

DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) UYGULAMASI VE YÜKLEME DENEYLERİNE İLİŞKİN BİR VAKA ANALİZİ

A CASE HISTORY ON RAMMED AGGREGATE PIER LOADING TESTS

Ece KURT¹

H. Ferhat KEMALOĞLU²

M. Ayhan SAYRAÇ³

ÖZET

Gaziantep İli, 4. Organize Sanayi Bölgesi'nde inşaatı tamamlanmış olan fabrika binası projesi kapsamında, temel zemininin Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK) ile iyileştirilmesi hedeflenmiş, imal edilen DKK elemanlarından beşi üzerinde yükleme deneyleri yapılmıştır. Seçilen vaka örneği kapsamında fabrika binası tekil temelleri altında mevcut teorik analiz yöntemleri ile belirlenen DKK kapasite ve deformasyon davranışının yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılması ve kalibrasyonu hedeflenmiştir. Temel zemin profilinin belirlenmesine yönelik olarak zemin araştırma çalışmaları sonrası temeller altında 7.5 m derinliğe kadar yumuşak/katı kıvamda olduğu anlaşılan siltli kil tabakası yer almaktadır. Bu tabakayı takiben 12.5 m derinliklere kadar katı/çok katı kıvamda çakıllı-kumlu/siltli kil tabakası geçilmiştir. Bu tabakanın devamında ise kumlu-killi çakıl birimi yer almaktadır. Yapılan ilk değerlendirmeler ışığında 3.6 m x 3.6 m boyutlu bir tekil temelin 150 kPa net gerilme altında yaklaşık 10 cm oturmaya maruz kalacağı anlaşıldığından zeminin iyileştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmış ve DKK imalatına karar verilmiştir. Temel altında 5.5-7.5 m boyunda ve 1.1 metre aralıkla uygulanan 50 cm çaplı DKK uygulaması sonrası oturmaların 2 cm mertebelerine ineceği öngörülmüştür. Sahada yapılan DKK yükleme deneyleri sonrasında ise bu ön hesaplamalarla uyumlu olarak istenilen rijitlikte DKK elemanlarının imal edilebileceği görülmüştür.

¹ İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yazılım Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., ekurt@sentezinsaat.com.tr

² İnş. Müh., Sentez İnşaat Yazılım Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., kemaloğlu@sentezinsaat.com.tr

³ Dr. İnş. Müh., Sentez İnşaat Yazılım Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., asayrac@sentezinsaat.com.tr

ABSTRACT

The soil improvement with Rammed Aggregate Piers (RAP) of the foundation of a factory building located at the Gaziantep is selected. The load tests were performed on 5 of the constructed piers. The paper explains the comparison of RAP bearing capacity and deformation behavior which were obtained from theoretical analysis with the results of loading tests. As a case history, the performance of RAP columns installed beneath the single footings of the factory building will be assessed comparatively with the predictions of theoretical solutions. Site investigations revealed that the underlying soil profile is composed of soft to stiff silty clay layers of up to 7.5 meter depth. Below this layer, a gravelly silty clay layer extending to a depth of 12.5 m exists. Below 12.5 meters, a sandy gravel layer was located. Preliminary assessment revealed that expected settlements would exceed 10 cm beneath the single square footings of 3.6 m dimension, under net foundation pressures of 150 kPa. The settlements were estimated to be reduced to less than 2 cm, after the installation of 5.5 m to 7.5 long RAP columns with 1.1 m square pattern. After the field RAP load tests, the RAP columns with desired stiffness was constructed in accordance with preliminary calculation.

1. GİRİŞ

Gevşek veya yumuşak zeminler üzerine inşa edilecek yapı temelleri altında zemin iyileştirme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Elverişsiz zeminin temel altından kazılarak uzaklaştırılması ve yerine daha iyi nitelikli malzeme doldurulması bu yöntemlerin en eskilerinden biri olduğu bilinmektedir. Bu düşünceden hareketle 1980’li yıllarda Amerika’da Dr. Fox tarafından geliştirilen darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirme tekniği, günümüz koşullarında uygulama kolaylığı ve geniş kapsamlı ekonomi sağladığından yurdumuzda da son 6 yıldır uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bir fabrika projesi için 2076 adet imal edilen DKK elemanlarından beşi üzerinde uygulanan yükleme deneyleri konu edilmiş ve deney sonuçları tasarım varsayımları ile karşılaştırılmıştır.

2. PROJE TANITIMI VE ZEMİN YAPISI

Gaziantep İli, 4. Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilmekte olan yaklaşık 30.000 m²'lik bir alana sahip fabrika binası, toplamda 250 adet tekil temel ile desteklenmektedir. Net temel gerilmelerinin 150 kPa mertebelerinde olacağı öngörülmüştür. Temel zemin profilinin belirlenmesine yönelik olarak zemin araştırma çalışmaları kapsamında 3 nokta sondaj delgisinde değişik derinliklerde SPT deneyleri gerçekleştirilmiş, elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numunler üzerinde sınıflandırma deneylerine ek olarak zemin mukavemet ve deformasyon davranışının anlaşılmasına yönelik olarak üç eksenli konsolidasyonlu drenajsız basınç deneyleri ile odometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Özetle, söz konusu yapı altında 7.5 m derinliğe kadar yumuşak/katı kıvam aralığında olduğu anlaşılan siltli kil tabakası yer almaktadır. Bu tabaka içinde SPT N₆₀ verilerinin 5-19 darbe/30cm aralığında değiştiği ve PI değerlerinin ise % 30-40 mertebelerinde olduğu görülmüştür. Bu tabakayı takiben 12.5m derinliklere kadar katı/çok katı (N₆₀=7-24) kıvamda çakıllı-kumlu/siltli kil tabakası geçilmiştir. Bu tabakanın devamında ise kumlu-killi çakıl birimi yer almaktadır. Bu tabakalar için belirlenen geoteknik parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

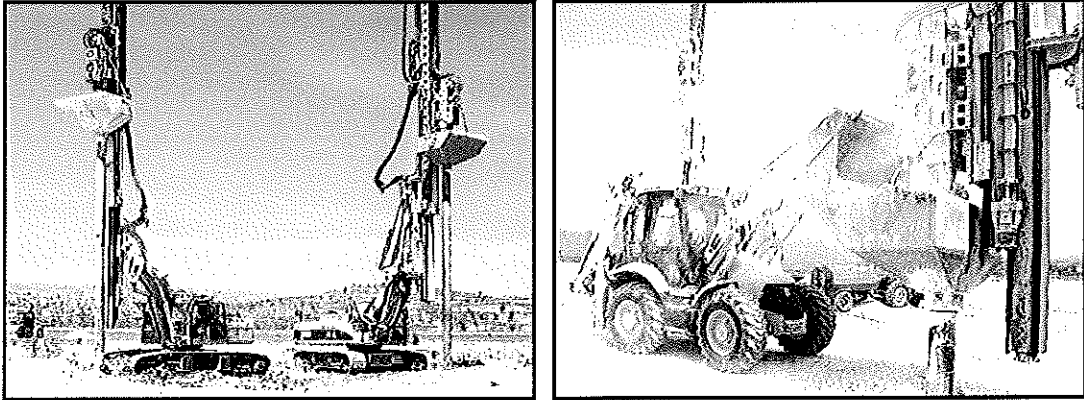
Çizelge 1. Sahadaki Zemin Profili için Geoteknik Parametreler

Derinlik (m)	Birim	Birim Hacim Ağırlık γ (kN/m ³)	Efektif Sürtünme ϕ' (°)	Efektif Kohezyon c' (kPa)	Drenajsız Kayma Mukavemeti c_u (kPa)	Elastisite Modülü E (Mpa)
0 - 7.5	Siltli KİL CH	18	20	0	50	4-16
7.5 - 12.5	Çakıllı-Kumlu-Siltli KİL CH	18	20	0	60	5-16

Yapılan ilk değerlendirmeler ışığında 3.6 m x 3.6 m boyutlu bir tekil temelin 150 kPa net gerilme altında yaklaşık 10 cm oturmaya maruz kalacağı anlaşıldığından zeminin iyileştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmış ve darbeli kırmataş kolon imalatına karar verilmiştir.

3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) İMALATI

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile zemin iyileştirilmesi kavramı 1980'lerin ortalarında geliştirilmiştir. Başlangıçta geliştirilen ve '*Geopier Sistemi*' olarak adlandırılan teknolojiye zeminde forajla bir boşluk oluşturulmakta, daha sonra tabana uniform dane boyutlu (5-15 cm) taş yerleştirilip pahlı bir plakanın vurulması ile sıkıştırılmış taban soğanı elde edilmektedir. Kolon gövdesi için kullanılan agrega iyi derecelenmiş çakıl (taş), sıkıştırılmış kalınlığı 30 cm olan tabakalar halinde etrafındaki zemine doğru itilerek kolon çevresinde yanıl gerilmeleri artırmaktadır. Yanıl gerilmelerin artırılması daha sonraki yüzey yüklemeleri için taşıma gücünü artırmakta, oturmaları azaltmaktadır. Daha sonra geliştirilen ve '*Impact Sistemi*' olarak adlandırılan yer değıştirmeli yöntemde ise alt ucuna sac bir sarf plakası yerleştirilen mandrel ve 36 cm çapındaki pahlı tokmak, itme kuvveti ve darbeyle tasarım derinliğine kadar indirilir. Sarf plakası kolonun alt ucunda kalacak şekilde mandrel kırmataş ile doldurulduktan sonra 1.0 metre yukarıya kaldırılır ve aşağı itme kuvveti ile 67 cm indirilerek, 33 cm'lik sıkıştırılmış 50 cm çapında bir tabaka oluşturulur. Kolonun üst kotuna kadar oluşturulacak tabakalar ise bu prosedür doğrultusunda yapılır. Söz konusu fabrika projesi için, DKK elemanlarının tasarımında ve imalatında *Impact Sistemi* (Şekil 1) kullanılmıştır.



Şekil 1: Darbeli Kırmataş Kolon İmalatı (Impact Sistemi)

4. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) TASARIMI

Temel iyileştirmesi yöntemi olarak darbeli kırmataş kolon imalatı seçilmiş olup, bu kolonların 5.0 – 7.5 metre değişen boylarda teşkil edilmesi ile DKK elemanları kumlu-killi çakıl tabakasına kadar uzanmış olacaktır. Bu kapsamda, DKK elemanları ile iyileştirilmiş bölge için oturma durumu, Üst Bölge Oturması (S_{UZ}) şeklinde incelenmiştir.

$$S_{UZ} = q_g / k_g \quad (1)$$

$$q_g = q \cdot R_s / ((R_s \cdot R_a) - R_a + 1) \quad (2)$$

$$R_a = A_g / A \quad (3)$$

$$R_s = k_g / k_m \quad (4)$$

Burada,

S_{UZ} : Üst Bölge Oturması

q_g : DKK Üzerindeki Gerilme

q : Taban Basıncı

R_s : DKK ve Matris Zemin Rijitlik Modülü Oranı

R_a : DKK Alan Oranı

A_g : DKK Alanı

A : Birim Hücre Alanı

k_g : DKK Rijitlik Modülü

k_m : Matris Zemin Rijitlik Modülü

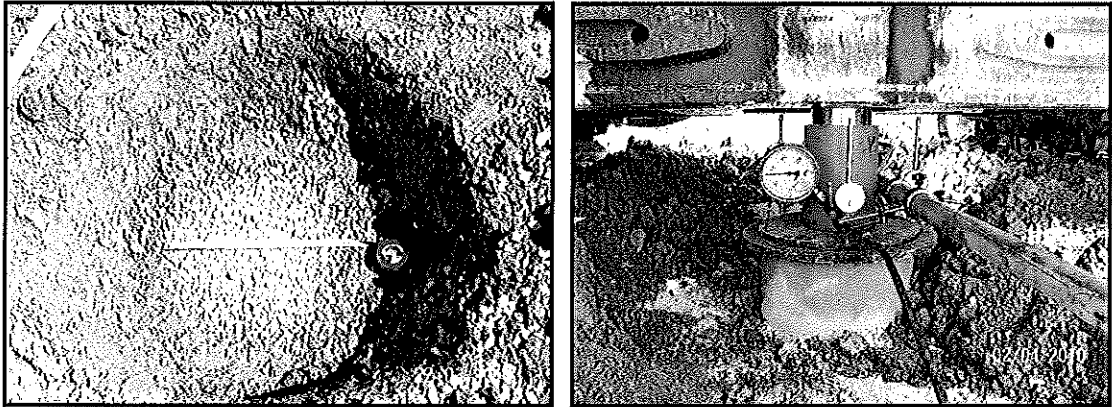
olarak tanımlanır.

Oturma kriterinin sağlanması için iyileştirilmiş zeminde zemin rijitliğinin başlangıçtakine göre 2-3 kat artırılması gerektiği açıktır. Bu amaçla yaklaşık 1.1 m x 1.1 m patern seçilmiş, böylelikle bir kolonun etki alanının ~1.2 m² olması sağlanmıştır. Zemin türü ve zemindeki SPT N_{60} sayılarına göre kolon için hücre taşıma kapasitesi, Q_{cell} , 180 kN ve DKK rijitlik modülü, k_g , 40.7 MN/m³ olarak seçilmiştir (Fox ve Cowell, 1998). İyileştirilmemiş zeminde 150 kPa net gerilme altında yaklaşık 10 cm mertebelerinde oturma beklendiğinden, matris zemin rijitlik modülü ise, k_m ,

1.5 MN/m³ olarak elde edilmiştir. Böylelikle denklem (2) kullanılarak DKK üzerindeki gerilme 800 kPa mertebelerinde elde edilmiştir. Sonuçta, denklem (1)'e göre üst bölge oturması, S_{UZ} , 1.9 cm mertebelerinde hesaplanmıştır. Ayrıca, DKK elemanları 2B (B : temel genişliği) etki derinliğine kadar tasarlandığından, alt bölge oturması, S_{LZ} , beklenmemektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, 7 metre boyunda teşkil edilmesi önerilen DKK elemanlarının drenajlı ve drenajsız koşullarda taşıma kapasitesi sırası ile 483 kN ve 550 kN olarak elde edilmiştir. DKK elemanları üzerine gelen yük ise 160 kN olduğundan, kolon taşıma gücü açısından herhangi bir problem söz konusu olmayacağı kanaatine varılmıştır.

5. YÜKLEME DENEYLERİ

Darbeli kırmataş kolon (DKK) yükleme deneyleri kazıkların basınç yükü altındaki deneylerine benzer biçimde bir düzeneğe yapılmaktadır (ASTM D-1143).



Şekil 2: Darbeli Kırmataş Kolon Yükleme Deneyi

Tasarım parametrelerinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla; üçü tekil kolon üzerinde, ikisi ise etrafı DKK elemanları ile çevrilmiş olan kolon üzerinde olacak şekilde toplamda 5 adet yükleme testi yapılmıştır. Bu test kolonlarına ait imalat ve yükleme testi bilgileri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Test kolonları tasarım yükünün %150' sine kadar yüklenmiştir. 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 yük artışları Çizelge 3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Test Kolonlarına Ait İmalat ve Yükleme Testi Bilgileri

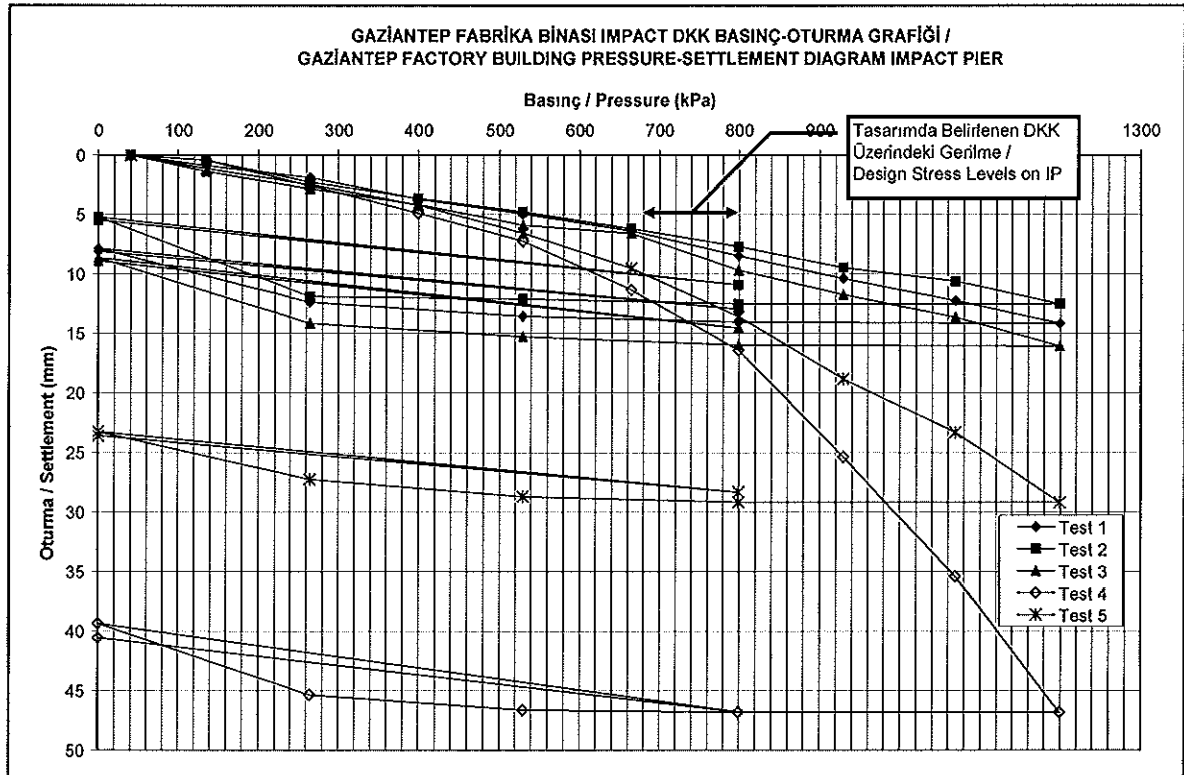
Test No	İmalat Tarihi	Test Tarihi	İmalat Yöntemi	DKK Boyu (m)	DKK Çapı (cm)	Test Kolonun Yeri (m)	Başlık Beton Çapı (cm)	Zemin Yüzeyinden Başlık Betonu Alt Seviyesi (cm)
Test 1	19.03.2010	02.04.2010	3 adım yukarı / 2 adım aşağı	7	50	Tekil Kolon	50	40
Test 2	19.03.2010	03.04.2010		5		Tekil Kolon		40
Test 3	19.03.2010	04.04.2010		5		Tekil Kolon		40
Test 4	02.04.2010	10.04.2010		7		T4 Temeli / D.30-09		Zemin Yüzeyinde
Test 5	20.04.2010	14.05.2010		7.5		T12 Temeli / C.07-05		70

Çizelge 3. Çalışma Yüğüne Göre Test Kolonları Üzerine Uygulanan Yük Miktarları

No	Çalışma Yüğü (%)	Kriko Yüğü (ton)
0	5.00	0.80
1	16.88	2.70
2	33.13	5.30
3	50.00	8.00
4	66.25	10.60
5	83.13	13.30
6	100.00	16.00
7	116.00	18.60
8	133.75	21.40
9	150.00	24.00
10	100.00	16.00
11	66.25	10.60
12	33.13	5.30
13	0.00	0.00
14	100.00	16.00
15	0.00	0.00

6. DEĞERLENDİRME

Şekil 3’de gösterildiği gibi, tasarımda belirlenen ve 675 kPa ile 785 kPa arasında değişen DKK üstündeki gerilme değerlerinde, ilk 3 test için elde edilen oturma miktarları 10 mm’den azdır. Ayrıca, Çizelge 4’de gösterildiği gibi ilk 3 test için elde edilen rijitlik modülü, tasarımda belirlenen rijitlik modülünden fazla olarak elde edilmiştir. 4. test ve 5. test için elde edilen basınç-oturma grafiği ise diğer 3 testten biraz farklılık göstermektedir. 4. test için ölçülen deformasyon neredeyse diğer 3 test için ölçülen deformasyonun iki katıdır ve elde edilen rijitlik modülü diğerlerine oranla düşüktür. Bu farklı davranışın sebebi ise, 4. test için kullanılan başlık betonu alt kotunun örselenmiş zemin bölgesinde yer alması olarak açıklanabilir (diğer 3 test için başlık betonu alt kotu zemin yüzeyinden 40 cm aşağıda yer almaktaydı). 5. test kolonu için kullanılan başlık betonu alt kotu ise, yaklaşık temel alt seviyesinde (zemin yüzeyinden 70 cm aşağıda) yer almakta olup, nispeten örselenmenin daha az beklendiği zemin bölgesindedir. Dolayısıyla, 5. test için tasarım yükünde ölçülen deformasyon 4. test için ölçülen deformasyondan daha azdır.



Şekil 3. Yükleme Testleri Basınç-Oturma Grafiği

Buna ek olarak, 4. ve 5. test kolonunun etrafına sık karelaj ile diğer kolonların imal edilmesi, aşırı boşluk suyu basınçları oluşturarak, deformasyonların diğerlerine oranla fazla olarak ölçülmesine sebep olmuştur, ancak bu aşırı boşluk suyu basınçlarının zaman içerisinde sönümlenerek, zeminin mukavemetinin artması sonucu kolonların daha iyi performans göstereceği beklenmektedir. Ayrıca, 4. ve 5. test kolonlarının imalat ve test yapım tarihleri arasındaki zaman farkı dikkate alındığında (4. test için 8 gün, 5. test için 23 gün), tasarım yükünde ölçülen deformasyon miktarlarının karşılaştırılması sonucunda (tasarım yükünde, 4. test için ~ 16 mm, 5. test için ~13 mm) aşırı boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı olarak sönümlenmeye başladığı görülmektedir. Sonuç olarak, tasarım aşamasında belirlenen gerilme koşulları altında beklenen oturma miktarı ve rijitlik modülü ile test sonuçları uyumluluk göstermektedir.

Çizelge 4. Yükleme Testi Sonuçları

Test No	DKK Boyu (m)	Tasarım Yükünün %100 (kN)	%100 Tasarım Yükünde Oluşan Deformasyon (mm)	Rijitlik Modülü (MN/m ³)
Test 1	7	160	8.47	87.6
Test 2	5	160	7.70	91.3
Test 3	5	160	9.69	80.0
Test 4	7	160	16.4	41.5
Test 5	7.5	160	13.6	53.3

Tasarım rijitlik modülü ise; $k_g = 40.7 \text{ MN/m}^3$ (Fox ve Cowell, 1998).

7. SONUÇ

Gaziantep İli, 4. Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilmekte olan fabrika binası sahasında mevcut zeminin iyileştirilmesi amacıyla Impact Pier patentli darbeli kırmataş kolonlar uygulanmaktadır. Yükleme test sonuçları; DKK elemanlarının zemininin rijitlik modülünü arttırdığını ve dolayısı ile kalite kontrol testini geçtiğini göstermektedir. Sonuç olarak teorik hesap yöntemleri ile hesaplanan DKK kapasite ve oturma değerleri ile uyumlu gerçekleşen yükleme deney sonuçlarınca da teyit edildiği üzere, 5.0 – 7.5 metre değişen boylardaki DKK elemanlarının, imalat sırasındaki yoğun sıkıştırma sebebi ile 16 ton servis yükleri altında istenilen rijitlikte imal edilebileceği görülmüştür.

SEMBOLLER

A	: Birim Hücree Alanı
A_g	: DKK Alanı
B	: Temel Genişliğı
c_u	: Drenajsız Kayma Mukavemeti
c'	: Efektif Kohezyon
E	: Elastisite Modülü
k_g	: DKK Rijitlik Modülü
k_m	: Matris Zemin Rijitlik Modülü
R_a	: DKK Alan Oranı
R_s	: DKK ve Matris Zemin Rijitlik Modülü Oranı
S_{LZ}	: Alt Bölge Oturması
S_{UZ}	: Üst Bölge Oturması
q	: Taban Basıncı
q_g	: DKK Üzerindeki Gerilme
γ	: Birim Hacim Ağırlık
ϕ'	: Efektif Sürtünme

KAYNAKLAR

Fox, N.S and M.J. Cowell (1998), 'Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual', Geopier Foundation Company Inc. Scottsdale, AZ

Handy, R.L., and Spangler, M.G. (2007), 'Geotechnical Engineering Soil and Foundation Principles and Practice', Mc Graw Hill, USA

Sentez (2010), "Gaziantep 4. Organize Sanayi Bölgesi Fabrika Binası Yükleme Deneyi Raporu", Sentez İnşaat Yazılım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şirketi, İstanbul