

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAŞ KOLON VE GEOPIER UYGULAMASI İLE ZEMİN
İYİLEŞTİRMESİ**

İnşaat Mühendisi Hakan DEMİR

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTIMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖNSÖZ	xvii
ÖZET	xviii
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	2
1.2 Amaç	13
2. TAŞ KOLONLAR	14
2.1 Genel	14
2.2 Taş Kolon İmalatı	17
2.3 Vibratör	18
2.4 Taş Kolon Uygulama Yöntemleri	19
2.4.1 Vibro Kompaksiyon	19
2.4.1.1 Vibro Kompaksiyonun Performansı	24
2.4.2 Vibro Yer Değiştirme	24
2.4.2.1 Islak, Tepeden Beslemeli Yöntem	25
2.4.2.2 Kuru, Dipten Beslemeli Yöntem	26
2.5 Vibro Sistemlerin Tasarımı	28
2.5.1 Tasarım Kriterleri	28
2.5.2 Tasarım için Gerekli Veriler	30
2.5.3 Taşıma Kapasitesinin Arttırılması	30
2.5.4 İyileştirilmiş Zeminde Oturma Hesabı	31
2.5.5 İyileştirilmiş Zemin Parametreleri	31
2.5.5.1 İyileştirme Faktörü Hesabı	32
2.5.5.2 Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Göz Önüne Alınması	33
2.5.5.3 Derinliğin (Jeolojik Yükün) Etkisinin Göz Önüne Alınması	35
2.5.5.4 Uygunluk Kontrolü	37
2.5.5.5 İyileştirilmiş Zeminin Mekanik Dayanım Parametreleri	38
2.5.5.6 İyileştirilmiş Zemin Oturma Hesapları	40
2.5.6 İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı	42
2.5.6.1 Tekil Kolon İçin Göçme Mekanizmaları	42
2.5.6.2 Taş Kolon Grupları İçin Göçme Mekanizmaları	42
2.5.6.3 Temel Bağlantılar	47
2.5.6.4 Birim Hücre Konsepti	47
2.5.7 Nihai Taşıma Gücü Analizi	51
2.5.7.1 Tekil Taş Kolon	51

2.5.7.2	Taş Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Kapasitesi	56
3.	GEOPİER KOLON İMALATI	59
3.1	Genel.....	59
3.2	Yapım Aşamaları	59
3.3	Geopier Kolon Çeşitleri.....	62
3.4	Diğer Zemin İyileştirme Yöntemleri İle Karşılaştırma	63
3.5	Geopier Kolonlar İle Desteklenmiş Temellerde Oturma Hesabı.....	64
3.5.1	Üst Bölge Oturmaları.....	65
3.5.2	Alt Bölge Oturmaları	71
3.6	Geopier (Rammed Aggregate) Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücü Hesabı.....	72
3.6.1	Tekil Kolonun Taşıma Kapasitesi	72
3.6.1.1	Tekil Kolon Elemanında Genişleme Göçmesi	73
3.6.1.2	Tekil Kolon Elemanı Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme.....	75
3.6.2	Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Kapasitesi	77
3.6.2.1	Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi.....	78
3.6.2.2	Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Kayma Göçmesi	79
3.6.2.3	Grup İçindeki Kolonun Zımbalanma Göçmesi	80
3.6.2.4	Kolon ve Zeminden Oluşan Bölge Altında Göçme Meydana Gelmesi.....	80
4.	TAŞ KOLON VEYA GEOPİER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE OTURMA VE TAŞIMA GÜCÜ HESABI	81
4.1	Genel.....	81
4.2	Zemin Kesiti ve Özellikleri	81
4.3	İyileştirme Yapılmamış Zeminde Oturma ve Taşıma Gücü Hesabı.....	82
4.3.1	E = 5000 Olan Yumuşak Kil Zeminde Meydana Gelecek Nihai Oturma	83
4.3.2	E = 3500 Olan Yumuşak Kil Zeminde Meydana Gelecek Nihai Oturma	84
4.3.3	İyileştirilmemiş Yumuşak Kil Zeminde Taşıma Gücü.....	85
4.4	Taş Kolon İle İyileştirilmiş Yumuşak Kil Zemin Kesiti ve Taş Kolon Özellikleri	92
4.4.1	E = 3500 Olan Yumuşak Kilde 2.00 m Aralıklı 80 cm Çapındaki Taş Kolonlar ile Zemin İyileştirmesi Uygulanması Durumu	94
4.4.1.1	Taş Kolon İle İyileştirilmiş Zeminde Oturmanın Belirlenmesi.....	94
4.4.1.2	İyileştirilmiş Zeminde İzole Edilmiş Tekil Kolon İçin Taşıma Gücü	98
4.4.1.2.1	Alan Değişim Oranı.....	98
4.4.1.2.2	Taş Kolonda Genişleme Göçmesi	98
4.4.1.2.3	Tekil Taş Kolon Kapasitesi	99
4.4.1.2.4	Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Göçme	100
4.5	Geopier İle İyileştirilmiş Yumuşak Kil Zemin Kesiti ve Geopier Özellikleri	103
4.5.1	Φ80 Çaplı Geopier Kolonların 2.00 m Ara İle Yumuşak Kil Zemine Uygulanması.....	104
4.5.1.1	Taşıma Gücü Hesapları	104
4.5.1.1.1	Tekil Kolon Elemanında Genişleme Göçmesi	105
4.5.1.1.2	Tekil Kolon Elemanı Taşıma Gücü	106
4.5.1.1.3	Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Göçme	107
4.5.1.1.4	Kolon ve Zeminden Oluşan Bölge Altında Göçme Meydana Gelmesi.....	108
4.5.1.2	Oturma Hesapları.....	110
4.5.1.2.1	Üst Bölgede Meydana Gelecek Oturma	110
4.5.1.2.2	Alt Bölgede Meydana Gelecek Oturma.....	110

5.	TAŞ KOLON VEYA GEOPİER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE OTURMA VE TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI	113
5.1	Plaxis Sonlu Elemanlar Programı	113
5.1.1	Modelin Oluşturulması (Input)	113
5.1.2	Mohr-Coulomb Modelin Temel Kavramları	118
5.2	Plaxis İle Oturma ve Taşıma Gücü Hesabı	119
5.2.1	İyileştirme Yapılmamış Dolgu Temel Zemininin Davranışı	121
5.2.2	Taş Kolon İle İyileştirilmiş Dolgu Temel Zemininin Davranışı	124
5.2.3	Geopier Elemanlar İle İyileştirilmiş Zeminde Dolgunun Kil Zemin Üzerine Oturtulması	136
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	148
	KAYNAKLAR	153
	İNTERNET KAYNAKLARI	155
	ÖZGEÇMİŞ	156

SİMGE LİSTESİ

A	Birim Hücre Toplam Alanı
a_c	Alan Değişim Oranı
A_c	Taş Kolon Alanı
A_{dolgu}	Dolgu Alanı
A_g	Geopier Alanı
A_m	Geopier Hesaplarında Zemin Alanı
A_s	Birim Hücre İçerisindeki Kohezyonlu Zeminin Alanı
B	Temel Genişliği
c_{avg}	Temel Altındaki Kesme Yüzeyinin Komposit Kohezyonu (c_{comp})
c_c	Kohezyonlu Zeminin Bakir Sıkışma İndeksi
c_v	Konsolidasyon Katsayısı
C_l	Taş Kolon Dizilimine Bağlı Bir Sabit
c'	Efektif Kohezyon
d'	Geopier elemanı Efektif Çapı
d_p	Sondaj Çapı
D	Sıkıştırılmış Taş Kolon Çapı
D_c	Taş Kolon Malzemesi Zorlanma Modülü
D_e	Birim Hücresinin Eşdeğer Çapı
D_f	Temel Derinliği
D_s	Zeminin Zorlanma Modülü
d_{shaft}	Geopier Kolon Çapı
e_o	Başlangıç Boşluk Oranı
E_{50}	Elastisite Modülü
E_c	Taş Kolon Malzemesi Elastisite Modülü
E_{LZ}	Alt Bölgenin Elastisite Modülü
E_s	Zeminin Elastisite Modülü
$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$	Şekil Faktörleri
f_d	Derinlik Faktörü
f_s	Kolon Çevre Yüzeyi Boyunca Birim Taşıma Gücü
F_v	Düşey Kuvvet
F_c', F_q'	Vesic (1972) Boşluk Genişleme Faktörleri
H	Dolgu Yüksekliği
H_d	Drenaj Mesafesi

H_{LZ}	Alt Bölge Kalınlığı
H_{UZ}	Üst Bölge Kalınlığı (H_{shaft})
H_o	Kazı Derinliği
I_r	Rijitlik İndeksi
I_q	Westergaard Etki Faktörü
I_S, I_F	Etki Katsayıları
K_{AC}	Taş Kolon Malzemesi Aktif İtki Katsayısı
k_g	Kolon Malzemesi Yataklanma Katsayısı
k_m	Zeminin Yataklanma Katsayısı
$K_{p,g}$	Geopier Malzemesi Pasif İtki Katsayısı
$K_{p,m}$	Geopier Hesaplarında Zeminin Pasif İtki Katsayısı
k_y	Zeminin Düşey Permeabilitesi
k_x	Zeminin Yatay Permeabilitesi
K_o	Sükûnetteki Toprak Basıncı Katsayısı
K_{oc}	Kolon Malzemesi Sükûnetteki Toprak Basıncı Katsayısı
L	Temel Uzunluğu
m	Taş kolona Gelen Kısmi Yük Oranı
m_v	Hacimsel Sıkışma Katsayısı
n	Tabaka Sayısı
N_c, N_q, N_γ	Taşıma Kapasitesi Faktörleri
n_s	Gerilme Dağılım Oranı
n_0, n_1, n_2	Priebe'a (1995) Göre İyileştirme Faktörleri
q_{all}	İzin Verilebilir Taşıma Gücü
q_{bottom}	Geopier Uygulanmış Tabakanın Alt Kısmında Sebep Olunan Gerilme
q_m	Zemine Gelen Düşey Gerilme
q_p	Kolon Tepesine Etkiyen Düşey Gerilme
$q_{tip,g}$	Geopier Elemanı Uç Direnci ($q_{ult,bot,g}$)
q_{ult}	Nihai Taşıma Kapasitesi
$q_{ult,g}$	Geopierin Nihai Taşıma Kapasitesi
P	Temelden gelen Yük
p	İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Temel Taban Basıncı
P_c	Temelden Kolona Gelen Yük
P_s	Temelden Zemine Gelen Yük
P_o'	Başlangıçtaki Düşey Efektif Gerilme

R_a	Alan Değişim Oranı
R_a'	İndirgenmiş Alan Değişim Oranı
R_s	Kolon-Zemin Rijitlik Oranı
R_s'	İndirgenmiş Gerilme Konsantrasyon oranı (n_s)
s	Taş Kolonlar Arasındaki Merkezden Merkeze Olan Mesafe
$S_{c,LZ}$	Alt Bölgedeki Birincil Konsolidasyon Oturması
$S_{i,LZ}$	Alt Bölgedeki Ani Oturma
$S_{m,LZ}$	Alt Bölgedeki Su Muhtevastaki Değişimden Dolayı Meydana Gelebilecek Oturma
$S_{s,LZ}$	Alt Bölgedeki ikincil Konsolidasyon Oturması
S_T	Toplam Oturma
s_u	Drenajsız Kayma Mukavemeti
S_{UZ}	Üst Bölgedeki Oturma
s_∞	Priebe'a (1995) Göre Homojen Koşullarda Oluşacak Toplam Oturma
T_v	Zaman Faktörü
u_o	Boşluk Suyu Basıncı
W_c	Taş Kolon Ağırlığı
W_s	Zemin Ağırlığı
W_p	Geopier Ağırlığı
z_b	Geopier Elemanında Dışa Doğru Genişlemenin Meydana Geldiği Derinlik
σ_c	Taş Kolondaki Düşey Gerilme
σ_{ro}	Arazideki Toplam Yanal Gerilme
$\sigma_{r,lim}$	Sınırlayıcı Radyal Gerilme
σ_s	Kohezyonlu Zemindeki Düşey Gerilme
σ_{vo}'	Düşey Efektif Gerilme
$\sigma_{v,ave}$	Kolona Etkiyen Ortalama Düşey Efektif Gerilme
σ_3	Ortalama Sınırlayıcı Yanal Gerilme
τ_g	Geopier Elemanının Göçmeye Karşı Direnci
τ_s	Zeminin Göçmeye Karşı Direnci
β	Göçme Yüzeyinin Temelle Yaptığı Açısı
Φ_{avg}	Kompozit İçsel Sürtünme Açısı
Φ_c	Taş Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı
Φ_g	Geopier Materyali İçsel Sürtünme Açısı
Φ_m	Geopier Hesaplarında Zeminin İçsel sürtünme Açısı

γ_{comp}	Komposit Birim Hacim Ağırlık
γ_d	Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık
γ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlık
γ_m	Geopier Hesaplarında Zeminin Birim Hacim Ağırlığı
γ_w	Suyun Birim Hacim Ağırlığı
μ_c	Kolona Gelen Düşey Gerilme Oranı
μ_s	Zemine Gelen Düşey Gerilme Oranı
ν_s	Zeminin Poisson Oranı
ν_u	Zeminin Suya Doygun Durumdaki Poisson Oranı
ψ	Genleşme Açısı
δ	Oturma Miktarı
$\Delta\sigma_z$	Gerilme Artışı

KISALTMA LİSTESİ

CPT	Koni Penetrasyon Deneyi
DMT	Dilatometre Deneyi
PMT	Pressiyometre Deneyi
RAP	Rammed Aggregate Piers
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	CPT deneyi sonuçları: (a) Kinrara ve (b) Kebun. (qc, uç direnci; FR, sürtünme oranı.) 5
Şekil 1.2	Zemin iyileştirilmesi için kullanılan taş kolonların şeması.(Raju, 1997) 6
Şekil 1.3	Kinrara ve Kebun’da ölçüm cihazından alınan oturma sonuçları..... 6
Şekil 1.4	Tam ölçekli kesme deneyi sonuçları. (Wissmann vd., 2002) 8
Şekil 1.5	Geopier ve taş kolon elemanlarındaki karşılaştırmalı gerilme-şekil değiştirme grafiği. 12
Şekil 1.6	Oturma plakalarından okunan dolgu yüksekliğine göre oturma miktarları. 12
Şekil 2.1	Vibroprob kesiti. (Vibratory Ground Improvement Manual, Vibro Systems Inc.)..... 16
Şekil 2.2	İmalat adımları. 18
Şekil 2.3	Vibratör hareketi ve şeması. 19
Şekil 2.4	İmalat adımları. 21
Şekil 2.5	Tipik bir vibro kompaksiyon makinesi. 22
Şekil 2.6	İyileştirme yapılan saha planı ve kesiti. 23
Şekil 2.7	Gerçekleştirilen tipik CPT deneyi sonuçları, (a) sıkıştırılmamış alan, (b) sıkıştırma sonrası uçak pisti alanı, (c) sıkıştırma sonrası taxiway alanı. (Raju, V.R. vd., 1998) 23
Şekil 2.8	Islak yöntemle taş kolon imalatı. 26
Şekil 2.9	Dipten beslemeli yöntem için kullanılan vibroprob..... 27
Şekil 2.10	İnşa adımları..... 28
Şekil 2.11	Vibrasyon teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları. (Hayward Baker Vibrasyon Teknolojileri) 30
Şekil 2.12	$\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü grafiği. (Priebe; Keller-Publications) 33
Şekil 2.13	$\mu_s = 0.33$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri. (Priebe; Keller-Publications) 34
Şekil 2.14	$\mu_s = 0.33$ için derinlik etki faktörü. (Priebe; Keller-Publications)..... 37
Şekil 2.15	Derinlik faktörü limit değerleri. (Priebe; Keller-Publications)..... 38
Şekil 2.16	$\mu_s = 0.33$ için kolon yük oranları. (Priebe; Keller-Publications) 40
Şekil 2.17a	Tekil temellerin oturması. (Priebe; Keller-Publications)..... 41
Şekil 2.17b	Şerit temellerin oturması. (Priebe; Keller-Publications)..... 41
Şekil 2.18	Homojen zeminde tekil taş kolonun göçme mekanizmaları. 42

Şekil 2.19	Taş kolona etkiyen farklı tipteki yükler.....	43
Şekil 2.20	Taş Kolon gruplarının göçme mekanizmaları.....	44
Şekil 2.21	Sürşarj yüklemesi sonunda dolgu altında meydana gelen yanal yer değiştirme.....	45
Şekil 2.22	Jourdan terminali – taş kolonla güçlendirilmiş zemin üzerindeki donatılı zemin istinat duvarı altında göçmeden sonraki durum.	45
Şekil 2.23	Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları.....	46
Şekil 2.24	Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi.	47
Şekil 2.25	Birim hücre yaklaşımı.....	48
Şekil 2.26	Taş kolonlarda gözlemlenen gerilme yoğunluğu faktörleri. (Barksdale ve Bachus, 1983)	50
Şekil 2.27	Tekil bir kolon üzerindeki rijit bir plakaya etkiyen yük sonucunda kolonda oluşacak kabarma göçmesi modu.	52
Şekil 2.28	Vesic (1972) silindirik boşluk genişleme faktörleri.....	55
Şekil 2.29	Taş Kolon grup analizleri.....	56
Şekil 3.1	Geopier inşa adımları. (Lawton, 2004)	60
Şekil 3.2	Geopier inşa ekipmanları; özel tokmaklı kazıcı ve sondaj makinesi. (Lawton, 2004).....	61
Şekil 3.3	Agreganın yerleştirilmesi.....	61
Şekil 3.4	Geopier çeşitleri. (Lawton, 2004)	62
Şekil 3.5	Donatılı geopier kurulumu. (Lawton, 2004).....	63
Şekil 3.6	Rammed aggregate kolonlar ile desteklenmiş temeller için hesap şeması.	64
Şekil 3.7	Temel altında yukarı ve aşağı bölge sınırları.....	67
Şekil 3.8	Gerilme konsantrasyonu için yay yaklaşımı.	68
Şekil 3.9	Plaka yükleme deneyi düzeneği. (Bowles, 1996)	70
Şekil 3.10	Rammed aggregate kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlere oturan temellerde göçme mekanizmaları; (a) Tek bir kolonun kabarması, (b) Tekil kolon altında göçme, (c) Kolon ile iyileştirilmiş bölgede göçme, (d) Kolon ile iyileştirilmiş bölge altında göçme. (Fox ve Cowell, 1998).....	72
Şekil 3.11	Tekil kolonlarda göçme durumları.....	73
Şekil 3.12	Kolon gruplarında göçme durumları.....	78
Şekil 4.1	Zemin kesiti.	81
Şekil 4.2	Kohezyonlu zeminlerde ($\Phi=0$) taşıma kapasitesi faktörü N_c	86

Şekil 4.3	Zemin ve dolgu kesiti.....	87
Şekil 4.3a	Ani oturma için A1 ve A2 faktörleri.....	90
Şekil 4.4	Zemin, dolgu ve taş kolon kesiti.....	93
Şekil 4.5	Zemin, dolgu ve geopier kesiti.....	103
Şekil 5.1	Genel ayarların yapılması.....	114
Şekil 5.2	Plaxis veri giriş penceresi.....	115
Şekil 5.3	Malzeme özellikleri menüsü.....	116
Şekil 5.4	Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş zemin.....	117
Şekil 5.5	Hesaplama adımlarının belirlenmesi ve hesaplamanın yapılması.....	118
Şekil 5.6	Zemin kesiti ve 4 m'lik kum dolgu.....	119
Şekil 5.7	4 m'lik kum dolgu ve kil zeminin sınır koşulları.....	121
Şekil 5.8	4 m'lik kum dolgunun kil tabakaları üzerine oturtulması.....	122
Şekil 5.9	Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş 4 m'lik kum dolgu ile temel zeminini sınır koşulları.....	122
Şekil 5.10	İyileştirilmemiş killi zemin tabakalarının taşıma gücünün belirlenmesi.....	123
Şekil 5.11	Temel zeminini tabakalarının taşıma gücünün belirlenmesi için zeminin yüklenmesi sonucu oluşan düşey gerilme-oturma eğrisi.....	124
Şekil 5.12	80 cm çapındaki taş kolonlar ile iyileştirilmiş temel zeminini.....	125
Şekil 5.13	Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş temel zeminini ve 4 m'lik kum dolgunun sınır koşulları.....	125
Şekil 5.14	Taş kolonlar ile iyileştirilmiş kil zeminin taşıma gücünün belirlenmesi.....	127
Şekil 5.15	Taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	127
Şekil 5.16	Taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	128
Şekil 5.17	Grup kolonlarda zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için dolgu merkezi altında taş kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	128
Şekil 5.18	Grup kolonlarda zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için dolgu merkezi altında taş kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	129
Şekil 5.19	Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajlı durum için	

	dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği... 129
Şekil 5.20	Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajsız durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 130
Şekil 5.21	Tek bir taş kolon ve içinde yer aldığı zemin tabakalarının aksisimetrik olarak modellenmesi 131
Şekil 5.22	Tekil kolonda drenajlı durum için kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 131
Şekil 5.23	Tekil kolonda drenajsız durum için kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 132
Şekil 5.24	Farklı çaplarda taş kolonlar için tekil kolonun drenajlı durumunda kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 132
Şekil 5.25	Farklı çaplarda taş kolonlar için tekil kolonun drenajsız durumunda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 133
Şekil 5.26	Dolgu altında normal gerilme dağılımı. ($\phi 80$ cm ve 2 m ara) 134
Şekil 5.27	80 cm'lik kolon grubunda göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajlı durum)..... 135
Şekil 5.28	80 cm'lik kolon grubunda göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajsız durum)..... 135
Şekil 5.29	80 cm çapındaki geopier elemanların 2 m ara ile kil zemine uygulanması ... 137
Şekil 5.30	Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş zemin..... 137
Şekil 5.31	Kil temel zemini ve üzerindeki 4 m'lik kum dolgunun sınır koşulları..... 138
Şekil 5.32	Geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminin taşıma gücü değerinin belirlenmesi..... 139
Şekil 5.33	Geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 139
Şekil 5.34	Geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 140
Şekil 5.35	Farklı çaplarda geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajlı durum için düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 140
Şekil 5.36	Farklı çaplarda geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajsız durum için düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği..... 141

Şekil 5.37	Tek bir geopier elemanın ve içinde yer aldığı zemin tabakalarının aksisimetrik olarak modellenmesi.....	142
Şekil 5.38	Tekil geopier eleman için drenajlı durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	142
Şekil 5.39	Tekil geopier elemanı için drenajsız durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	143
Şekil 5.40	Farklı çaplarda tekil geopier elemanlar için drenajlı durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	143
Şekil 5.41	Farklı çaplarda tekil geopier elemanlar için drenajsız durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.....	144
Şekil 5.42	Geopier elemanlar ve zeminde 4 m dolgu yükü altında normal gerilme dağılımı. ($\phi 80$ cm ve 2 m ara).....	145
Şekil 5.43	80 cm çapında geopier elemanlar ile zeminde göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajlı durum).....	146
Şekil 5.44	80 cm çapında geopier elemanlar ile zeminde göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajsız durum).....	146

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Tahmin edilen oturma değerleri ile gerçek oturma değerlerinin karşılaştırılması. (Lawton vd., 1994).....	4
Çizelge 1.2 Örnek numunelerden elde edilen laboratuvar deneyleri sonucu.....	5
Çizelge 1.3 Taş kolon ve geopier inşa sahasının zemin özelliklerinin karşılaştırılması.(White vd., 2002)	10
Çizelge 1.4 Yükleme deneyinden elde edilen Rijitlik değerlerinin karşılaştırılması. (White vd., 2002)	10
Çizelge 1.5 Oturma gözlemlenmeleri sonuçları. (White vd., 2002)	11
Çizelge 2.1 Vibroprob çeşitleri.	17
Çizelge 2.2 Vibrokompaksiyon uygulamalarında beklenen sonuçlar.....	20
Çizelge 2.3 Vibro kompaksiyon performansı.	24
Çizelge 2.4 Enerji Jeneratörü Deney Sahası Zemin Profili (Clemente J. ve Davie R., 1999)	29
Çizelge 4.1 Zemin özellikleri.....	82
Çizelge 4.2 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelen düşey gerilme artışları.	84
Çizelge 4.3 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde meydana gelecek oturmalar.	84
Çizelge 4.4 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelecek düşey gerilme artışları.	85
Çizelge 4.5 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde meydana gelecek oturmalar.	85
Çizelge 4.6 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelen düşey gerilme artışları.	88
Çizelge 4.7 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde (E=3500 kPa) meydana gelecek nihai oturmalar.....	88
Çizelge 4.8 Zemin için (U-Tv) bağıntısı.....	92
Çizelge 4.9 Taş kolon malzemesi özellikleri.	93
Çizelge 4.10 2 m aralıklı eşkenar üçgen dizilimli taş kolon uygulanmasından sonra beklenen oturma değerleri.....	97
Çizelge 4.11 Taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede meydana gelecek oturma miktarı.....	97
Çizelge 4.12 Tekil taş kolon ve taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerde elde edilen taşıma gücü değerleri.	102
Çizelge 4.13 Geopier malzeme özellikleri.....	104
Çizelge 4.14 Tekil geopier eleman ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.	110
Çizelge 4.15 Dolgu merkezi altında alt bölgede meydana gelen düşey gerilme artışları. ...	111

Çizelge 4.16	Dolgu merkezi altında alt bölgede meydana gelecek nihai konsolidasyon oturması.	112
Çizelge 4.17	Geopier ile iyileştirilmiş zeminlerde kolon çaplarına göre toplam oturma değerleri.	112
Çizelge 5.1	Eleman Tipleri	115
Çizelge 5.2	Uygulamada kullanılan zemin Malzemesinin Parametreleri	120
Çizelge 5.3	Analiz sonucunda dolgu merkezi altında hesaplanan ani ve konsolidasyon oturması değerleri.	123
Çizelge 5.4	Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zemin için dolgu merkezi altında hesaplanan ani ve konsolidasyon oturması değerleri.	126
Çizelge 5.5	Sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan tekil taş kolon ve taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için taşıma gücü değerleri.	133
Çizelge 5.6	2 m ara ile yerleştirilen farklı çaplarda taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde 4 m dolgu yükü altında gerilme konsantrasyon oranları.	134
Çizelge 5.7	Göçme durumunda taş kolon/zemin gerilme konsantrasyon oranları.....	136
Çizelge 5.8	Geopier elemanları ile iyileştirilmiş zeminde dolgu merkezi altında ani ve konsolidasyon oturması değerleri.....	138
Çizelge 5.9	Tekil geopier eleman ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.	144
Çizelge 5.10	4 m dolgu yükü geopier/zemin gerilme konsantrasyon oranları.....	145
Çizelge 5.11	Geopier elemanlar ile iyileştirilen zeminde göçme durumunda gerilme konsantrasyon oranları.....	147
Çizelge 6.1	İyileştirilmemiş zeminde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi sonucu zeminde meydana geleceği hesaplanan oturma değerleri.....	148
Çizelge 6.2	İyileştirilmemiş zeminde hesaplanan taşıma gücü değerleri.	148
Çizelge 6.3	Taş kolon ile iyileştirilmiş kil zeminde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi durumunda meydana gelmesi beklenen oturmalar.....	149
Çizelge 6.4	Tekil taş kolon için ve taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.	149
Çizelge 6.5	Geopier ile iyileştirilmiş killi zemin üzerinde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi durumunda meydana gelmesi beklenen oturma değerleri.	150
Çizelge 6.6	Tekil geopier eleman için ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.	151

ÖNSÖZ

Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilecek dolgularda taşıma gücü ve deformasyon ile diğer duraylılık problemlerini (yanal yayılma, yerel göçme vb.) çözmek için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada bu yöntemlerden taş kolonlar ile geopier (Rammed Aggregate Pier) uygulaması yöntemleri incelenmiştir.

Taş kolonlar günümüzde sıkça kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Gerek kohezyonlu gerekse kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilen taş kolonlar; konsolidasyonu hızlandırmak, taşıma kapasitesini arttırmak, sıvılaşma potansiyelini azaltmak, dolgu ve şev stabilitesini sağlamak gibi pek çok amaçla kullanılmaktadır.

Geopier uygulaması daha çok Amerika'da yumuşak zemin özelliği taşıyan bölgelerde zemin iyileştirmesi amacıyla kullanılan, başarılı ve ekonomik sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yöntem, iyileştirme yapılmak istenilen sahada, zeminde açılan kuyuya çok sert ve yoğunluğu yüksek agregaların kademeler halinde yerleştirilmesi ve patentli bir tokmak yardımıyla sıkıştırılmasından ibarettir.

Bu çalışmada, yumuşak killi zeminler üzerine dolgu inşa edilmesi durumunda, taş kolonlar ve geopier elemanlar uygulanması ile taşıma kapasitesinin artırılması ve oturmaların azaltılması incelenmiştir. Yumuşak kil ve orta katı kil tabakalarından oluşan zeminin üzerine inşa edilecek dolgu altında temel zemininin oturmalar ve taşıma gücü açısından davranışı incelenmiş, daha sonra zemine iyileştirme yöntemlerinden olan taş kolon ve geopier elemanlar ayrı ayrı uygulandığında meydana gelen değişimler literatürdeki hesap yöntemleri ve Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak incelenmiştir. Tez kapsamında genel bir giriş bölümünden sonra taş kolon ve geopier uygulamaları hakkında literatürde yer alan bazı çalışmalara değinilmiştir. Bölüm 2 ve Bölüm 3'de, sırası ile, taş kolon ve geopier uygulamaları hakkında geniş bilgi ile birlikte literatürde yer alan diğer çalışmalara değinilmiştir. Bölüm 4'de literatürde yer alan hesap yöntemleri ile dolgu altında iyileştirilmemiş zeminin ve değişik çaptaki taş kolonlar ve geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminin oturma ve taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Bölüm 5'de ise Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak zemin modellenmiş ve kullanılan iyileştirme yöntemine göre oturma ve taşıma gücü değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar bölümünde ise elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Tez çalışmam boyunca bilgi birikimini, deneyimlerini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a, gerek analiz aşamasında gerekse tezimin diğer aşamalarında deneyimlerini benimle paylaşan Sn. Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e, tez boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen yakın arkadaşlarım Araş. Gör. Melis UZAR'a, Tamer DİNLEMEK'e, Araş. Gör. Sevgi YALÇIN'a, Ayşegül DEMİRKOÇ'a, Onur KENGİL'e, Erhan ŞİMŞEK'e ve her zaman yanımda olup bana destek veren canım arkadaşım Pelin KALE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında gösterdikleri destek ve yardımlardan dolayı Araş. Gör. Dr. Murat TONAROĞLU'na, Araş. Gör. Tayfun ŞENGÜL'e, Araş. Gör. Murat SELÇUK'a ve İnşaat Yük. Müh. Müge İNANIR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Okul hayatım boyunca maddi manevi desteğini hiç esirgemeyen ve beni sabırla destekleyen, her zaman yanımda olan canım anneme sevgi ve saygılarımı sunarım.

ÖZET

Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilecek dolgularda taşıma gücü ve deformasyon ile diğer duraylılık problemlerini (yanal yayılma, yerel göçme vb.) çözmek için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada bu yöntemlerden taş kolonlar ile geopier (Rammed Aggregate Pier) uygulaması yöntemleri incelenmiştir.

Taş kolonlar günümüzde sıkça kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir. Gerek kohezyonlu gerekse kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilen taş kolonlar; konsolidasyonu hızlandırmak, taşıma kapasitesini arttırmak, sıvılaşma potansiyelini azaltmak, dolgu ve şev stabilitesini sağlamak gibi pek çok amaçla kullanılmaktadır.

Geopier uygulaması daha çok Amerika'da yumuşak zemin özelliği taşıyan bölgelerde zemin iyileştirmesi amacıyla kullanılan, başarılı ve ekonomik sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yöntem, iyileştirme yapılmak istenilen sahada, zeminde açılan kuyuya çok sert ve yoğunluğu yüksek agregaların kademeler halinde yerleştirilmesi ve patentli bir tokmak yardımıyla sıkıştırılmasından ibarettir.

Bu çalışmada, yumuşak killi zeminler üzerine dolgu inşa edilmesi durumunda, taş kolonlar ve geopier elemanlar uygulanması ile taşıma kapasitesinin artırılması ve oturmaların azaltılması incelenmiştir. Yumuşak kil ve orta katı kil tabakalarından oluşan zeminin üzerine inşa edilecek dolgu altında temel zemininin oturmalar ve taşıma gücü açısından davranışı incelenmiş, daha sonra zemine iyileştirme yöntemlerinden olan taş kolon ve geopier elemanlar ayrı ayrı uygulandığında meydana gelen değişimler literatürdeki hesap yöntemleri ve Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Hem literatürdeki hesap yöntemleri ile yapılan analizler hem de Plaxis sonlu elemanlar programı yardımı ile yapılan analiz sonuçlarından anlaşılacağı üzere taş kolon ile iyileştirilen zeminin taşıma kapasitesi artmaktadır. Ayrıca meydana gelmesi beklenen oturma değerleri iyileştirilmemiş zemine göre bir hayli azalmaktadır. Klasik yöntemlerle bulunan taşıma gücü değerleri Plaxis sonlu elemanlar programı ile bulunanlardan daha fazla çıkmaktadır. Yapılan analizlerden anlaşılacağı üzere geopier elemanlar ile iyileştirilen zeminin taşıma kapasitesinde, kolon boyları daha kısa olmasına rağmen taş kolonlarla sağlanan iyileşmeye yakın artış sağlamaktadır. Ayrıca oturma değerleri de, taş kolonlara göre daha büyük olmasına rağmen, iyileştirilmemiş zemine göre bir hayli azalmaktadır. Klasik yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri Plaxis sonlu elemanlar programı ile bulunanlardan fazla çıkmaktadır. Taş kolonlar davranışı literatürde bulunan yöntemlere göre hesaplanırken gerilme konsantrasyon oranı $n=3$ olarak alınmıştır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde bu değer değişik kolon çaplarına göre 2.88 ile 3.70 arasında değiştiği bulunmuştur. Buna göre alınan $n=3$ değeri doğru gözükmektedir. Geopier elemanların literatürde bulunan yöntemlere göre hesaplanmasında ise gerilme konsantrasyon oranı $n=6$ olarak alınmıştır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde ise bu değer değişik kolon çaplarına göre 5.35 ile 5.75 arasında değiştiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Dolgu, zemin iyileştirmesi, taş kolonlar, geopier elemanlar, rammed aggregate piers, oturma, taşıma gücü.

ABSTRACT

Soil improvement methods are developed for solving the bearing capacity, deformation and stability problems on the earthfills built on soft ground.

In this research two of these methods which are stone columns and geopier, were studied. Stone column is frequently used soil improvement method nowadays. It could be used both in cohesive and cohesionless soils for increasing the rate of consolidation, decreasing the settlements, improving the bearing capacity, to lessen the liquefaction potential and for the stability of the earthfills. In US, geopier is a successful and economic practice which is used as a soil improvement method in soft soil region. This is based on a well elaborated method used in weak soil, comprising very hard and dense aggregate compacted with a hammer in the holes formed in the ground.

In this research, increasing the bearing capacity of the earthfill on soft clayey soils were studied. Bearing capacity and consolidation behaviour were studied under thick earthfill on soft and medium stiff clay with both stone column and geopier treatment and the improvements were calculated using both the calculation methods in literature and PLAXIS finite elements program. Analysis methods in literature and PLAXIS finite elements analysis have shown the stone column reinforced soil had an increase in the bearing capacity. Also, expected settlement values decreased compared to the untreated soil. Bearing capacity computed by using the classical methods was larger than that found by PLAXIS finite elements program. According to the results of analyses, reinforcement using geopier elements, even with shorter column lengths will provide nearly same improvement with the stone column. The calculated settlement values were larger than the values for stone columns, but smaller than for the untreated soil. Bearing capacity of soil reinforced with geopiers calculated by the classical methods were larger than that found by PLAXIS. In the analyses of the stone column by the literature methods for the stress concentration ratio $n=3$ value used and the analyses made with PLAXIS revealed that this ratio varies between 2.88 and 3.70 depending on the column diameter. Therefore the value of $n=3$ seems to be appropriate. In the geopier calculation with the literature methods, stress concentration rate was taken as 6. The analysis made with PLAXIS showed that, the ratio varies between 5.35 and 5.75 depending on the column diameter.

Key Words: Earthfill, ground treatment, stone column, geopier, rammed aggregate piers, settlement, bearing capacity.

1. GİRİŞ

Kötü zemin şartlarına sahip sahalarda inşa edilecek yapılarda geleneksel zemin inşaatı yöntemleri ekonomik boyutunu kaybetmektedir. Bu nedenle bunlara bir alternatif teşkil edecek yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan biri de yerinde zemin iyileştirme yöntemlerinden olan taş kolon yöntemidir. Taş kolonlar ilk olarak 1830'lu yıllarda Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Ancak, bu yöntem Avrupa'da 1950'den sonra, Amerika'da ise 1972'den sonra yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntemde bir prob veya muhafaza borusu yardımıyla istenilen derinliğe kadar zemine yer değiştirterek inilmekte ve daha sonra oluşturulan bu boşluğa zemin yüzeyine kadar titreşim ile sıkıştırılarak granüler malzeme doldurulmakta ve zemin içerisinde kolonlar oluşturulmaktadır. Genellikle taş kolonların sağlam tabakaya ulaşacak şekilde uygulanması tercih edilmektedir.

Son yirmi yıllık dönemde ise Amerika Birleşik Devletleri'nde yumuşak zemin özelliği taşıyan bölgelerde yapılan birçok projede, özel bir taş kolon çeşidi olan geopier kolonlar (Rammed Aggregate Pier) yöntemi kullanılarak zemin iyileştirmesinde oldukça başarılı ve ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntem özetle, zeminde açılan bir kuyu içerisine çok sert ve yoğunluğu yüksek agregaların patentli konik uçlu bir darbe tokmağı ile kademeler halinde sıkıştırılması ve zeminde yüksek yoğunlukta agrega kolonlar oluşturulmasıdır. Bu yöntemde, agrega kolonunun tabanı daha alttaki sert bir zemine değil, yumuşak ve sıkışma özelliği gösteren zeminlere oturtulmaktadır. Geopier kolonlar inşa edilirken darbe ile sıkıştırılan agregalar yanal olarak genişlemekte ve zeminde yanal yönde bir sıkışma sağlanmaktadır.

Geopier yöntemi ile iyileştirilen zeminlerde zemin üst ve alt bölge olarak iki kısımda ele alınmakta, geopier uygulanan tabakada oluşan gerilme birikimini modellemek için yay yaklaşımı kullanılmaktadır. Böylece kolonun yataklanma katsayısına göre meydana gelebilecek oturmalar kolayca belirlenebilmektedir. Bu yaklaşıma uygun olarak genellikle arazide yükleme deneyleri yapılarak geopier kolonların sıkışma modülü tespit edilmektedir. Alt bölgedeki zeminin oturmaları ise geleneksel zemin mekaniği yöntemleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Daha sonra bu iki tabaka için elde edilen değerler toplanarak toplam oturma değerleri elde edilmektedir.

Geopier kolonlar darbe etkisi ile oluşturulduğu için yüksek çevre sürtünmesine sahiptir. Bu nedenle, kolon tabanına yerleştirilen ve çekme çubukları ile yüzeye bağlanan bir metal plaka vasıtasıyla düşey ankraj olarak da kullanılabilirler.

1.1 Literatür Araştırması

Zemin iyileştirme amacı ile kullanılan taş kolon ve geopier uygulamaları hakkında literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda kısaca değinilmiştir. Bölüm 2 ve Bölüm 3’de, sırası ile, taş kolon ve geopier uygulamaları hakkında daha geniş bilgi ile birlikte literatürde yer alan diğer çalışmalara yer verilmiştir.

Dursunoğlu vd.’nin (1992) yayınlamış olduğu makalede ülkemizde ilk defa Borçelik Gemlik Soğuk Hadde Fabrikası’nda uygulanan taş kolonların projelendirilmesi, gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır.

ZETAŞ Zemin Teknolojisi A.Ş. tarafından gerçekleştirilen zemin etüdü bulguları fabrika alanının sıvılaşma potansiyeline sahip bir bölge olduğu göstermiştir. Bu amaçla, doğal zemin kotundan itibaren 12.0 m derinliğe kadar olan zemin tabakalarının taş kolonlar ile ıslah edilmesi projelendirilmiştir. Ayrıca tesis dahilindeki yüksek stok sahası yüklerini taşımak ve oturmaları azaltmak için de bazı bölgelerde sağlam (taşıyıcı) zemine kadar taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir. (Dursunoğlu vd, 1992).

Yapılan çalışmada, uygulama alanı arazide rastlanan zemin tabakalarına göre dört bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelerin zemin modellerine uygun olarak taş kolon çapları, dizilimleri ve boyları belirlenmiştir.

Taş kolonlar bir muhafaza borusunun üstten darbe ile sürülmesi sonucu oluşturulmuşlardır. Bu yöntemde, ucu sac tıpa ile kapalı bir muhafaza borusu üstten bir darbeli dizel çekiç ile vurularak istenilen derinliğe kadar sürülmüştür. Muhafaza borusu çelik olup kalınlığı kullanılan çekicinin uygulayacağı en yüksek darbeye dayanır nitelikte seçilmiştir. Tıpa, çakma esnasında maruz kalacağı yükler altında deforme olmaması için min. 12 mm kalınlıkta sac olarak seçilmiştir. Proje kotuna kadar çakma işlemi yapıldıktan sonra, boru içerisine taş kolon malzemesi doldurulmuştur. Boru titreşim ile yukarı çekilmiştir. Borunun yukarı çekilme işlemi başladıktan sonra uçtaki tıpa muhafaza borusunun ucundan ayrılmış ve çakıldığı yerde kalmıştır. Taş kolonda kullanılan malzeme temiz, sert ve kimyasal reaksiyona girmeyen doğal kırma taştır. Malzeme 10 -100 mm dane boyutundadır ve 200 no’lu elekten geçen ince dane miktarı %5’den azdır. (Dursunoğlu vd., 1992).

Zeminin iyileşme derecesinin belirlenmesi için CPT ve bölge yükleme deneyleri yapılmıştır. Buna göre uygulama bölgeleri 200-400 adetlik taş kolon alanlarına bölünerek her bir deney alanında ikisi taş kolon öncesi dördü ise taş kolon uygulandıktan sonra olmak üzere altı adet CPT deneyi yapılmıştır. CPT deneyleri 200 kN kapasiteli elektrikli sonda (piezocone) ve mekanik sonda kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca tesis genelinde ikisi iyileştirilmemiş alanda,

ikisi ise taş kolon ile iyileştirilmiş alanda olmak üzere dört adet yükleme deneyi yapılmıştır.

Deneylelerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Sürtünme oranı $FR > \%3$ olan killi zemin tabakalarında iyileştirme öncesi ve sonrası CPT uç mukavemeti değerlerinde belirgin bir fark olmamaktadır. Başka bir deyişle, $FR > \%3$ olan killi tabakalarda taş kolon uygulaması mukavemeti arttırmamaktadır. Hassas kil tabakalarında taş kolon uygulaması sonrasında CPT uç mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- $FR < \%3$ olan kısımlarda ölçülen CPT değerlerinde iyileştirme sonrası uç mukavemeti değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Deney yapılan kısımlarda çakmadan dolayı boşluk suyu basıncında artış meydana geldiği için bir süre beklendikten sonra yapılan deneylerde uç mukavemeti daha fazla çıkmaktadır.
- İki bölgede yapılan yükleme deneyi sonucunda yükleme oturma grafiği 300 ton (19 t/m^2) değerine kadar aynı şekilde ilerlemekte, 300 tonu geçince iyileştirilmemiş zeminde oturmalar hızlı bir şekilde artmaktayken iyileştirilmiş zeminde bu görülmemektedir. 19 t/m^2 'den sonra taş kolon olmayan bölgede oturmaların hızlanması, bu gerilmenin üzerinde zeminde bir taşıma kapasitesi göçmesi olduğunu göstermektedir. Taş kolonda ise 27 t/m^2 zemin gerilmesine kadar bu tür göçme olmamaktadır. Bu bilgiler ışığında 20 t/m^2 stok sahası yükü etkileyen fakat projede taş kolon uygulanması ön görülmeyen kısımlara da taş kolon uygulanmasına karar verilmiştir.

Lawton vd. (1994) oturmaları ve sıyırılmaları kontrol etmek için kısa agrega kolonlar kullanılarak iyileştirilen iki ayrı projede yapılan hesaplamaları ve uygulama sonucunda elde edilen değerleri karşılaştırmışlardır. Birinci projede agrega kolonlar, tekil ve radye temellerde meydana gelebilecek oturma miktarını azaltmak için kullanılmıştır. Makalede agrega kolonlar ile güçlendirilmiş zeminlerde oturmaların hesabı için uygulanabilecek yöntem tanımlanmış ve bu yöntemle göre yapılan hesaplarda bulunan ile gerçek oturma birbirine yakın olduğu gösterilmiştir. İkinci projede kısa agrega kolonlar yüksek kaldırma gücü oluşmasına sebep olan rüzgar yüküne karşılık, havalimanı hangarının sıyırılma kapasitesini arttırmak için kullanılmışlardır. Agrega kolonlar 113 km/sa hızdan daha hızlı esen rüzgara karşı iyi bir şekilde dayanabilmişlerdir. Makalede agrega kolonların sıyırılma kapasitesini hesaplamak için teorik bir yöntem önerilmiştir.

Birinci proje, bir hastanenin genişletilmesi amacıyla iki adet kule bina eklenmesi çalışmasıdır. Bu çalışma ile ek ofis ve hastane odaları elde edilmesi planlanmıştır. Dört katlı bir yapının üzerine yirmi katlı olması planlanan kulelerden biri inşa edilecektir. Yapılacak olan diğer kule ise 16 katlı olup sıfırdan inşa edilecektir.

Bölgedeki zemin formasyonu, sertten katıya değişen kil, kumlu silt, sıkı siltli kum üzerinde gevşek siltli kum ve en altta kaya şeklinde tanımlanmaktadır. Tasarım aşamasında hesaplanan oturma değerleri ile oluşan gerçek oturma değerleri Çizelge 1.1'de sunulmuştur.

Çizelge 1.1 Tahmin edilen oturma değerleri ile gerçek oturma değerlerinin karşılaştırılması.
(Lawton vd., 1994)

	Oturma Miktarı (mm)		Ölçülen Değer
	Tahmin Edilen		
Çalışma Yeri ve Temel Şekli	İyileştirilmemiş	Agrega Kolonlu	
Güney Kulesi, Kare Temel	40-43	8-12	<6
Güney Kulesi, Dikdörtgen Temel	52-58	10-16	<10
Kuzey Kulesi, Geniş Radye Temel	29-71	13-38	<10
Kuzey Kulesi, Küçük Radye Temel	62-98	24-48	<20

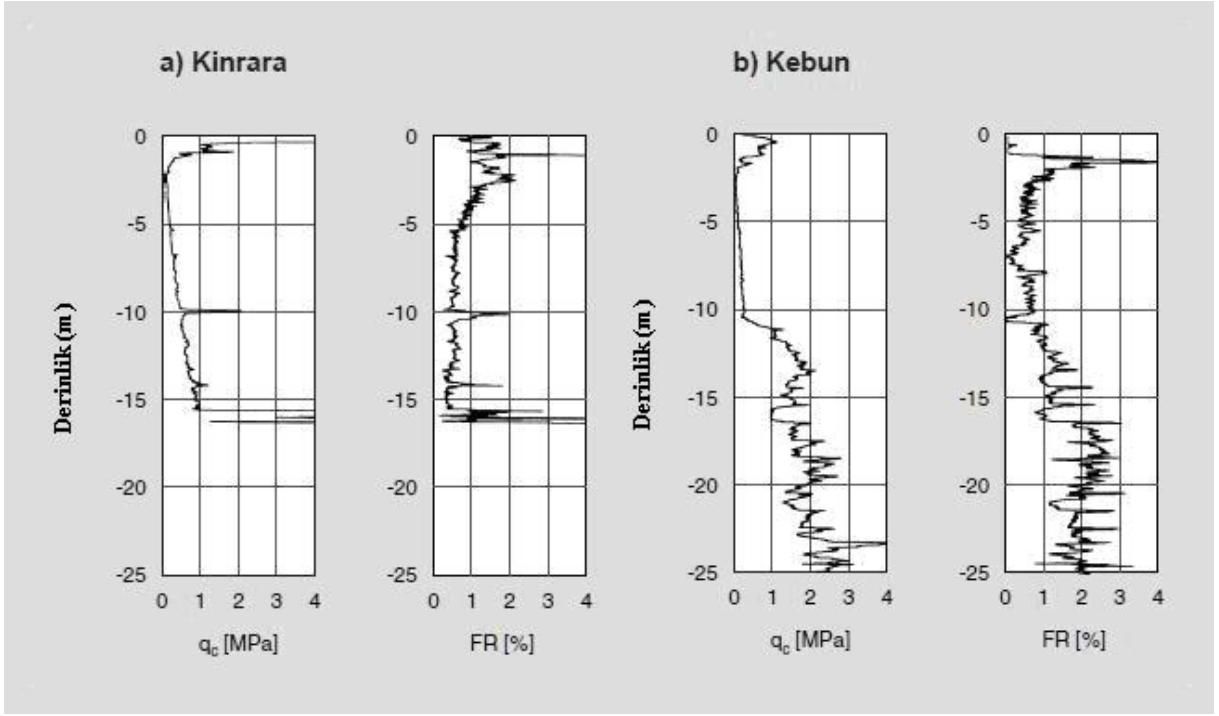
Agrega kolonlu ve agrega kolonsuz zeminlerde tahmin edilen ve ölçülen oturma değerleri, agrega kolonların toplam ve farklı oturma değerlerini düşürmekte etkili olduğunu göstermiştir. (Lawton vd., 1994).

Raju (1997) çok yumuşak killerde vibro yer değiştirme (taş kolonlar) yöntemi uygulandığında oluşan konsolidasyon sürecini incelemiştir. Vibro yer değiştirme genellikle gevşek siltli kumlar, yumuşak siltler ve kayma mukavemeti 15 kPa'dan yukarı olan killer gibi zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Çalışmada, vibro yer değiştirme metodunun drenajsız kayma mukavemeti 10 kPa'dan az olan çok yumuşak killer için uygun olup olmadığı Malezya'daki Kinrara ve Kebun isimli şehirlerde gerçekleştirilen araştırmalar ile incelenmiştir.

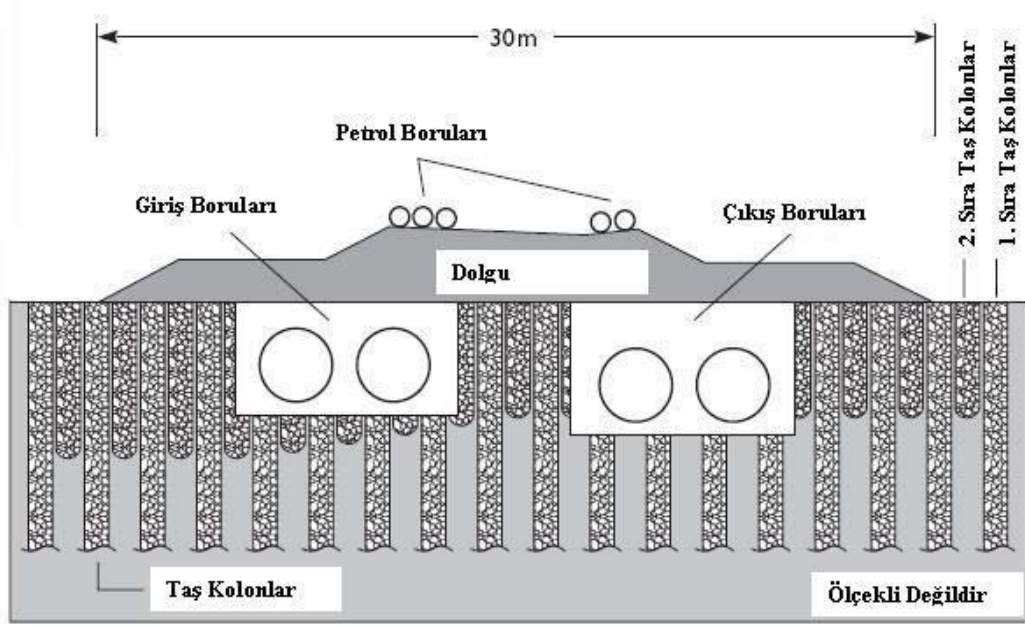
Kinrara'daki madencilik etkinlikleri nedeniyle bölgede geniş çukurlar açılmakta ve bu çukurların içi çamur ile dolu bulunmaktadır. Bazı yerlerde bu çamurların kalınlıkları 16 m'yi bulmakta ve derinliği boyunca SPT değerleri sifira eşit olmaktadır. Çamur havuzu derinliğinin 16 m olduğu noktadan bir otoyol geçirilmesi araştırılmıştır. Şekil 1.1a'da Kinrara'da çamur havuzunda gerçekleştirilen CPT deneyi sonuçlarından biri gösterilmiştir. Uç direnci değerleri 0.15 MPa ile 1.0 MPa arasında değişmektedir. Kayma mukavemeti değerleri tepede 6 kPa'dan azdır ve derinlikle birlikte her metrede 2-3 kPa artmaktadır. Kebun ise Malezya'nın batı sahilinde yer alan bir liman kentidir. Sahil kesiminde zeminin üst kısmında baskın olarak kalınlığı 35 m'den fazla olan çok yumuşak deniz kili bulunmaktadır. Şekil 1.1b Kebun'da 11 m kalınlığındaki yumuşak kil tabakasında gerçekleştirilen CPT deneyi sonuçları gösterilmiştir. Buna göre uç direnci 0.1 MPa ile 0.3 MPa arasında değişmektedir. Drenajsız kayma mukavemeti değerleri ise 5 kPa'dan azdır ve derinlikle birlikte her metrede 1 kPa artmaktadır. Çizelge 1.2'de örnek teşkil etmesi amacıyla zemin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 Örnek numunelerden elde edilen laboratuvar deneyleri sonucu.

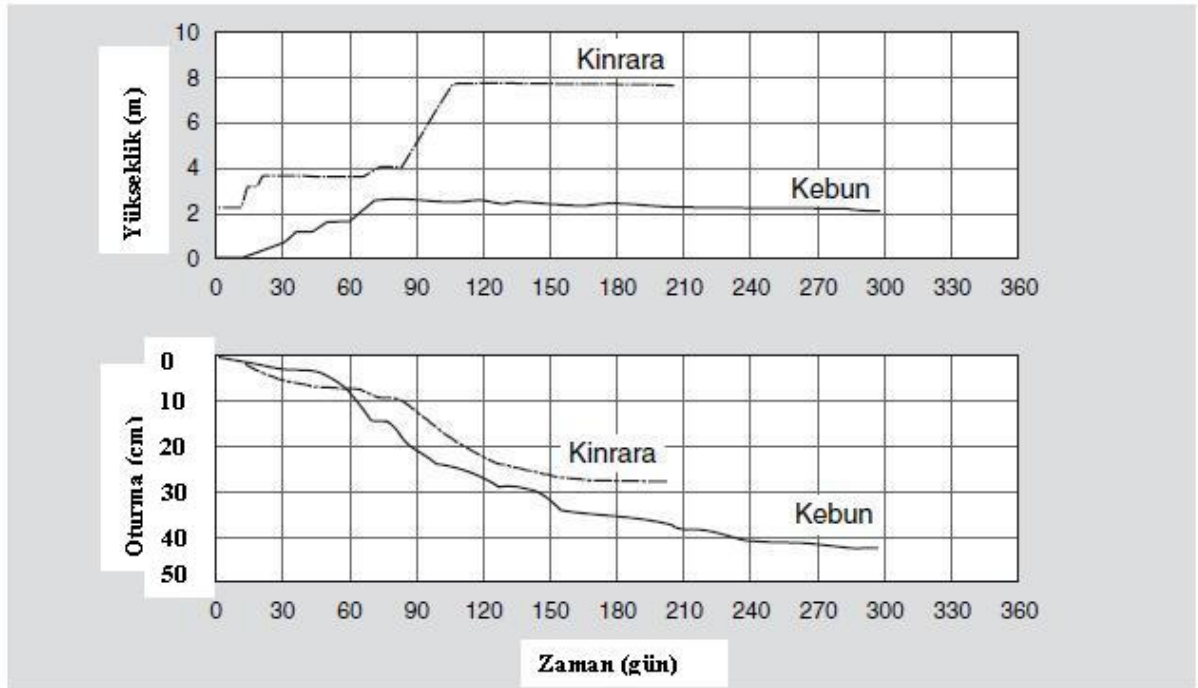
Saha	Zemin Cinsi	w (%)	w _l (%)	w _p (%)	PI (%)	Kil (%)	Silt (%)	Kum (%)	S _t (-)	c _v (m ² /yıl)
Kinrara	Maden Çamuru	60	60	30	30	40	45	15	2-3	4.0
Kebun	Deniz Kili	100	100	40	60	50	45	5	4-5	1.0

Şekil 1.1 CPT deney sonuçları: (a) Kinrara ve (b) Kebun. (q_c, uç direnci; FR, sürtünme oranı.)

Taş kolon uygulaması Priebe'in (1995) geliştirdiği yöntemle tasarlanmıştır. Kolon çapları 1 m olmakla beraber, bazı durumlarda kolon çapı 1.2 m'den fazla alınmıştır. Kolonlar bazı yerlerde 1.5 m, bazı yerlerdeyse 2 m aralıklara sahip olacak yerleşim düzeninde ve sıkı veya katı tabakaya ulaşacak boyda imal edilmişlerdir.



Şekil 1.2 Zemin iyileştirilmesi için kullanılan taş kolonların şeması.(Raju, 1997)



Şekil 1.3 Kinrara ve Kebun'da ölçüm cihazından alınan oturma sonuçları.

Oturma ölçüm aletleri ile oluşacak olan oturmaların geniş bir alanda ölçülmesine çalışılmıştır. Her sahaya yaklaşık 40 adet ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Şekil 1.3 Kinrara ve Kebun'da en fazla oturmanın olduğu kısımda ölçülen oturmaların sonuçları gösterilmektedir. Kinrara'da, ölçüm yapılan noktada kolon çapı 1.2 m, kolonlar arası mesafe merkezden merkeze 1.8 m ve kolon boyu ise 17 m olarak alınmıştır. Kebun'da ise kolon çapı 1.1 m, kolonlar arası mesafe

merkezden merkeze 2.2 m ve kolon boyu 12 m olarak alınmıştır. Kinrara'da ölçüm alınan nokta, dolgunun maksimum yüksekliğinin olduğu nokta yani 7.5 m olduğu noktadır ve bu noktada oturma 25 cm olarak ölçülmüştür. Bu oturmanın büyük kısmı dolgu inşa edilirken, geri kalan kısmı ise ondan sonraki 3 ay içinde meydana gelmiştir. Kebun'da dolgunun 2.6 m (1m'lik ön yüklemeyi içermekte) olduğu noktada alınan ölçümlere göre oturma 40 cm olarak ölçülmüştür. Bu değer %25'i dolgu inşaatı sırasında meydana gelmiştir. Geri kalan oturma ise ondan sonraki 8 ayda tamamlanmıştır. Raju (1997) iki saha arasındaki zemin şartları farklı olduğu için oturma değerlerinin direkt karşılaştırılmayacağını söylemiştir. Raju (1997) tarafından ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Ölçülen oturma değerleri Kinrara'da 25 cm, Kebun'da ise 40 cm olarak belirlenmiştir. Bu değerler iyileştirilmemiş zemindekilerle karşılaştırıldığında iyileşme faktörünün sırasıyla 4 ve 2.5 olduğunu tespit etmiştir. Bu ise vibro yer değiştirme ile çok yumuşak killerde iyileşme sağlanabileceğini göstermektedir.
- Birbirine yakın gibi görünen çok yumuşak kil zeminlerin oturma davranışının çok farklı olduğu görülmüştür. Çamur (slime) çok çabuk konsolide olmuştur. Oturmanın %75'inden fazlası dolgu inşa edilirken meydana gelmiş ve bundan sonraki üç aylık bir dönemde aşırı bir oturma tespit edilmemiştir. Deniz kilinde ise konsolidasyon daha uzun zaman almıştır. Oturmanın %75'inden fazlası dolgu inşaatından sonraki dönemde meydana gelmiştir. Oturmaların stabil hale gelmesi için 6 ay geçmesi gerekmiştir. Raju'ya (1997) göre bu davranış kilin konsolidasyon katsayısına ve deniz kilinin yüksek plastisiteli olmasına bağlanabilir. Deniz killerinde ön yükleme yapılırken uzun dönemde meydana gelecek oturmalara dikkat edilmesi önerilmektedir.

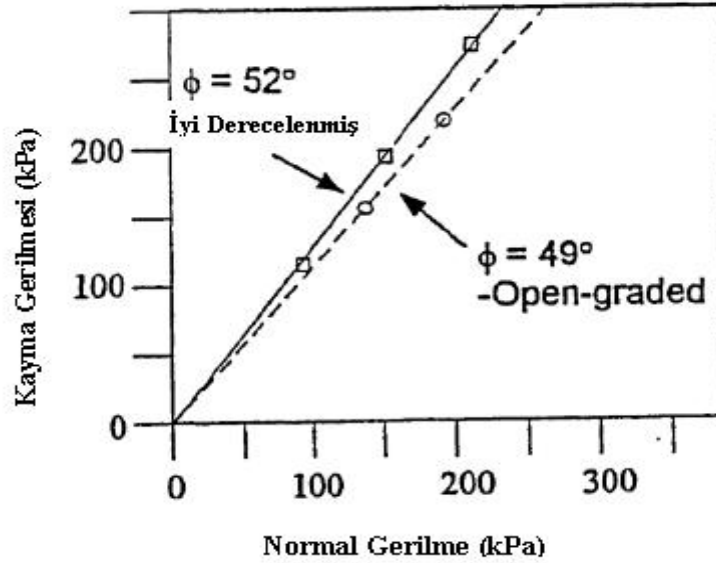
Sonuç olarak, bu çalışmaya göre taş kolonları drenajsız kayma mukavemeti 10 kPa'dan küçük olan çok yumuşak killi zeminlerde uygulamak mümkündür. Uygulanan zemin iyileştirmesini takiben 10 m'lik otoyol dolgusu inşa edilmiştir ve meydana gelen oturmaların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür.

Wissmann (1999) geopier ile desteklenmiş temellerin taşıma kapasitesini belirlemek için gerekli tasarım yöntemlerini ele almıştır. Geopier elemanlarının tekil ve grup davranışı, bu elemanların inşası sırasında uygulanan çakma işlemi sebebiyle zeminde oluşan gerilme değişimi ve temel, zemin ve geopier arasındaki karmaşık yükleme-aktarım mekanizması nedeniyle oldukça karmaşıktır. Birbirleriyle olan bu karmaşık etkileşimler nedeniyle basitleştirilmiş yaklaşımlar ve kabuller yapmak gerekmektedir. Çalışmada çeşitli uzunlukta geopier elemanlar kullanımı ile elde edilen taşıma gücü değerleri karşılaştırılmıştır.

Wissmann vd. (2002) geopier uygulamalarında kullanılan tasarım parametrelerini, genel stabilite ve oturma kontrolü yönünden incelemiştir. Geopierlarda kullanılan agrega elemanlarının sahip olduğu yüksek kayma dayanımı şevlerdeki ve dolgu altındaki zeminlerin kayma direncinde önemli artışlara olanak sağlamakta ve bunun sonucunda göçmeye karşı yüksek güvenlik sağlamaktadır. Wissmann vd., (2002) geopier elemanlarının mühendislik

özelliklerini belirlemek için arazi ve laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Arazide geopir elemanların tepe noktasında yaptıkları kesme deneyleri ve laboratuvar numuneleri üzerinde yaptıkları üç eksenli deneyler ile kolon elemanların yüksek kesme dayanımına sahip olduklarını bulmuşlardır.

Gerçekleştirdikleri tam ölçekli kesme deneylerinde, geopier kolon inşa edildikten sonra, ince dane oranı %0 olan malzeme ile inşa edilen kolonların olduğu bölgede içsel sürtünme açısı 49° civarında, ince daneli malzeme oranı %10 olan kolonların olduğu bölgede ise 52° civarında bulunmuştur. İnce daneli malzeme oranı %10 olan kolonların olduğu bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılan üç eksenli deney sonucunda içsel sürtünme açısı 51° olarak bulunmuştur. Şekil 1.4'de arazide yapılan kesme deneyi sonuçları gösterilmiştir. Çeşitli zeminlerde, değişik boy ve uzunluktaki geopier elemanları üzerinde gerçekleştirilen modül deneyleri sonucunda Fox ve Cowell (1998) tarafından bir veri tabanı geliştirilmiştir. Sıkışma modülü, kolon elemanı üzerindeki gerilmenin kolon elemanı üzerindeki dönmeye oranı olarak tanımlanır.



Şekil 1.4 Tam ölçekli kesme deneyi sonuçları. (Wissmann vd., 2002)

Geopier elemanlarının rijitliği ve bu elemanların inşası sırasında zeminde oluşturulan yanıl gerilme artışı nedeniyle iyileştirme yapılan bölgede kompozit rijitlik artmakta ve oturmaların azalması sağlanmaktadır. (Wissmann, 2002). Ayrıca zeminde uygulanan geopier elemanlar nedeniyle oluşacak radyal drenaj oturmaların daha hızlı olması sağlanmaktadır. Des Moines, Iowa'da yapılan arazi deney çalışmasında köprü ayağı altında inşa edilen geopierlerin

davranışı incelenmiştir. Tasarım boyutları 0.76 m çaplı, merkezden merkeze 1.8 m aralıklı ve 5.5 m boyunda olan geopier kolonlar yumuşak kil zeminde inşa edilmişlerdir. İnşaat sonrasında güçlendirilmiş zeminde yapılan ölçümlerde oturmanın yaklaşık 2.5 cm olduğu civarında görülmüştür ki bu değer iyileştirilmemiş zeminde tahmin edilen oturmanın %10'u kadardır.

White vd. (2002), Des Moines, Iowa'daki bir otoyol genişletme işi için inşa edilen taş kolon ve geopier uygulamalarını karşılaştırmışlardır. Burada inşa edilecek iki adet dolgunun zemin tarafından taşınabilmesi için zeminde iyileştirme yapılması gerekmektedir. Bir bölümde sıkışabilirliği azaltmak ve kayma dayanımını arttırmak için taş kolon inşa edilmiş, diğer bölümde de oturmaların azaltılması ve oturma hızının arttırılması için geopier inşa edilmiştir.

Dolgu sahası benzer zeminlerden oluşmaktadır. Taş kolonlar büyük çaplı ve uzun elemanlar olarak seçilmişlerdir. Geopier elemanlar ise küçük çaplı ve kısa fakat yüksek rijitlikte seçilmişlerdir. Dolgu yerleştirilmeden önce arazi deneyleri ve tam ölçekli yükleme deneyleri yapılarak tasarım için gerekli zemin parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca dolgu inşası sırasında dolgu altındaki oturmaları belirleyebilmek için ölçüm plakaları yerleştirilmiştir. Bu araştırma, yerinde ölçümlerle taş kolon ve geopier davranışı karşılaştırıldığı için önemlidir. Deney sahasında taş kolonlar 9m'lik köprü ayağı dolgusunun genel stabilitesini sağlamak için, oturmaları azaltacak ve güvenlik faktörünü arttıracak şekilde 3 m ile 14 m arasında değişen boylarda inşa edilmişlerdir. Benzer sahada ise geopier kolonlar boyları 4.5 m ile 6.5 m arasında değişecek şekilde inşa edilmişlerdir. Geopier kullanımı ile oturma değerinin azaltılması ve oturma hızının arttırılması amaçlanmış ve bu şekilde köprü ayaklarının hızlı bir şekilde inşa edilmesinin sağlanabileceği düşünülmüştür.

Arazi deneylerinin gerçekleştirildiği inşaat sahasında zemin özellikleri benzer olmakla birlikte, taş kolonların uygulandığı zemin ile geopier kolonların uygulandığı zemin koşulları arasında bazı farklılıklar mevcuttur. Çizelge 1.3'de zemin özellikleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Taş kolonların uygulandığı sahadaki CPT uç direncinin geopier inşa edilen sahadakine oranı yaklaşık olarak 1.2'dir. Bu oran bize taş kolon imal edilen sahadaki killi ve siltli zeminlerin geopier inşa edilen sahadakinden biraz daha dayanımlı olduğunu göstermektedir. Taş kolon sahasında ölçülen CPT sürtünme oranı değeri geopier sahasından elde edilen değerlerden düşüktür. Bu değer düşük olması zeminin daha az kohezyonlu davranış göstereceği şeklinde yorumlanabilir. (Douglas and Olsen, 1981; White, D.J. vd., 2002). Farklı boyda inşa edildikleri için farklı özellikteki tabakada sonlanmaktadırlar. Geopier elemanlarının çapları

küçük olduğu için taş kolonlara nazaran daha küçük alan değişim oranları elde edilmektedir.

Çizelge 1.3 Taş kolon ve geopier inşa sahasının zemin özelliklerinin karşılaştırılması.(White vd., 2002)

	Taş Kolon	Geopier
Taşıyıcı tabakaya olan mesafe (m)	3 – 13	4 – 6
CPT Uç Direnci (kPa)	650 – 1000	400 – 950
CPT Sürtünme Oranı (%)	1.7 – 2.9	3.8 – 6.7
Kolon Elemanı İnşa Derinliği (m)	3 – 14	4.5 – 6.5
Kolon Elemanı Çapı (m)	0.91	0.76
Kolon Elemanları Arası Mesafe (m)	1.8 (Eşkenar Üçgen Dizilimi)	1.8 (Kare)
Alan Değişim Oranı (%)	23	14
Dolgu Tabakası Yüksekliği (m)	9	8
Kolon Elemanı Sayısı	871	234

Taş kolon ve geopier tek elemanları üzerinde, ayrıca taş kolon ve geopier elemanları ile iyileştirilen zeminler üzerinde yükleme deneyleri yapılmıştır. Çizelge 1.4’de yükleme deneylerinde elde edilen sonuçların karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 1.4 Yükleme deneyinden elde edilen Rijitlik değerlerinin karşılaştırılması. (White vd., 2002)

Etkiyen Gerilme (kPa)	Taş Kolon Rijitliği (MPa)	Geopier Kolon Rijitliği (MPa)	Geopier ve Taş Kolon Rijitlik Oranı
25	81	196	2.4
50	44	171	3.9
100	21	132	6.3
200	-	40	-
400	-	18	-

Çizelge 1.4’de, etkiyen gerilme ile rijitlik arasındaki bağlantı taş kolon ve geopier elemanlar için gösterilmiştir. Rijitlik Şekil 1.5’de gösterilen gerilme deformasyon eğrisinin eğimi olarak tanımlanmıştır.

Arazide taş kolon ve geopier ile iyileştirilen zeminler üzerinde yapılan dolgular altında ölçülen oturma değerleri Şekil 1.6'da gösterilmiş ve Çizelge 1.5'de özetlenmiştir. Arazide ölçülen oturma değerlerine göre;

- 6 m'lik dolgu yerleştirildikten sonra, taş kolon inşa edilen zemin yaklaşık 19.5 cm oturmuştur. Geopier inşa edilen zeminde ise bu değer yaklaşık 5.4 cm civarındadır.
- Taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerde oturma miktarının geopierdeki oturma miktarına oranı 6 m'lik dolgu için yaklaşık 3.2'dir.
- Taş kolon elemanları ile zemin arasındaki farklı oturmalar, geopier elemanları ile zemin arasındaki farklı oturmalardan çok daha büyüktür.

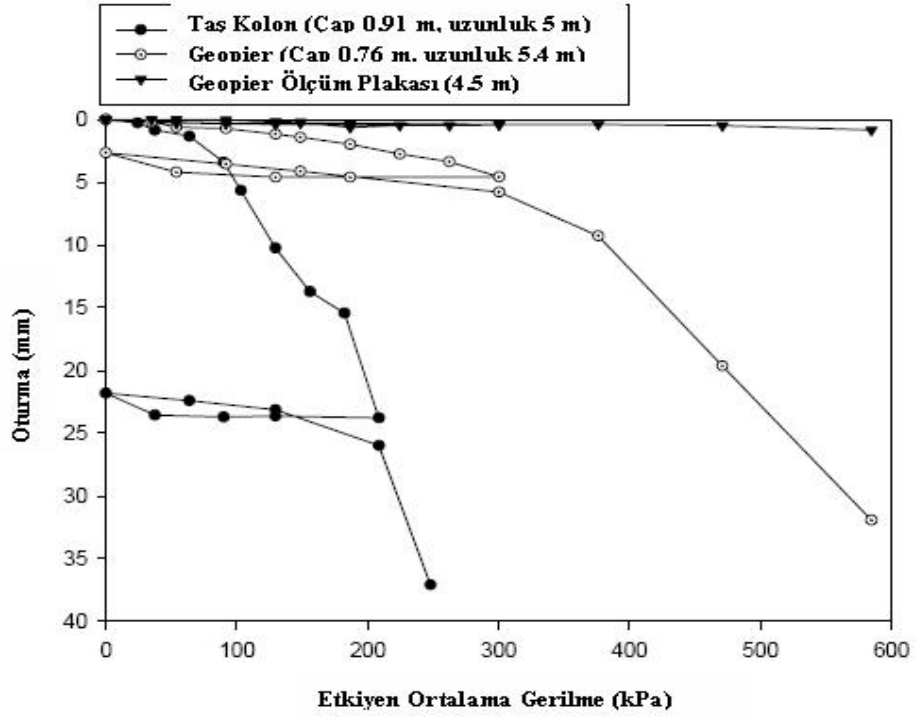
Taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde geopierdekenden daha fazla oturma meydana gelmesinin açıklaması, taş kolon ile yeniden şekillendirilen zeminin kolonları sınırlandırmaması ve kolonların genişlemesidir. (Mckenn vd., 1975)

Çizelge 1.5 Oturma gözlemlenmeleri sonuçları. (White vd., 2002)

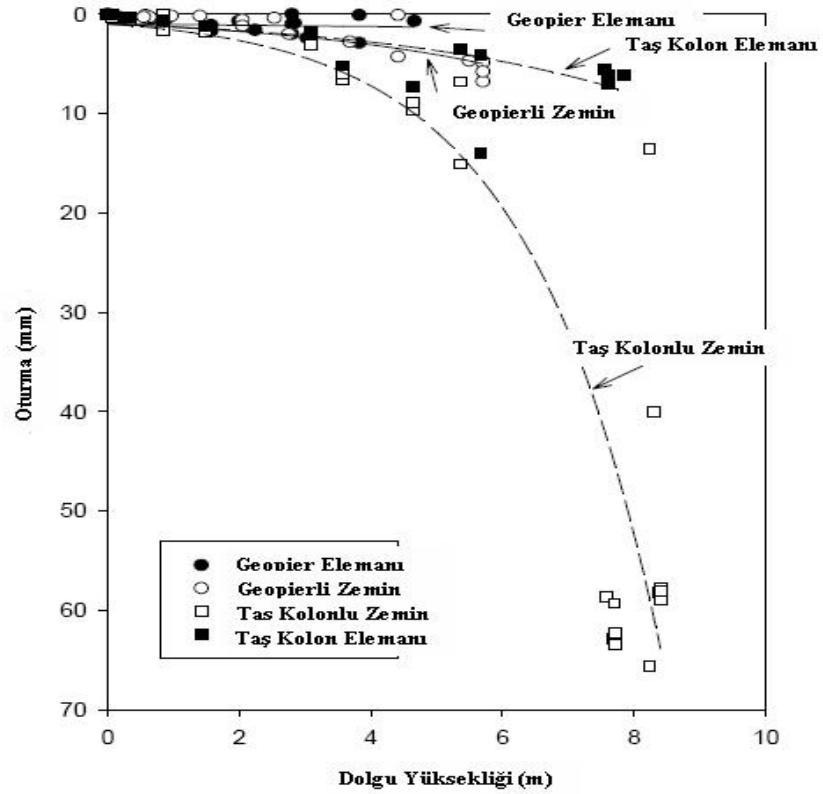
Oturma (cm)	Dolgu Yüksekliği (m)			
	2	4	6	8
Taş Kolon Elemanı	1.7	2.8	4.8	8.1
Taş Kolonlu Zemin	2.7	7.2	19.5	52.4
Taş Kolonlu Zemin ile Taş Kolon Elemanı Arasındaki Oran	1.6	2.6	4.1	6.5
Geopier Elemanı	1.1	1.3	1.5	-
Geopierli Zemin	1.8	3.1	5.4	-
Geopierli Zemin ile Geopier Elemanı Arasındaki Oran	1.6	2.4	3.6	-

White vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı arazi araştırmaları sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- CPT sonuçlarına göre taş kolon imal edilen saha, geopier inşa edilen sahaya göre biraz daha yüksek dayanımlı ve daha az kohezyonludur.
- Her iki sahada da kolonlar arasındaki boşluk merkezden merkeze 1.8 m olarak alınmıştır. Taş kolonların çaplarının büyük olması ve eşkenar üçgen dizilim uygulanması nedeniyle alan değişim oranı daha yüksektir.
- Kolonlar arasında gerçekleştirilen SPT sonuçlarına göre, ortalama N değeri taş kolon uygulanmış sahada 11, geopier uygulanmış sahada 17 olarak bulunmuştur.
- İnşaat sonrası geopier elemanlı zemindeki yanal gerilmenin taş kolonlu zemindekine oranı yaklaşık 2 bulunmuştur.



Şekil 1.5 Geopier ve taş kolon elemanlarındaki karşılaştırmalı gerilme-şekil değiştirme grafiği.



Şekil 1.6 Oturma plakalarından okunan dolgu yüksekliğine göre oturma miktarları.

- Taş kolonlar ile iyileştirilen zeminde meydana gelen oturma, geopier uygulanan zeminde meydana gelen oturmadan 3 kat fazladır.
- Yükleme deneyi sonuçlarına göre geopier rijitliğinin taş kolon rijitliğine oranı uygulanan gerilmenin fonksiyonu olarak 2 ila 9 arasında değişmektedir.

Taş kolonlu dolgu sahası amaçlanan genel şev stabilitesi güçlendirmesine uygun davranmıştır. Geopier uygulamasının ise oturmaların azaltılması ve dolgu ile köprü ayağı yapım süresinin kısaltılması amaçlarına uygun davrandığı gözlenmiştir. Geopierle, 120 gün olarak planlanan inşaat süresi 30 güne düşmüştür.

1.2 Amaç

Bu çalışmada, zayıf zemin tabakalarının yerinde iyileştirilmesi için kullanılan taş kolonlar ve gepier elemanların, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması yönünden etkinliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Taş kolonlar ve geopier elemanların yapım yöntemleri ve uygulama örnekleri incelenerek, üzerine dolgu inşa edilecek zayıf zemin tabakalarının taşıma gücünün ve meydana gelecek oturmaların belirlenebilmesi için, klasik hesap yöntemleri yanında sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programından da yararlanılarak hesaplar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, klasik hesap yöntemlerinde taş kolon ile zemin arasında yük paylaşımı için yapılan kabullerin geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. TAŞ KOLONLAR

2.1 Genel

Kötü zemin şartlarına sahip sahalarda inşa edilecek yapılarda geleneksel temel inşaatı yöntemleri pahalıya mal olmakta ve ekonomikliğini kaybetmektedir. Geleneksel temellerin bu tür zeminlerde inşaat maliyetinin yüksek olması, çevre faktörlerinin oluşturduğu sayısız sıkıntılar ve bunların aşılmasındaki güçlükler nedeniyle zayıf zeminlerde, yerinde zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmaya başlamıştır. Geçmişte uygulanmış bazı yöntemlerle bu tür zeminlerde ekonomik çözümler elde edilmiştir. Bu yöntemlerin bazıları günümüzde uygulanabilirliğini korumaktadır. Fakat uygulanan bu yöntemlerin uygulanabilirliği ve güvenilir olup olmadığı hakkında daha fazla araştırmaya gerek duyulmaktadır. Burada önemli olan soru bu yöntemlerin geleneksel temel inşaatı yöntemlerine, çevreye uygunluk ve ekonomiklik yönünden bir alternatif teşkil edip edemeyeceğidir.

Zemin iyileştirme yöntemleri arasında yeralan taş kolonlar bu zamana kadar başarı ile uygulanmış yöntemlerden biridir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda taş kolonların yumuşak killerde, siltlerde ve siltli kumlarda güçlendirme amacıyla kullanımının iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Taş kolonların geçmişine bakarsak, ilk olarak 1830'larda Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi için uygulandığını görürüz. O zamandan bu zamana bu yöntem Avrupa'da ancak 1950'den sonra, Amerika'da ise 1972'den sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Gerek ince daneli gerekse kaba daneli zeminlere uygulanabilen taş kolonların başlıca kullanım amaçları;

- Konsolidasyonu hızlandırmak
- Taşıma kapasitelerini arttırmak
- Sıvılaşma potansiyelini azaltmak
- Dolgu ve şev stabilizesini sağlamak

olarak özetlenebilir.

İnce daneli zeminlerde taş kolon uygulamalarının başlıca amacı arazide meydana gelecek konsolidasyon oturmasını hızlandırarak yapım öncesi temel için gerekli zeminin rijitliğini ve dayanımını arttırmaktır. Taş kolon uygulaması ile zemin içerisindeki su, yükmeden kaynaklanan hidrolik eğim sayesinde yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine doğru hareket eder. Suyun taş kolon içerisindeki hareketi zemin içerisindeki hareketine nazaran daha kolay olduğundan, taş kolonlar düşük enerji potansiyeline sahiptir. Bu nedenle,

zemin suyu taş kolonlar ile kolayca drene edilebilir.

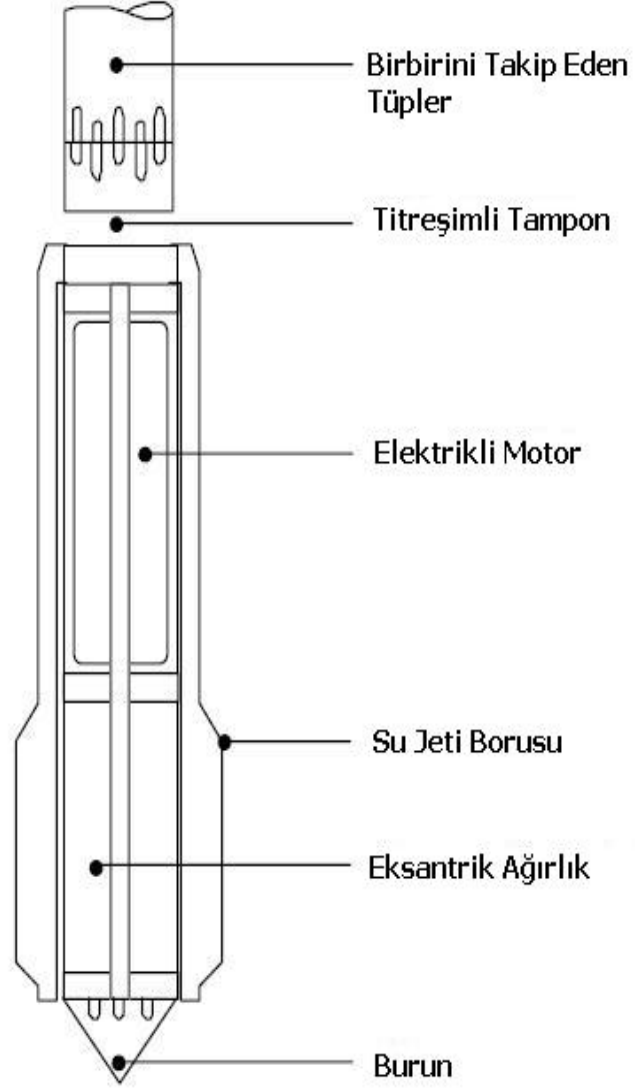
Taş kolonlar ayrıca zemindeki sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla uygulanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli olan bir zemine taş kolon uygulandığında zemine kazandırdığı özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Taş kolon yapımı sırasında oluşan titreşim ve yer değiştirme sayesinde zeminin sıklık derecesinde artış sağlanır.
- Taş kolonlar, sahip oldukları yüksek dayanım ve yoğunluk ile zeminin taşıma gücü kapasitesini arttırmaları.
- Taş kolonlar aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını engeller.
- Taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanıl gerilme artışı meydana gelir.

Taş kolon inşası yüzeydeki uygun olmayan zeminin genellikle zayıf tabakaya tamamen batacak şekilde inşa edilmiş sıkıştırılmış düşey taş kolonlarla kısmi olarak yer değiştirmesini içerir. Eğer inşa sırasında su kullanılıyorsa bu işlem vibro-replacement veya ıslak metot olarak adlandırılır. Islak metotta titreşim yanında basınçlı su jeti yardımıyla vibroflotun zeminde ilerlemesi sağlanmaktadır. Eski kontrolsüz dolgu zeminler gibi kısmen suya doygun zeminlerde su kullanılmadan yapılan işleme ise vibro-displacement veya kuru metot denilir. Bu yöntem sırasında zemine basınçlı hava verilerek zeminin yanıl olarak yer değiştirmesi sağlanarak probun zayıf tabakada ilerlemesi sağlanmaktadır. İlerleyen kısımlarda bu yöntemler ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Aşağıda taş kolon imalatında kullanılan aletler ve malzemeler anlatılmıştır. Burada kullanılan bilgiler Vibratory Ground Improvement Manual'den alınmış olup taş kolonların inşa adımları, ekipmanları ve uygulamaları hakkında özet bilgiler için Greenwood ve Kirsch'in (1983) yapmış olduğu çalışmadan yararlanılabilir. Taş kolon imalatı sırasında kullanılan malzeme, orijinali 1935 yılında granüler zeminlerin sıkıştırılması için geliştirilen, titreşimli bir prob yardımı ile sıkıştırılır. Prob gövdesi içerisindeki eksantrik ağırlık ve elektrik veya hidrolik güç kullanılarak prob uç kısmında yanıl titreşim oluşturulmaktadır. Her ne kadar her üretici kendi aletlerini farklı isimlerle adlandırsa da genel olarak problemleri tanımlamak için Vibroflot veya Poker terimleri kullanılır. Şekil 2.1'de taş kolon imalatında kullanılan Vibro Systems adlı şirketin V23 modeline ait kesit gösterilmiştir. Çizelge 2.1'de ise bazı vibroprob çeşitleri gösterilmiştir.

Vibroprob



Şekil 2.1 Vibroprob kesiti. (Vibratory Ground Improvement Manual, Vibro Systems Inc.)

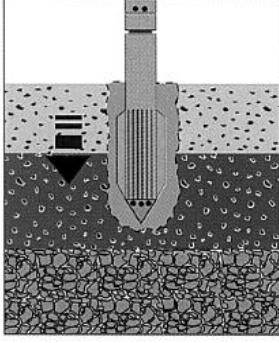
Çizelge 2.1 Vibroprob çeşitleri.

Üretici	Bauer	Bauer	Keller	Keller	Keller	Keller	Vibro	Vibro
Makine İsmi	TR13	TR85	M	S	A	L	V23	V32
Uzunluk (m)	3.13	4.20	3.30	3.00	4.35	3.10	3.57	3.57
Çap (mm)	300	420	290	400	290	320	350	350
Ağırlık (kg)	1000	2090	1600	2450	1900	1815	2200	2200
Motor (kW)	105	210	50	120	50	100	130	130
Hız (min⁻¹)	3250	1800	3000	1800	2000	3600	1800	1800
Genlik (mm)	6	22	7.2	18	13.8	5.3	23	32
Dinamik Kuvvet (kN)	150	330	150	280	160	201	300	450

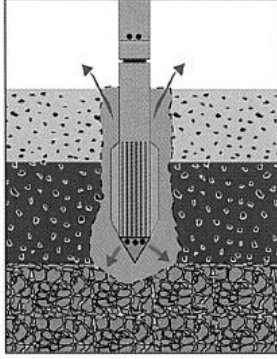
Problar genellikle 30 cm ile 46 cm arasında değişen çap değerlerine sahiptir. Bu değerler üreticinin donanımlarına bağlı olarak değişir.

2.2 Taş Kolon İmalatı

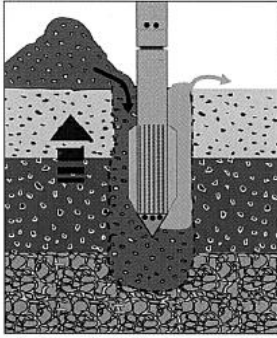
Titreşim ve su ve/veya hava jeti yardımıyla vibroprob ile zeminde gerekli derinlikte bir kuyu kazılır. Kazı sırasında kuyu içerisindeki erozyon ve yanal sıkışma nedeniyle kuyu probdan bir miktar geniştir. Kuyu içerisinde 30 cm.den 120 cm.ye kadar değişen kalınlıktaki tabakalar halinde geri dolgularla yüzeye kadar çıkılarak kolon imal edilmektedir. Taş zemin yüzeyinden boşaltılır ve prob ile zemin arasındaki dairesel boşluğa düşmesine izin verilir. Çukur kenarlarının göçmeyeceği bilinen zeminlerde açılan çukura taş eklenmeden önce prob geri çekilebilir. Her tabakanın oluşturulması sırasında malzemeyi sıkıştırmak ve zemin içerisine iyice yerleşmesini sağlamak amacıyla vibroprob tabakaya birkaç kez bastırılıp çıkarılır. Taşın sıkışması amacıyla vibroprob belli bir süre sabit pozisyonda tutulabilir. Taş kolon zemin yüzeyine ulaşıncaya kadar, birbirini takip eden ve sıkıştırılarak oluşturulan tabakalar halinde imal edilir. Aşağıda imalat adımları Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



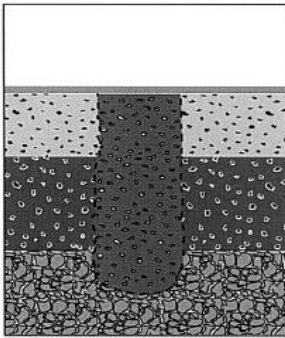
Penetrasyon: Vibroprobe titreşimle gerekli derinliğe kadar indirilir.



Kuyunun Basınçlı Suyla Temizlenmesi: Vibroprob etrafındaki bölge taş aktarımı için basınçlı suyla temizlenir.



Kurulum: Yukarıdan çakıl aktarılarak taş kolon imalatına başlanır.



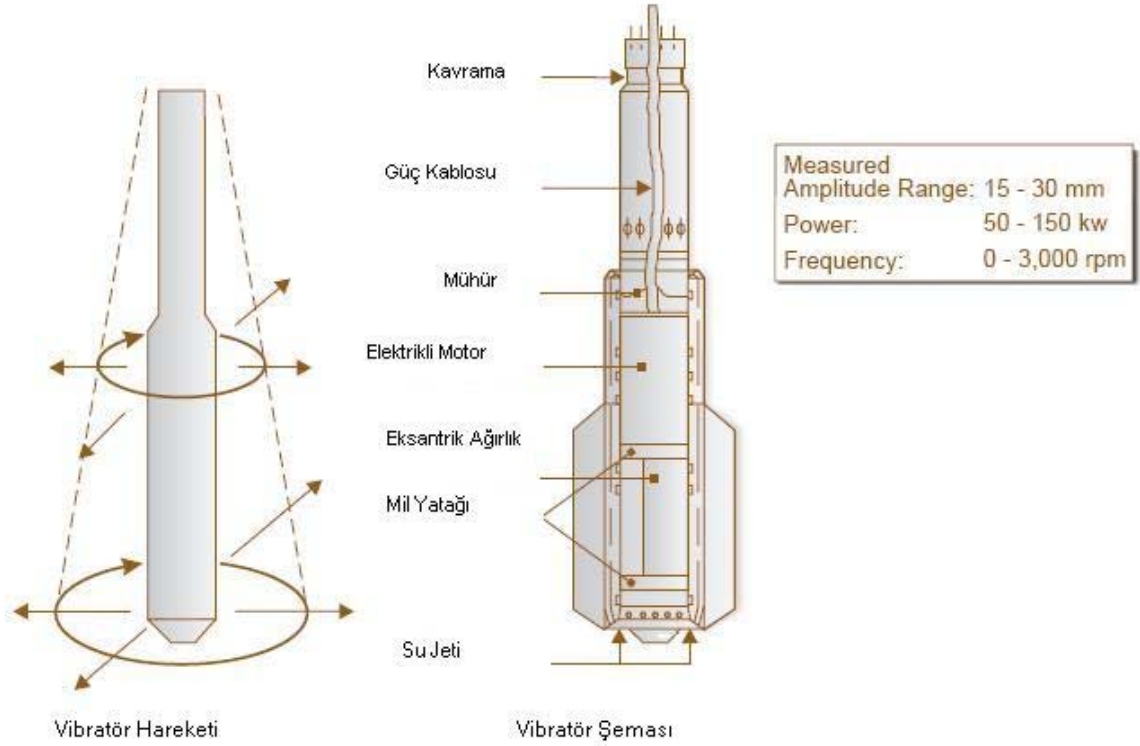
Bitiş: Yüzey seviyesi ile eşitlenir ve sonunda silindirele kompaksiyon yapılır.

Şekil 2.2 İmalat adımları.

2.3 Vibratör

Vibratör kendi ağırlığı ve oluşturulan titreşimle zemin içerisine batırılarak ilerler. Bazen zemin içerisinde daha kolay ilerlemesini sağlamak için hava veya su jeti kullanılır. İstenilen derinlikte eksantrik ağırlık ve elektrikli motor kullanılarak yanal vibrasyon oluşması sağlanır.

Vibratörün hareketi yatay düzlemde dairesel bir harektir ve zayıf zemin içerisinde dinamik kuvvetler oluşturur. Bu, vibratör istenilen derinlikteyken üretilen vibrasyon enerjisinin efektif kullanımını ve en iyi sıkışmanın elde edilmesini sağlar.



Şekil 2.3 Vibratör hareketi ve şeması.

2.4 Taş Kolon Uygulama Yöntemleri

Taş kolonlar farklı metotlarla değişik çap ve uzunluklarda uygulanabilmektedir. Uygulama yapılacak zemine göre değişen metotların bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.4.1 Vibro Kompaksiyon

Vibro kompaksiyon temiz, kohezyonsuz zeminlerin (Genellikle ince dane oranı %10'dan az) derinlik vibratörleri kullanılarak sıklığının artırılmasında kullanılır. Genellikle su jeti ile desteklenen vibratörün hareketi zemin partikülleri arasındaki kuvvetlerin yenilmesini sağlayarak onların daha sıkı konuma geçmesini sağlar. Bu yöntemle tipik olarak %70 – 80 rölatif sıklık elde edilebilir. Kompaksiyon su seviyesi altında ve üstünde başarılı olabilir.

İyileştirilen zeminin özellikleri, zemin tipine ve derecelenmesine, penetrasyon mesafesine ve kompaksiyon için geçen zamana bağlıdır. Genellikle merkez ile arasındaki mesafe 1,8 metre

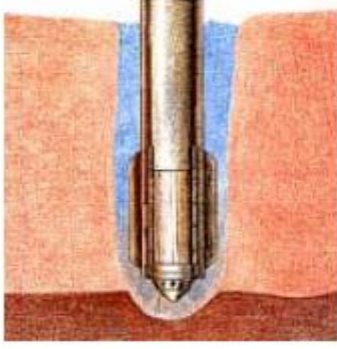
ile 4,3 metre arasında değişen değerlerde ve dizilimi eşkenar üçgen veya kare oluşturacak şekilde uygulanır.

Vibratör bir kez istenilen derinliğe indikten sonra önceden ayarlanmış derinlik aralıklarında işleme başlanır. Kompaksiyon sırasında kompaksiyondan dolayı zemin hacminde meydana gelen azalmayı dengelemek amacıyla yüzeyden temiz kum eklenir. Bu yolla arazi seviyesi korunmuş olur. Buna rağmen çalışma sonunda arazide planlanan temel kotunun altında bir kot değeri elde edilebilir. Uygulamalarda kompaksiyon sırasında zemin yüzeyinin çökmesine izin verilir. Bazen yüzeye yakın zeminler geri dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

Vibro kompaksiyon, tasarım taşıma basıncı genellikle 240 kPa ile 480 kPa arasında değişen ekonomik sürekli temel kullanımına olanak verir. Oturma ve sıvılaşma potansiyelini düşürür. Gerekli işlem derinliği genellikle 4,5 metre ile 15 metre arasında değişir, fakat uygulamada en fazla 36,5 metre derinliğe kadar inilmiştir. Çizelge 2.2’de zemin cinslerine göre elde edilen başarımlar ve Şekil 2.4’de imalat adımları gösterilmiştir.

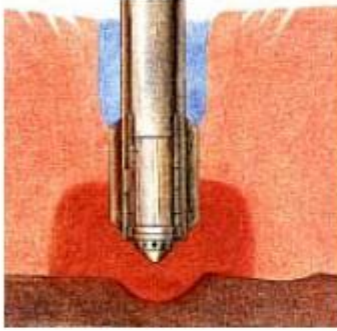
Çizelge 2.2 Vibrokompaksiyon uygulamalarında beklenen sonuçlar.

Zemin Cinsi	Sonuç
Kumlar	Mükemmel
Siltli Kumlar	İyiye Yakın
Siltler	Zayıf
Killer	Uygulanamaz
Maden Kalıntıları	İyi (Eğer Temiz Granülerse)
Kontrolsüz Dolgularda	Dolgunun Tabiatına Bağlı Olarak Değişir



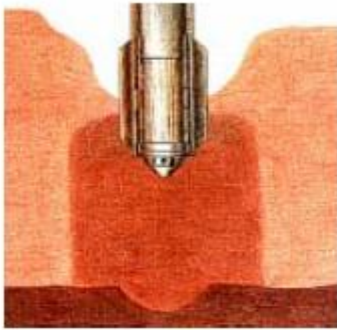
Kuyu Açılması

Titreşim ve su ve/veya hava jeti kullanılarak vibroprob yardımı ile gerekli derinliğe inilir.



Kompaksiyon

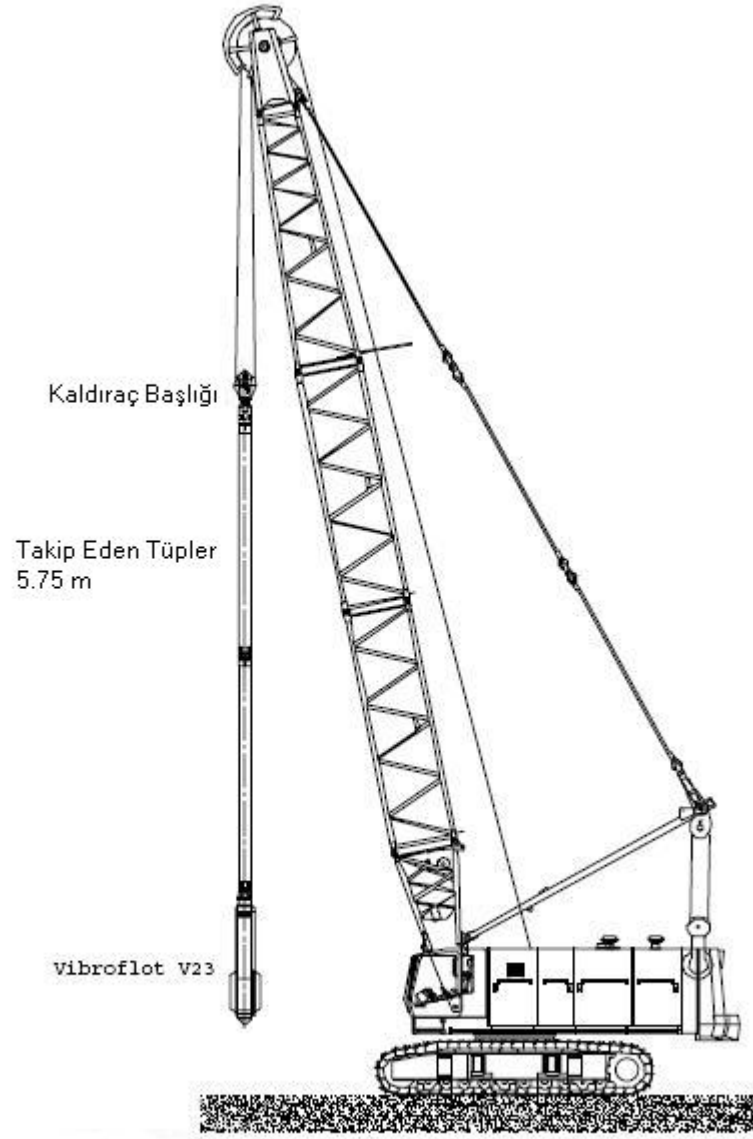
Vibroprobe maksimum derinliğe inildikten sonra 0.5 m aralıklarla geri çekilmeye başlanır. Yerinde kum ve çakıl malzeme vibroprob doğrultusunda akıtılır.



Geri Dolgu

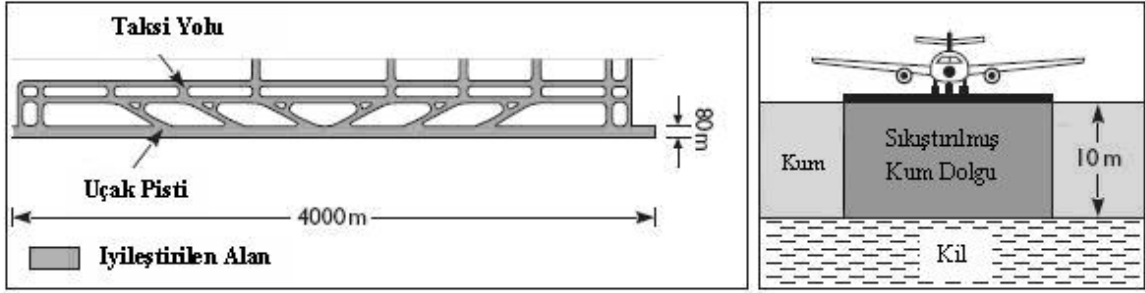
Kompaksiyon, tepeden veya yerinde yapılan geri dolgu ile tamamlanır.

Şekil 2.4 İmalat adımları.



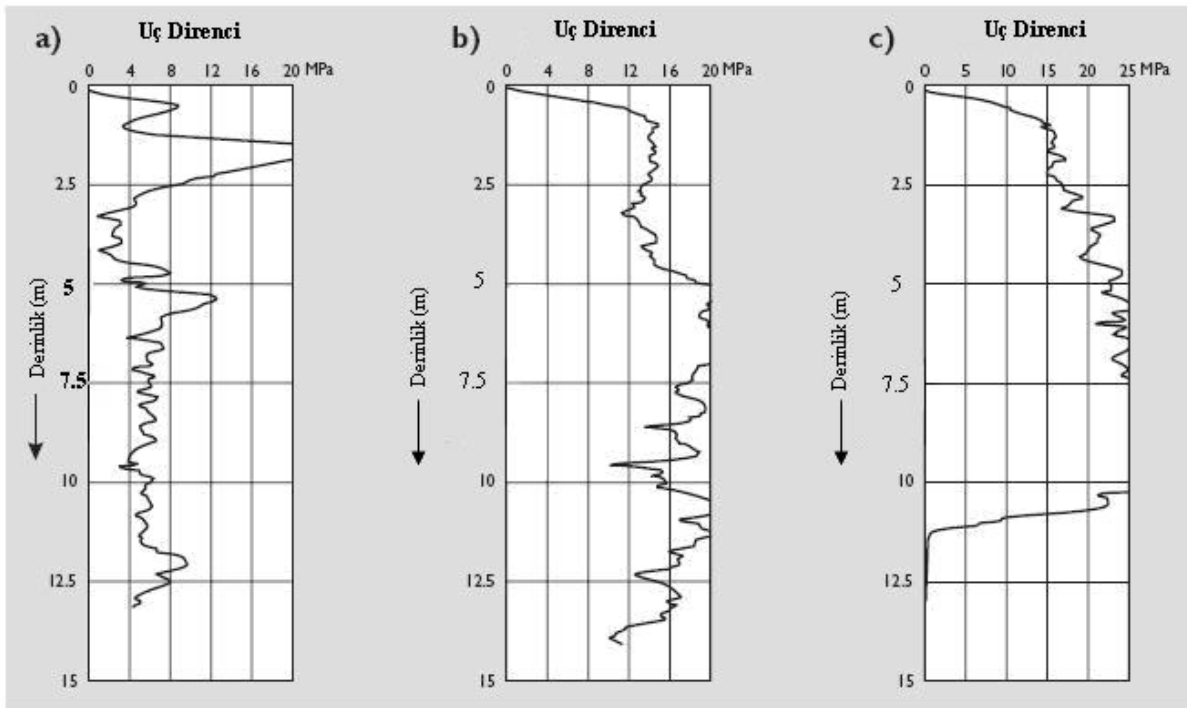
Şekil 2.5 Tipik bir vibro kompaksiyon makinesi.

Singapur'da Chagi havaalanında bu yöntem kullanılmıştır. Arazi ıslahı sırasında 170 milyon m³ kum iyileştirme amaçlı serilmiştir. Serilen kum dolgunun altında 35 m'lik yumuşak kil tabakası bulunmaktadır. Yumuşak kildeki iyileştirme işlemi için prefabrik dikey direnler ve sürşarj yükü uygulamasına gidilmiştir. Kil tabakası konsolide olduktan sonra üzerindeki kum tabakası sıkıştırılmıştır.



Şekil 2.6 İyileştirme yapılan saha planı ve kesiti.

İyileştirme yapılan alan, her biri 2500 m² alana sahip olacak şekilde kısımlara ayrılmıştır. Sıkıştırmadan sonra kontrol amaçlı olarak her bir kısımda CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler genellikle eşkenar üçgen dizilimini oluşturulan üç kolonun oluşturduğu bölgenin ortasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.7 Gerçekleştirilen tipik CPT deneyi sonuçları, (a) sıkıştırılmamış alan, (b) sıkıştırma sonrası uçak pisti alanı, (c) sıkıştırma sonrası taxiway alanı. (Raju, V.R. vd., 1998)

CPT deneyi sonuçlarında minimum uç direnci değerleri, uçak pisti alanında $q_c = 15$ Mpa ve taxiway sahasında $q_c = 12$ Mpa olarak ölçülmüştür.

2.4.1.1 Vibro Kompaksiyonun Performansı

Vibro kompaksiyonun başarısı vibratörün kullanımına bağlıdır. Çizelge 2.3'de V23 model vibratör kullanıldığında elde edilecek minimum ve maksimum değerler gösterilmiştir. Fakat bu değerler projeden projeye değişiklik gösterebilmektedir.

Çizelge 2.3 Vibro kompaksiyon performansı.

	Temiz Kum	Kum (10% < 0.06mm)
Her Metredeki Kompaksiyon Zamanı	24 s	90 s
Her Kuyudaki Batış Zamanı	1.5 dak	1.5 dak
Dakika / m *	0.55	1.65
M / saat **	87.3	29.1

* 10 veya 20 m.lik bir derin kompaksiyonda %75 rölatif sıklığa ulaşıldığı kabul edilmiştir.

** %80 zaman verimliliği = 48 dakika çalışma / saat kabul edilmiştir.

2.4.2 Vibro Yer Değiştirme

Kohezyonlu, karışık ve tabakalı zeminler sadece vibrasyonla kolayca sıkılaştırılmaz. Derin vibrasyon işlemleri ile iyileştirilebilecek zemin cinsleri sayısını arttırabilmek amacıyla taş kolon yöntemi geliştirilmiştir.

Vibro yer değiştirme yöntemi ile zemin içerisinde, kırma taştan oluşturulan sıkı kolonlarla elde edilen yararlar şöyle sıralanabilir;

- Temel altında oluşacak oturmaların azaltılması
- Taşıma gücü kapasitesinin arttırılması ve temel boyutlarının düşmesi
- Sismik bir aktivite sırasında sıvılaşma riskinin azaltılması
- Şev stabilizasyonu
- Dolgu zeminlerde inşaat
- Zayıf zeminlerde yüzeysel temellere destek

Taş kolonların zemine eklenmesi ile siltli, killi zeminlerde taşıma gücü kapasitesi arttırılabilir. Taş kolon oluşturulması sırasında vibro kompaksiyondakine benzer titreşimli bir prob kullanılır. Prob zeminde ilerlemeyi ve ilerlerken zeminde radyal olarak yer değiştirme oluşmasını sağlar. Bir kez istenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra probe dışarı çekilir ve oluşturulan kuyuya 75 mm.den büyük derecelenmiş agrega ile geri dolgu yapılır. Probe tekrar kuyuya indirilerek agreganın sıkışması ve radyal olarak yayılması sağlanır. Bu adımlar gerekli taş kolon oluşturulana kadar tekrarlanır. Yumuşak killerde zemin yer değiştirmez, su jeti ile

uzaklaştırılır. Bu method eğer temel yükleri fazla değilse geçerlidir. Yükün çok fazla olduğu temelerde aşırı oturmalar meydana gelebilir. Oluşturulan vibro kolon ve zemin karışımı bütünleşik sistem düşük sıkışabilirliğe ve yüksek kesme dayanımına sahiptir. Mevcut aşırı boşluk suyu sanki düşey drenler varmış gibi taş kolonlarla kolayca dağıtılır.

Vibro taş kolonlar performans şartlarına, zemin cinsine ve yükleme koşullarına bağlı olarak projelendirilir. Kolonlar arası mesafe genellikle 1,8 metre ile 3 metre arasında değişir. Güçlendirilmiş zeminlerde izin verilebilir yükler zemin durumu ve performans gerekliliklerine bağlı olarak değişir. Fakat kohezyonlu zeminlerde genellikle bu değer 48 kPa ile 240 kPa arasındadır. Bununla birlikte daha yüksek değerler (96 kPa ile 480 kPa) granüler zeminlerde veya konsolidasyonun hızlı olması istenilen zeminlerde uygulanabilir.

Vibro taş kolon imalatında iki ana yöntem vardır. Bunlar;

- Islak, tepeden beslemeli yöntem
 - Kuru, dipten beslemeli yöntem
- olarak adlandırılır.

2.4.2.1 Islak, Tepeden Beslemeli Yöntem

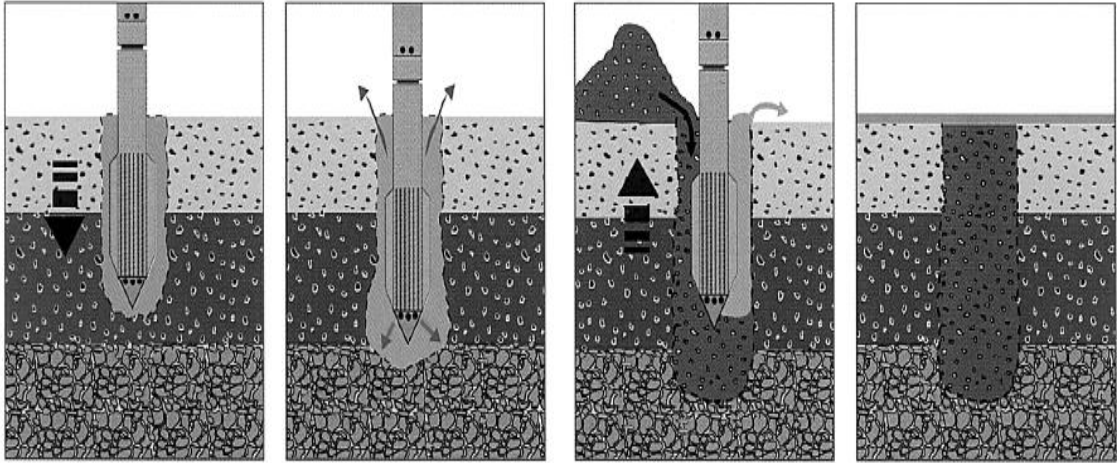
Bu yöntemde su jeti yumuşak malzemeleri kaldırmak ve açılan çukurun stabilizasyonunu sağlamak için kullanılır. Çok kullanılan ve uygun maliyetli bir derin vibrasyon tekniğidir. Arazi koşulları içinde su jeti için kullanılacak su mevcutsa ve ortaya çıkacak atık çevreye zarar vermiyorsa bu metot kuru yöntemden daha uygundur.

Şekil 2.8'de imalat adımları gösterilmiştir.

Bu yöntemde önemli olan parametreler;

- Zemin cinsi
 - Rölatif sıkılık
 - Suya doygunluk derecesi
 - Permeabilite
- olarak sıralanabilir.

Taş kolon inşaatı bittikten sonra arazide yapılan işlemi kontrol etmek amacıyla yükleme deneyi, presiyometre deneyi (PMT), dilatometre deneyi (DMT), standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi arazi deneylerinden biri veya birkaçı yapılır.



Delme
Vibroprobe titreşim vasıtasıyla gerekli derinliğe iner.

Deliğin Basınçlı Suyla Yıkanması
Vibroprobe etrafındaki bölge taş aktarımı için basınçlı suyla yıkanır.

İmalat
Taş kolon yüzeyden taş eklenerek oluşturulur

Tamamlanma
Son kısımda, taş kolon imalatı bittikten sonra, yüzey silindire düzeltilir.

Şekil 2.8 Islak yöntemle taş kolon imalatı.

2.4.2.2 Kuru, Dipten Beslemeli Yöntem

Vibro yer değiştirme yönteminde zemine yanal yönde yer değiştirmek ve probun zemin içerisinde ilerlemesini sağlamak amacıyla basınçlı hava kullanılır. Bu yöntemde vibro değiştirme ile aynı standartlara sahip titreşimli problemler kullanılır. Fakat ek olarak geri dolgunun vibratörün uç kısmından yapılmasını sağlamak amacıyla doldurma hunisi ve besleme tüpü bulunmaktadır. Şekil 2.9’da bu yöntemde kullanılan bir vibroprob gösterilmiştir. Dipten beslemeli vibro yer değiştirme tamamen kuru bir operasyondur. Bu yüzden inşa işlemi sırasında vibratör kuyu içerisinde durur. İşlem sırasında 24 metreden daha derine inilebilir ve yeraltı suyunun varlığı işlemi sınırlandırmaz

Bu yöntemin avantajı, inşaat sırasında kullanılacak taş hacminin tam olarak hesaplanabilir ve taş dolgu tüketiminin düşük olması, ayrıca su jeti kullanılmadığı için ortaya daha az miktarda atık çıkmasıdır. Şekil 2.10’de inşa adımları gösterilmiştir.



Dipten beslemeli yöntemde taşı vibratörün ucuna aktarmak için doldurma hunisi ve besleme tüpü bulunur.

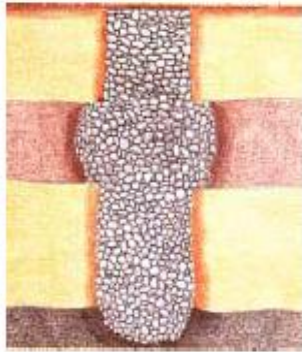
Şekil 2.9 Dipten beslemeli yöntem için kullanılan vibroprob.

**Batma**

Vibroprob gerekli derinliğe vibrasyon ve basınçlı hava yardımıyla iner.

**Kurulum**

Taşlar vibroprobun uç kısmına aktarılarak kurulum işlemine başlanır

**Tamamlanma**

İşlem bittikten sonra seviye düzlenir ve silindirajı yapılır.

Şekil 2.10 İnşa adımları.

2.5 Vibro Sistemlerin Tasarımı

2.5.1 Tasarım Kriterleri

Taş kolon dizilimi iyileştirilmemiş zemin durumuna göre tanımlanan temel oturmasının, iyileştirilmiş zemin durumuna göre oluşacak temel oturmasına oranı olarak tanımlanan hedeflenen oturma iyileştirmesi oranına (SIR) göre belirlenebilir. Arzulanan SIR orijinal zemin koşullarına göre hesaplanan oturmaya bağlı olarak belirlenebilir.(Clemente, J.L. ve Davie, J.R., 1999). SIR ile taş kolon alan değişim oranı arasındaki ampirik bağıntılar için Priebe'in (1995) çalışması yayınlanmıştır. Clemente J. ve Davie R. (1999) yaptıkları arazi çalışmasında taş kolon aralıklarının nasıl olması gerektiği ve taş kolonların oturmalar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada 4 adet deney sahasında mevcut olan

granüler, suya doymun kohezyonlu zeminler ve aşırı konsolide zeminlerin oturma hesapları sonuçları sunulmuştur. Aşağıda Çizelge 2.4'de 1 numaralı deney sahasındaki zemin özellikleri örnek teşkil etmesi amacıyla sunulmuştur.

Çizelge 2.4 Enerji Jeneratörü Deney Sahası Zemin Profili (Clemente J. ve Davie R., 1999)

Zemin Tanımı	H (m)	E (MPa)
Kum	2	10
Silt/Kil	6	7
Kum ve Mercan	15	60
	>15	100

Taş kolonlar çalışma yapılacak zeminin durumunu iyileştirmek amacıyla 8 m boyunda imal edilmiştir. İncelenen sahada taş kolonların dizilimi sırasıyla şu şekilde seçilmiştir: 2 tane eşkenar üçgen dizilimli, 1.2 m aralıklı; 1 tane eşkenar üçgen dizilimli, 1.6 m aralıklı ve son olarak kare dizilimli 1.6 m aralıklı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca bunlara ek olarak iyileştirilmemiş zeminde deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilmiş deney programı hakkında detaylı bilgi Clemente vd.'de (1997) bulunabilir.

Elde edilen sonuçlara göre;

- İyileştirilmemiş zeminde Çizelge 2.2 kullanılarak yapılan hesaplarda 250 kPa'lık yük altında 2.5 m²'lik temelde 44 mm, 2.8 m²'lik temelde 51 mm ve 3.2 m²'lik temelde ise 64 mm'lik oturma tespit edilmiştir.
- Yükleme deneyinde 2.5 m²'lik temel (1.2 m aralıklı) izin verilebilir taşıma gücü değerinin iki katı kadar olan 500 kPa'lık yükü taşıyabilmiştir. 2.8 m²'lik temelde (1.6 m aralıklı) gerçekleştirilen deneyde ise 462 kPa'lık yükü taşıyabilmiştir.

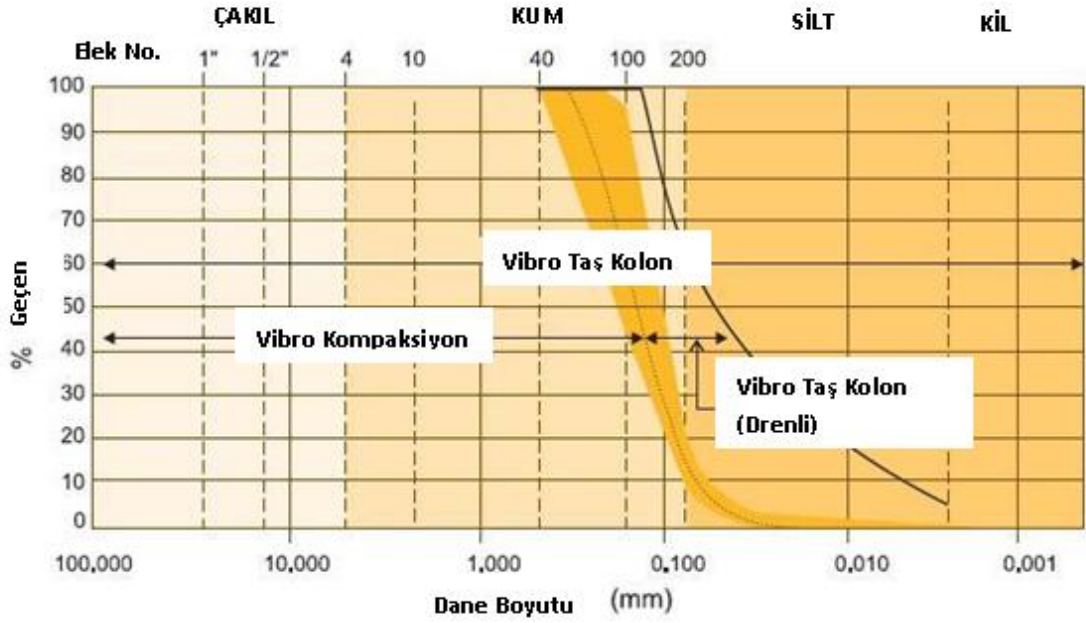
Temel ve taş kolonların tasarımı elde edilmek istenilen iyileştirmeye göre seçilmelidir.

Titreşim teknolojileri için tasarım kriterleri üç ana kategoriden birine veya birkaçına bağlıdır.

Bunlar;

- Kesme Dayanımı
- Oturma Kontrolü
- Sıvılaşma Riski

olarak sıralanabilir.



Şekil 2.11 Vibrasyon teknolojileri ile işlenebilir zemin sınırları. (Hayward Baker Vibrasyon Teknolojileri)

Şekil 2.11’de vibro teknolojileri ile işlenebilen zeminlerin sınırları gösterilmiştir. Drenler ile birlikte kullanılan vibro değiştirme yöntemi ile işlenebilir zemin sınırları genişlemektedir.

2.5.2 Tasarım için Gerekli Veriler

Tasarım için gerekli veriler;

- Toplam yük (Yapı, sürşarj, hareketli yükler, rüzgâr yükü ve deprem yükü)
- Zemin cinsi (Çeşitlilik, stratigrafi, yeraltı suyu konumu)
- Temel tasarımı
- Yapı için izin verilebilir oturma miktarı

den oluşmaktadır.

2.5.3 Taşıma Kapasitesinin Arttırılması

Taşıma kapasitesi zemine ait içsel sürtünme açısı ve kohezyondan türetilen kayma dayanımının bir fonksiyonudur. Vibro sistemler efektif içsel sürtünme açısını yükselterek izin verilebilir taşıma kapasitesini arttırmaları.

Vibro Kompaksiyon kohezyonsuz granüler zeminleri sıkıştırır, dolayısıyla içsel sürtünme açısının artmasını sağlar. İzin verilebilir taşıma kapasitesi, artan içsel sürtünme açısı kullanılarak geleneksel hesap yöntemleri kullanılarak hesaplanır.

Vibro Değiştirme ile iyileştirilmek istenilen bölgede sıkı vibro taş kolonlar inşa edilir. İzin verilebilir taşıma kapasitesi çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Bunlardan bir tanesi de Priebe tarafından geliştirilen ve “The Design of Vibro Replacement” (Ground Engineering, December 1995) adlı makalede yayınlanan yöntemdir. Eğer sahadaki zemin içerisinde granüler malzeme varsa, tasarım için granüler malzemenin iyileştirilmiş değerleri de hesaplanmalıdır.

2.5.4 İyileştirilmiş Zeminde Oturma Hesabı

Oturma, zeminin sıkışma modülünün ve konsolidasyon karakterinin bir fonksiyonudur. Vibro sistemler yapılması planlanan temelin altında meydana gelecek oturmaları azaltır. Bunun için sahadaki zeminin sıkışma modülü değerinde artış sağlanır veya yüksek modüllü vibro taş kolonlar inşa edilir.

Vibro Kompaksiyon kohezyonsuz, granüler zeminleri sıkıştırdığı için zeminin sıkışma modülü değeri artar. Oturma hesabı geleneksel hesap yöntemleri ile iyileştirilmiş modül değeri kullanılarak yapılır.

Vibro Değiştirme ile iyileştirmede gerekli bölgede yüksek modüllü sıkı vibro taş kolonlar inşa edilir. Beklenen oturma Priebe yöntemi gibi çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Bu yöntemde taş kolonun içsel sürtünme açısına ve iyileştirilen bölgede taş kolonla değiştirilen bölgenin yüzdesine (alan değiştirme oranı) bağlı bir iyileştirme faktörü tanımlanır. Ayrıca zeminde granüler malzeme varsa tasarımda onların iyileştirilmiş parametreleri kullanılmalıdır.

2.5.5 İyileştirilmiş Zemin Parametreleri

Kohezyonsuz zeminlerde vibrasyon yardımıyla sıklık derecesinin artırılmasıyla zeminin iyileşmesini sağlayan vibro kompaksiyonun tersine, vibro değiştirme işleminde zeminde iyi kompakte edilmiş ve iyi derecelendirilmiş granüler malzemedен oluşan kolonlar oluşturulur. Burada problem zemin içerisinde oluşturulan sıkıştırılmış taş kolon malzemesi ile zemin bir araya geldiğinde oluşacak yeni parametrelerin ve ne kadarlık bir iyileşme sağlandığının belirlenmesidir. Priebe’a (1995) göre taş kolonların davranışlarının belirlenmesi için geniş ölçekli arazi deneyleri gerekmektedir. Bununla birlikte taş kolonlu ve taş kolonsuz zemin durumları kıyaslanarak iyileşme derecesi belirlenebilir. Priebe’a (1995) göre yerleşim planı geometrisi ve dolgu malzemesi özellikleri bilindiğinden bu durum mümkündür.

İyileştirilmiş zemin parametrelerinin belirlenmesi için Priebe (1995) tarafından önerilen yöntem aşağıda adım adım gösterilmiştir. Bu yöntemde kolonun iyileştirme etkisi zeminin başlangıçtaki durumu ile kıyaslanmakta ve taş kolon ile iyileştirilen zemin, iyileştirilmemiş

zemin ile karşılaştırılarak bir iyileştirme faktörü elde edilmektedir.

2.5.5.1 İyileştirme Faktörü Hesabı

Priebe (1995) tarafından önerilen taş kolon tasarım yöntemine göre, kolonun rijid bir tabaka üzerine yerleştirildiği ve kolon – zemin sisteminin sadece yatay deformasyonlar neticesinde oturduğu kabul edilmiştir. Kolon malzemesinin baştan itibaren kesildiği, çevresindeki zeminin ise elastik davrandığı kabul edilirken, kolon imalatı sırasında çevre zeminin aşırı yer değiştirmeye zorlanmasından dolayı başlangıç yanal direncinin sıvı duruma karşılık geldiği (yanal toprak basıncı katsayısının $K=1$ olduğu) varsayılmaktadır. Buna göre iyileştirme faktörü (n_0);

$$K_{AC} = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi_C}{2} \right) \quad (2.1)$$

$$f(\mu_s, A_C / A) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - A_C / A)}{1 - 2\mu_s + A_C / A} \quad (2.2)$$

$$n_0 = 1 + \frac{A_C}{A} \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, A_C / A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_C / A)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada;

K_{AC} : Taş Kolon Malzemesi Aktif İtke Katsayısı

ϕ_C : Taş Kolon Malzemesi İçsel Sürtünme Açısı

μ_s : Zeminin PoissonOranı

A_C : Taş Kolon Alanı

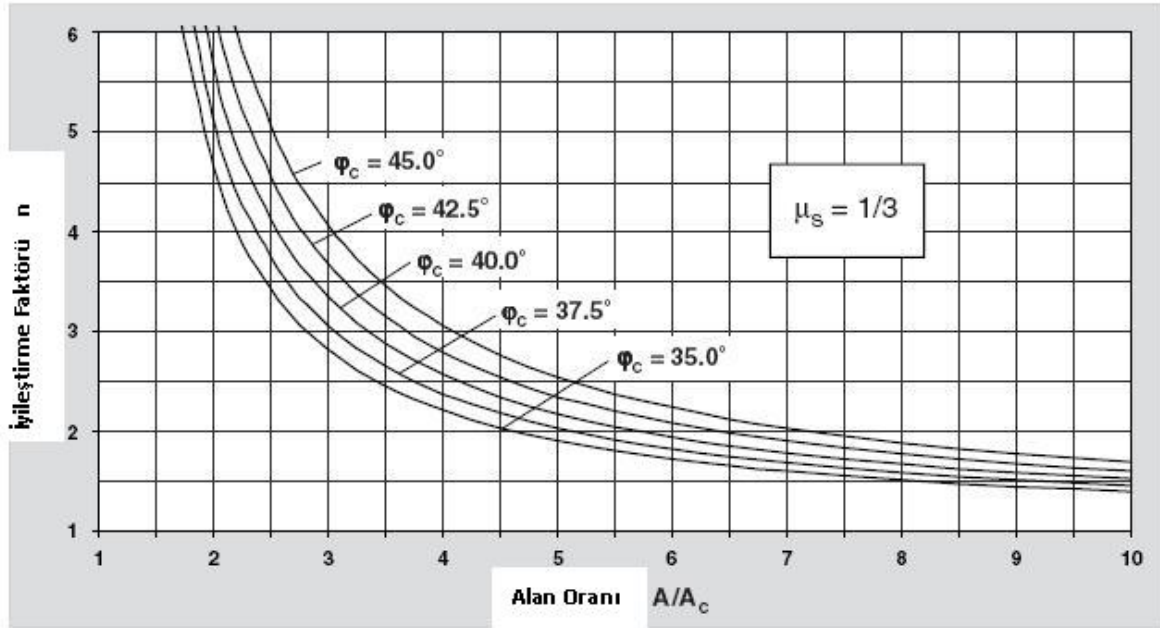
A : Toplam Alan

olarak tanımlanır.

Birçok durumda poisson oranının $\mu_s = 1/3$ alınması, son oturma durumu için çoğunlukla yeterlidir. Bu durumda iyileştirme faktörü;

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{AC} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (2.3a)$$

şeklinde sadeleştirilebilir. İyileştirme faktörü n_0 , ters alan oranı A/A_c ve kolon malzemesi içsel sürtünme açısı arasındaki bağlantı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 $\mu_s = 1/3$ için iyileştirme faktörü grafiği. (Priebe; Keller-Publications)

2.5.5.2 Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Göz Önüne Alınması

Sıkıştırılan kolon dolgu malzemesi pratikte hala sıkışabilmektedir. Bu nedenle üzerine herhangi bir yük geldiğinde, kolonun dışa doğru genişlemesi ile alakalı olmayan oturmalar meydana gelecektir. Teoride A/A_c oranı 1 olduğunda iyileştirme faktörü sonsuz hesaplanmaktadır, gerçekte ise kolonun sıkışabilirliğine göre değişmektedir. Priebe’a göre iyileştirme faktörü kolon ve çevre zemin arasındaki tek eksenli sıkışma modülleri (D_c/D_s) oranıyla sınırlıdır. Bu kabulde, kolonun sıkışabilirliğinin iyileştirme faktörü üzerindeki etkisini hesaplayabilmek için, hangi alan oranında iyileştirme faktörünün tek eksenli sıkışma modülleri oranına eşit olacağını bulmak yeterli olacaktır. $\mu_s = 0.33$ için;

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{2(4K_{AC} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{4K_{AC} - 1}\right]^2 + \frac{16K_{AC}(n_0 - 1)}{4K_{AC} - 1}} \quad (2.4)$$

Kolon malzemesinin sıkışabilirliğini yaklaşık olarak dikkate almak için, alan oranına (A/A_c) aşağıdaki eklemeyi yaparak bir düzeltilmiş iyileştirme oranı bulunabilmektedir.

$$\Delta(A/A_c) = \frac{1}{(A_c/A)_1} - 1 \quad (2.5)$$

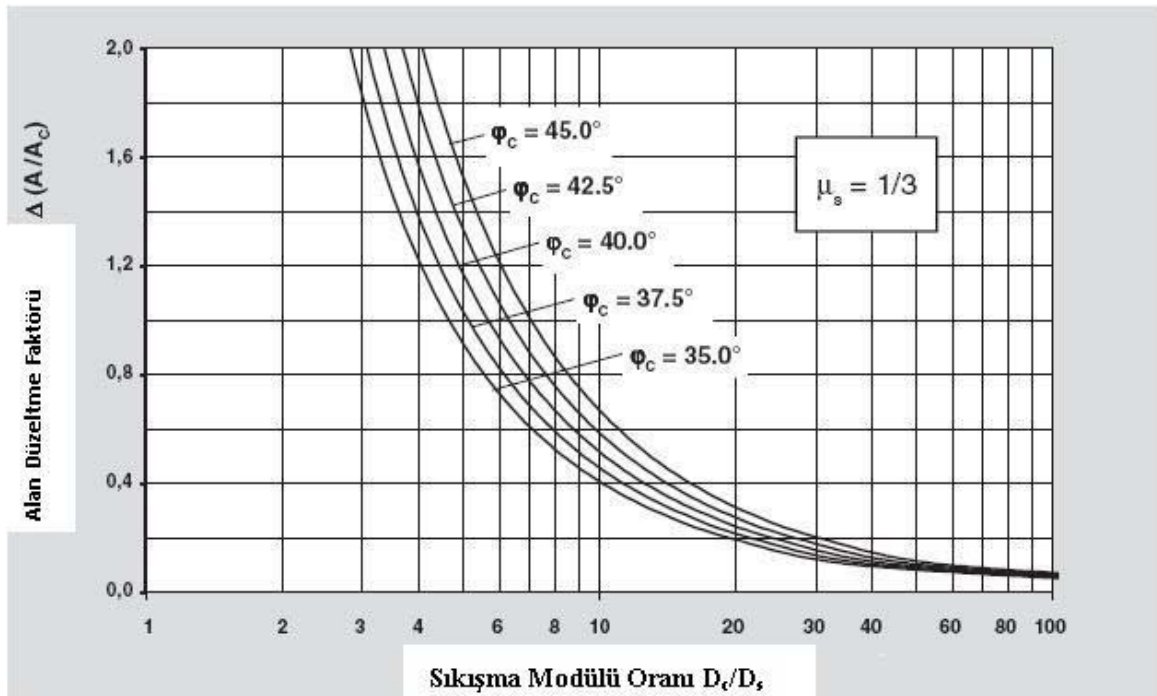
Düzeltilmiş alan oranı;

$$\left(\frac{A_c}{A}\right) = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (2.6)$$

şeklinde elde edildikten sonra, düzeltilmiş iyileştirme faktörü hesaplanabilmektedir.

$$n_1 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c/A)} - 1 \right] \quad (2.7)$$

Poisson oranı $\mu_s = 0.33$ olan zeminlerde değişik taş kolon malzemesi içsel sürtünme açıları ve tek eksenli sıkışma modülleri oranları için alan düzeltme faktörü grafiği Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 $\mu_s = 0.33$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri. (Priebe; Keller-Publications)

2.5.5.3 Derinliğin (Jeolojik Yükün) Etkisinin Göz Önüne Alınması

Kolonun ve zeminin birim hacim ağırlığını ihmal etmek, kolonun dışa doğru genişlemesine yol açan (bulging) kolon ve zemin arasındaki başlangıç basınçlarındaki farklılığın sadece temelden gelen P yükünün, taş kolonlar ve zemin arasında dağıtımına bağlı ve derinlikle sabit olduğunu varsaymak anlamına gelmektedir. Gerçekçi bir yaklaşımla, zeminin ve kolonun ağırlıkları dış yüke eklenmelidir. Bu ağırlıkların göz önüne alınması ile başlangıç basınç farklılığı derinlikle asimptotik olarak düşecek ve yanal genişlemenin azalmasına yol açacaktır. Diğer bir deyişle derinlikle jeolojik yükün artması nedeniyle kolonlar yanal olarak daha iyi desteklenecek ve bu nedenle taşıma kapasitesi artacaktır. Basınç farklılığı iyileştirme faktörünün elde edilmesinde doğrusal değişen bir parametre olduğundan, başlangıç basınç farklılığı ile derinliğe bağlı olanın oranı (derinlik faktörü, f_d) kullanılarak iyileştirme faktöründe bir düzeltme yapılabilir. Düzeltilmiş iyileştirme faktörü $n_2 = f_d n_1$ olarak elde edilir. Örnek olarak basınç farklılığı miktarı başlangıç değerinin %50 si olan derinlikte, derinlik faktörü $f_d = 2$ olmaktadır. Derinlik faktörünün f_d , derinlikle lineer olarak değişen $(P_c + \gamma_c d)K_{ac}$ ve $(P_c + \gamma_s d)(K_s = 1)$ yanal basınç çizgilerinden hesaplanabileceği kabul edilmektedir. Bununla birlikte derinlikle yatay deformasyonların azalması ile kolonlardan, toprak basıncı aktif basınç katsayısı K_{AC} değerinden sükûnetteki K_{OC} değerine doğru değişmektedir. Basınç farkı olarak kabul edilen düz çizginin, var olan asimptotik çizgi ile bulunduğu derinliğe kadar önerilen derinlik faktörü güvenli tarafta kalmaktadır. Pratikte iyileştirme derinliği bundan çoğunlukla daha azdır.

$$f_d = \frac{1}{K_{oc} - \frac{W_s}{W_c} \times \frac{W_c}{P_c}} \quad (2.8)$$

$$P_c = \frac{P}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{P_c}{P_s}}} \quad (2.9)$$

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c/A})}{K_{Ac} f(\mu_s, \overline{A_c/A})} \quad (2.10)$$

$$W_c = \sum (\gamma_c \Delta d) \quad (2.11a)$$

$$W_s = \sum (\gamma_s \Delta d) \quad (2.11b)$$

$$K_{oc} = 1 - \sin \phi_c \quad (2.12)$$

$$n_2 = f_d n_1 \quad (2.13)$$

Burada;

f_d : Derinlik Faktörü

W_s : Zemin Ağırlığı

W_c : Kolon Malzemesi Ağırlığı

P_c : Temelden Dolayı Kolona Gelen Yük

P_s : Temelden Dolayı Zemine Gelen Yük

P : Temel Yüğü

K_{oc} : Kolonun Malzemesinin Sükûnetteki Toprak Basıncı Katsayısı

olarak tanımlanır.

Şekil 2.14'de gösterilen basitleştirilmiş diyagramda, kolon malzemesi ve zemin için aynı birim hacim ağırlık değerleri kullanılmıştır. Güvenli yönde olmayan bu kabul nedeniyle daha düşük değere sahip olan zeminin birim hacim ağırlığı göz önüne alınmalıdır.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - 1}{K_{oc}} \times \frac{W_c}{P_c}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{oc} - 1}{K_{oc}} \frac{\sum (\gamma_s \Delta d)}{P_c}} \quad (2.14a)$$

Burada $W_c = \sum \gamma_c \Delta d$ ile ifade edilir. Fakat γ_c yerine γ_s değerinin kullanılması durumunda

$W_c = \sum \gamma_s \Delta d$ olacaktır. $y = \frac{1 - K_0}{K_0}$ etki faktörü olarak tanımlanırsa, derinlik düzeltme

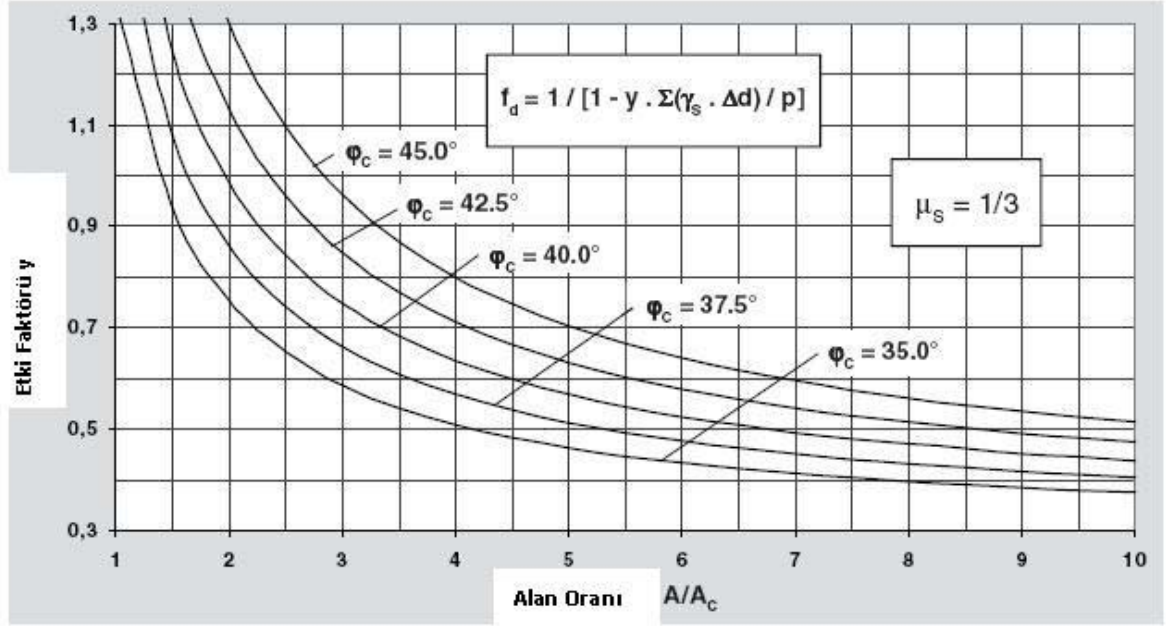
faktörü aşağıdaki şekilde;

$$f_d = \frac{1}{1 - \frac{y \sum (\gamma_s \Delta d)}{P_c}} \quad (2.14b)$$

olarak elde edilir.

Şekil 2.14'de $\mu_s = 0.33$ için etki faktörünün (y) alan oranı ve kolon malzemesi içsel

sürtünme açısı ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 $\mu_s = 0.33$ için derinlik etki faktörü. (Priebe; Keller-Publications)

2.5.5.4 Uygunluk Kontrolü

Tasarım aşamasındaki basit adımlar matematiksel olarak bağlantılı olmayıp çeşitli basitleştirmeler ve kabuller içermektedir. Bu nedenle sınır durumlarda kolonların sıkışabilirliğine bağlı olarak taşıyabileceklerinden daha fazla yük gelmemesi için uygunluk kontrolü yapılmalıdır. Derinlik arttıkça zemin tarafından sağlanan destek, kolonun artık yanal olarak genişleyemeyeceği sınıra ulaşır. Bununla birlikte derinlik faktörü sonsuza kadar artmaz. Bu yüzden ilk uyumluluk kontrolü derinlik faktörü sınırlarının belirlenmesi ve dolayısıyla kolonun etkiyecek yükün sınırlanması olmalı ve kolonun içsel sıkışabilirliğine bağlı olarak oluşacak oturma, komposit sistemin oturma değerini geçmemelidir. Bu kontrol özellikle arazide oldukça sıkı ve katı zeminler yer aldığı zaman uygulanmalıdır. Derinliğe bağlı iyileştirme faktörü düzeltilmesinin sınır değeri;

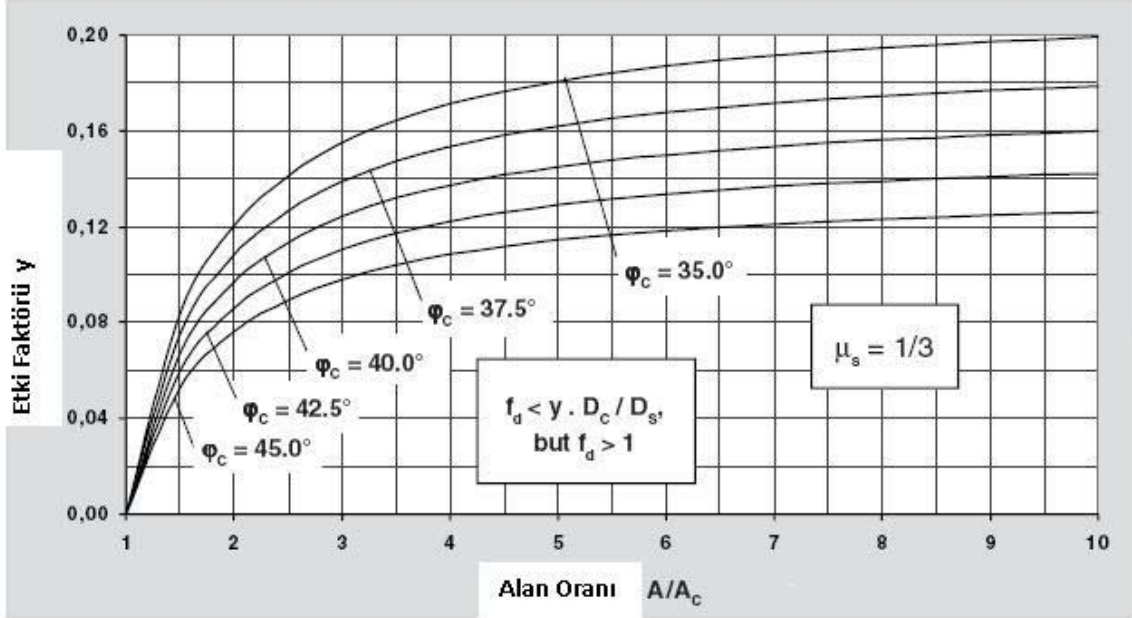
$$f_d \leq \frac{D_c / D_s}{P_c / P_s} \quad (2.15)$$

olmalıdır. Burada;

D_c : Kolon Malzemesi Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

D_s : Zeminin Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

olmaktadır.



Şekil 2.15 Derinlik faktörü limit değerleri. (Priebe; Keller-Publications)

Şekil 2.15’de gösterilen grafiklerden alan oranı A/A_c ve kolon malzemesi içsel sürtünme açısına bağlı olarak etki faktörü y değeri bulunur ve bu değer kullanılarak derinlik faktörü

$f_d < y \frac{D_c}{D_s}$ değeri kontrol edilir. Eğer derinlik faktörü $f_d < 1$ olarak hesaplanırsa göz önüne

alınmamalıdır. Bu durumda zorunlu olarak iyileştirme faktörünün maksimum değeri ile alakalı ikinci bir uygunluk kontrolü gerekir. Bu kontrol ilk kontrolle benzerdir ve kolonların, her birine gelen yükten dolayı içsel sıkışabilirliklerinin neden olacağı oturmanın, çevreleyen zeminin oturmasını aşmamasını garantiler. İkinci kontrolün öncelikle arazide gevşek veya yumuşak zemin tabakalarının yer aldığı durumlarda uygulanması gerekmektedir.

$$n_{maks} = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{D_c}{D_s} - 1 \right) \quad (2.16)$$

2.5.5.5 İyileştirilmiş Zeminin Mekanik Dayanım Parametreleri

İyileştirilmiş olan zeminlerde kolonlar, alan oranı (A_c / A) ve iyileştirme faktörü (n)’ye bağlı olarak uygulanan yükün belli bir kısmını taşımaktadır. Bu oran;

$$m = (n - 1 + \overline{A_C / A}) / n \quad (2.17)$$

formülüyle hesaplanabilmektedir. Burada;

m: Taş Kolonlara Gelen Yük Oranı

olarak tanımlanabilir.

Önerilen tasarım yöntemine göre kolonlar yanal deplasman yaptıktan sonra çevre zeminde oluşan hacimsel azalmalar hesaba katılmamaktadır. Bu sebeple, özellikle yük alan oranlarında çevre zemin hesaplanandan daha fazla yük taşımaktadır. Kolonların kesme direncini gerçekte olması gerektiğinden daha fazla almamak için, kolonların taşıdığı yük oranı azaltılmalıdır. Priebe'a (1995) göre aşağıda ifade edilen yaklaşık bağıntı bu etkiyi hesaba katmak için yeterli olacaktır.

$$m' = (n - 1) / n \quad (2.18)$$

Uygulanan yüklerin kolonlar ve çevre zemin arasında oranlanmasının sonrasında kompozit sistemin içsel sürtünme açısı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$\tan \phi = m' \tan \phi_C + (1 - m') \tan \phi_S \quad (2.19)$$

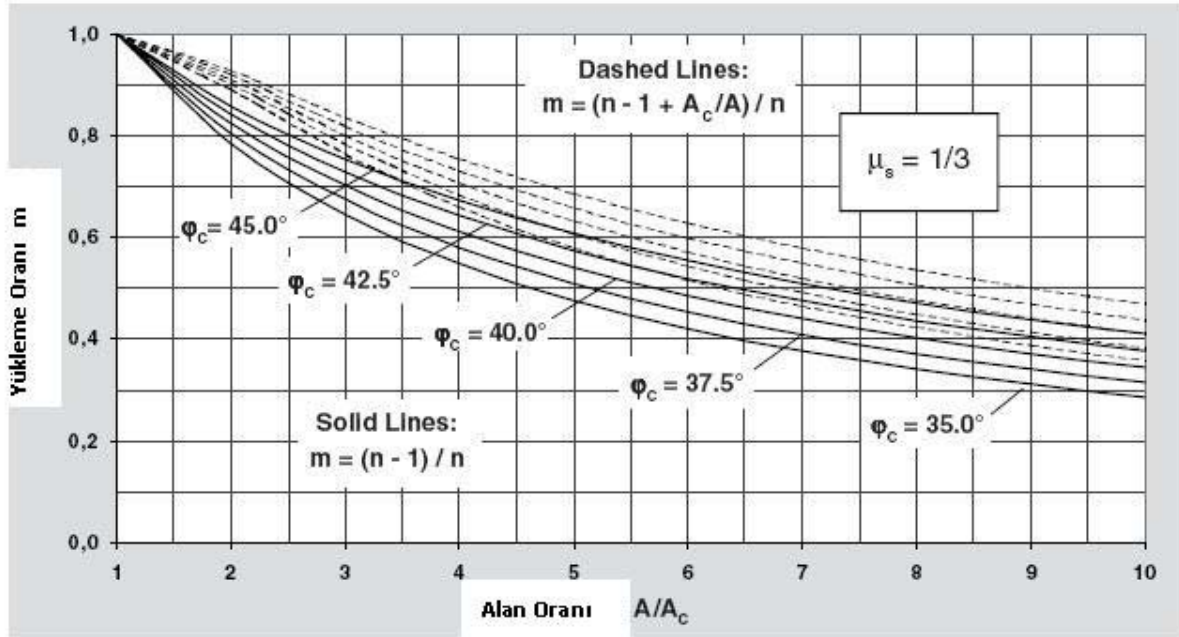
Kompozit zemine ait kohezyon ise;

$$c = (1 - \overline{A_C / A}) c_S \quad (2.20)$$

bağıntısından hesaplanmaktadır. Kolonların imalatı sırasında çevre zemin örselenmekte ve yapısı bozulmaktadır. Bu yüzden Priebe kohezyonun yük oranlarına bağlı olarak değerlendirilmesini önermektedir. Bu şekliyle kompozit sistemdeki kohezyon değeri;

$$c' = (1 - m') c_S \quad (2.21)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Poisson oranı $\mu_s = 0.33$ olan zeminlerde değişik alan oranları ve kolon içsel sürtünme açıları için kolonun taşıdığı yük oranlarının hesabına dair grafik Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 $\mu_s = 0.33$ için kolon yük oranları. (Priebe; Keller-Publications)

2.5.5.6 İyileştirilmiş Zemin Oturma Hesapları

Taş kolonların tekil veya şerit temel altındaki performansı kesin olarak belirlenebilmiş değildir. Tasarım, sınırsız yükleme alanı altındaki sınırsız kolon dizilimi performansının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu durumda homojen koşullarda oluşacak olan toplam oturma s_∞ , yukarıda tanımlanan n_2 değerinin d derinliğine bağlı ortalama değeri kullanılarak;

$$S_\infty = p \frac{d}{D_s n_2} \quad (2.22)$$

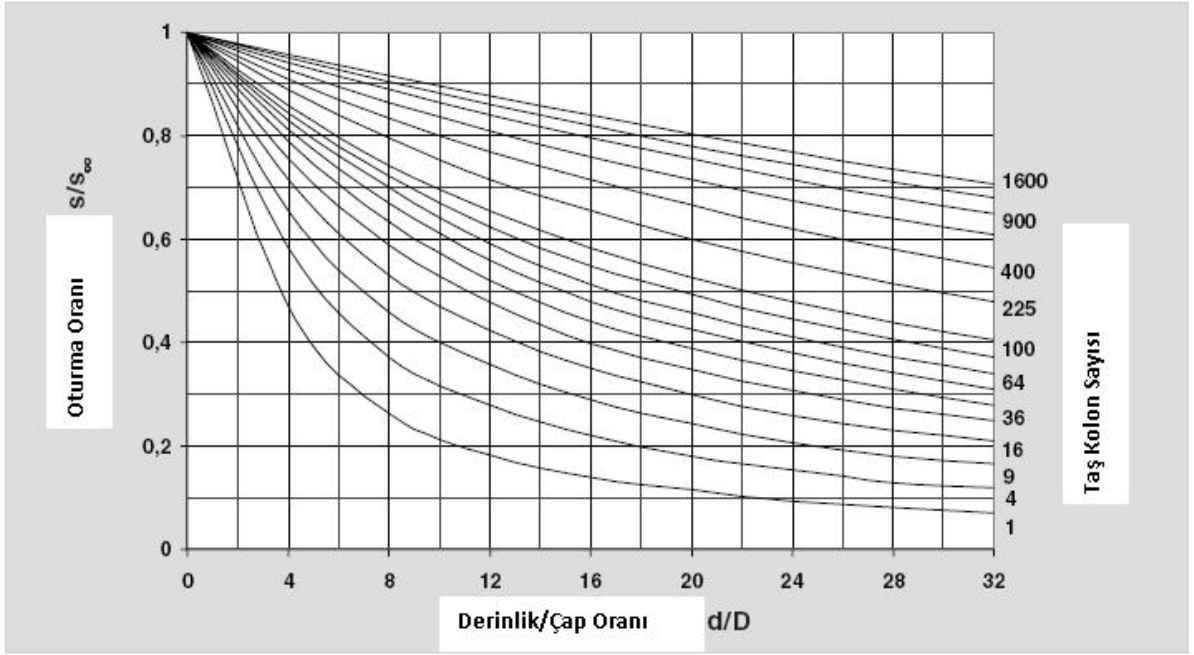
formülü ile hesaplanabilir. Burada;

S_∞ : Homojen Zeminde Sınırsız Kolon Dizilimi ve Sınırsız Yükleme Alanı Altında Oturma

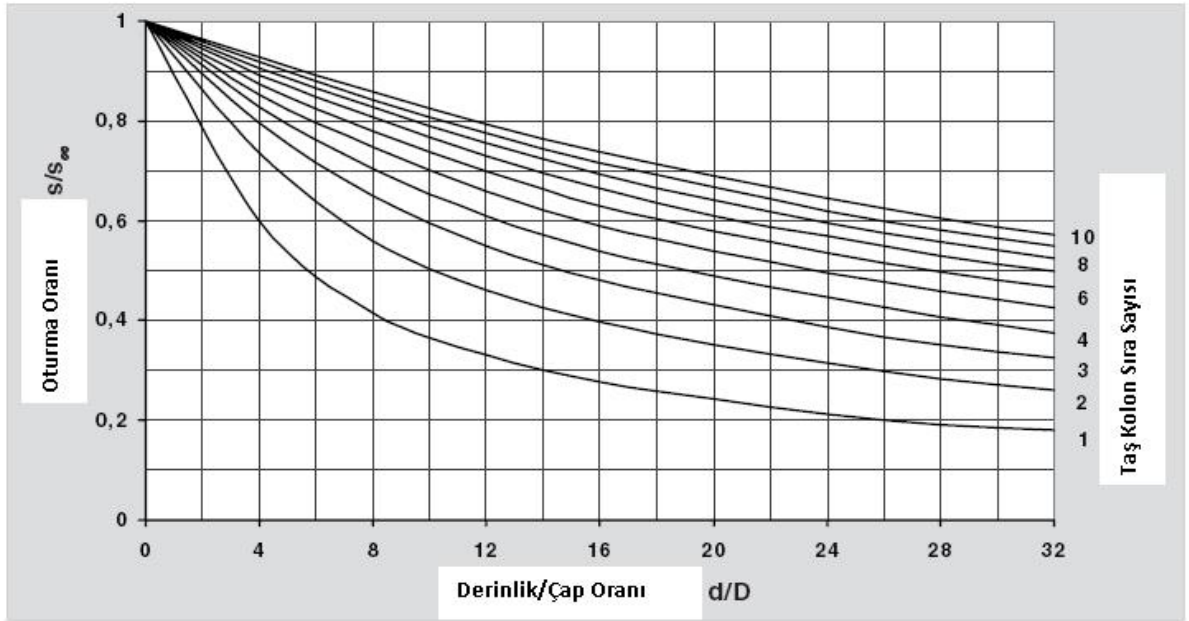
p : İyileştirilmiş Zemine Uygulanan Temel Taban Basıncı

d : Derinlik

olarak tanımlanabilir. Aşağıda verilen Şekil 2.17a ve Şekil 2.17b'de bu değer kullanılarak taş kolon uygulanmış tekil veya şerit temellerin oturmaları hesaplanabilir. Taş kolon çapı D değerinin de kullanıldığı bu diyagramlar bir yanda yükleme dağılımının ve diğer yanda temel altındaki kolon gruplarında, dışardaki kolonların düşük taşıma kapasitesinin göz önüne alındığı sayısız hesaplamalara dayanmaktadır.



Şekil 2.17a Tekil temellerin oturması. (Priebe; Keller-Publications)

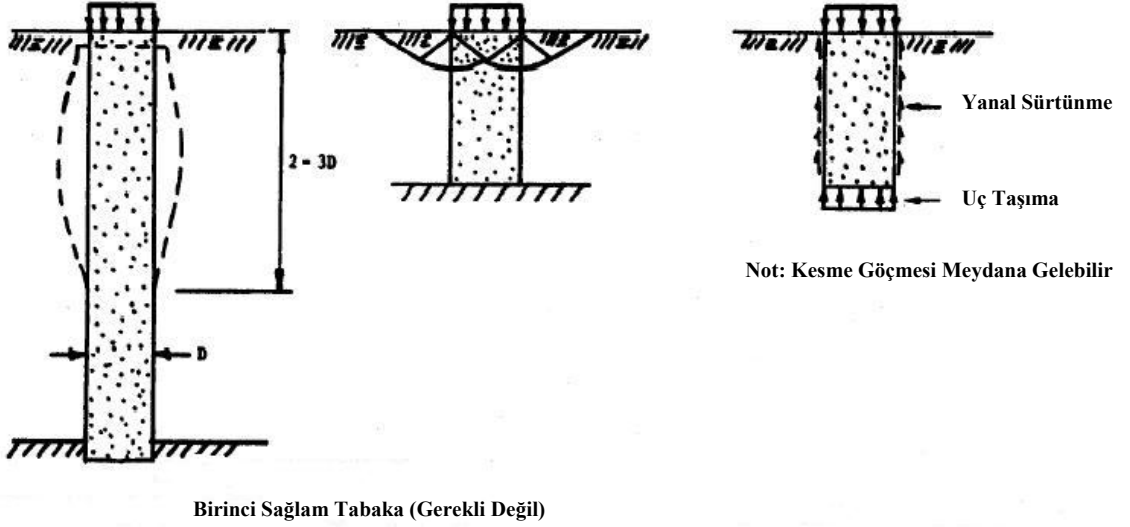


Şekil 2.17b Şerit temellerin oturması. (Priebe; Keller-Publications)

2.5.6 İyileştirilmiş Zeminde Taşıma Gücü Hesabı

2.5.6.1 Tekil Kolon İçin Göçme Mekanizmaları

Taş kolonlar yumuşak tabaka içerisinde imal edilirken sağlam tabakaya kadar uzatılabilir ya da sağlam tabakaya kadar uzatılmadan kolon ucu yumuşak tabaka içerisinde kalacak şekilde yüzen sistemler olarak imal edilebilirler.



(a) Uzun Taş Kolon, Sağlam Tabakada veya Yüzen Sistem Olarak

(b) Rijit Kısa Kolon - Kesme Göçmesi

(c) Yüzen Kısa Kolon - Zımbalanma Göçmesi

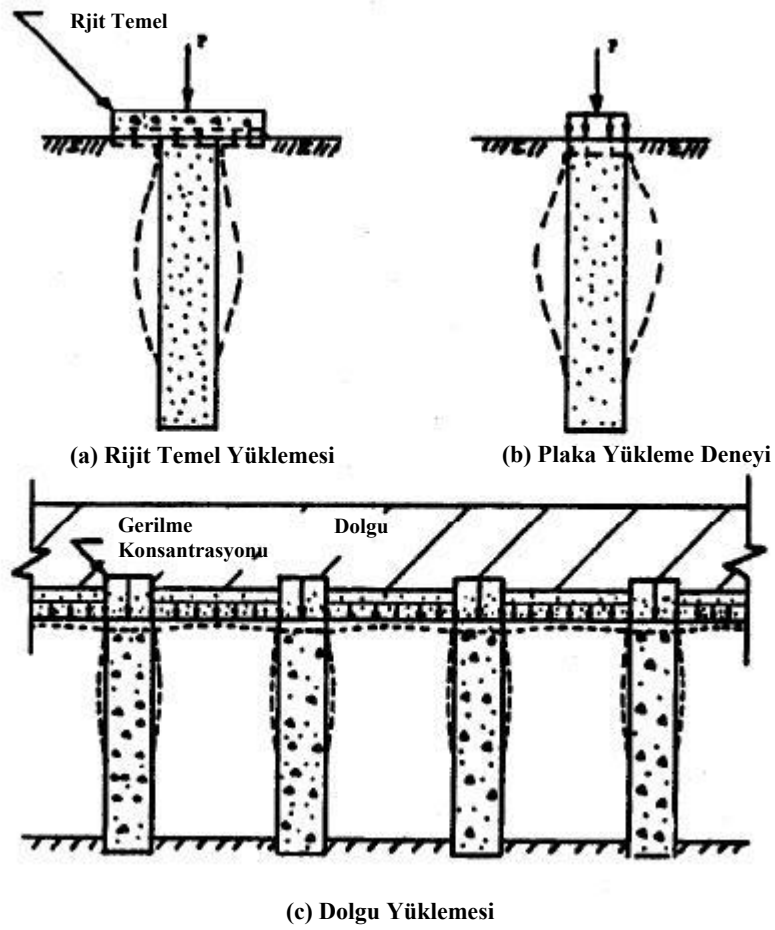
Şekil 2.18 Homojen zeminde tekil taş kolonun göçme mekanizmaları.

Şekil 2.18'de gösterildiği gibi taş kolon yüklendiğinde meydana gelebilecek göçme türlerini inceleyelim. Taş kolon ister sağlam tabakaya kadar uzatılsın isterse yüzen bir sistem olarak imal edilsin, eğer kolon uzunsa Şekil 2.18a'da gösterildiği gibi göçme malzemenin dışı doğru kabarması ve kolon çapının genişlemesi şeklinde olur. Eğer kolon çok kısaysa ve sağlam tabakaya kadar iniyorsa, Şekil 2.18b'de gösterildiği gibi yüzeyde kolonu da içerecek şekilde genel ve yerel göçme meydana gelebilir. Son olarak kolon kısaysa ve yüzen sistem olarak imal edilmişse Şekil 2.18c'deki gibi göçme uç kısımda meydana gelebilir.

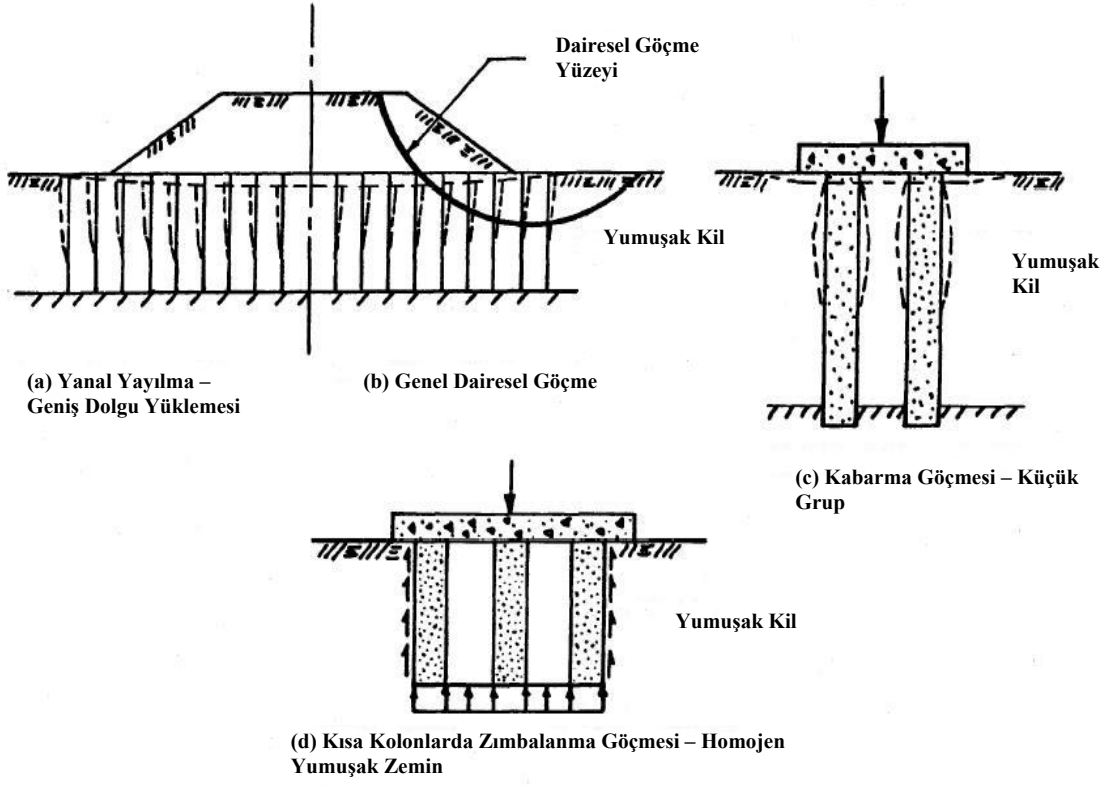
2.5.6.2 Taş Kolon Grupları İçin Göçme Mekanizmaları

Tekil bir taş kolon, taş kolon grubu ile karşılaştırıldığında nihai yükleme kapasitesi grup içerisindeki bir kolona göre küçük bir miktar daha düşüktür. Çevreleyen kolonlar ile içteki kolonun hareketi sınırlandırılır ve çevreleyen zemin pekleştirilir. Bu nedenle her bir kolonun nihai taşıma gücünde bir miktar artış meydana gelir.

Model yükleme deneyleri tekil kolonun davranışının yükün uygulanma yönteminden önemli oranda etkilendiğini göstermektedir. (Şekil 2.19). Yükün kolon çapından geniş rijit bir temel ile uygulanması (Şekil 2.19a) durumunda kolon etrafındaki gerilmelerde ve taşıma gücünde artış meydana gelmektedir. Yüklenen taş kolonun göstereceği yanal genişlemenin yüklenme şekline büyük oranda etkilendiği Şekil 2.19’da gösterilen farklı yükleme türleri için gözlenmektedir.

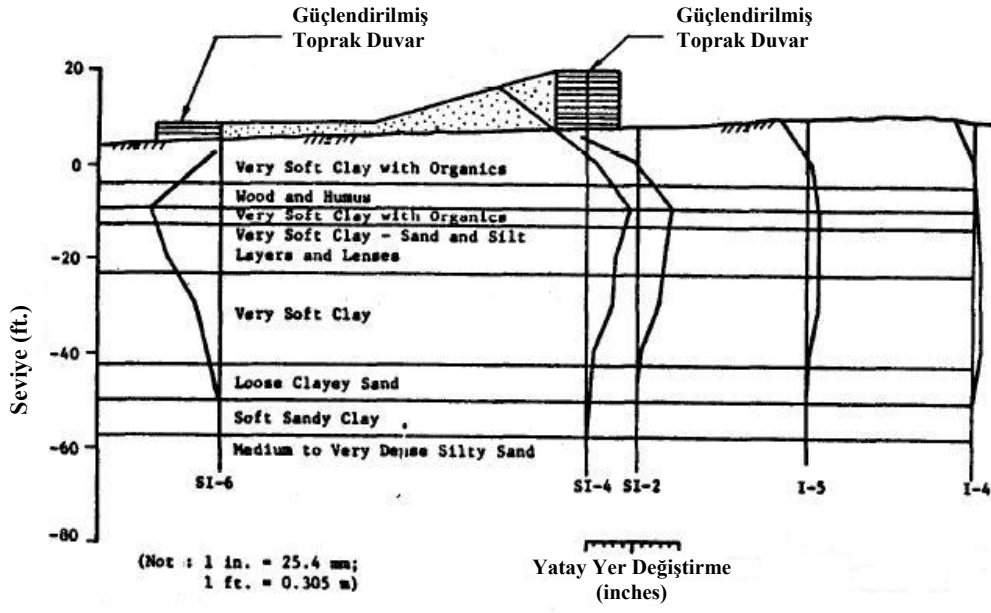


Şekil 2.19 Taş kolona etkiyen farklı tipteki yükler.

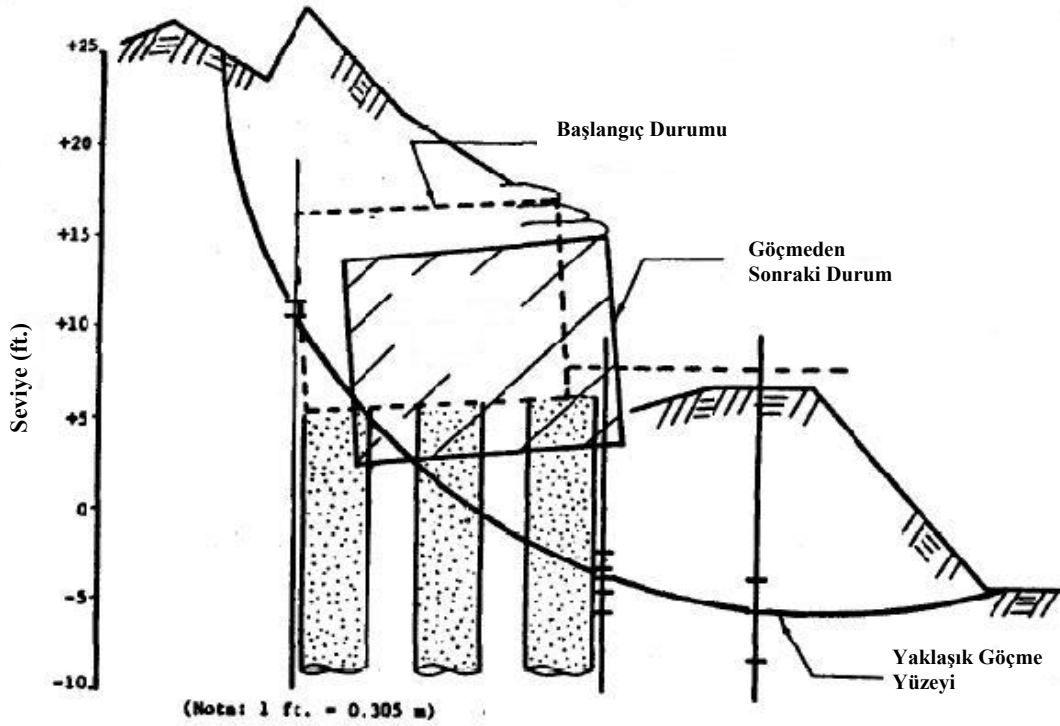


Şekil 2.20 Taş Kolon gruplarının göçme mekanizmaları.

Şekil 2.19c ve Şekil 2.20a’da gösterilen dolgu inşaatı gibi yüklemenin geniş bir alanda yapıldığı ve zeminin taş kolonlar ile iyileştirildiğini düşünelim. Vautrain (1977) sıkışabilir zemin ve taş kolonda meydana gelen oturmanın dolgu altında yaklaşık olarak eşit olduğunu bulmuştur. Zayıf zeminlerde dolgu inşaatına bağlı olarak temel altındaki zemin Şekil 2.20a ve Şekil 2.20b’de gösterildiği gibi yanal olarak ötelenir. Bu durum “yanal yayılma” olarak adlandırılır. Arazi deneyimleri ve sonlu elemanlar analizleri sonuçları, yan al yayılma oluştuğunda meydana gelen oturmaların yan al yayılma oluşmasının engellendiğinde meydana gelebilecek oturmalardan çok daha fazla olduğunu göstermektedir. Yanal yayılma zeminle taş kolon arasındaki yan al desteği azaltmaktadır. Ayrıca yan al yayılma taş kolon içerisinde dış doğru genişleme nedeniyle oluşacak göçme ihtimalini bir miktar arttırmaktadır.



Şekil 2.21 Sürşarj yüklemesi sonunda dolgu altında meydana gelen yanıl yer değiştirme.

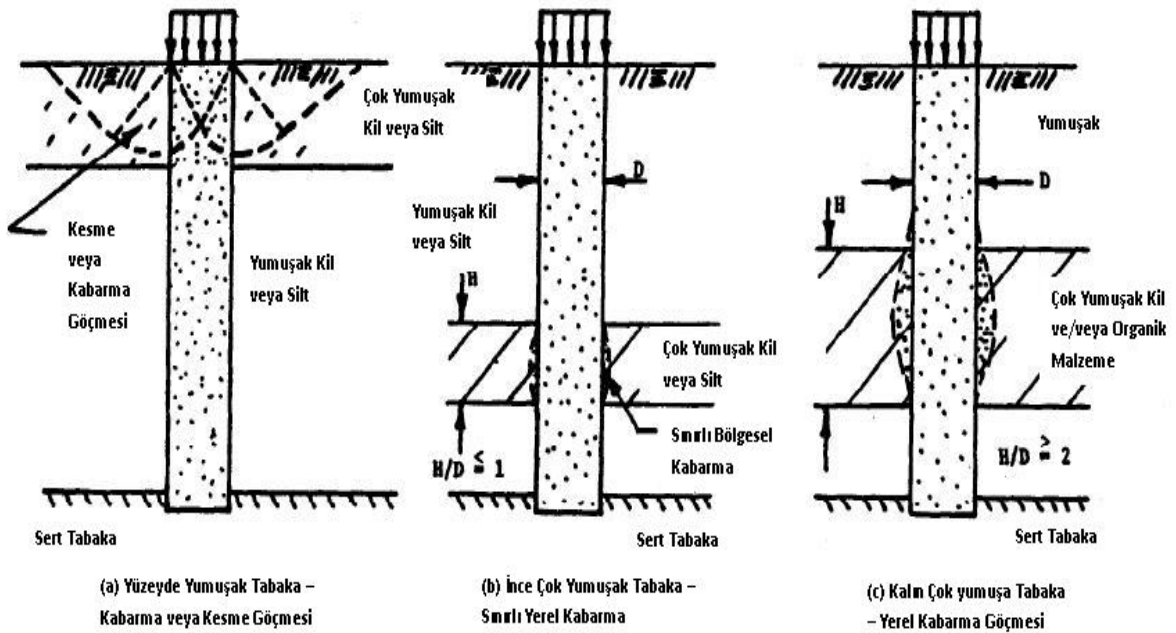


Şekil 2.22 Jourdan terminali – taş kolonla güçlendirilmiş zemin üzerindeki donatılı zemin istinat duvarı altında göçmeden sonraki durum.

Journal Terminali dolgu inşaatında inklinometrik ölçümler ile belirlenen yanal yayılma ötelenmeleri Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Bu projede 11x 4 m² boyutlarındaki bir inşaat sahasında 1.1 m çapında 14 adet taş kolon ile desteklenen küçük bir donatı zemin duvar inşa edilmiştir. Daha sonra istinat yapısı üzerine sürşarj yükü uygulanmış ve önünde kazıya başlanmıştır. Kazı sırasında Şekil 2.22’de gösterildiği gibi bir göçme meydana gelmiştir.

Yumuşak zemin içerisindeki taş kolon gruplarında Şekil 2.20’de gösterildiği gibi yerel göçme ve kabarma tipinde göçmeler meydana gelebilmektedir. Yerel göçme rölatif olarak rijit taş kolonun (veya kolon grubunun) zımbalanması şeklinde meydana gelir. Kısa kolon gruplarında Şekil 2.18d’de gösterildiği gibi uçta son taşıma gücünün aşılması nedeniyle göçme meydana gelebilir.

Yukarıda idealize edilen göçme mekanizmaları tanımlanırken zeminin üniform olduğu kabul edilmiştir ki gerçekte bu çok nadir bir durumdur. Deneyimlerden elde edilen sonuçlara göre zemin tabakaları içerisinde sınırlandırılmış, izole edilmiş çok yumuşak kohezyonlu zeminlerin bulunması, imal edilecek taş kolon veya taş kolon gruplarının Şekil 2.23’de gösterildiği gibi zeminin o bölgesinde dışa doğru kabarmaya göçmesine neden olabilmektedirler. Ayrıca arazi gözlemlerinden bu tabakanın kalınlığının taş kolonun çapından çok büyük olması durumunda taş kolonda ciddi stabilite sorunlarının ortaya çıkabileceği farkedilmiştir.



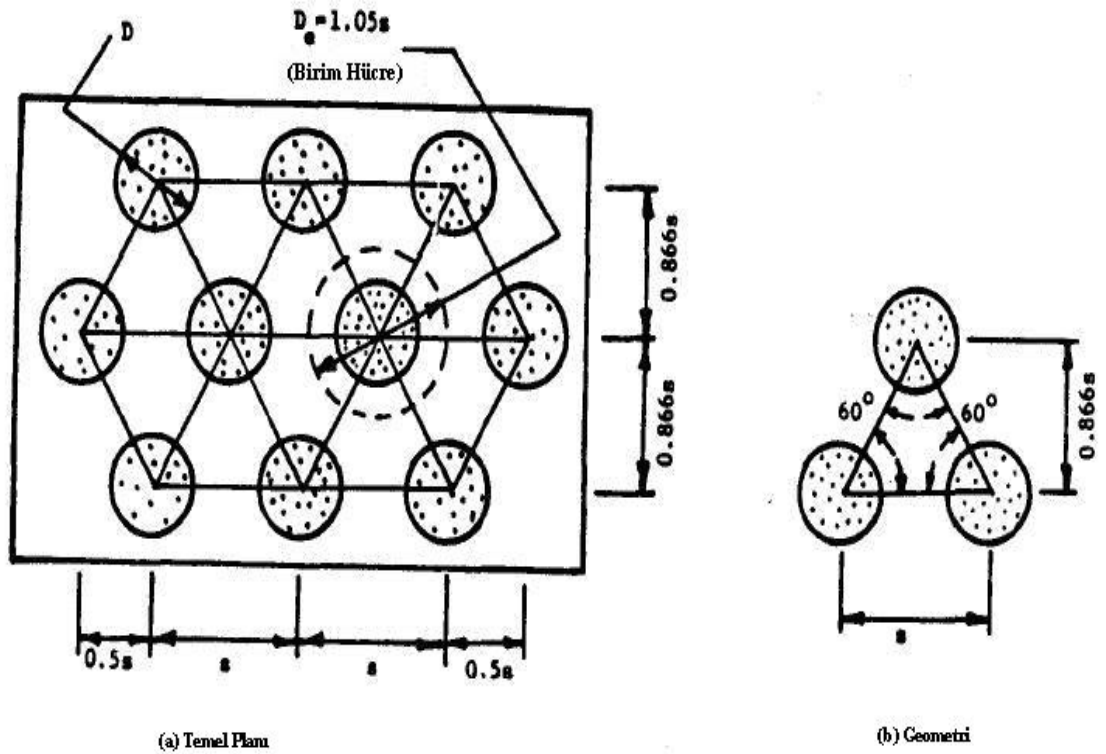
Şekil 2.23 Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları.

2.5.6.3 Temel Bağlantılar

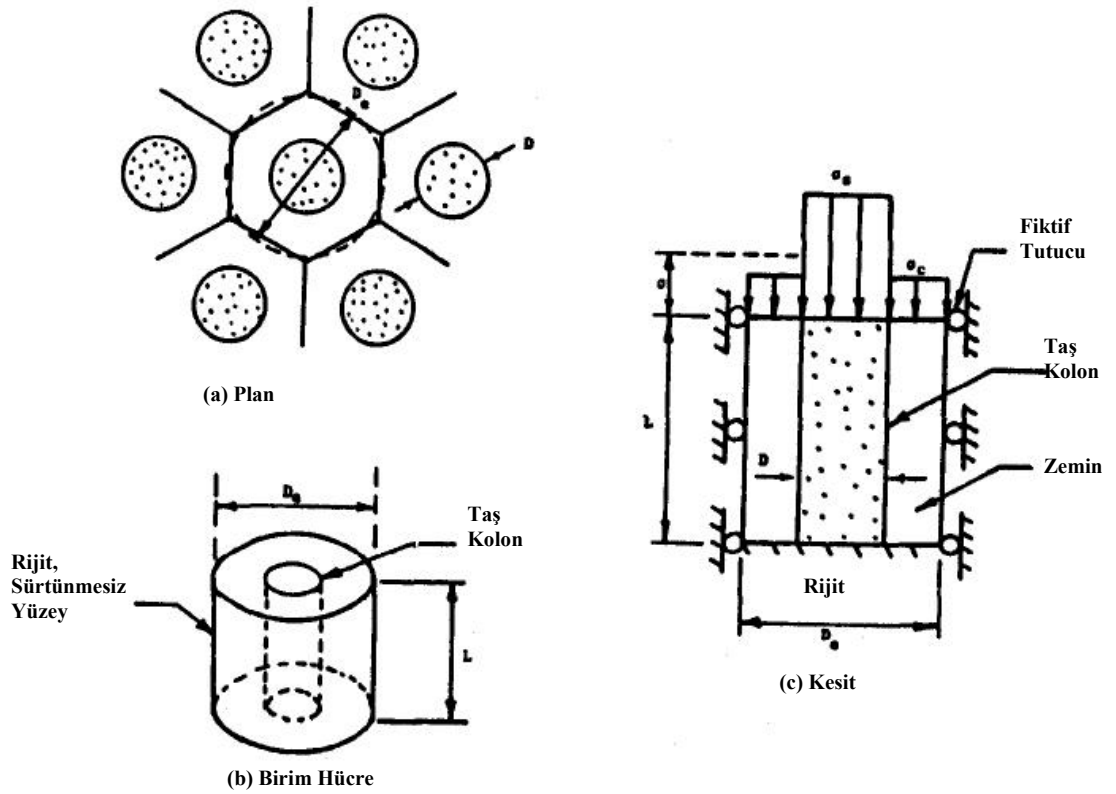
Taş kolonlar genellikle eşkenar üçgen diziliminde inşa edilirler, bazen de inşa sırasında kare dizilim uygulanabilir. Eşkenar üçgen dizilimi bize daha sıkı bir taş kolon paketi sunar. Şekil 2.22’de tipik bir taş kolon planı gösterilmiştir.

2.5.6.4 Birim Hücre Kavramı

Eşdeğer Cap: Oturma ve stabilite analizlerini yapabilmek için her bir kolonu çevreleyen zemin kolon ile birlikte düşünülmelidir. Bu kolonu çevreleyen zeminin alanı Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’de gösterildiği gibi düzgün altıgenden oluştuğu için buna yakın bir değerde, aynı alan değerine sahip bir daire kabul edilebilir.



Şekil 2.24 Taş kolonlarda eşkenar üçgen dizilimi.



Şekil 2.25 Birim hücre yaklaşımı.

Eşkenar üçgen yerleşimli kolonlar için bu eşdeğer dairenin efektif çapı;

$$D_e = 1.05s \quad (2.23)$$

kare yerleşimine göre ise;

$$D_e = 1.13s \quad (2.24)$$

olarak bulunur. Burada s , kolon merkezleri arasındaki mesafedir. Buna göre D_e çapına sahip ve hesap yapılan alanı içerisinde alan silindirik birim içerisinde zemin ve taş kolondan oluşan yapı birim hücre olarak adlandırılır. Taş kolon ve birim hücrenin merkezleri ortaktır.

Alan Değişim Oranı: Taş kolonlar ile değiştirilen zemin hacmi iyileştirilmiş zeminin performansında önemli bir etkiye sahiptir. Değiştirilen zemin miktarını belirlemek amacıyla, alan değişim oranı, a_c ;

$$a_c = \frac{A_c}{A} \quad (2.25)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada;

A_c : Sıkıştırılmadan sonra taş kolonun alanı

A : Birim hücrenin toplam alanı

olarak tanımlanabilir. Zemin alan oranı ise;

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (2.26)$$

$$a_s = 1 - a_c \quad (2.27)$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Alan değişim oranı ayrıca;

$$a_c = C_1 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.28)$$

formülüyle hesaplanabilir. Burada;

D : Sıkıştırılmış Taş Kolonun Çapı

s : Merkezden Merkeze Taş Kolonlar Arasındaki Mesafe

C_1 : Taş Kolonların Dizilimine Göre Belirlenen Sabit Bir Katsayı

C_1 katsayısı, kare dizilim için $\frac{\pi}{4}$, eşkenar üçgen dizilimi için $\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$ olarak alınır. Eşkenar üçgen dizilimine göre a_s ;

$$a_c = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.29)$$

olarak alınır.

Gerilme Konsantrasyonu: Taş kolon üzerine bir dolgu veya temel yerleştirildiğinde, Şekil 2.25c'de gösterildiği gibi taş kolonda önemli miktarda bir gerilme artışı meydana gelmekte ve çevresinde bulunan zeminde oluşacak gerilme miktarı azalmaktadır. Zeminde ve taş kolonda meydana gelen düşey oturmalar neredeyse aynı olduğu için ve taş kolon zemine göre daha rijit olduğu için gerilme konsantrasyonu taş kolon içerisinde meydana gelir.

Birim hücre kavramına uygun, kabul edilebilir genişlikte, göreceli olarak üniform yükün etkidiği, eşkenar üçgen veya kare yerleşimli bir taş kolon grubunu göz önüne alalım. Şekil 2.25c'de gösterilen düşey gerilme dağılımı aşağıda tanımlanan gerilme konsantrasyonu faktörü, n ile ifade edilebilir.

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (2.30)$$

Burada;

σ_c : Taş Kolon İçerisindeki Gerilme

σ_s : Kohezyonlu Zemin İçerisindeki Gerilme

olarak tanımlanır. Formülden de anlaşılacağı üzere temelden gelen yük nedeniyle kolonda ve zeminde oluşacak olan gerilme miktarlarının oranı gerilme konsantrasyon faktörü n olarak tanımlanır. Barksdale ve Bachus (1983) çeşitli arazi ölçümlerinden elde edilen gerilme konsantrasyon oranlarını tablo olarak sunmuşlardır. Bu çalışmada 12 farklı sahada ölçüm yapılmış ve bunların 4 tanesinde ölçümler 3 metre ve 15 metre derinlikte yapılmıştır. Ölçümler 15 haftalık konsolidasyon döneminden sonra alınmıştır. Buna göre oluşturulan tablo Şekil 2.26'da gösterilmiştir.

Deney Tipi	Dizayn	Yer	Gerilme Oranı (n)	Zamanla Değişimi	Taş Kolon Uzunluğu (m)	Zemin Durumu
Dolgu	Kare Dizilim S=1.7 metre D=0.9 metre a _s =0.25	Rouen, France- Vautrain (1977)	2.8 (Ortalama)	Sabitte Yakın	6.7 – 7.9	Yumuşak Kil : c = 20 – 30 kPa
Yükleme Deneyi; 45 Taş Kolon	Eşkenar Ü. Dizilimi; S=1.8 metre D=1.2 metre a _s =0.43	Hampton, Virginia – Goughnour et al. (1979)	3 (Başlangıç) 2.6 (Son)	Azalıyor	6.3	Çok yumuşak ve Yumuşak Kumlu Silt ve Kil; c = 10 – 38 kPa
Deneme Dolgusu, 14 Adet Taş Kolon	Eşkenar Ü. Dizilimi; S=2 metre D=1.1 metre a _s = 0.26	Jourden Road Terminal, New Orleans (1980)	2.6–2.4 (Baş.) 4.0–4.5 (Son)	Artıyor	20	Organik Malzemeli Çok Yumuşak Kil, Silt ve Kum Mercekleri, Gevşek Killi Kum, Yumuşak Kumlu Kil
Dolgu	a _s = 0.1 – 0.3	Japanese Studies -Sand Compaction Piles Aboshi et al. (1979)	2.5–8.5 4.9 (average)	Artıyor	Değişken	Çok Yumuşak ve Yumuşak Çökeçtiler
Model Deneyi	a _s = 0.07 – 0.4 D=0.03 m	GaTech Model Tests; Unit Cell; Sand Column	1.5 – 5.0	Sabitte Yavaşça Artan arası	Değişken	Yumuşak Kil, n a _s değeri ile artıyor gibi görünüyor.

Şekil 2.26 Taş kolonlarda gözlemlenen gerilme yoğunluğu faktörleri. (Barksdale ve Bachus, 1983)

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

hesaplanabilirler.

$$\sigma = \sigma_c a_c + \sigma_s (1 - a_c) \quad (2.31)$$

Bu denklemden kohezyonlu zemindeki ve taş kolondaki gerilmeler, gerilme konsantrasyon faktörü (n) kullanılarak;

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_s \sigma \quad (2.32)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_c \sigma \quad (2.33)$$

hesaplanabilir. Burada μ_s ve μ_c , zemindeki ve taş kolondaki gerilmelerin oranıdır. σ , σ_c ve σ_s etkiyen yüklemeye bağlıdır. Ayrıca başlangıçtaki efektif (veya toplam) düşey jeolojik gerilmeler ve yanal gerilmeler de önemlidir.

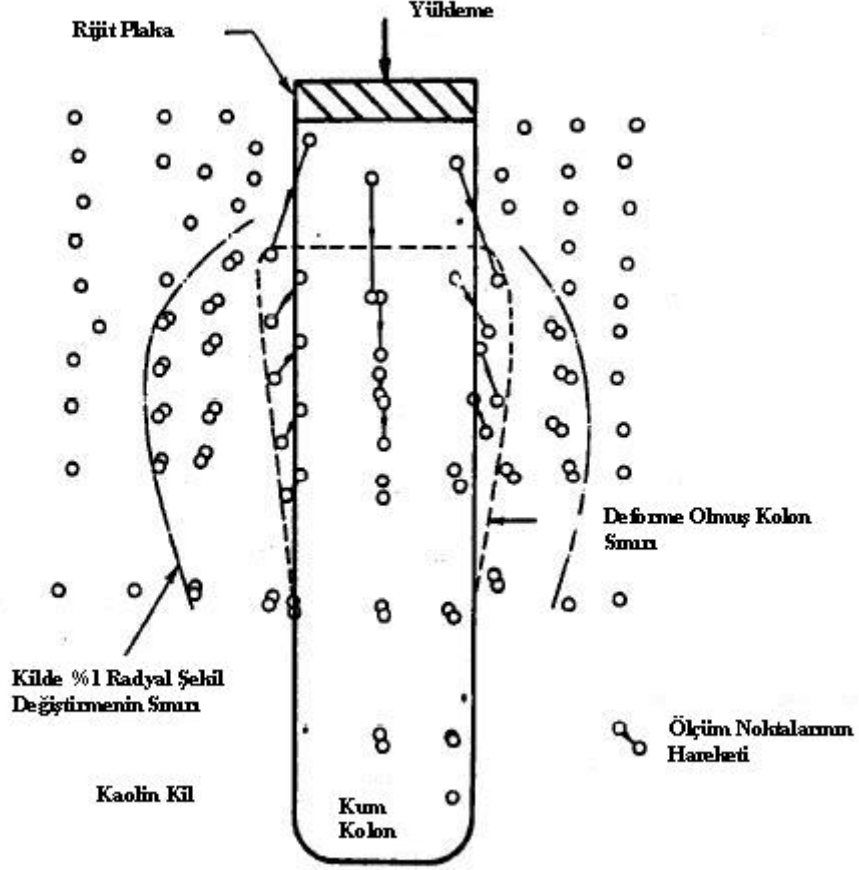
Yukarıdaki iki eşitlik, etkiyen yüke göre taş kolondaki ve zemindeki gerilmeyi veren oturma ve stabilite analizlerinde oldukça kullanışlıdır.

2.5.7 Nihai Taşıma Gücü Analizi

2.5.7.1 Tekil Taş Kolon

Taş kolonun uzunluğunun çapına oranı dört veya altıya eşit veya daha büyükse genellikle taş kolonda dışa doğru kabarma (genişleme) şeklinde göçme meydana gelmektedir. Kolon ucu yumuşak tabaka içinde kalacak şekilde yüzen sistem olarak tasarlanmış ya da sağlam tabakaya kadar uzatılmış olması fark etmez. Şekil 2.27’de yumuşak kilde tek bir taş kolonun kabarma göçmesi gösterilmiştir.

Hughes ve Withers (1974) tarafından yumuşak kilde yapılan küçük ölçekli bir model deneyinde göçmenin yüzeyden, çapın iki veya üç katı derinlikte meydana geldiği görülmüştür. Bu modelde 12.5 mm den 38 mm ye kadar değişen çapta ve 150 mm uzunluğunda kum kolonlar kullanılmıştır. Deneyde kayma mukavemeti 19.1 kPa olan yumuşak kaolin kil kullanılmıştır. Kompozit zemin kütlesi içerisindeki birim şekil değiştirme belirlenmiştir. Bu deneyde tekil bir kolona yük geldiğinde yükün zemine aktarıldığı gözlenmiştir. Etkiyen yük sonucunda kolon dışa doğru taşmış ve aşağı doğru hareket etmiş, kolon içerisindeki granüler malzemenin çevresindeki zemine baskı yaptığı gözlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışmalar göçmeye yakın yük seviyelerinde kolon üst kesimlerinde taş ile kil arasındaki ara yüzeyde kayma oluştuğuna işaret etmektedir.



Şekil 2.27 Tekil bir kolon üzerindeki rijit bir plakaya etkiyen yük sonucunda kolonda oluşacak kabarma göçmesi modü.

Taş kolonu destekleyen, yanıl çevre gerilmesi (σ_3) bu yöntemde çevre zeminde taş kolon genişlediğinde mobilize olan nihai pasif direnç olarak alınır. Kolon göçme durumunda kabul edildiğinde, nihai düşey gerilme σ_1 , taş kolon malzemesi pasif itki katsayısı K_p , yanıl çevre gerilmesi σ_3 ise klasik plastik teori kavramından aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \quad (2.34)$$

ϕ_c : Taş Kolonun İçsel Sürtünme Açısı

Gerilme oranı $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$, taş kolon için pasif toprak basıncı K_p katsayısıdır.

Boşluk Genişleme Teorisi: İlk yaklaşım olarak çevre zeminde oluşacak nihai pasif direnç, simetri eksenini etrafında genişleyebilen sonsuz uzun bir silindire karşı oluşan pasif direnç

olarak modellenebilir. Genişleyebilen silindirik boşluk yaklaşık olarak zemin içerisinde yanal olarak dışarı doğru taşan kolonu temsil edebilir. Hughes ve Withers (1974), Datye vd. (1978) ve Walleys vd. (1981) bu yaklaşımı kullanarak taş kolonu çevreleyen zeminde oluşan basıncı incelemiştirlerdir. Taş kolon iki veya üç çap kadar uzunlukta dışa doğru taşmasına rağmen, mühendislik yaklaşımı olarak sonsuz uzun ve genişleyebilir silindir teorisi uygun sonuçlar vermektedir.

Hughes ve Withers (1974), tek bir taş kolondaki kabarma göçmesinin pressiyometre testi sırasında gelişen boşluk ile benzer özellikler taşıdığını düşünmüşlerdir. Yaklaşımlarına göre Gibson ve Anderson (1961) tarafından sürtünmesiz bir malzeme ve sonsuz uzunlukta genişleyebilir bir silindirik boşluk için geliştirilen elasto-plastik teori, çevreleyen zeminde oluşacak drenajsız nihai yanal gerilme değerini hesaplamak için kullanılabilir.

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E_s}{2c(1+\nu)} \right] \quad (2.35)$$

Burada;

σ_3 : Nihai Drenajsız Yanal Gerilme

σ_{ro} : Kolon İmalatından Sonraki Toplam Radyal Gerilme

E_s : Zeminin Elastik Modülü

c : Drenajsız Kayma Mukavemeti

ν : Poisson Oranı

olarak tanımlanır. (2.35) eşitliği kullanılarak elde edilen taş kolonu çevreleyen zemindeki gerilme değeri kullanılarak ve $q_{ult} = \sigma_1$ kabul edilerek;

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left[1 + \ln \frac{E}{2c(1+\nu)} \right] \right\} \left(\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right) \quad (2.36)$$

formülü ile taş kolona uygulanabilecek nihai gerilme hesaplanabilir. Yumuşak kohezyonlu zeminin drenajsız elastisite modülü yaklaşık olarak drenajsız kesme dayanımı ile orantılı olarak alınabilir.

Vesic (1972) Boşluk Genişleme Teorisi: Genel silindirik boşluk genişleme teorisi Vesic (1972) tarafından sürtünmeli ve kohezyonlu zeminleri içerecek şekilde genişletilmiştir. Bir kez daha sonsuz uzun bir silindir alınmış ve zemin elasto-plastik kabul edilmiştir. Çevreleyen zeminden dolayı oluşacak nihai yanal direnç σ_3 ;

$$\sigma_3 = c_u F'_c + q F'_q \quad (2.37)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

c_u :Kilin Drenajsız Kohezyonu

q : Hesap Derinliğindeki Ortalama Normal Gerilme

F'_c, F'_q :Boşluk Genişleme Faktörleri

olarak tanımlanır. Şekil 2.28'de zeminin içsel sürtünme açısına bağlı boşluk genişleme teorisi faktörleri F'_c ve F'_q değerlerinin rijitlik indeksi I_r 'ye bağlı değişimi gösterilmiştir. Rijilik indeksi;

$$I_r = \frac{E}{2(1+\nu)(c + qtg\phi_s)} \quad (2.38)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

E : Zeminin Elastisite Modülü

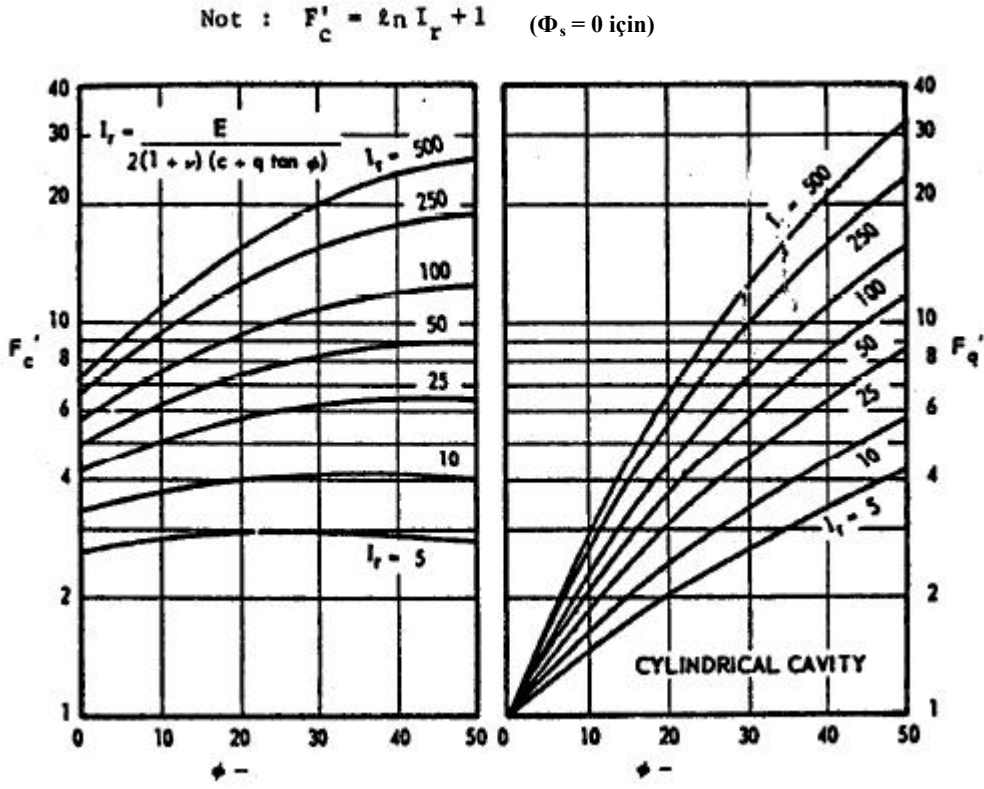
ϕ_s : Zeminin Kayma Mukavemeti Açısı

c : Zeminin Kohezyonu

ν : Zeminin Poisson Oranı

q : Göçme Bölgesindeki Ortalama Normal Gerilme

olarak tanımlanır.



Şekil 2.28 Vesic (1972) silindirik boşluk genişleme faktörleri.

$q_{ult} = \sigma_1$ kabul edersek;

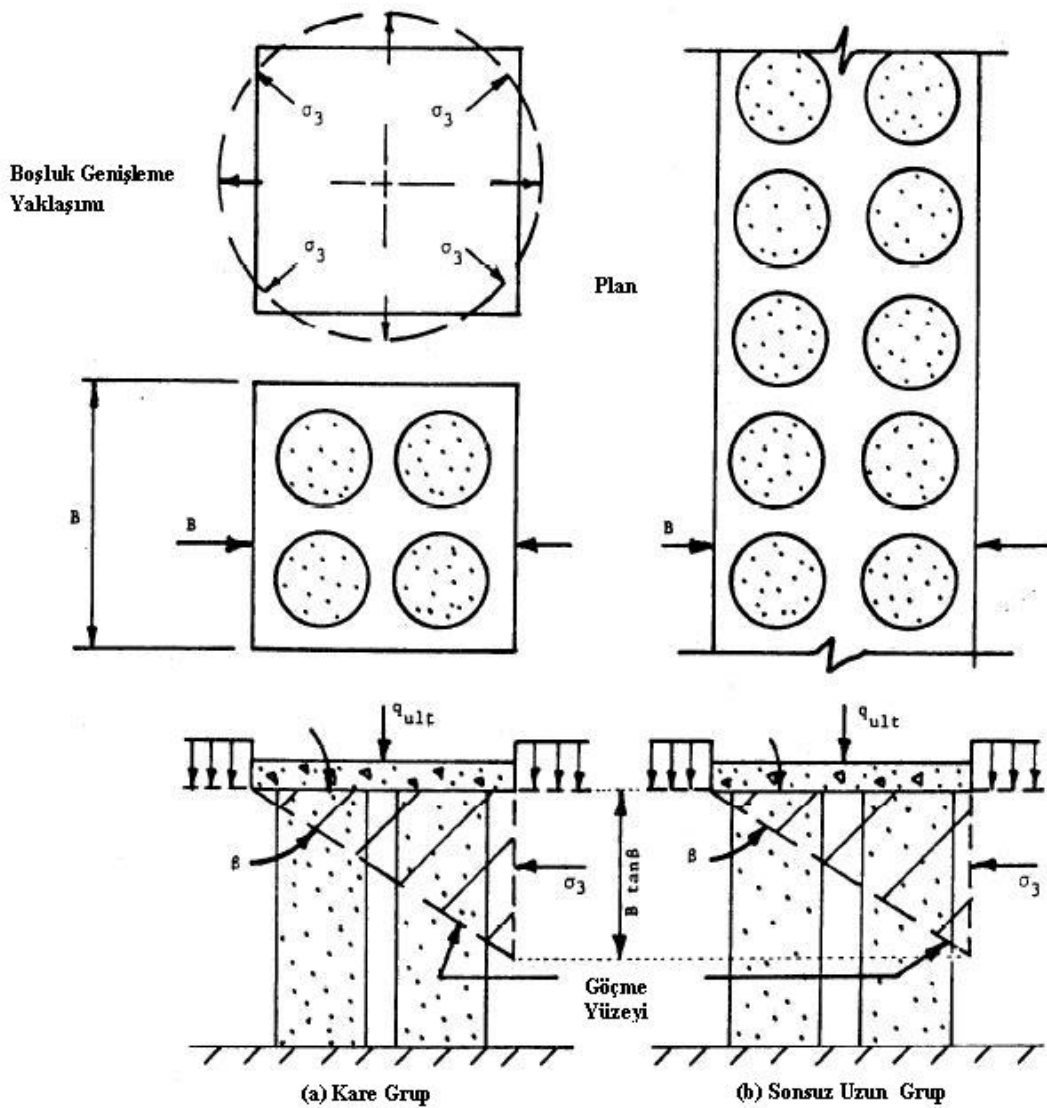
$$q_{ult} = [cF'_c + qF'_q] \left[\frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} \right] \quad (2.39)$$

denklemini elde edilir.

Vesic (1972) tarafından geliştirilen bu yöntem bize sürtünmesiz zeminler için, nihai yükleme altında Gibson ve Anderson (1961) tarafından geliştirilen boşluk genişleme teorisi ile aynı sonuçları vermektedir. Normal gerilme q analizlerde kabarmanın meydana geldiği derinlikteki ortalama gerilme değeri olarak alınmalıdır. Normal gerilme q , başlangıç gerilmelerinin ve etkiyen yükten dolayı oluşacak gerilme değişiminin toplamı olarak ifade edilebilir. Taş kolondaki gerilme konsantrasyonuna bağlı olarak taş kolonun kısa ve uzun dönem için nihai kapasitesi boşluk genişleme teorisi kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca inşaat sırasında önyükleme ve konsolidasyon dolayısıyla yumuşak zemindeki mukavemet artışı göz önüne alınmalıdır.

2.5.7.2 Taş Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Kapasitesi

Şekil 2.29'da gösterilen, taş kolon ile iyileştirilmiş kohezyonlu zemin tabakası üzerine oturan kare veya sonsuz uzun, rijit beton bir temelin taşıma gücünü belirlemek için, yükün çok çabuk yüklendiğini, bu nedenle kohezyonlu zeminde drenajsız kesme durumu meydana geldiğini ve içsel sürtünme açısının bu nedenle ihmal edildiğini kabul edelim. Ayrıca, kesme dayanımının hem taş kolonda hem de zeminde tam olarak mobilize olduğunu kabul edelim. Grubun nihai taşıma kapasitesi yaklaşık olarak iki düz yırtılma çizgisi tarafından oluşturulan bir göçme yüzeyi kabul edilerek belirlenebilir.



Şekil 2.29 Taş Kolon grup analizleri.

Bu teori ilk olarak homojen zeminler için Bell (1978) tarafından geliştirilmiş daha sonra Terzaghi ve Sowers (1979) tarafından modifiye edilmiştir. Homojen zeminler için Bell'in taşıma kapasitesi teorisi, Terzaghi'nin yerel göçme teorisine yakın sonuçlar vermektedir.

Şekil 2.29'da gösterildiği gibi temelin hemen altındaki zeminin düz bir yırtılma çizgisi ile üçgen bir blok oluşturacak şekilde göçtüğünü kabul edelim. Zeminin kompozit kesme dayanımı kesme yüzeyinde gerçekleşebilir. Kompozit zeminin karşı koyabileceği nihai gerilme q_{ult} , bloğun yanal harekete nihai direnci, σ_3 'e ve eğimli kesme yüzeyinde oluşacak kompozit kesme direncine bağlıdır. Bloğun dengesi göz önüne alındığında blok içerisindeki ortalama kesme dayanımı parametreleri;

$$[tg\phi]_{avg} = \mu_c a_c tg\phi_c \quad (2.40a)$$

$$c_{avg} = (1 - a_c)c \quad (2.40b)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Burada;

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

c_{avg} : Temelin Altındaki Kesme Yüzeyinin Kompozit Kohezyonu

a_c : Alan Değişim Oranı

μ_c : Taş Kolon İçin Gerilme Konsantrasyon Faktörü

olarak tanımlanabilir. Daha önceden de açıklandığı üzere taş kolonun kohezyonu ve zeminin içsel sürtünme açısı ihmal edilmiştir. Göçme yüzeyi temelle bir β açısı yapmaktadır.

Kompozit zemin için bu açı;

$$\beta = 45 + \frac{\phi_{avg}}{2} \quad (2.41)$$

olarak yazılabilir. Taş kolon grubunun nihai taşıma gücünü hesaplamak için öncelikle nihai yanal gerilme σ_3 hesaplanmalıdır. Klasik toprak basıncı teorisinde, suya doygun killerde sonsuz uzun bir temelde;

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_s B tg\beta}{2} + 2c \quad (2.42)$$

bağıntısı kullanılabilir. Burada;

σ_3 : Ortalama Yanal Çevre Basıncı

γ_s : Kohezyonlu Zeminin Doygun veya Islak Birim Hacim Ağırlığı

B : Temel Genişliği

β : Göçme Yüzeyinin Eğimi

c : İyileştirilmemiş Zemindeki Drenajsız Kesme Dayanımı

Kare temel için yanal gerilme; Vesic'in (2.37) bağıntısı ile ifade edilen boşluk genişleme teorisi kullanılarak hesaplanabilir. Vesic silindirik genişleme teorisi göçme bloğuna etkiyen nihai yanal gerilmeyi verir. Nihai düşey gerilme q_{ult} ve nihai yanal gerilme σ_3 asal gerilmeler olarak kabul edilirse, bloğun dengesinden,

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2c_{avg} \tan \beta \quad (2.43)$$

olarak yazılabilir. Burada σ_3 (2.42) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Kamadaki zeminin ağırlığı ihmal edilmiştir. Kamadaki zeminin ağırlığı kompozit kesme dayanımını arttırabilir ve (2.40a)'nın modifiye edilmesi ile analizlerde dikkate alınabilir. Taş kolon gruplarının nihai taşıma gücünün hesaplanması için önerilen bu yöntemde, temel şekli, temel boyutları, taş kolonun içsel sürtünme açısı, taş kolonla güçlendirilmiş kompozit zeminin kayma mukavemeti ve üzerine etkiyen jeolojik gerilme ile çevreleyen zeminin rijitlik indeksi ile tanımlanan sıkışabilirliği göz önüne alınmaktadır.

3. GEOPIER KOLON İMALATI

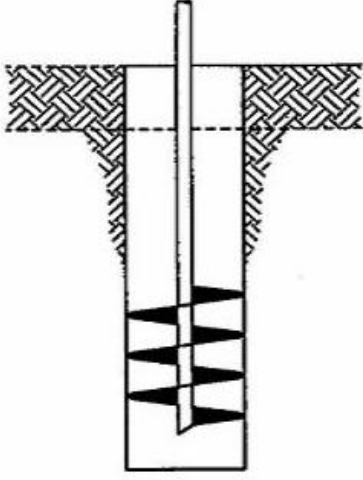
3.1 Genel

Yirmi yıldan fazla zamandır Geopier kolonlar (Rammed Aggregate Columns) Amerika'da oturmaları uygun seviyelere indirmek ve temel altındaki yumuşak zeminlerin taşıma kapasitesini arttırmak amacıyla etkin bir şekilde kullanılmaktadır.(Lawton ve Fox, 1994; Lawton vd., 1994; Wissmann vd., 2001). Geopier kolonlar, önceden kazılmış kuyulara geri dolgu ile ince, sağlam agrega tabakalarının özel tasarlanmış, konik uçlu çekiç ile tokmaklanarak sıkıştırılması ile oluşturulur. (Fox ve Cowell, 1998). Kolon inşası sırasında ilk geri dolgu tabakası darbe ile sıkıştırılırken alt kısmı yayılarak diğer tabakalar için sağlam bir tabaka oluşmasını sağlar. Kuyuda sıkıca sıkıştırılan agrega özellikle iyileştirilmiş bölgedeki yataklanma katsayısının artmasını sağlar.(Lawton ve Fox, 1994; Lawton vd., 1994). Üstelik darbe ile sıkıştırmadan dolayı kuyu içerisindeki agrega kolon boyunca yanal olarak, uç kısımda ise aşağıya doğru genişleyerek çevre zeminde öngerilme ve şekil değiştirme oluşmasına sebep olur.(Fox ve Cowell, 1998; Handy ve White, 2005a; 2005b; Pham vd., 2005)

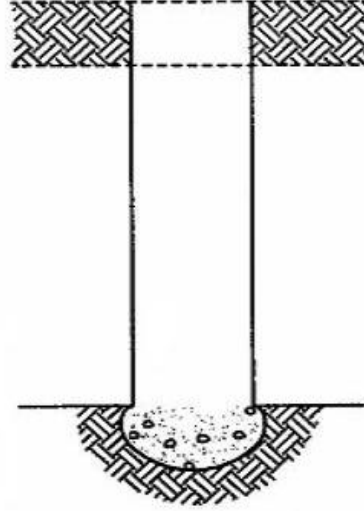
3.2 Yapım Aşamaları

Fox ve Cowell (1998) Geopier kolonlar için detaylı yapım aşamalarını Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sunmuşlardır. Buna göre;

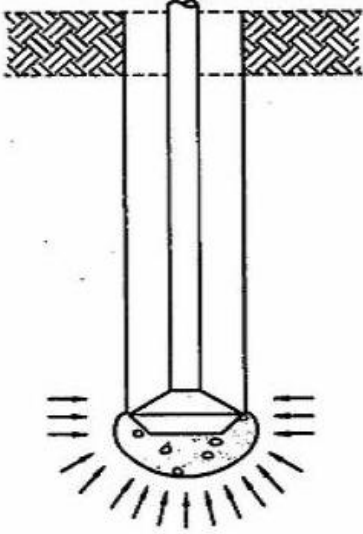
- 1) Uygun bir kazı aleti ile bir kuyu kazılır. (Şekil 3.1a)
- 2) Taş malzeme kuyunun dibine yerleştirilir ve ince tabakalar halinde sıkıştırılır. (Şekil 3.1b) genellikle tabaka kalınlığı 300 mm veya daha düşüktür. Göreceli olarak yüksek frekanslı, özel tasarlanmış 45 derecelik konik uçlu darbe tokmağı, agregayı sıkıştırmak için kullanılır.(Şekil 3.1c). Bunun sonucunda zemin içerisinde yanal ve düşey yöndeki gerilmelerde artış meydana gelir. Bu işlem sırasında kolonun çapı artar. Kolon boyutlarındaki bu artış bitişik zemin tabakasında öngerilme ve şekil değiştirmeye sebep olur.
- 3) Sıkıştırılan agrega yüzeye ulaşana kadar birçok tabaka oluşturacak şekilde imal edilir. (Şekil 3.1d).
- 4) Sınırların olmaması yüzünden ve yüzeyde zemini sıkıştırma kapasitesinin düşmesi nedeniyle kolon tepesi yüzey seviyesinin biraz altında bırakılır. Daha sonra çevre zemin kazılarak son temel seviyesine ulaşılır. (Şekil 3.1d)



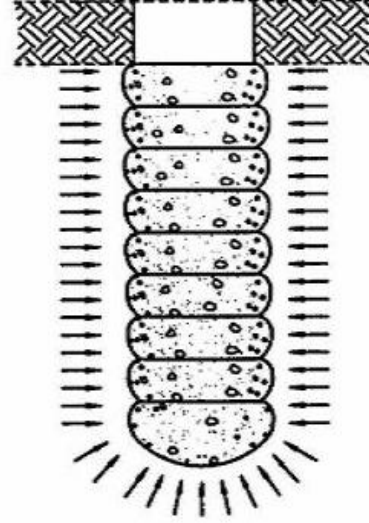
a) Kuyunun Kazılması



b) Kazılan Kuyunun Dip Kısımına Taşın Yerleştirilmesi



c) Dip Kısımda Şişkin Topuk Kısımının Oluşturulması



d) Kolon Boyunca Ondülasyon Yüzeyleri oluşturacak 300mm Kalınlığındaki Tabakalar Oluşturarak Geopier'in İnşa Edilmesi

Şekil 3.1 Geopier inşa adımları. (Lawton, 2004)



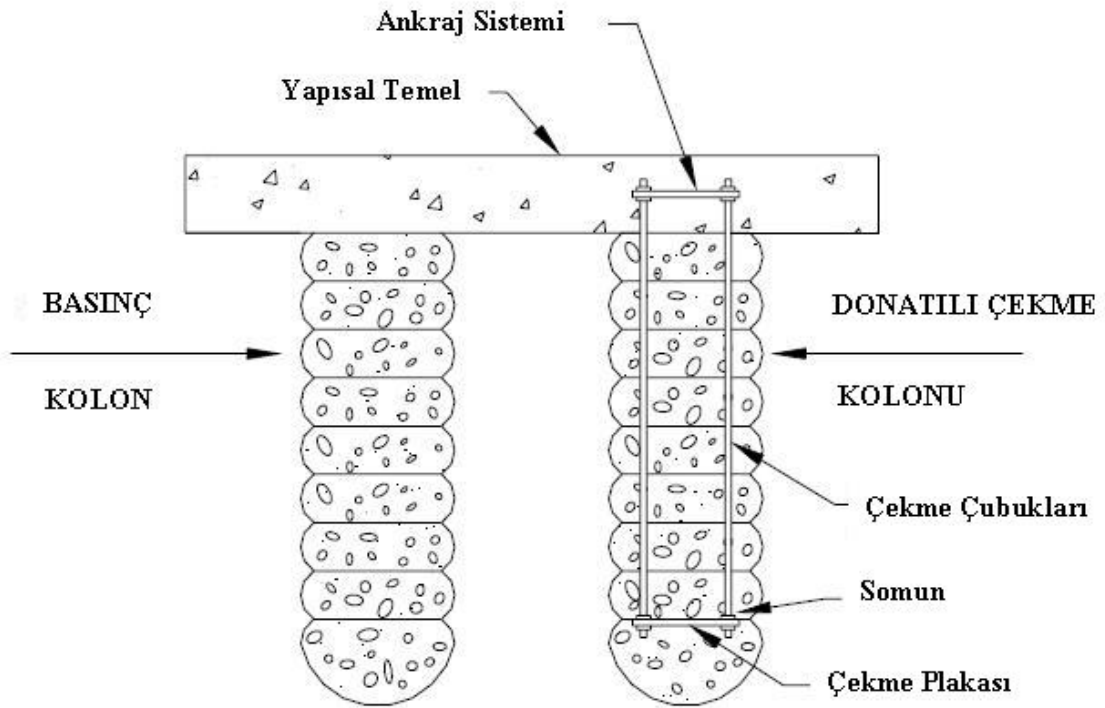
Şekil 3.2 Geopier inşa ekipmanları; özel tokmaklı kazıcı ve sondaj makinesi. (Lawton, 2004)



Şekil 3.3 Agreganın yerleştirilmesi.

3.3 Geopier Kolon Çeşitleri

İki çeşit kolon inşa edilebilir. Bunlar basınç kolonları (taşıyıcı) ve donatılı çekme kolonları olarak adlandırılabilir. Bu iki tip kolon için inşa adımları aynıdır. Birbirine benzemekle birlikte çekme kolonları için birkaç ekstra adım gerekir. Dipte oluşturulan şişkin topuk kısmı oluşturulduktan sonra sıyrılma düzeneği kuyu dibine indirilir. Bu düzeneği birbirine geçmiş çelik çubukların, çelik bir plakaya alttan ve üstten vida yardımıyla tutturulması ile oluşturulur. (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Geri kalan inşa adımları önceden tanımlandığı gibidir.



Şekil 3.4 Geopier çeşitleri. (Lawton, 2004)



Şekil 3.5 Donatılı geopier kurulumu. (Lawton, 2004)

3.4 Diğer Zemin İyileştirme Yöntemleri İle Karşılaştırma

İki yöntem zemin iyileştirme için sıklıkla kullanılır. Bunlar taş kolonlar ve kazı/yerine geri dolgu yerleştirme yöntemleridir. Geopier elemanları, taş kolonlar ile benzer görünebilir fakat önemli birkaç farklılığı vardır. Bunlar Lawton ve Fox (1994) tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

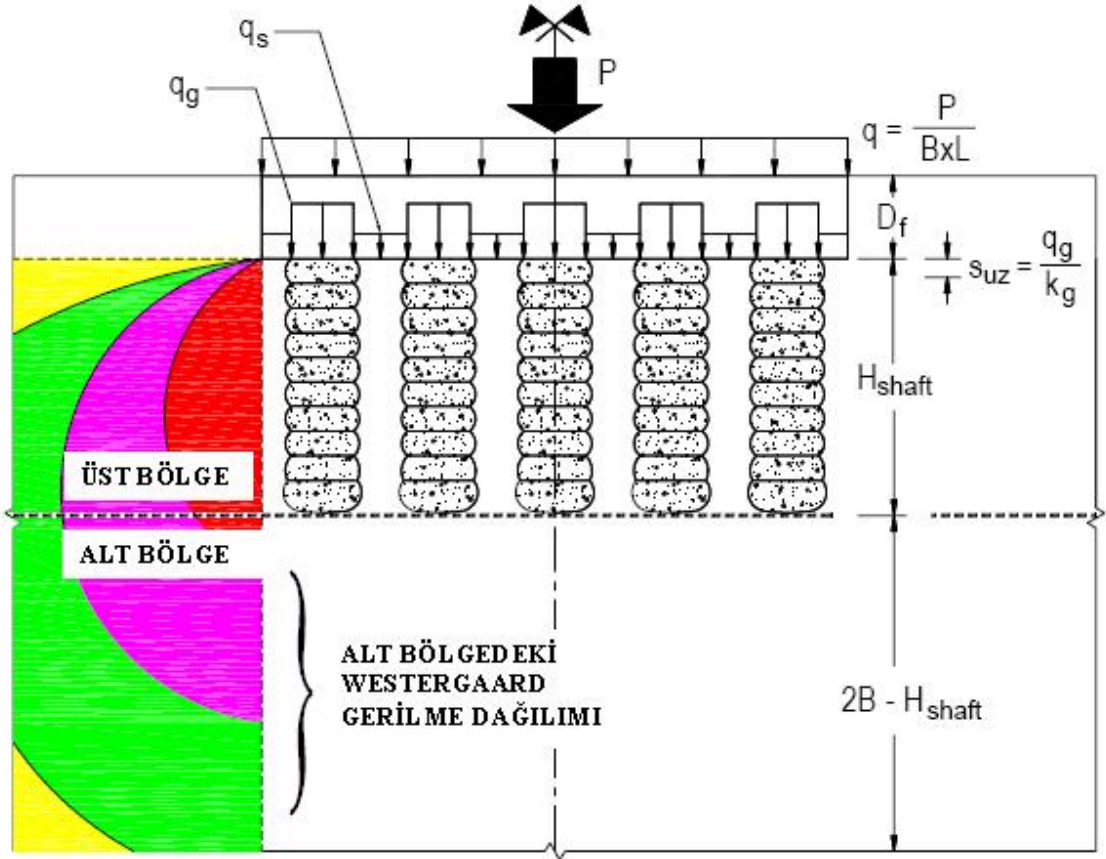
- Geopier kolonlar öncelikle alt tabakayı pekleştirmek için tasarlanırlar. Bazı uygulamalarda önemli olan radyal drenajı arttırmak ve alt tabakayı güçlendirmek ikinci plandadır.
- Geopier kolonlar genellikle kısadır. Uzunlukları genellikle genişliklerinin 2 veya 8 katı olacak şekilde ayarlanırlar.
- Geopier kolonlar, yatay veya düşey titreşimle yer değiştirmek yerine kazılarak hazırlanırlar. Bu nedenle çevreleyen zemin genellikle yapısal özelliklerini kaybetmez.
- Geopier kolon inşası vibrasyon teknolojisi yerine özel tasarlanmış yüksek frekanslı tokmak yardımıyla inşa edilir.
- Geopier kolonlar ince tabakalar halinde inşa edilirler. Bu durum çevre zeminde öngerilme, ön şekil değiştirme ve sıkışmayı sağlar.

Elverişsiz zeminlerin kazılıp yerine sıkıştırılmış geri dolgu yapılması pahalı ve fazla zaman gerektiren işlemlerdir. Kolon inşası gerekli temel boyutlarına göre gerekli yerlere gerekli

miktarda kuyu kazılarak yapılır.

3.5 Geopier Kolonlar İle Desteklenmiş Temelerde Oturma Hesabı

Geopier ile güçlendirilmiş taşıyıcı zeminlerin oturmalarını tahmin etmek, iyileştirilmemiş zeminlerinkini tahmin etmekten daha zordur. Şekil 3.6'da rijit temelleri destekleyen RAP sistemlerinin hesabı için kullanılan örnek bir şema gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Rammed aggregate kolonlar ile desteklenmiş temeller için hesap şeması.

Şekilde görüleceği üzere zemin iki bölgeye ayrılmıştır ve bu bölgeler üst ve alt bölge olarak adlandırılmıştır. Üst bölge olarak ayrılan tabakanın kalınlığı (H_{shaft}); kolon boyu H_0 ve kolon çapı (d_{shaft}) değerlerinin toplamı olarak tanımlanır. Lawton ve Warner'a (2004) göre kolonlarla desteklenen rijit temelerde meydana gelecek toplam oturma;

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} = S_{UZ} + S_{i,LZ} + S_{c,LZ} + S_{s,LZ} \quad (3.1)$$

formülü ile tanımlanır. Burada;

S_{UZ} : Üst Bölgedeki Ani Oturma Miktarı

S_{LZ} : Alt Bölgedeki Toplam Oturma Miktarı

$S_{i,LZ}$: Alt Bölgedeki Ani Oturma Miktarı

$S_{c,LZ}$: Alt Bölgedeki Birincil Konsolidasyon Oturması

$S_{s,LZ}$: Alt Bölgedeki İkincil Konsolidasyon Oturması

olarak tanımlanabilir. Yukarıda tanımlanan değerlerden ikincil konsolidasyon oturmasına bağlı olarak meydana gelebilecek oturma çok küçük olacağından ihmal edilebilir. Buna göre formül aşağıdaki gibi olacaktır:

$$S_T = S_{UZ} + S_{i,LZ} + S_{c,LZ} \quad (3.2)$$

Şekil 3.7'de Fox ve Cowell'a (1998) göre zemin sistemi içerisinde alt ve üst bölgenin yerleri gösterilmiştir.

3.5.1 Üst Bölge Oturmaları

Üst bölgedeki oturmalar, kolon ve kolon etrafındaki sıkıştırılmış zeminin kompozit rijitliğine bağlıdır. Üst bölgedeki oturma, kolon modülünün, kolon materyalindeki gerilmenin, zemin modülünün ve zemindeki gerilmenin bir fonksiyonudur. Üst bölge oturmaları hesaplanırken zemindeki farklı oturmalar hesaba katılmaz. Yapılan arazi çalışmaları göstermiştir ki dolgu altında, geopier tepesinde ve zeminde farklı oturma miktarları çok azdır. (Minsk, 2001; White, 2002). Şekil 3.8'de geopier elemanlarında gelişen gerilme birikimini anlamaya yardımcı olacak bir yay modeli gösterilmiştir. Rijit yay rijit kolon materyalini, yumuşak yay ise zemini temsil etmektedir. Rijit bir temel ve merkeze etkiyen bir P yükü için bütün yaylar δ miktarı kadar çökecektir. Buna göre P kuvveti;

$$P = -k.\delta \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Burada;

k : Yay Sabiti

olarak tanımlanır. Kolon ile güçlendirilmiş zeminde temel yükü nedeniyle oluşacak kolon üst kısmındaki gerilme q_p , zemine etkiyen q_m gerilmesinden çok daha büyüktür. Yay sabiti kolonun ve zeminin yataklanma katsayısı olarak alınabilir.

Eğer temel tam olarak rijitse zeminde meydana gelecek oturma, kolon içerisinde meydana gelecek oturmaya eşit olacaktır. Buna göre eşitlik;

$$S_{UZ} = \frac{q_p}{k_p} = \frac{q_m}{k_m} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

q_p : Kolon Elemanı Üzerindeki Gerilme

k_p : Kolon Elemanı Yataklanma Katsayısı

şeklinde tanımlanır. k_p değeri genellikle arazide, o inşaatın yapıldığı bölgeyi temsil eden bir bölgede inşa edilen izole edilmiş kolon üzerinde gerçekleştirilen deney ile elde edilir.

Şekil 3.8'de düşey yöndeki kuvvetlerin toplamı;

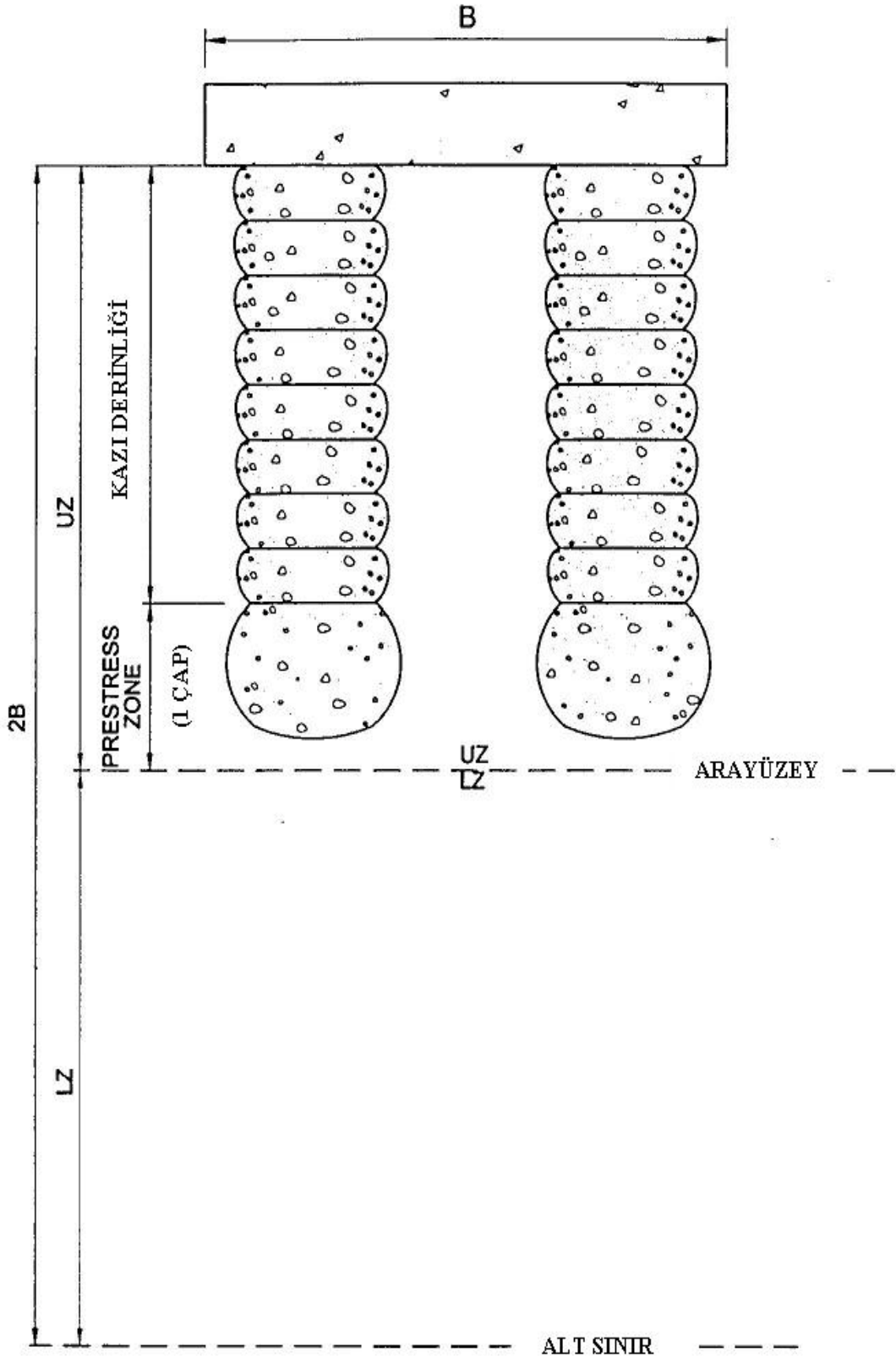
$$\sum F_v = 0 = q_0 \cdot A - q_p \cdot A_g - q_m \cdot A_m \quad (3.5)$$

eşitliğini verir. Burada;

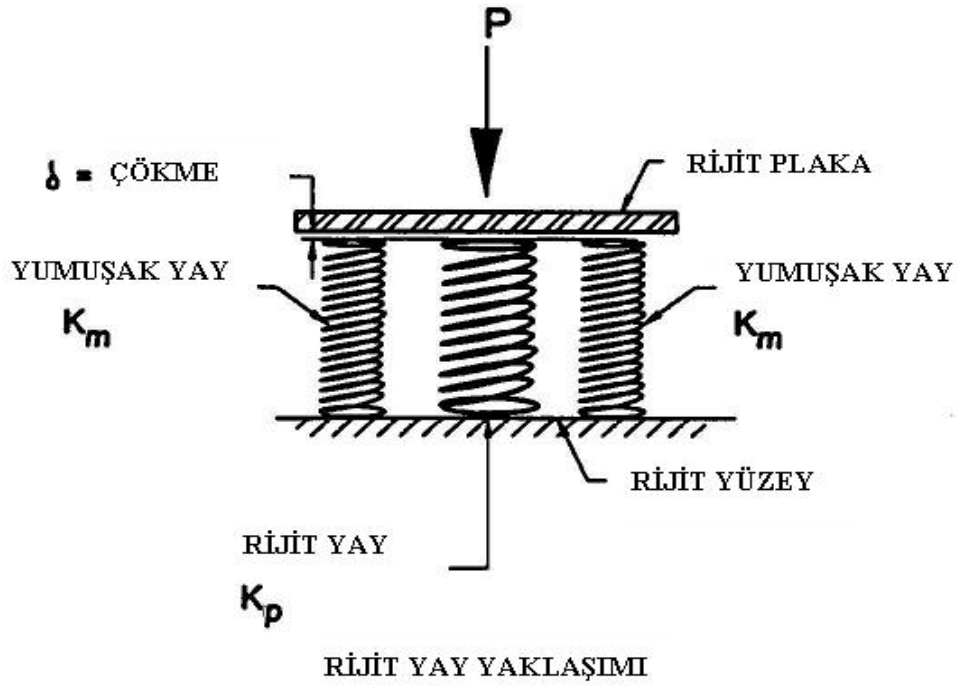
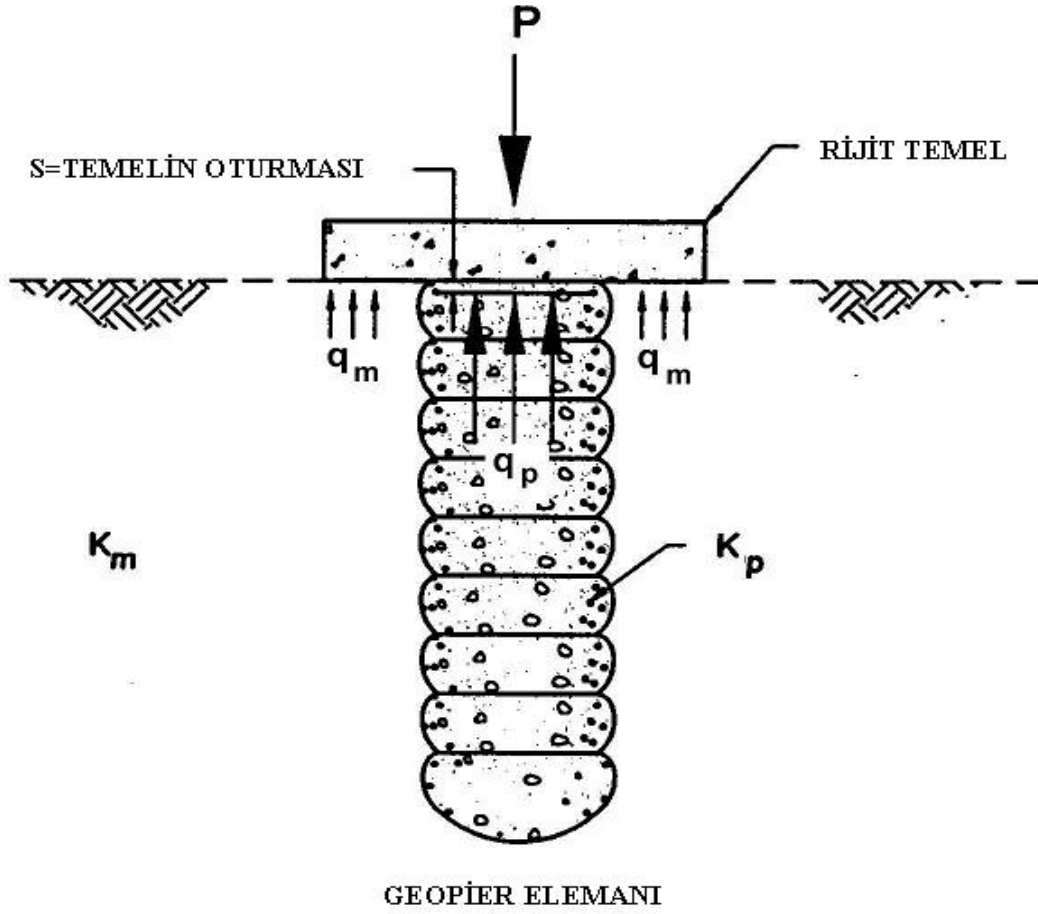
F_v : Düşey Kuvvet

q_0 : Ortalama Temel Tabanı Basıncı

A : Toplam Temel Alanı



Şekil 3.7 Temel altında yukarı ve aşağı bölge sınırları.



Şekil 3.8 Gerilme konsantrasyonu için yay yaklaşımı.

q_p : Kolon Üstüne Etkiyen Düşey Gerilme

A_g : Geopier Kolon Alanı

q_m : Zemine Etkiyen Düşey Gerilme

A_m : Zeminin Alanı

olarak tanımlanır. (3.5) eşitliğinin çözümünden kolon ve zemin üzerine gelen gerilme değerleri;

$$q_p = \frac{qn_s}{R_a(n_s - 1) + 1} = q_o \cdot \mu_p \quad (3.6)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(n_s - 1) + 1} = q_o \cdot \mu_m \quad (3.7)$$

$$R_s = \frac{q_p}{q_m} \quad (3.8)$$

$$R_a = \frac{A_p}{A} \quad (3.9)$$

$$R_s = n_s = \frac{k_p}{k_m} \quad (\text{Tamamen Rijit Temeller İçin}) \quad (3.10)$$

Rijit temeller için $R_s = n_s$ olduğundan kolon ve temeller üzerine gelen gerilme değerleri,

$$q_p = \frac{q \cdot R_s}{R_a(R_s - 1) + 1} = q_o \cdot \mu_p \quad (3.6a)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(R_s - 1) + 1} = q_o \cdot \mu_m \quad (3.7a)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada;

q : Temelden Gelen Ortalama Düşey Gerilme

R_s : Kolon-Zemin Gerilme Oranı

n_s : Gerilme Konsantrasyon Oranı

R_a : Alan Değişim Oranı

k_m : Zeminin Yataklanma Katsayısı

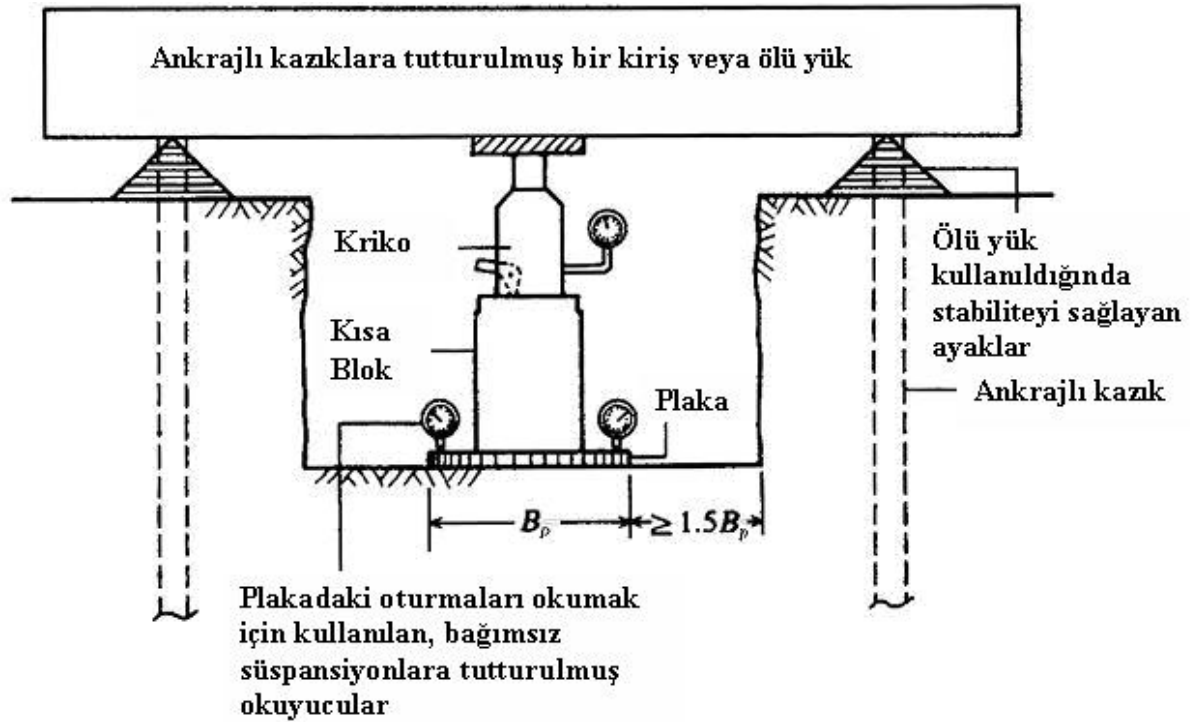
olarak tanımlanır. Tamamen rijit temeller için kolon-zemin gerilme oranı R_s , gerilme konsantrasyon oranı n_s 'e eşittir. Gerilme konsantrasyon oranının, yapılan ölçümlerde rijit temeller için 4 ila 45 arasında değiştiği bulunmuştur. Dolgular ve MSE duvarlar rijit yapılar olmadığı için gerilme konsantrasyon oranı rijit temeller için bulunan bu değerlerden daha düşük olmalı ve dikkatli seçilmelidir.

Bowles'un (1996) belirttiği gibi k_m ; zeminin elastisite modülü E_s , poisson oranı ν , temel genişliği B ve etki katsayıları I_s, I_F ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$k_m = \frac{1}{BE_s' I_s I_F} \quad (3.11)$$

$$E_s' = \frac{(1-\nu^2)}{E_s} \quad (3.12)$$

Şekil 3.9'da zeminin ve geopier kolonların yataklanma katsayılarını belirlemek için yararlanılan bir düzenek gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Plaka yükleme deneyi düzeni. (Bowles, 1996)

3.5.2 Alt Bölge Oturmaları

Alt bölgede meydana gelebilecek ani oturma aşağıdaki gibi elastik yöntemle;

$$S_{i,LZ} = \frac{qI_q H_{LZ}}{E_{LZ}} \quad (3.13)$$

hesaplanabilir. Kare veya dairesel temeller için;

$$H_{LZ} = 2B - H_{shaft} = 2B - H_0 - d_{shaft} \quad (3.14)$$

olarak tanımlanır. Burada;

I_q : Westergaard Etki Faktörü

H_{LZ} : Alt Bölge Kalınlığı

E_{LZ} : Alt Bölgenin Elastisite Modülü

B : Temel Genişliği

Ani oturmaların hesabı için varolan çeşitli yöntemlerden biri kullanılabilir. Yapılan arazi deneyleri sonucunda bu yaklaşımların her biri ile elde edilen değerler hakkındaki özet bilgiler için Lawton'un (2004) grup ve tekil geopier kolonları karşılaştırdığı çalışmasına bakılabilir. Elastik modül değerleri, kum ve killer için ampirik yaklaşımlar kullanılarak belirlenir. (Davie ve Lewis, 1988)

Alt bölgede meydana gelebilecek birincil konsolidasyon oturması ödometre deneyinden elde edilen değerlerle;

$$S_{c,LZ} = \frac{C_c H_{LZ}}{1 + e_0} \log\left(\frac{P'_0 + \delta P}{P'_0}\right) \quad (3.15)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilir. Burada;

C_c : Sıkışabilirlik veya Tekrar Sıkışabilirlik İndeksi

P'_0 : Başlangıç Düşey Efektif Gerilme

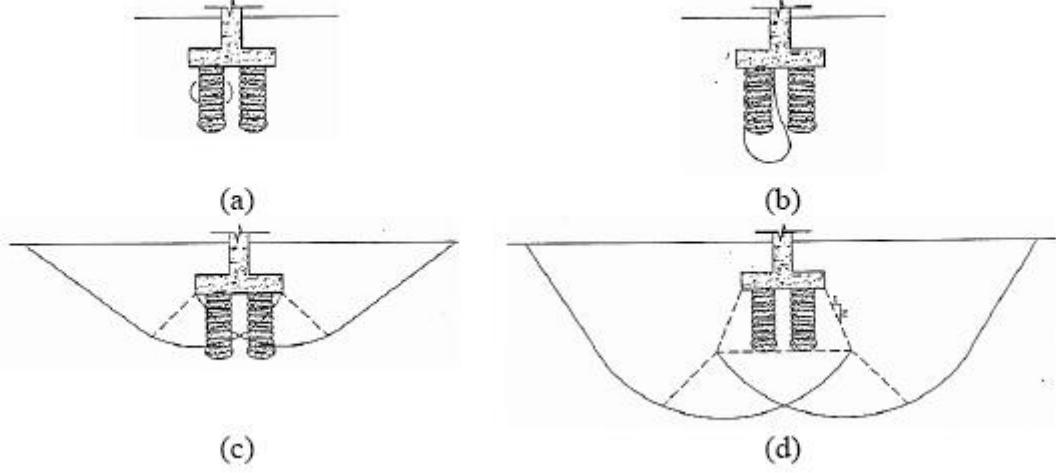
δP : Düşey Gerilmedeki Artış

e_0 : Başlangıç Boşluk Oranı

olarak tanımlanır.

3.6 Geopier (Rammed Aggregate) Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerde Temel Taşıma Gücü Hesabı

Geopier ile iyileştirilmiş zeminlere oturan temellerin taşıma gücü, muhtemel göçme durumlarından limit denge denklemleri kullanılarak elde edilen değerlerden minimum olanı alınarak bulunabilir.

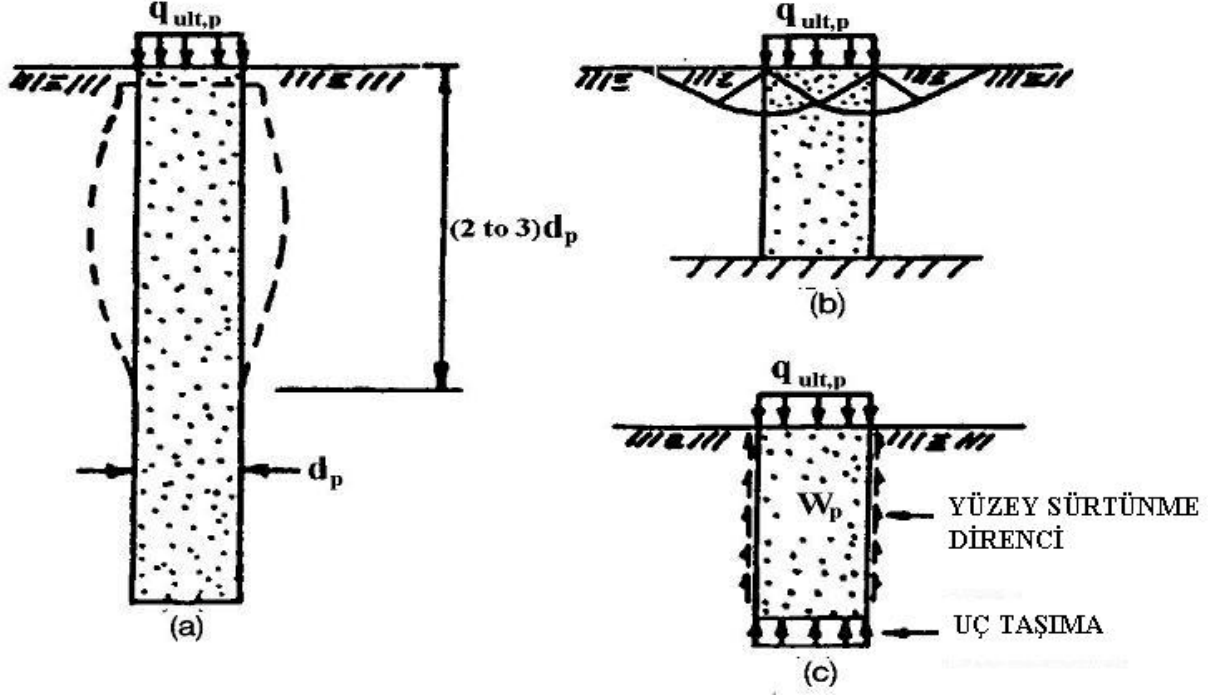


Şekil 3.10 Rammed aggregate kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlere oturan temellerde göçme mekanizmaları; (a) Tek bir kolonun kabarması, (b) Tekil kolon altında göçme, (c) Kolon ile iyileştirilmiş bölgede göçme, (d) Kolon ile iyileştirilmiş bölge altında göçme. (Fox ve Cowell, 1998)

Geopier ile güçlendirilmiş zeminlerde taşıma kapasitesi analizleri karışıktır. Bu nedenle grup kolon analizi yapmadan önce tekil bir kolonun davranışını incelemek gereklidir.

3.6.1 Tekil Kolonun Taşıma Kapasitesi

Lawton (2001) homojen zeminlerde tekil bir kolonun göçme mekanizması davranışını incelemiştir. Şekil 3.11'de görüleceği üzere tekil bir kolonda üç tip göçme mekanizması mevcuttur.



Şekil 3.11 Tekil kolonlarda göçme durumları.

Genişleme (Kabarma) göçmesi (Şekil 3.11a), göreceli olarak yumuşak kohezyonlu zeminlerde meydana gelebilir. Kolon kohezyonsuz zeminden oluşturulmuştur ve davranışları zemin içerisindeki kuşatma etkisine bağlıdır. Genişleme, kolon içerisindeki yatay gerilme zemin içerisindeki yanal gerilmeden çok daha büyükse meydana gelir. Genişleme, sınırları kolon tepesi ile kolon çapının 2 veya 3 katı aşağısı olan bir bölgede meydana gelebilir, eğer zemin tabakalı ise sadece zeminin çok zayıf olduğu bir yerde genişleyebilir.

Yerel veya genel göçme (Şekil 3.11b) kolon ve zeminden geçerek meydana gelebilir. Bu olay;

- Eğer çok kısa bir kolon ($H_p < (2 \text{ veya } 3)d_p$) sağlam tabakaya uzatılmışsa
- Kolon çevresini saran zeminden çok daha kuvvetli değilse mümkün olabilir.

Zımbalanma göçmesi veya kolon altında göçme (Şekil 3.11c) uygulanan yük kolon boyunca oluşacak yüzey sürtünmesinden ve uç taşıma dayanımından veya ikisinin birleşiminden büyükse meydana gelir. Bu tür göçme sağlam zemine oturmayan çok kısa kolonlarda yaygın olarak görülür.

3.6.1.1 Tekil Kolon Elemanında Genişleme Göçmesi

Kolon yeterince uzunsa, kolonun tepesine etkiyen gerilme kolon içerisindeki agregada,

gerilme uç kısma transfer edilmeden önce kesme kuvvetinin tamamen mobilize olmasına sebep olabilir. Kolon elemanı içerisinde gelişen kesilme yüzeyi, kolon elemanın dışa doğru taşarak göçmesine neden olur. (Şekil 3.10a). Genişleme göz önüne alındığında, kolon üstüne etkiyebilecek nihai gerilme $q_{ult,g}$, çevreleyen sınır radyal gerilme ve kolon elemanına ait Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır ve Hughes ve Withers'a (1974) göre;

$$q_{ult,g} = \sigma_{r,lim} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_g}{2} \right) \quad (3.16)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

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

ϕ_g : Kolon Materyali İçsel Sürtünme Açısı

olarak tanımlanır.

Bu eşitlik aşağıdaki kabullere dayanmaktadır:

- Kolon malzemesinde kohezyon yoktur.
- Kolon ve zemin ara yüzeyinde gelişecek kesme kuvvetleri ihmal edilir.
- Asal gerilmeler düşey ve yatay etkiyen gerilmelerdir.

Çevreleyen sınır radyal gerilme, göz önüne alınan derinlikte zemindeki yatay gerilmeler ile kolondan zemine etkiyebilecek yanal gerilmelere zeminin karşı koyabilme kapasitesinin toplamıdır. Hughes ve Withers (1974) kolonda meydana gelen genişlemeyi, pressiometre deneyine benzer olarak, kil zemin içerisinde silindirik bir boşluğun genişlemesi şeklinde idealize etmişlerdir. Yapılan birçok pressiometre deneyi göstermiştir ki zemin limit bir genişleme değerine kadar genişlemeye karşı direnmektedir. Zeminin elasto-plastik malzeme olarak idealize edilmesi ile Gibson ve Anderson (1961) radyal gerilmenin sınır değerinin (2.35) eşitliği ile hesaplanabileceğini söylemişlerdir.

Toplam radyal gerilme σ_{ro} , efektif düşey gerilme ve boşluk suyu basıncından;

$$\sigma_{ro} = \sigma'_{vo} K_p + u_o \quad (3.17)$$

Formülü ile hesaplanabilir. Burada;

K_p : Zeminin Pasif Toprak Basıncı Katsayısı

σ'_{vo} : Düşey Efektif Gerilme

u_o : Boşluk Suyu Basıncı

olarak tanımlanır. Eğer zemin hakkında yetersiz bilgi varsa, E_u ve s_u 'nun birbirine oranı, tutucu olarak 200 ve poisson oranı da 0.5 olarak alınabilir. Hughes ve Withers (1974) yaptıkları birçok arazi çalışmasının sonucunda $\sigma_{r,lim}$ denkleminin;

$$\sigma_{r,lim} = \sigma'_{ro} + 4s_u + u \quad (3.18)$$

şeklinde basitleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Formüldeki artık boşluk suyu basıncı (u), kolon içerisine doğru drenaj varsa sıfır kabul edilebilir.

Eğer temel altındaki zemin homojen ise genişleme derinliği z_b , kolonun içsel sürtünme açısı ϕ_g ve temel derinliği D_f kullanılarak;

$$z_b = D_f + \frac{1}{2} d_{\text{shaft}} \operatorname{tg}\left(45 + \frac{\phi_g}{2}\right) \quad (3.19)$$

formülünden hesaplanabilir.

Temelden kaynaklanan düşey sınır gerilmeyi içermediğinden ve geopier inşa edilirken oluşan ek normal ve kayma gerilmeleri Rankine toprak basıncı durumunda göz önüne alınmadığından, burada hesaplanan değer tutucu bir değer olarak göz önüne alınabilir.(Wissmann, 1999).

3.6.1.2 Tekil Kolon Elemanı Ucunda Meydana Gelebilecek Göçme

Tekil kolon elemanının uç kısmında meydana gelebilecek göçmede, kolon üstüne etkiyebilecek nihai gerilme, çevre sürtünmesi ve uç taşıma kapasitesinin birleşimidir. Bir kolonda düşey kuvvetlerin toplamı Şekil 3.11c'de görüleceği üzere;

$$\sum F_v = 0 = q_{ult,p} \cdot A_p + W_g - q_{ult,bot,g} \cdot A_g - \sum_{i=1} f_{si} \cdot p_i \cdot \Delta z_i \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

W_g : Geopier Ağırlığı

f_{si} : i. Tabakada Kolon Çevre Yüzeyindeki Sürtünme

p_i : i. Tabakada Kolonun Çevre Uzunluğu

Δz_i : i. Tabakada Kolon Uzunluğu

$q_{ult,bot,g}$: Geopier Uç Taşıma Kapasitesi

A_g : Geopier Kesit Alanı

n : Tabaka Sayısı

olarak tanımlanır. Wissmann (1999) (3.20) eşitliğinde kolon ağırlığını ihmal etmiş ve A_p deki artışı hesaba katarak denklemi;

$$q_{ult,g} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{si} \cdot A_{shaft}}{A_g} \right) + q_{ult,bot,g} \quad (3.21)$$

şeklinde ifade etmiştir. Burada;

A_{shaft} : Kolon İnşası Sırasında Meydana Gelen Genişlemeden Sonraki Kolon Yüzey Alanı

olarak tanımlanır ve genişleyen kolon çapı $d_{shaft} = d_p + 76.2$ mm (3 in.) formülü kullanılarak hesaplanabilir.

Çevre sürtünmesi her bir tabakadaki ortalama yatay gerilmeye ve malzemenin sürtünme karakteristiğine bağlıdır. Buna göre çevre sürtünmesi;

$$f_{si} = \left(d_f + \frac{\Delta z_i}{2} \right) \gamma_m K_p tg(\phi_m) \quad (3.22)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada;

d_f : i. Tabakanın Tepe Noktasının Derinliği

γ_m : Zeminin Birim Hacim Ağırlığı

ϕ_m : Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

K_p : Kolon Malzemesi İçin Rankine Pasif Toprak Basıncı Katsayısı

olarak tanımlanır. Bu eşitlikte kolonun yüklenmesi sırasında gelişecek olan kayma gerilmeleri ihmal edilmektedir. (Lawton, 1994).

Özet olarak, eğer inşa edilen kolon kısaysa, kolonun üst kısmına gelen gerilme kolonun uç kısmına aktarılabilir. Uç kısmında oluşacak bu gerilme göçme meydana gelmesine sebep olabilir. (Şekil 3.10b). Bu durumda nihai taşıma kapasitesi;

$$q_{ult,g} = \frac{1}{A_g} (f_s A_{shaft} + q_{tip,g} A_g) = \frac{4}{d_{shaft}^2} f_s d' H_{shaft} + q_{tip,g} \quad (3.23)$$

Drenajsız durum için;

$$f_s = s_u \quad (3.24)$$

$$q_{tip,g} = s_u N_c \quad (3.25)$$

Drenajlı durum için;

$$f_s = \sigma'_{v,ave} \cdot \text{tg} \phi_s \cdot K_p = \left(D_f + \frac{H_{shaft}}{2} \right) \cdot \gamma \cdot \text{tg} \phi_s \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi_s}{2} \right) \quad (3.26)$$

$$q_{tip,g} = c' \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot d_{shaft} \cdot \gamma \cdot N_\gamma + \sigma'_v \cdot N_q \quad (3.27)$$

olacaktır. Burada,

$q_{tip,g}$: Kolon Ucu Birim Taşıma Gücü

f_s : Kolon Çevre Yüzeyi Boyunca Birim Taşıma Gücü

d' : Kolon Elemanı Efektif Çapı ve Yaklaşık Olarak d_{shaft} 'in %110'udur.

N_c, N_q, N_γ : Boyutsuz Taşıma Gücü Faktörleri

$\sigma'_{v,ave}$: Kolona Etkiyen Ortalama Düşey Efektif Gerilme

ϕ_s : Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

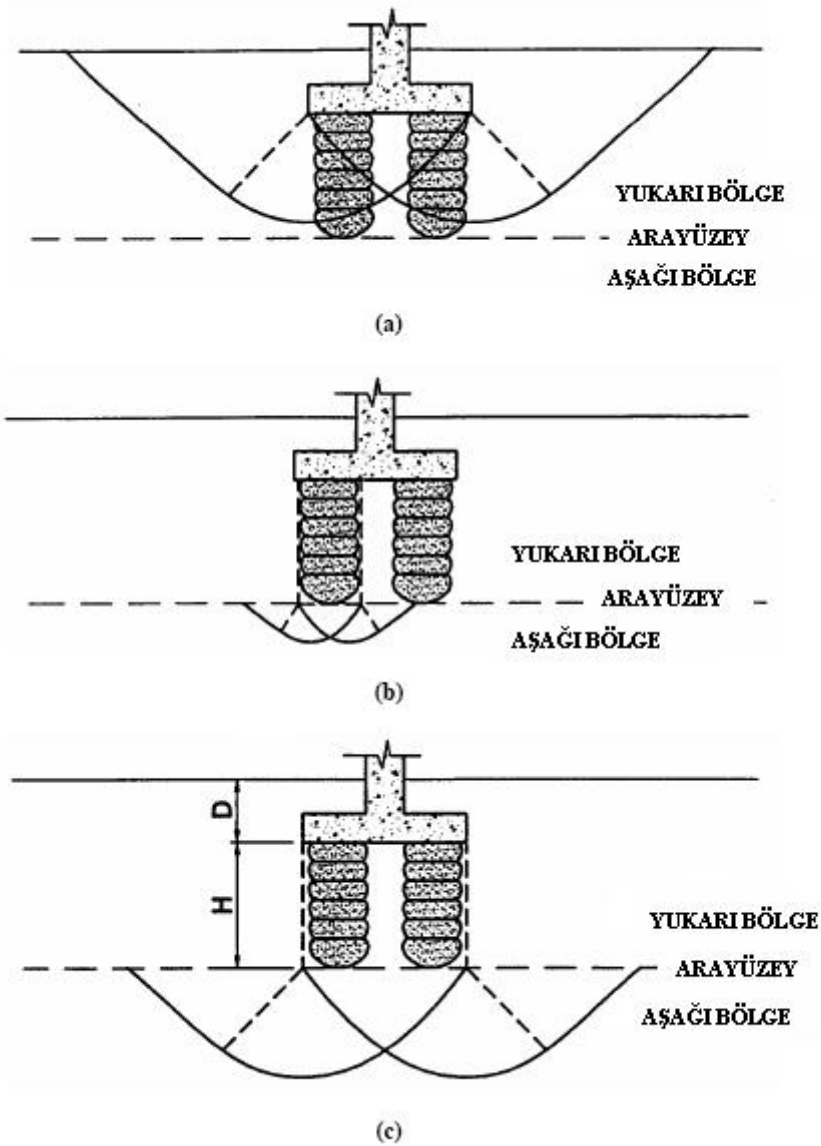
γ : Zeminin Birim Hacim Ağırlığı

σ'_v : Kolon Uç Kısımındaki Düşey Efektif Gerilme

3.6.2 Kolon Gruplarının Nihai Taşıma Kapasitesi

Şekil 3.12'de kolon gruplarında mümkün olabilecek göçme mekanizmaları gösterilmiştir.

Kolon gruplarında meydana gelebilecek göçme tekil kolonlardaki ile benzerdir. Genişleme, zemin – kolon bölgesinde yerel göçme, tekil kolon altında zımbalanma göçmesi ve kolon-zemin bölgesi altında göçme durumları taş kolon grupları için incelenecektir.



Şekil 3.12 Kolon gruplarında göçme durumları.

3.6.2.1 Kolon Gruplarında Genişleme Göçmesi

Grup içerisinde genişleme kolonlar arasındaki mesafeye, temelin sınırlayıcı etkisine ve zemin cinsine bağlı olarak meydana gelebilir. Hughes ve Withers (1974) eğer kolonlar arasındaki mesafe $2.5d_p$ 'den çok büyükse (d_p : kolonlar arası merkezden merkeze uzaklık) taş kolonların bağımsız hareket edeceğini söylemişlerdir. Bir taş kolon grubunda temelin nihai taşıma kapasitesi genişleme göçmesine bağlı olarak (3.6) ve (3.16) eşitlikleri kullanılarak;

$$q_{ult} = \frac{q_{ult,g}}{\mu_g} \quad (3.28)$$

denkleminde hesaplanabilir.

3.6.2.2 Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Kayma Göçmesi

Bu durumda Şekil 3.12a'da görüleceği üzere göçme düzleminin kolon ve zeminden oluşan bölge içerisinden geçtiği kabul edilir. Kabul edilen göçme düzlemi boyunca kesme dayanımı, zeminin kesmeye karşı sürtünme direnci τ_s ve kolon elemanlarınca sağlanan göçmeye karşı sürtünme direnci τ_g değerlerine bağlıdır. Kolonlar ile iyileştirilmiş zemin bölgesinde meydana gelebilecek yerel göçme, kompozit zemin parametreleri ve geleneksel Terzaghi taşıma gücü eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Kompozit zemin parametreleri Priebe'a (1978) göre;

$$\phi_{comp} = tg^{-1}[n_s \cdot R_a \cdot tg\phi_g + (1 - R_a n_s) \cdot tg\phi_s] \quad (3.29a)$$

$$c_{comp} = (1 - R_a n_s) c_m \quad (3.30a)$$

formülleri kullanılarak, Wiessmann'a (1999) göre ise;

$$\phi_{comp} = tg^{-1}[\mu'_g \cdot R'_a \cdot tg\phi_g + \mu'_m \cdot (1 - R'_a) \cdot tg\phi_m] \quad (3.29b)$$

$$c_{comp} = c_c \cdot R'_a + c_m \cdot (1 - R'_a) \quad (3.30b)$$

$$\gamma_{comp} = \gamma_c R'_a + \gamma_m \cdot (1 - R'_a) \quad (3.31)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada;

$$R'_a : \text{İndirgeme Faktörü } 0.4 \text{ ile Çarpılarak Hesaplanan Alan Değişim Oranı} = (0.4 R_a)$$

$$R'_s : \text{İndirgenmiş Gerilme Konsantrasyon Oranı} (n_s) = (2.8)$$

$$\mu'_g : (3.6) \text{ Eşitliğinden } R'_a \text{ ve } R'_s \text{ Kullanılarak Elde Edilen Değer}$$

$$\mu'_m : (3.7) \text{ Eşitliğinde } R'_a \text{ ve } R'_s \text{ Kullanılarak Elde Edilen Değer}$$

olarak tanımlanır. R_s değerindeki azaltma, gerilmedeki ve göçme düzlemi yönündeki değişimi hesaplamak içindir. Wiessmann (1999) tarafından n_s değerinin 2.8 alınması tavsiye edilmektedir. Bir kez kompozit kesme kuvveti değerleri belirlendikten sonra kolon ile desteklenen bölgenin taşıma gücü kapasitesi taşıma gücü denklemi ve (3.28) eşitliği

kullanılarak hesaplanabilir.

3.6.2.3 Grup İçindeki Kolonun Zımbalanma Göçmesi

Bir kolon grubu içerisindeki tekil bir kolon elemanının zımbalanma göçmesi ya da kesilmesi tekil kolonların analizi ile aynıdır. Tekil kolonun taşıma kapasitesi (3.21) eşitliği kullanılarak belirlenir. Daha sonra (3.28) eşitliği kullanılarak $q_{ult,g}$ 'den q_{ult} hesaplanır.

3.6.2.4 Kolon ve Zeminden Oluşan Bölge Altında Göçme Meydana Gelmesi

Şekil 3.12d'de görüleceği üzere, genel taşıma gücü kapasitesi göçme durumu, kolon ve zeminden oluşan bölge altında meydana gelebilir. Bu tür bir problem için geleneksel çözümlerden elde edilen sonucun bir önceki denklemden elde edilen sonuçla karşılaştırılarak bir izin verilebilir taşıma gücü basıncı belirlenmesi yoluna gidilebilir ve bu bölgede bir göçme meydana gelmesi engellenebilir. Temel altındaki gerilmenin 2:1 oranında arttığı kabulüyle kolon ile iyileştirilmiş bölge altındaki gerilme;

$$L' = L + H_{UZ} \quad (3.32)$$

$$B' = B + H_{UZ} \quad (3.33)$$

$$q_{ult} = \frac{q_{bottom} (B + H_{UZ})(L + H_{UZ})}{BL} \quad (3.34)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada;

H_{UZ} : Kolon Boyuna Bir Kolon Çapı Eklenerek Hesaplanan Uzunluk

q_{bottom} : Geopier Uygulanmış Tabakanın Alt Sınırında Oluşan Gerilme

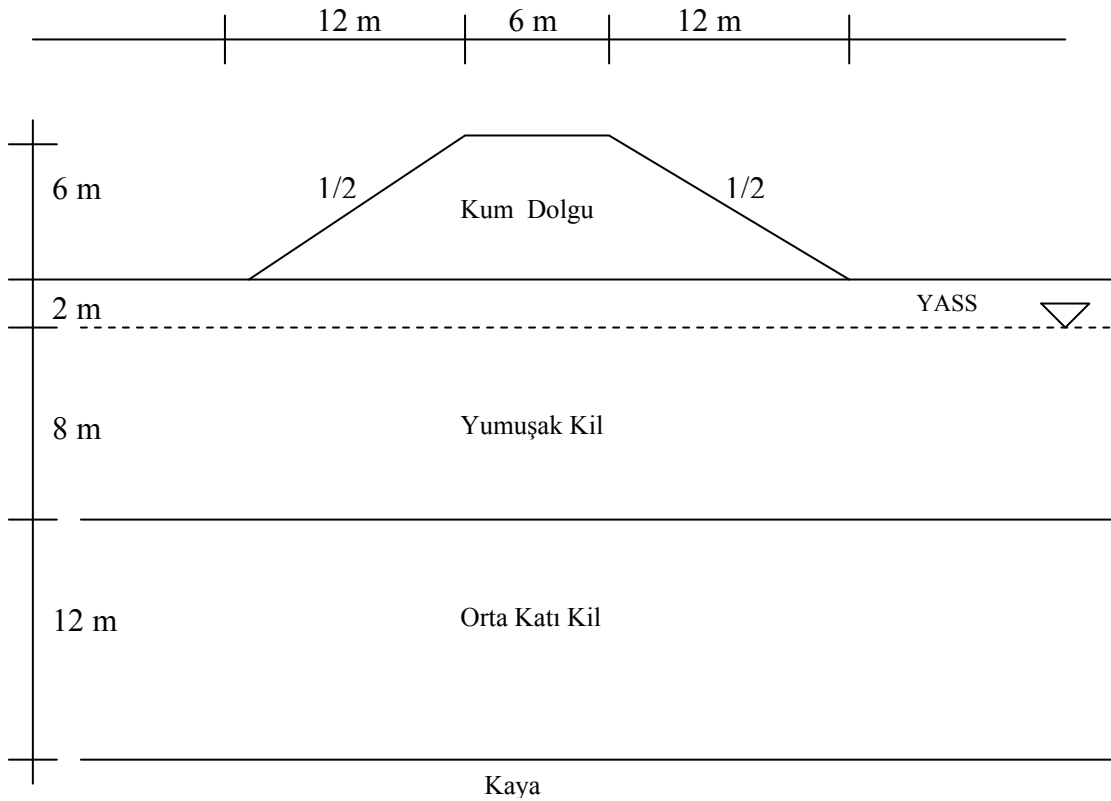
olarak tanımlanır.

4. TAŞ KOLON VEYA GEOPIER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE OTURMA VE TAŞIMA GÜCÜ HESABI

4.1 Genel

Aşağıda üzerine dolgu yapılacak killi zemin tabakalarından oluşan bir araziye ait zemin kesiti ve zemin parametreleri gösterilmiştir. Bu bölümde literatürdeki hesap yöntemleri kullanılarak taş kolon veya geopierlerle iyileştirilen zeminlerde taşıma gücü ve oturma hesaplarına ait örneklere yer verilmiştir. İncelenen örnekte zemin, aşağıda verilen parametrelerden anlaşılacağı üzere çok yumuşak kohezyonlu bir zemin olup taşıma gücü oldukça düşüktür. Zeminin üzerine 6 m yükseklikte ve 10x30 m² boyutunda bir toprak dolgu yerleştirilecektir. Bu zeminde önce iyileştirme yapılmadan oturma ve taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra taş kolon ve geopier kolonlar ile zeminin iyileştirilmesi durumu için hesaplamalar yapılmıştır.

4.2 Zemin Kesiti ve Özellikleri



Şekil 4.1 Zemin kesiti.

Çizelge 4.1 Zemin özellikleri.

Zemin Özellikleri			
	Yumuşak Kil	Orta Katı Kil	Kum Dolgu
Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_k (kN/m ³)	16	17	16
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_d (kN/m ³)	19	20	20
Permeabilite, $k_x = k_y$ (m/gün)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10
Elastisite Modülü, E' (kN/m ²)	5000 3500	10000	20000
Poisson Oranı, ν'	0.33	0.33	0.25
Efektif Kohezyon, c' (kN/m ²)	2	10	1
Efektif İçsel Sürtünme Açısı, ϕ' (°)	24	28	38
Drenajsız Kesme Dayanımı, s_u (kN/m ²)	30	60	-
Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı, K_0	0.59	0.53	0.384
Yataklanma Katsayısı, k_m (MN/m ³)	4.2	-	-
Sıkışma İndisi, C_c	0.11	0.23	-
Boşluk Oranı, e_0	1	1	0.33

4.3 İyileştirme Yapılmamış Zeminde Oturma ve Taşıma Gücü Hesabı

Zeminde meydana gelebilecek oturmaya belirleyebilmek için zemin için aldığımız Elastisite modülünü tek eksenli sıkışma modülüne dönüştürmemiz gerekmektedir. Yanal yönde şekil değiştirmenin sınırlandığı durumlarda sıkışma modülü;

$$\bar{D} = E_{\text{odo}} = \frac{(1 - \nu')E'}{(1 - 2\nu')(1 + \nu')} \quad (4.1)$$

formülü ile bulunabilir. Burada;

E_{odo} : Ödometre Modülü

E' : Kil Zemin İçin Elastisite Modülü

ν' : Poisson Oranı

olarak tanımlanmıştır.

Ödometre modülü bulunduktan sonra aşağıdaki formül yardımıyla hacimsel sıkışma katsayısı hesaplanır.

$$m_v = \frac{1}{E_{\text{odo}}} \quad (4.2)$$

Hacimsel sıkışma katsayısı kullanılarak zeminde meydana gelebilecek oturmalar aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$\delta = m_v H \Delta \sigma_z \quad (4.3)$$

Burada;

δ : Oturma Miktarı

m_v : Hacimsel Sıkışma Katsayısı

$\Delta \sigma_z$: Düşey Gerilme Artışı

olarak tanımlanabilir.

4.3.1 E = 5000 Olan Yumuşak Kil Zeminde Meydana Gelecek Nihai Oturma

Yumuşak kil için ödometre modülü;

$$E_{\text{odo}} = \frac{(1 - 0.33)(5000)}{(1 - 0.66)(1 + 0.33)} = 7408.23 \text{ kN/m}^2$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerden;

$$m_v = \frac{1}{7408.23} = 1.35 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$$

elde edilir.

Dolgu merkezi altında meydana gelecek düşey gerilme artışlarını bulmak için Bousinesq çözümünün integrali alınarak elde edilen ve kenarları eğimli çok uzun bir toprak dolgu altında meydana gelecek gerilme dağılımını veren tesir katsayılarının değerlerini gösteren grafikten yararlanılmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelen düşey gerilme artışları.

Derinlik z (m)	B_2/z	B_1/z	Tesir Katsayısı (I_p)	Dolgunun Üniform Yüğü σ (kN/m ²)	Gerilme Artışı $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)
2.5	4.8	2.4	0.50	96	96.00
5.0	2.4	1.2	0.49	96	94.08
7.5	1.6	0.8	0.48	96	92.16
10.0	1.2	0.6	0.46	96	88.32

Elde edilen bu değerlerle dolgu merkezi altında meydana gelecek oturmalar hesaplanabilir. Buna göre dolgu merkezi altında meydana gelecek nihai oturma Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde meydana gelecek oturmalar.

Derinlik, z (m)	Gerilme Artışı, $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)	Sıkışma Modülü, m_v (m ² /kN)	Tabaka Kalınlığı, H (m)	Oturma Miktarı, $S = m_v H \Delta\sigma_v$ (m)
2.5	96.00	1.35×10^{-4}	2.5	0.0324
5.0	94.08	1.35×10^{-4}	2.5	0.0318
7.5	92.16	1.35×10^{-4}	2.5	0.0311
10.0	88.32	1.35×10^{-4}	2.5	0.0298
			Toplam	0.125

Dolgu merkezi altında meydana gelecek nihai toplam oturma;

$$\delta = 0.125 = 0.13 \text{ m} = 13 \text{ cm}$$

olarak bulunmuştur.

4.3.2 E = 3500 Olan Yumuşak Kil Zeminde Meydana Gelecek Nihai Oturma

Yumuşak kil için ödometre modülü;

$$E_{\text{odo}} = \frac{(1-0.33) \times 3500}{(1-0.66)(1+0.33)} = 5186 \text{ kN/m}^2$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerden;

$$m_v = \frac{1}{5186} = 1.93 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$$

elde edilir.

Dolgu merkezi altında meydana gelecek düşey gerilme artışlarını bulmak için, Bousinesq çözümünün integrali alınarak elde edilen ve kenarları eğimli çok uzun bir toprak dolgu altında meydana gelecek gerilme dağılımını veren tesir katsayılarının değerlerini gösteren grafikten yararlanılmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelecek düşey gerilme artışları.

Derinlik z (m)	B_2/z	B_1/z	Tesir Katsayısı (I_p)	Dolgunun Üniform Yüğü σ (kN/m ²)	Gerilme Artışı $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)
2.5	4.8	2.4	0.50	96	96.00
5.0	2.4	1.2	0.49	96	94.08
7.5	1.6	0.8	0.48	96	92.16
10.0	1.2	0.6	0.46	96	88.32

Elde edilen bu değerlerle dolgu merkezi altında meydana gelecek oturmalar hesaplanabilir. Buna göre dolgu merkezi altında meydana gelecek nihai oturma Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde meydana gelecek oturmalar.

Derinlik, z (m)	Gerilme Artışı, $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)	Sıkışma Modülü, m_v (m ² /kN)	Tabaka Kalınlığı, H (m)	Oturma Miktarı, $S = m_v H \Delta\sigma_v$ (m)
2.5	96.00	1.93×10^{-4}	2.5	0.0463
5.0	94.08	1.93×10^{-4}	2.5	0.0454
7.5	92.16	1.93×10^{-4}	2.5	0.0445
10.0	88.32	1.93×10^{-4}	2.5	0.0426
			Toplam	0.179

Dolgu merkezi altında meydana gelecek nihai toplam oturma;

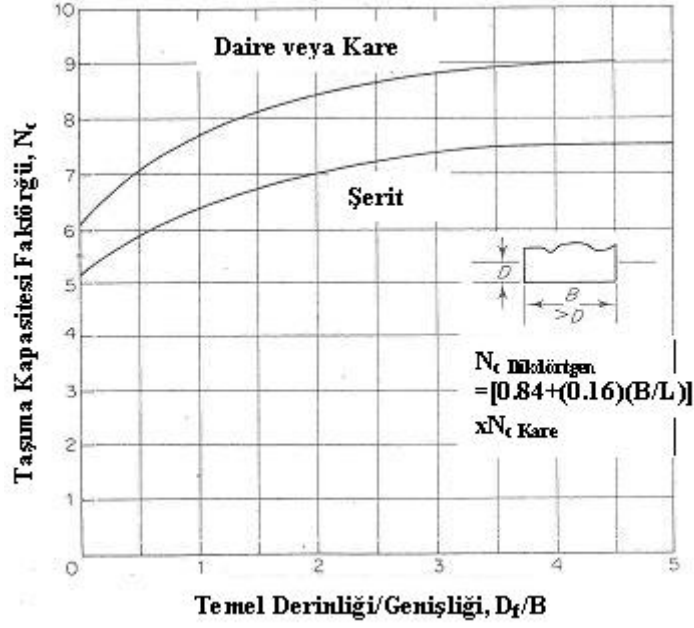
$$\delta = 0.18 \text{ m} = 18 \text{ cm}$$

olarak bulunmuştur.

4.3.3 İyileştirilmemiş Yumuşak Kil Zeminde Taşıma Gücü

Terzaghi’nin yüzeysel temeller için kullandığı eşitliği kullanarak zeminin taşıma gücünü hesaplayabiliriz. Burada kil suya doymun olduğu için taşıma gücü hesabında drenajsız kohezyon $c_u = 30$ kPa değeri kullanılmıştır. Ayrıca drenajsız kohezyonlu zeminler için taşıma

gücü faktörü N_c değeri Şekil 4.2 kullanılarak seçilmiştir.



Şekil 4.2 Kohezyonlu zeminlerde ($\Phi=0$) taşıma kapasitesi faktörü N_c

Şekil 4.2'den $\phi_c = 0$ ve kare temel için, $N_c = 6.2$ olarak bulunur. Dikdörtgen bir temel için bu değer;

$$N_{c,dikdörtgen} = \left(0.84 + 0.16 \frac{B}{L}\right) N_{c,kare} \quad (4.4)$$

$$N_{c,dikdörtgen} = \left(0.84 + 0.16 \frac{10}{30}\right) (6.2)$$

$$N_{c,dikdörtgen} = 5.54$$

olarak düzeltilir. Dolgu, zemin yüzeyine uygulandığından $D_f = 0$, $\Phi=0$ için $N_\gamma = 0$ olacaktır. Buna göre genel taşıma gücü denklemi,

$$q_{ult} = cN_c \quad (4.5)$$

şekline dönüşür. Buradan zeminin nihai taşıma gücü;

$$q_{ult} = cN_c = (30)(5.54) = 166.2 \text{ kN/m}^2$$

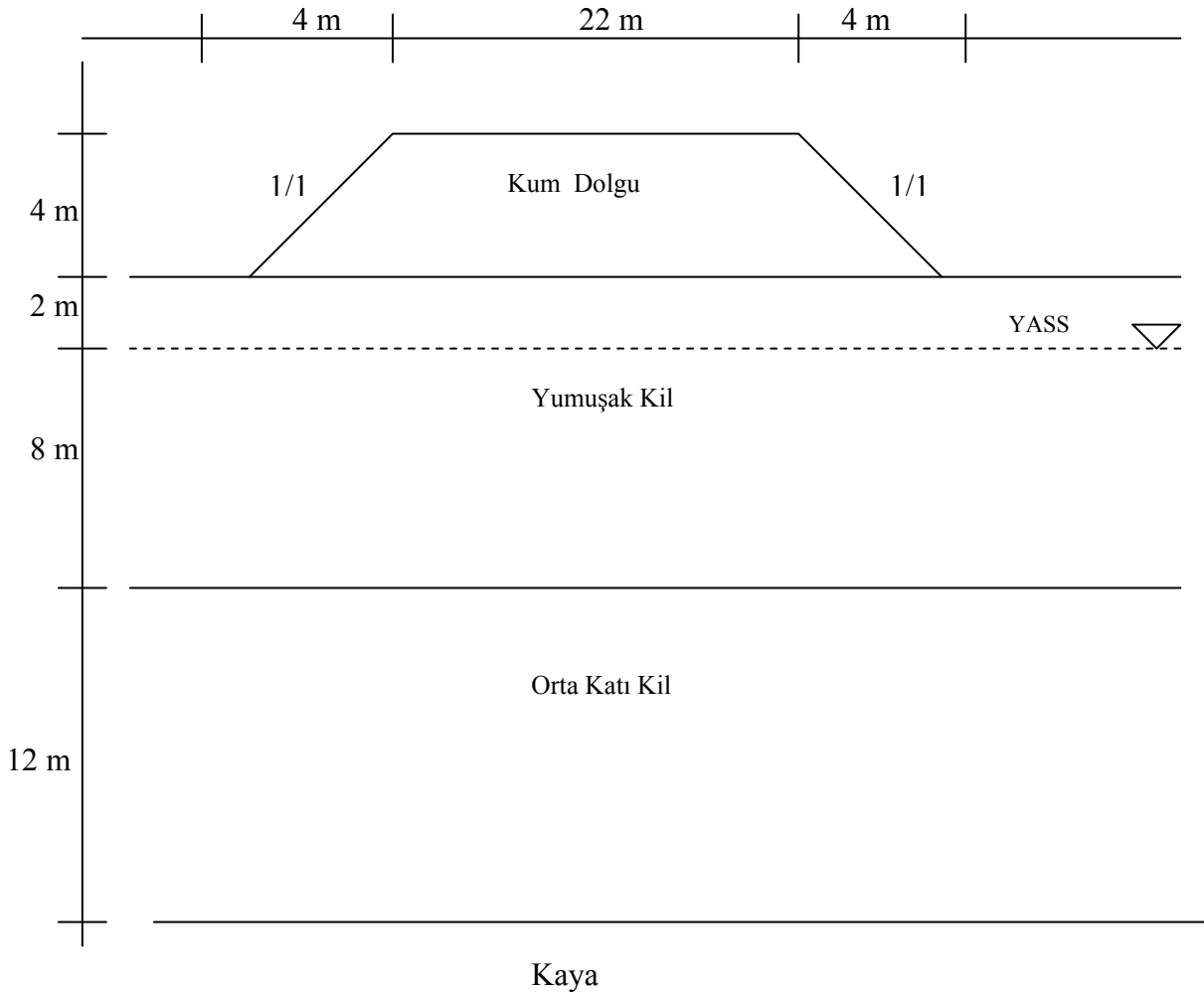
olarak hesaplanır. Güvenli taşıma gücü ise;

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{FS} = \frac{166.2}{2} = 83.1 \text{ kPa}$$

olarak elde edilmiştir. Bu durumda temel zemininde göçmeye yol açmayacak güvenli dolgu yüksekliği;

$$H_{maks} = \frac{q_{all}}{\gamma_{dolgu}} = \frac{83.1}{16} \cong 5.19 \text{ m} < 6 \text{ m}$$

olduğundan dolgu yüksekliği 4.0 m olarak değiştirilmiştir. Dolgunun bu yükseklik değerine göre hesaplar tekrarlanırsa;



Şekil 4.3 Zemin ve dolgu kesiti.

$$\sigma_{dolgu} = \gamma_{dolgu} H_{dolgu} = (16)(4) = 64 \text{ kPa}$$

Çizelge 4.6 Dolgu merkezi altında yumuşak kilde meydana gelen düşey gerilme artışları.

Derinlik z (m)	B_2/z	B_1/z	Tesir Katsayısı (I_p)	Dolgunun Üniform Yüğü σ_v (kN/m ²)	Gerilme Artışı $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)
1.25	3.20	8.80	0.500	64	64.00
3.75	1.07	2.93	0.490	64	62.72
6.25	0.64	1.76	0.484	64	61.95
8.75	0.46	1.26	0.470	64	60.16
11.25	0.36	0.98	0.430	64	55.04
13.75	0.29	0.80	0.390	64	49.92
16.25	0.25	0.68	0.375	64	48.00
18.75	0.21	0.59	0.342	64	43.78
21.00	0.19	0.52	0.310	64	39.68

Çizelge 4.7 Dolgu merkezi altında yumuşak katı kilde (E=3500 kPa) meydana gelecek nihai oturmalar.

Derinlik, z (m)	Gerilme Artışı, $\Delta\sigma = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)	Sıkışma Modülü, m_v (m ² /kN)	Tabaka Kalınlığı, H (m)	Oturma Miktarı, $S = m_v H \Delta\sigma_v$ (m)
1.25	64.00	1.93×10^{-4}	2.5	0.0309
3.75	62.72	1.93×10^{-4}	2.5	0.0303
6.25	61.95	1.93×10^{-4}	2.5	0.0299
8.75	60.16	1.93×10^{-4}	2.5	0.0290
11.25	55.04	6.75×10^{-5}	2.5	0.0093
13.75	49.92	6.75×10^{-5}	2.5	0.0084
16.25	48.00	6.75×10^{-5}	2.5	0.0081
18.75	43.78	6.75×10^{-5}	2.5	0.0074
21.00	39.68	6.75×10^{-5}	2.0	0.0054
Toplam				0.159

Dolgu merkezi altında yumuşak kil tabakasının konsolidasyonundan kaynaklanacak toplam nihai oturma;

$$\delta = 0.159 \text{ m} \cong 16 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Suya doygun killerde meydana gelebilecek ani oturma için Janbu, Bjerrum, Kjaernsi (1956) üniform olarak yüklenmiş bükülebilir bir temelde meydana gelecek ortalama oturma için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir. (Yıldırım, 2004).

$$\delta_e = A_1 A_2 \frac{qB}{E_u} \quad (4.6)$$

A_1 : Temel Şekli ve Sıkışan Tabakanın Kalınlığını Göz Önüne Alan Bir Faktör

A_2 : Temel Derinliği Etkisini Göz Önüne Alan Faktör

E_u : Kil İçin Drenajsız Elastisite Modülü

q : Temel Yükü

olarak tanımlanır. A_1 ve A_2 değerleri Şekil 4.3a'dan alınabilir.

Killi zeminlerin katılığının farklı tabakalardan oluşması halinde yukarıda belirtilen yöntem süperpozisyon tekniği ile bu durum için uygulanabilir. Üç tabakalı bir kil zemin için ani oturma süperpozisyon tekniği ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sum \delta_e = \delta_{H_1, E_1} + \delta_{(H_1+H_2), E_2} + \delta_{(H_1+H_2+H_3), E_3} - \delta_{H_1, E_2} - \delta_{(H_1+H_2), E_3} \quad (4.7)$$

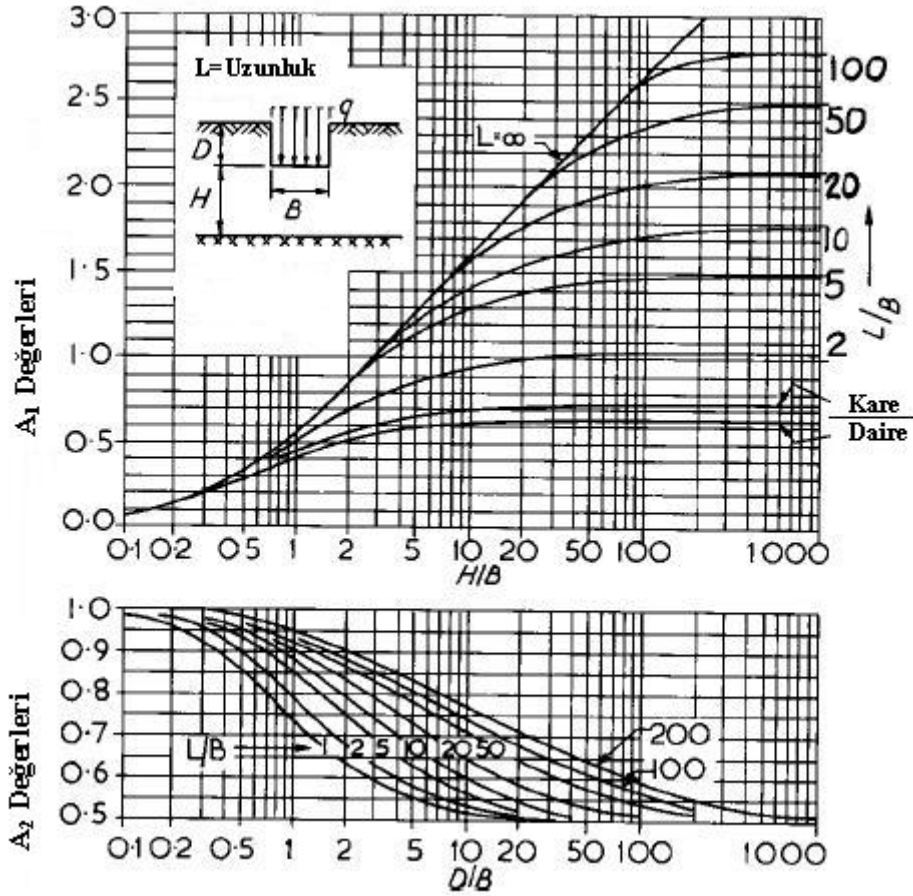
Eşitliğin sağında yer alan ilk üç terim rijit sınırın sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü tabaka altında olduğu varsayımıyla Şekil 4.3a'daki eğrilerden alınacak A_1 , A_2 eşitliğinden bulunacak oturmalarlardır. Son iki terim fazladan göz önüne alınan oturmaların düzeltilmesi ile ilgili olup dördüncü terim H_1 tabakasının E_2 modülü ile yapacağı oturma, son terim ise ilk iki tabakanın E_3 elastisite modülüne sahip olması halinde yapacağı oturmayı belirtmektedir.

Bu hesaplar modelimize uygulanırsa oluşabilecek toplam ani oturma değeri aşağıda hesaplanmıştır.

Birinci tabaka için $H = 10$ m'dir. Buna göre Şekil 4.3a'dan, $A_1 = 0.30$ ve $A_2 = 1$ olarak bulunur. Buna göre,

$$\delta_{H_1, E_1} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_1} = (0.30)(1) \frac{(64)(10)}{4000} = 0.048 \text{ m}$$

olarak bulunur.



Şekil 4.3a Ani oturma için A1 ve A2 faktörleri.

İkinci tabaka için $H = H_1 + H_2 = 10 + 12 = 22$ m'dir. Buna göre Şekil 4.3a'dan, $A_1 = 0.72$ ve $A_2 = 1$ olarak bulunur. Elde edilen bu değerlere göre rijit temel ikinci tabakanın sonundaymış gibi düşünüldüğünde elde edilecek ani oturma miktarı,

$$\delta_{(H_1+H_2),E_2} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_2} = (0.72)(1) \frac{(64)(10)}{11280} = 0.0408 \text{ m}$$

olarak bulunur. Fazladan göz önüne alınan oturmanın düzeltilmesi için gerekli değer,

$$\delta_{H_1,E_2} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_1} = (0.30)(1) \frac{(64)(10)}{11280} = 0.017 \text{ m}$$

olarak hesaplanır. Buna göre suya doymun kil zeminde meydana gelecek toplam ani oturma miktarı,

$$\sum \delta_e = \delta_{H_1,E_1} + \delta_{(H_1+H_2),E_2} - \delta_{H_1,E_2} = 0.048 + 0.041 - 0.017 = 0.072 \text{ m} = 7.2 \text{ cm}$$

olarak bulunur. Buna göre kilde meydana gelebilecek toplam oturma,

$$\delta_T = \sum \delta_e + \sum \delta_c = 7.2 + 16 = 23.2 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Hesaplanan bu nihai konsolidasyon oturmasının ne kadar sürede meydana gelebileceğini hesaplamak için;

$$T_v = \frac{c_v}{H_d^2} t \quad (4.8)$$

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (4.9)$$

denklemlerini kullanabiliriz. Burada;

T_v : Zaman Faktörü

H_d : Drenaj Mesafesi

c_v : Konsolidasyon Katsayısı

k : Permeabilite Katsayısı

γ_w : Suyun Birim Hacim ağırlığı

olup, alt ve üst tabakanın geçirimli olduğu durumda

$$H_d = \frac{H}{2} \quad (4.10)$$

alt tabakanın geçirimsiz olduğu durumda ise

$$H_d = H \quad (4.11)$$

olarak alınır. Modelde zemin alttan geçirimsiz olduğundan (4.11) eşitliği kullanılacaktır.

Buna göre;

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{10^{-4}}{1.93 \times 10^{-4} \times 10} = 0.0518 \text{ m}^2/\text{gün}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.8 Zemin için (U-T_v) bağıntısı.

U	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
T _v	0.008	0.031	0.071	0.126	0.197	0.287	0.403	0.567	0.848	∞

U: Konsolidasyon Yüzdesi

Çizelge 4.8 kullanılarak iyileştirme yapılmamış kil zeminde meydana gelen konsolidasyon oturmasının %90'a ulaşması için gerekli süre (4.8) eşitliği yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$0.848 = \frac{0.0518}{10^2} t$$

$$t = \frac{100 \times 0.848}{0.0518} = 1637 \text{ gün} \approx 5 \text{ yıl}$$

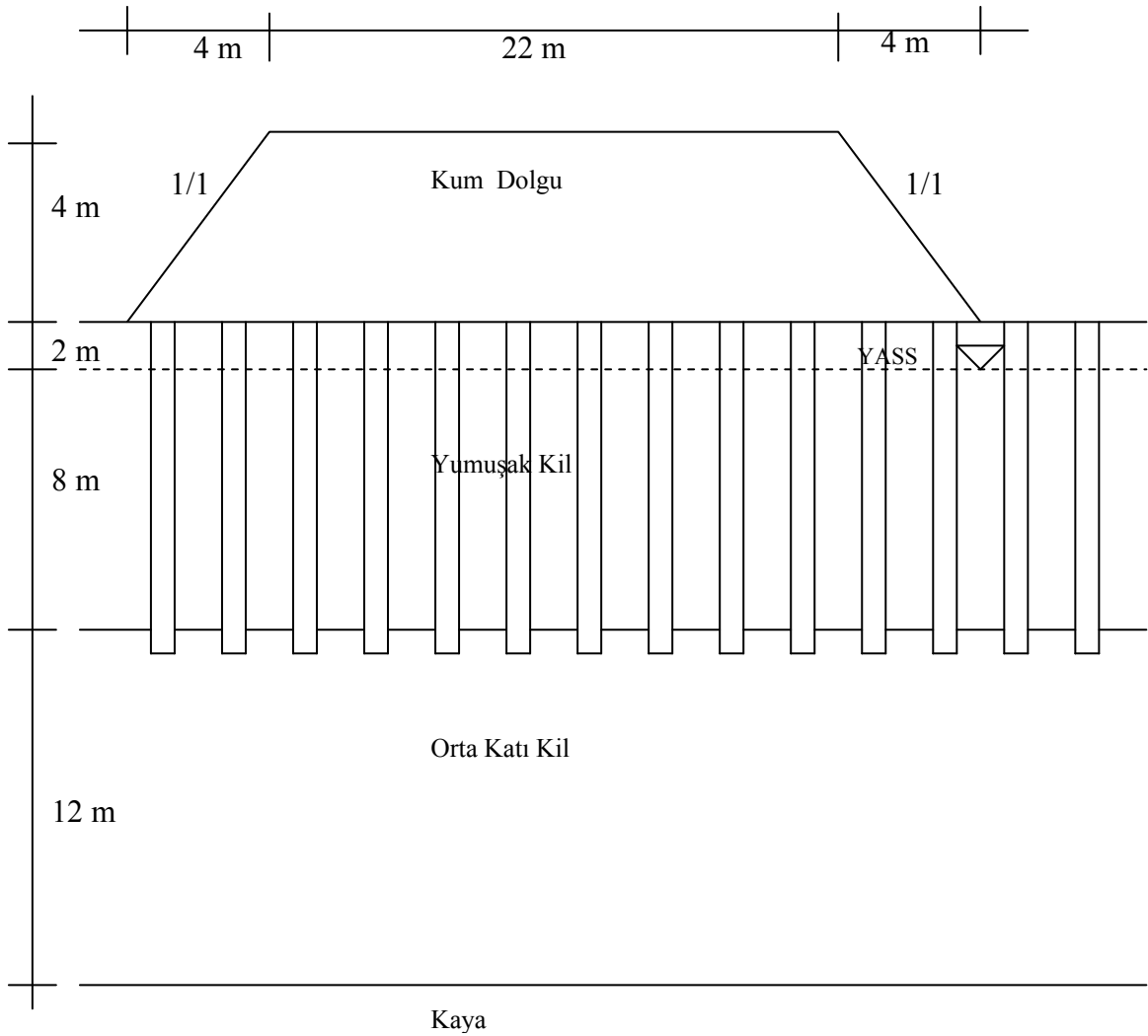
Konsolidasyonun %90 değerine ulaşması için 5 yıl gerekmektedir. Bu ise inşaat aşaması için uzun bir süredir. Oturmaları azaltmak ve zeminin taşıma kapasitesini arttırmak için zeminde çeşitli çap ve aralıkta taş kolon inşa edilmesi durumu analiz edilecektir.

4.4 Taş Kolon İle İyileştirilmiş Yumuşak Kil Zemin Kesiti ve Taş Kolon Özellikleri

Şekil 4.4'de daha önce oturması ve taşıma gücü hesapları yapılan, üzerine dolgu yapılacak arazide taş kolon uygulandıktan sonraki zemin kesiti gösterilmiş ve taş kolon parametreleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Zemine taş kolon uygulandığında ve daha sonra üzerine 4 m yüksekliğinde ve 10x30 m² boyutunda bir toprak dolgu yerleştirildiğinde zeminde meydana gelecek oturma ve taşıma gücü değişimleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9 Taş kolon malzemesi özellikleri.

Zemin Özellikleri	Taş Kolon
Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_k (kN/m ³)	21
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_d (kN/m ³)	23
Permeabilite, $k_x = k_y$ (m/gün)	100
Elastisite Modülü, E (kN/m ²)	75000
Poisson Oranı, ν	0.25
Efektif Kohezyon, c (kN/m ²)	0.5
Efektif İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	40
Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı, K_0	0.36



Şekil 4.4 Zemin, dolgu ve taş kolon kesiti.

4.4.1 E = 3500 Olan Yumuşak Kilde 2.00 m Aralıklı 80 cm Çapındaki Taş Kolonlar ile Zemin İyileştirmesi Uygulanması Durumu

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$$

$$a_c = \frac{A_c}{A}$$

Eşkenar üçgen dizilimine göre;

$$a_c = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 = (0.907)(0.80/2.00)^2 = 0.145$$

birim hücrenin çapı ve toplam alanı,

$$D_e = (1.05)(2) = 2.1 \text{ m}$$

$$A = \frac{(\pi)(D_e)^2}{4} = \frac{(\pi)(2.1)^2}{4} = 3.464 \text{ m}^2$$

olarak bulunur.

4.4.1.1 Taş Kolon İle İyileştirilmiş Zeminde Oturmanın Belirlenmesi

Taş kolon ile iyileştirme sonucu meydana gelecek oturma miktarı Priebe'nin (1995) vibro yer değiştirme kolonlar için geliştirmiş olduğu yöntemle hesaplanacaktır. Buna göre daha önce belirlenmiş olan alan değişim oranından $A/A_c = 1/a_c$ değeri hesaplanır ve Şekil 2.12 kullanılarak iyileştirme faktörü n_0 bulunur.

$$A/A_c = 1/0.145 = 6.9$$

$$n_0 = 1.8$$

Daha sonra kolonun sıkışabilirliğini dikkate almak için düzeltilmiş iyileştirme değeri n_1 hesaplanır. (n_1 her zaman n_0 'dan küçük olmalıdır.)

Tek eksenli sıkışma modülü değerleri taş kolon ve zemin için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$D_c = \frac{(1-0.25)(75000)}{(1-0.50)(1+0.25)} = 90000 \text{ kN/m}^2$$

$$D_s = \frac{(1-0.33)(3500)}{(1-0.66)(1+0.33)} = 5186 \text{ kN/m}^2$$

ve buradan kolonun ve zeminin sıkışma modülleri oranı,

$$\frac{D_c}{D_s} \cong 17$$

olarak bulunur. Bulunan bu değer ve Şekil 2.13 kullanılarak ek alan oranı,

$$\Delta \frac{A}{A_c} = 0.3$$

olarak bulunur. Bulunan bu değer kullanılarak,

$$\left(\frac{\overline{A_c}}{A} \right) = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta \left(\frac{A}{A_c} \right)} = \frac{1}{6.9 + 0.3} = 0.139$$

$$\left(\frac{\overline{A}}{A_c} \right) = \frac{1}{0.139} = 7.2$$

olarak bulunur. Bulunan bu değer Şekil 2.12'de kullanılırsa n_1 değeri,

$$n_1 = 1.7$$

olarak bulunur.

Derinlik etkisini dikkate almak için, $n_2 = f_d n_1$ eşitliğindeki f_d , derinlik faktörünün bulunması gerekir.

$$f_d = \frac{1}{1 - \frac{y \sum (\gamma_s \Delta d)}{P_c}} \quad (2.14b)$$

Kolon boyu ortasında,

$$\sum (\gamma d) = (2)(19) + (3)(19 - 10) = 65 \text{ kPa}$$

$$p = 64 \text{ kPa}$$

Yukarıda verilen değerler ve Şekil 2.14 kullanılarak derinlik etki faktörü, $y = 0.48$ olarak bulunur. Bulunan bu değere göre derinlik faktörü,

$$f_d = \frac{1}{1 - \frac{(0.48)(65)}{64}} = 1.95$$

olarak bulunur.

Bu değerin güvenli tarafta olup olmadığı kontrol edilmelidir. Bunun için Şekil 2.15'den yararlanılır. Buradan f_d için maksimum değer,

$$f_d = (0.152)\left(\frac{D_c}{D_s}\right) = (0.152)(17) = 2.58$$

olarak bulunmuştur. Bulduğumuz f_d değeri kullanılabilir. Bulunan bu değere göre oturma hesaplarında kullanılacak olan n_2 değeri,

$$n_2 = f_d n_1 = (1.95)(1.7) = 3.32$$

olarak bulunur. İyileştirme faktörünün maksimum değeri kontrolü için,

$$n_{maks} = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{D_c}{D_s} - 1 \right) = 1 + 0.145(17 - 1) = 3.32 = n_2$$

olduğundan hesaplanan n_2 değeri kullanılabilir. Arazide iyileştirmeden sonra meydana gelecek oturmayı belirlemek için önce oluşacak toplam oturma belirlenmelidir. Buna göre toplam oturma (2.22) eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$S_\infty = p \frac{d}{D_s n_2} = (64) \frac{(10)}{(5186)(3.32)} = 0.0372$$

$$\frac{d}{D} = \frac{10}{0.8} = 12.5$$

Taş kolon sayısı 100 olarak kabul edilmiştir. Buna göre Şekil 2.17a kullanılarak s/s_∞ oranı 0.65 olarak bulunur. Bulunan bu değer kullanılarak meydana gelecek oturma miktarı,

$$s = (0.65)(s_\infty) = (0.65)(0.037) = 0.024 \text{ m}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.10'da 2 m aralıklı 90 cm ve 100 cm çapında taş kolonlar kullanılması durumunda hesaplanan oturma değerleri de verilmiştir.

Çizelge 4.10 2 m aralıklı eşkenar üçgen dizimli taş kolon uygulanmasından sonra beklenen oturma değerleri

Kolon Çapı (cm)	A/A_c	n_o	$\frac{D_c}{D_s}$	$\Delta \frac{A}{A_c}$	$\left(\frac{A}{A_c}\right)$	n_1	$\sum(\gamma d)$	p	y	f_d	$f_{d,maks}$	n_2	n_{max}	s_∞ (m)	$\frac{s}{s_\infty}$	δ (m)
Φ80	6.9	1.8	17	0.3	7.20	1.70	65	64	0.48	1.95	2.58	3.32	3.32	0.037	0.65	0.024
Φ90	5.5	2.1	17	0.3	5.80	1.95	65	64	0.54	2.21	2.55	4.42	3.94	0.031	0.68	0.021
Φ100	4.4	2.4	17	0.3	4.72	2.30	65	64	0.59	2.50	2.43	5.59	4.63	0.027	0.70	0.019

Taş kolon ile iyileştirilmemiş bölgede meydana gelecek ani ve konsolidasyon oturmaları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır ve elde edilen değerler Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Kolon altında kalan bölgedeki tabaka için $H = 11.5$ m’dir. Buna göre Şekil 4.3a’dan, $A_1 = 0.58$ ve $A_2 = 0.8$ olarak bulunur. Buna göre kil zeminde meydana gelecek ani oturma,

$$\delta_i = A_1 A_2 \frac{qB}{E_u} = (0.58)(0.8) \frac{(64)(10)}{11280} = 0.026 \text{ m} = 2.6 \text{ cm}$$

olarak bulunur. Kil zeminde meydana gelecek oturma ise Çizelge 4.7’den yararlanılarak,

$$\delta_c = 0.029 \text{ m} = 2.9 \text{ cm}$$

olarak bulunur. 80 cm’lik taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede meydana gelecek toplam oturma,

$$\delta_T = \delta + \delta_i + \delta_c = 2.4 + 2.6 + 2.9 = 7.9 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.11 Taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölgede meydana gelecek oturma miktarı.

Kolon Çapı (cm)	δ (cm)	δ_i (cm)	δ_c (cm)	δ_T (cm)
Φ80	2.4	2.6	2.9	7.9
Φ90	2.1	2.6	2.9	7.6
Φ100	1.9	2.6	2.9	7.4

4.4.1.2 İyileştirilmiş Zeminde İzole Edilmiş Tekil Kolon İçin Taşıma Gücü

4.4.1.2.1 Alan Değişim Oranı

$$a_c = 0.907 \left(\frac{D}{s} \right)^2 = 0.907 x (0.80/2)^2 = 0.145$$

$$A_c = \frac{\pi(d)^2}{4} = \frac{(\pi)(0.80)^2}{4} = 0.503 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{(\pi)(D_e)^2}{4} = \frac{(\pi)(2.1)^2}{4} = 3.464 \text{ m}^2$$

Alan değişim oranından, kolona ve zemine gelecek olan gerilmelerin belirlenmesinde kullanılacak olan oranlar gerilme konsantrasyon faktörü $n=3$ alınarak aşağıda hesaplanmıştır.

$$\mu_c = \frac{n}{[1 + (n-1)a_c]} = \frac{3}{[1 + (3-1)0.145]} = 2.33$$

$$\mu_s = \frac{1}{[1 + (n-1)a_c]} = \frac{1}{[1 + (3-1)0.145]} = 0.78$$

4.4.1.2.2 Taş Kolonda Genişleme Göçmesi

Taş kolonda oluşacak en büyük genişlemenin yüzeyden 3D kadar derinlikte meydana geleceği kabul edilmiştir. Buna göre oluşabilecek genişleme göçmesi için gerekli değerler aşağıda hesaplanmıştır.

$$q_{ult,c} = \sigma_{r,\lim} K_{pc}$$

$$\sigma_{r,\lim} = \sigma_{ro} + s_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2s_u(1 + \nu_u)} \right]$$

$$\sigma_{ro} = \sigma'_{vo} K_{pm} + u_o$$

$$\phi = 24^\circ \text{ için, } K_p = \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \text{tg}^2 \left(45 + \frac{24}{2} \right) = 2.37 \text{ olarak bulunur.}$$

$$\sigma'_{vo} = (3)(0.80)(19) = 45.6 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{ro} = (45.6)(2.37) = 108 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{r,\lim} = 108 + 30x \left[1 + \ln \frac{3500}{(2)(30)(1 + 0.50)} \right] = 248 \text{ kPa}$$

Buradan kolonun dışı doğru genişleme meydana gelmesi durumuna karşı nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,c} = (248)tg^2 \left(45 + \frac{40}{2}\right) = 1140 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

4.4.1.2.3 Tekil Taş Kolon Kapasitesi

$$q_{ult} = (F'_c c_u + F'_q q) K_{pc}$$

Hesap derinliğindeki ortalama yanıl gerilme,

$$q = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2K_0\sigma_v)$$

formülü ile bulunabilir. Ortalama düşey gerilme, genişlemenin 3D derinlikte olduğu göz önüne alınarak,

$$\sigma'_v = (\gamma')(z)$$

$$\sigma'_v = (3)(0.8)(19) = 45,6 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Drenajlı durum için;

$$I_c = \frac{E_c}{2(1+\nu)(c + qtg\phi)}$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 24 = 0,593$$

$$q = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2K_0\sigma_v) = \frac{1}{3}[45.6 + (2)(0.593)(45.6)] = 33.23 \text{ kPa}$$

$$I_c = \frac{3500}{2(1+0.33)(2 + (33.23)tg24)} = 78$$

$$F'_c = 9.0 ; F'_q = 4.2$$

Buradan kolonun nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult} = [(9.0)(30) + (4.2)(33.22)](4.6) = 1884 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Drenajsız durum için:

$$I_c = \frac{E_c}{2(1+\nu)(c + qtg\phi)}$$

$$K_0 = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 0 = 1$$

$$q = \sigma_v = 45.6 \text{ kPa}$$

$$I_c = \frac{4000}{(2)(1+0.50)(30 + (45.6)(tg0))} = 44.4$$

$$F'_c = 4.7 ; F'_q = 1$$

Bu değerlere göre kolonun nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult} = [(4.7)(30) + (1)(45.6)](4.6) = 858 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

4.4.1.2.4 Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Göçme

Wissmann'a göre iyileştirilmiş zemin parametreleri (3.30b) ve (3.31b) eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\phi_{comp} = tg^{-1}(\mu'_c a_c \tan \phi_c + \mu'_s (1 - a'_c) \tan \phi_s)$$

$$R'_a = (0.4)(a_c) = (0.4)(0.145) = 0.058$$

$$n_s = 2.8$$

$$\mu'_c = \frac{n_s}{a'_c(n_s - 1) + 1} = 2.54$$

$$\mu'_s = \frac{1}{a'_c(n_s - 1) + 1} = 0.79$$

$$\phi_c = 40^\circ, \phi_s = 24^\circ \rightarrow \phi_{comp} = 24.46^\circ$$

$$\phi_c = 40^\circ, \phi_s = 0^\circ \rightarrow \phi_{comp} = 7.05^\circ$$

$$c_{comp} = (c_c)(a'_c) + c_s(1 - a'_c)$$

$$c_c = 0 \rightarrow c_{comp} = c_s(1 - a'_c)$$

$$c_s = 2 \text{ kPa} \rightarrow c_{comp} = (2)(1 - 0.058) = 1.88 \text{ kPa}$$

$$c_u = 30 \text{ kPa} \rightarrow c_{u,comp} = (30)(1 - 0.058) = 28.26 \text{ kPa}$$

$\phi = 24.46^\circ$ için genel taşıma gücü denkleminde kullanılacak faktörler;

$$N_c = 19.94 \quad F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{10.07}{19.94}\right) = 1.17$$

$$N_q = 10.07 \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} \text{tg}(24.46) = 1.15$$

$$N_\gamma = 6.19 \quad F_{\gamma s} = 1 - (0.4) \left(\frac{10}{30}\right) = 0.867$$

$\phi = 7.05^\circ$ için genel taşıma gücü denkleminde kullanılacak faktörler;

$$N_c = 7.20 \quad F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{1.89}{7.20}\right) = 1.09$$

$$N_q = 1.89 \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} \text{tg}(7.05) = 1.04$$

$$N_\gamma = 0.165 \quad F_{\gamma s} = 1 - (0.4) \left(\frac{10}{30}\right) = 0.87$$

olarak bulunur. Genel taşıma gücü denklemi kullanılarak taş kolon grubunda, kolon-zemin bölgesinde meydana gelebilecek göçme durumunda, temelin nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

Drenajlı durumda;

$$q_{ult} = c' N_c F_{cs} + q N_q F_{qs} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s}$$

$$q_{ult} = (1.88)(19.94)(1.17) + 0 + (0,5)(19)(10)(6.19)(0,867) = 554 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Drenajsız durumda ise;

$$q_{ult} = c_{u,comp} N_c + q N_q F_{qs} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s}$$

$$q_{ult} = (28.5)(7.20)(1.09) + 0 + (0,5)(19)(10)(0.165)(0,87) = 237 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

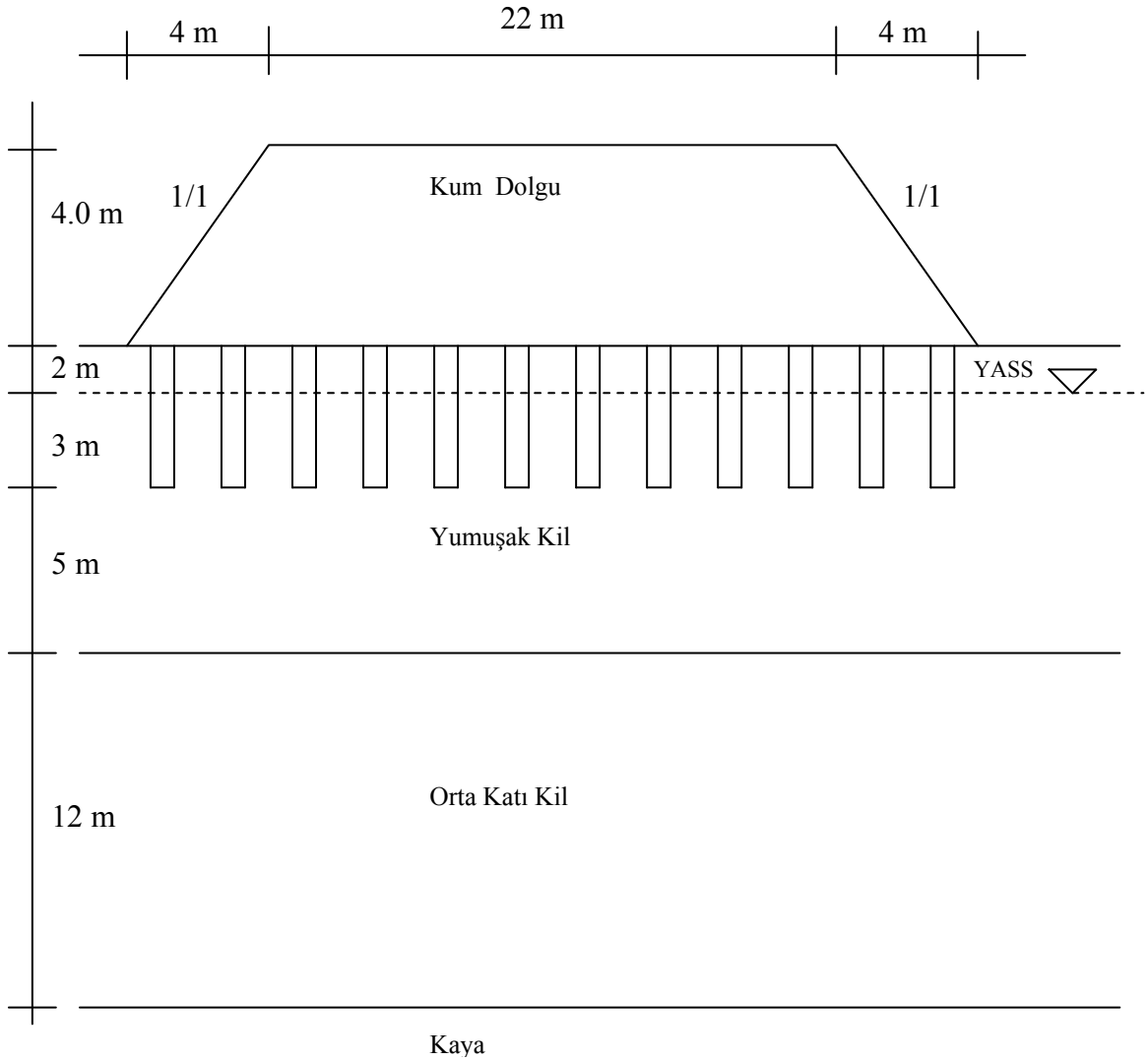
Çizelge 4.12’de 2 m aralıklı 90 cm ve 100 cm çapında taş kolonların kullanılması durumunda hesaplanan taşıma gücü değerleri de verilmiştir.

Çizelge 4.12 Tekil taş kolon ve taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerde elde edilen taşıma gücü değerleri.

		q_{ult} (kPa)		
Kolon Çapı (cm)		Φ80	Φ90	Φ100
Tekil Kolon Elemanında Kabarma Göçmesi ($q_{ult,g}$)		1140	1202	1265
Tekil Kolon Elemanında Meydana Gelebilecek Göçme ($q_{ult,g}$)	Drenajsız Durum	858	885	911
	Drenajlı Durum	1884	1985	2008
İyileştirilmiş Kolon-Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelebilecek Göçme (q_{ult})	Drenajsız Durum	237	253	292
	Drenajlı Durum	541	595	957

4.5 Geopier İle İyileştirilmiş Yumuşak Kil Zemin Kesiti ve Geopier Özellikleri

Şekil 4.5’de zemin profili gösterilen arazide killi zemin tabakaları üzerine dolgu yapılacaktır. Dolgudan önce geopier imalatı ile zemin iyileştirmesi uygulandıktan sonraki zemin kesiti gösterilmiş ve geopier parametreleri Çizelge 4.13’de verilmiştir. İyileştirilmiş zemin üzerine uygulanacak olan 4m yüksekliğinde ve 10x30 m² boyutunda bir dolgudan dolayı zeminde oluşacak oturma ve taşıma gücündeki iyileşme miktarı hesaplanmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.5 Zemin, dolgu ve geopier kesiti.

Çizelge 4.13 Geopier malzeme özellikleri.

Zemin Özellikleri	Geopier Kolon
	Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_k (kN/m ³)
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_d (kN/m ³)	23
Permeabilite, $k_x = k_y$ (m/gün)	100
Elastisite Modülü, E (kN/m ²)	100000
Poisson Oranı, ν	0.25
Efektif Kohezyon, c (kN/m ²)	4
Efektif İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	47
Drenajsız Kesme Dayanımı, s_u (kN/m ²)	0
Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı, K_0	0.269
k_g (MN/m ³)	45

4.5.1 $\Phi 80$ Çaplı Geopier Kolonların 2.00 m Ara İle Yumuşak Kil Zemine Uygulanması

4.5.1.1 Taşıma Gücü Hesapları

Aşağıda Çizelge 4.13'den yararlanılarak geopier oturma ve taşıma gücü hesaplarında gerekli olan değerler hesaplanmıştır.

$$H_0 = 5 \text{ m}$$

$$d_{\text{shaft}} = 0,80 \text{ m}$$

$$H_{UZ} = H_{\text{shaft}} = 5 + 0.80 = 5.80 \text{ m}$$

$$H_{LZ} = 2B - H_{\text{shaft}} = (2)(10) - 5.80 = 14.2 \text{ m}$$

$$n_{\text{geopier}} = 75$$

$$A_{\text{dogu}} = (10)(30) = 300 \text{ m}^2$$

Bu çalışma için $n_s = 6$ olarak kabul edilmiştir.

$$A_{geopier} = (75) \frac{\pi(0.80)^2}{4} = 37.7 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{37.7}{300} = 0.126$$

$$d' = d_{shaft} + 0.0762 = 0.80 + 0.076 = 0.876 \text{ m}$$

4.5.1.1.1 Tekil Kolon Elemanında Genişleme Göçmesi

Zeminde, kolon iç malzemesinde oluşan gerilmenin zeminin yanal karşı koyma direncini yenmesi durumunda meydana gelebilecek göçme için gerekli değer aşağıda hesaplanmıştır.

$$K_{p,g} = tg^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = tg^2 \left(45 + \frac{47}{2}\right) = 6,44$$

$$K_p = tg^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) = tg^2 \left(45 + \frac{24}{2}\right) = 2,37$$

Dışa doğru taşmanın yani kabarmanın meydana geleceği derinlik (3.20) eşitliğinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$z_b = (0.5)(0.876)tg\left(45 + \frac{47}{2}\right) = 1.1 \text{ m}$$

Bulunan bu derinlik değerine göre o noktadaki başlangıç düşey efektif gerilme değeri,

$$\sigma'_{vo} = (1.1)(19) = 21.13 \text{ kPa}$$

olarak bulunur. (3.18) eşitliği kullanılarak,

$$\sigma_{ro} = (21.13)(2.37) = 50 \text{ kPa}$$

Değeri elde edilir. Bu değer (3.17) eşitliğinde yerine konulursa sınırlayıcı radyal gerilme,

$$\sigma_{r,lim} = 50 + (30) \left[1 + \ln \frac{3500}{(2)(30)(1+0.5)} \right] \cong 190 \text{ kPa}$$

olarak bulunur. Burada zeminin poisson oranı zemin suya doygun kabul edildiği için $\nu_u = 0.5$ olarak alınmıştır. Bulunan bu değer (3.16) eşitliğinde yerine konulursa kolonun nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibidir.

$$q_{ult,g} = (190)tg^2 \left(45 + \frac{47}{2}\right) = 1224 \text{ kPa}$$

4.5.1.1.2 Tekil Kolon Elemanı Taşıma Gücü

Bu bölümde tekil geopier elemanında meydana gelebilecek zımbalanma göçmesi analizi drenajlı ve drenajsız durumlar için incelenecektir.

Drenajsız durum için:

Drenajsız durumda birim çevre taşıma gücü,

$$f_s = s_u = 30 \text{ kPa}$$

Olarak bulunur ve (3.26) eşitliği kullanılarak kolon birim uç taşıma gücü,

$$q_{tip,g} = s_u N_c = (30)(7) = 210 \text{ kPa} \quad (N_c = 7, \text{ CFEM})$$

olarak bulunacaktır. Bu değer (3.24) eşitliğinde yerine konulursa geopier elemanı nihai taşıma gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$q_{ult,g} = \frac{4}{(0.80)^2} (30)(0.876)(5.80) + 210 = 1163 \text{ kPa}$$

Drenajlı durum için:

Drenajlı durumda birim çevre taşıma gücü (3.27) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$f_s = \sigma_{v,ave} (tg \phi_s) K_p = ((2)(19) + (0.5)(19 - 10))(tg 24) tg^2 \left(45 + \frac{24}{2}\right) = 44.87 \text{ kPa}$$

$\phi = 24^\circ$ için birim uç taşıma gücü denkleminde kullanılacak faktörler;

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi = (9.6 - 1)(2.246) = 19.32, \quad F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{9.60}{19.32}\right) = 1.166$$

$$N_q = tg^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) e^{(\pi)(tg \phi)} = 9.60, \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} (tg 24) = 1.148$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1) tg \phi = 5.74, \quad F_{\gamma s} = 1 - (0.4) \left(\frac{10}{30}\right) = 0.867$$

olarak hesaplanır. Burada F_{cs} , F_{qs} ve $F_{\gamma s}$ genel taşıma gücü denklemindeki şekil faktörleridir. Drenajlı durumdaki zemin parametrelerine göre geopier elemanının uç direnci (3.28) eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$q_{tip,g} = (2)(19.32)(1.166) + (0.5)(0.876)(9)(5.74)(0.867) + [(2)(19) + (3)(19 - 10)](9.60)(1.148)$$

$$q_{tip,g} = 781 \text{ kPa}$$

Geopier elemanının nihai taşıma gücü ise (3.24) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$q_{ult.g} = \frac{4}{(0,80)^2} (44,87)(0,876)(5,80) + 781 = 2206 \text{ kPa}$$

4.5.1.1.3 Kolon – Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelecek Göçme

Wissmann'a göre iyileştirilmiş zemin parametreleri (3.30b) ve (3.31b) eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\phi_{comp} = tg^{-1}(\mu'_g R'_a \tan \phi_g + \mu'_m (1 - R'_a) \tan \phi_m)$$

$$R'_a = 0,4R_a = (0,4)(0,126) = 0,0504$$

$$R'_s = 2,8$$

$$\mu'_p = \mu'_g = \frac{R'_s}{R'_a(R'_s - 1) + 1} = 2,567$$

$$\mu'_m = \mu'_s = \frac{1}{R'_a(R'_s - 1) + 1} = 0,917$$

$$\phi_g = 47^\circ, \phi_m = 24^\circ \rightarrow \phi_{comp} = 27,76^\circ$$

$$\phi_g = 47^\circ, \phi_m = 0^\circ \rightarrow \phi_{comp} = 7,90^\circ$$

$$c_{comp} = c_c R'_a + c_m (1 - R'_a)$$

$$c_c = c_g = 0 \rightarrow c_{comp} = c_m (1 - R'_a)$$

$$c_m = 2 \text{ kPa} \rightarrow c_{comp} = (2)(1 - 0,0504) = 1,90 \text{ kPa}$$

$$c_u = 30 \text{ kPa} \rightarrow c_{u,comp} = (30)(1 - 0,0504) = 28,5 \text{ kPa}$$

$\phi = 27,76^\circ$ için genel taşıma gücü denkleminde kullanılacak faktörler;

$$N_c = 25,34 \quad F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{14,34}{25,34}\right) = 1,189$$

$$N_q = 14,34 \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} tg(27,76) = 1,175$$

$$N_\gamma = 10,53 \quad F_{\gamma s} = 1 - (0,4) \left(\frac{10}{30}\right) = 0,867$$

$\phi = 7.9^\circ$ için genel taşıma gücü denkleminde kullanılacak faktörler;

$$N_c = 7.49 \quad F_{cs} = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_c} = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{2.04}{7.49}\right) = 1.09$$

$$N_q = 2.04 \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} \text{tg}(7.9) = 1.05$$

$$N_\gamma = 0.22 \quad F_{\gamma s} = 1 - (0.4) \left(\frac{10}{30}\right) = 0.87$$

olarak bulunur. Genel taşıma gücü denklemi kullanılarak geopier kolon grubunda, kolon-zemin bölgesinde meydana gelebilecek göçme durumunda, temelin nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

Drenajlı durumda;

$$q_{ult} = c' N_c + q N_q F_{qs} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s}$$

$$q_{ult} = (1.9)(25.34)(1.189) + 0 + (0,5)(19)(10)(10.53)(0,867) = 924 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

Drenajsız durumda ise;

$$q_{ult} = c_{u,comp} N_c + q N_q F_{qs} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s}$$

$$q_{ult} = (28.5)(7.49)(1.09) + 0 + (0,5)(19)(10)(0.22)(0,87) = 250.86 \text{ kPa}$$

olarak bulunur.

4.5.1.1.4 Kolon ve Zeminden Oluşan Bölge Altında Göçme Meydana Gelmesi

Kolon-zemin iyileştirilmiş bölgesinin altında meydana gelebilecek göçme durumunun incelenmesi için gerilmenin 2:1 oranında arttığı kabulüne göre hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için üst bölge hesaplarda göz önüne alınmıştır.

$$B' = B + H_{UZ} = 10 + 5.80 = 15.80 \text{ m}$$

$$L' = L + H_{UZ} = 30 + 5.80 = 35.80 \text{ m}$$

Drenajsız durum için:

$$s_u = 30 \text{ kPa}, \phi = 0^\circ$$

$$N_c = (0.84 + 0.16 \frac{B}{L}) N_{c,kare} = (0.893)(6.2) = 5.54$$

$$N_q = 1$$

$$N_\gamma = 0$$

Temel derinliği geopier boyu olarak alınırsa sürşarj yükü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\bar{q} = (2)(19) + (3)(19 - 10) = 65 \text{ kPa}$$

Bulunan bu yük değerine göre kolonun nihai uç taşıma gücü ve (3.35) eşitliği kullanılarak iyileştirilmiş bölgenin taşıma gücü aşağıdaki gibi bulunur.

$$q_{bottom} = s_u N_c + \bar{q} = (30)(5.54) + 65 = 231.2 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = \frac{(231.2)(15.8)(35.8)}{(10)(30)} = 435 \text{ kPa}$$

Drenajlı durum:

$$\phi = 24^\circ, c = 2 \text{ kPa}$$

$$N_c = 19.32 \quad F_{cs} = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right) = 1 + \left(\frac{10}{30}\right) \left(\frac{9.6}{19.32}\right) = 1.166$$

$$N_q = 9.60 \quad F_{qs} = 1 + \frac{10}{30} (\text{tg } 24) = 1.148$$

$$N_\gamma = 5.7 \quad F_{\gamma s} = 1 - (0.4) \frac{10}{30} = 0.867$$

$$q_{bottom} = c' N_c F_{cs} + \sigma_v N_q F_{qs} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s}$$

$$q_{bottom} = (2)(19.32)(1.166) + (65)(9.60)(1.148) + \frac{1}{2} (15.80)(9)(5.7)(0.867)$$

$$q_{bottom} = 1113 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = \frac{(1113)(15.80)(35.80)}{(10)(30)} = 2098 \text{ kPa}$$

Çizelge 4.14'de 2 m aralıklı 90 cm ve 100 cm çapında geopier elemanlar kullanılması durumunda hesaplanan taşıma gücü değerleri de verilmiştir.

Çizelge 4.14 Tekil geopier eleman ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.

		Tekil geopier eleman ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri, q_{ult} (kPa)		
Kolon Çapı (cm)		Φ80	Φ90	Φ100
Tekil Kolon Elemanında Kabarma Göçmesi ($q_{ult,g}$)		1224	1261	1297
Tekil Kolon Elemanında Meydana Gelebilecek Göçme ($q_{ult,g}$)	Drenajsız Durum	1163	1063	985
	Drenajlı Durum	2206	2059	1944
İyileştirilmiş Kolon-Zemin Bölgesi İçerisinde Meydana Gelebilecek Göçme (q_{ult})	Drenajsız Durum	251	285	326
	Drenajlı Durum	924	1058	1210
Kolon ve Zeminden Oluşan Bölge Altında Göçme Meydana Gelmesi (q_{ult})	Drenajsız Durum	435	440	444
	Drenajlı Durum	2098	2122	2145

4.5.1.2 Oturma Hesapları

4.5.1.2.1 Üst Bölgede Meydana Gelecek Oturma

Alan değişim oranı daha önceki hesaplardan $\phi 80$ 'lik kolon için,

$$R_a = 0.126$$

olarak bulunmuştur. Dolgudan kaynaklanan yük artışı,

$$q = (16)(4) = 64 \text{ kPa}$$

olduğuna göre bu artıştan dolayı bir geopier elemanına gelecek gerilme aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$q_g = q \left[\frac{n_s}{n_s R_a - R_a + 1} \right] = (64) \left[\frac{6}{(6)(0.126) - (0.126) + 1} \right] = 236 \text{ kPa}$$

Buna göre üst bölgede oluşabilecek olan oturma (3.4) eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$S_{UZ} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{236}{45000} = 0.0052 \text{ m} = 0.52 \text{ cm}$$

4.5.1.2.2 Alt Bölgede Meydana Gelecek Oturma

Alt bölgede meydana gelecek ani oturma Janbu, Bjerrum, Kjaernsi'nin (1956) önerdiği yöntem kullanılarak aşağıda hesaplanmıştır.

Birinci tabaka için $H = 4.2$ m, $d_f = 5.8$ m'dir. Buna göre Şekil 4.3a'dan, $A_1 = 0.32$ ve $A_2 = 0.90$ olarak bulunur. Buna göre,

$$\delta_{H_1,E_1} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_1} = (0.32)(0.90) \frac{(64)(10)}{4000} = 0.0461 \text{ m}$$

olarak bulunur. İkinci tabaka için $H = H_1 + H_2 = 4.2 + 10 = 14.2$ m'dir. Buna göre Şekil 4.3a'dan, $A_1 = 0.62$ ve $A_2 = 0.90$ olarak bulunur. Elde edilen bu değerlere göre rijit temel ikinci tabakanın sonundaymış gibi düşünüldüğünde elde edilecek ani oturma miktarı,

$$\delta_{(H_1+H_2),E_2} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_2} = (0.62)(0.90) \frac{(64)(10)}{11280} = 0.0320 \text{ m}$$

olarak bulunur. Fazladan göz önüne alınan oturmanın düzeltilmesi için gerekli değer,

$$\delta_{H_1,E_2} = A_1 A_2 \frac{qB}{E_1} = (0.32)(0.90) \frac{(64)(10)}{11280} = 0.0163 \text{ m}$$

olarak hesaplanır. Buna göre suya doymun kil zeminde meydana gelecek toplam ani oturma miktarı,

$$\sum \delta_e = \delta_{H_1,E_1} + \delta_{(H_1+H_2),E_2} - \delta_{H_1,E_2} = 0.0461 + 0.0320 - 0.0163 = 0.062 \text{ m} = 6.2 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Kilde meydana gelecek nihai konsolidasyon oturması ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 4.15 Dolgu merkezi altında alt bölgede meydana gelen düşey gerilme artışları.

Derinlik z (m)	B_2/z	B_1/z	Tesir Katsayısı (I_p)	Dolgunun Üniform Yüğü σ_v (kN/m ²)	Gerilme Artışı $\Delta\sigma_v = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)
6.85	0.58	1.61	0.470	64	60.16
8.95	0.45	1.23	0.455	64	58.24
11	0.36	1.00	0.430	64	55.04
13	0.31	0.85	0.405	64	51.84
15	0.27	0.73	0.380	64	48.64
17	0.24	0.65	0.360	64	46.08
19	0.21	0.58	0.340	64	43.52

Çizelge 4.16 Dolgu merkezi altında alt bölgede meydana gelecek nihai konsolidasyon oturması.

Derinlik, z (m)	Gerilme Artışı, $\Delta\sigma = 2I_p\sigma$ (kN/m ²)	Sıkışma Modülü, m_v (m ² /kN)	Tabaka Kalınlığı, H (m)	Oturma Miktarı, $S = m_v H \Delta\sigma_v$ (m)
6.85	60.16	1.93×10^{-4}	2.1	0.0244
8.95	58.24	1.93×10^{-4}	2.1	0.0236
11	55.04	6.75×10^{-5}	2.0	0.0074
13	51.84	6.75×10^{-5}	2.0	0.0070
15	48.64	6.75×10^{-5}	2.0	0.0066
17	46.08	6.75×10^{-5}	2.0	0.0062
19	43.52	6.75×10^{-5}	2.0	0.0059
Toplam				0.081

Buna göre kilde alt bölgede meydana gelebilecek toplam oturma,

$$S_{LZ} = S_{i,LZ} + S_{c,LZ} = 6.2 + 8.1 = 14.3 \text{ cm}$$

olarak bulunur. Meydana gelecek toplam oturma (3.2) eşitliğinden;

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} = 0.5 + 14.3 = 14.8 \text{ cm}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.17 Geopier ile iyileştirilmiş zeminlerde kolon çaplarına göre toplam oturma değerleri.

Kolon Çapı (cm)	S_{UZ} (cm)	$S_{i,LZ}$ (cm)	$S_{c,LZ}$ (cm)	S_T (cm)
Φ80	0.50	6.2	8.1	14.8
Φ90	0.48	5.7	8.0	14.2
Φ100	0.43	5.4	7.8	13.6

5. TAŞ KOLON VEYA GEOPIER İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE OTURMA VE TAŞIMA GÜCÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Bu bölümde taş kolonlar ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zeminlerin taşıma gücü ve oturmaları sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis 7.2 programı ile analiz edilerek önceki bölümlerde klasik yöntemlerle hesaplanan değerlerle karşılaştırılacaktır. Önce zeminin iyileştirilmeden önceki davranışı modellenmiş, daha sonra taş kolon ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zeminler modellenerek yük altında davranışları analiz edilmiştir. Aşağıda hesaplamalarda önce kullanılan Plaxis 7.2 programı kısaca tanıtılmış, daha sonra analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

5.1 Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

Program, “Input”, “Output”, “Calculation” ve “Curves” ana başlıkları altında dört bölümden oluşmaktadır. Input kısmında gerekli veriler bilgisayara girilmekte, Calculation komutuyla hesaplamalar yapılmakta, Output komutuyla analiz sonuçları elde edilmekte ve Curves komutu ile istenilen grafikler çizilebilmektedir.

5.1.1 Modelin Oluşturulması (Input)

Programın kullanımı sırasında öncelikle geometrik modelin oluşturulması gereklidir. Geometrik model, gerçek problemi temsil edecek şekilde “Nokta”lar (Point), noktaların birleştirilmesinden oluşan “Çizgi”ler (Line) ve çizgilerin birbirine eklenmesinden meydana gelen “Kapalı Alan”lardan (Cluster) oluşturulur.

Oluşturulan geometrik modelde zemin tabakalarının, yapısal elemanların, yapım aşamalarının ve yüklemelerin tanımlanması gerekir. Model sınırları sonuçların etkilenmeyeceği kadar geniş seçilmelidir. Şekil 5.1’de Plaxis’deki veri giriş penceresi gösterilmiştir.

Plaxis programı ile bir analize başlanırken öncelikle üzerinde çalışılacak projenin genel özelliklerinin verilmesi ve sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 5.1’de gösterilen genel ayarlarda proje ismi, düğüm noktası sayısı ve geometrik sınırlar girilerek analize başlanır.

Plaxis programında kullanılan sonlu elemanlar yönteminde deplasmanlar esas bilinmeyen olarak kabul edilmiştir. Sürekli ortam bir çok elemana ayrılır ve her bir eleman üzerindeki düğüm noktaları iki serbestlik derecesine sahiptir. Plaxis programında sonlu elemanlar ağının oluşturulmasında üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Bu üçgen elemanlar 6 veya 15 düğüm

noktalı olarak seçilebilmektedir. Bunların tercih edilebilecekleri durumlar Çizelge 5.1’ sunulmuştur.

General settings

Project | Dimensions

Project

Filename <NoName>

Directory ...

Title <NoName>

General

Model Plane strain

Elements 6-Node

Comments

Acceleration

Gravity angle : -90° 1.0 G

x-acceleration : 0,000 G

y-acceleration : 0,000 G

Next OK Cancel Help

General settings

Project | Dimensions

Units

Length m

Force kN

Time day

Stress kN/m^2

Weights kN/m^3

Geometry dimensions

Left : 0,000 m

Right : 60,000 m

Bottom : 0,000 m

Top : 30,000 m

Grid

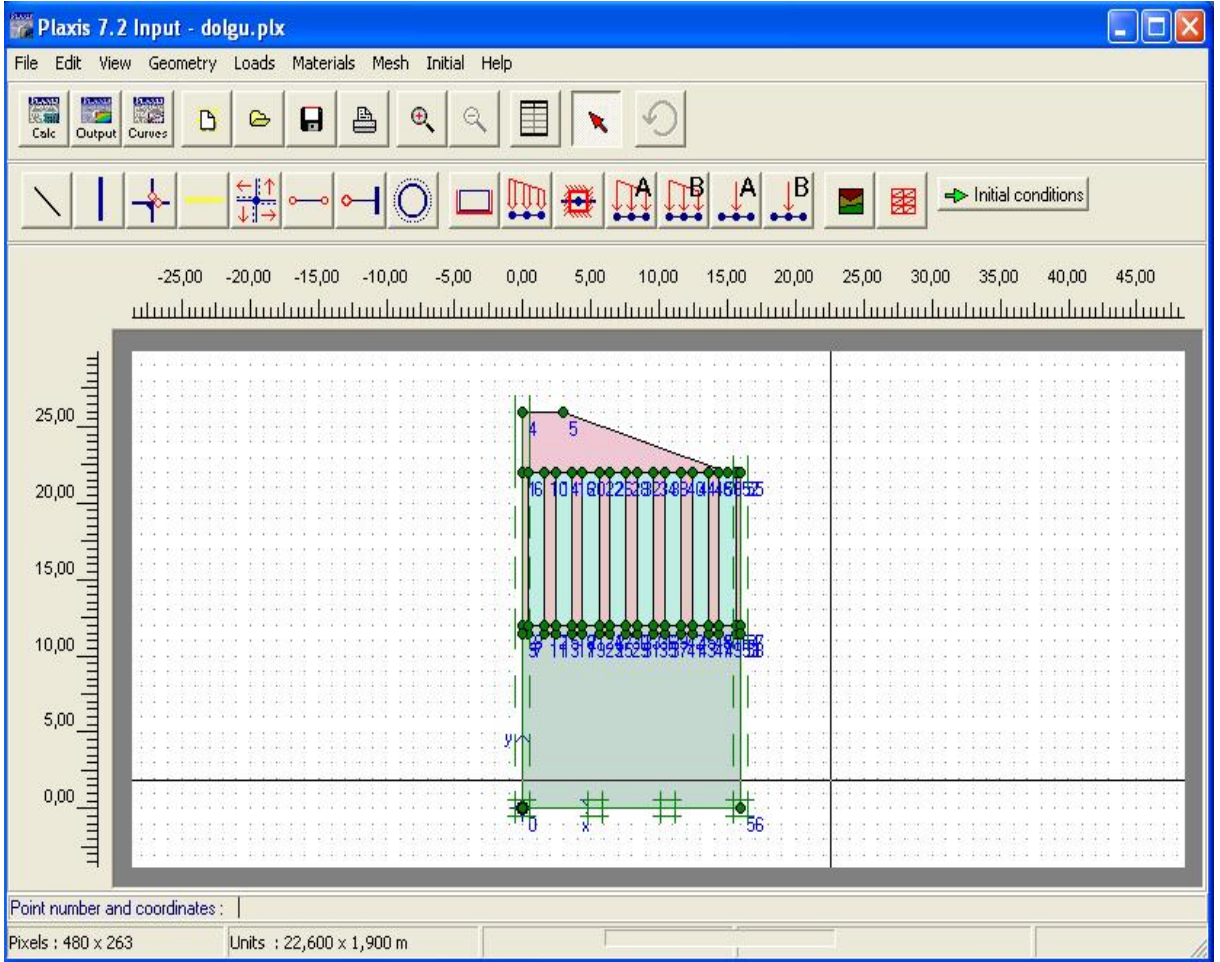
Spacing 1,000 m

Number of intervals 10

Set as default

Next OK Cancel Help

Şekil 5.1 Genel ayarların yapılması.



Şekil 5.2 Plaxis veri giriş penceresi.

Çizelge 5.1 Eleman Tipleri

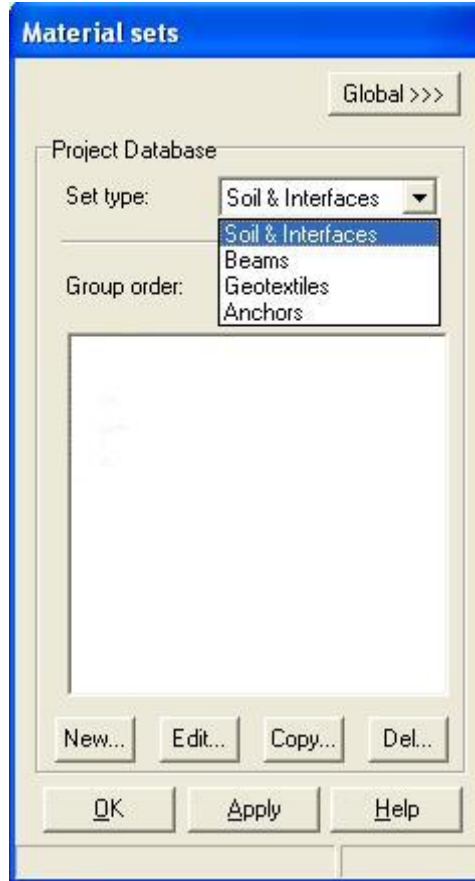
Eleman Tipleri	
6 düğüm Noktalı Üçgen Eleman	15 düğüm Noktalı Üçgen eleman
Servis yükleri	Göçme yükleri ve phi/c reduction analizleri
Düzlem şekil değiştirme	Aksi-simetrik modeller
Hızlı hesap	Daha yavaş hesap

Gerilmelerin ve göçme yüzeylerinin daha doğru hesaplanabilmesi için 15 düğüm noktalı elemanların seçilmesi daha doğru bir yaklaşım olur.

Programın kullanımı sırasında öncelikle geometrinin oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 5.2’de gösterilen çizim alanında “Lines” komutu kullanılarak çizgisel elemanlarla zemin

kesiti çizilir. Tabakalı bir zemin profilinde bu tabakalar yine çizgisel elemanlarla tanımlanır. Geometri girişinde deformasyon problemleri için iki tip sınır koşul bulunmaktadır. Bunlar tanımlı yükler ve tanımlı deplasmanlardır. Prensip olarak tüm sınırlarda her bir yönde tek bir sınır koşulu bulunmalıdır. Tanımlı deplasmanlar sınır koşulu, yani standart fixities durumunda, kenarlarda $u_x=0$, $u_y=serbest$; en altta ise $u_x=u_y=0$ olarak alınır.

Geometrinin oluşturulmasından sonra projedeki zeminin ve yapısal elemanların özellikleri girilir. Şekil 5.3’de görüldüğü üzere malzeme özellikleri dört ana kategoriye ayrılmıştır.

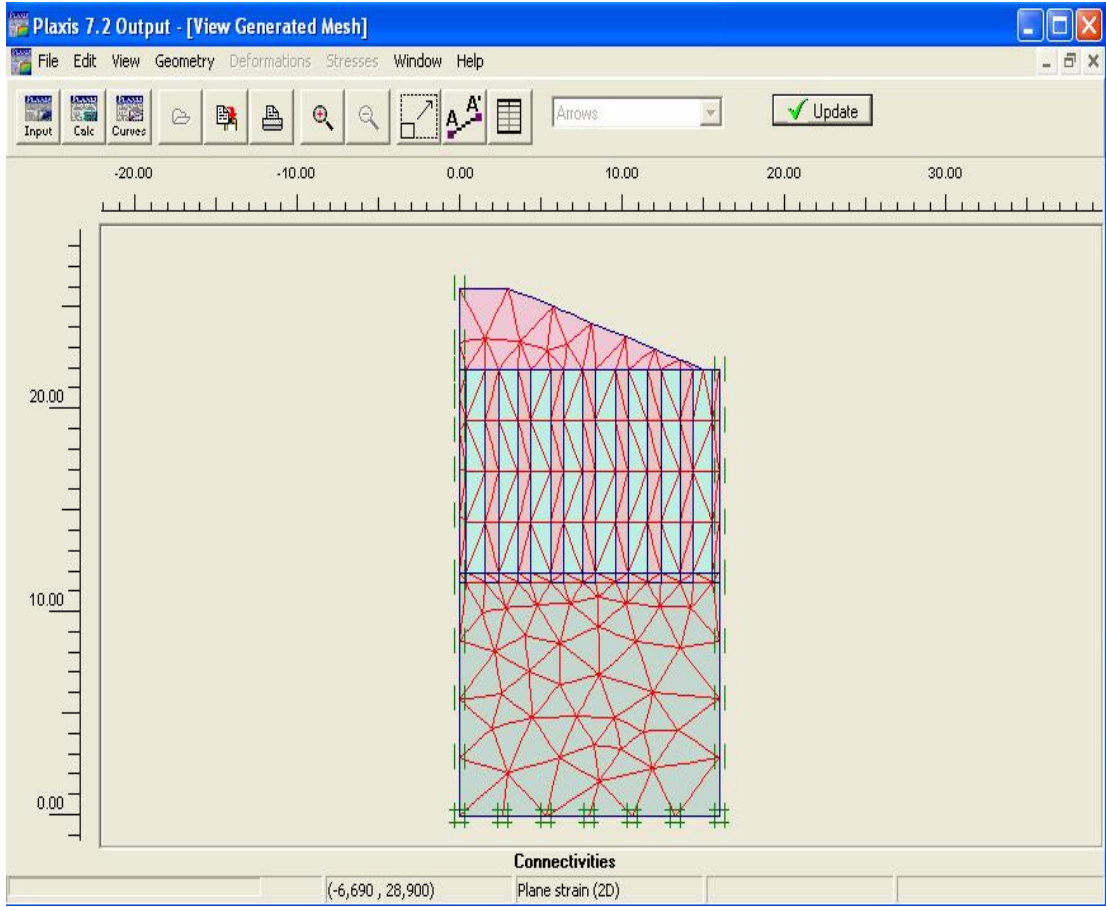


Şekil 5.3 Malzeme özellikleri menüsü.

Zemin ve malzeme özellikleri girildikten sonra “Mesh” komutu ile Şekil 5.4’deki gibi sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Programın normal işleyişinde sonlu elemanlar ağı çok ince olarak oluşturulmaz, ancak istenildiği takdirde sıklaştırılmak istenilen kısım seçilerek “Mesh” menüsünden uygun olan “Refine” komutu kullanılabilir.

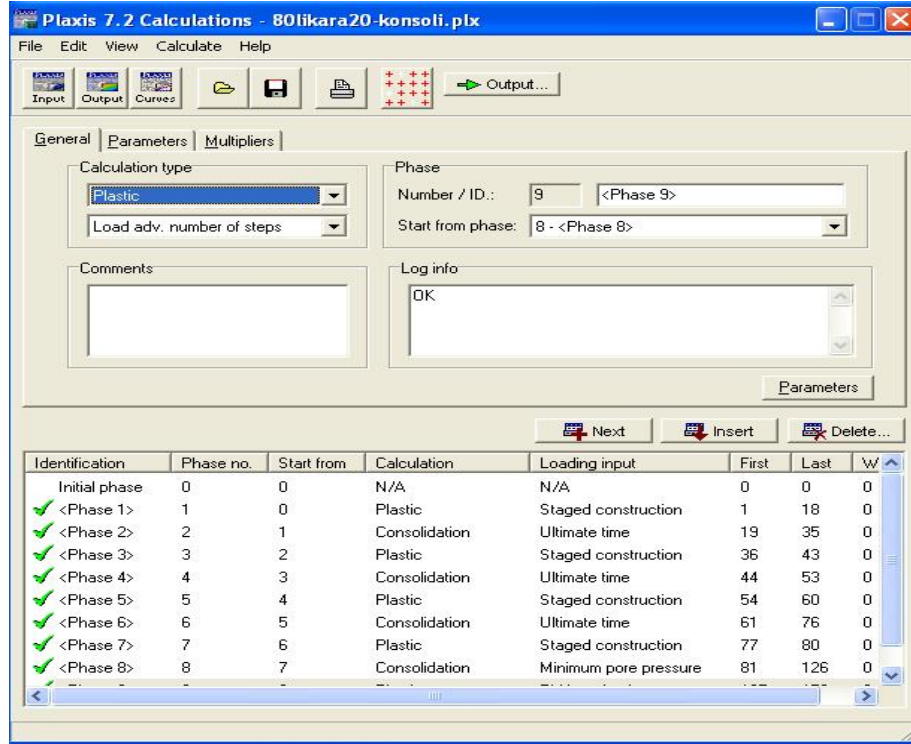
Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra programda başlangıç koşullarının tanımlanması gerekir. Bunun için programda “Initial condition” kısmı seçilir. Burada varsa yer altı su seviyesi ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncı hesaplanır. Daha sonra zemin ilk durumuna getirilerek efektif gerilmeler belirlenir.

Bu adımdan sonra Şekil 5.5’de görülen “Calculation” safhasına geçilerek hesaplamalara başlanır. Bu aşamada kademeli inşaat yapılması durumunda “Staged construction”, tekil ya da yayılı yük tanımlanması durumunda ise “Total multipliers” komutuyla işlem yapılır. Tüm adımların belirlenmesinden sonra “Calculate” komutuyla hesaplamalar yaptırılır ve “Output” komutuyla elde edilen sonuçlara ulaşılır. İstenildiği takdirde “Curves” komutuyla istenilen grafikler çizilerek karşılaştırmalar yapılabilir.



Şekil 5.4 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş zemin.

Programda zemin özelliklerini belirlemek amacıyla Mohr-Coulomb (MC), Hardening Soil Model, Soft Soil Creep Model (SSC) ve Linear Elastik Model olmak üzere dört farklı zemin modeli kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında Mohr-Coulomb modelinden yararlanıldığı için Mohr-Coulomb modeli parametrelerinden bahsedilecektir.



Şekil 5.5 Hesaplama adımlarının belirlenmesi ve hesaplamanın yapılması

5.1.2 Mohr-Coulomb Modelin Temel Kavramları

Bu modelde kullanılan temel kavramlar Poisson oranı (ν), (efektif) kohezyon (c'), (efektif) içsel sürtünme açısı (ϕ'), zeminin kuru ve doğal birim hacim ağırlıkları (γ_k ve γ_s), yatay ve düşey permeabilite katsayıları (k_x, k_y), Young modülü (E) ve dilatans (genleşme) açısından (ψ) oluşur.

Mohr-Coulomb Modeli olası durumları ve avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Basit ve açık bir modeldir.
- Genelde zemin davranışı için birinci mertebe yaklaşımı göz önüne alınır.
- Çoğu pratik programa uygulanabilir.
- Sınırlı sayıda ve açık parametreler ile çalışılır.
- Göçme davranışını iyi temsil eder.
- Dilatans ihtiva edebilir.

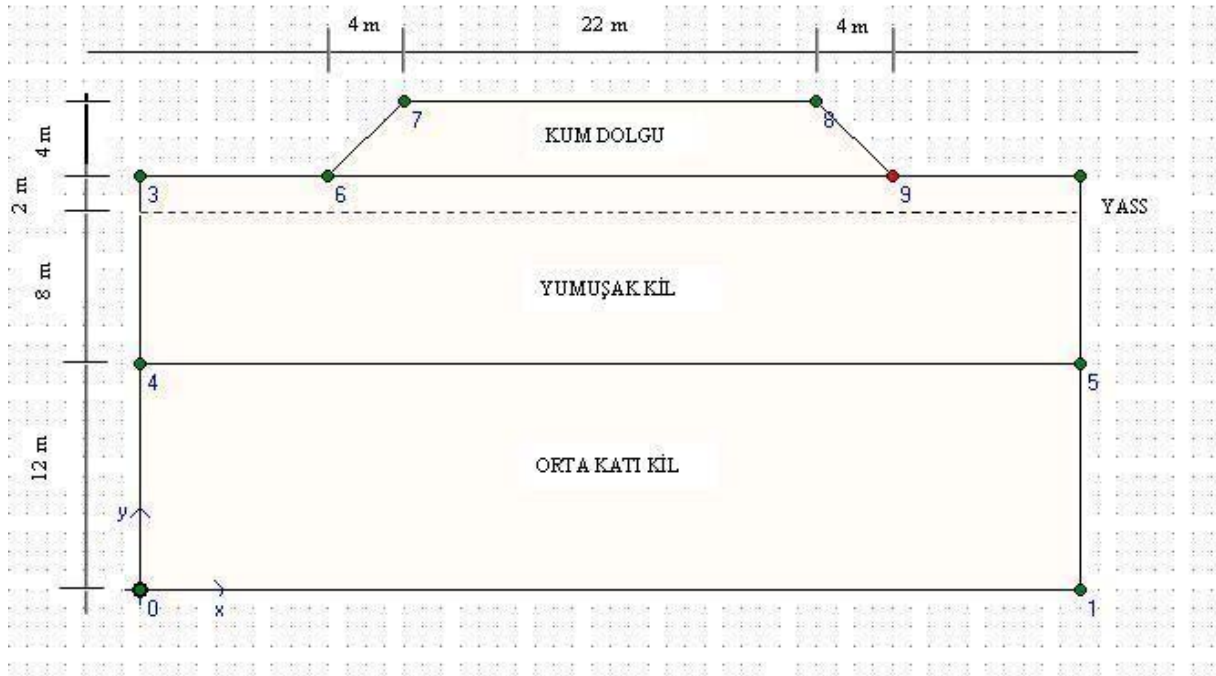
Mohr-Coulomb Modeli olası durumları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İzotrop ve homojen davranış göz önüne alınır.
- Göçmeye kadar lineer elastik davranış yaptığı kabul edilir.
- Rijitlik gerilmeden bağımsızdır.
- Ön yükleme ve boşaltma veya yeniden yükleme arasında ayırım yoktur.
- Dilatans süreklidir. Bu nedenle kritik boşluk oranı yoktur.
- Drenajsız davranış her zaman gerçekçi değildir.

5.2 Plaxis İle Oturma ve Taşıma Gücü Hesabı

Şekil 5.6'da gösterilen, daha önce oturma ve taşıma gücü hesapları literatürde yeralan hesap yöntemleri ile yapılan, yumuşak ve orta katı kil tabakalarından oluşan iyileştirilmemiş zemin üzerine dolgu yapıldıktan sonra, zeminin göstereceği davranış Plaxis sonlu elemanlar programı yardımı ile modellenmiş ve bu modele göre oturma ve taşıma gücü değerleri belirlenmiştir.

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere 10 m genişlikte ve 4 m yükseklikteki kum dolgu, geçirimsiz kaya üzerinde yeralan 12 m kalınlığında orta katı kil ve onun üzerinde yeralan 10 m kalınlığında yumuşak kil zeminden oluşan toplam kalınlığı 22 m olan zemin tabakası üzerine oturtulmaktadır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinin 2 m altındadır.



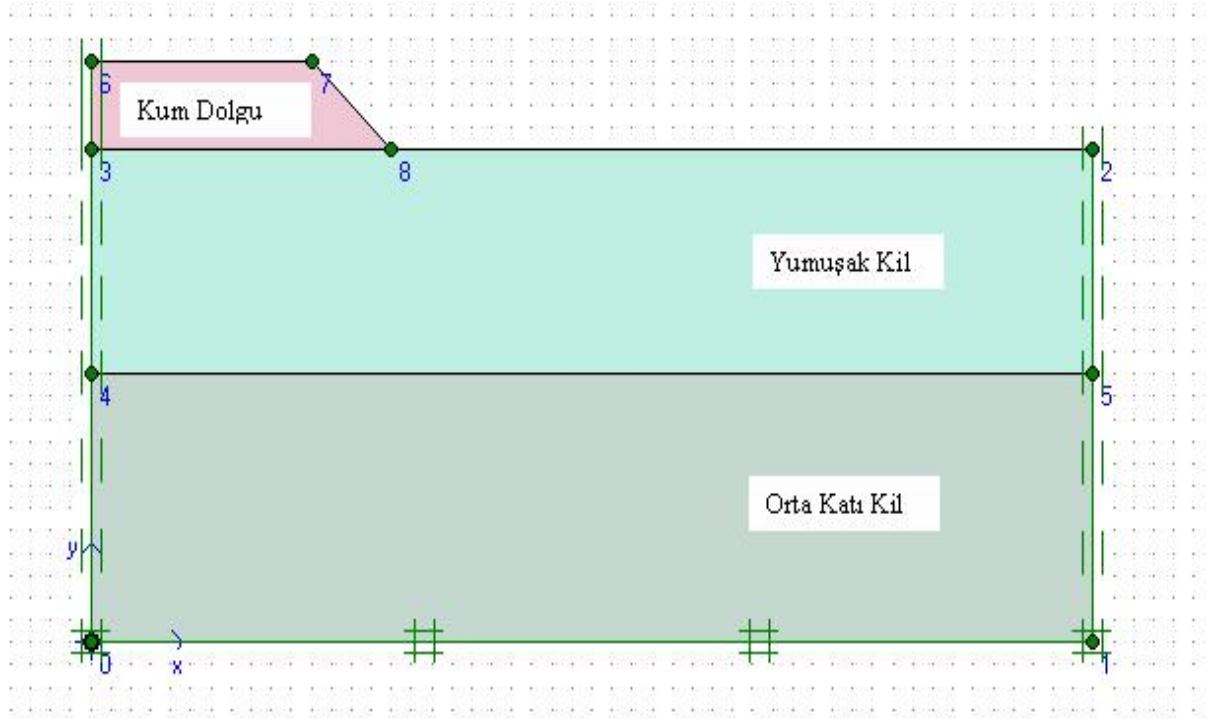
Şekil 5.6 Zemin kesiti ve 4 m'lik kum dolgu.

Çizelge 5.2'de verilen zemin parametrelerinden de anlaşılacağı üzere incelenen zemin çok yumuşak kohezyonlu bir zemin olup taşıma gücü oldukça düşüktür. Bu nedenle kum dolgu uygulanmadan önce zeminde taş kolon ve bir taş kolon çeşidi olan geopier kolon uygulaması ile iyileştirme yapılması düşünülen bu zemin profili, iyileştirme öncesi ve sonrası ayrı ayrı modellenerek analiz edilmiş ve araştırılmıştır. Dolgu ile birlikte zemin profilindeki simetri göz önüne alınarak analizler sırasında zemin profilinin yarısı modellenmiştir. Plaxiste modelleme yapılırken genişlik en az dolgu yüksekliğinin üç veya dört katı, derinlik ise en az dolgu yüksekliğinin 2 katı olacak şekilde seçilmelidir.

Çizelge 5.2 Uygulamada kullanılan zemin malzemesinin parametreleri

Parametreler	Yumuşak Kil Zemin	Orta Katı Kil Zemin	Kum Dolgu	Taş Kolon	Geopier Kolon
Malzeme Modeli	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Lineer Elastik	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
Drenaj Durumu	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlığı, γ_k (kN/m ³)	16	17	16	21	21
Suya Doymun Birim Hacim Ağırlığı, γ_d (kN/m ³)	19	20	20	23	23
Yatay Permeabilite, k_x (m/gün)	0,0001	0,0001	10	100	100
Düşey Permeabilite, k_y (m/gün)	0,0001	0,0001	10	100	100
Elastisite Modülü, E (kN/m ²)	3500	10000	20000	75000	100000
Kohezyon, c (kN/m ²)	2	10	1	0.5	4
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	24	28	38	40	47
Poisson Oranı	0.33	0.33	0.25	0.25	0.25
Drenajsız Durumda Elastisite Modülü, E_u (kN/m ²)	4000	11280	-	-	-
Drenajsız Kesme Dayanımı, s_u (kN/m ²)	30	60	-	-	-
Drenajsız Durumda Poisson Oranı	0.495	0.495	-	-	-
Genleşme Açısı, ψ (°)	-	-	-	6	12

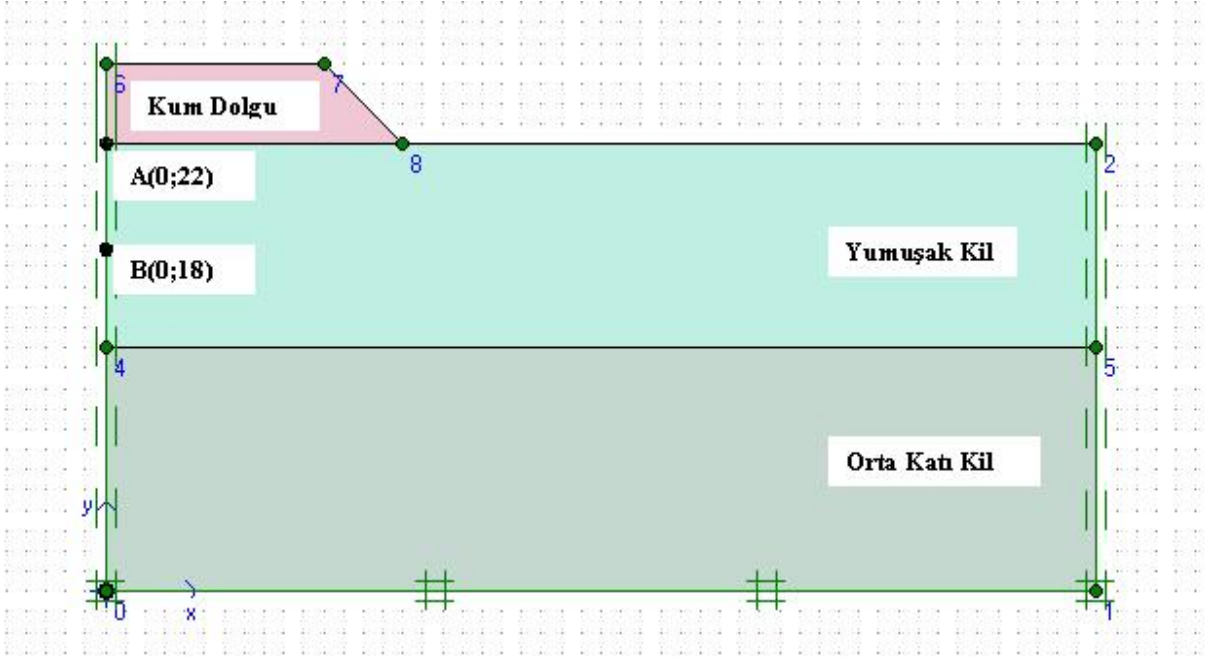
Şekil 5.7'de görüleceği üzere sınır koşulu olarak kenarlarda yatay yönde, tabanda ise düşey ve yatay yönde harekete izin verilmemiştir.



Şekil 5.7 4 m'lik kum dolgu ve kil zeminin sınır koşulları

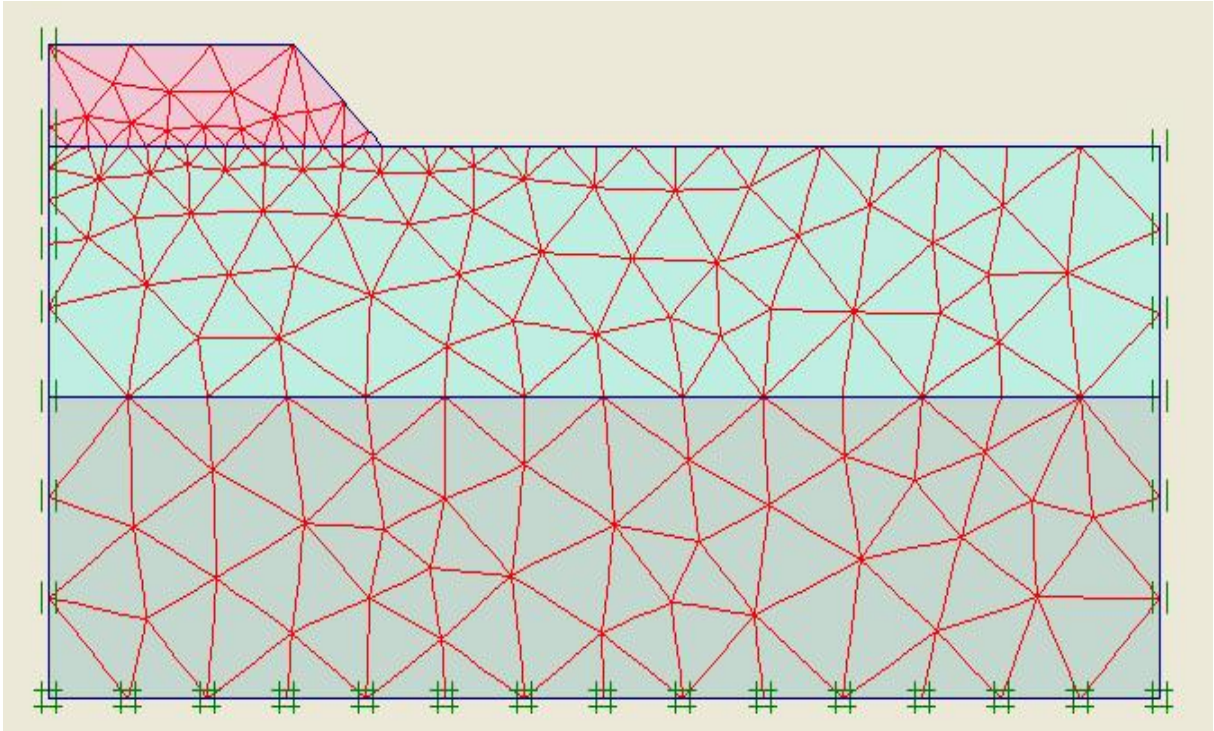
5.2.1 İyileştirme Yapılmamış Dolgu Temel Zemininin Davranışı

Arazide yumuşak ve orta katı kil tabakalarından oluşan zeminin dolgu altındaki davranışını incelemek için Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak Plaxis sonlu elemanlar programı ile bir model oluşturulmuştur. Kum dolgunun Şekil 5.8'de görüldüğü gibi kil tabakaları üzerine inşa edilmesi durumu için Plaxis ile gerçekleştirilen nümerik analizler, klasik yöntemler ile uyumlu olması amacıyla iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada 4 m'lik dolgu temel zemini üzerine yerleştirilerek gerilme-şekil değiştirme analizi yapılmış ve zemin tabakalarında dolgu yüklemesinden kaynaklanan artık boşluk suyu basınçları hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise iki boyutlu konsolidasyon analizi yapılarak boşluk suyu basıncının zamana bağlı sönümlenmesi ve oluşan şekil değiştirmeler belirlenmiştir.



Şekil 5.8 4 m'lik kum dolgunun kil tabakaları üzerine oturtulması.

Sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları Şekil 5.9'da gösterilmiş, gerçekleştirilen analizler sonucunda dolgu merkezi altında oluşması hesaplanan ani oturma ve konsolidasyon oturması değerleri Çizelge 5.3'de özetlenmiştir.

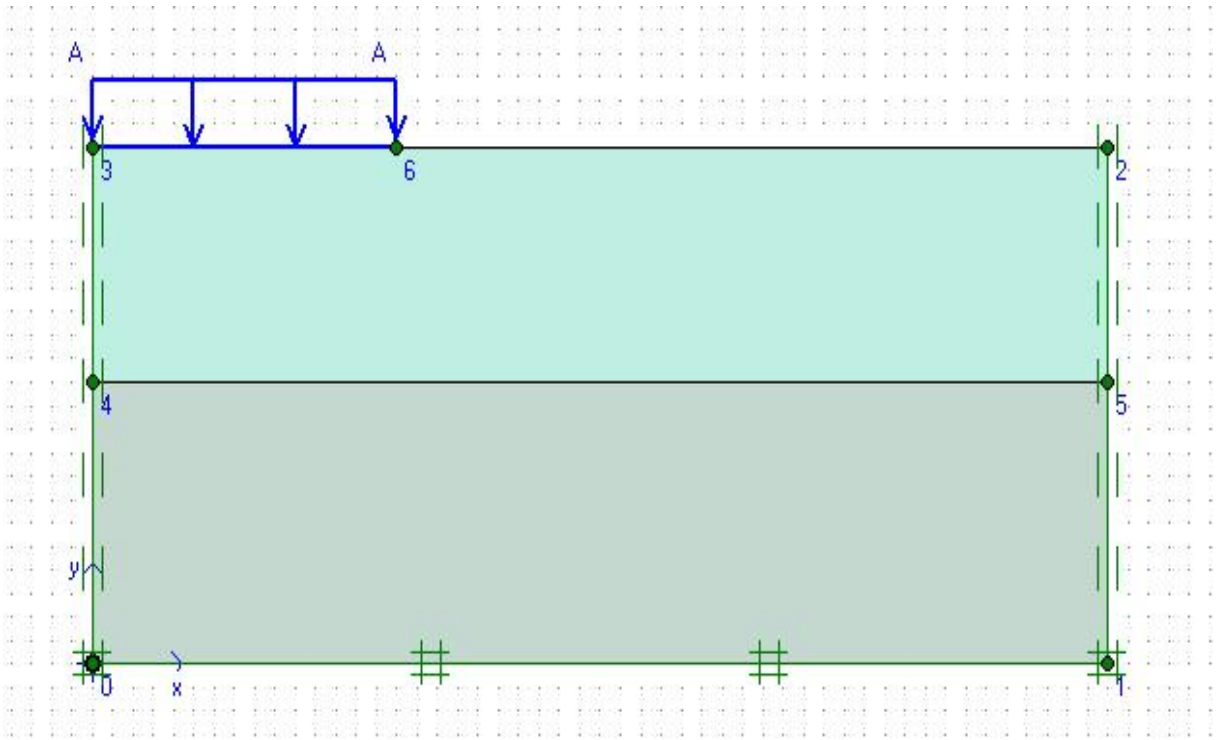


Şekil 5.9 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş 4 m'lik kum dolgu ile temel zemini sınır koşulları.

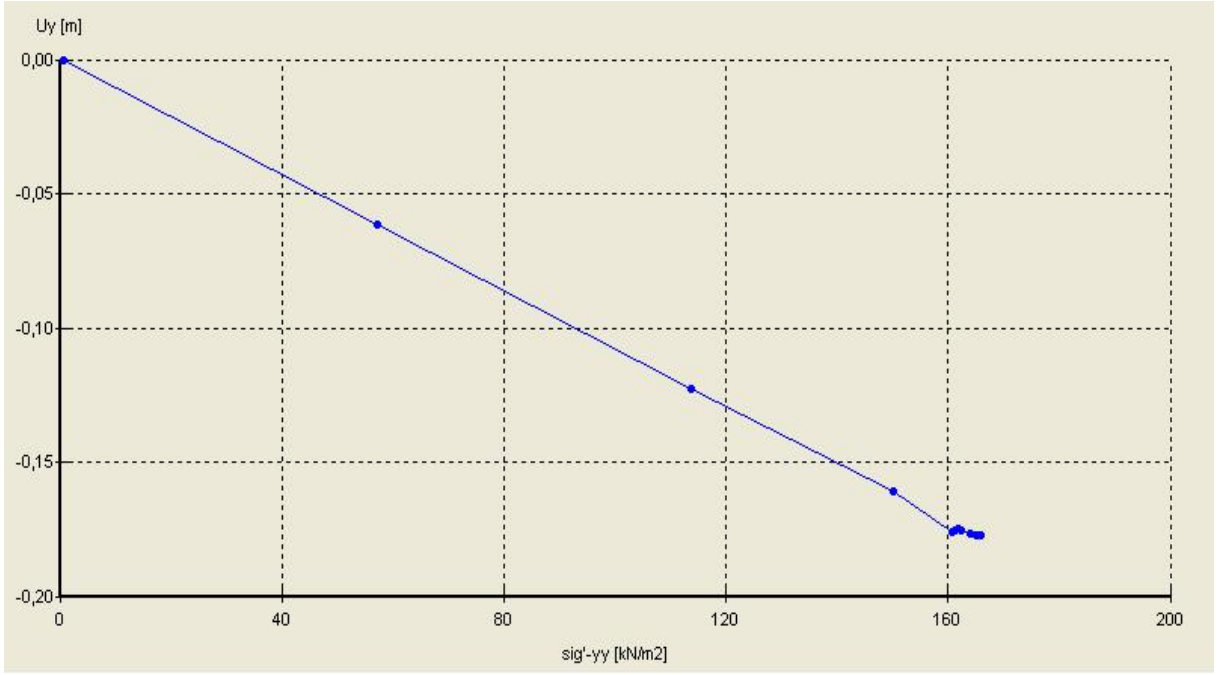
Çizelge 5.3 Analiz sonucunda dolgu merkezi altında hesaplanan ani ve konsolidasyon oturması değerleri.

Ani Oturma (cm)	10.8
Konsolidasyon Oturması (cm)	10.5
Toplam Oturma (cm)	21.3

Diğer yandan killi temel zemini tabakalarının taşıma gücü değerini belirlemek için, sonlu elemanlar modeli üzerinde zemin göçmeye ulaşmaya kadar yüklenerek taşıma gücü belirlenmiştir. Yük Şekil 5.10’da gösterildiği gibi zemin yüzeyinde üniform olarak yüklenmiştir. Şekil 5.11’de gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen düşey gerilme-oturma eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.10 İyileştirilmemiş killi zemin tabakalarının taşıma gücünün belirlenmesi.



Şekil 5.11 Temel zemini tabakalarının taşıma gücünün belirlenmesi için zeminin yüklenmesi sonucu oluşan düşey gerilme-oturma eğrisi.

Bu eğriden elde edilen nihai taşıma gücü değeri;

$$q_{ult} = 166 \text{ kN/m}^2$$

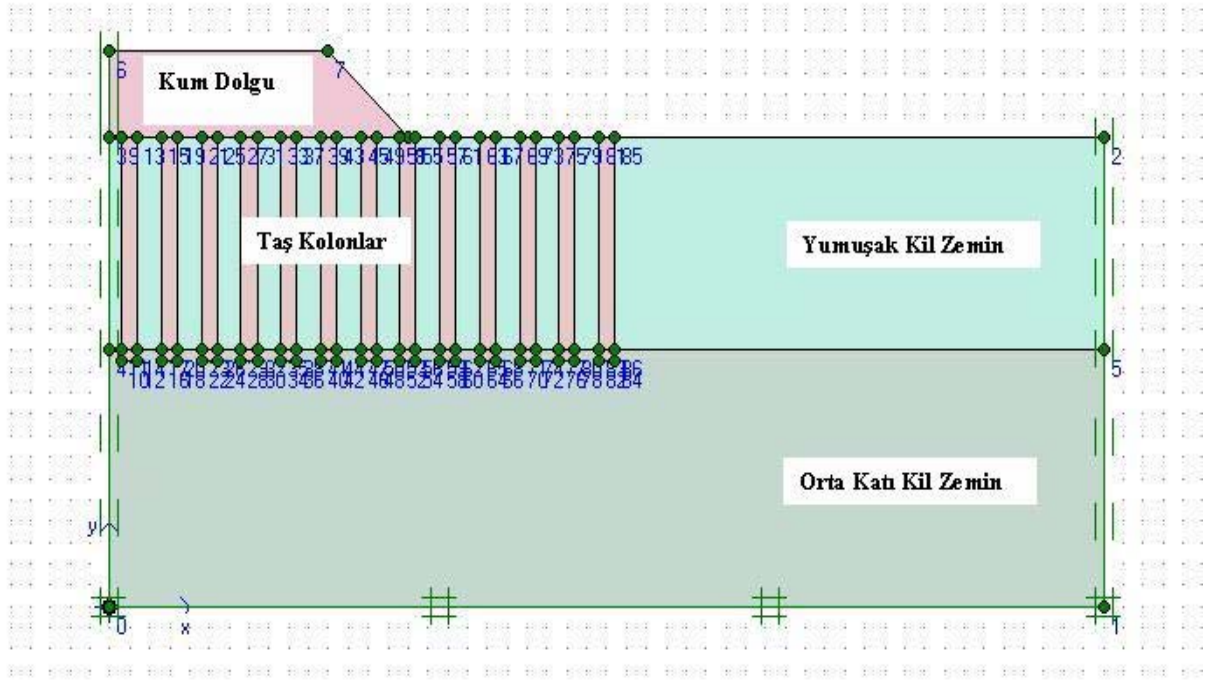
olarak bulunmuştur. Bu analizlerde kil zeminde drenaj olmayacağı düşünülerek temel zemini tabakaları için drenajsız parametreler kullanılmıştır.

5.2.2 Taş Kolon İle İyileştirilmiş Dolgu Temel Zemininin Davranışı

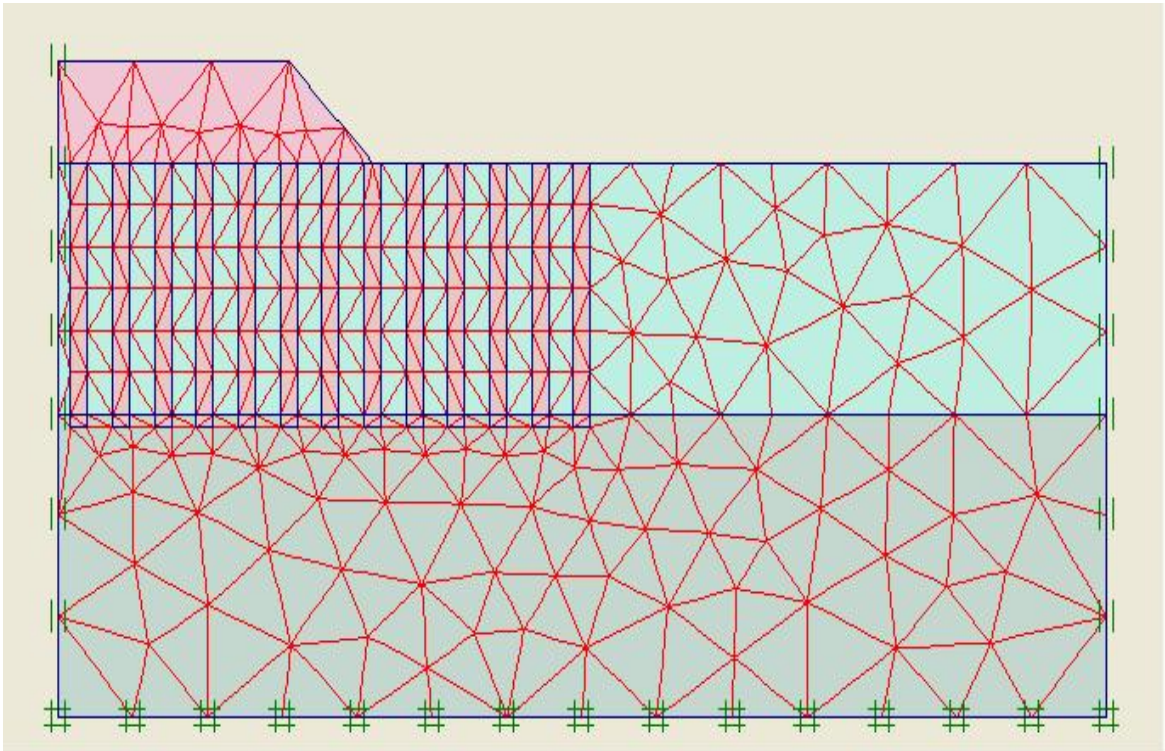
Daha önce analiz edilen iyileştirilmemiş dolgu temel zemininin taş kolonlar ile iyileştirildikten sonra dolgu altındaki davranışını incelemek için Plaxis sonlu elemanlar programı ile bir model oluşturulmuştur. Taş kolonların 2 m ara ile yerleştirildiği zemin üzerinde kum dolgunun Şekil 5.12'deki gibi inşa edildiği kabul edilmiştir. Plaxis ile yapılan analizlerde önce taş kolonların inşa edildiği kabulü yapılarak analizlere başlanmıştır. Daha önceki gibi analiz iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada dolgu yükü altında ani oturmalar ve boşluk suyu basıncındaki artışlar, ikinci aşamada ise boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve oluşan şekil değiştirmeler hesaplanmıştır.

Taş kolon uygulanan zemin için oluşturulan sonlu elemanlar ağı ve uygulanan sınır koşulları Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Taş kolonlar imal edilirken zemine yer değiştirttiği için sükunetteki toprak basıncı K_0 , taş kolonlarda ve yumuşak kil zeminde bire eşit olarak alınmış ve analizler ona göre yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda farklı çaplarda taş

kolonlar kullanılarak iyileştirilmiş zeminde dolgu merkezi altında hesaplanan ani ve konsolidasyon oturması değerleri Çizelge 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.12 80 cm çapındaki taş kolonlar ile iyileştirilmiş temel zemini.

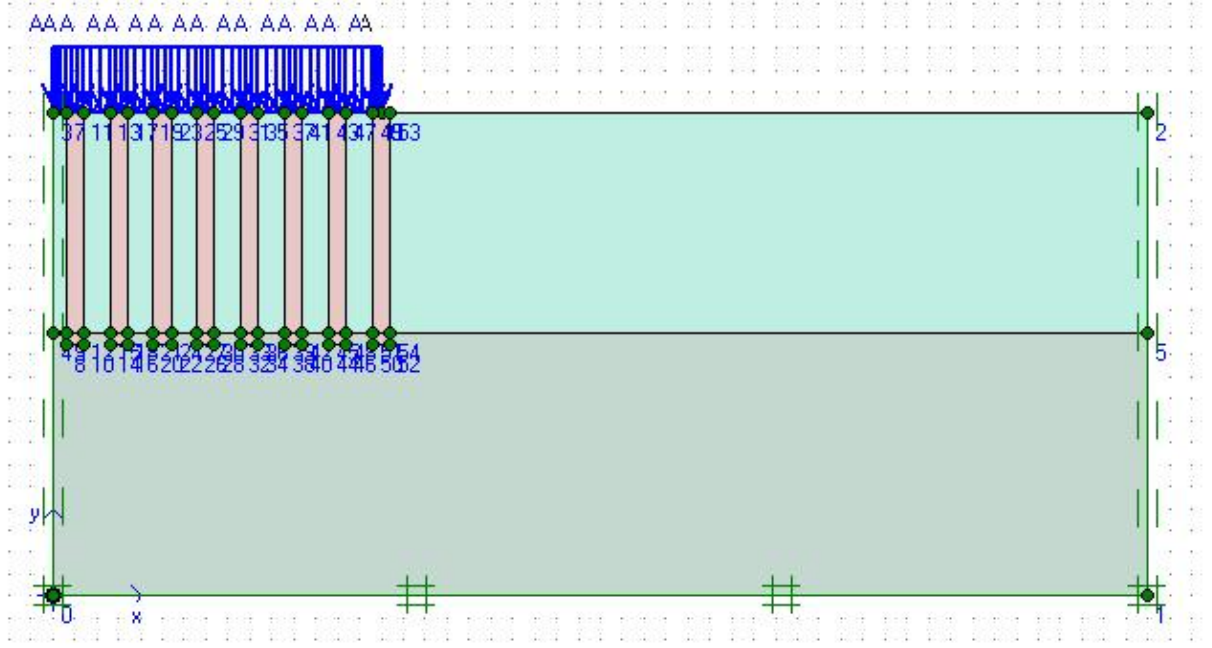


Şekil 5.13 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş temel zemini ve 4 m'lik kum dolgunun sınır koşulları.

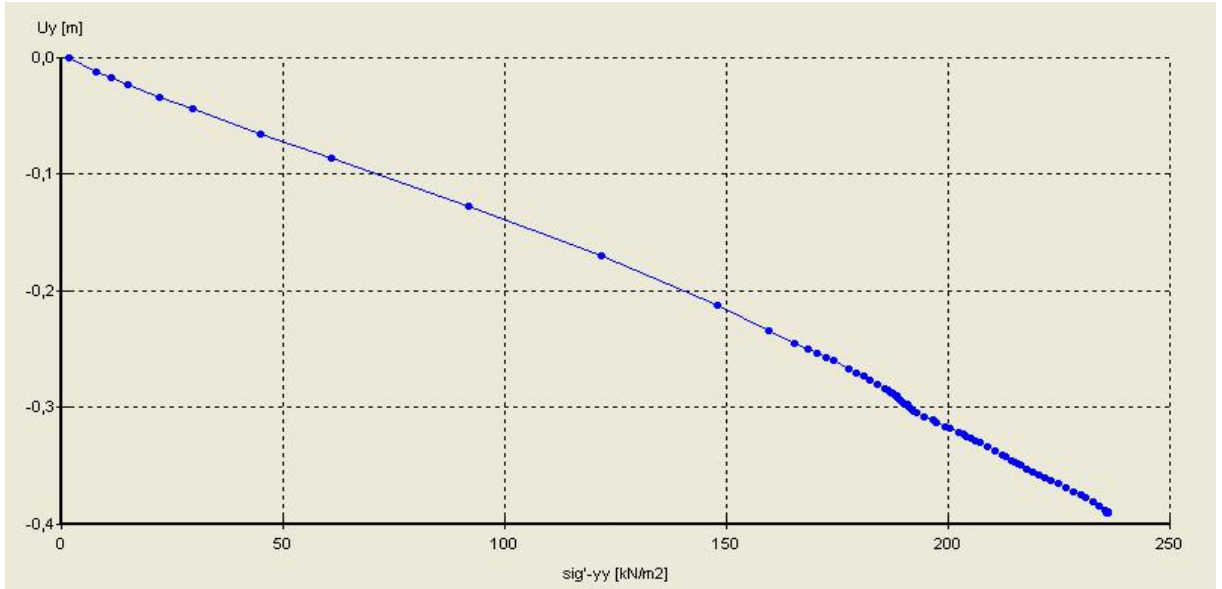
Çizelge 5.4 Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zemin için dolgu merkezi altında hesaplanan ani ve konsolidasyon oturması değerleri.

	$\phi 80$	$\phi 90$	$\phi 100$
Ani Oturma (cm)	5.7	5.5	5.4
Konsolidasyon Oturması (cm)	3.4	3.2	3.1
Toplam Oturma (cm)	9.1	8.7	8.5

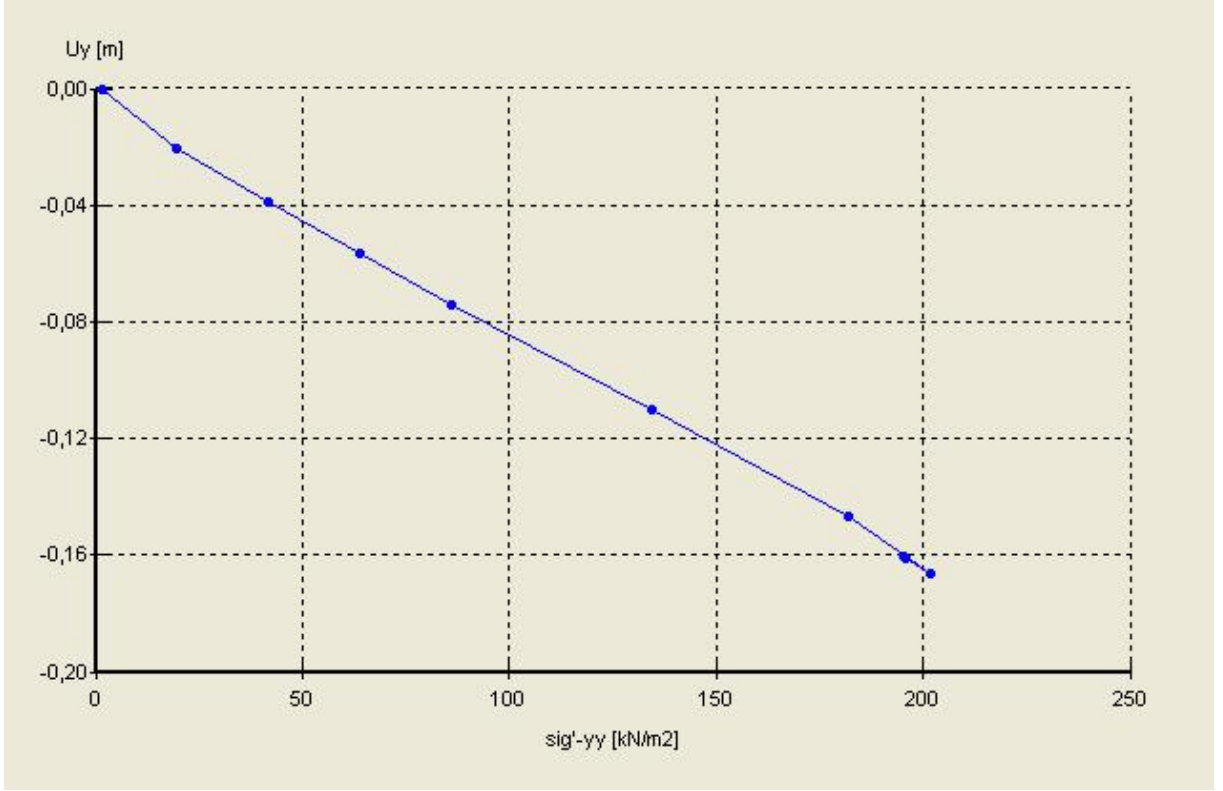
Taş kolonlar ile iyileştirilmiş temel zemininin taşıma gücünü belirlemek için sonlu elemanlar modeli üzerinde taş kolon ile iyileştirilmiş zemin göçmeye ulaşınca kadar yüklenerek, zeminin drenajlı ve drenajsız durumda taşıma gücü belirlenmiştir. Yük Şekil 5.14’de gösterildiği gibi taş kolonlar ile iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform olarak uygulanmıştır. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da gerçekleştirilen analiz sonucunda, drenajlı ve drenajsız durumda, 80 cm’lik kolonlar ile iyileştirilmiş zemin için hesaplanan düşey gerilme-oturma eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 ise, 80 cm çaplı taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde dolgu merkezi altında bir taş kolonun, sırası ile, drenajlı ve drenajsız durumlar için hesaplanan düşey yük-düşey yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Taş kolonlar ile aralarındaki zeminin aynı miktarda düşey yerdeğiştirme gösterdiği gözlenmektedir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de sırası ile, drenajlı ve drenajsız yüklenme durumları için farklı çaplarda taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için elde edilen düşey gerilme-oturma eğrileri gösterilmiştir. Kolon çapları arttıkça iyileştirilmiş zeminin taşıma gücünün bir miktar arttığı gözlemlenmektedir.



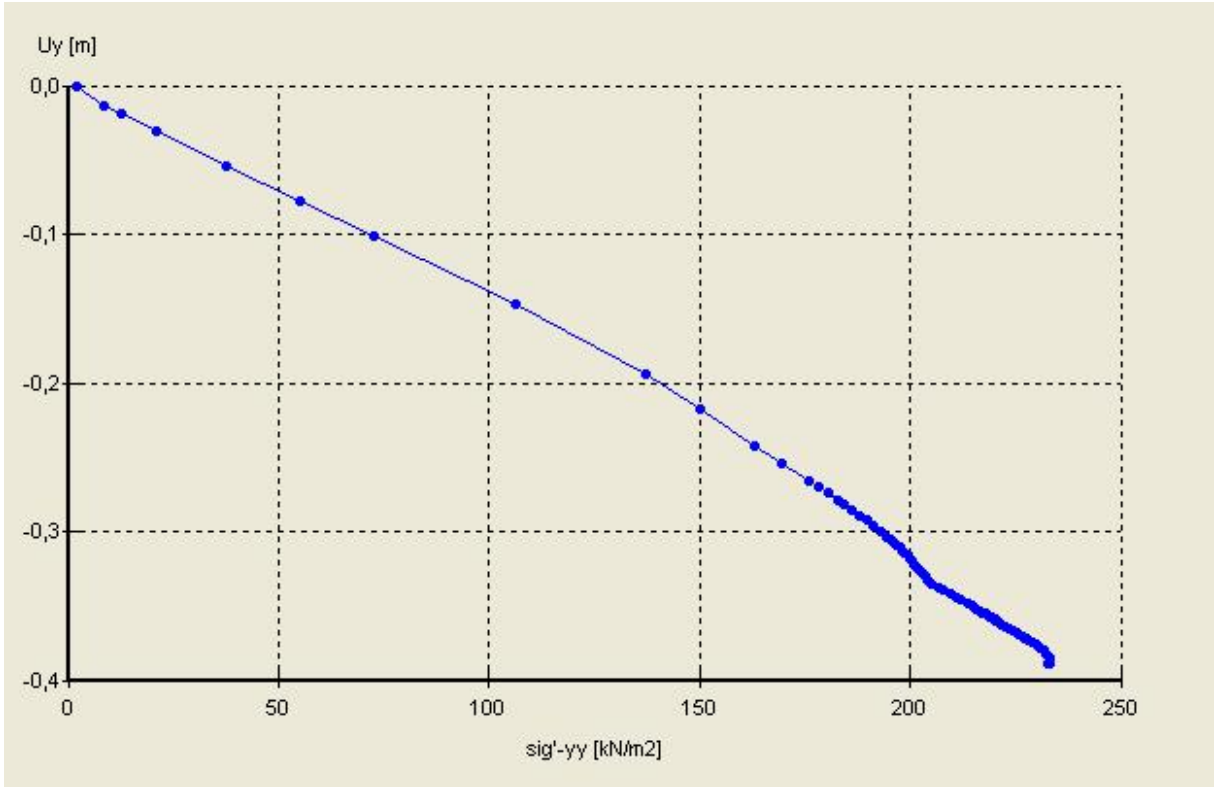
Şekil 5.14 Taş kolonlar ile iyileştirilmiş kil zeminin taşıma gücünün belirlenmesi.



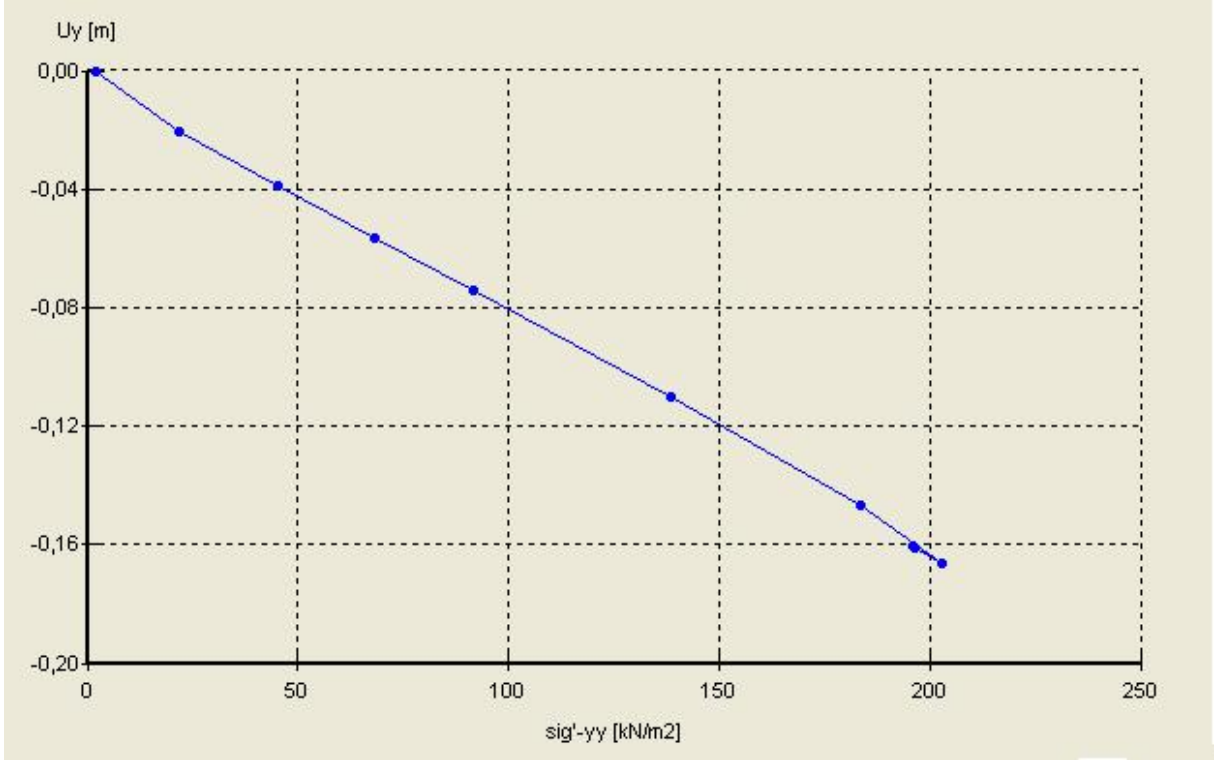
Şekil 5.15 Taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



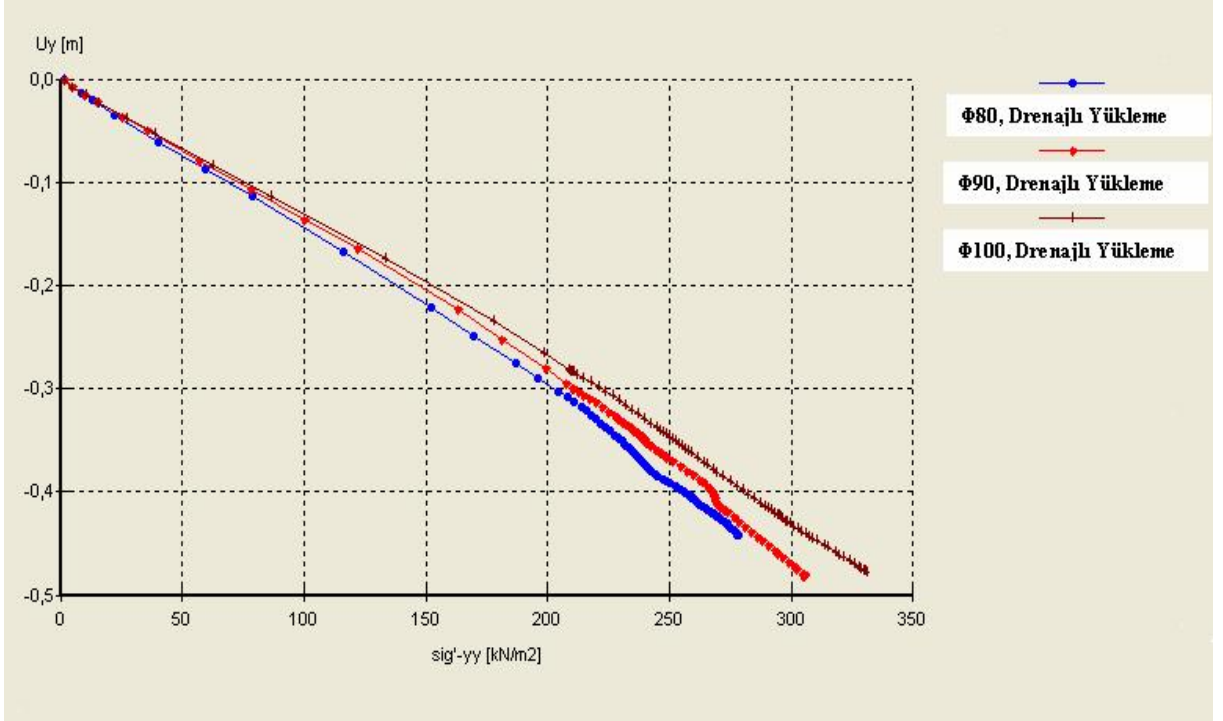
Şekil 5.16 Taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



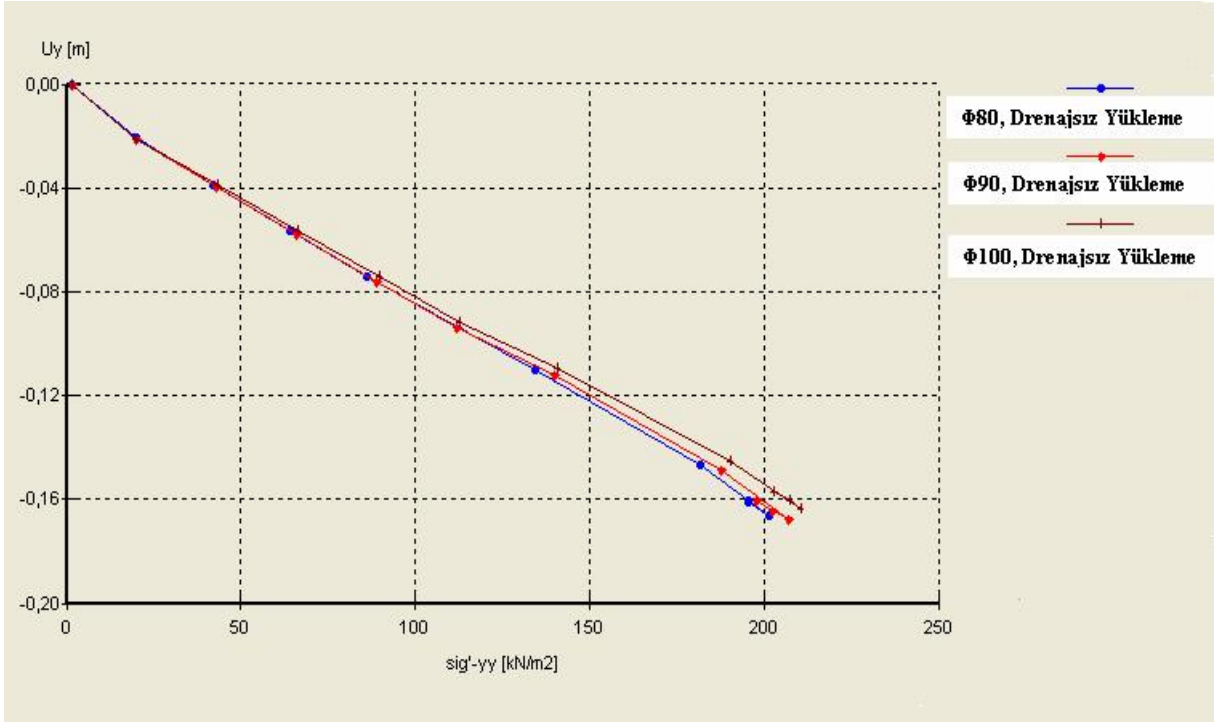
Şekil 5.17 Grup kolonlarda zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için dolgu merkezi altında taş kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.18 Grup kolonlarda zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için dolgu merkezi altında taş kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

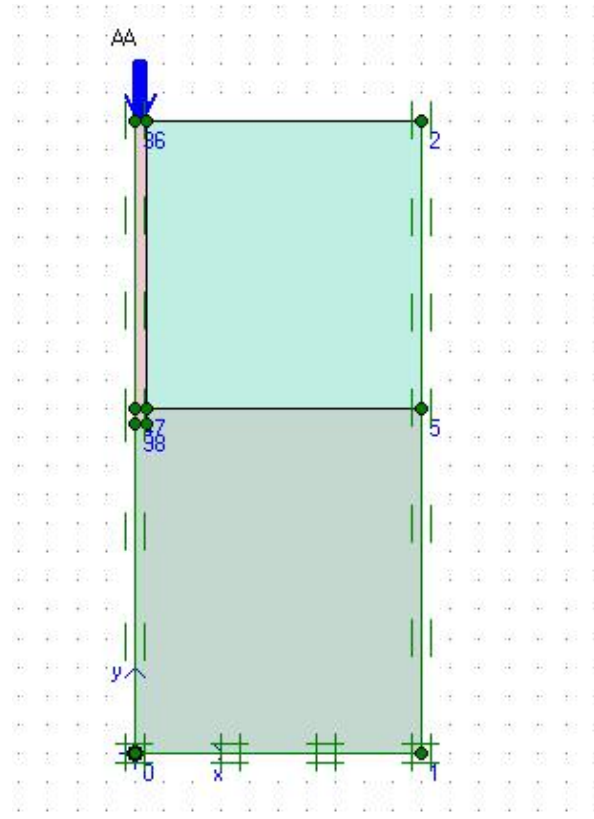


Şekil 5.19 Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajlı durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

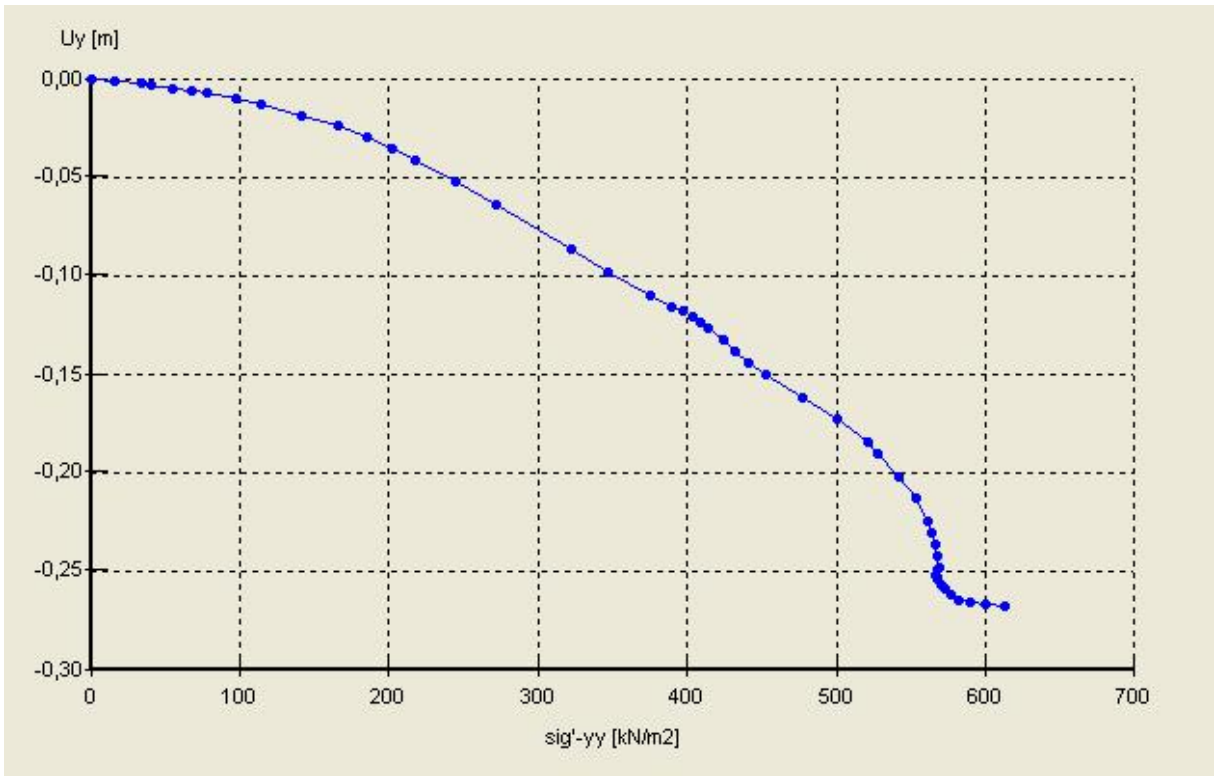


Şekil 5.20 Farklı çaplarda taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajsız durum için dolgu merkezi altında zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

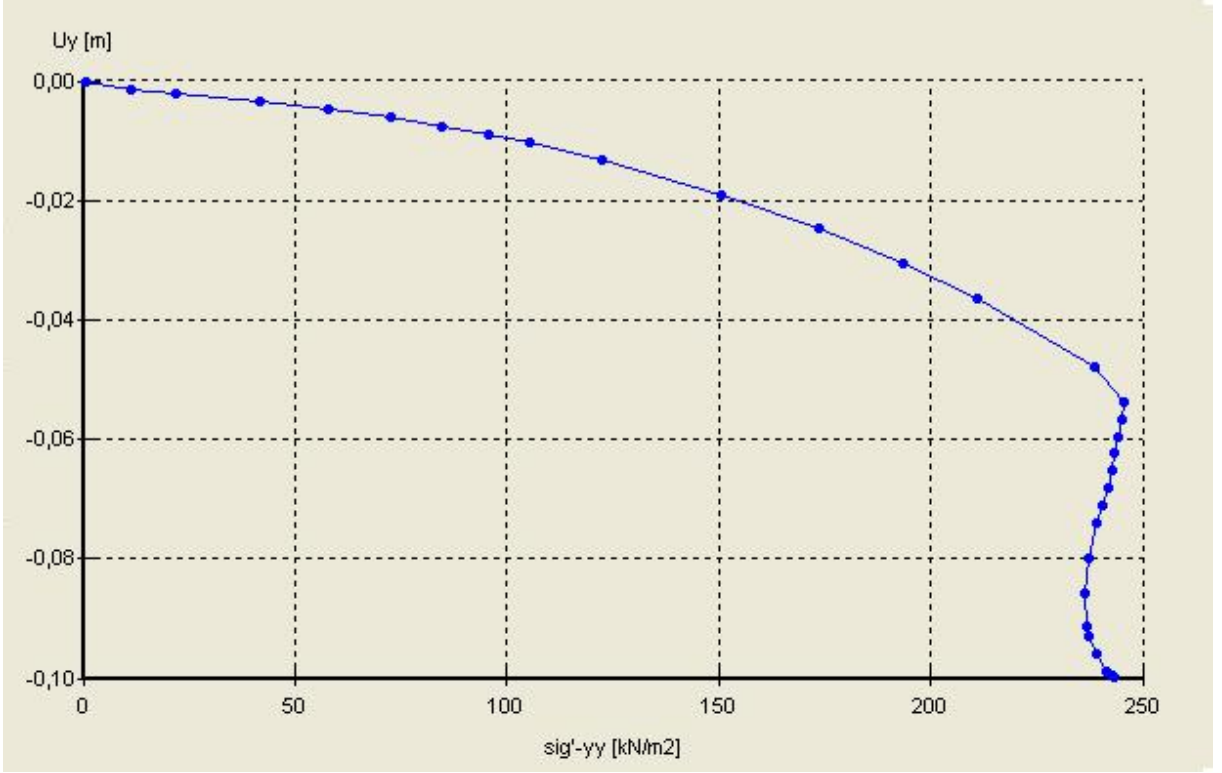
Ayrıca tekil kolonun davranışını belirlemek için Şekil 5.21'de görüldüğü gibi tek bir taş kolon ve içinde yer aldığı zemin tabakaları aksisimetrik olarak modellenmiştir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'de 80 cm çapındaki kolon için yük altında drenajlı ve drenajsız durumda hesaplanan yük deplasman eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'de ise farklı çaplarda kolonlar için drenajlı ve drenajsız yüklenme durumlarında hesaplanan düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda düşey yük-düşey yerdeğiştirme eğrisinden elde edilen nihai taşıma gücü değerleri Çizelge 5.5'de özetlenmiştir.



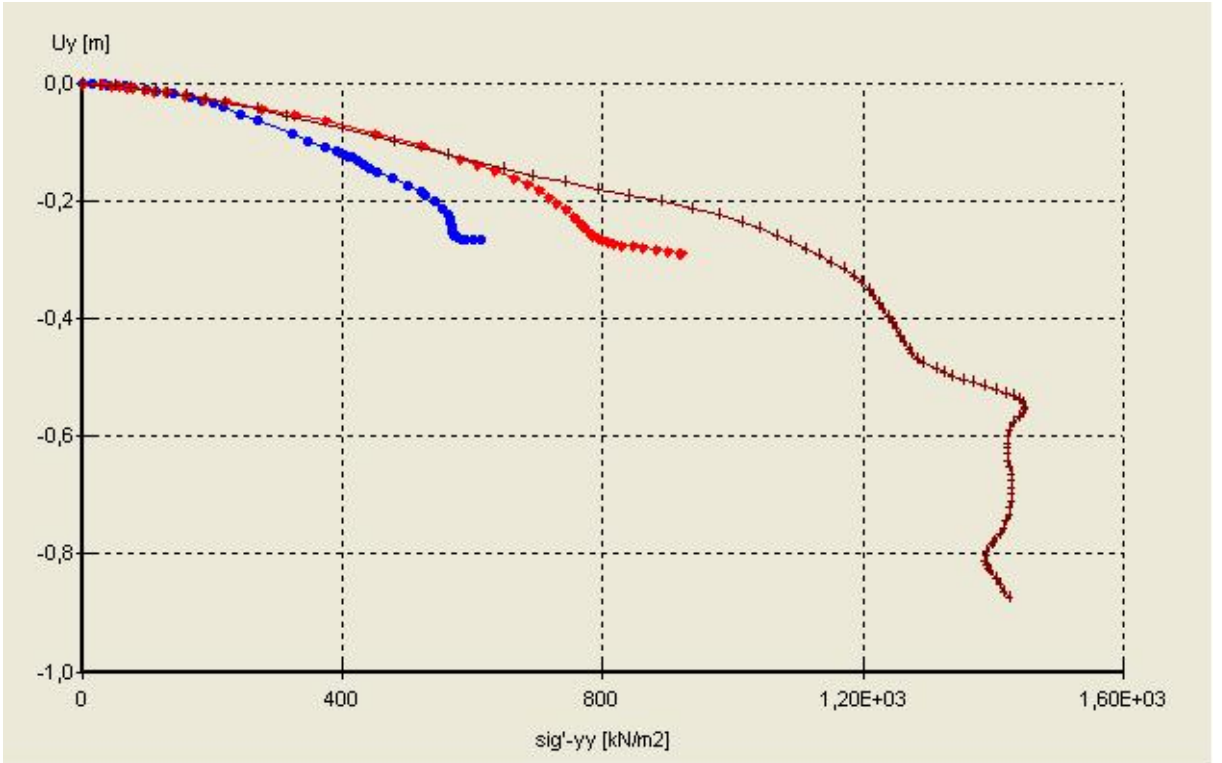
Şekil 5.21 Tek bir taş kolon ve içinde yer aldığı zemin tabakalarının aksisimetrik olarak modellenmesi



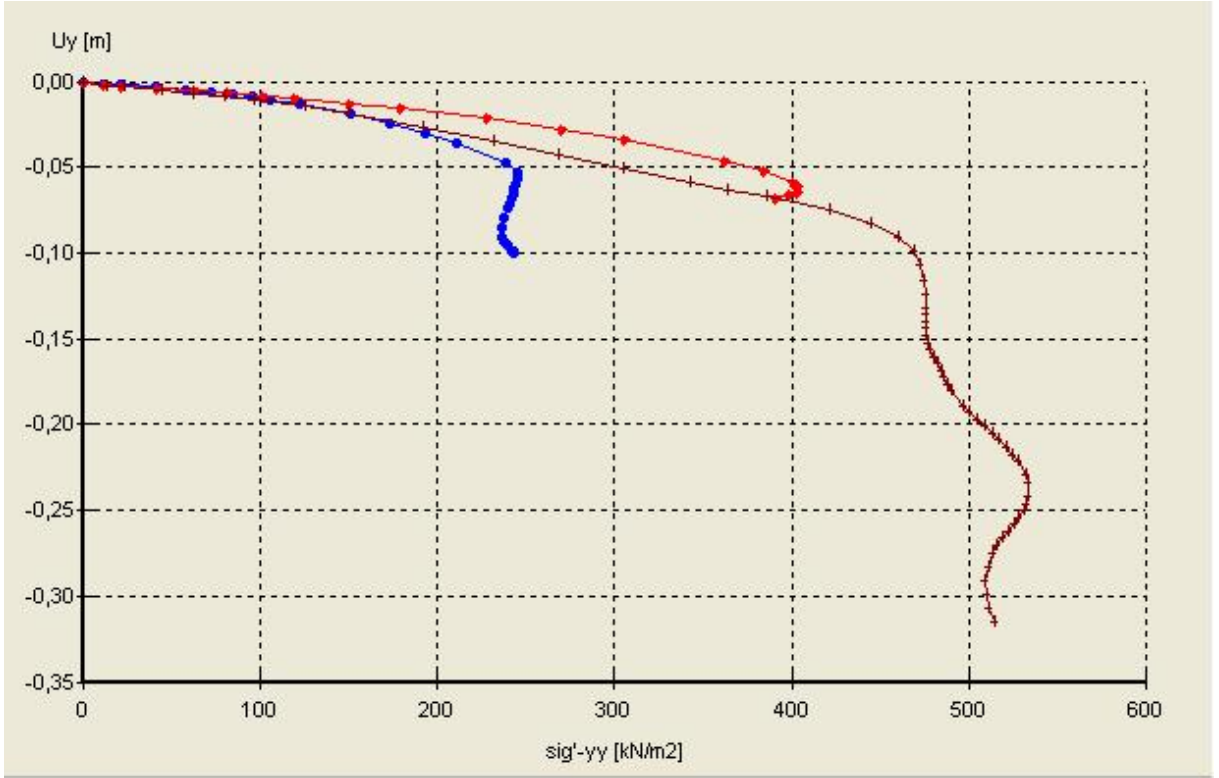
Şekil 5.22 Tekil kolonda drenajlı durum için kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.23 Tekil kolonda drenajsız durum için kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.24 Farklı çaplarda taş kolonlar için tekil kolonun drenajlı durumunda kolonun düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği

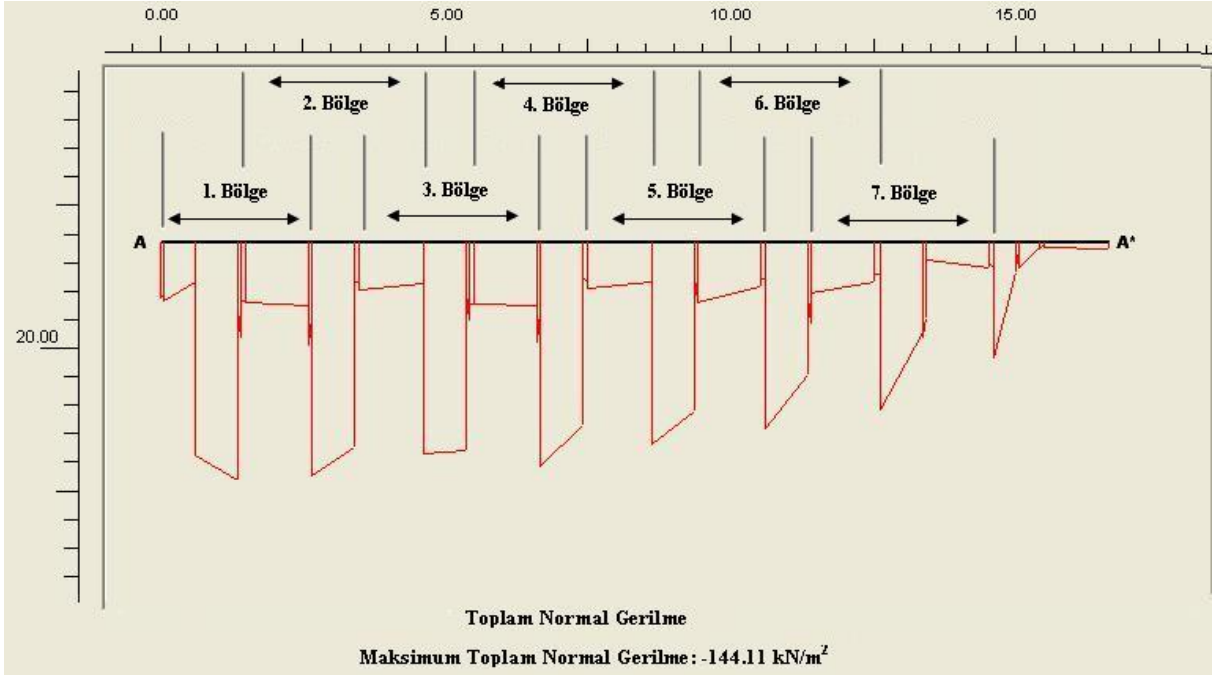


Şekil 5.25 Farklı çaplarda taş kolonlar için tekil kolonun drenajsız durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği

Çizelge 5.5 Sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan tekil taş kolon ve taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için taşıma gücü değerleri.

		q_{ult} (kPa)		
		$\Phi 80$ (cm)	$\Phi 90$ (cm)	$\Phi 100$ (cm)
Taş Kolonlarla İyileştirilmiş Zeminin Taşıma Kapasitesi Değerleri	Drenajlı Durum	278	314	376
	Drenajsız Durum	201.6	207	211
Tekil Taş Kolon Taşıma Kapasitesi	Drenajlı Durum	568	784	1185
	Drenajsız Durum	249	400	476

Taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminde, 4 m dolgu yükü altında taş kolonlar ile aralarındaki zeminin yük paylaşımını incelemek için, kolonlarda ve zemin yüzünde oluşan normal gerilmeler Şekil 5.26'da gösterilmiş ve dolgu altında taş kolon/zemin gerilme konsantrasyon oranları farklı taş kolon çapları için Çizelge 5.6'da verilmiştir.

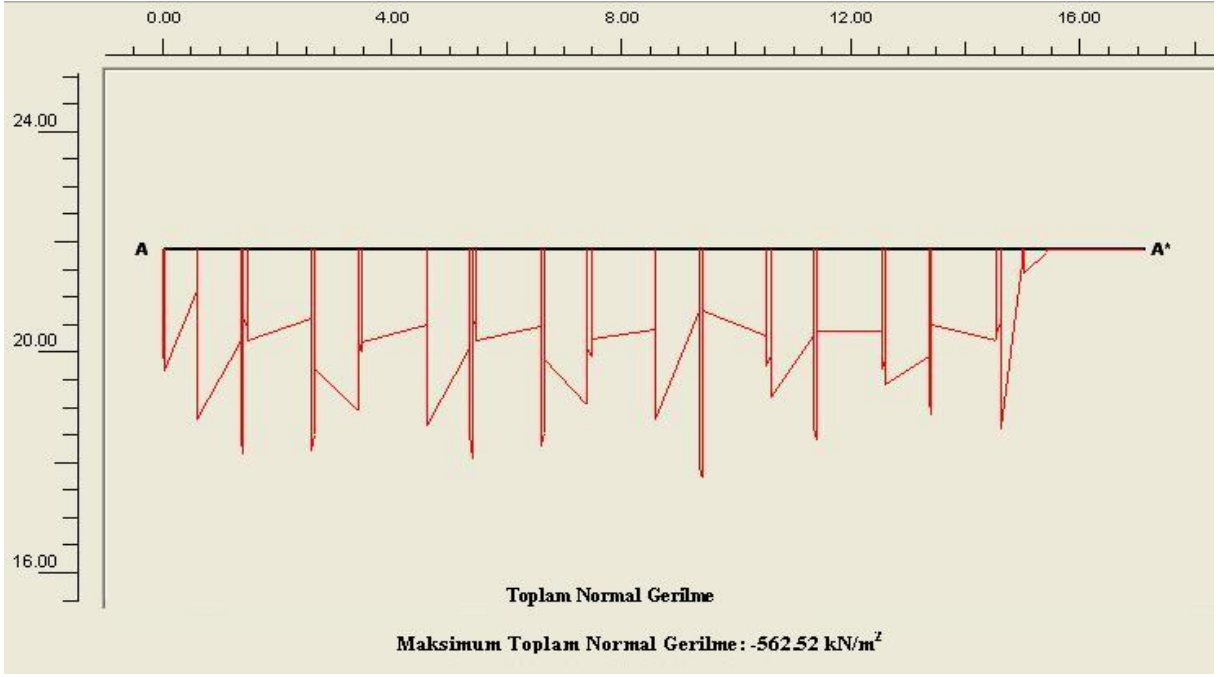


Şekil 5.26 Dolgu altında normal gerilme dağılımı. ($\phi 80$ cm ve 2 m ara)

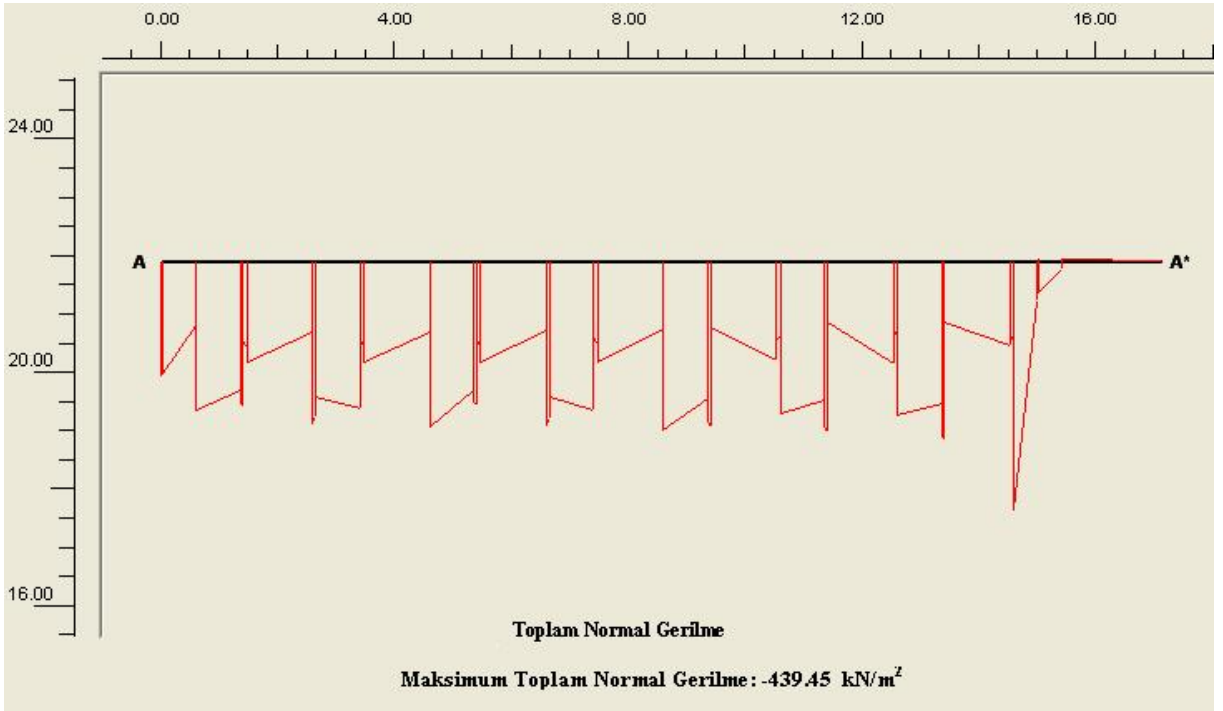
Çizelge 5.6 2 m ara ile yerleştirilen farklı çaplarda taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde 4 m dolgu yükü altında gerilme konsantrasyon oranları.

	$\phi 80$ (cm)	$\phi 90$ (cm)	$\phi 100$ (cm)
1. Bölge	2.69	3.26	3.76
2. Bölge	2.99	3.29	3.78
3. Bölge	2.59	3.66	3.56
4. Bölge	2.81	3.17	3.48
5. Bölge	2.71	2.68	3.69
6. Bölge	2.71	3.13	4.24
7. Bölge	3.63	3.39	3.43
Ortalama Değer	2.88	3.23	3.70

Taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminin göçmeye kadar yüklenmesi durumu için hesaplanan normal gerilmeler Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de drenajlı ve drenajsız durumlar için gösterilmiş ve göçme durumunda taş kolon/zemin gerilme konsantrasyon oranları Çizelge 5.7'de farklı taş kolon çapları için özetlenmiştir.



Şekil 5.27 80 cm'lik kolon grubunda göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajlı durum)



Şekil 5.28 80 cm'lik kolon grubunda göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajsız durum)

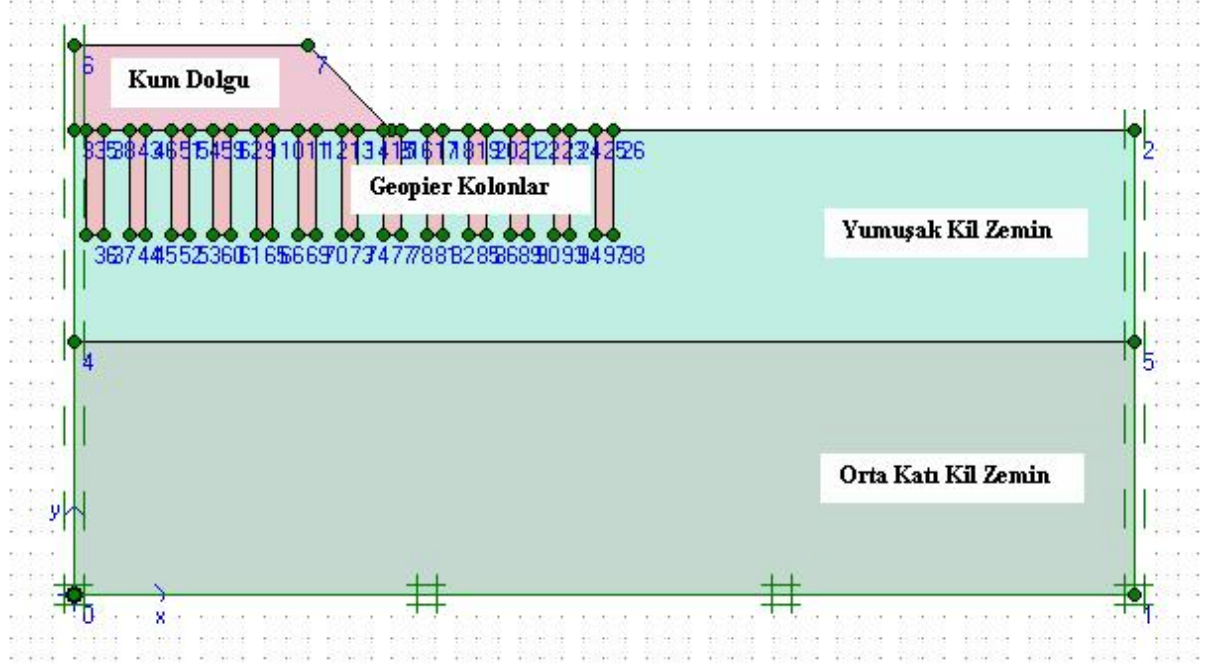
Çizelge 5.7 Göçme durumunda taş kolon/zemin gerilme konsantrasyon oranları.

	$\phi 80$ (cm)		$\phi 90$ (cm)		$\phi 100$ (cm)	
	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum
	1.90	1.52	2.06	1.57	1.92	1.53
	1.98	1.79	1.93	1.64	2.14	1.66
	1.98	1.74	1.93	1.74	2.10	1.67
	1.87	1.84	2.16	1.83	1.97	1.70
	1.81	1.95	1.81	1.81	1.66	1.76
	1.58	2.01	1.59	1.84	1.91	1.86
	1.55	2.14	1.64	2.15	1.72	1.97
Toplam	1.81	1.86	1.88	1.80	1.92	1.74

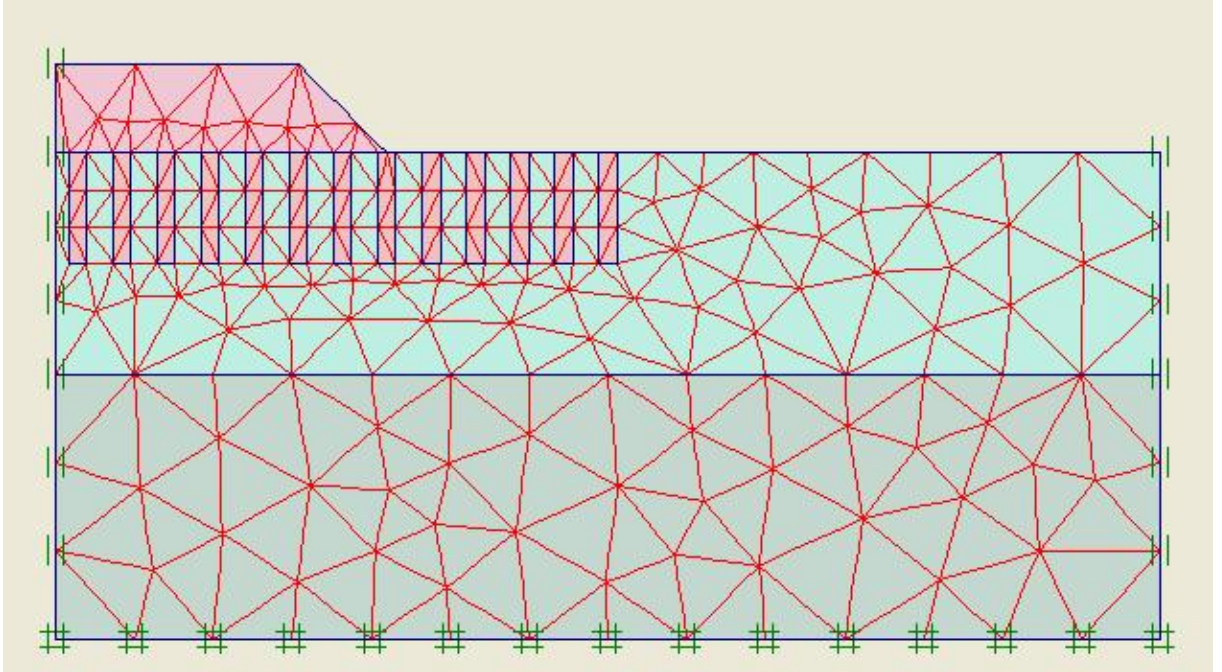
5.2.3 Geopier Elemanlar İle İyileştirilmiş Zeminde Dolgunun Kil Zemin Üzerine Oturtulması

Zeminin geopier elemanlar ile iyileştirildikten sonra dolgu altındaki davranışını incelemek için geopier elemanların 2 m ara ile yerleştirildiği bir model Plaxis sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir. Bu modelde geopier ile iyileştirilmiş zemin üzerine kum dolgu Şekil 5.29'daki gibi inşa edilmiştir. Plaxis ile yapılan analizde, taş kolonların modellenmesinde olduğu gibi geopier elemanların önceden inşa edildiği kabulü yapılarak analize başlanmıştır. Daha önceki gibi analizler iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşama dolgu yükü altında ani oturmalar ve boşluk suyu basıncındaki artışlar, ikinci aşama ise boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ve oluşan şekil değiştirmelerin hesaplanmasından oluşmaktadır.

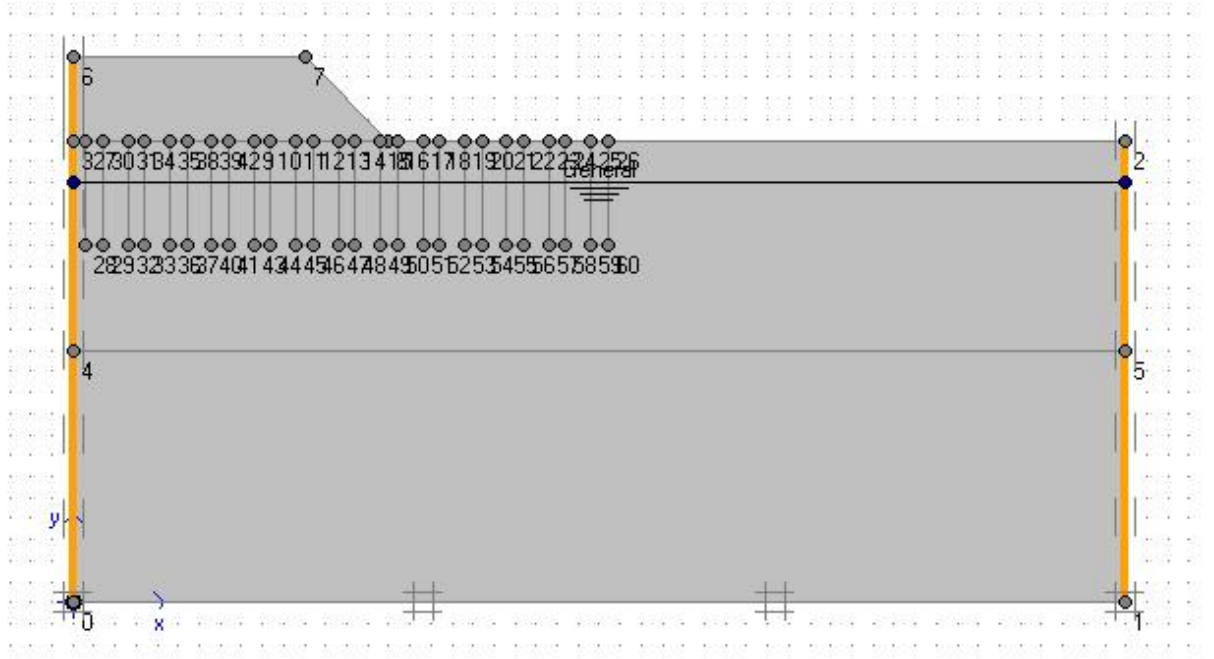
Geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminde oluşturulan sonlu elemanlar ağı Şekil 5.30'da, uygulanan sınır koşullar ise Şekil 5.31'de gösterilmiştir. Geopier elemanlar imal edilirken zemine yer değiştirttiği için sükunetteki toprak basıncı K_0 , geopier elemanlarda ve zeminde bire eşit olarak alınmış ve analizler ona göre yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda geopier elemanlar ile iyileştirilmiş killi zeminde elde edilen ani ve konsolidasyon oturması değerleri farklı kolon çapları kullanılması durumları için Çizelge 5.8'de özetlenmiştir.



Şekil 5.29 80 cm çapındaki geopier elemanların 2 m ara ile kil zemine uygulanması.



Şekil 5.30 Sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş zemin.

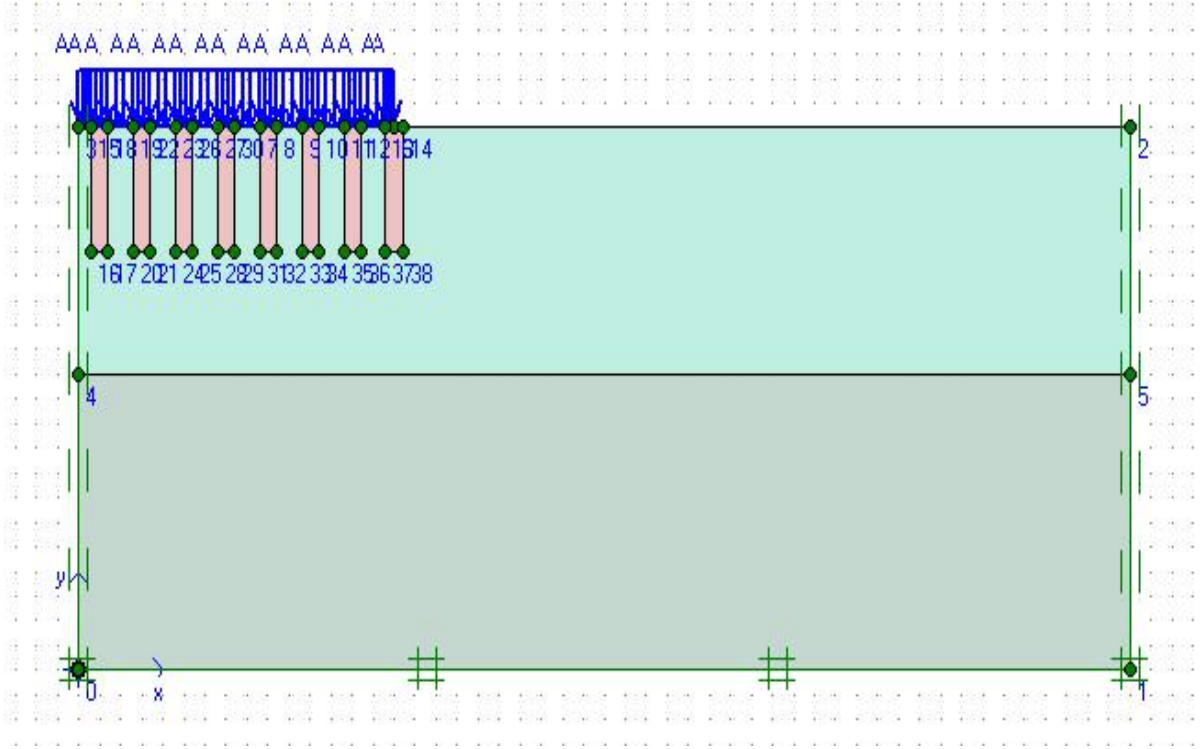


Şekil 5.31 Kil temel zemini ve üzerindeki 4 m'lik kum dolgunun sınır koşulları.

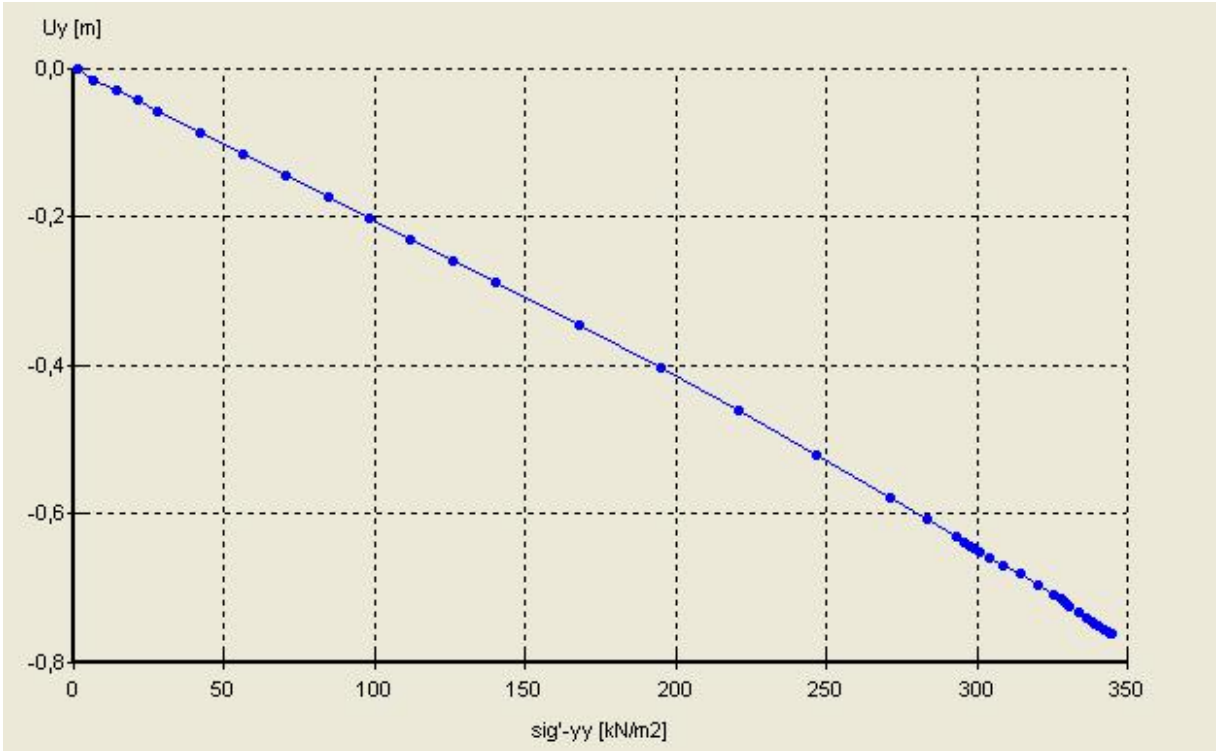
Çizelge 5.8 Geopier elemanları ile iyileştirilmiş zeminde dolgu merkezi altında ani ve konsolidasyon oturması değerleri.

	$\phi 80$	$\phi 90$	$\phi 100$
Ani Oturma (cm)	7.2	7.0	6.8
Konsolidasyon Oturması (cm)	6.8	6.7	6.6
Toplam Oturma (cm)	14	13.7	13.4

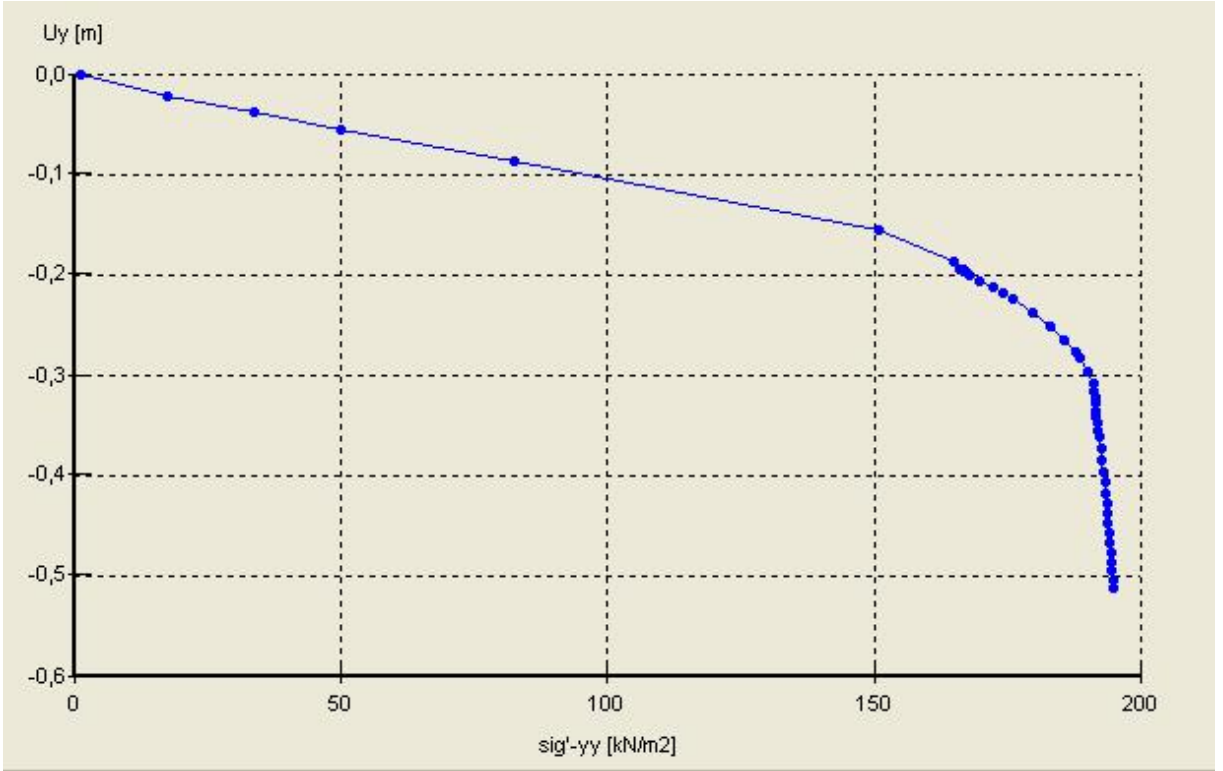
Geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminin taşıma gücünü belirlemek için sonlu elemanlar modeli üzerinde iyileştirilmiş zemin göçmeye ulaşmaya kadar yüklenerek, zeminin drenajlı ve drenajsız durumda taşıma gücü belirlenmiştir. Yük Şekil 5.32'de gösterildiği gibi grup halindeki geopier elemanların ve kil zeminin üzerine üniform olarak yüklenmiştir. Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de gerçekleştirilen analiz sonucunda, 80 cm'lik geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zemin için elde edilen düşey gerilme-oturma eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da ise farklı kolon çapları için, drenajlı ve drenajsız durumda elde edilen düşey gerilme-oturma eğrileri gösterilmiştir.



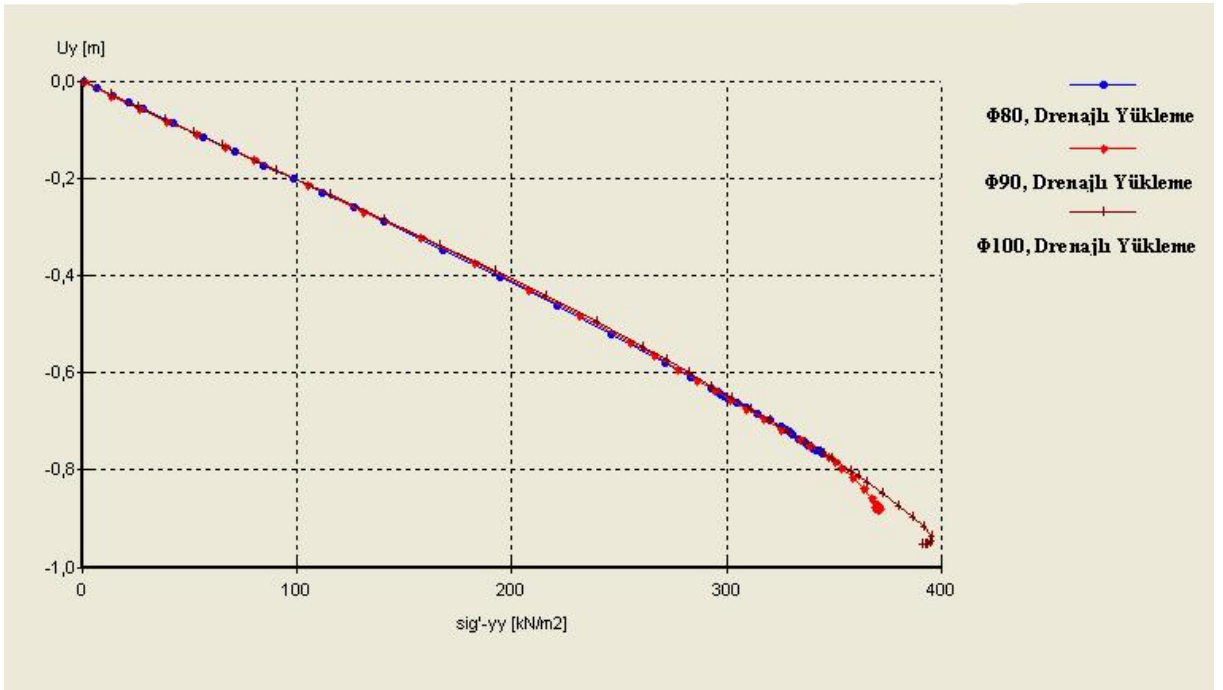
Şekil 5.32 Geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminin taşıma gücü değerinin belirlenmesi.



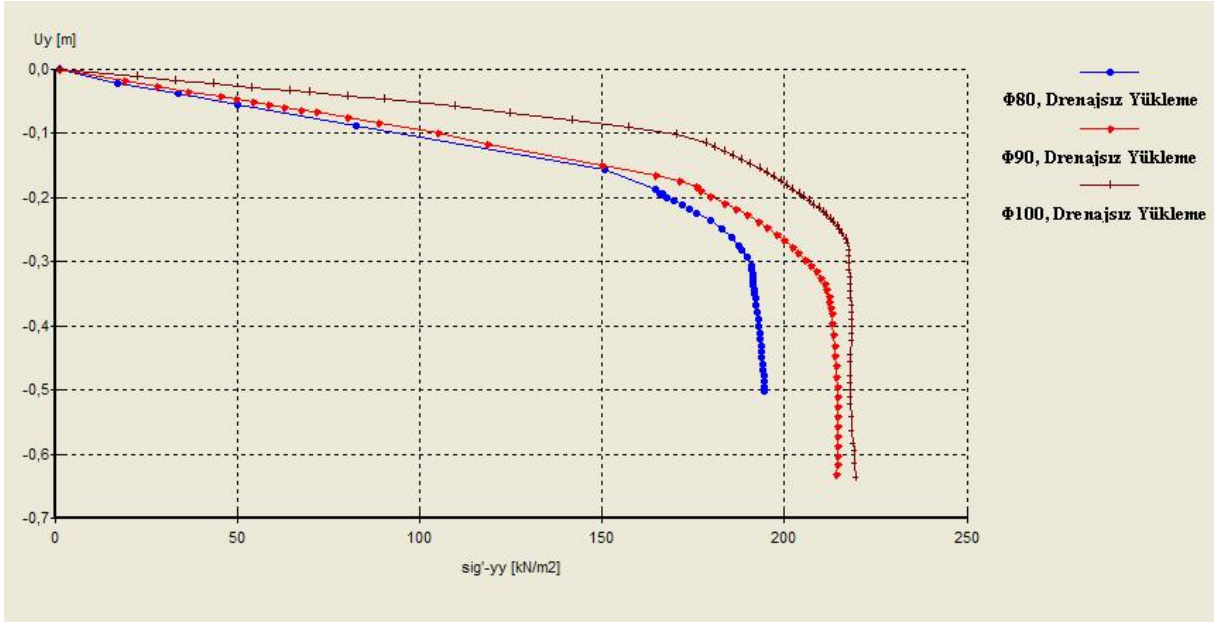
Şekil 5.33 Geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajlı durum için zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.34 Geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin yüzeyine üniform yük uygulandığında drenajsız durum için zeminin düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

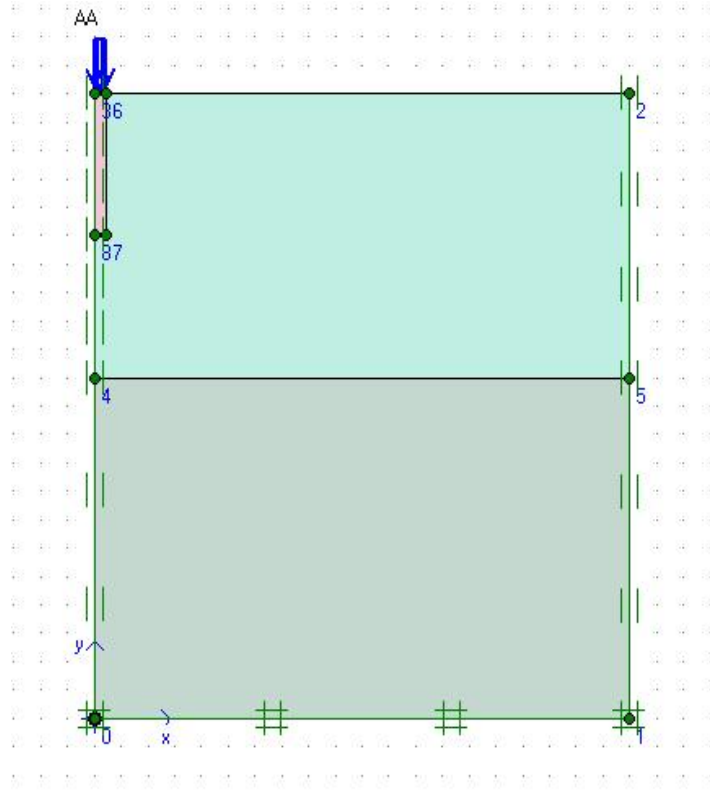


Şekil 5.35 Farklı çaplarda geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajlı durum için düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

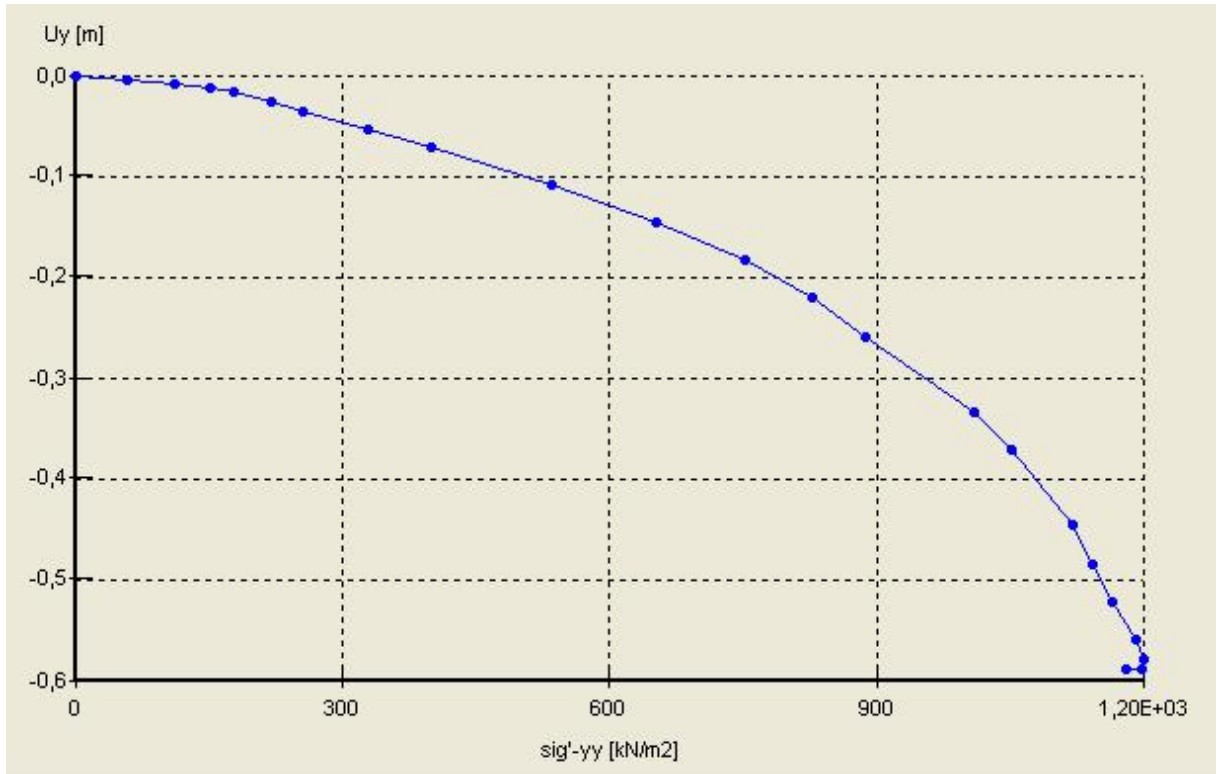


Şekil 5.36 Farklı çaplarda geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminde drenajsız durum için düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

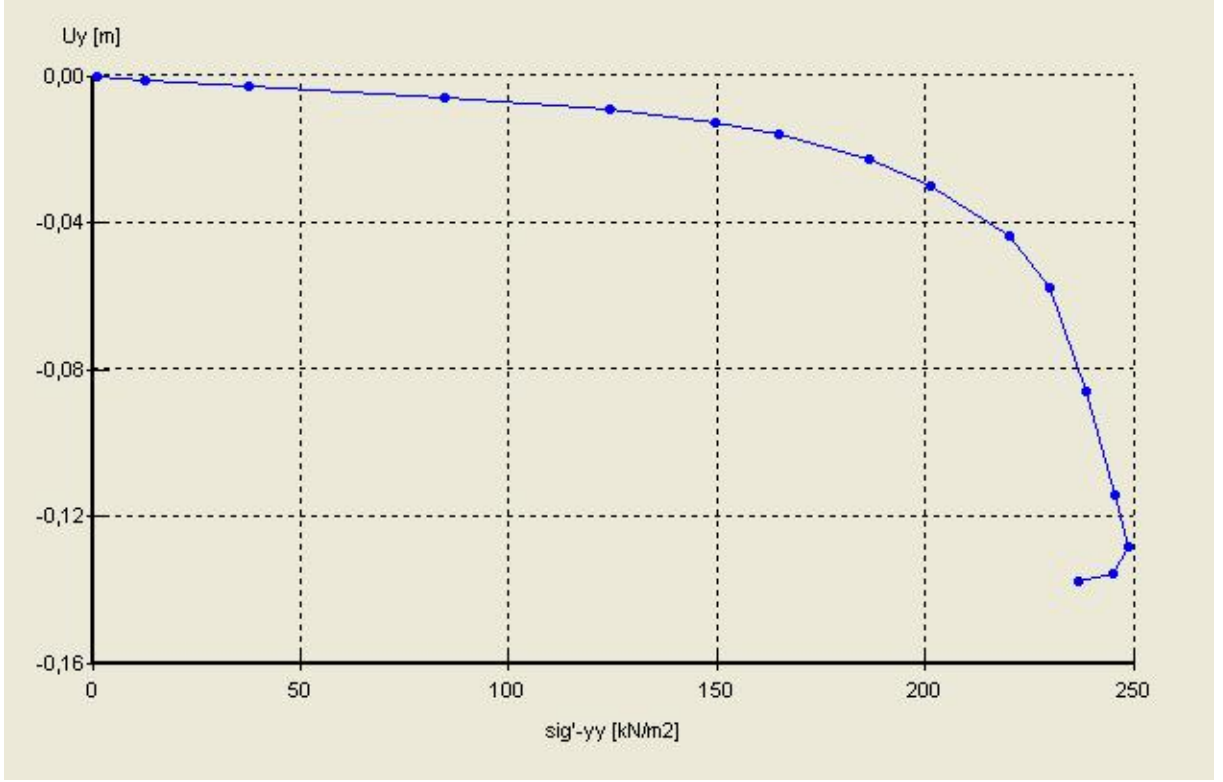
Geopier bir elemanın tekil davranışını belirlemek için Şekil 5.37’de görüldüğü gibi tek bir geopier eleman ve içinde yer aldığı zemin tabakaları aksisimetrik olarak modellenmiştir. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39’da 80 cm çapında tekil bir elemanın drenajlı ve drenajsız durumda düşey yük-düşey yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de ise farklı kolon çaplarına göre drenajlı ve drenajsız durumda elde edilen düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafikleri gösterilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda düşey yük-düşey yerdeğiştirme eğrisinden elde edilen nihai taşıma gücü değerleri Çizelge 5.9’da özetlenmiştir.



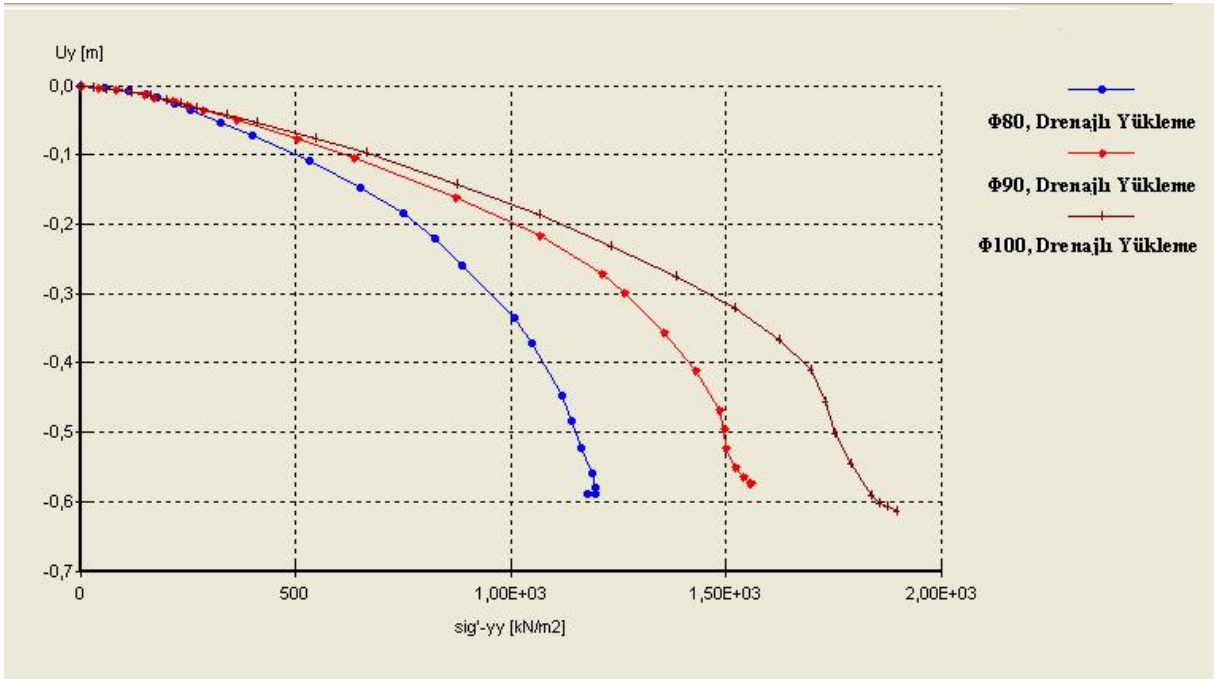
Şekil 5.37 Tek bir geopier elemanın ve içinde yer aldığı zemin tabakalarının aksisimetrik olarak modellenmesi.



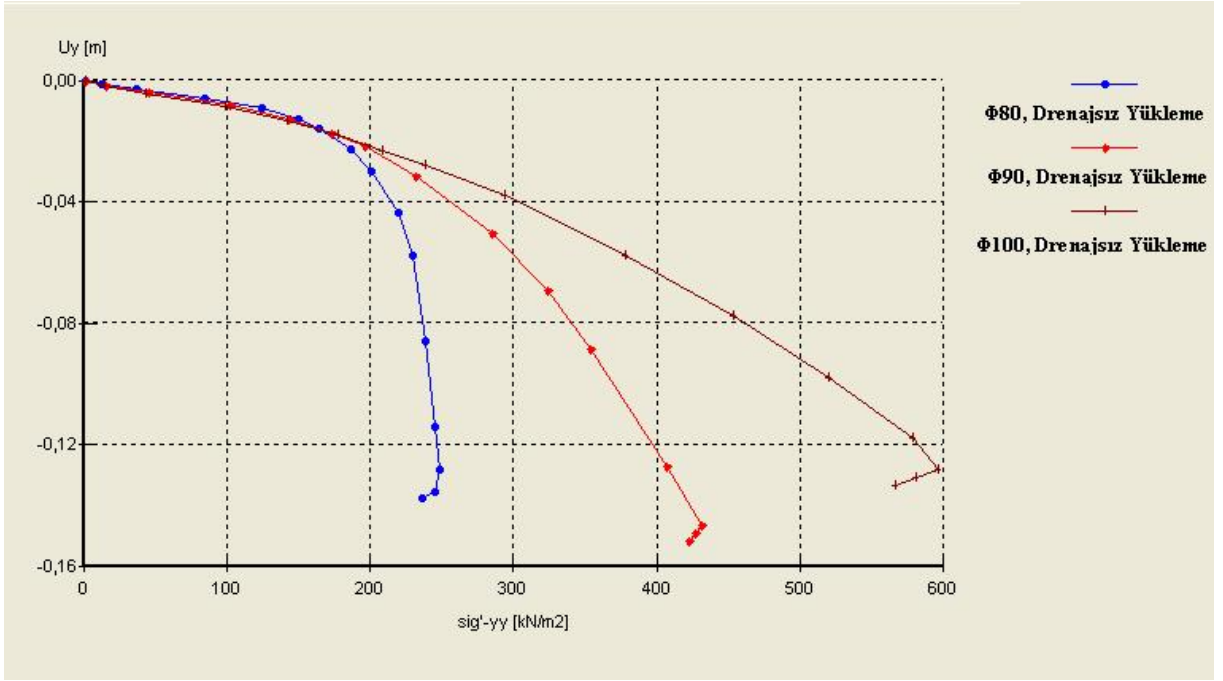
Şekil 5.38 Tekil geopier eleman için drenajlı durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.39 Tekil geopier elemanı için drenajsız durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.40 Farklı çaplarda tekil geopier elemanlar için drenajlı durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

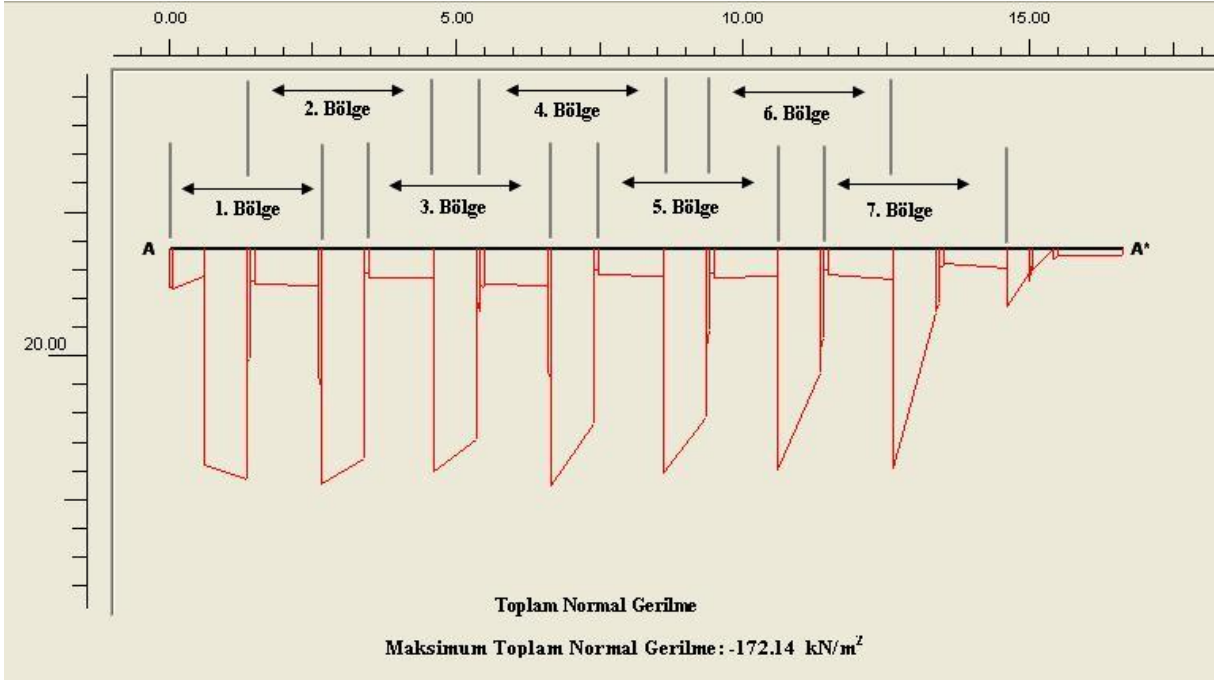


Şekil 5.41 Farklı çaplarda tekil geopier elemanlar için drenajsız durumda düşey gerilme-düşey yerdeğiştirme grafiği.

Çizelge 5.9 Tekil geopier eleman ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.

		q _{ult} (kPa)		
		Φ80 (cm)	Φ90 (cm)	Φ100 (cm)
Geopier Elemanlarla İyileştirilen Zeminin Taşıma Kapasitesi Değerleri	Drenajlı Durum	344	371	395
	Drenajsız Durum	161	164	195
Tekil Geopier Eleman Taşıma Kapasitesi Değerleri	Drenajlı Durum	1200	1500	1700
	Drenajsız Durum	248	431	596

Geopier elemanlar ile zemin arasındaki 4 m dolgu yükü altında oluşan normal gerilmeler Şekil 5.42'de gösterilmiş ve kolon/zemin gerilme konsantrasyon oranları Çizelge 5.10'da farklı çaplar için özetlenmiştir.

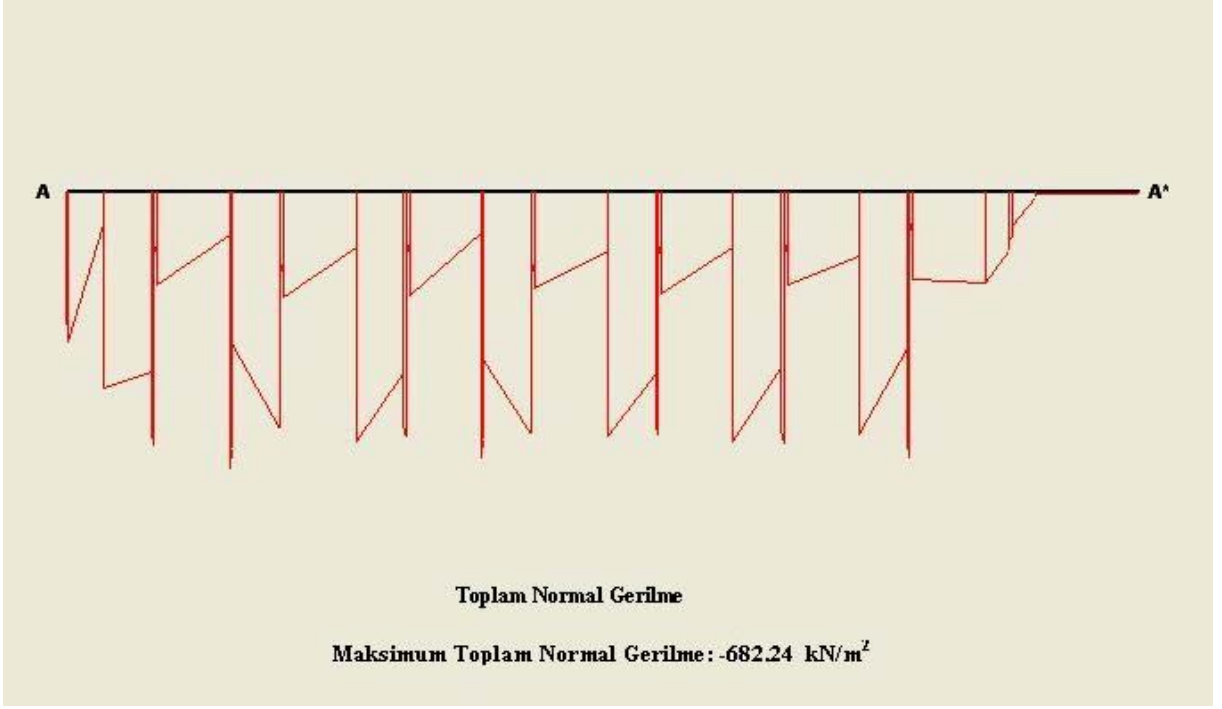


Şekil 5.42 Geopier elemanlar ve zeminde 4 m dolgu yükü altında normal gerilme dağılımı.
($\phi 80$ cm ve 2 m ara)

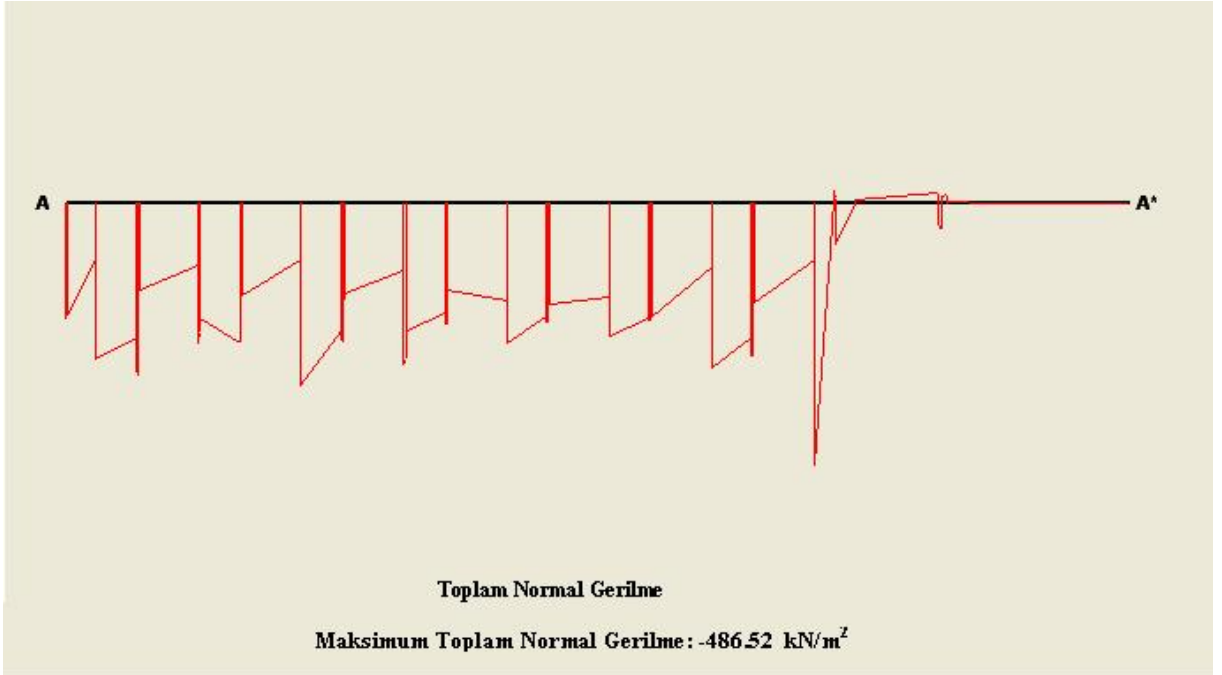
Çizelge 5.10 4 m dolgu yükü geopier/zemin gerilme konsantrasyon oranları.

	$\phi 80$ (cm)	$\phi 90$ (cm)	$\phi 100$ (cm)
1. Bölge	4.88	5.19	5.85
2. Bölge	6.23	6.20	6.15
3. Bölge	4.19	7.03	6.10
4. Bölge	5.68	5.81	6.20
5. Bölge	6.07	5.58	6.25
6. Bölge	5.45	4.81	5.68
7. Bölge	4.93	4.37	4.02
Ortalama Değer	5.35	5.57	5.75

Geopier elemanlar ile iyileştirilmiş zeminin göçmeye ulaşınca kadar yüklenmesi durumunda hesaplanan normal gerilmeler Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'de drenajlı ve drenajsız durumlar için gösterilmiş, kolon/zemin oluşan bölge için gerilme konsantrasyon oranları Çizelge 5.11'de farklı kolon çapları için özetlenmiştir.



Şekil 5.43 80 cm çapında geopier elemanlar ile zeminde göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajlı durum)



Şekil 5.44 80 cm çapında geopier elemanlar ile zeminde göçme durumunda normal gerilme dağılımı. (Drenajsız durum)

Çizelge 5.11 Geopier elemanlar ile iyileştirilen zeminde göçme durumunda gerilme konsantrasyon oranları.

	$\phi 80$ (cm)		$\phi 90$ (cm)		$\phi 100$ (cm)	
	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum	Drenajlı Durum	Drenajsız Durum
	2.51	1.86	2.37	1.79	2.27	1.74
	3.31	1.86	3.61	2.28	3.56	1.28
	3.21	1.82	3.28	1.72	3.51	1.73
	3.30	1.42	3.33	1.32	3.39	1.24
	3.16	1.19	3.44	1.19	3.38	1.13
	3.43	1.29	3.33	1.28	3.41	1.23
	3.56	1.99	3.66	1.85	3.78	1.74
Toplam	3.21	1.63	3.29	1.63	3.33	1.58

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Orta katı ve yumuşak kil tabakalarından oluşan 22 m kalınlığında killi zeminler üzerine 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi durumunda oluşan oturma değerleri hem literatürde bulunan hesap yöntemleri hem de Plaxis sonlu elemanlar programı ile hesap edilerek bulunan değerler Çizelge 6.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.1 İyileştirilmemiş zeminde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi sonucu zeminde meydana geleceği hesaplanan oturma değerleri.

	Ani Oturma, δ_i (cm)	Konsolidasyon Oturması, δ_c (cm)	Toplam Oturma, δ_T (cm)
Literatürdeki Hesap Yöntemleri İle Hesaplanan Değerler	7.2	15.9	23.1
Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanan Değerler	10.8	10.5	21.3

Çizelge 6.2 İyileştirilmemiş zeminde hesaplanan taşıma gücü değerleri.

	Literatürdeki Hesap Yöntemleri İle Hesaplanan Değer	Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanan Değer
İyileştirilmemiş Zeminin Taşıma Gücü Değeri, q_{ult} (kPa)	166.2	166.0

Sonuçlardan görüleceği üzere değerler birbirine yakındır. Ayrıca yumuşak killi zemine dolgu ile yükleme yapıldığında meydana gelecek oturmaların çok büyük olacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca yapılan hesaplamalar konsolidasyon oturmasının %90’ının meydana gelmesi için yaklaşık 5 yıl süre gerektiğini göstermektedir. Bu sürenin ve oturmaların azaltılması, taşıma gücünün artırılması için taş kolonlar ve geopier gibi zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulabilmektedir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, zemine taş kolonlar ile zemin iyileştirmesi uygulandığında beklenen oturma ve taşıma gücü değerleri Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.3 Taş kolon ile iyileştirilmiş kil zeminde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi durumunda meydana gelmesi beklenen oturmalar.

Taş Kolon Çapı (cm)	Φ80		Φ90		Φ100	
	Literatürdeki Hesap Yöntemleri İle Hesaplanan Değerler	Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanan Değerler	Literatürdeki Hesap Yöntemleri İle Hesaplanan Değerler	Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanan Değerler	Literatürdeki Hesap Yöntemleri İle Hesaplanan Değerler	Plaxis Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanan Değerler
Ani Oturma, δ_i (cm)	5.0	5.7	4.7	5.5	4.5	5.4
Konsolidasyon Oturması, δ_c (cm)	2.9	3.4	2.9	3.2	2.9	3.1
Toplam Oturma, δ_T (cm)	7.9	9.1	7.6	8.7	7.4	8.5

Çizelge 6.4 Tekil taş kolon için ve taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.

Taş Kolon Çapı (cm)		Φ80		Φ90		Φ100	
		L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler
Taş Kolonlarla İyileştirilen Zeminin Taşıma Kapasitesi Değerleri (kPa)	Drenajlı	541	278	595	314	957	376
	Drenajsız	237	202	253	207	292	211
Tekil Taş Kolon Taşıma Kapasitesi Değerleri (kPa)	Drenajlı	1884	568	1985	784	2008	1185
	Drenajsız	858	249	885	400	911	476

Hem literatürdeki hesap yöntemleri ile yapılan analizlerde hem de Plaxis sonlu elemanlar programı yardımı ile yapılan analizlerden anlaşılacağı üzere taş kolon ile iyileştirilen zeminin taşıma kapasitesi artmaktadır. Ayrıca meydana gelmesi beklenen oturma değerleri iyileştirilmemiş zemine göre bir hayli azalmaktadır. Klasik yöntemlerle bulunan taşıma gücü değerleri Plaxis sonlu elemanlar programı ile bulunanlardan fazla çıkmaktadır.

Zeminin geopier elemanlar ile iyileştirilmesi durumunda hesaplanan oturma ve taşıma gücü değerleri ise Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.5 Geopier ile iyileştirilmiş killi zemin üzerinde 4 m yüksekliğinde dolgu inşa edilmesi durumunda meydana gelmesi beklenen oturma değerleri.

Geopier Çapı (cm)	Φ80		Φ90		Φ100	
	L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	L. H. Y.İle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler
Ani Oturma, δ_i (cm)	6.70	7.20	6.18	7.00	5.83	6.80
Konsolidasyon Oturması, δ_c (cm)	8.10	6.80	8.00	6.70	7.80	6.60
Toplam Oturma, δ_T (cm)	14.80	14.00	14.18	13.70	13.63	13.40

Çizelge 6.6 Tekil geopier eleman için ve geopier elemanlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri.

Geopier Çapı (cm)		Φ80		Φ90		Φ100	
		Elle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	Elle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler	Elle Hesaplanan Değerler	Plaxis İle Hesaplanan Değerler
Geopier Elemanlarla İyileştirilen Zeminin Taşıma Kapasitesi Değerleri (kPa)	Drenajlı	903	344	1058	371	1210	395
	Drenajsız	251	161	285	164	326	195
Tekil Geopier Eleman Taşıma Kapasitesi Değerleri (kPa)	Drenajlı	2206	1200	2059	1500	1944	1700
	Drenajsız	1163	248	1063	431	985	596

Yapılan analizlerden anlaşılacağı üzere geopier elemanlar ile iyileştirilen zeminin taşıma kapasitesinde, kolon boyları daha kısa olmasına rağmen taş kolonlarla sağlanan iyileşmeye yakın artış sağlamaktadır. Ayrıca oturma değerleride, taş kolonlara göre daha büyük olmasına rağmen, iyileştirilmemiş zemine göre bir hayli azalmaktadır. Klasik yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri Plaxis sonlu elemanlar programı ile bulunanlardan fazla çıkmaktadır.

Taş kolonlar davranışı literatürde bulunan yöntemlere göre hesaplanırken gerilme konsantrasyon oranı $n=3$ olarak alınmıştır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde bu değer değişik kolon çaplarına göre 2.88 ile 3.70 arasında değiştiği bulunmuştur. Buna göre alınan $n=3$ değeri doğru gözükmektedir.

Geopier elemanların literatürde bulunan yöntemlere göre hesaplanmasında ise gerilme konsantrasyon oranı $n=6$ olarak alınmıştır. Plaxis sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde ise bu değer değişik kolon çaplarına göre 5.35 ile 5.75 arasında değiştiği bulunmuştur.

Hem literatürde varolan hesap yöntemleri ile yapılan analizlerin hem de PLAXIS sonlu elemanlar programı ile yapılan analizlerin gösterdiği üzere, geopier elemanlar ile iyileştirilen zemin taşıma kapasitesi bakımından taş kolonlarla sağlanan iyileştirmeye yakın artış sağlanmaktadır. Geopier elemanların kısa olması ve uygulama yönteminin hızlı olması, ayrıca elde edilen taşıma gücü artışı bakımından da taş kolonlara yakın değerler vermesi geopier elemanları daha tercih edilebilir kılmaktadır.

Literatürde varolan hesap yöntemleri kullanılarak hesaplanan, iyileştirilmemiş zeminde meydana gelmesi beklenen oturma değerleri ile taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde meydana gelmesi beklenen oturma değerleri karşılaştırıldığında, kolon çaplarına bağlı olarak %66 ile %68 arasında iyileşme elde edilmektedir. Geopier elemanlarla elde edilen iyileştirme miktarı ise kolon çaplarına bağlı olarak %36 ile %41 arasında değişmektedir. PLAXIS sonlu elemanlar programı ile hesaplanan değerlere göre ise kolon çaplarına bağlı olarak bu değerler taş kolonlarda %57 ile %60, geopierde ise %34 ile %37 arasında değişmektedir. Elde edilen bu değerlerden de anlaşılacağı üzere taş kolonlar uzun oldukları için alt zeminde meydana gelecek ani oturma ve konsolidasyon oturması değerleri azalmakta ve killi zeminde geopiere göre daha az oturma meydana gelmektedir. Bu durum göz önüne alınarak uygulanacak projeye, elde edilmek istenilen iyileştirmenin türüne ve ekonomik kriterlere bağlı olarak taş kolonlar veya geopier elemanlar arasında bir tercih yapılabilir.

Bu çalışmada literatürdeki hesap yöntemleri ve PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılarak taş kolonların ve geopier elemanlarının taşıma gücü ve oturma davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın geoteknikte çok önemli olan arazi ve laboratuarda gerçekleştirilecek model çalışmaları ve deneylerle desteklenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Afatoğlu, H.A., (2004), “Yumuşak Kil Zeminlere Oturan Kum Dolgunun Taşıma Gücü Güvenliğinin Geotekstiller ve Taş Kolonlarla Arttırılması.”, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Barksdale, R.D. ve Bachus, R.C., (1983), “Design and Construction of Stone Columns: Vol.1-2.”, Report No. FHWA/RD-83/026, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Bell, J.R., (1978), “Future Advances in Soil Placement and Improvement.”, Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, No.GT1:1-10.
- Berilgen, M.M., Abdullah, C.H. ve Edil, T.. (2006), “Geopier Kolonlar Üzerinde Yeralan Geogrid Donatılı Yükleme Platformlu Bir Deneme Dolgusunun Davranışı.”, İkinci Ulusal Geosentetikler Konferansı, 16-17 Kasım 2004, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Bowles, J.E., (1996), Foundation Analysis and Design, 5th ed., McGraw-Hill, New York.
- Clemente, J.L. ve Davie, J.R., (1999), “Stone Columns for Settlement Reduction.”.
- Datye, K.R., (1978), “Special Construction Techniques.”, Proceeding ICS Conference on Geotechnical Engineering, New Delhi, India, sf. 30-44.
- Durgunoğlu, T., (1992), “ Taş Kolonlar ile Zemin Islahı Üzerine Bir Uygulama”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, ZMTM Türk Milli Komitesi, Cilt-II, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Edil, T.B., Şenol, A. ve Fox, N.S., (2000), “Sıkıştırılmış Geokolon-Rammed Aggregate Pier Yöntemi ile Yumuşak Zeminlerin Taşıma Gücünün Arttırılması.”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Farrell, T. ve Taylor, A., (2004), “Rammed Aggregate Pier Design and Construction in California-Performans, Constructability, and Economics.”, SEAOC 2004 Convention Proceeding, California.
- Fox, N.S. ve Tuncer, B.E., (2000), “Case Histories of Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement Construction Over Peat and Highly Organic Soils.”, Technical Bulletin No.1, Geopier Foundation Co., Inc., Scottsdale, Arizona.
- Gibson, R.D. ve Anderson, W.F., (1961), “In-situ Measurement of Soil Properties with Pressuremeter.”, Civil Engineering and Public Works Review, Vol.56, No.658.
- Greenwood, D.A., ve Kirsch, K., (1983), “Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods.”, Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations, Thomas Telford, London, sf. 17-47.
- Hughes, J.M.O. ve Withers, N.J., (1974), “Reinforcing of Soft Soil Cohesive Soils with Stone Columns.”, Ground Engineering, Vol.7, No.3:42-49, Mayıs.
- Kirch, F. ve Sondermann, W., (2003), “Field Measurements and Numerical Analysis of The Stres Distribution Below Stone Column Supported Embankments and Their Stability.”
- Kumbasar, V., (1984), İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Lawton, E.C. ve Fox, N.S., (1994), “Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soil Stiffened with Short Aggregate Piers.” Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Special Publication, No.40, Vol.2:962-974.

- Lawton, E.C., Fox, N.S. ve Handy, R.L., (1994), "Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers.", In-situ Deep Soil Improvement, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, sf. 121-132.
- Lawton, E.C. ve Warner, B.J., (2004), "Performance of a Group of Geopier Elements Loaded in Compression Compared to Single Geopier Elements and Unreinforced Soil.", Final Report, Report No. UUCVEEN 04-12, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA.
- Özaydın, K., (1999), Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Pan, J.L. ve Selby, A.R., (2002), "Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils.", Advances in Engineering Software, 33:631-640.
- Pham, H.T., (2005), "Support Mechanism of Rammed Aggregate Piers.", A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Priebe, H.J., (1995), "The Design of Vibro Replacement.", Ground Engineering, December, sf. 31-37.
- Raju, V.R., (1997), "The Behavior of Very Soft Soils Improved by Vibro Replacement.", Ground Improvement Conference, London.
- Raju, V.R., Wegner, R. ve Godenzie, D., (1998), "Ground Improvement Using Vibro Using Vibro Techniques.", Ground Improvement Conference, Singapore.
- Sowers, G.F., (1979), "Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering.", 4th Edition, McMillian Publishing Co., Inc. New York.
- Vautrain, J., (1977), "Mur en Terre Armee Sur Colonnes Ballastees.", Proceeding International Symposium on Soft Clay, Bangkok, Thailand.
- Vesic, A.S., (1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass.", Journal of The Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.98, No.SM3:265-290.
- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. ve Gaul, A.J., (2002), "Embankment Support: A Comparison of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement.", Presented at Transportation Research Board, 81th Annual Meeting, Washington D.C., Ocak 13-17.
- White, D.J., Suleiman, M.T. ve Bigelow, J., (2002), "Constitutive Equation for Aggregates Used in Geopier Foundation Construction.", Final Report, Iowa State University, Eylül.
- White, D.J., Suleiman, M.T., Pham, H.T. ve Bigelow, J., (2004), "Design of Short Aggregate Piers to Support Highway Embankments.", Transportation Research Board Annual Meeting.
- Wissmann, K.J., (1999), "Bearing Capacity of Geopier Supported Foundation Systems.", Technical Bulletin No.2, Geopier Foundation Co., Inc., Arizona.
- Wissmann, K.J., Meser, K. Ve Pando, M., (2001), "Reducing Settlement Risk in Residual Piedmond Soil Using Rammed Aggregate Pier elements", Proceeding ASCE Specialty Conference, Blacksburg.
- Wissmann, K.J., White, D.J., FitzPatrick, B.T. ve Lien, B.H., (2002), "Improving Global Stability and Controlling Settlement with Geopier Soil Reinforcing Elemnts.", Proceeding of The 4th International Conference on Ground Improvement Techniques, Kuala Lumpur, Malasia.
- Yıldırım, S., (2004), Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Zomorodion, A. ve Eslami, A., (2005), "Determining The Geotechnical Parameters of Stabilized Soils by Stone Column Based on SPT Results.", University of Shiraz, İran.

INTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://tc17.poly.edu/Vibro-Displacement%20Stone%20Columns.html>
- [2] <http://tc17.poly.edu/vrsc.html>
- [3] <http://www.sbe.napier.ac.uk/projects/compaction/chapter3b.htm>
- [4] <http://www.haywardbaker.com/>
- [5] <http://www.vibroflotation.com/>
- [6] http://www.mooreandtaber.com/stone_columns.htm
- [7] <http://www.geoforum.com/>
- [8] <http://www.seslisozluk.com/>
- [9] <http://www.geopier.com/>
- [10] <http://www.sciencedirect.com>
- [11] <http://www.elsevier.com/>
- [12] <http://scholar.google.com/>
- [13] <http://www.birimcevir.com/basinc-birimleri/basinc-birimleri.aspx>
- [14] <http://proquest.umi.com/>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 11.11.1977

Doğum yeri Duesseldorf - ALMANYA

Lise 1991-1994 Ordu Atatürk Lisesi

Lisans 1995-1997 Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi
Matematik Öğretmenliği Bölümü

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2002-2003 İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş.
2004-2005 Detay Yapı Denetim Ltd. Şti.
2005 Geos Geoteknik ve Sondajcılık ve Tic. Lim. Şti.