

# DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARDAKİ GRUP ETKİSİNİN 3-B SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

## 3-D NUMERICAL ASSESSMENT OF RAMMED AGGREGATE PIER (RAP) GROUP EFFECTS

Lale ÖNER<sup>1</sup>, Ece KURT BAL<sup>2</sup>, Kemal Önder ÇETİN<sup>3</sup>

### ABSTRACT

Within the confines of this manuscript, the results of three dimensional finite element assessments of a geothermal power plant site, which is improved with 50cm diameter Rammed Aggregate Piers<sup>®</sup> (RAP) are presented. The soil profile is composed of a fill layer with a thickness of 0,3-0,5m over medium stiff to stiff silty clay to a depth of 22m with interlayers of loose to medium dense clayey, gravelly sand / clayey gravel layers. Below this clay layer, there rests dense clayey sand layer. Power plant facilities are composed of a number of structures with gross foundation stresses varying in the range of 25 kPa to 160 kPa. 17m long RAP elements are installed with a square grid spacing, in the range of 1,3 to 2,75m. Design lengths and patterns are governed by i) the allowable settlement criterion of 7-25 millimeters, ii) factor of safety against seismic soil liquefaction, defined as 1,2. The long term consolidation settlements of cohesive layers, which are estimated in the range of 12 to 50cm before improvement, are reduced to 5-20mm after the improvement with RAP elements. RAP load tests are performed to test the conformity of bearing capacity and stiffness responses. Series of three dimensional numerical assessments were performed by using RS<sup>3</sup>-Rocscience software to assess the load distribution among group of RAP elements and the corollary settlements. The results of these analyses are presented in the form of load and settlement distribution factors, which address the group response of RAPs. The findings are then compared with available literature, widely used to assess concrete pile group effects.

**Keywords:** Impact<sup>®</sup> System, Rammed Aggregate Piers<sup>®</sup>, rigid columns, group effects

### ÖZET

Bu çalışmada, Impact<sup>®</sup> Sistemi ile imal edilen 50cm çaplı ve boyları 17m olan Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) elemanları kullanılarak temel zeminleri iyileştirilen jeotermal enerji santrali projesi kapsamında gerçekleştirilen 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ve sonuçları sunulmuştur. Zemin profili, 0,3-0,5m kalınlığında dolgu tabakası, bu tabaka altında 22m derinliğe kadar yer yer gevşek - orta sıkı killi kum ve killi çakıl tabakalarını da içeren orta katı - katı siltli kil tabakası, bu kil tabakasının altında ise orta sıkı - sıkı killi, siltli kum tabakasından oluşmaktadır. 11 adet farklı yapıdan oluşan jeotermal enerji

<sup>1</sup>İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yaz. San. ve Tic. Ltd. Şti., [loner@sentezinsaat.com.tr](mailto:loner@sentezinsaat.com.tr) (Sorumlu)

<sup>2</sup>İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Yaz. San. ve Tic. Ltd. Şti., [ekurt@sentezinsaat.com.tr](mailto:ekurt@sentezinsaat.com.tr)

<sup>3</sup>Prof. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, [ocetin@metu.edu.tr](mailto:ocetin@metu.edu.tr)

santralinde, herbir yapıdan zemine 25 kPa ile 160 kPa arasında değişen gerilmeler etkidiği rapor edilmiştir. Yapı altlarına 17m boyunda 1,3-2,75m aralığında değişen karelaj ile Impact® DKK elemanları imal edilmiştir. DKK boyu ve karelajı; i) 7-25mm aralığında değişen izin verilebilir oturma kriteri, ii) depremlerle durumdaki zemin sıvılaşmasına karşı minimum güvenlik faktörünün 1,2 olmasına göre seçilmiştir. İyileştirme öncesinde kohezyonlu birimlerdeki uzun dönem kondolidasyon oturmaları ve kohezyonsuz birimlerdeki ani oturmalar 12-50cm mertebelerinde hesaplanmış, iyileştirme ile bu değerler 5-20mm mertebelerine düşürülmüştür. Impact® DKK yükleme deneyleri ile, kolon elemanlarının taşıma kapasitesi ve rijitlik davranışı yerinde belirlenmiştir. Impact® DKK grubundaki yük dağılımı ve bunun neticesinde oluşan oturmaların belirlenmesine yönelik RS<sup>3</sup>-Rocscience yazılımı kullanılarak bir dizi 3-B sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin sonucunda DKK grup davranışı yük ve oturma dağılım faktörleri şeklinde sunulmuştur. Bulgular kazık grupları için geliştirilen literatür ile karşılaştırılmıştır.

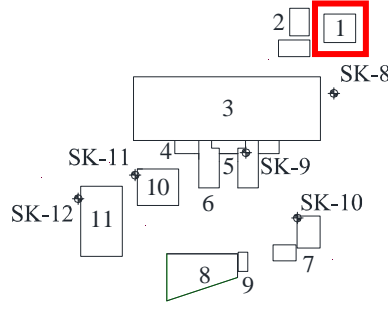
**Anahtar Kelimeler:** Impact® Sistemi, Darbeli Kırmataş Kolon, rijitlik, yük dağılımı

## 1. GİRİŞ

Mühendislik yapılarının çoğunun temel tasarımında zemin iyileştirme çözümleri geniş bir yer tutmakta olup, bu çözümler derin karıştırma, fore kazıklar, kum drenler, vakum konsolidasyonu veya taş kolonlar olabilmektedir. Proje için efektif olan zemin iyileştirme çözümünün alternatif yöntemler içerisindeki seçiminde, genellikle maaliyet ve/veya süre etkin rol oynamaktadır. Derin temeller ya da sıkışabilir zeminin kazılarak yerine daha iyi nitelikli malzeme doldurulması gibi maaliyeti yüksek mevcut çözüm yöntemlerine alternatif olarak Darbeli Kırmataş Kolon® (DKK) yöntemi ile oluşturulan rijit elemanlar da kullanılmaktadır. Bu yöntemde (Geopier - Impact® yöntemi ile) muhafaza borusu kullanılarak zemin yerdeğiştirmeye (displacement) uğratılıp, kuru-alttan besleme ile çapı 50cm olan kolonlar imal edilmektedir. Darbeli Kırmataş Kolon elemanlarının çap kontrolü gerçek zamanlı hacim ölçümleri ile yapılmaktadır. Impact® DKK elemanlarının önemli özelliği, kolon imalatı esnasında düşey darbeleme etkisi ile zemin içinde yanıl gerilmelerin meydana gelmesi sonucunda, yüksek dayanıma ve rijitliğe sahip olmalarıdır. Bu bildiri kapsamında, jeotermal enerji santrali radye temeli altında 50cm çaplı 17m uzunluğunda Impact® Sistemi ile imal edilen Darbeli Kırmataş Kolon elemanlarının davranışının 3 boyutlu sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analizi konu edilmiştir. Bu analizlerden yük dağılım ve oturma dağılım faktörleri elde edilerek, Impact® DKK elemanlarındaki grup etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçları, beton kazık ve kazık gruplarının performansının konu edildiği literatür ile karşılaştırılmıştır.

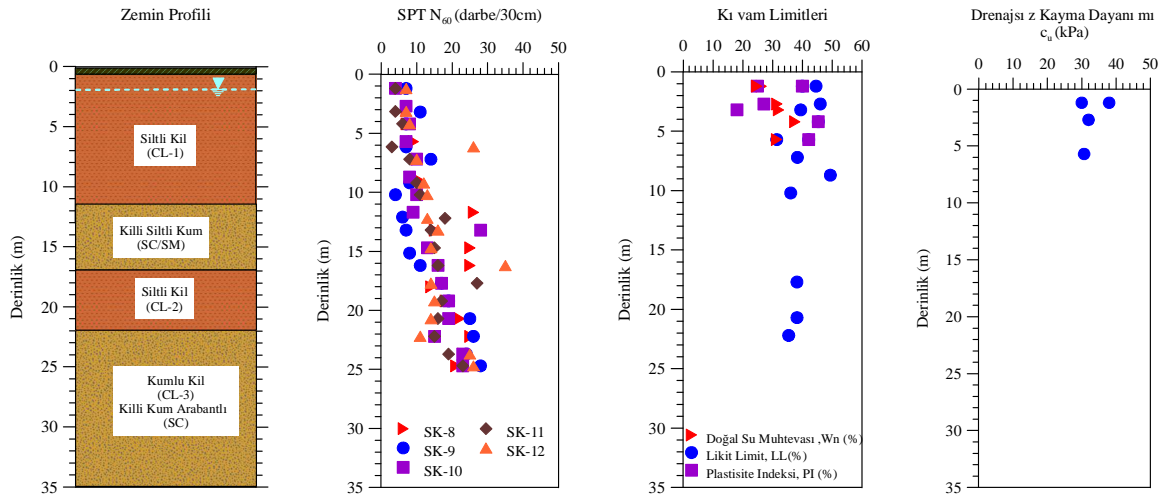
## 2. JEOTERMAL ENERJİ SANTRALİ SAHASI ZEMİN PROFİLİ

Proje kapsamında inşaa edilen Jeotermal Enerji Santrali, Aydın İli, Germencik İlçesinde yer almaktadır. 11 adet farklı yapıdan oluşan tesiste, herbir yapıdan zemine 25 kPa ile 160 kPa arasında değişen gerilmeler etkimektedir. Bu tesis için izin verilebilir oturma kriteri 7mm ile 25mm arasında değişecek şekilde tariflenmiştir. Tesisin şematik gösterimi Şekil 1'de sunulmuş olup, bildiri kapsamında Impact® DKK ile desteklenen radye temellerden 1-No'lu yapı seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Proje sahasının planı

Impact<sup>®</sup> DKK ile iyileştirilen sahada iyileştirme öncesi zemin profilini ve özelliklerini belirlemek için 35m derinliğe ulaşan sondaj çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çeşitli derinliklerde standart penetrasyon deneyleri yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Zemin araştırma çalışmalarından elde edilen genelleştirilmiş zemin profili ve laboratuvar sonuçları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Genelleştirilmiş zemin profili ve laboratuvar test sonuçları

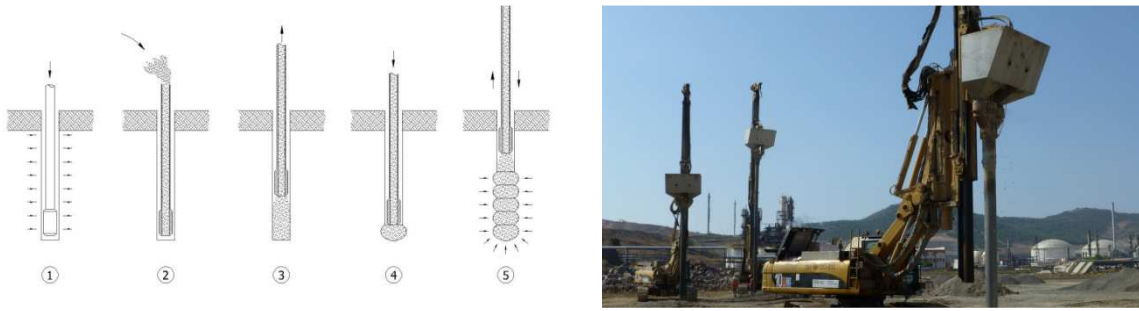
Zemin profili, 0,3-0,5m kalınlığında dolgu tabakası, bu tabaka altında 22m derinliğe kadar yer yer gevşek - orta sıkı killi kum ve killi çakıl tabakalarını da içeren orta katı - katı siltli kil tabakası, bu kil tabakasının altında ise orta sıkı - sıkı killi, siltli kum tabakasından oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesinin, doğal yeraltı su seviyesinin 1,7m altında olduğu belirlenmiştir.

Tesisi oluşturan farklı tipteki yapıların inşaatı öncesinde zemin iyileştirmenin gerekliliği, inşaatın tamamlanmasından sonra istenen oturma kriterinin son derece sınırlayıcı bir değer olmasından kaynaklanmaktadır. Impact<sup>®</sup> Darbeli Kırmataş Kolon yöntemi diğer zemin iyileştirme teknikleri ile karşılaştırıldığında, bu proje için en efektif çözüm olarak belirlenmiştir. Bu nedenle her bir yapı altında 17m uzunluğunda, kare patern ile (1,3-2,75m aralığında değişen) Impact<sup>®</sup> DKK elemanları imal edilmiştir. DKK boyu ve karelajı; i) 7-25mm aralığında değişen izin verilebilir oturma kriteri, ii) deprem durumundaki zemin sıvılaşmasına karşı minimum güvenlik faktörünün 1,2 olması kriterleri gözetilerek seçilmiştir. İyileştirme öncesinde kohezyonlu birimlerdeki uzun dönem kondolidasyon oturmaları ve kohezyonsuz birimlerdeki ani oturmalar 12-50cm mertebelerinde hesaplanırken, Impact<sup>®</sup> DKK elemanlarının imalatından sonra bu değerler 5-20mm

mertebelerine düşürülerek izin verilebilir oturma limitleri ile uyumlu bir temel performansı sağlanmıştır.

### 3. IMPACT® DARBELİ KIRMATAŞ KOLON İMALATI

Sahada Impact® Sistemi kullanılarak imal edilen Darbeli Kırmataş Kolon® elemanları için imalat adımları şu şekildedir: (1) alt ucu kapalı olan 36cm çaplı mandrel itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir; (2) mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur; (3) 100cm yukarı / 67cm aşağı itme yöntemi ile düşey vibrosyon uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3). 100cm yukarı / 67cm aşağı itme yöntemi ile uygulanan sıkıştırma işlemi sonunda 36cm olan çap, 50cm'ye genişler. İmalat aşamaları yüksek yoğunluklu kırmataşla birlikte yanal gerilmelerde önemli bir artış yaratarak, Impact® DKK elemanlarında tek eksenli dayanımı ve rijitliği sağlar (Handy 2001, Wissmann et al., 2001).

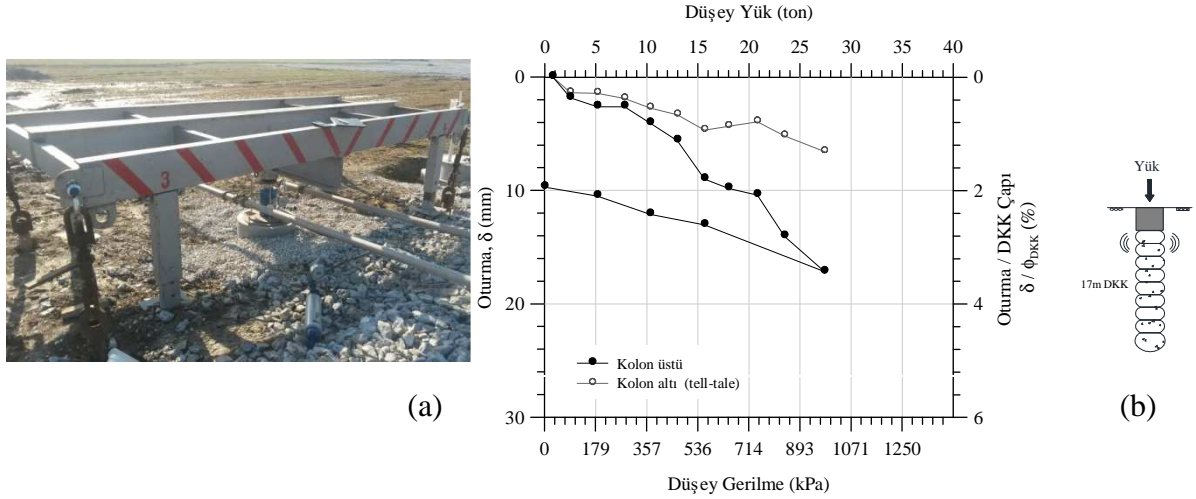


Şekil 3. Impact® Sistemi yapım metodolojisi ve sahadaki imalattan görünüm

### 4. SAHA YÜKLEME DENEYİ

Impact® DKK saha yükleme deneyleri, yükleme şeklinin göreceli olarak hızlı uygulanması nedeniyle genellikle "hızlı" deneyler olarak tanımlanır. Deney prosedürü, ASTM D-1143 standardında tanımlanmış olan kazıkların basınç altındaki davranışlarını ölçen deney aşamalarına benzer şekilde yapılmaktadır. Şekil 4a'da gösterildiği gibi deney yükü doğrudan kolon üzerine uygulanabildiği gibi, yükün çaptan daha geniş bir başlık üzerine uygulanması ile hem zemin hem kolon üzerine olan hücre yüklemesi şeklinde de olabilir. Impact® DKK elemanlarının modulus yükleme deneylerinde, kolon içine "tell-tale" olarak adlandırılan yatay çelik bir plakaya manşonlu olarak eklenen ve kolon başına kadar uzanan iki adet düşey yönlü çubuk elemanlar yerleştirilir. Yükleme deneyi süresince kolon başındaki ve tell-tale plakasındaki deplasmanlar kayıt altına alınarak kolon elemanın göreceli deplasmanının belirlenmesi sağlanır (Brian et al., 2006). Tell-tale elemanının yerleşimine bağlı olarak, Impact® DKK elemanı boyunca oluşan deplasman değerlendirmeye alınabilir. Kademeli yükleme servis yükünün %5'i ile başlayıp, servis yükünün %150'sine kadar devam eder. Daha sonra bunu yük boşaltma kademeleri takip eder.

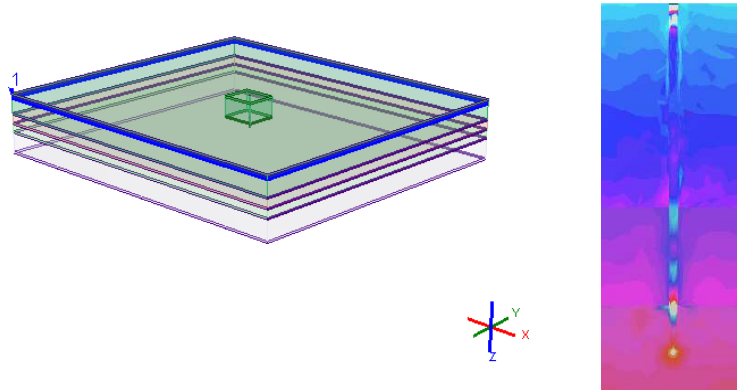
Yük artışlarında yaklaşık olarak Darbeli Kırmataş Kolon başındaki maksimum tasarım gerilmesinin %115'inde ve yük boşaltma adımları dışında, tüm yükleme kademelerinde minimum 15 dakika ve oturma hızı 0,254 mm/saat altında olduğu sürece veya maximum 1 saat süresince beklenmelidir. Maksimum tasarım gerilmesinin %115'inde, minimum 60 dakika beklenmeli ve oturma hızı 0,254 mm/saat altında olduğu sürece veya maximum 4 saat süresince beklenmelidir. Yük boşaltma kademelerindeki minimum bekleme süresi 5 dakika olmalıdır. Darbeli Kırmataş Kolon elemanının üstünde ve altında ölçülen Yük - Oturma (Gerilme - Birim Deformasyon) eğrisi Şekil 4b'de gösterilmiştir.



Şekil 4. a) Tekil DKK yükleme deney kurulumu b) yükleme deney sonucu

## 5. SAHADAKİ TEKİL YÜKLEME DENEYİNİN 3-B SAYISAL MODELİ (SONLU ELEMANLAR) VE MODEL KALİBRASYONU

Saha yükleme deneylerinin sayısal gösterimi ve zemin parametrelerinin kalibrasyonu için Rocscience firmasının RS<sup>3</sup> yazılımı kullanılarak, 3-B sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu amaçla Şekil 5’de gösterilen model hazırlanmıştır.



Şekil 5. Saha yükleme deneyi 3-B sonlu elemanlar modeli

Başlangıç gerilmeleri, sükunetteki ( $K_0$ ) gerilme koşullarına uyumlu olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde Darbeli Kırmataş Kolon imalat yönteminin etkisi hesaba katılmıştır. Bu sebeple, kolon imalatı esnasında çevre zemindeki boşluk genişleme durumundan dolayı artan yatay toprak basıncı oranı ( $K=2,5$ ) kullanılarak modellenmiştir. Bu yapılan işlem, sıkıştırma sonrası kolon elemanının genişlemesi ile zemin danelerinin kenetlenmesinin ve sıkışmasının etkisi ile artan yatay gerilmeleri modellemektedir. Beton başlık, arazideki imalata benzer şekilde 60cm çaplı ve 60cm kalınlığında tanımlanmıştır.

3 boyutlu sayısal model için elde sınırlı sayıda laboratuvar deneyi bulunmasından dolayı basit bir bünye modeli oluşturulmuştur. Bu nedenle Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılarak, zemin elemanları elastik - mükemmel plastik eleman olarak modellenmiştir. DKK beton başlığı için ise elastik elemanlar tanımlanmıştır. Sayısal analizde kullanılan girdi parametrelerinin özeti Tablo 1’de verilmiştir. Tekil DKK yükleme deneyinin yapılışı hızlı yükleme koşulu olarak düşünüldüğünden arazi zemini (DKK elemanı için değil) için

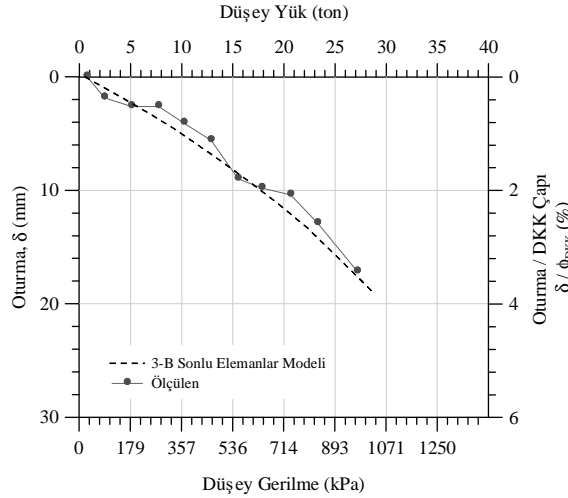
drenajsız parametreler kullanılmıştır. Bununla birlikte DKK ile iyileştirilmiş radye sisteminin uzun dönemdeki performansı için efektif gerilme tabanlı drenajlı analiz yapılmış olup, bu konu daha sonra irdelenecektir.

Tablo 1. Bünye modeli için drenajlı ve drenajsız girdi parametreleri

No	Malzeme	Malzeme Tipi	Kalınlık (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E' (MPa)	E <sub>u</sub> (MPa)	c' (kPa)	c <sub>u</sub> (kPa)	$\phi'$ (°)	$\nu'$	$\nu_u$
1	Siltli Kil (CL-1)	Elastik-Plastik	11,5	18	4,8	8	0	40	29	0,34	0,50
2	Killi, Siltli Kum (SC-SM)	Elastik-Plastik	5,5	19	17,8	-	0	0	35	0,30	0,30
3	Siltli Kil (CL-2)	Elastik-Plastik	5	18	11	18	0	90	29	0,34	0,50
4	Kumlu Kil (CL-3) killi kum ara tabakalı (SC)	Elastik-Plastik	12	19	20	-	10	10	33	0,30	0,30
5	DKK Elemanı	Elastik	17	22	165	-	-	-	-	0,25	0,25
6	DKK Beton Başlık	Elastik	$\phi$ 0,6	-	35,000	-	-	-	-	0,15	-
7	Radye Temel	Elastik	0,6	-	35,000	-	-	-	-	0,15	-

$\gamma$  - birim hacim ağırlık; E' - drenajlı elastik modül; E<sub>u</sub> - drenajsız elastik modül; c' - efektif kohezyon; c<sub>u</sub> - drenajsız kayma dayanımı;  $\phi'$  - efektif sürtünme açısı;  $\nu'$  - efektif Poisson oranı;  $\nu_u$  - drenajsız Poisson oranı

Arazi yükleme deney düzeneği 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile modellenerek, modelden ve arazide gözlemlenen elde edilen yük-oturma verileri Şekil 6'da gösterilmiştir.



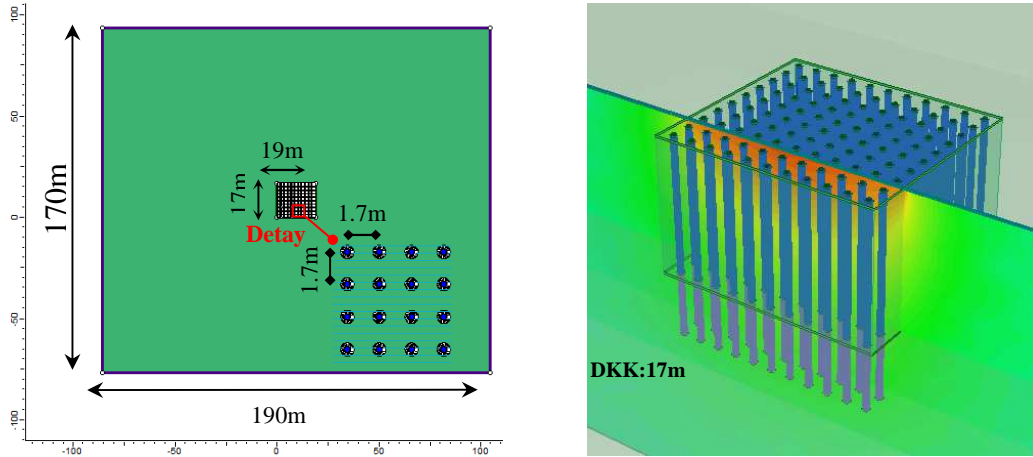
Şekil 6. Ölçülen ve hesaplanan yük - oturma eğrilerinin karşılaştırılması

Herhangi bir kalibrasyon işlemine ihtiyaç duymadan, arazi gözlemleri ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinden elde edilen yük - oturma eğrileri şaşırtıcı derecede birbirleriyle örtüşmektedir. Bu bakımdan analizlerde kullanılacak parametreler için ek kalibrasyon işlemi yapılmamıştır.

## 6. IMPACT<sup>®</sup> DKK İLE DESTEKLENEN RADYE TEMELİNİN UZUN DÖNEM DAVRANIŞININ 3-B SONLU ELEMANLAR MODELİ

Arazi gözlemi ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçların birbirleri arasındaki tatmin edici uyumdan ilham alınarak, benzer model kullanılarak radye temel in 3 boyutlu

modeli yapılmıştır. Tüm modelin boyutları 170m x 190m x 34m olan sonlu elemanlar modeli Şekil 7’de gösterilmiştir.

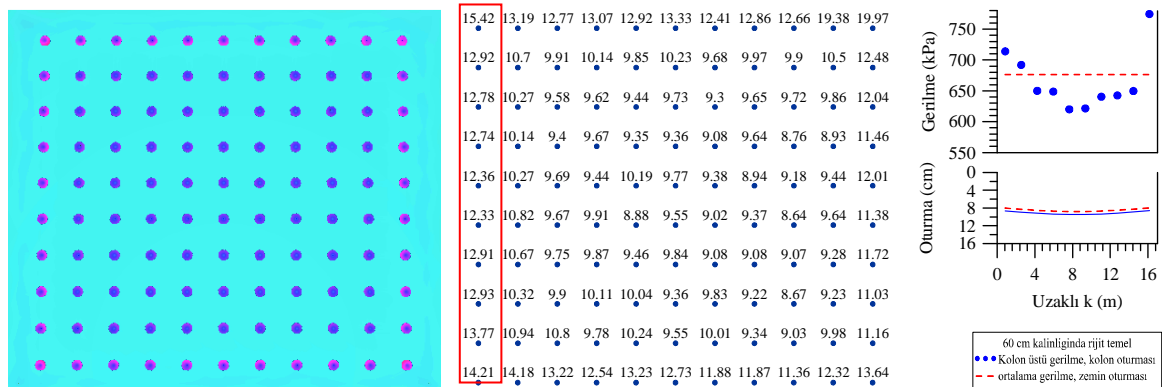


Şekil 7. Impact® DKK ile iyileştirilmiş radye temelinin 3-B sonlu elemanlar modeli

Bünye modelinde kullanılan drenajlı parametreler Tablo 1’de özetlenmiştir. Sonlu elemanlar ağı için 10 noktalı dörtyüzlü (tetrahedron) elemanlar kullanılmıştır. 50cm çaplı 1,7m x 1,7m karelajla imal edilen DKK elemanları, modelde yerleşimi 10 satır ve 11 sütun olmaktadır. DKK elemanlarının boyu temel altından itibaren 17m derinliğe kadardır. 17m x 19m boyutlarında ve 60cm kalınlığındaki radye temel üzerine uniform olarak etkiyen gerilme değeri 100 kPa’dır.

## 7. SAYISAL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

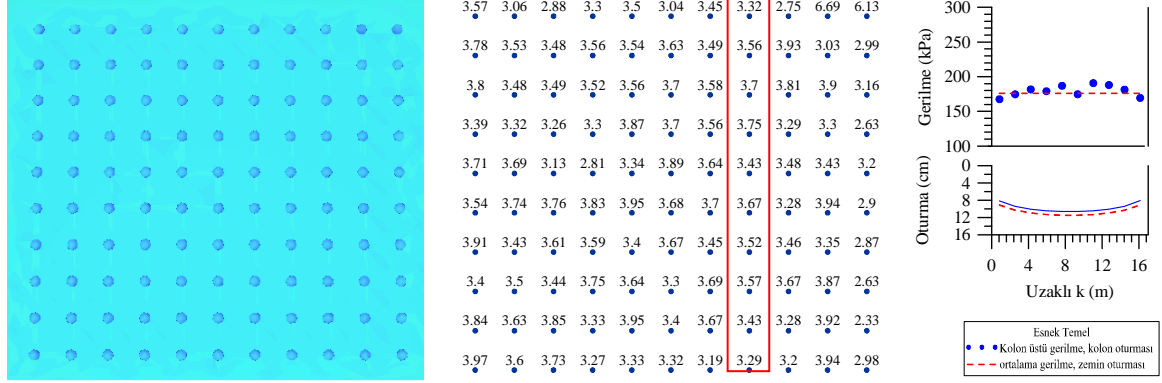
17m uzunluğundaki Impact® DKK elemanları ile desteklenen esnek ve 60cm kalınlığındaki radye davranışının karşılaştırılması amacıyla yönelik olarak bir dizi şekil hazırlanmıştır. Şekil 8’de 60cm kalınlığındaki radye temeli altında yer alan DKK elemanlarındaki düşey yüklerin dağılımı gösterilmiştir. Radyenin ortasında yer alan DKK elemanları ile kenarlarda yer alan elemanlar karşılaştırıldığında, ortadaki elemanların kenarlara göre daha az düşey yüklendiği açıkça görülmektedir. Köşelerdeki DKK elemanları yaklaşık 13-14 ton yüklenirken, ortaldaki DKK elemanlarına gelen yük 9-10 ton’dur. Kenar ve orta DKK elemanları arasında 1,4’lük bir yük faktörü bulunmaktadır.



Şekil 8. 60cm kalınlığındaki radye temel altında yer alan DKK elemanları üzerindeki düşey yük dağılımı (ton)

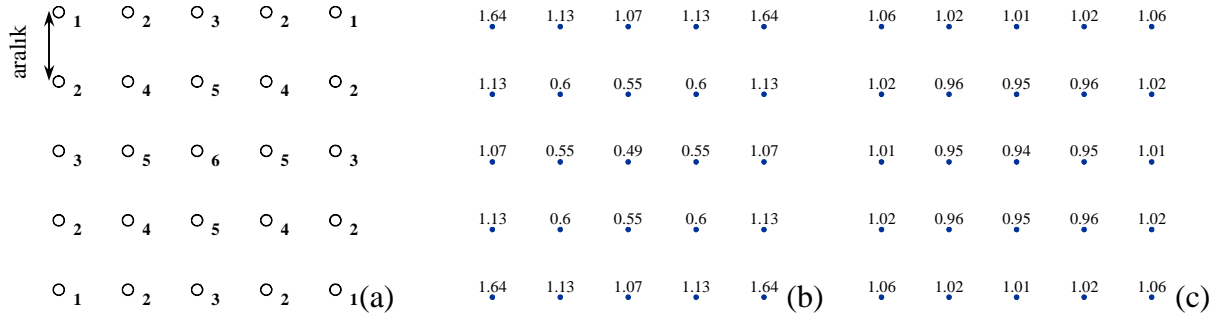


Şekil 9’da esnek temel altında yer alan DKK elemanlarındaki düşey yük dağılımı gösterilmiştir. Esnek temel altında yer alan DKK elemanlarındaki düşey yük dağılımının beklendiği gibi nispeten uniform olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte temelin orta kısmındaki düşey oturmanın kenarlara göre önemli oranda fazla olduğu görülmekte olup, literatürde bahsedilen esnek temel davranışı ile benzer bir davranış sergilemektedir.



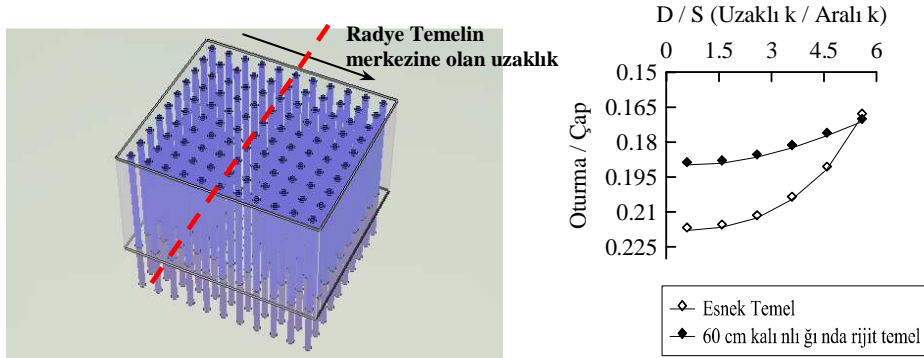
Şekil 9. Elastik temel altında yer alan DKK elemanları üzerindeki düşey yük dağılımı (ton)

Şekil 10’da yer alan Poulos ve Davis’in 1980 yılında yapmış olduğu 5 x 5’li kazık grubu davranışına benzer bir eğilim bu çalışma içinde de gözlemlenmiştir.



Şekil 10. a) 5 x 5’li kare gruptaki kazıkların tanımı, b) rijit başlık için c) eşit yüklenme durumu için (Poulos ve Davis, 1980)

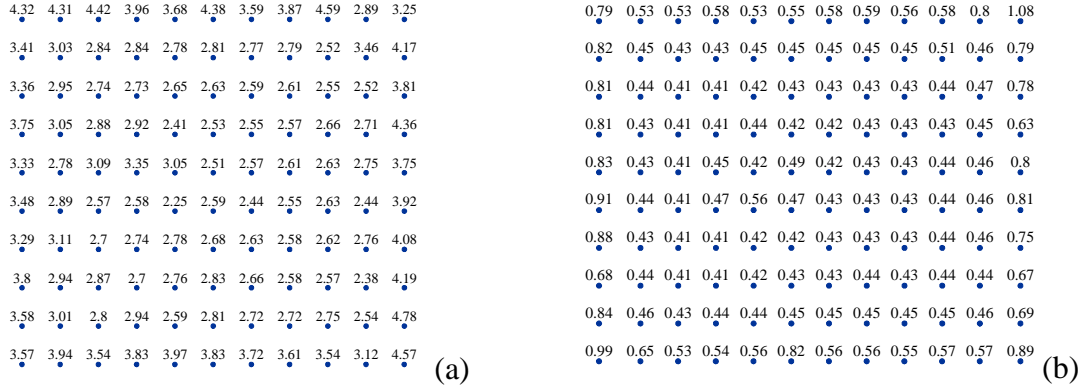
Temel rijitliğinin oturmalar üzerindeki etkisi Şekil 11’de gösterilmiştir. Radye temeldeki oturmanın, radyedeki rijitliğin artışı ile azalmakta olduğu ilgili literatür ile doğrulanmıştır (Gandhi ve Maharaj, 1995).



Şekil 11. Temel rijitliğinin oturma üzerindeki etkisi



60cm kalınlığındaki radye ve esnek temel altındaki DKK elemanları üzerindeki düşey yük oranı Şekil 12a'da gösterilmiştir. 60cm kalınlığındaki radye altındaki DKK elemanlarının esnek temel altındaki DKK elemanları ile karşılaştırıldığında 2,5-4,8 kat daha fazla yüklendiği görülmüştür. Bu bulgularla uyumlu olarak, esnek ve rijit temeller altında yer alan DKK elemanları arasındaki zemin üzerine gelen gerilme oranı Şekil 12b'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi esnek temel altındaki zemin yaklaşık olarak 2,5 kat daha fazla gerilmeye maruz kalmıştır. Bu gözlemler tutarlı olarak, daha rijit bir radye altındaki düşey oturmalar esnek temel altındaki oturmalardan yaklaşık % 25 daha azdır.



Şekil 12. a) 60cm kalınlığındaki radye ve esnek temel altındaki düşey yük oranı b) 60cm kalınlığındaki radye ve esnek temel altındaki DKK elemanları arasında kalan zemindeki düşey yük oranı

## 8. SONUÇLAR

Bu bildiri kapsamında Impact<sup>®</sup> DKK grubunun temel yükleri altında gerilme dağılımı ve oturmaları konu edilmiş, RS<sup>3</sup>-Rocscience yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen 3 boyutlu sayısal analiz sonuçları tartışılmıştır. Sayısal modelin doğrulanmasında arazi yükleme deney sonuçları kullanılmıştır. Sonuçlar DKK grup davranışı yük ve oturma dağılım katsayıları şeklinde sunulmuştur. Bulgular kazık grupları için sunulan ilgili literatür ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmaya ait değerlendirmeler ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- i) 60cm kalınlığındaki radye temeli için; radyenin ortasında yer alan Impact<sup>®</sup> DKK elemanları ile kenarlarda yer alan elemanlar karşılaştırıldığında, ortadaki elemanların kenarlara göre daha az düşey yüke maruz kaldığı görülmektedir. Köşedeki Impact<sup>®</sup> DKK elemanları 13-14 ton mertebelerinde yüklenirken, orta bölgedeki DKK elemanlarına gelen yük 9-10 ton'dur. Bir başka deyişle, kenar ve orta DKK elemanları arasında 1,4 mertebelerine varan yük (gerilme) farklılaşmasına rastlanmaktadır.
- ii) Esnek temel altında yer alan Impact<sup>®</sup> DKK elemanlarındaki düşey yük dağılımının beklendiği gibi nispeten uniform olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte temelin orta kısmındaki düşey oturmanın kenarlara göre önemli oranda fazla olduğu görülmekte olup, literatürde bahsedilen esnek temel davranışı ile benzer bir davranış sergilemektedir. Temel rijitliği arttıkça radye temel altındaki farklı oturmalar azalmaktadır.

- iii) 60cm kalınlığındaki radye altındaki Impact® DKK elemanları, esnek temel altındaki Impact® DKK elemanları ile karşılaştırıldığında 2,5-5 kat mertebelerinde daha fazla yüklenmiştir.
- iv) 60cm kalınlığındaki radye temel davranışı ile karşılaştırıldığında, esnek temel altındaki zemin yaklaşık olarak 2,5 kat daha fazla gerilmeye maruz kalmıştır.
- v) 60cm kalınlığındaki radye temel altındaki düşey oturmalar, esnek temel altındaki oturmalarından % 25 mertebelerinde daha azdır.

## **9. KAYNAKLAR**

- ASTM D1143-81 (Reapproved 1994), Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load, Annual Book of ASTM Standarts.
- 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.
- Gandhi, S. R. and Maharaj, D. K. (1995), “Behaviour of Piled Raft under Uniform Loading”, Indian Geotechnical Conference (IGC-95), Bangalore, Vol.1, 169-172.
- Handy, R.L. (2001), “Does Lateral Stress Really Influence Settlement?”, ASCE Journal of Geotechnical and Goenviromental Engineering, 127(7), 623-626.
- Poulos, H. G. and Davis, E. H. (1980), “Pile Foundation Analysis and Design”, John Wiley & Sons, New York.
- Wissmann, K.J., Moser, K. and Pando, M.A. (2001), “Reducing Settlement Risks in Residual Piedmont Soils Using Rammed Aggregate Pier Elements”, Proceedings, ASCE Specialty Conference, Blacksburg, Virginia.