

FARKLI İMALAT YÖNTEMLERİ İLE TEŞKİL EDİLMİŞ TAŞ KOLONLARIN PERFORMANSLARININ YÜKLEME DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ: VAKA ANALİZİ

FIELD LOAD TESTING OF STONE COLUMNS CONSTRUCTED BY DIFFERENT METHODS: A CASE HISTORY

Ece KURT BAL¹, Berrak TEYMUR²

ABSTRACT

In this paper, performance of the stone columns by displacement and replacement systems are compared with the results of loading tests done in the field. In the field, four Impact[®] Rammed Aggregate Piers[®] and four stone columns which have the same diameter (50 cm) and the length (6,5 m) were constructed with three different methods. The typical subsurface conditions at the project site consist of 1,2 meters of fill material below the existing ground surface, underlain by a 3,8 meters thick medium stiff to stiff, fine gravelly clay layer. A 1,0 meter thick layer of medium dense to dense, clayey sand and gravel exists below the clay, which is underlain by very stiff to hard gravelly, sandy clay. The full scale loading test results show that the ratio of stiffness of rammed aggregate piers constructed with vertical impact ramming energy to stone columns constructed with vibration is about 2,2 - 8,8 as a function of the applied stress.

Keywords: Loading test, Rammed Aggregate Pier[®], stone column

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, taş kolon elemanlarının performansı üç farklı imalat yöntemi kullanılarak imal edilen kolonlar üzerinde gerçekleştirilen yükleme testi sonuçları ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Impact[®] Sistemi kullanılarak Darbeli Kırmataş Kolon[®] imalatı, öteleme ve ön delgi sistemleri kullanılarak da taş kolon imalatı yapılmıştır. Aynı zemin koşullarında, aynı çap ve boyda (D = 50 cm ve L = 6,5 m) imal edilen bu kolonlar üzerinde sekiz adet yükleme deneyi yapılmıştır. Zemin araştırma çalışmaları, zemin üst seviyesinden 1,2 m derinliklere kadar yer alan dolgu tabakası altında 3,8 m kalınlığında orta katı - katı kıvamdaki ince çakıllı kil birimlerin devam ettiğini ve sonrasında 1,0 m kalınlığında orta sıkı - sıkı killi kum / çakıl tabakasının yer aldığını ve bunun altında ise çok katı çakıllı, kumlu kil birimlerin devam ettiğini göstermektedir. Tam ölçekli yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar, statik kuvvet ve vibratörün dinamik enerjisi ile düşey darbeleme yapılarak imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanlarının, sadece titreşim ile imal edilen taş kolon elemanlarına göre 2,2 - 8,8 kat rijit olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yükleme deneyi, Darbeli Kırmataş Kolon[®], taş kolon

¹ İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yaz. San. ve Tic. Ltd. Şti., ekurt@sentezinsaat.com.tr (Sorumlu)

² Yrd. Doç. Dr., İTÜ İnşaat Fakültesi, teymurb@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Zemin iyileştirme yöntemi olarak, yumuşak ya da gevşek zeminlerde uygulanabilen, kohezyonsuz zeminlerde kolon etrafındaki zeminin sıkışmasını, kohezyonlu zeminlerde ise zemin içerisinde nispeten rijit kolonların oluşturulmasını sağlayan ve ekonomik olması sebebi ile günümüzde sıkça tercih edilen taş kolon elemanları; projenin türü, üst yapı yükleri ve çalışılan bölgenin zemin koşulları da göz önünde bulundurularak farklı imalat yöntemleri ile değişik çap ve boylarda uygulanabilmektedirler. İlk olarak 1830' larda Fransa' da doğal zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan bu yöntem, 1950' den sonra Avrupa' da ve 1970' den sonra da Amerika' da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Barksdale vd., 1983). Taş kolon sistemleri uygulamaya başlandığı yıllardan itibaren özellikle toplam ve farklı oturmaların kontrol altına alınması, konsolidasyon sürelerinin hızlandırılması ve taşıma gücünün artırılması gerekliliğinin olduğu projelerde, şevlerin ve dolguların stabilitesi alanında yapılan uygulamalarda kullanılmaktadır.

White (2007), darbeli kırmataş kolon elemanları ile ilgili yaptığı bir çalışmada; tekil ve grup yükleme testlerinden elde ettiği yük - oturma ilişkisinden; oturma ve taşıma kapasitesi açısından grup etkisini, kolon üzerindeki gerilme konsantrasyonunu ve gerilmenin derinlik ile değişimini aletsel gözlem sonuçları ile beraber değerlendirmiştir. Tekil kolon ve grup kolonlar üzerinde uygulanan yükleme testi sonuçlarına göre, yüksek yükler altında kısa kolonlarda uç yenilmesi, uzun kolonlarda ise yanal genişleme yenilmesi olduğunu ve taşıma kapasitesinin darbeli kırmataş kolon elemanları ile desteklenen bir temel için, darbeli kırmataş kolon elemanları ile desteklenmeyen temele göre üç kat fazla olduğunu gözlemlemiştir.

Bhosle ve Vaishampayan (2009), gevşek siltli kum ara tabakası içeren yumuşak kil birimlerde, vibro-yer değiştirme üstten beslemeli ıslak sistemle imal ettiği 90 cm - 110 cm çaplarındaki, 20 m - 22 m boylarındaki taş kolon elemanlarının kapasitesini araştırma amacına yönelik olarak, tekil ve grup yükleme testleri gerçekleştirmişlerdir. 1,7 m üçgen yerleşim ile imal edilen yedi kolondan ortasındaki tekil kolon yüklenmiş ve 25 ton yük altında 5,2 mm mertebelerinde deformasyon ölçülmüştür. Grup yükleme testlerinde ise, onbeş kolondan ortaki üç kolonda ve yirmi sekiz kolondan ortadaki yedi kolon üzerinde iki ayrı grup yükleme testi gerçekleştirmişler ve 75 ton ve 385 ton mertebelerindeki tasarım yükleri altında sırasıyla 7,5 mm ve 26 mm mertebelerinde deformasyon gözlemlemiştir. Tekil ve grup yükleme test sonuçlarına göre, tasarım yükünün 2,5 katına kadar yükleme yapıldığı ve tasarım yükü altında ölçülen deformasyonların tasarım kriterleri ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

White vd. (2002), Iowa' da bir yol genişletme projesi kapsamında inşa edilecek dolgu temel zemininin iyileştirilmesi amacıyla gerçekleştirdikleri bir çalışmada, benzer zemin koşullarında farklı tasarım amaçları için inşa edilen taş kolon ile Geopier® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon davranışının ve mühendislik özelliklerinin karşılaştırılmasını hedeflemiştir. Dolgu inşaatı öncesinde ve sonrasında tasarım parametrelerinin teyidi için arazi testleri ve tam ölçekli yükleme testleri yapılmıştır. Araştırma sahasında taş kolon elemanları, köprü yaklaşım dolgusu altında oturmaları azaltma ve genel stabiliteyi sağlama amaçlarına yönelik olarak 3,0 m - 14 m boylarında inşa edilmişlerdir. Diğer sahada ise, oturmaların azaltılması ve oturma sürelerinin artırılması sağlanarak köprü ayaklarının inşaat süresinin hızlandırılması hedeflenmiş ve darbeli kırmataş kolon elemanları 4,5 m - 6,5 m boylarında inşa edilmişlerdir. 91 cm çaplı ve 5,0 m boyundaki taş kolon elemanı ve 76 cm çaplı 5,4 m boyundaki darbeli kırmataş kolon elemanı üzerinde tam ölçekli yükleme deneyleri yapılmıştır. Her iki sahada gerçekleştirilen zemin araştırma çalışmalarına göre,

taş kolon imal edilen sahadaki zemin özelliklerinin darbeli kırmataş kolon imal edilen sahadaki zemin özelliklerinden daha yüksek dayanımlı ve daha az kohezyonlu olduğu görülmüştür. Her iki kolon sistemi için kullanılan kolon yerleşimi merkezden merkeze 1,8 m' dir. Ancak, hem kolon çapının büyük olması hem de eşkenar üçgen dizilim uygulanması sebebi ile elde edilen alan oranı taş kolon elemanları için daha büyüktür. Kolonlar arasında gerçekleştirilen SPT sonuçlarına göre ortalama N değerleri taş kolon uygulanmış sahada 11 iken, darbeli kırmataş kolon uygulanmış sahada 17 olarak elde edilmiştir. Yükleme testi sonuçlarına göre, darbeli kırmataş kolon elemanının rijitliğinin taş kolon elemanı rijitliğine oranının 2 ile 9 arasında değiştiği ve taş kolon elemanları ile iyileştirilen zeminde meydana gelen oturmanın, darbeli kırmataş kolon elemanları ile iyileştirilen zeminde meydana gelen oturmadan 3 kat fazla olduğu görülmüştür. Taş kolon uygulamasının genel stabilite güçlendirilmesi amacına uygun olduğu, darbeli kırmataş kolon uygulamasının ise oturmaların azaltılması ve dolgu inşaatının tamamlanıp köprü ayağı inşaatının başlatılması için planlanan 120 gün süreyi 30 güne düşürdüğü görülmüştür.

Darbeli kırmataş kolon ve taş kolon elemanlarının içsel sürtünme açılarının araştırılmasına yönelik yapılan çalışmalar da mevcuttur. Geopier® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanı üzerinde uygulanan tam ölçekli kesme deneyi ve küçük ölçekli üç eksenli basınç deneyi sonuçları; içsel sürtünme açısının 49-52° civarında olduğunu göstermektedir (Fox ve Cowell, 1998; White, 2001). Taş kolon elemanları için kayma mukavemeti açısının 40-45° arasında (Bell, 1975) olduğu, ancak tasarım aşamasında güvenlik faktörünün dikkate alınmasıyla kayma mukavemeti açısının 38° olarak kullanılması önerilmektedir (Besancon, 1982).

Bu çalışma kapsamında; darbeli kırmataş kolon ve taş kolon sistemleri kullanılarak imalat teknolojisinin kolon rijitliği üzerindeki etkisi Lüleburgaz' da yapılan arazi testleri ile araştırılmıştır. Çalışmanın yapıldığı bölgede üç farklı tipteki imalat yöntemi ile Impact® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanı ve öteleme ve ön delgi yöntemi ile imal edilen taş kolon elemanları olmak üzere toplamda sekiz adet kolon imal edilmiştir. 50 cm çapında ve 6,5 m boyunda imal edilen bu kolonlar üzerinde, kolonlara ait tasarım parametrelerinin (kolon taşıma kapasitesi, kolon rijitlik modülü, vb.) belirlenebilmesi amacıyla sekiz adet tam ölçekli yükleme testi gerçekleştirilmiştir.

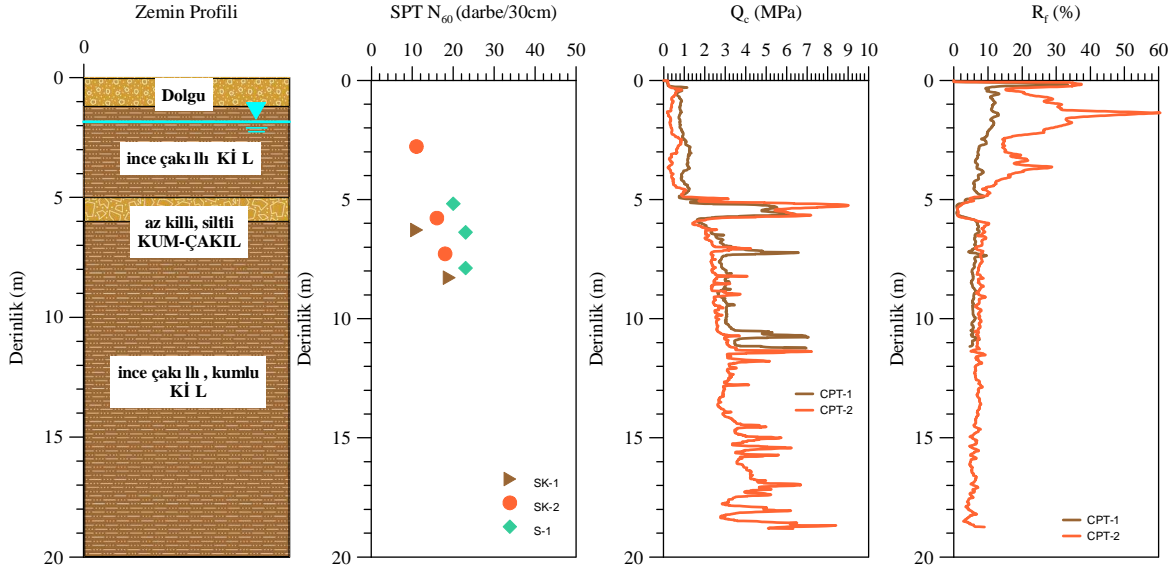
2. ÇALIŞMA ALANI VE ZEMİN PROFİLİ

Darbeli kırmataş kolon ve taş kolon imalatlarının yapıldığı Kırklareli İli, Lüleburgaz İlçesi, Sarımsaklı Mevkiinde yer alan çalışma alanı ve sondaj kuyularına ve koni penetrasyon testlerine ait yerleşim planı Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı ve arazi testleri yerleşim planı (Kurt, 2011)

Zemin araştırma çalışmaları kapsamında, 10 m derinliklere ulaşan sondaj çalışmaları, 20 m derinliklere ulaşan CPT çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazi zemin profili, standart penetrasyon deneyinden elde edilen N_{60} (darbe/30cm), koni penetrasyon deneyinden elde edilen uç direnci (Q_c) ve sürtünme oranı (R_f) değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 2’ de, analizlerde kullanılan geoteknik parametreler ise Tablo 1’ de verilmiştir.



Şekil 2. Temsili zemin profili ve SPT N_{60} , CPT Q_c , CPT R_f – derinlik ilişkisi

Tablo 1. Temsili zemin profili ve geoteknik parametreler

Derinlik (m)	Kalınlık (m)	Birim	SPT N_{60}	q_c (MPa)	c_u (kPa)	ϕ ($^{\circ}$)
0,0 – 1,2	1,2	Dolgu	-	-	-	-
1,2 – 5,0	3,8	ince çakıllı KİL	11	0,4 - 0,9	30 - 70	-
5,0 – 6,0	1,0	az killi, siltli KUM-ÇAKIL	16 - 22	5,4	-	36
≥ 6,0	-	ince çakıllı, kumlu KİL	23 - 41	2,6	120 - 200	-

q_c - koni uç direnci, c_u - drenajsız kayma mukavemeti, ϕ - içsel sürtünme açısı

Bu verilere göre az eğimli bir topoğrafyaya sahip olan inceleme alanında, zemin yüzeyinden 1,2 m kalınlığındaki dolgu tabakası altında 5,0 m derinliklere kadar orta katı - katı kıvamda olduğu anlaşılan ince çakıllı kil birimi yer almaktadır. Bu tabakanın devamında yaklaşık 1,0 m kalınlığında orta sıkı - sıkı az killi, siltli kum / çakıl tabakası geçilmiştir. Bu tabakanın altında ise çok katı çakıllı, kumlu kil tabakası devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi 1,8 m derinliklerde ölçülmüştür.

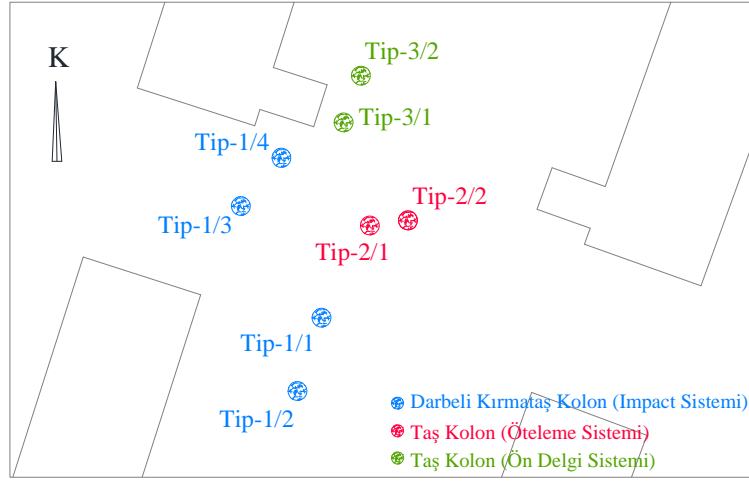
3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON İMALATLARI

Bu çalışma kapsamında Impact[®] Sistemi ile darbeli kırmataş kolon ve öteleme ve ön delgi sistemleri ile de taş kolon imalatları yapılarak, bu üç farklı yöntemin oturma ve rijitlik açısından karşılaştırılması hedeflenmiştir. Tip-1 olarak adlandırılan imalatlarda kırmataşın düşey yönde ve çevredeki zeminin de yatay yönde sıkıştırıldığı Impact Sistemi[®] ile darbeli kırmataş kolon imalatı gerçekleştirilmiştir. Tip-2 ve Tip-3 olarak adlandırılan imalatlarda ise sıkıştırmanın yatay vibrasyon ile yapıldığı klasik taş kolon imalatlarından farklı olarak sadece titreşim ile sıkıştırma yapılmıştır. Bu yöntemlerin detayları aşağıda açıklanmış ve ayrıca imalat bilgileri Tablo 2’ de özetlenmiştir. Üç yöntemde de kolon boyları 6,5 m olup, bitmiş kolon çapları 50 cm’dir. Test kolonları yerleşim planı Şekil 3’ de gösterilmiştir.

Darbeli kırmataş kolon ve taş kolon imalatı için ince dane oranı $< \% 5$, maksimum dane çapı 38 mm ve minimum dane çapı 13 mm olan kırmataş kullanılmıştır.

Tablo 2. Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 için imalat bilgileri (Kurt, 2011)

Kolon No	Açıklama	Kolon Boyu (m)	Bitmiş Kolon Çapı (cm)
Tip-1/1	<i>Impact® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanı</i> 36 cm çaplı mandrel kafası kullanılarak 100 cm yukarı / 67 cm aşağı imalat yöntemi ile düşey darbeleme yapıldı	6,5	50
Tip-1/2			
Tip-1/3			
Tip-1/4			
Tip-2/1	<i>Öteleme sistemi ile imal edilen taş kolon elemanı</i> 50 cm çaplı mandrel kafası kullanılarak titreşim ile imalat yapıldı (darbeleme yapılmadı)	6,5	50
Tip-2/2			
Tip-3/1	<i>Ön delgi sistemi ile imal edilen taş kolon elemanı</i> 50 cm çaplı auger kullanılarak titreşim ile imalat yapıldı (darbeleme yapılmadı)	6,5	50
Tip-3/1			



Şekil 3. Test kolonları yerleşim planı (Kurt, 2011)

3.1. Impact® Sistemi ile Darbeli Kırmataş Kolon İmalatı (Tip-1)

Alt ucu kapalı olan 36 cm çaplı pahlı kafa ile mandrelin, itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine indirilmesinin ardından mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulmuştur. Daha sonra, 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi kullanılarak, düşey vibrosyon ile sıkıştırma işlemi zemin üst kotuna kadar uygulanmış ve 50 cm çapında darbeli kırmataş kolon imalatı tamamlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Impact® Sistemi ile darbeli kırmataş kolon imalatı (Kurt, 2011)

3.2. Öteleme Sistemi ile Taş Kolon İmalatı (Tip-2)

Alt ucuna sarf plakası yerleştirilen 50 cm çaplı kafa ile mandrelin, itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine indirilmesinin ardından mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulmuş ve darbeleme yapılmadan sadece titreşim ile mandrel zemin üst kotuna kadar geri çekilerek 50 cm çapında taş kolon imalatı tamamlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Öteleme sistemi ile taş kolon imalatı (Kurt, 2011)

3.3. Ön Delgi Sistemi ile Taş Kolon İmalatı (Tip-3)

50 cm çapındaki burğu ile tasarım derinliğine ulaşılanın ardından mandrel kuyuya indirilmiş, mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulmuş ve darbeleme yapılmadan sadece titreşim ile mandrel zemin üst kotuna kadar geri çekilerek 50 cm çapında taş kolon imalatı tamamlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Ön delgi sistemi ile taş kolon imalatı (Kurt, 2011)

4. YÜKLEME TESTLERİ VE SONUÇLARI

Çalışma kapsamında, üç farklı imalat yöntemi ile imal edilen kolonlar üzerinde rijitlik ve taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik olarak tam ölçekli yükleme testleri yapılmış olup, yükleme testlerinden fotoğraflar Şekil 7’ de gösterilmiştir. Yükleme testleri, ASTM D-1143 standartında tanımlanmış olan kazıkların basınç altındaki davranışlarını ölçen test aşamalarına benzer şekilde yapılmıştır. Gerilmenin büyüklüğü manometresi kalibre edilmiş hidrolik kriko ile kontrol edilmiş, deformasyon enine kirişe bağlanmış üç adet komparatör ile ölçülmüş ve bu kirişin mesnet noktalarının, test kolonlarına olan uzaklığının 4D olması sağlanmıştır. Deney yükü doğrudan kolon üzerine uygulanabildiği gibi, zemin ve kolondan teşkil edilen birim hücre üzerine de uygulanabilir. Bu çalışma kapsamında, yükün doğrudan kolon üzerine uygulanması tercih edilmiş ve test kolonlarının üst seviyesine 50 cm çapında başlık betonu yerleştirilmiştir.



Şekil 7. Darbeli kırmataş kolon ve taş kolon yükleme testleri (Kurt, 2011)

Arazi yükleme testleri sırasında yükleme kademelerine % 5 artış ile başlanmış, bu artış tasarım yükünün % 150' sine kadar devam ettirilmiştir. Daha sonra boşaltma kademeleri ile devam edilerek, ilgili testler sonlandırılmıştır. Yükleme okumalarına; oturma hızı, 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika' nın altına düşmediği sürece önerilen maksimum süreye kadar beklenerek devam edilmiştir.

Test kolonları için belirlenen tasarım yükü, birim hücre kavramına uygun, kabul edilebilir genişlikte, göreceli olarak üniform yükün etkidiği, kare yerleşimli bir dizilim ile zemin ve taş kolon için gerilme konsantrasyon oranı (n) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_s \sigma \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_c \sigma \quad (2)$$

Burada, σ , net temel basıncı, μ_s ve μ_c , zemindeki ve taş kolondaki gerilme oranı, σ_s ve σ_c ise zemin ve taş kolon içerisindeki gerilme olarak tanımlanır. Taş kolon elemanları ile yer değiştirilen zemin miktarını belirleyebilmek amacıyla, alan oranı, a_c ;

$$a_c = \frac{A_c}{A} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; A_c , taş kolon alanı ve A , birim hücre alanı olarak tanımlanır.

Zemin üst seviyelerinde yer alan SPT $N_{60} = 11$ darbe/30cm olan ince çakıllı kil birimler dikkate alındığında tüm imalat tipleri için birim hücre taşıma kapasitesinin (Q_{cell}) aynı olduğu kabulü ile Q_{cell} değeri 270 kN olarak seçilmiştir. Böylelikle, 120 kPa net gerilme altında 1,5 m x 1,5 m kare yerleşim ile bir kolonun etki alanının $\sim 2,25$ m² olması sağlanmıştır. Darbeli kırmataş kolon için gerilme konsantrasyon oranı, $n = 10$ (Fox ve Cowell, 1998), taş kolonlar için ise $n = 3$ (Barksdale ve diğ., 1983) seçilerek yukarıda verilen eşitliklerden darbeli kırmataş kolon üzerine etkiyecek yük miktarı 13 ton, taş kolonlar üzerine etkiyecek yük miktarı ise 7 ton mertebelerinde elde edilmiştir. Test kolonu için belirlenen yük artışları Tablo 3' de gösterilmiştir.

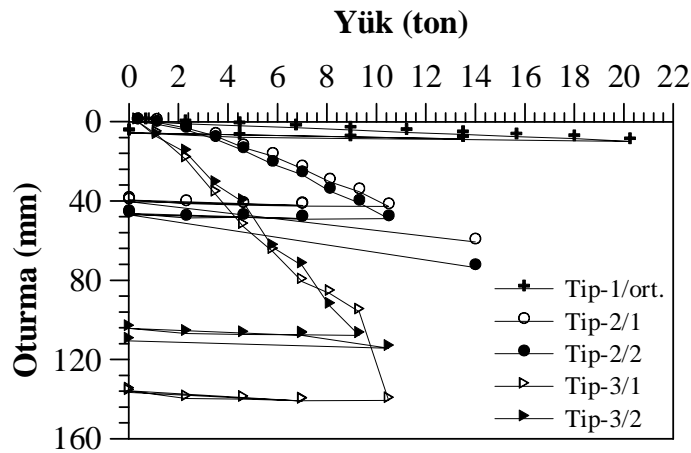
Tablo 3. Test kolonları üzerine uygulanan yük miktarları (Kurt, 2011)

Çalışma Yüğü (%)	Kriko Yüğü (ton)		
	Tip-1	Tip-2	Tip-3
5	0,67	0,35	0,35
16	2,28	1,12	1,12
33	4,47	2,31	2,31
50	6,75	3,50	3,50
66	8,95	4,62	4,62
83	11,22	5,81	5,81
100	13,50	7,00	7,00
116	15,66	8,12	8,12
133	18,00	9,31	9,31
150	20,25	10,50	10,50
100	13,50	7,00	7,00
66	8,95	4,62	4,62
33	4,47	2,31	2,31
0	0,00	0,00	0,00
100	13,50	7,00	7,00
0	0,00	0,00	0,00

Şekil 8' de gösterildiği gibi, Tip-1 olarak tariflenen ve Impact® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanları üzerine tasarım yükünün % 150' si olan 20 ton mertebelerine kadar yük uygulanmış olup, bu mertebelerde bile darbeli kırmataş kolon elemanlarının halen linear bir davranış gösterdiği ve ölçülen oturma miktarlarının < 15 mm olduğu görülmüştür.

Öteleme sistemi (Tip-2) ile imal edilen taş kolon elemanları üzerine 10,5 ton mertebelerinde yük uygulanmış ve bu yük altında ölçülen oturma miktarlarının 30 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür (Şekil 8).

Ön delgi sistemi (Tip-3) ile imal edilen taş kolon elemanları üzerine ise ancak 8 ton mertebelerine kadar yük uygulanabilmiş ve bu yük altında ölçülen oturma miktarlarının 90 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür (Şekil 8).



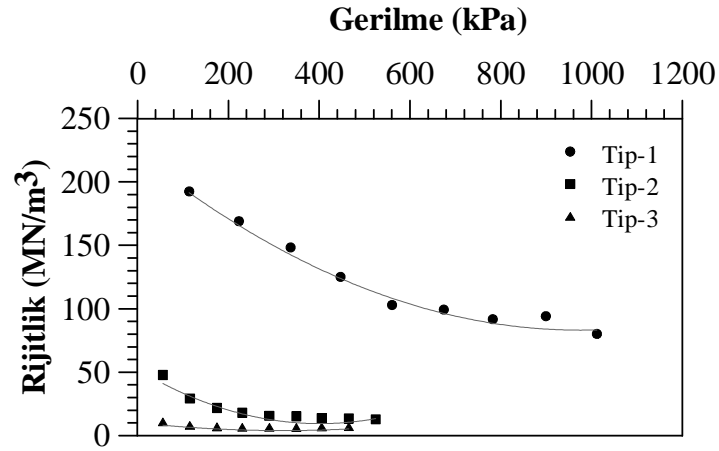
Şekil 8. Darbeli kırmataş kolon (Tip-1) ve taş kolon (Tip-2 ve Tip-3) üzerine uygulanan yükleme testi sonuçları yük - oturma ilişkisi

Kıyaslama yapılabilmesi için bütün kolonlar için 8 ton mertebelerindeki yük altında ölçülen deformasyon miktarları incelendiğinde, Impact® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanları için ölçülen oturma miktarlarının 3 mm - 5 mm iken, öteleme sistemi ile imal edilen taş kolon elemanları için ölçülen oturma miktarlarının 29 mm - 32 mm ve ön delgi sistemi ile imal edilen taş kolon elemanları için ise ölçülen oturma miktarlarının 85 mm - 92 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür (Tablo 4).

Tablo 4. Üç farklı tipteki imalatlar için ölçülen rijitlik modülü değerleri (Kurt, 2011)

İmalat Tipi	Yük (ton)	Oturma (mm)	Rijitlik (MN/m ³)	
Tip - 1	Impact® Sistemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanı	8	3 -5	88 - 190
Tip - 2	Öteleme sistemi ile imal edilen taş kolon elemanı	8	29 - 32	10 - 40
Tip - 3	Ön delgi sistemi ile imal edilen taş kolon elemanı	8	85 - 92	≤ 10

Şekil 9’ da darbeli kırmataş kolon ve taş kolon elemanları için gerilme - rijitlik arasındaki ilişki gösterilmiştir. Taş kolon elemanları için düşük gerilme seviyelerinde ölçülen 20-40 MN/m³ değerindeki rijitlik, 400 kPa gerilme değerlerinde 10 MN/m³ mertebelerinde ölçülmüştür. Darbeli kırmataş kolon elemanının rijitliği ise, düşük gerilme seviyelerinde 180 MN/m³ değerinde, 800 kPa gerilme değerlerinde ise 80 MN/m³ olarak ölçülmüştür. Özetle, darbeli kırmataş kolon elemanlarının rijitliğinin taş kolon elemanlarının rijitliğinden yaklaşık 2,2 ile 8,8 kat fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Üç farklı imalat yöntemi ile imal edilen kolonlar için gerilme - rijitlik grafiği

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, darbeli kırmataş kolon ve taş kolon performansının yükleme deneyleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, Impact® Sistemi kullanılarak Darbeli Kırmataş Kolon® imalatı, öteleme ve ön delgi sistemleri kullanılarak da taş kolon imalatları yapılmıştır. Zemin araştırma çalışmaları, zemin üst seviyesinden 1,2 m derinliklere kadar yer alan dolgu tabakası altında 3,8 m kalınlığında orta katı - katı kıvamdaki ince çakıllı kil birimlerin devam ettiğini ve sonrasında 1,0 m kalınlığında orta sıkı - sıkı killi kum / çakıl tabakasının yer aldığını ve bunun altında ise çok katı çakıllı,

kumlu kil birimlerin devam ettiğini göstermektedir. Üç farklı imalat yöntemi kullanılarak, aynı zemin koşullarında, aynı çap ve boyda ($D = 50$ cm ve $L = 6,5$ m) imal edilen kolonlar üzerinde gerçekleştirilen yükleme testi sonuçlarına göre,

- Darbeli kırmataş kolon elemanlarının, taş kolon elemanlarına göre 2,2 - 8,8 kat rijit bir davranış gösterdiği görülmüştür.
- White vd. (2002) tarafından benzer zemin koşullarında farklı tasarım amaçları için imal edilen taş kolon ($D = 91$ cm ve $L = 5,0$ m) ve darbeli kırmataş kolon ($D = 76$ cm ve $L = 5,4$ m) elemanları üzerinde gerçekleştirilen yükleme testi sonuçları, darbeli kırmataş kolon elemanlarının, taş kolon elemanlarına göre 2 ile 9 kat arasında rijitlik farkı olduğunu göstermiştir.
- Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların beklenildiği gibi literatür ile de uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, farklı imalat yöntemleri ile aynı zemin koşullarında imal edilen taş kolon elemanlarının, aynı çap ve boyda olsalar bile birbirinden farklı performans göstereceği bilinmektedir. Çeşitli taş kolon imalat teknolojileri göz önünde bulundurulduğunda önemli olan husus, proje kapsamında sunulan alternatif taş kolon yöntemlerinin avantajlarının ve dezavantajlarının, proje kriterleri doğrultusunda değerlendirilerek doğru ve ekonomik bir tasarım için projeye en uygun sistemin seçilmesidir.

6. KAYNAKLAR

- ASTM D-1143. (2009), “Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load”.
- Barksdale, R.D. and Bachus, R.C. (1983), “Design and Construction of Stone Columns Volume II”, FHWA/RD-83/027, Federal Highway Administration, U.S.A.
- Bell, F.G. (1975), “Methods of Treatment of Unstable Ground”, Newnes-Butterworths: London.
- Besancon, G. and Pertusier, E. (1982), “Soil Improvement by Deep Vibration”, ASCE Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok.
- Bhosle, S. and Vaishampayan, V.V. (2009), “Ground Improvement Using Vibro Stone Columns-Capacity of Stone Column”, IGC, Guntur, India, 510-513.
- Fox, N.S. and Cowell, M. (1998), “Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual”, Published by Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Kurt, E. (2011), “Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması”, MSc, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- White, D.J. (2001), “Letter to Geopier Foundation Company”, Iowa State University.
- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. and Gaul A.J. (2002), “Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement”, Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington D.C.
- White, D.J. (2007), “Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ©ASCE, Vol. 133, No. 12, 1503-1511.