

# DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) ELEMANLARININ DEFORMASYON TEMELLİ TASARIMI

## PERFORMANCE BASED DESIGN OF RAMMED AGGREGATE PIERS (RAPS)

Ece KURT BAL<sup>1</sup>

Lale ÖNER<sup>2</sup>

Kemal Önder ÇETİN<sup>3</sup>

### ABSTRACT

Within the confines of this paper, a normalized deformation based capacity mobilization assessment scheme is presented for rammed aggregate piers (RAP). For this purpose, field load tests, performed on 63 RAPs in Turkey were assessed. Site investigations at these sites revealed that generalized soil profiles are mostly composed of normally consolidated clay layers extending to a depth of 18m. Below this depth, usually medium dense to dense sand / hard greywacke / very stiff to hard clay are present. A weighted arithmetic mean SPT  $N_{60}$  assessment procedure was used to estimate representative soil strength and stiffness parameters in cohesive soils. The results of RAP load tests were summarized in the form of normalized mobilized capacity versus settlement curves as functions of representative SPT  $N_{60}$  values. The normalized field load test database revealed that: i) the shaft resistance is observed to be fully mobilized at normalized displacements of 40 percent of RAP diameter for very soft clays to 10 percent for relatively stiffer clays, ii) upto normalized displacements of 2-5% of RAP diameter, 30-50% of the shaft resistance capacity is mobilized in a rather linear elastic manner, iii) normalized capacity mobilization response of RAPs is softer than the ones of bored concrete piles, iv) under compressive loads RAPs exhibit a strain hardening response, as a result of which the design-basis capacity is dominated by allowable settlement criterion.

**Keywords:** *Rammed aggregate pier, load tests, bearing capacity, settlement*

### ÖZET

Bu çalışmada, darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanlarının düşey yükler altında deformasyon ve kapasite performansının saha yükleme deneyleri ile değerlendirilmesi konu edilmiş olup, söz konusu deneyler onüç farklı bölgede imal edilen 63 kolon üzerinde gerçekleştirilmiştir. Saha zemin profilleri farklılık göstermekle birlikte, genel olarak yaklaşık 18m derinliklere kadar normal konsolide birimlerin yer aldığı, bu tabakanın altında, çoğunlukla orta sıkı-sıkı kum / sağlam grovak / orta katı-sert kil birimlerin devam

<sup>1</sup> İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yaz. San. ve Tic. Ltd. Şirk., ekurt@sentezinsaat.com.tr

<sup>2</sup> İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yaz. San. ve Tic. Ltd. Şirk., loner@sentezinsaat.com.tr

<sup>3</sup> Prof. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, o Cetin@metu.edu.tr

ettiği görülmüştür. Kohezif zeminlerin mukavemetinin belirlenmesinde ağırlıklı ortalama yöntemiyle belirlenen temsili SPT  $N_{60}$  değerleri kullanılmıştır. Arazi yükleme deney sonuçları nihai taşıma kapasitesi ile normalize edilen yüke karşılık, kolon çapı ile normalize edilen oturma grafikleri şeklinde sunulmuştur. Çalışma sonuçları esas alındığında: i) çok yumuşak killerde maksimum çeper sürtünme direncinin DKK çapının %40'ı mertebelerindeki deplasmanlarda mobilize olduğu, benzer olarak görece daha sert killerde ise bu deplasman değerinin %10 mertebelerinde olduğu görülmüştür, ii) çapla normalize edilmiş deplasman değerinin %2-5 mertebelerine ulaştığı durumlarda kapasitenin %30-50 mertebelerinde mobilize olduğu ve oturma davranışının doğrusal elastik şekilde bu mertebelere ulaştığı anlaşılmıştır, iii) normalize kapasite mobilizasyon davranışının foraj ile teşkil edilmiş kazıkların davranışına kıyasla daha sünek olduğu belirlenmiştir, iv) basınç altında DKK elemanlarının birim deformasyonla pekleşen davranış gösterdiği, dolayısı ile tasarıma esas kapasitenin projeye özel izin verilebilir deformasyon değeri ile belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Darbeli kırmataş kolon, kolon yükleme testi, taşıma kapasitesi, oturma

## 1. GİRİŞ

Taşıma gücü yetersizliği, aşırı oturma, sıvılaşma ve duraysızlık gibi mühendislik problemlerine gebe sahalarda inşaatı planlanan yapı temelleri altında sıklıkla zemin iyileştirme uygulamalarına ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu kapsamda, derin temeller ya da sıkışabilir zeminin kazılarak yerine daha iyi nitelikli malzeme doldurulması gibi mevcut çözüm yöntemlerine alternatif olarak darbeli kırmataş kolonlardan oluşan rijit elemanlar da kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, çapı 50 cm olan muhafazalı alttan beslemeli kuru sistemle (Geopier-Impact yöntemi ile) imal edilmiş darbeli kırmataş kolon elemanlarının düşey yükler altındaki davranışı konu edilmiş olup, bu kolonlar üzerinde uygulanan tam ölçekli yükleme deneylerinin sonuçları normalize edilen yük-oturma davranışı şeklinde sunulmuştur. Bu amaca yönelik olarak Geopier-Impact yöntemi ile Türkiye'nin onüç farklı yöresinde imal edilmiş 63 adet darbeli kırmataş kolon (DKK) üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bildiri kapsamında kısa bir literatür özeti sonrası, yükleme deneyi sonuçları ve önerilen normalize kapasite mobilizasyon eğrileri sunulacaktır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

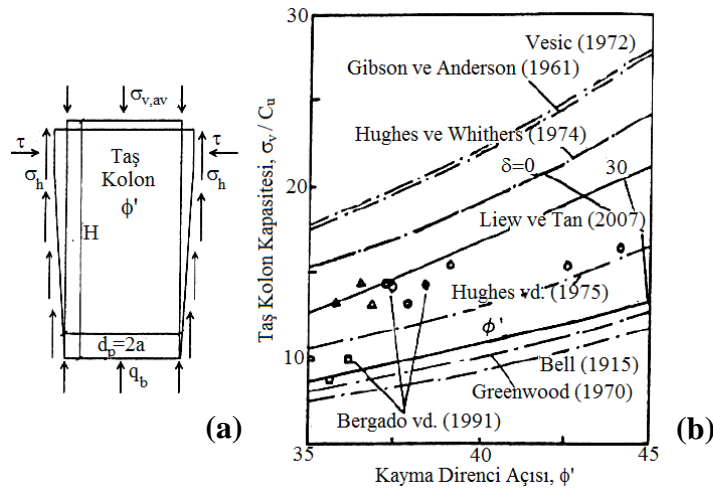
Barksdale ve Bachus (1983), taş kolonlar için yenilme mekanizmalarını üç şekilde gruplandırmıştır. Bu mekanizmalar yanal genişleme, makaslama ve zımbalama yenilmeleri olarak tanımlanmıştır. Değişik yenilme mekanizmaları esas alınarak, düşey yükler altında taş kolonun nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik teorik çözümler geliştirilmiştir. Bunlardan bazılarını, yanal genişleme yenilmesi için; Grenwood (1970), Vesic (1972), Hughes ve Withers (1974), Datye ve Nagaraju (1975), Madhav ve diğ. (1979), kesme yenilmesi için; Madhav ve Vitkare (1978), Wong (1975), Barksdale ve Bachus (1983), zımbalama yenilmesi için ise; Aboshi ve diğ. (1979) şeklinde sıralayabiliriz.

Taş kolon nihai taşıma kapasitesinin; kolon geometrisine, imalat yöntemine, kolonun ve zeminin mukavemet özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Uygulanan yükün büyük bir bölümü kolon ucuna iletilmeden kolon çeperinde mobilize olduğundan, genel olarak "uzun taş kolon" taşıma kapasitesi analizlerinde, kolon boyunu ihmal ederek hesaplamaların yapılmasını öneren yöntemler mevcuttur. Örnek olarak, uzun kolonlar için deneysel olarak taş kolon nihai taşıma kapasitesi, Hughes ve Withers (1974) ve Pitt ve diğ. (2003) tarafından araştırılmıştır. Hughes ve Withers (1974), normal konsolide killerde bir seri model deneyleri ile yanal genişleme yenilmesi üzerine de araştırma yapmışlar ve yanal genişlemenin 4D derinliklere kadar zeminin maksimum radyal direnci ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, son zamanlarda tekil kolonlar ve grup kolonlar için nihai taşıma kapasitesinin tahmininde saha çalışmalarının ve sonlu elemanlar yönteminin kullanılarak analitik çözümlerin sunulduğu yaklaşımlar (Etezad, 2006) da mevcuttur.

Ali ve diğ. (2010), kolon çapının taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini, boy/çap (l/d) oranı 6 olacak şekilde 40mm, 50mm ve 70mm çaplı kolonlar üzerinde laboratuvar deneyleri ile araştırmışlardır. Sonuçlar, küçük çaplı kolonlar için taşıma kapasitesinin aynı deformasyon altında %60 daha fazla olduğunu göstermiştir. Diğer ifadeyle küçük çaplı kolonlarda kapasite deformasyonla daha hızlı mobilize olmaktadır.

Bae ve diğ. (2002), taş kolon yenilme mekanizması üzerindeki parametre etkisini laboratuvarında model testler ile araştırıp, sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Tekil taş kolonlarda yanal genişleme yenilmesinin 1,6D – 2,8D derinliklerde olduğu ve kolon taşıma kapasitesinde zeminin drenajsız kayma mukavemetinin ve alan oranının etkili olduğu görülmüştür.

Madhav ve Miura (1994), birçok araştırmacının yöntemini bir araya getirerek bir çalışma yapmışlardır. Bu yöntemler incelendiğinde, nihai taşıma kapasitesi için geniş bir aralık (Şekil 1b) ortaya çıktığından, tasarımın yükleme testleri ve enstrümantasyonlar ile doğrulanması önerilmektedir.



**Şekil 1.** a) Taş kolon Üzerindeki Gerilme b) Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması (Madhav ve Miura, 1994)

Thompson ve Suleiman (2010), yük-deformasyon ilişkisinin nümerik analizler ile tahmininde DKK imalat şeklinin nasıl modellenmesi gerektiğini araştırmışlardır. Boşluk

genişleme teorisini modelleyebilmek için, hacimsel birim deformasyon yöntemini kullanmışlar ve ölçülen ile hesaplanan deformasyonların uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Das ve Pal (2012), kumlu silt ve kil zeminlerdeki taş kolon kapasitesini laboratuvarında kurulan tank sistemi ile araştırmışlardır. 25mm deformasyona ulaşana dek çeşitli çaplardaki taş kolonlar üzerine yükleme yapılmıştır. Taş kolon çapının artması ile bu deformasyon değerinde mobilize olan kolon kapasitesinde %85 mertebelerinde azalma olduğu görülmüştür.

Ambily ve Gandhi (2004), yük-deformasyon davranışını, taş kolonun nihai eksenel kapasitesini ve iyileştirilmiş zeminin rijitliğini; deneysel yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Tekil kolonda yanal genişleme yenilmesinin 0,5D - 1,0D derinlikte olduğu, yük-deformasyon davranışının neredeyse doğrusal olduğu ve iyileştirilmiş zemin rijitliğine ulaştığı görülmüştür.

Zahmatkesh ve Choobbasti (2010), taş kolonlar ile desteklenmiş şerit temelin taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi için bir seri sayısal analiz yapmışlardır. Yapılan analizler sonucunda, geliştirdikleri taşıma kapasitesi oranının; kolon aralığına ve temel genişliğine bağlı olduğunu bulmuşlar ve tüm sonuçları literatür ile karşılaştırmışlardır. Temel boyutunun artmasıyla, taşıma kapasitesi oranının, Etezzad (2006)'nın kullandığı eşdeğer zemin/kolon sistemi yöntemine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Afshar ve Ghazavi (2013), nihai taşıma kapasitesinin tahmini için basit bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, yanal toprak basıncı teoremi ile kolonun ve zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin kullanımına dayanmakla birlikte, çap ve kolon aralığı gibi geometrik parametrelere de ihtiyaç duymaktadır. İlgili sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi ve literatür ile doğrulanmış olup, taş kolon sürtünme açısının artmasıyla nihai taşıma kapasitesinin artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

### **3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) İMALATI**

Literatürde de detaylı olarak tartışıldığı üzere taş kolon elemanlarının gerek kapasite gerekse de deformasyon davranışına etken ana parametrelerden biri imalat yöntemidir. Bu çalışma kapsamında 63 farklı noktada Geopier-Impact sistemi ile darbeli kırmataş kolon (DKK) imalatı gerçekleştirilmiş olup, impact elemanları için imalat adımları aşağıda özetlenmiştir:

- (1) alt ucu kapalı olan 36 cm çaplı mandrel itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir (Şekil 2a).
- (2) mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur (Şekil 2b).
- (3) 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile düşey vibrasyon uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2c). 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile sıkıştırma gerçekleştirildiğinde 36 cm olan çap, 50 cm çapa genişler.

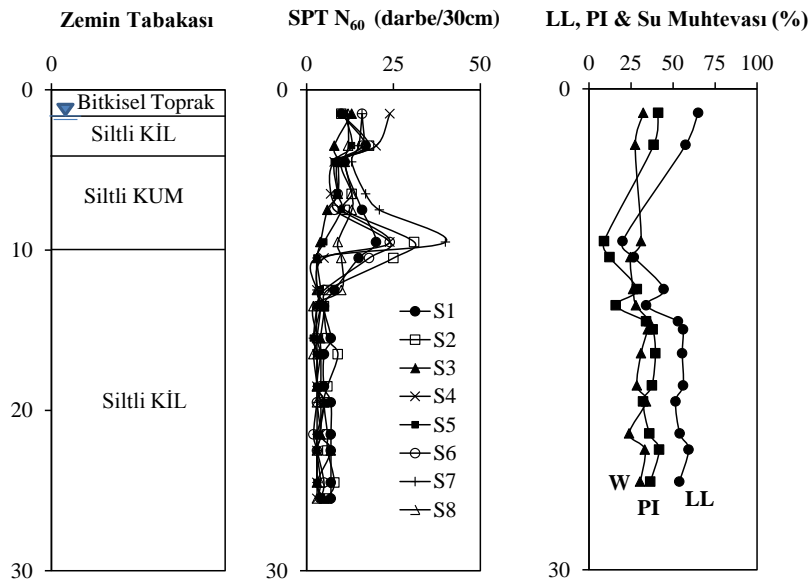
Bu bildiri kapsamında sunulan yükleme deney sonuçları ve dolayısı ile bu sonuçları esas alarak geliştirilmiş normalize edilmiş kapasite ve deplasman davranışı Geopier-Impact yöntemi ile teşkil edilmiş DKK eleman davranışı için geçerli olup, farklı imalat yöntemleri ile teşkil edilmiş rijit kolonların sunulandan farklı davranış göstermesi olasıdır.



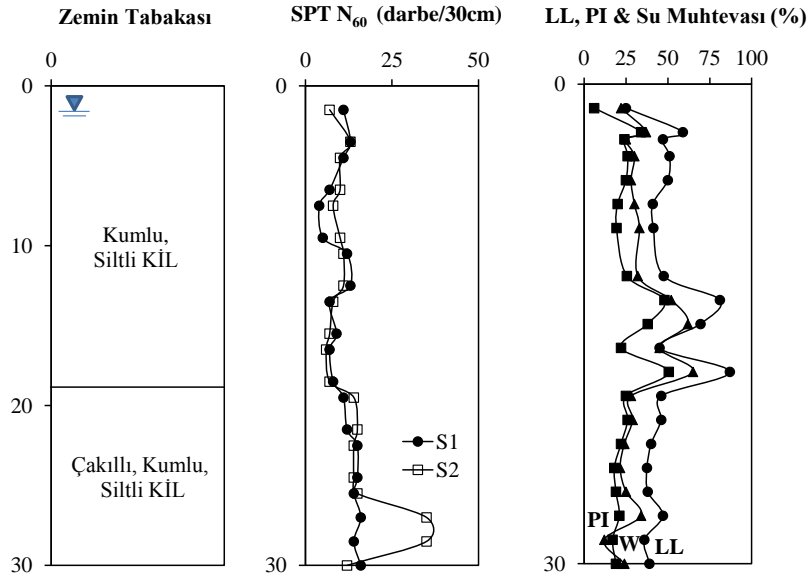
Şekil 2. Impact Sistemi ile Kolon İmalatı

#### 4. ZEMİN ARAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

Zemin araştırma çalışmaları kapsamında, 23 - 40 m derinliklere ulaşan sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çeşitli derinliklerde standart penetrasyon testleri yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Temsili zemin profilinin gösteriminde örnek teşkil etmesi açısından Yalova ve Afyon sahalarına ait zemin profilleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’de sunulmuştur. Zemin araştırma çalışmaları, temsili zemin profilinin yaklaşık 4 - 18m derinliklere kadar normal konsolide, düşük-yüksek plastisiteli, yumuşak - orta katı kıvamlı CL-CH birimlerinden oluştuğuna işaret etmektedir. Yer yer siltli kil - killi silt ara tabakalarına ek olarak kum ara tabakaları da kesilmiştir. DKK elemanlarının geçtiği birimlerin altında ise taşıma ve oturma davranışları açısından sıkıntısız orta sıkı - sıkı çakıllı, killi, siltli kum / sağlam grovak / orta katı – katı - çok katı - sert kil birimlerin devam ettiği görülmüştür. Yeraltı su seviyesinin tüm sahalarda 0,0 - 5m derinlikler arasında olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Temsili Zemin Profili – Yalova



Şekil 4. Temsili Zemin Profili – Afyon

## 5. DKK YÜKLEME DENEY YÖNTEMİ

Yükleme deneyi, ASTM D-1143 standardında tanımlanmış olan kazıkların basınç altındaki davranışlarını ölçen deney aşamalarında benzer şekilde yapılmaktadır. Deney yükü doğrudan kolon üzerine uygulanabildiği gibi, zemin ve kolondan teşkil edilen birim hücre üzerine de uygulanabilir. Arazi yüklemeye deneyleri sırasında yüklemeye kademelerine % 5 artış ile başlanmış olup, bu artış tasarım yükünün % 150'sine kadar devam ettirilmiştir (Çizelge 1). Daha sonra boşaltma kademeleri ile devam edilerek, ilgili deneyler bitirilmiştir. Şekil 5'de yüklemeye deney düzeneği gösterilmiştir.

Çizelge 1. Yüklemeye Deney Aşamaları

No	Zaman (dk.) (min. / max.)	Yük (%)	No	Zaman (dk.) (min. / max.)	Yük (%)
0	15 / 60	5	8	15 / 60	133
1	15 / 60	16	9	15 / 60	150
2	15 / 60	33	10	N/A	100
3	15 / 60	50	11	N/A	66
4	15 / 60	66	12	N/A	33
5	15 / 60	83	13	N/A	0
6	15 / 60	100	14	N/A	100
7	60 / 240	116 *	15	N/A	0

\* Kolon üzerindeki maksimum yükün %115'inde, oturma hızı 0,254mm/saat olduğu takdirde yüklemeye okumaları önerilen maksimum sürede (60dk) sonlandırılıp, bir sonraki kademeye geçilir, aksi halde önerilen maksimum süreye (4 saat) kadar devam edilir.

Ek olarak Geopier-Impact elemanları üzerinde gerçekleştirilen yüklemeye deneylerinde, kolonun uç kısmına "tell-tale" olarak adlandırılan çubuk elemanlar yerleştirilerek uç bölgesindeki deformasyon davranışı da izlenmeye çalışılmıştır (Brian et al., 2006). Çubuk

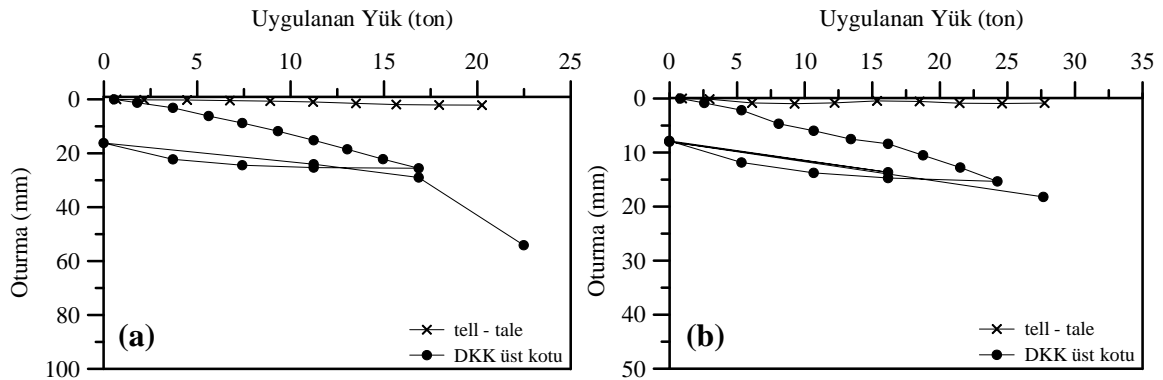
elemanı, yatay çelik plaka üzerine yerleştirilen ve pvc boru ile muhafaza edilmiş iki adet demir çubuktan oluşmaktadır. Yükleme deneyi sırasında kolon üst kotunda ve tell-tale plakasında oluşan deplasman ve yük değerleri kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5. Yükleme Deney Düzenegi

## 6. YÜKLEME DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada, yumuşak - katı kil zeminlerde imal edilmiş 63 tekil kolon üzerinde, kolon taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bitmiş çapı 50 cm olan ve boyları 8 m ile 17 m arasında değişim gösteren Geopier-Impact darbeli kırmataş kolon elemanları, onüç farklı yörede ve çalışma alanında imal edilmiş olup, bu kolonlar üzerinde yükleme deneyleri uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında, yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri kullanılarak nihai kolon taşıma kapasitesi belirlenmiş, nihai kapasiteye ulaşamayan yükleme durumları için ise hiperbolik yaklaşım kullanılmıştır. Reese ve O'Neill (1988) yöntemine benzer şekilde; nihai taşıma kapasitesine göre normalize edilen yüke karşılık kolon çapı ile normalize edilen oturma grafikleri elde edilmiştir. İlgili grafikler çalışma sahası zeminlerinin mukavemet ve rijitlik özelliklerini temsilen, temsili  $N_{60}$  değerine göre sınıflandırılmıştır. Temsili  $N_{60}$  değerinin hesaplanmasında enerji verimine göre düzeltilmiş SPT  $N_{60}$  değerleri kullanılmış olup, bu değerlendirme kapsamında yüzeyden itibaren 8 m-17 m derinliklere kadar doğrusal olarak azalan bir ağırlık faktörü kullanılarak yüzeye yakın SPT  $N_{60}$  değerlerinin ortalama hesaplanmasında daha yüksek ağırlıkla temsil edilmesi sağlanmıştır. Ağırlıklı ortalama kullanılarak elde edilen temsili SPT  $N_{60}$  değerleri ( $N_{60,rep.}$ ) Çizelge 2'de özetlenmiştir. Şekil 6'da yükleme testi sonuçlarına örnek teşkil edebilecek Yalova ve Yozgat sahalarında gerçekleştiren iki adet temsili yük-oturma grafiği gösterilmiştir.



Şekil 6. Temsili Yükleme Deney Sonuçları a) Yalova b) Yozgat

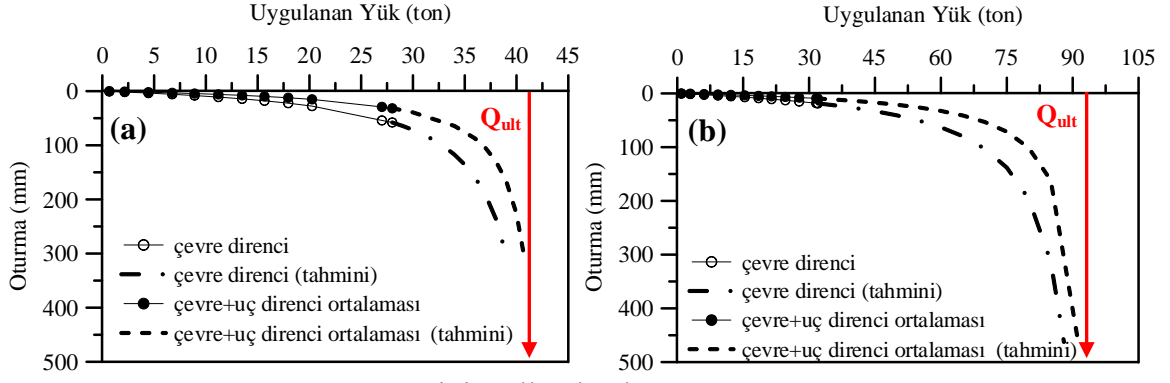
Çizelge 2. SPT  $N_{60,rep}$  Değerleri, DKK Boyları ve Çalışma Sahaları

No	Çalışma Sahası	$N_{60,rep}$	DKK Boyu (m)	No	Çalışma Sahası	$N_{60,rep}$	DKK Boyu (m)	No	Çalışma Sahası	$N_{60,rep}$	DKK Boyu (m)
1	Afyon-1	3	8	22	Bursa	14	16	43	Sivas	10	9
2	Afyon-1	5	8	23	Bursa	11	17	44	Yalova	7	12
3	Afyon-1	3	11	24	Bursa	11	17	45	Yalova	7	14
4	Afyon-1	4	16	25	Bursa	11	17	46	Yalova	6	16
5	Afyon-1	5	16	26	Bursa	11	17	47	Yalova	11	16
6	Afyon-2	9	14	27	Gaziantep-1	12	7	48	Yalova	11	16
7	Afyon-2	9	17	28	Gaziantep-1	12	8	49	Yalova	7	16
8	Afyon-2	9	14	29	Gaziantep-2	13	9	50	Yalova	10	16
9	Afyon-2	9	17	30	Gaziantep-2	13	9	51	Yalova	12	16
10	Aydın	8	18	31	İstanbul-1	13	10	52	Yozgat-1	9	12
11	Aydın	8	18	32	İstanbul-2	3	14	53	Yozgat-1	8	10
12	Aydın	7	13	33	İstanbul-2	2	8	54	Yozgat-1	10	8
13	Aydın	7	13	34	Kayseri	22	17	55	Yozgat-1	10	8
14	Bursa	11	16	35	Kayseri	22	17	56	Yozgat-1	11	17
15	Bursa	11	16	36	Sivas	10	9	57	Yozgat-1	12	15
16	Bursa	14	16	37	Sivas	10	10	58	Yozgat-2	6	15
17	Bursa	14	16	38	Sivas	6	12	59	Yozgat-2	8	12
18	Bursa	11	16	39	Sivas	15	10	60	Yozgat-2	4	10
19	Bursa	11	16	40	Sivas	5	10	61	Yozgat-2	10	9
20	Bursa	11	16	41	Sivas	5	10	62	Yozgat-2	10	9
21	Bursa	14	16	42	Sivas	15	7	63	Yozgat-2	10	9

### Çeper Direncinin Mobilizasyonu

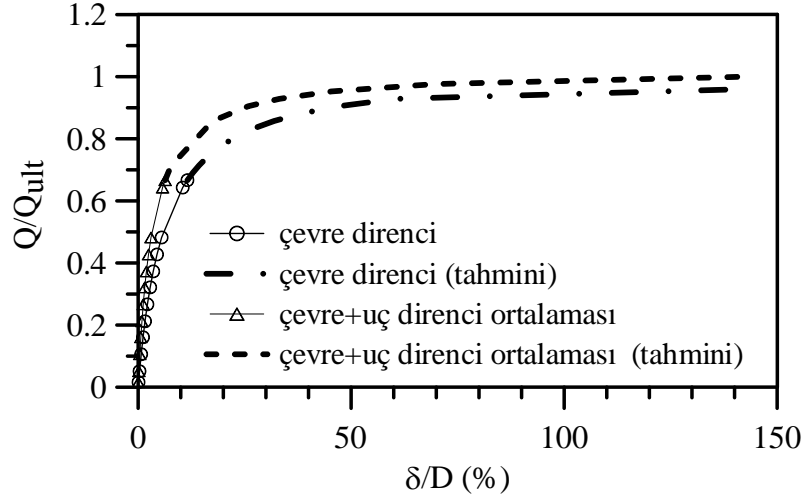
Reese ve O'Neill (1988), servis yükleri altında çoğunluğu forajla imal edilmiş yerinde dökme beton kazığın oturmasını hesaplamak için kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde çeper ve uç dirençleri için normalize edilen yüke karşılık normalize edilen oturma grafiklerini, tam ölçekli yükleme deneylerini kullanarak geliştirmişlerdir. Bu grafikler, oturmayı, mobilize olmuş direncin tüm dirence oranı şeklinde ifade etmektedir. Bu değerlendirmeden esinlenerek, kohezyonlu zeminler içinde teşkil edilmiş DKK elemanların normalize çeper kapasitesini nasıl mobilize ettiğini belirleme amacına yönelik olarak 63 adet yükleme deney verileri değerlendirilmiştir. Yükleme deneylerinden elde edilen yük-oturma grafikleri kullanılarak nihai kolon taşıma kapasitesi ( $Q_{ult}$ ) belirlenmiştir. Yükleme sırasında birçok durumda nihai kapasiteye ulaşmak mümkün olmadığından hiperbolik fonksiyon benzeştirme yöntemi ile  $Q_{ult}$  değerleri elde edilmiştir. DKK elemanının çeper bölgesinin maruz kaldığı temsili deformasyonu bulmak üzere kolon üst kotu ile kolon alt kotunda ölçülen deplasmanların ortalama değerleri hesaplanmıştır. İlgili yükleme testleri, SPT  $N_{60}$  değerlerinin 2 ila 22 arasındaki değerleri için gruplandırılmış olup, temsili olarak seçilen ve SPT  $N_{60} = 6$  için belirlenen nihai taşıma kapasitesi ( $Q_{ult}$ ) grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Aynı şekil üzerinde hiperbola eğrisi kullanılarak maksimum kapasitenin nasıl belirlendiği de gösterilmiştir. Şekiller üzerinde ölçümle belirlenmiş veriler kesiksiz çizgilerle, hiperbola ile türetilmiş veriler ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



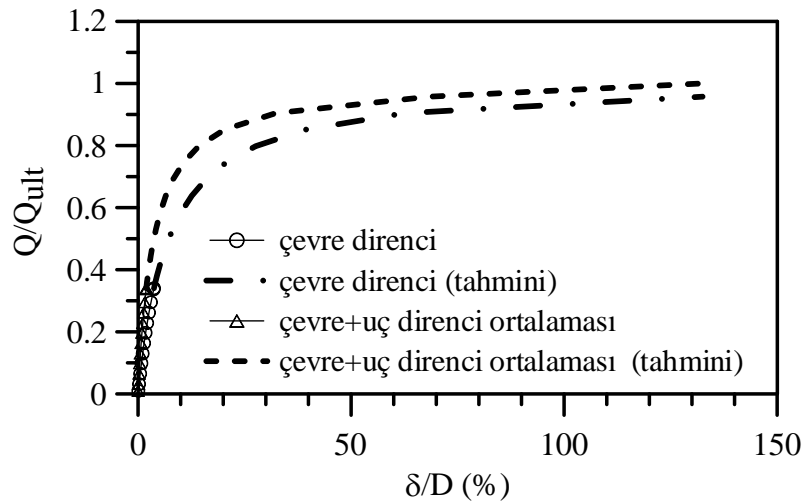


Şekil 7. Yük - Oturma Grafiği Kullanılarak  $Q_{ult}$  Tahmini a) Yalova b) Yozgat

Yükleme deney verileri kullanılarak her bir test için tahmin edilen  $Q_{ult}$  değerleri kullanılarak normalize edilen yüke karşılık, kolon çapı ( $D=50\text{cm}$ ) ile normalize edilen oturma grafikleri elde edilmiştir. Yalova ve Yozgat sahalarında gerçekleştirilen ve  $SPT N_{60} = 6$  değeri için elde edilen temsili grafikler sırası ile Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.

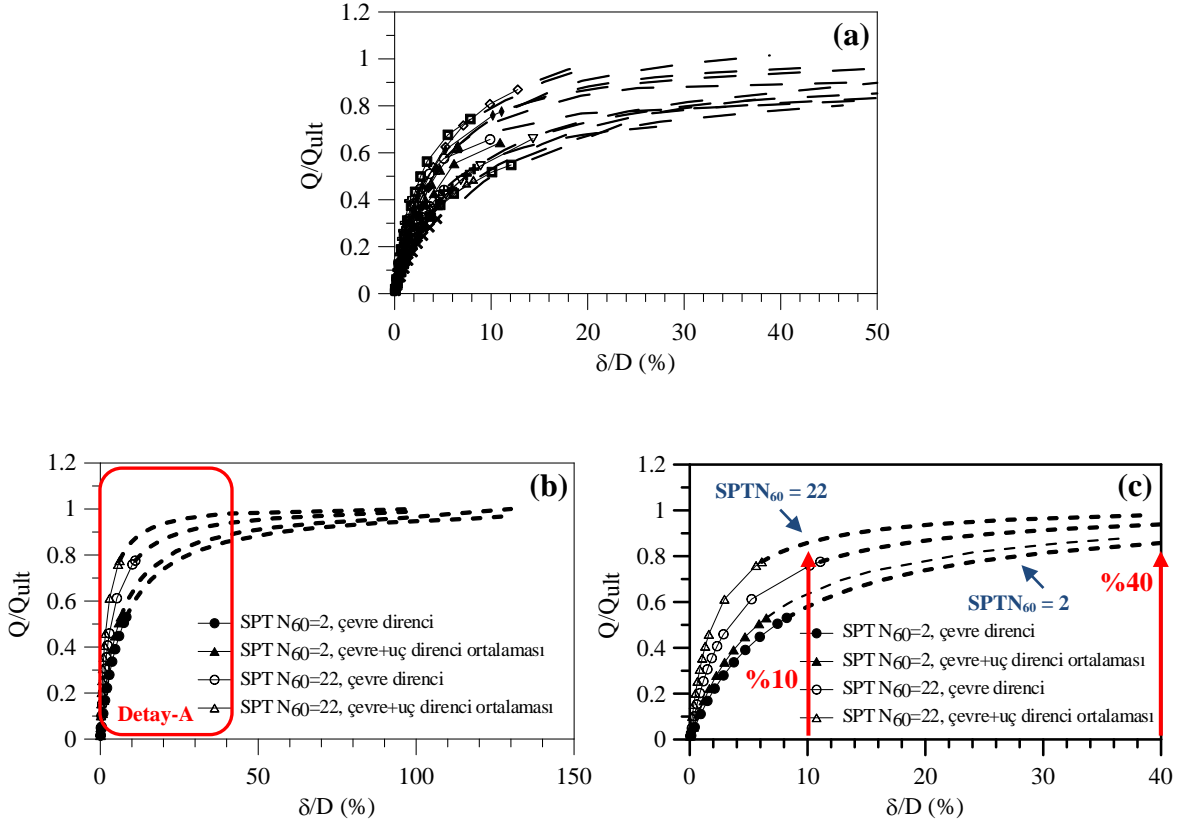


Şekil 8. Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği (Yalova,  $SPT N_{60} = 6$ )



Şekil 9. Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği (Yozgat,  $SPT N_{60} = 6$ )

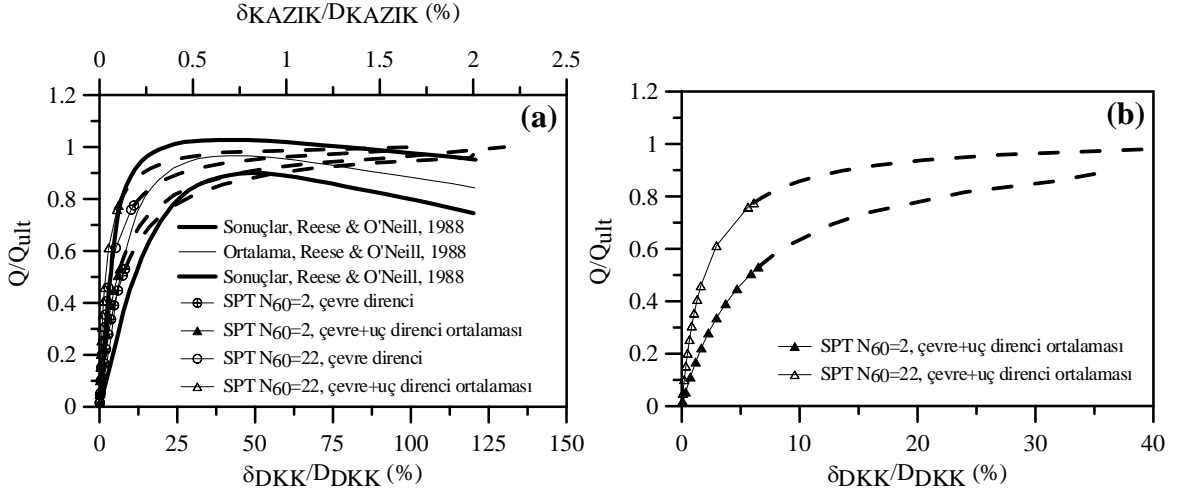
Şekil 10a'da, 63 tekil yükleme deney verileri normalize düzlemde gösterilmiş olup, davranışının yayılımının belirlenmesi için temsili SPT  $N_{60}$  verilerinin minimum (2) ve maksimum (22) değerlerine ulaştığı sahalardan elde edilen veriler Şekil 10b, ve daha detaylı bir ölçekte Şekil 10c'de gösterilmiştir.



Şekil 10. Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği

Kıyaslama imkanı vermek üzere, Şekil 11a'da, Reese ve O'Neill (1988) tarafından kohezyonlu zeminlerde forajla teşkil edilmiş betonarme kazıklar için geliştirilmiş çeper direnci için normalize edilen yüke karşılık normalize edilen oturma grafikleri, DKK elemanları için elde edilmiş davranış ile birlikte sunulmuştur. SPT  $N_{60}$  verilerinin 2 ve 22 olduğu değerleri için kolon üst kotu ile kolon alt kotunda ölçülen deplasmanların ortalama değerleri kullanılarak elde edilen normalize yük-oturma grafiği ise Şekil 11b'de gösterilmiştir.

Çalışma sonuçları esas alındığında: i) çok yumuşak ( $N_{60}= 2-5$  darbe/30 cm) killer için çeper sürtünme direncinin DKK çapının % 40'ı mertebelerindeki deplasmanlarda mobilize olduğu, benzer olarak görece daha sert ( $N_{60}= 20-25$  darbe/30 cm) killer için ise bu deplasman değerinin % 10 mertebelerinde olduğu görülmüştür, ii) çapla normalize edilmiş deplasman değerinin % 2-5 mertebelerine ulaştığı durumlarda kapasitenin % 30-50 mertebelerinde mobilize olduğu ve oturma davranışının doğrusal elastik şekilde bu mertebelere ulaştığı anlaşılmıştır, iii) normalize kapasite mobilizasyon davranışının foraj ile teşkil edilmiş beton kazıkların davranışına kıyasla daha sünek olduğu belirlenmiştir, iv) basınç altında DKK elemanlarının birim deformasyonla pekleşen davranış gösterdiği dolayısı ile tasarıma esas kapasitenin projeye özel izin verilebilir deformasyon değeri ile belirlenmesi gerektiği görülmüştür.



**Şekil 11.** a) DKK Elemanları İçin Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiğinin Reese & O'Neill (1988) Yöntemi İle Karşılaştırılması b) SPT N<sub>60</sub>=2 ve 22 İçin Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği

## 7. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, 63 adet DKK eleman üzerinde uygulanan tam ölçekli arazi yükleme testi sonuçları kapasite ve deformasyon açısından analiz edilmiştir. Geopier-Impact darbeli kırmataş kolon elemanları şu aşamalar izlenerek imal edilmiştir: alt ucu kapalı olan 36 cm çaplı mandrel itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir (Şekil 2a), mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur (Şekil 2b), 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile düşey vibrasyon uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 2c). 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile sıkıştırma gerçekleştirildiğinde 36 cm olan çap, 50 cm çapa genişler.

Yükleme deneyleri, ASTM D-1143 standardında tanımlanmış olan kazıkların basınç altındaki davranışlarını ölçen deney aşamalarına benzer şekilde yapılmaktadır. Arazi yükleme testleri sırasında yükleme kademelerine %5 artış ile başlanmış olup, bu artış tasarım yükünün % 150'sine kadar devam ettirilmiştir. Ayrıca, Geopier-Impact elemanları üzerinde gerçekleştirilen yükleme testlerinde, kolonun alt kotuna yerleştirilen tell-tale elemanları kullanılmıştır (Brian et al., 2006). DKK yükleme testi sonuçları kullanılarak, nihai taşıma kapasitesine (Q<sub>ult</sub>) göre normalize edilen yüke karşılık, kolon çapı (D = 50 cm) ile normalize edilen oturma grafikleri elde edilmiş ve ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- çok yumuşak (N<sub>60</sub>= 2-5 darbe/30 cm) killer için çeper sürtünme direncinin DKK çapının % 40'ı mertebelerindeki deplasmanlarda mobilize olduğu, benzer olarak görece daha sert (N<sub>60</sub>= 20-25 darbe/30 cm) killer için ise bu deplasman değerinin % 10 mertebelerinde olduğu görülmüştür.
- çapla normalize edilmiş deplasman değerinin % 2-5 mertebelerine ulaştığı durumlarda kapasitenin % 30-50 mertebelerinde mobilize olduğu ve oturma davranışının doğrusal elastik şekilde bu mertebelere ulaştığı anlaşılmıştır.
- normalize kapasite mobilizasyon davranışının foraj ile teşkil edilmiş beton kazıkların davranışına kıyasla daha sünek olduğu belirlenmiştir.
- basınç altında DKK elemanlarının birim deformasyonla pekleşen davranış gösterdiği dolayısı ile tasarıma esas kapasitenin projeye özel izin verilebilir deformasyon değeri ile belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- ASTM D1143 – 81 (Reapproved 1994), Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, Annual Book of ASTM Standards.
- Brian, C.M., FitzPatrick, B.T. and Wissman., K.J. (2006), Specifications for Impact® Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement, Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Afshar, J.N., Ghazavi, M. (2013), A Simple Analytical Method for Calculation of Bearing Capacity of Stone-Column, International Journal of Civil Engineering.
- Zahmatkesh, A., Choobbasti, A.J. (2010), Investigation of Bearing Capacity and Settlement of Strip Footing on Clay Reinforced with Stone Columns, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(8): 3658-3668.
- Ambily, A.P., Gandhi, S.R. (2004), Experimental and Theoretical Evaluation of Stone Column in Soft Clay, ICGGE.
- Thompson, M.J., Suleiman, M.T. (2010), Numerical Modeling of Rammed Aggregate Pier Construction, ASCE.
- Das, P., Pal, S.K. (2013), A Study of the Behavior of Stone Column in Local Soft and Loose Layered Soil, EJGE, Vol.18.
- Bae, W.S., Shin, B.W. and An, B.C. (2002), Behaviors of Foundation System Improved with Stone Columns, Kitakyushu, Japan.
- Ali, K., Shahu, J.T. and Sharma, K.G. (2010), Behaviour of Reinforced Stone Columns in Soft Soils: An Experimental Study, Indian Geotechnical Conference.
- Madhav, M.R. and Miura, N. (1994), Stone Columns, Proc. 13th Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng'g., New Delhi. India. 4, pp. 163-164.
- Etezad, M., Hanna, A.M. and Ayadat, T. (2006), Bearing Capacity of Groups of Stone Columns, Graz, pp. 781-786.
- Barksdale, R.D., and Bachus, R.C. (1983), Design and Construction of Stone Column. Report No.FHWA/RD-83/026, Springfield, Virginia.
- Greenwood, D.A. (1970), Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface. Proceedings of Ground Improvement Conference, Institute of Civil Engineering.
- Vesic, A.S. (1972), Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 98 (No SM3): 265-290.
- Huges, J.M.O., and Withers, N.J. (1974), Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns. Ground Engineering, 7(3): 42-49.
- Datye, K.R., and Nagaraju, S.S. (1975), Installation and Testing of Rammed Stone Columns. Proceedings of IGS Specialty Session, Bangalor, India: 101-104.
- Madhav, M.R., Iyengar, N.G.R., Vitkar, R.P., Nandia, A. (1979), Increased Bearing Capacity and Reduced Settlements due to Inclusions in Soil.
- Madhav, M.R., and Vitkar, R.P. (1978), Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Pile. Canadian Geotechnical Journal; 15(4): 605–609.
- Wong, H.Y. (1975), Vibroflotation – Its Effect on Weak Cohesive Soils. Civil Engineering (London); 82:44-76.
- Aboshi, H., Ichimoto, E., Harada, K., Emoki, M. (1979), The Composer- A Method to Improve the Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns. Proceedings of International Conference on Soil Reinforcement, E.N.P.C, 1, Paris: 211–216.
- Pitt John, M., White, David J, et al. (2003), Highway Application For Rammed Aggregate Piles in Iowa Soils. Iowa Department of Transportation, Final Repot.
- Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1988), Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, Pub. No. FHWA-HI-88-042, U.S., Washington, D.C., 564–564.