode 7, Table A.11

Table A.11 - Correlation factors ξ to derive characteristic values from dynamic impact tests (n - number of tested piles)					
ξ for n =	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25
b The ξ-values may be multiplied with a model factor of 0.85 when using dynamic impact tests with signal matching.					
c The ξ-values should be multiplied with a model factor of 1.10 when using a pile driving formula with measurement of the quasi-elastic pile head displacement during the impact.					

Rıhtım yapısı çelik boru kazıkları üzerinde gerçekleştirilen toplam 41 adet dinamik analiz sonuçları, Tablo 6'da Eurocode 7, Table A.11 'de kırmızı çerçeve içerisinde belirtilmiş olan ≥ 20 PDA koşulları için belirlenen değerler, yine Tablo-6 altında belirtilmiş olan tasarımda dikkate alınan kabuller ile dinamik analizde kullanılan yöntemlerden ötürü azaltma katsayılarına tabi tutulmuş ve aşağıdaki ortalama ve minimum değerler hesaplanmış olup değerlendirmeler bu kriterlere göre gerçekleştirilmiştir.

- Güvenlik Katsayısı ≥ **1.31** (≥ 20 PDA için- ortalama) /Proje Ortalama – **1,56**
- Güvenlik Katsayısı ≥ **1.17** (≥ 20 PDA için- minimum)/ Proje Minimum-**1,15*** olarak gerçekleşmiştir.

Toplam 41 adet PDA testi gerçekleştirilmiş olup, yalnızca 236 nolu kazıkta elde edilen güvenlik katsayısının önerilen kabul kriterinin bir miktar altında kaldığı (1,15 <1,17) belirlenmiştir. Bununla birlikte, söz konusu testin çakım işlemini takiben yalnızca 12 gün sonra gerçekleştirilmiş olması nedeniyle, kazık-zemin sisteminde zamanla gelişen set-up etkisinin tam olarak oluşmadığı ve bu durumun ölçülen taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemiş olabileceği değerlendirilmektedir.

4. STATİK YÜKLEME TESTİ

Statik Yükleme Testi, kazıkların taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışını yerinde belirlemek amacıyla kullanılan temel doğrulama yöntemidir.



Şekil 1. Statik Yükleme Testi

Test kazığında meydana gelen düşey deplasmanlar, bağımsız referans kirişine, manyetik tutucular ile bağlanan, 0,01 mm hassasiyete sahip dijital potansiyometrelerile takip edilmiştir. Reaksiyon kazıklarındaki deplasmanlar, test sisteminin dışına kurulan topografik aletler yardımıyla izlenmiştir.

Test yükü 27 cm stroğa sahip 2 adet 750 tonluk kriko vasıtasıyla uygulanmıştır. 30 ton ağırlığındaki test kirişinin üzerine, 340 ton ağırlığında slablar yerleştirilerek reaksiyon kazıklarındaki çekme yükü hafifletilmiştir. Proje kapsamında K033, K109 ve K158 nolu kazıklara statik yükleme testi yapılmıştır.

4.1. Statik Yükleme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan statik yükleme deneyleri sonucunda, incelenen tüm kazıkların yük oturma davranışları değerlendirildiğinde, deney yükü seviyelerinde herhangi bir göçme mekanizması gelişmediği ve kazıkların taşıma kapasitesi ile elastik ve plastik deformasyon performansı açısından yeterli olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. Farklı Yük Seviyelerinde Ölçülen Ortalama Oturma Değerleri

Yük Seviyesi	Yük (ton)	K033 Oturma (mm)	K109 Oturma (mm)	K158 Oturma (mm)
50%	363.67	3.83	4.80	5.10
100%	727.33	20.23	10.93	8.98
125%	909.17	31.33	10.48	10.83
150%	1091.00	43.28	12.53	17.28

Tablo 8. Statik Yükleme Test sonuçları-Zemin İlişkisi

K. N.	S.N.	Bas. Zem.	Proj. Yük. (t)	Maks. Yük (t)	%100 Oturma (mm)	%150 Oturma (mm)	Nihai Oturma (mm)	Chin-Kondner Kap. (t)	C1	EN 1997-1:2004 Kontrolü	Sonuç
K033	DS13	Siltli kum / orta sıkı	727	1091	20,23	43,28	14,9	1724	0,00058	1320,80*0,1: 132,08mm	Başarılı
K109	DS15–DS16	Kum + çakıl + geçiş zonu	727	1091	10,93	12,53	7,63	2041	0,00049	1320,80*0,1: 132,08mm	Başarılı
K158	DS16–DS17	Kil + kum	727	1091	8,98	17,28	3,03	1613	0,00062	1320,80*0,1: 132,08mm	Başarılı

Tablo 8'de Chin-Kondner yöntemiyle hesaplanan kazık taşıma kapasitelerinin proje tasarım yüklerinin üzerinde olduğu belirlenmiş, bu durum kazıkların yeterli güvenlik düzeyine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca deney sonuçları, EN 1997-1:2004 Madde 7.6.1.1 kapsamında değerlendirildiğinde, kazıkların deney yükü altında stabil yük-oturma davranışı sergilediği ve herhangi bir göçme belirtisi göstermediği görülmüştür. Kazıklar arası karşılaştırmalı değerlendirmede:

- K109 kazığı, düşük oturma değerleri ve yüksek Chin-Kondner kapasitesi ile yüksek rijitlik ve üstün yük taşıma performansı sergilemiştir.
- K158 kazığı, sınırlı kalıcı deformasyon değerleri ile yükleme sonrası elastik geri kazanımı en yüksek kazık olarak öne çıkmıştır.
- K033 kazığında ise diğer kazıklara kıyasla daha yüksek oturma değerleri gözlenmiş olmakla birlikte, yükleme boyunca kararlı davranışın korunması ve nihai kapasitenin yeterli olması nedeniyle söz konusu deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tüm kazıkların hem taşıma gücü hem de servis davranışı bakımından yeterli performansı sağladığı ve proje tasarım kriterlerini karşıladığı teknik olarak teyit edilmiştir.

Kazık ve sondaj verilerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, kazık performanslarının zemin tabakalanması ve geçiş zonlarından önemli ölçüde etkilendiği belirlenmiştir. K109 kazığı, farklı granüler tabakaların kesişiminde konumlanması nedeniyle yüksek çevresel sürtünme ve uç direncinin birlikte mobilize olması sonucu en yüksek taşıma kapasitesini ve en düşük deformasyonları göstermiştir. Buna karşılık K033 kazığında siltli ve süreksiz zemin yapısı nedeniyle daha yüksek oturmalar gözlenirken, K158 kazığında kohezyonlu zemin etkisi deformasyonları sınırlandırmış ancak birim sürtünme direncinin düşük olması taşıma kapasitesini kısıtlamıştır. Sonuç olarak, kazık davranışının yalnızca zemin türüne değil, tabaka sürekliliği, geçiş zonları ve yük transfer mekanizmasının etkinliğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

5. STATİK YÜKLEME TESTİ VE RESTRIKE PDA TESTİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Bu bölümde, Statik Yükleme Testleri ile Restirke PDA (Dinamik Kazık Yükleme) testlerinden elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkinin varlığı ve düzeyi, saha uygulamalarından elde edilen veriler kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 9. Genel Karşılaştırma (RestrikePDA-Statik Test)

Kazık No	Bekleme (gün)	Restrike PDA(Ru)(ton)	Statik (Q_{SLT}), (ton)	Q_{SLT} / Ru	Restrike PDA (Ru)/ Proje Tasarım Yükü	Statik(Q_{SLT}), / Proje Tasarım Yükü
K033	10	983	1724	1,75	1,35	2,37
K109	20	1036	2041	1,97	1,43	2,81
K158	3	876	1613	1,84	1,20	2,22

Tablo 9'da yapılan karşılaştırmalar sonucunda, Restrike PDA test sonuçlarının statik yükleme testlerine kıyasla sistematik olarak daha düşük kaldığı (RestrikePDA sonuçları proje yükünü %20–40 civarında aşarken, statik testler projeyi 2.2 – 2.8 katına kadar taşıdığı görülmüştür.), ayrıca verilerde daha uzun bekleme süresine sahip kazıklarda daha yüksek kapasite değerleri gözlenmektedir. Ancak kazıklar farklı zemin koşullarında bulunduğundan bekleme süresinin etkisi diğer değişkenlerden bağımsız olarak ortaya konulamamaktadır.

Restrike PDA sonuçlarının statik yükleme testi sonuçlarına kıyasla daha konservatif tarafta kaldığı belirlenmiştir. Bunun başlıca nedeni, dinamik yükleme sırasında zemin direncinin tam olarak mobilize olmaması ve set-up etkisinin sınırlı düzeyde yansıtılabilmesidir. Bu fark özellikle kohezyonlu zeminlerde daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir.

Yalnızca üç eşleştirilmiş veri seti için Restrike PDA ve statik test sonuçları arasında yüksek doğrusal uyum ($R^2 \approx 0.80$) gözlenmiştir. Ancak veri sayısının sınırlı olması nedeniyle bu sonuç istatistiksel anlamlılığı kanıtlayan bir korelasyon olarak değil, proje özelinde gözlenen bir eğilim olarak değerlendirilmelidir.

Buna karşılık set-up oranı ile logaritmik zaman [log(t)] arasında ilişki araştırılmış, ancak korelasyon katsayısının düşük olması ($R^2 \approx 0.21$) nedeniyle set-up etkisinin yalnızca geçen süre ile açıklanamayacağı, zemin tipi, ince dane oranı, efektif gerilme, drenaj koşulları ve çakım sonrası boşluk suyu basıncının sönümlenmesi gibi zemin özelliklerinin de önemli rol oynadığı değerlendirilmiştir.

6. SONUÇLAR

1. **Kazıklarda belirgin bir set-up etkisi tespit edilmiştir.** Restrike PDA sonuçlarına göre, ilk çakım sonrasında kazık taşıma kapasitelerinde önemli artışlar meydana gelmiş olup, hesaplanan set-up katsayıları 1,03 ile 2,49 arasında değişmiştir. Kapasite artışının büyük ölçüde çevresel sürtünme direncindeki (Rs) gelişimden kaynaklandığı belirlenmiştir.

2. **Set-up davranışının yalnızca bekleme süresine bağlı olmadığı görülmüştür.** Set-up oranı ile logaritmik zaman [log(t)] arasındaki ilişki zayıf korelasyon

göstermiştir ($R^2 \approx 0,21$). Bu durum, zaman faktörünün tek başına yeterli olmadığını; zemin türü, ince dane oranı, drenaj koşulları ve konsolidasyon davranışının da kapasite artışında önemli rol oynadığını göstermektedir.

3. **Zemin özelliklerinin set-up davranışı üzerinde belirleyici etkisi olduğu belirlenmiştir.** Özellikle DS17 sondaj bölgesinde gözlenen plastik kil ve silt tabakalarında en yüksek set-up katsayıları elde edilmiştir. Buna karşılık, daha yüksek düzeltilmiş SPT-$(N_1)_{60}$ değerlerine sahip DS16 ve DS18 bölgelerinde daha düşük set-up değerleri gözlenmiştir. Bu sonuç, set-up davranışının yalnızca SPT direnci ile açıklanamayacağını ve zeminin kohezyon özelliklerinin önemli olduğunu göstermektedir.

4. **240 numaralı kazık üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı Restrike PDA testleri, zaman etkisinin daha net değerlendirilmesine imkân vermiştir.** Yaklaşık 85 günlük izleme sürecinde toplam taşıma kapasitesi 610 tondan 1007 tona yükselmiş ve yaklaşık %65 oranında artış göstermiştir. Aynı kazıkta set-up katsayısı ile logaritmik zaman arasında orta düzeyde ilişki elde edilmiştir ($R^2 \approx 0,65$).

5. **Dinamik ve statik yükleme deneyleri arasında uyumlu bir eğilim gözlenmiştir.** Restrike PDA ve statik yükleme testlerinden elde edilen kapasite değerleri arasında pozitif bir ilişki bulunmuş ($R^2 \approx 0,80$), ancak değerlendirme yalnızca üç eşleştirilmiş veri setine dayandığından bu sonuç genel bir korelasyon yerine proje özelinde gözlenen bir eğilim olarak kabul edilmelidir.

6. **Restrike PDA sonuçlarının proje özelinde statik yükleme testlerine kıyasla konservatif tarafta kaldığı gözlemlenmiştir.** Statik yükleme testlerinden Chin-Kondner yöntemiyle hesaplanan kapasite değerleri, Restrike PDA sonuçlarından yaklaşık %75-97 oranında daha yüksek bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Beni destekleyen yöneticilerime ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

STFA Temel Araştırma ve Sondaj A.Ş. (2023), "İsdemir Limanı Onarım ve Devreye Alma Projesi Faz 1 Jeolojik-Jeoteknik Zemin Etüt Veri Raporu" TR-2023-STFA-ES-IES-RP-001-00.

2ER Müşavirlik Proje Kontrol ve Ticaret A.Ş. (2024)," Rıhtım-3 33/109/158 Nolu Proje Kazığı Yükleme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirmesi Bilgi Notu" 2ER.İSD.ES.BN.06/07/08

EN 1997-1 (2004), "Eurocode 7: Geotechnical Design- Part 1: General Rules (EN 1997-1)", European Committee for Standardization, Brussels, 1-171.

British Standards Institution (2010), "BS 6349-2 Maritime Works – Code of Practice for the Design of Quay Walls, Jetties and Dolphins", BSI, London, 1-180.

ASTM International (2017), "ASTM D4945-17 Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations", ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 1-14

ASTM International (2022), "ASTM D1143/D1143M-22 Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load", ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 1-21.

Kabaca, H., Vural, İ., Poyraz, S. (2021), "Kazık Nihai Taşıma Gücünün Farklı Yöntemlerle Analizi", BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 531-546.

İnce, M., Karakaş, A., Coruk, Ö., Yüksel, O. (2024), "Kocaeli Yarımca RO-RO Limanı'ndaki Çakma Kazıkların Zamanla Taşıma Kapasitesi Artışlarının İncelenmesi", Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14(4), 1836-1857

Hussein, M.H., Sharp, M.R., Knight, W.F. (2002), "The Use of Superposition for Evaluating Pile Capacity", Deep Foundations 2002, American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, 6-21.

Pile Dynamics, Inc. (2014), "CAPWAP Background Report Version 2014", Pile Dynamics Inc., Cleveland, Ohio, 1-82.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
PDA	Kazık Çakım Analizi (Pile Driving Analyzer)	CAPWAP	Case Pile Wave Analysis Program
DS	Deniz Sondajı	DLT	Dinamik Yükleme Testi
K	Kazık Kısaltması	Ru	Toplam nihai kazık taşıma kapasitesi
C1	Chin -Konder metoduyla hesaplamada kullanılan doğrunun eğimi	Rs	Kazık çevre sürtünme direnci
R^2	Regresyon analizinde modelin veriyi ne kadar iyi açıkladığını gösteren bir istatistiksel ölçüdür.	Rb	Kazık uç direnci
$(N_1)_{60}$	Örtü gerilmesine göre düzeltilmiş standart penetrasyon değeri	Qinitial	İlk PDA testinden elde edilen taşıma kapasitesi
Q_{SLT}	Statik yükleme testinden elde edilen taşıma kapasitesi	Qrestrike	Restrike PDA testinden elde edilen taşıma kapasitesi
φ'	Efektif içsel sürtünme açısı (°)	Su	Set-Up Oranı
c'	Efektif kohezyon	log(t)	Yeniden çakım ile ilk çakım arasındaki sürenin logaritmik değeri