

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNİN KIRMATAŞ KOLONLARI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin MUNGAN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Programı : Geoteknik

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Ersin AREL

NİSAN 2016

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZEMİNİN KIRMATAŞ KOLONLARI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin MUNGAN

1309211001

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.04.2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 21.04.2016

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Ersin AREL

Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Akın ÖNALP

Doç.Dr.Aydın KAVAK

NİSAN 2016

ÖNSÖZ

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın konusu darbeli kırmataş kolonların zemin ortamındaki performanslarının değerlendirilmesidir.

Tez çalışmamın her aşamasında, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman yol gösteren değerli danışman hocam Yrd.Doç.Dr.Ersin AREL' e şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam aşamasında, danışman hocamla birlikte yardımlarını esirgemeyen ve öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli hocam, Prof.Dr.Akın ÖNALP' e şükranlarımı sunarım.

Tez çalışma aşamasında, özellikle analizlerde yardımlarından ötürü Yük.Müh.İlhan Burak DURAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın analiz kısmında, veri paylaşımından ötürü Sentez İnşaat çalışanlarından Yük.Müh.Lale ÖNER' e ve Yük.Müh.Ece KURT BAL' a teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite eğitimi süresince, maddi ve manevi desteklerinden ötürü aileme teşekkür ederim.

Nisan 2016

Hüseyin MUNGAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	IV
TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	VI
SEMBOL LİSTESİ	VIII
ÖZET	XIII
ABSTRACT	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
2. ZEMİNİN RİJİT KOLONLARLA İYİLEŞTİRİLMESİ	1
2.1. Zeminin Taş Kolonlar ve Darbeli Kırmataş Kolonlarla İyileştirilmesi	2
2.1.1. Önceki Çalışmalar	2
2.1.2. Taş Kolonlar	9
2.1.2.1. Taş Kolon Yapım Yöntemleri	9
2.1.2.1.1. Titreşimli Kompaksiyon (<i>Vibro Compaction</i>)	9
2.1.2.1.2. Titreşimli İttirme (<i>Vibro-Replacement</i>)	10
2.1.2.1.2.1. Titreşimli İttirme Islak Yöntem (Üstten Beslemeli)	11
2.1.2.1.2.2. Titreşimli İttirme Kuru Yöntem (Altan Beslemeli)	12
2.1.2.1.3. Titreşimli Kum Kazık Yöntemi (<i>Vibro Composer</i>)	12
2.1.2.2. Taş Kolonlarda Birim Hücre Kavramı	13
2.1.2.3. Taş Kolonlarda Göçme Mekanizması	16
2.1.2.3.1. Tekil Taş Kolonlarda Göçme Mekanizması	16
2.1.2.3.2. Grup Taş Kolonlarda Göçme Türleri	18
2.1.2.4. Taş Kolonlarda Taşıma Gücü	21
2.1.2.4.1. Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Gücü	21
2.1.2.4.2. Kısa Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Gücü	26
2.1.2.4.3. Hint Standartına Göre Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Yüğü'nün Bulunması	28
2.1.2.4.3.1. Radyal Genişlemeden Dolayı Oluşan Emniyetli Taşıma Yüğü	28
2.1.2.4.3.2. Sürşarj Yüklemesinden Dolayı Oluşan Yanal Gerilme Artışının Neden Olduğu Emniyetli Taşıma Yüğü	29
2.1.2.4.3.3. Zeminin Emniyetli Taşıma Yüğü	29
2.1.2.4.4. Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü	30
2.1.2.5. Taş Kolonlarda Oturma Hesabı	32
2.1.2.5.1. Greenwood ve Thomson Yöntemi	32
2.1.2.5.2. Van Impe ve De Beer Yöntemi	33
2.1.2.5.3. Van Impe ve Madhav Yöntemi	34
2.1.2.5.4. Priebe Yöntemi	35
2.1.3. Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK)	39
2.1.3.1. DKK' larda Kayma Direnci Açısı	39
2.1.3.2. DKK Yapım Yöntemleri	40

2.1.3.2.1. DKK Kuyu Yöntemi	40
2.1.3.2.2. Geopier® Yöntemi (GP3)	41
2.1.3.2.3. Impact® Yöntemi.....	42
2.1.3.2.4. Rampact® Yöntemi	44
2.1.3.3. DKK'larda Taşıma Gücü Hesabı	45
2.1.3.3.1. Tekil Darbeli Kırmataş Kolonlarda Yanal Şişme Yenilmesi	46
2.1.3.3.2. Tekil Darbeli Kırmataş Kolonlarda Kayma Yenilmesi.....	47
2.1.3.3.3. DKK ile İyileştirilen Zeminde Kayma Yenilmesi	49
2.1.3.3.4. DKK ile İyileşen Zeminlerde Uç Bölgesinde Kayma Yenilmesi.....	49
2.1.3.4. DKK' larda Oturma Hesabı	52
2.1.3.4.1. Üst Bölge Oturması.....	53
2.1.3.4.2. Alt Bölge Oturması	56
2.1.3.5. DKK'larda Kalite Kontrol	57
2.1.3.5.1. Akış Oranı Testi.....	57
2.1.3.5.2. Artan Kırmataş Hacim Testi.....	57
2.1.3.5.3. Kullanılan Kırmataş Hacim Testi	58
2.1.3.5.4. Uç Dengeleme Testi (BST)	58
2.1.3.5.5. Dinamik Koni Penetrasyon Testi (DCP)	58
2.1.3.5.6. DKK Yükleme Testi	58
2.1.3.6. DKK' ların Taş Kolonlardan Üstünlükleri	59
3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARDA HESAPLAMALAR	59
3.1. DKK' larda Oturma Kontrolü.....	60
3.1.1. Temeller Altındaki Geopier® DKK' larda Oturma Miktarı.....	60
3.1.2. Granüler Tabaka Altındaki DKK' larda Oturma Bulunuşu	64
3.2. DKK' larda Şaft Uzunluğu Bulunuşu	64
4. DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ.....	66
4.1. Proje Özellikleri	66
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	68
4.2.1. DKK'sız Ortamda Temeldeki Oturmalar.....	68
4.2.2. Kompozit Zemin Ortamında Temeldeki Oturmalar	71
4.2.3. DKK' lı Ortamda Temeldeki Oturmalar	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	78
EK - A.....	82

KISALTMALAR

BST	: Uç Dengeleme Testi
DCP	: Dinamik Koni Penetrasyon Testi
DSM	: Derin Karıştırma Kolonları
DKK	: Darbeli Kırmataş Kolonlar
GS	: Güvenlik Sayısı
JG	: Jet Grout
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
SPT-N	: Standart Penetrasyon Deneyi Darbe Sayısı
TK	: Taş Kolonlar

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Taş Kolonlu Zeminde Oturma.....	4
Tablo 2.2. Kolonların Rijitliklerinin Karşılaştırılması	7
Tablo 2.3. Kolonların Oturmalarının Karşılaştırılması	8
Tablo 2.4. Impact® DKK, Delme Kazık ve Jet Grout Yöntemlerinin Örnek Bir Projede Kıyaslanması.....	43
Tablo 3.1. 0,76 m Çap İçin Geopier® DKK Tasarım Parametreleri.....	62
Tablo 4.1. Jeotermal Enerji Santrali Projesi Zemin ve DKK Özellikleri	67
Tablo 4.2. Analizlerde Kullanılan Zemin Parametreleri	70
Tablo 4.3. Analizde Kullanılan Yayılı Temel Özellikleri	70
Tablo 4.4. Kompozit Ortamda Zemin Parametreleri.....	72
Tablo 4.5. DKK Parametreleri	75
Tablo A.1. Oturma Miktarları	89

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Zemin Tipleri ve Dane Çaplarına Göre Ayrılması	2
Şekil 2.2 Yük-Oturma Eğrisi	3
Şekil 2.3 Summer Washington’da Temel Altına DKK Uygulaması.....	5
Şekil 2.4 Salem Oregon’da Temel Altına DKK Uygulaması	5
Şekil 2.5 Baevertton, Oregon’da Temel Altına DKK Uygulaması.....	6
Şekil 2.6 Titreşimli Kompaksiyon Yöntemi	10
Şekil 2.7 Temel Altında Taşkolon Yerleşim Planı.....	10
Şekil 2.8 Titreşimli İttirme ve Titreşimli Sıkıştırma Yöntemleri Zemin Tipine Göre Uygulanabilirliği	11
Şekil 2.9 Titreşimli İttirme (Islak Yöntem) Taş Kolon Uygulaması.....	11
Şekil 2.10 Titreşimli İttirme Kuru Yöntem Taş Kolon Uygulaması.....	12
Şekil 2.11 Titreşimli Kum Kazık Yöntemi	13
Şekil 2.12 Birim Hücre Kavramı.....	13
Şekil 2.13 Taş Kolon Zemin Yük Paylaşımı	14
Şekil 2.14 Gerilme Yoğunlaşma Oranı Değişimi.....	16
Şekil 2.15 Taş Kolonlarda Göçme Türleri.....	17
Şekil 2.16 Kritik Yanal Şişme Yenilmesi Derinliği Değişimi	17
Şekil 2.17 Tabakalı Zeminde Göçme Türleri.....	18
Şekil 2.18 Grup taş Kolonlarda Yenilme.....	19
Şekil 2.19 Grup Taş Kolonlarda Yenilme Tipleri	20
Şekil 2.20 Tekil Taş Kolonda Şişme Göçmesi	21
Şekil 2.21 Boşluk Genleşme Faktörleri	23
Şekil 2.22 Tekil Taş Kolonda Yenilme	24
Şekil 2.23 Taşıma Gücü Katsayıları.....	27
Şekil 2.24 Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü	31
Şekil 2.25 Oturma Miktarı Bulunuşu	32
Şekil 2.26 Taş Kolon Etki Alanı (A) ve Taş Kolon Alanı (A _c)	33
Şekil 2.27 Oturma Miktarı Bulunuşu	34
Şekil 2.28 İyileştirme Sonrası Oturma Miktarı Bulunuşu	35
Şekil 2.29 Birim Hücre	36
Şekil 2.30 Priebe Metodu İyileştirme Katsayısı Bulunuşu	37
Şekil 2.31 Tekil Temel İçin Priebe Metodu Oturma Oranı Bulunuşu.....	37
Şekil 2.32 Şerit Temel İçin Priebe Metodu Oturma Oranı Bulunuşu	38
Şekil 2.33 Grup Taş Kolonlarda Oturma	38
Şekil 2.34 DKK ‘larda Kayma Direnci Açısı Değişimi	39
Şekil 2.35 DKK Kuyu Yöntemi	40
Şekil 2.36 Geopier Sistemi Ekipmanları	41
Şekil 2.37 Geopier® Yöntemi.....	41
Şekil 2.38 Impact® Sistemi	42

Şekil 2.39 Impact [®] Yöntemi	43
Şekil 2.40 DKK Yöntemlerinin Zemin Tipine Göre Uygulanabilirliği	44
Şekil 2.41 Taşıma Gücünün Aşılması Durumu	45
Şekil 2.42 DKK ile İyileştirilmiş Zeminde Yenilme Durumları.....	45
Şekil 2.43 Drenajsız Durum İçin Taşıma Gücü Tahmini	50
Şekil 2.44 Drenajlı Durum İçin Taşıma Gücü Tahmini	51
Şekil 2.45 Granüler Tabaka Altında DKK Davranışı.....	51
Şekil 2.46 DKK'larda Oturma Analizi	52
Şekil 2.47 Temel Tiplerine Göre Alt ve Üst Bölge Kalınlığı	53
Şekil 2.48 DKK Üst Oturma Analizi.....	54
Şekil 2.49 Elastik Oturma Hesabı	55
Şekil 2.50 Taş Kolon Yükleme Düzenegi	59
Şekil 3.1 DKK' larda Şaft Uzunluğu Bulunuşu	65
Şekil 4.1 Zemin Tabakaları ve SPT-N Sayıları.....	67
Şekil 4.2 Plaxis 2D Programında Zemin Tabakalarının Modellenmesi	68
Şekil 4.3 Yayılı Temelin Modellenmesi	69
Şekil 4.4 DKK'sız Ortamda Yayılı Temeldeki Toplam Oturma	71
Şekil 4.5 Kompozit Zemin Ortamı	72
Şekil 4.6 Kompozit Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma	74
Şekil 4.7 DKK' lı Modelleme	74
Şekil 4.8 DKK' lı Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma	75
Şekil 4.9 Oturmaların Karşılaştırılması	76
Şekil A.1 Yüzeysel Temel Örneği.....	83
Şekil A.2 Şaft Uzunluğu Kontrolü	86
Şekil A.3 Granüler Tabaka Altında DKK Tasarımı	87

SEMBOL LİSTESİ

A	: Birim hücre etki alanı
A_c	: Taş kolon kesit alanı
A_g	: Tekil DKK taban alanı
A_m	: Zemin alanı
A_{net}	: Zeminin net alanı
a_r	: Taş kolonlarda alan oranı
A_s	: Tekil DKK zemin içinde kalan yanıl alanı
A_T	: Temelin alanı
B	: Temel genişliği
c	: Zeminin kohezyonu
c_1	: Taş Kolonun kohezyonu
c'	: Efektif kohezyon
c_{comp}	: Kompozit malzemenin kohezyonu
c_c	: Sıkışma indisi
c_u	: Drenajsız kayma direnci
d	: DKK yarıçapı
D	: DKK kolon çapı
D_0	: Temel çapı
D_e	: Eşdeğer dairenin efektif çapı
D_f	: Temel gömme derinliği
D_r	: Bağıl birim hacim ağırlık
d_s	: DKK yapıldıktan sonra oluşın çap
d_{taban}	: Artın kırmataş konisinin taban çapı

D_{50}	: Ortalama ap
E	: Elastisite modülü
E_{comp}	: Kompozit bölgenin elastisite modülü
E_m	: İyileştirilmiş zeminin elastisite modülü
E_g	: Taş kolonun elastisite modülü
E_s	: Zeminin elastisite modülü
E_u	: Drenajsız elastisite modülü
E_{50}	: Kiriş modülü
E_{oed}	: Ödometre modülü
E_{ur}	: Yükleme boşalma modülü
e_0	: Zeminin ilk boşluk oranı
Fc' ve Fq'	: Boşluk genişleme faktörleri
f_s	: Kolon gövdesi boyunca ortalama birim çeper sürtünme direnci
G	: Kayma modülü
H	: Tabaka kalınlığı
h	: Derinlik
H_{LZ}	: DKK alt bölge tabaka kalınlığı
H_{UZ}	: DKK st bölge tabaka kalınlığı
H_s	: DKK şaft uzunluğu
h_y	: Göçme derinliği
I	: Westergaard gerilme artış faktörü
I_r	: Rijitlik endeksi
k	: Geirirnililik katsayısı
k_g	: DKK rijitlik modülü
k_m	: Zeminin rijitlik modülü

K_0	: Sükunet durumundaki yatay toprak basıncı katsayısı
K_{pcol}	: Taş kolonun pasif toprak basıncı katsayısı
K_p	: Zeminin pasif toprak basıncı katsayısı
L	: Temel boyu ve taş kolon boyu
N	: Taş kolon adeti
N_c	: Taşıma gücü katsayısı
N_q	: Taşıma gücü katsayısı
N_γ	: Taşıma gücü katsayısı
n	: Oturma iyileştirme faktörü
n_s	: Gerilme yoğunlaşma oranı
r	: Taş kolon yarıçapı
R_a	: DKK alan oranı
R_s	: DKK rijitlik oranı
S_t	: Taş kolonla iyileştirilme yapıldıktan sonraki oturma
S_c	: Taş kolonla iyileştirilme yapılmadan önceki oturma
S	: Konsolidasyon oturması
S_1	: Priebe metodu iyileştirme sonrası toplam oturma
S_∞	: Priebe metodu iyileştirme yapılmadan önceki toplam oturma
S_T	: DKK' larda toplam oturma
S_{UZ}	: DKK' larda üst bölge oturması
S_{LZ}	: DKK' larda alt bölge oturması
s	: Kolon aralığı
t	: Dolgu kalınlığı
μ_c	: Taş kolon gerilme yoğunlaşma faktörü
μ_s	: Zeminin gerilme yoğunlaşma faktörü
q	: Dış yayılı yük

q_{bottom}	: DKK ile iyileştirilmiş tabakanın alt ucundaki sınır gerilme
q_a	: Emniyetli taşıma gücü
Q_a	: Taş kolonun emniyetli taşıma yükü
Q_{a1}	: Taş kolonun radyal genişlemesinden dolayı oluşan emniyetli taşıma yükü
Q_{a2}	: Sürşarj yüklemesinden dolayı oluşan yanıl gerilme artışının neden olduğu emniyetli taşıma yükü
Q_{a3}	: Zeminin emniyetli taşıma yükü
Q_d	: Tekil DKK sınır yükü
q_d	: Tekil DKK' daki sınır taşıma gücü
Q_g	: DKK kolon uç direnci
Q_g'	: Şaft direnci
q_g	: Tekil DKK' ya gelen gerilme
q_m	: Zemine gelen gerilme
Q_{cell}	: Tekil Geopier [®] DKK' nın taşıma yükü
Q_{max}	: Üst yapıdan temele gelen maksimum düşey yük
Q_s	: DKK çevre sürtünme direnci
$V_{\text{artan kırmataş}}$: Artan kırmataş hacmi
z_c	: Kritik derinlik
σ	: Toplam gerilme
σ_3	: Yanıl çevre gerilmesi
σ_c	: Taş kolona gelen gerilme
σ_h	: Yatay gerilme
σ_{h0}	: Sukünet durumundaki yatay gerilme
σ_0'	: Düşey efektif gerilme
σ_{ort}	: Şişme yenilmesi bölgesindeki ortalama gerilme

σ_{r0}	: Toplam radyal gerilme
σ_{rL}	: Limit radyal gerilme
σ_s	: Zemine gelen gerilme
σ_v	: Düşey gerilme
$\Delta\sigma$: Gerilme artışı
δ_p	: Taş kolonda kayma yüzeyi açısı
δ	: Taş kolonla iyileştirilmiş zeminde kayma yüzeyi açısı
ρ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
ρ_{sat}	: Zeminin doymun birim hacim ağırlığı
ϕ'	: Efektif kayma direnci açısı
ϕ_{comp}	: Kompozit malzemenin kayma direnci açısı
ϕ_c	: Taş kolonun kayma direnci açısı
ϕ_s	: Zeminin kayma direnci açısı
β	: Göçme yüzeyi kırılma açısı
ν	: Zeminin poisson oranı
ν'	: Efektif durumdaki zeminin poisson oranı
ν_u	: Drenajsız durumda zeminin poisson oranı
ν'_{ur}	: Yükleme boşalma durumunda zeminin poisson oranı
ψ	: Zeminin kabarma açısı
τ	: Kayma direnci

Enstitü	:	Fen Bilimleri
Dalı	:	İnşaat Mühendisliği
Programı	:	Geoteknik
Tez Danışmanı	:	Yrd.Doç.Dr.Ersin AREL
Tez Türü ve Tarihi	:	Yüksek Lisans - Nisan 2016

ÖZET

ZEMİNİN KIRMATAŞ KOLONLARI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Hüseyin MUNGAN

İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın amacı; aşırı oturmaların görüldüğü zemin ortamlarında darbeli kırmataş kolonların göstereceği performansların incelenmesidir. Zeminde rijitliği artırmak için yapılan darbeli kırmataş kolonlar, toplam ve farklı oturmaları azaltmaktadır.

Bu çalışmada, Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak, DKK' lar modellenerek, DKK'lı ve DKK'sız ortamda oturma miktarları karşılaştırılarak sonuçlar incelenmiştir. İlk aşamada, 17 m genişliğindeki yayılı temelin yumuşak zemin ortamında 52,55 cm oturma yaptığı görülmüştür. İkinci aşamada, darbeli kırmataş kolonların etkilediği zemin ortamında kompozit zemin modeli esas alınarak, DKK ve zemin parametrelerini kapsayan ortak kompozit bölge tanımlanarak, yayılı temelde 16,87 cm oturma oluştuğu görülmüştür. Üçüncü aşamada, yayılı temel altına 1,7 m aralıklarla kare yerleşim planına göre DKK' lar tanımlanarak, yayılı temelde 26,04 cm oturma oluştuğu görülmüştür.

Darbeli kırmataş kolonların, aşırı oturmaların görüldüğü yumuşak zemin ortamlarında, oturmaları önemli derecede azalttığı analizlerde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Darbeli Kırmataş Kolonlar, Sonlu Elemanlar, Oturma

University : Istanbul Kültür University
Institute : Institute of Sciences
Department : Civil Engineering
Programme : Geotechnical Engineering
Supervisor : Assist.Prof.Dr.Ersin AREL
Degree Awarded and Date : MA – April 2016

ABSTRACT

GROUND IMPROVEMENT WITH AGGREGATE PIERS

Hüseyin MUNGAN

The essential aim of this thesis that has been prepared in Geotechnical Engineering program of Civil Engineering Department at Istanbul Kültür University, is to analyze the performance of the Rammed Aggregate Piers in the situations that it performs the inserted in soft soils.

Rammed Aggregate Piers increase the stiffness of soil, decreasing both total and differential settlements, while increasing the bearing capacity.

The study has been performed with the principal aim of comparing the settlements of the untreated soil to that of the soil having been treated by Rammed Aggregate Piers . The software Plaxis 2D which uses the Finite Element method has been employed to analyse the problem. In my study, every work has been done to compare two conditions with each other. These conditions are done both with Rammed Aggregate Piers and without Rammed Agregate Piers. To do this, amount of settlements of Rammed Aggregate Piers is considered and Plaxis FEM program is implemented. A comprehensive literature survey to understand the mechanics of the process was implemented prior to the calculation stage.

In the first step a footing of 17 m length was placed on the untreated soil and was found to settle 52,55 cm. The second approach was attempted by assuming the soil-column system as a composite material. This produced a settlement of 16,87 cm. Rammed Aggregate Piers were inserted in the third step in a square pattern with a spacing of 1,7 m, which reduced the settlement to 26,04 cm.

As a result of the study, it was confirmed that the use of Rammed Aggregate Piers significantly decreases settlement in soft soils.

Key Words: Rammed Aggregate Piers, FEM, Settlement.

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan taş kolonlar ve bunların özel bir tipi olan darbeli kırmataş kolonlara (DKK) ait genel özellikler, yapım yöntemleri, olumlu ve olumsuz yönleri belirtilerek, bunların analiz ve tasarımının sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmasıdır. DKK'sız ortamda, kompozit zemin ortamında ve DKK' lı durumda temelde oluşacak oturmaların 3 farklı model üzerinde değerlendirmesi yapılmıştır.

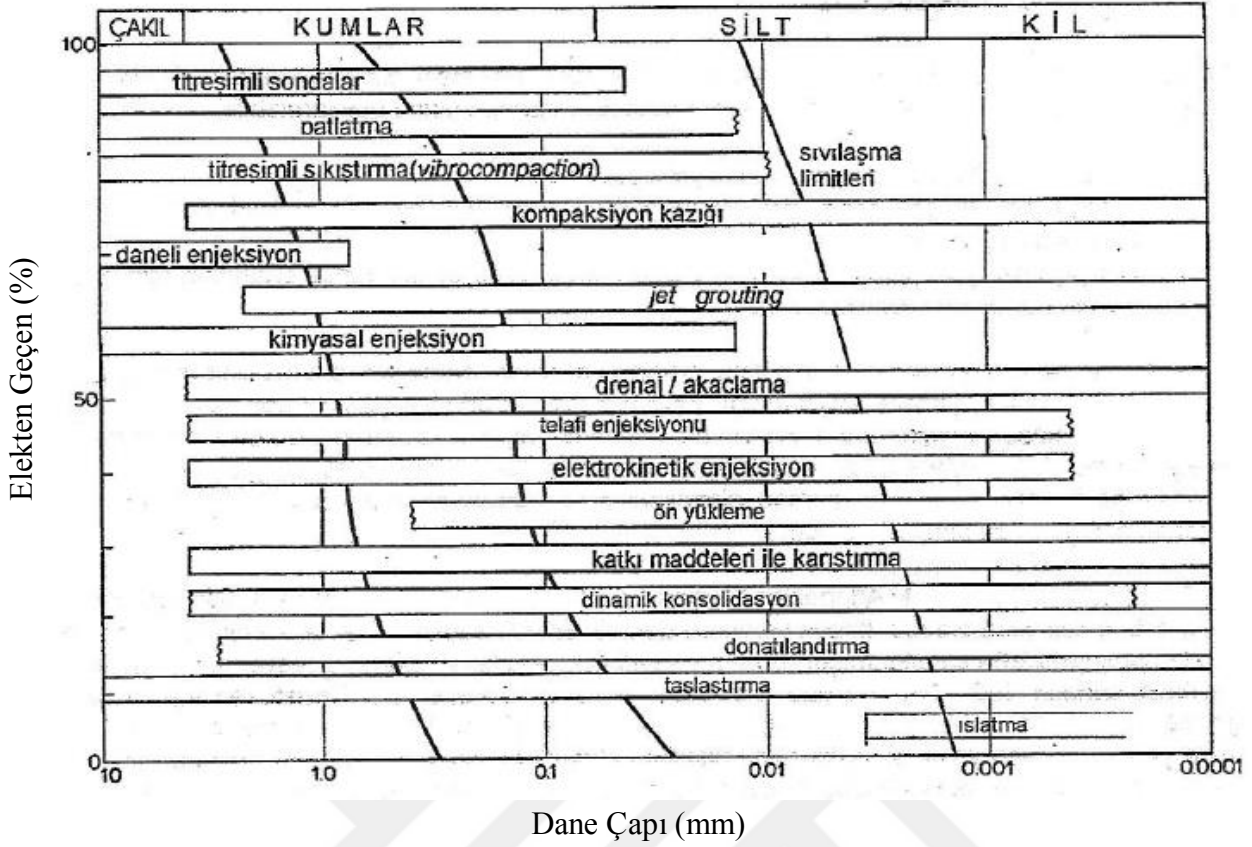
2. ZEMİNİN RİJİT KOLONLARLA İYİLEŞTİRİLMESİ

Zemin ortamında projelendirme yapılırken, ortamda yetersiz temel taşıma gücü ve aşırı oturmalar görülebilmektedir. Bu durumlarda, mevcut zeminin veya inşaat alanının değiştirilmesi, derin temellerle projelendirme ve zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri, zemin parametrelerinin iyileştirilmesi, güvenli taşıma gücünün aşılmaması ve kabul edilebilir oturmalarla, zemin koşullarının projede öngörülen hale getirilmesi amacıyla yapılan işlemlere ve yöntemlere denir. Zemin iyileştirme yöntemleri derin temellere göre daha ekonomik olduğu için tercih edilmektedir. Bu işlemlerde kullanılacak yöntemler zeminin cinsine ve dane çapı dağılımına göre değişmektedir. Şekil 2.1' de dane çapı dağılımı ve zemin tipine göre (kil, silt, kum ve çakıl) zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği gösterilmektedir.

Ülkemizde son yıllarda sık kullanılmaya başlayan zemin iyileştirme yöntemlerinden rijit kolonlar, elverişsiz zemin ortamlarının rijitliğini artırarak aşırı oturmaları, sıvılaşmayı önlemek ve heyelan risklerini azaltmak amacıyla zeminlere uygulanan yöntemler arasındadır.

Zeminin rijitliğini artırmak için zeminde yapılan kolonlar şu şekilde belirtilebilir:

- Jet Grout (JG)
- Derin Karıştırma Kolonları (DSM)
- Kum Kazıkları
- Kireç Kazıkları
- Taş Kolonlar (TK)
- Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK)



Şekil 2.1 Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Zemin Tipleri ve Dane Çaplarına Göre Ayrılması (Mitchell ve Katti, 1981)

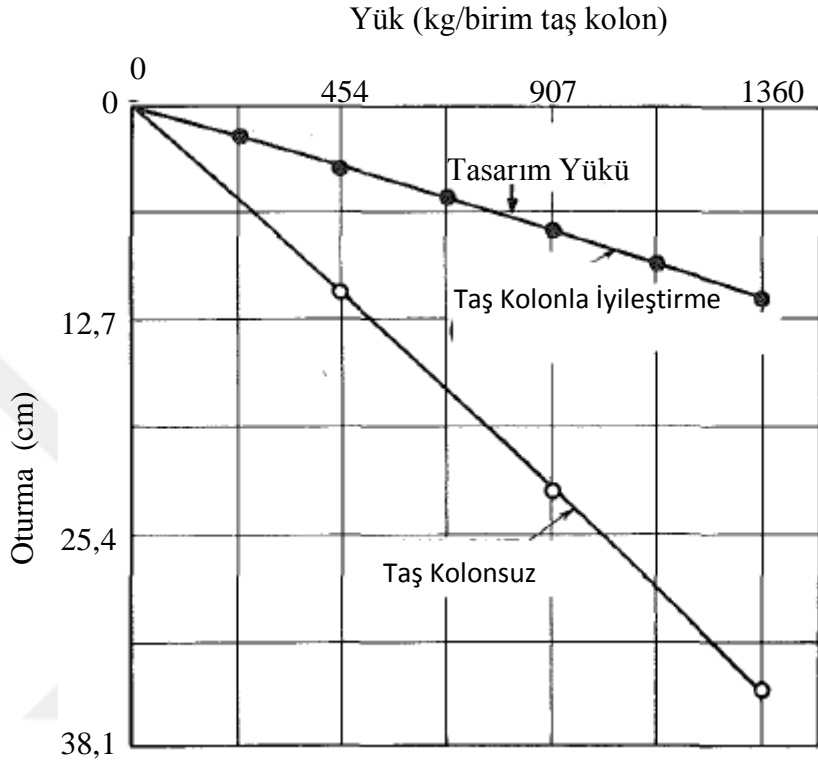
2.1. Zeminin Taş Kolonlar ve Darbeli Kırmataş Kolonlarla İyileştirilmesi

2.1.1. Önceki Çalışmalar

İngiltere Canvey adasında, ıslak titreşimli itirme yöntemine göre uygulanan, kayma direnci açısı 38° olan ve boyutları 20-40 mm arasında değişen nehirden alınmış kırmataşlarla yapılan taş kolonların arazide yükleme deneyi yapılarak davranışları incelenmiştir (Hughes vd., 1975). İnceleme sonucunda, 10 m uzunluğunda taş kolonda yükleme deneyi sonucunda kritik derinlikte (2,25 m) sınır yanal gerilmenin aşılmasından ötürü şişme ile yanal göçme gözlemlenmiştir. Sınır yanal gerilmeyi teorik hesaplamalarla ve arazide Menard Presiyometre deneyiyle hesaplayarak, sınır yanal gerilmeyi belirlemede güvenilir olduğu belirtilmiştir. Kolon çapının taş kolonun taşıma kapasitesinde ve oturma miktarında etkili olduğu saptanmıştır.

Santa Barbara Atıksu Arıtma Tesisi için zemine titreşimli kompaksiyon yöntemiyle, boyutları 12-100 mm arasında değişen kırmataşlar kullanılarak, 9-15 m boylarında, 0,50-0,75 m çapında yapılacak bina oturma yerlerine göre üçgen ve kare yerleşim planına uyacak şekilde taş kolonlar yapılmıştır (Mitchell vd., 1985). Taş kolonlu ve taş kolonsuz temelde yükleme

deneyi sonucu oturma miktarları karşılaştırılarak, taş kolonlu zeminde oturmaların %30-40 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.2). Arazide yerinde ölçülen temeldeki oturmalar 25-60 mm arasında iken sonlu elemanlarla analiz yapılarak bulunan oturmalar ise 64 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.2 Yük-Oturma Eğrisi (Mitchell vd., 1985)

ABD’de çeşitli projelerde kısa taş kolonların oturmalar üzerine etkisi incelendiğinde, iyileştirilmemiş zemin ve temel altına yerleştirilen kısa taş kolonlarla iyileştirilmiş zemindeki oturmalar karşılaştırılmasıyla, Tablo 2.1.’den görüldüğü gibi kısa taş kolonların oturmaları azalttığı belirtilmiştir (Lawton ve Fox, 1994).

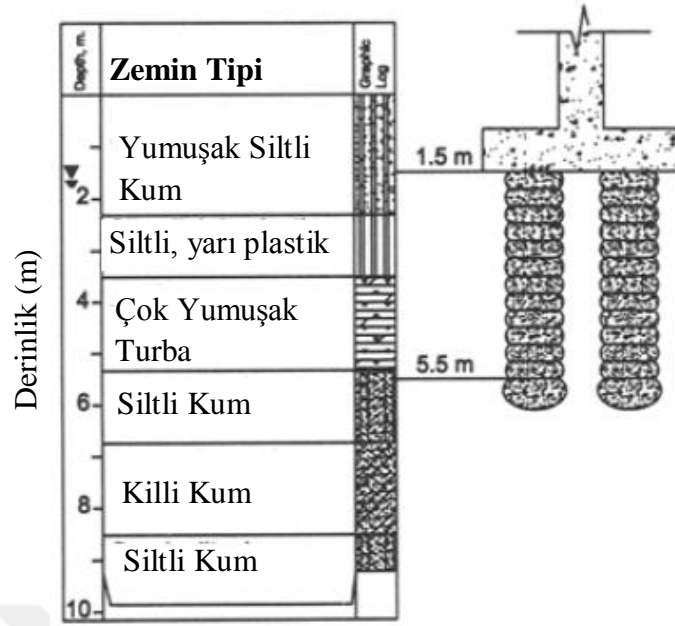
Tablo 2.1. Taş Kolonlu Zeminde Oturma (Lawton ve Fox, 1994)

Proje	Temel Tipi	Taşıma Gücü (kPa)	Oturma (mm)	
			Zemin	Taş Kolonlu Zemin
Kütüphane	3,66 m x 3,66 m kare temel	266	33-102	18
Silo Tankı	4,57 m x 4,57 m kare temel	144	48-104	13
Konut	0,91 m çapında dairesel temel	244	58-79	5
Endüstriyel Yapı	1,52 m x 1,52 m kare temel	193	150-230	23
Ofis	1,07 m x 2,13 m dikdörtgen temel	352	41-112	13
Hastane	12,2 m çapında dairesel temel	317	61-109	10
Hastane	2,74 m çapında dairesel temel	242	30-104	13
Kule	15,2 m x 30,5 m dikdörtgen temel	144	20-89	10
Kule	3,66 m çapında kare temel	332	61-66	10
Otopark	4,27 m çapında kare temel	318	124-188	38

Poorooshab ve Meyerhof, (1997) taş kolonlarda zemin ve taş kolon parametrelerinin değişiminin taş kolonlarda etkilerini incelemişlerdir. Yumuşak kil özellikleri, elastisite modülü 1000 kPa ve poisson oranı 0,2 olan zemine 100 cm çapında ve 10 m uzunluğundaki grup taş kolonlarda, taş kolon aralığı arttıkça oturmaların artacağı, taş kolon kayma direnci açısı arttıkça da oturmaların azalacağını belirtmişlerdir. Taş kolon aralıklarının ve taş kolon kayma direnci açısının taş kolondaki yük, rijitlik ve oturmaları etkilediğini belirtmişlerdir.

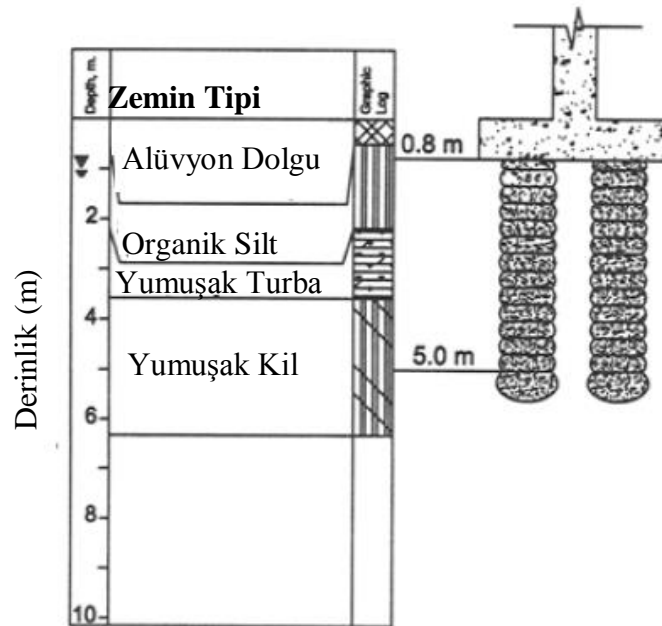
A.B.D.Washington'da bir otopark inşaatı için projede öngörülen 23 m uzunluğunda temelaltı çelik kazıklara alternatif olarak darbeli kırmataş kolon (DKK) yöntemlerinden Impact® yöntemiyle 2,1-2,7 m arasında temel desteklenerek maliyette %50 düşüş elde edilmiştir. DKK' ların 4 cm' den az oturma yaparak ortamın taşıma gücünü 270 kPa' a kadar artırdığı belirtilmiştir (Wissmann vd., 2000).

Fox ve Edil, (2000) üç farklı projede DKK kolonlarının performansını incelemişlerdir. İlk proje 1997 yılında A.B.D. Washington, Summer kasabasında üç katlı ahşap bir yapı için CPT verilerinden zemin profili çıkartılarak 18,3 m' den daha uzun derin temel yapılması planlanmışken projedeki mühendislerin önerisiyle temel altına 76,2 cm çapında ve 5 m uzunluğunda maksimum dane boyutu 50 mm olan DKK yaparak taşıma gücünü 215 kPa ve oturmaların 2,5 mm den daha az olarak projelendirmişlerdir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Summer Washington'da Temel Altına DKK Uygulaması (Fox ve Edil, 2000)

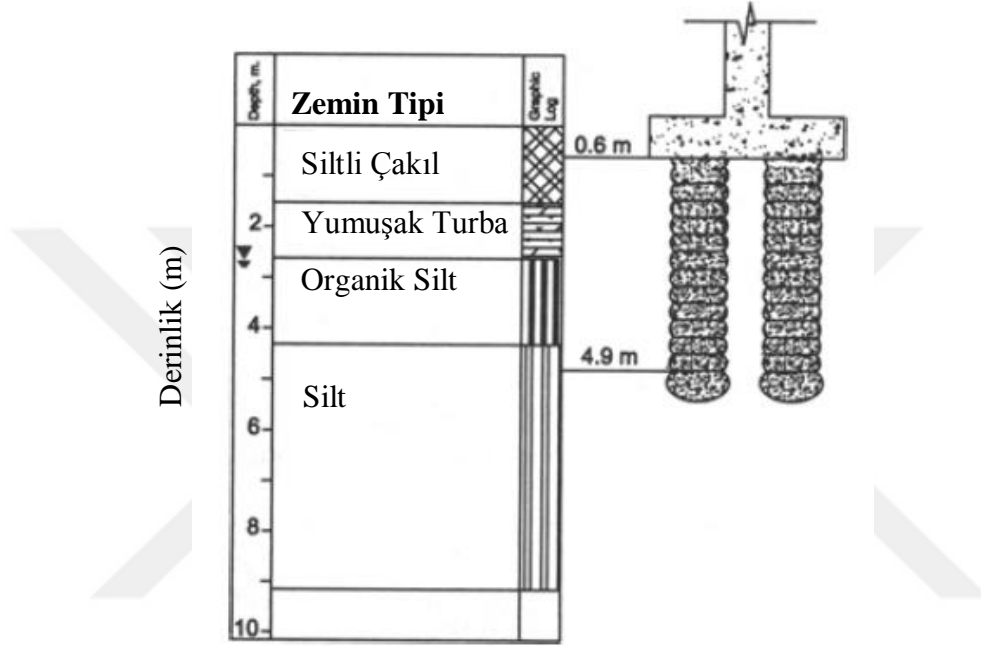
A.B.D. Salem, Oregon'da Şekil 2.4'te zemin profili görülen 11,150 m² alanda kare yerleşim planına göre 2,5 m aralıklarla 4,2 m uzunluğunda DKK yapılarak farklı oturmaların azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.4 Salem Oregon'da Temel Altına DKK Uygulaması (Fox ve Edil, 2000)

A.B.D. Beaverton, Oregon’da Şekil 2.5’ te zemin profili görülen 4 katlı ofis için temeli yumuşak zemine oturan dolgu altına yapılan DKK uygulamasında taşıma gücünün 338 kPa olduğu ve oturmaların 20 mm’ den az olduğunu saptamışlardır.

Bu üç farklı örnekte derin temel uygulaması yerine DKK yapılarak maliyetten %-20-30 oranında tasarruf elde edilmiş ve taşıma güçleri ve oturmalar izin verilen sınırlar içinde olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.5 Baeverton, Oregon’da Temel Altına DKK Uygulaması (Fox ve Edil, 2000)

Düzceer ve Gökalp (2002), Gürcistan Poti Limanına yapılacak tanklarda titreşimli kompaksiyon yöntemine göre, taş kolonlar yapılmadan önce SPT değerlerinin 2-20, yapıldıktan sonra ise 18-30 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Tank çevresinde oturmaların, Priebe, (1995) ve sonlu elemanlara göre hesap yapılarak birbirleriyle uyumluluk gösterdiğini ve taş kolon yapımından sonra oturmaların azaldığını belirtmişlerdir.

White vd., (2002) taş kolonlar ile Geopier® DKK sistemiyle yapılan darbeli kırmataş kolonları karşılaştırmışlardır. Geopier® DKK sistemi diğer taş kolonların yapılış şekline farklı olarak belli dane boyutundaki çakılların vurularak kademeli olarak sıkıştırılmasıyla yapılan taş kolon yöntemidir. İyileştirilmiş zeminde SPT sayılarının Geopier® DKK sisteminde daha yüksek sonuçlar verdiğini, taş kolonlarda daha yüksek oturmaların oluştuğunu, Geopier® DKK ile yapılan sistemde taş kolon rijitliğinin 2-9 katı arasında değiştiğini ve yükleme durumunda Geopier® DKK sistemdeki yanal gerilmenin taş kolonunkinden 2 kat yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Wissmann vd., (2002) Geopier® DKK yöntemiyle yapılan iyileştirme sonrasında zemin ve taş kolonları kompozit olarak değerlendirilerek kayma direnci parametrelerini taş kolon ve zeminin kayma direnci parametrelerini kapsayacak şekilde ele almışlardır. Amerika’da bir demiryolu dolgusunda, iyileştirme yapılmadan önce kısa dönem için göçmeye karşı güvenlik sayısının 1,2 olduğunu, Geopier® DKK sistemiyle yapılan iyileştirme sonrasında göçme için güvenlik sayılarının kısa dönem için 1,2-1,3 aralığına yükseldiğini belirtmişlerdir.

Alonso vd., (2011) taş kolonların oturmalarının zamana bağlı olarak inceleyerek oturmaya etki eden parametrelerin güvenilirlik analiz yöntemini incelemişlerdir. Genel anlamda taş kolonların oturmalarına, zamana bağlı olarak etki eden en önemli parametrenin zeminin radyal konsolidasyon katsayısı olduğunu belirtmişlerdir. Kısa zaman aralığında, oturmaya etki eden faktörün taş kolon çapı olduğunu, zaman aralığı artıkça taş kolon çapının oturmaya etkisinin azaldığını, uzun dönemde ise ise oturmaya etki eden en önemli faktörün zeminin radyal konsolidasyon katsayısı olduğunu belirtmişlerdir.

Kurt, (2011) Lüleburgaz Sarımsaklı mevkiinde yapmış olduğu çalışmada, zemin ortamında gerçekleştirilen SPT ve CPT deney sonuçlarıyla, 50 cm çapında ve 6,50 m boyunda olmak üzere, 4 adet Impact® DKK ve 4 adet taş kolonu araziye uygulamıştır. Uygulama sonucunda 8 adet yükleme deneyi yapılmış ve bunlar Plaxis 2D programıyla da analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yükleme deney sonuçlarına göre öngörülen gerilme, oturma miktarına bölünerek farklı yöntemlerle imal edilen taş kolonların rijitlikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.2.’de görüldüğü gibi titreşimli ittirme yöntemiyle imal edilen taş kolon rijitliğinin, titreşimli sıkıştırma ile yapılan taş kolon rijitliğine oranının 4 olduğunu belirtmiştir. Impact® yöntemiyle imal edilen DKK’ların rijitliğinin, titreşimli ittirme ile imal edilen taş kolonların rijitliğe oranı 2,2-8,8 oranında değişmekte olduğunu belirtmiştir.

Tablo 2.2. Kolonların Rijitliklerinin Karşılaştırılması (Kurt, 2011)

Kolon Tipi	Kolon Çapı (cm)	Kolon Boyu (m)	Yük (ton)	Oturma (mm)	Rijitlik MN/m³
Impact® Yöntemiye Yapılan DKK	50	6,5	8	3-5	88-190
Titreşimli İttirme İle Yapılan Taş Kolon	50	6,5	8	29-32	10-40
Titreşimli Sıkıştırma İle Yapılan Taş Kolon	50	6,5	8	85-92	10

Tablo 2.3.’ te ise taş kolonlar ile Impact® DKK’ lar arasında yapılan 8 adet arazi yükleme deney sonuçlarındaki oturmalar ile Plaxis 2D programında modellenen kolonların yaptıkları

oturmalar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre titreşimli sıkıştırma imal edilen taş kolonlardaki oturmaların, titreşimli itirme ile imal edilen taş kolonların oturmalarına oranı 2 olduğunu, titreşimli sıkıştırma imal edilen taş kolonlardaki oturmaların Impact® yöntemiye imal edilen DKK lar’ daki oturmalara oranının 5 olduğunu belirtmiştir.

Tablo 2.3. Kolonların Oturmalarının Karşılaştırılması (Kurt, 2011)

Kolon Tipi		Kolon Çapı (cm)	Kolon Boyu (m)	Uygulanan Yük (ton)	Arazide Ölçülen Oturma Miktarları (mm)	Plaxis 2D ile Hesaplanan Oturmalar (mm)
Impact® Yöntemiyle Yapılan DKK	1.Deney	50	6,5	18	6,18	11,4
	2.Deney				7,97	
	3.Deney				9,77	
	4.Deney				10	
Titreşimli İttirme Kuru Yöntemiyle Yapılan	1.Deney			10,5	42,8	47,7
	2.Deney					
Titreşimli Sıkıştırma Yöntemiyle Yapılan	1.Deney			8	85	82
	2.Deney				92	

Zhang vd., (2013), taş kolonlarda parametre değişimlerinin oturmalara ne derece etkili olduklarını incelemişlerdir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, ortamda gerilme oranı (taş kolona gelen yük / zemine gelen yük) arttıkça oturmaların arttığını, zeminin kayma direnci açısı, kohezyonu ve taş kolonların elastisite modülü arttıkça oturmaların azaldığını belirtmişlerdir.

Jeludin vd., (2015) Laboratuvar ortamında, titreşimli itirme yöntemine göre yapılan tekil ve grup taş kolonların yük altındaki davranışlarını incelemişlerdir. 40 mm çapındaki tekil taş kolonlar ile 18 mm çapındaki 5 adet grup taş kolonları, 300 mm çapında 400 mm yüksekliğindeki kaolin kil tank içerisine yerleştirilerek, farklı L/D (kolon yüksekliği / kolon çapı), oranına göre yük altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yüzen taş kolonlar, aynı oturma miktarında rijit tabana oturan kolonların daha fazla gerilme aldığını ve aynı alan oranına sahip (Taş kolon taban alanı / birim hücre etki alanı), yüzen grup taş kolonların tekil taş kolonlara göre daha az oturma yaptıklarını belirtmişlerdir.

Çekinmez ve Erol, (2015) laboratuvar ortamında, 41 cm çapında ve 38 cm yüksekliğinde tank içerisinde konsolide olmuş kaolin tipi kil içerisinde eşkenar üçgen dizilimine göre, 3 cm çapında 7 cm mesafeli ve 31 adet taş kolonun davranışlarını farklı basınçlar altında incelemişlerdir. Düşük drenajsız kayma direncine (c_u), sahip killerde oturma azaltım oranı (taş kolon yapıldıktan sonraki oturma / taş kolon yapılmadan önceki oturma), daha efektif sonuçlar verdiğini ve yüksek drenajsız kayma direncine sahip killerde ise oturma azaltım oranı farklı basınçlar altında sabit olarak kaldığını belirtmişlerdir. Taş kolon uzunluğu arttıkça oturmaların daha da azalacağını belirtmişlerdir.

2.1.2. Taş Kolonlar

İlk defa 1930' lu yıllarda Almanya'da ortaya çıkmış olup, Türkiye'de son 10 yıl içerisinde kullanılmaya başlanmıştır. Yumuşak killi, üniform kumlu ve siltli kumlu zeminlerde, zeminleri iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bunların hassaslık derecesi 4' ten büyük olan killi ve siltli zeminlerde kullanılması pek uygun olmamaktadır.

Ülkemizde ilk defa taş kolon uygulaması zemin iyileştirme kapsamında kullanılmış olup, dane boyutu 10-100 mm arasında değişen ince dane oranı %5' ten az olan ve ortamla kimyasal reaksiyona girmeyen doğal kırmataş malzemesi olarak kullanılmıştır (Durgunoğlu vd., 1992).

Taş kolonlar zemin rijitliğini artırmak için yapılan diğer yöntemlere göre daha hızlı ve ekonomik olan zemin iyileştirme yöntemidir. Zemine gelen üst yapı yüklerinin bir kısmını karşılar ve ortamda taşıma gücünü ve kayma direncini artırır. Ayrıca toplam ve farklı oturmaları azaltır. Zeminde geçirimsizliği artırarak dren gibi çalışır ve konsolidasyon süresini kısaltır. Deprem sırasında oluşan fazla boşluksuyu basınçlarını sönmeler ve sıvılaşma riskinide azaltır (Selçuk, 2009).

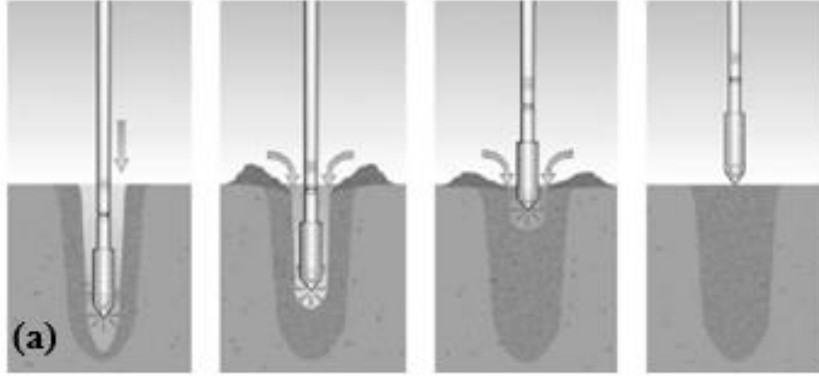
Drenajsız kayma direncinin 25 kPa'dan düşük olduğu yumuşak zeminlerde yüksek yoğunlukta taşların zaman içerisinde düşük yoğunluktaki kil içine dağılması durumu görülmektedir. Bu duruma taş göçü denilmektedir. Taş göçü durumunda, zemin taş kolonları yutabilmekte ve sıvılaşma riskinide artırabilmektedir. Bunu önlemek için taş kolonlar, çimento enjeksiyonu ile takviye edilmelidirler (Önalp ve Sert, 2010).

Farklı tekniklerle yapılan taş kolon yöntemleri, titreşimli kompaksiyon, titreşimli itirme ve titreşimli kum kazık yöntemleri olarak sınıflandırılırlar.

2.1.2.1. Taş Kolon Yapım Yöntemleri

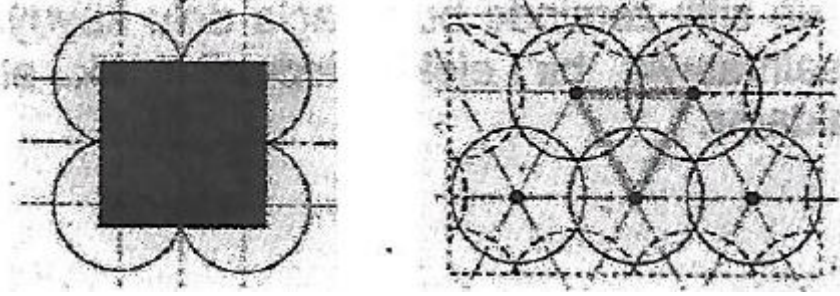
2.1.2.1.1. Titreşimli Kompaksiyon (*Vibro Compaction*)

İlk defa 1930'lu yıllarda Almanya'da ortaya çıkmış olup, 1940 yılında Amerika'da yapının taşıma gücünü artırmak ve oturmaları azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntem ince dane yüzdesinin %15-20'den az olduğu ortamlarda, bağıl birim hacim ağırlığın (D_r), %50'den az olduğu ve Standart Penetrasyon Sayısı'nın (SPT), 20'den düşük olduğu iri daneli zeminlerde kullanılmaktadır. Zemine 0,45 m çaplı basınçlı su veya hava verilerek sonda 1-2 m/dak hızla zemine istenilen derinliğe kadar indirilir. Su basıncı veya hava burada kesilir, vibratör çalıştırılır, daha sonra çakıllar sondanın üst kısmından verilerek, sondanın yukarıya doğru kademeli olarak 0,5 m çekilmesiyle birlikte sıkıştırılarak zemin içinde taş kolon oluşturulur (Şekil 2.6). Zemin ortamında, bağıl birim hacim ağırlığı %55-%90 oranına kadar artırabilmektedir.



Şekil 2.6 Titreşimli Kompaksiyon Yöntemi

Taş kolonlar 100 cm çapa kadar yapılabilmekte olup, taş kolonlar arası merkezden merkeze açıklık 1,5- 3,6 m arasında değişmektedir. Bu yöntemde taş kolonların yerleşimi tekil, sürekli ve yayılı temeller için kare (Şekil 2.7a) veya üçgen şeklinde (Şekil 2.7b) daha uygun olurken, daha geniş açıklıklı temellerde ise altıgen yerleşim de yapılabilmektedir.



(a) Kare Yerleşim Planı (b) Üçgen Yerleşim Planı

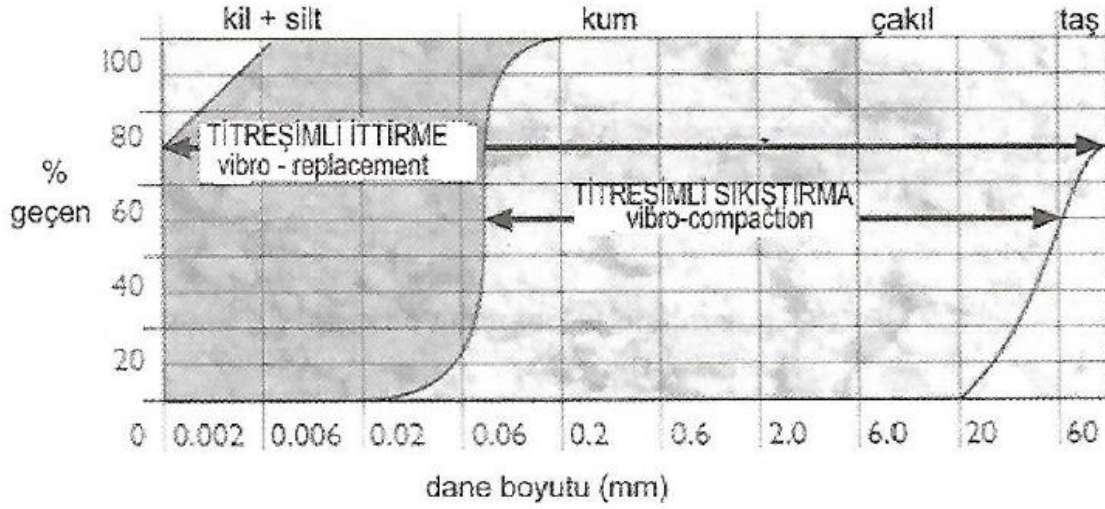
Şekil 2.7 Temel Altında Taşkolon Yerleşim Planı

2.1.2.1.2. Titreşimli İttirme (*Vibro-Replacement*)

Bu yöntemde titreşimli sonda zemine istenilen derinliğe kadar indirilmekte, sıkıştırma işlemi zemine verilecek taş ya da kumların sondanın yan boşluklarına ittirilmesiyle yapılan taş kolon oluşturma yöntemidir. Taş kolon oluşturulduktan sonra üzeri bir dolguyla kapatılabilmektedir. İnce daneli zeminlerde sıkıştırmaya başlanılmadan önce 1 m' lik granüler dolgu yapılması öngörülmektedir. Y.A.S.S. altında yumuşak killerde etkili olmamaktadır. Titreşimli ittirme yöntemi, ıslak yöntem ve kuru yöntem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Şekil 2.8' de titreşimli kompaksiyon ve titreşimli ittirme yöntemlerinin dane çapları aralıklarına göre uygulanabilirliği verilmiştir. Buna göre titreşimli ittirme (*Vibro-*

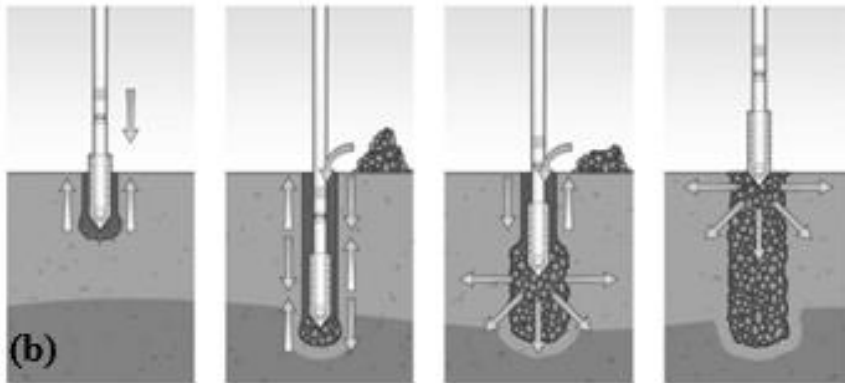
Replacement) killi ve siltli zeminlerde etkili olurken titreşimli kompaksiyon (*Vibro Compaction*) ise daha çok kumlu ve çakıllı zeminlerde etkili olmaktadır.



Şekil 2.8 Titreşimli İttirme ve Titreşimli Sıkıştırma Yöntemleri Zemin Tipine Göre Uygulanabilirliği (Moseley ve Kirsch, 2004)

2.1.2.1.2.1. Titreşimli İttirme Islak Yöntem (Üstten Beslemeli)

Bu yöntemde delik zeminde istenilen derinliğe kadar su jeti probuyla örselenip açılmaktadır. Prob üstünden 12-75 mm boyutlarındaki kırmataşlar 0,3-1,2 m aralıklarla elektrikli vibratörlerle zemin içine itilmektedir (Şekil 2.9). Bu yöntem genellikle geçirimsizliği az olan yumuşak killi zeminlerde, kohezyon değeri 15-20 kPa arasında değişen zeminlerde etkili olmaktadır (Greenwood ve Kirsch, 1983). Bu yöntemin olumsuz yanı işlemde çok su kullanılmasıdır. Bu sebeple yeterli miktarda su bulunmalıdır. Taş kolon yapımıyla beraber su jetine kil ve silt karışabilmektedir. Kil ve siltlerin taş kolonların arasına sızması önlenmelidir.

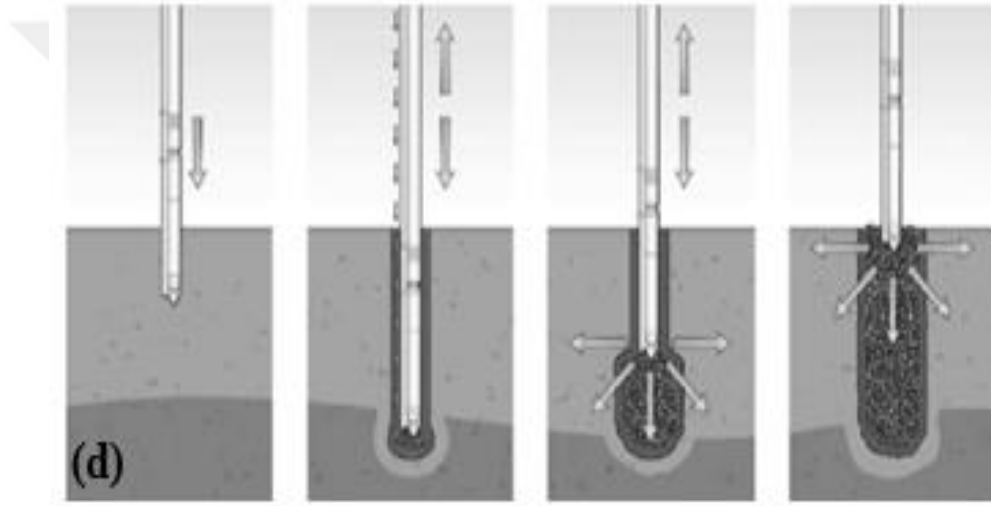


Şekil 2.9 Titreşimli İttirme (Islak Yöntem) Taş Kolon Uygulaması

2.1.2.1.2.2. Titreşimli İttirme Kuru Yöntem (Alttan Beslemeli)

Bu yöntemde prob istenilen derinliğe indirilerek zemini kuru olarak örselenmektedir. Zeminde örselenerek delik açıldıktan sonra probtan kırmataş malzemeleri indirilerek, probun çekilmesiyle birlikte vibratörle malzemeler kademeli olarak yerleştirilmektedir (Şekil 2.10). Bu yöntem drenajsız kayma direnci 30-60 kPa arasında değişen zeminlerde etkili olmaktadır (Greenwood ve Kirsch, 1983). Yöntemde su kullanılmadığı için ıslak yöntemle göre daha temiz ve çevrecidir. Probun zemine yapışmaması için hava jeti verilerek çıkartılabilir.

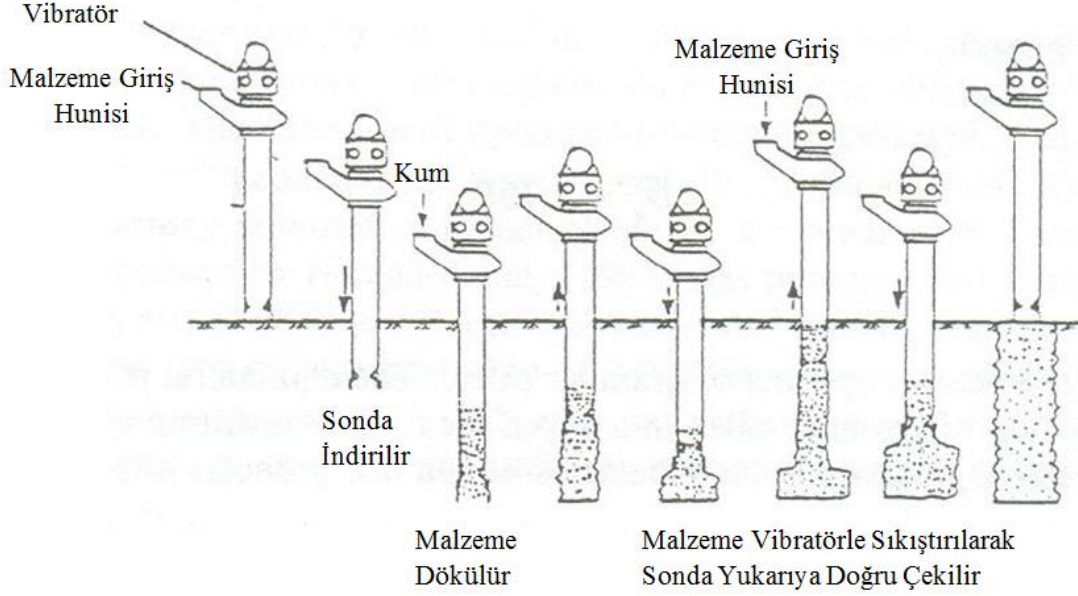
Jeludin vd. (2015), tekil ve grup taş kolonları üstten beslemeli ve alttan beslemeli titreşimli ittirme yöntemine göre yapılan yük altındaki davranışlarını laboratuvar ortamında incelemişlerdir. Alttan beslemeli titreşimli ittirme yöntemiyle yapılan taş kolonların aynı yük altında üstten beslemeli titreşimli ittirme yöntemiyle yapılan taş kolonlardan daha az oturma yaptıklarını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.10 Titreşimli İttirme Kuru Yöntem Taş Kolon Uygulaması

2.1.2.1.3. Titreşimli Kum Kazık Yöntemi (*Vibro Composer*)

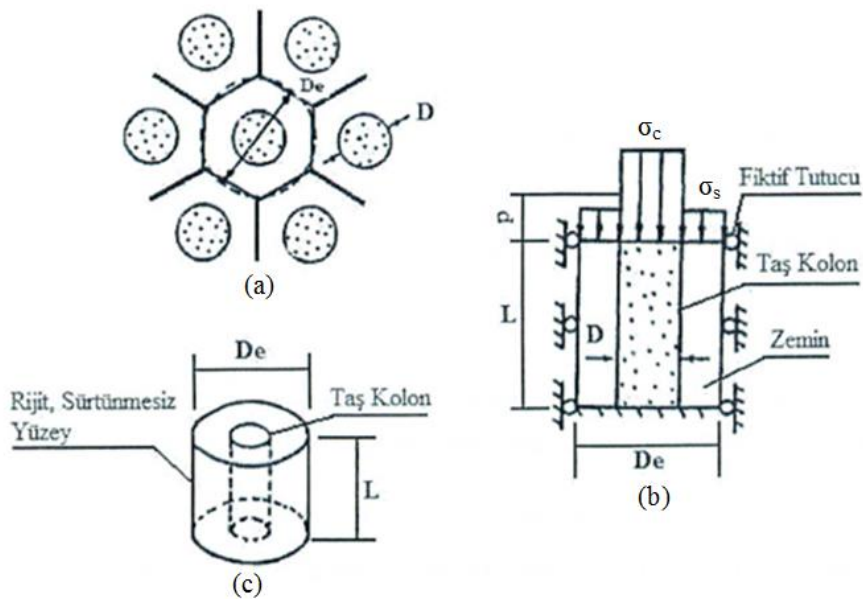
Japonya’da yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yumuşak killi zeminlerin olduğu ve yeraltı su seviyesinin yüksek seviyelerde olduğu yerlerde kullanılan bir yöntemdir. Şekil 2.11’ de görüldüğü gibi, titreşimli olarak zemine istenilen seviyeye indirilen içi boş sondaya kum doldurulduktan sonra sonda ucundaki kapak açılarak, sonda yukarıya doğru çekilirken, titreşimli şekilde kum zemine sıkıştırılarak, kolon oluşturulmaktadır.



Şekil 2.11 Titreşimli Kum Kazık Yöntemi (Aboshi ve Suematsu, 1985)

2.1.2.2. Taş Kolonlarda Birim Hücre Kavramı

Birim hücre kavramı Şekil 2.12’ de görüldüğü gibi zemin ve taş kolonu birlikte kapsayan kolonun etki alanını düzgün altıgen olarak oluşturan, ve bu düzgün altıgenle aynı alana sahip olan D_e eşdeğer çaplı daireyi ele almaktadır. Taş kolon zeminde ve rijit bir tabakaya oturduğu varsayılmaktadır. Birim hücre kavramına göre rijit kolonlarla iyileştirilen zeminde dış toplam yük (σ), uygulanırsa bunun bir kısmını taş kolon (σ_c), bir kısmını da zemin (σ_s), karşılamaktadır.



Şekil 2.12 Birim Hücre Kavramı (Barksdale ve Bachus, 1983)

Burada,

D : Taş kolon çapı,

D_e : Eşdeğer dairenin efektif çapı,

L : Birim hücrenin boyu,

σ_c : Taş kolona gelen gerilme,

σ_s : Zemine gelen gerilme,

dir.

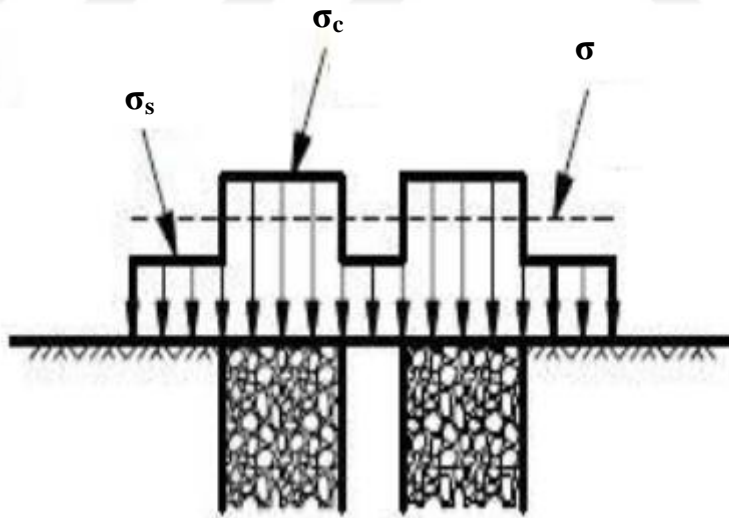
Efektif daire çapı, üçgen ve kare yerleşim planına göre değişmektedir.

$$D_e = 1,05s \text{ (Üçgen yerleşim)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$D_e = 1,13s \text{ (Kare yerleşim)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Burada, s taş kolonların merkezi arasındaki uzaklıktır.

Şekil 2.13' de bu iki gerilme oranına (σ_c/σ_s), gerilme yoğunlaşma oranı (n_s), denir (Formül 2.3). Bu yöntemle taş kolonlar ve zemin eşit miktarda oturma yapmaktadır.



Şekil 2.13 Taş Kolon Zemin Yük Paylaşımı (Bergado vd., 1996)

$$n_s = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \dots\dots\dots (2.3)$$

Yük paylaşımı toplam gerilme cinsinden yazdığımızda Formül 2.4 elde edilir.

$$\sigma = \sigma_c \frac{A_c}{A} + \sigma_s \frac{A_s}{A} = \sigma_c a_r + \sigma_s (1 - a_r) \dots\dots\dots (2.4)$$

Burada,

A_c : Taş kolon kesit alanı,

A_s : Birim hücredeki zeminin alanı,

A : Birim hücre etki alanı,

a_r : Alan oranı olup, taş kolon taban alanının birim hücre etki alanına oranı,

olarak tanımlanmaktadır.

$a_r = 0,907 (D/s)^2$, (Üçgen yerleşim planı için)

$a_r = 0,783 (D/s)^2$, (Kare yerleşim planı için)

Formül 2.3 ve Formül 2.4' ü birleştirdiğimiz zaman, Formül 2.5 ve 2.6 elde edilir.

$$\sigma_c = \frac{n_s \sigma}{\{1 + (n_s - 1) a_r\}} = \mu_c \sigma \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{\{1 + (n_s - 1) a_r\}} = \mu_s \sigma \dots\dots\dots (2.6)$$

Burada,

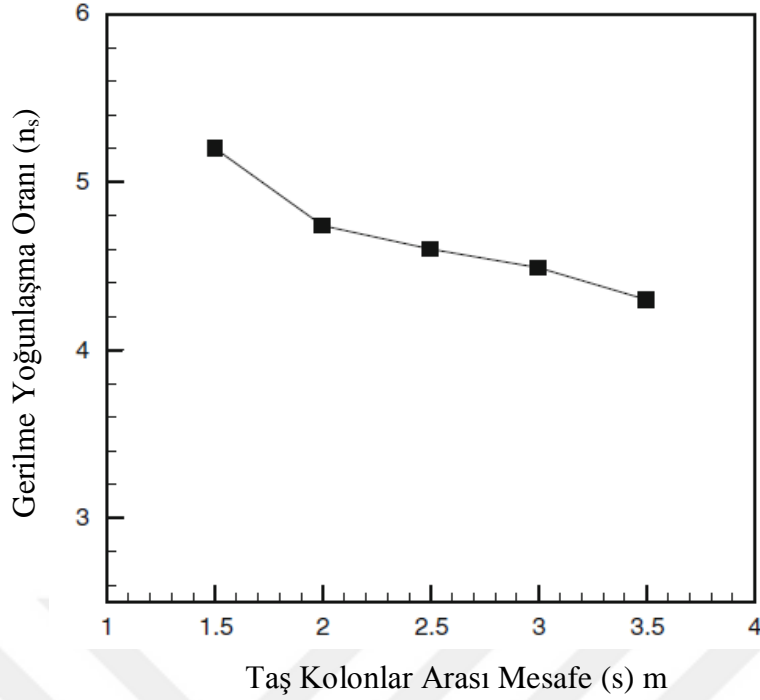
μ_c : Taş kolon gerilme yoğunlaşma faktörü,

μ_s : Zeminin gerilme yoğunlaşma faktörü,

olarak belirtilir.

Munfakh, (1984) taş kolonlar hemen yapıldıktan sonra, gerilme yoğunlaşma oranının 2,5-3,5 arasında olduğunu konsolidasyon süreci tamamlandığında ise 4-5 aralığına yükseldiğini belirtmiştir.

Choobbasti vd., (2011) gerilme yoğunlaşma oranının taş kolonlar arası mesafeye göre değişmekte olduğunu belirtmiştir (Şekil 2.14).



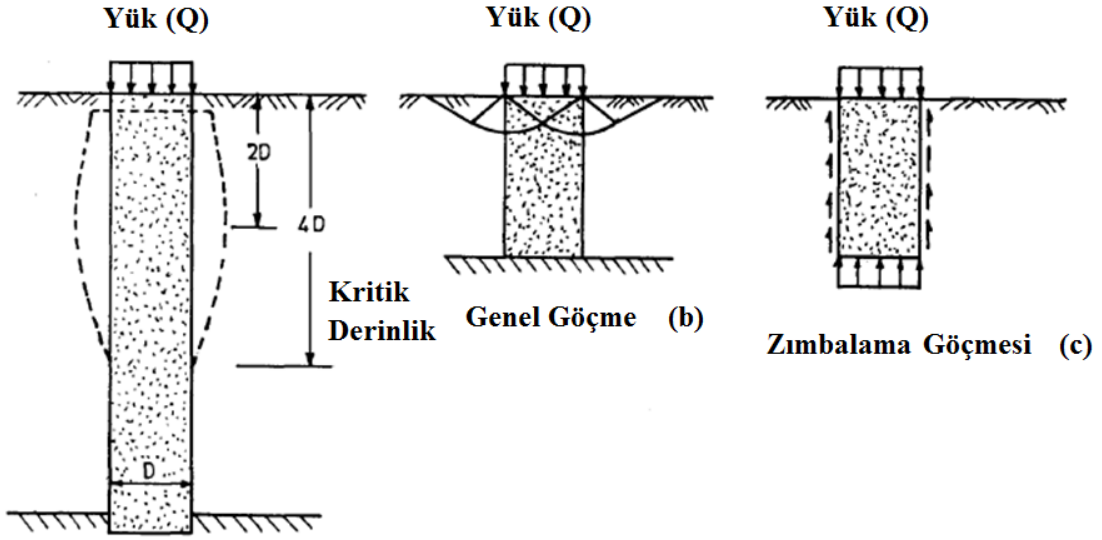
Şekil 2.14 Gerilme Yoğunlaşma Oranı Değişimi (Choobbasti vd., 2011)

2.1.2.3. Taş Kolonlarda Göçme Mekanizması

2.1.2.3.1. Tekil Taş Kolonlarda Göçme Mekanizması

Taş kolonlarda göçme mekanizması incelendiğinde, uzun sağlam tabakaya oturan ya da yüzen ve kritik derinliği geçen taş kolonlarda (kritik derinlik: kolon çapının 4 katından fazla olan derinlik) yenilme durumu şişme göçmesi şeklinde gözlenmektedir (Şekil 2.15a). Madhav, (2007) kritik yanal göçme derinliğini $((L/D)_{cr})$, taş kolon gerecinin kayma direnci açısına bağlı olarak (ϕ_c) , G/c_u oranı cinsinden Şekil 2.16' daki gibi ifade etmiştir. Bae vd., (2002) kritik yanal göçme derinliğinin $1,6D - 2,8D$ aralığında olduğu belirtmişlerdir.

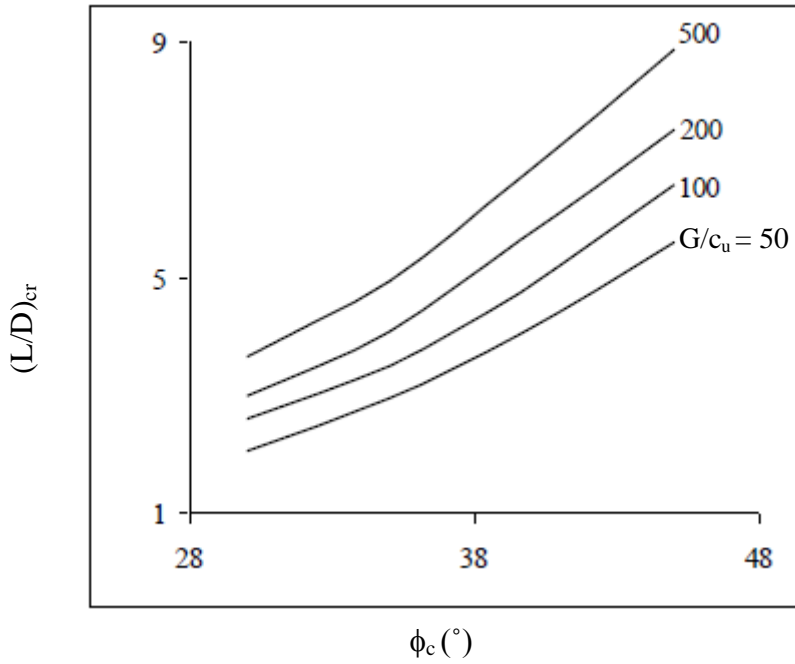
Rijit sağlam tabakaya oturan ve kritik derinlikten kısa olan taş kolonlarda yenilme genel göçme şeklinde oluşur (Şekil 2.15b). Rijit tabakaya oturmayan, kritik derinlik boyundan kısa ve yüzen taş kolonlarda ise zımbalama tipi göçme görülmektedir (Şekil 2.15c).



Şişme Kabarma Göçmesi (a)

Şekil 2.15 Taş Kolonlarda Göçme Türleri (Barksdale ve Bachus, 1983)

Tabakalı zeminde göçme durumu incelendiğinde, Şekil 2.17a 'da görülmek üzere rijit bir tabakaya oturan taş kolonda zayıf tabakanın üst bölgede olması durumunda göçme genel göçme olarak üst zayıf tabakada belirecektir. Şekil 2.17b ve 2.17c 'lerde görülmek üzere rijit bir tabakaya oturan taş kolonda zayıf zemin tabakasının kritik derinliğin altında bir bölgede olmasına bağlı olarak H/D (tabaka kalınlığı/kolon çapı), oranına göre göçme kabarma /şişme şeklinde zayıf tabaka içinde oluşmaktadır. Bu bölgede $H/D \leq 1$ olduğu zaman kabarma miktarı az fakat $H/D \geq 2$ olduğu zaman kabarma miktarı daha belirgin olmaktadır.



Şekil 2.16 Kritik Yanal Şişme Yenilmesi Derinliği Değişimi (Madhav, 2007)

Burada,

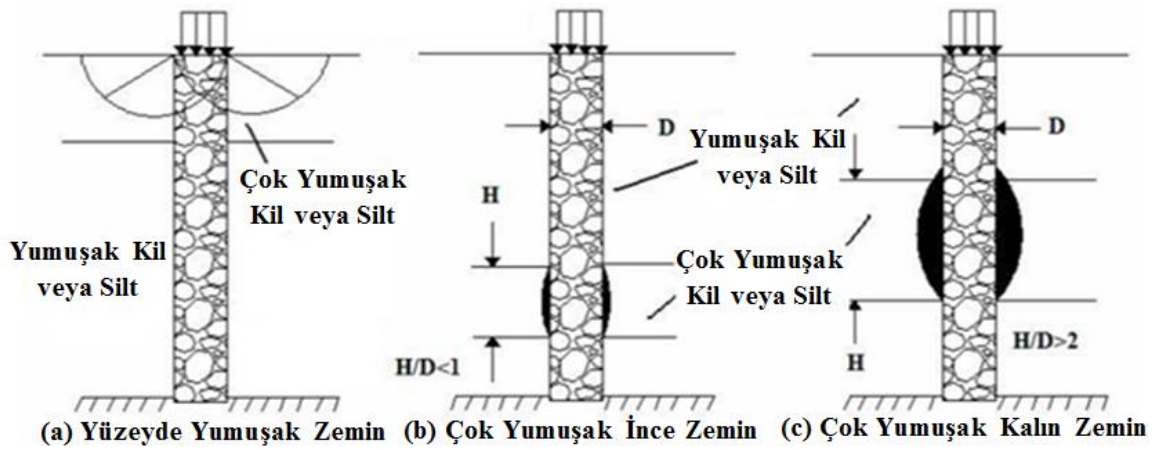
L : Taş kolon boyu,

D : Taş kolon çapı,

ϕ_c : Taş kolon kayma direnci açısı,

G : Zeminin kayma modülü,

dür.



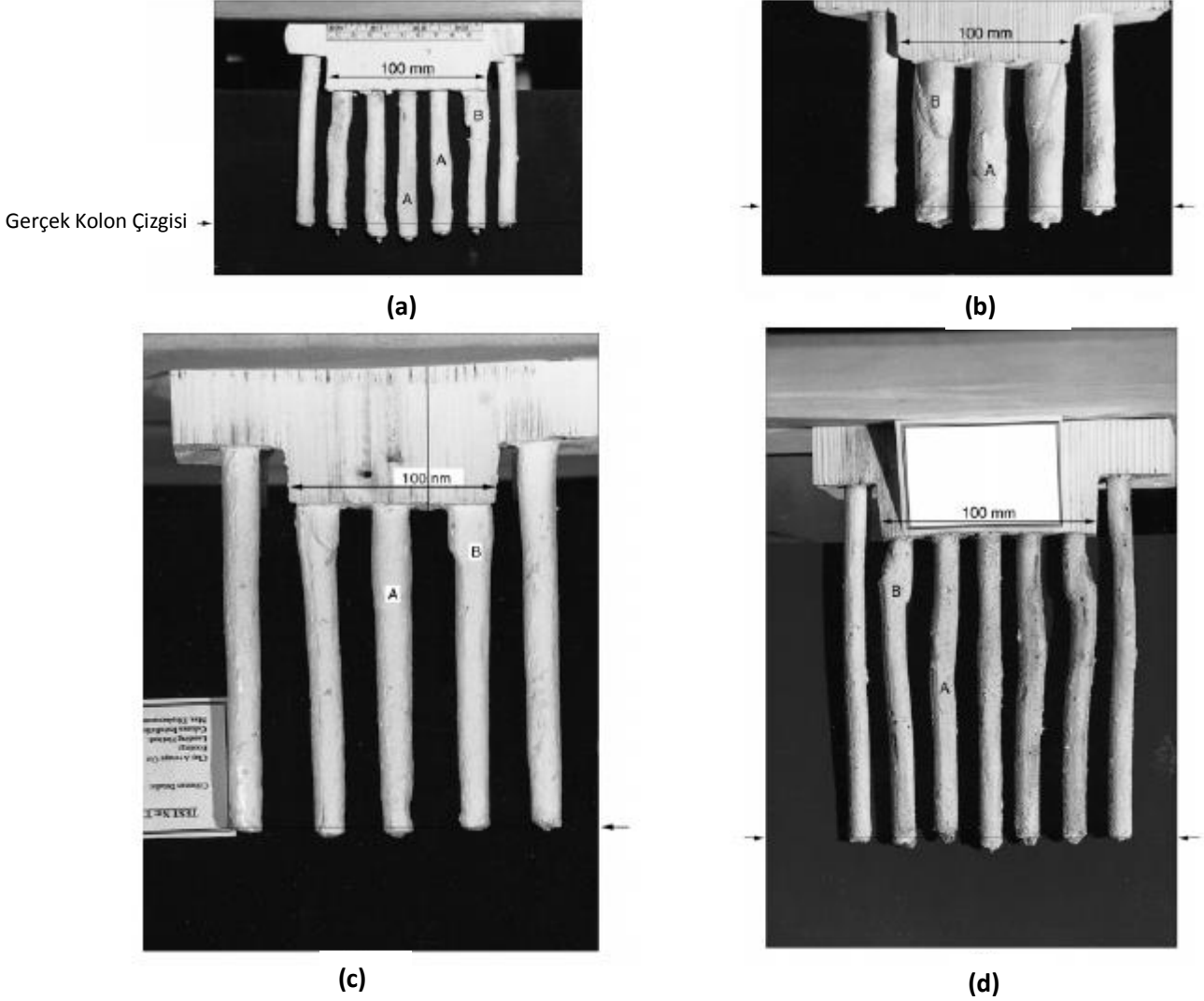
Şekil 2.17 Tabakalı Zeminde Göçme Türleri (Barksdale ve Bachus, 1983)

2.1.2.3.2. Grup Taş Kolonlarda Göçme Türleri

Wood vd. (2000), taş kolonlarda grup göçme türlerini laboratuvar ortamında incelemişlerdir. 760 mm çapındaki tank içine ince dane oranı % 60, kohezyon değeri 23 kPa olan, kaolin konularak kuvars mineralli, ortalama çapı (D_{50}), 0,21 mm, kayma direnci açısı 30° olan kum ve bağıl birim hacim ağırlığı %50 olan çapları 5,5 ve 8,75 mm arasında değişen çeşitli aralıklarla kare yerleşim planına göre grup halinde yüzen kum kolonlar yapmışlardır. 300 mm çapında bir plaka ile 30 mm deformasyon oluşuncaya kadar yüklemeye devam etmişlerdir.

Şekil 2.18' de farklı L/D_0 , a_r ve D değerlerine sahip grup taş kolonlardaki yenilme durumları görülmektedir. Şekil 2.18c ve 2.18d' de uzun A kolonlarında Şekil 2.19a' daki gibi şişme yenilmesi görülmektedir. Şekil 2.18b' de ise B kolonunda düşey yükün yatay yükten fazla olmasından ötürü Şekil 2.19b' deki gibi yenilme durumu kayma yüzeyi oluşarak görülmektedir. Şekil 2.18d' de ise ince ve birbirine daha yakın kazık gruplarında yatay itkilerin artması sonucu Şekil 2.19e' deki gibi kazık grupları yatay yüklenmiş kazık davranışı göstermektedir.

Şekil 2.18a ve 2.18b' de kısa kazıklarda Şekil 2.19c' deki gibi kolonlar farklı oranlarda zemine batma eğilimi gösterirken Şekil 2.18c ve 2.18d' de ise uzun kolonlar Şekil 2.19d'deki gibi farklı oturmaları kontrol eden davranışları göstermiştir.



Şekil 2.18 Grup taş Kolonlarda Yenilme (Wood vd., 2000)

- (a) $L/D_0 = 2$, $a_r = \%24$, $D = 5,5$ mm; (b) $L/D_0 = 2$, $a_r = \%30$, $D = 8,75$ mm ;
(c) $L/D_0 = 3,4$, $a_r = \%24$, $D = 8,75$ mm; (d) $L/D_0 = 3,2$, $a_r = \%24$, $D = 5,5$ mm

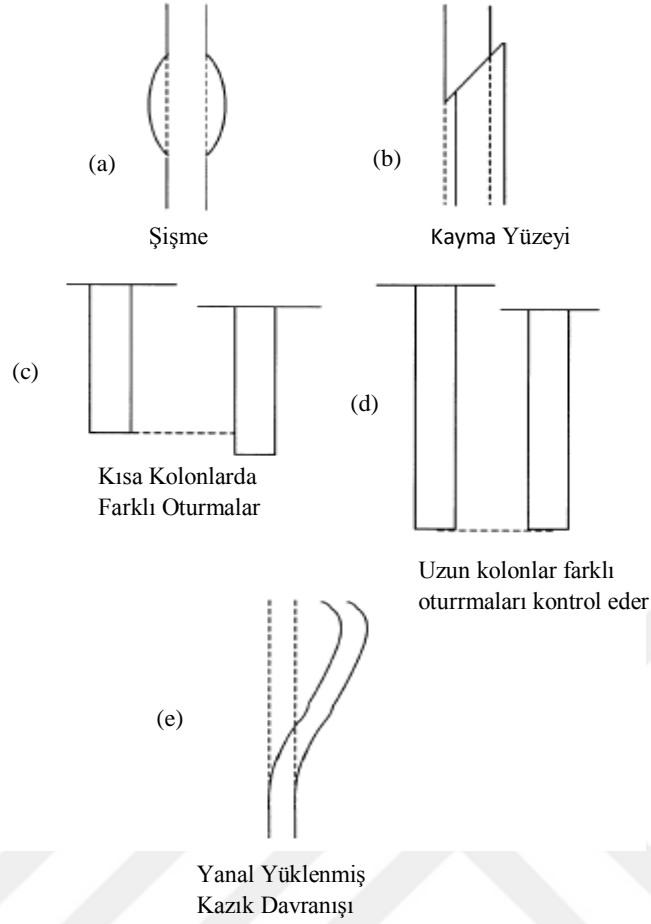
Burada,

L : Taş kolon boyutu,

D_0 : Temelin çapı, ($D_0 = 100$ mm)

D : Taş kolonun çapı,

dır.



Şekil 2.19 Grup Taş Kolonlarda Yenilme Tipleri (Wood vd., 2000)

Hint standartında, (2003) grup halinde yapılacak taş kolonlar arası mesafenin şantiye şartlarına bağlı olarak; üst yapı yükleri, kolon faktörleri ve izin verilebilir oturma durumlarına göre değişmekte olduğu belirtilmiştir. Bu standarta göre, taş kolonlar yapılırken kolon çapının 2-3 katı kadar kolonlararası mesafe bırakılmaktadır.

Tan vd. (2014), grup taş kolonlarda, sonlu elemanlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, grup taş kolonlarda alan oranı artıçça, taş kolonlar arasındaki plastik yenilme bölgesinin alanında azalmalar olacağını belirtmişlerdir. Yüksek alan oranlarında yük transferinin daha iyi olacağı ve buda oturmaların azaldığı optimum taş kolon boylarını artıracığı tespitini yapmışlardır.

2.1.2.4. Taş Kolonlarda Taşıma Gücü

2.1.2.4.1. Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Gücü

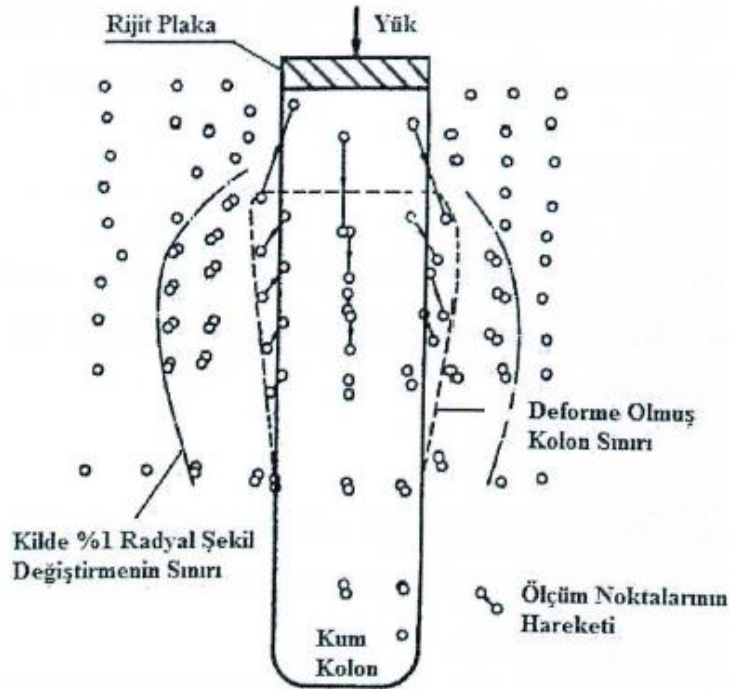
Tekil bir taş kolonun killi bir zeminde emniyetli taşıma gücü (q_a), Formül 2.7' deki gibi bulunmaktadır :

$$q_a = \frac{25 c_u}{GS} \dots\dots\dots (2.7)$$

Burada, GS yaklaşık olarak 3 alınmaktadır (Mitchell, 1982).

Tekil bir taş kolona gelen yükleme sonucunda eğer taş kolon yeteri kadar uzunsa (çapın 4 katı kadar) üst yapı yüklemelerinden ötürü taş kolonda yanal şişme göçme türü görülmektedir (Şekil 2.20). Bundan dolayı yanal çevre gerilmesi (σ_3), pasif direnç olarak çalışarak, kolonun sınır taşıma gücü (q_d), kolonun pasif toprak basıncı katsayısı (K_p), ile Formül 2.8' deki gibi ifade edilir.

$$q_d = \sigma_3 K_p = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin\phi_c}{1 - \sin\phi_c} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$



Şekil 2.20 Tekil Taş Kolonda Şişme Göçmesi (Barksdale ve Bachus, 1983)

Hughes ve Withers, (1974) tekil taş kolonlarda, şişme yenilmesini presiyometre deneyindeki yanal şişmeyle ifade ederek, çevre gerilmesini Formül 2.9' daki gibi bulmuşlardır.

$$\sigma_3 = \sigma_{r0} + c_u \left[1 + \ln \frac{E_s}{2 c_u [1 + \nu]} \right] \dots \dots \dots (2.9)$$

Burada,

σ_{r0} : Toplam radyal gerilme,

E_s : Zeminin elastisite modülü,

ν : Zeminin poisson oranı,

olarak tanımlanır.

Tekil taş kolonun sınır taşıma gücü Formül 2.10' daki gibi bulunur.

$$q_d = \sigma_3 K_p = \left(\sigma_{r0} + c_u \left[1 + \ln \frac{E_s}{2 c_u [1 + \nu]} \right] \right) \left(\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right) \dots \dots \dots (2.10)$$

Vesic, (1972) sınır çevre gerilmesini, sürtülmeli kohezyonlu içi boş silindirik genel gerilme teorisine göre ifade etmiştir. İçi boş olan silindirin sonsuz uzun olduğu varsayarak, zemininde elastik yada plastik olduğunu varsaymaktadır. Sınır yanal gerilme, Formül 2.11' deki gibi bulunmaktadır.

Carvajal vd., (2013) titreşimli kompaksiyonla yapılan taş kolonlarda içi boş silindirik genel gerilme teorisine göre siltli kumlu ve killi zeminlerde arazi yükleme deney sonucuna göre, teorik hesaplamalarla ve sonlu elemanlar yöntemine göre analiz ederek aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşumunu incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre taş kolonlar yapıldıktan sonra, taş kolon yatay eksen uzaklığına bağlı olarak arazide piyazometrelerle ölçüm sonucunda aşırı boşluksuyu basınçlarının oluştuğunu ve yatay gerilmelerin arttığını belirtmişlerdir. Taş kolonlar yapıldıktan 5 saat sonra arazide piyazometre ölçümlerine göre aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlendiğini ve ortamın rijitliğinin arttığını belirtmişlerdir. Aşırı boşluk suyu basınçlarını arazide ölçerek, teorik hesaplamalar sonucu ve sonlu elemanlar yöntemine görede analiz edilerek sonuçların birbirine uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

$$\sigma_3 = c_u Fc' + \sigma_{ort} Fq' \dots \dots \dots (2.11)$$

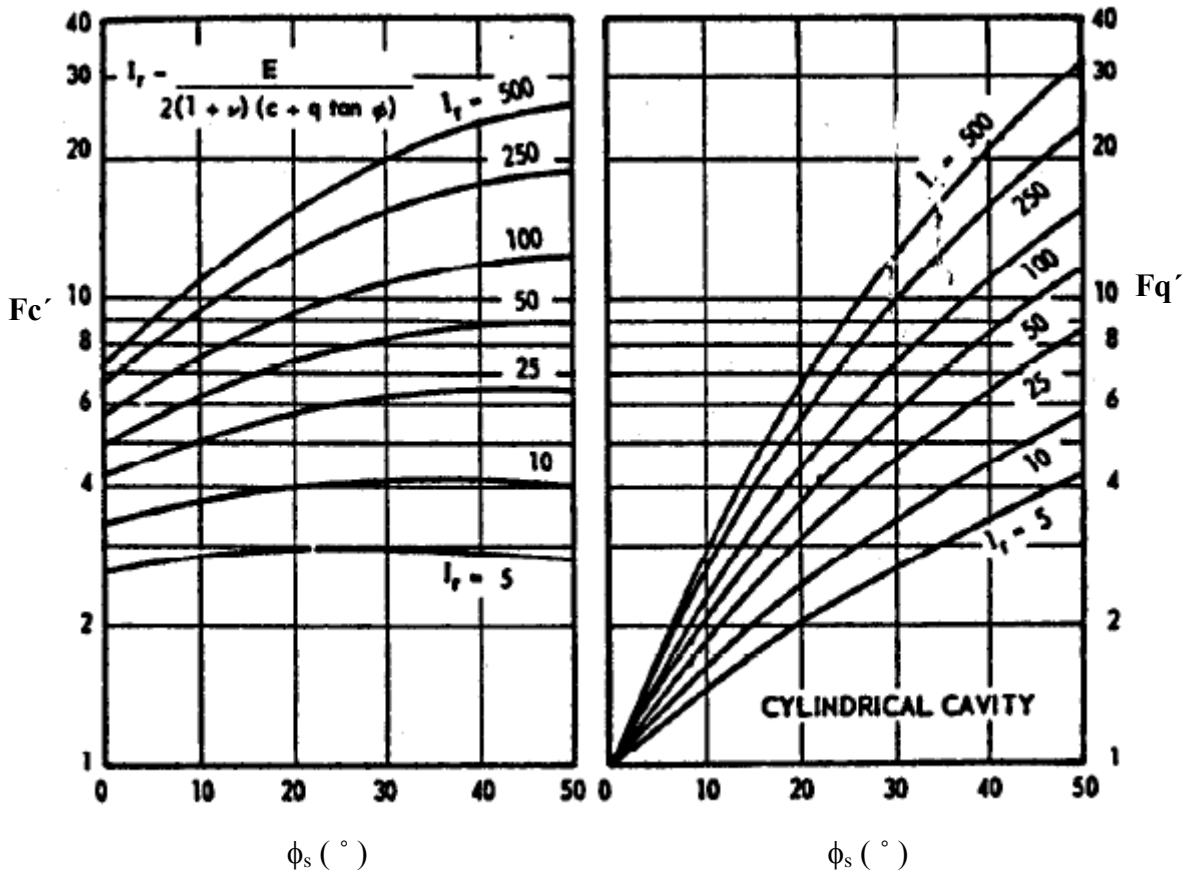
Burada,

σ_{ort} : Şişme yenilmesi bölgesindeki ortalama gerilme,

F_c' ve F_q' : Boşluk genişleme faktörleri,

dir.

Boşluk genişleme faktörleri Şekil 2.21' daki zeminin kayma direnci açısına (ϕ_s), bağlı olarak bulunur.



Şekil 2.21 Boşluk Genişleme Faktörleri (Vesic, 1972)

Burada,

Rijitlik endeksi (I_r), Formül 2.12' deki gibi bulunmaktadır.

$$I_r = \frac{E_s}{2(1+\nu)(c + \sigma_{ort} \tan \phi_s)} \dots \dots \dots (2.12)$$

Burada,

E_s : Kolon çevresindeki zeminin elastisite modülü,

c : Kolon etrafındaki zeminin kohezyonu,

σ_{ort} : Şişme yenilmesi bölgesindeki ortalama gerilme,

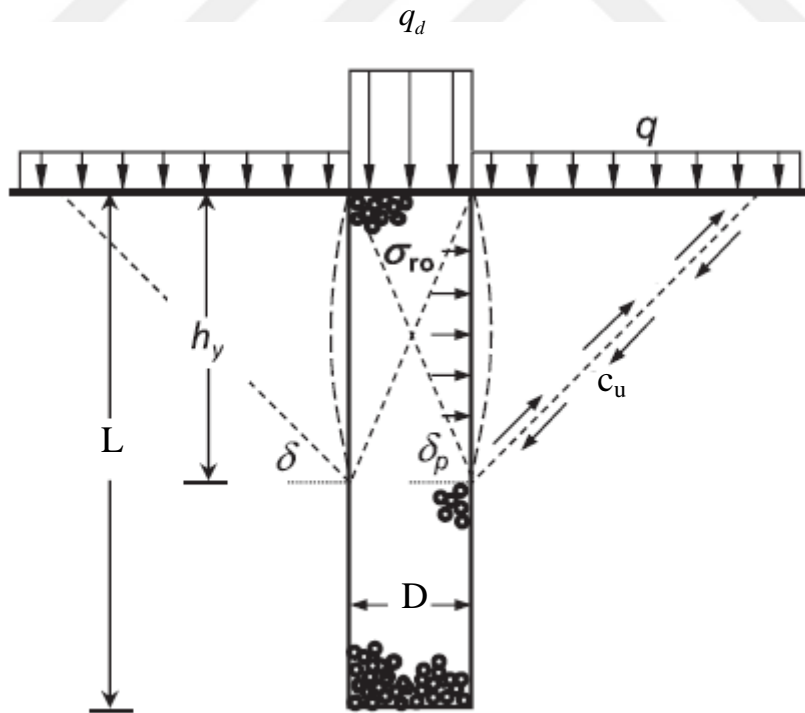
ϕ_s : Zeminin kayma direnci açısı,

olarak ifade edilir.

Çevre gerilmesi Formül 2.11 cinsinden ifade edildiğinde taş kolonun sınır taşıma gücü Formül 2.13' teki gibi bulunmaktadır.

$$q_d = (c Fc' + \sigma_{ort} Fq') \frac{1 + \sin\phi_c}{1 - \sin\phi_c} \dots\dots\dots (2.13)$$

Brauns, (1978) tekil taş kolonda, drenajsız ortamda taşıma gücünü üç eksenli basınç gerilmesi cinsinden Şekil 2.22 'deki gibi ifade etmiştir.



Şekil 2.22 Tekil Taş Kolonda Yenilme (Brauns, 1978)

Burada,

q : Yayılı yükü,

σ_{r0} : Toplam radyal gerilme,

h_y : Göçme derinliği,

L : Taş kolonun toplam uzunluğu,

δ_p : Taş kolonda kayma yüzeyi açısı,

δ : Taş kolonla iyileştirilmiş zeminde kayma yüzeyi açısı,

D : Taş kolonun çapı,

olarak ifade edilir.

Taş kolonda, kayma yüzeyi açısı taş kolon kayma direnci açısı cinsinden Formül 2.14' deki gibi bulunur.

$$\delta_p = 45 + (\phi_c / 2) \dots \dots \dots (2.14)$$

Göçme derinliği, Formül 2.15' deki gibi bulunur.

$$h_y = D \tan \delta_p \dots \dots \dots (2.15)$$

Toplam radyal gerime Formül 2.16' daki gibi bulunur.

$$\sigma_{r0} = \left(q + \frac{2 c_u}{\sin 2\delta} \right) \left(1 + \frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} \right) \dots \dots \dots (2.16)$$

Sınır taşıma gücü Formül 2.17' deki gibi bulunur.

$$q_d = \left(q + \frac{2 c_u}{\sin 2\delta} \right) \left(1 + \frac{\tan \delta_p}{\tan \delta} \right) \tan^2 \delta_p \dots \dots \dots (2.17)$$

Burada, taş kolonla iyileştirilmiş zemindeki kayma yüzeyi açısı (δ), Formül 2.18' deki gibi bulunur.

$$\tan\delta (\tan^2\delta - 1) = 2\tan\delta_p \dots\dots\dots (2.18)$$

2.1.2.4.2. Kısa Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Gücü

Kısa tekil taş kolonlar kolon çapının 3-4 katından daha kısa olan kolonlar olarak ele alınmaktadır. Uzun taş kolonlardaki gibi şişme yenilmesi görülmemektedir. Kısa taş kolonlarda alttaki zemin tipine göre genel, yerel ve zımbalama tipi göçme durumları görülmektedir.

Madhav ve Vitkar, (1978) sürtünmesiz zeminde hendekler açarak bunları granüler malzeme doldurup şerit temel gibi çözüm yaparak, Formül 2.19' daki gibi sınır taşıma gücünü bulmuşlardır.

$$q_d = \frac{\rho B}{2} N\gamma + c_u Nc + D_f \rho Nq \dots\dots\dots (2.19)$$

Burada,

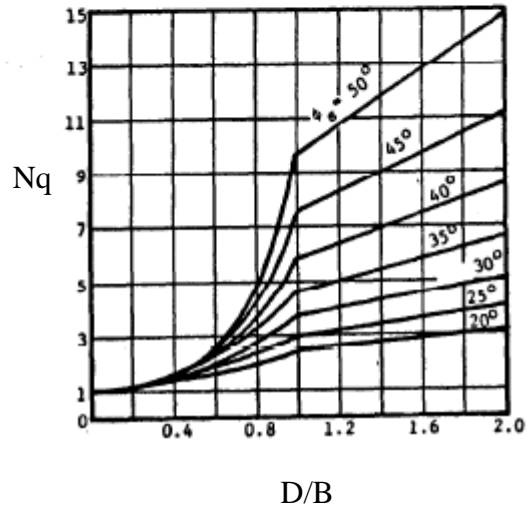
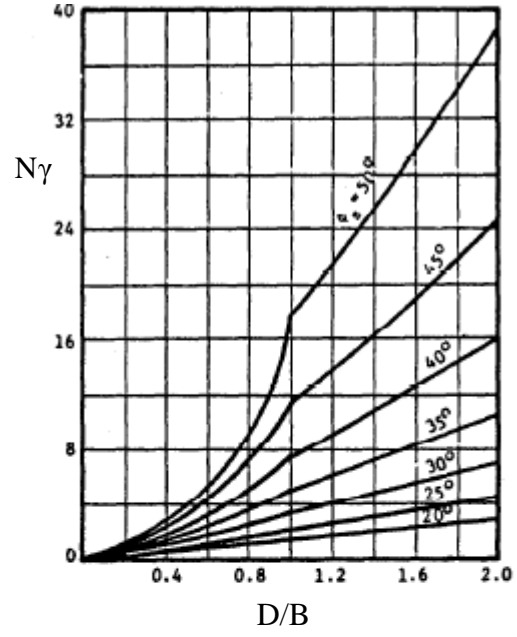
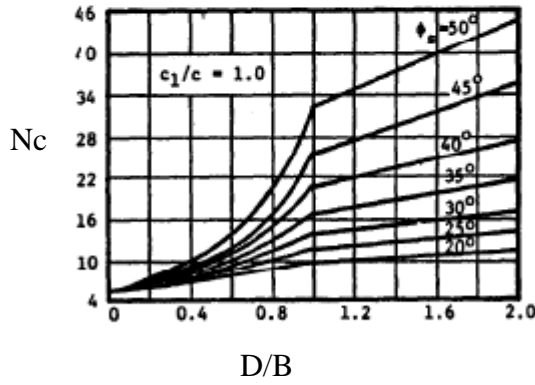
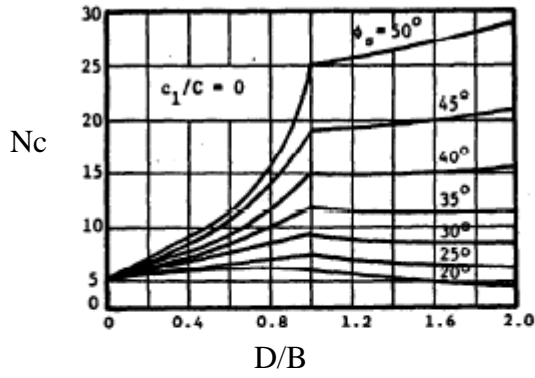
ρ : Zeminin birim hacim ağırlığı,

B : Taş kolon üzerindeki yayılı yükün genişliği,

D_f : Temel gömme derinliği,

olmaktadır.

Nc , Nq ve $N\gamma$: Taşıma gücü katsayıları olup, Şekil 2.23' teki gibi bulunmaktadır.



Şekil 2.23 Taşıma Gücü Katsayıları (Madhav ve Vitkar, 1978)

Burada,

ϕ_c : Taş kolonun kayma direnci açısı,

D : Taş kolonların çapı,

c_1 : Taş kolonun kohezyon değeri,

c : Zeminin kohezyon değeri,

dir.

2.1.2.4.3. Hint Standartına Göre Tekil Taş Kolonlarda Taşıma Yüğü'nün Bulunması

Hint Standartında tekil taş kolonların emniyetli taşıma yüğü (Q_a), Formül 2.20' deki gibi 3 bileşene ayrılmaktadır.

$$Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} + Q_{a3} \dots\dots\dots (2.20)$$

Burada,

Q_{a1} : Taş kolonun radyal genişlemesinden dolayı oluşan emniyetli taşıma yüküdür.

Q_{a2} : Sürşarj yüklemesinden dolayı oluşan yanal gerilme artışının neden olduğu emniyetli taşıma yüküdür.

Q_{a3} : Zeminin emniyetli taşıma yüküdür.

2.1.2.4.3.1. Radyal Genişlemeden Dolayı Oluşan Emniyetli Taşıma Yüğü (Q_{a1})

Tekil taş kolonda radyal genişlemeden dolayı oluşan emniyetli taşıma yüğü Formül 2.21 'deki gibi bulunmaktadır.

$$Q_{a1} = q_d (\pi D^2 / 4) / GS \dots\dots\dots (2.21)$$

GS yaklaşık olarak 2 alınmaktadır.

$$q_d = \sigma_3 \times K_p \dots\dots\dots (2.22)$$

Formül 2.22' de

σ_3 : Yanal çevre gerilme, $\sigma_3 = \sigma_{h0} + 4c_u$

σ_{h0} : Sükunet durumunda yanal gerilme, $\sigma_{h0} = \sigma_0' K_0$

K_0 : Sükunet durumundaki yatay toprak basıncı katsayısı, ($K_0 = 1 - \sin \phi_s$)

σ_0' : Düşey efektif gerilme, $\sigma_0' = \rho 2D$ olarak alınır.

olarak belirtilir.

2.1.2.4.3.2. Sürşarj Yüklemesinden Dolayı Oluşan Yanal Gerilme Artışının Neden Olduğu Emniyetli Taşıma Yüğü (Q_{a2})

Tekil taş kolonda sürşarj yüklemesinden dolayı oluşan yanal gerilme artışının neden olduğu emniyetli taşıma yüğü Formül 2.23' teki gibi bulunmaktadır.

$$Q_{a2} = (K_p \Delta\sigma_{r0} A_c) / 2 \dots\dots\dots (2.23)$$

Burada,

$\Delta\sigma_{r0}$: Sürşarj etkisinden ötürü radyal gerilmedeki artış gerilmesi, $\Delta\sigma_{r0} = (q_a / 3) \times (1 + 2K_0)$

2.1.2.4.3.3. Zeminin Emniyetli Taşıma Yüğü (Q_{a3})

Zeminin emniyetli taşıma yüğü Formül 2.24' teki gibi bulunmaktadır.

$$Q_{a3} = q_a A_{net} \dots\dots\dots (2.24)$$

q_a : Zemindeki emniyetli taşıma gücü, $q_a = (c_u N_c) / 2,5$ olarak bulunmaktadır.

A_{net} : Zeminin net alanıdır. (Efektif alandan, taş kolon taban alanının çıkarılmasıyla bulunur.)

Taş kolonların üçgen yerleşim planı için efektif alan $0,866 s^2$ olarak bulunurken, kare yerleşim planı için $1,0 s^2$ olarak bulunmaktadır. Burada s kolon merkezleri arasındaki mesafedir.

$A_{net} = 0,866 s^2 - (\pi D^2 / 4) \longrightarrow$ Üçgen yerleşim planı içindir.

$A_{net} = 1 s^2 - (\pi D^2 / 4) \longrightarrow$ Kare yerleşim planı içindir.

2.1.2.4.4. Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü

Grup taş kolonlarda, taşıma gücü hesabı yapılırken, Şekil 2.24' te kare ve şerit temel yerleşim planına göre ele alındığında, göçme yüzeyi üçgen şeklinde olmaktadır. Grup taş kolonlarda iyileştirilen zeminler taş kolonla birlikte tek kompozit bir yapı alınarak ilgili parametreler Formül 2.25 ve Formül 2.26' ya göre revize edilir.

$$\tan \phi_{\text{comp}} = \mu_c a_r \tan \phi_c \dots\dots\dots (2.25)$$

$$c_{\text{comp}} = (1 - a_r) c \dots\dots\dots (2.26)$$

Burada,

$\tan \phi_{\text{avr}}$: Kompozit malzemenin kayma direnci açısının tanjantı,

μ_c : Taş kolon gerilme yoğunlaşma faktörü, (Formül 2.5' deki gibi bulunur.)

c_{avr} : Kompozit malzemenin kohezyonu,

c : Zeminin kohezyonu,

olarak belirtilir.

Grup taş kolonlarda sınır taşıma gücü sınır yanal gerilme ve kompozit malzemenin kayma direncine bağlı olarak Formül 2.27' deki gibi bulunur.

$$q_d = \sigma_3 (\tan \beta)^2 + 2 c_{\text{avr}} \tan \beta \dots\dots\dots (2.27)$$

Burada,

β : Göçme yüzeyi kırılma açısıdır. Formül 2.28' deki gibi bulunur.

$$\beta = (45 + \phi_{\text{avr}} / 2) \dots\dots\dots (2.28)$$

Sınır yanal gerilme, Formül 2.29' daki gibi bulunmaktadır.

$$\sigma_3 = \frac{\rho_{sat} B \tan\beta}{2} + 2c_u \dots\dots\dots (2.29)$$

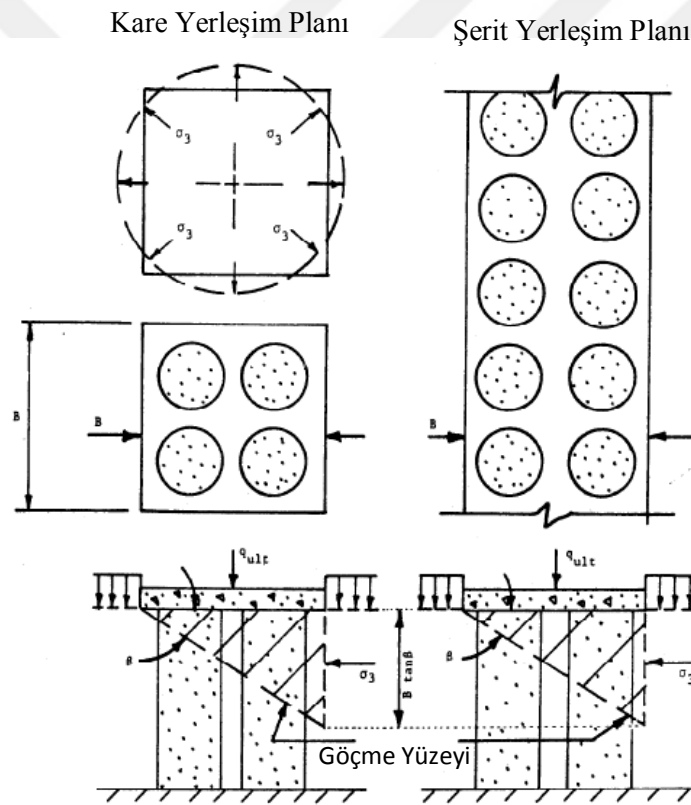
Burada,

ρ_{sat} : Doygun birim hacim ağırlık,

B : Temel genişliği,

olarak belirtilir.

Bu yaklaşımda, kolonlarda şişme yenilmesi olmadığı varsayılarak, drenajsız kayma direncinin 30-40 kPa olduğu katı killer için geçerlidir (Bergado vd., 1994).



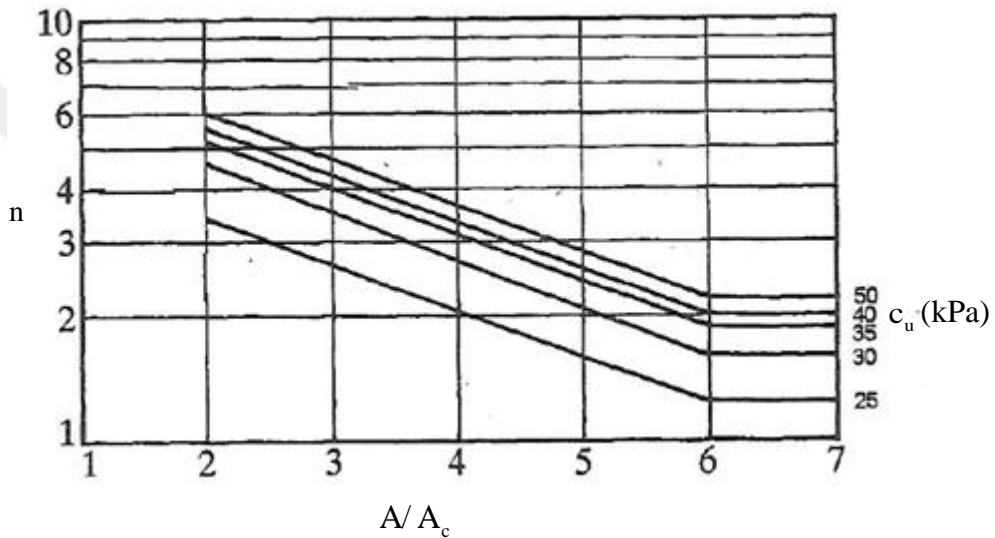
Şekil 2.24 Grup Taş Kolonlarda Taşıma Gücü (Barksdale ve Bachus, 1983)

2.1.2.5. Taş Kolonlarda Oturma Hesabı

2.1.2.5.1. Greenwood ve Thomson (1984) Yöntemi

Taş kolon yapıldıktan sonra ne kadar oturma miktarı yapacağını Greenwood ve Thomson (1984) yarı ampirik olarak Şekil 2.25' te belirtmiştir.

Şekil 2.25' e göre yatayda A/A_c oranı ile drenajsız kayma direnci'nin kesiştiği yerden düşey düzlemde oturma iyileştirme faktörü (n), bulunarak oturma miktarı bulunur.



Şekil 2.25 Oturma Miktarı Bulunuşu (Greenwood ve Thomson, 1984)

Burada,

n : Oturma iyileştirme faktörü olup, taş kolon yapılmadan önceki oturmanın taş kolon yapıldıktan sonraki oturmaya oranı,

olarak belirtilir.

A ve A_c 'nin nasıl bulunacağı Şekil 2.26 'da verilmiştir. Taş kolon taban alanı (A_c), genelde daire olurken, birim hücre etki alanı (A), üçgen yerleşim planına göre yapılıncsa düzgün altıgen, kare yerleşim planına göre yapılıncsa kare olmaktadır. A_c/A oranı Formül 2.30'daki gibi bulunmaktadır.

$$a_r = A_c / A = k(r/s)^2 \dots\dots\dots (2.30)$$

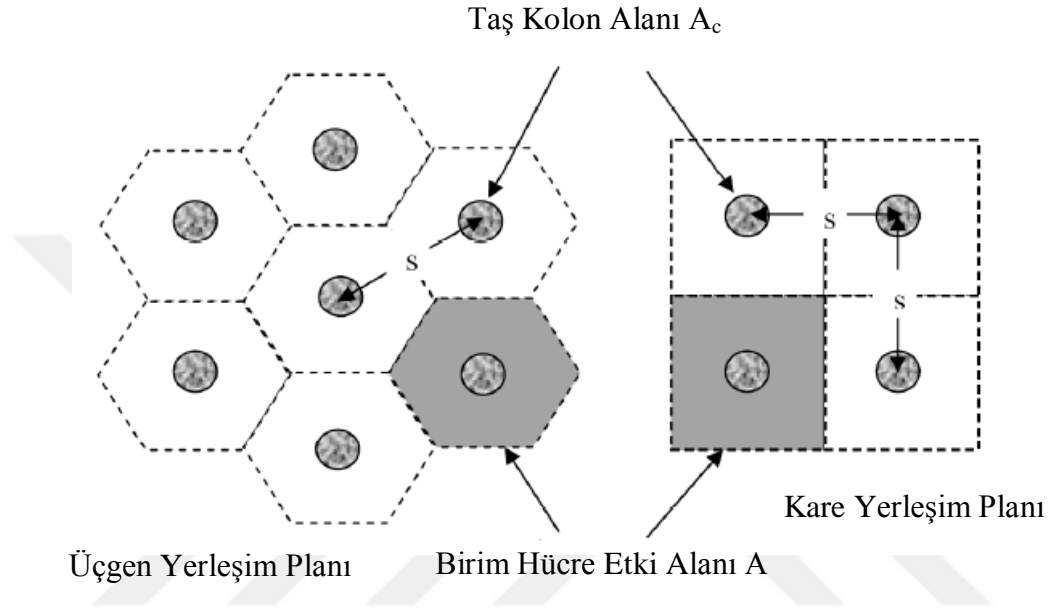
Burada,

r : Taş kolon yarıçapı,

s : Taş kolonların merkezleri arasındaki uzaklık,

olarak belirtilir.

k : Etki katsayısı olup, kare yerleşim planı için π , üçgen yerleşim planı için $2\pi/\sqrt{3}$ alınır.



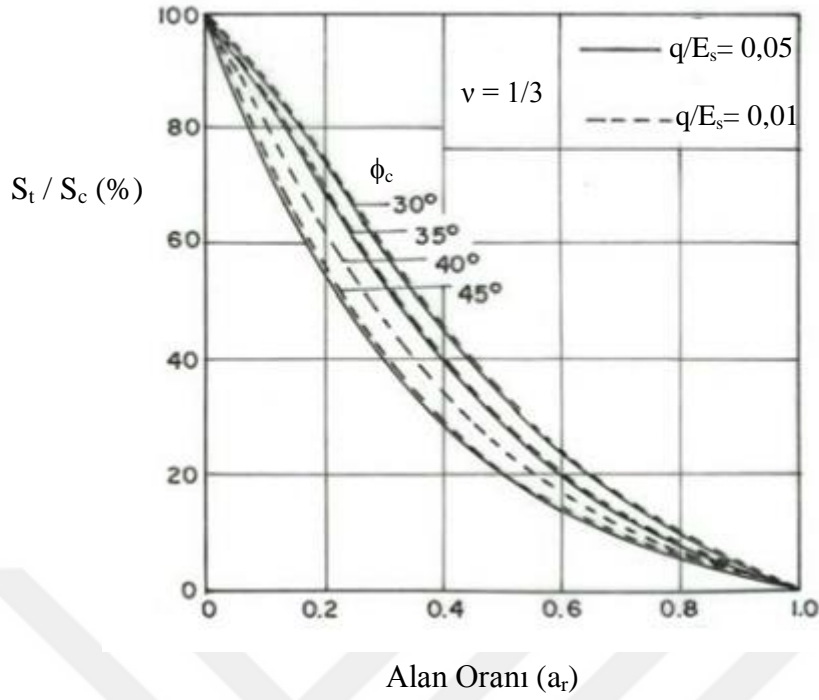
Şekil 2.26 Taş Kolon Etki Alanı (A) ve Taş Kolon Alanı (A_c) (Kosho, 2000)

2.1.2.5.2. Van Impe ve De Beer (1983) Yöntemi

Bu yöntemde yumuşak bir kilde tekil bir taş kolon ele alınarak, taş kolon yapıldıktan sonra (S_t), ve yapılmadan önceki oturma (S_c), oranını, taş kolonun kayma direnci açısı ve zeminin poisson oranı ($\nu = 1/3$), cinsinden Şekil 2.27' deki gibi ifade etmiştir.

Şekil 2.27' de

Yatay eksende A_c/A oranı girilerek, taş kolon kayma direnci açısı kesiştiği noktadan düşey eksene geçilerek S_t / S_c oranı bulunmaktadır. Alan oranı, Formül 2.30' daki gibi bulunmaktadır.



Şekil 2.27 Oturma Miktarı Bulunuşu (Van Impe ve De Beer, 1983)

Burada,

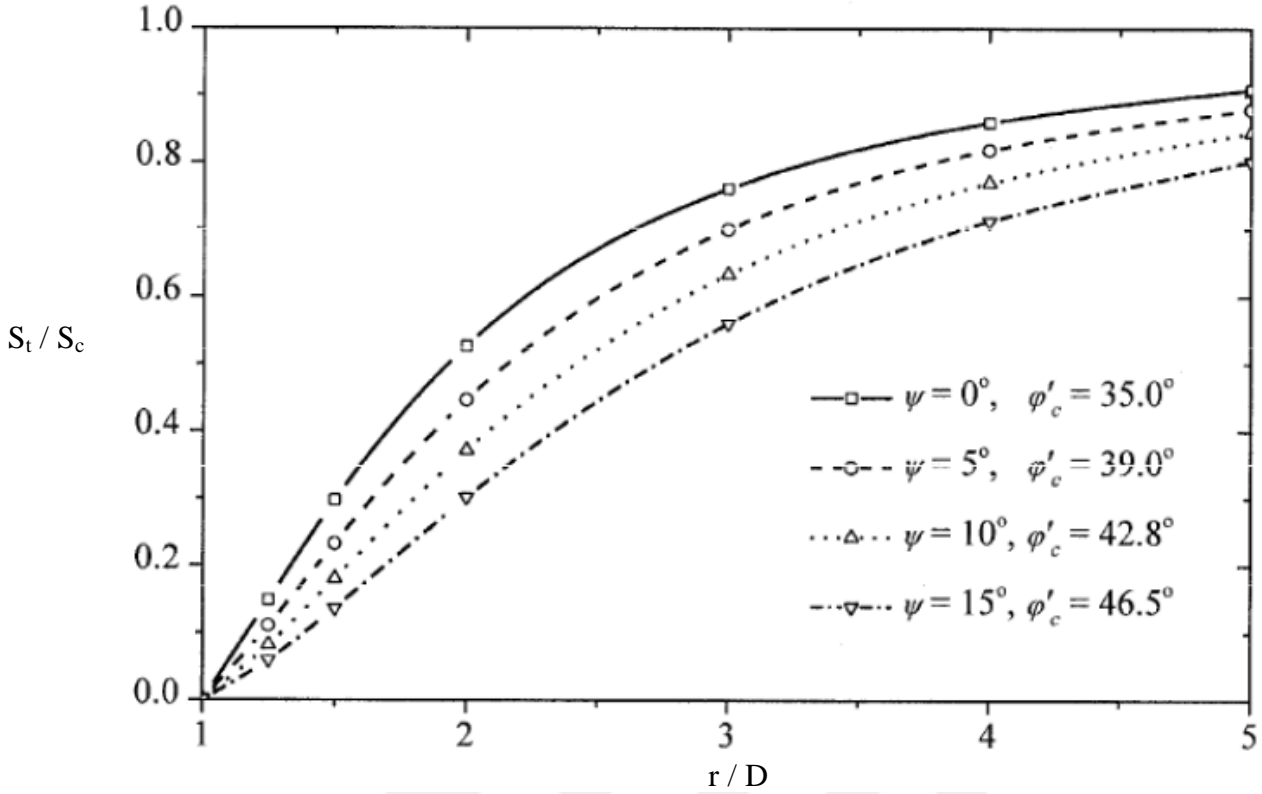
q : Dış yayılı yük,

E_s : Zeminin elastisite modülü,

olarak belirtilir.

2.1.2.5.3. Van Impe ve Madhav (1992) Yöntemi

Taş kolonlarla iyileştirilmiş, kompozit zeminde iyileştirmeden sonra ve iyileştirme öncesi oturma miktarını Van Impe ve Madhav, (1992) zemin kabarma açısı ve taş kolonun kayma direnci açısı cinsinden, taş kolon uzaklığına bağlı olarak Şekil 2.28' deki gibi ifade etmiştir.



Şekil 2.28 İyileştirme Sonrası Oturma Miktarı Bulunuşu (Van Impe ve Madhav, 1992)

Burada,

r : Taş kolonun merkezinden uzaklığı

D : Taş kolonun çapı,

ψ : Zeminin kabarma açısı,

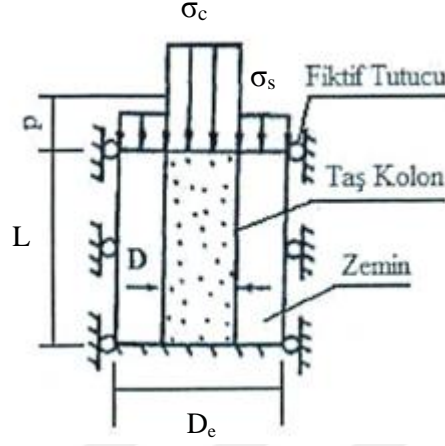
olarak belirtilir.

2.1.2.5.4. Priebe (1995) Yöntemi

Priebe, (1995) taş kolonlar için geliştirdiği oturma hesabı metodu için Şekil 2.29' da görülmek üzere birim hücre prensibini kullanarak şu varsayımları ele almıştır :

- 1) Taş kolon rijit tabaka üzerine oturmaktadır.
- 2) Taş kolon rijit ve plastik olup sıkışmazdır.

- 3) Taş kolonla zemin eşit miktarda oturma yapmaktadır.
- 4) Dış yayılı yükün bir kısmını taş kolon karşılamakta, bir kısmında zemin karşılamaktadır.
- 5) Kolon rijit bir tabakaya oturduğu varsayılarak, zemindeki değişim taş kolonun yatay deformasyonundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.29 Birim Hücre (Barksdale ve Bachus, 1983)

Tekil kolon için oturma hesaplanması yapılırken, iyileştirme faktörü'nden (n), yararlanılır. İyileştirme faktörü, taş kolon alanı birim hücre etki alanına göre ve taş kolonun kayma direnci açısından değişmektedir.

İyileştirme Faktörü iyileştirme yapılmadan önceki oturma ile iyileştirme yapıldıktan sonraki oturmaya oranı olarak ifade edilir.

Alan oranı Formül 2.31' deki gibi bulunur.

$$a_r = \frac{A_c}{A} = k \left(\frac{r}{s} \right)^2 \dots\dots\dots (2.31)$$

Burada,

A_c : Taş kolon taban alanı,

A : Toplam etki alanı,

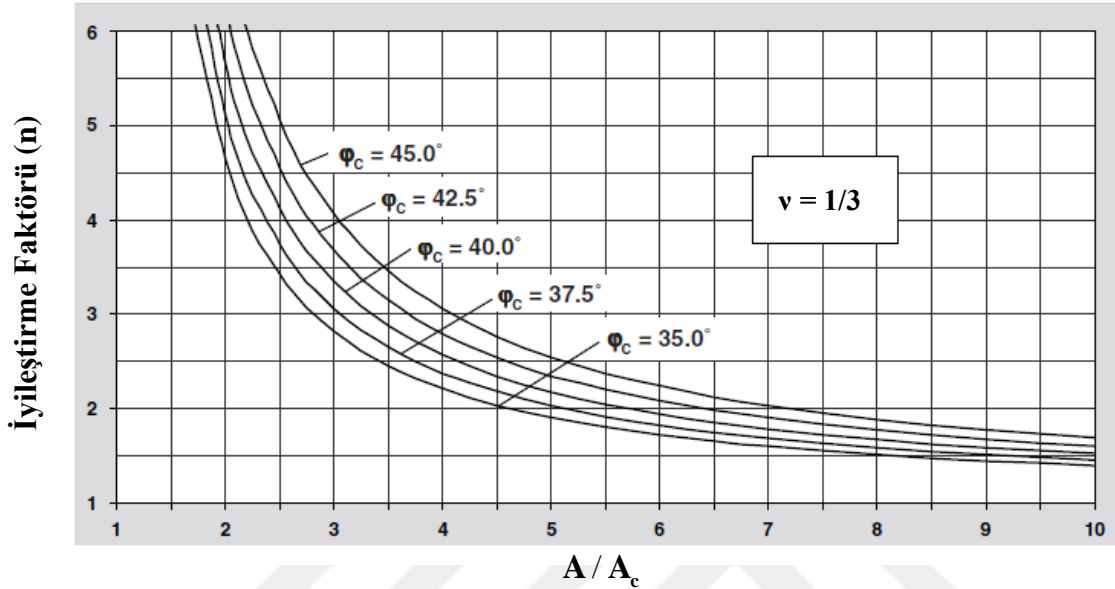
r : Taş kolon yarıçapı,

s : Taş kolon merkezleri arası mesafe,

olarak belirtilir.

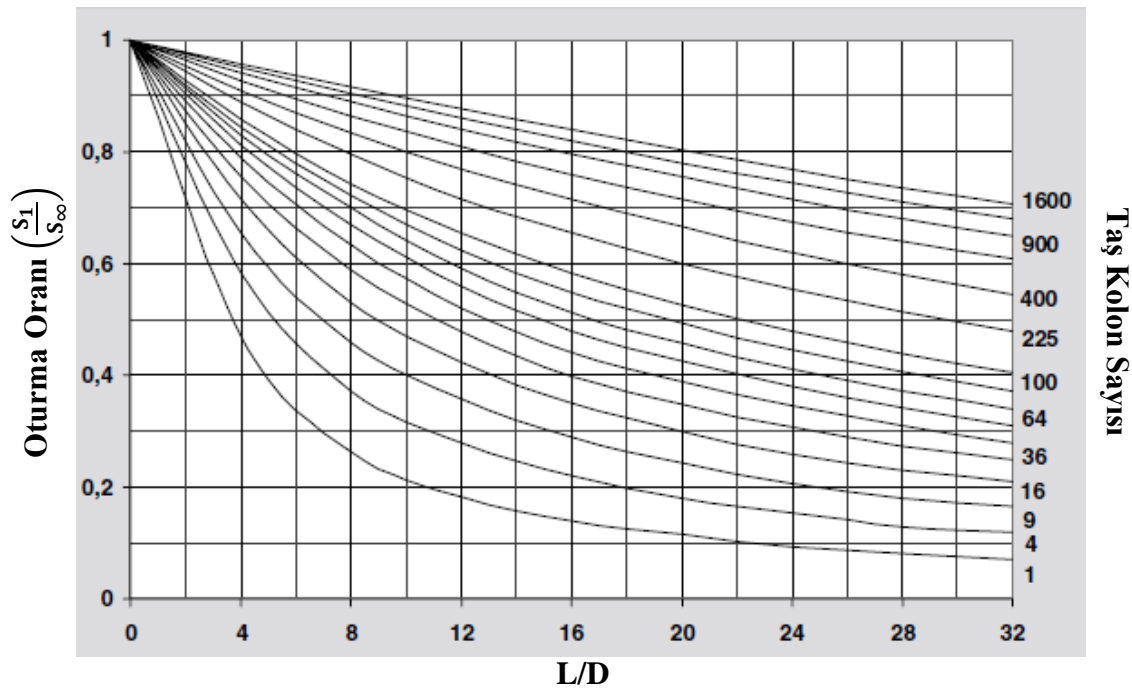
k, katsayısı kare yerleşim planına göre π , üçgen yerleşim planına göre $2\pi/\sqrt{3}$ alınır.

Şekil 2.30' da A/A_c oranına göre ve ϕ_c' ye göre iyileştirme katsayısının değişimi gösterilmektedir. Bu yöntemde, taş kolon yapımı sırasında zeminin örselenmesinden ötürü, kolon etrafındaki zeminin sıvı gibi davrandığı varsayılarak, yatay toprak basıncı katsayısı $K=1$, ve zeminin poisson oranında $1/3$ olarak kabul edilir.

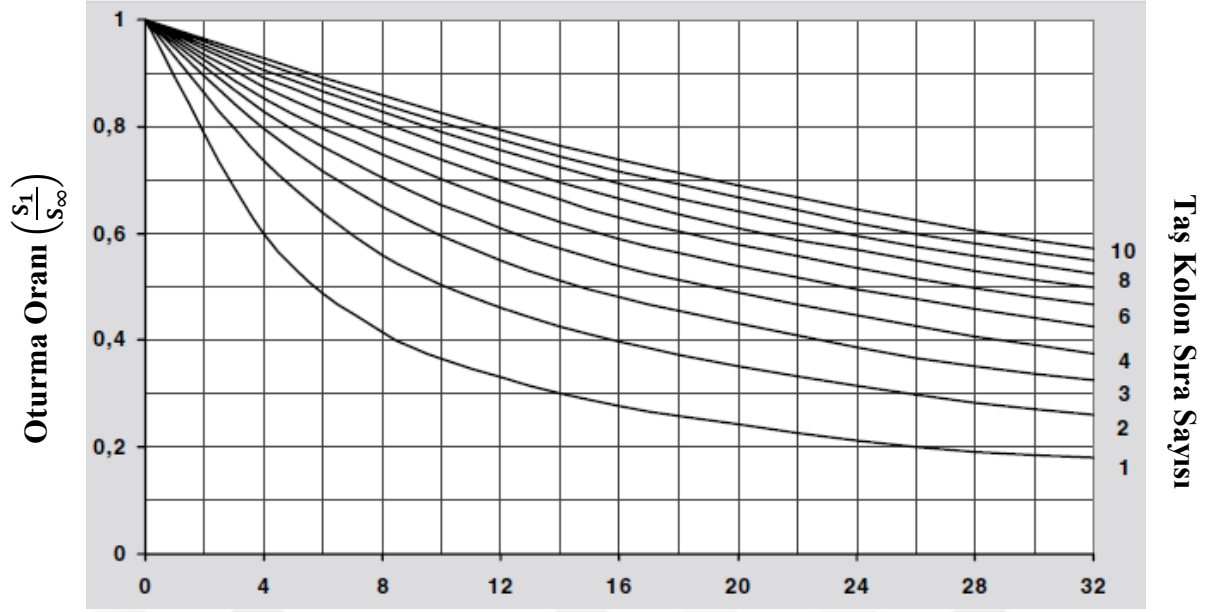


Şekil 2.30 Priebe Metodu İyileştirme Katsayısı Bulunuşu (Priebe, 1995)

Grup taş kolonlar olması halinde grup taş kolonlardaki oturmayı Priebe (1995), tekil temel için ve şerit temel için oturma oran değişimi, kolon sayısı, kolon sıra sayısı ve kolon boyu-kolon çapı (L/D), oranına göre değişimi Şekil 2.31 ve Şekil 2.32' de görülmektedir.



Şekil 2.31 Tekil Temel İçin Priebe Metodu Oturma Oranı Bulunuşu (Priebe, 1995)



Şekil 2.32 Şerit Temel İçin Priebe Metodu Oturma Oranı Bulunuşu (Priebe, 1995)

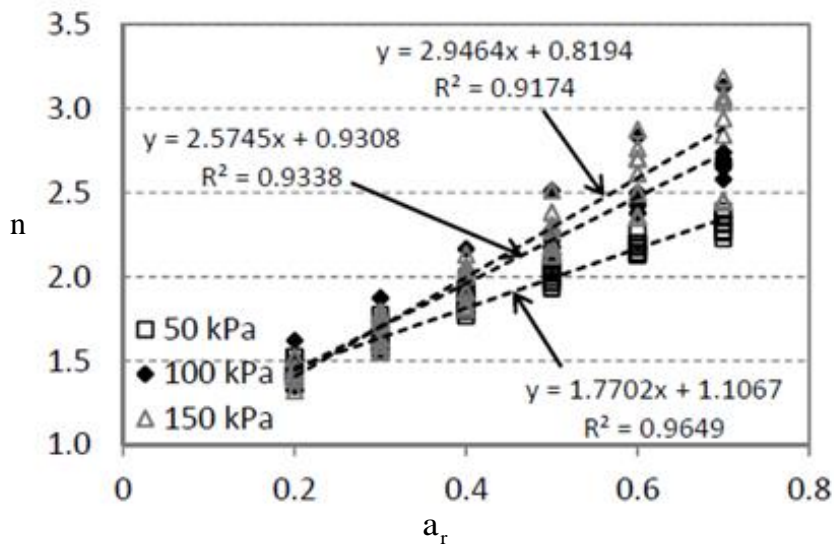
Burada,

S_1 : İyileştirme sonrası toplam oturma,

S_∞ : İyileştirme yapılmadan önceki toplam oturma,

olarak belirtilir.

Tan vd., (2014) Sonlu elemanlar yöntemine göre, grup taş kolonlar üzerinde yapmış oldukları çalışmalarda, grup taş kolonların 50, 100 ve 150 kPa yük altında farklı uzunluklardaki oturma iyileştirme faktörü alan oranı cinsinden Şekil 2.33' teki gibi belirtmişlerdir.



Şekil 2.33 Grup Taş Kolonlarda Oturma (Tan vd., 2014)

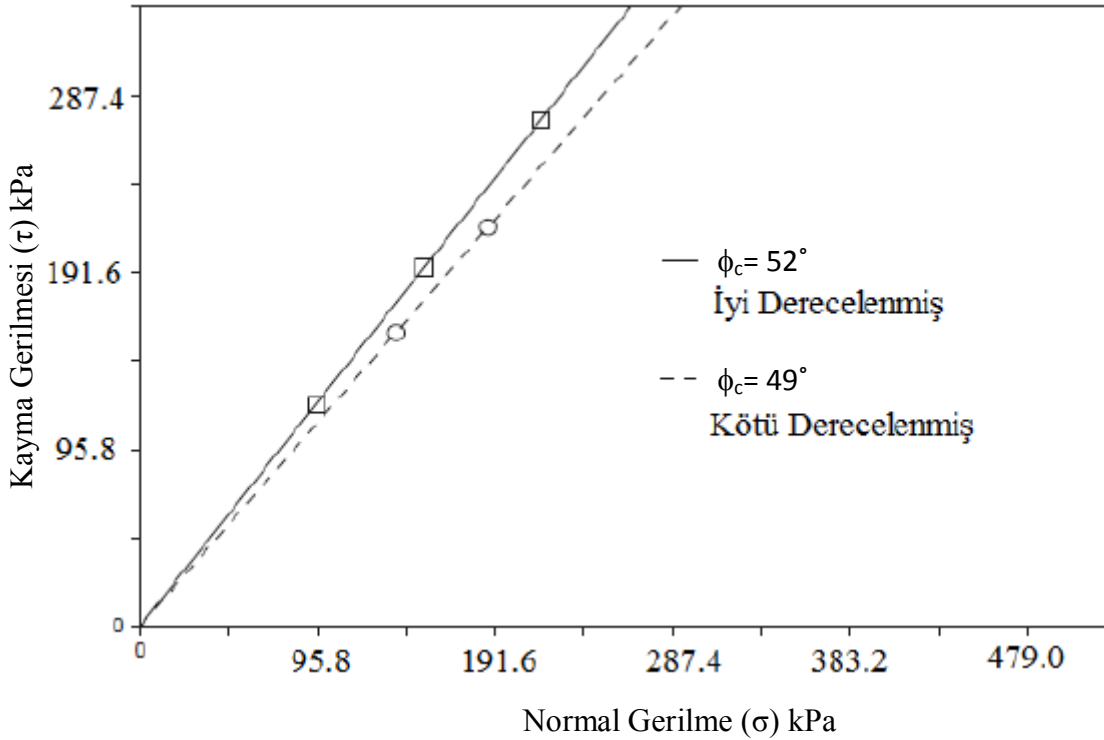
2.1.3. Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK)

Darbeli kırmataş kolon yöntemi Amerika'da 1980' li yıllarda Dr. Fox tarafından geliştirilen, Türkiye' de ise son 10 yıl içerisinde kullanılması yaygınlaşan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Diğer taş kolon yapım yöntemlerinden farklı olarak, granüler malzeme vurularak sıkıştırılır ve rijit bir kolon elde edilir. Bu yöntemde zemin ortamının taşıma gücünü artırarak, oturmaların azaltılması, deprem sırasında sıvılaşma riskinin azaltılması, dren gibi çalışarak konsolidasyon süresinin kısaltılması, yamaç ve şevlerde stabilitenin sağlanması, yüzeysel temellerin desteklenmesinde, döşeme plaklarının desteklenmesinde, dolguların, duvarların ve tankların stabilite çözümlerinde kullanılırlar.

DKK, yöntemlerinden günümüzde en çok olarak kullanılan yöntemler, Geopier® ve Impact® DKK yöntemleridir. Diğer yöntemler DKK Kuyu yöntemi ve Rampact® yöntemleridir.

2.1.3.1. DKK' larda Kayma Direnci Açısı

DKK elemanlarının granüler malzemesinin (kırmataşlar) kayma direnci açısı değişimini Fox ve Cowell, (1998) 30 inc (76,2 cm) çapındaki DKK kolonunda, laboratuvar ortamında kesme deneyinde değişimini incelemiştir. Şekil 2.34' te görülmek üzere kırmataşların kötü ve iyi derecelenmesine göre kayma direnci açılarının değişimi 49-52° arasında değişmektedir.



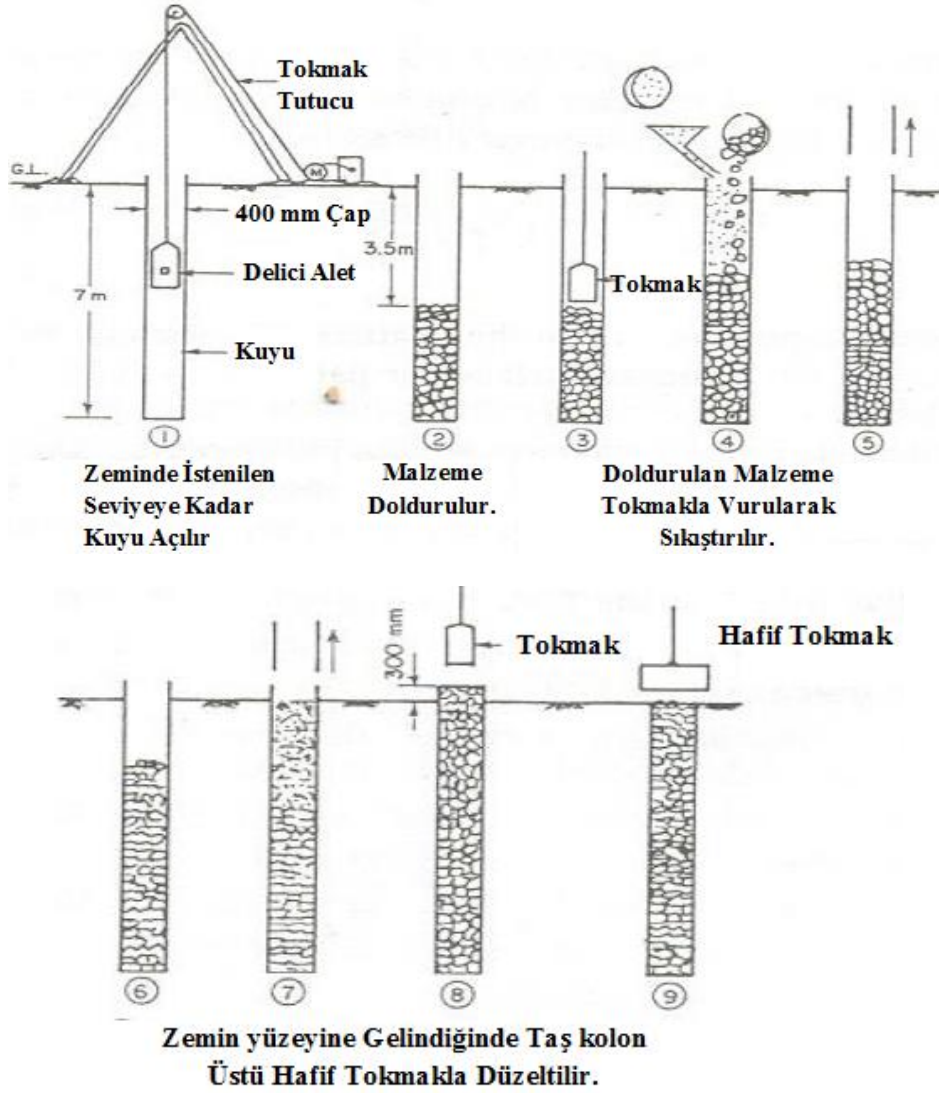
Şekil 2.34 DKK 'larda Kayma Direnci Açısı Değişimi (Fox ve Cowell, 1998)

White, (2001) Iowa Üniversitesinde DKK 'ların kayma direnci açısını üç eksenli basınç deneyinde incelemiştir. Sıkıştırılan kırmataşlar üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyine kayma direnci açısını 51° olarak bulmuştur. Sıkıştırma sırasında yüksek enerjiler ele edildiği için ve yanal gerilmeler artığından dolayı kayma direnci açısı yüksek bulunmuştur.

2.1.3.2. DKK Yapım Yöntemleri

2.1.3.2.1. DKK Kuyu Yöntemi

Bu yöntem Datye ve Nagaraju, (1975) tarafından geliştirilmiş olup, açılan kuyuya kırmataşlar konulup, 15-20 kN ağırlığındaki bir tokmağın, 1-1,5 m yüksekten kırmataşlara vurularak, sıkıştırma yöntemidir (Şekil 2.35). Bu yöntem titreşimli itirme ve titreşimli sıkıştırma yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha yüksek taşıma kapasitesi sunmaktadır. Ancak bu yöntem kuyu derinliğinin 12-15 m' den fazla olduğu zaman çok yavaş olup ekonomik çözümler vermemektedir.



Şekil 2.35 DKK Kuyu Yöntemi (Datye ve Nagaraju, 1975)

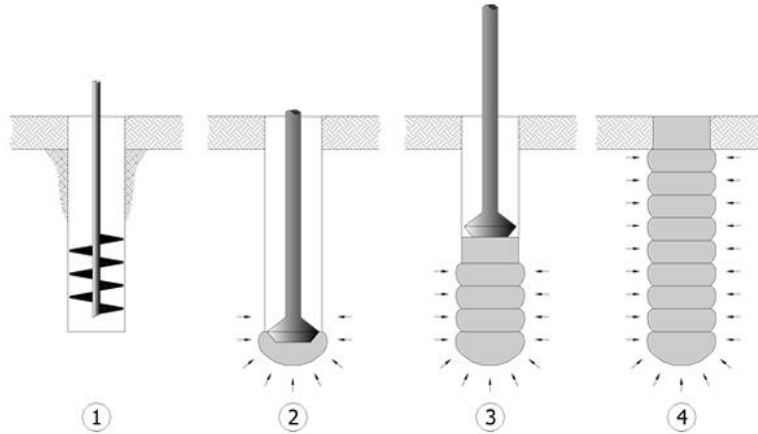
2.1.3.2.2. Geopier® Yöntemi (GP3)

Geopier® yöntemi Şekil 2.36’ da görülmek üzere, muhafaza borusu (a), burgu makinası (b), yükleyici (c) ve tokmak olmak üzere 4 ekipmandan oluşmaktadır. Bu yöntem elverişsiz zemin koşullarının olduğu iyileştirmeye uygun, yumuşak, katı killi ve siltli zeminler, gevşek ve sıkı kumlu zeminler ve organik siltli turba zeminlerde özellikle mevcut zeminin kazılıp yerine daha iyi zemin dolgularının yapılabileceği durumlar için uygun yöntemdir.



Şekil 2.36 Geopier Sistemi Ekipmanları

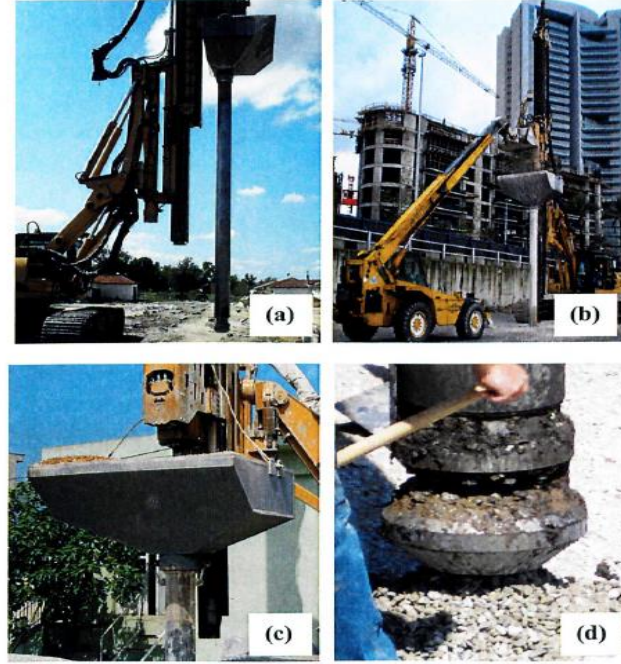
Geopier® yönteminde Şekil 2.37’de görülmek üzere, zeminde istenilen derinliğe kadar 76 cm delgi ile sondaj açılır (1), iyi derecelenmiş 5-15 cm dane boyutlu 46 cm kalınlığında granüler malzeme yerleştirilip (2), bir plaka ile vurularak, (3) kademeli olarak 30 cm kalınlığında oluşacak şekilde zemin yüzeyine kadar tabakalarla sıkıştırılır.(4) Kolon boyları 2-8 m arasında değişmekte olup, 8,5 m’ ye kadar kolon boyları yapılmaktadır. Kırmataş malzemesi olarak, geri dönüşümlü beton agregaları kullanılabilir. Orta yumuşaklıkta zeminlerde granüler malzeme olarak kumda kullanılabilir. Ortamda taşıma gücünü 480 kPa’a kadar artırabilir. Günde ortalama 30-50 kolon yapılabilir. Sıkıştırmadan dolayı kolon çevresinde yanıl gerilmeleri arttırır.



Şekil 2.37 Geopier® Yöntemi

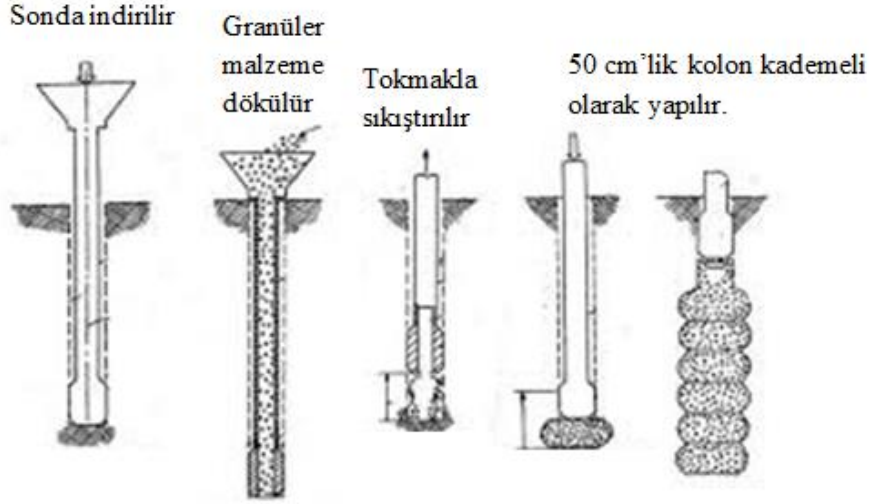
2.1.3.2.3. Impact® Yöntemi

Impact® yöntemi Şekil 2.38’de verildiği gibi (a) Impact makinesi, (b) yükleyici hazne (c) ve (d) mandrel olmak üzere 4 ekipmandan oluşmaktadır. Bu yöntem elverişsiz zemin koşullarının olduğu iyileştirmeye uygun, yumuşak, katı killi ve siltli zeminler, gevşek ve sıkı kumlu zeminler ve organik siltli turba zeminlerde özellikle mevcut zeminin kazılıp yerine daha iyi zemin dolgularının yapılabileceği durumlar için uygun yöntemdir.



Şekil 2.38 Impact® Sistemi

Geopier® yönteminden sonra geliştirilen Impact® yönteminde zemine 36 cm çaplı mandrel istenilen derinliğe indirilerek, içine iyi derecelenmiş doğal kırmataşlar doldurulur, daha sonra mandrel 1 m yukarı kaldırılır 67 cm aşağıya indirilerek, tokmakla kırmataşlar sıkıştırılır. Sıkıştırma sonucunda 36 cm olan çap değeri 50 cm olarak 33 cm’lik tabaka kalınlığı elde edilir. Kademeli olarak bu işlem zemin yüzeyine kadar devam eder, her kademede 50 cm’lik kolon çapları ve 33 cm’lik tabaka kalınlığı oluşur (Şekil 2.39). Çok yumuşak killi zeminlerde granüler malzeme arasına betonda enjekte edilebilir. Bu yöntemde kullanılan kırmataş malzemelerinin boyutları minimum 13 mm maksimum 38 mm arasında değişmektedir. Kolon boyutları minimum 3 m, maksimum 18 m’ye kadar olabilmektedir. Yapım sırasında, muhafaza borusu gerektirmeyen bir yöntem olup, yeraltı su seviyesinin altındaki bölgelerde de uygulanabilmektedir. Günde ortalama 40-100 kolon yapılabilmektedir. Hızlı yapılan bu yöntem derin temel sistemlerine göre %20-50 daha ekonomiktir.



Şekil 2.39 Impact® Yöntemi

Tablo 2.4.' de örnek bir projede Delme Kazık, Jet Grout ve Impact® DKK yöntemleri kıyaslanmıştır. Kıyaslanma sonucunda Impact® DKK sistemlerinin diğer yöntemlerle aynı tasarım yükünde, daha az zamanda imal edilip daha ekonomik sonuçlar verdiği görülmektedir.

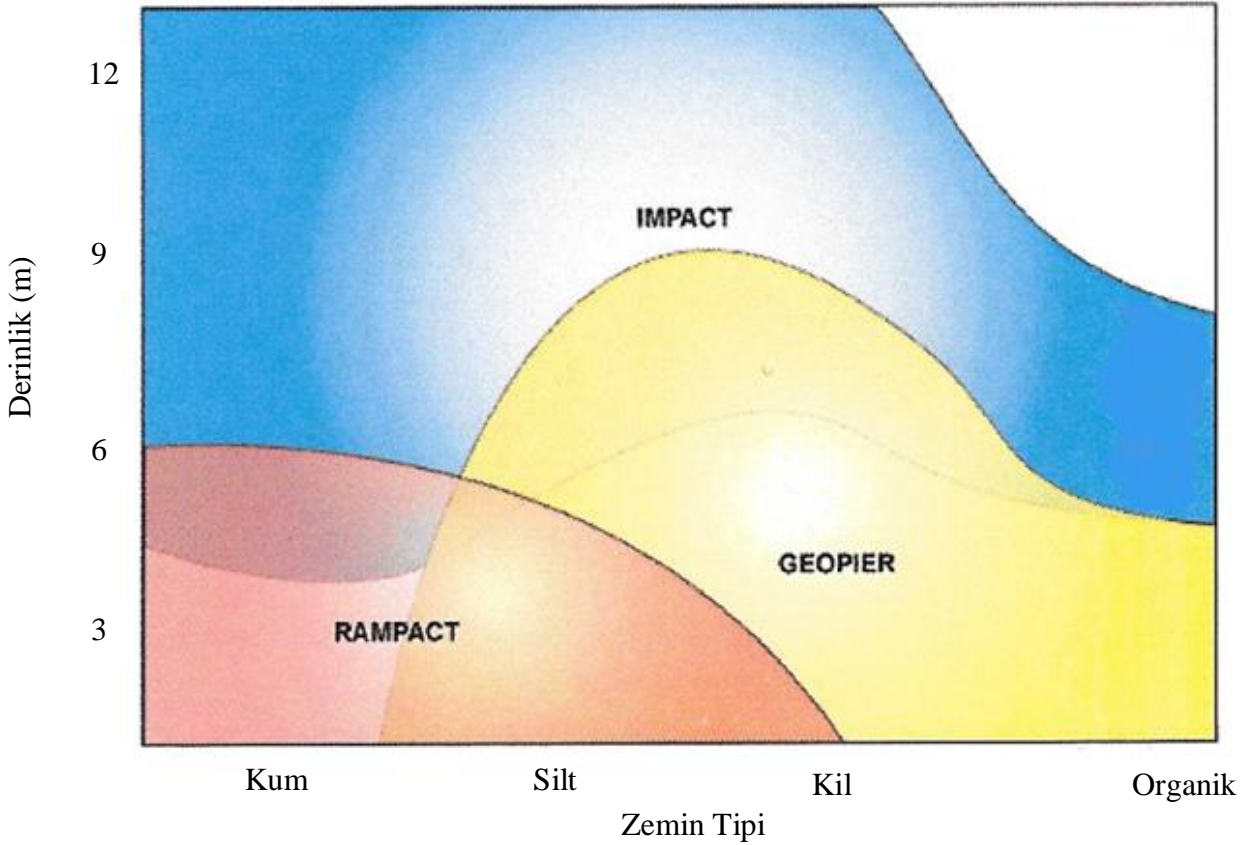
Tablo 2.4. Impact® DKK, Delme Kazık ve Jet Grout Yöntemlerinin Örnek Bir Projede Kıyaslanması (Geopier Foundation Company)

	Delme Kazık	Jet Grout	Impact® DKK
Çap (cm)	80	60	50
Boy (m)	36	30	14
Tekil Elemanın Emniyetli Taşıma Yükü	100 ton	36 ton	22 ton
Tasarım Gerilmesi	10 t/m ²	10 t/m ²	10 t/m ²
Oturma Miktarı	5-10 mm	3-4 cm	5-6 cm
Karelaj (m)	3,2 x 3,2	1,9 x 1,9	1,5 x 1,5
Kullanılan Malzeme	Beton ve Çelik	Çimento	Kırmataş
Proje Süresi	50 gün	40 gün	30 gün
Toplam Metraj	3600 metre	8400 metre	6300 metre
Proje Bedeli	% 100	% 52	% 36

2.1.3.2.4. Rampact® Yöntemi

Rampact® sistemi Türkiye’de henüz kullanılmamakla birlikte, diğer yöntemlere göre daha kısa kolonlar elde edilen yöntemdir. Günde ortalama 40-60 kolon yapılabilir. Kolon boyları 8 m’ ye kadar olabilmektedir. Mandrel 4-7 m derinliğe kadar, zemine indirildikten sonra, mandrele yukarıdan kırmataş malzemeleri dökülerek, mandrel yukarıya doğru çekildikten sonra, granüler malzeme yukarıya doğru çekilerek, kuyu içine dolan granüler malzemeler bir tokmakla sıkıştırılarak DKK elde edilir. Kolon etrafında yanal gerilmeleri artırır, sığ temel altına ve döşeme plak temellerinin altına uygun olarak yapılmaktadır.

Şekil 2.40’ da görüldüğü gibi, Geopier®, Impact® ve Rampact® DKK yöntemlerinin zemin cinslerine göre uygulanabilirliği görülmektedir.

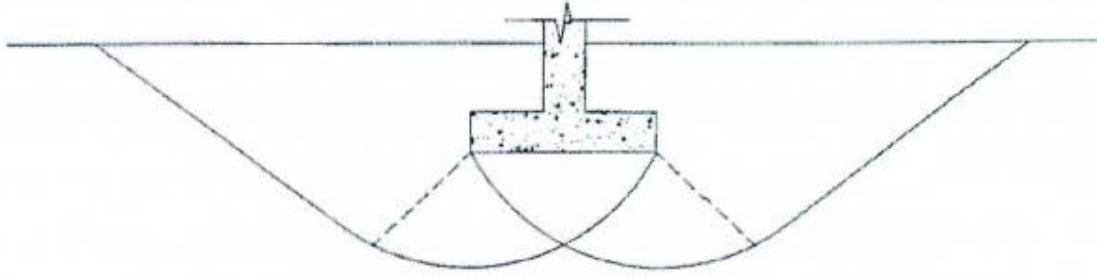


Şekil 2.40 DKK Yöntemlerinin Zemin Tipine Göre Uygulanabilirliği

(Geopier Technical Workshop, 2014)

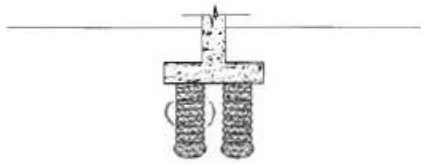
2.1.3.3. DKK'larda Taşıma Gücü Hesabı

Darbeli kırmataş kolonların (DKK) taşıma gücü irdelenirken, esas amaç zeminde oturmaları azaltmaktır. Şekil 2.41' de DKK tarafından iyileştirilmemiş bir zeminde, taşıma gücünün aşılması durumunda göçme durumu görülmektedir.

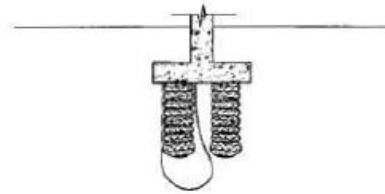


Şekil 2.41 Taşıma Gücünün Aşılması Durumu (Wissmann, 1999)

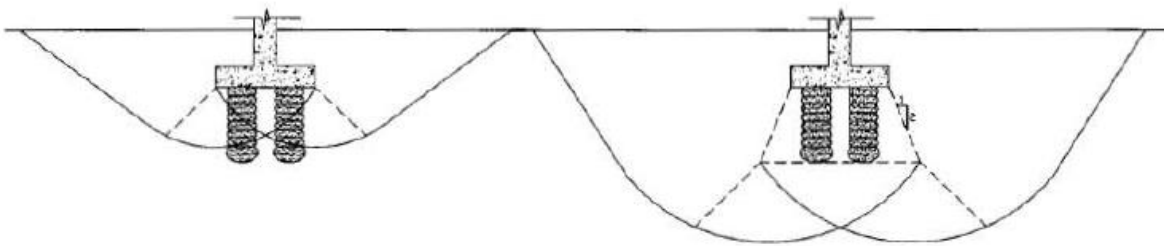
DKK'larla iyileştirilmiş bir zemin ortamında tekil kolonda ve grup halinde kolonlarda taşıma gücünün aşılması durumu Şekil 2.42' de gösterilmiştir.



(a) Tekil Kolonda Şişme Göçmesi Yenilmesi



(b) Tekil Kolon Ucunda Kayma Göçmesi Yenilmesi



(c) DKK Elemanlarının Kayma Yenilmesi

(d) DKK Elemanlarının Ucunda Kayma Yenilmesi

Şekil 2.42 DKK ile İyileştirilmiş Zeminde Yenilme Durumları (Wissmann, 1999)

2.1.3.3.1. Tekil Darbeli Kırmataş Kolonlarda Yanal Şişme Yenilmesi

Tekil darbeli kırmataş kolonlarda (DKK) tekil taş kolonun yanar şişme yenilmesi Şekil 2.42a' da ki gibi olmaktadır.

Hughes ve Withers, (1974) kohezyonlu zemin için yanar şişmeden dolayı sınır taşıma gücü durumunu Formül 2.32' deki gibi belirtmiştir.

$$q_d = \sigma_{rL} \tan^2(45 + \phi_c / 2) \dots \dots \dots (2.32)$$

Burada,

σ_{rL} : Kolonu çevreleyen sınır radyal gerilme,

ϕ_c : DKK kayma direnci açısı,

dır.

Kolonu çevreleyen sınır radyal gerilme, Formül 2.33' deki gibi bulunmaktadır.

$$\sigma_{rL} = \sigma_{r0} + c_u \left[1 + \ln \left(\frac{E_s}{(2 c_u (1 + \nu))} \right) \right] \dots \dots \dots (2.33)$$

Burada,

σ_{r0} : DKK yapıldıktan sonraki toplam radyal gerilme olup, kritik derinliğe (z_c), kadarki pasif yanar gerilme ile boşluksuyu basıncının toplamına eşittir.

E_s : DKK' larla iyileştirilmiş zeminin elastisite modülü,

ν : DKK ve zemini kapsayan ortamın poisson oranı,

olarak belirtilir.

Formül 2.33' de $E_s / c_u = 200$ ve $\nu = 0,5$ kabulü yapıldığı zaman, Formül 2.34' deki gibi sadeleştirilir:

$$\sigma_{rL} = 2 \sigma_0' + 5,2 c_u \dots \dots \dots (2.34)$$

Burada,

σ_0' : Kritik derinliğe kadarki düşey efektif gerilme,

dir.

Yanal şişme yenilmesinin en fazla olarak belireceği kritik derinlik (z_c), DKK' ların kayma direnci açısı, çapına ve temel gömme derinliğine bağlı olarak Formül 2.35' deki gibi bulunur.

$$z_c = D_f + D(\tan(45 + \phi_c / 2)) \dots\dots\dots (2.35)$$

Formül 2.32 ve Formül 2.34 birleştirildiği zaman ve DKK kayma direnci açısı 50° alınınca, sınır taşıma gücü Formül 2.36' daki gibi bulunmaktadır.

$$q_d = 15,1 \sigma_0' + 39,3c_u \dots\dots\dots (2.36)$$

2.1.3.3.2. Tekil Darbeli Kırmataş Kolonlarda Kayma Yenilmesi

Tekil darbeli kırmataş kolonlarda, kayma yenilmesi Şekil 2.42b' deki gibidir. DKK ağırlığı ihmal edilerek, tekil DKK uygulanan toplam sınır yük (Q_d), uç direnci (Q_g), ve çevre sürtünme direnci (Q_s), olmak üzere Formül 2.37' deki gibi iki bileşene ayrılmaktadır.

$$Q_d = Q_g + Q_s \dots\dots\dots (2.37)$$

Formül 2.37' yi daha ayrıntılı olarak ifade edersek,

$$q_d A_g = q_g A_g + fs A_s \dots\dots\dots (2.38)$$

elde edilir.

Burada,

A_g : Tekil DKK taban alanı,

q_g : Tekil DKK sınır uç direnci,

fs : Kolon gövdesi boyunca ortalama birim çeper sürtünme direnci,

A_s : Tekil DKK zemin içinde kalan yanal alanı,

olarak ifade edilir.

Formül 2.38 tekrar revize edilip düzenlendiğinde, sınır taşıma gücü Formül 2.39' daki gibi elde edilir. Sınır taşıma gücü 1,5 gibi bir güvenlik sayısına bölünerek emniyetli taşıma gücü bulunur.

$$q_d = (f_s A_s) / A_g + q_g = 4 f_s D_s H_s / D^2 + q_g \dots\dots\dots (2.39)$$

Burada,

H_s : DKK şaft uzunluğu,

D_s : DKK elemanları çekiçle sıkıştırıldıktan sonra oluşan şaft gövdesindeki çap değeri,

D : DKK elemanları çekiçle vurulmadan önceki nominal kolon çapı,

olarak ifade edilir.

DKK şaft gövdesindeki yarıçap (d_s), DKK nominal kolon yarıçapından (d), 3 inc (7,62 cm) daha fazladır.

DKK uç taşıma gücü Terzaghi-Buisman ifadesiyle Formül 2.40' daki gibi bulunur.

$$q_g = c N_c + 0,5 D_s \rho N_\gamma + \sigma_0' N_q \dots\dots\dots (2.40)$$

Drenajsız durum için,

Kolon gövdesi boyunca ortalama birim çeper sürtünme direnci ve ortalama drenajsız kayma direnci yaklaşık olarak birbirine eşit alınabilir. Bu durumda DKK uç taşıma gücü Formül 2.41' daki gibi ifade edilir.

$$q_g = c_u N_c \dots\dots\dots (2.41)$$

Burada N_c değeri çakma ve delme kazıklar için 9 alınırken, Formül 2.39 ve Formül 2.41 birleştirildiği zaman sınır taşıma gücü Formül 2.42' deki gibi bulunur.

$$q_d = 4 c_u D_s H_s / D^2 + 9 c_u \dots\dots\dots (2.42)$$

Drenajlı durum için,

Kolon gövdesi boyunca ortalama birim çeper sürtünme direnci ortalama efektif düşey gerilme ve zeminin kayma direnci açısının tanjantı cinsinden Formül 2.43' deki gibi ifade edilir.

$$f_s = \sigma_{\text{ort}}' \tan(\phi_s) K_p = \left(D_f + \frac{H_s}{2} \right) \rho \tan(\phi_s) \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_s}{2} \right) \dots \dots \dots (2.43)$$

Burada,

K_p : Zeminin pasif toprak basıncı katsayısı, ($K_p = \tan^2(45 + \phi_s / 2)$)

olarak ifade edilir.

2.1.3.3.3. DKK ile İyileştirilen Zeminde Kayma Yenilmesi

Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilen zeminlerde kayma yenilme durumu Şekil 2.42c' deki gibi görülmektedir. Göçme yüzeyi boyunca oluşacak kayma direnci, zeminin sürtünme direnci ve DKK sürtünme direncine bağlıdır. Kayma direnci parametreleri zemin ve DKK elemanında kapsayacak şekilde kompozit kayma direnci parametreleri Formül 2.44 ve 2.45' daki gibi elde edilmektedir (Priebe, 1978).

$$\phi_{\text{comp}} = \tan^{-1} \left((R_a \times n_s \tan(\phi_c) + (1 - R_a \times n_s) \tan(\phi_s)) \right) \dots \dots \dots (2.44)$$

$$c_{\text{comp}} = (1 - R_a \times n_s) c \dots \dots \dots (2.45)$$

Burada,

R_a : Alan oranı, (Formül 3.3' teki gibi bulunur.)

olarak ifade edilir.

Alan oranının, 0,4 katsayısıyla çarpılıp alınmasının daha güvenli olacağı belirtilmektedir. Taşıma gücü Formül 2.40' taki gibi Terzaghi-Buisman' daki yöntemle hesaplanabilmektedir. Bu formülde D_s çap değeri yerine, B temel genişliği alınır.

2.1.3.3.4. DKK ile İyileşen Zeminlerde Uç Bölgesinde Kayma Yenilmesi

Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilen zeminlerde uç bölgesinde kayma yenilme durumu Şekil 2.42d' deki gibi görülmektedir. DKK ile iyileştirilen zeminlerde gerilmenin 2:1 oranında dağılacağı ve alt ucundaki yenilme sınır taşıma gücü Formül 2.46 'daki gibi dir.

$$q_{\text{bottom}} = q_d \left(\frac{B \times L}{((B + H_s) \times (L + H_s))} \right) \dots \dots \dots (2.46)$$

Burada,

q_d : DKK alt bölge sınır taşıma gücü,

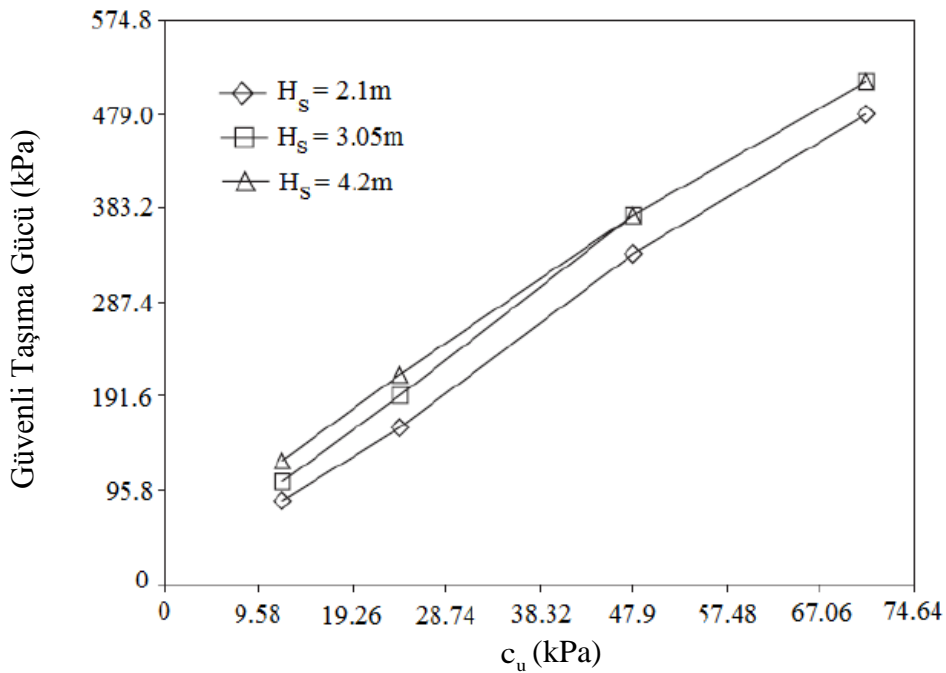
q_{bottom} : DKK ile iyileştirilmiş tabakanın alt ucundaki taşıma gücü,

B ve L : Temel boyutları,

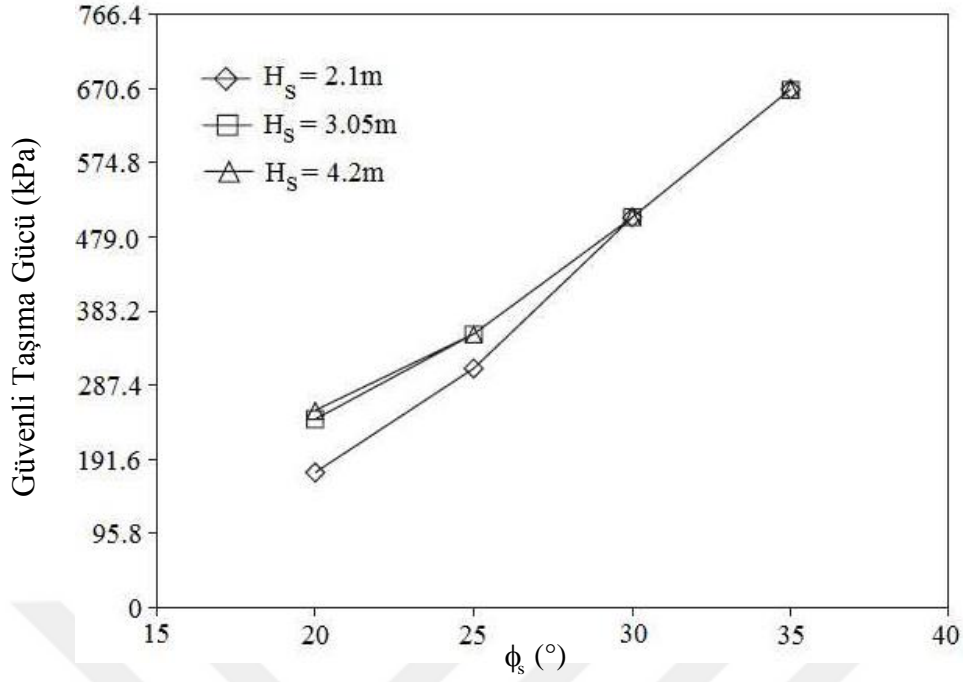
H_s : DKK shaft uzunluğu,

olarak ifade edilir.

DKK'larda taşıma gücü tahmini drenajlı ve drenajsız durum için Şekil 2.43 ve Şekil 2.44' teki gibi zeminin kayma direnci açısı ve drenajsız kayma direncine bakılarak güvenli taşıma gücü tahmin edilebilmektedir.

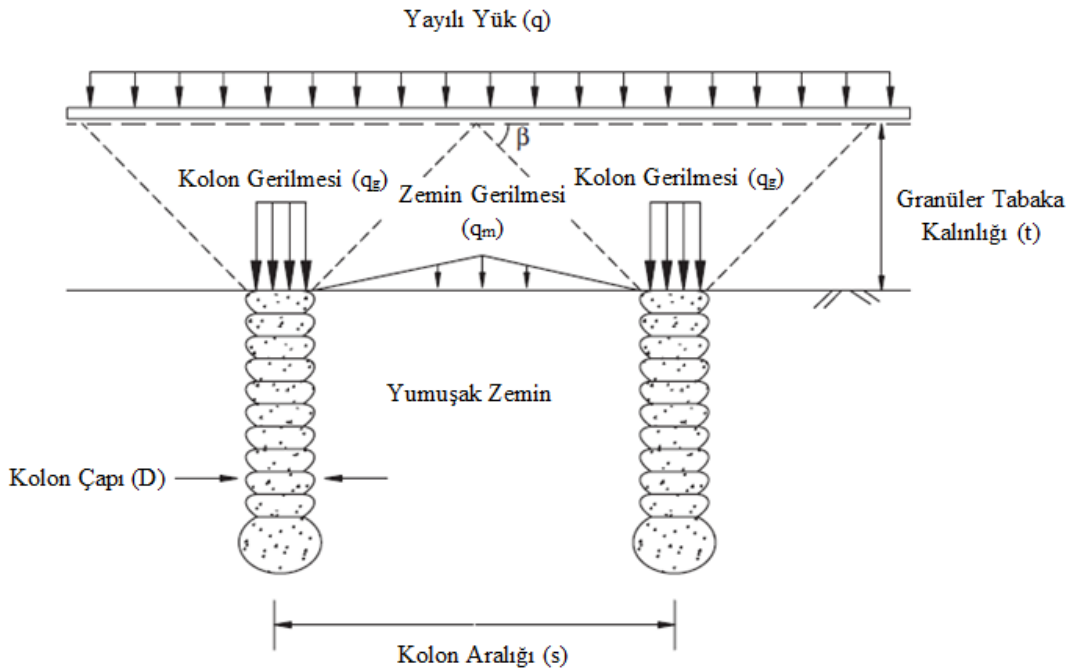


Şekil 2.43 Drenajsız Durum İçin Taşıma Gücü Tahmini (Wissman, 1999)



Şekil 2.44 Drenajlı Durum İçin Taşıma Gücü Tahmini (Wissman, 1999)

DKK' grup halinde yapıldığında, üst yapı yükleri çok yüksek mertebede olduğunda, istenilen tasarım gerilmesi altında, öngörülen oturmaları elde edebilmek için DKK' lar üzerine belli kalınlıkta granüler tabaka yapılabilmektedir. Üst yapılar bu granüler tabaka üzerine oturtularak, üst yapı yükleri rijit kolonlara daha güvenli şekilde aktarabilmektedir. Granüler tabaka yapımı aynı zamanda toplam ve farklı oturmaları da kontrol edebilmekte ve zemin ortamında üniform oturma sağlayabilmektedir (Şekil 2.45).



Şekil 2.45 Granüler Tabaka Altında DKK Davranışı

Şekil 2.45' te granüler tabaka altında DKK' ların yük aktarım mekanizması görülmektedir. Granüler tabaka yapılırken, granüler tabaka kalınlığı (t), Formül 2.47' deki ifadeyle kontrol edilmektedir.

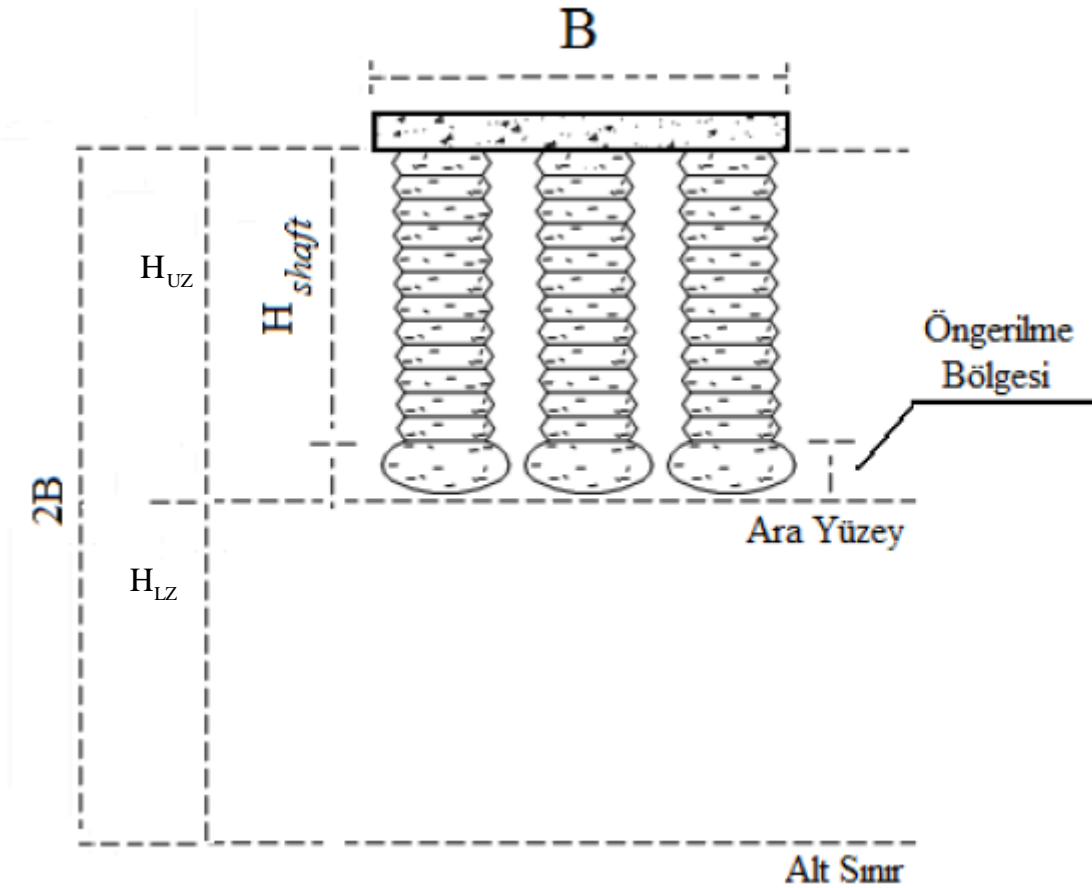
$$t \geq \frac{\tan\beta \times (s - D)}{2} \dots\dots\dots (2.47)$$

Burada, β granüler tabakanın taş kolon üzerinde yenilme açısıdır. β genellikle 45° alınır.

2.1.3.4. DKK' larda Oturma Hesabı

Darbeli kırmataş kolonlarda oturma analizi yapılırken toplam oturma (S_T), üst bölge oturması (S_{UZ}), ve alt bölge oturması (S_{LZ}), olarak üzere iki bileşene ayrılmaktadır (Formül 2.48). Üst bölge oturması iyileştirme yapılmış bölgenin oturması olup, alt bölge oturmasında geleneksel oturma yaklaşımlarına göre bulunmaktadır (Şekil 2.46).

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} \dots\dots\dots (2.48)$$



Şekil 2.46 DKK' larda Oturma Analizi (Fox ve Cowell, 1998)

Burada,

B : Temel genişliği,

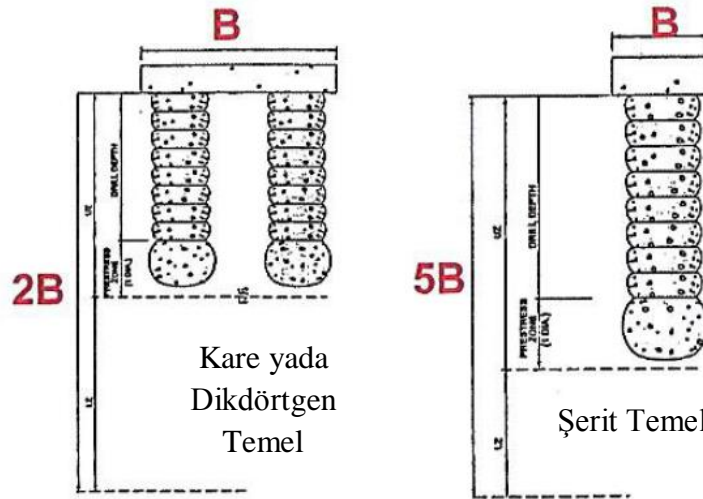
$2B$: Tekil temelde oturma analizi için etki derinliği,

H_{UZ} : Üst bölge tabaka kalınlığı,

H_{LZ} : Alt bölge tabaka kalınlığı,

olarak ifade edilir.

Şekil 2.47' de görülmek üzere kare yada dikdörtgen temel için ve şerit temeller için oturma analizi için alt ve üst bölge toplam kalınlığının alınacak miktarı gösterilmiştir. Kare yada dikdörtgen temel için bu kalınlık temel genişliğinin, 2 katı iken ($2B$) şerit temellerde ise bu kalınlık temel genişliğinin 5 katı ($5B$) olarak alınır.



Şekil 2.47 Temel Tiplerine Göre Alt ve Üst Bölge Kalınlığı
(Geopier Technical Workshop, 2014)

2.1.3.4.1. Üst Bölge Oturması

Üst bölge oturmasında zemin ile kolonlar birlikte kompozit bir malzeme varsayılarak, aynı miktarda oturma yaptığı kabul edilmektedir. Birim hücre prensibine göre kolonlar zeminden daha fazla yük gerilmesi alacaktır. Şekil 2.48' de kolon ve zeminlere gelen yük gerilmelerini ayrı ayrı kolonun ve zeminin rijitlik modülüne bölünmesiyle üst bölge oturması hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yapılırken, Winkler hipotezine göre, kolonun ve zeminin ayrı rijitlikte yay olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Böylece gerçekleşecek oturma Formül 2.49' daki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{UZ} = q_g / k_g = q_m / k_m \dots\dots\dots (2.49)$$

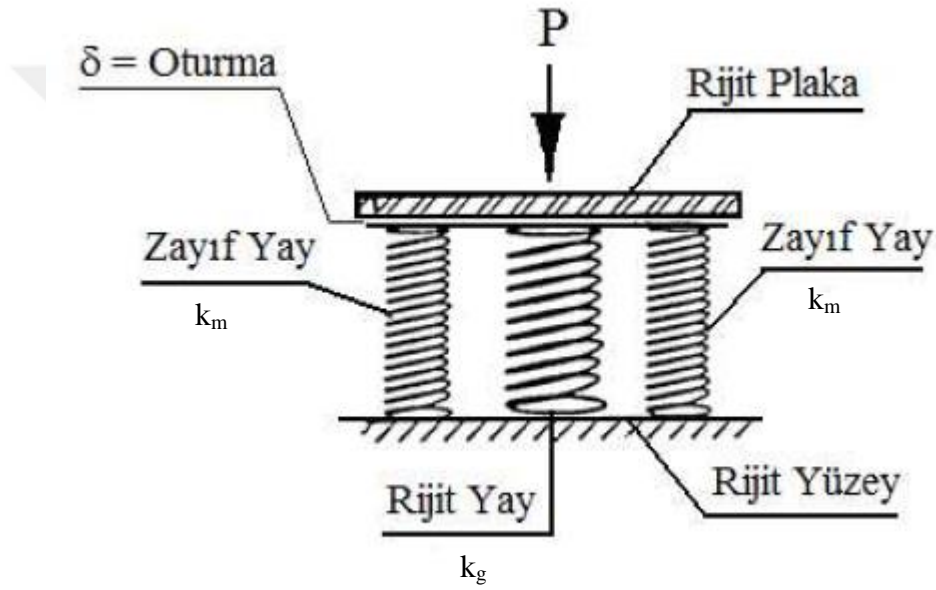
Burada,

q_g : Tekil DKK' ya gelen gerilme,

q_m : Zeminine gelen gerilme,

k_g ve k_m : Taş kolon ve zeminin rijitlik modülleri,

olarak ifade edilir.



Şekil 2.48 DKK Üst Oturma Analizi (Fox vd., 1998)

İyileştirilmiş bölgede (üst bölge) oturma analizi yapılması için öncelikle kuvvetler dengesinden net gerilme hesaplanmaktadır (Formül 2.50).

$$\Sigma F_v = q A - q_g A_g - q_m A_m = 0 \dots\dots\dots (2.50)$$

Burada,

q : Üst yapı gerilmesi,

A : Temel alanı,

A_g : Taş kolon taban alanı,

A_m : Zemin alanı,

olarak belirtilir.

Taş kolona gelen net gerilme Formül 2.51' deki gibi bulunur,

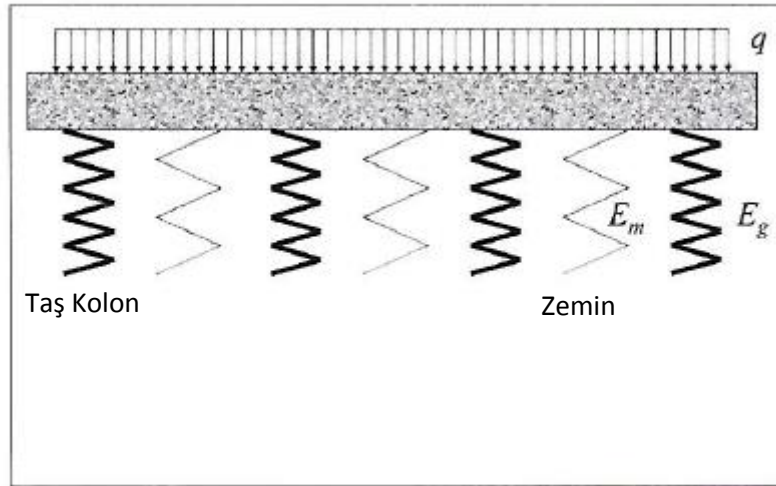
$$q_g = q \left[\frac{R_s}{R_s \times R_a - R_a + 1} \right] \dots \dots \dots (2.51)$$

Burada,

R_s : Rijitlik oranı olup, DKK elemanın rijitliğinin zeminin rijitliğine oranıdır.

olarak ifade edilir.

Üst Bölge oturma hesabında, elastik oturma hesabı yapılırken Şekil 2.49' da görüldüğü gibi farklı elastisite modüllerine sahip taş kolon (E_g), ve zemin (E_m), için birlikte çalıştığı varsayılarak Formül 2.52' deki gibi kompozit bir elastisite modülü (E_{comp}), hesaplanır.



Şekil 2.49 Elastik Oturma Hesabı

$$E_{comp} = (1 - R_a) E_m + R_a E_g \dots \dots \dots (2.52)$$

Üst bölgede, elastik oturma Formül 2.53' teki gibi hesaplanır.

$$S_{UZ} = (q I H_{UZ}) / E_{comp} \dots \dots \dots (2.53)$$

Burada,

q : Temel taban basıncı,

I : Etki faktörü,

olarak belirtilir.

2.1.3.4.2. Alt Bölge Oturması

Alt bölge oturması hesabı yapılırken, geleneksel oturma hesaplarından yararlanır. Bu bölgede yük artışından ötürü zeminin elastik oturma ve konsolidasyon oturması yapıldığı belirtilir.

Alt bölge, elastik oturma hesabı yapılırken Formül 2.54' deki bağıntı kullanılarak elastik oturma bulunur.

$$S_{LZ} = \frac{(q I H_{LZ})}{E} \dots\dots\dots (2.54)$$

Burada,

E : DKK alt bölgesindeki zeminin elastisite modülü,

olarak belirtilir.

Alt bölge için, konsolidasyon oturması normal konsolide zemin için Formül 2.55' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{LZ} = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H_{LZ} \log \left[\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right] \dots\dots\dots (2.55)$$

Burada,

c_c : Sıkışma indisi,

e_0 : Zeminin ilk boşluk oranı,

σ_0' : Düşey efektif gerilme,

$\Delta\sigma$: Alt bölge tabakasındaki gerilme artışı,

olarak ifade edilir.

2.1.3.5. DKK'larda Kalite Kontrol

DKK'larda yapılan kolonların imalata uygunluğunu belirlemek için bir takım kalite kontrol testleri yapılmaktadır. Bunlar; akış oranı testi, artan kırmataş hacim testi, kullanılan kırmataş hacim testi ve DKK yükleme testleridir (Wismann vd., 1999). Bu yöntemlere ilave olarak, uç dengeleme testi ve dinamik koni penetrasyon testi yapılmaktadır.

2.1.3.5.1. Akış Oranı Testi

Zemin örsenelip delindikten sonra mandrelin istenilen zemin kotuna indirirken, içinden boşalan kırmataşların geçiş hızı testi amacıyla yapılmaktadır. Geçiş hızı mandrel kaldırılırken, 5 saniye için 30 cm kırmataş geçişi olmalıdır. Eğer geçiş hızı az yada mandrel içinde kırmataş sıkışmış ise akış hızlandırıcı kullanılabilir.

2.1.3.5.2. Artan Kırmataş Hacim Testi

Zemin örsenelip delindikten sonra mandrel tarafından açılan delikte kullanılıp geriye kalan agregaların hacim kontrolü için yapılan testtir. Artan kırmataş hacmi zemine boşalan kırmataş konisinin hacmi olarak Formül 2.56' daki gibi bulunmaktadır.

$$V_{\text{artan kırmataş}} = \frac{\pi h (d_{\text{taban}})^2}{12} \dots\dots\dots (2.56)$$

Burada,

d_{taban} : Artan kırmataş konisinin taban çapı,

h : Artan kırmataş konisinin yüksekliği,

dir.

2.1.3.5.3. Kullanılan Kırmataş Hacim Testi

Kullanılan kırmataş hacmi, DKK yapımında mandrele konulan kullanılan kırmataş taş hacmi ile DKK yapımından sonra kullanılmayan kırmataş hacmi farkına eşittir.

2.1.3.5.4. Uç Dengeleme Testi (BST)

Uç Dengeleme testi ilk yapılan DKK katmanındaki sıkışmanın kontrolü için yapılan bir testtir. İlk uç katman yapılırken, belli bir yükseklik düzeyi referans seçilir ve 10 saniye boyunca sıkıştırma yapılır. Bu sıkışmanın 10 saniye içinde 1-2 inc (2,54- 5,08 cm) olması gerektiğini belirtmektedir.

2.1.3.5.5. Dinamik Koni Penetrasyon Testi (DCP)

Dinamik Koni Penetrasyon testi, 20 mm çapında 60° açığa sahip, konik ucun 575 mm yükseklikten, elle 8 kg ağırlığındaki tokmağın kaldırıp düşürülmesiyle, batan miktarı darbe cinsinden (mm/darbe) veren arazi deney yöntemidir. Taş kolonlarda, 1,75 inc (4,445 cm) için vuruş sayısının 15' ten fazla olması gerektiğini belirtmektedir. Eğer bu vuruş sayısı 15' ten küçük ise, agregalar sıkıştırma sırasında daha fazla vurularak sıkıştırılmalı, agregaların nem kontrolü yapılmalı yada başka agregaya çeşidi kullanılmalıdır. Bu test tekil taş kolonun 1/3'ünden fazlasını kapsayacak şekilde yapılmalı ayrıca proje başında 5 ardışık test yapılarak bu sonuçlar kıyaslanmalıdır.

2.1.3.5.6. DKK Yükleme Testi

Yükleme testi, zemin ortamının karmaşık olmasından ötürü, gerçek arazide DKK'ların göstereceği performansları yerinde anlamak, taşıma güçlerini, yük altında yapacakları oturmaları ve kolon rijitliğini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Yükleme yapılırken ASTM D-1143 deney kuralları uygulanmaktadır. Yüklenecek DKK, tasarımda öngörülen gerilmenin %150'sine kadar yüklenmelidir. Yükleme sırasında taş kolon üzerindeki yük tasarım yükünün %112'nin dışında yükleme sırasında, oturma hızı 0,0254 cm/saat altında ise yükleme okumaları minimum 15 dakika maksimum 1 saat içinde okuma alınarak bir sonraki yük kademesine geçilecektir. Kolon üzerindeki yük tasarım yükünün %112'si ise ve oturma hızı 0,0254 cm/saat ise yükleme okumaları minimum 15 dakika maksimum 4 saat içinde okuma alınarak bir sonraki yükleme kademesine geçilecektir. Şekil 2.50'de yükleme sırasında yükleri ölçmek, plaka ve kolon altında okumaları almak için taban plakasına bağlanan demir çubuklar (tell-tale) görülmektedir.



Şekil 2.50 Taş Kolon Yükleme Düzenegi (Kurt, 2011)

2.1.3.6. DKK' ların Taş Kolonlardan Üstünlükleri

- 1) Taş kolonlar doğal zeminden 2-5 kat, DKK ise doğal zeminden 10-40 kat daha rijittir. DKK sistemleri taş kolon sistemlerine göre 3-7 kat daha rijittir.
- 2) DKK sistemi yöntemleri kuru ve temiz yapılan bir süreçtir. Sahada elektrik ve su gibi yöntemlere ihtiyaç duyulmaz.
- 3) DKK sistemleri taş kolonlara göre daha az maliyetlidir.
- 4) Temiz ve çevreci yöntem olup taş kolonlara göre daha hızlı imal edilebilmektedir.
- 5) DKK sistemleri düşey darbeleme etkisiyle taş kolonlardan daha yüksek kesme dayanımına, kayma direnci açısına ve rijitliğe sahiptir.
- 6) Taş kolonlarda sadece düşey yönde sıkışma olurken, DKK' larda ise hem düşey hemde yatay yönde sıkışma oluşarak, ortamda yatay gerilmeleride arttırmaktadır.

3. DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARDA HESAPLAMALAR

Darbeli kırmataş kolonların kullanım amaçları ortamda oturmaları azaltmak ve taşıma gücünü artırmaktır. Buna paralel olarak bu bölümde temeller ve granüler tabaka altına uygulanan DKK' ların taşıma gücü ve oturma miktarları hesaplanarak, DKK' lar yapılmadan önce ve yapıldıktan sonraki oturma miktarları karşılaştırılarak sayısal sonuçlar irdelenmiştir. DKK' larda bir diğer önemli konu, shaft uzunluğu boyunca oluşan maksimum pasif yatay gerilmeyi karşılayabilmelidirler. Yatay gerime kontrolünden sonra, shaft uzunluğunun DKK' lara gelen kolon yükünü karşılayabilecek uzunlukta olmalıdır. Hesaplar, örnek modeller üzerinde EK- A' da yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. DKK' larda Oturma Kontrolü

3.1.1. Temeller Altındaki Geopier® DKK' larda Oturma Miktarı

Darbeli kırmataş kolonlarda oturma hesabı irdelenirken, ilk önce temel altında DKK şaft uzunluğu boyunca ortalama SPT-N sayısı alınarak, Tablo 3.1.' deki gibi SPT-N sayılarına göre ilgili Geopier® DKK' larla iyileştirilmiş ortamdaki zemin tipine göre izin verilebilir taşıma gücü tekil DKK taşıma gücü (Q_{cell}), ve Geopier® DKK rijitlik modülü (k_g), seçilir. Şaft uzunluğu genel olarak 8-14 feet (2,4-4,2 m) arasında seçilir. Geopier® DKK' ların kolon çapı 0,76 m olarak alınır. Ortalama SPT-N sayısına göre Tablo 3.1.' den tasarım parametreleri seçimi yapıldıktan sonra, Formül 3.1' den temel altındaki taş kolon adeti bulunur.

$$N(\text{Taş kolon adeti}) = Q_{max} / Q_{cell} \dots\dots\dots (3.1)$$

Burada,

Q_{max} : Üst yapıdan temele gelen maksimum düşey yük,

Q_{cell} : Taş kolon ve temelin taşıma kapasitesi,

olarak ifade edilir.

Taş kolon adeti bulunduktan sonra temel taban alanı (A_T), Formül 3.2' deki gibi bulunur.

$$A_T = Q_{max} / q_a \dots\dots\dots (3.2)$$

Burada,

q_a : Tablo 3.1.'den bulunan izin verilebilir taşıma gücü,

olarak ifade edilir.

Temel alanı bulunduktan sonra temel boyutları B ve L temel alanına göre kare yada dikdörtgen temel olacak şekilde irdelenir.

Temel boyutları B ve L irdelendikten sonra, alan oranı Formül 3.3' teki gibi bulunur.

$$Ra = A_{eg} / A_T \dots\dots\dots (3.3)$$

Burada,

A_g : Toplam taş kolonların taban alanı,

A_T : Temelin taban alanı,

dır.

Alan oranı bulunduktan sonra, rijitlik oranı Formül 3.4' deki gibi bulunur.

$$R_s = k_g / k_m \dots\dots\dots (3.4)$$

Burada,

k_g : Geopier® DKK rijitlik modülü,

k_m : DKK' larla iyileştirilen zeminin rijitlik modülü,

olarak ifade edilir.

Rijitlik oranı (R_s), DKK' lar için 5-45 aralığında değişmektedir.

Alan oranı (R_a), ve rijitlik oranı (R_s), bulunduktan sonra taş kolona gelen gerilme (q_g), Formül 3.5' teki gibi bulunur.

$$q_g = q \left[\frac{R_s}{R_s \times R_a - R_a + 1} \right] \dots\dots\dots (3.5)$$

Oturma analizi yapılırken toplam tabaka kalınlığı tekil temeller için temel genişliğinin, (2B) katı alınırken, şerit temeller için ise temel genişliğinin (5B) katı derinlik olarak alınmaktadır. Oturma analizi için toplam tabaka kalınlığı, üst bölge tabaka kalınlığı ve alt bölge kalınlığı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Üst bölge kalınlığı Formül 3.6' daki gibi bulunur.

$$H_{UZ} = H_s + D \dots\dots\dots (3.6)$$

Tablo 3.1. 0,76 m Çap İçin Geopier® DKK Tasarım Parametreleri (Geopier Technical Workshop, 2014)

SPT -N	UCS (kPa)	Kum ve Kumlu Silt			Kil ve Silt			Turba		
		İzin Verilen Temel Tasarım Taşıma Gücü (q_a) kPa	Taş Kolon ve Temelin Taşıma Kapasitesi (Q_{cell}) kN	Taş Kolonların Rijitlik Modülü (k_g) MN/m ³	İzin Verilen Temel Tasarım Taşıma Gücü (q_a) kPa	Taş Kolon ve Temelin Taşıma Kapasitesi (Q_{cell}) kN	Taş Kolonların Rijitlik Modülü (k_g) MN/m ³	İzin Verilen Temel Tasarım Taşıma Gücü (q_a) kPa	Taş Kolon ve Temelin Taşıma Kapasitesi (Q_{cell}) kN	Taş Kolonların Rijitlik Modülü (k_g) MN/m ³
1-3	10-48	239	289	44,8	215	222	33,9	168	133	20,4
4-6	48-110	287	400	61,1	240	311	47,5	191	200	29,9
7-9	110-168	335	467	70,6	287	378	57	239	245	33,9
10-12	168-220	383	512	77,4	335	445	67,9	-	-	-
13-16	220-287	407	556	84,1	335	467	70,6	-	-	-
17-25	287-383	431	578	88,2	359	489	74,7	-	-	-
25 ve üstü	383 ve üstü	479	645	97,2	407	534	81,5	-	-	-

Burada,

H_s : DKK shaft uzunluğu, (2,4 - 4,2 m arasında alınır.)

D : DKK çapı, (Geopier® DKK için 0,76 m olarak alınır.)

olarak ifade edilir.

Alt bölge tabaka kalınlığı toplam tabaka kalınlığından (2B veya 5B), üst bölge tabaka kalınlığının çıkarılmasıyla bulunur.

$$H_{LZ} = (2B \text{ veya } 5B) - H_{UZ} \dots\dots\dots (3.7)$$

Toplam oturma bulunurken, üst bölge oturması ve alt bölge oturması olarak iki bileşene ayrılmaktadır.

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} \dots\dots\dots (3.8)$$

Üst bölge oturması, taş kolonlara gelen gerilmenin Geopier® DKK rijitlik modülüne, bölünmesiyle Formül 3.9' daki gibi bulunur.

$$S_{UZ} = q_g / k_g \dots\dots\dots (3.9)$$

Alt bölge oturması, geleneksel elastik oturma ve konsolidasyon oturma yöntemine göre bulunmaktadır.

Elastik oturma,

$$S_{LZ} = (q \text{ I } H_{LZ}) / E \dots\dots\dots (3.10)$$

Konsolidasyon oturması,

Normal konsolide zemin için Formül 3.11' teki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{LZ} = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H_{LZ} \log \left[\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right] \dots\dots\dots (3.11)$$

3.1.2. Granüler Tabaka Altındaki DKK' larda Oturma Bulunuşu

Ağır yükleme durumlarının olduğu elverişsiz zemin ortamlarında, üst yapı yüklemelerin DKK' lara daha kontrollü aktarılması için ve oturmaların daha da azaltılması için DKK' ların üstüne belli kalınlıkta granüler tabaka yapılır. Oturma miktarı bulunmadan önce yapılacak ilk işlem Geopier® DKK' ların olduğu zemin tabakasında ortalama SPT-N sayısı alınarak Tablo 3.1.' den SPT-N sayısına göre gerekli parametre seçimleri yapılır. Parametre seçimleri yapıldıktan sonra DKK kolon aralıkları Formül 3.12' deki gibi belirlenir.

$$s = \sqrt{\frac{Q_{\text{cell}}}{q}} \dots\dots\dots (3.12)$$

Kolon aralıkları bulunduktan sonra, DKK' lar üzerindeki granüler tabaka kalınlığı Formül 3.13' teki gibi bulunur.

$$t \geq \frac{s - D}{2} \dots\dots\dots (3.13)$$

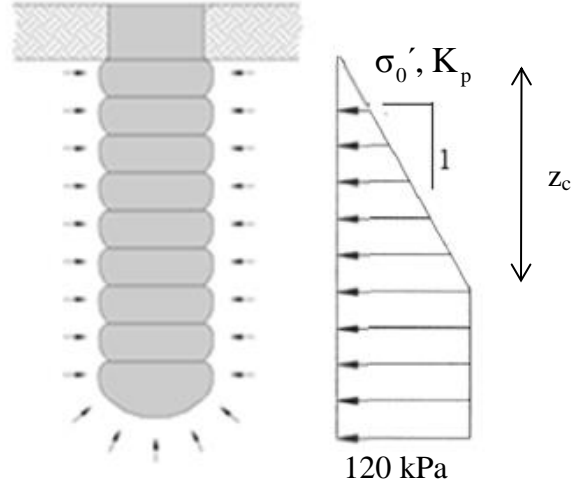
Granüler tabaka kalınlığı bulunduktan sonra alan oranı Formül 3.14' deki gibi bulunur.

$$Ra = A_g / s^2 \dots\dots\dots (3.14)$$

Rijitlik oranı, Formül 3.4' deki gibi bulunur. Alan oranı ve rijitlik oranı bulunduktan sonra, DKK gelen gerilme miktarı Formül 3.5' deki gibi bulunur. Oturma analizi yapılırken granüler tabaka altındaki Geopier® DKK' Formül 3.9 ve 3.10 ele alınarak oturma miktarları bulunur.

3.2. DKK' larda Şaft Uzunluğu Bulunuşu

DKK' larda şaft uzunluğu genel olarak 2,4 - 4,2 m arasında seçilebilir. Şaft uzunluğu seçildikten sonra öncelikli olarak DKK' ların kolon uçlarına kadar olan pasif direnç bulunur. Maksimum pasif direnç 120 kPa' dan fazla olmamalıdır. 120 kPa' dan fazla pasif direnç oluşursa kritik derinliğe (z_c), göre Şekil 3.2'deki gibi maksimum 120 kPa olacak şekilde revize edilir (Handy, 2001).



Şekil 3.1 DKK' larda Şaft Uzunluğu Bulunuşu
(Geopier Foudation Co. Inc Technical Bulletin)

Burada,

z_c : Kritik derinliktir. Kritik derinlik maksimum pasif yatay gerilmenin 120 kPa olduğu derinliktir.

Kritik derinlik kolon ucuna kadar maksimum pasif yatay gerilme 120 kPa' a eşit olacak şekilde Formül 3.15' deki gibi bulunur.

$$120 = \rho z_c K_p \dots\dots\dots (3.15)$$

Burada,

K_p : Yatay pasif toprak basıncı katsayısı, ($K_p = \tan^2(45 + \phi_s / 2)$)

olarak ifade edilir.

Yatay gerilme irdelemesi yapıldıktan sonra, şaft uzunluğu kontrolüne geçilir. Şaft uzunluğu kontrolü yapılırken ilk olarak Formül 3.5' teki gibi Geopier® DKK' lara gelen gerilme bulunur. Geopier® DKK' lara gelen gerilme bulunduktan sonra, Geopier® DKK kolon direnci Formül 3.16' daki gibi bulunur.

$$Q_g = q_g \pi (D/2)^2 \dots\dots\dots (3.16)$$

Kolon şaft uzunluğu kolon direncini (Q_g), sağlayacak kadar uzunluğa sahip olmalıdır. Bunun kontrolü yapılırken, seçilen şaft uzunluğu boyunca ortalama yatay pasif gerilme (σ_{hort}),

bulunur. Ortalama pasif yatay gerilmeden, şaft direncine (Q_g'), geçilirken Formül 3.17 ele alınır.

$$Q_g' = \sigma_{\text{hort}} \pi D \tan\phi_s \dots\dots\dots (3.17)$$

Q_g' , şaft direnci bulunduktan sonra, kolon direnci (Q_g), ile karşılaştırılır. $Q_g' \geq Q_g$ ise şaft uzunluğu yeterlidir. $Q_g' < Q_g$ ise şaft uzunluğu artırılarak tekrar şaft direnci bulunarak kolon direnciyle karşılaştırılır.

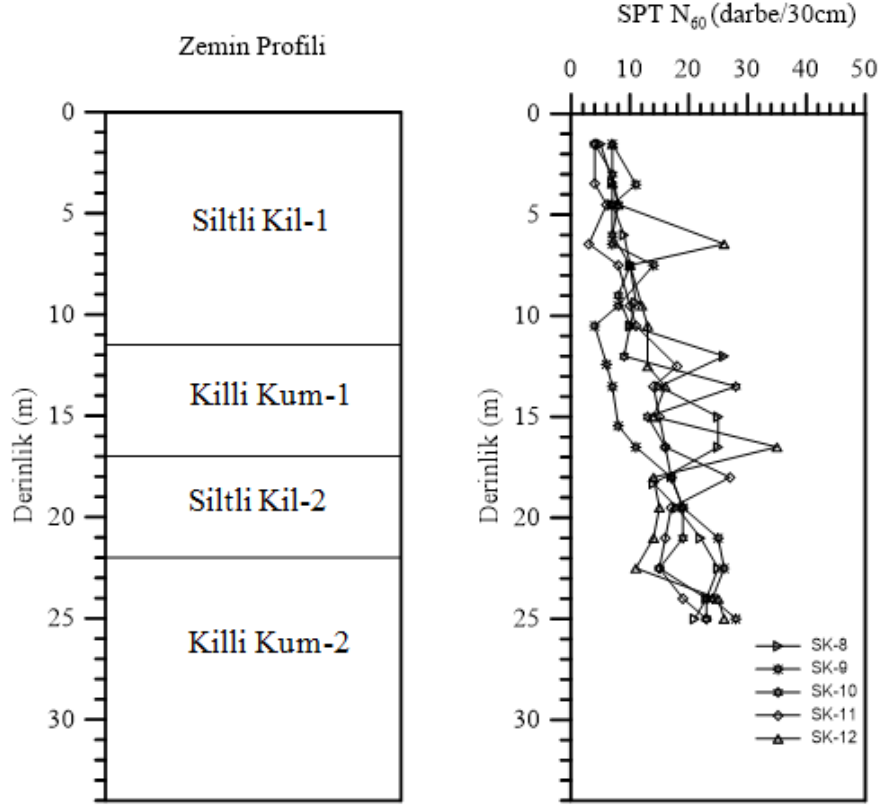
DKK' larda oturma miktarı ve şaft uzunluğu bulunuşunun sayısal örnekleri EK-A' da gösterilmiştir.

4. DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ

Bu bölümde Jeotermal Enerji Santrali projesinde yapılmış olan grup halindeki DKK' ların Plaxis 2D sonlu elemanlar programında farklı yöntemlerle modellenmesi yapılarak DKK' lı ve DKK' sız ortamda yayılı temel altındaki oturmaları karşılaştırılmıştır.

4.1. Proje Özellikleri

Jeotermal Enerji Santrali projesinde Şekil 4.1.' de görüldüğü gibi 4 farklı zemin tabakası görülmektedir. Impact® yöntemine göre imal edilen 50 cm çapındaki DKK' lar temel altına 1,7 m x 1,7 m mesafeli olarak kare yerleşim planına göre, şaft uzunluğu 17 m olacak şekilde zemine uygulanmıştır. DKK ve zemin özellikleri Tablo 4.1.' de verilmiştir.



Şekil 4.1 Zemin Tabakaları ve SPT-N Sayıları

Tablo 4.1. Jeotermal Enerji Santrali Projesi Zemin ve DKK Özellikleri

Zemin	Kalınlık (m)	ρ (kN/m ³)	ρ_{sat} (kN/m ³)	E_u (kPa)	E (kPa)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	ν	ν_u	k (m/gün)
Siltli Kil-1	11,5	18	19	-	2773	40	-	0	-	0,5	10^{-5}
Killi Kum-1	5,5	19	20	-	16800	-	-	35	0,3	-	1
Siltli Kil-2	5	18	19	-	6240	90	-	0	-	0,5	10^{-5}
Killi Kum-2	12	19	20	-	20000	-	10	33	0,35	-	1
DKK	17	22	-	-	165000	-	0	45	0,25	-	-

Burada,

E_u : Drenajsız elastisite modülü,

ν_u : Drenajsız durumda poisson oranı,

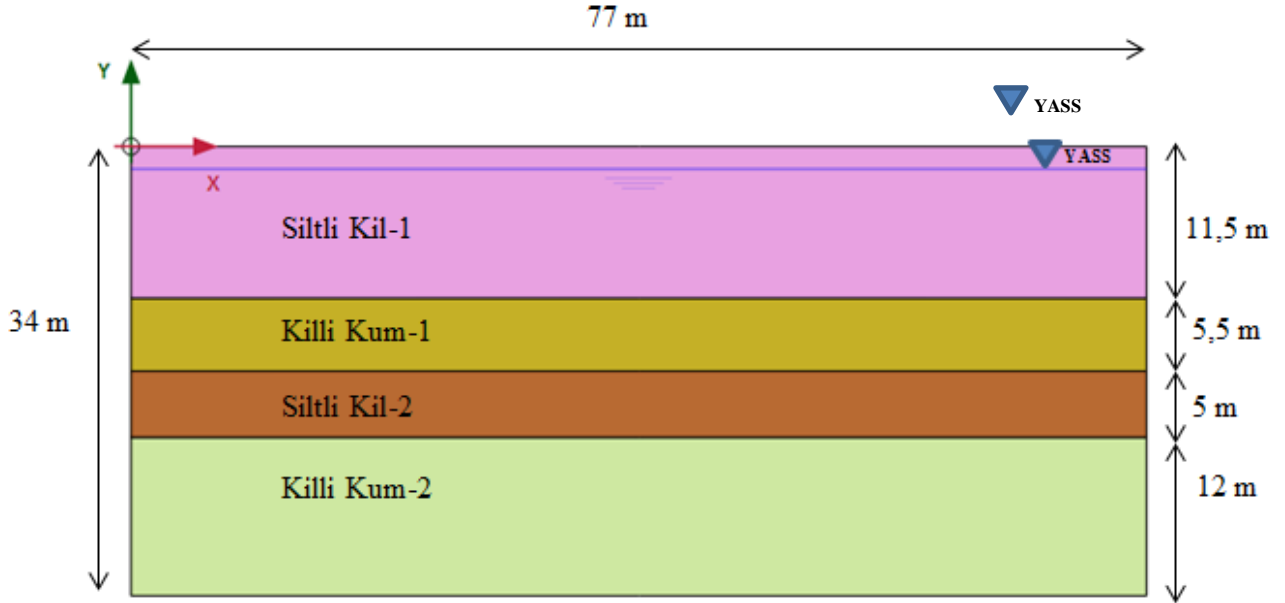
k : Geçirimsizlik katsayısı,

dır.

Proje verilerinde, DKK üstüne oturacak olan yayılı temelin boyutları, $B = 17$ m ve $L = 19$ m olup yayılı temel kalınlığı 60 cm dir. Üst yapıdan zemine gelen maksimum gerilme 100 kPa dır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden itibaren 1,7 m derinliktedir.

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Çalışmada, düzlem deformasyon (*Plane Strain*) modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizlerde zeminin, gerilme deformasyon davranışını hiperbol olarak tanımlayıp, 3 farklı elastisite modülünü esas aldığından dolayı ve zeminin elastoplastik özelliğini daha iyi ifade etmesinden ötürü pekleşen zemin modeli, (*Hardening Soil*) esas alınarak tüm analizler drenajlı duruma göre yapılmıştır. Şekil 4.2’ de görülmek üzere, sınır koşullar yatay düzlemde, minimum (x_{min}) 0 m, maksimum (x_{max}) 77 m, düşey düzlemde ise minimum (y_{min}) 0 m, maksimum (y_{max}) 34 m, alınmıştır. Analiz yapılırken 3 farklı yöntem esas alınarak yayılı temeldeki toplam oturmalar karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler, DKK’sız ortamda temeldeki oturmalar, DKK ile oluşan kompozit zemin modeline göre temeldeki oturmalar ve DKK’ lı ortamda temeldeki oturmalar olmak üzere üç farklı analiz sonuçları irdelenmiştir.

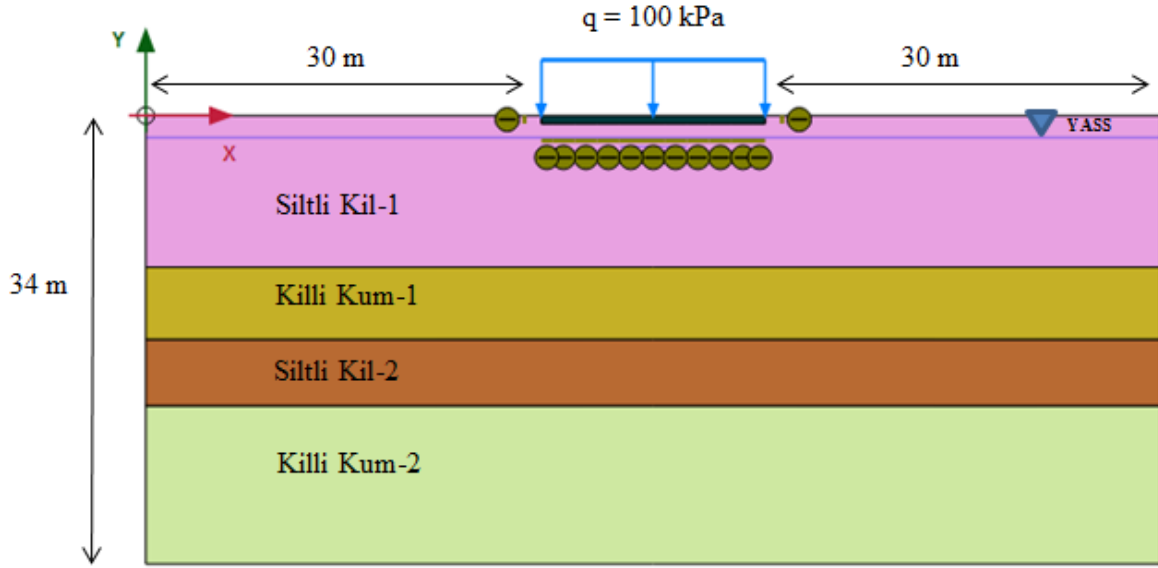


Şekil 4.2 Plaxis 2D Programında Zemin Tabakalarının Modellenmesi

4.2.1. DKK’sız Ortamda Temeldeki Oturmalar

DKK’ sız ortamda analiz yapılırken, Bölüm 4.2’ deki sınır koşulları alınarak Şekil 4.3’ te görüldüğü gibi 17 m genişliğinde ve 60 cm kalınlığında yayılı temel zemin modelinin ortasına, sağ ve soldan 30 m açıklık kalacak şekilde, 100 kPa yayılı yük etkilmiştir. Temel

ile zemin arasına arayüz bölgesi (*interface*) tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri ve yayılı temel parametreleri Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.' te verilmiştir.



Şekil 4.3 Yayılı Temelin Modellenmesi

Proje verilerinde, bazı zeminlerin drenajlı parametreleri bulunmadığından, analizlerde Siltli Kil-1 ve Siltli Kil-2 zemin tabakaları için kayma direnci değerleri (τ), Tablo 4.1.' deki drenajsız kayma direncine eşit alınarak, Siltli Kil-1 için 40 kPa ve Siltli Kil-2 için 90 kPa alınmıştır. Bu değerlerle birlikte Siltli Kil-1 ve Siltli Kil-2 zeminlerinin tabaka ortalarına kadar efektif gerilme değerleri alınarak, Formül 4.1' deki kayma direnci ifadesine göre efektif kohezyon değerleri bulunmuştur.

$$\tau = c' + \sigma_0' \tan\phi' \dots\dots\dots (4.1)$$

Siltli Kil-1 için, $\phi' = 25^\circ$ kabul edilerek,

$$40 = c' + 64 \tan 25, \quad c' = 10 \text{ kPa olur.}$$

Siltli Kil-2 için, $\phi' = 20^\circ$ kabul edilerek,

$$90 = c' + 182 \tan 20, \quad c' = 23 \text{ kPa olur.}$$

Tablo 4.2. Analizlerde Kullanılan Zemin Parametreleri

	Siltli Kil-1	Kili Kum-1	Siltli Kil-2	Killi Kum-2
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
ρ (kN/m ³)	18	19	18	19
ρ_{sat} (kN/m ³)	19	20	19	20
E_{50} (kPa)	2773	16800	6240	20000
E_{oed} (kPa)	2773	16800	6240	20000
E_{ur} (kPa)	8319	50400	18720	60000
v'_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2
c' (kPa)	10	5	23	10
ϕ' (°)	25	35	20	33
ψ (°)	0	5	0	3

Tablo 4.3. Analizde Kullanılan Yayılı Temel Özellikleri

Malzeme	Malzeme Modeli	Drenaj Durumu	ρ (kN/m ³)	E (GPa)	ν
Yayılı Temel	Lineer Elastik	Geçirimsiz	24	30	0,2

Burada,

E_{50} : Kiriş modülü,

E_{oed} : Ödometre modülü,

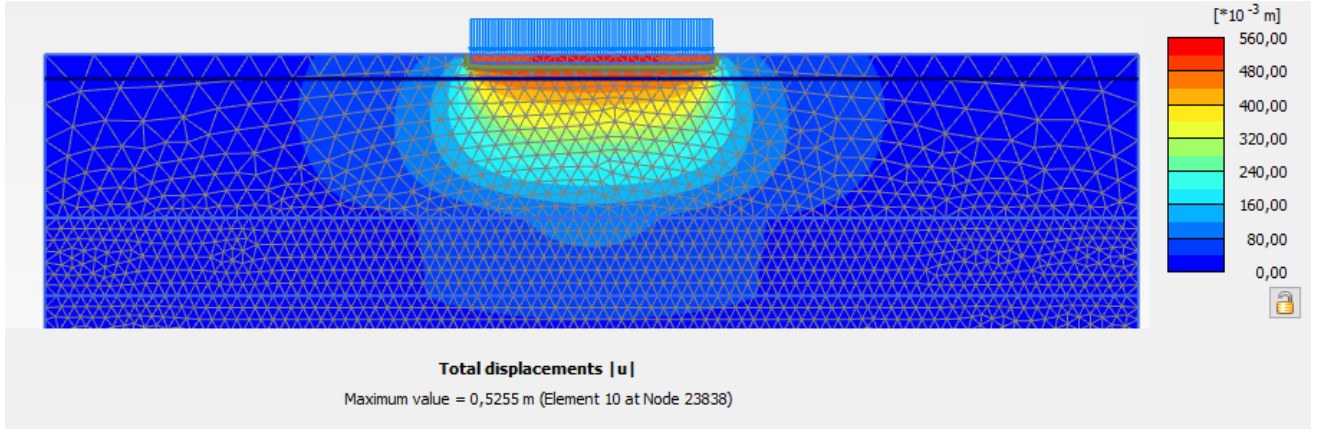
E_{ur} : Yükleme boşalma modülü,

v'_{ur} : Yükleme boşalma poisson oranı,

ψ : Kabarma açısı,

dır.

Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 4.4' te görüldüğü gibi toplamda 52,55 cm oturma görülmüştür.



Şekil 4.4 DKK'sız Ortamda Yayılı Temeldeki Toplam Oturma

Şekil 4.9' da görüldüğü gibi DKK'sız ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 6500 gün sürmektedir. Üst yapı inşaatının tamamlanması 186 gün sürmektedir. Bu süre içinde yayılı temel 25,17 cm oturma yapmaktadır. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 27,38 cm oturma görülmektedir.

4.2.2. Kompozit Zemin Ortamında Temeldeki Oturmalar

Kompozit zemin ortamında, Şekil 4.5' de görüldüğü gibi temel altındaki DKK'ların belli sınırlar içerisinde etki ettiği bölgede zeminin ve DKK' nın parametrelerini birlikte kapsayan iyileştirilmiş kompozit zemin bölgesi tanımlanmıştır. İyileştirilmiş kompozit zemin bölgesindeki elastisite modülü, kohezyon ve kayma direnci açısı alan oranına göre, Formül 4.2, 4.3 ve 4.4' teki gibi bulunarak kompozit zemin parametreleri elde edilerek Tablo 4.4.' te gösterilmiştir. Siltli Kil-1, Kili Kum- 1, Siltli Kil- 2 ve Killi Kum- 2 değerleri Tablo 4.2.' ye göre alınmıştır.

$$Ra = \frac{A_g}{s^2} = \frac{\pi(0,5/2)^2}{1,7^2} = 0,068$$

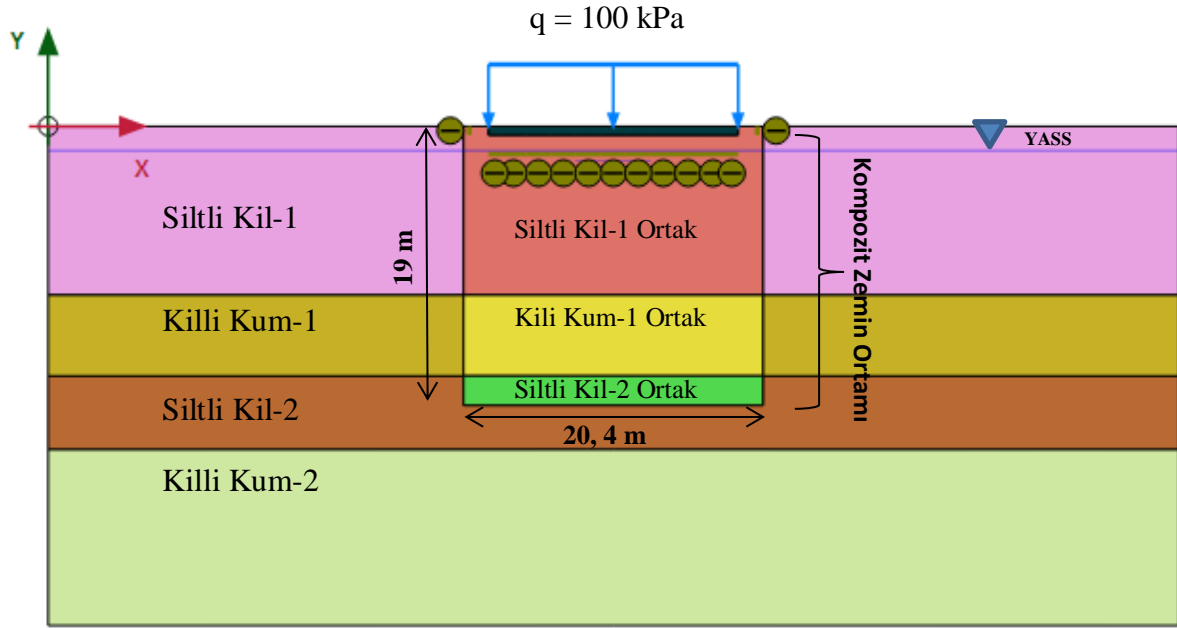
olarak elde edilir.

Burada,

A_g : DKK taban alanı,

s : DKK arasındaki mesafe,

dir.



Şekil 4.5 Kompozit Zemin Ortamı

Tablo 4.4. Kompozit Ortamda Zemin Parametreleri

	Siltli Kil-1 Ortak	Kili Kum-1 Ortak	Siltli Kil-2 Ortak
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin
Drenaj Durumu	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
ρ (kN/m ³)	18	19	18
ρ_{sat} (kN/m ³)	19	20	19
$E_{comp 50}$ (kPa)	13800	26880	17040
$E_{comp oed}$ (kPa)	13800	26880	17040
$E_{comp ur}$ (kPa)	41410	80630	51110
v'_{ur}	0,2	0,2	0,2
c'_{comp} (kPa)	10	5	22
ϕ'_{comp} (°)	26	35,6	22
ψ (°)	0	5	0

$$E_{comp} = (1 - Ra) E_{zemin} + Ra E_{DKK} \dots \dots \dots (4.2)$$

$$c'_{comp} = (1 - Ra) c'_{zemin} + Ra c'_{DKK} \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\phi'_{comp} = (1 - Ra) \phi'_{zemin} + Ra \phi'_{DKK} \dots \dots \dots (4.4)$$

Burada,

E_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak elastisite modülü,

c'_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak kohezyonu,

ϕ'_{comp} : DKK ve zemini kapsayan bölgenin ortak kayma direnci açısı,

R_a : Alan oranı,

dır.

Siltli Kil-1 Ortak için,

$$E_{\text{comp}} = (1 - R_a)E_{\text{zemin}} + R_a E_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 2773 + 0,068 \times 165000 = 13800 \text{ kPa olur.}$$

$$c'_{\text{comp}} = (1 - R_a)c_{\text{zemin}} + R_a c_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 10 + 0,068 \times 5 = 10 \text{ kPa olur.}$$

$$\phi'_{\text{comp}} = (1 - R_a)\phi_{\text{zemin}} + R_a \phi_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 25 + 0,068 \times 45 = 26^\circ \text{ olur.}$$

Killi Kum-1 Ortak için,

$$E_{\text{comp}} = (1 - R_a)E_{\text{zemin}} + R_a E_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 16800 + 0,068 \times 165000 = 26800 \text{ kPa olur.}$$

$$c'_{\text{comp}} = (1 - R_a)c_{\text{zemin}} + R_a c_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 5 + 0,068 \times 5 = 5 \text{ kPa olur.}$$

$$\phi'_{\text{comp}} = (1 - R_a)\phi_{\text{zemin}} + R_a \phi_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 35 + 0,068 \times 45 = 35,6^\circ \text{ olur.}$$

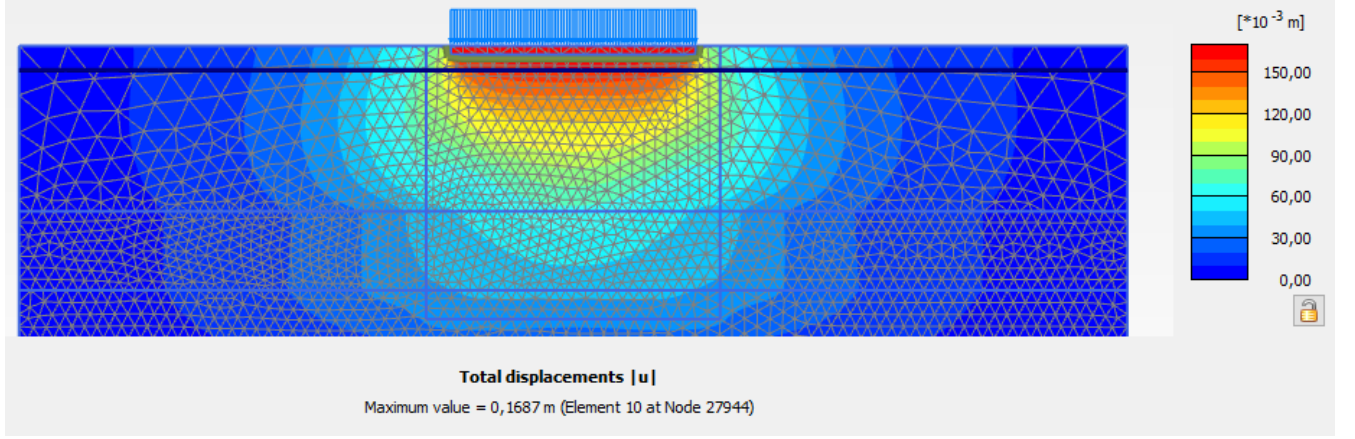
Siltli Kil-2 Ortak için,

$$E_{\text{comp}} = (1 - R_a)E_{\text{zemin}} + R_a E_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 6240 + 0,068 \times 165000 = 17040 \text{ kPa olur.}$$

$$c'_{\text{comp}} = (1 - R_a)c_{\text{zemin}} + R_a c_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 23 + 0,068 \times 5 = 22 \text{ kPa olur.}$$

$$\phi'_{\text{comp}} = (1 - R_a)\phi_{\text{zemin}} + R_a \phi_{\text{DKK}} = (1 - 0,068) \times 20 + 0,068 \times 45 = 22^\circ \text{ olur.}$$

Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 4.6' da görüldüğü gibi toplamda 16,87 cm oturma görülmüştür.

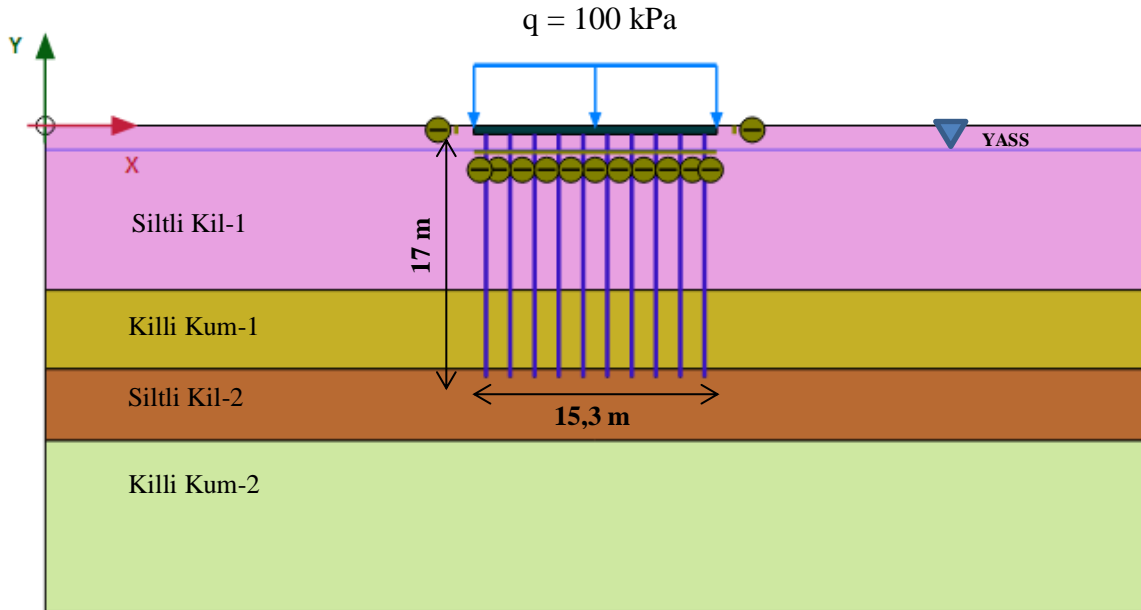


Şekil 4.6 Kompozit Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma

Şekil 4.9' da görüldüğü gibi kompozit ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 1500 gün sürmektedir. DKK' ların yapılması ve üst yapı inşaatının tamamlanması 216 gün sürmektedir. Bu süre zarfında yayılı temel 12,4 cm oturma yapmaktadır. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 4,47 cm oturma görülmektedir.

4.2.3. DKK' lı Ortamda Temeldeki Oturmalar

Bu yöntemde Şekil 4.7' de görüldüğü gibi yayılı temel altına 1,7 m aralıklarla 17 m uzunluğunda, DKK' lar tanımlanmıştır. Plaxis 2D programında kazıklar arasında mesafe tanımlaması yapılabilen *embedded beam row* özelliği kullanılarak, Tablo 4.5.' teki parametreler tanımlanmıştır. Siltli Kil-1, Killi Kum-1, Siltli Kil-2 ve Killi Kum-2 zemin parametreleri Tablo 4.2.' deki gibi alınmıştır.



Şekil 4.7 DKK' lı Modelleme

DKK uç direnci ve sürtünme direnci değerleri, bölüm 2.1.3.3.2. drenajsız durum için, sürtünme direnci (f_s), drenajsız kayma direncine eşit alınarak, uç direnci (Q_g), Formül 2.41' e göre uygun alınarak Tablo 4.5.'te gösterilmiştir.

Siltli Kil-1 bölgesinde ilk aşamada drenajsız kayma direnci 40 kPa olduğundan üst bölgede sürtünme direnci 40 kPa alınmıştır. Siltli Kil-2 bölgesinde ise, drenajsız kayma direnci 90 kPa olduğundan, alt bölgede sürtünme direnci 90 kPa alınmıştır. Ortalama olarak sürtünme direnci,

$$f_s = (40 + 90) / 2 = 65 \text{ kPa,}$$

birim genişlik için 65 kN/m alınmıştır.

Uç direnci,

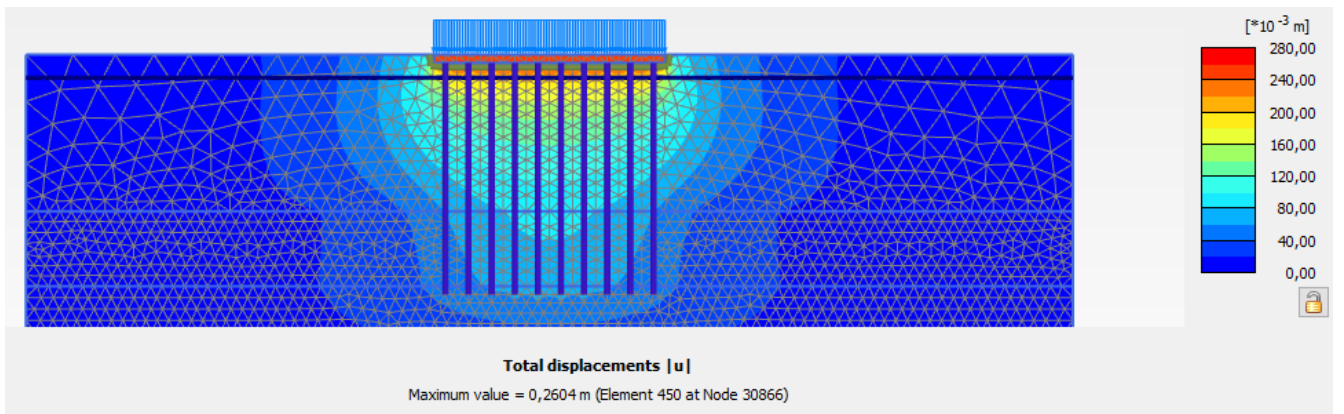
$$Q_g = 9 c_u A_g = 9 \times 90 \times \pi (0,5 / 2)^2 = 160 \text{ kN}$$

elde edilir.

Tablo 4.5. DKK Parametreleri

Malzeme	E (MPa)	ρ (kN/m ³)	Çap (m)	Sürtünme Direnci f_s (kN/m)	Uç Direnci Q_g (kN)
DKK	165	22	0,5	65	160

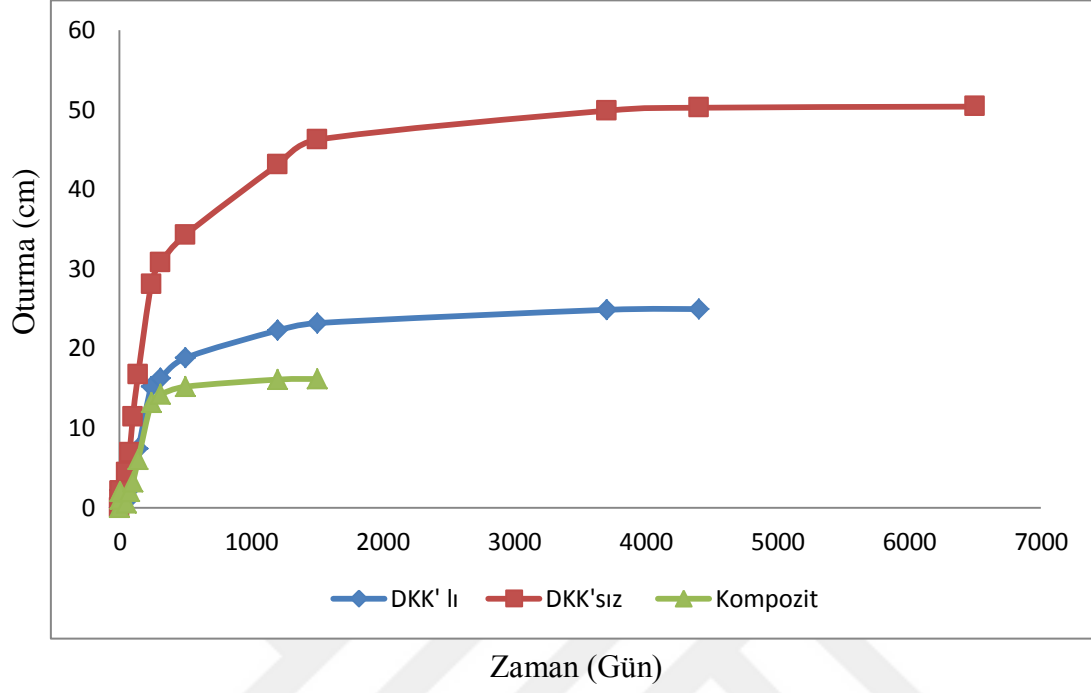
Kademeli olarak modellenen yayılı temelde, 100 kPa yayılı yük altında Şekil 4.8' de görüldüğü gibi toplamda 26,04 cm oturma görülmüştür.



Şekil 4.8 DKK' lı Ortamda Yayılı Temeldeki Oturma

Şekil 4.9' da görüldüğü gibi DKK' lı ortamda konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 4400 gün sürmektedir. DKK' ların yapılması ve üst yapı inşaatının tamamlanması 216 gün

sürmektedir. Bu süre zarfında yayılı temelde 14,5 cm oturma görülmektedir. Üst yapı inşaatı bittikten sonra temelde 11,54 cm oturma görülmektedir.



Şekil 4.9 Oturmaların Karşılaştırılması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Plaxis 2D sonlu elemanlar programında darbeli kırmataş kolonların grup halinde modellenmesi üzerinde ve uygulamadan örnek verilerek zeminde göstereceği performanslar irdelenmiştir. DKK' lar yetersiz taşıma gücünün olduğu ve aşırı oturmaların görüldüğü zeminlere uygulanmaktadır.

Bu çalışmada, grup halindeki Impact® DKK' ların araziye en yakın şekilde modellenmesi yapılarak 3 farklı durum üzerinde çalışılmıştır.

İlk modelde yayılı temelin DKK' sız ortamda drenajlı durumda (uzun vadede) yapacağı toplam oturma analiz edilmiştir. Analiz yapılırken kademeli olarak yayılı temel tanımlanıp, üst yapıdan 100 kPa yayılı yük zemine etkiletilerek, toplamda 52,55 cm konsolidasyon oturması saptanmıştır. Bu durum oturma açısından zemin ortamının çok elverişsiz olduğunu göstermektedir.

İkinci modelde, kompozit zemin modeli esas alınarak, DKK' ların temel altında etkilediği bölge sınırları içerisinde, zemin ve DKK parametrelerini kapsayan ortak elastisite modülü, kohezyon ve kayma direnci açısı değerleri tanımlanmıştır. Analiz yapılırken önce temel kazısının yapılması tanımlanarak, DKK' ların etkilediği bölgede ortak kompozit bölge oluşturulmuştur. Yayılı temel tanımlanıp, üst yapıdan 100 kPa yayılı yük zemine etkiletilerek, analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda yayılı temelde toplam 16,87 cm oturma görülmüştür. İlk modele göre toplam oturmalar, %68 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından ötürü, konsolidasyon oturmalarının %73' ü üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %76 oranında azalmıştır.

Üçüncü modelde DKK' lar 1,7 m aralıklarla kare yerleşim planına uygun olarak temel altına 17 m uzunluğunda olacak şekilde tanımlanmıştır. Analiz yapılırken önce temel kazısının yapılması tanımlanarak, DKK' lar 1,7 m aralıklarla temel altına tanımlanmıştır. DKK' lar tanımlandıktan sonra DKK' ların üstüne yayılı temel tanımlanmıştır. Son aşamada 100 kPa üst yapı yükü zemine etkiletilerek, analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda yayılı temelde toplamda 26,04 cm oturma görülmüştür. İlk modele göre toplam oturmalar, %50 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından ötürü konsolidasyon oturmalarının %55' i üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %32 oranında azalmıştır.

İkinci ve üçüncü model sonuçları analizlerde ele alınan zemin parametrelerinin farklı olmasından dolayı oturma açısından farklı sonuçlar göstermektedir. İkinci modelde kompozit zemin modeli esas alındığından ortak zemin parametreleri (E, c ve ϕ), tanımlanarak, üçüncü modelin zemin parametrelerinden daha yüksektir. Bu sebepten ötürü ikinci modelde oturmalar daha az bulunmuştur. Analiz sonuçlarına göre DKK' lar aşırı oturmaların olası görüldüğü zemin ortamlarında bu oturmaları azaltmaktadır.

Darbeli kırmataş kolonların, tasarımı yapılırken zemin ortamında yapacağı oturma miktarı konusunda, tasarım ve gerçek arazideki göstereceği performansların uyuşması, tasarımda bulunan oturmaların arazideki gerçek oturmaların karşılaştırılması yapılmalıdır. Tasarım yapılırken beklenen durumların arazideki uyumluluğu kontrol edilmelidir.

KAYNAKLAR

Aboshi, H. and Suematsu, N., (1985) “Sand Compaction Pile Method” state-of-the-art paper. Proceedings of 3rd International Geotechnical Seminar on Soil Improvement Methods, Nanyang Technological Institute, Singapore.

Alonso, J. A. and Jimenez, R., (2011) “Reliability Analysis of Stone Columns for Ground Improvement”, GeoRisk ASCE

Bae, W.S., Shin, B.W. and An, B.C., (2002) “Behaviors of Foundation System Improved with Stone Columns”, Kitakyushu, Japan.

Barksdale, R. D. and Bachus, R. C., (1983) “Design and Construction of Stone Columns”, vol.1. Report no. FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Bergado, D. T., Anderson, L. R., Muira, N., and Balasubramaniam, A. S., (1996) “Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments”. ASCE, 427.

Bergado, D. T., Alfaro, M. C., Chai, J. C. ve Balasubramaniam, A. S., (1994) “Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment” Balkema, Rotterdam, pp. 57 – 97.

Brauns, J. (1978). “Initial Bearing Capacity of Stone Columns and Sand Piles.” Vol. I, Proc., Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice, New South Wales Institute of Technology, Sydney, Australia, pp.497-512.

Carvajal, E., Vukotić, G., Castro, J. and Wehr, W., (2013) “Comparison Between Theoretical Procedures and Field Test Results For The Evaluation Of Installation Effects Of Vibro-Stone Columns”, Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00041-4

Çekinmez Z. ve Erol O., (2015) “Yüzer Tip Taş Kolonlarda Oturma Azaltım Oranı Üzerine Deneysel Bir Çalışma”, 6. Geoteknik Sempozyumu 26-27 Kasım 2015, Çukurova Üniversitesi, Adana

Choobbasti, A. J., Zahmatkesh A. and Noorzad R., (2011) “Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation”, Geotech Geol. Eng. 29:675-684 DOI 10.1007/s10706-011-9409-x

Datye, K.R. and Nagaraju S.S., (1975) “Installation and Testing of Rammed Stone Columns”, Proceedings of the Indian Geotechnical Society Specialty Session, 5th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangalore, India, 101–104.

Durgunoğlu, H.T., Kulaç, F., İkiz, S. ve Karadayılar, T., (1992) “Taş Kolonlar İle Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama” , Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, İTÜ

Düzceer, R. ve Gökalp A., (2002) “Akaryakıt Tank Temellerinin Taş Kolonlarla İyileştirilmesi” , Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

Fox, N. S. and Cowell, M.J., (1998) “Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manuel” , Geopier Foundation Company Inc. Scootsdale. A.Z.

Fox, N. S. and Edil, T.B., M.J., (2000) “Case Histories of Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement Construction over Peat and Highly Organic Soils” , Soft Ground Stabilization, pp. 146-157

Greenwood DA, Kirsch, K., (1983) “Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamics methods” . In: Proceedings, International Conference on Piling and Ground Treatment, Thomas Telford, London, pp 17–45

Greenwood, D. A., and Thompson, G. H., (1984) “Ground Stabilization, Deep Compaction and Grouting ” . ICE Works Construction Guides , Thomas Telford Ltd. London

Geopier Foundation Co. Inc Technical Bulletin

Geopier Technical Workshop, April 3-5 2014, Phoenix, Arizona

Handy, R L., (2001). Personal communication. March 1, 2001. Hsu, C. L. (2000). “Uplift Capacity of Geopier Foundations.” MS thesis. University of Utah.

Hughes, J.M.O. and Withers, N.J., (1974) “Reinforcing Of Soft Cohesive Soils With Stone Columns” , Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp 42-49.

Hughes, J.M.O., Withers, N.J. and Greenwood, D.A., (1975) “Afield Trial Of The Reinforcing Effect Of a Stone Column In Soil” , Geotechnique, 25(1), pp.31-44

Indian Standarts (IS 15284). “Design And Construction For Ground Improvement Guidelines Part 1 Stone Columns” , 2003

Jeludin, N. M., Sivakumar, V., O’Kelly, B. C. and Mackinnon, Pa. A., (2015) “Experimental Observations of Settlement of Footings Supported on Soft Clay Reinforced with Granular Columns: Laboratory Model Study” , DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001377. © 2015 American Society of Civil Engineers.

Kosho, A., (2000) “Ground Improvement Using the Vibro-Stone Column Technique” , ALTEA & Geostudio2000, Rr. Maliq Muco L. 6, Durres, Albania

Kurt, E., (2011) “Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Lawton, E.C. and Fox, N. S., (1994). “Settlement of Structures Supported on Marginal Old Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers” In-situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, 121-132

Madhav, M.R., (2007) “Granular Piles-Construction, Design and Behaviour”, Sri Lankan Geotechnical Society with International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering under the ISSMGE Touring Lecture Programme 17th & 18th December 2007 at Hotel Galadari.

Madhav, M.R. and Vitkar, P.P., (1978) “ Strip Footing on Weak Clay Stabilized with a Granular Trench or Pile” Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 605-609, 10.1139/t78-066.

Mitchell, J. K. and Huber, T. R., (1985) “Performance Of a Stone Column Foundation ” , Journal of Geotechnical Engineering, Vol.III, No. 2, February, 1985

Mitchell, J.K., (1982) “Soil improvement-State-of-the-Art, Proceedings”, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Stockholm, June, Vol. 4., pp. 509 565.

Mitchell, J.K., and Katti, R.K., (1981) “Soil Improvement-State-of-the-Art Report”, Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, pp.261-31

Moseley, M. P., and Kirsch, K., (2004) “Ground Improvement, 2nd Edition, SponPress, Taylor and Francis Group, London and New York.

Munfakh, G.A., (1984) “ Soil Reinforcement by Stone Columns-Varied Case Applications”, Int. Cnf. On Insitu Soil and Rock Reinforcement, Paris , pp:157-162

Önalp, A. ve Sert S., Geoteknik Bilgisi III , Birsen Yayınevi 2010

Poorooshab H. B. and Meyerhof, G. G., (1997) “Analysis of Behavior of Stone Columns and Lime Columns” , Computers and Geotechnics, Vol. 20, No. 1, pp. 47-70

Priebe, H. J., (1978), “Abschaetzung des Scherwiderstandes eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes,” Die Bautechnik, (55), 8, 281-284.

Priebe H.J., (1995) “The Design of Vibro Replacement”, Ground Engineering, pp:31-37

Selçuk, L., (2009) “Zemin Sıvılaşmasına Karşı Optimum Taş Kolon Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi”, Ankara Üniversitesi Doktora Tezi, Ankara

Tan, S., Ng, K. and Sun, J., (2014) “Column Group Analyses for Stone Column Reinforced Foundation From Soil Behaviour Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering ”, pp.597-608,doi: 10.1061/9780784413265.048

Van Impe, W.F, De Beer, E., (1983). “Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns”, Proceedings of 8th ECSMFE, Helsinki

Van Impe, W.F. and Madhav, M.R., (1992) “Analysis and Settlement of Dilating Stone Column Reinforced Soil”, Austrian Geotechnical Journal, 137: 114-121

Vesic, A.S., (1972) “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98(SM3), pp.365-290

White, D.J., (2001) “Personal Communication. September 13

White, D. J., Wissmann K. J., Barnes A. G. and Gaul A. J., (2002) “Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement.” Presented at Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington, D.C., January 13-17.

Wissmann, K. J., (1999) “Bearing Capacity of Geopier-Supported Foundation Systems” , Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Company, Inc., Mooresville, NC.

Wissmann, K. J., FitzPatrick, B.T. and White, D. J., (2002) ”Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elements”, Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, Malaysia

Wissmann, K. J., Fox, N. S. and Martin, P., (2000) “Rammed Aggregate Piers Defeat 75-Foot Long Driven Piles”, Proceedings, Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities, ASCE Special Publication, No.194, Amherst, Massachusetts

Wood, D. M., Hu, W. and Nash, F. T., (2000) “Group Effects In Stone Column Foundations: Model Tests” , Géotechnique 50, No. 6, 689-698

Zhang, L., Zhao, M., Shi, C. and Zhao H., (2013) “Settlement Calculation of Composite Foundation Reinforced with Stone Columns”, International Journal Of Geomechanics ASCE, 13: pp.248-256.

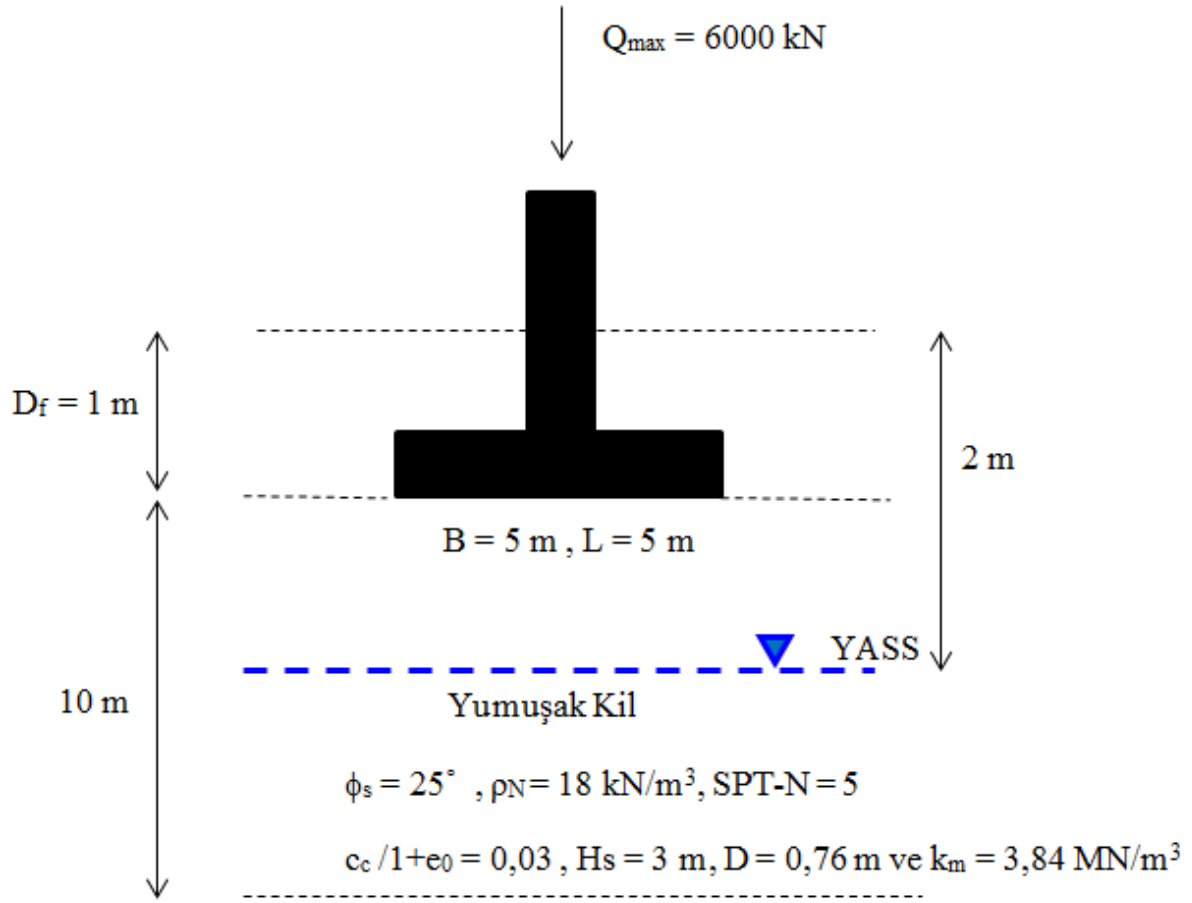


EK - A

A.1. Darbeli Kırmataş Kolon Tasarım Örneği

A.1.1. Yüzeysel Temel Altında DKK Tasarımı

Şekil A.1’ de görülmek üzere yumuşak kil zemin üzerindeki tekil temel için Geopier® DKK tasarımı yapılarak Geopier® DKK’ larla iyileştirilmiş zemindeki oturma ile iyileştirilmemiş zemindeki oturma karşılaştırılmıştır. Şaft uzunluğu kontrolü yapılarak şaft uzunluğu belirlenmiştir.



Şekil A.1 Yüzeysel Temel Örneği

A.1.1.1. DKK' larla İyileştirilmemiş Zeminde Oturma Analizi

10 m yumuşak kil tabakasına oturan tekil temelde etki derinliği 2B kadar olup, kil tabakasının yarısı referans alınarak $z = 6$ m derinlik için efektif gerilme ve gerilme artış değeri bulunarak konsolidasyon oturma miktarı bulunmuştur.

$z = 6$ m için efektif gerilme,

$$\sigma_0' = 6 \times 18 - 9,81 \times 4 = 68,8 \text{ kPa dır.}$$

Temel taban basıncı, $q = 6000 / (5 \times 5) = 240 \text{ kPa}$ dır.

Temel tabanından 5 m derinlik için gerilme artış değeri, $I = 0,2$ olarak alınır.

$$\Delta\sigma = I \times q = 0,2 \times 240 = 48 \text{ kPa dır.}$$

Böylece konsolidasyon oturması,

$$S = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H \log \left[\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right] = 0,03 \times 10 \times \log \left[\frac{68,8 + 48}{68,8} \right] = 0,069 \text{ m} = 6,9 \text{ cm dir.}$$

A.1.1.2. Geopier® DKK' larla İyileştirilmiş Zeminde Oturma Analizi

SPT-N = 5 için Tablo 3.1.' den $q_a = 240 \text{ kPa}$, $Q_{\text{cell}} = 311 \text{ kN}$ ve $k_g = 47,5 \text{ MN/m}^3$ olarak seçilir.

$$N = Q_{\text{max}} / Q_{\text{cell}} = 6000 / 311 = 20 \text{ adet DKK seçilir.}$$

$$R_a = A_g / A_T = (\pi \times (0,76/2)^2 \times 20) / (5 \times 5) = 0,36 \text{ dır.}$$

$$R_s = k_g / k_m = 47,5 / 3,84 = 12,4 \text{ tür.}$$

Taş kolonlara gelen gerilme,

$$q_g = q \left[\frac{R_s}{R_s \times R_a - R_a + 1} \right] = 240 \left[\frac{12,4}{12,4 \times 0,36 - 0,36 + 1} \right] = 583 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Üst bölge oturması,

$$S_{UZ} = q_g / k_g = 583 / 47,5 \times 1000 = 0,0123 \text{ m} = 1,23 \text{ cm dir.}$$

Üst bölge tabaka kalınlığı,

$$H_{UZ} = H_s + D = 3 + 0,76 = 3,76 \text{ m dir.}$$

Alt bölge tabaka kalınlığı,

$$H_{LZ} = 2B - H_{UZ} = 2 \times 5 - 3,76 = 6,24 \text{ m dir.}$$

Etki derinliği,

$$z = H_{UZ} + H_{LZ} / 2 = 3,76 + 6,24 / 2 = 6,88 \text{ m dir.}$$

Etki faktörü, $I = 0,1$ olarak alınır.

Gerilme artışı,

$$\Delta\sigma = q \times I = 240 \times 0,1 = 24 \text{ kPa dir.}$$

$z = 7,88$ m deki efektif gerilme,

$$\sigma'_0 = 7,88 \times 18 - (5,88 \times 9,81) = 84,2 \text{ kPa dir.}$$

Alt bölge oturması,

$$S_{LZ} = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H_{LZ} \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right] = 0,03 \times 6,24 \times \log \left[\frac{84,2 + 24}{84,2} \right] = 0,0203 \text{ m} = 2,03 \text{ cm dir.}$$

Böylece toplam oturma,

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} = 1,23 + 2,03 = 3,26 \text{ cm dir.}$$

A.1.1.3. Geopier® DKK'larda Şaft Uzunluğu Kontrolü

Şaft uzunluğu kontrolü yapılırken, ilk olarak DKK şaft uzunluğu boyunca pasif direnç bulunur. Pasif direnç en fazla 120 kPa olmalıdır. 120 kPa' dan fazla pasif direnç oluşursa maksimum pasif direnç 120 kPa olacak şekilde revize edilir ve şaft uzunluğu kontrolüne geçilir (Handy, 2001).

Şaft uzunluğu 3 m olarak seçilmiştir. Kolon uçlarına kadar olan pasif yatay gerilmeyi bulmak için kolon ucuna kadarki düşey efektif gerilme bulunur.

Kolon uçları için derinlik, $z = 4$ m dir.

$z = 4$ m için efektif gerilme,

$$\sigma_0' = 4 \times 18 - 2 \times 9,81 = 52,4 \text{ kPa dır.}$$

Pasif yatay gerilme,

$\sigma_h = \sigma_0' \times \tan^2(45 + \phi_s/2) = 52,4 \times \tan^2(45 + 25/2) = 129,1 \text{ kPa}$ dır. Pasif yatay gerilme 120 kPa' dan fazla olduğu için maksimum pasif yatay gerilme 120 kPa olacak şekilde revize edilir (Şekil A.2).

$$120 = \sigma_0' \times \tan^2(45 + 25/2), \sigma_0' = 48,7 \text{ kPa dır.}$$

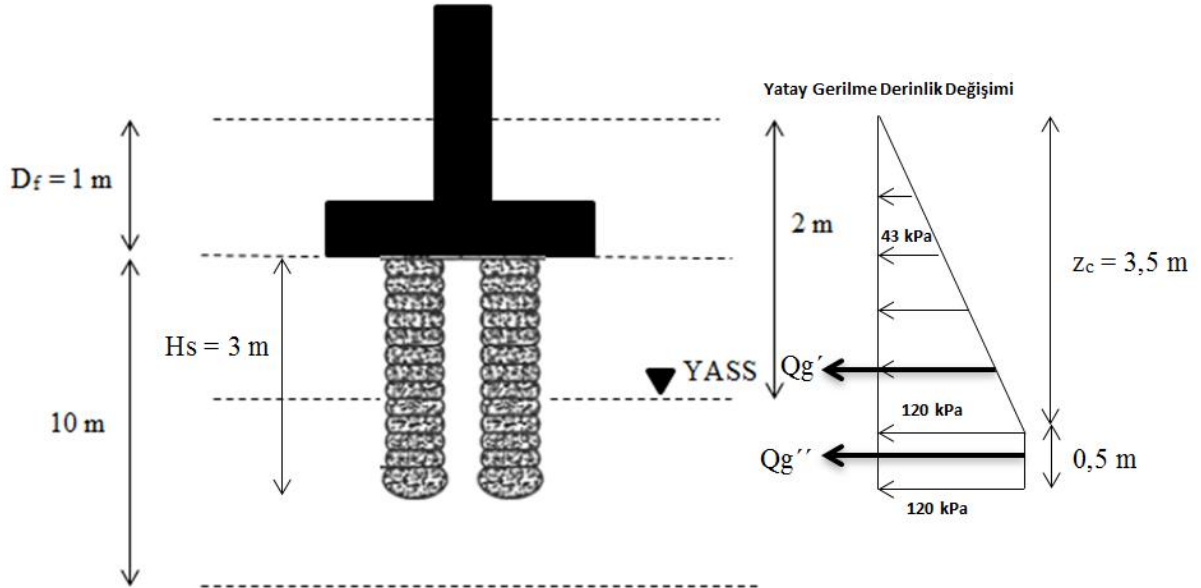
Efektif gerilmenin, $\sigma_0' = 48,7$ kPa olduğu kritik derinlik bulunur.

$$48,7 = (18 \times z_c) - 9,81 \times (z_c - 2), z_c = 3,5 \text{ m bulunur.}$$

Şekil A.2 'de görüldüğü gibi, şaft uzunluğu kolon direncini karşılayabilecek uzunlukta olmalıdır.

Kolon üst başlığında oluşan yük (kolon direnci),

$$Q_g = q_g \times A_g = 583 \times (\pi \times 0,76/2)^2 = 264,5 \text{ kN olarak bulunur.}$$



Şekil A.2 Şaft Uzunluğu Kontrolü

Yeterli şaft uzunluğu için Şekil A.2' de görüldüğü gibi şaft direncinin ($Q_g' + Q_g''$), kolon direncinden (Q_g), eşit yada büyük olması gerekmektedir.

$$Q_g' = (120 + 43) / 2 \times \pi \times 0,76 \times \tan 25 \times (3,5 - 1) = 227 \text{ kN dur.}$$

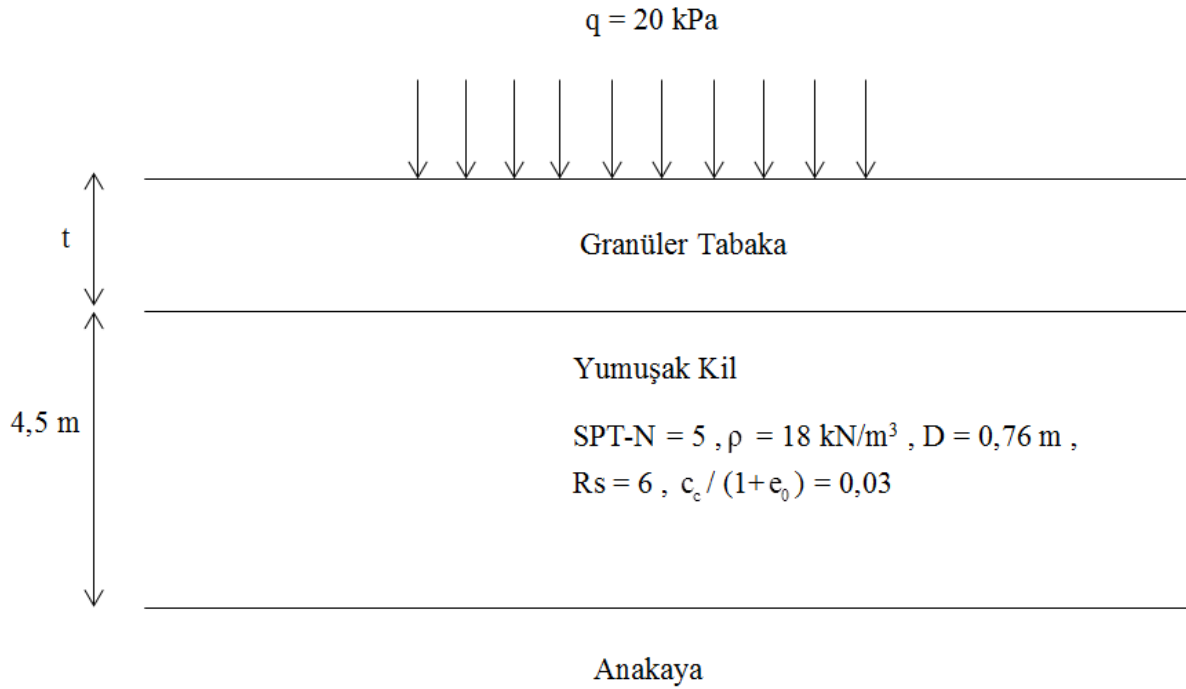
$$Q_g'' = 120 \times \pi \times 0,76 \times \tan 25^\circ \times (0,5) = 67 \text{ kN dur.}$$

$Q_g' + Q_g'' = 227 + 67 = 294 \text{ kN} > 264,5 \text{ kN}$ dur. Şaft direnci kolon direncinden büyük olduğu için yeterlidir.

A.1.2. Granüler Tabaka Altında Geopier® DKK Tasarım Örneği

A.1.2.1. Geopier® DKK' lı Ortamda Oturma Analizi

Şekil A.3' te görülmek üzere, granüler tabaka altında anakaya üzerine oturan DKK' ların, kolon aralıkları ve granüler tabaka kalınlığı belirlenerek oturma miktarı bulunmuştur.



Şekil A.3 Granüler Tabaka Altında DKK Tasarımı

SPT-N = 5 için, killi zeminde ilgili parametreler Tablo 3.1.' den bulunur:

$$Q_{\text{cell}} = 311 \text{ kN} , k_g = 47,5 \text{ MN/m}^3$$

Kolon aralığı,

$$s = \sqrt{\frac{Q_{\text{cell}}}{q}} = \sqrt{\frac{311}{20}} = 3,9 \text{ m dir.}$$

Granüler tabaka kalınlığı,

$$t = \frac{s-D}{2} = \frac{3,9-0,76}{2} = 1,57 \text{ m dir.}$$

Alan oranı,

$$Ra = \frac{A_g}{s^2} = \frac{\pi \left(\frac{0,76}{2} \right)^2}{3,9^2} = 0,03 \text{ dür.}$$

DKK' lara gelen gerilme,

$$q_g = q \left[\frac{Rs}{Rs \times Ra - Ra + 1} \right] = 20 \left[\frac{6}{6 \times 0,03 - 0,03 + 1} \right] = 104 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Toplam oturma,

$$S_T = S_{UZ} = q_g / k_g = 104 / (47,5 \times 1000) = 0,0022 \text{ m} = 0,22 \text{ cm dir.}$$

A.1.2.2. DKK' sız Ortamda Oturma Analizi

Şekil A.3' te görülmek üzere yumuşak kil tabakası üzerinde granüler tabaka altında ($t = 1,57$ m) ve DKK olmayan zemin tabakasında konsolidasyon oturma miktarı bulunmuştur.

Oturma miktarı bulunacak yumuşak kil tabakası kalınlığı 4,5 m dir. Oturma analizi için tabakanın yarısına kadar efektif gerime bulunur.

$z = 3,82$ m derinlik için efektif gerilme,

$$\sigma'_0 = 3,82 \times 18 = 68,8 \text{ kPa dır.}$$

Dış yayılı yük 20 kPa olarak, $z = 3,82$ m derinlikte aynı miktarda gerilme artışı yapacaktır. Bu sebeple gerilme artışı miktarı $\Delta\sigma = 20$ kPa olarak alınır.

Konsolidasyon oturması,

$$S = c_c \left[\frac{1}{1 + e_0} \right] H \log \left[\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right] = 0,03 \times 4,5 \times \log \left[\frac{68,8 + 20}{68,8} \right] = 0,015 \text{ m} = 1,5 \text{ cm dir.}$$

A.1.3. Oturma Miktarlarının Karşılaştırılması

Yüzeysel temel altında ve granüler tabaka altında tasarımı yapılan Geopier® DKK' larda Tablo A.1.' de görüldüğü gibi darbeli kırmataş kolonsuz (DKK' sız) ve darbeli kırmataş kolonlu (DKK' lı) ortamda oturma miktarları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, DKK' ların oturmaları önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.

Tablo A.1. Oturma Miktarları

Sistem	Ortam	Oturma Miktarı (cm)
Yüzeysel Temel Altı	DKK' lı	3,26
	DKK' sız	6,9
Granüler Tabaka	DKK' lı	0,22
	DKK' sız	1,5