Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

KAYA SOKETLİ ENSTRÜMANTE FORE KAZIKLARIN YÜK–OTURMA DAVRANIŞI VE 3B ANALİZİ

LOAD–SETTLEMENT BEHAVIOR OF ROCK-SOCKETED INSTRUMENTED BORED PILES AND 3D NUMERICAL ANALYSIS

Ahmet DİNÇ[1], Şenol ADATEPE [2], Alp GÖKALP[3]

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, İstanbul'da gerçekleştirilen 1000 mm çaplı fore kazıklar üzerinde yürütülen tam ölçekli enstrümante edilmiş eksenel basınç yükleme testlerinin sonuçları kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Alüvyon birimler altında yer alan, düşük dayanımlı ve yüksek derecede ayrışmış kumtaşı–kiltaşı ana kayasına 3.0 m soketlenen iki adet test kazığı üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, kazıklar tasarım yükünün 2.25 katına kadar yüklenmiştir. Maksimum oturma değerlerinin 23.0–23.6 mm aralığında kaldığı ve bu değerlerin literatürde yaygın olarak kabul edilen göçme kriterlerinin oldukça altında olduğu belirlenmiştir. Enstrümantasyon kapsamında kullanılan gerinim ölçerlerden elde edilen veriler, yük transfer mekanizmasının büyük ölçüde şaft direnci ile sağlandığını, uç direncinin ise sınırlı düzeyde mobilize olduğunu göstermiştir. Nihai taşıma kapasitesi, Chin hiperbolik yaklaşımı ve Decourt ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak sırasıyla yaklaşık 32,700 kN ve 30,839 kN olarak tahmin edilmiştir (Chin, 1970; Decourt, 1999). Servis yükleri altında gözlenen düşük deformasyon seviyeleri, kazık sisteminin yüksek rijitlikte davrandığını ve servis limit durum kriterlerini sağladığını göstermektedir. Ayrıca, saha verileri kullanılarak oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri ile gerçekleştirilen analizler, ölçülen yük–oturma davranışı ile yüksek derecede uyum göstermiştir. Bu durum, uygun kalibrasyon ile sayısal modellemenin saha davranışını güvenilir biçimde temsil edebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, zayıf kaya ortamında soketli kazık tasarımında enstrümante saha deneyleri ile desteklenen sayısal analizlerin birlikte kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Fore kazık, kaya soketleme, yük–oturma davranışı, enstrümantasyon, sonlu elemanlar analizi*

ABSTRACT

Within the scope of this study, the results of full-scale instrumented static axial compression load tests performed on 1000 mm diameter bored piles constructed in Istanbul were comprehensively evaluated. The tests were carried out on two instrumented piles socketed 3.0 m into a weak, highly weathered sandstone–claystone bedrock underlying alluvial deposits. The piles were loaded up to 2.25 times the design load. The measured maximum settlements ranged between 23.0 mm and 23.6 mm, which are well below the commonly accepted failure criteria reported in the literature. Data obtained from strain gauges installed along the pile length indicate that the load transfer mechanism is predominantly governed by shaft resistance, while end bearing is mobilized to a limited extent. The ultimate pile capacities were estimated to be approximately 32,700 kN and 30,839 kN using the Chin hyperbolic method and the Decourt extrapolation method, respectively (Chin, 1970; Decourt, 1999). The low deformation levels observed under service loads demonstrate that the pile system exhibits high stiffness and satisfies serviceability limit state criteria. Furthermore, three-dimensional finite element analyses were performed using field data, and the numerical results showed a high level of

[1] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, ahmet.dinc@kasktas.com.tr
[2] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, senol.adatepe@kasktas.com.tr
[3] İnş.Yük. Müh, KASKTAŞ, alp.gokalp@kasktas.com.tr

agreement with the measured load–settlement behavior. This indicates that, with proper calibration, numerical modeling can reliably represent in-situ pile response. The findings emphasize the importance of integrating instrumented field testing with calibrated numerical analyses for the design of rock-socketed piles in weak rock conditions.
Keywords: *Bored pile, rock socket, load–settlement behaviour, instrumentation, finite element analysis*

1. GİRİŞ

Enstrümante edilmiş kazık yükleme testleri, Geoteknik mühendisliğinde baret kazık ve fore kazıkların zemin ile etkileşimini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen en önemli deneysel yöntemlerden biridir. Bu testler, kazıklı temellerin taşıma kapasitesinin ve davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi için kritik öneme sahiptir. Test sırasında kazığa uygulanan yükler, kazığın başındaki ve çeşitli derinliklerindeki gerilmeler, deformasyonlar ve diğer ilgili parametreler yüksek hassasiyetli sensörler ile ölçülür. Bu veriler, kazık-zemin etkileşiminin anlaşılmasına ve kazık tasarımının optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sunar. Enstrümante edilmiş kazık yükleme testleri, sahada gerçekleştirilen doğrulama testleri ve laboratuvar deneyleri ile desteklenerek, güvenli ve ekonomik kazık temellerin tasarımı için temel bir referans oluşturur. Bu çalışma kapsamında, alüvyon tabakaların, kumlu siltli kil birimlerinin ve kumtaşı-kiltaşı ana kayasının hâkim olduğu bir proje sahasında, kazık kapasitelerinin doğrulanması amacıyla iki adet 1000mm çapında fore kazık üzerinde tam ölçekli enstrümante edilmiş statik yükleme testi gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

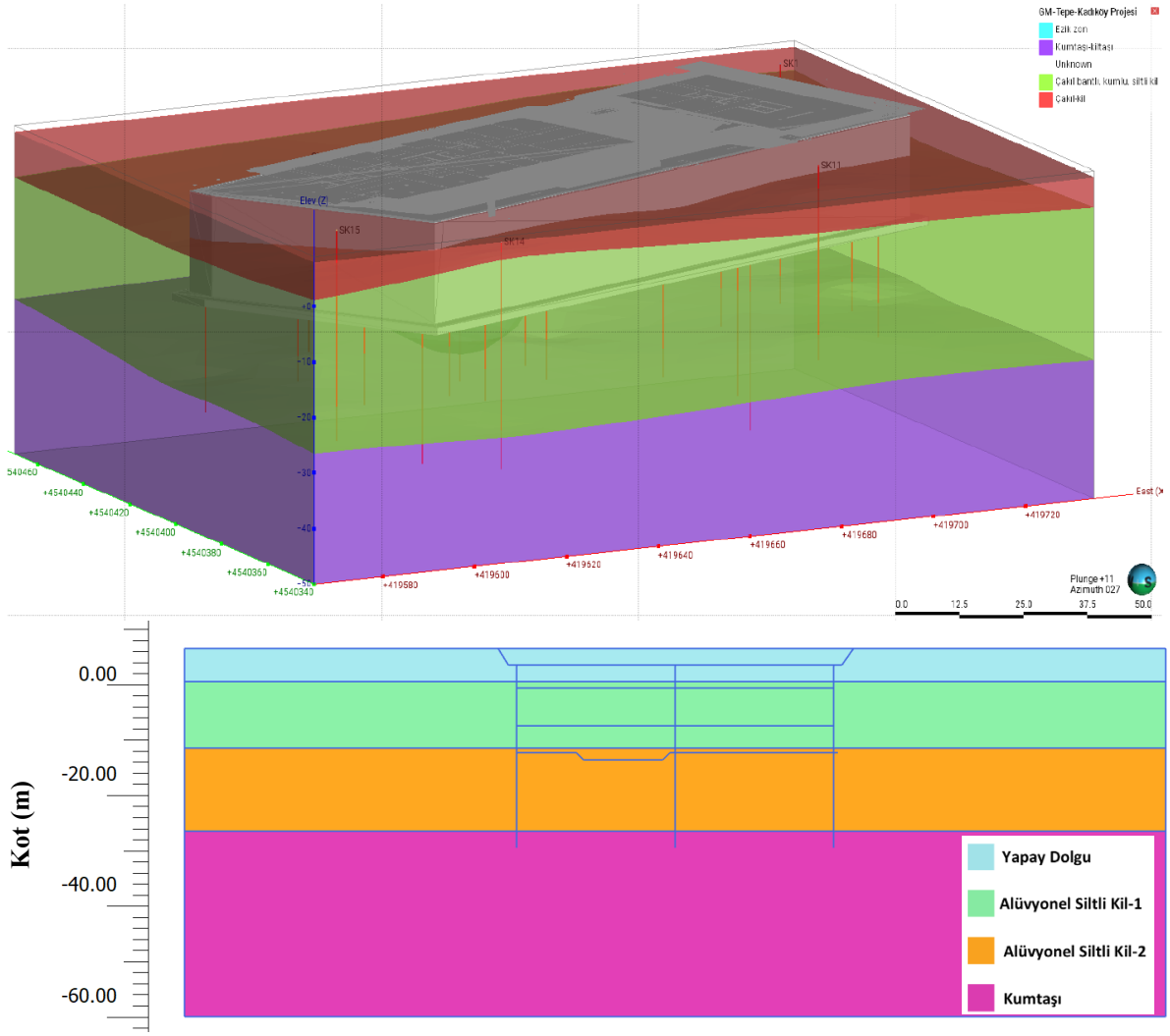
2. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Proje sahasında gerçekleştirilen 18 adet zemin araştırma sondajından elde edilen verilere göre zemin profili, yüzeyden itibaren 1.50–7.50 m kalınlığındaki dolgu tabakası ile bunun altında yer alan alüvyon ve Pendik Formasyonu Kartal Üyesi kaya birimlerinden oluşmaktadır. Alüvyon, genel olarak az kumlu siltli kil tabakasından meydana gelmekte olup, üst seviyelerde orta katı–katı, derinlikle birlikte ise katı–çok katı–sert kıvam göstermektedir. Kartal Üyesi'ne ait kumtaşı-kiltaşı tabakaları ise genel olarak orta–az ayrışmış (W3–W2), çok sık kırıklı ve çatlaklı yapıdadır. Zemin profilindeki tabakaların mühendislik özellikleri Tablo-1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Zemin profilindeki tabakaların mühendislik özellikleri

	Dolgu	**Kumlu Siltli Kil-1**	**Kumlu Siltli Kil-2**	**Kumtaşı Kiltaşı**
Doğal Birim Hacim Ağırlığı, γ_n (kN/m3)	18	18	19	22
SPT N30 Darbe Sayıları	-	5-12	12-30	-
Drenajsız Kayma Mukavemeti, Drenajsız Kohezyon, cu (kPa)	-	25-60	60-150	-
Tek Eksenli Basınç Dayanımı, UCS (MPa)	-	-	-	>10
Efektif Kayma Mukavemeti Açısı, φ' (°)	30	29	25	38
Efektif Kohezyon, c' (kPa)	15	5	20	40
Elastisite Modülü, E (MPa)	35	-	-	300
Deformasyon Modülü, Mc (MPa)	-	18	24	-

Kaya tabakalarında ölçülen RQD değerleri %0–25 aralığında olup, kaya kalitesinin çok zayıf olduğunu göstermektedir. Karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç ve nokta yük dayanım deneyleri de Deere ve Miller (1966) sınıflamasına göre bu kayaçların çok düşük–düşük dayanımlı olduğunu ortaya koymuştur. Proje sahası için oluşturulan idealize zemin profili Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. İdealize zemin profili

3. KAZIK KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ

Kazıkların taşıdığı eksenel yük, esas olarak kazık şaftı boyunca gelişen şaft sürtünmesi ve kazık tabanında oluşan uç direnci aracılığıyla zemine aktarılmaktadır. Literatürde, fore kazıklarda çevre sürtünmesinin büyük ölçüde kazık çapının yaklaşık %0.5–1'i mertebesindeki oturmalarda mobilize olduğu, uç direncinin ise yaklaşık %10–20D seviyesindeki oturmalarda etkin hale geldiği belirtilmektedir (Tomlinson, 2001).

Proje kapsamında kazıkların uç direncinin tam olarak mobilize olmasını sağlayacak düzeyde deplasmana izin verilmediğinden, taşıma kapasitesi değerlendirmelerinde yalnızca çevre

sürtünmesi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda kapasite analizleri, ampirik yaklaşımlar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

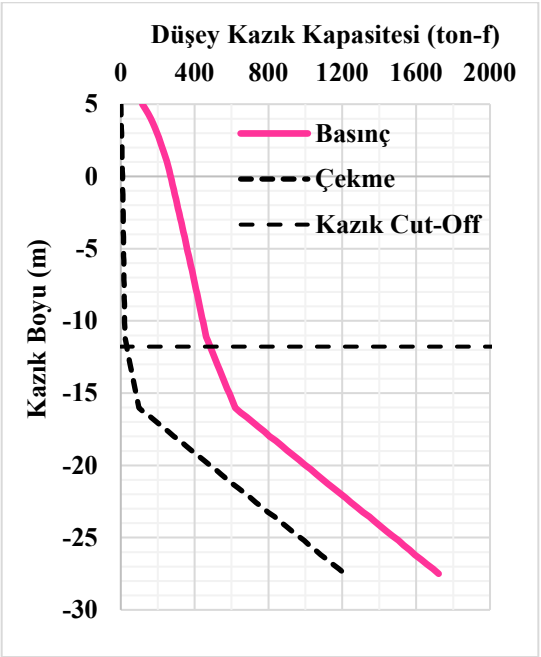
3.1. Ampirik Yöntemler

Kayaya soketli kazıkların taşıma kapasitesinin değerlendirilmesine yönelik literatürde farklı ampirik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda kullanılan katsayılar, gerçekleştirilen kazık yükleme testlerinden elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Kaya soketli kazıkların kapasite hesaplarında, kayacın tek eksenli basınç dayanımı (UCS) temel parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir. Literatürde önerilen katsayılar kullanılarak kaya tabakası için ortalama birim şaft direnci hesaplanmış ve elde edilen bu direnç değerleri ile Reese ve O'Neill (1988) tarafından önerilen yöntem kullanılarak kazık için yük-kazık boyu ilişkisi türetilmiştir.

Çalışma kapsamında, birim şaft sürtünmesinin belirlenmesinde yararlanılan bağıntılar ve bu yöntemlerle hesaplanan birim şaft sürtünmesi değerleri Şekil 2'de sunulmuştur.

$f_{su} = \alpha\ q_u^{\beta}$

Yöntem	Tasarım q_u (MPa)	a	b	f_{su} (MPa)
Horvath and Kenney 1979	2.0	0.21	0.50	0.30
Carter and Kulhawy 1988		0.20	0.50	0.28
Williams et al. 1980		0.44	0.36	0.56
Rowe and Armitage 1984		0.40	0.57	0.59
Rosenberg and Journeux 1976		0.34	0.51	0.48
Gupton and Logan 1984		0.20	1.00	0.40
Reese and Q'Neill 1988		0.15	1.00	0.30
		Tasarım		0.42



Şekil 2. D=100cm fore kazık taşıma gücü hesap sonuçları

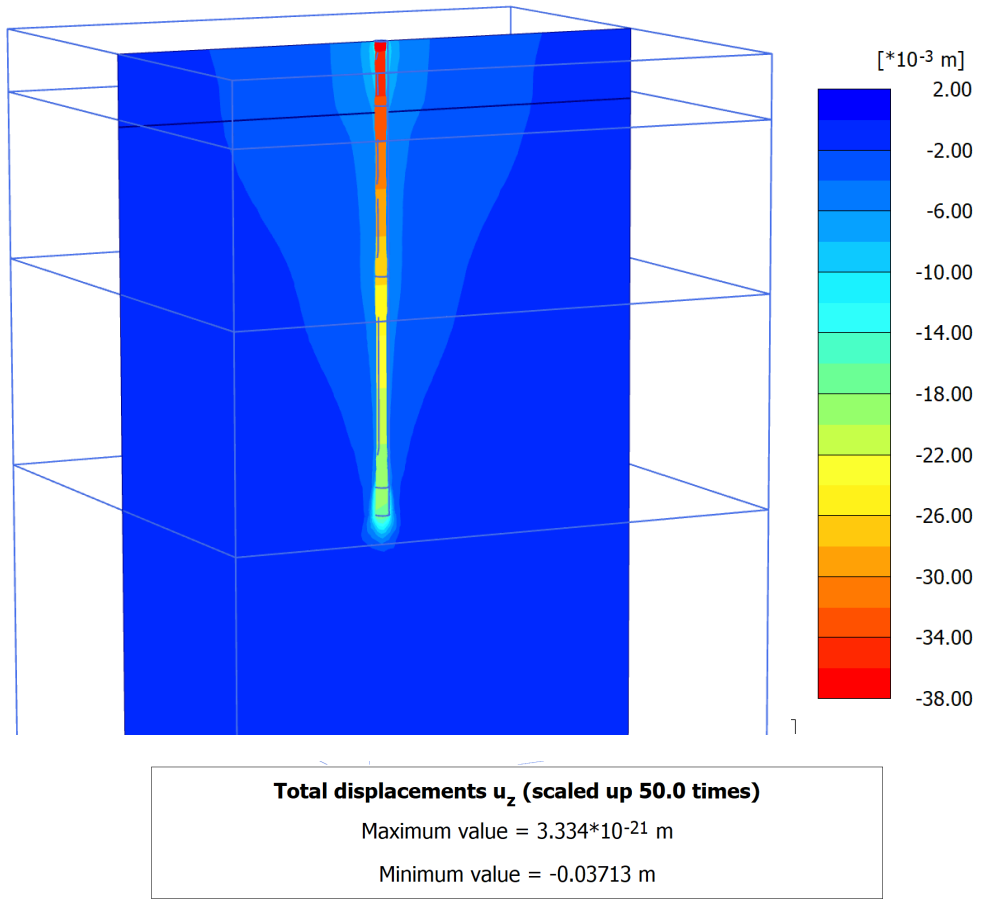
Tasarım hesaplarında emniyetli birim çevre sürtünmesi değeri, kumlu siltli kil tabakası-2 için 60 kPa, kumtaşı–kiltaşı tabakası için ise 420 kPa olarak dikkate alınmıştır. Bu değerler, ilgili zemin ve kaya tabakalarının özellikleri ile literatürdeki ampirik yaklaşımlar kullanılarak elde edilen sonuçlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

3.2. Sayısal Yöntemler

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), özellikle geoteknik ve yapısal problemlerin analizinde yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntemde, analiz edilmek istenen sürekli ortam sonlu sayıda ve sonlu boyutlu elemanlara ayrılarak (ağ oluşturularak) yaklaşık olarak temsil edilir. Elemanlar, düğüm noktaları aracılığıyla birbirleriyle etkileşir ve sistemin denge denklemleri, tüm elemanların katkılarının birleştirilmesiyle oluşturulan küresel rijitlik

matrisi üzerinden çözülür. Bu çözüm sonucunda modelin farklı noktalarındaki deplasman, şekil değiştirme ve gerilme gibi büyüklükler elde edilir.

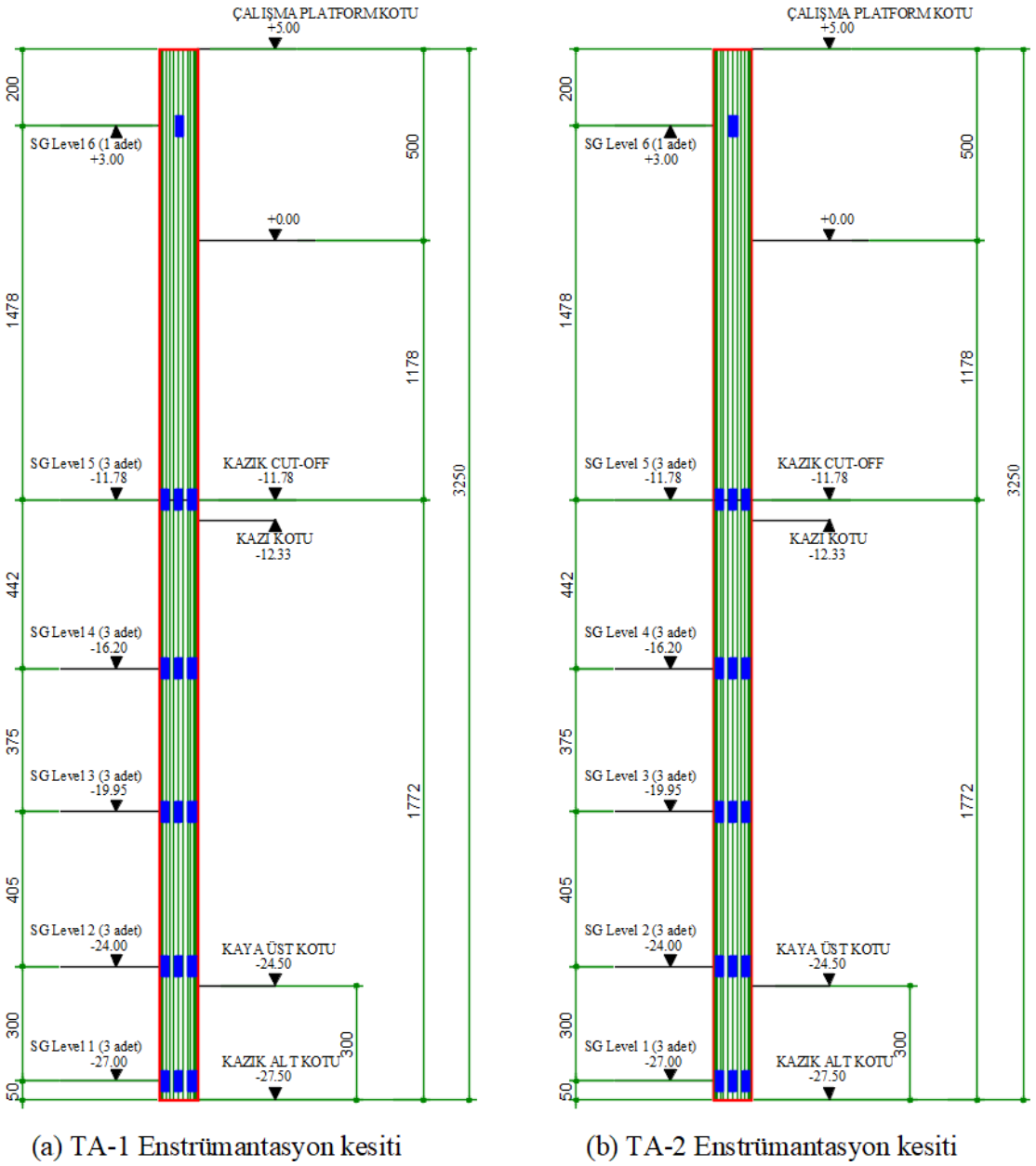
Zemin modellemesi kapsamında, Plaxis 3D programında kumlu siltli kil-1 ve Kumlu siltli kil-2 tabakaları Hardening Soil (HS) modeli ile, kumtaşı–kiltaşı birimi ise Mohr–Coulomb (MC) modeli ile temsil edilmiştir. Kazıklar, kapalı geometriye sahip, homojen ve izotropik lineer elastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Plaxis 3D kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar ağı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli

4. TEST KAZIKLARININ İMALATI

Kazık tasarımını ve taşıma kapasitesini doğrulamak amacıyla, A (TA-1) ve B (TA-2) bloklarında birer adet olmak üzere toplam 2 adet test kazığı ve 8 adet reaksiyon kazığı imal edilmiştir. Her test kazığı, kazık davranışının değerlendirilmesi amacıyla toplam 16 adet gerinim ölçer (strain gauge) ile enstrümante edilmiştir. Ölçüm sistemi, beş seviyede üçer adet ve cut-off seviyesinde bir adet olmak üzere toplam altı ölçüm seviyesinden oluşmaktadır. Yükleme testleri çalışma kotundan gerçekleştirilmiş, cut-off seviyesindeki eksenel yük bu seviyeye yerleştirilen gerinim ölçerlerden elde edilmiştir. Diğer ölçüm seviyelerinden elde edilen veriler kullanılarak kazık boyunca eksenel yük dağılımı ve mobilize şaft sürtünmesinin derinliğe bağlı değişimi belirlenmiştir. Test kazıklarının enstrümantasyon düzeni Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te, her iki test kazığı boyunca yerleştirilen gerinim ölçerlerin konumları ve kotları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 4. TA-1 (a) ve TA-2 (b) enstrümantasyon kesiti

Gerinim ölçerin (strain gauge) montaj resimleri Şekil 5‘de verilmiştir.



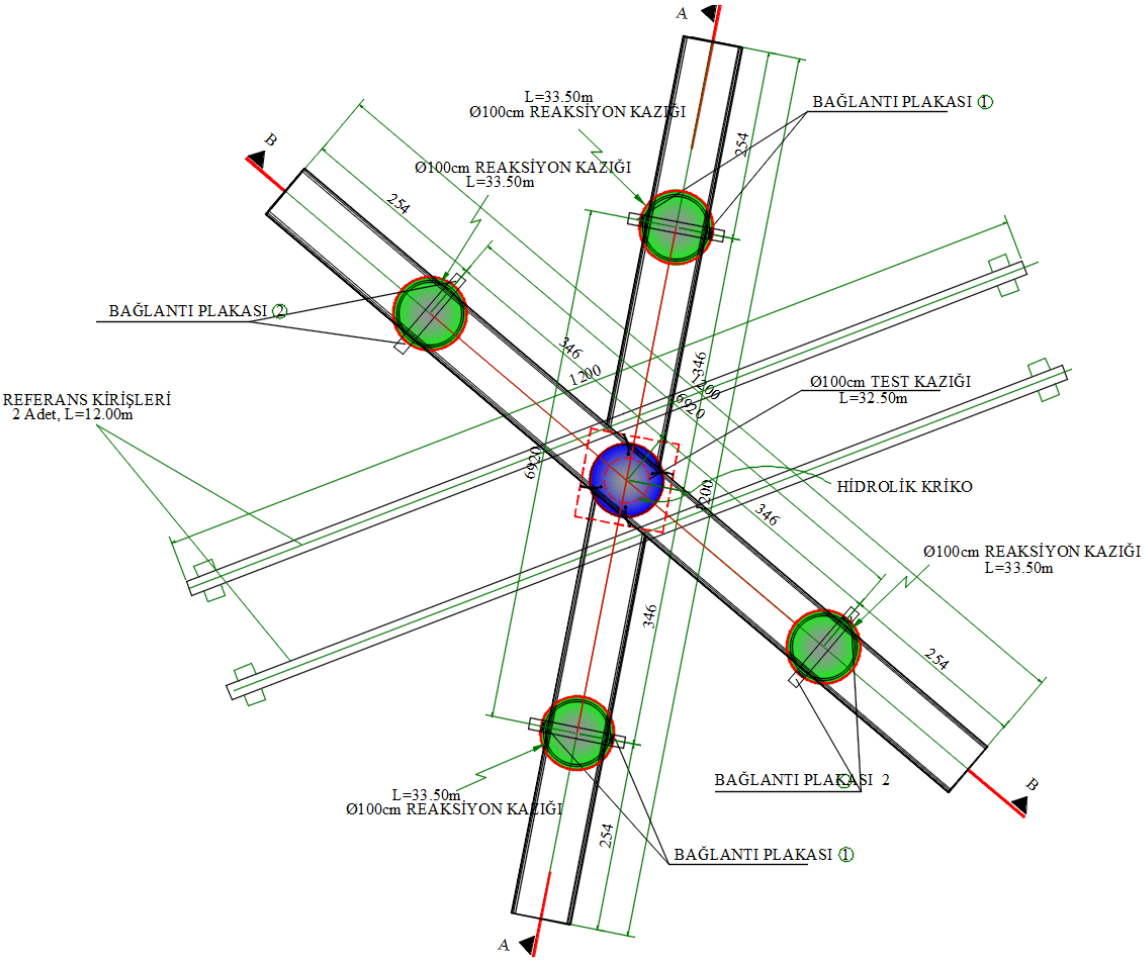
Şekil 5. Gerinim ölçerlerin montajı

Her bir test kazığından alınan 3 adet yaş beton numunesi üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, TA-1 ve TA-2 test kazıklarının ortalama 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 62.8 MPa ve 65.4 MPa olarak belirlenmiştir.

5. KAZIK YÜKLEME DENEYLERİ

5.1. Kazık Yükleme Deney Düzeneğinin Kurulması

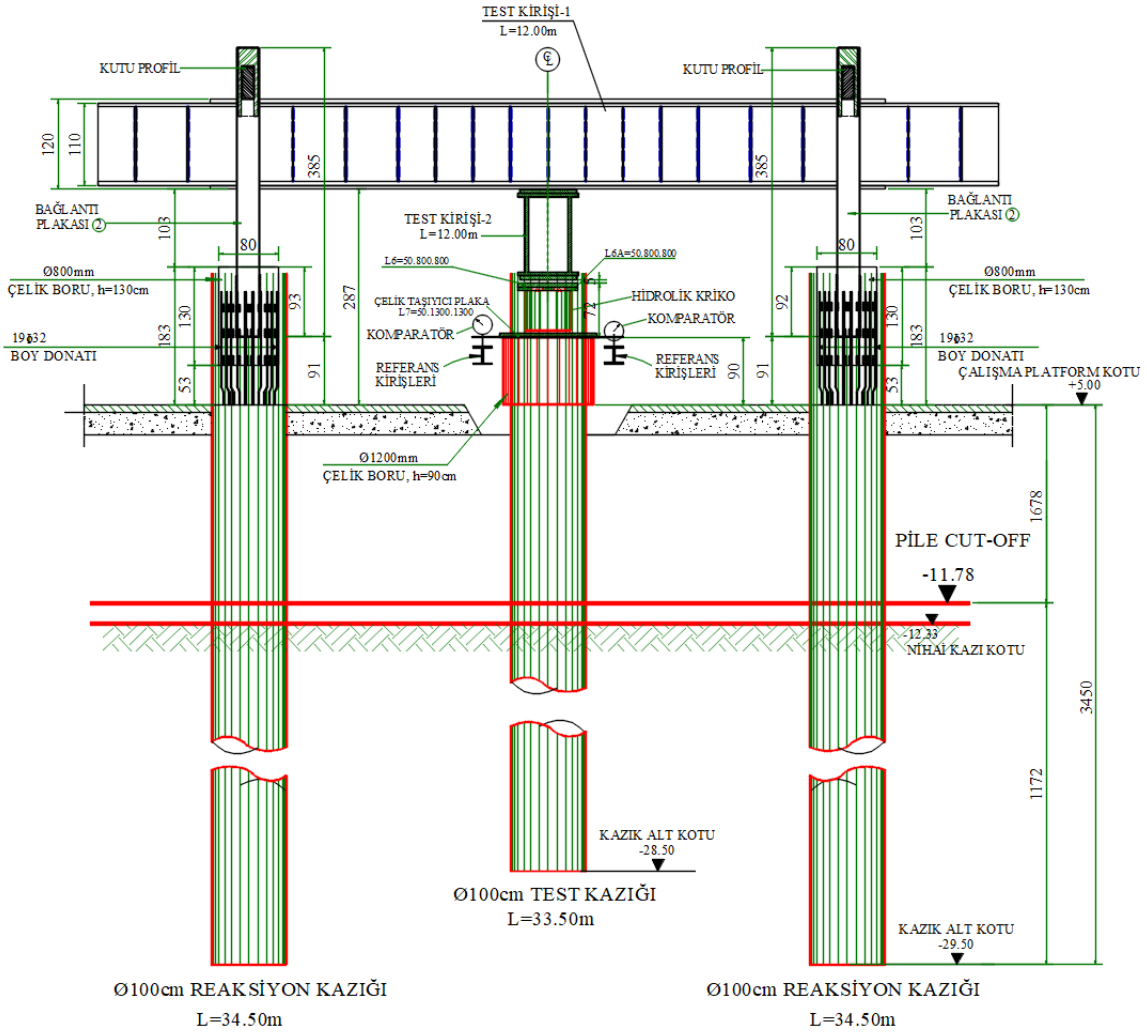
Kazıklı temel sistemlerinin tasarımında kullanılacak kazık kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla, proje sahasında iki adet tam ölçekli ve enstrümante test kazığı üzerinde eksenel basınç yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. A ve B bloklarında imal edilen Ø1000 mm çapındaki test kazıkları, kaya birimine en az 3.0 m soketlenmiştir. Her bir kazık, zemin profiline bağlı olarak belirlenen 6 ölçüm seviyesinde titreşim telli gerinim ölçerlerle (VW strain gauges) enstrümante edilmiştir. Bu ölçümler aracılığıyla, yükleme sırasında kazık çevresindeki zemin ve kaya birimleri içerisinde mobilize olan birim çevre sürtünmelerinin ve kazık boyunca yük aktarım mekanizmasının belirlenmesi amaçlanmıştır. Test sisteminin genel yerleşim planı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Test düzeneğinin yerleşim planı

TA-1 ve TA-2 test kazıkları, anakaya birimine 3.0 m (3D) soketlenmiş olup, toplam kazık boyları sırasıyla 32.5 m ve 33.5 m olarak imal edilmiştir. Yükleme, test kirişi üzerine

yerleştirilen tek bir yüksek kapasiteli hidrolik kriko aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Test sisteminin şematik kesiti Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Test sisteminin kesiti

Yükleme prosedürü olarak ASTM D1143 standardında tanımlanan Quick Load (Rapid Maintained Load) yöntemi uygulanmıştır. Test kazıkları, tasarım yükünün %100, %200 ve %225 seviyelerine kadar kademeli olarak yüklenmiştir. Yükleme sırasında, yüksek kapasiteli bir adet hidrolik kriko, hava beslemeli tam otomatik bir sistem aracılığıyla basınçlandırılmıştır.

Ø1000 mm çapındaki fore kazıklar üzerinde gerçekleştirilen tam ölçekli, enstrümante eksenel basınç yükleme testleri başarıyla tamamlanmıştır. Zayıf ve ileri derecede ayrışmış kumtaşı–kiltaşı ana kaya birimine 3.0 m soketlenen test kazıkları, 1680 ton-f yük seviyesine kadar güvenli bir şekilde yüklenmiştir.

5.2. Yük-Deplasman Sonuçları

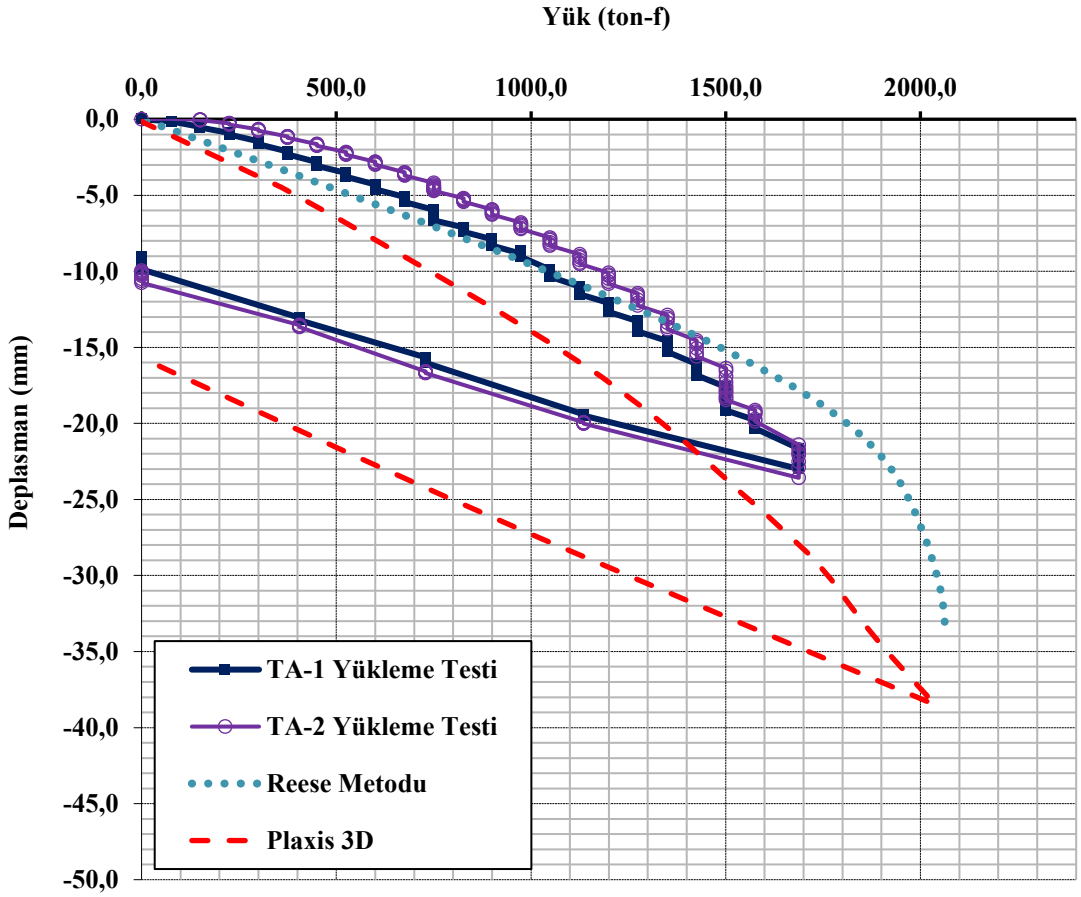
TA-1 ve TA-2 test kazıklarına ait yük–deplasman eğrileri Şekil 8'de sunulmuştur. Maksimum test yükü altında ölçülen maksimum oturmalar TA-1 ve TA-2 için sırasıyla 23.0

mm ve 23.6 mm olarak belirlenmiştir. Kalıcı ve elastik deplasman bileşenleri ise TA-1 için 9.0 mm ve 14.0 mm, TA-2 için 10.0 mm ve 13.6 mm olarak elde edilmiştir.

Her iki test kazığında da toplam oturmaların 23.0–23.6 mm aralığında kalması, kazıkların izin verilebilir deformasyon sınırları içerisinde çalıştığını göstermiştir. Deney sonuçları ve konservatif tasarım yaklaşımı dikkate alınarak, Ø1000 mm çapında ve kaya birimine en az 3.0 m soketlenen fore kazıklar için düşey tasarım taşıma kapasitesi, boş forajla geçilen kesimdeki çevre sürtünmesi dikkate alınmaksızın aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

$$Q_{test} = Q_{ktv} = (1680 - 30ton)/\gamma_{RT} \quad \text{(TBDY 2018 uyarınca } \gamma_{RT} = 1.4)$$

$$Q_{tv} = {}^{1650ton}/_{1.4} = 1178 \cong 1200\ ton$$

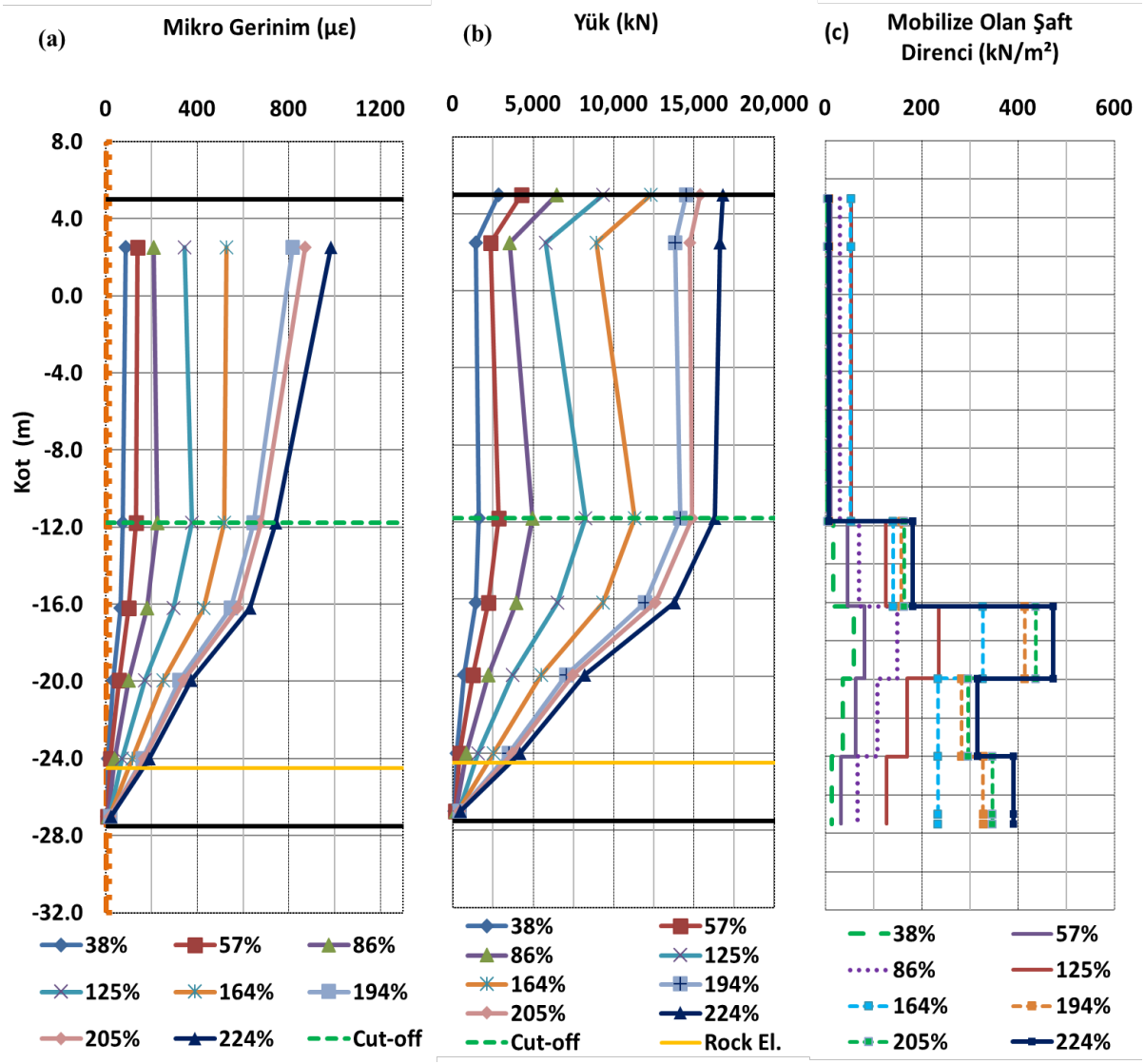


Şekil 8. TA-1 ve TA-2 yük-deplasman grafiği

Her iki test kazığında da maksimum oturma değerleri 0.15D = 150 mm sınırının oldukça altında kalmış ve deneyler sırasında göçme ya da taşıma kapasitesi aşımı gözlenmemiştir. Elde edilen düşük deplasman seviyeleri, kazıkların yüksek rijitlik ve düşük sıkışabilirlik özelliklerini ortaya koymaktadır. Yük–oturma davranışı, kazıkların nihai taşıma kapasitelerinin uygulanan maksimum test yükünün üzerinde olabileceğine işaret etse de, tasarımda mevcut deney verilerine dayanan konservatif kapasite değerlerinin kullanılması tercih edilmiştir. Bu doğrultuda, Ø1000 mm çapında ve kaya birimine en az 3.0 m soketlenen fore kazıklar için düşey tasarım taşıma kapasitesi, Q_{tv}=1200 ton olarak kabul edilmiştir.

5.3. Mobilize Olan Şaft Direnci

TA-1 test kazığına yerleştirilen gerinim ölçer okumalarından elde edilen, mikro gerinimin (a), yük (b) birim şaft direnci ve (c) derinlik ile değişimi Şekil 9'da verilmiştir.

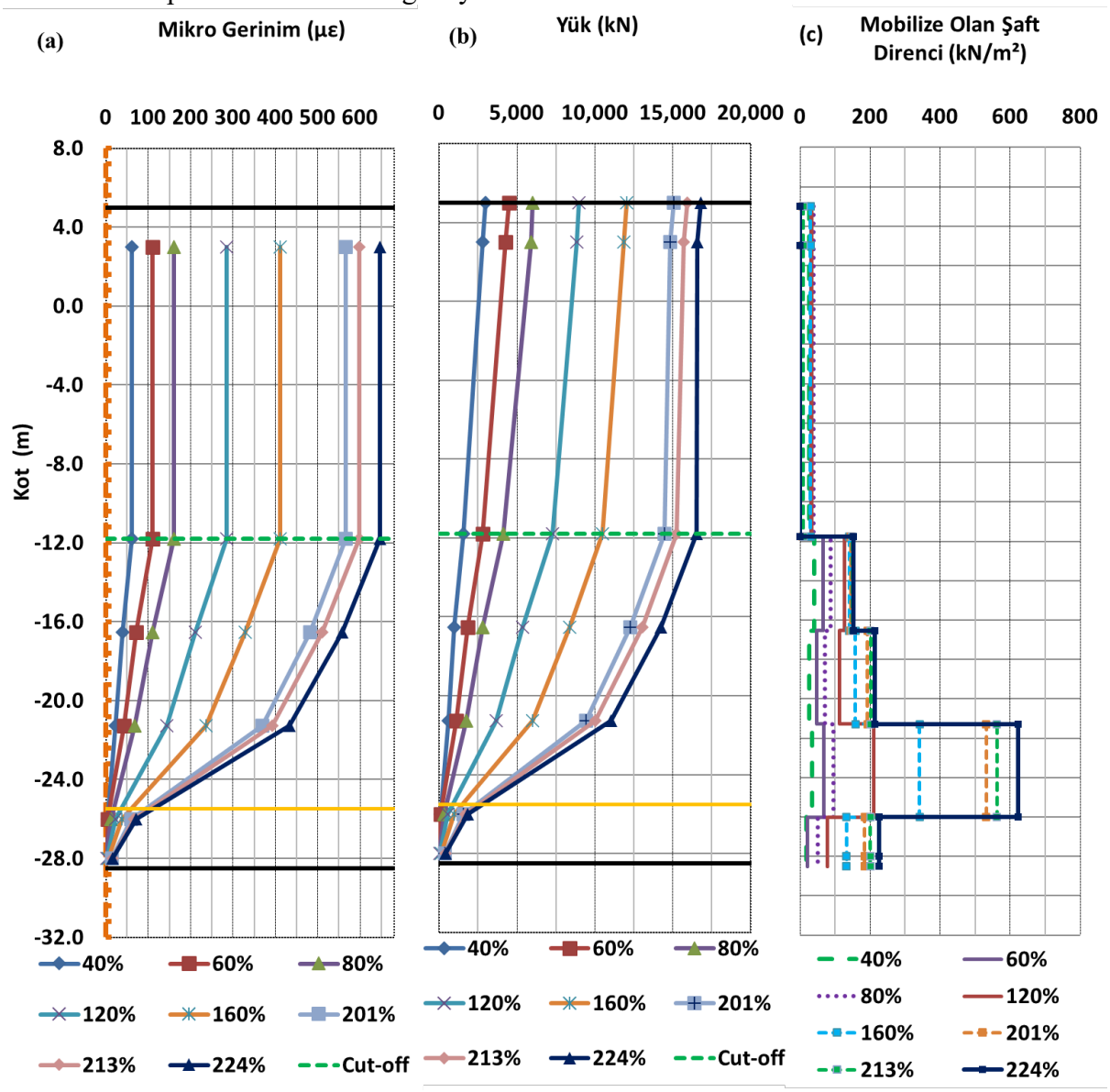


Şekil 9. TA-1 mikro gerinimin (a), yük (b) birim şaft direnci ve (c) derinlik ile değişimi

Kazık şaftı boyunca mobilize olan birim çevre sürtünmesi, zemin profiline bağlı olarak önemli farklılıklar göstermiştir. İlk 16 m kalınlığındaki kumlu siltli kil-1 biriminde ortalama 60 kPa, bunu izleyen 12 m kalınlığındaki kumlu siltli kil-2 biriminde ise yaklaşık 300 kPa olarak belirlenmiştir. Kumtaşı–kiltaşı ana kaya biriminde ölçülen ortalama mobilize birim çevre sürtünmesi ise yaklaşık 400 kPa seviyesindedir. Bununla birlikte, test kazıkları nihai göçme durumuna ulaşmadığından ve ana kaya birimine yeterli düzeyde yük aktarılmadığından, bu birimdeki nihai çevre sürtünmesi kapasitesinin tamamen mobilize edildiği sonucuna varılamamaktadır.

TA-2 test kazığına yerleştirilen gerinim ölçer okumalarından elde edilen, mikro gerinimin (a), yük (b) birim şaft direnci ve (c) derinlik ile değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Kazık şaftı

boyunca mobilize olan birim çevre sürtünmesi, zemin birimlerine bağlı olarak farklılık göstermiştir. İlk 16 m kalınlığındaki Kumlu Siltli Kil-1 biriminde ortalama 50 kPa, bunu izleyen 8 m kalınlığındaki Kumlu Siltli Kil-2 biriminde 200 kPa ve altındaki 4 m kalınlığındaki aynı birimde yaklaşık 600 kPa olarak belirlenmiştir. Kumtaşı–kiltaşı ana kaya biriminde ise ortalama mobilize birim çevre sürtünmesi yaklaşık 225 kPa olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, test kazıkları nihai göçme durumuna ulaşmadığından ve ana kaya birimine yeterli düzeyde yük aktarılmadığından, ölçülen değerin bu birimin nihai çevre sürtünmesi kapasitesini temsil ettiği söylenemez.



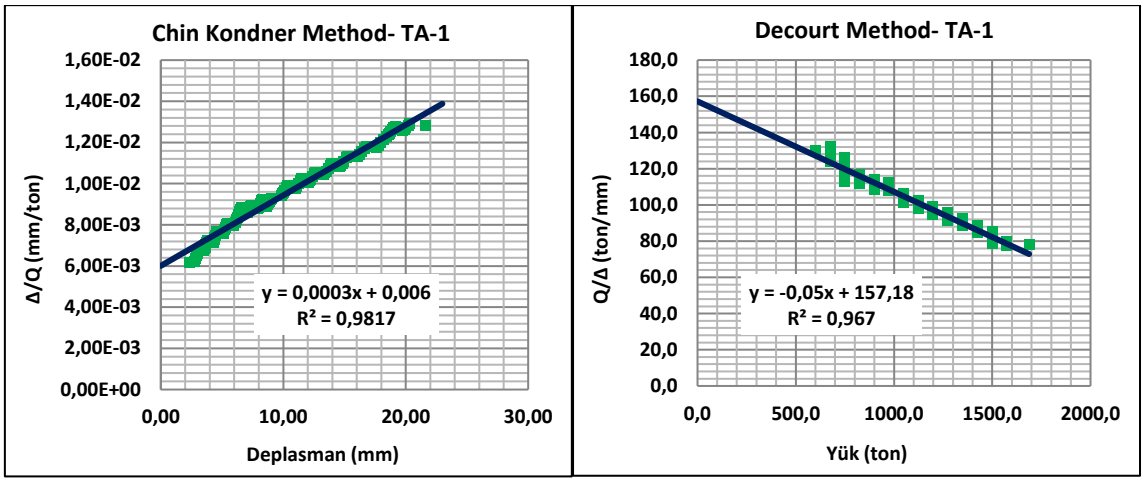
Şekil 10. TA-2 mikro gerinimin (a), yük (b) birim şaft direnci ve (c) derinlik ile değişimi

5.4. Kazık Yükleme Deneylerinin Değerlendirilmesi

Kazık yükleme deneylerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla literatürde farklı araştırmacılar tarafından çeşitli yorumlama yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin farklı varsayımlara ve uygulama sınırlamalarına sahip olması nedeniyle, deney

koşulları ve elde edilen yük–oturma davranışı dikkate alınarak uygun yöntemin seçilmesi önem taşımaktadır.

Oturma kriterlerine dayalı yöntemler; toplam oturmanın, plastik oturmanın, plastik/elastik oturma oranının, toplam oturma/birim yük oranının veya plastik oturma/birim yük oranının sınırlandırılmasına dayalı yaklaşımlar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ayrıca Davisson ile Hirany–Kulhawy yöntemleri de oturma sınırlarına dayalı değerlendirme yöntemleri arasında yer almaktadır (Fellenius, 2006). Bu çalışmada test kazıkları nihai göçme davranışına ulaşmadığından, kapasite değerlendirmesinde Chin–Kondner ve Decourt yöntemleri esas alınmıştır (Birid, 2017). TA-1 test sonuçları için bu yöntemlere ait grafikler Şekil 11'de sunulmuştur.

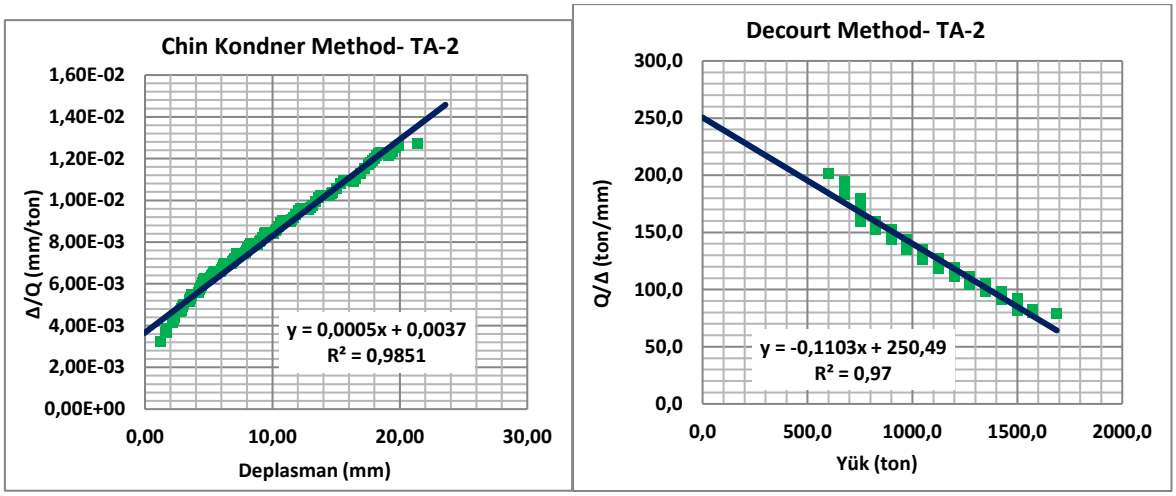


$$Q_u = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{0.0003} = 3{,}333\ ton = 32{,}700\ kN$$

$$Q_u = \frac{C_2}{C_1} = \frac{157.18}{0.05} = 3{,}144\ ton = 30{,}839\ kN$$

Şekil 11. TA-1 kazık yükleme deney sonuçlarının Chin ve Decourt yöntemleri ile yorumlanması

TA-2 test sonuçları için bu yöntemlere ait grafikler Şekil 12'de sunulmuştur.



$$Q_u = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{0.0005} = 2{,}000\ ton = 19{,}620\ kN$$

$$Q_u = \frac{C_2}{C_1} = \frac{250.49}{0.1103} = 2{,}271\ ton = 22{,}278\ kN$$

Şekil 12. TA-2 kazık yükleme deney sonuçlarının Chin ve Decourt yöntemleri ile yorumlanması

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, zayıf ve ileri derecede ayrışmış kumtaşı–kiltaşı ana kaya birimine soketlenen Ø1000 mm çapındaki fore kazıkların eksenel yük–oturma davranışı, tam ölçekli enstrümante yükleme deneyleri ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile incelenmiştir. TA-1 ve TA-2 test kazıkları 1680 ton-f seviyesine kadar başarıyla yüklenmiş ve maksimum oturmalar sırasıyla 23.0 mm ve 23.6 mm olarak ölçülmüştür. Bu değerler 0.15D = 150 mm göçme kriterinin oldukça altında kalmış ve deneyler sırasında göçme veya belirgin bir taşıma kapasitesi aşımı gözlenmemiştir. Elde edilen düşük deplasmanlar, kazıkların yükleme koşullarında yüksek rijitlik sergilediğini göstermiştir.

Gerinim ölçerlerden elde edilen veriler, yük aktarımının esas olarak kazık şaftı boyunca gelişen çevre sürtünmesi ile gerçekleştiğini, uç direncinin ise sınırlı düzeyde mobilize olduğunu ortaya koymuştur. Ölçülen birim şaft sürtünmesi değerleri zemin ve kaya birimlerine bağlı olarak önemli farklılıklar göstermiştir. Bununla birlikte, test kazıkları nihai göçme durumuna ulaşmadığından, ölçülen değerlerin özellikle kaya–kazık ara yüzünün nihai şaft sürtünmesi kapasitesini temsil ettiği kabul edilmemiştir.

Deney sonuçları ve konservatif tasarım yaklaşımı doğrultusunda, Ø1000 mm çapında ve kaya birimine en az 3.0 m soketlenen fore kazıklar için düşey tasarım taşıma kapasitesi Q_{tv}=1200 ton olarak belirlenmiştir. Chin–Kondner ve Decourt yöntemleriyle yapılan değerlendirmeler ise kazıkların nihai taşıma kapasitelerinin uygulanan maksimum test yükünün üzerinde olabileceğine işaret etmiştir.

Üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin saha deneyleriyle uyumlu sonuçlar vermesi, uygun zemin modeli ve parametre kalibrasyonu ile sayısal analizlerin kaya soketli kazıkların yük–oturma davranışını güvenilir biçimde temsil edebileceğini göstermiştir. Genel olarak, enstrümante tam ölçekli yükleme deneyleri ile kalibre edilmiş sayısal analizlerin birlikte kullanılması, zayıf kaya ortamlarında kazıkların yük aktarım mekanizmasının ve servis performansının güvenilir biçimde değerlendirilmesi açısından etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

ASTM D1143/D1143M-07 (2007), “Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load”, ASTM International.

BS EN ISO 22477-1 (2018), “Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures — Testing of columns: Static compression load testing”, BSI Standards Publication.

Carter, J. P. ve Kulhawy, F. H. (1988), “Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock”, Report EL-5918, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Fellenius, B. H. (2006), “Basics of Foundation Design”, Electronic Edition.

Gökalp, A., Adatepe, Ş. ve Dinç, A. (2024), “A case study: Evaluation of instrumented bored pile loading test (PLT) in silty sand soils”, 19th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey, October 17–18.

Gupton, C. ve Logan, T. (1984), “Design Guidelines for Drilled Shafts in Weak Rocks of South Florida”, Proceedings of the South Florida Annual ASCE Meeting.

Horvath, R. G. ve Kenney, T. C. (1979), "Shaft Resistance of Rock Socketed Drilled Piers", Proceedings of the ASCE Symposium on Deep Foundations, Atlanta, USA.

Karagkounis, N., Latapie, B., Sayers, K. ve Mulinti, S. R. (2016), "Geology and geotechnical evaluation of Doha rock formations", Geotechnical Research, Vol 3(3), 119–136.

Reese, L. C. ve O'Neill, M. W. (1988), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation, McLean, Virginia.

Rosenberg, P. ve Journeaux, N. L. (1976), "Friction and end bearing tests on bedrock for high-capacity socket design", Canadian Geotechnical Journal, Vol 13(3), 324–333.

Rowe, R. K. ve Armitage, H. H. (1984), "A design method for drilled piers in soft rock", Canadian Geotechnical Journal, Vol 24(1), 126–142.

Tomlinson, M. J. ve Boorman, R. (2001), "Foundation Design and Construction", Pearson Education.

Williams, A. F., Johnston, I. W. ve Donald, I. B. (1980), "The design of sockets in weak rock", Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock, Sydney, Vol 1, 327–347.