

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON ELEMANLARINA AİT
YÜKLEME TESTLERİNİN SAYISAL ANALİZİ VE
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ece KURT**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mek. ve Geoteknik Müh.

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON ELEMANLARINA AİT
YÜKLEME TESTLERİNİN SAYISAL ANALİZİ VE
SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ece KURT

(501071304)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMUR (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mete İNCECİK (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK (İÜ)

HAZİRAN 2011

Anneme ve babama,

ÖNSÖZ

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorluklara bilgi ve tecrübesi ile değerli katkıları olan Prof. Dr. Kemal Önder ÇETİN'e çok teşekkür ederim.

Tezimin hem teorik hem de deneysel çalışma aşamasında katkılarını eksik etmeyen, her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan SENTEZ İNŞAAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın uygulama aşamasında değerli yardımlarını benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a ve zemin araştırma çalışmaları kapsamında önemli ölçüde katkıları olan GEOSAN A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

34209 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Yapıcı eleştirileri ile tez çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Berrak TEYMUR'a teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Tezimin hiçbir aşamasında beni yalnız bırakmayan, bana karşı göstermiş oldukları sabır ve anlayış için sevgili aileme saygılarımı sunarım.

Mayıs 2011

Ece KURT
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Genel	3
2. TAŞ KOLON (TK) SİSTEMLERİ.....	19
2.1 Genel	19
2.2 İmalat Yöntemleri	20
2.2.1 Vibro kompaksiyon yöntemi.....	20
2.2.2 Vibro yer değiştirme yöntemi	21
2.2.3 Vibro öteleme yöntemi.....	21
2.2.4 Darbeli yöntem.....	22
2.3 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması	22
2.4 Taş Kolon Elemanlarının Özellikleri	23
2.4.1 Taş kolon çapı	23
2.4.2 Taş kolon boyu.....	24
2.4.3 Taş kolonun içsel sürtünme açısı	24
2.4.4 Taş kolon malzemesinin dane çapı dağılımı	24
2.5 Tasarım Kriterleri ve Tasarım Yöntemleri.....	24
2.5.1 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları	25
2.5.2 Taş kolon grupları göçme mekanizmaları.....	26
2.5.3 Birim hücre kavramı	28
2.5.3.1 Eşdeğer çap.....	28
2.5.3.2 Alan oranı.....	29
2.5.3.3 Gerilme konsantrasyonu.....	30
2.5.4 Nihai taşıma gücü analizi.....	31
2.5.4.1 Tekil taş kolon.....	31
2.5.4.2 Kısa taş kolon.....	34
2.5.4.3 Taş kolon gruplarının nihai taşıma gücü.....	36
2.5.5 Taş kolon elemanları için oturma analizi.....	38
2.6 Taş Kolon Elemanları için Kalite Kontrol Prosedürü	41
2.7 Taş Kolon Sitemlerinin Değerlendirilmesi	41
3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) SİSTEMLERİ.....	43
3.1 Genel	43

3.2 Geopier® Sistemi (Replacement Method)	47
3.2.1 Geopier® sistemi ekipmanı	47
3.2.2 Geopier® sistemi imalat yöntemi	47
3.2.3 Geopier® sisteminin inşa ve performans avantajları	48
3.3 Impact® Sistemi (Displacement Method)	49
3.3.1 Impact® sistemi ekipmanı	49
3.3.2 Impact® sistemi imalat yöntemi	50
3.3.3 Impact® sisteminin inşa ve performans avantajları	50
3.4 Darbeli kırmataş kolon elemanının özellikleri	51
3.4.1 Darbeli kırmataş kolon çapı	51
3.4.2 Darbeli kırmataş kolon boyu	51
3.4.3 Darbeli kırmataş kolon içsel sürtünme açısı	52
3.4.4 Darbeli kırmataş kolon rijitlik modülü	53
3.4.5 Darbeli kırmataş kolon malzemesinin dane çapı dağılımı	54
3.5 Impact Sistemi İle Desteklenmiş Temelerde Oturma Hesabı	54
3.5.1 Üst bölge oturması	55
3.5.2 Alt bölge oturması	58
3.6 Impact Sistemi İle Desteklenmiş Temelerde Taşıma Kapasitesi	59
3.6.1 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının yanıl genişleme yenilmesi	61
3.6.2 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi	62
3.6.3 Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede kayma yenilmesi	64
3.6.4 Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş bölge altında kayma yenilmesi	65
3.7 Impact Darbeli Kırmataş Kolon için Kalite Kontrol Prosedürü	65
3.7.1 Akış oranı testi	65
3.7.2 Kullanılmamış (artan) kırmataş hacmi	66
3.7.3 Kullanılan kırmataş hacmi	66
3.7.4 Yükleme testi	67
3.8 Darbeli Kırmataş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi	68
3.9 Taş Kolon ve Darbeli Kırmataş Kolon için Uygulamaya Yönelik Detaylar	69
4. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON ELEMANLAR ÜZERİNDE UYGULANAN YÜKLEME DENEYLERİNİN ANALİZİ	71
4.1 Çalışma Alanının Tanıtılması	71
4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi	72
4.3 Zemin Araştırma Çalışmaları ve Temsili Zemin Profili	72
4.4 Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon İmalatları & Yükleme Testleri	76
4.4.1 Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolon imalatı (Tip – 1)	78
4.4.2 Öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolon imalatı (Tip – 2)	79
4.4.3 Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş taş kolon imalatı (Tip–3)	80
4.5 Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Üzerine Uygulanan Yükleme Testleri	81
4.5.1 Yükleme testi aşamaları	82
4.5.2 Yükleme testi sonuçları	82
5. DARBELİ KIRMATAŞ VE TAŞ KOLON ELEMANLARI ÜZERİNDE UYGULANAN YÜKLEME DENEYLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ	89
5.1 Modelin Oluşturulması	89
5.1.1 Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolonun modellenmesi	91

5.1.2 Öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun modellenmesi	94
5.1.3 Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun modellenmesi.....	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	103
EKLER.....	109

KISALTMALAR

CPT	: Koni Penetrasyon Testi
DKK	: Darbeli Kırmataş Kolon
RAP	: Rammed Aggregate Pier (Darbeli Kırmataş Kolon)
SP	: Single Pier (Tekil Kolon)
SPD	: Single Pier Displacement (Tekil Kolon Öteleme)
SPR	: Single Pier Replacement (Tekil Kolon Ön Delgi)
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
TK	: Taş Kolon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Sıkıştırılmış kırmataşın ve kil birimlerin mukavemet özellikleri.....	6
Çizelge 1.2 : DKK projeleri için tahmin edilen ve gerçekleşen oturma miktarları. ..	10
Çizelge 1.3 : DKK ve TK projeleri için zemin özelliklerinin karşılaştırılması.	15
Çizelge 1.4 : DKK ve TK elemanlarına ait imalat bilgileri.....	15
Çizelge 3.1 : Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) imalat yöntemleri (Geopier® Foundation Company, Inc., 2010).	1
Çizelge 3.2 : Genelleştirilmiş zemin türleri için Geopier rijitlik modülü değerleri (Fox ve Cowell, 1998).	53
Çizelge 4.1 : Temsili zemin profili ve geoteknik parametreler.	74
Çizelge 4.2 : Test kolonlarına ait imalat ve yükleme testi bilgileri.	77
Çizelge 4.3 : Çalışma yüküne göre test kolonları üzerine uygulanan yük miktarları.....	82
Çizelge 4.4 : DKK ve TK elemanları için rijitlik modülü değerleri.....	86
Çizelge 5.1 : Plaxis programında kullanılan geoteknik parametreler.....	90
Çizelge 5.2 : Tip-1 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.....	94
Çizelge 5.3 : Tip-2 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.....	96
Çizelge 5.4 : Tip-3 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.....	98
Çizelge 6.1 : DKK ve TK elemanları için rijitlik modülü değerleri.....	100
Çizelge 6.2 : DKK ve TK elemanları için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.....	100

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yük-oturma grafiği.....	5
Şekil 1.2 : Zamana bağlı oturma oranı.	5
Şekil 1.3 : Ölçümleme (a) plan (G_1) (b) kesit A-A (G_1).	7
Şekil 1.4 : Ölçümleme (P_3).	8
Şekil 1.5 : Yük – oturma grafiği.	9
Şekil 1.6 : İyileştirilmemiş zemin ve agrega kolonlar ile iyileştirilmiş zemin için yükleme testi (Columbia, SC).	11
Şekil 1.7 : İnceleme alanı, Utah (a) CPT sonucu (b) kesit (c) plan.....	12
Şekil 1.8 : Tekil kolon ve grup kolon yüklemesi testi, Utah.....	12
Şekil 1.9 : Grup kolon yüklemesi testi, Utah.	12
Şekil 1.10 : İnceleme alanı, Iowa (a) CPT sonucu (b) kesit (c) plan.	13
Şekil 1.11 : Kısa kolonlar için yüklemesi testi, Iowa (a) kolon üstü davranışı (b) kolon altı davranışı.	13
Şekil 1.12 : Uzun kolonlar için yüklemesi testi, Iowa (a) kolon üstü davranışı (b) kolon altı davranışı.	14
Şekil 1.13 : DKK ve TK elemanları için gerilme-oturma ilişkisi.....	16
Şekil 1.14 : DKK ve TK elemanları için gerilme-rijitlik ilişkisi.	17
Şekil 2.1 : Vibro kompaksiyon yöntemi imalat adımları (Url-1).	20
Şekil 2.2 : Vibro yer değiştirme yöntemi imalat adımları (Url-1).....	21
Şekil 2.3 : Alttan beslemeli yöntem imalat adımları (Url-1).	22
Şekil 2.4 : Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi (Besancon, 1984).....	23
Şekil 2.5 : Homojen zeminde tekil taş kolon için göçme mekanizmaları (a) uzun taş kolon, sağlam tabakada veya yüzen sistem olarak (b) rijit kısa kolon, kesme göçmesi (c) yüzen sistem kısa kolon, zımbalanma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).....	25
Şekil 2.6 : Taş kolona etkileyen farklı tipteki yükler: (a) rijit temel yüklemesi (b) plaka yüklemesi (c) dolgu yüklemesi (Barksdale ve diğ., 1983).....	26
Şekil 2.7 : Taş kolon grupları için göçme mekanizmaları: (a) yanal genişleme, geniş dolgu yüklemesi (b) genel dairesel göçme (c) kabarma göçmesi, küçük grup (d) kısa kolonlar, zımbalanma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).....	27
Şekil 2.8 : Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları: (a) yüzeyde yumuşak tabaka, kabarma veya kesme göçmesi (b) ince çok yumuşak tabaka, sınırlı yerel kabarma (c) kalın çok yumuşak tabaka, yerel kabarma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).....	27
Şekil 2.9 : Eşkenar üçgen dizilimi: (a) plan (b) geometri (Barksdale ve diğ., 1983).....	28
Şekil 2.10 : Birim hücre yaklaşımı: (a) plan (b) birim hücre (c) kesit (Barksdale ve diğ., 1983).	29

Şekil 2.11 : Tekil bir kolon üzerindeki rijit bir plakaya etkiyen yük sonucunda kolonda oluşacak yanal genişleme yenilmesi (Barksdale ve diğ., 1983).....	32
Şekil 2.12 : Silindirik boşluk genişleme faktörleri (Barksdale ve diğ., 1983).....	34
Şekil 2.13 : Taş kolonlarda şerit yükleme için taşıma gücü faktörleri (a) N_c (b) N_γ (c) N_q (Barksdale ve diğ., 1983).	35
Şekil 2.14 : Taş kolon grup analizi – yumuşak / katı kohezyonlu birimler (a) kare grup (b) sonlu uzun kolon grubu (Barksdale ve diğ., 1983).	37
Şekil 2.15 : Oturma azaltım faktörü – Denge yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983). ...	39
Şekil 2.16 : Oturma azaltım faktörü – Priebe yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).....	40
Şekil 2.17 : Oturma azaltım faktörü – Greenwood yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).....	40
Şekil 3.1 : DKK elemanlarının diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).....	44
Şekil 3.2 : DKK teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).	45
Şekil 3.3 : Geopier sistemi ekipmanı (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).....	47
Şekil 3.4 : Geopier sistemi imalat adımları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).....	48
Şekil 3.5 : Impact sistemi ekipmanı.....	49
Şekil 3.6 : Impact sistemi imalat adımları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).....	50
Şekil 3.7 : Geopier DKK üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi sonuçları (Fox ve Cowell, 1998).	52
Şekil 3.8 : Sıkıştırılmış Geopier agregası üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi (White, 2001).	53
Şekil 3.9 : Temel altında alt bölge ve üst bölge sınırları (Fox ve diğ., 1998).....	54
Şekil 3.10 : Gerilme konsantrasyonu yay yaklaşımı (Fox ve diğ., 1998).....	56
Şekil 3.11 : DKK ile desteklenmiş temeller için alt bölge oturması hesap şeması (Fox ve diğ., 1998).....	58
Şekil 3.12 : Şerit temelin limit denge taşıma kapasitesi (Wissman, 1999).....	59
Şekil 3.13 : Muhtemel göçme mekanizmaları (Wissman, 1999).....	60
Şekil 3.14 : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti için izin veirlebilir taşıma kapasitesi (Wissman, 1999).	60
Şekil 3.15 : Zeminin içsel sürtünme açısı için izin veirlebilir taşıma kapasitesi (Wissman, 1999).....	61
Şekil 3.16 : Artan kırmataş hacim ölçümü.	66
Şekil 3.17 : Yükleme testi düzeneği.	68
Şekil 4.1 : DKK ve TK imalatlarının yapıldığı çalışma alanı.....	71
Şekil 4.2 : İnceleme alanında gerçekleştirilen (a) sondaj çalışması (b) CPT çalışması.	72
Şekil 4.3 : Çalışma alanına ait vaziyet planı.	73
Şekil 4.4 : İmalatta kullanılan kırmataşın (a) araziden görünüşü (b) laboratuvar testi.....	74
Şekil 4.5 : Çalışma kapsamında kullanılan kırmataşın darbeleme öncesi ve sonrası dane çapı dağılımı.	75
Şekil 4.6 : Kireçtaşı örneği için darbeleme öncesi ve sonrası dane çapı dağılımı (White ve diğ., 2002).	75
Şekil 4.7 : Tip – 1, Tip – 2 ve Tip – 3 kolon imalatı aşamaları.	78

Şekil 4.8 : Impact yöntemi ile DKK elemanı imalat aşamaları.	79
Şekil 4.9 : Öteleme yöntemi ile TK elemanı imalat aşamaları.	80
Şekil 4.10 : Ön delgi yöntemi ile TK elemanı imalat aşamaları.	81
Şekil 4.11 : DKK ve TK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testleri.	83
Şekil 4.12 : Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanları için yük-oturma grafiği.	84
Şekil 4.13 : Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları için yük-oturma grafiği.	84
Şekil 4.14 : Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları için yük-oturma grafiği.	85
Şekil 4.15 : SP, SPD ve SPR için yük-oturma grafiği.	85
Şekil 4.16 : SP, SPD ve SPR için gerilme-oturma grafiği.	87
Şekil 4.17 : SP, SPD ve SPR için gerilme- rijitlik grafiği.	87
Şekil 5.1 : Temsili zemin profili.	89
Şekil 5.2 : Sonlu elemanlar ağı.	91
Şekil 5.3 : Impact sistemi ile DKK imalatı Plaxis modeli.	92
Şekil 5.4 : Impact sistemi için Plaxis modeli.	93
Şekil 5.5 : Impact sistemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.	93
Şekil 5.6 : Öteleme yöntemi ile TK imalatı Plaxis modeli.	94
Şekil 5.7 : Öteleme yöntemi için Plaxis modeli.	95
Şekil 5.8 : Öteleme yöntemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.	95
Şekil 5.9 : Ön delgi yöntemi ile TK imalatı Plaxis modeli.	97
Şekil 5.10 : Ön delgi yöntemi için Plaxis modeli.	98
Şekil 5.11 : Ön delgi yöntemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.	98
Şekil 6.1 : SP, SPD ve SPR için gerilme-şekil değiştirme.	101
Şekil 6.2 : Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı.	101
Şekil A.1 : SK-1 nolu sondaj logu.	111
Şekil A.2 : SK-2 nolu sondaj logu.	112
Şekil A.3 : S-1 nolu sondaj logu.	113
Şekil A.4 : CPT uç direncinin derinlik ile değişimi.	114
Şekil A.5 : CPT sürtünme direncinin derinlik ile değişimi.	115
Şekil A.6 : CPT sürtünme oranının derinlik ile değişimi.	116
Şekil A.7 : Los Angeles deneyi sonucu.	117
Şekil A.8 : SP 1 yükleme testi formu.	118
Şekil A.9 : SP 1 yükleme testi formu (devamı).	119
Şekil A.10 : SP 1 yükleme testi formu (devamı).	120
Şekil A.11 : SPD 1 yükleme testi formu.	121
Şekil A.12 : SPD 1 yükleme testi formu (devamı).	122
Şekil A.13 : SPD 1 yükleme testi formu (devamı).	123
Şekil A.14 : SPR 1 yükleme testi formu.	124
Şekil A.15 : SPR 1 yükleme testi formu (devamı).	125
Şekil A.16 : SPR 1 yükleme testi formu (devamı).	126

DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON ELEMANLARINA AİT YÜKLEME TESTLERİNİN SAYISAL ANALİZİ VE SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Gevşek ve yumuşak zeminler üzerine inşa edilecek yapılarda, temeller geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile desteklenmekte olup, bu yöntemlerin maliyetleri günümüz koşullarında ekonomik boyutları aşmaktadır. Bu nedenle, taşıma gücü ve diğer mühendislik problemlerine çözüm yolu sunabilecek ekonomik zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu yöntemlerden birisi, uygulama açısından oldukça pratik olan Taş Kolon (TK) sistemleridir. Günümüzde taş kolon uygulamalarının yanı sıra 1980'li yıllarda Amerika'da Dr. Nathaniel Fox tarafından geliştirilen Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) sistemleri ile de temellerin desteklenmesi sağlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında; TK ile DKK sistemlerinin performansları arazi yükleme testleri yardımıyla karşılaştırılmıştır.

Elverişsiz zemin koşullarına sahip olan inceleme alanında SPT ve CPT çalışmaları yapılarak, zemin tabakalarına ait mühendislik parametreleri geliştirilmiş ve temsili zemin profili oluşturulmuştur. İnceleme alanında üç farklı tipte imalat yöntemi ile dört adedi DKK elemanı ve dört adedi ise TK elemanı olmak üzere toplamda sekiz adet kolon imal edilmiştir. Aynı çaplarda (50 cm) ve boylarda (6.50 m) imal edilen bu kolonlar üzerinde, kolonlara ait taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak arazi yükleme testleri gerçekleştirilmiş olup, yükleme testlerinden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 2D programı analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan tüm değerlendirmeler sonucunda, öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğinin, ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğine oranı yaklaşık 4 olarak elde edilmiştir. Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanı rijitliğinin, öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğine oranı ise 2.2 – 8.8 arasında değiştiği görülmektedir. Tasarım yükü altında ölçülen oturma miktarları değerlendirildiğinde; ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturma, öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturmaya oranı 2 olarak elde edilmiştir. Ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturma, Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanlarında meydana gelen oturmaya oranının ise 5 olduğu görülmüştür.

Özetle, günümüz koşullarında uygulama kolaylığının yanı sıra ucuz ve etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olarak bilinen ve TK elemanlarına göre oldukça rijit olan DKK elemanlarının, oturma ve taşıma kapasitesi yönünden etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu gerçekleştirilen arazi yükleme testi sonuçları ile kanıtlanmıştır.

COMPARISON OF THE RESULTS OF LOAD TEST DONE ON STONE COLUMNS AND RAMMED AGGREGATE PIERS USING NUMERICAL MODELLING

SUMMARY

Foundations of the buildings which will be constructed on loose and soft soil are improved by one of the soil improvement methods, but in today's conditions the cost of these methods can exceed the budget. Therefore, economical methods that can provide solutions to the bearing capacity and other engineering problems have been developed. One of them is the Stone Column method which is quite practical at production phase. Nowadays the foundations are also supported by Rammed Aggregate Pier (RAP) method which was developed by Dr. Fox at USA in 1980's. In this research; performance of stone column (SC) and rammed aggregate pier (RAP) are compared with the results of loading tests done in the field.

SPT and CPT tests were performed to obtain the engineering properties of soil on site. In study area, four stone columns and four rammed aggregate piers were constructed with three different methods and on all columns which have the same diameter (50 cm) and the length (6.50 m), the loading tests were performed to obtain the bearing capacity and stiffness of columns. The results of loading tests and finite element method obtained by PLAXIS 2D were evaluated. All results indicate that the ratio of stiffness for SC named as displacement method to stiffness for SC named as replacement method is about four. Also, the ratio of stiffness for RAP (Impact Method) to stiffness for SC named as displacement method ranges from about 2.2 to 8.8 as a function of applied stress. In addition, the ratio of settlement for SC named as replacement method to settlement for SC named as displacement method is about two. Also, the ratio of settlement for SC named as replacement method to settlement for RAP (Impact Method) is about five.

In conclusion, Rammed Aggregate Piers are more suitable, cheap, effective and have more stiffness compared to Stone Columns. The loading test results show that rammed aggregate piers perform better in terms of settlement and bearing capacity.

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği projelerinde mevcut zeminin yapıyı destekleyebilecek kapasitede olmaması durumunda zemin iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir. Söz konusu yapıların geoteknik ve sismik risklerinin değerlendirilmesi sonucu, yüzeysel temellerle güvenli olarak desteklenemeyeceğine karar verildiğinde, inşaat yerinin değiştirilmesi ya da istenilen özelliklere sahip olmayan zeminin kaldırılarak yerine uygun zeminlerin kullanılması tercih edilebilir. Ancak bu çözümlerin kullanılabilirliği gerek teknolojik ve gerekse ekonomik nedenlerle uygun görülmemektedir. Bu gibi durumlarda, çalışma alanındaki farklı zemin yapısı ve yeraltı suyu durumları için farklı zemin iyileştirme yöntemleri önerilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, ya zeminin boşluk oranının mekanik araçlarla sıkıştırılarak azaltılması ya da zemin boşluklarının çeşitli bileşimlerdeki karışımlarla doldurularak, zeminin şekil değiştirme özelliğinin kısıtlanmasıdır. Elverişsiz zemini, üst yapı yüklerini destekleyebilecek duruma getirebilmek amacıyla uygulanan bu yöntemlerle, zayıf zeminin taşıma kapasitesinin artırılması, toplam oturmanın azaltılıp konsolidasyon oturmasının hızlandırılması, zeminin permeabilitesinin azaltılması, zeminin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması, dolgu ve şevlerin stabilitesinin sağlanması hedeflenmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemleri uygulandığında zeminin; kayma mukavemeti artar, kumlu zeminlerin sıkılığı, killi zeminlerin kıvamı iyileşir, sıkışabilirliği azalır, şişme ve büzülme potansiyeli düşer, permeabilitesi azalır, borulanmaya karşı mukavemeti artar, sıvılaşma potansiyeli azalır ve zemin homojen hale gelir.

Dünyada ve ülkemizde çok sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda sıralanmıştır:

- Darbeli Kırmataş Kolonlar
- Taş Kolonlar
- Kum Kazıklar-Düşey Drenler
- Ön Yükleme
- Derin Karıştırma

- Vibrokompaksiyon-Vibroflasyon
- Dinamik Kompaksiyon (Ağırlık Düşürme)
- Kompaksiyon Enjeksiyonu
- Jet Enjeksiyonu
- Patlatma
- Geotekstil ve Geosentetikler ile Güçlendirme
- Kimyasal Enjeksiyon

Temel inşaatı yönünden sorunlu oldukları varsayılan zemin türleri için yukarıda bahsedilen iyileştirme yöntemlerinden birisi veya birkaçı uygulanabilir, ancak bu yöntemlerin hepsinin benzer zemin koşullarında uygulanması mümkün değildir.

Ayrıca, günümüzde yapı ağırlıklarının artması sebebi ile derin temellere eğilimin arttığı gözlemlenmektedir. Oysa, örneğin, kazık gibi pahalı bir seçeneğe başvurmadan önce yukarıda bahsettiğimiz zemin iyileştirme yöntemlerinden projeye uygun olanı seçilerek yüzeysel temel olanağı değerlendirildiğinde önemli maliyet düşüşleri sağlanabildiği deneyimlerle görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, kohezyonsuz zeminlerde (ince dane oranı < %20) kolon etrafındaki zeminin sıkışmasını, kohezyonlu zeminlerde ise zemin içerisinde nispeten rijit kolonların oluşturulmasını sağlayan ve yüzeysel temellerin zeminlerinde kullanılabilen Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) ve Taş Kolon (TK) sistemleri ele alınacaktır. Bu kapsamda, Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon elemanları üzerinde uygulananan yükleme testi sonuçlarının karşılaştırılması ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Son zamanlarda zemin iyileştirme amacıyla sıklıkla tercih edilmeye başlanan DKK ve TK elemanların sayısal modellenmesi PLAXIS 2D programıyla gerçekleştirilmiştir. İmal edilen kolonlar üzerinde uygulanan yükleme testi sonuçlarının değerlendirilmesiyle, kolonlara ait tasarım parametrelerinin (kolon taşıma kapasitesi, kolon rijitlik modülü, vb.) doğruluğu teyit edilmektedir. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılarak, günümüzde zemin iyileştirme yöntemi olarak hangi sistemin tercih edilmesinin daha doğru olacağı vurgulanmaktadır.

1.2 Genel

Zemin iyileştirme yöntemleri içerisinde yer alan Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) ve Taş Kolon (TK) sistemleri için literatür çalışması yapılmış olup, bu çalışmalardan birkaçı aşağıda özetlenmiştir. İleriki bölümlerde DKK ve TK uygulamalarına genişçe yer verilerek, anlatımlar içerisinde literatürdeki diğer çalışmalardan bahsedilecektir.

Durgunoğlu ve diğ. (1992) Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası bölgesinde taş kolon uygulaması ile zemin ıslahı amacına yönelik olarak, taş kolonların projelendirilmesi ve kalite kontrolü ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Söz konusu bölgede, sıvılaşma iyileştirmesine yönelik olarak 50 cm çapında ve 12 m boyunda taş kolon imalatı yapılmıştır. Ayrıca, yüksek stok sahası yüklerini taşımak ve oturumları azaltmak amacıyla 60 cm çapında sağlam zemine uzanan TK uygulaması gerçekleştirilmiştir.

TK elemanları muhafaza borusunun üstten darbe ile sürülmesi ile oluşturulmuştur. Bu yöntemde, ucu saç tapa ile kapalı olan muhafaza borusu üstten bir darbeli dizel çekiç ile vurularak istenilen derinliğe kadar sürülmüş olup, boru içerisine taş kolon malzemesi doldurulmuştur. Daha sonra boru titreşim ile yukarıya çekilerek imalat tamamlanmıştır. TK imalatında kullanılan malzeme; temiz, sert, plastik olmayan, kimyasal reaksiyona girmeyen, dane boyutu 10-100 mm olan ve içerdiği 200 No'lu elekten geçen ince malzeme miktarı % 5'den az olan doğal kırmataştır.

Bu çalışmada, zemin tabakalarının değişimine göre uygulama alanı dört bölgeye ayrılarak projelendirilmiş olup, zemin ıslah derecesinin proje kriterleri ile karşılaştırılabilmesi için CPT ve bölge yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda, uygulama bölgeleri 200 veya 400 adetlik taş kolon alanlarına bölünerek her bir deney alanında ikisi taş kolon imalatı öncesi, dördü ise taş kolon imalatı sonrasında olmak üzere toplam altı adet CPT deneyleri ve tesis genelinde ikisi taş kolon uygulanmamış alanda, ikisi ise taş kolon uygulanmış alanda olmak üzere toplam dört adet bölge yükleme deneyleri yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Sürtünme oranı (FR) > % 3 olan killi zemin tabakalarında, ıslah öncesi ve sonrası CPT uç mukavemeti değerlerinde belirgin bir fark olmamaktadır. Hassas kil tabakalarında taş kolon uygulaması sonrasında CPT uç mukavemetinin azaldığı başka deney kesimlerinde gözlenmiştir.

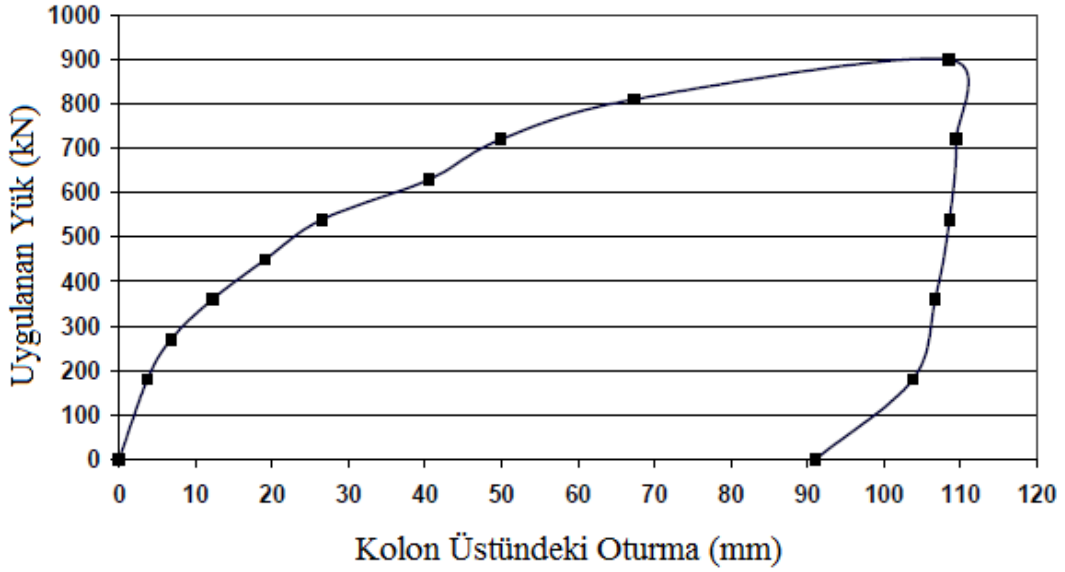
- Sürtünme oranı (FR) < % 3 olan kum-silt tabakalarında ise, taş kolon uygulaması sonrasında ölçülen CPT uç mukavemetleri, ıslah öncesi CPT uç mukavemetlerinden ortalama % 73 daha fazladır.
- Taş kolon uygulaması sonrasında nihai ıslah derecesinin çakım sonrası oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için belirli bir süre beklendikten sonra yapılan CPT uç mukavemeti değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir.
- Bölge yükleme deneyleri neticesinde, yük-oturma grafiğinin (300 ton yük) 19 t/m^2 zemin gerilmesine kadar benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Ancak, 19 t/m^2 gerilme sonrasında taş kolon uygulanmayan bölgede oturmalar hızlı bir şekilde artarak zeminde bir taşıma kapasitesi göçmesi olduğu gözlenirken, taş kolon olan bölgede oturmalarda bu tür bir hızlanma olmayıp, uygulanan maksimum (430 ton yük) 27 t/m^2 zemin gerilmesine kadar bu tür bir göçme olmadığı gözlenmiştir.

Böylelikle, zemin sıvılaşması, yüksek oturma ve taşıma kapasitesi sorunu olan zeminlerin TK elemanları ile verimli bir şekilde ıslah edilebileceği uygulamadan örnekler ile gösterilmiştir.

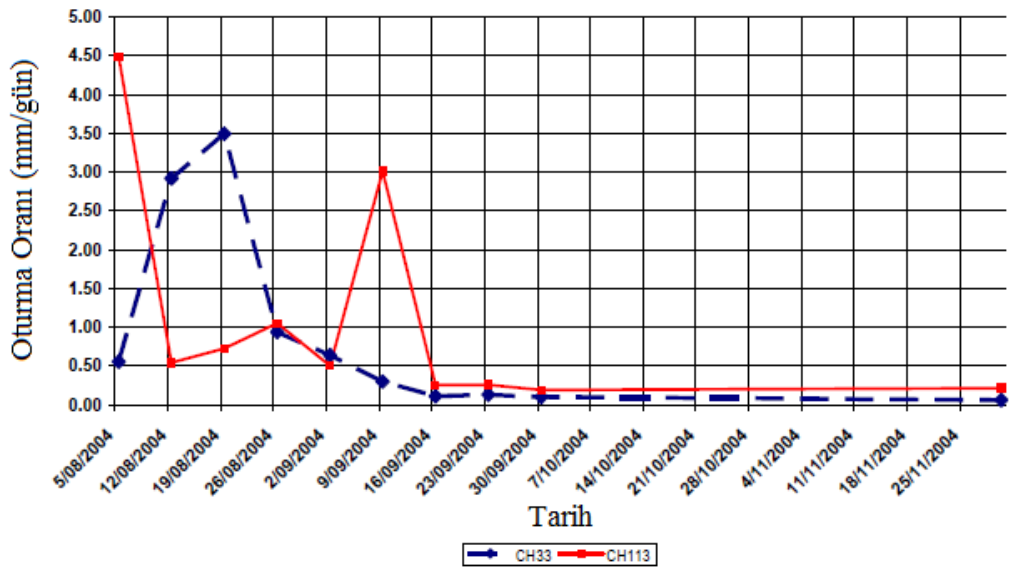
Liew ve Tan (2007), yumuşak zemin tabakası içinde imal edilen TK elemanlarının davranışını yükleme testleri ile incelemiştir. Proje kapsamında teşkil edilmesi planlanan 10 m yüksekliğindeki toprakarme duvarın düşey ve yatay stabilitesinin sağlanması amacıyla teknik ve ekonomik sebeplerden dolayı taş kolon uygulamasına karar verilmiştir. Bölgedeki idealize zemin profili; 12 m kalınlığında kıvamı derinlik ile artan çok yumuşak kumlu kil tabakası altında sağlam (taşıyıcı) tabakanın devam ettiği şeklinde tanımlanmıştır. Söz konusu yapının desteklenmesi amacıyla 100 cm çaplı taş kolonların merkezden merkeze 2.0 m karelaç ile uygulanması kararlaştırılmıştır. Taş kolonların projelendirilmesi (kolonun yanal genişleme kontrolü, kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımı, zeminin ve kolonun taşıma kapasitesi, iyileştirme sonrası oturma durumu vb.) literatürde belirtilen tasarım yöntemleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiş olup, tasarımın performansını incelemek amacıyla 1.0 m x 1.0 m boyutlarındaki plaka üzerinde yükleme testleri yapılmıştır.

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi 900 kN maksimum yük altında oturma miktarı 110 mm olarak ölçülmüştür. İyileştirme olmadan önce tahmin edilen oturma miktarı 650 mm mertebelerinde iken, taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede tahmin edilen oturma miktarı 250-280 mm mertebelerindedir. Söz konusu yapının inşaatından

sonra da devam eden oturma miktarlarının ölçümü yapılmış olup, 4 aylık bir zaman diliminde oturmaların halen 115 mm mertebelerinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca en kritik iki kesimdeki oturma oranının yıl sonunda 0.2 mm/gün olduğu görülmüştür (Şekil 1.2). Toprakarme duvarın imlatından 6 hafta sonra yumuşak kil birimlerde gözlemlenen bu sıkışmanın taş kolonların etkin bir drenaj sistemi olarak da çalıştığını göstermektedir.



Şekil 1.1 : Yük-oturma grafiği.



Şekil 1.2 : Zamana bağlı oturma oranı.

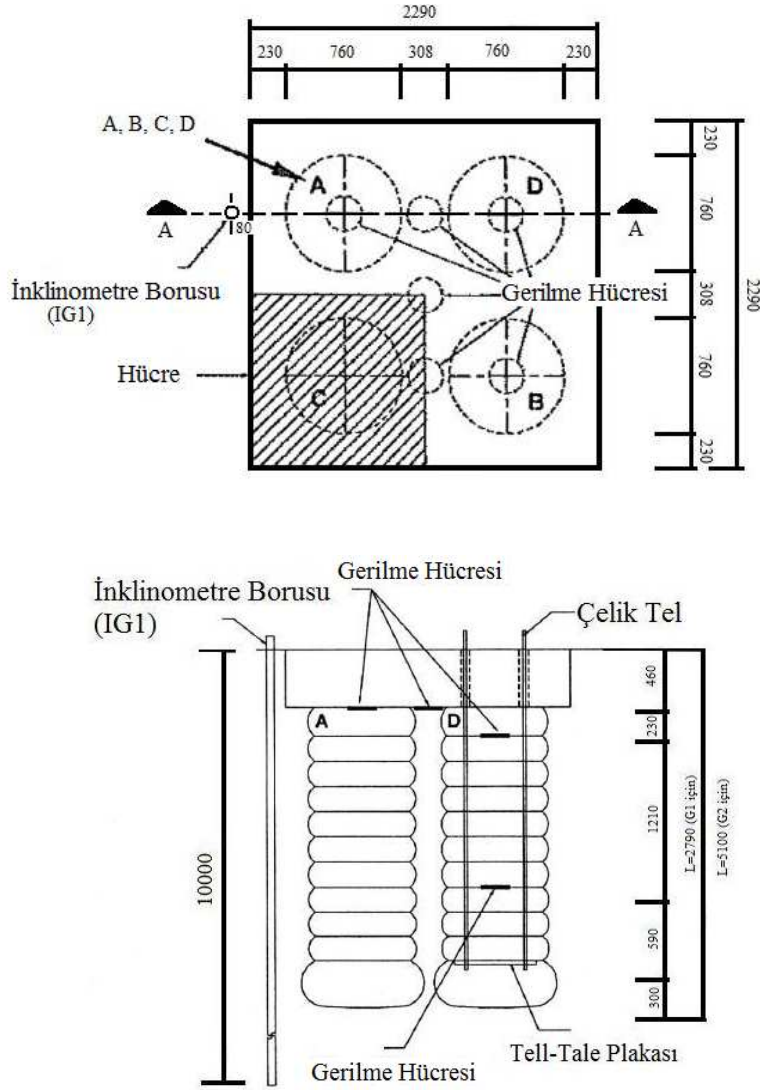
White ve diğ. (2007), Iowa eyaletinin Neola bölgesinde imal edilen tekil DKK ve grup DKK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testi sonuçları ile yük-oturma davranışını inceleyerek, oturma ve taşıma kapasitesi açısından grup etkisini, kolon üzerindeki gerilme konsantrasyonunu ve gerilmenin derinlik ile değişimini aletsel gözlemleri de (230 mm çaplı gerilme hücreleri, kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale), inklinometre) kullanarak yorumlamışlardır. G_1 ve G_2 olarak adlandırılan grup elemanların her biri, 0.76 m çapında 1.07 m karelaj ile imal edilen dört tekil kolondan oluşmaktadır. G_1 ve G_2 için kolonların ortalama imalat boyları sırasıyla, 2.79 m ve 5.10 m dir. Şekil 1.3’de gösterildiği gibi ikisi B ve D kolonlarının üst ve orta seviyelerine, biri A kolonunun üst seviyesine, üçü ise kolonların arasında olacak şekilde sekiz adet gerilme hücresi yerleştirilmiştir. Çizelge 1.1’de sıkıştırılmış agreganın ve çalışma alanına ait birimlerin mukavemet özellikleri özetlenmiştir. Yeraltı suyu zemin yüzeyinden 2.0 m aşağıda ölçülmüştür.

Çizelge 1.1 : Sıkıştırılmış kırmataşın ve kil birimlerin mukavemet özellikleri.

No	USCS Sınıflama	γ (kN/m ³)	ω_n (%)	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	S_u (kPa)	K_o (---)	c_c (---)	E_s (MPa)
1	Sıkıştırılmış kırmataş (GP)	20.6	6	4 ^a	47 ^a	12 ^a	-	-	-	85 ^a
2	Kil tabakası (CL)	18.9	36	2 ^b	24 ^b	0	30 ^c	0.6	0.1	3.5 ^e
3	Kurumuş tabaka (CL)	18.9	36	2	35 ^d	0	150 ^d	1.0	-	8.0 ^e

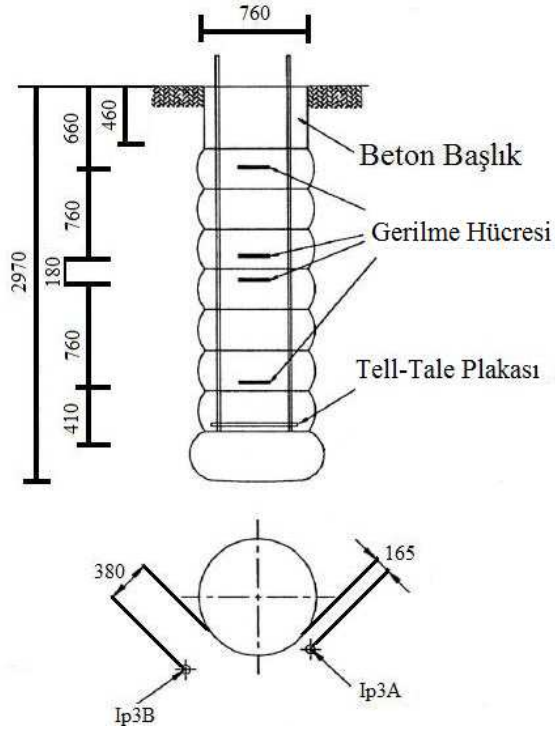
^aCD üç eksenli basınç deneyi, ^byerinde kesme deneyi, ^cUU üç eksenli basınç deneyi, ^dCPT, ^eyerinde yapılan ölçümlerin ortalaması

G_1 grubu içerisinde yer alan A kolunu köşesinden 310 mm uzaklığa yerleştirilen 70 mm çaplı, 10 m uzunluğunda inklinometre borusu yerleştirilerek kolon imalatı öncesinde, sonrasında ve yükleme sırasında okumalar alınmıştır (Şekil 1.3). Bunlara ek olarak, C ve D kolonlarının alt kotundan itibaren sıkıştırılmış ilk tabaka üzerine 225 mm genişliğinde, 13 mm kalınlığında kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) yerleştirilmiştir. Ayrıca, ikisi (P_1 ve P_2) sırasıyla G_1 ve G_2 ile aynı boylarda, biri (P_3) ise 2.97 m boylarında olacak şekilde üç adet tekil kolon imal edilmiştir. P_3 olarak adlandırılan tekil kolon üzerine Şekil 1.4’de gösterildiği gibi dört adet gerilme hücresi ile birlikte I_{P3A} ve I_{P3B} olarak tanımlanan ve sırasıyla kolon kenarından 165 mm ve 380 mm uzaklıkta olacak şekilde iki adet inklinometre borusu yerleştirilmiştir. Tüm tekil kolonlara ise kolon altı oturma okuma (tell-tale) plakası yerleştirilmiştir.



Şekil 1.3 : Ölçümleme (a) plan (G₁) (b) kesit A-A (G₁).

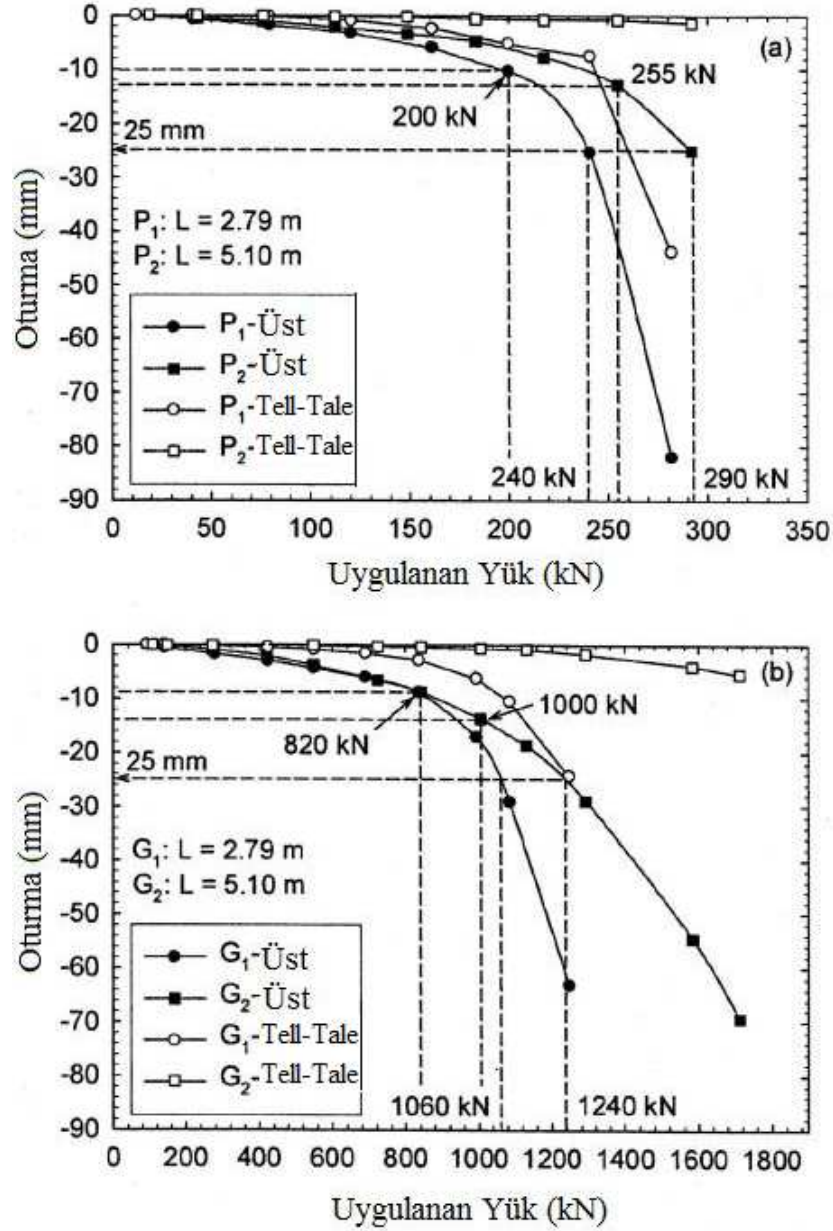
Tekil kolon ve grup kolonlar üzerinde uygulanan yükleme testi sonuçları Şekil 1.5’de gösterilmiştir. Yükleme testi grafiklerinde gösterilen kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) için yük-oturma ilişkisi incelendiğinde, daha uzun kolon boyuna sahip olan P₂ ve G₂ ile karşılaştırılan P₁ ve G₁ kolonlarının alt kotunda oluşan deformasyonun daha fazla olduğu görülmektedir. Tekil kolonlar taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında, P₂ kolonunun P₁ kolonundan kısmen de olsa daha rijit olduğu söylenebilir. Grup kolonları karşılaştırdığımızda ise 820 kN luk yüke kadar olan kısımlar oldukça benzerlik göstermekte iken 820 kN dan daha fazla uygulanan yükleme durumlarında uzun kolonlardan oluşan G₂ grubunun daha rijit yük-oturma davranışı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1.4 : Ölçümleme (P₃).

Aletsel gözleminde yapıldığı yüklemeye testleri sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Yüksek yükler altında, kısa kolonlarda (P₁ ve G₁) uç yenilmesi, uzun kolonlarda (P₂ ve G₂) da ise yanal genişleme yenilmesi oluşmuştur. Hangi tip deformasyon yenilmesi oluştuğunu kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) kullanılarak elde edilen yük-oturma grafiğinden rahatlıkla anlaşılabilir. Bunun da ötesinde inklinometre sonuçlarından elde edilen çevre zeminde oluşan yatay deformasyonlar, kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) ile ölçülen yenilme türlerini de doğrulamaktadır.
- G₁ ve G₂ gruplarının her ikisi için de grup etkisinin (grupun üzerindeki toplam yük / tekil kolon üzerindeki yük x kolon sayısı) 1.0 olduğu görülmüştür. Gerilme konsantrasyon oranının uygulanan yükün artmasıyla orantılı olarak 4 ile 5 arasında olduğu ölçülmüştür. Tekil kolon ile grup içerisindeki bir kolon karşılaştırıldığında, düşey gerilmenin tekil kolon boyunca daha hızlı sönümlendiği görülmüştür.
- Aynı çap ve uzunluktaki tekil kolon ile grup içerisindeki bir kolon karşılaştırıldığında, her iki kolon içinde rijitliklerin benzer olduğu söylenebilir.



Şekil 1.5 : Yük – oturma grafiği.

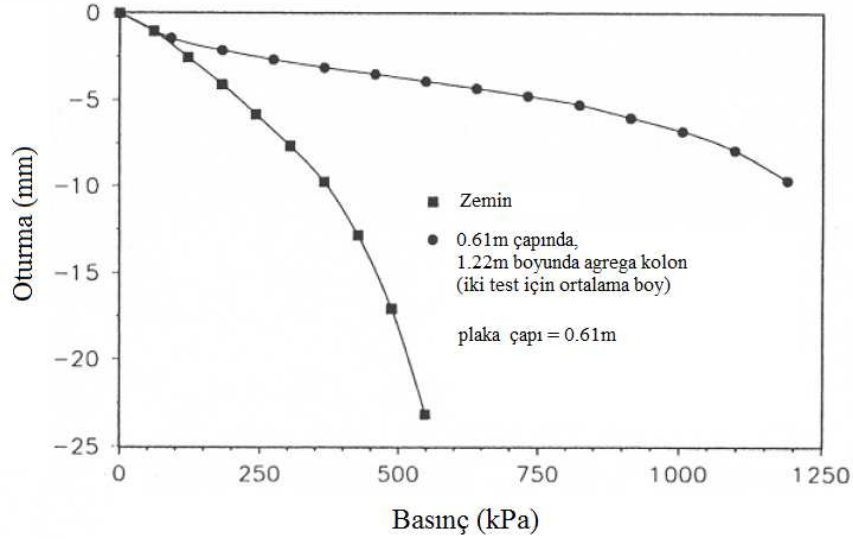
Lawton ve Fox (1994), elverişsiz zeminin kaldırılıp, yerine sağlam dolgu yerleştirilmesiyle yapılan zemin iyileştirme yöntemine alternatif olarak geliştirilen kısa agrega kolonların, derin temellere de alternatif olduğunu araştırmışlardır. Bu kapsamda, kısa agrega kolonlar ile desteklenmiş yüzeysel temeller ile projelendirilmiş on adet projeyi incelemişlerdir. Projelere ait veriler ile birlikte tahmin edilen ve gerçekleşen oturma miktarları Çizelge 1.2’de özetlenmiş olup, bu projelerden iki tanesine ait proje detaylarına aşağıda yer verilmiştir.

Çizelge 1.2 : DKK projeleri için tahmin edilen ve gerçekleşen oturma miktarları.

Proje Tanımı	Temel Tanımı	Yük (kN)	Taşıma Kapasitesi (kPa)	Oturma (mm)		Gerçekleşen
				Tahmin Edilen		
				İyileştirilmemiş Zeminde	DKK ile İyileştirilmiş Zeminde	
5 katlı ofis binası, Columbia-SC	3.66m (kare tekil temel)	3560	266	33 – 102	18	< 1.5
Süt silosu (H=12m), Atlanta-GA	4.57m (kare tekil temel)	3010	144	48 – 104	13	< 1.8
46m x 91m sera, Atlanta-GA	0.91m (daireysel temel)	160	244	58 – 79	5	< 6
Sanayi deposu, Winterset-IA	1.52m (kare tekil temel)	445	193	150 – 230	23	< 19
Ofis binası, Orangeburg, SC	1.07m x 2.13m (tekil temel)	801	352	41 – 112	13	< 13
Hastane binası, Hickory-NC	12.2m (kare radye temel)	4715	317	61 – 109	10	< 3.3
Hastane binası, Hickory-NC	2.74m (kare tekil temel)	1824	242	30 – 104	13	< 6
16 katlı kule, Atlanta-GA	15.2m x 30.5m (radye temel)	6672	144	20 – 89	10	3 – 8, ort. 6
12 katlı kule, Atlanta-GA	3.66m (kare tekil temel)	4448	332	61 – 66	10	< 6
7 katlı otopark, Marietta-GA	4.27m (kare tekil temel)	5782	318	124 – 188	38	20 – 33

Birinci projede, 1991 yılında South Carolina eyaletinin Columbia bölgesinde 91 m x 49 m temel boyutlarına sahip çelik iskelet yapısında 5 katlı bir ofis binası inşa edilmiştir. Bölgedeki zemin tabakaları; 9 m-12 m kalınlığındaki gevşek-orta sıkı siltli kum (SM) altında devam eden orta sıkı-sıkı killi kum (SC) olarak tanımlanmıştır. Projeye ait kolon yükleri 222 kN – 3460 kN, ve duvar yükleri ise 58 kN – 102 kN arasında değişmektedir. Geoteknik danışmanlar bu zeminin yüzeysel bir temeli destekleyemeyeceğine karar vermişler ve kısa agrega kolonlar ile mevcut problemi ortadan kaldırmayı hedeflemişlerdir. 0.61 m çapında ve 1.2 m boyunda imal edilen agrega kolonlar üzerinde iki adet yükleme testi yapılmış ve her iki test de birbirine yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 1.6). Basınç – oturma ilişkisi neredeyse lineer bir davranış göstermekle birlikte, 1000 kPa lık gerilme altında rijitlik modülü 149 MN/m^3 olarak ölçüldü (bu değer neredeyse başlangıçta kabul edilen değer iki katıdır). İyileştirilmiş zemin için taşıma kapasitesi 287 kPa olup, bu değer iyileştirilmemiş zemin için verilen değer yaklaşık dört katıdır. Yapılan analizlere göre iyileştirilmiş zeminde oturma miktarı 18 mm olarak tahmin edilmektedir. 6 ay

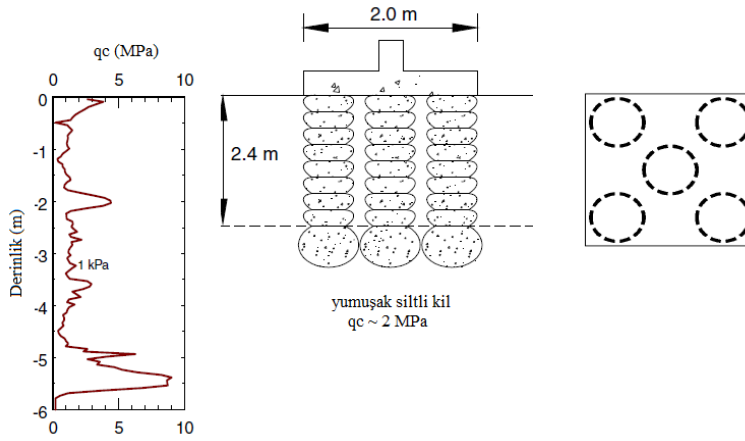
sonra yapının inşaatı tamamlanmış ve ana müteahit tarafından 12 adet agrega kolonu elemanı üzerinde oturma araştırması yapılmıştır. Ölçülen oturma miktarları 1.6 mm civarında olup, tahmin edilen oturma miktarı ile uyum sağladığı görülmüştür.



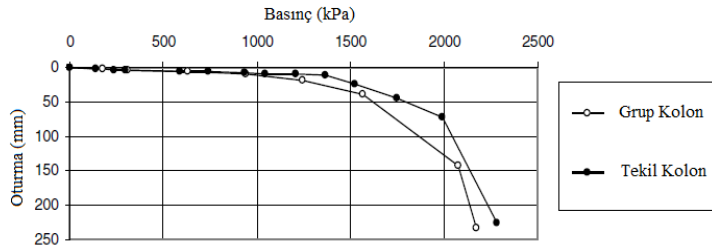
Şekil 1.6 : İyileştirilmemiş zemin ve agrega kolonlar ile iyileştirilmiş zemin için yükleme testi (Columbia, SC).

İkinci proje ise, Georgia eyaletinin Atlanta bölgesinde inşa edilen 12 m yüksekliğinde ve 3.7 m çapındaki çelik iskelet yapısına sahip süt siloları için gerçekleştirilen bir araştırmayı kapsamaktadır. Bu çalışma, kısa agrega kolonlara iyi bir örnek olmasının yanı sıra, imalat öncesinde yükleme testi yapılmayıp, projenin kendisi tam ölçekli yükleme gerçekleştirdiği için oldukça ilginç bir proje olmasıyla bilinmektedir. Zemin profili, SPT N sayıları 8 m-10 m derinliklere doğru artış gösteren, ortalama N=3 olan yumuşak kumlu-mikalı silt (ML) olarak tanımlanmıştır. 0.61 m çapında ve 1.5 m boyundaki agrega kolonlar üzerinde dinamik penetrasyon testleri yapılmış olup, darbe sayılarının 20-42 arasında değiştiği ve bu sıklığın %100 modifiye proctor sıklığını aştığı görülmüştür. Yapılan analizlere göre 144 kPa lık gerilme altında iyileştirilmiş zeminde oturma miktarı 13 mm olarak tahmin edilmektedir. 3 ay sonra silolar doldurulmuş ve son oturma davranışının araştırılması için üç okuma alınmıştır. Bu okumalar, toplam oturmaların 1.5 mm ile 1.8 mm arasında değiştiğini ve farklı oturmaların ise 2.5 mm den az ölçüldüğünü göstermektedir. Wissmann ve diğ. (1997) Utah Üniversitesi ve Iowa Üniversitesi'nde yapmış oldukları bir çalışmada Darbeli Kırmataş Kolon elemanların grup etkisini araştırmışlardır.

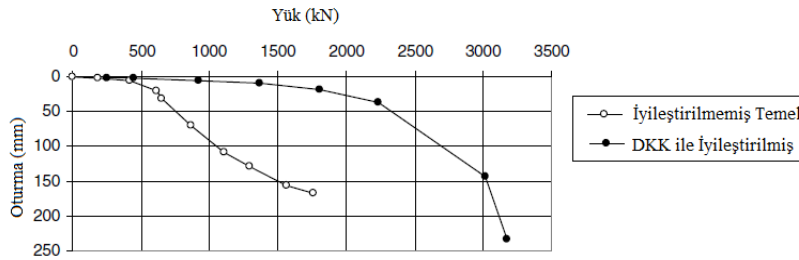
Tam ölçekli arazi yükleme testleri ile tekil kolonların, grup kolonlar ile desteklenen temellerin ve kolonlar ile desteklenmeyen temellerin davranışlarını inceleyerek elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Kolonların imalatı Bölüm 3.2.2’de anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Salt Lake City, Utah bölgesine ait zemin profili, uç direnci (q_c) 1 MPa olarak 5m derinliklere kadar devam eden kil-silt birimlerden oluştuğu belirtilmektedir (Şekil 1.7). Bu bölgede; 1) 0.60 m çapında ve 2.4 m boyundaki tekil kolon üzerinde yükleme testi, 2) 2.4 m boyunda beş adet DKK ile desteklenen 2.0 m genişliğindeki kare temel üzerinde grup yükleme testi, 3) DKK ile desteklenmeyen 2.0 m genişliğindeki kare temel üzerinde tam ölçekli yükleme testi gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Şekil 1.8 ve Şekil 1.9’da gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : İnceleme alanı, Utah (a) CPT sonucu (b) kesit (c) plan.

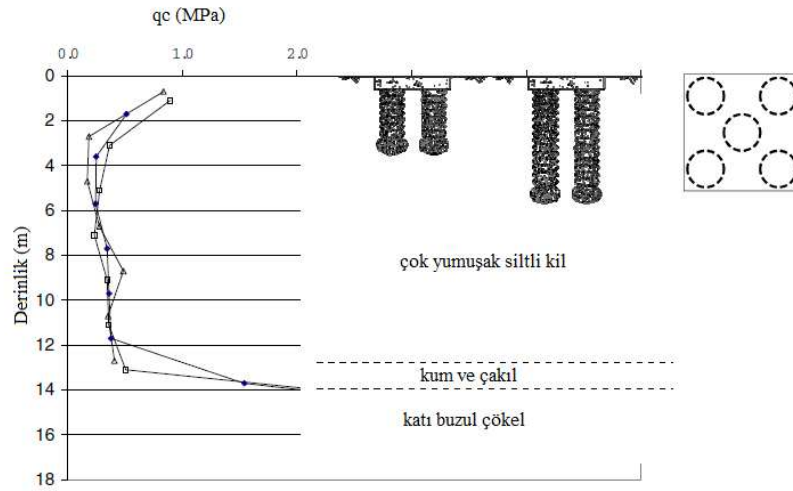


Şekil 1.8 : Tekil kolon ve grup kolon yükleme testi, Utah.

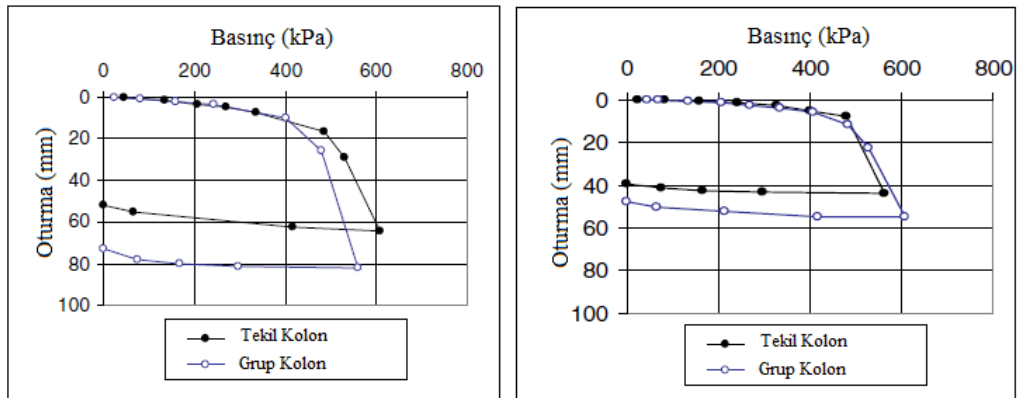


Şekil 1.9 : Grup kolon yükleme testi, Utah.

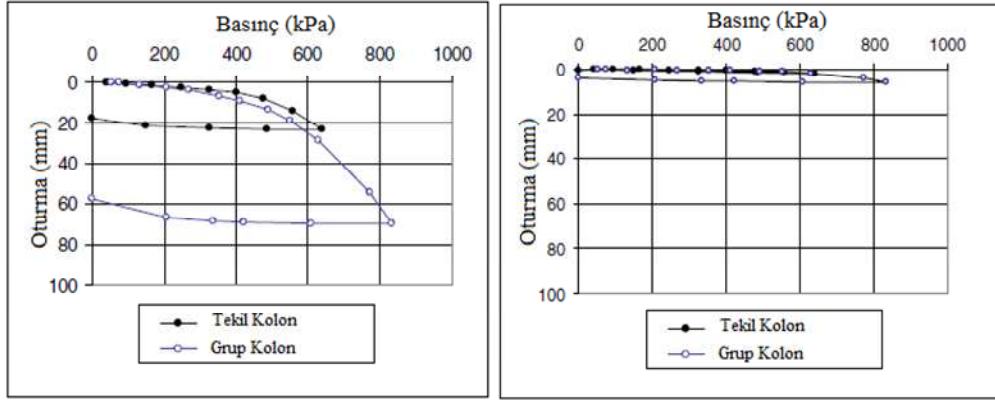
Pottawattamie County, Iowa bölgesine ait zemin profili ise, uç direnci 0.3 MPa ile 0.4 MPa arasında değişen çok yumuşak siltli kil olarak tanımlanmıştır (Şekil 1.10). Bu bölgede ise; (1) 0.76 m çapında ve 2.3 m boyundaki tekil kolon üzerinde yükleme testi, (2) 2.3 m boyunda dört adet DKK ile desteklenen 2.3 m genişliğindeki kare temel üzerinde grup yükleme testi, (3) 0.76 m çapında ve 4.6 m boyundaki tekil kolon üzerinde yükleme testi, (4) 4.6 m boyunda dört adet DKK ile desteklenen 2.3 m genişliğindeki kare temel üzerinde grup yükleme testi gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Şekil 1.11 ve Şekil 1.12’de gösterilmiştir.



Şekil 1.10 : İnceleme alanı, Iowa (a) CPT sonucu (b) kesit (c) plan.



Şekil 1.11 : Kısa kolonlar için yükleme testi, Iowa (a) kolon üstü davranışı (b) kolon altı davranışı.



Şekil 1.12 : Uzun kolonlar için yükleme testi, Iowa (a) kolon üstü davranışı (b) kolon altı davranışı.

Buna göre, araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar:

- Her iki çalışma sahasında da kısa ya da uzun kolonlar ile desteklenen temeller için tekil ve grup yükleme testlerinden elde edilen kolonun üst seviyesindeki gerilmeye karşı oturma grafiği sonuçları oldukça yakındır.
- DKK ile iyileştirilmiş bölge olarak tanımlanan üst bölge içinde tahmin edilen DKK rijitliğinin yükleme testleri ile teyidi sağlanmıştır.
- Tekil ve grup yükleme testlerinin her ikisi içinde ölçülen kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) ile kısa kolonların alt seviyelerinde oluşan deformasyonun uç yenilmesi şeklinde meydana geldiği gözlenmiştir.
- Tekil ve grup yükleme testlerinin her ikisi içinde ölçülen kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) ile uzun kolonların üst seviyelerinde oluşan deformasyonun yanal genişleme (bulging) şeklinde meydana geldiği gözlenmiştir.
- Beş adet DKK ile desteklenen temel için, 25 mm oturma kriteri altında taşıma kapasitesinin DKK ile desteklenmeyen temelden üç kat fazla olduğu anlaşılmıştır.

White ve diğ. (2002), Des Moines, Iowa'da bir yol genişletme projesi kapsamında inşa edilecek dolgu temel zemininin iyileştirilmesi amacıyla teşkili gerçekleştirilen Taş Kolon (TK) elemanları ile Geopier® sistemiyle imal edilmiş Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) elemanlarının performansını karşılaştırmışlardır. Bu araştırma, TK ve DKK elemanlarının karşılaştırıldığı ilk proje olması açısından büyük önem taşımaktadır. TK elemanları sıkışabilirliği azaltmak ve kayma dayanımını arttırmak amacıyla, DKK elemanları ise oturmaların azaltılması ve oturma sürelerinin

arttırılması amacıyla imal edilmişlerdir. TK elemanları ile DKK elemanlarının inşa edildiği sahalarda zemin özellikleri büyük oranda benzerlikler göstermekle birlikte, yer yer bazı farklılıklar söz konusu olup, Çizelge 1.3’de zemin özellikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

TK elemanları büyük çaplı ve uzun seçilmiş iken, DKK elemanları küçük çaplı ve kısa, ancak yüksek rijitlikte seçilmişlerdir. Dolgu inşaatı öncesinde tasarım parametrelerini belirleyebilmek için arazi testleri ve tam ölçekli yükleme testleri yapılmıştır. Ayrıca, dolgu inşaatı sırasında dolgu altında oluşacak oturmaları ölçülebilmek amacıyla ölçüm plakaları yerleştirilmiştir.

Bu araştırmada TK ve DKK elemanları farklı amaçlar için tasarlanmış olmalarına rağmen, benzer zemin koşullarında inşa edildiklerinden dolayı her iki sistemin davranışının ve mühendislik özelliklerinin karşılaştırılması sağlanmış olacaktır.

Çizelge 1.3 : DKK ve TK projeleri için zemin özelliklerinin karşılaştırılması.

Açıklama	TK Uygulama Sahası	DKK Uygulama Sahası
Taşıyıcı tabakaya olan mesafe (m)	3 - 13	4 – 6
CPT uç direnci (kPa)	650 - 1000	400 – 950
CPT sürtünme oranı (%)	1.7 – 2.9	3.8 – 6.7

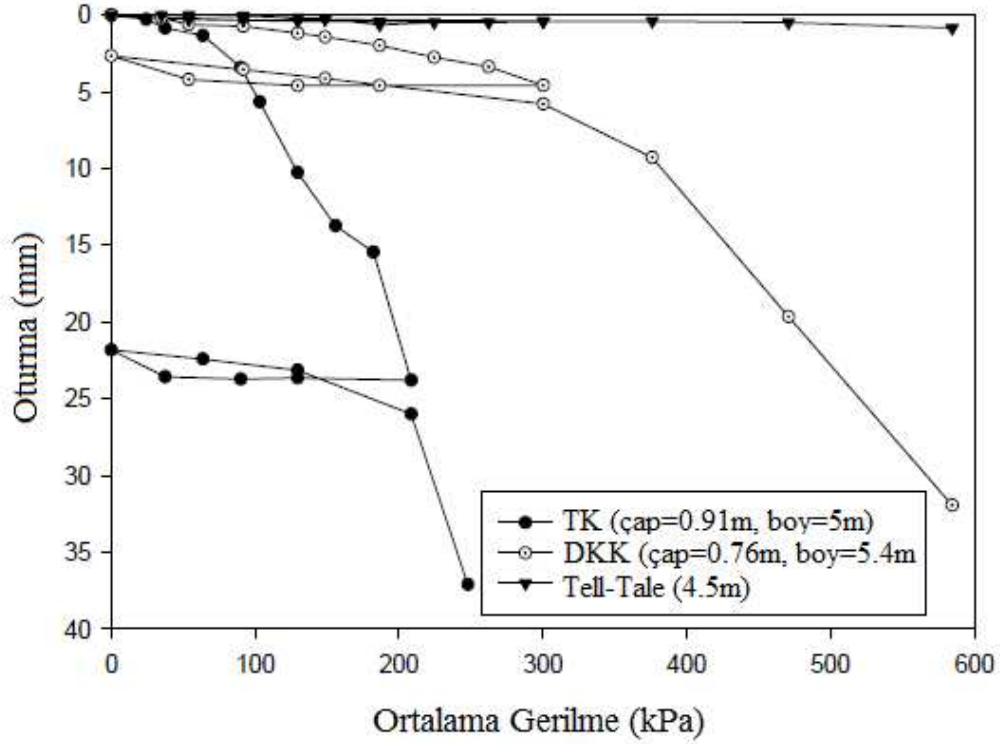
Araştırma sahasında TK elemanları, köprü yaklaşım dolgusu altında oturmaları azaltma ve genel stabiliteyi sağlama amaçlarına yönelik olarak 3 m – 14 m boylarında inşa edilmişlerdir. Diğer sahada ise, oturmaların azaltılması ve oturma sürelerinin arttırılması sağlanarak köprü ayaklarının inşaat sürecinin hızlandırılması hedeflenmiş ve DKK elemanları 4.5 m – 6.5 m boylarında inşa edilmiştir.

Çizelge 1.4 : DKK ve TK elemanlarına ait imalat bilgileri.

İmalat Tipi	İmalat Yöntemi	Kolonların merkezden merkeze mesafesi	Kolon Boyu	Kolon Çapı	Alan Oranı (%)	Dolgu Yüksekliği (m)	Kolon Eleman Sayısı
TK	Vibro-Öteleme Sistemi	1.8m (üçgen yerleşim)	3m – 14m	91cm	23	9	871
DKK	Geopier Sistemi	1.8m (kare yerleşim)	4.5m – 6.5m	76cm	14	8	234

91 cm çaplı ve 5.0 m boyundaki TK elemanı ve 76 cm çaplı 5.4 m boyundaki DKK elemanı üzerinde tam ölçekli yükleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca DKK elemanının alt kotunda oluşacak oturmaları ölçmek amacıyla 4.9 m derinliğine kolon altı oturma

okuma plakası (tell-tale) yerleştirilmiştir. Şekil 1.13'de uygulanan gerilmeye karşı ölçülen deformasyon miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 1.14'de DKK ve TK elemanları için gerilme-rijitlik arasındaki ilişki gösterilmiştir.

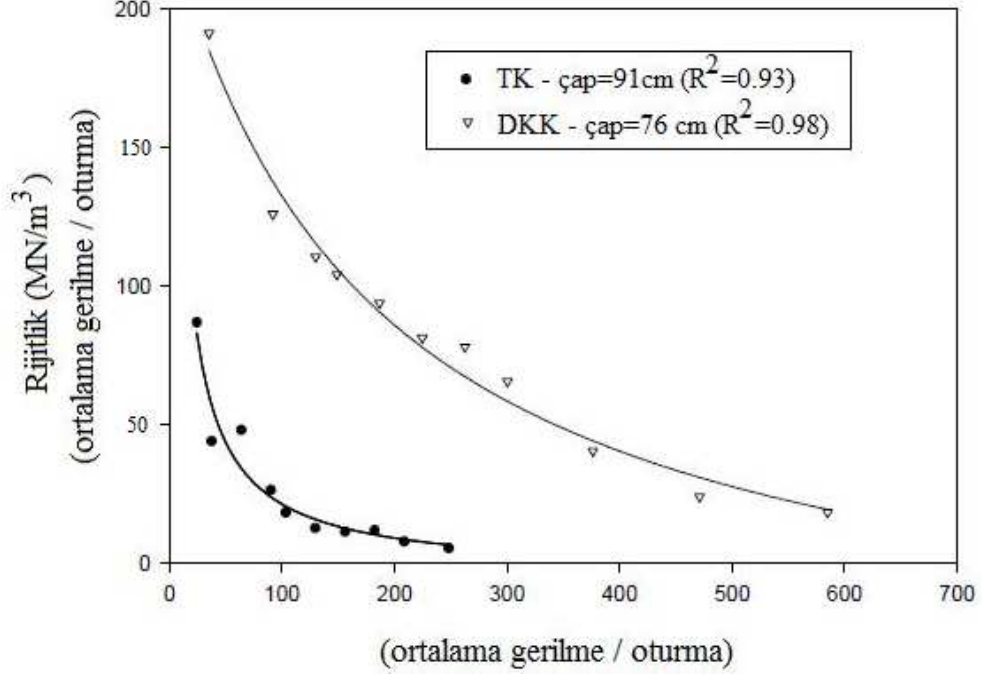


Şekil 1.13 : DKK ve TK elemanları için gerilme-oturma ilişkisi.

Burada rijitlik, Şekil 1.13'de gösterilen gerilme-oturma eğrisinin eğimi olarak tanımlanmıştır. TK elemanı için düşük gerilme seviyelerinde ölçülen 80 MN/m^3 değerindeki rijitlik, 200 kPa gerilme değerlerinde 10 MN/m^3 mertebelerine ölçülmektedir. DKK elemanının rijitliği ise, düşük gerilme seviyelerinde 190 MN/m^3 değerinde ölçülmüş iken, 600 kPa gerilme değerlerinde 80 MN/m^3 olarak ölçülmüştür. Kısacası, DKK elemanlarının rijitliğinin TK elemanlarının rijitliğinden 2.4 ile 9.6 kat fazla olduğunu söylemek mümkündür.

Her iki sahada gerçekleştirilen kapsamlı zemin araştırma sonuçları şu şekildedir;

- CPT sonuçlarına göre; TK imal edilen sahadaki zemin özellikleri DKK imal edilen sahadaki zemin özelliklerinden daha yüksek dayanımlı ve daha az kohezyonludur.
- Her iki kolon sistemi için kullanılan kolon yerleşimi merkezden merkeze 1.8 m olarak belirlenmiştir. Ancak, hem kolon çapının büyük olması hem de eşkenar üçgen dizilim uygulanması sebebi ile elde edilen alan oranı TK elemanları için daha büyüktür.



Şekil 1.14 : DKK ve TK elemanları için gerilme-rijitlik ilişkisi.

- İmalat sonrasında DKK elemanlı zemindeki yanal gerilmenin TK elemanlı zemindeki yanal gerilmeye oranı yaklaşık 2 olarak elde edilmiştir.
- Kolonlar arasında gerçekleştirilen SPT sonuçlarına göre ortalama N değerleri TK uygulanmış sahada 11 iken, DKK uygulanmış sahada 17 olarak elde edilmiştir.
- Yükleme testi sonuçlarına göre, yanal genişlemeye karşı DKK elemanının göstermiş olduğu direncin TK elemanının göstermiş olduğu dirence oranı yaklaşık 4 olarak elde edilmiştir.
- Yükleme testi sonuçlarına göre, DKK elemanının rijitliği TK elemanının rijitliğine oranı 2 ile 9 arasında değişmektedir.
- TK elemanları ile iyileştirilen zeminde meydana gelen oturma, DKK elemanları ile iyileştirilen zeminde meydana gelen oturmadan 3 kat fazladır.

TK uygulamasının genel stabilite güçlendirilmesi amacına uygun olduğu gözlemsel olarak incelenerek kanıtlanmıştır. DKK uygulamasının ise oturmaların azaltılması ve dolgu inşaatının tamamlanıp köprü ayağı inşaatının başlatılması için planlanan 120 gün süreyi 30 güne düşürdüğü görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında; TK ile DKK sistemlerinin performansları arazi yükleme testleri yardımıyla incelenmiş olup; taş kolon ve darbeli kırmataş kolon elemanları için çeşitli imalat yöntemleri, bu yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması, yöntemlerin avantajları ve dezavantajları, özellikleri ve kalite kontrol prosedürleri gibi konulara 2. Bölüm ve 3. Bölüm’de yer verilmiştir. 4. Bölüm’de ise; yükleme testlerinin uygulandığı çalışma alanının kısaca tanıtılmasının ardından zemin araştırma çalışmaları sonucu oluşturulan temsili zemin profili ile birlikte DKK ve TK elemanlarının taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen yükleme testi sonuçları değerlendirilmiştir. 5. Bölüm’de DKK ve TK elemanları üzerinde uygulanan yükleme deneyi sonuçlarının sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS 2D programı ile analizi gerçekleştirilmiştir. Arazi yükleme testlerinden ve Plaxis hesaplamalarından elde edilen tüm sonuçların karşılaştırılması ise 6. Bölüm’de yapılmıştır.

2. TAŞ KOLON (TK) SİSTEMLERİ

Bu bölümde, taş kolon elemanları için çeşitli imalat yöntemleri, bu yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması, yöntemlerin avantajları ve dezavantajları, özellikleri ve kalite kontrol prosedürleri gibi konulara yer verilecektir.

2.1 Genel

Zemin iyileştirme yöntemi olarak yumuşak ya da gevşek zeminlerde uygulanabilen ve ekonomik olması sebebi ile günümüzde sıkça tercih edilen taş kolon elemanlarının başlıca kullanım amaçları;

- Toplam ve farklı oturmaları azaltmak
- Konsolidasyonu hızlandırmak
- Taşıma kapasitesini arttırmak
- Dolgu şevlerinin ve doğal şevlerin stabilitesini arttırmak
- Sıvılaşma potansiyelini azaltmak

şeklinde özetlenebilir.

Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda, taş kolon sistemlerinin yumuşak killerde, siltlerde ve siltli kumlarda güçlendirme amacıyla uygulandığı ve verimli sonuçlar alındığı görülmüştür. İlk olarak 1830'larda Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan bu yöntem (Barksdale ve Bachus, 1983), 1950'den sonra Avrupa'da ve 1970'den sonra da Amerika'da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Taş kolon sistemleri en verimli olarak baraj gövdelerinde, sedde gibi geniş yükleme alanlarında, dolgularda, ağır makine, silo, depo ve tank temelleri altında, terminal, rıhtım, havaalanı gibi tesislerin zeminlerinde, enerji üretim ve nakil tesislerinin temel zeminlerinde kullanılmaktadırlar. Taş kolon sistemleri uygulamaya başlandığı yıllardan itibaren özellikle toplam ve farklı oturmaların kontrol altına alınması, konsolidasyon sürelerinin hızlandırılması ve taşıma gücünün artırılmasının gerekliliğinin olduğu projelerde kullanılmış, şevlerin ve dolguların stabilitesi alanında yapılan uygulamaları daha sonraki yıllarda ortaya çıkmıştır.

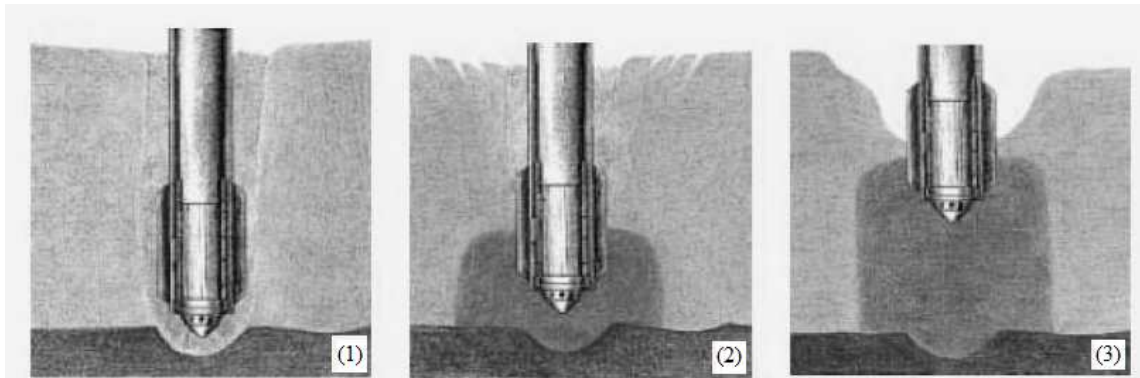
Özellikle sıvılaşıma potansiyeline sahip gevşek kum zeminlerde sıvılaşıma iyileştirmesi sağlama amacı ise en yeni uygulama alanını oluşturmaktadır. Projelerin kendilerine ait kriterleri doğrultusunda sunulan alternatif zemin iyileştirme yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları ile birlikte karşılaştırma yapılarak doğru ve ekonomik bir tasarım için en uygun sistemin seçilmesinin önemli bir etken olduğu unutulmamalıdır.

2.2 İmalat Yöntemleri

Taş kolon elemanları, projenin türü ve çalışılan bölgenin zemin koşulları da göz önünde bulundurularak farklı uygulama yöntemleri ile değişik çap ve boylarda uygulanabilmekte olup, bu yöntemlerden bazıları aşağıda anlatılmaktadır.

2.2.1 Vibro kompaksiyon yöntemi

Vibro kompaksiyon yöntemi temiz, kohezyonsuz zeminlerin (ince dane oranı \leq %10) derinlik vibratörleri kullanılarak sıklığının artırılması amacıyla kullanılır. Şekil 2.1’de bu yöntemin imalat adımları gösterilmiştir. Vibratör su veya hava jeti kullanılarak istenilen derinliğe indirildikten sonra (1) 0.50 m aralıklarla geri çekilmeye başlanır (2) Kompaksiyon tepeden veya yerinde yapılan geri dolgu ile tamamlanır (3) Bu yöntemde, tipik olarak % 70-80 rölatif sıklık elde edilebilir. Kompaksiyon sırasında, sıkıştırmadan dolayı zemin hacminde meydana gelen azalmayı dengelemek amacıyla yüzeyden temiz kum eklenerek, arazi seviyesinin korunması sağlanır. Bu yöntemin, su seviyesi altında ve üstünde iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir.



Şekil 2.1 : Vibro kompaksiyon yöntemi imalat adımları (Url-1).

2.2.2 Vibro yer değiştirme yöntemi

Vibro yer değiştirme yönteminde (ıslak yöntem), Şekil 2.2’de gösterildiği gibi yüksek basınca sahip su jeti yardımı ve titreşim ile istenilen derinlikte bir kuyu açılır (1) Daha sonra prob etrafındaki bölge taş aktarımı için basınçlı su ile yıkanır ve taş kolon yüzeyden taş eklenerek oluşturulur (2) Taş kolon imalatı bittikten sonra, yüzey silindir ile düzeltilir (3) Bu yöntemdeki en önemli etken, mevcut zemin içerisindeki ince danelerin kuyu çevresinde taş kolonun geçirimsiz olmasını engelleyen ve kuyunun imalat sırasında stabilitesini sağlayan su jetidir. Çok kullanılan ve uygun maliyetli bir derin vibrasyon tekniği olan bu yöntem, yumuşak ile katı kıvamlı zemin koşullarında ($c_u = 15 - 50$ kPa) ve yeraltı suyunun yüksek olduğu bölgelerde etkili bir iyileştirme yöntemidir.

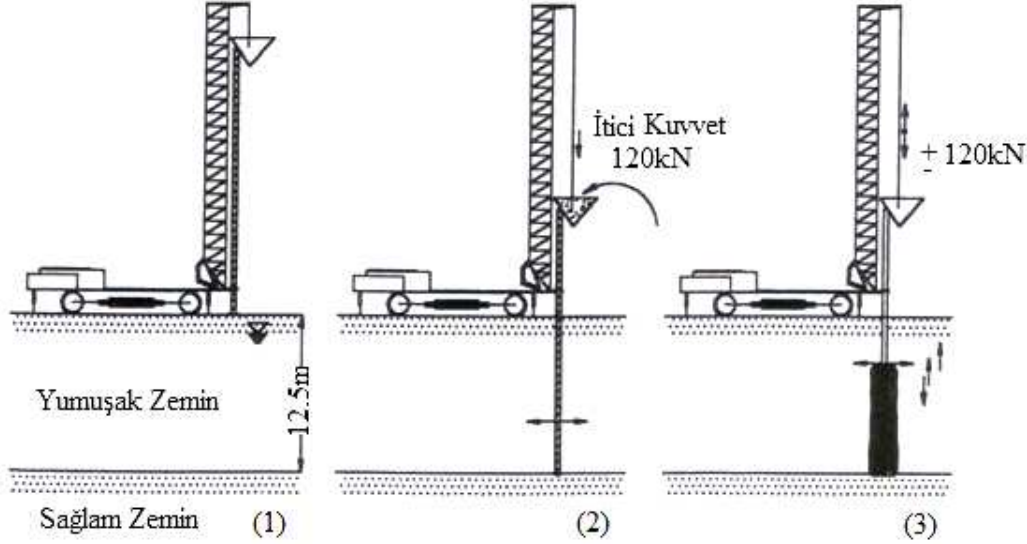


Şekil 2.2 : Vibro yer değiştirme yöntemi imalat adımları (Url-1).

2.2.3 Vibro teleme yöntemi

Vibro teleme yönteminde (kuru yöntem), zemin içerisinde istenilen derinliğe kadar itilen probun zemini yanal olarak ötelemesi ile bir kuyu oluşturulur. Kuyu dibine indirilen prob çıkarılır ve kuyu içerisine tabakalar halinde taş doldurulur. Her tabakanın doldurulmasının ardından prob tekrar kuyuya indirilir ve probun uyguladığı kuvvet yardımı ile taşın düşey ve kuyu çeperine doğru sıkışması sağlanır. Sıkışmış bir taş kolon oluşturulan bu yöntemde, kuyu açılmasından taşın kuyu içerisine doldurulmasına kadar geçen süre içerisinde mevcut zeminin kendini tutabilmesi gerekmektedir. Vibro teleme yöntemi ile taş kolon imalatı, Vibro yerdeğiştirme yöntemine göre daha mukavim ($c_u = 30 - 60$ kPa) ve yeraltı su seviyesinin daha derinlerde olduğu zemin koşullarında uygundur. Probu kuyudan geri çekilmeden, kuyu içerisine taş doldurulması işlemine dayanan ve dolayısıyla kuyu çeperinin taş ile doldurulması sürecindeki stabilite problemini ortadan kaldıran ve *alttan beslemeli yöntem* olarak adlandırılan bir diğer yöntem vibro öteleme

yönteminin bir modifikasyonu olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemin imalat detayları Şekil 2.3’de gösterildiği gibi; (1) ekipmanın kurulumu, (2) probun zemine itilmesi (3) vibrasyonlu şekilde taş kolonun oluşturulması şeklinde sıralanabilir.



Şekil 2.3 : Alttan beslemeli yöntem imalat adımları (Url-1).

2.2.4 Darbeli yöntem

Darbeli yöntemde, ucu açık veya kapalı bir boru zemine itilerek ya da bir burgu yardımı ile kuyu açılır. Kuyu içerisine tabakalar halinde taş doldurulur ve her tabakanın doldurulmasının ardından boru düşük hızla geri çekilir ve aynı zamanda bu tabaka, üzerine düşürülen tokmağın etkisi ile boru altına doğru sıkışır. Bu darbeli yöntem, 1980’li yıllarda Amerika’da Dr. Fox tarafından geliştirilerek özel bir sistem haline getirilmiş olup, bu yöntemin çeşitlerine ve uygulama detaylarına 3. Bölüm’de genişçe yer verilecektir.

2.3 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Taş kolon imalatı için, vibro kompaksiyon, vibro yer değiştirme, vibro öteleme ve darbeleme yöntemleri karşılaştırılmış olup, sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Vibro kompaksiyon ile iyileştirme kumlar-siltli kumlar için iyi sonuçlar vermekte iken, vibro yer değiştirme yöntemi kil ve silt zeminler için uygundur.
- Vibro yer değiştirme yönteminde, kendini tutabilen zemin koşullarında kuyunun stabilitesi için kılıfa ihtiyaç duyulmadığından, imalat hızı darbeleme metoduna göre yüksektir.

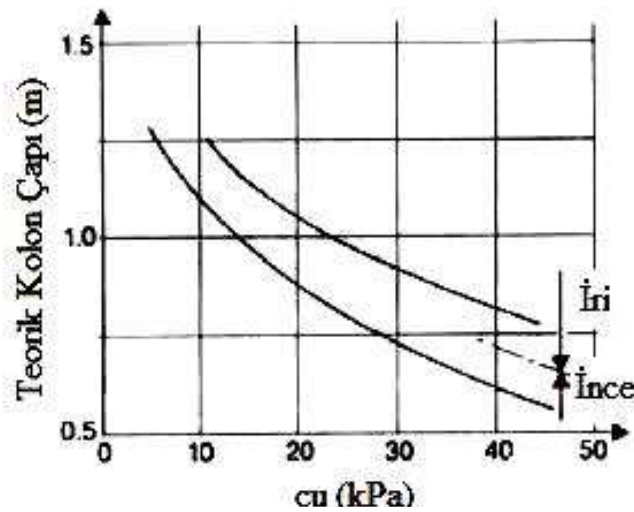
- Vibro öteleme ekipmanının temin edilemediği durumlarda, imalat yöntemi olarak benzer olan darbeleme yöntemi tercih edilebilir. Kuru yöntem, ıslak yöntemden daha ekonomiktir.
- Vibro yer değiştirme yönteminde büyük miktarda su kullanıldığından imalat sonrasında yüzeye çıkacak suyun çevreye zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Vibro öteleme yöntemi ise temiz bir yöntemdir. Ancak bu yöntem, kuyu stabilitesini sağlamak için yeraltı suyunun derinlerde olduğu ve kendini tutabilen zemin koşullarının bulunduğu bölgelerde kullanılmalıdır.
- Kirlilikle ilgili kısıtlamaların olduğu ve zemin özelliklerinin kuru yöntemin uygulanmasına müsaade etmediği bölgelerde alttan beslemeli yöntem bir diğer alternatiftir. Bu yöntemde, imalat sırasında kullanılacak taş hacmi kesin olarak hesaplanabilmektedir.

2.4 Taş Kolon Elemanlarının Özellikleri

Taş kolon elemanlarının çapları, boyları, içsel sürtünme açıları ve imalatta kullanılan malzemenin özellikleri aşağıda anlatılmaktadır.

2.4.1 Taş kolon çapı

Taş kolon elemanlarının çapı, uygulanan zeminin mukavemetine, imalat yöntemlerine ve uygulamada gerçekleştirilen sıkıştırma enerjisine önemli ölçüde bağlı olduğundan bu elemanların etkili çapları kesin olarak bilinmemektedir.



Şekil 2.4 : Zemin mukavemetinin teorik kolon çapına etkisi (Besancon, 1984).

Vibro yer değiştirme ve vibro öteleme yöntemleri ile imal edilen kolonların çaplarının 100 cm civarında olduğu, tokmaklı yöntemle imal edilen kolonların çapları için 80 cm ya da daha küçük mertebelerde olduğu söylenebilir. Besancon (1984) tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmalar sonucu etkili kolon çapı ile kohezyonlu zeminin kayma mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

2.4.2 Taş kolon boyu

Genellikle taş kolon elemanları ile zemin iyileştirme yönteminde, oturmaların azaltılabilmesi ve yüksek taşıma gücüne ulaşılabilmesi için kolon boylarının sağlam zemine kadar uzatılması istenir. Sağlam tabakanın derinlerde olması durumunda kolonlar yumuşak zemin tabakasında da sonlandırılabilirler ancak bu durumda taş kolon herhangi bir uç mukavemetine sahip olamayacak ve yüzen kolon davranışı gösterecektir. Taş kolon elemanlarının sonlandırılacağı sağlam tabaka derinliği 6 m - 10 m civarında olduğu uygulamalar ile ekonomik bir çözüme ulaşılmış olur.

2.4.3 Taş kolonun içsel sürtünme açısı

Taş kolon elemanları için içsel sürtünme açısı kullanılan malzemeye bağlı olmak üzere 40° ile 45° arasındadır (Bell, 1975). Ancak, tasarım aşamasında güvenlik faktörünün dikkate alınmasıyla içsel sürtünme açısının 38° olarak kullanılması önerilir (Besancon, 1982).

2.4.4 Taş kolon malzemesinin dane çapı dağılımı

Taş kolon elemanlarının imalatında çapları 1.3 cm - 1.7 cm arasında değişen iyi derecelenmiş taş ve çakıl malzeme kullanılabil-diği gibi, bu malzemelerin temininde zorlanıldığı durumda kırmataş malzeme de kullanılabilir. Eğer kırmataş ile imalat yapılacaksa, oturmaların azaltılabilmesi amacıyla malzemenin farklı dane çaplarından oluşturulması önerilmektedir.

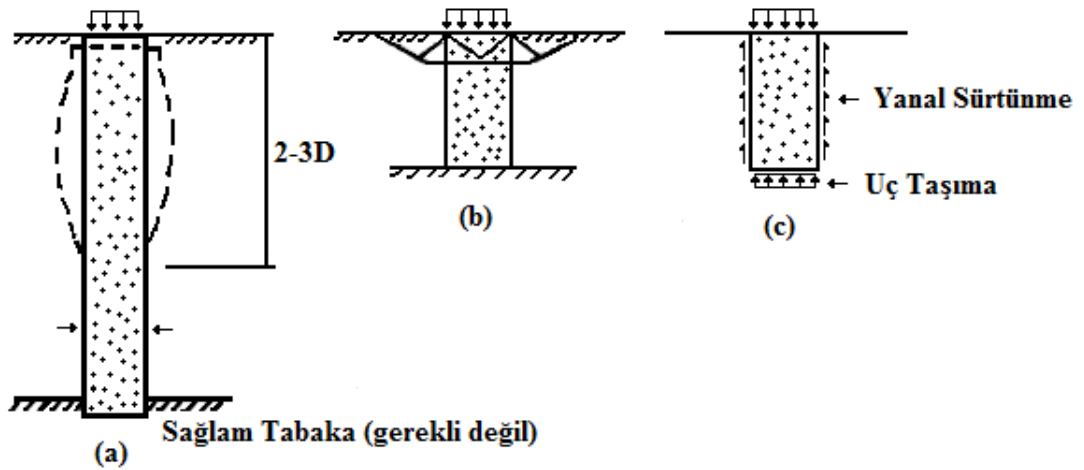
2.5 Tasarım Kriterleri ve Tasarım Yöntemleri

Taş kolon elemanları yerine geçtikleri zeminden daha sağlamdırlar. İmal edilen kolonun rijitliği, kolona zemin tarafından sağlanan yanal desteğe bağlı olup, bu destek kolonu sıkı hale getiremeyecek durumda ise, kolon aşırı yanal genişleme yaparak göçer. Zemin-kolon kompozit sisteminin stabilitesi, kolon ve onu çevreleyen

zemin arasında oluşan kayma etkisine bağlıdır. Geniş yükleme alanı altında kolonun kendisini çevreleyen zeminle aynı miktarda oturma yapmaması ya da üst yapı yüklerinin tamamının kolon tarafından karşılanması gibi durumlarda zemin-kolon arakesitinde kolon boyunca kayma gerilmeleri oluşur. Bu durumda, kolon taşıma kapasitesi aşılması sebebi ile göçmeye maruz kalır. Bu sebeplerden dolayı taş kolonlar hem yanal genişleme yönünden hem de kayma yönünden analiz edilmelidir.

2.5.1 Tekil taş kolon göçme mekanizmaları

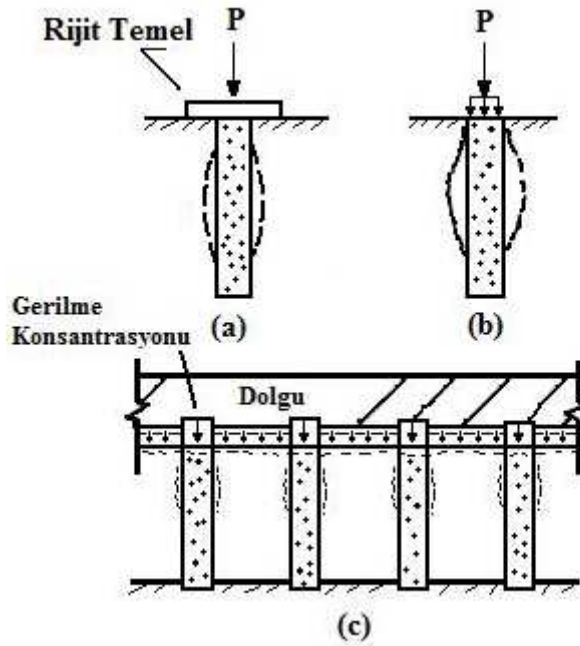
Taş kolon elemanları yumuşak tabaka içerisinde imal edilirken, kolon boylarının tasarımı ya sağlam tabakaya kadar uzanacak şekilde uç kolonu olarak ya da yumuşak zemin içerisinde kalacak şekilde yüzen kolon olarak yapılır. Şekil 2.5’de homojen zeminde tekil taş kolonun göçme mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.5 : Homojen zeminde tekil taş kolon için göçme mekanizmaları (a) uzun taş kolon, sağlam tabakada veya yüzen sistem olarak (b) rijit kısa kolon, kesme göçmesi (c) yüzen sistem kısa kolon, zımbalanma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).

Taş kolon elemanı sağlam tabakaya kadar uzatılsa da, yüzen kolon şeklinde imal edilse de kolonun boyu çapının 3-4 katından daha uzun olması durumunda, kolonda yanal genişleme yenilmesi sonucu göçme oluşur (Şekil 2.5a). Sağlam zemine ulaşan kısa boylu bir taş kolon elemanında ise yüzeyle kolonu da içerecek şekilde genel ve yerel göçme meydana gelebilir (Şekil 2.5b). Taş kolon elemanı, boyu çapının 2-3 katı kadar olacak şekilde yüzen sistem ile imal edilmiş ise göçme kolonun uç kısmında taşıma gücünün aşılması şeklinde oluşur (Şekil 2.5c).

Tekil taş kolon elemanları ile ilgili yapılan çalışmalar ve model yükleme deneyleri, kolonun taşıma gücünün ve oturma davranışının önemli oranda yükün uygulanma şekline bağlı olduğunu göstermektedir (Şekil 2.6). Yükün kolon çapından geniş rijit bir plaka ile aktarılması durumunda yanıl genişleme engellenir ve böylece oturmalar azaltılıp, taşıma gücü arttırılmış olur (Şekil 2.6a). Yükün kolon çapı ile aynı boyutta bir plaka ile uygulanması durumunda ise, yanıl gerilmelerde bir artış olmadığından oturmalar küçük bir miktar fazla olabilir (Şekil 2.6b). Yükün kolon ve mevcut zemin tarafından birlikte taşınması ile oturmalar önemli ölçüde azaltılır (Şekil 2.6c).

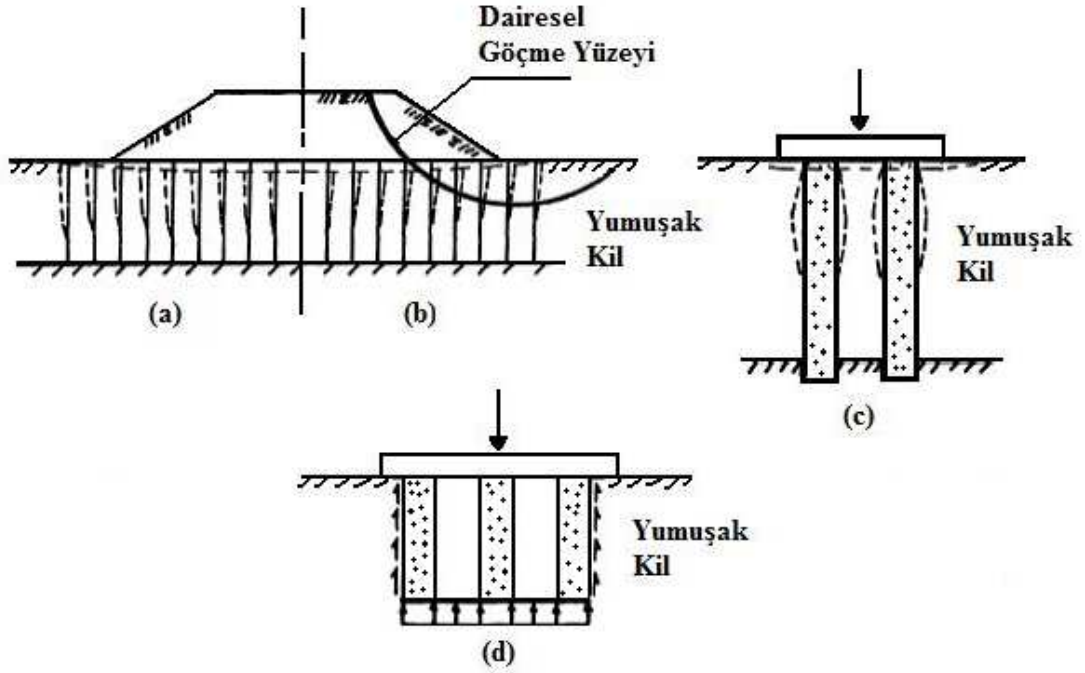


Şekil 2.6 : Taş kolona etkiyen farklı tipteki yükler: (a) rijit temel yükleme (b) plaka yükleme (c) dolgu yükleme (Barksdale ve diğ., 1983).

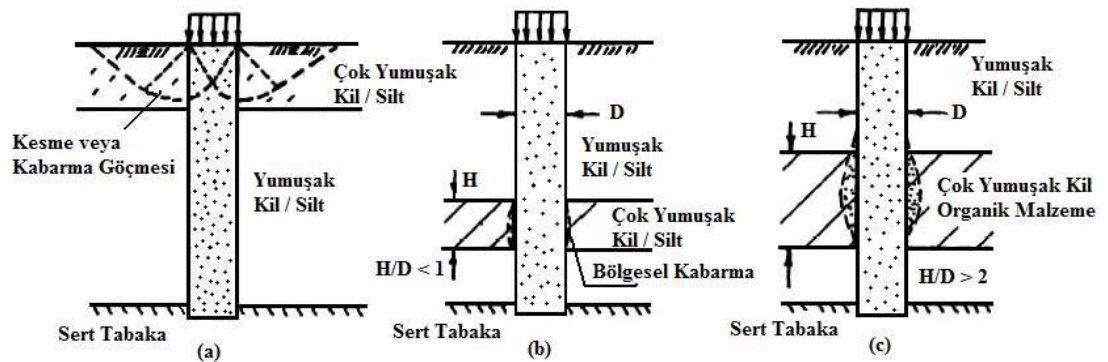
2.5.2 Taş kolon grupları göçme mekanizmaları

Tekil bir taş kolon elemanı, taş kolon grubu ile karşılaştırıldığında nihai yükleme kapasitesi grup içerisindeki bir elemana göre biraz daha düşüktür. Bir taş kolonun etrafına diğer taş kolonların imal edilmesi ile arada kalan zemin bu kolonlar ile çevrelenmiş ve içteki kolonun hareketi sınırlandırılmış olur. Bu nedenle her bir kolonun nihai taşıma kapasitesinde bir miktar artış olur. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi yüklemenin geniş bir alanda yapıldığı durumlarda, Vautrain, 1977 sıkışabilir zemin ve taş kolonda meydana gelen oturmaın eşit olduğunu bulmuştur. Zayıf zeminlerde dolgu inşaatına bağlı olarak temel altındaki zemin yanıl olarak ötelenir (Şekil 2.7a ve Şekil 2.7b). Yanıl genişleme olarak adlandırılan bu durum, zemin ile

taş kolon arasındaki yanıl desteği azaltmaktadır. Yumuşak zemin içerisinde imal edilen taş kolon grupları da tekil kolonlardaki gibi yanıl genişleme yenilmesi ya da uç kısımda taşıma kapasitesinin aşılması şeklinde göçmeye maruz kalabilirler (Şekil 2.7c ve Şekil 2.7d).



Şekil 2.7 : Taş kolon grupları için göçme mekanizmaları: (a) yanıl genişleme, geniş dolgu yüklemesi (b) genel dairesel göçme (c) kabarma göçmesi, küçük grup (d) kısa kolonlar, zımbalanma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).



Şekil 2.8 : Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları: (a) yüzye yumuşak tabaka, kabarma veya kesme göçmesi (b) ince çok yumuşak tabaka, sınırlı yerel kabarma (c) kalın çok yumuşak tabaka, yerel kabarma göçmesi (Barksdale ve diğ., 1983).

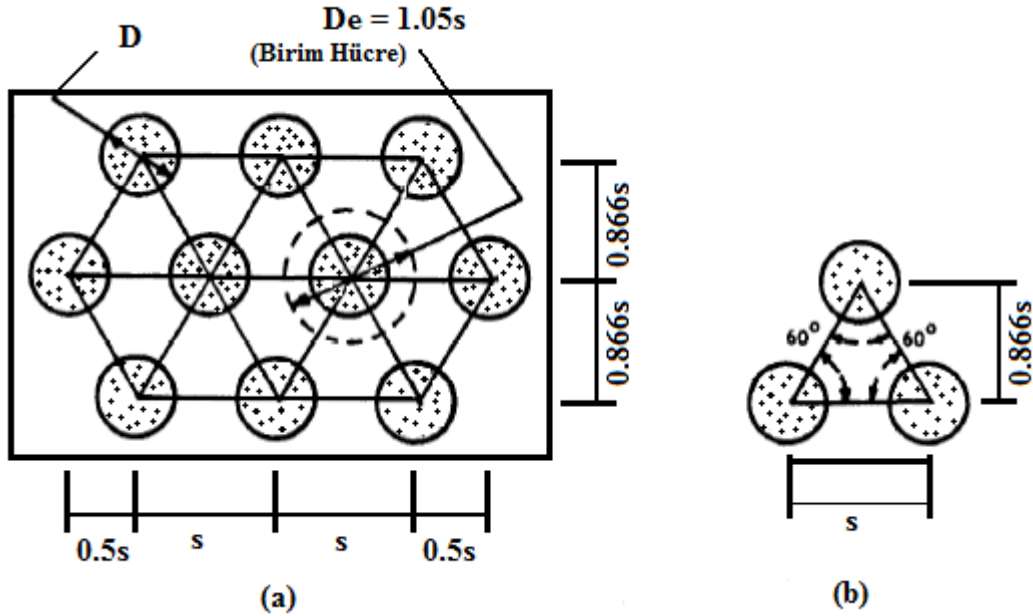
Tabakalı zeminlerde yumuşak kohezyonlu birimlerin yer alması durumunda, tekil kolonlarda ya da grup kolonlarda yanal genişleme yenilmesi şeklinde göçme oluştuğu bilinmektedir (Şekil 2.8). Yüzeyde 1.0 m – 2.0 m kalınlığında çok yumuşak kohezyonlu tabakaların bulunması halinde meydana gelecek göçme mekanizması Şekil 2.8a’da gösterilmiştir. Ayrıca saha deneyimlerine dayanarak, bu tabakaların kalınlığının kolon çapından büyük olduğu durumlarda kolonda ciddi stabilite problemlerinin varlığından bahsedilebilir (Şekil 2.8c).

2.5.3 Birim hücre kavramı

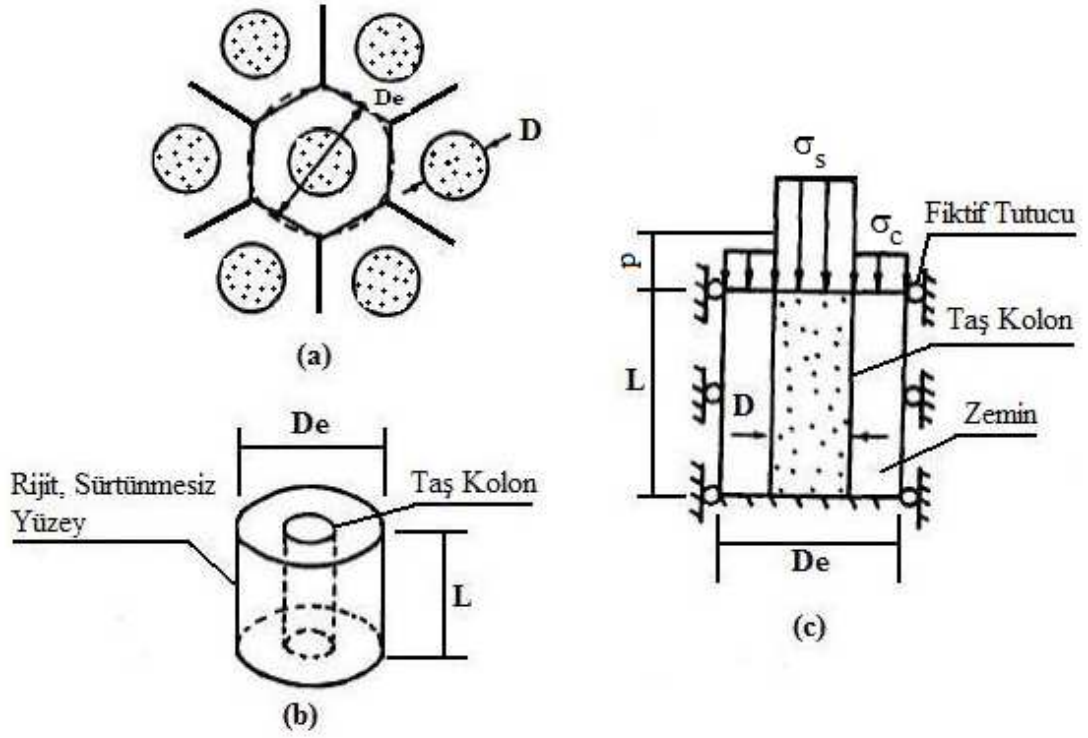
Birim hücre üzerinde etkili olan faktörler; eşdeğer çap, alan oranı ve gerilme konsantrasyonu şeklinde sıralanabilir.

2.5.3.1 Eşdeğer çap

Oturma ve stabilite analizleri için, her bir kolonu çevreleyen zemin kolon ile birlikte düşünülmelidir. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da gösterildiği gibi bu kolonu çevreleyen zeminin alanı düzgün altıgenden oluştuğu için, bu alan aynı alan değerine sahip bir daire kabul edilebilir.



Şekil 2.9 : Eşkenar üçgen dizilimi: (a) plan (b) geometri (Barksdale ve diğ., 1983).



Şekil 2.10 : Birim hücre yaklaşımı: (a) plan (b) birim hücre (c) kesit (Barksdale ve diğ., 1983).

Bu eşdeğer dairenin efektif çapı sırası ile eşkenar üçgen ve kare yerleşimine göre;

$$De = 1.05s \quad (2.1)$$

$$De = 1.13s \quad (2.2)$$

şeklinde bulunur. Burada; s, kolon merkezleri arası mesafedir. Buna göre, zemin ve taş kolondan oluşan De çapına sahip alan *birim hücre* olarak adlandırılır.

2.5.3.2 Alan oranı

Taş kolon elemanları ile yer değiştirilen zemin hacmi iyileştirilmiş zeminin performansında önemli bir etkiye sahiptir. Değiştirilen zemin miktarını belirleyebilmek amacıyla, alan oranı, a_c ;

$$a_c = \frac{A_c}{A} \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada;

A_c : Taş Kolon Alanı

A : Birim Hücre Alanı

olarak tanımlanır. Zemin alan oranı ise,

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.4)$$

$$a_s = 1 - a_c \quad (2.5)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Oturma ve stabilite analizleri için, her bir kolonu çevreleyen zemin kolon ile birlikte düşünülmelidir.

2.5.3.3 Gerilme konsantrasyonu

Taş kolon ile iyileştirilmiş zemin üzerine bir dolgu veya temel yerleştirildiğinde, Şekil 2.10c'de gösterildiği gibi taş kolonda önemli ölçüde bir gerilme artışı meydana gelir ve çevresinde bulunan zeminde oluşacak gerilme miktarı azalır. Taş kolonda ve taş kolonu çevreleyen zeminde düşey oturmalar neredeyse aynı miktarda olduğundan ve taş kolon yumuşak ya da gevşek zemine göre daha rijit olduğundan gerilme konsantrasyonu taş kolon içerisinde meydana gelir. Birim hücre kavramına uygun, kabul edilebilir genişlikte, göreceli olarak üniform yükün etkidiği, eşkenar üçgen veya kare yerleşimli bir taş kolon göz önüne alındığında, Şekil 2.10c'de gösterilen düşey gerilme dağılımı *gerilme konsantrasyonu* (n) ile ifade edilir.

$$n = \sigma_c / \sigma_s \quad (2.6)$$

Burada;

σ_c : Taş Kolon İçerisindeki Gerilme

σ_s : Kohezyonlu Zemin İçerisindeki Gerilme

olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, temelden gelen yük nedeniyle kolonda ve zeminde oluşacak gerilme miktarının oranı *konsantrasyon faktörü* (n) olarak tanımlanır.

Birim hücre içerisinde verilen bir derinlikte olması gereken ortalama gerilme, birim hücre içerisindeki düşey kuvvetlerin dengesi için verilen alan oranı ile;

$$\sigma = \sigma_c a_c + \sigma_s (1 - a_c) \quad (2.7)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Buradan, kohezyonlu zemindeki ve taş kolondaki gerilme dağılımı gerilme konsantrasyonu faktörü (n) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_s \sigma \quad (2.8)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_c \sigma \quad (2.9)$$

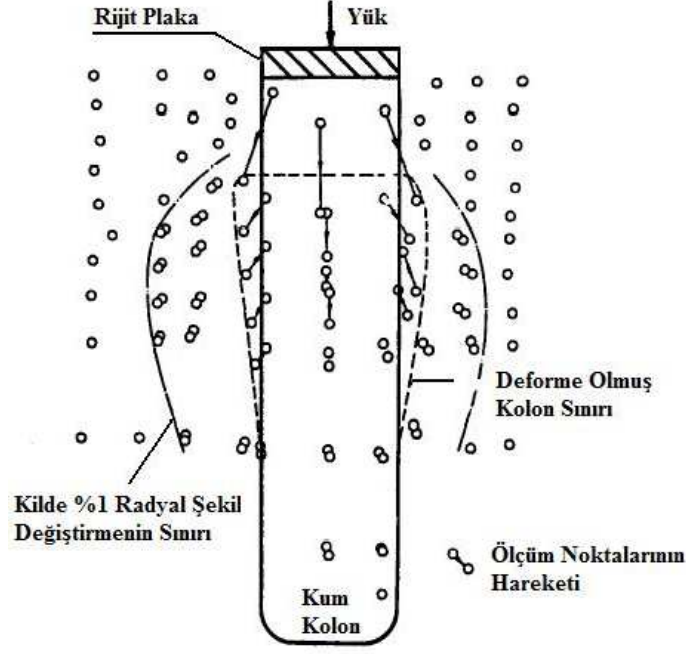
Burada, μ_s ve μ_c , zemindeki ve taş kolondaki gerilme oranıdır. Uygulanan yüke bağlı olarak taş kolondaki ve zemindeki gerilmeyi veren bu eşitlikler, oturma ve stabilite analizlerinde oldukça kullanışlıdır.

2.5.4 Nihai taşıma gücü analizi

Taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerin nihai taşıma gücünün tahmini için kullanılan yöntemlerin büyük bir kısmı boşluk genişleme teorisi ve limit durum analizlerinden geliştirilmiştir.

2.5.4.1 Tekil taş kolon

Ucu yumuşak tabakada kalacak şekilde yüzen sistem olarak tasarlanan ya da ucu sağlam tabakaya kadar uzatılan taş kolonlarda, kolonun boyunun çapına oranı dört veya altıya eşit ya da daha büyük ise genellikle taş kolonda yanal genişleme şeklinde göçme meydana gelmektedir. Yumuşak kohezyonlu bir tabaka içinde imal edilen tekil taş kolonun yanal genişleme davranışı Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Yumuşak kohezyonlu zeminle çevrelenmiş tekil bir taş kolonun nihai taşıma gücünün tahmini için kullanılan yöntemlerin bir kısmı kolonda üç eksenli gerilme durumunun geçerli olduğunu ve kolon ile zeminin limit denge durumunda olduğunu kabul ederler.



Şekil 2.11 : Tekil bir kolon üzerindeki rijit bir plakaya etkiyen yük sonucunda kolonda oluşacak yanıl genişleme yenilmesi (Barksdale ve diğ., 1983).

Bu yöntemlerde taş kolonu destekleyen yanıl çevre gerilmesi (σ_3) kolonu çevreleyen zeminde mobilize olup kolonun yanıl genişlemesine engel olan nihai pasif direnç olarak alınır. Kolon göçme durumunda kabul edildiğinde, kolonun taşıyabileceği gerilme (σ_1), kolonun pasif toprak basıncı katsayısı (K_p), ile yanıl çevre basıncı (σ_3)nın çarpımına eşittir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \quad (2.10)$$

Burada; ϕ_c , kolonun içsel sürtünme açısı olarak tanımlanır.

Hughes ve Withers (1974) taş kolonda zemine doğru meydana gelen yanıl genişlemenin presiyometre testinde gelişen yanıl boşluk genişlemesi ile benzer özellikler taşıdığını düşünmüşlerdir. Gibson ve Anderson (1961) çevre basıncının tahmini için, sürtünmesiz bir malzeme ve sonsuz uzunlukta genişleyebilir bir silindirik boşluk için geliştirilen elasto-plastik teoriyi kullanarak,

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \quad (2.11)$$

ifadesini ortaya koymuşlardır. Burada;

σ_3 : Drenajsız Nihai Yanal Genişleme Basıncı

σ_{ro} : Başlangıçta Arazideki Yanal Gerilme

E_s : Zeminin Elastisite Modülü

c : Drenajsız Kayma Mukavemeti

ν : Poisson Oranı

olarak tanımlanır.

Kolondaki limit hal gerilmeleri düşünüldüğünde kolonun nihai taşıma gücü ise,

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E}{2c(1+\nu)} \right] \right\} \left(\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilebilir ve bu da yaklaşık olarak,

$$q_{ult} = (\sigma_{ro} + 4c_u) K_p \quad (2.13)$$

değerine eşittir.

Vesic, (1972) hem sürtünmeli hem de kohezyonlu zeminler için boşluk genişlemeli elasto-plastik bir çözüm geliştirmiştir. Boşluk genişleme basıncının nihai yanıl kapasitesi (σ_3);

$$\sigma_3 = c_u F'_c + q F'_q \quad (2.14)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada;

c_u : Drenajsız Kayma Mukavemeti

q : Hesap Derinliğindeki Ortalama Normal Gerilme

F'_c, F'_q : Boşluk Genişleme Faktörleri

olarak tanımlanır. İçsel sürtünme açısına bağlı boşluk genişleme faktörlerinin rijitlik indeksine (I_r) bağlı değişimleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Rijitlik indeksi,

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c + qtg \phi_s)} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

E : Zeminin Elastisite Modülünü

ϕ_s : Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı

c : Zeminin Kohezyonu

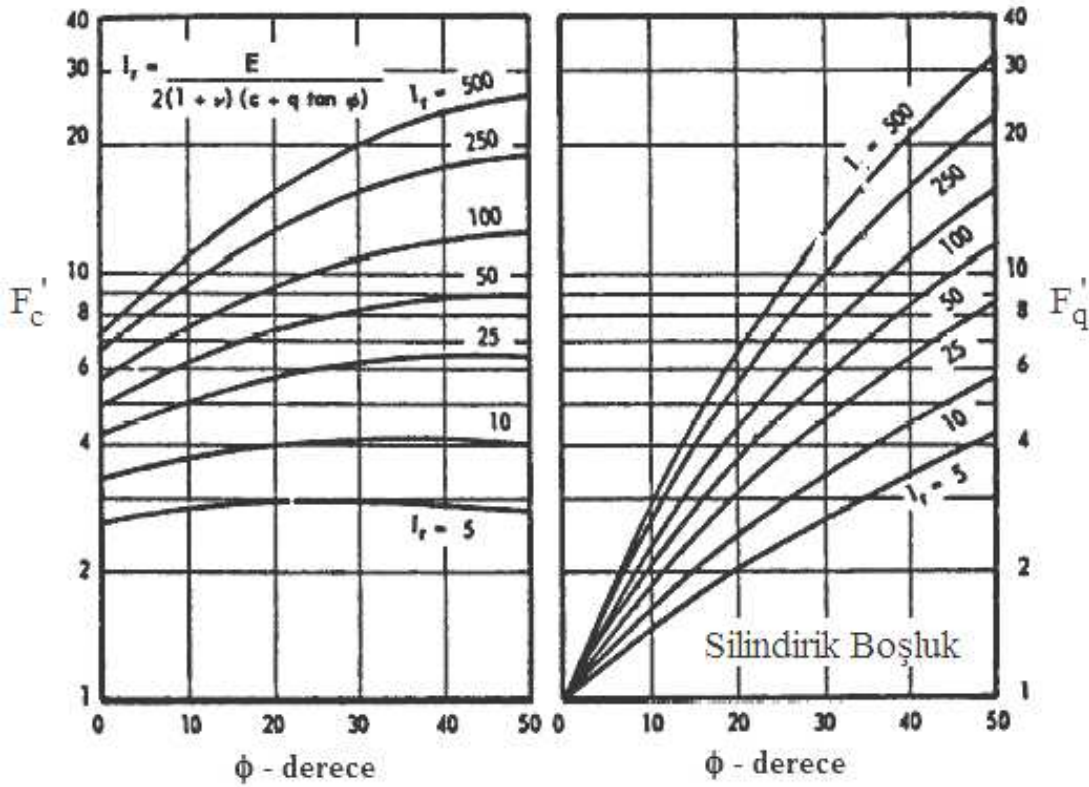
ν : Zeminin Poisson Oranı

q : Göçme Bölgesindeki Ortalama Gerilme

olarak tanımlanır. $q_{ult} = \sigma_1$ olarak kabul edilirse, kolonda nihai düşey gerilme;

$$q_{ult} = \left[cF'_c + qF'_q \right] \left[\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right] \quad (2.16)$$

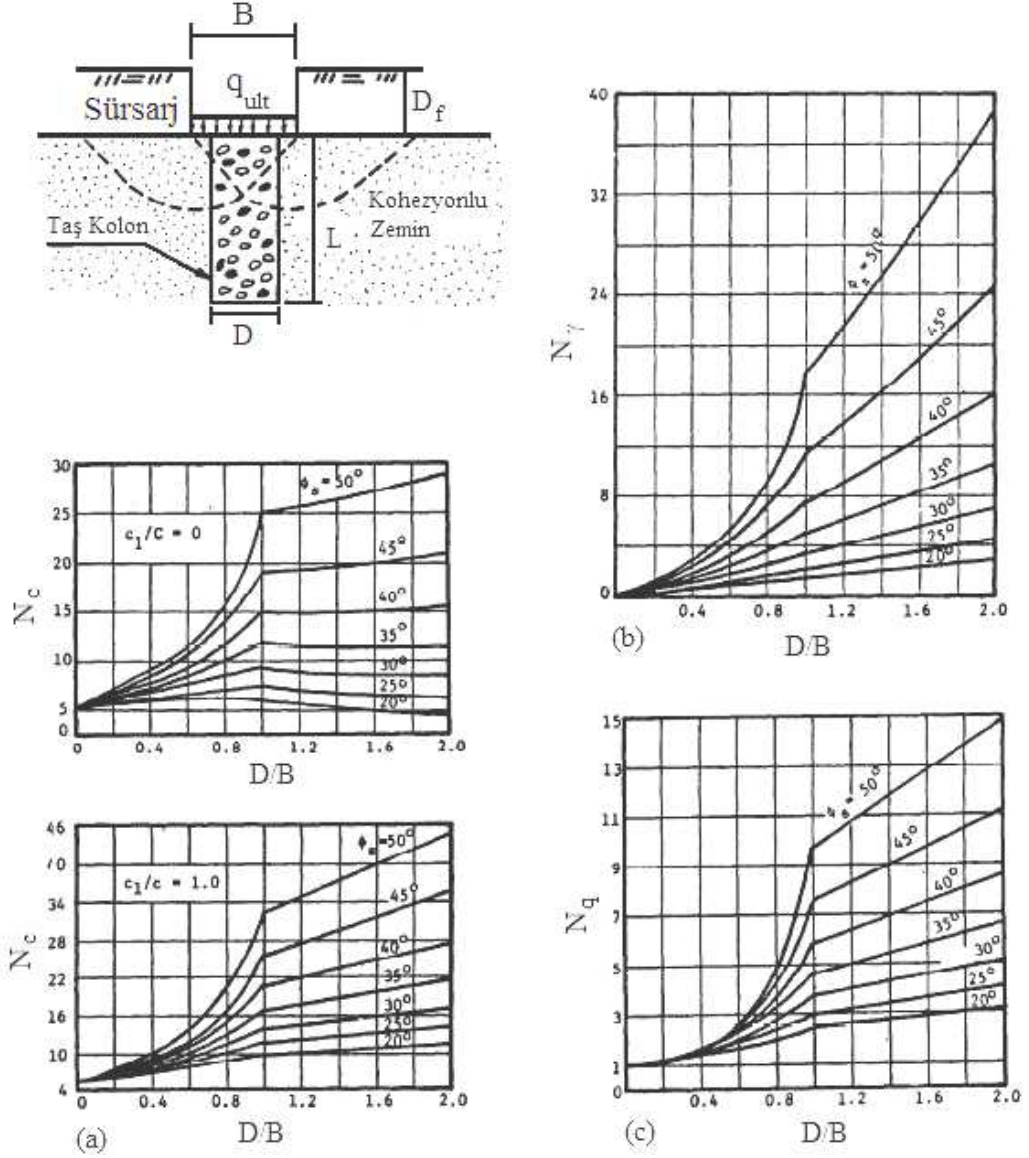
olarak bulunabilir.



Şekil 2.12 : Silindirik boşluk genişleme faktörleri (Barksdale ve diğ., 1983).

2.5.4.2 Kısa taş kolon

Boyu çapının iki ya da üç katından az olan kısa taş kolonlarda göçme, kolonda ya da kolonu çevreleyen zeminde genel veya lokal olarak taşıma gücünün aşılması şeklinde olabileceği gibi (Şekil 2.5b) kolonun alttaki yumuşak zemine doğru bir zımbalama yapması (Şekil 2.5c) şeklinde de olabilir.



Şekil 2.13 : Taş kolonlarda şerit yükleme için taşıma gücü faktörleri (a) N_c (b) N_γ (c) N_q (Barksdale ve diğ., 1983).

Zımbalama göçmesi için taşıma gücü, kazık tasarıma benzer şekilde kolonun uç taşıma gücü ve yanal çevre sürtünmesi hesabı yapılarak bulunabilir. Genel göçme ise sürsarj etkisinin minimum olduğu yüzeyde meydana gelir. Madhav ve Vitkar (1978) sürtünmesiz zeminde granüler malzeme doldurularak oluşturulan hendekler için bir düzlem şekil değiştirme çözümü geliştirmişlerdir. Bu durumda, şerit yükleme için taşıma gücü;

$$q_{ult} = (\gamma B/2) \cdot N_r + c_u \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, N_r , N_c ve N_q taşıma gücü faktörlerini göstermektedir (Şekil 2.13).

2.5.4.3 Taş kolon gruplarının nihai taşıma gücü

Taş kolonlar ile iyileştirilmiş kohezyonlu zemin üzerine oturan kare ya da şerit temelin nihai taşıma gücü limit denge yöntemi ile analiz edilebilir. Rijit bir temelin taşıma gücünü belirleyebilmek için, hızlı yükleme yapılarak kohezyonlu zeminde drenajsız kesme durumunun geçerli olması sağlanır ve böylece içsel sürtünme açısı ihmal edilebilir.

Şekil 2.14'de gösterilen beklenen göçme yüzeyi üçgen bir blok oluşturur ve kayma yüzeyi boyunca zemin ile kolonun kayma direnci tamamıyla mobilize olur. Bu teori, homojen zeminler için Bell (1978) tarafından geliştirilmiş olup, daha sonra Terzaghi ve Sowers (1979) tarafından modifiye edilmiştir. Kompozit zeminin alabileceği nihai gerilme (q_{ult}) bloğun yanal hareketi nihai direncine (σ_3) ve kesme yüzeyinde oluşacak kompozit kesme direncine bağlıdır. Bloğun kuvvet dengesi göz önüne alındığında blok içerisindeki ortalama kesme dayanımı parametreleri,

$$[tg\phi]_{avr} = \mu_c a_c tg\phi_c \quad (2.18)$$

$$c_{avr} = (1 - a_c)c \quad (2.19)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Burada;

$[tg\phi]_{avr}$: Kompozit İçsel Sürtünme Açısının Tanjantı

c_{avr} : Temelin Altındaki Kesme Yüzeyinin Kompozit Kohezyonu

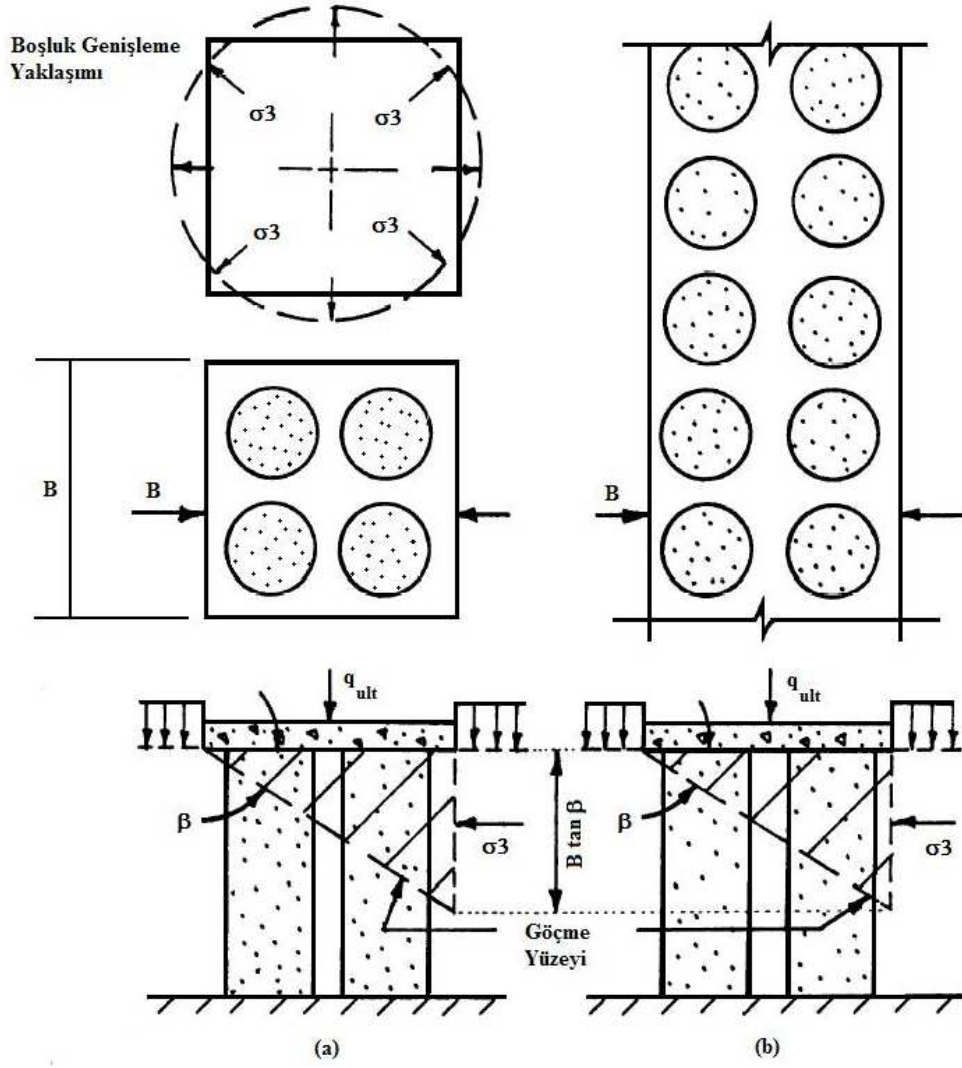
a_c : Alan Oranı

μ_c : Taş Kolon için Gerilme Konsantrasyon Faktörü

olarak tanımlanır. Kompozit zeminde temelde β açısını yapan göçme yüzeyinde,

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{avr}}{2} \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir.



Şekil 2.14 : Taş kolon grup analizi – yumuşak / katı kohezyonlu birimler **(a)** kare grup **(b)** sonlu uzun kolon grubu (Barksdale ve diğ., 1983).

Klasik toprak basıncı teorisinde, suya doymun killerde sonsuz uzun bir temel için nihai yanal gerilme,

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_s B t g \beta}{2} + 2c \quad (2.21)$$

bağıntısı yardımıyla ifade edilebilir. Burada;

σ_3 : Ortalama Yanal Çevre Basıncı

γ_s : Kohezyonlu Zemin için Doymun Birim Hacim Ağırlığı

B : Temel Genişliği

β : Göçme Yüzeyinin Eğimi

c : İyileştirilmiş Zemindeki Drenajsız Kesme Dayanımı

olarak tanımlanır. Kare temeller için yanal gerilme, Vesic'in boşluk genişleme teorisi kullanılarak hesaplanabilir ve bu teori göçme bloğuna etkiyen nihai yanal gerilmeyi verir. Bu durumda, nihai düşey gerilme (q_{ult}) bloğun dengesinden,

$$q_{ult} = \sigma_3 tg^2 \beta + 2c_{avr} tg \beta \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Taş kolonların nihai taşıma gücünün hesaplanması için önerilen bu yöntemde; temel şekli, temel boyutları, taş kolonun içsel sürtünme açısı, taş kolonla iyileştirilmiş zeminin kayma dayanımı, taş kolonu çevreleyen zeminin rilijlik modülü ve üzerine etkiyen jeolojik gerilme dikkate alınmaktadır.

2.5.5 Taş kolon elemanları için oturma analizi

Barsdale ve Bachus (1983) taş kolonların oturma analizi için, bir boyutlu konsolidasyon teorisi ile gerilme faktörünü ve birim hücre kavramını birleştirerek, denge yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem, taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde oluşacak oturmaların azaltım miktarlarının belirlenmesinde çok basit ve gerçekçi sonuçlar veren bir yaklaşım içermektedir.

Denge yönteminin bir parçası olarak tanımlanan oturma oranı şu şekilde ifade edilir:

$$S_t / S = 1 / [1 + (n - 1)a_s] = \mu_c \quad (2.23)$$

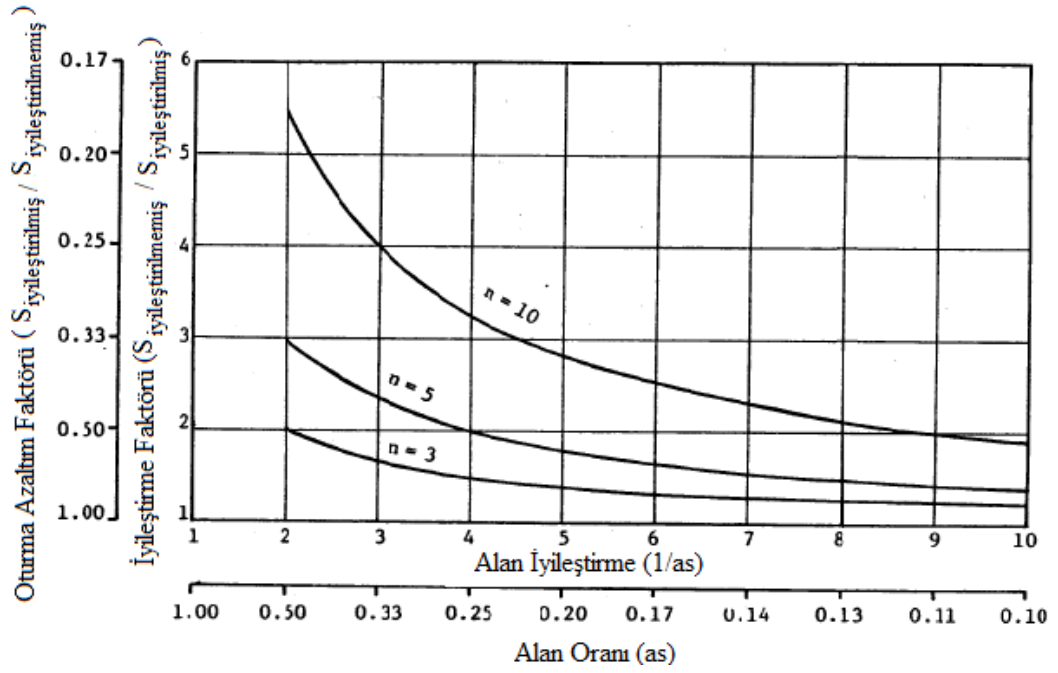
Burada,

S_t : İyileştirilmiş Zeminde Beklenen Oturma

S : İyileştirilmemiş Zeminde Beklenen Toplam Oturma

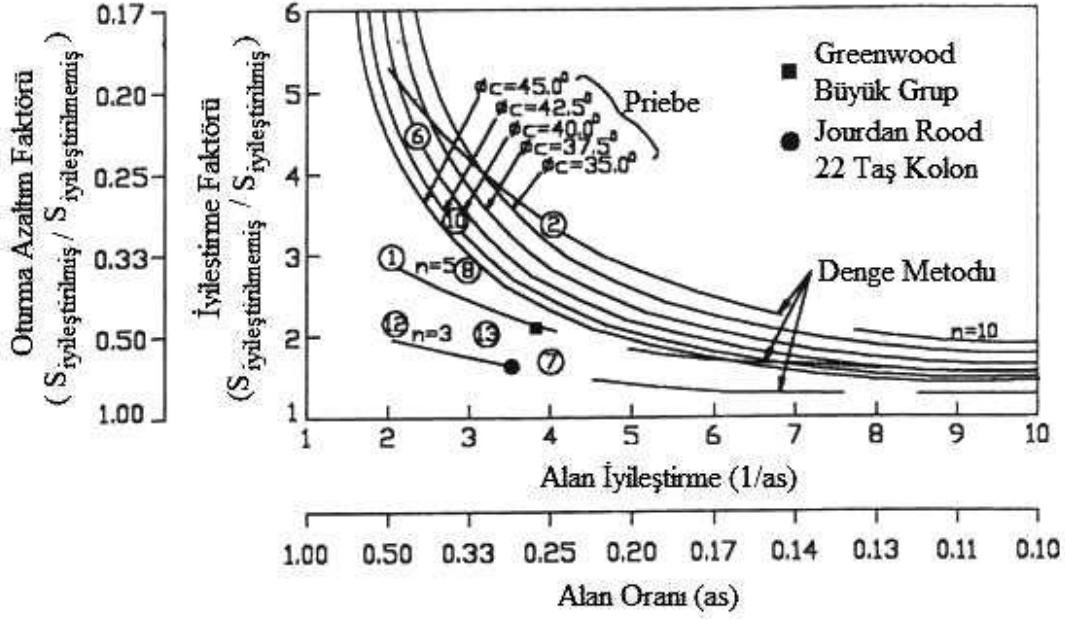
olarak tanımlanır.

Oturma oranı, zeminin taş kolon ile yer değiştirmesinden dolayı sıkışabilir zemindeki hacim azalmasını içerir ve dolayısıyla sıkışabilir zemin üzerindeki gerilmeyi azaltır. Şekil 2.15'de farklı alan oranları ve gerilme konsantrasyon oranlarına karşılık oturma azaltım faktörünün değişimi gösterilmiştir.

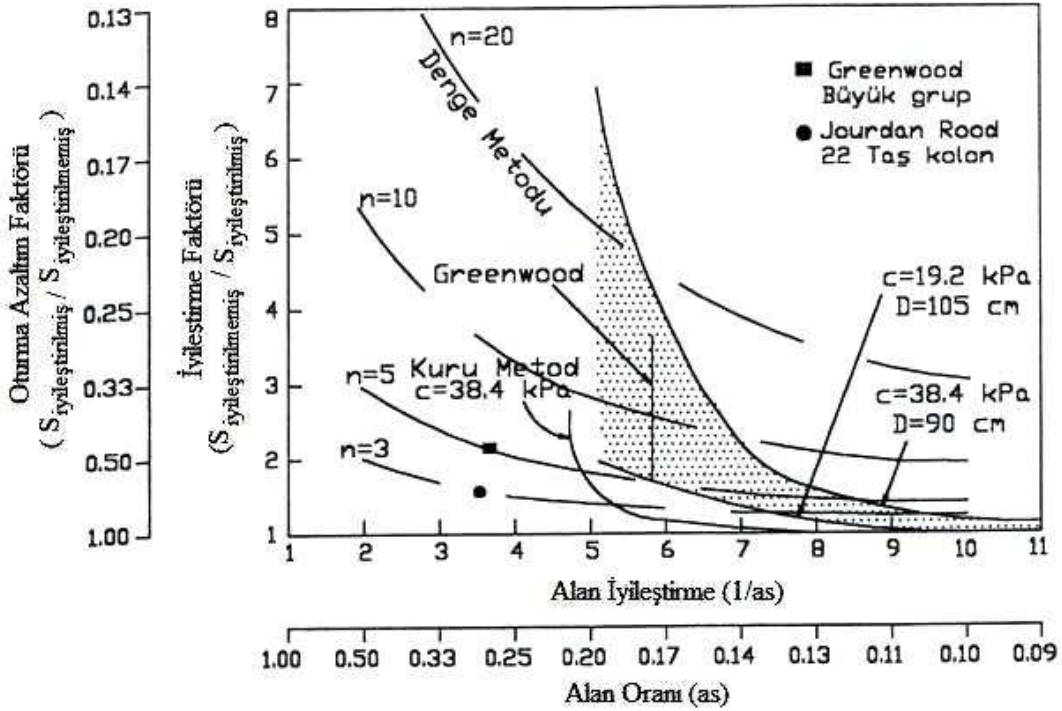


Şekil 2.15 : Oturma azaltım faktörü – Denge yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).

Taş kolon elemanları ile iyileştirilmiş zeminlerdeki oturma azaltım oranının tayini için Priebe tarafından bir yöntem geliştirilmiştir ve bu yöntemde birim hücre için; taş kolonun rijit, plastik ve sıkışmaz olduğu, zemin ile taş kolonun düşey oturmalarının eşit olduğu, zeminde ve taş kolonda üniform gerilme dağılımı olduğunu, kolonun ucunun sert zemine dayandığını ve kolonun sıkışmaz olarak kabul edilmesinden dolayı zemin hacmindeki değişimin kolonun düşeydeki kısılması ile ilgili olduğu gibi kabulleri yapılmaktadır. Bu yöntemde oturma azaltım faktörü, alan oranı ile taş kolonun sürtünme açısının bir fonksiyonu olarak verilmiştir (Şekil 2.16). Bu tasarım grafiğinde denge yöntemi ile geliştirilen gerilme konsantrasyon oranlarına, $n = 3, 5$ ve 10 da yer verilmiştir. Ayrıca iki farklı sahada yapılan çalışmalar yine bu grafikte gösterilmiş olup, elde edilen gerilme konsantrasyon oranlarının 3 ile 5 arasında olduğunu ve bu sonuçların denge yönteminde ifade edilen gerilme konsantrasyon oranı ile benzer olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak Priebe yöntemi denge yöntemi ve sınırlı sayıda yapılan saha çalışmaları ile karşılaştırıldığında, bu yöntem ile oturma azaltım etkisi bir miktar fazla tahmin edilmektedir.



Şekil 2.16 : Oturma azaltım faktörü – Priebe yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).



Şekil 2.17 : Oturma azaltım faktörü – Greenwood yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).

Greenwood (1983), taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde oturma azaltım etkisini, zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve kolon yerleşim aralığı cinsinden veren ön amprik eğriler ortaya koymuştur (Şekil 2.17). Şekilde ayrıca, gerilme konsantrasyon oranlarının 3, 5, 10 ve 20 değerleri için denge yöntemi ile elde edilen sonuçlarda gösterilmiştir. Bu yöntemde, vibro yer değiştirme yöntemi ve 20 kN/m² lik kayma

mukavemeti genellikle $n = 3-5$ aralığında gerilme konsantrasyon oranlarına denk gelir ki bu değerler denge yöntemi ile tahmin edilenlerle aynıdır. Sert killerde ve alan oranının 0.35 ile 0.15 arasında olduğu durumlarda, bu yöntemle bulunan oturma azaltım faktörleri bir miktar fazla tahmin edilebilir. Gerilme konsantrasyon oranı mevcut zeminin rijitliği arttıkça azalır.

2.6 Taş Kolon Elemanları için Kalite Kontrol Prosedürü

Taş kolon elemanlarının performansı üzerinde etkili olan ve imalat süresince değerlendirilmesi gereken konulardan en önemlileri taş kolonun imalat çapının ve kolonun yerleştirilmesinin, kolonu çevreleyen zemin ve diğer kolonlar üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. İmal edilen kolon için harcanan malzeme ile kolon boyu arasındaki oran tespit edilerek imalatı tamamlanmış taş kolonun ortalama çapı hesaplanabilir. Kullanılacak taş kolon malzemesinin çapı ve şekli imalat tekniğine bağlıdır. Vibro yer değiştirme yöntemi (ıslak yöntem) ile imal edilen kolonlarda, yuvarlak veya az köşeli ve uniform dane dağılımı olan (25-60 mm çaplı) çakıl kullanılmalıdır. Vibro öteleme (kuru yöntem) yönteminde ise boşlukların en iyi şekilde doldurulabilmesi için, iyi derecelenmiş (10-100 mm çaplı) köşeli malzeme kullanılmalıdır. Bu yöntemle yapılan imalatın başarılı olması için, kolona nüfuz ederek tıkanmaya ve geçirimsizliğin azalmasına yol açabilecek ince zemin danelerinin dışarı yıkanması ve kuyunun stabilitesini sağlayan su jetinin kesintisiz devam ettirilmesi gerekmektedir. Ayrıca taş kolonların performansı, aletsel gözlemler ve arazi testleri ile değerlendirilebilir. İyileştirilmiş zemin yüzeyinde temel yüklemesini temsil edecek şekilde yapılabilen yükleme testleri ile kolonun taşıma kapasitesi ve oturma davranışı belirlenebilir. Bu tez kapsamında ise dördü taş kolon elemanları üzerinde olacak şekilde 8 adet yükleme testi gerçekleştirilmiş olup, ileriki bölümlerde bu testler ile ilgili daha detaylı bilgilere yer verilecektir.

2.7 Taş Kolon Sitemlerinin Değerlendirilmesi

Yumuşak killerin, siltli kumların, vibroflotasyon ya da derin sıkıştırma teknikleri ile verimli şekilde sıkıştırılmayan gevşek granüler ve dolgu zeminlerin iyileştirilmesinde etkin bir yöntem olan taş kolonların diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları şu şekilde özetlenebilir:

- Derin temel sistemleri (fore ya da çakma kazık), tamamen yer değiştirme veya enjeksiyon gibi geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, imalatta kullanılan malzemenin kolay temin edilebilir ve ucuz olması sebepleri ile taş kolonlar oldukça ekonomik çözümler sunar.
- Taş kolon yöntemi, etkin bir drenaj sistemi olduğundan kohezyonlu birimlerde konsolidasyon sürelerini azaltarak yumuşak zeminlerin mukavemetini arttırmaktadırlar. Taş kolonların tek başına üstlendiği bu etkiyi diğer zemin iyileştirme yöntemleri ile yaratabilmek için birkaç sistemin birlikte çalıştırılmasına (kum dren + ön yükleme gibi) ihtiyaç vardır.
- Taş kolon imalatında kullanılan malzeme doğal zemin olduğundan yöntemin çevreye olumsuz etkisi (ıslak yöntemde kullanılan suyun deşarjı hariç) bulunmamaktadır.
- Taş kolonların uygulanabilirliği önemli ölçüde zemin koşullarına bağlı olduğundan yöntemin uygulanması için tecrübeli mühendis gruplarının çalışmalarına ve detaylı zemin araştırmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kayma mukavemeti ≤ 15 kPa olan zeminlerde ve organik ya da turba zemin tabaka kalınlığının kolon çapının iki katından fazla olduğu durumlarda yöntem verimliliğini kaybetmektedir.

3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) SİSTEMLERİ

Bu bölümde, darbeli kırmataş kolon elemanları için çeşitli imalat yöntemleri, bu yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması, yöntemlerin inşa ve performans avantajları, tasarım kriterleri ve kalite kontrol prosedürleri gibi konulara yer verilecektir.

3.1 Genel

Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK); elverişsiz bir zeminin güçlendirilmesinde oldukça ekonomik bir çözüm yolu sunması sebebi ile son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. 1980'li yıllarda Amerika'da Dr. Fox tarafından geliştirilen bu yöntem ile oturmaların uygun seviyelere indirilmesi ve temel altındaki yumuşak zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir (Lawton ve Fox, 1994; Lawton ve diğ., 1994; Wissmann ve diğ., 2001; Lawton ve Warner 2004; Wissman ve diğ., 2007). Bu kolonlar, önceden kazılmış kuyulara ya da mandrelin zemine çakılmasıyla oluşturulan kuyulara geri dolgu ile, sağlam agrega tabakalarının özel tasarlanmış pahlı tokmak ile darbelenmesi sonucunda oluşturulur (Fox ve Cowell, 1998). Kolon imalatı sırasında ilk tabaka darbeleme ile sıkıştırılırken alt kısmı yayılarak diğer tabakalar için sağlam bir tabaka (bottom bulb) oluşması sağlanır. Darbe ile sıkıştırma sonucunda kuyu içerisindeki agrega; kolon boyunca yanal olarak ve uç kısmında aşağıya doğru genişleyerek, çevre zemine ön gerilme kazandırır ve zemini sıkı bir hale getirir (Handy ve White 2006a, b; White ve Suleiman 2005; White ve diğ., 2006).

Darbeli kırmataş kolonlar ile; kohezyonsuz zeminlerde (ince dane oranı < % 20) kolon etrafındaki zeminin sıkışması, kohezyonlu zeminlerde ise zemin içerisinde nispeten rijit kolonların oluşturulması amaçlanmaktadır. Elverişsiz zemini, üst yapı yüklerini destekleyebilecek duruma getirebilmek amacıyla uygulanan bu yöntem ile;

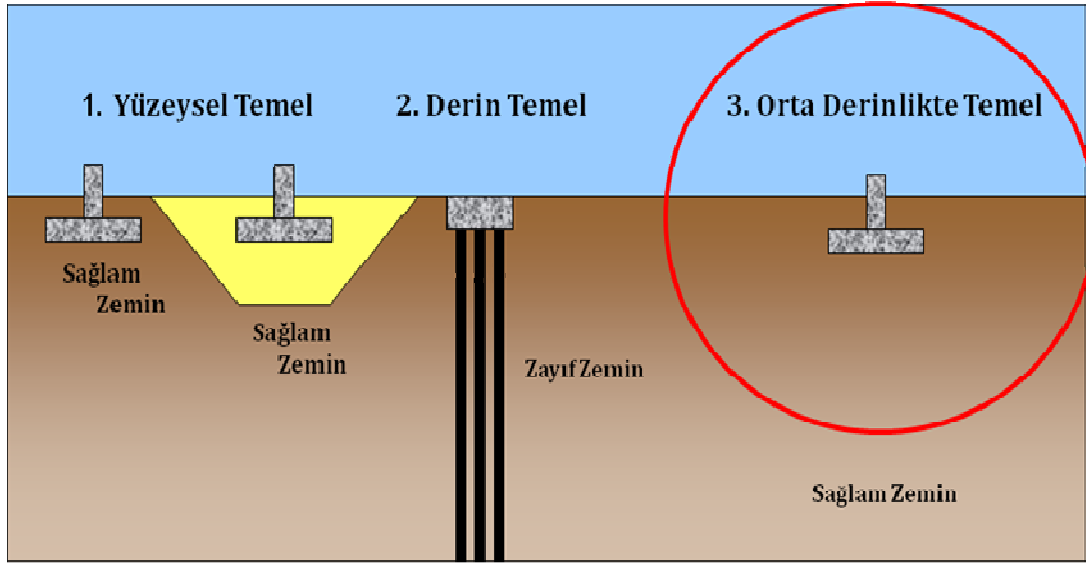
- Zayıf zeminin taşıma kapasitesinin artırılması
- Toplam ve farklı oturmaların azaltılması

- Konsolidasyonun hızlandırılması
- Zeminin permeabilitesinin azaltılması
- Zeminin sıvılaşma potansiyelinin azaltılması
- Dolgu şevlerinin ve doğal şevlerin stabilitesinin artırılması

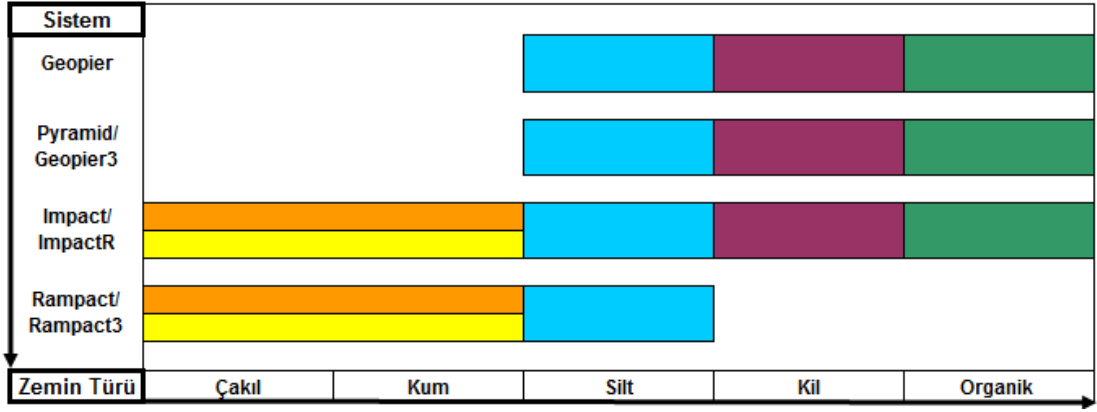
sağlanmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonlar; Şekil 3.1’de gösterildiği gibi birçok mühendislik yapısının desteklenmesini *orta derinlikte temel çözümü* ile sağlamaktadır. Bu yöntemin uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Tekil ve radye temel zeminlerinde
- Yol projelerinde
- Dolgu ve menfez temel zeminlerinde
- Tank temel zeminlerinde
- Sanayi ve enerji yapılarında
- Köprü yaklaşım dolgularında









Şekil 3.1 : DKK elemanlarının diğer temel sistemleri ile karşılaştırılması (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).



Şekil 3.2 : DKK teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).

Darbeli kırmataş kolon elemanları, uygulama yöntemi olarak çeşitli gruplara ayrılmakta olup, bu uygulama yöntemleri ve detayları Çizelge 3.1’de, işlenebilir zemin sınırları ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu tez kapsamında ise, DKK elemanlarının ilk geliştirildiği klasik yöntem olan Geopier® Sistemi için uygulama detayları anlatıldıktan sonra, 2005 yılından bu zamana kadar Türkiye’de zemin iyileştirme yöntemi olarak tasarımı ve uygulaması ile yer bulan Impact Sistemi® anlatılacak olup, uygulamadan bir örnek ile bu sistemin analizi detaylıca ele alınacaktır.

Çizelge 3.1 : Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) imalat yöntemleri (Geopier® Foundation Company, Inc., 2010).

Şekil	Sistem	Zemin Türü	Auger Çapı (cm)	Darbe Tokmağı Çapı (cm)	İmalat Çapı (m)	Mak. Darbe Tokmağı Uzunluğu (m)	Min. Karelaaj (m)	Tipik Uygulama Alanları	Özel Durum
	Geopier	Bknz. Şekil 3.2	76	66	76+	7.6	1.07	Hafif ile Ağır Temeller & Döşemeler, Tank, Dolgu, İstinat Duvarları, Rüzgar Santralleri	-
	Pyramid	Bknz. Şekil 3.2	61	15 (üst) 56 (alt)	61+	7.6	0.92	Hafif ile Orta Hafif Temeller & Döşemeler,	-
	Geopier3	Bknz. Şekil 3.2	51 - 61	46 - 52	51 – 61+	7.6	0.92	Hafif ile Ağır Temeller & Döşemeler,	-
	Impact	Bknz. Şekil 3.2	-	36	50+	13.7+	1.22	Hafif ile Ağır Temeller & Döşemeler, Tank, Dolgu, İstinat Duvarları, Rüzgar Santralleri	Zemin Artığı Yok
	ImpactR	Bknz. Şekil 3.2	-	31	50+	13.7+	1.22	Hafif ile Ağır Temeller & Döşemeler, Tank, Dolgu, İstinat Duvarları, Rüzgar Santralleri	Zemin Artığı Yok
	Rampact3	Bknz. Şekil 3.2	-	38 (üst) 46 (alt)	46+	5	1.22	Hafif ile Ağır Temeller & Döşemeler, Tank, Dolgu, İstinat Duvarları, Rüzgar Santralleri	Zemin Artığı Yok

3.2 Geopier® Sistemi (Replacement Method)

Geopier® Sistemi, kolon hacmi kadar zayıf zeminin çıkartılıp yerine kırmataş doldurulmasıyla imal edilen, iyi ile zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemidir. Burgu ile ön delgi yapılması ve düşey darbeleme enerjisi ile kırmataşın sıkıştırılması işlemine dayanan bu yöntem, toplam ve farklı oturumların kontrol edilmesinde ve proje ihtiyaçları doğrultusunda zemin taşıma kapasitesinin artırılmasında oldukça etkilidir.

3.2.1 Geopier® sistemi ekipmanı

Geopier® sistemi ekipmanı; (a) muhafaza borusu, (b) burgu (auger), (c) yükleyici ve (d) pahlı tokmak olmak üzere dört birimden oluşmaktadır (Şekil 3.3).

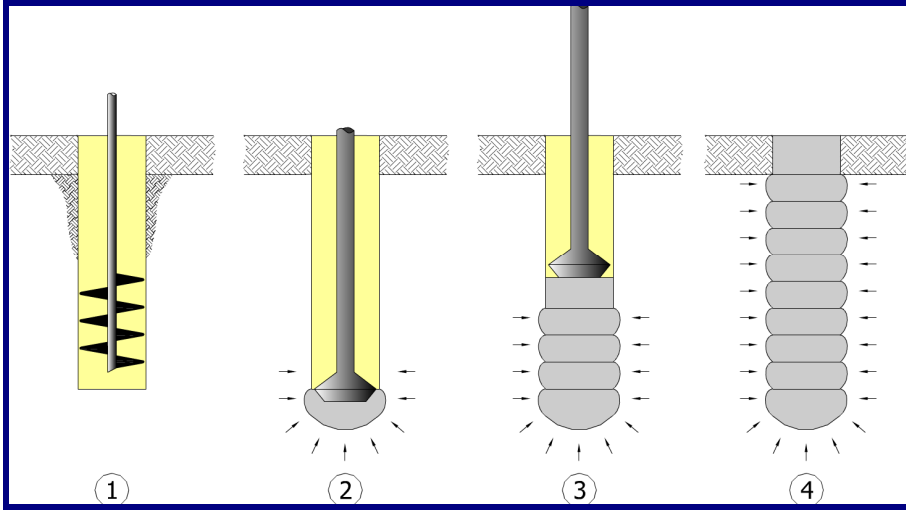


Şekil 3.3 : Geopier sistemi ekipmanı (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).

3.2.2 Geopier® sistemi imalat yöntemi

Patentli Geopier imalatı Şekil 3.4’de gösterildiği gibi dört aşamadan oluşur (Lawton ve Fox 1994, Lawton ve diğ. 1994, Wissmann ve Fox 2000, Wissmann ve diğ. 2000). İmalat, zemin içinde 76 cm çapındaki burgu yardımı ile proje derinliğine kadar bir kuyunun açılmasıyla başlar (1). Yeraltı suyu ile karşılaşıldığı durumda kuyu açılması işleminden önce muhafaza borusu çakılır. Kuyu derinliği tasarım ihtiyaçlarına göre 2 m ile 8 m arasında değişebilir. Açılmış kuyunun içine 46 cm

kalınlığında kırmataş doldurulur ve pahlı tokmak ile 30 cm kalınlığında bir tabaka elde edilecek şekilde düşey darbeleme ile kırmataş sıkıştırılır (2). Aynı işlemler sıkıştırılmış tabakaların zemin yüzeyinde sonlanmasına kadar tekrar edilir (3-4).



Şekil 3.4 : Geopier sistemi imalat adımları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).

3.2.3 Geopier® sisteminin inşa ve performans avantajları

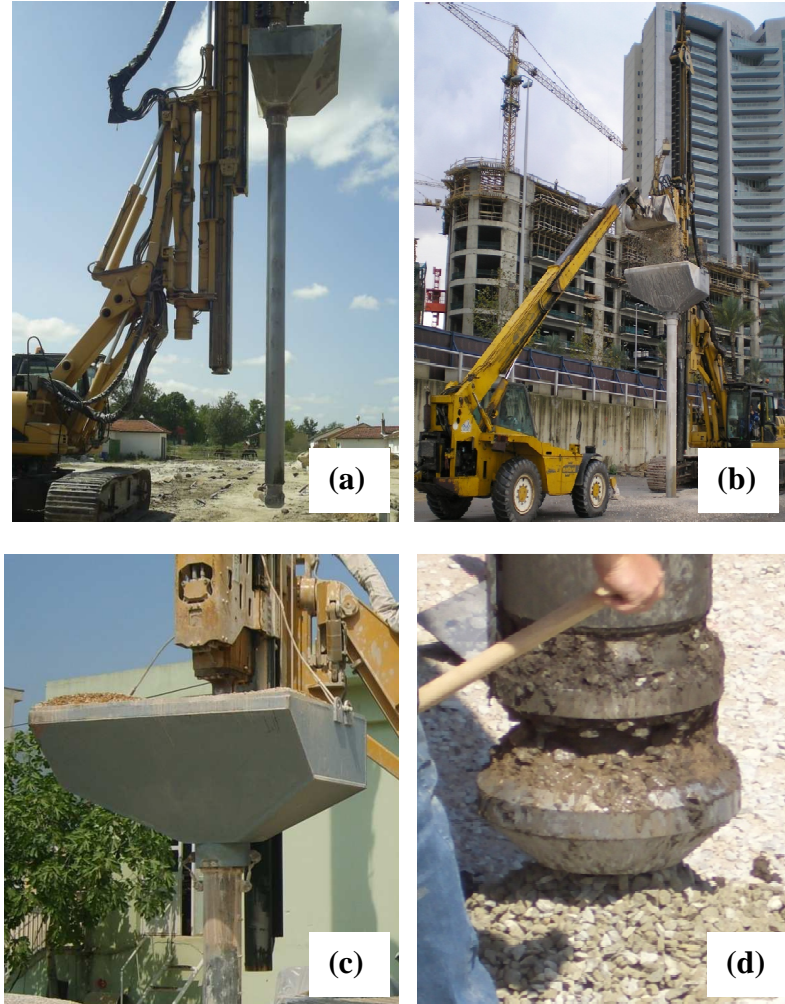
- Ön delgiyle mevcut zeminin çıkarılması işlemine dayanan bu yöntem, zeminin görülebilir olmasına ve dolayısıyla doğru zeminin güçlendirilip güçlendirilmediğinin tespitine olanak sağlamaktadır.
- Derin kazı ve yerine sağlam dolgu yapılması, çakma ya da fore kazık gibi derin temel sistemlerine alternatif olarak *orta derinlikte temel çözümü* (Şekil 3.1) sunmaktadır.
- Pahlı tokmağın oluşturduğu darbeleme, kırmataşı düşey olarak sıkıştırırken kuyunun duvarına doğru yanıl olarak iter. Yanıl gerilmelerin zeminin sıkışma özelliğindeki etkisi Handy, 2001 tarafından incelenmiş ve geliştirilmiştir. Bunun sonucunda, çevresindeki zemin ile etkileşime giren DKK elemanı güvenilir bir oturma kontrolü sağlar.
- 480 kPa mertebelerine kadar taşıma kapasitesine sahip bu rijit elemanlar çekme donatıları ile beraber kullanıldığında rüzgar ve sismik yükler karşısında çekme direnci sağlayabilmektedirler.
- Temiz ve hızlı inşa metodu sayesinde proje sürelerini önemli ölçüde hızlandırır.
- Yirmi yılı aşkın süredir temel desteği olarak kullanılması bu elemanların güvenilir ve ekonomik olduğunun bir kanıtıdır.

3.3 Impact® Sistemi (Displacement Method)

Impact® Sistemi, mandrelin tasarım derinliğine kadar çakılması ve hazneden boşalan kırmataşın mandrel içine doldurulmasıyla imal edilen, iyi ile zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemidir. Mandrelin zemini yanlara doğru iterek zemin yerini alması ve düşey darbeleme enerjisi ile kırmataşın sıkıştırılması işlemine dayanan bu yöntem, toplam ve farklı oturmaların kontrol edilmesinde, proje ihtiyaçları doğrultusunda zemin taşıma kapasitesinin artırılmasında, konsolidasyon sürelerinin hızlandırılmasında, şev ve dolguların stabilitesinde ve sıvılaştırma iyileştirmesinde oldukça etkilidir.

3.3.1 Impact® sistemi ekipmanı

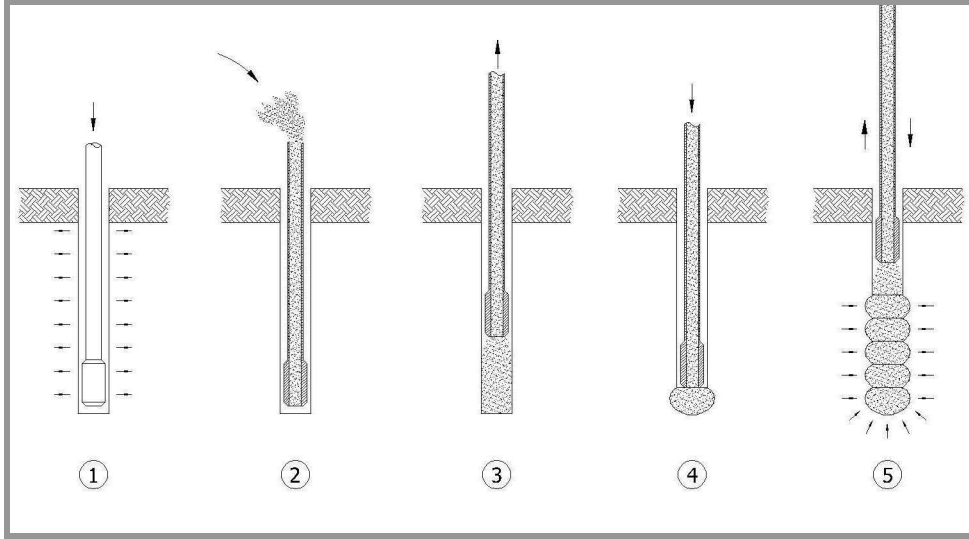
Impact® sistemi ekipmanı; (a) Impact makinesi, (b) yükleyici, (c) hazne ve (d) mandrel olmak üzere dört birimden oluşmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Impact sistemi ekipmanı.

3.3.2 Impact® sistemi imalat yöntemi

Şekil 3.6’da gösterildiği gibi kuyu içindeki zeminin yanlara doğru deplase edilmesini sağlayarak zemini sıkı bir hale getiren bu yöntemde, ucuna sarf plakası yerleştirilmiş 36 cm çaplı mandrel, itme kuvveti ve darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir (1) ve kırmataş ile doldurulur (2). Daha sonra, mandrel 1.0 m yukarıya kaldırılır (3) ve aşağı itme basıncıyla 67 cm indirilerek, 33 cm kalınlığında sıkıştırılmış 50 cm çapında bir tabaka oluşturulur (4). Daha sonraki tabakalar da anlatılan bu prosedür doğrultusunda kolonun üst kotuna kadar oluşturulur (5). Sıkıştırma; statik kuvvet ve vibratörün dinamik enerjisi ile gerçekleştirilir. Darbe tokmağı, kırmataşı düşey yönde ve çevredeki zemini de yatay yönde sıkıştırır. Bu çift yönlü sıkıştırma ile; zeminin sağlamlığı artar ve oturmalar kontrol altına alınır.



Şekil 3.6 : Impact sistemi imalat adımları (Geopier® Foundation Company, Inc., 2009).

3.3.3 Impact® sisteminin inşa ve performans avantajları

- Özel olarak dizayn edilmiş bir mandrelin ve darbeleme kafasının dinamik düşey darbeleme enerjisi ile zemin içine çakılması işlemine dayanan bu yöntemle zemin yanlara doğru itilir, bir sıkışma ve güçlendirme oluşturulur ve yapılan imalattan dışarıya herhangi bir zemin kısmı çıkarılmadığı için çevre kirliliği oluşturmaz.
- Zemini yer değiştiren tipteki mandreli sayesinde zayıf zeminlerin kazılmasının söz konusu olduğu projelerde oldukça ekonomik bir çözümdür.
- Büyük miktardaki kazı ve dolgu işlerinin, çakma ya da fore kazık gibi derin temel sistemlerine alternatif olarak *orta derinlikte temel çözümü* (Şekil 3.1) sunmaktadır.

- Projenin gereklerine göre 18 m derinliklere kadar yer alan yumuşak/gevşek zemin tabakalarının iyileştirilmesi sağlanabilir. Özellikle sıvılaşma problemi olan zemin tabakaları için sıvılaşma potansiyelinin söz konusu olduğu derinliklere kadar etkin bir iyileştirme olanağı sunar.
- Pahlı tokmağın oluşturduğu darbeleme, kırmataşı düşey olarak sıkıştırırken kuyunun duvarına doğru yanal olarak iter. Yanal gerilmelerin zeminin sıkışma özelliğindeki etkisi Handy, 2001 tarafından incelenmiş ve geliştirilmiştir. Bunun sonucunda, çevresindeki zemin ile etkileşime giren DKK elemanı güvenilir bir oturma kontrolü sağlar.
- 480 kPa mertebelerine kadar taşıma kapasitesine sahip bu rijit elemanlara gerektiği durumlarda çimentolu katkı eklenmesi ile kolonların rijitliğini ve taşıma gücünü arttırmak mümkün olmaktadır.
- Temiz ve hızlı inşa metodu sayesinde proje sürelerini önemli ölçüde hızlandırırlar.
- Kendini tutamayan ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip zeminlerde muhafaza borusuna ihtiyaç duyulmadan uygulanabilmesi oldukça pratik ve ekonomik bir yöntem olduğunun kanıtıdır.

3.4 Darbeli kırmataş kolon elemanının özellikleri

Darbeli kırmataş kolon elemanlarının çapları, boyları, içsel sürtünme açıları ve imalatta kullanılan malzemenin özellikleri aşağıdaki anlatımlarda özetlenmiştir.

3.4.1 Darbeli kırmataş kolon çapı

Darbeli kırmataş kolon elemanlarının çapı, Çizelge 3.1'de özetlenen imalat yöntemlerine göre farklılıklar göstermekte olup, Geopier sistemi ile imal edilen kolonlar için bitmiş çapın 76 cm, Impact sistemi ile imal edilen kolonlar için bitmiş çapın 50 cm olduğu bilinmektedir.

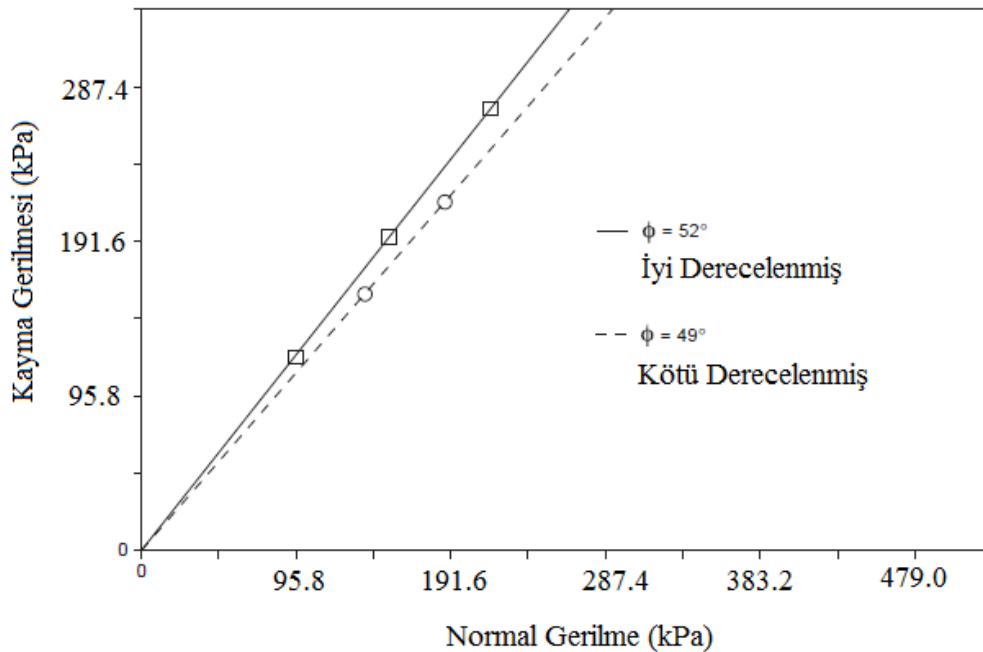
3.4.2 Darbeli kırmataş kolon boyu

Proje kriterlerine göre çeşitli imalat yöntemleri için değişik boylarda darbeli kırmataş kolon imalatı (DKK) yapılabilir. Geopier sistemi ile imalat boyunun maksimum 8 m, Impact sistemi için ise imalat boyunun maksimum 18 m olduğu bilinmektedir. DKK elemanlarının boyları genellikle kısadır. Uzunlukları genişliklerinin 2 ila 8 katı

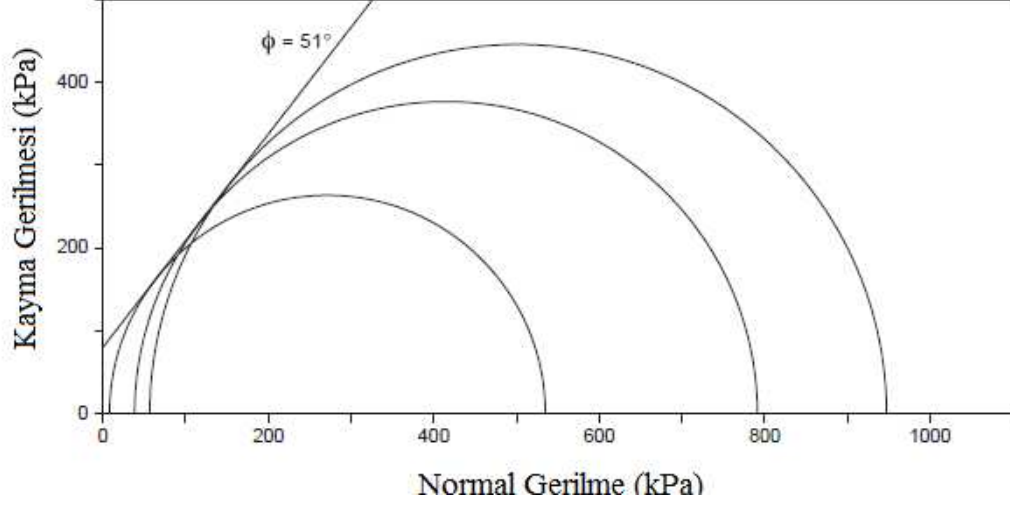
arasında olacak şekilde imal edilebilirler. Sıvılaşma potansiyeli söz konusu olan sahalarda Impact sistemi tercih edilerek gerekli iyileştirme rahatlıkla sağlanabilir.

3.4.3 Darbeli kırmataş kolon içsel sürtünme açısı

Darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanlarının mühendislik özelliklerini belirleyebilmek için; arazide tam ölçekli kesme deneyi ve laboratuarda ise temsili numuneler üzerinde küçük ölçekli üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bitmiş çapı 76 cm olan Geopier DKK elemanı üzerinde uygulanan tam ölçekli kesme deneyi sonuçları; ince dane oranı % 0 olan malzeme ile imal edilmiş kolonların bulunduğu bölgede içsel sürtünme açısının 49° , ince dane oranı %5-10 olan malzeme ile imal edilmiş kolonların bulunduğu bölgede ise içsel sürtünme açısının 52° civarında olduğunu göstermektedir (Şekil 3.7). Iowa Üniversitesi'nde gerçekleştirilen küçük ölçekli üç eksenli basınç deneyi sonuçları ise, ince dane oranı %5-10 olan malzeme ile imal edilmiş kolon için içsel sürtünme açısının 51° olduğunu göstermektedir (Şekil 3.8). Arazi ve laboratuvar test sonuçlarına göre yüksek içsel sürtünme açısının elde edilmesinin sebebi ise, Geopier elemanı için kullanılan kırmataşın yüksek enerji ile darbelenmesi sonucu yanal olarak genişlemesi ve yüksek yoğunluğa sahip olması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 3.7 : Geopier DKK üzerinde uygulanan arazi kesme deneyi sonuçları (Fox ve Cowell, 1998).



Şekil 3.8 : Sıkıştırılmış Geopier agregası üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi (White, 2001).

3.4.4 Darbeli kırmataş kolon rijitlik modülü

Darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanlarının rijitlik modülü tam ölçekli yükleme testleri sonuçlarına göre belirlenir. Geopier elemanı üzerine uygulanan % 100 tasarım gerilmesi altında elde edilen rijitlik modülünün birimi MN/m^3 olarak tanımlanır. Bu yükleme testi, kazık yükleme testindeki gibi taşıma kapasitesi kontrolü sağlayan bir test değildir, aksine Geopier elemanının rijitliğinin belirlenmesinde kullanılan oturma kontrolü testidir (Fox ve diğ., 2002). 20 yılı aşkın süredir gerçekleştirilen 400 den fazla yükleme testi sonuçları; çeşitli zemin türleri için tipik DKK rijitlik modülü değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu yükleme testleri sonuçları DKK rijitlik modülünün iyileştirilmemiş zeminin rijitlik modülünden 10 ile 40 kat fazlası şeklinde elde edildiğini göstermiştir. Yükleme testi ölçümlmelerine göre gerilme konsantrasyon oranının kontrolü 1998 yılında bir araştırma projesi kapsamında Salt Lake City, Utah bölgesinde yapılmıştır (Lawton, 2000).

Çizelge 3.2 : Genelleştirilmiş zemin türleri için Geopier rijitlik modülü değerleri (Fox ve Cowell, 1998).

Zemin Sınıfı	Serbest Basınç Mukavemeti (kPa)	Geopier Rijitlik Modülü, k_g (MN/m^3)	
		Zemin Sınıfı	SPT N (darbe)
Kil	10 – 110	Kum	1 – 6
	111 – 220		7 – 12
	221 - 380		13 - 25

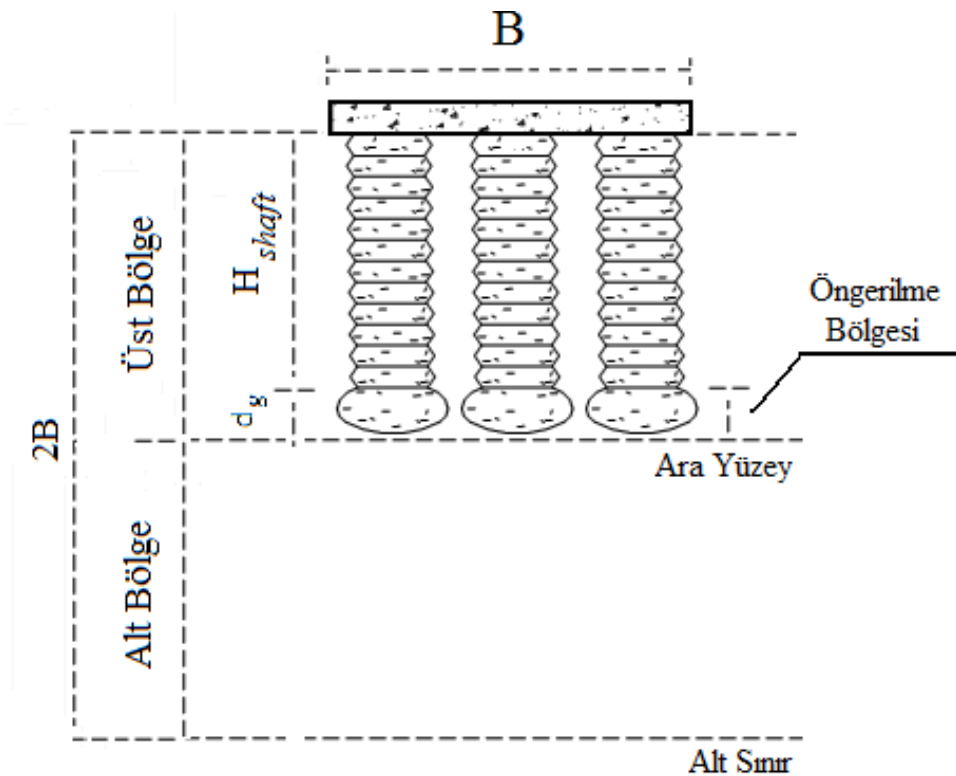
Çizelge 3.2’de gösterilen değerler son zamanlarda Geopier Foundation Company tarafından modifiye edilmiştir. Ayrıca diğer DKK imalat yöntemleri için de değişik zemin koşullarını kapsayan ön tasarım rijitlik modülü değerleri geliştirilmiştir.

3.4.5 Darbeli kırmataş kolon malzemesinin dane çapı dağılımı

Impact darbeli kırmataş kolon (DKK) inşaatı için kullanılacak kırmataşın maksimum dane çapı 38 mm, minimum dane çapı ise 13 mm olmalıdır ve bu malzeme yükleme ve akma deneylerinde de başarıyla kullanılmış olmalıdır. Yumusak veya gevsek zeminlerde inşaatı kolaylaştırmak için yükleme ve akma deneyinden geçmesi şartı ile dane büyüklüğü 5 cm veya daha yukarısı kırmataş kullanılabilir. Alternatif tip kırmataşlar Impact DKK inşaatında kullanılabilir. Bunlar, çimento (grout) içeren kırmataş veya beton karışımı olabilir.

3.5 Impact Sistemi İle Desteklenmiş Temelerde Oturma Hesabı

Darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile desteklenen temeller için oturma analizi, temel ile DKK, temel ile zemin ve DKK ile zemin arasındaki etkileşimi içeren bir zemin-yapı etkileşimi problemidir. DKK elemanları ile desteklenmiş temeller için oturma tahminlerinin yapıldığı çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 3.9 : Temel altında alt bölge ve üst bölge sınırları (Fox ve diğ., 1998).

1992 yılından bu zamana kadar DKK projelerinde kullanılan en pratik yöntem, gerilmelerin sönümlendiği etki derinliğine kadar yer alan bölgenin iki tabakalı olarak değerlendirilmesidir (Lawton ve diğ., 1994, Lawton ve Fox, 1994, Fox ve Cowell, 1998 ve Wissmann ve diğ., 2002). Bunlardan birincisi, 'üst bölge' olarak adlandırılan DKK elemanlarının imal edildiği, sıkışabilirliğin azaltıldığı iyileştirilmiş bölgedir. İkincisi ise, 'alt bölge' olarak adlandırılan ve geleneksel oturma analizleri yaklaşımı ile değerlendirilen iyileştirilmiş bölgenin altındaki bölgedir (Şekil 3.9). Üst bölge oturması (S_{UZ}) ile alt bölge oturmasının (S_{LZ}) toplamı ise toplam oturmayı (S_{tot}) vermektedir (3.1).

$$S_{tot} = S_{UZ} + S_{LZ} \quad (3.1)$$

3.5.1 Üst bölge oturması

Temel alt kotundan tasarım derinliğine kadar imal edilen kolonun düşey mesafesi (H_o) ve kolonun çapı (d_{shaft}) toplamı 'üst bölge (H_{shaft})' yi oluşturmaktadır.

Üst bölge oturması, kolon ve kolon etrafındaki sıkıştırılmış zeminin kompozit rijitliğine bağlıdır. Üst bölgedeki oturma, kolon modülünün, kolon materyalindeki gerilmenin, zemin modülünün ve zemindeki gerilmenin bir fonksiyonudur. Bu kapsamda, darbeli kırmtaş kolon (DKK) elemanlarında gelişen gerilme birikimini anlamaya yardımcı olacak bir yay modeli gösterilmiştir (Şekil 3.10). Rijit bir temel ve merkeze etkiyen bir P yükü için bütün yaylar δ miktarı kadar çökecektir.

Buna göre P kuvveti;

$$P = -k.\delta \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Burada; k , yay sabiti olarak tanımlanır.

DKK ile güçlendirilmiş zeminde temel yükü nedeniyle oluşacak kolon üst kısmındaki gerilme (q_g), zemine etkiyen gerilmeden (q_m) çok daha büyüktür. Eğer temel tam olarak rijit ise zeminde meydana gelecek oturma, kolon içerisinde meydana gelecek oturmaya eşit olacaktır. Buna göre üst bölge oturması;

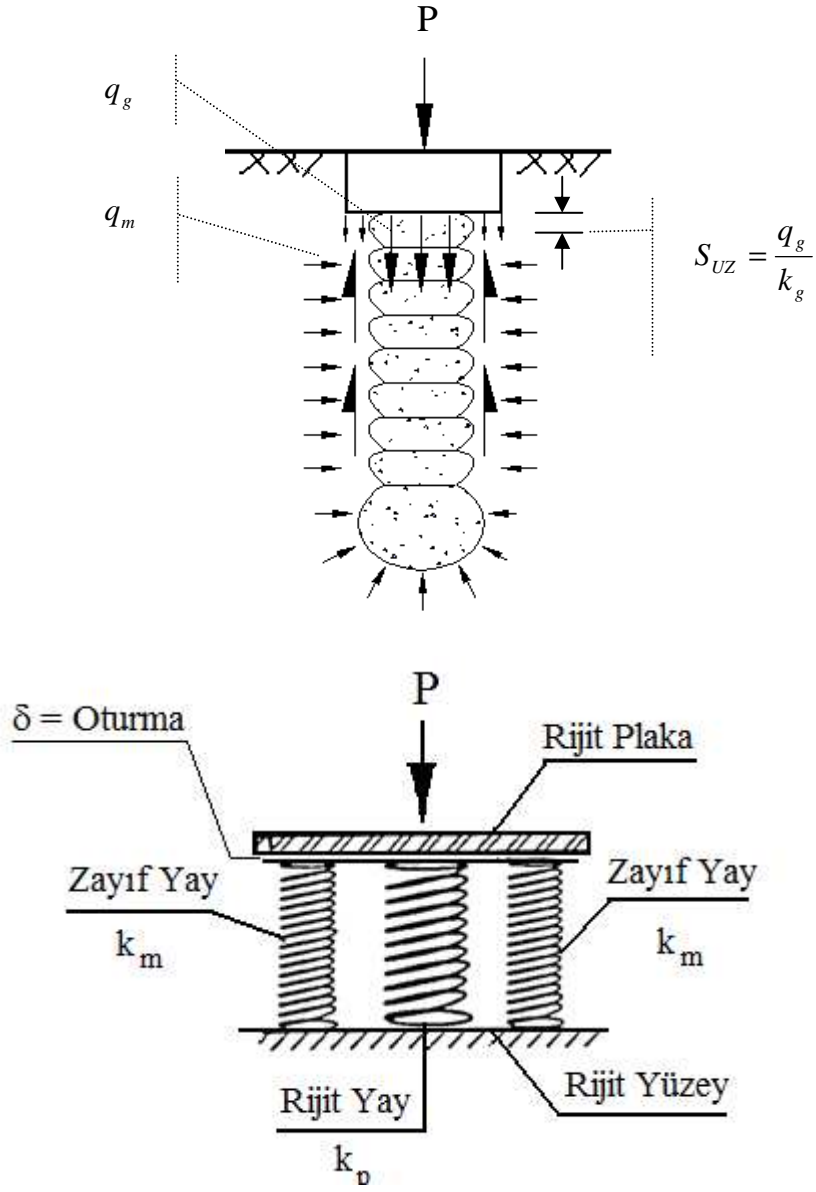
$$S_{UZ} = \frac{q_g}{k_q} = \frac{q_m}{k_m} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

k_m : Matris Zemin Rijitlik Modülü

k_g : DKK Rijitlik Modülü

olarak tanımlanır.



Şekil 3.10 : Gerilme konsantrasyonu yay yaklaşımı (Fox ve diğ., 1998).

Şekil 3.10'da gösterilen düşey yöndeki kuvvetlerin toplamı aşağıdaki eşitliği verir.

$$\sum F_v = 0 = q \cdot A - q_g \cdot A_g - q_m \cdot A_m \quad (3.4)$$

Burada;

F_v : Düşey Kuvvet

q : Temel Taban Basıncı

A : Toplam Temel Alanı

q_g : DKK Üzerindeki Gerilme

A_g : DKK Alanı

q_m : Matris Zemin Üzerindeki Gerilme

A_m : Zemin Alanı

olarak tanımlanır. Bu eşitlikten yola çıkarak DKK ve zemin üzerine gelen gerilmeler;

$$q_g = \frac{q \cdot n_s}{R_a (n_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (3.5)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a (n_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_m \quad (3.6)$$

$$R_a = \frac{A_g}{A} \quad (3.7)$$

$$R_s = \frac{q_g}{q_m} = \frac{k_g}{k_m} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

n_s : Gerilme Konsantrasyon Oranı

R_a : DKK Alan Oranı

R_s : DKK ve Matris Zemin Rijitlik Modülü Oranı

olarak tanımlanır. Rijit temeller için $R_s = n_s$ olduğundan kolon ve zemin üzerine gelen gerilme değerleri;

$$q_g = \frac{q \cdot R_s}{R_a (R_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (3.9)$$

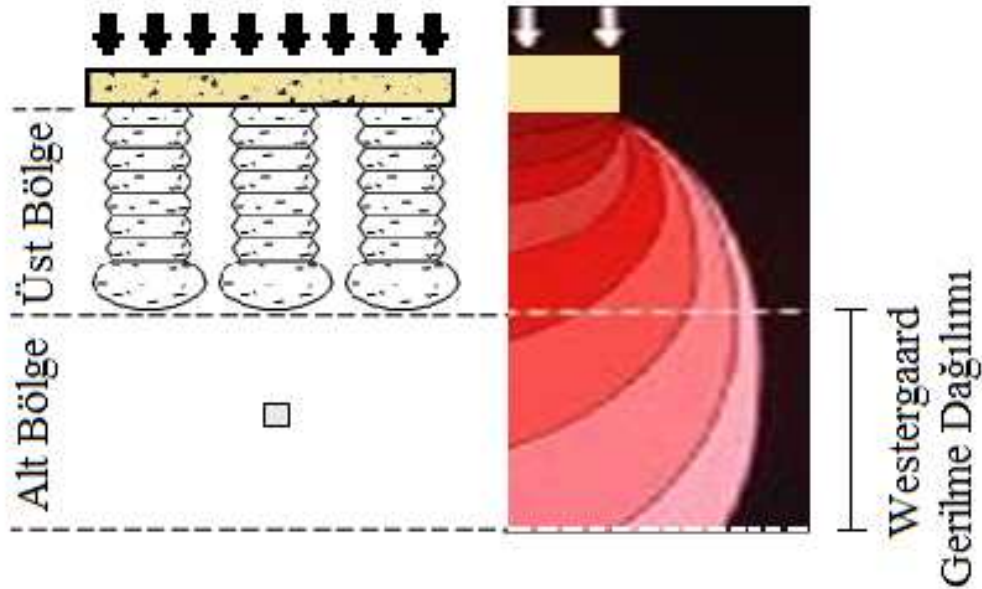
$$q_m = \frac{q}{R_a (R_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_m \quad (3.10)$$

bağıntıları yardımı ile hesaplanır.

Arazi testleri sonuçlarına göre, DKK elemanları ile matris zemin arasındaki oturma farkının oldukça küçük olmasından dolayı, üst bölge oturması analiz yöntemi sadece darbeli kırmataş kolonun deformasyonuna dayandırılmaktadır (Minks 2001, White 2002).

3.5.2 Alt bölge oturması

Alt bölge oturması, geleneksel oturma analizi yöntemlerini içeren elastik oturma ve konsolidasyon oturması hesaplamalarına dayanmaktadır (3.11). Elastik oturma analizleri için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Matris zeminin elastisite değeri, SPT (Bowles, 1977 – Martin, 1987) ya da CPT (Schmertmann, 1975) deney sonuçlarına bağlı olarak apirik yaklaşımlar ile belirlenebilir. Konsolidasyon oturması analizleri için ise, ödometre deney sonucuna bağlı değerlendirmeler yapılabilir.



Şekil 3.11 : DKK ile desteklenmiş temeller için alt bölge oturması hesap şeması (Fox ve diğ., 1998).

Kohezyonsuz ve aşırı konsolide kohezyonlu zeminler için,

$$S_{LZ} = \frac{qI_q H_{LZ}}{E_{LZ}} \quad (3.11)$$

Normal konsolide kohezyonlu zeminler için,

$$S_{LZ} = H_{LZ} \times \left(\frac{c_c}{1 + e_0} \right) \times \log \left(\frac{P'_0 + \Delta q}{P'_0} \right) \quad (3.12)$$

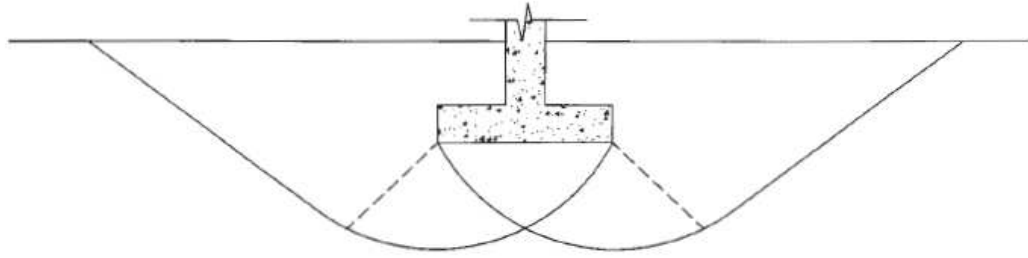
bağıntıları yardımı ile alt bölge oturma analizleri yapılmaktadır. Burada;

H_{LZ} : Alt Bölge Kalınlığı
 E_{LZ} : Matris Zemin Elastisite Modülü
 c_c : Matris Zemin Sıkışabilirlik İndeksi
 Δ_q : Düşey Gerilme Artışı
 e_0 : Başlangıç Boşluk Oranı
 P_0 : Düşey Efektif Gerilme

olarak tanımlanır.

3.6 Impact Sistemi İle Desteklenmiş Temelerde Taşıma Kapasitesi

İmpat sistemi ile desteklenmiş temelerde izin verilebilir taşıma kapasitesi oturma durumu ile kontrol edilmektedir. Tamamıyla mobilize olmuş kayma mukavemeti ile ilişkili olan taşıma kapasitesi temelin limit denge taşıma kapasitesi olarak tanımlanır. Impact sistem ile desteklenmemiş temelerde klasik kayma yüzeyi Şekil 3.12'deki gibi gerçekleşir.

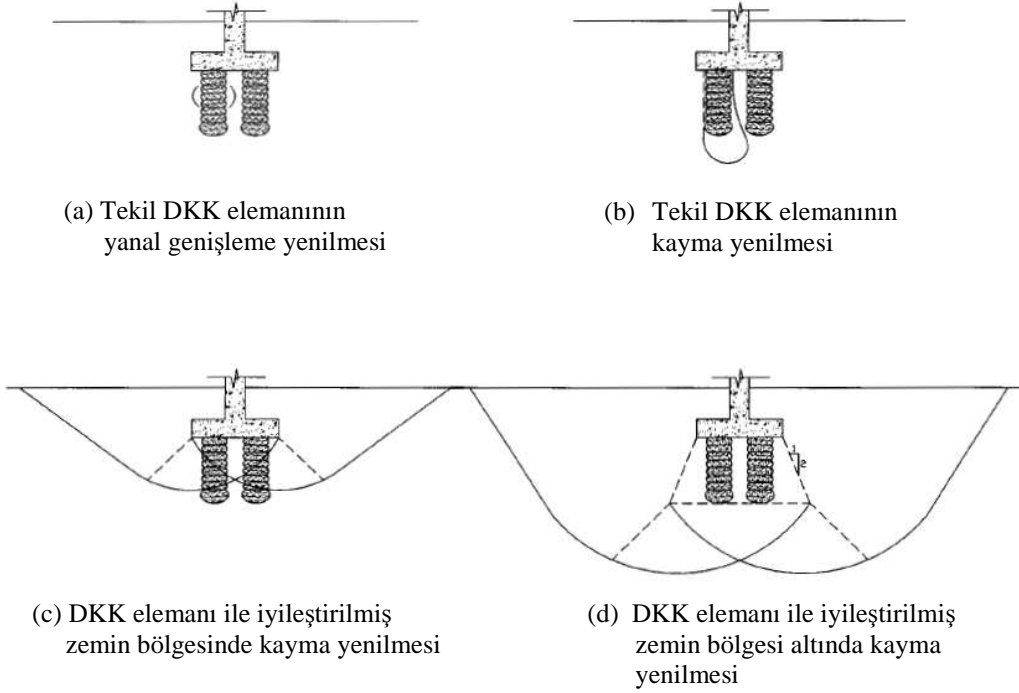


Şekil 3.12 : Şerit temelin limit denge taşıma kapasitesi (Wissman, 1999).

Darbeli kırmtaş kolon (DKK) elemanları ile iyileştirilmiş zeminlere oturan temellerin muhtemel göçme durumlarına göre çeşitli tasarım yaklaşımları vardır (Şekil 3.13).

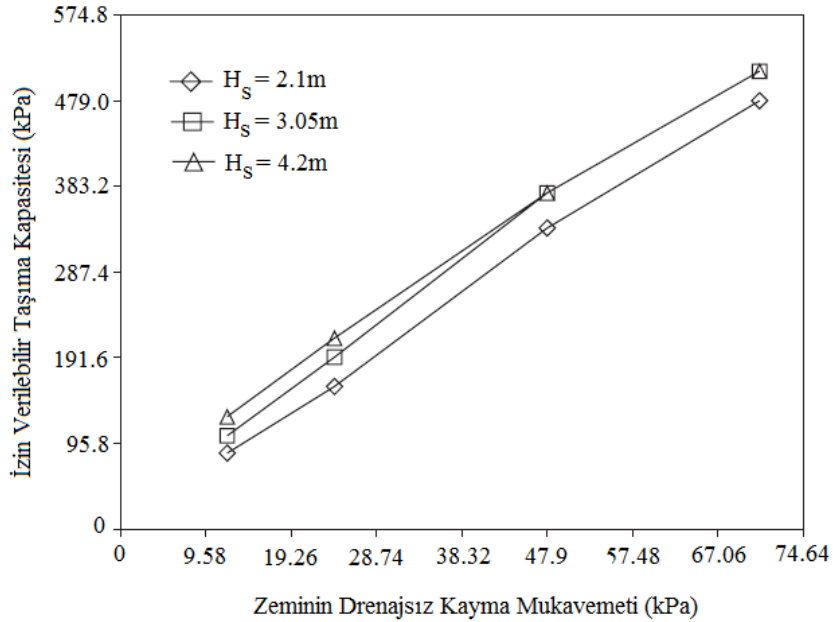
1. Tekil DKK elemanının yanıl genişleme yenilmesi
2. Tekil DKK elemanının kayma yenilmesi
3. DKK elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde kayma yenilmesi
4. DKK elemanı ile iyileştirilmiş zemin bölgesi altında kayma yenilmesi

Bu limit denge yenilme modları için hesaplanan taşıma kapasitesi sonuçlarından en kritik olanını değerlendirmeye almak daha doğru olmaktadır. Limit denge taşıma kapasitesi için tipik tasarım koşulları drenajlı ve drenajasız koşullar için Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

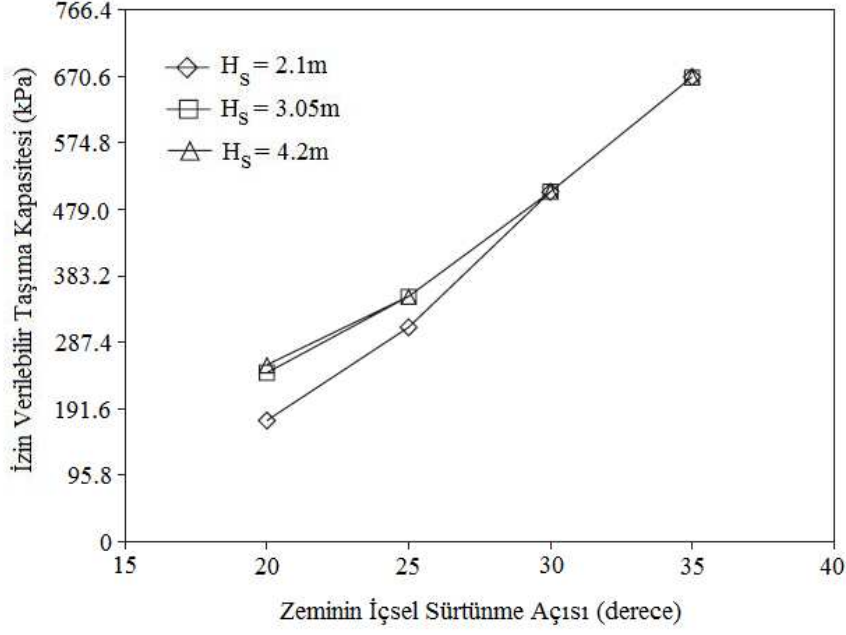


Şekil 3.13 : Muhtemel göçme mekanizmaları (Wissman, 1999).

Bu grafiklerin özellikle yumuşak ya da gevşek zeminlerde imal edilen kısa Geopier elemanlar için oldukça konservatif olduğu düşünülmelidir. Bu sebepten dolayı Geopier elemanlarının taşıma kapasitesininin yüklemeye testleri ile tahmin edilmesi önerilmektedir.



Şekil 3.14 : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti için izin verilebilir taşıma kapasitesi (Wissman, 1999).



Şekil 3.15 : Zeminin içsel sürtünme açısı için izin verilebilir taşıma kapasitesi (Wissman, 1999)

3.6.1 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının yanal genişleme yenilmesi

Doygun kil birimler içinde imal edilen tekil granüler kolonların yanal genişleme yenilmesi Mitchell, 1981 tarafından tanımlanmıştır (Şekil 3.13a). Kolon yeterince uzun ise, kolonun tepesine etkiyen gerilme, kolon uç kısmına transfer edilmeden önce kayma mukavemetinin tamamen mobilize olmasına sebep olabilir. Kolon elemanı içerisinde gelişen kayma yüzeyi, kolon elemanının dışa doğru taşarak göçmesine neden olur.

Hughes ve Withers, (1974) tekil kolonun yanal genişleme göçme mekanizmasını boşluk genişleme teorisi ile açıklamışlardır. Kohezyonlu zemin içine imal edilen darbeli kırmataş kolon (DKK) üzerindeki nihai gerilme ($q_{ult,g}$), kolonu çevreleyen sınır radyal gerilme ve Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır.

$$q_{ult,g} = \sigma_{r,lim} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_g}{2} \right) \quad (3.13)$$

Burada,

ϕ_g : DKK İçsel Sürtünme Açısı

$\sigma_{r,lim}$: Kolonu Çevreleyen Sınır Radyal Gerilme

olarak tanımlanır. Hughes ve Withers (1974) yaptıkları birçok arazi deney sonuçlarına göre, $E_u / c_u = 200$ ve drenajsız koşullar için $\mu = 0.5$ olarak kabul edildiğinde, kolonu çevreleyen radyal gerilme denkleminin,

$$\sigma_{r,\text{lim}} = 2\sigma'_v + 5.2c \quad (3.14)$$

şeklinde basitleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Burada,

σ'_v : Kritik Derinlikteki Düşey Efektif Gerilme

olarak tanımlanır.

Yanal genişlemenin beklendiği kritik derinlik (z_c) ise, DKK elemanının içsel sürtünme açısına (ϕ_g), çapına (d_g) ve temel derinliğine (D_f) bağlı olarak;

$$z_c = D_f + d_g \times \tan\left(45 + \frac{\phi_g}{2}\right) \quad (3.15)$$

şeklinde tanımlanır.

Yanal genişleme yenilmesi hesap yöntemine göre elde edilen değer, temelden kaynaklanan düşey sınır gerilmeyi içermediğinden ve DKK imal edilirken oluşan ek normal ve kayma gerilmeleri Rankine toprak basıncı durumunda göz önüne alınmadığından, konservatif bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir (Wissmann, 1999).

3.6.2 Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi

Tekil kolon ucunda oluşabilecek kayma yenilmesi Şekil 3.13b'de gösterilmiştir. Darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanının ağırlığı ihmal edilerek, DKK elemanı üzerine uygulanan toplam yük ($Q_{\text{top},g}$), çevre sürtünmesi (Q_{shaft}) ve uç direnci ($Q_{\text{tip},g}$) tarafından karşılanır.

$$Q_{\text{top},g} = Q_{\text{shaft}} + Q_{\text{tip},g} \quad (3.16)$$

Bu eşitlik gerilmeler cinsinden

$$q_{\text{ult},g} \cdot A_g = f_s \cdot A_{\text{shaft}} + q_{\text{tip},g} \cdot A_g \quad (3.17)$$

şu şekilde ifade edilir. Burada;

$q_{ult,g}$: DKK Üzerindeki Nihai Gerilme

A_g : DKK Alanı

f_s : Kolon Boyunca Ortalama Birim Sürtünme

A_{shaft} : DKK Çevre Alanı

$q_{tip,g}$: DKK Çevre Direnci

olarak tanımlanır.

Eğer inşa edilen kolon yeteri kadar uzun değil ise, kolonun üst kısmına gelen gerilme kolonun uç kısmına aktarılabilir. Uç kısımda oluşacak bu gerilme göçme meydana gelmesine sebep olabilir (Şekil 3.13b) ve bu durumda nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$q_{ult,g} = f_s \cdot A_{shaft} / A_g + q_{tip,g} = 4 \cdot f_s \cdot d_{shaft} \cdot H_{shaft} / d^2 + q_{tip,g} \quad (3.18)$$

Burada;

H_{shaft} : DKK Boyu

d_{shaft} : İmalattan Sonraki DKK Boyunca Oluşan Çap

d : DKK Çapı

olarak tanımlanır.

DKK elemanı uç taşıma kapasitesi Terzaghi-Buisman denklemi şu şekilde açıklanabilir:

$$q_{tip,g} = q_{ult} = cN_c + 0.5d_{shaft} \gamma N_\gamma + \sigma_v^3 N_q \quad (3.19)$$

Burada;

N_c, N_γ, N_q : Taşıma Gücü Faktörleri

γ : Zeminin Birim Hacim Ağırlığı

σ_v^3 : Efektif Jeolojik Basınç

olarak tanımlanır.

Drenajsız koşullar için ortalama çevre direnci DKK elemanı boyunca hakim olan drenajsız kayma mukavemetine eşit olur ve kohezyonlu birimler için 3.19 nolu denklem aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (Meyerhof, 1976);

Drenajsız Koşullarda;

$$f_s = c_u \quad (3.20)$$

$$q_{tip,g} = c_u \cdot N_c \quad (3.21)$$

Drenajlı Koşullarda;

Drenajlı koşullar için çevre direnci, ortalama efektif yanal gerilme (σ_h^3) ile zeminin sürtünme açısının tanjantına $[\tan(\phi_m)]$ eşittir.

$$f_s = \sigma_v^3 \text{avr} \tan(\phi_m) K_p = (d_f + H_{\text{shaft}} / 2) \gamma \tan(\phi_m) \tan^2(45 + \phi_m / 2) \quad (3.22)$$

3.6.3 Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede kayma yenilmesi

Bu yenilme modunda Şekil 3.13c'de görüleceği üzere göçme düzleminin kolon ve zeminden oluşan bölge içerisinde geçtiği kabul edilir. Kabul edilen göçme düzlemi boyunca kayma dayanımı, matris zeminin kaymaya karşı sürtünme direnci (t_s) ve darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanlarının göçmeye karşı sürtünme direnci (t_g) değerlerine bağlıdır.

Kolonlar ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde meydana gelebilecek yerel göçme, kompozit zemin parametreleri ve geleneksel Terzaghi-Buisman taşıma gücü eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Kompozit zemin parametreleri Priebe (1978)'a göre;

$$\phi_{com} = \tan^{-1} [n_s R_a t_g \phi_g + (1 - R_a n_s) t_g \phi_m] \quad (3.23)$$

$$c_{com} = (1 - R_a n) c \quad (3.24)$$

bağıntıları yardımı ile hesaplanabilir. Burada;

n_s : Gerilme Konsantrasyon Oranı

R_a : DKK Alan Oranı

ϕ_g : DKK İçsel Sürtünme Açısı

ϕ_m : Zemin İçsel Sürtünme Açısı

olarak tanımlanır.

Temel altındaki kayma düzlemini belirleyebilmek için alan oranı üzerinde 0.4 gibi bir azaltma faktörünün kullanılması önerilmektedir. Gerilme konsantrasyon oranı, gerilmedeki ve göçme düzlemi yönündeki değişimi hesaplamak için kullanılır. DKK elemanın üst seviyelerinde bu değer yaklaşık olarak 12'dir.

3.6.4 Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş bölge altında kayma yenilmesi

Şekil 3.13d'de görüleceği üzere bir diğer göçme durumu, kolon ve zeminden oluşan bölge altında meydana gelebilir. Bu tür bir problem için geleneksel çözümlerden elde edilen sonucun (3.19)'dan elde edilen sonuçla karşılaştırılarak bir izin verilebilir taşıma gücü basıncı belirlenmesi yoluna gidilebilir ve bu bölgede bir göçme meydana gelmesi engellenebilir. Temel altındaki gerilmenin 2:1 oranında arttığı kabulüyle kolon ile iyileştirilmiş bölge altındaki gerilme;

$$q_{ult} = q_{bottom} \{(B + H).(L + H)\} / B.L \quad (3.25)$$

Burada;

q_{bottom} : DKK ile İyileştirilmiş Tabakanın Alt Sınırında Oluşan Gerilme

B : Temel Genişliği

L : Temel Uzunluğu

H : DKK İle İyileştirilmiş Tabaka Kalınlığı

olarak tanımlanır.

3.7 Impact Darbeli Kırmataş Kolon için Kalite Kontrol Prosedürü

Impact darbeli kırmataş kolon (DKK) inşaatının tasarım prosedürü ile uygunluğunu belirlemek için proje başlangıcında en az iki adet test kolonu inşa edilir ve bu kolonlar üzerinde aşağıda belirtilen testler uygulanır (Wissman ve diğ., 1998).

- Akış oranı testi
- Kullanılmamış (artan) kırmataş hacim testi
- Kullanılan kırmataş hacim testi
- Yükleme (modulus) testi

3.7.1 Akış oranı testi

Test kolonu imalatı esnasında mandrelden akan kırmataşın akış hızını teyit edebilmek amacıyla yapılan bu testin sonuçları mandrelin imalat esnasındaki kaldırma hızını (tipik olarak 5 saniyede 30 cm) belirlemek için kullanılmaktadır. Eğer zayıf akış gözlenirse (örneğin mandrel içerisinde agreganın sıkışması), alternatif bir agraga gradasyonu veya su/hava gibi bir akış hızlandırıcı kullanılabilir.

3.7.2 Kullanılmamış (artan) kırmataş hacmi

Şekil 3.16’da gösterildiği gibi zemin yüzeyine boşaltılmış kırmataş hacmi zemin yüzeyine boşalan kırmataş konisinin yaklaşık hacmi olarak aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir.

$$V_{ar\ tan.\ kırmataş} = \frac{\pi.h.(d_{taban}^2)}{12} \quad (3.26)$$

Burada;

d_{taban} : Artan Kırmataş Konisinin Taban Çapı

h : Artan Kırmataş Konisinin Yüksekliği

olarak tanımlanır.



Şekil 3.16 : Artan kırmataş hacim ölçümü.

3.7.3 Kullanılan kırmataş hacmi

Kullanılmış kırmataş net hacmi, darbeli kırmataş kolon (DKK) imalatı esnasında mandrele ve hazneye konulmuş kırmataş miktarı ile imalat sonunda artan kullanılmamış kırmataş farkına esittir. Ortalama DKK çapı, kullanılmış kırmataş

hacmi ve Impact DKK imalat derinliğinden belirlenebilir. Net hacime ve imalat derinliğine dayalı DKK elemanının ortalama imalat çapı, aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir.

$$d_{ort.imalat} = \frac{4.V_{ort}}{\pi.L} \quad (3.27)$$

Burada;

$d_{ort.imalat}$: İmal Edilen Kolonun Ortalama İmalat Çapı

V_{ort} : İmal Edilen Kolonun Net Hacmi

L : İmal Edilen Kolonun Boyu

olarak tanımlanır.

3.7.4 Yükleme testi

Bu test, tasarım aşamasında kullanılan parametrelerin doğruluğunu teyit etmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Gerilme ile şekil değiştirme davranışının örnek bir kolon üzerinde ölçülmesi yöntemine dayanan bu test ile darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanının rijitliğinin ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi sağlanır. Test esnasındaki yük artışlarının, yük artış sürelerinin ve yük azaltışlarının belirlenmesi için ASTM D-1143 genel deney prosedürleri kullanılmaktadır. Kolon üzerindeki maksimum yükün % 115'i dışındaki tüm yük artışlarında, oturma hızı 0.254mm/saat 'in (veya 0.064mm/15dk) altında olduğu takdirde yükleme okumaları önerilen minimum sürede (15dk) sonlandırılıp, bir sonraki kademeye geçilmekte, aksi halde önerilen maksimum süreye (1 saat) kadar devam edilmektedir. Kolon üzerindeki maksimum yükün %115 'inde ise oturma hızı 0.254mm/saat (veya 0.064mm/15dk) olduğu takdirde yükleme okumaları önerilen minimum sürede (60dk) sonlandırılıp, bir sonraki kademeye geçilecek, aksi halde önerilen maksimum süreye (4 saat) kadar devam edilmektedir. Yükün geri boşaltılması aşamasında ise beklenmesi gereken minimum süre 5dk'dır. Bu test sırasında DKK tabanında oluşan oturmayı ölçmek amacıyla taban plakasına bağlanmış tell-tale olarak adlandırılan muhafazalı demir çubuklar kullanılmaktadır. DKK tabanındaki oturma DKK üstündeki oturmanın genellikle % 33'ünden fazla olmamalıdır. Şekil 3.17'de kolon altı oturma okuma plakası (tell-tale) kullanılarak gerçekleştirilen DKK imalatı ve yükleme testi düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Yükleme testi düzeneği.

Bu tez kapsamında 8 adet yükleme testi gerçekleştirilmiş olup, ileriki bölümlerde bu testler ile ilgili daha detaylı bilgilere yer verilecektir.

3.8 Darbeli Kırmataş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Önceden kazılmış kuyulara ya da mandrelin zemine çakılmasıyla oluşturulan kuyulara geri dolgu ile, sağlam agrega tabakalarının özel tasarlanmış pahlı tokmak ile darbelenmesi sonucunda oluşturulan darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemlerinin diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre performans avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Derin kazı ve yerine sağlam dolgu yapılması, çakma ya da fore kazık gibi derin temel sistemlerine alternatif olarak orta derinlikte temel çözümü sunmaktadır.
- Pahlı tokmağın oluşturduğu dinamik düşey darbeleme enerjisi ile kırmataş, düşey olarak sıkıştırırken kuyunun duvarına doğru yanal olarak iter ve çevresindeki zemin ile etkileşime giren DKK elemanı güvenilir bir oturma kontrolü sağlar.
- Impact sistemi ile projenin gereklerine göre 18 m derinliklere kadar yer alan yumuşak/gevşek zemin tabakalarının iyileştirilmesi sağlanabilir ve bu sistem mandrelin zemine çakılması işlemine dayandığı için kendini tutamayan ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip zeminlerde muhafaza borusuna ihtiyaç duyulmadan uygulama kolaylığı sağlamaktadır.
- Yüksek rijitliğe sahip bu elemanlara gerektiği durumlarda çimentolu katkıları eklenebilmesi ile bu kolonların taşıma gücünü arttırmak mümkün olmaktadır.
- Temiz ve hızlı inşa metodu sayesinde proje sürelerini önemli ölçüde hızlandırır ve yirmi yılı aşkın süredir temel desteği olarak kullanılması bu elemanların güvenilir ve ekonomik olduğunun bir kanıtıdır.

3.9 Taş Kolon ve Darbeli Kırmataş Kolon için Uygulamaya Yönelik Detaylar

Etkin bir iyileştirme yöntemi olarak, taş kolon ve darbeli kırmataş kolon tekniği son otuz yıldır tüm dünyada sıkça kullanılmaktadır. Saha çalışmalarının dikkate alındığı uygulamaya yönelik detaylar aşağıda özetlenmiştir:

- Bu sistemler ile zemin iyileştirmesinde en iyi sonuçlar, zemin yüzeyine yakın mukavemeti 15 kPa - 50 kPa olan sıkışabilir silt-kil ve gevşek-orta sıkı granüler birimlerde elde edilmektedir. Zemin koşullarına göre seçilmesi gereken imalat yönteminin önemi unutulmamalıdır. Kolon imalatı yapılırken vibrasyon sırasında hassas silt ve kil zeminlerde mukavemet kaybı gözlenebilmektedir. Bu mukavemet kaybının sebebi, vibrasyon sırasında boşluk suyu basınçlarının artmasıdır. En ekonomik iyileştirmenin sağlam zeminin 6 m – 10 m derinliklerde olduğu durumlarda sağlandığı bilinmektedir.
- Yanal genişleme analizlerinde, malzemenin drenajsız kayma mukavemetinin çok etkili olduğu bilinmekte olup, yüzeye yakın kesimlerde çok yumuşak ($c_u \approx 10$ kPa) killerin / organik zeminlerin bulunması halinde bu bölgelerde yanal genişleme problemi beklenebilir. Bu zayıf zemin tabakalarının kalınlıkları ve özellikleri

kolonların uygulamasını etkileyen önemli parametrelerdir. Büyük ölçüde oturmalara ve yerel stabilite sorunlarının ortaya çıkmaması için bu zayıf zemin tabakalarının kalınlığının kolon çapının iki katını geçmemesi gerekmektedir. Kolonlar üzerinde uygulanan yükleme testleri sonucunda yanal genişleme problemi ile karşılaşılırsa, turba tabakalarının gözlemlendiği seviyelerde çimento karışımı taş/kırmataş kullanılması ile bu sorun engellenebilir.

- Bu kolonların tasarım yükü, mevcut zemin koşullarına önemli ölçüde bağlı olmakla birlikte 20 ton – 50 ton arasında tutulmalıdır.
- Bu kolonların; baraj gövdelerinde, sedde gibi geniş yükleme alanlarında, dolgularda, tank temelleri altında, toplam ve farklı oturmalara kontrol altına alınması ya da konsolidasyon sürelerinin hızlandırılmasında ve şev stabilitesi problemlerinde etkin bir iyileştirme yöntemi olduğu bilinmektedir.
- Kolonlar üzerine yerleştirilecek dolgu malzemesinin gradasyon özelliklerine bağlı olmak üzere, (i) dolgu yüklerinin homojen olarak kolonlara dağılması (ii) killi tabakaların konsolidasyon sonrası oluşan ve kolonlarca yüzeye taşınan boşluk suyu basınçlarının tahliye edilebilmesi ve (iii) çalışma platformu sağlama amaçlarına yönelik olarak 30-100 cm kalınlığında bir granüler dolgunun teşkilinde fayda vardır. Eğer bir çalışma platformu gerekli değil ise, bu granüler dolgu kolon imalatından sonra oluşturulabilmekle birlikte bazı durumlarda imal edilen kolonların arasında kalan mevcut zemin de belirli derinliğe kadar sıyrılarak granüler dolgu ile yer değiştirebilir. Bu granüler dolgu, kolonda oluşacak genişlemiş bölgenin mukavemeti daha yüksek olan alt kotlarda oluşmasını sağlayarak kolonun nihai mukavemetinin artmasına sebep olur.

4. DARBELİ KIRMATAŞ KOLON VE TAŞ KOLON ELEMANLAR ÜZERİNDE UYGULANAN YÜKLEME DENEYLERİNİN ANALİZİ

Bu bölümde; yükleme testlerinin uygulandığı çalışma alanı kısaca tanıtıldıktan sonra zemin araştırma çalışmaları sonucu oluşturulan temsili zemin profili ile birlikte darbeli kırmataş kolon ve taş kolon elemanlarının taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen yükleme testi sonuçları değerlendirilecektir.

4.1 Çalışma Alanının Tanıtılması

Çalışma alanı, Marmara Bölgesi, Kırklareli İli, Lüleburgaz İlçesi, Sarımsaklı Mevkiinde yer almaktadır. Darbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) imalatlarının yapıldığı çalışma alanı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Lüleburgaz Kırklareli İli’nin güneyinde yer almakta olup, doğusunda Tekirdağ İlinin Saray ve Çorlu İlçeleri, batısında Kırklareli ili Babaeski İlçesi, kuzeyinde Kırklareli ili Pınarhisar İlçesi ve güneyinde ise Tekirdağ ilinin Hayrabolu ve Muratlı İlçeleri ile çevrilmiştir.



Şekil 4.1 : DKK ve TK imalatlarının yapıldığı çalışma alanı.

4.2 Çalışma Alanının Jeolojisi

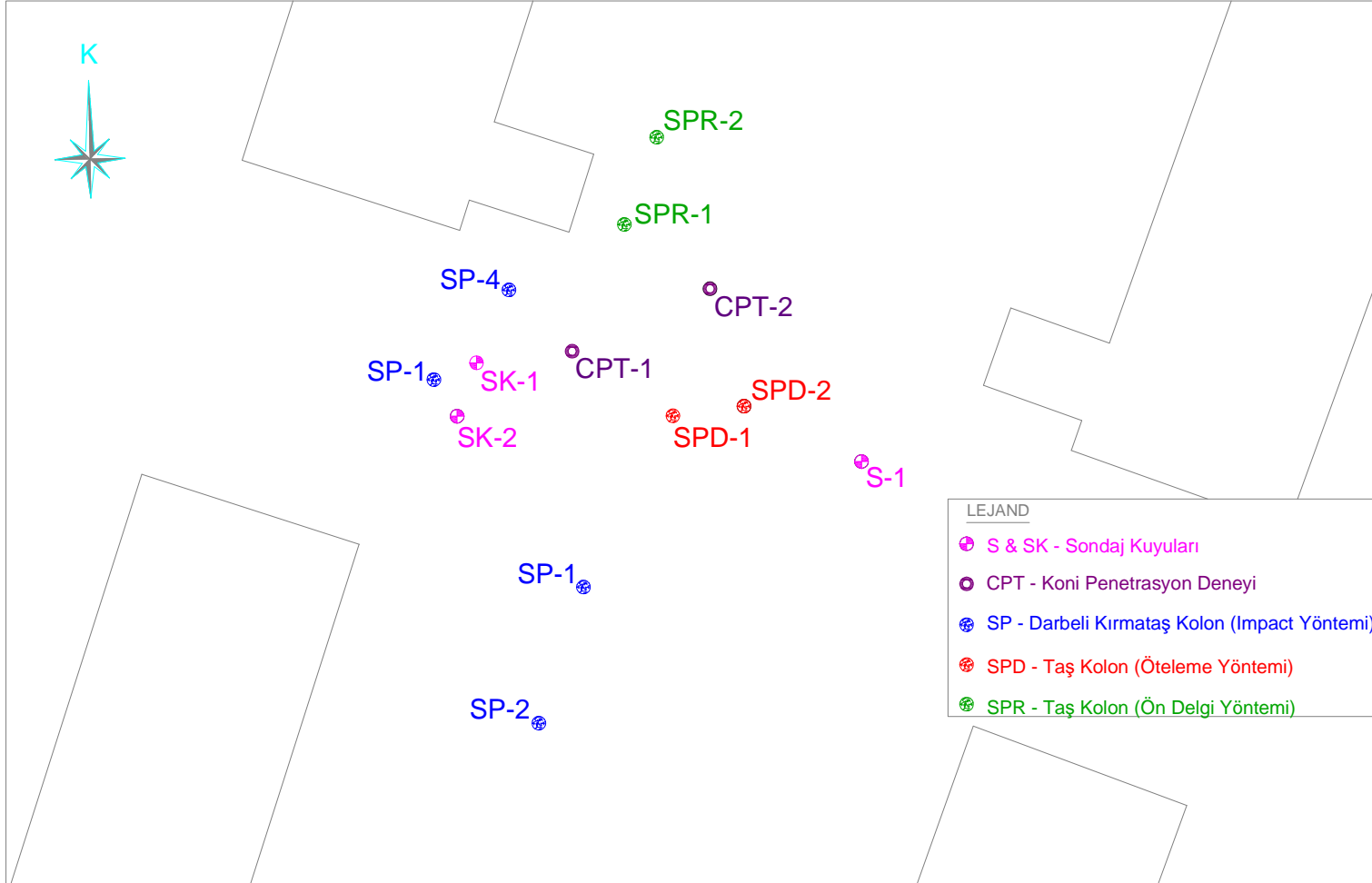
İnceleme alanı ve çevresinde Tersiyer yaşlı birimlerde; Oligosen, Miyosen ve Pliyosen dönemlerini kapsayan üç formasyon ayırtlanmıştır. Bunlardan birincisi olan ve Danişment (Td) olarak De Boer (1954) tarafından isimlendirilen formasyon genel olarak sarı, kahve, gri renkli, orta kalın ve belirgin tabakalanmalı kumtaşı - siltaşı - kiltası ardalanmasından oluşmaktadır. Danişmen Formasyonu üzerinde uyumsuzlukla oldukça geniş bir alana yayılan ve De Boer (1954) tarafından adlandırılan Ergene Formasyonu (Te) ise, beyaz sarımsı renkli, çapraz katmanlı, kil ve çakıl mercekli, gevşek tutturulmuş kumlardan oluşmaktadır. Genellikle Ergene Formasyonu üzerinde gelişmiş alüvyon yelpazesi görünümünde olan ve Hochstetter (1870) tarafından adlandırılan Trakya Formasyonu (Tt) ise; kırmızı, kahve, sarı, beyaz renklerdeki çakıl, kum, kil ve çamurtaşlarından oluşmaktadır.

4.3 Zemin Araştırma Çalışmaları ve Temsili Zemin Profili

Çalışma alanına ait mevcut zemin durumunun ve mühendislik parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla 10.0 m uzunluğunda üç adet araştırma sondajına ve iki adet CPT çalışmasına dayalı bir zemin etüdü yapılmış olup, bu çalışmalara ait fotoğraflardan birer örnek Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Mukavemet parametrelerinin geliştirilmesine ve oturma davranışının anlaşılmasına yönelik olarak arazide gerçekleştirilen ve 'EK A.1: Sondaj Logları' ve 'EK A.2: CPT Sonuçları' bölümünde gösterilen SPT ve CPT sonuçlarından yararlanılmıştır. İnceleme alanında gerçekleştirilen sondaj ve CPT çalışmaları için vaziyet planı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : İnceleme alanında gerçekleştirilen (a) sondaj çalışması (b) CPT çalışması.



Şekil 4.3 : Çalışma alanına ait vaziyet planı.

% 0 ile % 5 arasında değişim gösteren az eğimli bir topoğrafyaya sahip olan inceleme alanında, 0.0 – 1.2 metreler arasında yer alan dolgu tabakası altında 5.0 m derinliklere kadar ince çakıllı katı-çok katı kıvamda olduğu anlaşılan kil birimi yer almaktadır. Bu tabakanın devamında ise yaklaşık 1.0 m kalınlığında orta sıkı-sıkı az killi kum-çakıl tabakası geçilmiştir. Bu tabakanın altında ise çok katı-sert çakıllı, kumlu kil tabakası devam etmektedir.

Çizelge 4.1 : Temsili zemin profili ve geoteknik parametreler.

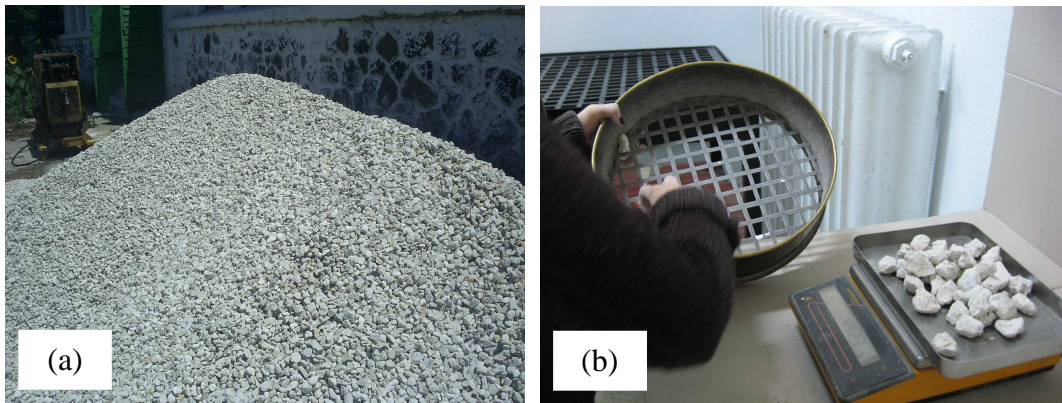
Derinlik (m)	Kalınlık (m)	Birim	SPT N ₆₀	q _c (MPa)	c _u (kPa)	φ (°)	E (MPa)
0.0 – 1.2	1.2	Dolgu	-	-	-	-	-
1.2 – 5.0	3.8	ince çakıllı KİL	11	0.4 – 0.9	30 – 70	-	11
5.0 – 6.0	1.0	ince, orta taneli, az killi KUM-ÇAKIL	16 – 22	5.4	-	36	14
≥ 6.0	-	ince çakıllı, kumlu KİL	23-41	2.6	120-200	-	18

$c_u = q_c - (\sigma_v / N_k) - q_c$: Uç direnci (kPa), σ_v : Efektif gerilme (kPa), Nk: Koni faktörü (Lunne ve diğ, 1997)

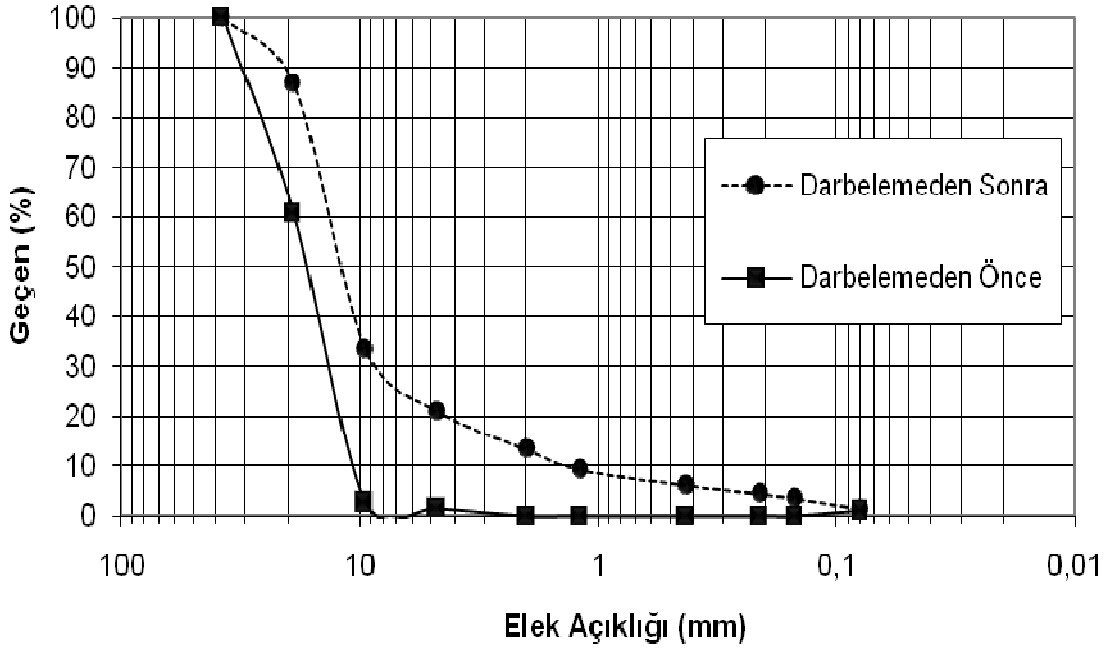
$\phi = 29 + (q_c)^{0.5} - q_c$: Uç direnci (MPa) (Mayerhof, 1976)

$E = N_{60} \times 0.7 - N_{60}$: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı (CIRIA, 1988)

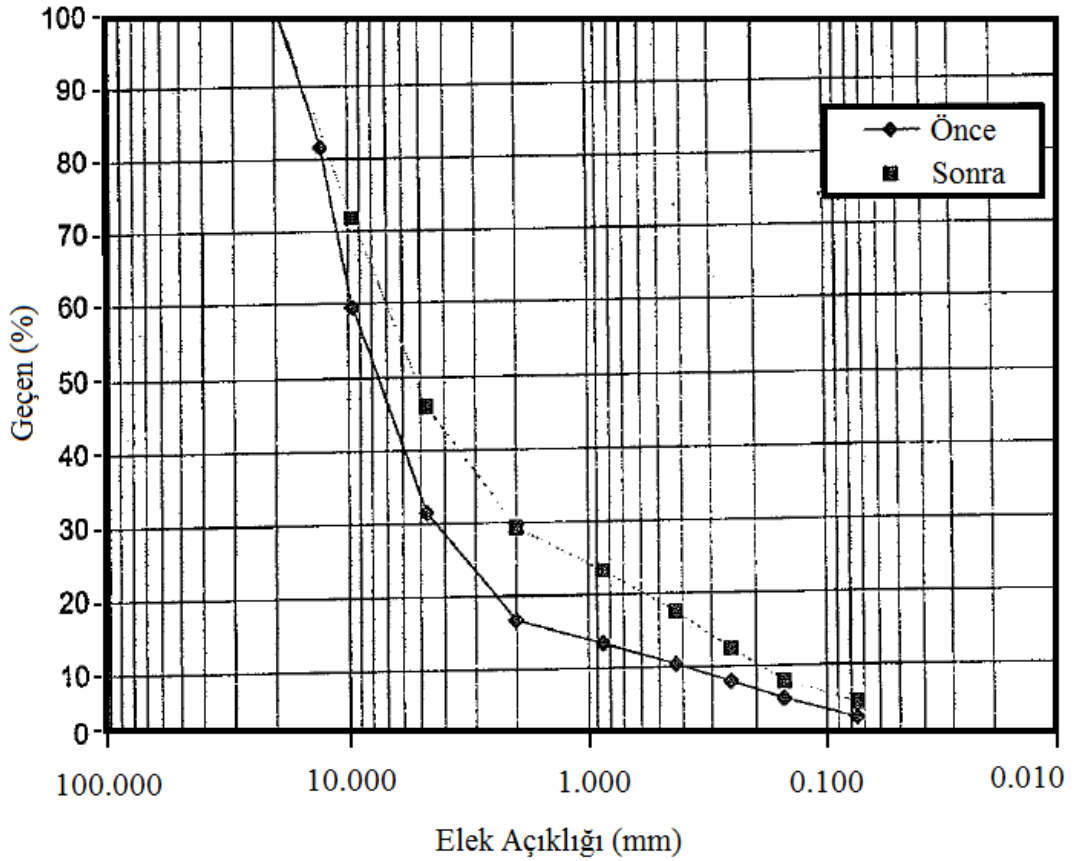
Darbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) inşaatı için ince dane oranı < % 5, maksimum dane çapı 38 mm ve minimum dane çapı 13 mm olan kırmataş kullanılmış olup, darbelemeden önce ve darbelemeden sonra araziden alınan numuneler üzerinde İTÜ Zemin Mekaniği ve Geoteknik Laboratuvarında malzemenin dane dağılımının belirlenmesine yönelik olarak elek analizi deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : İmalatta kullanılan kırmataşın (a) araziden görünüşü (b) laboratuvar testi.



Şekil 4.5 : Çalışma kapsamında kullanılan kırmataşın darbeleme öncesi ve sonrası dane çapı dağılımı.



Şekil 4.6 : Kireçtaşı örneği için darbeleme öncesi ve sonrası dane çapı dağılımı (White ve diğ., 2002).

Elek analizi deneylerinden elde edilen dane çapı dağılım grafiği Şekil 4.5’de gösterilmiş olup, bu elek analizi sonuçlarına göre; kullanılan malzeme üzerinde darbeleme işlemi yapılmadan önce malzemenin uniformluk katsayısı (Cu) < 4 ve derecelenme katsayısı (Cc) $1 \neq 3$ olarak, darbeleme işlemi yapıldıktan sonra ise, malzemenin uniformluk katsayısı (Cu) > 4 ve derecelenme katsayısı (Cc) ise $1 - 3$ olarak elde edilmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (ASTM D-2487)’ne göre kullanılan malzemeyi darbelemeden önce kötü derecelenmiş (GP), darbelemeden sonra ise iyi derecelenmiş (GW) olarak sınıflandırmak mümkündür.

White ve diğ., 2002 tarafından yapılan kireçtaşı kökenli kıramataşın darbeleme öncesi ve sonrası dane çapı dağılımı araştırılmış olup, bu çalışmaya ait grafik Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Şekil 4.5 ile Şekil 4.6’da gösterilen grafikler dikkate alındığında, sonuçların benzerlik gösterdiği söylenebilir. Ayrıca, DKK ve TK inşaatı için kullanılan kıramataş üzerinde Los Angeles Deneyi (ASTM C131) gerçekleştirilmiş olup (EK A.2: Los Angeles Aşınma Deneyi Sonucu), test sonuçlarına göre kıramataşın aşınmaya karşı direnci $< \% 40$ mertebelerinde ölçülmüştür.

4.4 Darbeli Kıramataş Kolon ve Taş Kolon İmalatları & Yükleme Testleri

Bu tez kapsamında, dört adedi darbeli kıramataş kolon (DKK) elemanı ve dört adedi taş kolon (TK) elemanı olmak üzere 01.07.2010-25.08.2010 tarihleri arasında imal edilen 8 kolon üzerinde 12.07.2010-02.09.2010 tarihleri arasında rijitlik ve taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik olarak 8 adet yükleme testi yapılmış olup, bu kolonlara ait yerleşim planı Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Üç farklı tipte gerçekleştirilmiş olan bu kolonlara ait imalat yöntemleri Şekil 4.7’de, imalat ve yükleme testi bilgileri ise Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 : Test kolonlarına ait imalat ve yükleme testi bilgileri.

İmalat Tipi	İmalat Tarihi	Test Tarihi	İmalat Yöntemi	Kolon Boyu (m)	Kolon Çapı (cm)	Başlık Betonunun Çapı (cm)	Başlık Betonunun Çalışma Platformundan olan Yüksekliği (cm)	
Tip - 1	SP 1	01.07.2010					110	
	SP 2	01.07.2010						
	SP 3	28.07.2010	21.08.2010	100cm yukarı / 67cm aşağı imalat yöntemi ile darbeleme yapıldı	6.5	50	50	40
	SP 4	20.02.2011	06.03.2011					
Tip - 2	SPD 1	30.07.2010	19.08.2010	titreşim ile imalat yapıldı (darbeleme yapılmadı)	6.5	50	50	40
	SPD 2	30.07.2010	18.08.2010					
Tip - 3	SPR 1	25.08.2010	02.09.2010	titreşim ile imalat yapıldı (darbeleme yapılmadı)	6.5	50	50	40
	SPR 2	25.08.2010	02.09.2010					

SP – Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı

SPD – Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

SPR – Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı



Tip – 1: Impact yöntemi ile imal edilmiş
DKK elemanı

- 36 cm çaplı mandrel kafası
- darbeleme var
- bitmiş kolon çapı 50 cm



Tip – 2: Öteleme yöntemi ile imal edilmiş
TK elemanı

- 50 cm çaplı mandrel kafası
- darbeleme yok
- bitmiş kolon çapı 50 cm



Tip – 3: Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş
TK elemanı

- 50 cm çaplı auger
- darbeleme yok
- bitmiş kolon çapı 50 cm

Şekil 4.7 : Tip – 1, Tip – 2 ve Tip – 3 kolon imalatı aşamaları.

4.4.1 Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolon imalatı (Tip – 1)

Impact yöntemi için darbeli kırmataş kolon imalat adımları aşağıda özetlenmiştir:

- (1) Sarf plakası yerleştirilir (Şekil 4.8a)
- (2) 36 cm çaplı kafa ile mandrel tasarım derinliğine indirilir (Şekil 4.8b)
- (3) Mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur (Şekil 4.8c)
- (4) 100 cm yukarı/67 cm aşağı yöntemi ile darbeleme işlemi yapılır (Şekil 4.8d)
- (5) 50 cm çaplı Impact DKK elemanı inşaatı tamamlanır (Şekil 4.8e)

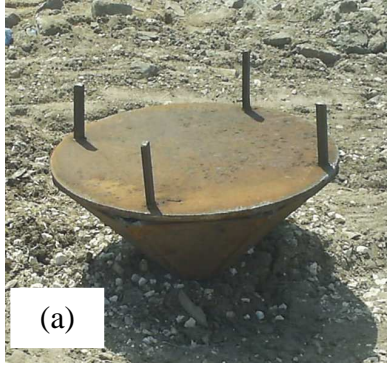


Şekil 4.8 : Impact yöntemi ile DKK elemanı imalat aşamaları.

4.4.2 Öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolon imalatı (Tip – 2)

Öteleme yöntemi için taş kolon imalat adımları aşağıda özetlenmiştir:

- (1) Sarf plakası yerleştirilir (Şekil 4.9a)
- (2) 50 cm çaplı mandrel kafası yardımı ile tasarım derinliğine inilir (Şekil 4.9b)
- (3) Mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur (Şekil 4.9c)
- (4) Mandrel darbeleme yapılmadan titreşim ile yukarı çekilir (Şekil 4.9d)
- (5) 50 cm çaplı TK elemanı inşaatı tamamlanır (Şekil 4.9e)

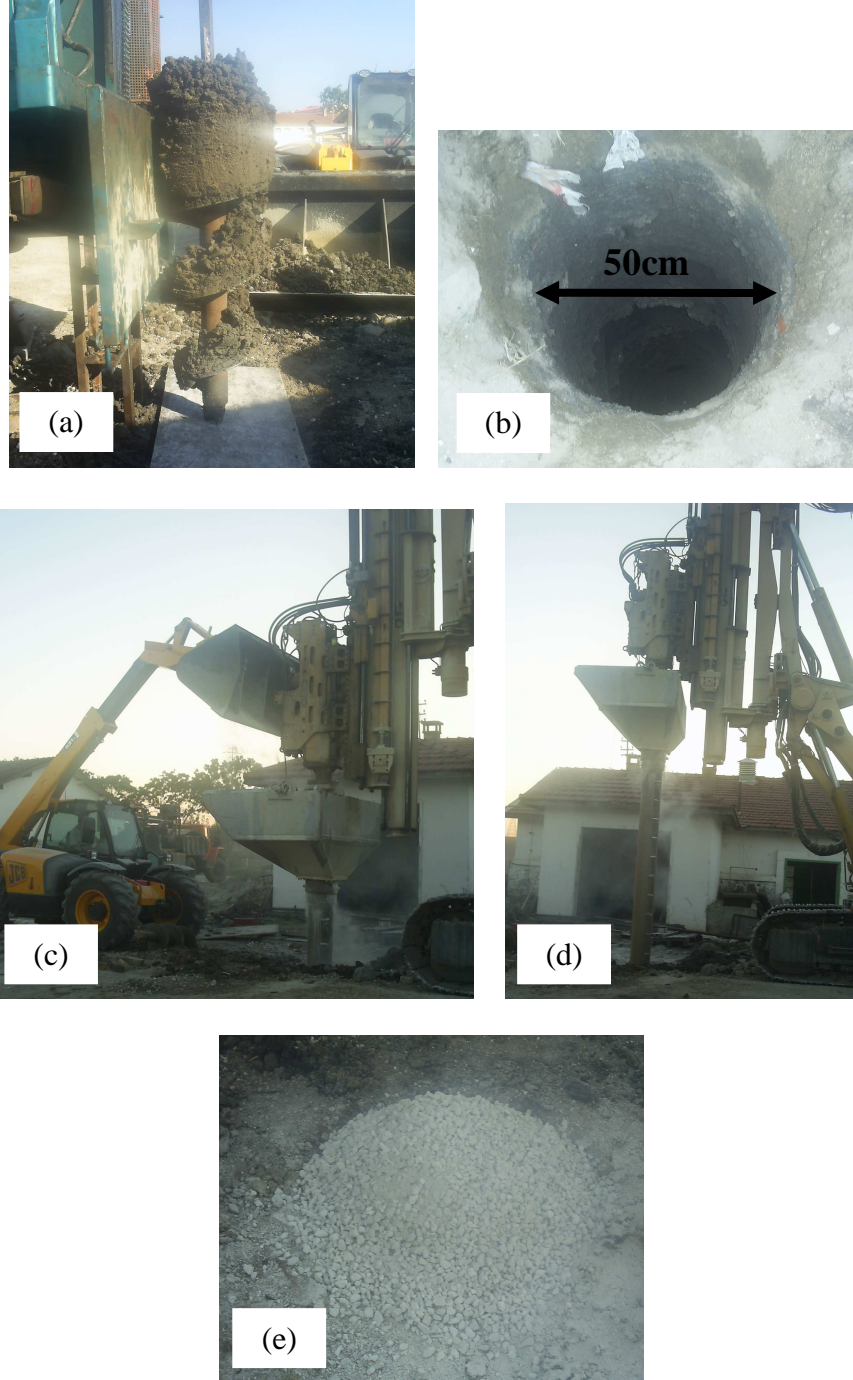


Şekil 4.9 : Öteleme yöntemi ile TK elemanı imalat aşamaları.

4.4.3 Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş taş kolon imalatı (Tip-3)

Ön delgi yöntemi için taş kolon imalat adımları aşağıda özetlenmiştir:

- (1) Burgu ile tasarım derinliğine kadar 50cm çaplı kuyu oluşturulur (Şekil 4.10a)
- (2) Mandrel tasarım derinliğine indirilir (Şekil 4.10b)
- (3) Mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur (Şekil 4.10c)
- (4) Mandrel titreşim ile darbeleme yapılmadan yukarı çekilir (Şekil 4.10d)
- (5) 50 cm çaplı TK elemanı inşaatı tamamlanır (Şekil 4.10e)



Şekil 4.10 : Ön delgi yöntemi ile TK elemanı imalat aşamaları.

4.5 Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Üzerine Uygulanan Yükleme Testleri

Bu tez kapsamında, dört adedi darbeli kırmataş kolon elemanı ve dört adedi taş kolon elemanı olmak üzere imal edilen 8 kolon üzerinde kolonların rijitliğinin ve taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik olarak arazi yükleme testleri yapılmıştır.

4.5.1 Yükleme testi aşamaları

Yük ölçümü kolon üzerinde yapılmış olup, gerilmenin büyüklüğü manometresi kalibre edilmiş hidrolik kriko ile kontrol edilmiştir. Deformasyon enine kirişe bağlanmış üç adet komparatör ile ölçülmüş olup, bu kirişin mesnet noktalarının, test kolonlarına olan uzaklığının 4D olması sağlanmıştır. Burada; D, kolon çapıdır. Test kolonlarının üst seviyesine, gerilmeleri aktarmak amacıyla 50 cm çaplı başlık betonu yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). 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 kolonu için belirlenen yük artışları Çizelge 4.3'de gösterilmiş olup, her tipteki kolon imalatı için yükleme testi formları 'EK A.4: Arazi Yükleme Testi Formları' bölümünde verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Çalışma yüküne göre test kolonları üzerine uygulanan yük miktarları.

No	Çalışma Yüğü (%)	Kriko Yüğü (ton)		
		Tip – 1 (SP)	Tip – 2 (SPD)	Tip – 3 (SPR)
0	5	0.675	0.35	0.35
1	16	2.28	1.12	1.12
2	33	4.47	2.31	2.31
3	50	6.75	3.50	3.5
4	66	8.95	4.62	4.62
5	83	11.22	5.81	5.81
6	100	13.50	7.00	7.00
7	116	15.66	8.12	8.12
8	133	18.00	9.31	9.31
9	150	20.25	10.5	10.5
10	100	13.50	7.00	7.00
11	66	8.95	4.62	4.62
12	33	4.47	2.31	2.31
13	0	0.00	0.00	0.00
14	100	13.50	7.00	7.00
15	0	0.00	0.00	0.00

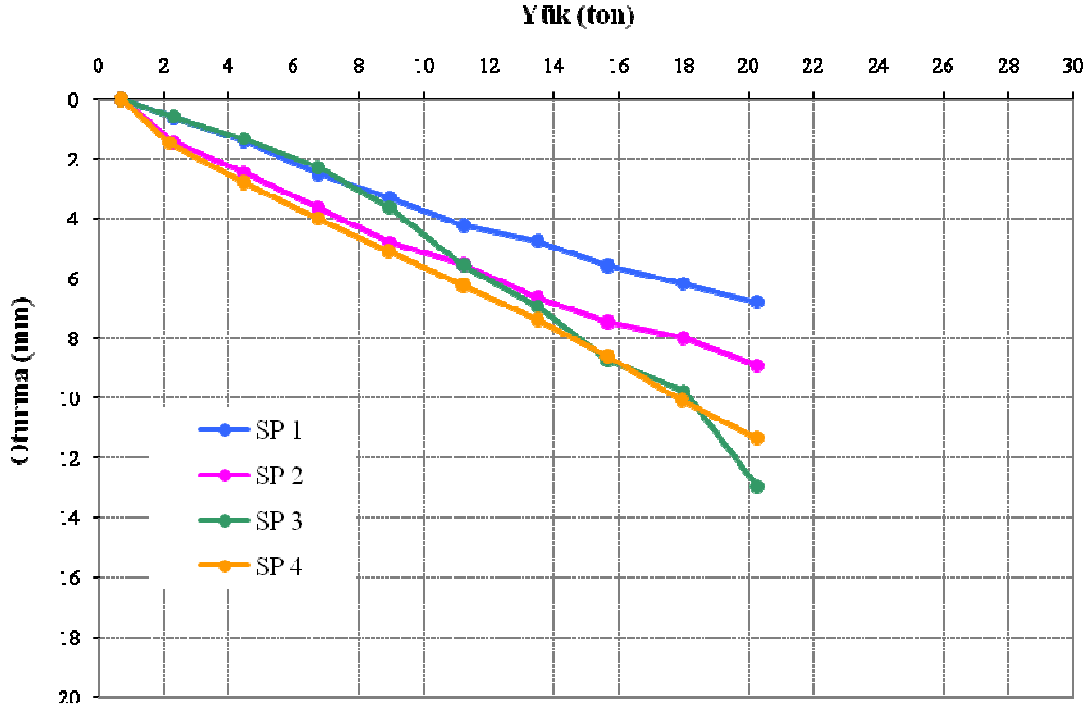
4.5.2 Yükleme testi sonuçları

Deformasyon ölçümleri için, her komparatördeki gerçek değerler dikkate alınmış olup, yükleme testleri için elde edilmiş yük-oturma grafikleri Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



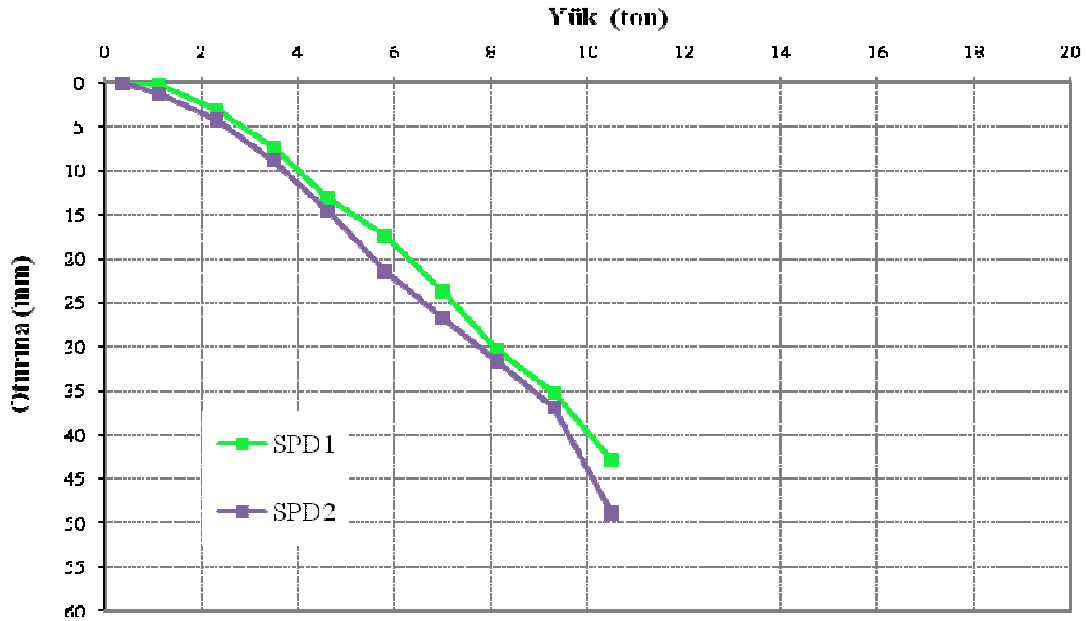
Şekil 4.11 : DKK ve TK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testleri.

Şekil 4.12’de gösterildiği gibi Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolon (DKK) elemanları üzerine tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 13.5 ton) % 150’si olan yaklaşık 20 ton mertebelerine kadar yük uygulanmış olup, bu mertebelerde bile DKK elemanlarının halen lineer bir davranış gösterdiği ve ölçülen oturma miktarlarının < 15 mm olduğu görülmüştür.



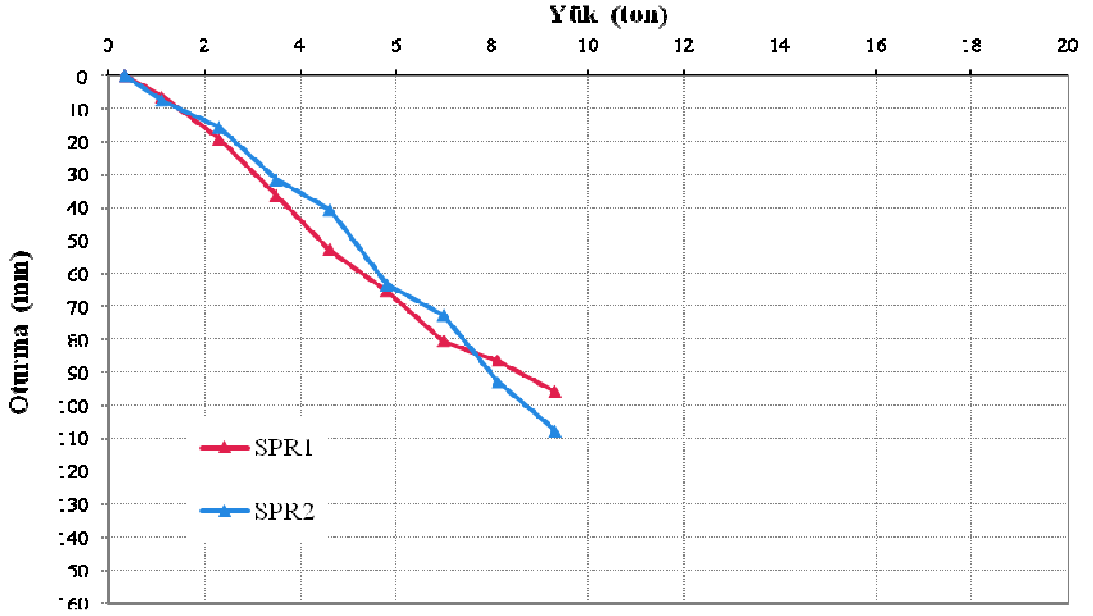
Şekil 4.12 : Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanları için yük-oturma grafiği.

Şekil 4.13’de gösterildiği gibi öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolon elemanları üzerine tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 7 ton) % 150’si olan 10.5 ton yük uygulanmış olup, bu yük altında ölçülen oturma miktarlarınının 30 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür.



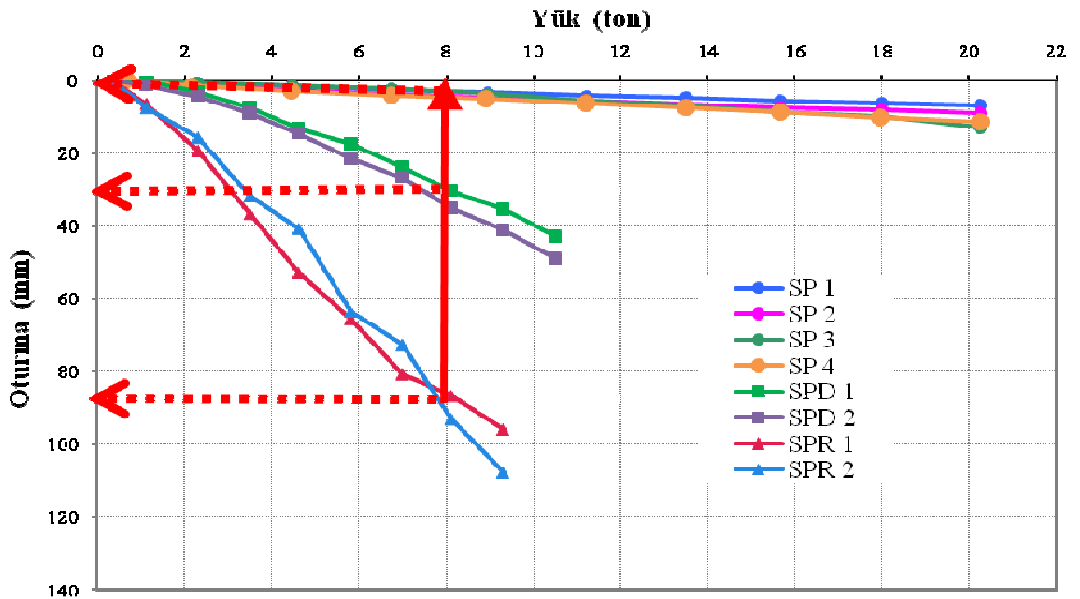
Şekil 4.13 : Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları için yük-oturma grafiği.

Şekil 4.14’de gösterildiği gibi yer değiştirme yöntemi ile imal edilmiş taş kolon elemanları üzerine tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 7 ton) yaklaşık % 150’si olan 8 ton yük uygulanmış olup, bu yük altında ölçülen oturma miktarlarının 90 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14 : Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları için yük-oturma grafiği.

Kıyaslama yapılabilmesi için bütün kolonlar için 8 ton mertebelerindeki yük altında oluşan deformasyon miktarları ölçülmüş olup, sonuçlar Şekil 4.15’de gösterilmiş ve sayısal olarak Çizelge 4.4’de özetlenmiştir.



Şekil 4.15 : SP, SPD ve SPR için yük-oturma grafiği.

8 ton yükleme altında; Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolon elemanları (SP) için ölçülen oturma miktarları 3 mm – 5 mm iken, öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolon elemanları (SPD) için ölçülen oturma miktarları 29 mm – 32 mm ve ön delgi yöntemi ile imal edilen taş kolon elemanları (SPR) için ise ölçülen oturma miktarları 85 mm – 92 mm mertebelerinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.4 : DKK ve TK elemanları için rijitlik modülü değerleri

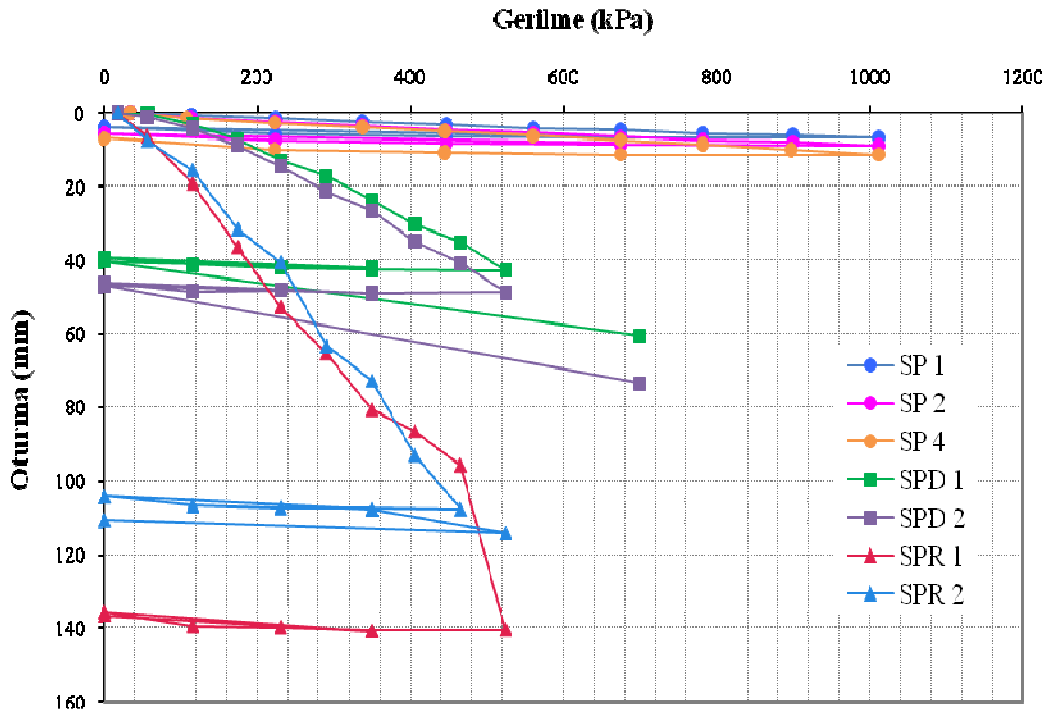
İmalat Tipi		Yük (ton)	Oturma (mm)	Rijitlik (MN/m ³)
Tip - 1	SP	8	3 -5	88 - 190
Tip - 2	SPD	8	29 – 32	10 – 40
Tip - 3	SPR	8	85 – 92	≤ 10

SP – Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı

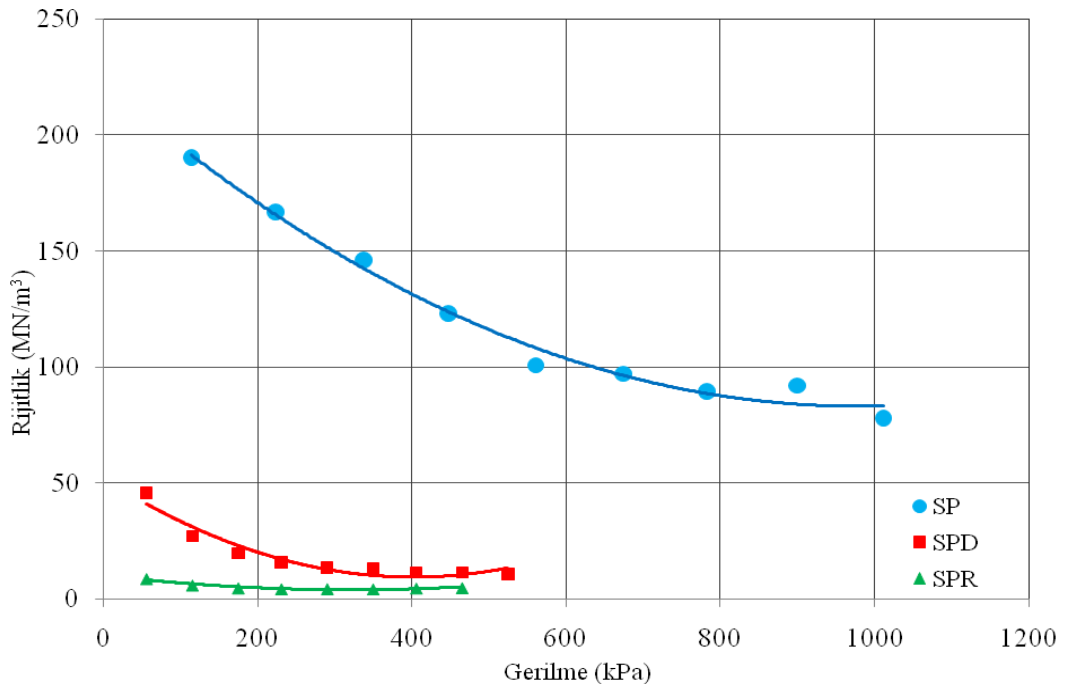
SPD – Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

SPR – Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

Şekil 4.17’de darbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) elemanları için gerilme-rijitlik arasındaki ilişki gösterilmiştir. Burada rijitlik, Şekil 4.16’da gösterilen gerilme-oturma eğrisinin eğimi olarak tanımlanmıştır. TK elemanları için düşük gerilme seviyelerinde ölçülen 20-40 MN/m³ değerindeki rijitlik, 400 kPa gerilme değerlerinde 10 MN/m³ mertebelerine ölçülmektedir. DKK elemanının rijitliği ise, düşük gerilme seviyelerinde 180 MN/m³ değerinde ölçülmüş iken, 800 kPa gerilme değerlerinde 80 MN/m³ olarak ölçülmüştür. Özetle, DKK elemanlarının rijitliğinin TK elemanlarının rijitliğinden yaklaşık 2.2 ile 8.8 kat fazla olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 4.16 : SP, SPD ve SPR için gerilme-oturma grafiği.



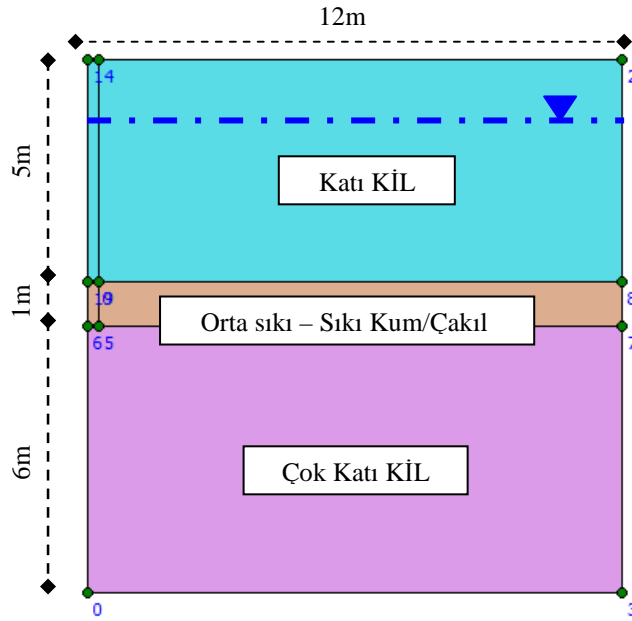
Şekil 4.17 : SP, SPD ve SPR için gerilme- rijitlik grafiği.

5. DARBELİ KIRMATAŞ VE TAŞ KOLON ELEMANLARI ÜZERİNDE UYGULANAN YÜKLEME DENEYLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Bu bölümde derbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) elemanları üzerinde uygulanan yükleme deneyi sonuçları sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS 2D programı ile analiz edilmiştir. Tüm analizler, SP (Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanı), SPD (öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanı) ve SPR (ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanı) kolonları için ayrı ayrı modellenerek, bu kolonların uygulanan yük altında oturma davranışları incelenmiştir.

5.1 Modelin Oluşturulması

Darbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) elemanlarının imalat yöntemleri farklı olduğundan, bu elemanların imalatlarına uygun olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu durumda her üç tipteki imalat yöntemi için ayrı ayrı modeller oluşturulmuş olup, analizlerde kullanılan temsili zemin profili Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Temsili zemin profili.

Çizelge 5.1'deki parametrelerden de anlaşılacağı üzere, bu tür zemin koşulları için yüksek gerilmeler altında taşıma gücü ve oturma problemi beklenmektedir. Söz konusu zeminin taşıma kapasitesini arttırma, oturmları sınırlandırma ve oturma süresini hızlandırma amaçlarına yönelik olarak DKK ya da TK imalatı yapılarak ihtiyaç duyulan zemin iyileştirmesi işi gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda arazide gerçekleştirilen yükleme testleri sonuçlarına yakın sonuçlar alabileceğimiz en uygun model Plaxis programı ile oluşturulmuştur.

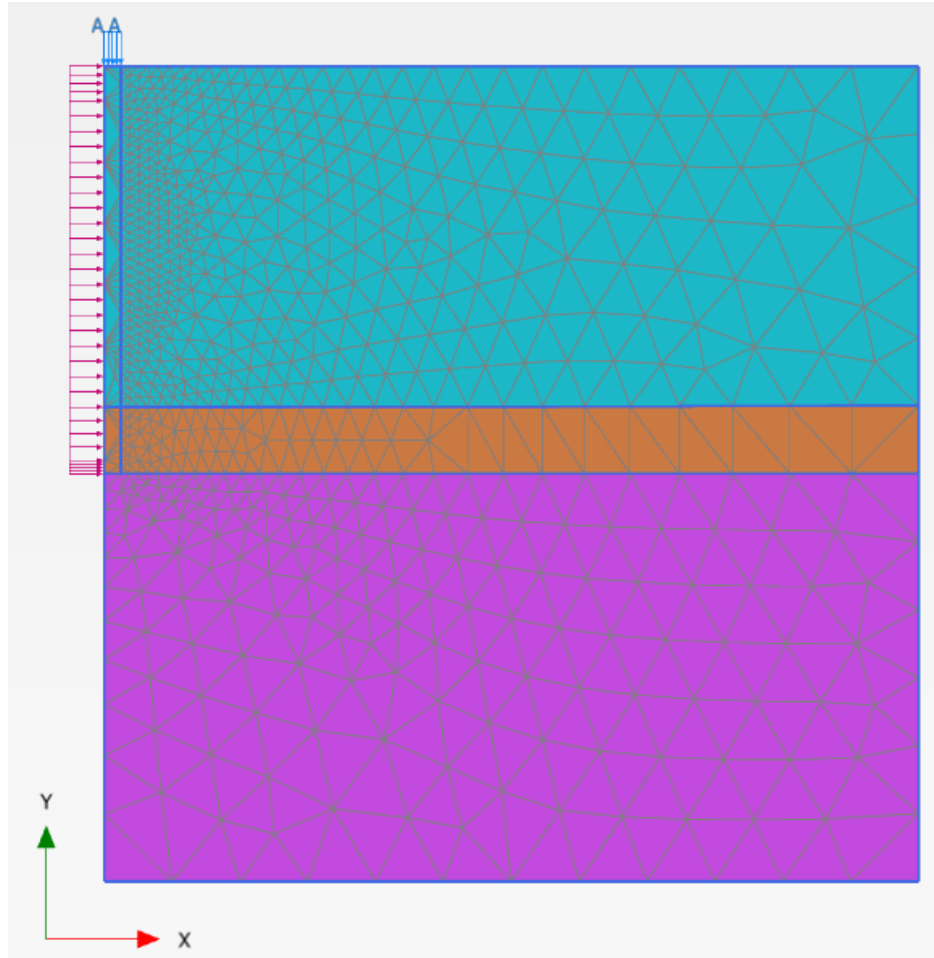
Çizelge 5.1 : Plaxis programında kullanılan geoteknik parametreler.

Parametreler	1.Tabaka (Katı Kil)	2.Tabaka (Orta Sıkı-Çok Sıkı Kum/Çakıl)	3.Tabaka (Çok Katı Kil)	DKK	TK
Malzeme Modeli	Mohr Coulomb				
Drenaj Durumu	Drenajsız	Drenajlı	Drenajsız	Drenajlı	Drenajlı
γ_k (kN/m ³)	17	19	19	21	21
γ_d (kN/m ³)	19	20	20	22	22
e	1	0.5	1	0.3	0.3
E (kN/m ²)	10.000	20.000	25.000	150.000	10.000
μ	0.4	0.25	0.4	0.25	0.25
c_u (kN/m ²)	50	0.01	120	0.01	0.01
ϕ (°)	-	35	-	45	40
ψ (°)	-	5	-	12	6
k_x (m/gün)	0.0001	10	0.0001	100	100
k_y (m/gün)	0.0001	10	0.0001	100	100

γ_k : Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_d : Doygun Birim Hacim Ağırlığı, e : Boşluk Oranı,
E : Elastisite Modülü, μ : Poisson Oranı, c_u : Drenajsız Kayma Dayanımı, ϕ : İçsel Sürtünme Açısı,
 ψ : Genleşme Açısı, k_x : Yatay Permeabilite, k_y : Düşey Permeabilite

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programında sürekli ortam birçok elemana ayrılır ve sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında üçgen elemanlar kullanılır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm analizlerde gerilmelerin daha doğru hesaplanabilmesi için 15 düğüm noktalı elemanlar seçilerek, tek bir kolon ve içinde yer aldığı zemin tabakaları aksi-simetrik olarak modellenmiştir. Şekil 5.2'de DKK ve TK elemanlarının bulunduğu kesimde daha sık olmak üzere oluşturulan

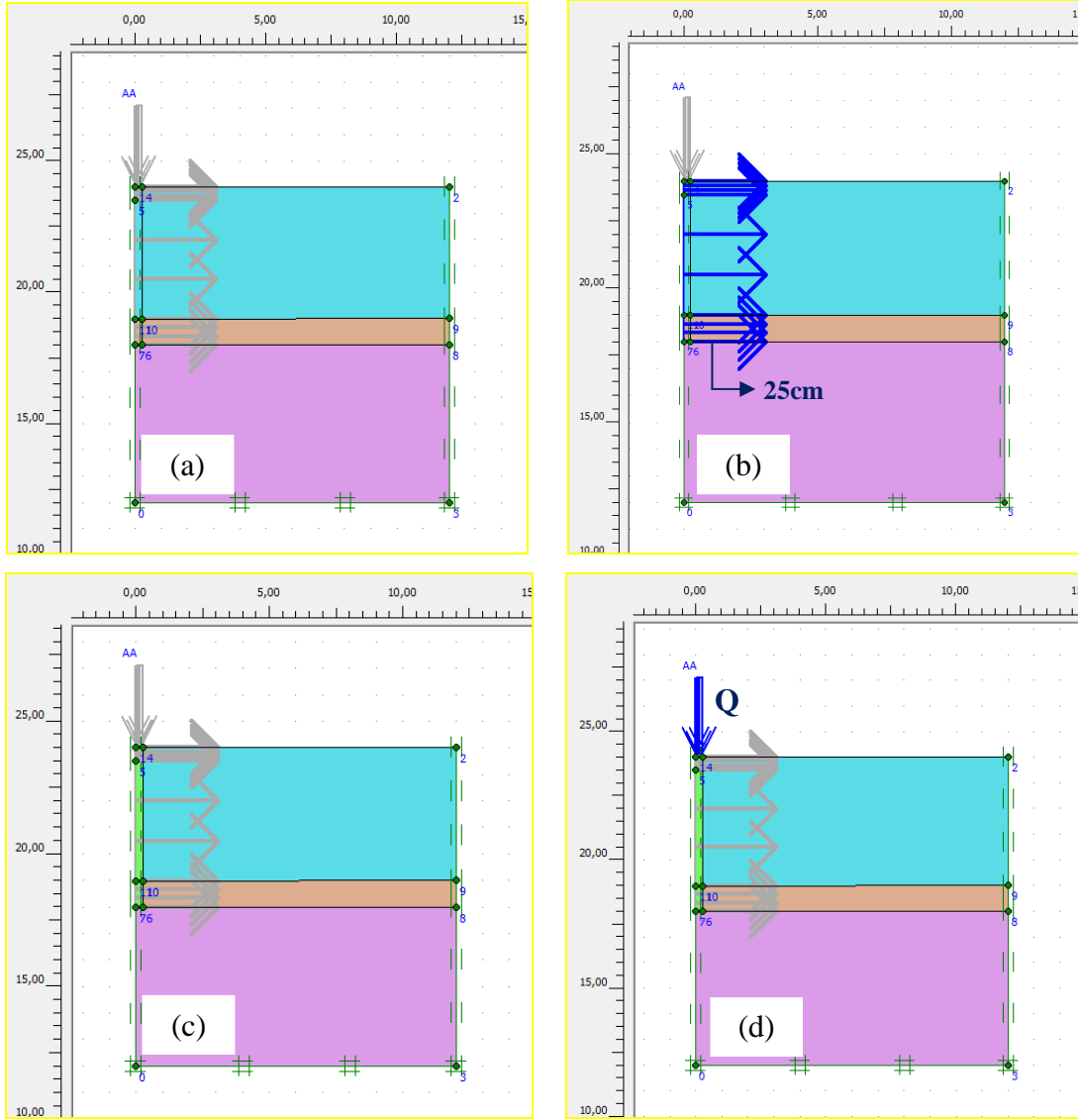
sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. Her model için sınır koşulları ise kenarlarda yatay yönde, tabanda ise düşey ve yatay yönde harekete izin verilmemiştir.



Şekil 5.2 : Sonlu elemanlar ağı.

5.1.1 Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolonun modellenmesi

Impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolonun (DKK) modellenmesinde Şekil 5.3'de gösterildiği gibi tanımlı deplasmanlar ve tanımlı yükler kullanılmıştır. Programa başlangıç koşullarının (a) tanıtılmasının ardından kolon boyunca kolon yarıçapı kadar (25 cm) yanıl deplasman uygulanarak (b) Impact yöntemi ile DKK imalatı sırasında gerçekleşen zeminin yanlara doğru itilmesi ile kolon etrafındaki zeminde yanıl gerilmelerin artması sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada ise Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi DKK elemanı için içsel sürtünme açısı 45^0 kabul edilerek programa DKK imalatı tanımlanmıştır (c). Son aşamada ise DKK elemanının düşey gerilme altında, taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak arazide uygulanan gerilme değerleri programa tanıtılmıştır (d).

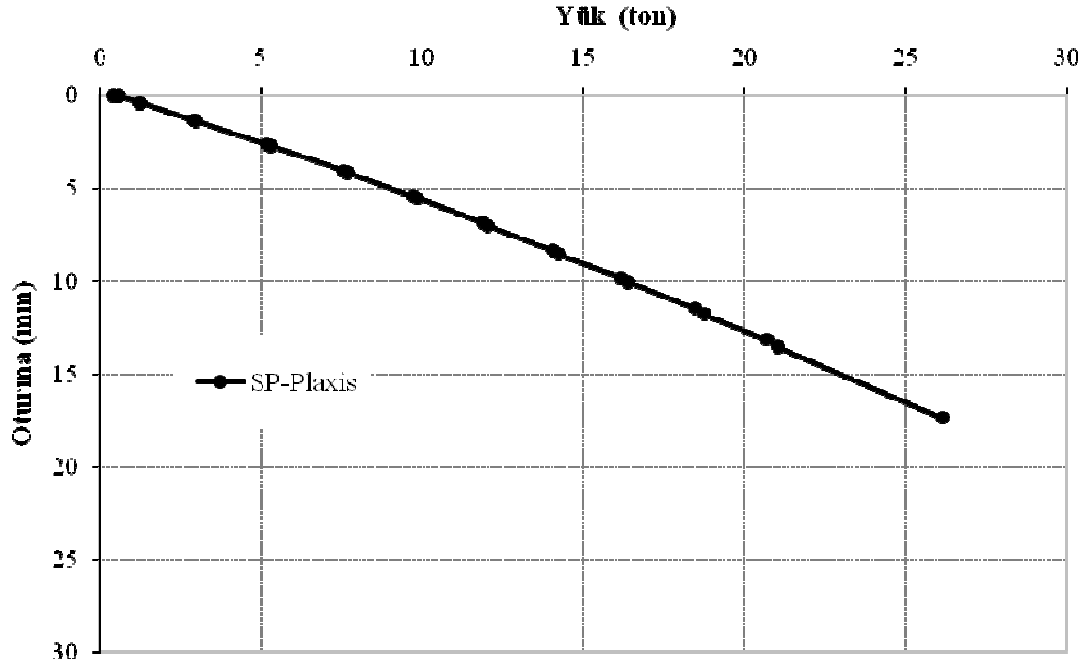


Şekil 5.3 : Impact sistemi ile DKK imalatı Plaxis modeli.

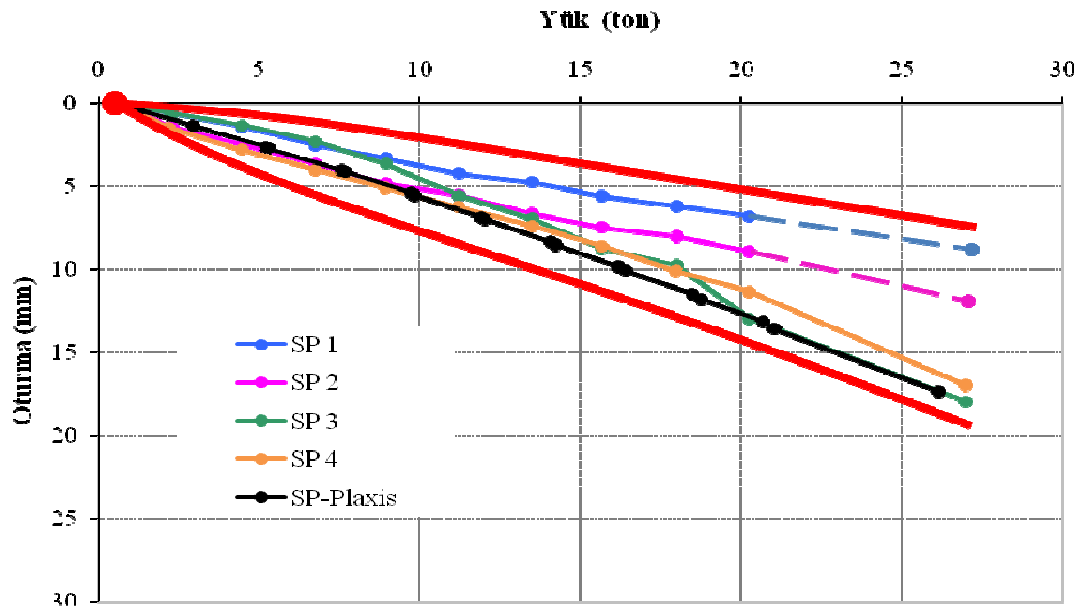
Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanın Plaxis programı ile modellenmesindeki önemli husus, imalat sırasında özel olarak dizayn edilmiş mandrelin ve darbeleme kafasının dinamik düşey darbeleme enerjisi ile zemin içine çakılması sırasında zeminin yanlara doğru itilmesi işlemine dayanmasıdır.

Şekil 5.4’de Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testinin Plaxis ile modellenmesi sonucunda elde edilen yük-oturma grafiği gösterilmiştir. Arazi yükleme testleri sırasında SP 1 ve SP 2 nolu test kolonları tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 13.5 ton) % 150’sine kadar yüklenmiş, SP 3 ve SP 4 nolu test kolonları ise % 200’üne kadar yüklenmiştir. Bu durumda SP 3 ve SP 4 nolu kolonların göstermiş olduğu lineer davranış dikkate alınarak SP 1 ve SP 2 nolu kolonların tasarım yükünün % 200’ü altında göstermiş oldukları oturma

davranışı Şekil 5.5’de kesikli çizgiler ile gösterildiği gibi tahmin edilmiştir. Bu değerlendirmenin ardından arazi yükleme testleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafiğinde arazide ölçülen maksimum ve minimum oturmaları sınırlandırmak için kırmızı çizgi ile ifade edilen sınır zarfı oluşturulmuştur. Plaxis ile oluşturulan model için elde edilen yük-oturma grafiğinin bu sınır zarfı içerisinde kaldığı ve arazi testlerinden SP 3 ve SP 4 nolu testler ile oldukça uyumluluğu olduğu Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : Impact sistemi için Plaxis modeli.



Şekil 5.5 : Impact sistemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.

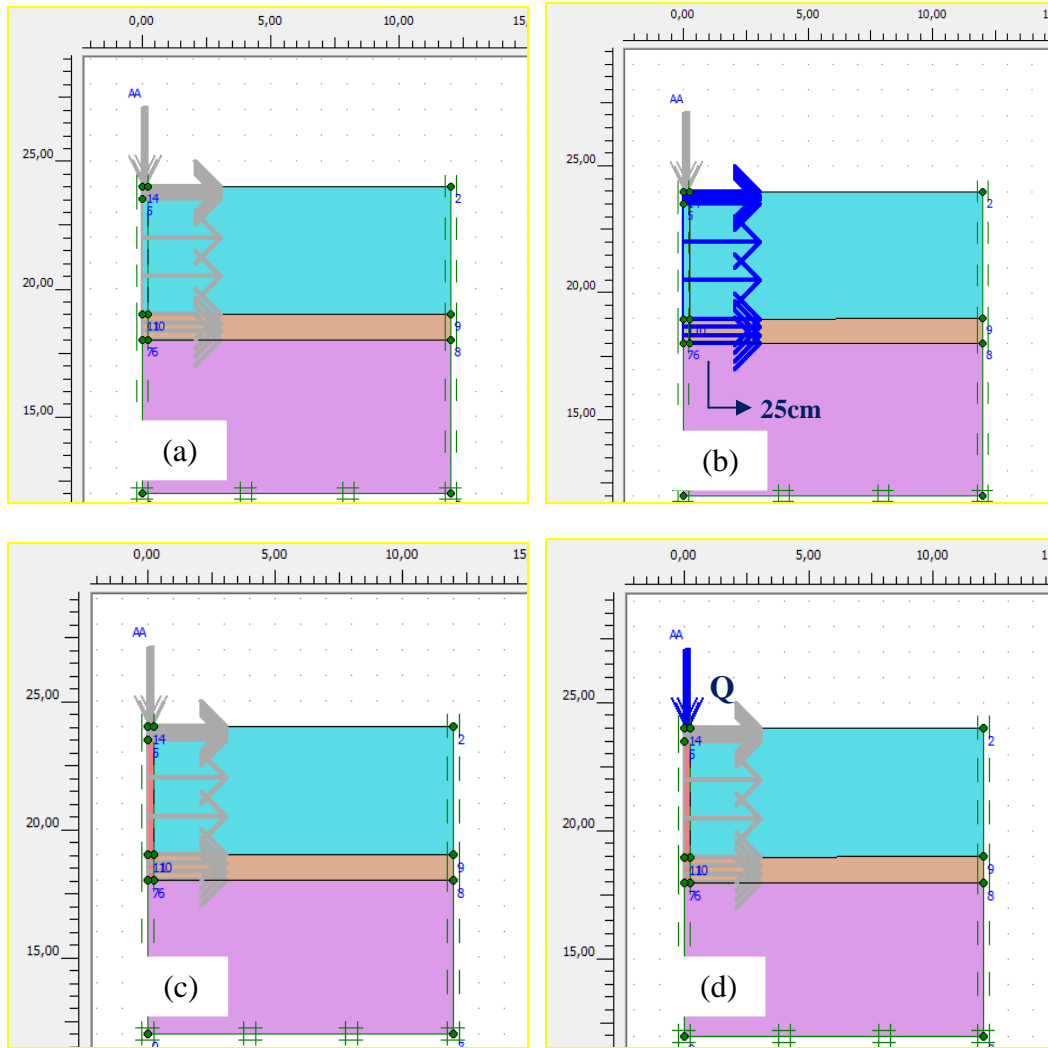
Bu veriler ışığında arazi yükleme testleri ve Plaxis programı ile hesaplama sonucunda Şekil 5.1’de gösterilen temsili zemin profili için 18 ton yük altında ölçülen deformasyon miktarları Çizelge 5.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 : Tip-1 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.

Yöntem	Uygulanan Yük (ton)	Oturma (mm)
SP 1 (arazi testi)	18	6.18
SP 2 (arazi testi)	18	7.97
SP 3 (arazi testi)	18	9.77
SP 4 (arazi testi)	18	10.0
SP (Plaxis 2D çözümü)	18	11.4

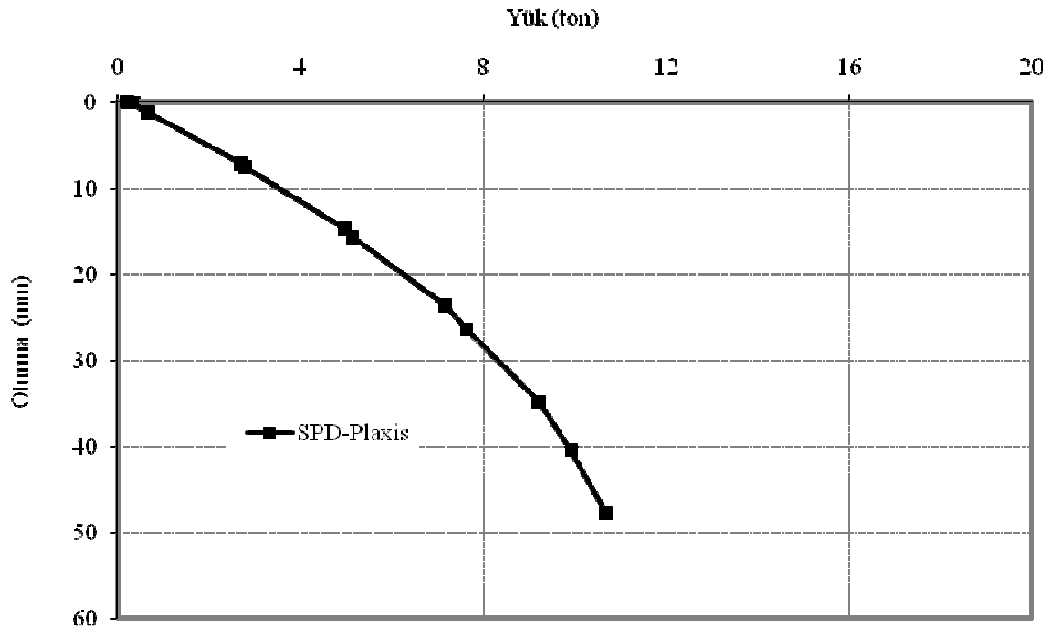
5.1.2 Öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun modellenmesi

Öteleme yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun (TK) modellenmesinde Şekil 5.6’da gösterildiği gibi tanımlı deplasmanlar ve tanımlı yükler kullanılmıştır.

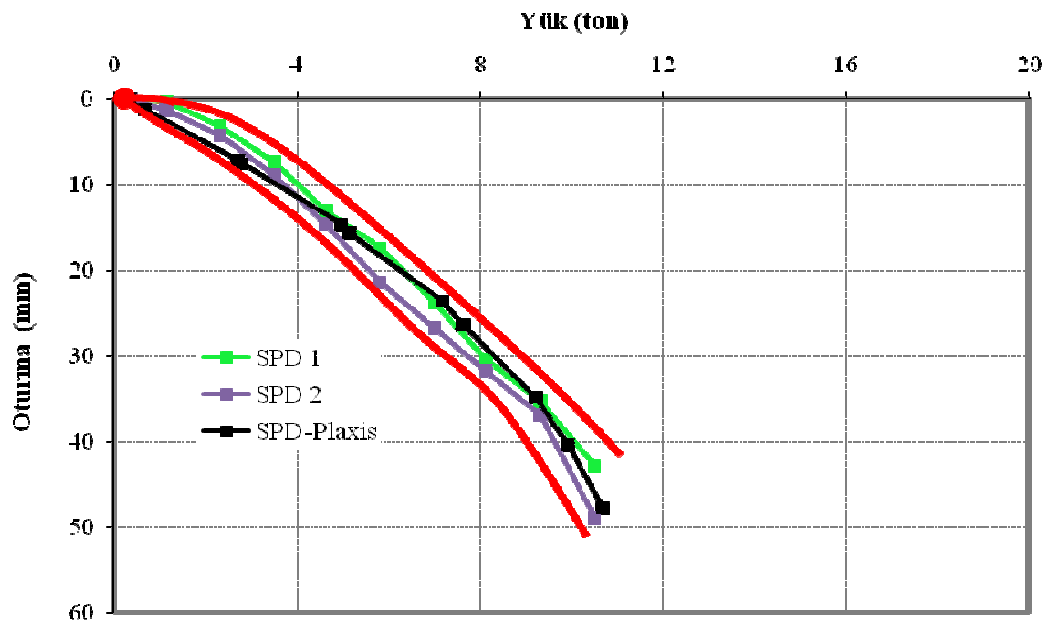


Şekil 5.6 : Öteleme yöntemi ile TK imalatı Plaxis modeli.

Programa başlangıç koşullarının (a) tanıtılmasının ardından kolon boyunca kolon yarıçapı kadar (25 cm) yanıl deplasman uygulanarak (b) öteleme yöntemi ile TK imalatı sırasında gerçekleşen zeminin yanlara doğru itilmesi ile kolon etrafındaki zeminde yanıl gerilmelerin artması sağlanmıştır. Bir sonraki aşamada ise Çizelge 5.1’de gösterildiği gibi TK elemanı için içsel sürtünme açısı 40^0 kabul edilerek programa TK imalatı tanımlanmıştır (c). Son aşamada ise TK elemanının düşey gerilme altında, taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak arazide uygulanan gerilme değerleri programa tanıtılmıştır (d).



Şekil 5.7 : Öteleme yöntemi için Plaxis modeli.



Şekil 5.8 : Öteleme yöntemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.

Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanının Plaxis programı ile modellenmesindeki önemli husus, imalat sırasında özel olarak dizayn edilmiş mandrelin ve darbeleme kafasının dinamik düşey darbeleme enerjisi ile zemin içine çakılması sırasında zeminin yanlara doğru itilmesi işlemine dayanmasıdır.

Şekil 5.7’de öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testinin Plaxis ile modellenmesi sonucunda elde edilen yük-oturma grafiği gösterilmiştir. Arazi yükleme testleri sırasında SPD 1 ve SPD 2 nolu test kolonları tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 7 ton) % 150’sine kadar yüklenmiştir. Bu değerlendirmenin ardından arazi yükleme testleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafiğinde arazide ölçülen maksimum ve minimum oturmaları sınırlandırmak için kırmızı çizgi ile ifade edilen sınır zarfı oluşturulmuştur. Plaxis ile oluşturulan model için elde edilen yük-oturma grafiğinin bu sınır zarfı içerisinde kaldığı ve arazi testleri ile oldukça uyumluluğu olduğu Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

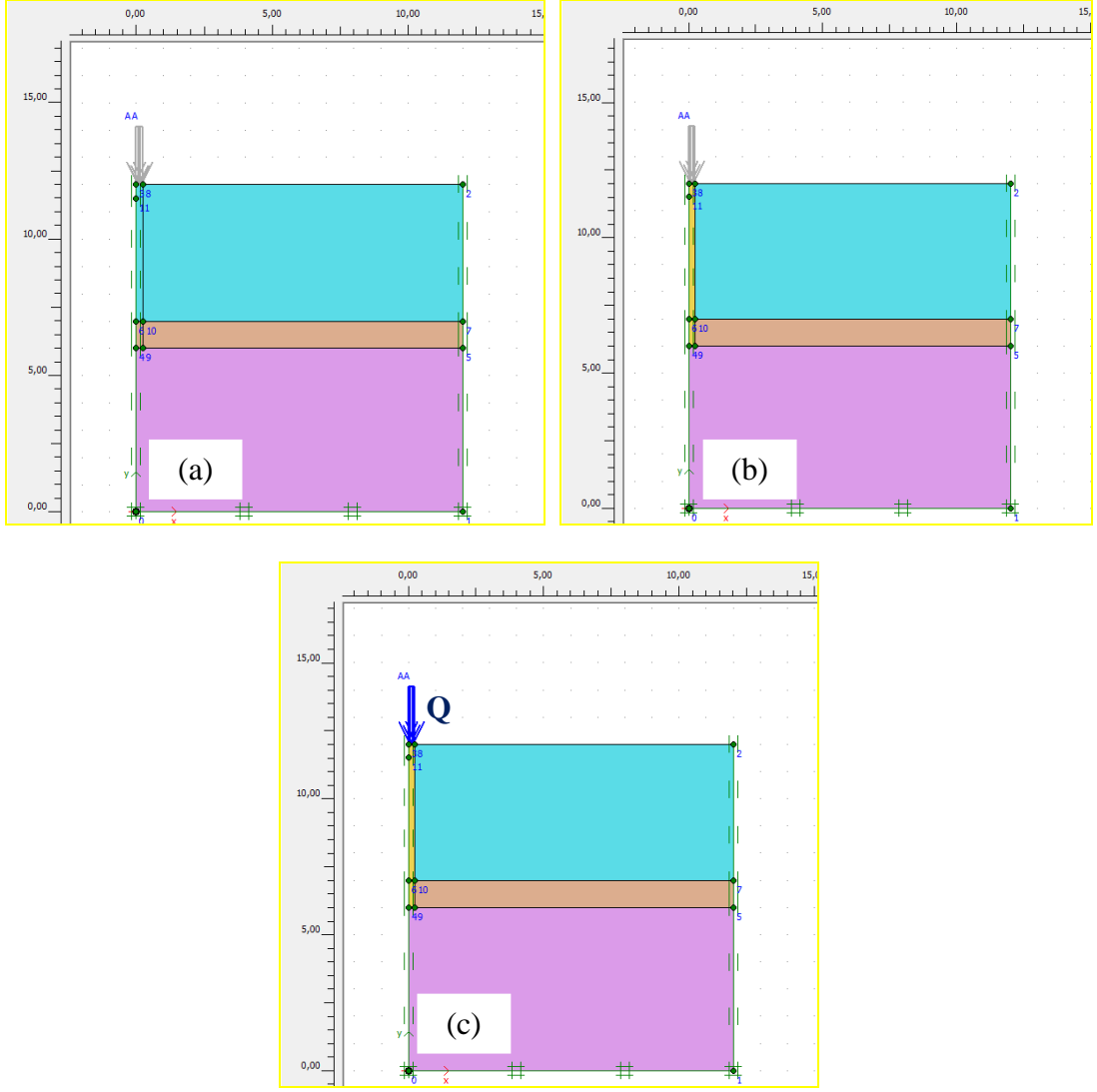
Bu veriler ışığında arazi yükleme testleri ve Plaxis programı ile hesaplama sonucunda Şekil 5.1’de gösterilen zemin profili için 10.5 ton yük altında ölçülen deformasyon miktarları Çizelge 5.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.3 : Tip-2 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.

Yöntem	Uygulanan Yük (ton)	Oturma (mm)
SPD 1 (arazi testi)	10.5	42.8
SPD 2 (arazi testi)	10.5	48.9
SPD (Plaxis 2D çözümü)	10.5	47.7

5.1.3 Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun modellenmesi

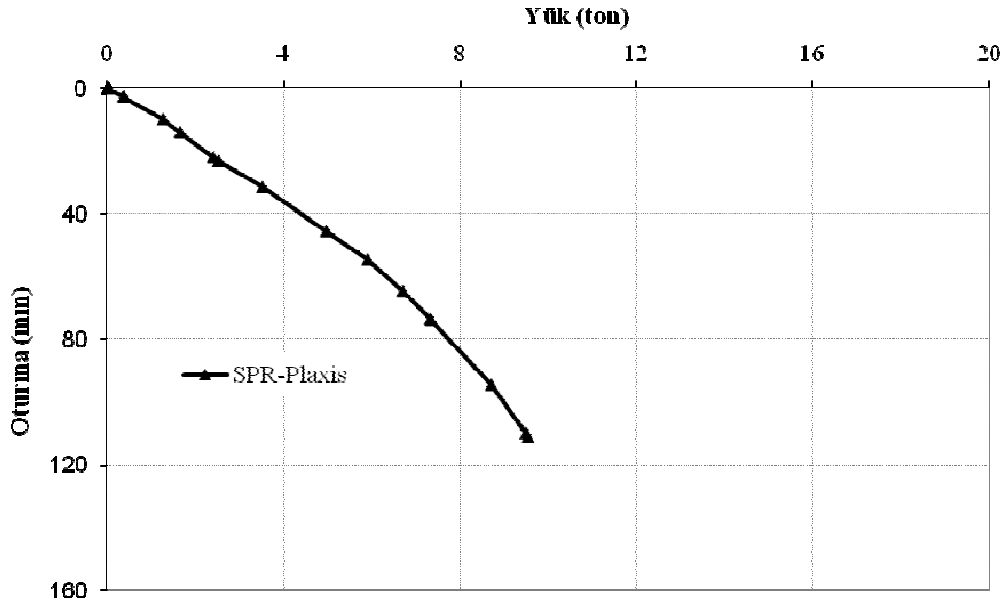
Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş taş kolonun (TK) modellenmesinde Şekil 5.9’da gösterildiği gibi tanımlı yükler kullanılmıştır. Programa başlangıç koşullarının (a) tanıtılmasının ardından Çizelge 5.1’de gösterildiği gibi TK elemanı için içsel sürtünme açısı 40^0 kabul edilerek programa TK imalatı tanımlanmıştır (b). Son aşamada ise TK elemanının düşey gerilme altında, taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin belirlenmesine yönelik olarak arazide uygulanan gerilme değerleri programa tanıtılmıştır (d).



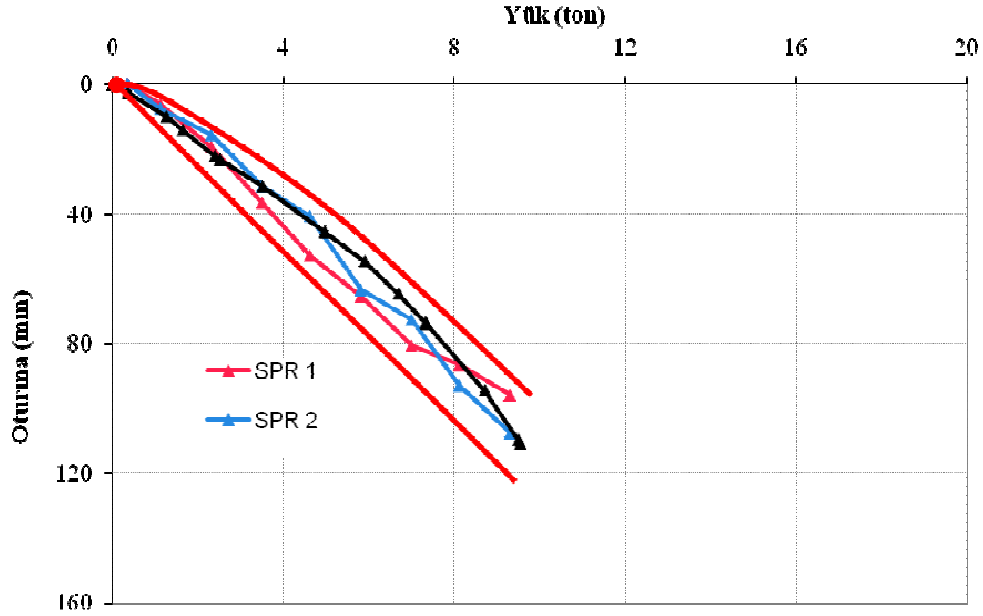
Şekil 5.9 : Ön delgi yöntemi ile TK imalatı Plaxis modeli.

Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanın Plaxis programı ile modellenmesindeki önemli husus, imalat sırasında özel olarak dizayn edilmiş 50 cm çapındaki burğu ile zemin içerisinde bir kuyu oluşturulması işlemine dayanmasıdır.

Şekil 5.10'da ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanları üzerinde uygulanan yükleme testinin Plaxis ile modellenmesi sonucunda elde edilen yük-oturma grafiği gösterilmiştir. Arazi yükleme testleri sırasında SPR 1 ve SPR 2 nolu test kolonları tasarım yükünün (% 100 tasarım yükü = 7 ton) yaklaşık olarak % 150'sine kadar yüklenmiştir. Bu değerlendirmenin ardından arazi yükleme testleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafiğinde arazide ölçülen maksimum ve minimum oturmaları sınırlandırmak için kırmızı çizgi ile ifade edilen sınır zarfı oluşturulmuştur. Plaxis ile oluşturulan model için elde edilen yük-oturma grafiğinin bu sınır zarfı içerisinde kaldığı ve arazi testleri ile oldukça uyumluluğu olduğu Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Ön delgi yöntemi için Plaxis modeli.



Şekil 5.11 : Ön delgi yöntemi için arazi yükleme testleri ve Plaxis modeli.

Bu veriler ışığında arazi yükleme testleri ve Plaxis programı ile hesaplama sonucunda Şekil 5.1'de gösterilen zemin profili için 8 ton yük altında ölçülen deformasyon miktarları Çizelge 5.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.4 : Tip-3 için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.

Yöntem	Uygulanan Yük (ton)	Oturma (mm)
SPR 1 (arazi testi)	8	86.6
SPR 2 (arazi testi)	8	93.0
SPR (Plaxis 2D çözümü)	8	82.0

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, kohezyonsuz zeminlerde (ince dane oranı < % 20) kolon etrafındaki zeminin sıkışmasını, kohezyonlu zeminlerde ise zemin içerisinde nispeten rijit kolonların oluşturulmasını sağlayan ve yüzeysel temellerin zeminlerinde kullanılabilen zemin iyileştirme yöntemlerinden darbeli kırmataş kolon (DKK) ve taş kolon (TK) sistemleri ele alınmıştır. Kırklareli İli, Lüleburgaz İlçesi, Sarımsaklı Mevkiinde yer alan çalışma alanına ait temsili zemin profilinin elde edilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen sondaj ve CPT çalışmalarının ardından üç farklı tipteki imalat yöntemi ile dört adedi DKK elemanı ve dört adedi ise TK elemanı olmak üzere toplamda sekiz adet kolon imal edilmiştir. 50 cm çapında ve 6.50 m boyunda imal edilen bu kolonlar üzerinde, kolonlara ait tasarım parametrelerinin (kolon taşıma kapasitesi, kolon rijitlik modülü, vb.) belirlenebilmesi amacıyla sekiz adet arazi yükleme testi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 2D programı analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan tüm analizler sonucunda;

- Çalışma alanında gerçekleştirilen arazi deneylerinin değerlendirilmesi sonucunda, bölgeye ait temsili zemin profili yer yer 5.00 m ile 6.00 m derinlikler arasında orta sıkı – sıkı kum / çakıl bantları ile kesilen üst seviyeleri katı kıvamda, alt seviyeleri ise çok karı-sert kıvamda olduğu anlaşılan çakıllı, kumlu kil birimlerden oluşmaktadır.
- Yükleme testi sonuçlarına göre; Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğinin, ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğine oranı yaklaşık 4 olarak elde edilmiştir. Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanı rijitliğinin, öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanı rijitliğine oranı ise 2.2 – 8.8 arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 6.1 : DKK ve TK elemanları için rijitlik modülü değerleri

İmalat Tipi	Kolon Çapı (cm)	Kolon Boyu (m)	Yük (ton)	Oturma (mm)	Rijitlik (MN/m ³)	
Tip - 1	SP		8	3 -5	88 - 190	
Tip - 2	SPD	50	6.5	8	29 – 32	10 – 40
Tip - 3	SPR		8	85 – 92	10	

SP – Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı

SPD – Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

SPR – Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

- Çizelge 6.2’de gösterildiği gibi arazi yükleme testi sonuçlarına ve Plaxis ile yapılan hesaplama sonuçlarına göre, ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturmanın, öteleme yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturmaya oranının 2, ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanlarında meydana gelen oturmanın, Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanlarında meydana gelen oturmaya oranının ise 5 olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.2 : DKK ve TK elemanları için arazide ölçülen ve Plaxis ile hesaplanan oturma miktarları.

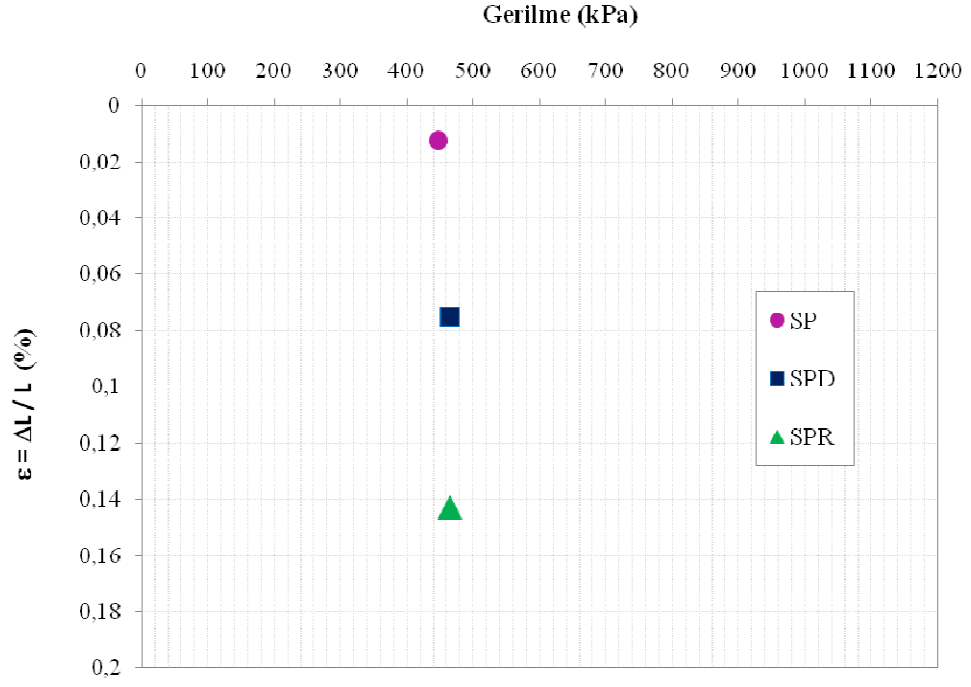
İmalat Tipi	Kolon Çapı (cm)	Kolon Boyu (m)	Uygulanan Yük (ton)	Arazide Ölçülen Oturma Miktarı (mm)	Plaxis 2D ile Hesaplanan Oturma Miktarı (mm)
Tip – 1	SP-1			6.18	
	SP-2			7.97	
	SP-3		18	9.77	11.4
	SP-4			10.0	
Tip – 2	SPD-1	50	6.5	42.8	
	SPD-2		10.5	48.9	47.7
Tip – 3	SPR-1		8	85.0	
	SPR-2			92.0	82.0

SP – Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı

SPD – Öteleme yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

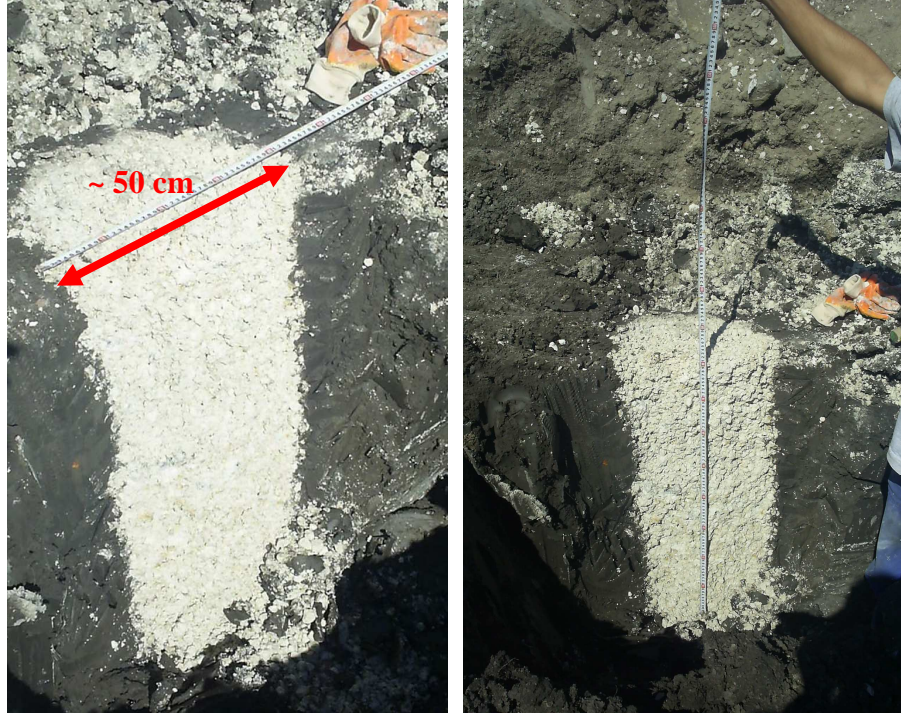
SPR – Ön delgi yöntemi ile imal edilmiş TK elemanı

- Ayrıca yükleme testi sonuçlarına göre; DKK ve TK elemanları için Şekil 6.1’de gösterildiği gibi Impact yöntemi ile imal edilen DKK elemanı için şekil değiştirme % 1.0 mertebelerinde iken, öteleme ve ön delgi yöntemi ile imal edilen TK elemanları için şekil değiştirme % 7 - % 15 mertebelerindedir.



Şekil 6.1 : SP, SPD ve SPR için gerilme-şekil değiştirme.

Sonuç olarak, günümüz koşullarında uygulama kolaylığının yanı sıra ucuz ve etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olarak bilinen ve TK elemanlarına göre oldukça rijit olan DKK elemanlarının (Şekil 6.2), oturma ve taşıma kapasitesi yönünden etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu gerçekteştirilen arazi yükleme testi sonuçları ile kanıtlanmıştır.



Şekil 6.2 : Impact yöntemi ile imal edilmiş DKK elemanı.

KAYNAKLAR

- Aghda, A.A. and Issigonis, T.**, 2009. A Case Study of Ground Improvement Using Impact TM Piers Method. Horizon Engineering Inc., North Vancouver, BC, Canada.
- Aral, İ.F.**, 2004. Kartepe Bazaltlarının (Çorlu-Tekirdağ) Yapı Malzemesi Olarak Kullanabilirliği, *İstanbul Üniversitesi Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, **17** (2), 69-76.
- ASCE Committee on Replacement and Improvement of Soils**, 1986. Soil Improvement A Ten Year Update, *Proceedings of Symposium at ASCE Convention*, Atlantic City, New Jersey.
- Barksdale, R.D. and Bachus, R.C.**, 1983. Design and Construction of Stone Columns Volume I, *FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration*, U.S.A.
- 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.
- 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.
- Chen, J-F., Han, J., Oztoprak, S. and Yang, X-M.**, 2009. Behavior of Single Rammed Aggregate Piers Considering Installation Effects. *Computers and Geotechnics*.
- Durgunoğlu, T., Kulaç, H.F., İkiz, S. ve Karadayılar, T.**, 1992. Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi*, ZMTM Türk Milli Komitesi, Cilt-II, İTÜ, İstanbul.
- Durgunoğlu, T.**, 2004. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı. *TMH- Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 431.
- Demir, H.**, 2007. Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi FBE. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Farrell, T. and Taylor A.**, 2004. Rammed Aggregate Pier Design and Construction in California – Performance. *Constructability and Economics*, Farrell Design-Build Companies, Inc., Placerville, California.
- FitzPatrick, B.T. and Wissmann, K.J.**, 2002. Geopier® Shear Reinforcement for Global Stability and Slope Stability, Technical Bulletin No.5 Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.

- FitzPatrick, B.T., Wissmann, K.J. and White, D.J.**, 2003. Settlement Control for Embankments and Transportation-Related Structures Using Geopier® Soil Reinforcement, Technical Bulletin No.6 Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- FitzPatrick, B.T. and Wissmann, K.J.**, 2005. Support of Storage Tanks using Rammed Aggregate Piers, Technical Bulletin No.8 Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- FitzPatrick, B.T. and Wissmann, K.J.**, 2006. Vibration and Noise Levels, Technical Bulletin No.9 Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Fox, N.S. and Cowell, M.**, 1998. Geopier Reference Manual. Published by Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Fox, N.S., Wepler, L.R. and Scherbeck, R.**, 2004. Geopier Soil Reinforcement System – Case Histories of High Bearing Capacity Fastig Support and Flor Slab Support. *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York.
- Gear, G. and Veitas, R.**, 2007. Structural Design Considerations for Uniformly-Loaded Floor Slabs Supported by Rammed Aggregate Piers, Technical Bulletin No. 10, Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Griffith, C.J.**, 1991. Soil Improvement Through Vibro-compaction and Vibro-replacement. *University of Maryland Dept. of Civil Engineering*.
- Han, J., Oztoprak, S., Parsons, R.L. and Huang, J.**, 2007. Numerical Analysis of Foundation Columns to Support Widening of Embankments. *Computers and Geotechnics*.
- Hall, K., Wissmann, K.J., Caskey, J.M. and FitzPatrick, B.T.**, 2002. Soil Reinforcement Used to Arrest Bearing Capacity Failure at Steel Mill. *Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Handy, R.L., Fox, N.S. and Wissmann K.J.**, 1999. Short Aggregate Piers Reinforce Soils Near Tunnels, Geo-Engineering for Underground Facilities, Third National Conference, ASCE, *Geotechnical Special Publication*.
- Handy, R.L. and White, D.J.**, 2006. Stres Zones Near Displacement Piers: I-Plastic and Liquefied Behavior, ASCE, *54th Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Handy, R.L. and White, D.J.**, 2006. Stres Zones Near Displacement Piers: II-Radial Cracking and Wedding, ASCE, *54th Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Juran, I., Chen, C.L. and Acar, Y.B.**, 1988. Soil Improvement Methods for Reinforcing Foundation Soils – Volume:3 – Stone Columns, A Comparative Study of Soil Improvement/Reinforcement Techniques for Highway Embankments, Louisiana State University, Baton Rouge.

- Lawton, E.C. and Fow, N.S.**, 1994. Settlement of Structures Supported on Marginal and Inadequate Soils Stiffened With Short Aggregate Piers. ASCE. *Geotechnical Special Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments Volume II*, College Station, Texas.
- Lawton, E.C., Fox, N.S. and Handy, R.L.**, 1994. Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers. *Proceedings of In-Situ Deep Soil Improvement*. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia.
- Liew, S.S. and Tan, S.K.**, 2007. Performance of Reinforced Soil Wall Supported on Stone Columns, *Proc. 16th Southeast Asian Geotechnical Conferences*, Malaysia.
- Majchrzak, M., Lew, M., Sorensen, K. and Farrell, T.**, 2004. Settlement of Shallow Foundations Constructed Over Reinforced Soil: Design Estimates vs. Measurements. *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York.
- Miller, J., FitzPatrick, B.T. and Wissmann, K.J.**, 2004. Seismic Site Class Improvements using Geopier soil reinforcement, Technical Bulletin No.7 Geopier Foundation Company, inc., Mooresville, NC.
- Miller, J.P. and Richards, J.N.**, 2005. Finite Element Modelling of Slab with Uniformly Distributed Load on Geopier Foundation Elements, Geopier Foundation Company.
- Miller, J.P., Richards, J.N. and Friedman, M.A.**, 2006. Finite Element Modelling of Geopier Supported Spread Footings, Geopier Foundation Company.
- Minks, A.G., Wissmann, K.J., Caskey, J.M. and Pando, M.A.**, 2001. Distribution of Stresses and Settlements Below Floor Slabs Supported by Rammed Aggregate Piers, *Proceedings, 54th Canadian Geotechnical Conference*, Calgary, Alberta.
- Özkeskin, A.**, 2004. Settlement Reduction and Stress Concentration Factors in Rammed Aggregate Piers Determined From Full Scale Load Tests. *A Thesis Submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*. Ankara
- Özsoy, B. ve Durgunoğlu, T.**, 2003. Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin – Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması. *Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul.
- Parra, J.P., Miller, J.P., Richards, J. and Wissmann, K.J.**, 2007. Structural Design of Spread Footings on Geopier Soil Reinforcement Elements, Technical Bulletin No.12, Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Selçuk, L. ve Kayabalı, K.**, 2009. Zemin Sıvılaşmasına Karşı Taş Kolon Uygulama Yönteminin Sonlu Elemanlar Analizi ile Modellenmesi. *62. Türkiye Jeoloji Kurultayı*. MTA-Ankara.

- Shields C.S., FitzPatrick, B.T. and Wissmann, K.J.**, 2004. Modulus Load Test Results for Rammed Aggregate PierTM in Granular Soils, *Geo-Support*, Orlando-Florida.
- Thompson, M.J. and Sulemian, M.T.**, 2010. Numerical Modeling of Rammed Aggregate Pier Construction, ASCE, GSP 199, GeoFlorida.
- Url-1** <<http://www.vibroflotation.com>>, alındığı tarih 27.02.2011.
- Url-2** <<http://www.geopier.com>>, alındığı tarih 25.01.2011.
- Yıldırım, S.**, 2004. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Wissmann, K.J., White, D.J. and Lawton E.C.**, 1997. Load Test Comparisons for Rammed Aggregate Piers and Pier Groups, GSP 172 Soil Improvement.
- Wissmann, K.J., Lawton, E.C. and Farrell, T.M.**, 1999. Behavior of Geopier-Supported Foundation Systems During Seismic Events. Technical Bulletin No.1, Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Wissman, K.J.**, 1999. Bearing Capacity of Geopier-Supported Foundation Systems. Technical Bulletin No. 2, Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Wissmann, K.J., Caskey, J.M. and FitzPatrick, B.T.**, 2001. Geopier® Uplift Resistance, Technical Bulletin No.3, Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- Wissman, K.J., FitzPatrick, B.T. and Lawton, E.C.**, 2001. Geopier® Lateral Resistance, Technical Bulletin No. 4, Geopier® Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- 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, VA.
- Wissmann, K.J. and Fox, N.S.**, 2000. Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soil for Foundation Support, *Darmstadt Technical University Colloquium*, Darmstadt, Germany.
- Wissman, K.J., FitzPatrick, B.T., White, D.J. and Lien, B.H.**, 2000. Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements.
- Wissmann, K.J., FitzPatrick, B.T., White, D.J. and Lien B.H.**, 2002. Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements, *4th International Conference on Ground Improvement Techniques*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Wissmann, K.J., Veitas, R. and Parra, J.R.**, 2007. Design of Strip Footings Over Soil Reinforced by Rammed Aggregate Piers, Technical Bulletin No. 11, Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.
- White, D.J., Lawton, E.C. and Pitt, J.M.**, 2000. Lateral Earth Pressure Induced by Rammed Aggregate Piers, *53rd Annual Canadian Geotechnical Conference*, Montreal, Canada.

- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. and Gaul A.J.,** 2002. Embankment Support : A Comprasion of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement, Transportation Research Board, *81st Annual Meeting*, Washington D.C.
- White, D.J. and Sulemian M.T.,** 2004. Design of Short Aggregate Piers to Support Highway Embankments, Transportation Research Board, *83rd Annual Meeting*, Washington D.C.
- White, D.J., Sulemian M.T., Pham, H.T. and Bigelow, J.,** 2002. Constitutive Equation for Aggregates Used in Geopier Foundation Construction. Final Report, Iowa State Universtiy.
- White, D.J. and Hoevelkamp, K.,** 2004. Settlement Monitoring of Large Box Culvert Supported by Rammed Aggregate Piers – A Case History, *ASCE Geotechnical for Transportation Projects*, Los Angles, California.
- White, D.J., Wissmann K.J. and Barnes, A.,** 2003. Embankment Support : A Comprasion of Stone Column and Rammed Aggregate Soil Reinforcement, Aoran Gaul, Terracon Omaha, Nebraska, USA.
- White, D.J.,** 2007. Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results, *Journal of Geotechnicals and Geoenvironmental Engineering* © ASCE.
- White, D.J., Pham, T.V. and Hoevelkamp, K.K.,** 2007. Support Mechanisms of Rammed Aggregate Piers. II : Numerical Analyses, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* © ASCE.
- White, D.J., Suleiman, H.T. and Pham, T.V.,** 2003. Numerical Analyses of Geosynthetic – Reinforced Rammed Aggregate Pier – Support Embankments, Iowa State University.
- White, D.J. and Thomsan, M.J.,** 2006. Construction and Performance Monitoring of a Mechanically Stabilized Earth Wall Supported by Rammed Aggregate Pier, Iowa State University.
- White, D.J. and Suleiman, H.T.,** 2006. Full Scale Direct Shear Tests for Rammed Aggregate Piers, Iowa State University.

EKLER

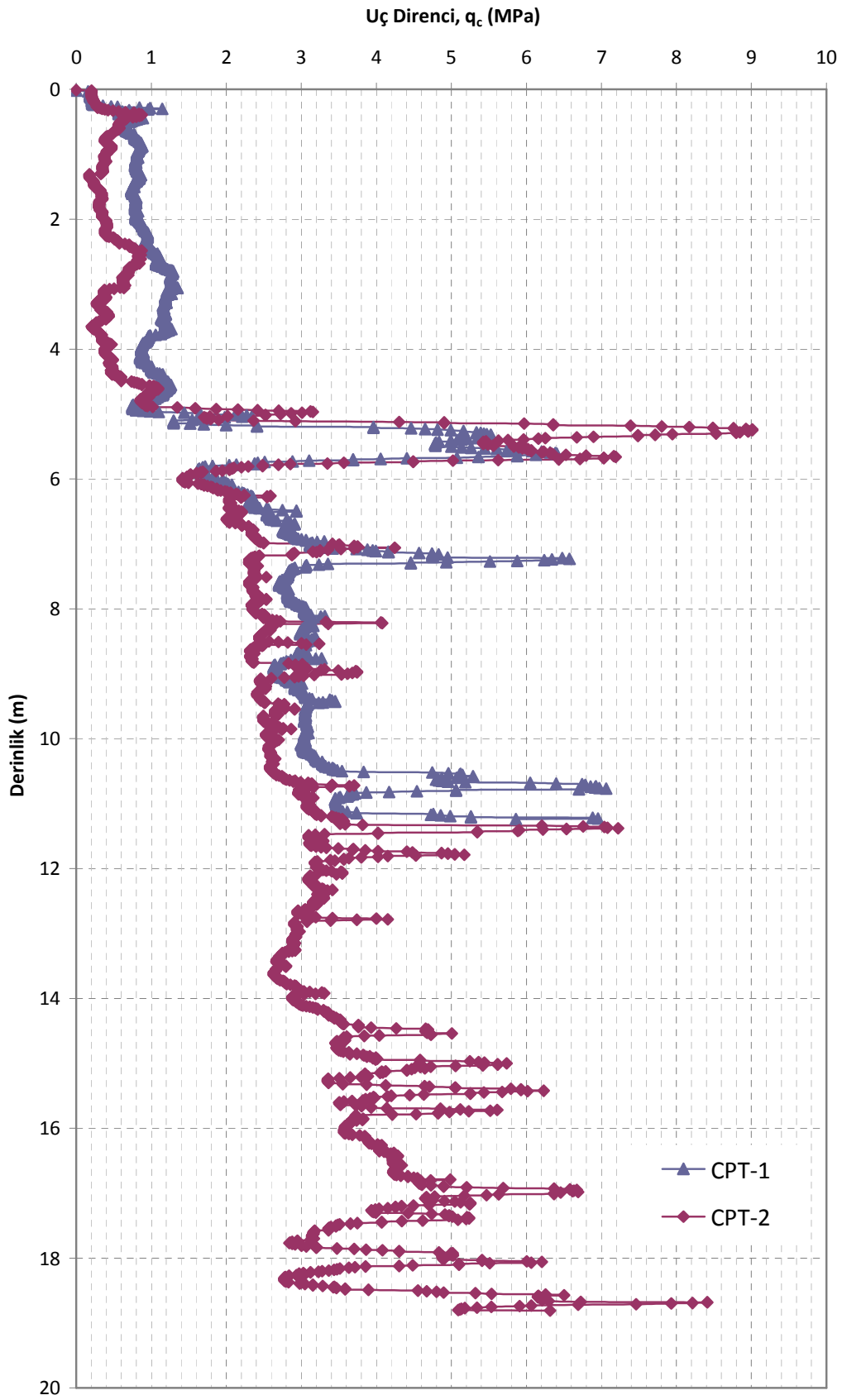
EK A.1 : Sondaj Logları

EK A.2 : CPT Sonuçları

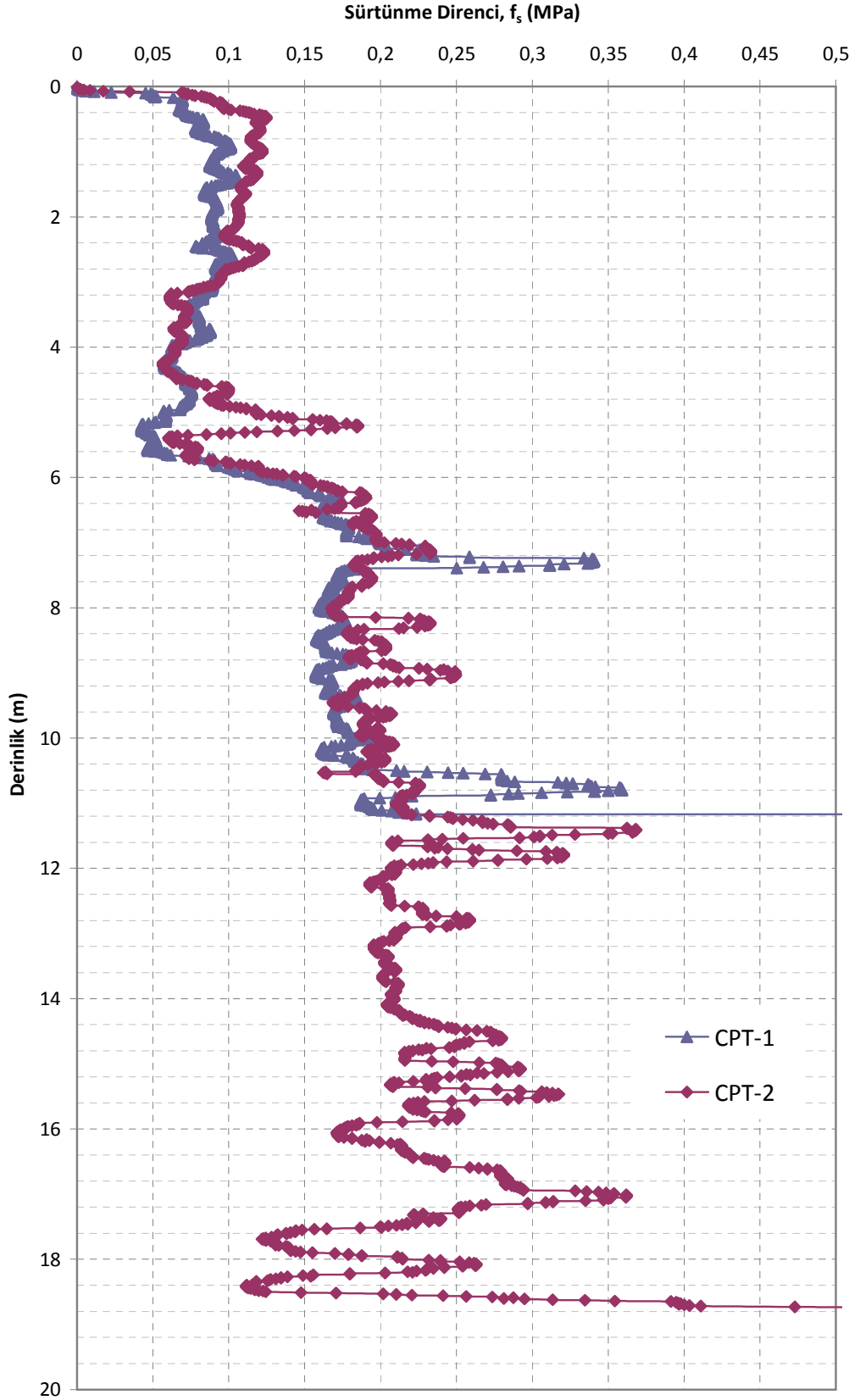
EK A.3 : Los Angeles Aşınma Deneyi Sonucu

EK A.4 : Arazi Yükleme Testi Formları

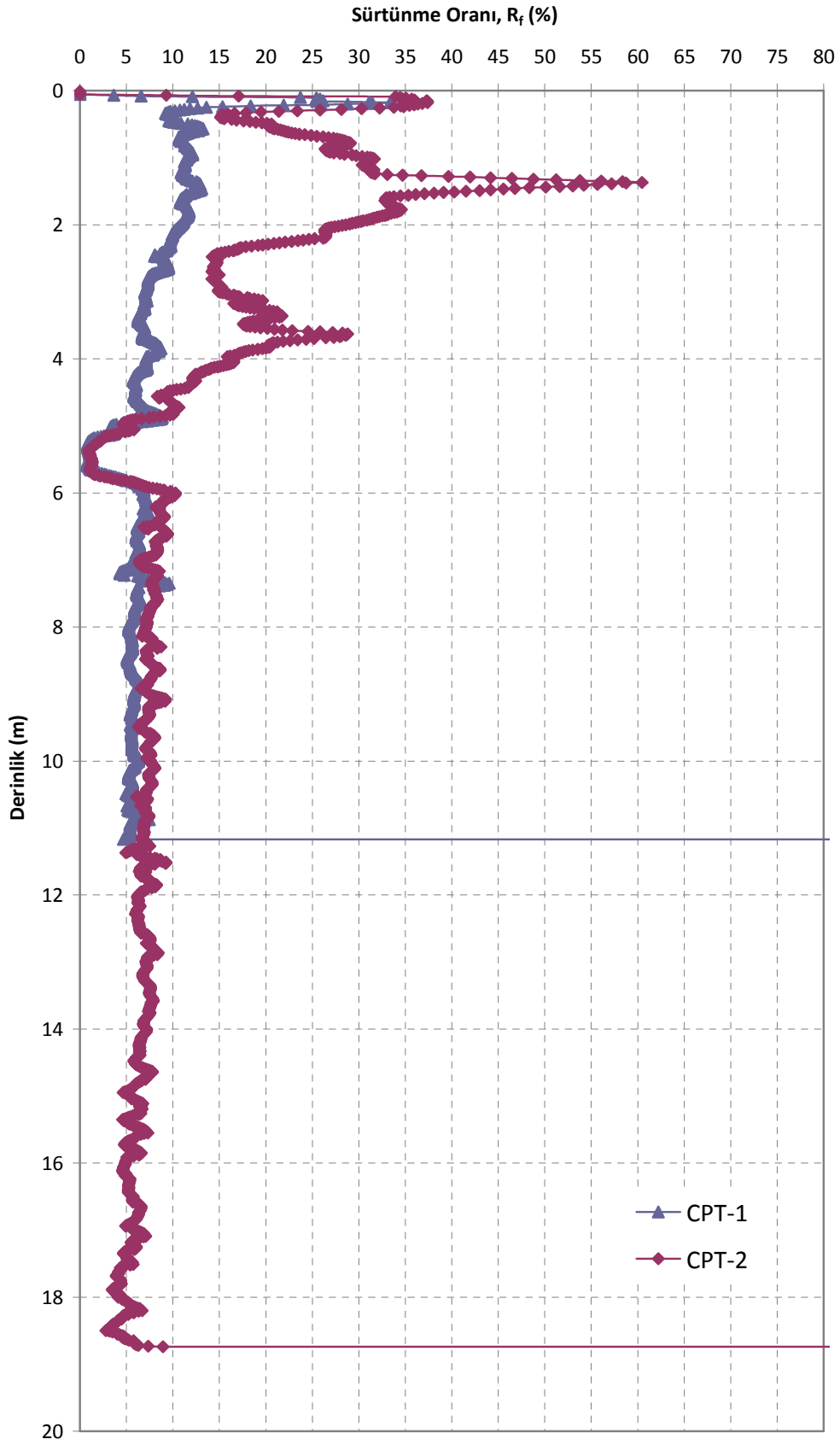
EK A.2



Şekil A.4 : CPT uç direncinin derinlik ile değişimi.




Şekil A.5 : CPT sürtünme direncinin derinlik ile değişimi.




Şekil A.6 : CPT sürtünme oranının derinlik ile değişimi.

EK A.3



geliştirilmiş ölçümleme ve test laboratuvarı



LOS ANGELES DENEYİ SONUÇLARI
LOS ANGELES TEST RESULTS

Müşteri Adı
Customer's Name

Num Arzı/Şg. Yer
Project/Location

Num Kabul Tarihi
Date of Samp. Accept.

SENTEZ İNŞAAT

Lüleburgaz

06,01,2011

Deney Tarihi
Date of Test

Deney Rapor Tarihi
Date of Test Report

Laboratuvar No
Laboratory No

07,01,2011

06,01,2011


11-24_A1

BRN-1163886


Sınıf ve Top. Adedi	Eliek No.	Deney Num. Kütle, g	Yıkama Eliekleri	Deney Sonu Kütle, g		Kütle Kaybı, %	
				100 Devir	300 Devir	100 Devir	300 Devir
A	12	1 1/2" - 1"	#12 (1,7 mm)				
A	12	1" - 3/4"					
A	12	3/4" - 1/2"					
A	12	1/2" - 3/8"					
B	11	3/4" - 5/2"		2500	4470	3425	11
B	11	1/2" - 3/8"		2300			32
C	5	3/8" - 1/16"		-			
C	5	1/4" - 1/8"		-			
D	5	1/8"		-			

- Deneyler için Bütün testler için referans verimlerin yerine numuneler kullanılmamıştır. Tests were done from the samples that are delivered by the related firm.
- Bu sonuç ASTM C 131 Mandaforuna göre yapılmıştır. This test is being done according to the ASTM C 131 standards.
- Bu deney raporları laboratuvarımız için özel olarak hazırlanmış ve doğrulanmıştır. The tests results must not be reproduced in any form without the written permission of laboratory.
- ZEMAR tarafından alınan Deney Sonuç raporlarında geçerlidir. Test result reports without a ZEMAR Redüğüren are invalid.
- T.C. Bakanlık ve İnceleme (Denetim) İşleri Bakanlığı Sayısı 28/07/2010 tarih ve 306 sayılı Bakanlık Laboratuvarları Belgeleri Kurumunda tescimlenmiştir. T.C. Department of State right cited by 28/07/2010 and 306 number of laboratory accreditation.


Deneyi Yapan
Tested By



Öznur ÜSKÜLOĞLU
Jeofizik Mühendisi



Onaylayan
Approved By



Nihat BAŞARIK
Denetçi Mühendis
Belge No: 5809

Şekil A.7 : Los Angeles deneyi sonucu.

EK A.4

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ DKK (Impact Yöntemi) YÜKLEME TESTİ													
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika 'nın altında olmadığı sürece yükleme okunmalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.													
DKK No:		SP 1					Tarih:			12.07.2010		Sayfa :1/3	
DKK Boyu :		6.5 m					Yükleme deneyi Yüku:			13,5 ton			
Başlık Betonü Çapı :		50 cm											
Yük No	Çalışma Yüku (%)	Yük (ton)	DKK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)
0	5,00	0,68	33,72	2,58	2,00	5 / -			99,9	99,44	99,44	99,593	
1	16,89	2,28	113,91	8,73	9,00	15 / 60	09:00	Yükleme	99,67	98,44	98,44	98,850	0,363
					9,00		09:05	5	99,00	98,42	98,34	98,587	0,627
					9,00		09:10	10	99,00	98,42	98,34	98,587	0,627
					9,00		09:15	15	99,00	98,42	98,34	98,587	0,627
					9,00		09:30	30	99,00	98,42	98,34	98,587	0,627
								45					
								60					
2	33,11	4,47	223,33	17,11	18,00	15 / 60	09:32	Yükleme	98,2	98,28	97,39	97,957	1,257
					17,50		09:37	5	98,19	98,22	97,26	97,890	1,323
					17,00		09:42	10	98,17	98,12	97,25	97,847	1,367
					17,00		09:47	15	98,13	98,07	97,25	97,817	1,397
					17,00		10:02	30	98,12	98,07	97,25	97,813	1,400
								45					
								60					
3	50,00	6,75	337,24	25,83	26,50	15 / 60	10:03	Yükleme	97,40	96,31	96,57	96,760	2,453
					26,00		10:08	5	97,39	96,26	96,53	96,727	2,487
					26,00		10:13	10	97,37	96,25	96,52	96,713	2,500
					25,50		10:18	15	97,37	96,24	96,51	96,707	2,507
								30					
								45					
								60					
4	66,30	8,95	447,16	34,25	35,00	15 / 60	10:22	Yükleme	96,69	95,50	95,74	95,977	3,237
					34,00		10:27	5	96,63	95,47	95,68	95,927	3,287
					34,00		10:32	10	96,63	95,47	95,68	95,927	3,287
					33,50		10:57	15	96,60	95,47	95,65	95,907	3,307
					33,50		10:52	30	96,60	95,47	95,65	95,907	3,307
								45					
								60					

Şekil A.8 : SP 1 yükleme testi formu.

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ DKK (Impact Yöntemi) YÜKLEME TESTİ														
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika 'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.														
DKK No:		SP 1						Tarih:		12.07.2010			Sayfa :2/3	
DKK Boyu :		6.5 m						Yükleme deneyi Yüğü:		13,5 ton				
Başlık Betonü Çapı :		50 cm												
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	DKK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)	
5	83,11	11,22	560,57	42,94	44,00	30 / 60	13:05	Yükleme	95,76	94,67	94,82	95,083	4,130	
					43,50		13:10	5	95,76	94,67	94,77	95,067	4,147	
					43,00		13:15	10	95,75	94,66	94,77	95,060	4,153	
					43,00		13:20	15	95,74	94,64	94,75	95,043	4,170	
					43,00		13:35	30	95,67	94,61	94,70	94,993	4,220	
								45						
								60						
6	100,00	13,50	674,48	51,66	52,50	30 / 60	11:29	Yükleme	95,30	94,17	94,22	94,563	4,650	
					51,00		11:34	5	95,3	94,15	94,21	94,553	4,660	
					51,00		11:39	10	95,24	94,08	94,19	94,503	4,710	
					51,00		11:44	15	95,21	94,05	94,18	94,480	4,733	
					51,00		11:59	30	95,2	94,04	94,18	94,473	4,740	
								45						
								60						
7	116,00	15,66	782,40	59,93	61,00	60 / 240	12:00	Yükleme	94,74	93,64	93,66	94,013	5,200	
					60,00		12:05	5	94,72	93,59	93,64	93,983	5,230	
					61,00		12:10	10	94,63	93,47	93,51	93,870	5,343	
					60,00		12:15	15	94,58	93,36	93,47	93,803	5,410	
					60,00		12:30	30	94,53	93,30	93,47	93,767	5,447	
					61,00		12:45	45	94,46	93,28	93,30	93,680	5,533	
					60,00		13:00	60	94,40	93,22	93,27	93,630	5,583	
								75						
								90						
								105						
								120						
								135						
								150						
								165						
								180						
								195						
								210						
								225						
								240						

Şekil A.9 : SP 1 yükleme testi formu (devamı).

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ DKK (Impact Yöntemi) YÜKLEME TESTİ																			
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika 'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.																			
DKK No:		SP 1						Tarih:		12.07.2010			Sayfa :3/3						
DKK Boyu :		6.5 m						Yükleme deneyi Yüğü:		13,5 ton									
Başlık Betonü Çapı :		50 cm																	
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	DKK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasiaları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)						
8	133,33	18,00	899,31	68,89	70,00	30 / 60	13:05	Yükleme	93,97	92,77	92,75	93,163	6,050						
					69,00		13:10	5	93,92	92,75	92,70	93,123	6,090						
					69,00		13:15	10	93,91	92,63	92,68	93,073	6,140						
					69,00		13:20	15	93,89	92,58	92,65	93,040	6,173						
					69,00		13:35	30	93,89	92,57	92,64	93,033	6,180						
9	150,00	20,25	1011,73	77,50	79,00	30 / 60	13:43	Yükleme	93,25	92,14	92,02	92,470	6,743						
					78,00		13:48	5	93,23	92,09	92,02	92,447	6,767						
					77,00		13:53	10	93,22	92,07	92,02	92,437	6,777						
					77,00		13:58	15	93,22	92,06	92,02	92,433	6,780						
					77,00		14:13	30	93,21	92,06	92,01	92,427	6,787						
10	100,00	13,50	674,48	51,66	52,00	N/A	14:15	Boşaltma	93,21	92,06	92,01	92,427	6,787						
11	66,30	8,95	447,16	34,25	35,00	N/A	14:17	Boşaltma	93,40	92,36	92,15	92,637	6,577						
12	33,11	4,47	223,33	17,11	17,00	N/A	14:19	Boşaltma	94,04	93,08	92,86	93,327	5,887						
13	0,00	0,00	0,00	0,00	17,00	N/A	14:20	Boşaltma	95,85	94,80	94,90	95,183	4,030						
14	100,00	13,50	674,48	51,66	52,00	N/A	14:28	Yükleme	94,17	91,95	92,55	92,890	6,323						
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A	14:30	Boşaltma	96,30	94,46	95,17	95,310	3,903						

Şekil A.10 : SP 1 yükleme testi formu (devamı).

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ TK (Öteleme Yöntemi) YÜKLEME TESTİ														
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika 'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.														
TK No:	SPD 1						Tarih:	19.08.2010			Sayfa :1/3			
TK Boyu :	6,5 m						Yükleme deneyi yükü:	7 ton						
Başlık Betonü Çapı :	50 cm													
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	TK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)	
									99,64	99,18	99,32			
0	5,00	0,35	17,49	1,34	1,50	5 / -	09:43		97,84	97,86	96,40	97,367		
							09:48		97,80	97,84	96,35	97,330		
1	16,00	1,12	55,96	4,29	4,50	15 / 60	09:49	Yükleme	97,77	97,78	96,20	97,250	0,117	
					4,40		09:54	5	97,77	97,725	96,15	97,215	0,152	
					4,40		09:59	10	97,77	97,705	96,13	97,202	0,165	
					4,30		10:04	15	97,77	97,68	96,09	97,180	0,187	
					4,30		10:19	30	97,77	97,61	96,02	97,133	0,233	
								45						
								60						
2	33,00	2,31	115,41	8,84	8,90	15 / 60	10:20	Yükleme	95,955	94,245	94,65	94,950	2,417	
					8,90		10:25	5	94,03	94,24	94,635	94,302	3,065	
					8,80		10:30	10	94,02	94,22	94,60	94,280	3,087	
					8,80		10:35	15	94,01	94,215	94,585	94,270	3,097	
					8,50		10:50	30	94,00	94,17	94,52	94,230	3,137	
								45						
								60						
3	50,00	3,50	174,87	13,39	13,50	15 / 60	10:53	Yükleme	90,21	90,55	89,56	90,107	7,260	
					13,50		11:05	5	90,17	90,52	89,50	90,063	7,303	
					13,45		11:10	10	90,17	90,52	89,49	90,060	7,307	
					13,40		11:15	15	90,17	90,52	89,48	90,057	7,310	
					13,30		11:25	30	90,17	90,52	89,48	90,057	7,310	
								45						
								60						
4	66,00	4,62	230,82	17,68	17,80	15 / 60	11:26	Yükleme		84,46	84,39	84,425	12,942	
					17,75		11:31	5		85,41	84,32	84,865	12,502	
					17,70		11:36	10		85,40	84,30	84,850	12,517	
					17,70		11:41	15		85,40	84,26	84,830	12,537	
					17,70		11:56	30		85,185	84,15	84,668	12,699	
					17,65		12:11	45		85,00	84,00	84,500	12,867	
					17,65		12:26	60		84,83	83,77	84,300	13,067	

Şekil A.11 : SPD 1 yükleme testi formu.

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ TK (Öteleme Yöntemi) YÜKLEME TESTİ														
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika 'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.														
TK No:	SPD 1							Tarih:	19.08.2010			Sayfa :2/3		
TK Boyu :	6,5 m							Yükleme deneyi yükü:	7 ton					
Başlık Betonü Çapı :	50 cm													
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	TK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)	
5	83,00	5,81	290,28	22,23	22,50	30 / 60	13:20	Yükleme	84,99	79,72	78,28	80,997	16,370	
					22,45		13:25	5	84,92	79,68	78,25	80,950	16,417	
					21,50		13:33	10	84,91	79,67	78,18	80,917	16,450	
					21,00		13:35	15	84,90	79,67	78,17	80,912	16,455	
					20,00		13:50	30	84,76	79,55	78,08	80,792	16,575	
					20,00		14:05	45	84,36	79,17	77,70	80,410	16,957	
							14:20	60	83,84	78,99	77,14	79,990	17,377	
6	100,00	7,00	349,73	26,79	27,00	30 / 60	14:24	Yükleme	79,26	74,86	72,24	75,453	21,913	
					27,50		14:29	5	79,37	74,95	72,38	75,567	21,800	
					27,50		14:34	10	78,56	73,20	71,57	74,442	22,925	
					26,00		14:39	15	78,48	73,12	71,47	74,357	23,010	
					25,45		14:54	30	78,31	72,96	71,39	74,220	23,147	
					25,00		15:09	45	78,04	72,80	71,16	74,000	23,367	
					25,00		15:24	60	77,66	72,41	70,81	73,627	23,740	
7	116,00	8,12	405,69	31,08	31,00	60 / 240	15:31	Yükleme	71,22	65,85	64,14	67,070	30,297	
					31,00		15:36	5	71,19	65,78	64,07	67,013	30,353	
					30,50		15:41	10	71,17	65,77	64,05	66,997	30,370	
					30,50		15:46	15	71,17	65,77	64,05	66,997	30,370	
					30,00		16:01	30	71,15	65,77	64,05	66,990	30,377	
								45						
								60						
								75						
								90						
								105						
								120						
								135						
								150						
								165						
								180						
								195						
								210						
								225						
								240						

Şekil A.12 : SPD 1 yükleme testi formu (devamı).

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ TK (Öteleme Yöntemi) YÜKLEME TESTİ													
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika h'n altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.													
TK No:		SPD 1					Tarih:			19.08.2010		Sayfa :3/3	
TK Boyu :		6,5 m					Yükleme deneyi yükü:			7 ton			
Başlık Betonü Çapı :		50 cm											
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	TK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygutlanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)
8	133,00	9,31	465,14	35,63	35,90	30 / 60	16:04	Yükleme	68,35	61,87	61,14	63,787	33,580
					34,00		16:09	5	67,97	61,60	60,81	63,460	33,907
					32,00		16:14	10	67,86	61,54	60,70	63,367	34,000
					31,00		16:19	15	67,73	61,33	60,56	63,207	34,160
					30,50		16:34	30	67,48	61,08	60,34	62,967	34,400
					30,00		16:49	45	67,05	60,70	59,90	62,550	34,817
					30,00		17:04	60	66,65	60,25	59,41	62,103	35,263
9	150,00	10,50	524,60	40,18	40,00	30 / 60	17:13	Yükleme	60,95	54,52	53,63	56,367	41,000
					39,00		17:18	5	61,37	54,77	53,88	56,673	40,693
					38,00		17:23	10	59,51	53,85	51,99	55,117	42,250
					40,00		17:28	15	59,40	53,74	51,97	55,037	42,330
					39,00		17:43	30	59,31	53,64	51,90	54,950	42,417
					38,00		17:58	45	59,43	54,75	52,03	55,403	41,963
					40,00		18:13	60	58,86	53,24	51,50	54,533	42,833
10	100,00	7,00	349,73	26,79	27,00	N/A	18:14	Boşaltma	59,11	53,47	51,75	54,777	42,590
11	66,00	4,62	230,82	17,68	18,00	N/A	18:20	Boşaltma	59,60	53,88	52,14	55,207	42,160
12	33,00	2,31	115,41	8,84	8,50	N/A	18:24	Boşaltma	60,15	54,43	53,66	56,080	41,287
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A	18:25	Boşaltma	62,73	55,78	54,82	57,777	39,590
14	100,00	7,00	349,73	26,79	27,00	N/A	18:26	Yükleme	59,53	53,84	51,89	55,087	42,280
							18:31		59,52	53,82	51,86	55,067	42,300
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N/A	18:32	Boşaltma	61,48	55,64	53,60	56,907	40,460
							18:37		61,61	55,74	53,72	57,023	40,343
16	200,00	14,00	699,47	53,58	50,00	N/A	18:44	Yükleme	41,34	36,61	34,12	37,357	60,010
					40,00		18:49		41,07	35,28	33,90	36,750	60,617

Şekil A.13 : SPD 1 yükleme testi formu (devamı).

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ TK (Yer Değiştirme Yöntemi) YÜKLEME TESTİ													
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.													
TK No:		SPR 1					Tarih:			02.09.2010		Sayfa :1/3	
TK Boyu :		6,5 m					Yükleme deneyi yükü:			7 ton			
Başlık Betonü Çapı:		50 cm											
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	TK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)
0	5,00	0,35	17,49	1,34	2,00	5 / -	07:52		99,89	99,72	99,76	99,790	
							07:57		99,08	98,54	98,79	98,803	
1	16,00	1,12	55,96	4,29	4,00	15 / 60	07:59	Yükleme	92,88	92,41	92,63	92,640	6,090
							08:04	5	92,715	92,18	92,54	92,478	6,252
							08:09	10	92,65	92,09	92,49	92,410	6,320
							08:14	15	92,645	92,085	92,45	92,393	6,337
							08:29	30	92,595	92,085	92,41	92,363	6,367
								45					
								60					
2	33,00	2,31	115,41	8,84	9,00	15 / 60	08:33	Yükleme	79,32	79,56	79,815	79,565	19,165
					8,00		08:38	5	79,215	79,48	79,71	79,468	19,262
					8,00		08:43	10	79,215	79,50	79,71	79,475	19,255
					7,00		08:48	15	79,215	79,50	79,71	79,475	19,255
								30					
								45					
								60					
3	50,00	3,50	174,87	13,39	14,00	15 / 60	08:50	Yükleme	62,77	62,28	62,27	62,440	36,290
					13,00		08:55	5	62,715	62,268	62,18	62,388	36,342
					12,00		09:00	10	62,645	62,21	62,15	62,335	36,395
					12,00		09:05	15	62,59	62,00	62,10	62,230	36,500
					12,00		09:20	30	62,54	61,91	62,03	62,160	36,570
					11,00		09:35	45	62,54	61,92	62,03	62,163	36,567
								60					
4	66,00	4,62	230,82	17,68	18,00	15 / 60	09:38	Yükleme	48,34	47,80	47,62	47,920	50,810
					15,00		09:43	5	48,29	47,725	47,55	47,855	50,875
					18,00		09:48	10	46,34	45,825	45,615	45,927	52,803
					17,00		09:53	15	46,29	45,79	45,58	45,887	52,843
					15,00		10:08	30	46,24	45,78	45,56	45,858	52,872
								45					
								60					

Şekil A.14 : SPR 1 yükleme testi formu.

SARIMSAKLI ÇİFTLİĞİ TK (Yer Değiştirme Yöntemi) YÜKLEME TESTİ													
Not: Oturma hızı 0,254 mm/saat veya 0,064 mm/15dakika'nın altında olmadığı sürece yükleme okumalarına önerilen maksimum süreye kadar devam edilecektir.													
TK No:		SPR 1						Tarih:		02.09.2010		Sayfa :2/3	
TK Boyu :		6,5 m				Yükleme deneyi yükü:				7 ton			
Başlık Betonü Çapı:		50 cm											
Yük No	Çalışma Yüğü (%)	Yük (ton)	TK üstündeki basınç (kPa)	Planlanan manometre basıncı (Bar)	Uygulanan manometre basıncı (Bar)	Tavsiye edilen Min/Max bekleme süresi (dk.)	Zaman (saat:dk)	Okuma fasılları (saat:dk)	Okuma 1 (mm)	Okuma 2 (mm)	Okuma 3 (mm)	Ortalama (mm)	Oturma (mm)
5	83,00	5,81	290,28	22,23	24,00	30 / 60	10:10	Yükleme	33,81	33,50	32,95	33,420	65,310
					20,00		10:15	5	33,71	33,50	32,87	33,360	65,370
					19,00		10:20	10	33,69	33,50	32,825	33,338	65,392
					19,00		10:25	15	33,61	33,40	32,765	33,258	65,472
					17,00		10:40	30	33,61	33,40	32,755	33,255	65,475
								45					
								60					
6	100,00	7,00	349,73	26,79	27,00	30 / 60	10:43	Yükleme	18,72		17,65	18,185	80,545
					24,00		10:48	5	18,645		17,63	18,138	80,593
					24,00		10:53	10	18,60		17,58	18,090	80,640
					24,00		10:58	15	18,60		17,57	18,085	80,645
					24,00		11:13	30	18,56		17,56	18,060	80,670
								45					
								60					
7	116,00	8,12	405,69	31,08	31,00	60 / 240	11:13	Yükleme	7,00		5,73	6,365	92,365
					27,00		11:18	5	6,89		5,63	6,265	92,265
					26,00		11:23	10	6,75		5,55	6,150	92,580
					26,00		11:28	15	6,78		5,54	6,160	92,570
					26,00		11:43	30	6,70		5,445	6,073	92,658
					25,00		11:58	45	6,675		5,45	6,063	92,668
					25,00		12:43	60	6,65		5,40	6,025	86,615
								75					
								90					
								105					
								120					
								135					
								150					
								165					
								180					
								195					
								210					
								225					
								240					

Şekil A.15 : SPR 1 yükleme testi formu (devamı).

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad	: Ece KURT
Doğum Yeri ve Tarihi	: İstanbul - 05.08.1984
Lisans Üniversite	: İstanbul Üniversitesi İnşaat Müh. (2004 - 2007) : İstanbul Üniversitesi Jeofizik Müh. (2002 – 2006)
Çalışılan Kurumlar	: Sentez İnşaat (2009 -) : Geoteknik A.Ş. (2007 – 2009)

