

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif KIRNAK

**TAŞ KOLON TASARIM PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA-2017

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TAŞ KOLON TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Elif KIRNAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez / /2018 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
DANIŞMAN

.....
Prof. Dr. Hasan ÇETİN
ÜYE

.....
Yrd. Doç. Firdevs UYSAL
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Kod No :

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAŞ KOLON TASARIM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Elif KIRNAK

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Yıl: 2017, Sayfa: 122
Jüri : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Prof. Dr. Hasan ÇETİN
: Yrd. Doç. Dr. Firdevs UYSAL

Bu çalışmada, taş kolon uygulaması için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi analitik ve sayısal yöntemler yardımı ile araştırılmıştır. Yapılan sayısal analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde taş kolon çapı, boyu, içsel sürtünme açısı, rijitliği, drenajsız kayma mukavemeti ve kolonlar arası mesafe gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca tez kapsamında, 2010-2013 tarihleri arasında arazide gerçekleştirilmiş tam ölçekli grup taş kolon yükleme deneyi de detaylı olarak incelenmiştir. Söz konusu grup taş kolonlar, TÜBİTAK projesi kapsamında arazide inşa edilmiş ve davranışı aletsel ölçüm sistemleri yardımıyla izlenmiştir. Arazide inşa edilen grup taş kolonlar literatürde önerilen analitik yöntemler ve PLAXIS bilgisayar programı yardımıyla 2 ve 3 boyutlu olarak analiz edilmiştir. Analitik yöntemler ve sayısal analiz sonuçları araziden elde edilen ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak grup taş kolon davranışı için önerilen analitik ve sayısal yöntemlerin doğruluğu ve güvenilirliği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taş kolon, Kil zemin, Priebe yöntemi, Sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis.

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF THE STONE COLUMN DESIGN PARAMETERS

Elif KIRNAK

**CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Year: 2017, Pages: 122
Jury : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
: Prof. Dr. Hasan ÇETİN
: Asst. Prof. Firdevs UYSAL

In this study, the effect of some design parameters for stone columns have been investigated using analytical and numerical methods. The numerical analyses have been performed by using PLAXIS computer software based on finite element method. The effect of some parameters such as diameter, length, friction angle, stiffness modulus of stone columns, distance between the columns, undrained shear strength and stiffness modulus of clays around the columns have been investigated in the analyses. An application of group stone columns on the field has been also investigated in the thesis. The group of stone columns have been constructed and instrumented with field monitoring system within a TUBITAK project between 2012-2013. Analytical, 2D and 3D numerical analyses in PLAXIS have been carried out using the project data. The results of numerical and analytical analyses have been compared with the field measurements to investigate accuracy and reliability of the numerical and analytical methods.

Key Words: Stone column, Clay soil, Priebe method, Finite elements method, Plaxis.

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu tez çalışmasında, taş kolon uygulaması için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi analitik ve sayısal yöntemler ile araştırılmıştır. Gerçekleştirilen sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizler, kısa süreli (drenajsız) stabilite analizleri ve uzun süreli (drenajlı) stabilite analizleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanmış olup analizlerde taş kolon çapı, boyu, içsel sürtünme açısı, kolon rijitliği, kolonlar arası mesafe, kilin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliği gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Analizler sırasında etkisi araştırılmak istenen parametre dışındaki parametreler sabit tutulmuştur. Ayrıca kolonlar arası mesafe ve kolon çapı parametrelerinin taş kolon uygulamasındaki etkilerini görmek amacıyla analitik yöntemler yardımı ile de analizler yapılmıştır.

Yapılan kısa süreli stabilite analizlerinde, taş kolonun rijitliği, taş kolonun içsel sürtünme açısı ve kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti parametreleri için yapılan analizlerde bu parametrelerin değerleri arttıkça oturmaların azaldığı ve taşıma gücünün arttığı gözlemlenmiştir. Kolonlar arası mesafe arttıkça oturmaların arttığı ve taşıma gücünün ise azaldığı gözlemlenmiştir. Kolon çapı arttıkça oturmalar azalmış ve taşıma gücü artış göstermiştir ancak birim hücreden dolayı oluşan sınır etkisi sebebiyle sonuçların doğruluğu kesin değildir. Aynı şekilde kolon boyu ile ilgili yapılan analizlerde kolon boyu arttıkça taşıma gücünün artması ve oturmaların azalması beklenirken sınır etkisinden dolayı beklenen sonuçlar elde edilememiştir.

Yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde ise, taş kolonun rijitliği, taş kolonun çapı, taş kolonun boyu ve içsel sürtünme açısı parametreleri için yapılan analizlerde bu parametrelerin değerleri arttıkça oturmaların azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kolonlar arası mesafe arttıkça oturmaların arttığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca bunlara ek olarak, 2010-2013 tarihleri arasında bir TÜBİTAK projesi kapsamında arazide inşa edilmiş grup taş kolonların arazi ölçüm sistemleri ile davranışlarının takip edilmiş olduğu bir proje de ele alınmıştır. Projeden elde edilmiş olan arazi verileri, tez kapsamında yapılan analitik ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde Plaxis 2D ve Plaxis 3D bilgisayar programları kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar ile analitik ve sayısal analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği araştırılmıştır.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca, tez çalışmalarımın tüm aşamalarında tavsiyeleri ile çalışmalarına yön veren, yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Ne zaman yardımına ihtiyaç duysam yanımda olduğunu hissettiren sevgili hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Firdevs UYSAL'a desteklerinden ve çok değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca yardımlarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Baki BAĞRIAÇIK'a, Sayın Arş. Gör. Buse EMİRLER TOLUN'a ve Sayın Arş. Gör. Mustafa TOLUN'a teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, desteklerini esirgemeyen, benim ve kardeşimin bugünlere gelebilmesi için her türlü fedakarlığı yapan, sevgilerini her an hissettiğim çok sevgili babam Mustafa KIRNAK ve annem Gönül KIRNAK'a teşekkürü borç bilirim. Canımdan çok sevdiğim kız kardeşim Ezgi KIRNAK'a manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET	III
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XVI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. TAŞ KOLON YÖNTEMİ	13
3.1. Giriş	13
3.2. Taş Kolon İmalatı	14
3.3. Taş Kolon İmalat Yöntemleri	16
3.3.1. Vibro-kompaksiyon Yöntemi	16
3.3.2. Vibro-yerdeğiştirme Yöntemi (Islak Yöntem)	18
3.3.3. Vibro-öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem)	19
3.3.4. Darbeli Yöntem (Darbeli Kırmataş Yöntemi)	20
3.4. İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması	22
3.5. Taş Kolon Elemanlarının Özellikleri.....	23
3.5.1. Taş Kolon Çapı.....	23
3.5.2. Taş Kolon Boyu.....	23
3.5.3. Taş Kolonun İçsel Sürtünme Açısı	23
3.5.4. Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı.....	23
3.6. Taş Kolon Elemanları için Kalite Kontrol Prosedürleri	24
3.7. Taş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi	24
4. ANALİTİK YÖNTEMLER	27

4.1. Taş Kolon Tasarım Parametreleri.....	27
4.1.1. Kolon Malzemesi.....	27
4.1.2. Yerleşim Modeli.....	28
4.1.3. Kolon Çapı.....	29
4.1.4. Birim Hücre Kavramı	30
4.1.5. Taşıma Gücü Hesabı.....	37
4.1.6. Oturma Hesabı.....	43
4.2. Priebe (1995) Yöntemi	49
4.2.1. İyileştirme Faktörü Hesabı	49
4.2.2. İyileştirilmiş Zemin Temellerinde Oturma Hesapları.....	57
4.3. Priebe (1995) Yönteminin Elektronik Tablo Yöntemi ile Analizi	59
4.4. “ <i>priebe_cal</i> ” Programının Kalibrasyonu.....	60
4.5. Priebe (1995) Yöntemi ile Parametrik Analiz	62
5. SAYISAL ANALİZLER.....	67
5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	67
5.2. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı.....	67
5.3. Sayısal Analizlerin Doğruluğunun Araştırılması.....	69
5.4. Parametrik Araştırma.....	72
5.4.1 Kısa Süreli Stabilitate Analizleri (Drenajsız Analizler)	72
5.4.2. Uzun Süreli Stabilitate Analizleri (Drenajlı Analizler)	85
6. TAŞ KOLON UYGULAMASI.....	93
6.1. Giriş.....	93
6.2. Proje ve Arazi ile İlgili Bilgiler.....	93
6.3. Zemin Özellikleri	95
6.4. Doğal Zeminde Yapılan Analizler.....	96
6.4.1. Doğal Zeminin Taşıma Gücü Analizi.....	97
6.4.2. Doğal Zeminin Oturma Analizi	99
6.5. Taş Kolonla İyileştirilmiş Zeminde Yapılan Analizler	100
6.5.1. Priebe(1995) Yöntemi ile Yapılan Analiz	100

6.5.2. Genel Yöntem ile Yapılan Analiz	101
6.5.3. Sonlu Elemanlar Programı İle Yapılan Analiz	102
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	109
KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	117
EKLER.....	118





ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 4.1.	Malzeme kalite oranları.....	28
Çizelge 4.2.	Taş kolon uygulamalarında kullanılan kolon çapları	30
Çizelge 4.3.	Zemin parametreleri	60
Çizelge 4.4.	Sonuçlar.....	61
Çizelge 4.5.	" <i>priebe_cal</i> " ile elde edilen sonuçlar.....	61
Çizelge 4.6.	Deney sahasına ait zemin parametrelerinin derinlikle değişimi	63
Çizelge 4.7.	Zemin parametreleri	64
Çizelge 4.8.	Taş kolon parametreleri.....	64
Çizelge 4.9.	Priebe (1995) yöntemi " <i>priebe_cal</i> " programı analiz sonuçları.....	65
Çizelge 5.1.	Zemin parametreleri	70
Çizelge 5.2.	Taş kolon parametreleri.....	73
Çizelge 5.3.	E_c/E_u etkisi için kullanılan zemin parametreleri (drenajsız analiz).....	74
Çizelge 5.4.	Taş kolon parametreleri.....	87
Çizelge 5.5.	E_c/E_s etkisi için kullanılan zemin parametreleri (drenajlı analiz).....	87
Çizelge 6.1.	Deney sahasına ait zemin parametrelerinin derinlikle değişimi	96
Çizelge 6.2.	Yapı ve zemin özellikleri	97
Çizelge 6.3.	K_1 ve K_2 değerleri (Terzaghi).....	97
Çizelge 6.4.	Taşıma gücü katsayıları (Terzaghi).....	98
Çizelge 6.5.	Taşıma gücü katsayıları (Hansen)	98
Çizelge 6.6.	C_c yöntemi ile oturma hesap tablosu	100
Çizelge 6.7.	Zemin parametreleri	101
Çizelge 6.8.	Taş kolon parametreleri.....	101
Çizelge 6.9.	Zemin parametreleri	104
Çizelge 6.10.	Taş kolon parametreleri-1 (HS zemin modeli parametreleri).....	104
Çizelge 6.11.	Taş kolon parametreleri-2 (HS zemin modeli parametreleri).....	104



ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 3.1.	Taş kolon imalat aşamaları	15
Şekil 3.2.	Vibro-kompaksiyon imalat adımları	17
Şekil 3.3.	Vibro-kompaksiyon makinası	18
Şekil 3.4.	Vibro-yerdeğiştirme imalat adımları.....	19
Şekil 3.5.	Alttan beslemeli yöntem imalat aşamaları	20
Şekil 3.6.	Geopier sistemi imalat aşamaları	21
Şekil 3.7.	Impact sistemi imalat aşamaları	22
Şekil 4.1.	Kare yerleşim	28
Şekil 4.2.	Eşkenar üçgen yerleşim	29
Şekil 4.3.	Radyal yerleşim	29
Şekil 4.4.	Birim hücre yaklaşımı. (a) plan (b) birim hücre (c) kesit	30
Şekil 4.5.	Taş kolon eşkenar üçgen dizilimi: (a) plan (b) geometri (Barksdale ve Bachus, 1983).	31
Şekil 4.6.	Rijit kabul modeli	33
Şekil 4.7.	Esnek kabul modeli.....	34
Şekil 4.8.	Kompozit sistemde kolon-zemin arasında yük paylaşımı.....	37
Şekil 4.9.	Göçme mekanizması	38
Şekil 4.10.	Homojen zeminde tekil taş kolonun göçme mekanizmaları	40
Şekil 4.11.	Taş kolona etkiyen farklı yükler	41
Şekil 4.12.	Taş kolon grupları için göçme mekanizmaları: (a) yanal genişleme, geniş dolgu yüklemesi (b) genel dairesel göçme (c) kabarma göçmesi, küçük grup (d) kısa kolonlar, zımbalanma göçmesi	42
Şekil 4.13.	Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları (a) yüzeyde yumuşak tabaka, kabarma veya kesme göçmesi (b) ince çok yumuşak tabaka, sınırlı yerel kabarma (c) kalın çok yumuşak tabaka, yerel kabarma göçmesi.....	43

Şekil 4.14.	$\mu_s=1/3$ için iyileştirme faktörü (Priebe,1995)	51
Şekil 4.15.	$\eta_g=1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri.....	53
Şekil 4.16.	$\eta_g= 1/3$ için derinlik faktörü	55
Şekil 4.17.	Derinlik faktörü limit değerleri.....	57
Şekil 4.18.	Tekil temellerin oturması.....	58
Şekil 4.19.	Şerit temellerin oturması.....	58
Şekil 4.20.	Deney sahasına ait zemin profili.....	62
Şekil 4.21.	Grup taş kolonların yerleşimi.....	63
Şekil 4.22.	Taş kolon çapı-oturma grafiği ($s=2m$)	65
Şekil 4.23.	Kolonlar arası mesafe-oturma grafiği ($D_c=1m$)	66
Şekil 4.24.	Taş kolon elastisite modülü-oturma grafiği	66
Şekil 5.1.	İki Boyutlu Geometrik Modeller.....	68
Şekil 5.2.	Zemin modeli	69
Şekil 5.3.	Sonlu elemanlar modeli ve ağ görüntüsü.....	70
Şekil 5.4.	Sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması	71
Şekil 5.5.	PLAXIS'te analiz sonrası deplasman dağılımları	71
Şekil 5.6.	Geometrik model	73
Şekil 5.7.	Taş kolon rijitliğinin oturma davranışına etkisi	75
Şekil 5.8.	E_c/E_u oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	76
Şekil 5.9.	Kil zemin rijitliğinin oturma davranışına etkisi	77
Şekil 5.10.	E_c/E_u oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	77
Şekil 5.11.	ϕ_c değerinin oturma davranışına etkisi	78
Şekil 5.12.	ϕ_c değeri ile oturma değeri arasındaki ilişki.....	79
Şekil 5.13.	Zeminin c_u değerinin oturma davranışına etkisi.....	80
Şekil 5.14.	c_u değerinin oturma davranışına etkisi	81
Şekil 5.15.	c_u değeri ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	81
Şekil 5.16.	Kolonlar arası mesafenin (s) oturma davranışına etkisi.....	82
Şekil 5.17.	Kolonlar arası mesafe (s) ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişki.....	82

Şekil 5.18.	D_c değerinin oturma davranışına etkisi	83
Şekil 5.19.	s/D_c oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	84
Şekil 5.20.	L_c değerinin oturma davranışına etkisi.....	85
Şekil 5.21.	L_c/D_c oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki	85
Şekil 5.22.	Geometrik model	86
Şekil 5.23.	E_c/E_s oranlarına göre oturma-zaman grafiği	88
Şekil 5.24.	Farklı s değerleri için oturma-zaman eğrileri.....	89
Şekil 5.25.	D_c değerlerine göre oturma-zaman grafiği.....	90
Şekil 5.26.	Farklı L_c değeri için oturma-zaman eğrileri	91
Şekil 5.27.	Farklı ϕ_c değerleri için oturma-zaman eğrileri	92
Şekil 6.1.	Deney sahasının yeri	94
Şekil 6.2.	Deney sahası	94
Şekil 6.3.	Deney sahasına ait zemin profili.....	95
Şekil 6.4.	Geometrik model ve sonlu elemanlar ağı (2D).....	103
Şekil 6.5.	Toplam deformasyon görüntüsü	105
Şekil 6.6.	Geometrik model ve sonlu elemanlar ağı (3D).....	106
Şekil 6.7.	Toplam deformasyon görüntüsü (3D).....	107
Şekil 6.8.	Oturma-zaman karşılaştırma grafiği	108



SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Toplam alan
A_c	: Taş kolon kesit alanı
A_e	: Etki bölgesi alanı
a_s	: Alan değişim oranı
c	: Kohezyon
C_c	: Zeminin sıkışma katsayısı
CPT	: Konik penetrasyon deneyi
c_r	: Zeminin radyal yöndeki konsolidasyon katsayısı
c_{rm}	: Zeminin radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
c_v	: Zeminin düşey yöndeki konsolidasyon katsayısı
c_{vm}	: Zeminin düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
d	: Derinlik
D	: Taş kolon malzemesi tek boyutlu sıkışma modülü
D_c	: Taş kolon çapı
D_e	: Birim hücre çapı
DKK	: Darbeli kırmataş kolon
d_1	: Zemin tabakasının alt sınır derinliği
D_r	: Rölatif sıkılık
D_s	: Zeminin tek boyutlu sıkışma modülü
D_s	: Ödometrik rijitlik modülü
d_u	: Zemin tabakasının üst sınır derinliği
D_{10}	: Granülometri eğrisinde %10 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)
D_{20}	: Granülometri eğrisinde %20 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)

D_{50}	: Granülometri eğrisinde %50 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)
E_c	: Taş kolonun sıkılığı (elastisite modülü)
E_{eq}	: Kompozit temelin eşdeğer elastisite modülü
$E_{oed,c}$	: Kolonun ödometrik koşullardaki sıkılığı
$E_{oed,s}$	: Zeminin ödometrik koşullardaki sıkılığı
E_s	: Zeminin elastisite modülü
E_u	: Zeminin drenajsız koşullardaki sıkılığı (elastisite modülü)
e_0	: Zeminin başlangıç boşluk oranı
h	: Kil tabakasının kalınlığı
K	: Yanal toprak basıncı katsayısı
K_{AC}	: Taş kolon malzemesi aktif itki katsayısı
k_x	: Zeminin x eksenindeki permeabilitesi
k_y	: Zeminin y eksenindeki permeabilitesi
k_z	: Zeminin z eksenindeki permeabilitesi
K_0	: Zemin malzemesinin sükünetteki toprak basıncı katsayısı
K_{0C}	: Taş kolon malzemesinin sükünetteki toprak basıncı katsayısı
L_c	: Taş kolon boyu
MC	: Mohr-Coulomb modeli
$m_{v,c}$	: Kolonun düşey yöndeki hacimsel sıkışma katsayısı
$m_{v,s}$	: Doğal zeminin hacimsel sıkışma katsayısı
$m_{v,s}^{\Phi}$	: Kolon inşaatından sonra zeminin hacimsel sıkışma katsayısı
n	: Yük paylaşım oranı = gerilme konsantrasyon oranı
N	: Ortalama normal gerilmenin 1kPa olduğu durumdaki normal konsolide zeminlerin özgül hacmi
N_D	: Çap oranı (D_e/D_c)
n_0	: Basit iyileştirme faktörü
n_1	: Azaltılmış iyileştirme oranı

n_2	: Son iyileştirme faktörü
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
P_c	: Temelden dolayı taş kolona gelen yük
P_s	: Temelden dolayı zemine gelen yük
q	: Temel yükü
$q_{ult,c}$	: Kolonun limit taşıma kapasitesi
$q_{ult,s}$	: Kolon çevresindeki zeminin limit taşıma kapasitesi
r_c	: Taş kolon yarı çapı
s	: Taş kolonlar arası merkezden merkeze mesafe
S_c	: Doğal zemin tabakası için hesaplanan oturma miktarı
S_c	: Kolonun oturması
S_e'	: Azaltılmış oturma miktarı ($S_e S_0 / S_e + S_0$)
S_i	: İyileştirilmiş zemin tabakası için hesaplanan oturma miktarı
S_N	: Uygunluluk sayısı
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
S_s	: Zeminin oturması
S_0	: İyileştirme yapılmadan önceki oturma miktarı
S_∞	: Homojen zeminde sınırsız kolon dizilimi ve sınırsız yükleme alanı altındaki oturma
t	: Zaman
TK	: Taş kolon
T_r	: Radyal drenaj nedeniyle zaman faktörü
T_v	: Düşey drenaj nedeniyle zaman faktörü
U_r	: Radyal drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi
U_{vr}	: Düşey ve radyal konsolidasyon yüzdesinin ortak etkisi
U_v	: Düşey drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi
W_c	: Taş kolon malzemesi ağırlığı
W_s	: Zemin ağırlığı

Ds_c	: Kolondaki düşey gerilme
Ds_s	: Zemindeki düşey gerilme
Ds_z	: İlave düşey gerilme
γ	: Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
γ_c	: Taş kolon malzemesinin doğal birim hacim ağırlığı
e_c	: Kolondaki düşey deformasyon
e_s	: Zemindeki düşey deformasyon
e_z	: Ortalama düşey deformasyon
n	: eminin poisson oranı
n_c	: olonun poisson oranı
ν_s	: Zeminin poisson oranı
$n\phi$	: Drenajlı yükleme durumu için poisson oranı
S_c	: Taş kolona etkiyen gerilme
S_r	: Kolon çevresine zeminden etkiyen yanıl gerilme
S_s	: Zemine etkiyen gerilme
S_{ϕ_z}	: Efektif jeolojik gerilme
S_{ϕ_s}	: Zemindeki ortalama efektif gerilme
S_{ϕ_c}	: Kolondaki ortalama efektif gerilme
ϕ	: Zeminin içsel sürtünme açısı
f_c	: Kolonun içsel sürtünme açısı
Y	: Zemin içindeki pasif göçme düzlemi açısı
Y_p	: Kolon içindeki pasif göçme düzlemi açısı
f_d	: Derinlik faktörü
δ	: Düşey deformasyon

- m : Gerilme azalma oranı
- μ_s : Zeminin poisson oranı
- r : Ortalama normal gerilmenin 1kPa olduğu durumdaki kritik durum hattının özgül hacmi
- k : Şişme eğrisinin eğimi
- λ : Normal konsolidasyon ve kritik durum hattının eğimi





1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun artması ile birlikte büyük kentlerde yaşanan yer sıkıntısı ve yüksek arsa maliyetleri nedeniyle mühendislik özellikleri bakımından yeterli olmayan zeminlerde dahi inşaat yapımı zorunlu hale gelmektedir. Sorunlu zemin olarak isimlendirdiğimiz bu tür zeminlerde uygulanan çözüm yöntemlerinden biri de zeminlerin mühendislik özelliklerinin çeşitli yöntemler uygulanarak yerinde iyileştirilmesidir.

Zemin iyileştirme yöntemleri, 1950'li yıllardan sonra geoteknik mühendisliğinin en önemli uygulama alanlarından biri haline gelmiştir. Bir proje sahasında yetersiz zemin koşulları ile karşılaşıldığı durumda; araziden vazgeçilmesi, daha iyi nitelikli zemin tabakalarına ulaşmak için derin temel tasarlanması, yetersiz zemin tabakasının uygun zemin tabakası ile değiştirilmesi, yetersiz zemin üzerine inşa edilecek yapının zeminden beklenen davranışa uygun biçimde tasarlanması ya da mevcut zeminin iyileştirilmesi gibi çözümler uygulanabilmektedir. Genellikle zeminlerin iyileştirilmesi en mantıklı ve en ekonomik çözüm olmaktadır. Bu çözümün uygulanabilecek en mantıklı ve ekonomik çözüm yöntemi olduğunu belirlemek için zemin etüdü titizlikle yapılmalı ve mevcut zemin için en uygun iyileştirme yönteminin seçildiğinden emin olunmalıdır.

Zemin iyileştirmesi, mühendislik açıdan sorunlu zeminin yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda üzerinde inşaat yapılabilecek hale getirilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Zeminler iyileştirilerek; kayma mukavemetinin ve taşıma gücünün artırılması, oturma, deformasyon ve boşluk oranının azaltılması amaçlanmaktadır.

Zemin profili, yeraltı su seviyesi, iyileştirme için gereken alan ve derinlik, yapılacak olan yeni yapının mevcut yapılarla etkileşimi ve maliyet zemin iyileştirme yöntemi seçimini etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Zemin iyileştirme yöntemleri; yüzeysel ve derin zemin iyileştirme yöntemleri olmak üzere sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında araştırılan taş kolon yöntemi derin zemin

iyileştirme yöntemlerinden biridir. Taş kolonlar ilk olarak 1830'lu yıllarda Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılmıştır (Osmanoğlu, 1999). Ancak, bu yöntem Avrupa'da 1950'den sonra, Amerika'da ise 1970'li yıllardan sonra yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntemde bir sonda veya muhafaza borusu yardımıyla istenilen derinliğe kadar zemine yer değiştirterek inilmekte ve daha sonra oluşturulan bu boşluğa zemin yüzeyine kadar titreşim ile sıkıştırılarak iri daneli granüler malzeme doldurulmakta ve zemin içerisinde kolonlar oluşturulmaktadır. Genellikle taş kolonların sağlam tabakaya ulaşacak şekilde uygulanması tercih edilmektedir. Taş kolon yönteminin en efektif kullanımı drenajsız kayma mukameti 7-50kPa değerine sahip yumuşak kil zeminlerde görülmektedir (Barksdale ve Bachus, 1983). Taş kolonlar, özellikle demir ve kara yolu dolgusu, çok katlı olmayan binalar gibi hafif yapıların altındaki zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır (Cimentada ve Costa, 2009). Taş kolonlar zeminin drenaj kapasitesini artırması bakımından düşey dren sistemlerine de benzetilebilir. Taş kolonlar drenaj yolunu kısaltılarak konsolidasyonu hızlandırmakta ve kayma dayanımının artmasına neden olmaktadır.

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 (Darbeli Kırmataş Kolon) 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 konik uçlu bir darbe tokmağı ile kademeler halinde sıkıştırılması ve zeminde yüksek yoğunlukta agrega kolonlar oluşturulmasıdır. Geopier kolonlar inşa edilirken darbe ile sıkıştırılan agregalar yanal olarak genişlemekte ve zeminde yanal yönde bir sıkışma sağlanmaktadır.

Ülkemizde son yıllarda taş kolon uygulamalarında artış gözlenmektedir. Fakat taş kolon uygulamalarında analiz ve tasarım aşamasında uygun bir hesap yöntemi olmadığından genellikle arazide yükleme deneyleri yapılarak projelendirme yapıldığı görülmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında taş kolonlar

için önerilmiş analiz ve tasarım yöntemleri kapsamlı olarak araştırılmıştır. Bu analiz yöntemleri, analitik ve sayısal çözüm yöntemleri şeklinde iki ayrı bölüm halinde incelenmiştir. Bu tez çalışmasına ait bölümler aşağıda verilmiştir.

Bölüm 2'de, taş kolonlarla ilgili literatürde yer alan deneysel ve teorik araştırmalar *Önceki Çalışmalar* başlığı altında özetlenmiştir.

Bölüm 3'te, taş kolon yöntemi, imalat aşamaları ve tasarım parametreleri *Taş Kolon Yöntemi* başlığı altında sunulmuştur.

Bölüm 4'te, *Analitik Yöntemler* başlığı altında taş kolonlar ile ilgili analitik çözüm yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde ayrıca, taş kolon uygulaması için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi analitik yöntemler yardımı ile araştırılmıştır.

Bölüm 5'te, *Sayısal Analizler* başlığı altında taş kolonların sonlu elemanlar yöntemine dayalı sayısal analizlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca, bu bölümde parametrik araştırmalar yapılarak taş kolon tasarım parametrelerinin etkisi sayısal yöntemler yardımı ile de araştırılmıştır.

Bölüm 6'da, *Taş Kolon Uygulaması* başlığı altında arazide inşa edilen grup taş kolonların analizi Bölüm 3 ve 4'te bahsedilen analitik ve sayısal yöntemler yardımıyla yapılmıştır. Söz konusu arazi uygulaması 2010-2013 tarihleri arasında TÜBİTAK projesi kapsamında arazide inşa edilmiş ve arazi ölçüm sistemleri ile davranışı takip edilmiştir. Araziden elde edilen ölçüm sonuçları ile analitik ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak analitik ve sayısal analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği araştırılmıştır.

Bölüm 7'de ise, tez kapsamında yapılan tüm araştırmalardan elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar, *Sonuçlar ve Öneriler* başlığı altında sunulmuştur.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde taş kolonlarla ilgili yapılan çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Tez çalışmasının bu aşamasında taş kolonlarla alakalı çeşitli konularda yapılan araştırmalardan kısaca bahsedilecektir.

Balaam ve ark. (1977): Bu araştırmada grup taş kolonların davranışı birim hücre yaklaşımı esas alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sayısal analizlerde araştırılan parametreler; kolon uzunluğu, kolonlar arasındaki mesafe, kolon rijitliği ve kolonların oturma davranışlarıdır. Sayısal analizlerde taş kolon ve zeminin poisson oranları 0.30 alınarak, taş kolon ile zeminin rijitlik modülleri oranı 10 ve 40 arasında değiştirilmiştir. Analizlerde sükûnetteki zemin basınç katsayısı $K_0=1$ olarak seçilmiş ve taş kolon ile zemin davranışı elastik kabul edilmiştir. Analizlerde ani oturmalar çok az olduğundan ihmal edilmiştir. Kolon merkezleri arasındaki mesafenin kolon çapından beş kat daha az olması durumunda oturmalarda ciddi bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları esas alınarak tasarım parametrelerine yönelik bir çizelge sunulmuştur.

Han ve Yee (1991): Çalışma kapsamında deniz kenarında bulunan yumuşak zeminli arazide inşa edilmiş taş kolonlar üzerinde büyük ölçekli dört farklı plaka yükleme deneyi yapılmıştır. Bu yükleme deneylerinden bir tanesi doğal zemine, bir tanesi yalıtılmış (isolated) taş kolonla iyileştirilmiş zemine, kalan ikisi de taş kolonla iyileştirilmiş zemine uygulanmıştır. Bu koşullarda rijit temelin oturması, gerilme dağılım faktörü ve boşluk suyu basıncının değişimi ölçülmüştür. Sonuç olarak taş kolonlu zemindeki rijit temel altında meydana gelen düşey gerilme dağılımının taş kolonsuz zemine göre oldukça farklı olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre gerilme dağılım faktörünün gerilme şiddeti ve zamana göre değiştiği, taş kolon uygulaması ile taşıma kapasitesinin iki katına çıktığı ve zemin stabilitesinde artış görüldüğü belirtilmiştir.

Priebe (1991): Genel kayma kırılmasının taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerde de meydana geldiğini ileri sürmüştür. Çalışma kapsamında eşdeğer

zemin kabulüne dayalı iki metot geliştirilmiştir. İlkinde zemin çevresindeki ortalama eşdeğer kohezyon ve kayma mukavemeti açısı ele alınmış ve iyileştirilmiş zemindeki temelin maksimum taşıma gücü teorik yoldan hesaplanmıştır. İkinci metotta ise temel için ortalama genişlik kabul edilmiş ve taşıma kapasitesi toplam bloğun malzeme özellikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

White ve ark. (2002): Bu çalışmada taş kolon uygulaması ile darbeli kırmataş kolon uygulaması karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, Iowa'daki bir otoyol genişletme inşaatında komşu iki dolgu sahasından birini taş kolonlar (TK) ile diğerini ise darbeli kırmataş kolonlar (DKK) ile iyileştirilmiştir. Her iki sahanın zemin özellikleri büyük oranda benzerlikler göstermektedir. Taş kolonlar büyük çaplı ve uzun elemanlar olarak seçilmişlerdir. Darbeli kırmataş kolon elemanlar ise küçük çaplı ve kısa ancak yüksek rijitlikte seçilmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda darbeli kırmataş kolonda meydana gelen oturma miktarı taş kolondaki oturma miktarının 1/3'ü oranında gerçekleşmiştir. Taş kolonlu zeminde meydana gelen oturmalar, darbeli kırmataş kolon uygulanan zemindeki oturmalara göre çok daha büyük olduğu gözlenmiştir. İnşaat sonrası yanal gerilmeler, taş kolonlu zeminde darbeli kırmataş kolonlu zemine nazaran yarısı kadar hesaplanmıştır.

Ambily ve Gandhi (2007): Bu araştırmada tekil taş kolon ve yedi adet kolondan oluşan grup taş kolon davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan bu sayısal ve deneysel çalışmalarda taş kolon aralığı, kilin kayma mukavemeti ve yükleme koşulları gibi değişen parametrelerin taş kolon davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan laboratuvar deneylerinde farklı su muhtevasına sahip yumuşak kil zeminle birlikte kullanılan taş kolonların çapı 100mm'dir. Tekil taş kolonların sadece taş kolonun yüklemesi ve tüm alanın yüklemesi olmak üzere iki farklı şekilde yüklemesi yapılmıştır. Sadece taş kolon yüklemesi ile tek bir kolonun eksenel limit taşıma kapasitesi incelenirken, tüm alan yüklemesi ile zeminin rijitliği incelenmiştir. Grup taş kolonların yüklemesi ise tüm alan üzerinde 7 adet kolonu kapsayacak şekilde ve farklı taş kolon aralıkları için yapılmıştır. Sayısal analizlerde ise zemin ve taş kolonlar, drenajlı koşullarda Mohr-

Coulomb (MC) zemin modeli ile modellenmiştir. Yapılan tüm deneyler Plaxis sonlu elemanlar programı ile modellenmiş ve sayısal analizler ile deneysel çalışmaların karşılaştırılması sonucunda iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

Liew ve Tan (2007): Bu çalışmada yumuşak zeminlerde inşa edilen taş kolon davranışı yükleme deneyleri yapılarak incelenmiştir. Projede yapılması planlanan 10m yüksekliğindeki toprakarme duvarın düşey ve yatay stabilitesinin sağlanabilmesi için taş kolon uygulaması ile iyileştirme yapılmasına karar verilmiştir. Arazideki zemin profili; 12m kalınlığında çok yumuşak kumlu kil tabakası ve bu tabakanın altında bulunan sağlam tabakanın bulunduğu şekildedir. Projede yapılması planlanan toprakarme duvarı desteklenmesi için 100cm çapındaki taş kolonların merkezden merkeze 2m karela ile uygulanmasına karar verilmiştir. Taş kolonların projelendirilmesi (zeminin ve kolonun taşıma kapasitesi, kolonun yanıl genişleme kontrolü, kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımı, iyileştirme sonrası oturma durumu vb.) literatürde belirtilen tasarım yöntemleri ile yapılmıştır. Uygulanan tasarımın performansını incelemek amacıyla 1m x 1m boyutlarındaki plaka üzerinde yükleme testleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda maksimum 900kN yük altında oturma miktarı 110mm olarak ölçülmüştür. İyileştirme yapılmadan önceki tahmini oturma miktarı 650mm'dir. Taş kolon uygulaması ile iyileştirilen bölgedeki tahmini oturma miktarı ise 250-280mm aralığındadır. İnşa edilen toprakarme duvarın inşaatından sonra da oturma miktarı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümde 4 ay sonundaki oturma miktarının 115mm olduğu görülmüştür.

Saroglou ve ark. (2008): Yunanistan'da bulunan Keratea-Lavrio arasında yapılan bir otoyol inşaatı dolgusu için taş kolon ile zemin iyileştirme çalışması yapılmıştır. Çalışmada dolgunun maksimum yüksekliği 3m olarak alınmıştır. Dolgu altında düşük plastisiteli, çakıllı ve siltli yumuşak kil tabakası bulunmaktadır. İmal edilen taş kolonların uzunluğu 14m'dir. Uygulama sonunda oturma süresinin 16 aydan 4 aya, toplam oturma miktarının 14cm'den 7cm kadar düştüğü görülmüştür.

Cimentada ve Costa (2009): Bu çalışmada yumuşak zeminin doğal haldeki ve taş kolon ile güçlendirilmiş haldeki davranışları Rowe- Barden adı verilen 254mm çapında ve 152.4mm yüksekliğindeki büyük ölçekli bir konsolidasyon hücresi ile incelenmiştir. Deneylerde kolon etrafındaki zeminde oluşan radyal konsolidasyon, oturma ve kolon-zemin arasındaki gerilme dağılımının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Deneyde birim hücre kavramı dikkate alınarak tek bir kolon davranışı esas alınmıştır. Yumuşak zemini temsil etmesi için yüksek permeabiliteye sahip kaolin kili kullanılmıştır. Yükleme eşit deformasyon kabulü ile zemin üzerine yerleştirilen rijit bir plaka yardımı ile yapılmıştır. Zeminin konsolidasyonu sırasında yalnızca zeminden kolona doğru drenaja izin verilmiştir. Çalışma sonucunda her bir yükleme kademesi için boşluk suyu basıncının zamana bağlı değişimi incelenmiş ve bu sonuçların literatürde daha önce uygulanmış olan bir teorik çözüm yöntemi ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre taş kolonların oturmaları azalttığı gözlenmiştir.

Vekli (2009): Bu çalışma kapsamında şev içerisine farklı aralıklarla yerleştirilen taş kolonların şev stabilitesine etkisi deneysel ve parametrik olarak incelenmiş olup ayrıca stabiliteye etki eden parametreler belirlenmiştir. Aynı zamanda bu tez çalışması kapsamında taş kolon yöntemi ile iyileştirilmiş şev üzerine yapılmış olan temellerin, taşıma gücü ve oturma özelliklerinin farklı taş kolon aralıkları (s) için değişimi de araştırılmıştır. Araştırmada deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Öncelikle taş kolonsuz durumda deneyler yapılmış ve deneylerde kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartları altında sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis programı ile modelleme yapılmıştır. Deneysel çalışmalar ve sonlu eleman analizlerinde oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizler

sonucunda taş kolonların şevlerin kaymaya karşı güvenlik sayılarını artırdığı gözlemlenmiştir.

Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda şev stabilitesinde, taş kolonlar arasındaki mesafe ve taş kolon sayısının taş kolonların tasarımı açısından önemli parametreler olduğu görülmüştür. Şev içerisindeki taş kolon sayısı ne kadar fazla ise şevin stabilitesi o kadar artmaktadır. Bunun sebebi taş kolonların düşey drenler gibi davranıp şevden suyun uzaklaşmasına yardımcı olmalarıdır.

Ataman (2011): Bu çalışmada, darbeli kırmataş kolonların laboratuvar ortamında modellenebilmesi amacıyla bir darbeli kırmataş kolon makinesi geliştirilmiş ve darbeli kırmataş kolon üretilmiştir. Darbeli kırmataş kolonun imalatı sırasında gerçekleşecek iyileşme oranını belirlemek için imalat öncesi ve sonrasında çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları karşılaştırılarak iyileşme oranları elde edilmiştir. İyileştirilmiş zemin ve iyileştirilmemiş zeminden örselenmeden alınan numuneler üstünde yapılan deneyler ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin üzerinde yapılan darbeli kırmataş kolon deneyleri yardımıyla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Örselenmemiş zemin numuneleri üstünde yapılan birçok serbest basınç, üç eksenli deneyi (UU), cep penetrometresi ve veyn deneyleri sonucunda c_u değerlerinin %7'ye kadar bir artış gösterdiği görülmüştür.
- Darbeli kırmataş kolon üretimi sırasında hacim artışı meydana geldiğinden yanal toprak basıncı katsayısında artışa neden olmaktadır. Üretilen model DKK üzerinde yapılan gözlemlerde boğumlarda oluşan hacim değişimi kolon çapının 1.5 ile 2.0 katı arasında değişmektedir.
- Model deney tankında oluşturulan darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilen zeminde, kolon çapından 30cm uzaklıktan sonra çevre zemine olan iyileştirme oranının düştüğü gözlenmiştir.

- Darbeli kırmataş kolon oluşturulan zeminde eksenel yükleme deneyi sonucunda oluşan deplasmanlar değerlendirildiğinde, zeminin darbeli kırmataş kolona göre daha çabuk göçtüğü ve aynı yükleme koşulları altında 2 kat daha fazla deplasman yaptığı belirlenmiştir.
- İyileştirme yapılmış zeminde üretilen darbeli kırmataş kolon ile, iyileştirilme yapılmayan zeminde üretilen darbeli kırmataş kolonda yapılan yükleme deneyi karşılaştırıldığında 1.5 - 2 kat arasında daha fazla iyileştirme sağlandığı görülmüştür.
- İyileştirilmeyen zemin üzerinde yapılan yükleme deneyi ile iyileştirme yapılan zemin üzerinde oluşturulan darbeli kırmataş kolondaki yükleme deneyi sonucunda oluşan deplasmanlara bakıldığında 3.5 ile 4 kat daha fazla deplasman yaptığı görülmüştür.
- Darbeli kırmataş kolon üretimi sırasında model deney tankının içinde bulunan gerilme ve boşluk suyu basıncı ölçümleri göz önüne alındığında basınçların gerilme ve boşluk suyu basıncı seviyesine kadar arttığı, üretimin bu seviyeyi geçmesinden sonra sürşarj etkisi ile basınçların belirli bir miktar azaldığı ve daha sonra sabitlendiği gözlenmektedir.
- Darbeli kırmataş kolonun hesaplanan kapasitesi ve yükleme deneyi ile ulaşılan sonuçlar yaklaşık olarak aynı değerleri vermiştir. Bu değerler her iki aşama içinde 40kN civarındadır.

Kurt (2011): Çalışmada taş kolon ile darbeli kırmataş kolon sistemlerinin performanslarını arazi yükleme testleri yardımıyla karşılaştırmıştır. Elverişsiz zemin koşullarına sahip olan inceleme alanında SPT ve CPT çalışmaları yapılarak zemin profili oluşturulmuştur. İnceleme alanında üç farklı tipte imalat yöntemi ile dört tanesi DKK elemanı ve dört tanesi TK elemanı olmak üzere toplamda sekiz adet kolon imal edilmiştir. İmal edilen kolonların hepsinin çapı 50cm ve boyları 6.50m'dir. Kolonlar üzerinde, kolonların taşıma kapasitesinin ve rijitliğinin

belirlenmesi için arazi yükleme testleri yapılmıştır. Yükleme testlerinden elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar yöntemine dayalı Plaxis 2D programı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda farklı imalat yöntemleri ile imal edilen taş kolonlar ve darbeli kırmataş kolonlar arasında farklı parametreler için elde edilen oranlar verilmiştir. Söz konusu çalışmalar sonucunda, etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olarak bilinen ve TK elemanlarına göre oldukça rijit olan DKK elemanlarının, oturma ve taşıma kapasitesi yönünden etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu gözlenmiştir.

Mirsalehi ve Bilsel (2012): Dolgu altındaki alüvyal zeminde imal edilen taş kolonların performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir bilgisayar programı ile düşey oturmalar, boşluk suyu basıncı değişimi ve konsolidasyon süresi araştırılmıştır. Dolgu altı zemini için drenajsız analizler, taş kolon malzemesi ve dolgu malzemesi için drenajlı analizler 500gün olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda oturma ve konsolidasyon süresini azaltmak amacıyla kullanılabilecek en uygun taş kolon boyunun 15m ve kolonlar arası mesafenin ise 1.5m olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Adeli (2013): Taş kolonların sayısal yöntemlerle analizi araştırılmış ve analitik yöntemlerle doğruluğu kontrol edilmiştir. Çalışmada bir TÜBİTAK projesi kapsamında arazide inşa edilmesi düşünülen grup taş kolonların analizleri gerçekleştirilmiş ve tasarım parametreleri belirlenmiştir. Uygulamada taş kolonların analiz ve tasarımı genellikle birim hücre modeli esas alınarak yapılmaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında, kolon malzemesinin kayma mukavemeti açısının 40^0 'den büyük ve rijitlik modülü oranının (E_c/E_s) 10'dan büyük olması gerektiği sonucu elde edilmiştir. Uygulamada taş kolonların çapı, kolonlar arası mesafe ve dolayısıyla yerleşim oranı önemli olduğundan arazideki uygulama için seçilebilecek çaplar ve yerleşim oranları verilmiştir.

Birim hücre analizlerinde, lineer elastik ve Mohr-Coulomb zemin modelleri ile ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Düzlem deformasyon analiz sonuçları eksenel simetrik ve üç boyutlu analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Uysal (2016): Bu çalışmada taş kolon davranışları büyük ölçekli arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sırasında taş kolonların konsolidasyon süreci incelenmiştir. Ayrıca arazide yapılan çalışmalarda grup kolonların düşey ve yatay deplasmanları, boşluk suyu basıncı ve toplam düşey basınç değerleri de incelenmiştir. Elde edilen veriler zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan tez çalışması kapsamında çok sayıda küçük ölçekli model deney de gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar deneyleri iki seri olarak yapılmıştır. İlkinde merkezde yer alan tekil kolonun taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi için sadece kolon yüklenirken, kolon ve zeminden oluşan kompozit malzemenin rijitlik modülünün elde edilmesi için birim hücrenin tamamı yüklenmiştir. İkinci seri deneyler ise büyük ölçekli oödometrik bir hücre içinde gerçekleştirilmiş olup zamana bağlı düşey yöndeki deplasmanlar ölçülmüştür. Deney sonuçları taş kolonlar için yaygın olarak kullanılan analitik yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak arazi ve laboratuvar çalışmaları Plaxis bilgisayar programı ile modellenmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3. TAŞ KOLON YÖNTEMİ

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

3.1. Giriş

Taş kolonlar ilk olarak 1830'lu yıllarda Fransa'da doğal zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılmıştır (Barksdale ve Bachus, 1983). Taş kolonların ilk uygulaması, 1835 yılında Fransız ordu mühendisleri tarafından ağır silah fabrikası ve mühimmat deposundan oluşan yapının zemininin iyileştirilmesi için yapılmıştır. Temel zeminine kazıklar sokulup ardından geri çekildikten sonra oluşan deliğe kırma taş ve kireç taşı doldurularak 2m boyunda, 10kN taşıma kapasitesine sahip taş kolonlar imal edilmiştir (Osmanoğlu, 1999). Ancak, bu yöntem Avrupa'da 1950'den sonra, Amerika'da ise 1972'den sonra yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Taş kolonlar, özellikle demir ve kara yolu dolgusu, çok katlı olmayan binalar gibi hafif yapıların altındaki zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır (Cimentada ve Costa, 2009). Ayrıca baraj gövdeleri, terminal, rıhtım ve havaalanı benzeri yapıların altındaki zemini iyileştirmede de etkili olarak kullanılmaktadır. Taş kolon yönteminin en efektif kullanımı drenajsız mukavemeti 7-50kPa değerine sahip zeminlerde görülmektedir (Barksdale ve Bachus, 1983). Yapılan çalışmalarda, taş kolonların yumuşak kil, silt ve siltli kum zeminlerde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Taş kolonların başlıca kullanım amaçları; konsolidasyonu hızlandırmak, taşıma kapasitelerini arttırmak, sıvılaşma potansiyelini azaltmak, toplam ve farklı oturmaları azaltmak, dolgu ve şev stabilitesini artırmak olarak özetlenebilir.

Sıvılaşma potansiyeline sahip olan bir zemine taş kolon uygulaması yapıldığında zeminin şu özellikleri kazanması beklenmelidir (Demir, 2011):

- 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 arttırmırlar.
- Taş kolonlar aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını engeller.
- Taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanal gerilme artışları meydana gelir.
- Alüvyon ve değişken zeminlerde vibro kompaksiyon ile birlikte kullanılmaktadırlar.

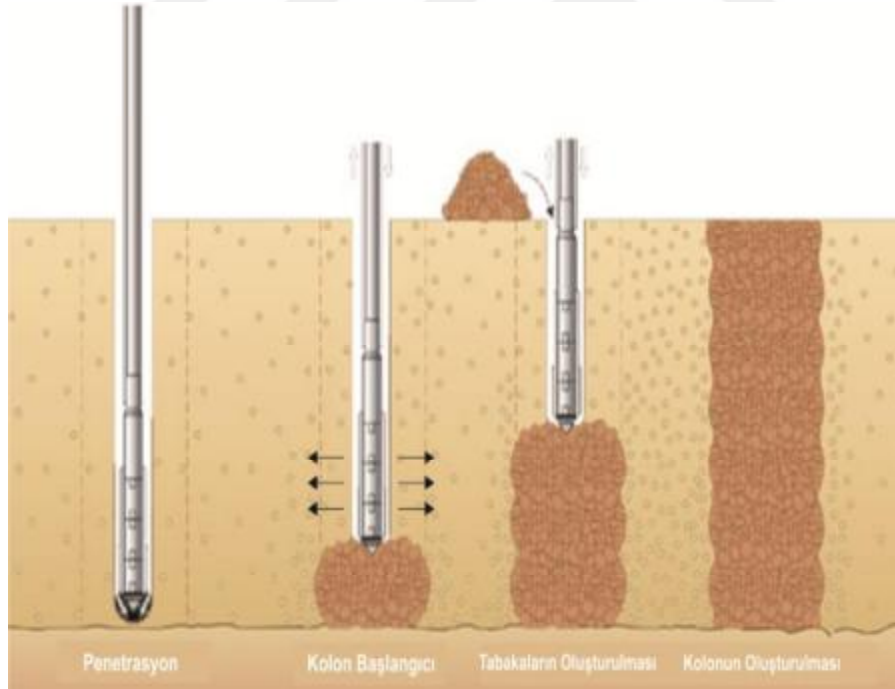
Taş kolonlar drenaj yolunu kısalttıklarından dren sistemlerine benzemektedirler. Ancak dren sistemlerinden farklı olarak taş kolonlar rijitlik modülleri yüksek elemanlar olduklarından sistemin taşıma gücünü arttırmaktadırlar. Ayrıca taş kolonlar yardımıyla konsolidasyon oturmaları hızlanmakta ve toplam oturmalar azalmaktadır.

3.2. Taş Kolon İmalatı

Taş kolon imalatında özel bir titreşimli başlık veya muhafaza borusu yardımıyla istenilen derinliğe kadar zemine yer değiştirterek inilmekte ve daha sonra oluşturulan bu boşluğa zemin yüzeyine kadar titreşim ile sıkıştırılarak çakıl veya mıcır gibi iri daneli malzeme doldurulmakta ve zemin içerisinde kolon oluşturulmaktadır.

Titreşim ve su ve/veya hava jeti yardımıyla titreşimli bir başlık ile zeminde gerekli derinlikte bir kuyu kazılır. Kazı sırasında kuyu içerisindeki erozyon ve yanal sıkışma nedeniyle kuyu titreşimli başlıktan bir miktar geniştir. Kuyu

içerisinde 30cm'den 120cm'ye kadar değişen kalınlıktaki tabakalar halinde geri dolgularla yüzeye kadar çıkılarak kolon imal edilmektedir. Taş zemin yüzeyinden boşaltılır ve titreşimli başlık ile zemin arasındaki dairesel boşluğa düşmesine izin verilir. Çukur kenarlarının göçmeyeceği bilinen zeminlerde açılan çukura taş eklenmeden önce titreşimli başlık geri çekilebilir. Her tabakanın oluşturulması sırasında malzemeyi sıkıştırmak ve zemin içerisine iyice yerleşmesini sağlamak amacıyla titreşimli başlık tabakaya birkaç kez bastırılıp çıkarılır. Taşın sıkışması amacıyla titreşimli başlık belli bir süre sabit pozisyonda tutulabilir. Taş kolon zemin yüzeyine ulaşıncaya kadar, birbirini takip eden ve sıkıştırılarak oluşturulan tabakalar halinde imal edilir (Demir, 2007). Genellikle taş kolonların sağlam tabakaya ulaşacak şekilde uygulanması tercih edilmektedir. Taş kolon imalat aşamaları Şekil 3.1'de görülmektedir.



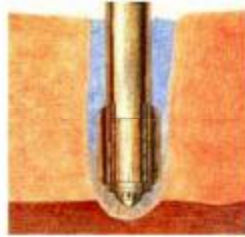
Şekil 3.1. Taş kolon imalat aşamaları (Namal, 2011)

3.3. Taş Kolon İmalat Yöntemleri

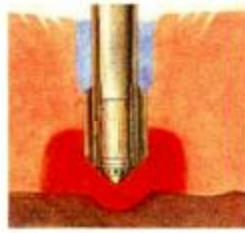
Taş kolonlar zeminin cinsine, uygulanacak olan projenin türü ve kullanılacak ekipmanların uygulanabilirliğine göre farklı yöntemlerle, farklı boy ve çapta uygulanmaktadırlar. Genel olarak ince dane oranı %10'dan az olan temiz ve kohezyonsuz zeminlerde vibro-kompaksiyon yöntemi, karışık kohezyonlu ve tabakalı zeminlerin istenildiği gibi sıkıştırılma yapılamadığı bölgelerde ıslak yöntem, yeraltı suyunun derinlerde olduğu ve kendini tutabilen zemin koşullarında kuru yöntem, kohezyonlu veya kohezyonsuz zayıf zeminlerde ise darbeli yöntem kullanılmaktadır. Taş kolon imalat yöntemleri 4 ana başlıkta incelenebilir.

3.3.1. Vibro-kompaksiyon Yöntemi

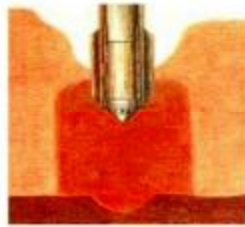
Vibro-kompaksiyon yönteminde genellikle %70 – 80 rölatif sıklık (D_r) elde edilebilir. İyileştirme sonucu elde edilen zeminin özellikleri, zemin tipine ve derecelenmesine, penetrasyon mesafesine ve uygulama sonrası geçen zamana bağlıdır. Vibro-kompaksiyon, merkezler arası mesafe 1.8 ile 4.3m arasında ve dizilimi kare veya eşkenar üçgen olacak şekilde uygulanır (Adeli, 2013). Öncelikle vibratör su veya hava jeti kullanılarak istenilen derinliğe indirilir. Daha sonra 0.50m aralıklarla geri çekilmeye başlanır. Kompaksiyon tepeden veya yerinde yapılan geri dolgu ile tamamlanır (Şekil 3.2). Kompaksiyon aşamasında, zemin hacminde sıkışmadan dolayı azalma meydana gelir ve bunu dengelemek amacıyla zemin yüzeyinden temiz kum eklenir. Böylece 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. Şekil 3.2'de bu yöntemin imalat adımları gösterilmiştir.

**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.

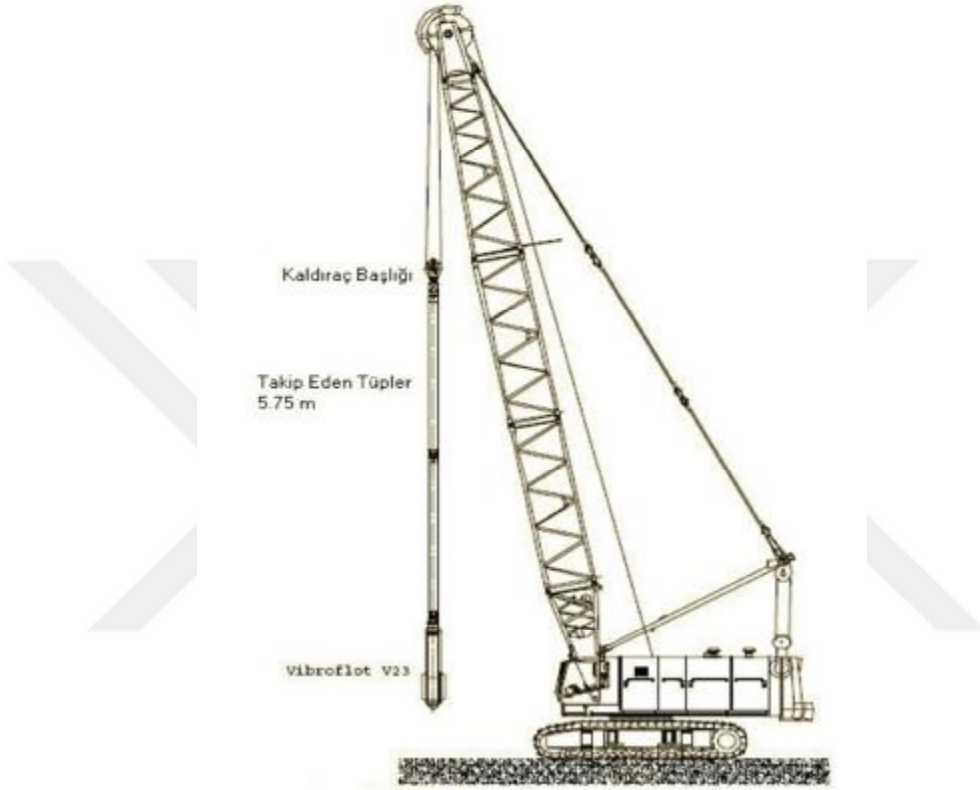
Şekil 3.2. Vibro-kompaksiyon imalat adımları (Demir, 2007)

Vibro-kompaksiyon işlemi ekonomik olarak 240kPa ile 480kPa arasında değişen temel taşıma gücü sağlamaktadır. Oturma ve sıvılaşma potansiyelini düşürmektedir. Gerekli işlem derinliği genellikle 4.5m ile 15m arasında değişir, fakat uygulamada en fazla 36.5m derinliğe kadar inilmiştir. Çizelge 3.1'de zemin cinslerine göre elde edilen başarımlar gösterilmiştir (Demir, 2007).

Çizelge 3.1. Zemin türüne göre taş kolon performansı (Demir, 2007)

Zemin Cinsi	Sonuç
Kum	Mükemmel
Siltli Kum	İyiye Yakın
Silt	Zayıf
Kil	Uygulanamaz
Maden Kalın tılları	İyi
Kontrolsüz Dolgular	Dolguya Bağlı Olarak Değişir

Ayrıca bu yöntemin, su seviyesi altında ve üstünde iyi sonuçlar verdiği de bilinmektedir. Şekil 3.3'de tipik vibro-kompaksiyon makinası gösterilmiştir.

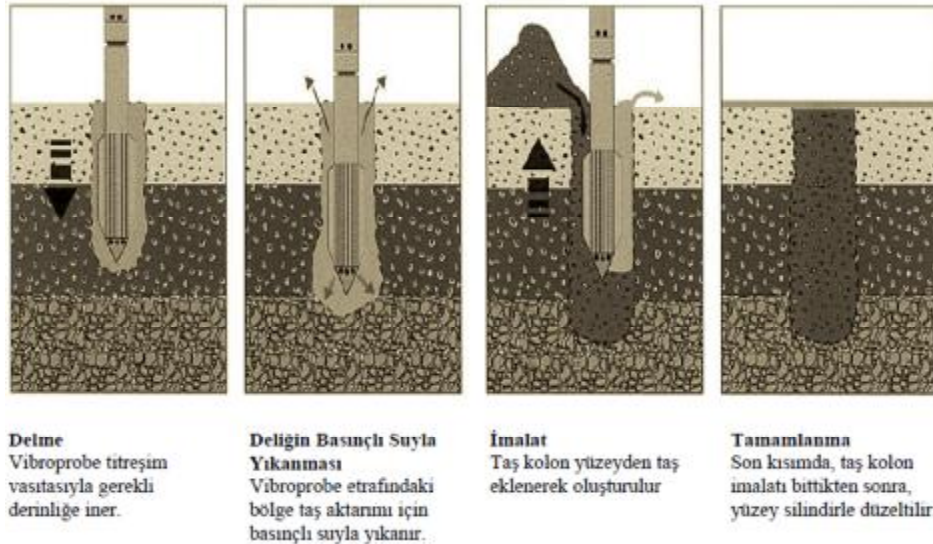


Şekil 3.3. Vibro-kompaksiyon makinası (Demir, 2007)

3.3.2. Vibro-yerdeğiştirme Yöntemi (Islak Yöntem)

Vibro-yerdeğiştirme yöntemi ıslak yöntem olarak da bilinmektedir. Bu yöntem karışık kohezyonlu ve tabakalı zeminlerin istenildiği gibi sıkıştırılma yapılamadığı bölgelerde tercih edilir. Vibro-yerdeğiştirme yönteminde vibro-kompaksiyon yöntemindekine benzer şekilde titreşimli bir başlık kullanılarak uygulama yapılır. Öncelikle titreşim ve yüksek basınçlı su jeti yardımıyla istenilen derinlikte bir kuyu açılır. Titreşimli başlık etrafındaki bölge basınçlı su jeti ile yıkanır ve yüzeyden taş eklenerek taş kolon oluşturulur. İmalat bittikten sonra

yüzey silindir ile düzeltilir. Vibro-yerdeğiştirme yöntemindeki en önemli parametre, ince danelerin kuyu çevresinde taş kolonun geçirimsiz olmasını engelleyen ve kuyunun stabilitesini sağlayan su jetidir. Bu yöntem yumuşak ve katı kıvamlı zemin koşullarında ($c_u=15$ ile 50kPa arasında), yeraltı suyunun yüksek olduğu bölgelerde etkili olarak kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemi olup aynı zamanda uygun maliyetli bir derin vibrasyon yöntemidir. Vibro-taş kolonlar zemin cinsi, istenilen şartlar ve yükleme şartlarına göre değişik şekillerde projelendirilmektedir. Kolonlar arası mesafeler 1.8 ile 3m arasında değişmektedir (Namal, 2011). Vibro-yerdeğiştirme imalat adımları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



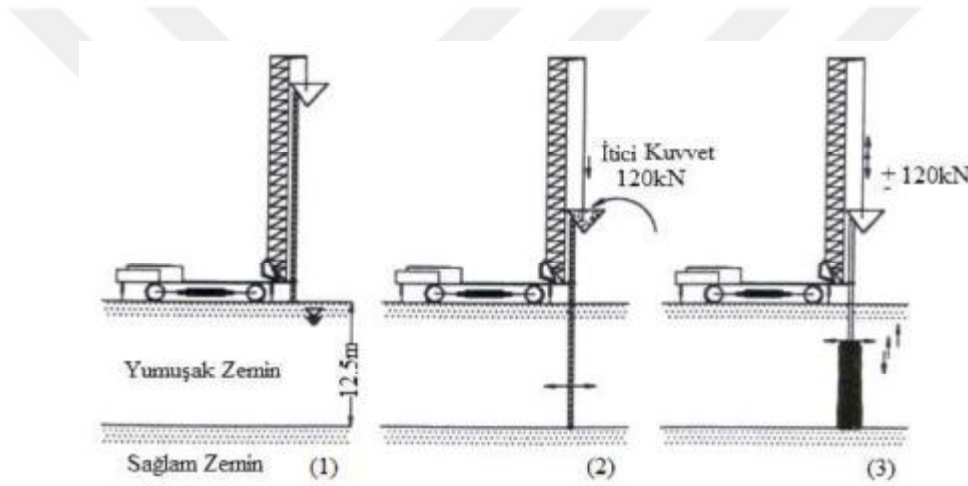
Şekil 3.4. Vibro-yerdeğiştirme imalat adımları (Demir, 2007)

3.3.3. Vibro-öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem)

Vibro-öteleme yöntemi kuru yöntem olarak da bilinmektedir. Bu yöntemde, taş kolon uygulaması yapılacak bölgede titreşimli başlığın zemini yanal olarak ötelemesi ile istenilen derinliğe kadar bir kuyu oluşturulur. Oluşturulan kuyu dibine indirilen başlık çıkarılır ve içine tabakalar halinde taş doldurulur. Doldurulan kuyu içine tekrar başlık indirilerek oluşturulan tabakalara kuvvet

uygulanır. Uygulanan bu kuvvetle taşın düşeyde ve kuyu çeperine doğru sıkışması sağlanır. Sıkışmış bir taş kolon oluşturulan bu yöntemde kuyunun içine taş dolduruluncaya kadar zeminin kendini tutması ve göçmemesi gerekmektedir. Bu yöntem, vibro-yerdeğiştirmeye göre daha dayanıklı ($c_u=30-60\text{kPa}$) ve yeraltı su seviyesinin derinlerde olduğu zeminlerde uygundur.

Kuru yöntem imalat aşamaları Şekil 3.5'teki gibidir. 1. aşamada ekipman kurulmakta, 2. aşamada titreşimli başlık zemin içerisine itilmekte ve 3. aşamada vibrasyonla taş kolon oluşturulmaktadır.



Şekil 3.5. Alttan beslemeli yöntem imalat aşamaları (Namal, 2011)

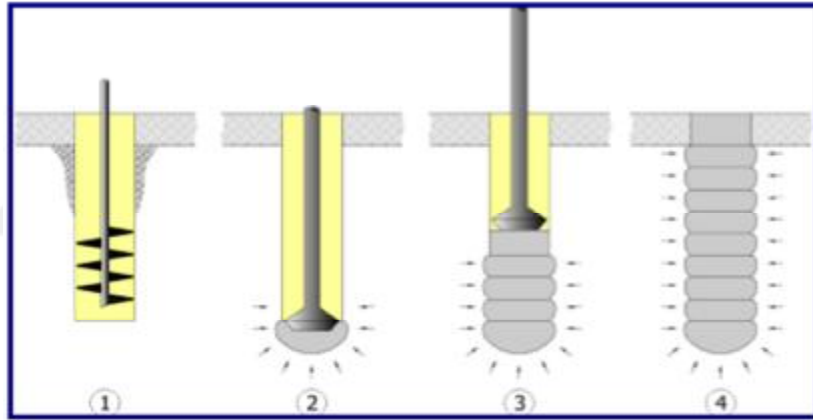
3.3.4. Darbeli Yöntem (Darbeli Kırmataş Yöntemi)

Bu yöntem 1980'li yıllarda Amerika'da Dr. Fox tarafından geliştirilmiştir. Darbeli kırmataş kolonlar ile; kohezyonsuz zeminlerde (ince dane oranı $< \% 20$) kolon etrafındaki zeminin sıkışması hedeflenirken, kohezyonlu zeminlerde zemin içerisinde nispeten rijit kolonların oluşturulması hedeflenmektedir. Darbeli yöntemde, ucu açık veya kapalı bir boru zemine itilerek ya da bir burgu yardımıyla kuyu açılır. Açılan bu kuyu içine tabakalı şekilde kolon malzemesi doldurulur her tabakanın doldurulmasından sonra boru düşük hızla geri çekilerek, tabakanın üstüne düşen borunun etkisi ile boru altında kalan zeminin sıkışması sağlanır.

Darbeli kırmataş kolon yöntemi; tekil ve radye temel zeminlerinde, yol projelerinde, dolgu ve menfez temel zeminlerinde, tank temel zeminlerinde, sanayi ve enerji yapılarında ve köprü yaklaşım dolgularında uygulanabilmektedir.

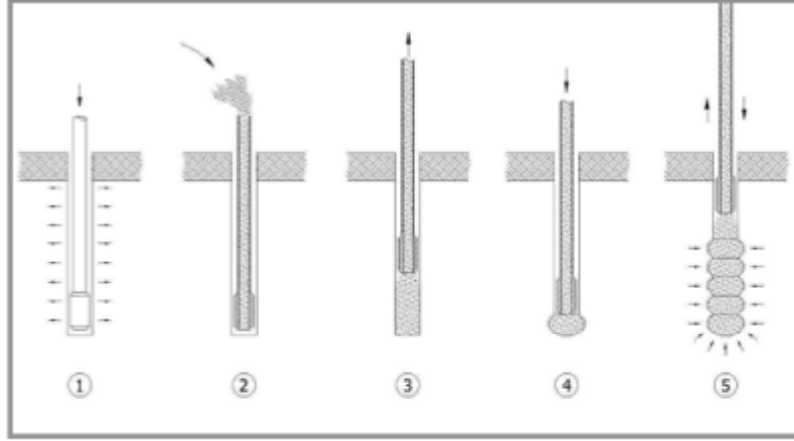
Darbeli kırmataş kolon elemanları, uygulama yöntemi olarak çeşitli gruplara ayrılmakta olup, en yaygın olarak kullanılanlar Geopier yöntemi ve Impact yöntemidir.

Geopier yöntemi, zayıf zeminin çıkartılıp yerine kırmataş doldurulmasıyla oluşturulan, böylelikle zayıf zemin içerisinde nispeten daha sağlam kolonlar oluşturularak zeminin iyileştirilmesine dayanan darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemidir.



Şekil 3.6. Geopier sistemi imalat aşamaları (Kurt, 2011)

Impact yöntemi ise, mandrelin istenilen derinliğe kadar çakılması ve hazneden boşalan kırmataşın mandrel içine doldurulmasıyla imal edilerek zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemidir.



Şekil 3.7. Impact sistemi imalat aşamaları (Kurt, 2011)

3.4. İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yukarıda anlatılan 4 farklı taş kolon imalat yöntemi karşılaştırılmış olup, sonuçları şu şekildedir :

- Kendini tutabilen, göçmeyen zeminlerde vibro-yerdeğiştirme yönteminde kılıfa ihtiyaç duyulmadığından, imalatı darbeli yöntemle göre daha hızlıdır.
- Vibro-yerdeğiştirme yöntemi genel olarak kil ve silt zeminler için uygundur. Kum ve siltli kumlarda vibro-kompaksiyon yöntemi iyi sonuçlar vermektedir.
- Vibro-yerdeğiştirme yönteminde büyük miktarda su kullanıldığından imalat sonrasında yüzeye çıkacak suyun çevreye zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Vibro-öteleme yöntemi ise temiz bir yöntemdir. Ancak bu yöntem, kuyu stabilitesini sağlamak için yeraltı suyunun derinlerde olduğu ve kendini tutabilen zemin koşullarında kullanılmalıdır.
- Genel olarak kuru yöntem ıslak yöntemle göre daha ekonomiktir.

3.5. Taş Kolon Elemanlarının Özellikleri**3.5.1. Taş Kolon Çapı**

Taş kolon elemanlarının çapları, uygulama yapılacak zeminin mukavemetine, imalat yöntemlerine ve uygulamada gerçekleştirilen sıkıştırma enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenden dolayı etkili taş kolon çapı tam olarak belirlenememektedir. Ancak genel olarak yapılan taş kolon uygulamalarında, vibro-yer değiştirme ve vibro-öteleme yöntemleri ile imal edilen kolonların çaplarının 100cm civarında olduğu, darbeli yöntem ile imal edilen kolonların çaplarının da 80cm ya da daha küçük boyutlarda olduğu söylenebilir.

3.5.2. Taş Kolon Boyu

Taş kolonlar ile zemin iyileştirme yöntemlerinde, taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle kolon boyunun sağlam zemine kadar uzatılması istenir. Böylece kolona uç kazığı özelliği kazandırılmış olur. Sağlam zeminin taş kolonun ulaşamayacağı kadar derin olması durumunda ise taş kolonlar sağlam zemine ulaşmadan sonlandırılabilir. Bu şekilde sağlam zemine ulaşmadan sonlandırılan taş kolonlar uç mukavemetine sahip olmadığından dolayı yüzen kolon davranışı gösterecektir. Taş kolon elemanlarının sonlandırılacağı tabaka derinliği 6m ile 10m arasında değişim göstermektedir ve bu şekilde ekonomik bir çözüm sağlanmış olmaktadır (Namal, 2011).

3.5.3. Taş Kolonun İçsel Sürtünme Açısı

Uygulamada kullanılan taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı genellikle 40° ile 45° arasındadır (Vekli, 2009).

3.5.4. Taş Kolon Malzemesinin Dane Çapı Dağılımı

Taş kolon elemanlarının imalatında çapları 1.3cm-1.7cm arasında değişen iyi derecelenmiş taş ve çakıl malzeme kullanılmaktadır (Kurt, 2011). Bu malzemelerin temininde zorlanıldığı durumlarda kırma-taş malzeme

kullanılabilmektedir. Ancak eğer kırma-taş ile imalat yapılacaksa, oturmaların azaltılabilmesi için malzemenin farklı dane çaplarından oluşturulması gerekmektedir.

3.6. Taş Kolon Elemanları için Kalite Kontrol Prosedürleri

Taş kolon elemanlarının performansı üzerinde etkili olan ve imalat süresince değerlendirilmesi gereken konulardan en önemlileri taş kolonun imalat çapının ve kolonun yerleştirilmesinin, kolonu çevreleyen zemin ve diğer kolonlar üzerindeki etkinin belirlenmesidir. İmal edilen kolon için harcanan malzeme ile kolon boyu arasındaki oran tespit edilerek imalatı tamamlanmış taş kolonun ortalama çapı hesaplanabilir. Kullanılacak taş kolon malzemenin çapı ve şekli imalat tekniğine bağlıdır. Vibro yer değiştirme (Islak yöntem) yöntemiyle imal edilen kolonlarda, yuvarlak veya az köşeli ve uniform dane dağılımı olan (25-60mm çaplı) çakıl kullanılmalıdır. Vibro öteleme (Kuru yöntem) yönteminde ise boşlukların en iyi şekilde doldurulabilmesi için iyi derecelendirilmiş (10-100mm çaplı) köşeli malzeme kullanılmalıdır. Bu yöntemde yapılan imalatın başarılı olması için kolona nüfuz ederek tıkanmaya ve geçirimsizliğin azalmasına yol açabilecek ince zemin danelerinin dışarı yıkanması ve kuyunun stabilitesini sağlayan su jetinin kesintisiz devam ettirilmesi gerekmektedir. Ayrıca taş kolonların performansı, aletsel gözlemler ve arazi testleri ile değerlendirilebilir. İyileştirilmiş zemin yüzeyinde temel yüklemesini temsil edecek şekilde yapılabilen yükleme testleri ile kolonun taşıma kapasitesi ve oturma davranışı belirlenebilir.

3.7. Taş Kolon Sistemlerinin Değerlendirilmesi

Vibro-flotasyon ya da derin sıkıştırma teknikleri ile verimli şekilde sıkıştırılamayan gevşek granüler ve dolgu zeminlerin, siltli kumların ve yumuşak killerin iyileştirilmesinde etkili olan taş kolon yönteminin diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Taş kolonlar zemin içerisinde drenler gibi çalıştığından kohezyonlu birimlerde konsolidasyon sürelerini azaltarak yumuşak zeminlerin mukavemetini arttırmaktadırlar. Ancak diğer zemin iyileştirme yöntemlerinde aynı sonuca ulaşabilmek için birkaç sistemin birlikte çalıştırılması (kum dren + ön yükleme gibi) gerekmektedir.
- Taş kolon uygulaması, derin temel sistemleri (fore ya da çakma kazık), tamamen yer değiştirme veya enjeksiyon gibi geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, imalatta kullanılan malzemenin kolay temin edilebilir ve ucuz olması sebepleri ile oldukça ekonomiktir.
- Taş kolon uygulamasında kullanılan malzeme doğal zemin olduğundan yöntemin çevreye olumsuz etkisi (ıslak yöntemde kullanılan suyun deşarjı hariç) bulunmamaktadır.
- Taş kolonların uygulanabilirliği önemli ölçüde zemin koşullarına bağlı olduğundan yöntemin uygulanması için tecrübeli mühendis gruplarının çalışmalarına ve detaylı zemin araştırmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.



4. ANALİTİK YÖNTEMLER

4.1. Taş Kolon Tasarım Parametreleri

Taş kolonlarla ilgili yapılan analitik çalışmalarda genellikle kompozit temel sistemi ve birim hücre yaklaşımı esas alınır. Taş kolonlarda tasarım parametreleri aşağıda sıralandığı gibidir.

- Kolon malzemesi
- Yerleşim modeli
- Kolon çapı
- Alan yerleşim oranı
- Taşıma kapasitesi
- Oturma

4.1.1. Kolon Malzemesi

Genellikle taş kolon imalatında kırma taş mıcır malzeme kullanılır. Kolon imalatında kullanılacak malzeme için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir (Han, 2015):

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (4.1)$$

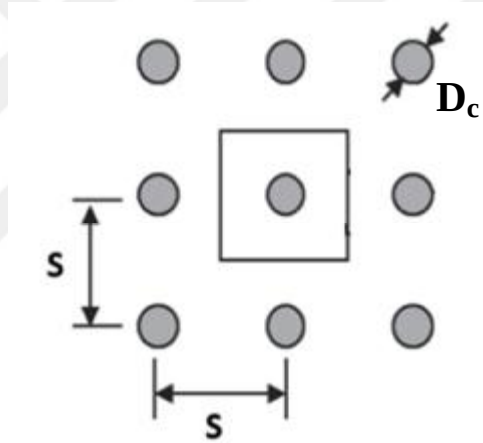
S_N uygunluluk sayısı olup denklemdeki D_{50} , D_{20} ve D_{10} granülometri eğrisinde %50, %20 ve %10 geçen yüzdelere karşılık gelen dane çapıdır (mm). Aşağıda Çizelge 4.1’de S_N değerlerine göre malzemenin kalite oranları görülmektedir.

Çizelge 4.1. Malzeme kalite oranları

Uygunluluk sayısı (S_N)	0-10	10-20	20-30	30-40	>50
Oran	Çok iyi	İyi	Orta	Kötü	Çok kötü

4.1.2. Yerleşim Modeli

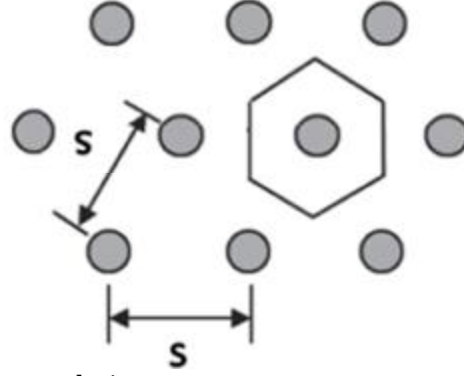
Taş kolonlar genellikle kare (Şekil 4.1) veya eşkenar üçgen (Şekil 4.2) dizilim şeklinde inşa edilirler. Eşkenar üçgen dizilimde, aralarındaki açı kare dizilim şekline göre daha küçük olduğundan daha sıkı bir taş kolon tasarımı ortaya koyulmaktadır.



Şekil 4.1. Kare yerleşim

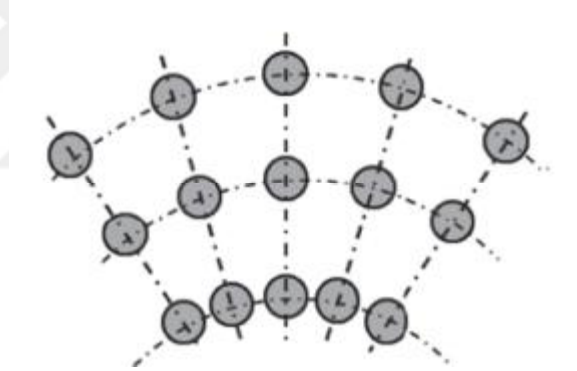
D_c : Taş Kolon çapı

s : Kolonlar arası merkezden merkeze mesafe



Şekil 4.2. Eşkenar üçgen yerleşim

Dairesel veya ring temeller için ise radyal yerleşim de tercih edilebilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Radyal yerleşim

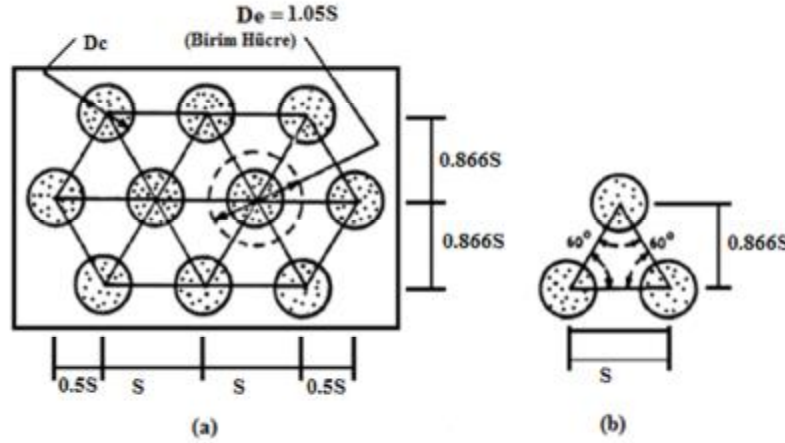
4.1.3. Kolon Çapı

Taş kolon uygulamalarında imalat yöntemine bağlı olarak seçilen kolon çapları değişmektedir. Çizelge 4.2’de uygulamada kullanılan kolon çapları gösterilmektedir.

Birim hücre kavramı üzerinde etkili olan faktörler; eşdeğer çap, alan değişim oranı ve gerilme konsantrasyonu şeklindedir.

4.1.4.1. Eşdeğer Çap

Oturma ve stabilite analizlerini doğru yapabilmek için kolonla birlikte onu çevreleyen zemin de dikkate alınmalıdır. Üçgen yerleşim modelinde kolonu çevreleyen zeminin alanı gösterildiği gibi düzgün bir altıgenden oluşmaktadır (Şekil 4.5). Hesaplama kolaylığı olması açısından bu düzgün altıgen, aynı eşdeğer alana sahip bir daire şeklinde kabul edilebilir.



Şekil 4.5. Taş kolon eşkenar üçgen dizilimi: (a) plan (b) geometri (Barksdale ve Bachus, 1983).

Eşkenar üçgen diziliimli kolonlar için eşdeğer çap Eşitlik 4.2 ve kare diziliimli kolonlar için eşdeğer çap Eşitlik 4.3 yardımı ile hesaplanmaktadır (Barksdale ve Bachus, 1983).

$$D_e = 1.05s \quad (4.2)$$

$$D_e = 1.13s \quad (4.3)$$

Buna göre, D_e eşdeğer çapına sahip tek bir kolon ve etrafındaki zeminin oluşturduğu silindirik hacim birim hücre olarak adlandırılır. Taş kolon ve birim hücrenin merkezleri ortaktır.

4.1.4.2. Alan Değişim Oranı (a_s)

Taş kolonların analizinde genellikle tek bir kolon ve onun etki bölgesi (birim hücre yöntemi) esas alınır. Bu nedenle etki bölgesinin alanı içerisinde taş kolon kesit alanının kaplamış olduğu alan tasarım açısından en önemli parametrelerden biridir. İyileştirilmiş zeminin performansı incelenirken, taş kolon ile değiştirilen zeminin hacmi oldukça önem arz etmektedir. Değiştirilen zeminin hacmini belirlemek amacıyla, alan değişim oranı (alan yerleşim oranı) kavramı kullanılır. Alan yerleşim oranı (a_s) iki farklı şekilde hesaplanır.

Bu oran kolon kesit alanı (A_c) ve etki bölgesi alanına (A_e) bağlı olarak Eşitlik 4.4 yardımıyla hesaplanır.

$$a_s = \frac{A_c}{A_e} \quad (4.4)$$

A_c : Kolon kesit alanı

A_e : Etki bölgesinin alanı

$A_e - A_c$: Zeminin kesit alanı

Kolon çap (D_c) ve kolonlar arası mesafeye (s) bağlı olarak ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$a_s = c_1 \frac{\pi D_c^2}{4s^2} \quad (4.5)$$

c_1 : Taş kolon dizilimine göre saptanan sabit bir katsayı (kare dizilim için $\pi/4$; eşkenar üçgen dizilim için $\pi/(2\sqrt{3})$ olarak alınır)

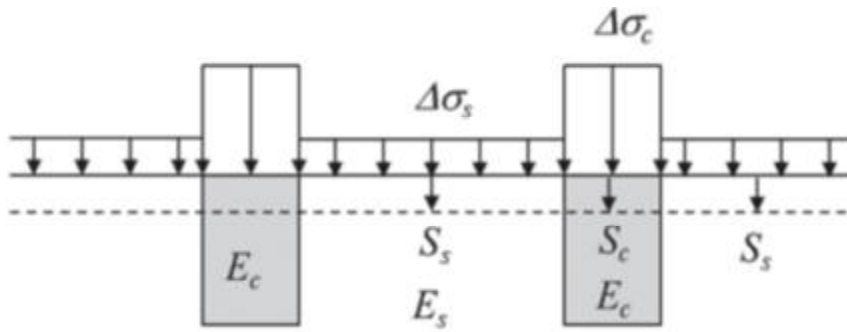
Bu durumda eşkenar üçgen dizilimine göre a_s Eşitlik 4.6 yardımı ile elde edilir.

$$a_s = 0.907 \frac{\alpha D_c \ddot{ö}}{c_s \ddot{ö}} \quad (4.6)$$

Taş kolonların analizi ile ilgili analitik yaklaşımlarda kolon ve zeminin birlikte kompozit bir temel oluşturduğu, yükleri ve deformasyonları paylaştığı kabul edilir. Genellikle de 2 yaklaşım kullanılır. Bunlar;

- Rijit temel altında eşit veya üniform deformasyon yaklaşımı ve
- Esnek temel altında eşit veya üniform gerilme dağılımı yaklaşımıdır.

Rijit temel – eşit deformasyon yaklaşımı: Kompozit temelde rijit temel nedeniyle temel altında eşit deformasyon ($S_c=S_s$) meydana geleceğinden zemine göre kolonlar daha yüksek gerilmeye ($Ds_c>Ds_s$) maruz kalır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Rijit kabul modeli

S_c : Kolonun oturması

S_s : Zeminin oturması

DS_c : Kolondaki düşey gerilme

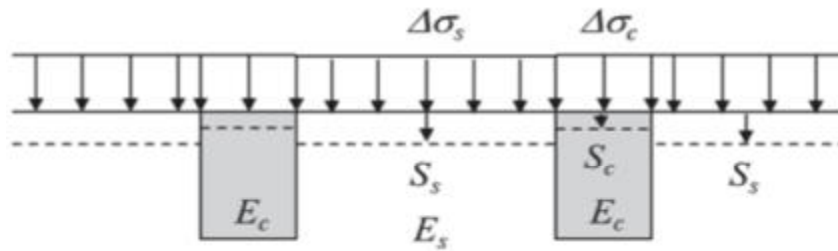
DS_s : Zemindeki düşey gerilme

Hesaplamalarda en önemli nokta, yükleme nedeniyle kolon ve zemine gelen gerilmelerin bilinmesi gerektiğidir. Yük paylaşım oranı (n) olarak da tanımlanan bu oranın bilinmesi veya tahmin edilmesi ile bu gerilmeler hesaplanabilir (Eşitlik 4.7).

$$n = \frac{DS_c}{DS_s} \quad (4.7)$$

Esnek temel-eşit gerilme yaklaşımı: Esnek temel altında eşit veya üniform gerilme meydana gelir. Bu yaklaşımda kolon ve zemine aynı yük etkir ($n=1$). Fakat kolon ve zeminde meydana gelen oturmalar farklı gelişir. ($DS_c = DS_s$ ve $S_s > S_c$)

$$n = \frac{DS_c}{DS_s} = 1 \quad (4.8)$$



Şekil 4.7. Esnek kabul modeli

Literatürde genellikle kompozit temel yaklaşımı ve rijit temel-eşit deformasyon yaklaşımı esas alınarak hesaplama yöntemlerinin geliştirildiği görülmektedir.

4.1.4.3. Gerilme Konsantrasyon Oranı (n)

Gerilme konsantrasyon oranı (n); kompozit sisteme etkiyen yük nedeniyle kolonda ve zeminde oluşacak gerilmelerin oranı şeklinde tanımlanır. Yük paylaşım oranı şeklinde de tanımlanabilir. Sisteme etkiyen yük, ilk anda üniform iken zamanla taş kolonda gerilme artışı olurken çevresindeki zemine etkiyen gerilmede azalma meydana gelir. Taş kolon, zemine göre daha rijit olduğundan ve düşey oturmalar üniform olduğundan zemine daha az gerilme gelirken taş kolonlar sisteme uygulanan gerilmelerin büyük bir kısmını taşırlar.

1D koşullarda gerilme konsantrasyon oranı Eşitlik (4.9) ile hesaplanmaktadır.

$$n_{1-D} = \frac{D_s}{D_c} = \frac{D_c}{D_s} \quad (4.9)$$

S_c : Taş Kolona Etkiyen Gerilme

S_s : Zemine Etkiyen Gerilme

Eğer 3D koşullarda kolonda yanal deformasyonlara izin verilirse, eşit deformasyon varsayımında, rijitlik modül oranı gerilme konsantrasyon oranına eşit olmaz.

$$n_{3-D} = \frac{E_c}{E_s} \quad (4.10)$$

Yanal deformasyonlara izin verilmesi durumunda;

$$n_{3-D} < n_{1-D} \quad (4.11)$$

olur. Birim hücre içerisinde verilen bir derinlikte olması gereken ortalama gerilme, birim hücre içerisindeki düşey kuvvetlerin dengesi için verilen alan oranı ile Eşitlik 4.12 yardımıyla hesaplama yapılabilir.

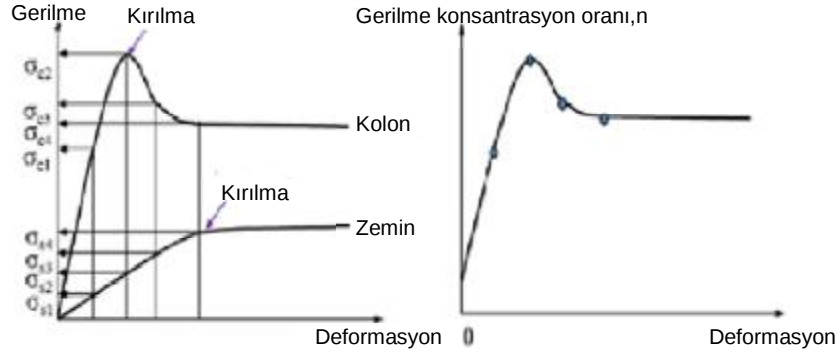
$$S = S_c a_c + S_s (1 - a_c) \quad (4.12)$$

Bu denklemden zemindeki ve taş kolondaki gerilmeler, gerilme konsantrasyon faktörü (n) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S_s = \frac{S}{[1 + (n - 1)a_c]} = m_s S \quad (4.13)$$

$$S_c = \frac{nS}{[1 + (n - 1)a_c]} = m_c S \quad (4.14)$$

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



Şekil 4.8. Kompozit sistemde kolon-zemin arasında yük paylaşımı (Han, 2015)

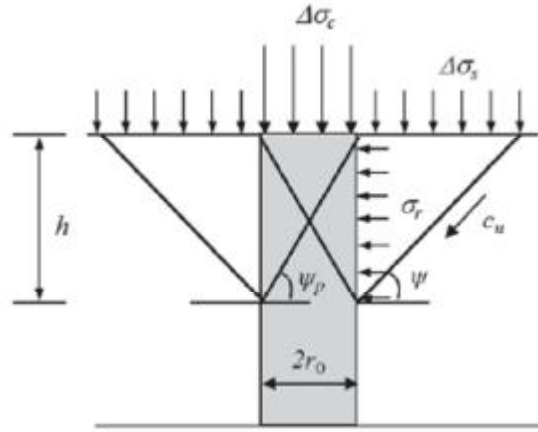
Şekil 4.8'deki grafikler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Kolon ve zeminin rijitlikleri çok farklı iki malzeme olduğu için yükleme sırasında gerilme konsantrasyon oranı sabit olmayıp zamana bağlı olarak sürekli değişir.
- İlk başlarda deformasyonla birlikte n artar (yük zeminden kolona transfer olur) ve maksimum bir değere ulaşır. Deformasyonun artmasıyla n azalır, yük tekrar kolondan zemine transfer olur.
- n arttıkça yük zeminden kolona transfer olurken, n azaldıkça yük kolondan zemine transfer olur. Konsolidasyon sonunda bu oran sabit kalır.
- Taş kolonlarda tipik olarak gerilme konsantrasyon oranı 1 ila 5 arasındadır.

4.1.5. Taşıma Gücü Hesabı

Brauns (1978); drenajsız koşulların geçerli olduğu suya doymun kil zeminlerde inşa edilen tek bir taş kolonun limit taşıma kapasitesi için basit bir hesaplama yöntemi önermiştir. Bu metod; yük altında kolonun çevresindeki zemine doğru genişleme göstermesini ve pasif kayma kırılmasını esas almaktadır. Bu yöntemde yapılan kabuller aşağıda sıralandığı gibidir.

- Kolon-zemin arasındaki etkileşim pürüzsüzdür (sürtünme yok).
- Çevresel gerilme oluşmaz.
- Zemin ve kolon ağırlıkları ihmal edilmiştir.



Şekil 4.9. Göçme mekanizması (Han, 2015)

Kuvvet dengesi esas alınarak aşağıdaki Eşitlik 4.15 çıkarılmıştır:

$$S_r = \frac{\sigma_c}{\sin 2Y} + \frac{2c_u}{\sin 2Y} + \frac{\tan Y_p}{\tan Y} \quad (4.15)$$

S_r :Kolon çevresine zeminden etkiyen yanal gerilme

c_u :Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

Y :Zemin içindeki pasif göçme düzlemi açısı

Y_p : Kolon içindeki pasif göçme düzlemi açısı

$$Y_p = 45 + \phi_c / 2 \quad (4.16)$$

f_c : Kolonun içsel sürtünme açısı

Bu eşitlik ile ilgili ortalama bir yaklaşım benimsenmiş ve tekil kolonun limit taşıma kapasitesi için Eşitlik 4.17 önerilmiştir.

$$q_{ult,c} = 20c_u \quad (4.17)$$

Yük altında eşit küçük deformasyon seviyesinde tekil kolon ve onun etrafındaki zeminin mukavemetleri mobilize olduğu için taş kolonla güçlendirilmiş kompozit temelin limit taşıma kapasitesi için aşağıdaki eşitlik önerilmiştir:

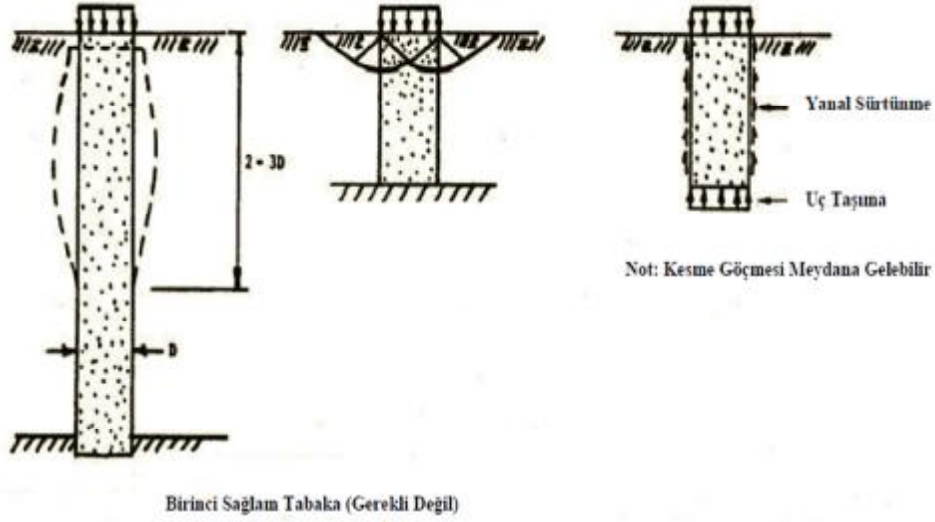
$$q_{ult} = q_{ult,c} a_s + q_{ult,s} (1 - a_s) \quad (4.18)$$

$q_{ult,s}$ = kolon çevresindeki zeminin limit taşıma kapasitesi

$q_{ult,c}$ = kolonun limit taşıma kapasitesi

4.1.5.1. Tekil Taş Kolon Göçme Mekanizmaları

Tekil taş kolonlar yüklendiğinde meydana gelecek göçme türlerini 3 farklı şekilde sınıflandırabilir. Bunlardan ilki, taş kolonun boyunun çapından 3-4 kat daha uzun olduğu durumda, kolonun sağlam tabakaya kadar uzanması ya da yüzen sistem olarak bırakılmasına bakılmaksızın, kolon malzemesinin dışa doğru kabarması ve sonrasında kolon çapının genişlemesi şeklinde olabilir (Şekil 4.10a). Bir diğeri, Şekil 4.10b'de görüldüğü gibi, taş kolonun kısa ve sağlam tabakaya oturduğu durumda, yüzeyde taş kolonu da içine alan bir genel ve yerel göçmeler meydana gelebilir. Sonuncusu ise, taş kolonun kısa (boyu çapının 2-3 katı kadar olacak şekilde) ve yumuşak tabaka içerisinde yüzen sistem olarak imal edildiği durumda, kolon ucunda göçmeler meydana gelebildiği görülmektedir (Şekil 4.10c).



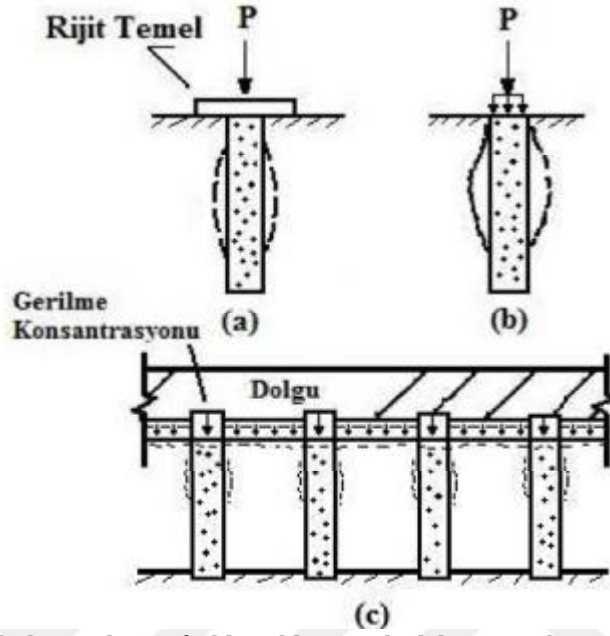
(a) Uzun Taş Kolon, Sağlam Tabakada veya Yüzen Sistem Olarak

(b) Rijit Kısa Kolon - Kesme Göçmesi

(c) Yüzen Kısa Kolon - Zımbalanma Göçmesi

Şekil 4.10. Homojen zeminde tekil taş kolonun göçme mekanizmaları (Barksdale ve Bachus, 1983)

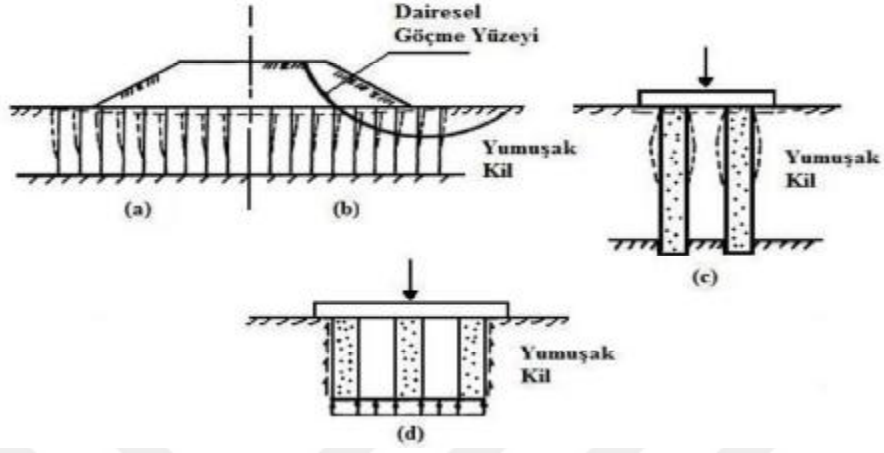
Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, tekil taş kolon elemanları ile yapılan çalışmalar ve model yükleme deneyleri, kolonun taşıma gücünün ve oturma davranışı önemli oranda yükün uygulanma şekline bağlıdır. Yükün kolon çapından geniş rijit bir plaka ile aktarılması durumunda yanıl genişleme engellenir ve böylelikle oturmalar azaltılıp, taşıma gücü arttırılmış olur (Şekil 4.11a). Yükün kolon çapı ile aynı boyutta uygulandığı durumda, yanıl genişlemede bir artış olmaz ve oturmalar küçük bir miktar fazla olabilir (Şekil 4.11b). Yükün kolon ve mevcut zemin tarafından birlikte taşınması ile oturmalar önemli ölçüde azaltılır (Şekil 4.11c).



Şekil 4.11. Taş kolona etkiyen farklı yükler (Barksdale ve Bachus, 1983)

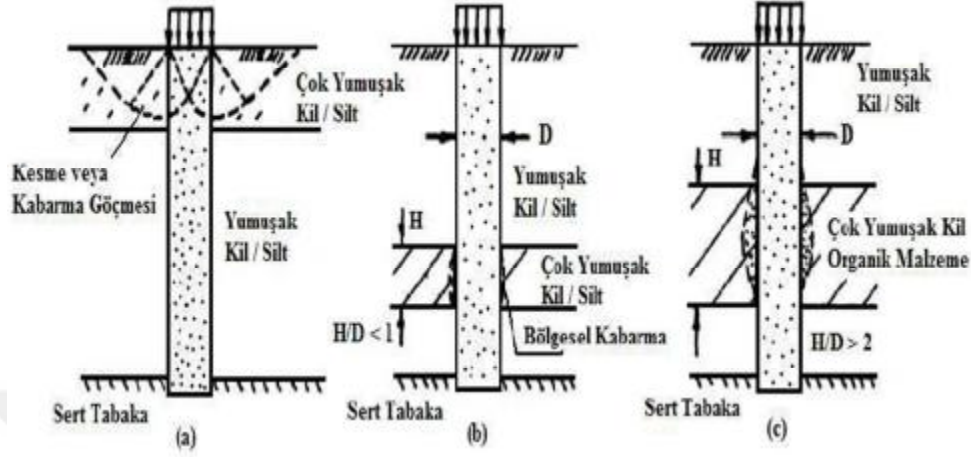
4.1.5.2. Grup Taş Kolon Göçme Mekanizmaları

Tekil bir taş kolon elemanı ile taş kolon grubu nihai yükleme kapasitesi açısından kıyaslandığında, grup taş kolon nihai yükleme kapasitesinin tekil taş kolonunkine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Tekil taş kolonun yanına bir başka kolon uygulaması yapılarak yeni bir kolon daha oluşturulduğunda bu iki kolon arasında kalan zemin, kolonlar ile çevrelendiğinden kolonun hareketi de sınırlandırılmış olmaktadır. Bu durumda her iki kolonun da taşıma kapasitesinde bir miktar artış meydana gelir. Zayıf zeminlerde dolgu inşaatına bağlı olarak temel altındaki zemin yanıl olarak ötelenir (Şekil 4.12a - Şekil 4.12b). Bu durum zemin ile taş kolon arasındaki ilişki yanıl desteği azaltmaktadır. Yumuşak zemin içinde oluşturulan grup kolonlarda, tekil kolonlarda olduğu gibi uç kısımda taşıma kapasitesinin aşılması ya da yanıl genişlemeye maruz kalabilirler (Şekil 4.12c-Şekil 4.12d).



Şekil 4.12. Taş kolon grupları için göçme mekanizmaları: **(a)** yanal genişleme, geniş dolgu yüklemesi **(b)** genel dairesel göçme **(c)** kabarma göçmesi, küçük grup **(d)** kısa kolonlar, zımbalanma göçmesi (Barksdale ve Bachus, 1983).

Taş kolonların arazi uygulama örneklerine bakıldığında, tabakalı zeminlerde yumuşak kohezyonlu birimlerin olması durumunda grup ya da tekil taş kolonlarda yanal genişleme göçmesi yaptığı görülmektedir (Şekil 4.13). Ayrıca arazi deneyimlerinden yola çıkılarak tabaka kalınlıklarının kolon çapından büyük olduğu durumlarda stabilite problemlerinin de oluştuğu bilinmektedir.



Şekil 4.13. Homojen olmayan kohezyonlu zeminlerde taş kolon göçme mekanizmaları (a) yüzeyde yumuşak tabaka, kabarma veya kesme göçmesi (b) ince çok yumuşak tabaka, sınırlı yerel kabarma (c) kalın çok yumuşak tabaka, yerel kabarma göçmesi (Barksdale ve Bachus, 1983).

4.1.6. Oturma Hesabı

Kohezyonlu zeminlerdeki oturmalar, zeminin sıkışma katsayısına ve konsolidasyon katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek rijitlik modülüne sahip taş kolon imalatı yapılması ile kil zeminin sıkışma katsayısı artar. Hesaplamalarda bu artışın dikkate alınması gerekir. Rijit yaklaşımda, 1-D koşullarda kolon ve zemindeki deformasyonların eşit olduğu kabul edilirse ($e_c = e_s = e_z$) Eşitlik 4.20 elde edilir.

e_c :Kolondaki düşey deformasyon

e_s :Zemindeki düşey deformasyon

e_z :Ortalama düşey deformasyon

$$E_{eq} = E_s(1 - a_s) + E_c a_s \quad (4.19)$$

E_{eq} : Kompozit temelin eşdeğer elastisite modülü

E_s : Zeminin elastisite modülü

E_c : Kolon elastisite modülü

$$E_{eq} = [1 + (n - 1)a_s] E_s \quad (4.20)$$

Oturma hesaplarında gerilme azaltma yöntemi esas alınmaktadır. Geniş yüklü bir alan altında (yüklü alanın genişliği yumuşak kil tabaka kalınlığının en az 3 katı) doğal zeminin oturması aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S = m_{v,s} D_s{}_z h \quad (4.21)$$

$m_{v,s}$: Doğal zeminin hacimsel sıkışma katsayısı

$D_s{}_z$: İlave düşey gerilme

h : Kil tabakasının kalınlığı

$$m_{v,s} = \frac{1}{D_s} = \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)}{E_s(1 - \nu_s)} \quad (4.22)$$

D_s : Ödometrik rijitlik modülü

ν_s : Zeminin Poisson oranı

Yumuşak killerde ödometre rijitlik modülü aşağıdaki eşitlik ile de hesaplanabilir.

$$D_s = \frac{2.3(1 + e_0) S_{z0}}{C_c} \quad (4.23)$$

e_0 : Zeminin başlangıç boşluk oranı

S_z : Efektif jeolojik gerilme

C_c : Zeminin sıkışma katsayısı

Kompozit temelin oturması

$$S_z = m_{v,s} D_s h = m_{v,s} n D_z h \quad (4.24)$$

$m_{v,s}$: Kolon inşaatından sonra zeminin hacimsel sıkışma katsayısı

m : Gerilme azalma oranı

Kompozit temelin oturmasının doğal zemin oturmasına oranı

$$\frac{S_z}{S} = \frac{m_{v,s}}{m} m \quad (4.25)$$

Yumuşak zemin için kolon inşaatı öncesi ve sonrası hacimsel sıkışması çok fazla değişmez.

$$m_{v,s} = m_{v,s} \quad (4.26)$$

$$\frac{S_z}{S} = m \quad (4.27)$$

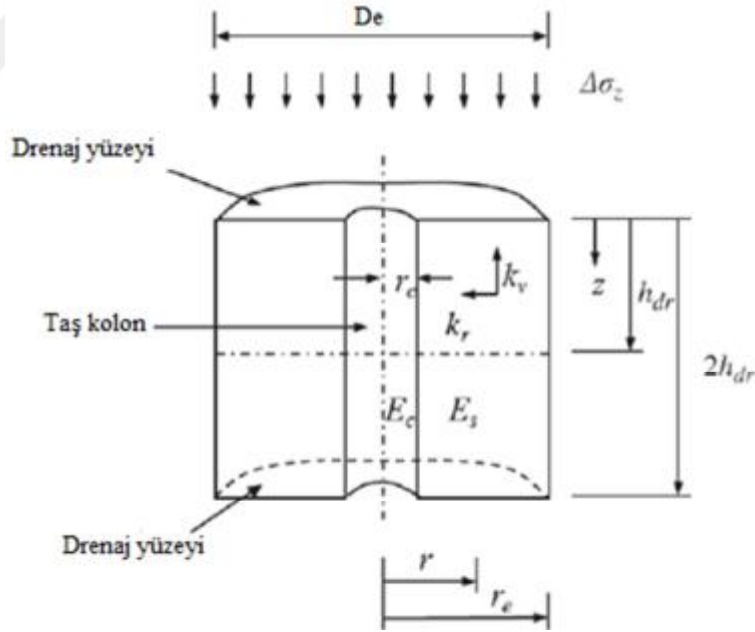
$$S_z = \frac{1}{1 + a_s(n-1)} S \quad (4.28)$$

$$n = 1 + 0.217 \frac{\frac{E_c}{E_s} - 1}{\frac{E_c}{E_s}} \quad (4.29)$$

Arazi datalarına göre rijitlik modül oranı (E_c/E_s) maksimum 20 ile sınırlandırılmalıdır. Taş kolonlar aynı zamanda düşey drenler gibi çalışarak konsolidasyonu hızlandırır. Taş kolon ile zeminin 1-D olarak sıkıştığı ve eşit deforme olduğu kabul edilirse aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\frac{e_s}{1+e_s} = \frac{e_c}{1+e_c} \quad (4.30)$$

$$Ds_s A_s + Ds_c A_c = Ds_z A_e \quad (4.31)$$



Şekil 4.14. Taş kolon ve drenaj

$$\sigma_s = \frac{m_{v,c}}{m_{v,s}} \sigma_c \quad (4.32)$$

σ_s : Zemindeki ortalama efektif gerilme

σ_c : Kolondaki ortalama efektif gerilme

$m_{v,c}$: Kolonun düşey yöndeki hacimsel sıkışma katsayısı

$$c_r = k_r / (g_w m_{v,s}) \quad (4.33)$$

$$c_v = k_v / (g_w m_{v,s}) \quad (4.34)$$

$$T_r = c_r t / d_e^2 \quad (4.35)$$

$$T_v = c_v t / h_{dr}^2 \quad (4.36)$$

$$c_{rm} = c_r \frac{\alpha}{\beta} \left[1 + n \frac{1}{N_D^2 - 1} \right] \div c_r \frac{\alpha}{\beta} \left[1 + n \frac{a_s}{1 - a_s} \right] \div \quad (4.37)$$

$$c_{vm} = c_v \frac{\alpha}{\beta} \left[1 + n \frac{1}{N_D^2 - 1} \right] \div c_v \frac{\alpha}{\beta} \left[1 + n \frac{a_s}{1 - a_s} \right] \div \quad (4.38)$$

c_r : Zeminin radyal yöndeki konsolidasyon katsayısı

c_{rm} : Zeminin radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

c_v : Zeminin düşey yöndeki konsolidasyon katsayısı

c_{vm} : Zeminin düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

N_D : Çap oranı (D_e/D_c)

$$0 < U_v < 52.6\% \text{ için } T_{rm} = c_{rm} t / d_e^2 \quad U_v = \sqrt{\frac{4T_v}{p}} \quad (4.39)$$

$$U_v > 52.6\% \text{ için } U_v = 1 - 0.81 \cdot 10^{-1.07 T_v} \quad (4.40)$$

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8}{F(N_D)} T_r} \quad (4.41)$$

$$F(N_D) = \frac{N_D^2}{N_D^2 - 1} \ln(N_D) - \frac{3N_D^2 - 1}{4N_D^2} \quad (4.42)$$

U_v : Düşey drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi

T_v : Düşey drenaj nedeniyle zaman faktörü

U_r : Radyal drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi

T_r : Radyal drenaj nedeniyle zaman faktörü

$$U_{vr} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (4.43)$$

U_{vr} : Düşey ve radyal konsolidasyon yüzdesinin ortak etkisi

$$T_{vm} = c_{vm} t / h_{dr}^2 \quad (4.44)$$

$$T_{rm} = c_{rm} t / d_e^2 \quad (4.45)$$

4.2. Priebe (1995) Yöntemi

Priebe (1995), taş kolon ile iyileştirilen zemindeki oturmaların tahmini için birim hücre yöntemini esas alan bir yaklaşım önermiştir. Bu yarı ampirik tasarım yöntemi Avrupa’da en yaygın kullanılan yöntemdir. Priebe (1995) yöntemi taş kolon performansını etkileyen tüm parametreleri içermemektedir. Ancak kullanımının basit olmasından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerdendir (McCabe ve ark., 2009).

İyileştirilmiş zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için Priebe (1995) tarafından önerilen yöntem detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır. Bu yöntemde zeminin taş kolon ile iyileştirildikten sonraki durumu ile başlangıçtaki durumu taş kolonun iyileştirme etkisi ele alınarak karşılaştırılmaktadır. Ayrıca bu yöntemle iyileştirilmemiş zemin ve taş kolonla iyileştirilen zemin karşılaştırılması sonucu bir iyileştirme faktörü elde edilmektedir.

4.2.1. İyileştirme Faktörü Hesabı

Priebe (1995) tarafından önerilen taş kolon tasarım yönteminde, kolonun rijit bir tabaka üzerine oturduğu, kolon malzemesinin sıkıştırılamaz olduğu ve kolon ve zeminin hacimsel yoğunluğunun ihmal edildiği 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 basit iyileştirme faktörü (n_o) Eşitlik (4.48) ile elde edilir. Bu faktör taş kolonların imalat öncesi ve sonrasındaki oturma oranlarını ifade etmektedir.

$$K_{AC} = \tan^2\left(45 - \frac{f_c}{2}\right) \quad (4.46)$$

$$f(\mu_s, A_c / A) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - A_c / A)}{1 - 2\mu_s + A_c / A} \quad (4.47)$$

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c / A)} - 1 \quad (4.48)$$

K_{AC} : Taş kolon malzemesi aktif itki katsayısı

μ_s : Zeminin Poisson oranı

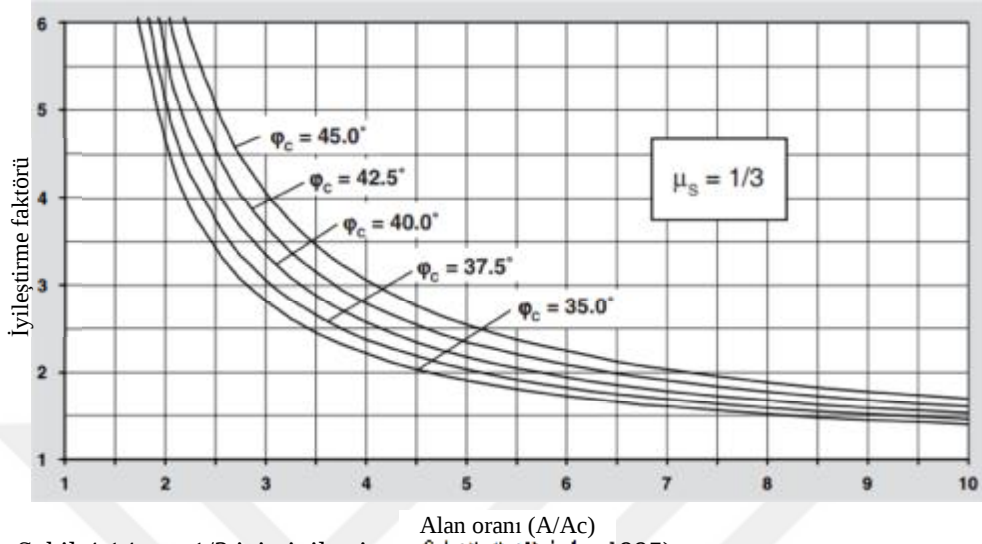
A_c : Taş kolon alanı

A : Toplam alan

Çoğu zaman Poisson oranının $\mu_s = 1/3$ alınması son oturma için yeterli olmaktadır. Bu durumda da iyileştirme faktörü Eşitlik (4.49) ile hesaplanabilir.

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c / A)} - 1 \quad (4.49)$$

Kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı, iyileştirme faktörü n_0 ve ters alan oranı olan A/A_c ilişkisini belirten eğri aşağıda verilmiştir (Şekil 4.15). Bu tasarım çizelgesinde kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı 35-45 aralığı seçilmiştir.



Şekil 4.14. $\mu_s=1/3$ için iyileştirme faktörü (Priebe, 1995)

Kolon Sıkışabilirlik Etkisinin Değerlendirilmesi: Priebe (1995), kolon malzemesinin sıkışabilir olduğunu belirtmiş ve kolonda meydana gelen sıkışmayı da dikkate almıştır. Ancak basit iyileştirme faktöründe (n_0) bu sıkışma özelliği yer almamaktadır. Fakat bunun için n_0 değerine bağlı olarak azaltılmış iyileştirme oranı tanımlanmıştır (n_1). Teoride A/A_c oranının 1 olmasından dolayı zaman iyileştirme faktörü sonsuz hesaplanmakta; gerçekte ise kolonun sıkışabilmesine göre değişkenlik göstermektedir. Priebe'a göre iyileştirme faktörü kolon ve çevre zemin arasındaki tek eksenli sıkışma modülleri (D_c/D_s) oranıyla sınırlıdır. $\mu_s=1/3$ için Eşitlik (4.50) kullanılır.

$$\frac{\partial A}{\partial \phi} = - \frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{2(4K_{AC} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{4K_{AC} - 1} + \frac{16K_{AC}(n_0 - 1)}{4K_{AC} - 1}} \quad (4.50)$$

Kolon malzemesinin sıkışabilirliğini tespit edebilmek için, alan oranında (A/A_c) bir düzenleme yaparak, düzeltilmiş (azaltılmış) iyileştirme faktörü hesaplanabilir.

$$D(A/A_c) = \frac{1}{(A_c/A)_1} - 1 \quad (4.51)$$

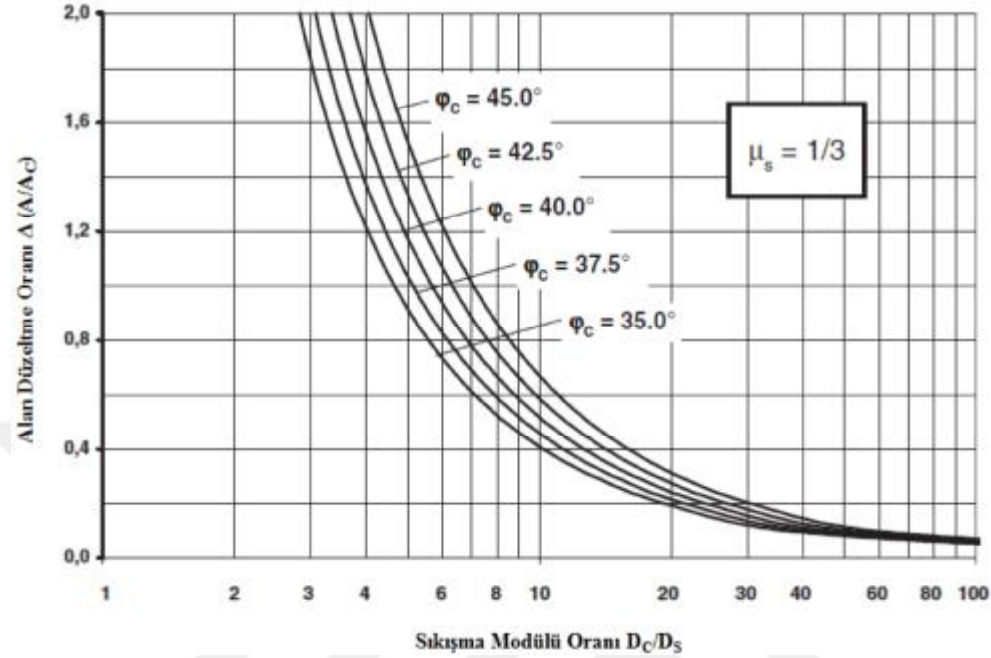
Düzeltilmiş alan oranı Eşitlik (4.52) yardımıyla elde edilebilir.

$$\frac{\overline{A_c}}{A} \div \frac{\overline{A_c}}{A} = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + D \frac{\overline{A_c}}{A} \div \frac{\overline{A_c}}{A}} \quad (4.52)$$

Son olarak da azaltılmış iyileştirme faktörü (n_1) Eşitlik (4.53) ile elde edilir.

$$n_1 = 1 + \frac{\overline{A_c}}{A} \frac{1/2 f(\mu_s, \overline{A_c}/A)}{\hat{e} K_{AC} f(\mu_s, \overline{A_c}/A)} - \frac{\hat{u}}{\hat{U}} \quad (4.53)$$

Poisson oranı $\mu_s = 1/3$ olan zeminlerde farklı taş kolon malzemeleri için içsel sürtünme açıları ile tek eksenli sıkışma modülleri oranı için alan düzeltme faktörü $\Delta(A/A_c)$ Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. $m_s=1/3$ için kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri (Priebe,1995)

Derinlik (Jeolojik Yük) Etkisinin Değerlendirilmesi: Taş kolonlarda yanal genişlemeye sebep olan faktör kolon ile zemin arasındaki başlangıç koşullarındaki düşey gerilme farkıdır. Bu durumda yalnızca temelden gelen P yükünün zemin ve taş kolonlar arasında dağıtımına bağlı ve derinlikle sabit olduğunu düşünmek anlamına gelmektedir. Yani zemindeki yanal basıncın derinlikle artması ile kolon, zemin tarafından derinlik boyunca daha fazla desteklenecek ve kolonun taşıma kapasitesinde artış olacaktır. Priebe (1995) önce bu durumu ihmal etmiştir. Ancak daha sonra başlangıç düşey gerilme farkının kolon boyunca sabit kaldığı kabulünü yapmıştır. Kolon ve zemin arasındaki gerilme farkı iyileştirme faktörü ile lineer olarak değiştiği için f_d derinlik faktörü tanımlanmıştır. Bu faktör 1'den büyük bir değer almaktadır. Bu faktör iyileştirilmesi düşünülen zeminin üst noktası ($z=0$) ve iyileştirme derinliğindeki ($z>0$) gerilme farkının oranıdır. Bu durumda iyileştirme faktörü n_1 , son iyileştirme faktörü $n_2=f_d.n_1$ değerine arttırılacaktır.

Derinlik faktörünün hesaba katılması ile daha düşük oturma değerleri elde edilecektir.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0C} - W_s / W_c}{K_{0C} \frac{W_c}{P_c}}} \quad (4.54)$$

$$P_c = \frac{P}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{P_c}{P_s}}} \quad (4.55)$$

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, \overline{A_c/A})}{K_{AC} f(\mu_s, \overline{A_c/A})} \quad (4.56)$$

$$W_c = \ddot{a} (g_c D d) \quad (4.57)$$

$$W_s = \ddot{a} (g_s D d) \quad (4.58)$$

$$K_{0C} = 1 - \sin f_c \quad (4.59)$$

$$n_2 = f_d \cdot n_1 \quad (4.60)$$

f_d : Derinlik Faktörü

W_s : Zemin Ağırlığı

W_c : Taş kolon malzemesi ağırlığı

P_c : Temelden dolayı taş kolona gelen yük

P_s : Temelden dolayı zemine gelen yük

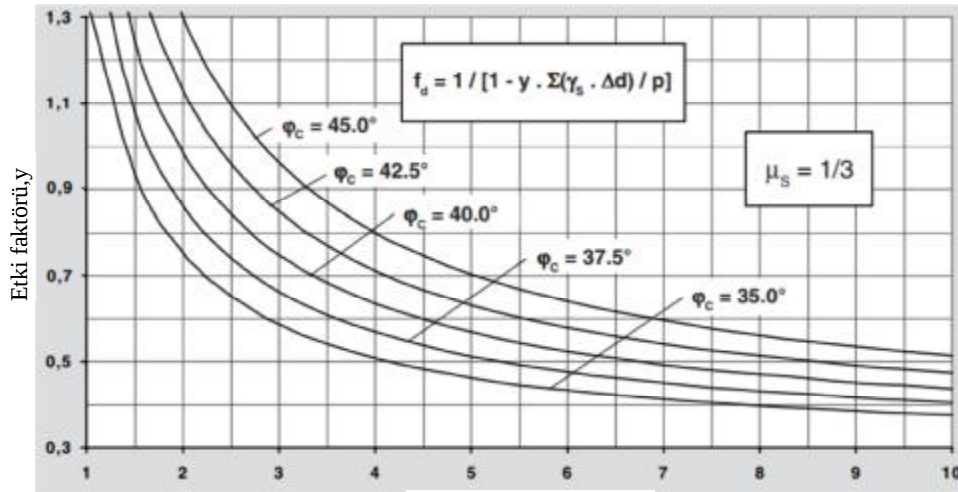
P : Temel yükü

K_{0C} : Taş kolon malzemesinin sükûnetteki toprak basıncı katsayısı

Şekil 4.17'de gösterilen sadeleştirilmiş diyagramda zemin ve taş kolon malzemesi için eşit birim hacim ağırlık değeri kullanılmıştır. Güvenlik sebebiyle uygun olmayan bu kabulde birim hacim ağırlığı daha düşük olan zeminin birim hacim ağırlığı kullanılmalıdır. Derinlik düzeltme faktörü de Eşitlik (4.61) ile elde edilebilir.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0C} - 1}{K_{0C}} \frac{W_c}{P_c}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{0C} - 1}{K_{0C}} \frac{\gamma (g_s D d)}{P_c}} \quad (4.61)$$

$\eta_s=0.33$ için etki faktörünün (y) alan oranı ve taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı ile değişimi gösterilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.16. $\eta_s = 1/3$ için derinlik faktörü (Priebe, 1995)

Uyumluluk Kontrolü: Priebe (1995) yöntemindeki basitleştirme ve kabullerin bu yöntemin uygulandığı probleme uygun olup olmadığının kontrolünün yapılması gerekmektedir. Bir başka deyişle kolonların sıkışabilirliği de göz önünde bulundurularak kolonların daha fazla yük taşıyamayacağı durumlar belirlenmelidir. Bunun için yapılan ilk uygunluk kontrolü derinlik faktörü ile yapılır. Bu kontrol özellikle zemin koşullarının oldukça sert veya sıkı olması durumunda yapılmalıdır. Derinlik ile artan yanal zemin desteği öyle bir duruma gelir ki artık kolonda yanal genişleme meydana gelmez. Kolon ile zemin arasındaki gerilme farkının doğrusal olarak azaldığı kabulü göz önüne alındığı zaman derinlik faktörünün sonsuza kadar artmayacağı görülecektir. Bunun için kolonların kendi yapısı gereği içinde meydana gelen sıkışma kompozit malzemede meydana gelen sıkışmayı aşmamalıdır. Yani taş kolon dolgu malzemesinin sıkışabilme özelliği ile derinlik faktörü maksimum değerine ulaşır (Şekil 4.18). Bu kontrol matematiksel olarak mümkün olsa da derinlik faktörünün (f_d) 1'den küçük değer aldığı durumlar kabul edilmemelidir.

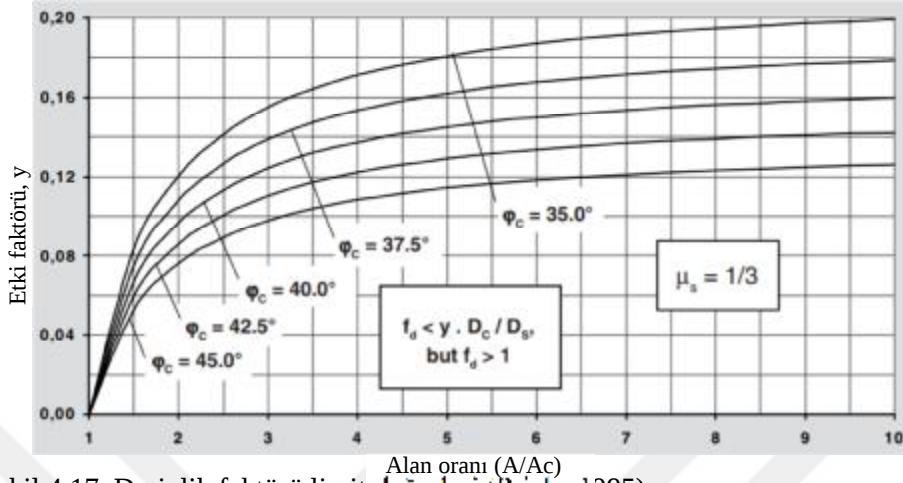
$$f_d \leq \frac{D / D_s}{P_c / P_s} \quad (4.62)$$

D : Taş Kolon Malzemesi Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

D_s : Zeminin Tek Boyutlu Sıkışma Modülü

İkinci kontrol iyileştirme faktörünün maksimum değerinin belirlenmesidir. İlkine sıkışmadan kaynaklanan oturmanın, yük uygulanması ile kolon etrafındaki zeminde meydana gelen oturmayı geçmesini sınırlandırır. İkinci kontrol zeminin yumuşak veya gevşek olması durumunda ilk olarak uygulanmalıdır.

$$n_{\max} = 1 + \frac{A_c}{A} \frac{D}{D_s} - 1 \quad (4.63)$$



Şekil 4.17. Derinlik faktörü limit değerleri (Priebe, 1995)

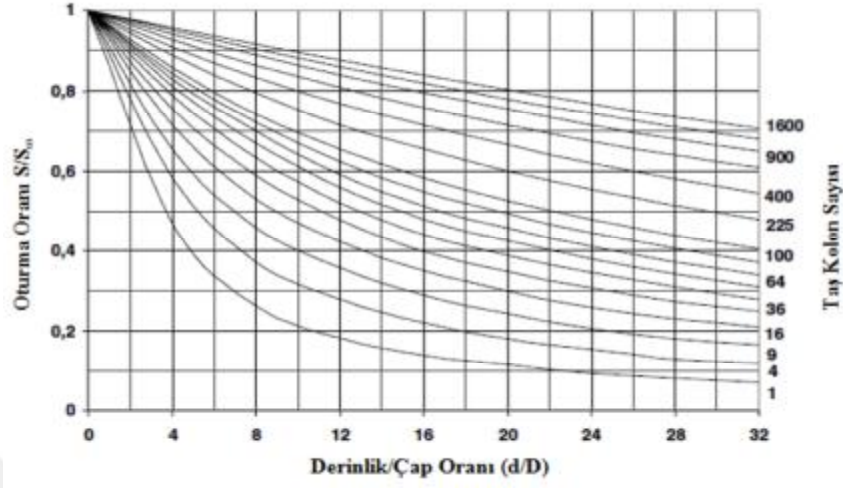
4.2.2. İyileştirilmiş Zemin Temellerinde Oturma Hesapları

Priebe (1995), sınırsız yükleme alanındaki sınırsız sayıdaki taş kolonda meydana gelen oturma için Eşitlik (4.64)'ü önermiştir. Ayrıca, grup kolonlardaki tekil ve şerit temellerin oturma hesabı için çizelgeler önermiştir (Şekil 4.19a ve 4.19b). Bu çizelgeler homojen zemin ortamları için geçerli olup, kolon çapı ve temel seviyesinden hesaplanan derinliğe bağlı olarak hazırlanmıştır.

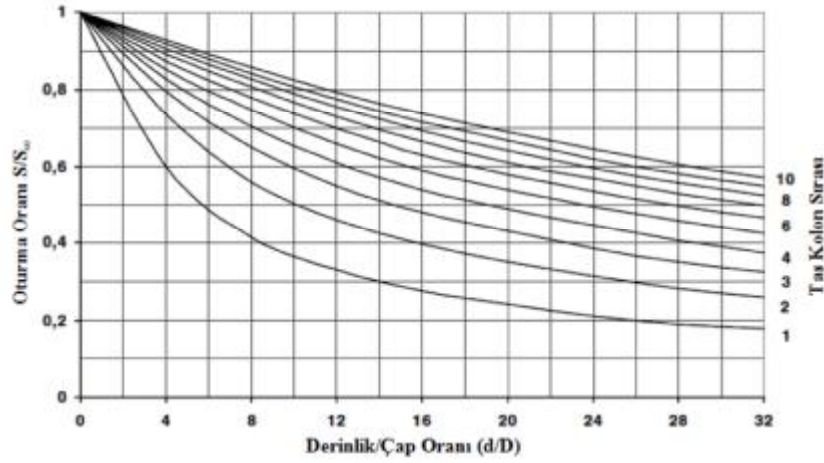
$$S_{\infty} = P \frac{d}{D_s n_2} \quad (4.64)$$

S_{∞} : homojen zeminde sınırsız kolon dizilimi ve sınırsız yükleme alanı altındaki oturma

d : Derinlik



Şekil 4.18. Tekil temellerin oturması (Priebe,1995)



Şekil 4.19. Şerit temellerin oturması (Priebe,1995)

Priebe (1995), oturmaları hesaplarırken aşırı oturma tahmini yapmamak için zemini tabakalara ayırarak her bir tabaka için ayrı ayrı oturma hesabı yapmıştır (Eşitlik 4.65).

$$DS = \frac{P}{D_s n_2} \left[\left(\frac{S}{S_*} \right)_l d_l - \left(\frac{S}{S_*} \right)_u d_u \right] \quad (4.65)$$

d_1 : Zemin tabakasının alt sınır derinliği

d_u : Zemin tabakasının üst sınır derinliği

Priebe, kısmen gömülü kolonların oturma hesabı için ise şu eşitliği önermiştir :

$$S = S_i + S_e \cdot \frac{S_0}{S_e + S_0} + S_c = S_i + \frac{S_e S_0}{S_e + S_0} + S_c \quad (4.66)$$

S_i : İyileştirilmiş zemin tabakası için hesaplanan oturma miktarı

S_c : Doğal zemin tabakası için hesaplanan oturma miktarı

S_e ': Azaltılmış oturma miktarı ($S_e S_0 / S_e + S_0$)

S_0 : İyileştirme yapılmadan önceki oturma miktarı

4.3. Priebe (1995) Yönteminin Elektronik Tablo Yöntemi ile Analizi

Priebe (1995) yönteminin hesap adımları elektronik tablo yöntemi ile Microsoft Excel'de programı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu programa "*priebe_cal*" adı verilmiştir.

Programın çalışabilmesi için öncelikle "*Veri Girişi*" sayfasında probleme ait gerekli veriler girilmektedir. Programın "*Hesaplama*" sayfasında ise yonteme ait bağıntılar yardımıyla herhangi bir tablo ve grafiğe ihtiyaç duymadan problem çözülmektedir. Elde edilen sonuçlar ise "*Sonuçlar*" sayfasında kullanıcıya sunulmakta ve istenirse de yazıcıdan çıktısı alınabilmektedir. Hazırlanan programa ait veri girişi sayfa görüntüsü Ek1'de, hesaplama sayfa görüntüsü Ek2'de ve sonuçlar sayfa görüntüsü ise Ek3'te verilmiştir.

Programın çalışabilmesi için kullanıcı tarafından girilmesi gereken parametreler; zemin birim hacim ağırlığı, zeminin poisson oranı, zeminin içsel sürtünme açısı, zeminin kohezyonu, zemin elastisite modülü, taş kolon elastisite

modülü, taş kolon poisson oranı, taş kolon içsel sürtünme açısı, taş kolon birim hacim ağırlığı, taş kolon çapı, kolonlar arası mesafe ve düşey temel yükü'dür.

4.4. “*priebe_cal*” Programının Kalibrasyonu

Bu tez kapsamında hazırlanan "*priebe_cal*" programının doğru çalışıp çalışmadığının kontrol edilmesi için literatürden bir örnek ele alınmıştır (Priebe 1995). Söz konusu örnekle ilgili parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Zemin parametreleri (Priebe,1995)

Zemin Tabakası [-]	Kalınlık m	γ kN/m ³	n [-]	ϕ [-]	c kPa	$E_{oed,s}$ MPa	D_c m
1	1.0	19	0.33	35	0	50	0.00
2	0.4	18	0.33	25	5	20	0.75
3	0.6	16	0.33	0	25	2	0.75
4	0.6	15	0.33	0	20	1	0.75
5	6.6	5	0.33	0	20	1	0.75
6	0.8	7	0.33	0	30	10	0.60
7	1.0	9	0.33	30	0	20	0.60
8	10.0	9	0.33	30	0	20	0.00

Makaleden alınan verilere göre;

- Zemin 8 tabakadan oluşmaktadır.
- Taş kolonlar üçgen yerleşimle zemine yerleştirilmiştir.
- Kolonlar arası mesafe 1.52m olarak verilmiştir.
- Kolon boyu 10m'dir.
- Toplam temel basıncı 130kN/m² 'dir.

Bu verilere göre makalede elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sonuçlar (Priebe,1995)

No	n_0	$\Delta A/A_c$	n_1	f_d	n_2
1	Taş kolonsuz tabaka				
2	2.34	1.17	2.01	****	1.88
3	2.34	0.09	2.31	1.16	2.68
4	2.34	0.05	2.32	1.21	2.82
5	2.34	0.05	2.32	1.27	2.94
6	1.78	0.52	1.72	1.24	2.13
7	1.78	1.17	1.65	****	1.57
8	Taş kolonsuz tabaka				

Çizelge 4.5. "priebe_cal" ile elde edilen sonuçlar

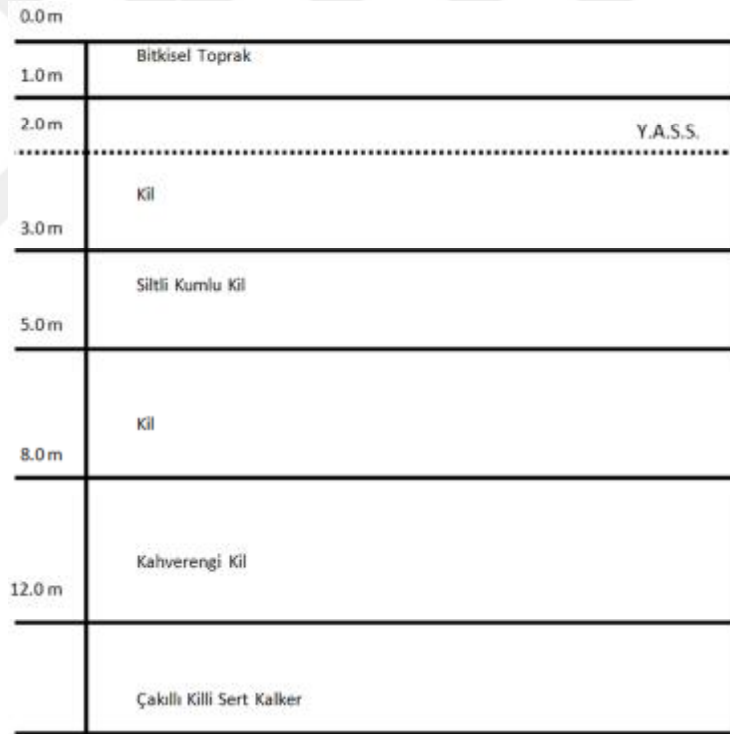
Zemin Tabakası	Kalınlık	n_0	$\Delta (A/A_c)$	n_1	f_d	n_2
[-]	m	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1.0	-	-	-	-	-
2	0.4	2.34	1.17	2.01	1.00	1.88
3	0.6	2.34	0.09	2.31	1.13	2.62
4	0.6	2.34	0.05	2.32	1.20	2.78
5	6.6	2.34	0.05	2.32	1.26	2.92
6	0.8	1.78	0.52	1.72	1.40	2.27
7	1.0	1.78	1.17	1.65	1.00	1.57
8	10.0	-	-	-	-	-

"*priebe_cal*" programından elde edilen sonuçlar ise Çizelge 4.5'te gösterildiği gibidir. Sonuçlar karşılaştırıldığında hazırlanan programın doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

4.5. Priebe (1995) Yöntemi ile Parametrik Analiz

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen arazi uygulamasına ait veriler kullanılarak Priebe (1995) yöntemi yardımıyla parametrik analizler yapılacaktır.

Deney sahasının bulunduğu arazide daha önce farklı tarihlerde sondajlı zemin etütleri yapılmıştır (Uysal, 2016). Bu zemin araştırmalarına ait sondaj logları incelendiğinde proje sahasının zemin profili Şekil 4.20'de görüldüğü gibidir.



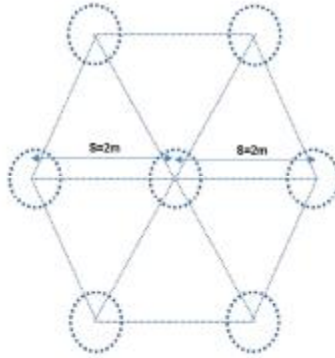
Şekil 4.20. Deney sahasına ait zemin profili

Deney sahasından alınan numuneler ile yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen zemin parametreleri Çizelge 4.6'da görüldüğü şekildedir.

Çizelge 4.6. Deney sahasına ait zemin parametrelerinin derinlikle değişimi (DAS-NAG, 2013)

Derinlik (m)	e_0	g (kN/m ³)	m_v (cm ² /kg)	C_r	C_c	κ	I	E_{oed} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	AKO
0.5	0.82	19.2	0.040	0.06	0.26	0.02	0.11	25.00	19.2	5.90
1.5	0.83	19.2	0.020	0.02	0.01	0.01	0.06	50.00	38.5	3.60
2.5	0.64	20.5	0.140	0.09	0.67	0.04	0.30	7.14	5.5	1.08
3.5	0.85	21.5	0.040	0.06	0.28	0.03	0.12	25.00	19.2	2.00
4.5	0.87	20.3	0.040	0.05	0.27	0.02	0.12	25.00	19.2	1.53
5.5	0.65	20.3	0.030	0.05	0.21	0.02	0.12	33.30	25.6	2.10
7.0	0.92	17.6	0.027	0.08	0.33	0.04	0.14	37.00	28.5	1.70

İncelenen projede imal edilen grup taş kolonların yerleşimi Şekil 4.21'deki gibidir.



Şekil 4.21. Grup taş kolonların yerleşimi

Parametrik analizlerde kullanılan veriler;

- Zemin 7 tabakadan oluşmaktadır.
- Taş kolonlar üçgen yerleşimle zemine yerleştirilmiştir.

Bu bölümde tez kapsamında incelenen arazi uygulaması üzerinde "*priebe_cal*" program ile bir dizi parametrik analiz yapılmıştır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Çizelge 4.7'de, taş kolon parametreleri Çizelge 4.8'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 4.7. Zemin parametreleri

Zemin Tabakası	Kalınlık	γ	n	ϕ	c	$E_{oed,s}$
[-]	m	kN/m ³	[-]	[-]	kPa	MPa
1	1	19.20	0.33	24	1	2.45
2	1	19.20	0.33	24	1	4.90
3	1	20.50	0.33	30	1	0.70
4	1	21.50	0.33	30	1	2.45
5	1	20.30	0.33	24	1	2.45
6	1	20.30	0.33	24	1	3.26
7	2	17.60	0.33	24	1	3.63

Çizelge 4.8. Taş kolon parametreleri

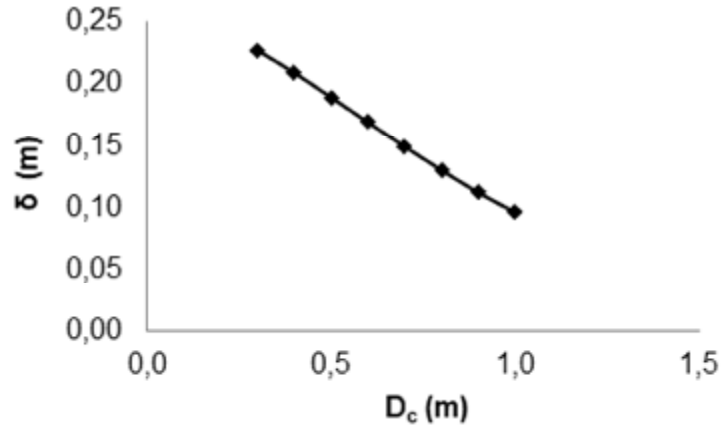
D_c	s	g_c	n_c	$E_{oed,c}$	f_c
m	m	kN/m ³	[-]	MPa	(°)
0.8	2.0	20	0.3	53.85	40

Yapılan parametrik analizlerde düşey temel yükü 100kPa olarak alınmıştır. Programda yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.9'daki gibidir.

Çizelge 4.9. Priebe (1995) yöntemi "*priebe_cal*" programı analiz sonuçları

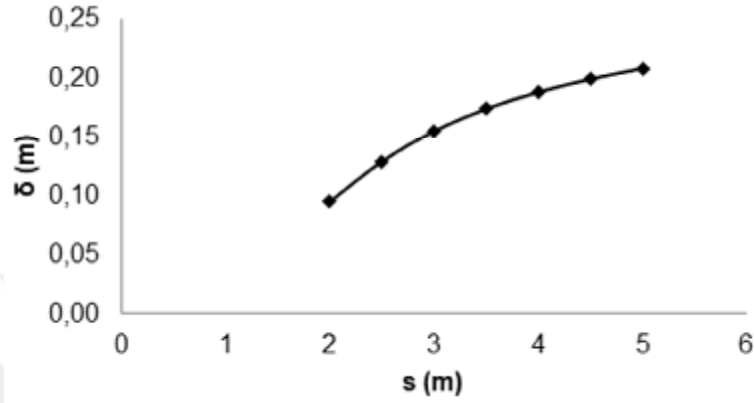
D_c m	s m	d m
0.6	2.0	0.169
0.8	2.0	0.130
1.0	2.0	0.096
0.6	2.5	0.193
0,8	2.5	0.161
1.0	2.5	0.130
0.6	3.0	0.209
0.8	3.0	0.183
1.0	3.0	0.156

Arazide seçilen kolon çapı 0.8m ve kolonlar arası mesafe 2.0m'dir. Programda yapılan parametrik analizler sonucunda elde edilen grafikler aşağıda görüldüğü gibidir.



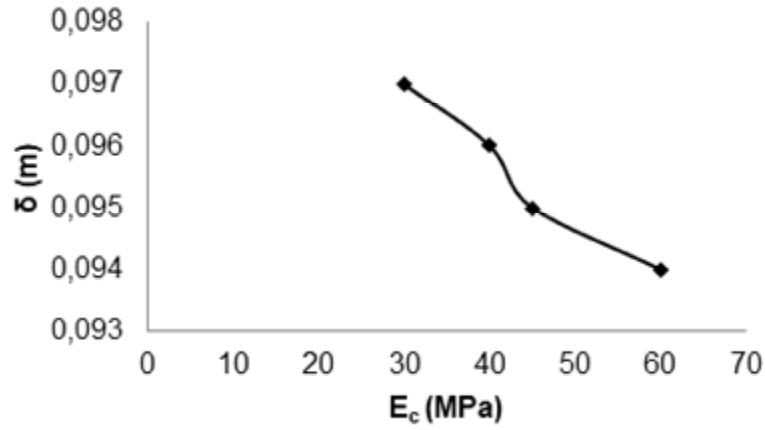
Şekil 4.22. Taş kolon çapı-oturma grafiği (s=2m)

Kolonlar arası mesafe 2m iken, kolon çapı arttıkça oturmaların azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. Kolonlar arası mesafe-oturma grafiği ($D_c=1m$)

Kolon çapı 1m alındığında, kolonlar arası mesafe arttıkça oturmanın beklendiği gibi artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.24. Taş kolon elastisite modülü-oturma grafiği

Kolon çapı 1m ve kolonlar arası mesafe 2m alınarak yapılan analizlere göre, taş kolonun elastisite modülü arttıkça oturmaların azaldığı gözlemlenmiştir.

5. SAYISAL ANALİZLER

5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi kısaca çok karmaşık bir problemin basitleştirilerek gerçek sonucun ya da bazen yaklaşık sonucun elde edilmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu yöntem geoteknik mühendisliğinde 1970 yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemine dayalı bilgisayar programları geliştirilmiş ve karmaşık geoteknik problemlerin çözümünde yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu tez kapsamında da bu bilgisayar programlarında biri olan PLAXIS paket programı kullanılmıştır.

5.2. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı

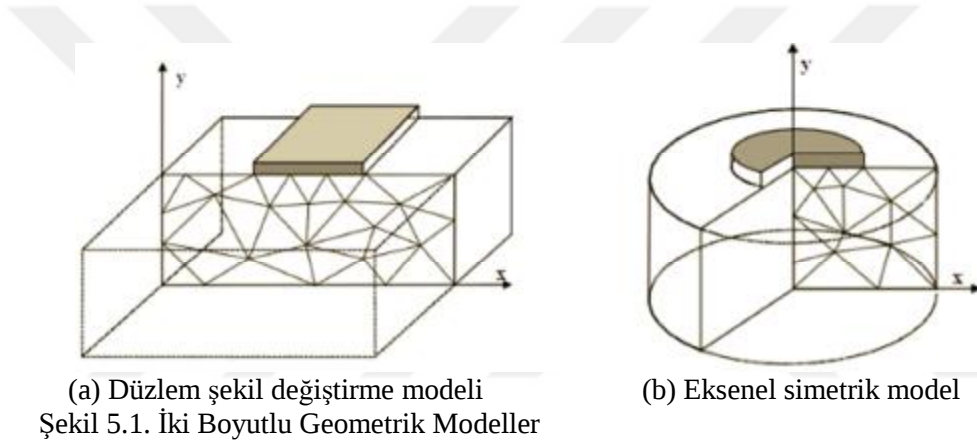
PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis), 1987 yılında Hollanda Delf Üniversitesinde geliştirilmiş sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir bilgisayar programıdır. Programın tasarım amacı, yumuşak zemin üzerindeki dolguların sonlu elemanlar yöntemi ile analizinin yapılmasıdır. Daha sonra 1993 yılında program ticari bir yazılım haline dönüştürülmüş olup 1998 yılında programın Windows sürümü çıkarılmıştır. Günümüzde deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış v.b. analizleri yapan bir sonlu elemanlar programı olarak geoteknik mühendisliğinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Program, 4 ana bölümden oluşmaktadır. Tüm geometri ve malzeme parametrelerinin girildiği kısım *INPUT*; hesap yöntemi parametrelerinin girildiği *CALCULATIONS*; analiz sonuçlarının irdelendiği *OUTPUT* ve yapılan işlemlerin grafiksel olarak gösterimini sağlayan *CURVES* kısımlarından oluşur.

Sonlu elemanlar programında gerçekte geometrisi üç boyutlu olan problemler iki boyutlu koşullara dönüştürülerek analiz edilir. Bunlar;

- Düzlem şekil değiştirme (plane strain)
- Eksenel simetrik (axisymmetry)

koşullardır. Düzlem şekil değiştirmede belirli bir geometrinin bir şerit boyunca uzadığı kabul edilir. Bu koşul o şeritten birim boyda dilim alınarak oluşturulacak tanımlamalar için kullanılır (Şekil 5.1a). Eksenel simetrik geometride ise belirli bir radyal eksene göre simetriklik gösteren silindirik geometrilerde kullanılır (Şekil 5.1b).



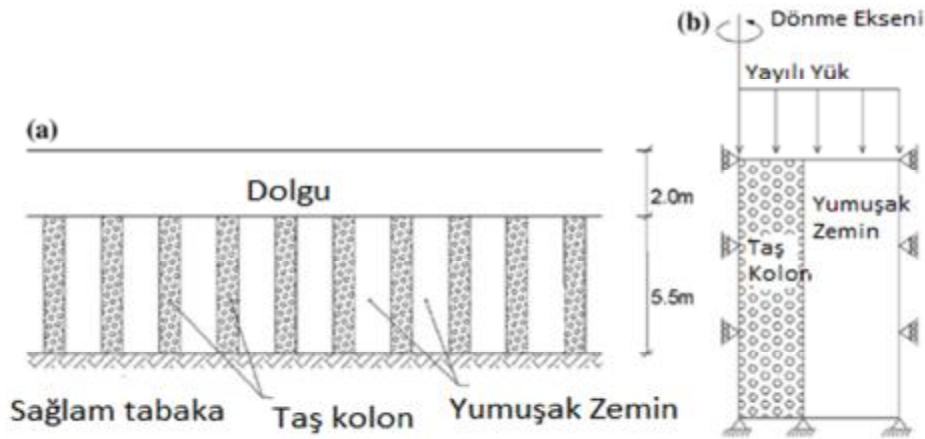
PLAXIS bilgisayar programında zemini davranışı için farklı zemin modelleri mevcuttur. Bunlar;

- Lineer elastik model,
- Mohr- Coulomb modeli,
- Pekleşen zemin modeli,
- Yumuşak zemin modeli,
- Yumuşak zemin krip modeli,
- Modifiye cam-clay modeli

Program ve zemin modelleri ile ilgili detaylı bilgi PLAXIS kullanım kılavuzunda yer almaktadır (Plaxis,2006).

5.3. Sayısal Analizlerin Doğruluğunun Araştırılması

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak analizlerde öncelikle programda oluşturulacak problemin geometrisinin, analizlerde kullanılacak zemin modeli ve parametrelerinin, sınır ve ağ etkisinin doğru şekilde seçildiğinin doğrulanması gerekir. Bu çalışmada literatürde yer alan Borges ve ark., (2009) tarafından taş kolonlar ile ilgili yapılan sayısal analizler referans alınmıştır. Borges ve ark., (2009), sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir bilgisayar programı yardımıyla taş kolonlarla güçlendirilmiş yumuşak zemin üzerine inşa edilen bir dolgunun analizini yapmışlardır. Eksenel simetrik koşullarda birim hücre yaklaşımı ile tek bir kolon ve onun etki bölgesi modellenmiştir. Problemin geometrisi Şekil 5.2’de görülmektedir. Taş kolonla güçlendirilmiş yumuşak zemin üzerinde 2m yüksekliğinde bir dolgu bulunmaktadır. Sağlam zemin üzerinde bulunan yumuşak zemin tabakasının kalınlığı 5.5m’dir. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyindedir. Kolon boyu 5.5m, kolon çapı 1.0m, birim hücre çapı ise 2.3m’dir. Analizlerde modifiye cam kili modeli kullanılmış ve Çizelge 5.1’de zemin parametreleri verilmiştir.

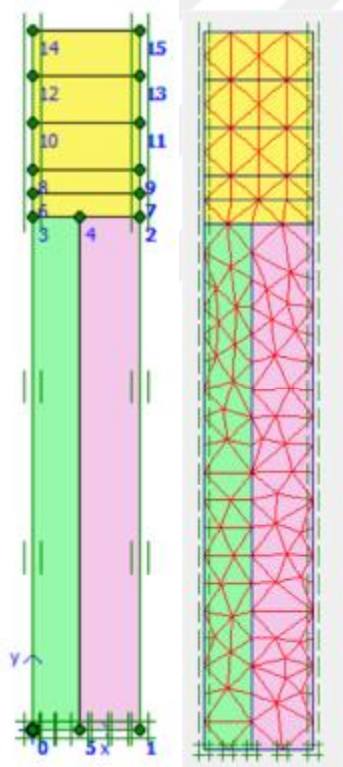


Şekil 5.2. Zemin modeli (Borges ve ark., 2009)

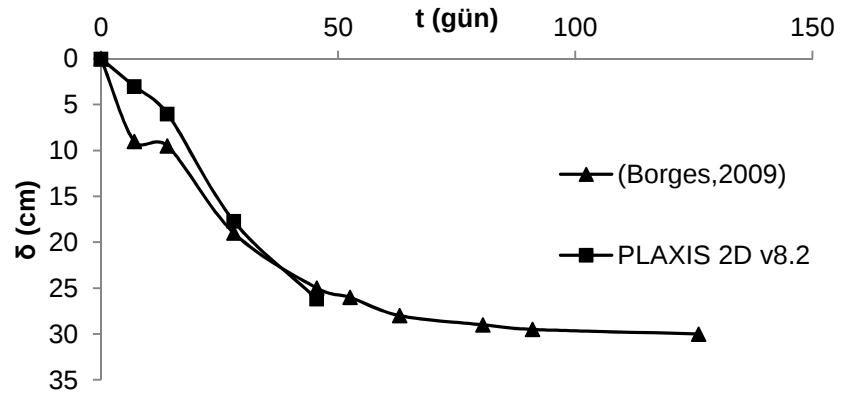
Çizelge 5.1. Zemin parametreleri (Borges ve ark., 2009)

	k	l	G	f (°)	$n\phi$	N	g (kN/m ³)	$k_x=k_y$ (m/s)	OCR
Taş Kolon	0.003	0.011	1.89	38	0.30	1.90	20	1	1
Zemin	0.020	0.220	3.26	30	0.25	3.40	17	10^{-9}	1
Dolgu	0.005	0.030	0.03	35	0.30	1.82	20	1	1

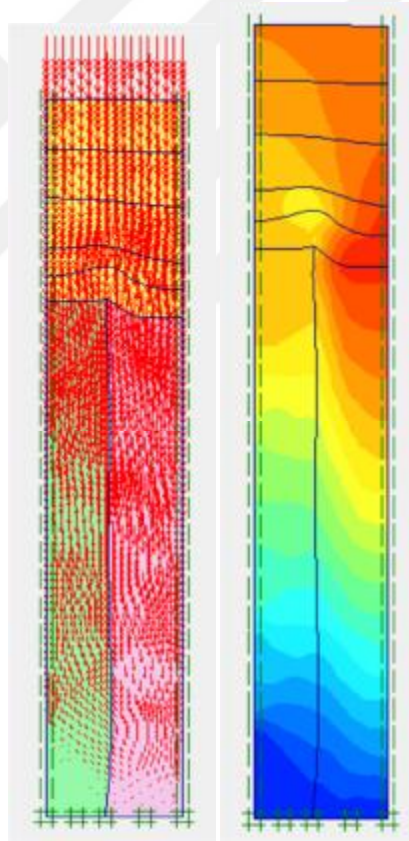
Şekil 5.3'te PLAXIS 2D V8.2 sonlu elemanlar bilgisayar programında oluşturulan söz konusu problemin geometrisi ve sonlu elemanlar ağı görülmektedir.



Şekil 5.3. Sonlu elemanlar modeli ve ağ görüntüsü



Şekil 5.4. Sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.5. PLAXIS'te analiz sonrası deplasman dağılımları

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı programdan elde edilen sonuçlar ile Borges ve ark. (2009) tarafından elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'te karşılaştırılmış ve aralarında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Şekil 5.5'te ise, PLAXIS analizlerinden elde edilen deplasman dağılımlarının çıktıları görülmektedir. Eğer sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerinin doğruluğu kanıtlanırsa analiz sonuçları ve çıktıları üzerinde gerilme ve deplasman dağılımları incelenerek problemin çalışma mekanizması ile ilgili çok önemli değerlendirmeler yapılabilir. Hatta parametrik çalışmalar ile her bir tasarım parametresinin sonuçlar üzerindeki etkisi çok daha net bir şekilde irdelenebilir. Bu amaçla bir sonraki başlıkta taş kolon sistemlerinin tasarımında önemli rol oynayan parametrelerin sistem davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için bir seri parametrik araştırma yapılmıştır.

5.4. Parametrik Araştırma

Bu bölümde yer alan taş kolon sistemi ile ilgili parametrik araştırmalar iki bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. Bunlar; kısa süreli (drenajsız koşullar) ve uzun süreli (drenajlı) davranışı dikkate alan analizlerdir.

5.4.1 Kısa Süreli Stabilitate Analizleri (Drenajsız Analizler)

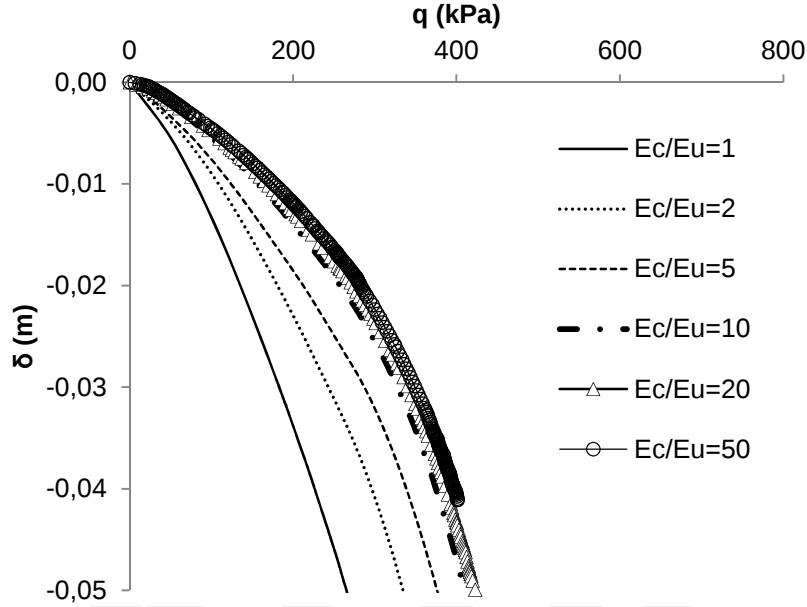
Suya doygun yumuşak kil zeminlerin drenajsız koşullardaki dayanımı drenajlı koşullara nazaran daha kritiktir. Bu nedenle, yumuşak kil zeminler taş kolon ile iyileştirildiğinde, drenajsız koşullarda taş kolon tasarım parametrelerinin kompozit sistemin stabilitesi üzerindeki etkisi önemlidir. Bu bölümde, drenajsız koşullarda taş kolon sistemlerinde her bir tasarım parametresinin etkisi ayrı ayrı araştırılmıştır. PLAXIS ile iki boyutlu eksenel simetrik koşullarda gerçekleştirilen analizlerde zemin ve kolon için Mohr Coulomb (MC) zemin modeli kullanılmıştır. MC zemin modeli elastik-tam plastik davranışı esas alan bir zemin modeli olup model için gerekli parametreler laboratuvar deneylerinden kolayca elde edilebilmektedir. Ayrıca lineer elastik model ile karşılaştırıldığında zemin

Bu parametrik araştırmada amaç, taş kolonların projelendirilmesinde önemli rol oynayan tasarım parametrelerinin (yerleşim düzeni, kolon çapı, boyutu ve kolon malzemesi v.b.) sonuçlar üzerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

E_c/E_u Etkisi: İlk olarak kil zeminin drenajsız elastisite modülü sabit tutularak ($E_u = 5\text{MPa}$) taş kolonun elastisite modülü (E_c) değiştirilmiş ve E_c/E_u oranının kompozit sistemin taşıma gücü davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 5.8'de farklı E_c/E_u oranları için hesaplanan yük-oturma ilişkileri karşılaştırılmıştır.

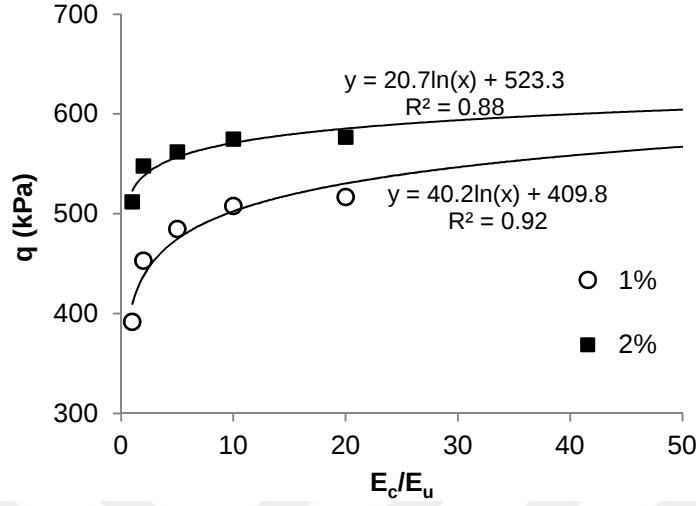
Çizelge 5.3. E_c/E_u etkisi için kullanılan zemin parametreleri (drenajsız analiz)

Parametreler	Kil Zemin	Taş Kolon Malzemesi
g (kN/m ³)	18	20
$k_h=k_v$ (m/gün)	$1*10^{-4}$	1
E (kN/m ²)	5000	Değişken
ν	0,35	0,30
c (kN/m ²)	40	0
ϕ (°)	0	30
ψ (°)	0	0



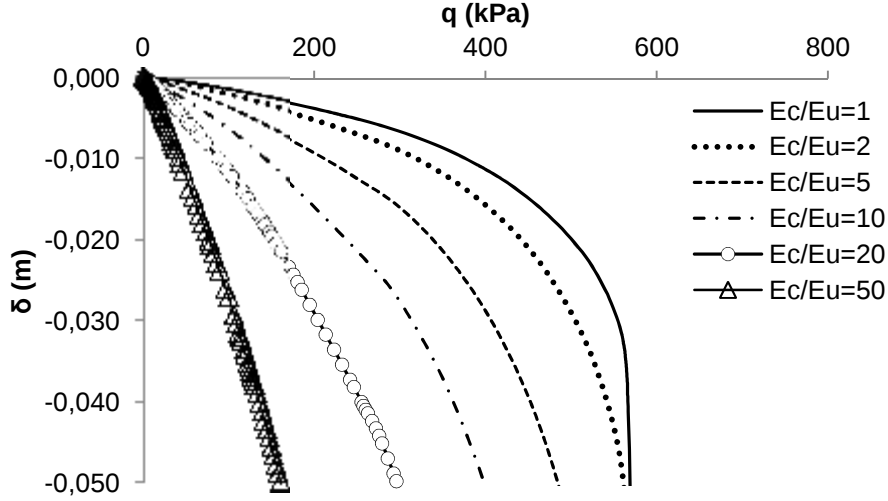
Şekil 5.7. Taş kolon rijitliğinin oturma davranışına etkisi

Şekil 5.7'de, E_c/E_u oranı yani taş kolonun elastisite modülü arttıkça kompozit sistemin hem dayanımı hem de oturma davranışı iyileşmektedir. Bir başka deyişle uygulamada taş kolon ne kadar iyi sıkıştırılırsa sistemin drenajsız kayma dayanımı artmakta ve oturmalar azalmaktadır. Genellikle temel mühendisliğinde oturma kriterine göre tasarım yapıldığı için Şekil 5.7'deki yük-oturma grafiklerinde $d/D_c = \%1$ ve $\%2$ oturma oranlarına karşılık gelen yük değerleri hesaplanmış ve E_c/E_u oranı ile q arasındaki ilişki Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.8'de, E_c/E_u oranı arttıkça taşıma gücünün de arttığı görülmektedir. $E_c/E_u=10$ 'dan sonra ise eğrinin yaklaşık asimptot kaldığı yani kolon rijitliğinin önemli bir etkisinin kalmadığı görülmektedir.

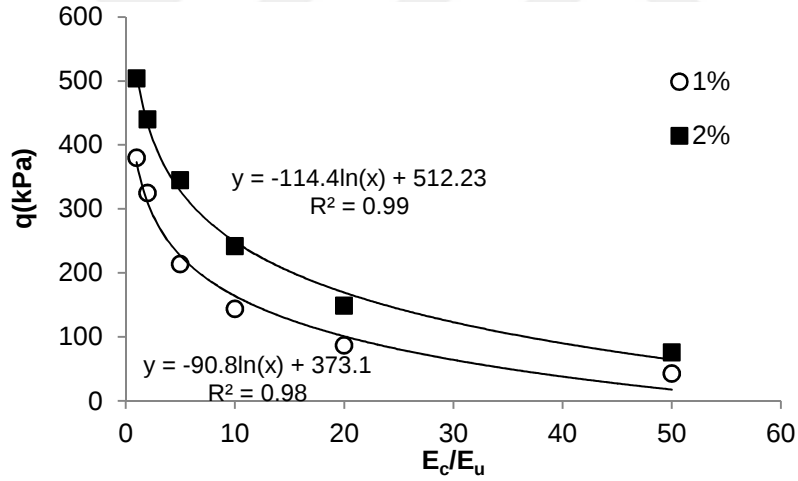


Şekil 5.8. E_c/E_u oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

Taş kolon ve yumuşak kil zeminden oluşan kompozit sistemde bir diğer önemli parametre ise yumuşak kil zeminin rijitliğidir. Çünkü, yük altında kompozit sistemin göçme mekanizması incelendiğinde göçmenin taş kolonun zemine doğru yanal yönde genişleme göstermesi yani kabarması sonucu oluştuğu görülmektedir. Bu nedenle kolon rijitliğini $E_c/E_u=10$ oranına karşılık gelen $E_c=50\text{MPa}$ değerinde sabit tutularak kil zeminin E_u oranı değiştirildiğinde kompozit sistemin taşıma gücüne etkisi Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Bu parametrik araştırmada E_u değeri 50MPa 'dan 1MPa değerine kadar belli oranlarda azaltılmıştır. Şekil 5.10'da ise E_c/E_u oranı ile $d/D_c = \%1$ ve $\%2$ oturma oranlarına karşılık gelen yük değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Benzer şekilde $E_c/E_u=10$ oranından sonra eğri yaklaşık olarak asimptot kalmaktadır.



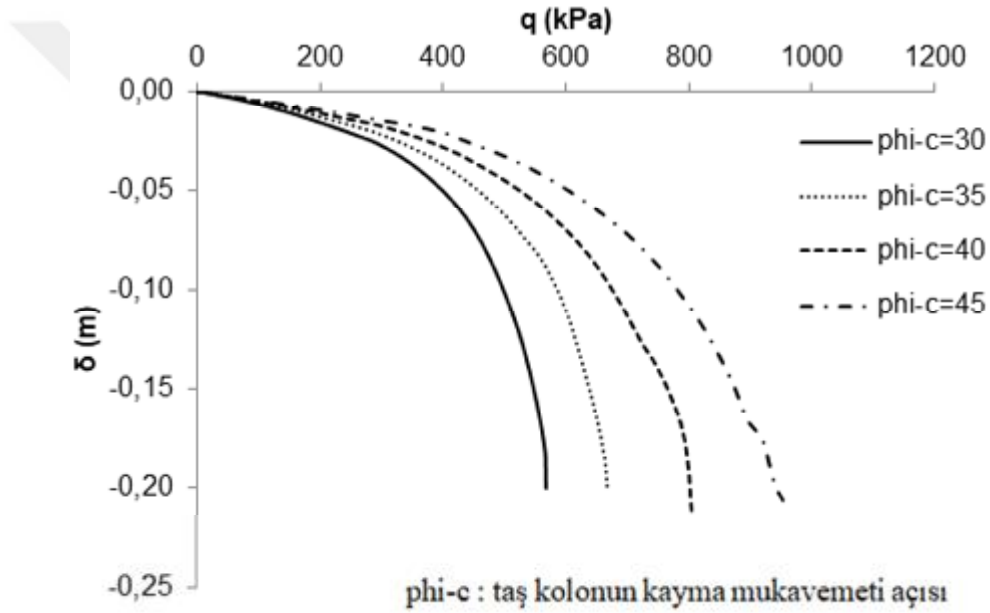
Şekil 5.9. Kil zemin rijitliğinin oturma davranışına etkisi

Şekil 5.10. E_c/E_u oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

Sonuç olarak, farklı rijitliğe sahip taş kolon ve kil zeminden oluşan kompozit sistemin davranışında E_c/E_u rijitlik oranının sistemin drenajsız kayma dayanımı üzerinde etkisinin önemli olduğu görülmüştür. Genellikle uygulamada yumuşak kil zeminin rijitlik modülü düşüktür ve bu zemin içerisine inşa edilecek taş kolonun rijitlik modülünün kil zeminin rijitlik modülünden en az 10 katı daha

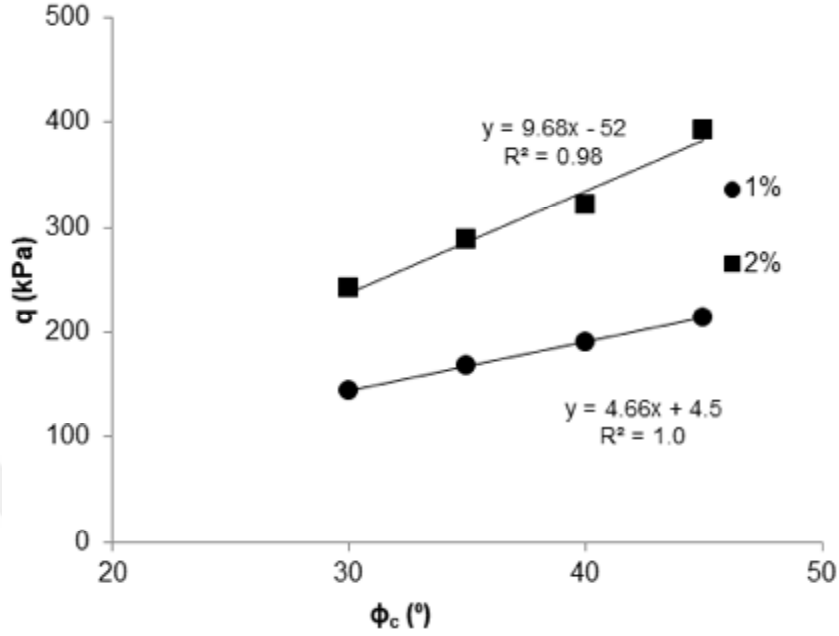
büyük olması gerekir. Bu nedenle taş kolon malzemesinin imalat sırasında çok iyi şekilde sıkıştırılması gerekir.

ϕ_c Etkisi: Bu bölümdeki analizlerde taş kolon malzemesinin granülometrik özelliklerinin dolayısıyla da içsel sürtünme açısı ϕ_c 'nin kompozit sistemin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Analizlerde $E_u=5\text{MPa}$, $E_c=50\text{MPa}$, $c_u=40\text{kPa}$ ve $c_c=0$ olarak alınmıştır. Şekil 5.11'de farklı ϕ_c değerleri için hesaplanan yük-deplasman ilişkileri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.11. ϕ_c değerinin oturma davranışına etkisi

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi taş kolonun içsel sürtünme açısı ϕ_c arttıkça yük taşıma kapasitesi artmakta ve oturmalar azalmaktadır. Ayrıca Şekil 5.12'de ϕ_c ile yük taşıma kapasitesi arasındaki bağıntı görülmektedir.

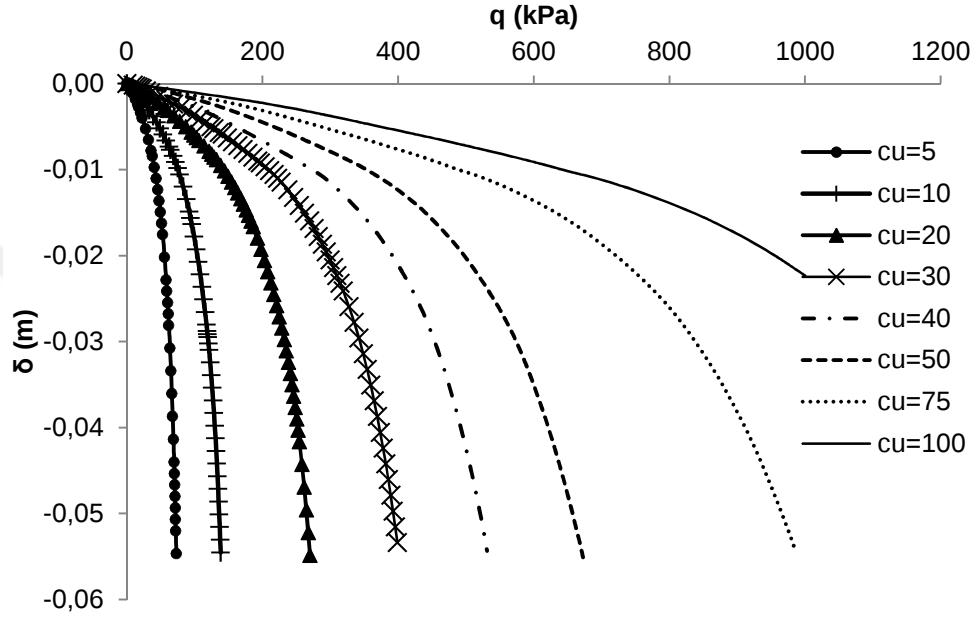


Şekil 5.12. ϕ_c değeri ile oturma değeri arasındaki ilişki

Sonuç olarak uygulamada seçilecek taş kolon malzemesinin granülometrik özelliklerini belirleyen en önemli parametre dane çapı dağılımı ve onun içsel sürtünme açısıdır. Şekil 5.11 ve 12'deki sonuçlar kompozit sistemin oturma ve taşıma kapasitesi açısından ϕ_c 'nin önemli bir parametre olduğunu göstermektedir. Bu nedenle taş kolon imalatı öncesinde granülometrik olarak uygun malzeme seçilmeli ve uygulama sırasında uygun yöntem seçilerek malzeme iyi bir şekilde sıkıştırılmalıdır.

c_u Etkisi: Kısa süreli stabilite analizlerinde kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti c_u önemli bir parametredir. Bu bölümde kil zeminin c_u değerinin kompozit sistemin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Literatürde genellikle kil zeminler için ortalama $E_u / c_u = 300$ önerilmektedir (Han,2015). Parametrik çalışmada farklı c_u değeri için bu oran esas alınarak kilin E_u değeri hesaplanmış ve analizlerde E_c / E_u oranı 10 olarak sabit tutulmuştur.

Şekil 5.13'te farklı c_u değerleri için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen yük-oturma grafikleri görülmektedir. Kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti değeri arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı ve oturmaların azaldığı görülmektedir.

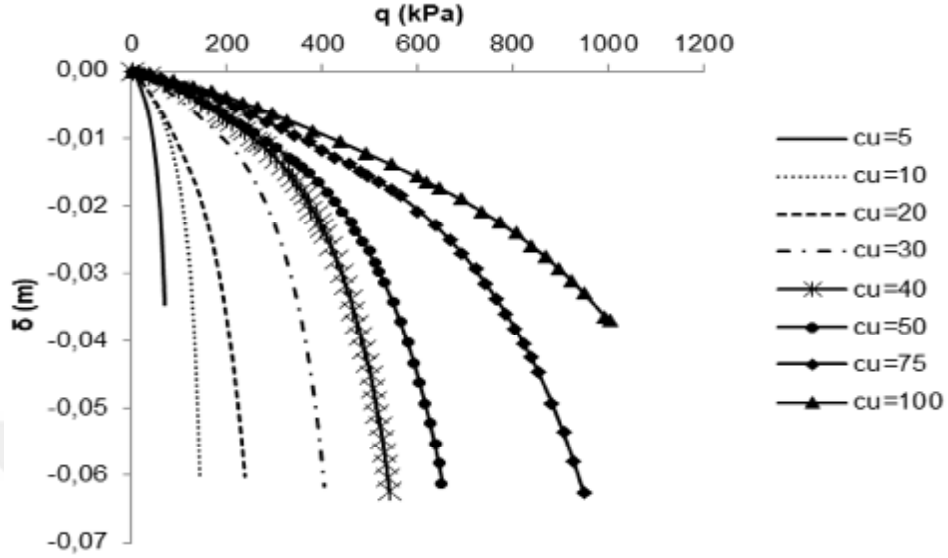


Şekil 5.13. Zeminin c_u değerinin oturma davranışına etkisi

Ayrıca analizlerde, $E_c=50\text{MPa}$ ve $E_u/c_u=300$ olarak sabit alınarak c_u parametresi değiştirilmiş ve sonuçlar üzerindeki etkisi de incelenmiştir.

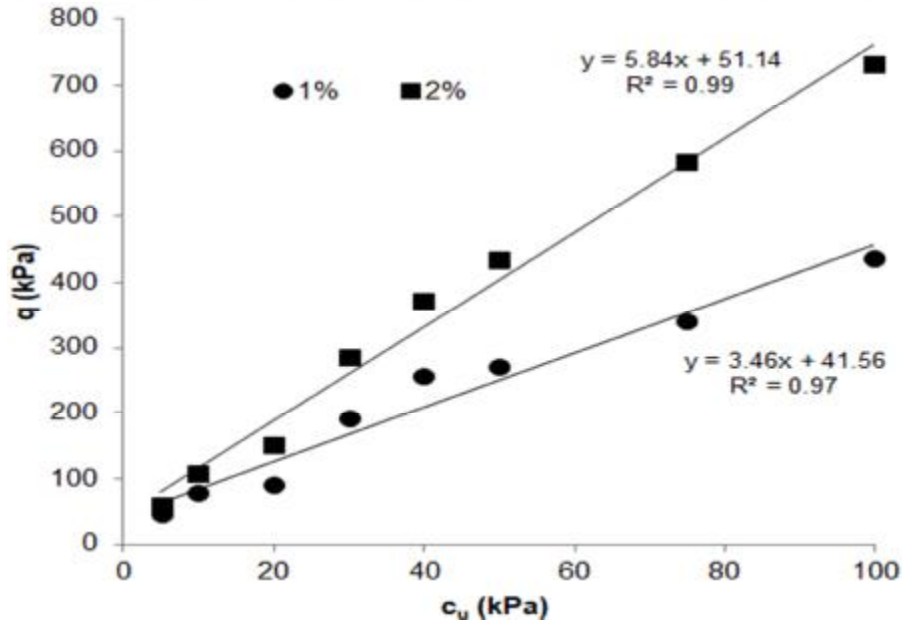
Analizler sonucunda, taş kolonun elastisite modülü 50MPa ve E_u/c_u oranı 300 olarak sabit tutulduğunda c_u değeri arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı ve oturma değerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.14).

Sonuç olarak yapılan her iki analize göre zeminin drenajsız kayma mukavemeti değerinin taşıma gücü ve oturma üzerinde önemli bir etkiye parametre sahip olduğu söylenebilir. Bu nedenle uygulama sırasında derinlik boyunca c_u değeri hassas ve doğru şekilde belirlenmelidir.



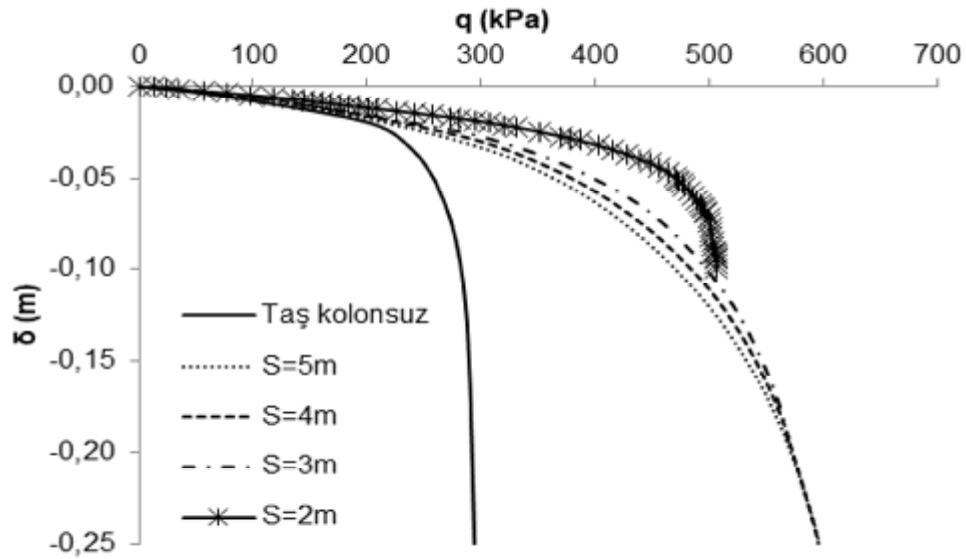
Şekil 5.14. c_u değerinin oturma davranışına etkisi

Ayrıca Şekil 5.15'de c_u ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki görülmektedir.

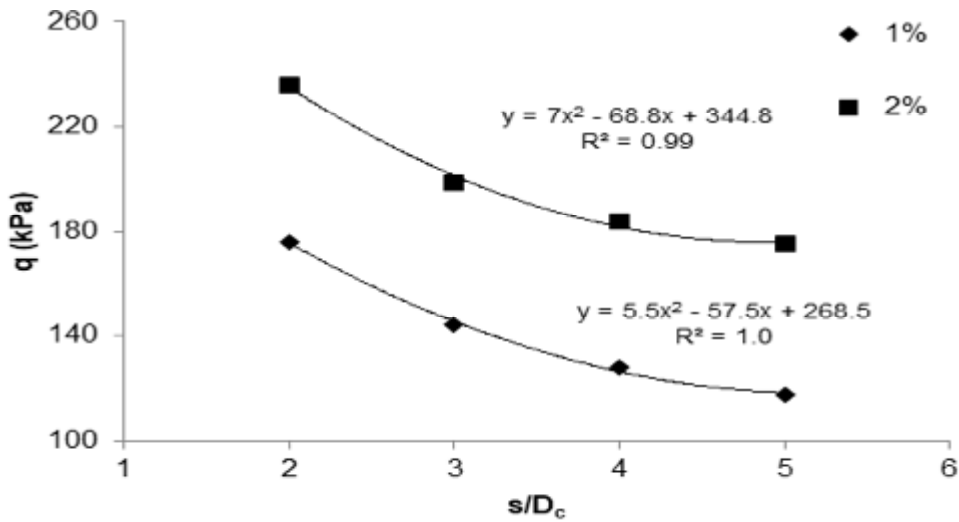


Şekil 5.15. c_u değeri ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

s Etkisi: Bu bölümdeki analizlerde $D_c=1.0\text{m}$, $E_u=5\text{MPa}$ ve $E_c=50\text{MPa}$ alınarak taş kolon ve zemin ile ilgili diğer tüm parametreler sabit tutulup yalnızca birim hücre çapı yani kolonlar arası merkezden merkeze mesafe değeri (s) değiştirilmiştir.



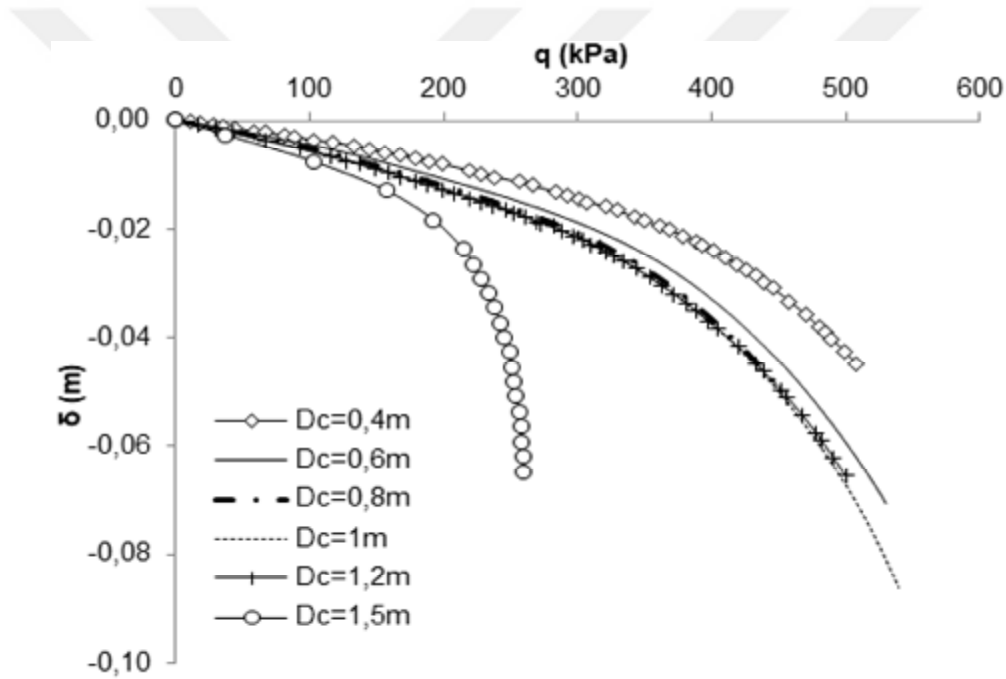
Şekil 5.16. Kolonlar arası mesafenin (s) oturma davranışına etkisi



Şekil 5.17. Kolonlar arası mesafe (s) ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

Ayrıca Şekil 5.17'de s/D_c oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki görülmektedir. Beklendiği gibi kolonlar arası mesafe arttıkça taşıma kapasitesi azalmakta ve s/D_c oranı 5'den sonra ise taşıma kapasitesi yaklaşık olarak asimptot kalmaktadır. Yani s 'nin çok büyük değerlerde seçilmesi taş kolonların etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır.

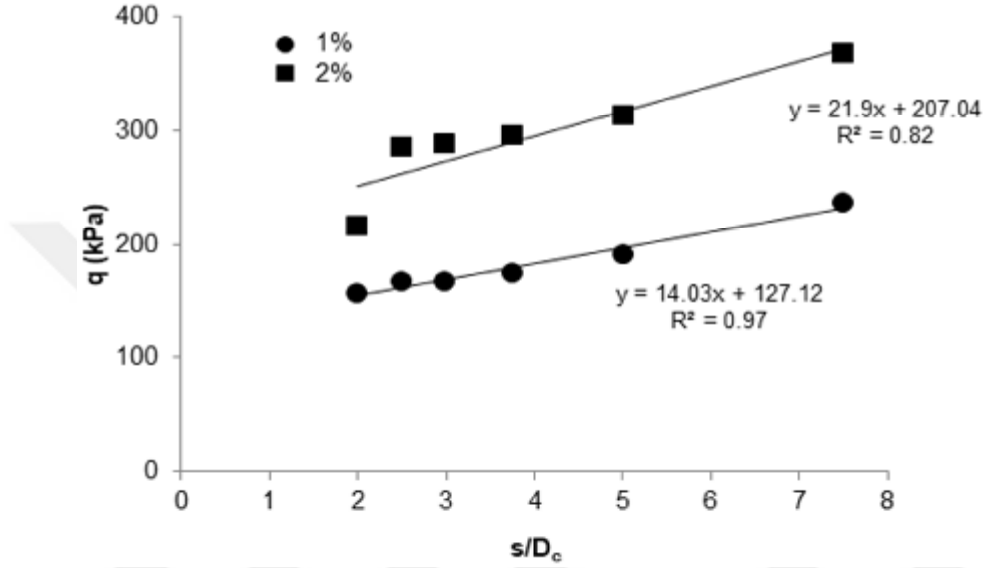
D_c Etkisi: Bu bölümde, $s = 3\text{m}$, $E_u = 5\text{MPa}$, $E_c = 50\text{MPa}$ ve $c_u = 40\text{kPa}$ olarak alınmış olup, taş kolon çapı değiştirilmiş ve D_c 'nin taşıma gücü ve oturma üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 5.18. D_c değerinin oturma davranışına etkisi

Şekil 5.18'de D_c 'nin artmasıyla yük taşıma kapasitesi ve oturma davranışında kısmi iyileşmeler görülmektedir. Fakat bu iyileşmenin tutarlı bir şekilde gerçekleşmediği gözlenmiştir. Ayrıca Şekil 5.19'da s/D_c değeri ile yük taşıma kapasitesi arasındaki bağıntı görülmektedir. Bu sonuçlar; taş kolon çapı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermektedir. Fakat birim hücre çapı

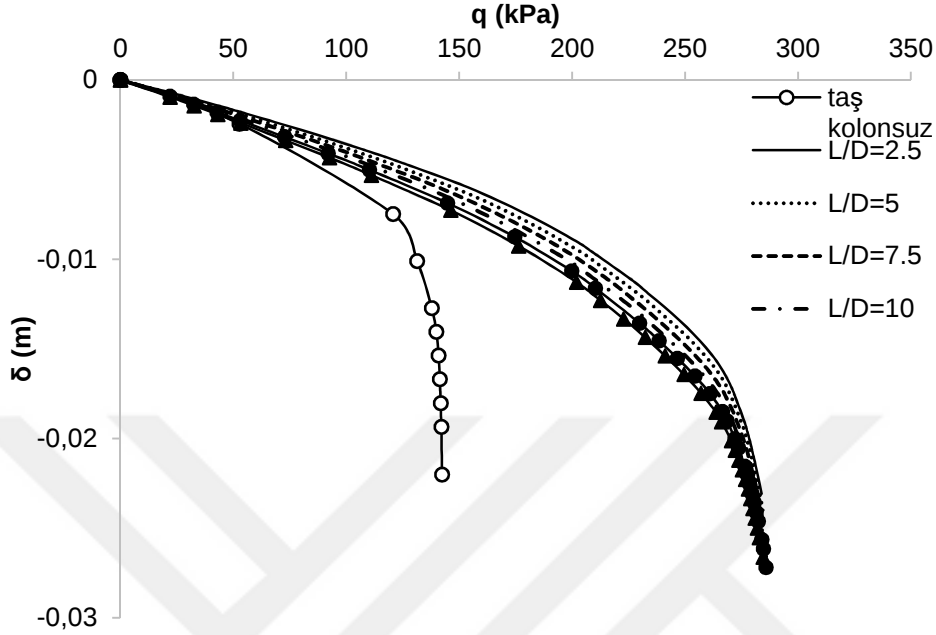
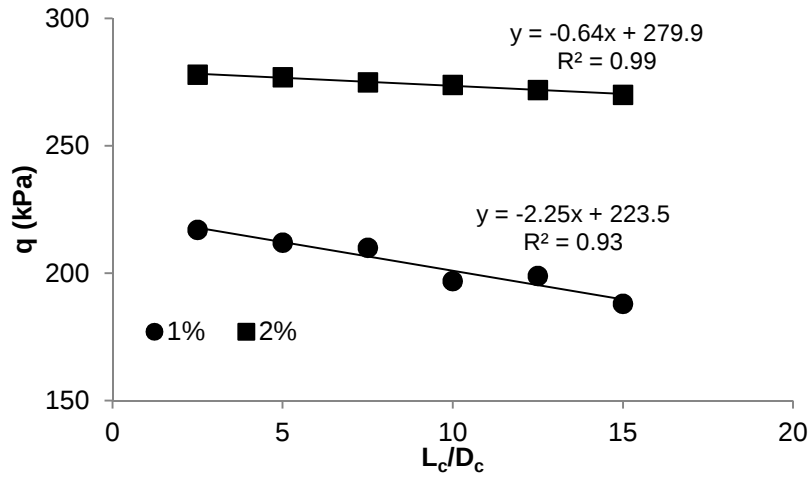
yani s parametresi sabit tutulduğu için D_c 'deki artış analizlerde sınır etkisi oluşturmakta ve sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle sağlıklı bir değerlendirme yapmak mümkün değildir.



Şekil 5.19. s/D_c oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

L_c Etkisi: Parametrik analizlerde incelenen bir diğer parametre ise taş kolon boyudur. Uygulamada taş kolonların imalatı sırasında kolon ile zemin arasında etkileşim meydana gelmekte ve sistemin davranışına etki yapmaktadır. Bu nedenle sayısal analizlerde $s=3.0m$, $D_c=1.0m$, $E_u=5MPa$, $E_c=50MPa$, $c_u=40kPa$ olarak sabit tutulmuş ve taş kolon boyu değiştirilerek taşıma gücü ve oturma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

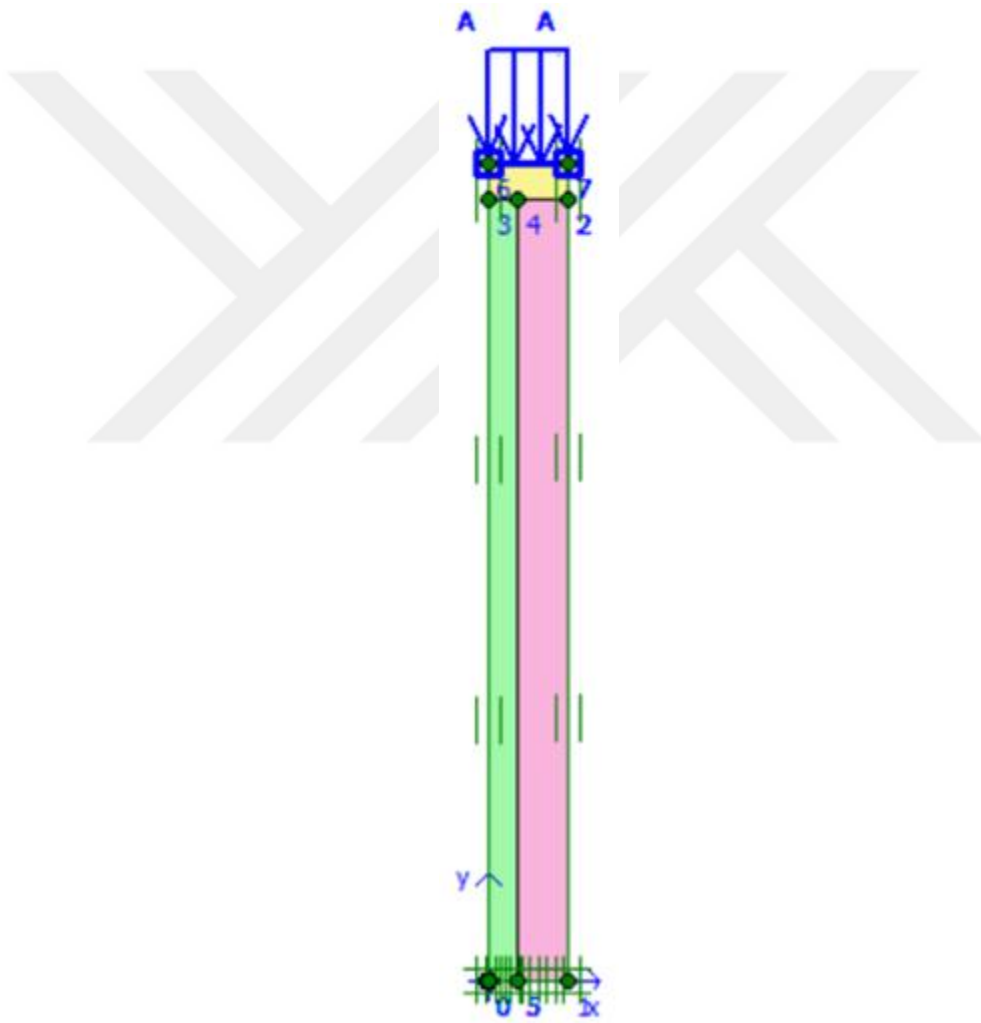
Şekil 5.20'de farklı L_c kolon boyları için elde edilen yük oturma eğrileri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.21'de ise L_c/D_c oranı ile yük oturma davranışı arasındaki ilişki görülmektedir. Her iki şekil incelendiğinde taş kolon boyu arttıkça taşıma gücünün artması beklenirken çok fazla bir değişim göstermediği gözlenmiştir. Bunun nedeni drenajsız koşullar nedeniyle kolon ile zemin arasında etkileşim beklendiği ölçüde gerçekleşmemesi olabilir.

Şekil 5.20. L_c değerinin oturma davranışına etkisiŞekil 5.21. L_c/D_c oranı ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki

5.4.2. Uzun Süreli Stabilité Analizleri (Drenajlı Analizler)

Taş kolonlar düşey dren gibi çalışarak konsolidasyonu hızlandırdığı için zamana bağlı olarak da sistemin davranışının incelenmesi gerekir. Bu nedenle bu

bölümde uzun süreli stabilite yani drenajlı koşullarda konsolidasyon analizleri yapılarak kompozit sistemin davranışına etki eden bazı parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan geometrik model Şekil 5.22'de, taş kolon parametreleri ise Çizelge 5.4'te verilmiştir. Sayısal analizlerde taş kolon ve zemin parametreleri arazide gerçekleştirilen büyük ölçekli yükleme deneyindeki parametrelerle aynı seçilmiştir.



Şekil 5.22. Geometrik model

Çizelge 5.4. Taş kolon parametreleri

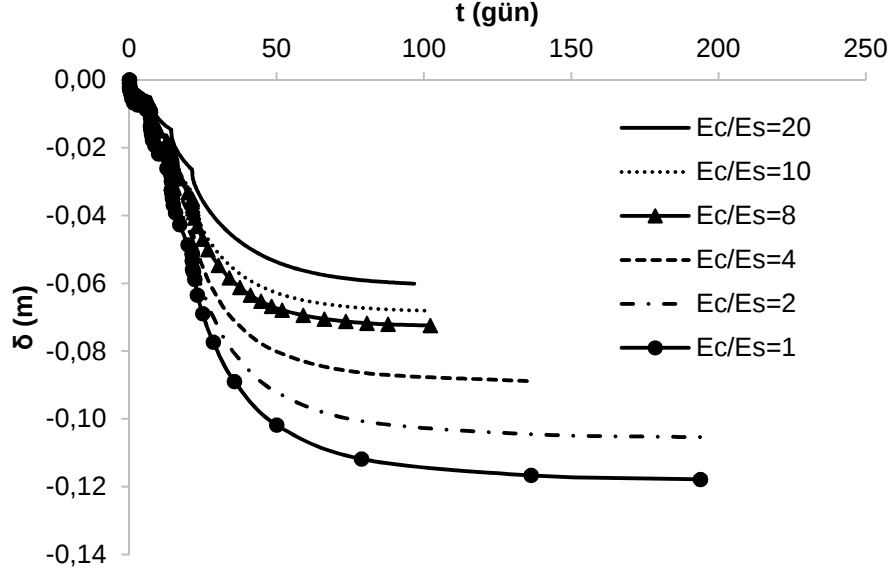
D_c (m)	r_c (m)	L_c (m)	s (m)	q (kN/m ²)
0.8	0.4	11.0	2.26	60

Analizler PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile yapılmış olup hesap aşamasında zamana bağlı konsolidasyon analizi yapılmıştır. Analizlerde inşaat safhaları ve süreleri dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Arazide taş kolon inşa edildikten sonra üzerine 0.50m yüksekliğinde dolgu serilmiştir. Daha sonra temel plağı inşa edilmiş ve yükleme safhasına geçilmiştir. Yükleme, kademeli olarak üç aşamada uygulanmıştır. Her kademe 20kN/m² olmak üzere sisteme toplam 60kN/m² yük uygulanmıştır. Her yük kademesinde 1 hafta bekleme yapılmıştır.

E_c/E_s Etkisi: Drenajsız analizlerde olduğu gibi, kil zeminin drenajlı rijitlik modülü (E_s) sabit tutulup taş kolonun rijitlik modülü değiştirilerek E_c/E_s oranının sistemin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çizelge 5.5. E_c/E_s etkisi için kullanılan zemin parametreleri (drenajlı analiz)

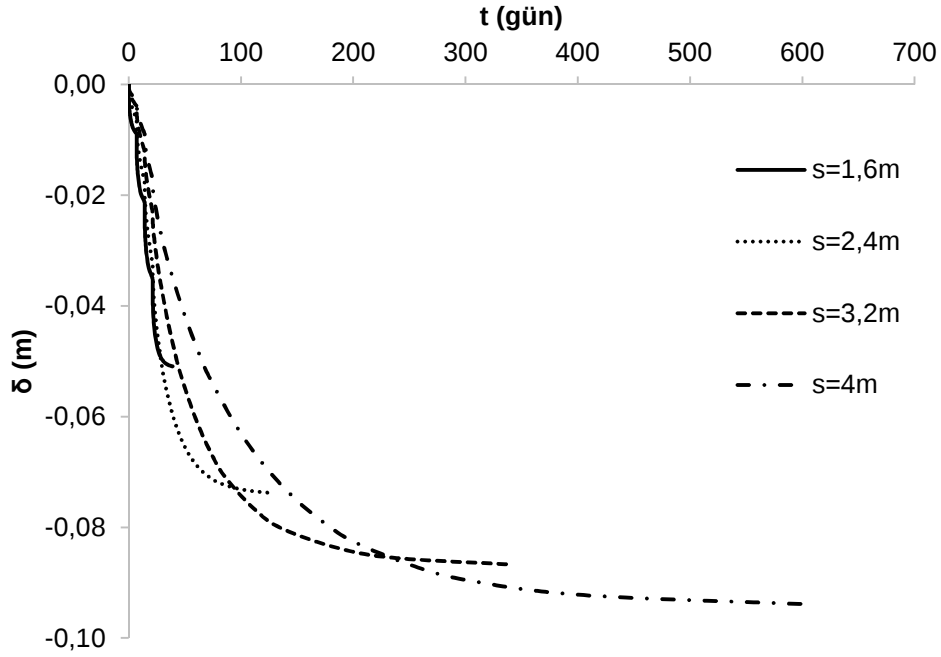
Parametreler	Kil Zemin	Taş Kolon Malzemesi	Dolgu Malzemesi
ρ (kN/m ³)	18	20	20
$k_h=k_v$ (m/gün)	$1 \cdot 10^{-4}$	1	1
E (kN/m ²)	5200	Değişken	40000
ν	0,30	0,30	0,3
c (kN/m ²)	1	0	1
ϕ (°)	25	40	38
ψ (°)	0	10	8



Şekil 5.23. E_c/E_s oranlarına göre oturma-zaman grafiği

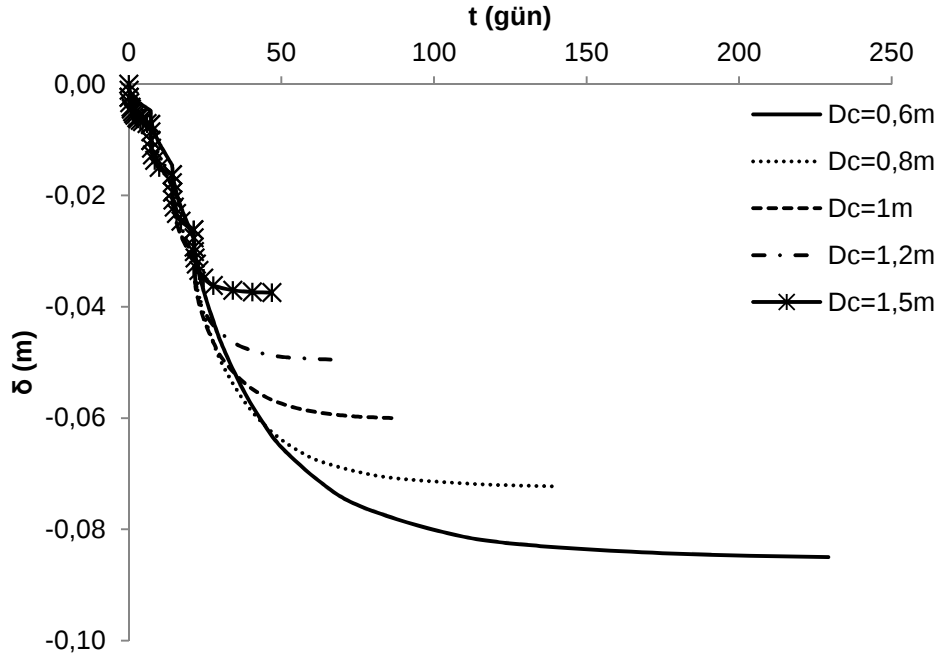
Taş kolon rijitlik modülünün artması yani E_c/E_s oranının artması ile zamana bağlı oturmalar önemli ölçüde azalmaktadır (Şekil 5.23).

s Etkisi: Taş kolon çapı $D_c=0.8m$ olarak sabit tutulmuş olup taş kolonlar arası mesafeler değiştirilerek s parametresinin sistem davranışına etkisi araştırılmıştır. Yapılan analizlerde $E_s=5.2MPa$, $E_c=40MPa$, $c_u=1kPa$ olarak alınmıştır. Analiz sonuçlarından taş kolonlar arası mesafe arttıkça birim hücre genişliği artacağı için konsolidasyon süresinde ve oturmalarda artış gözlemlenmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Farklı s değerleri için oturma-zaman eğrileri

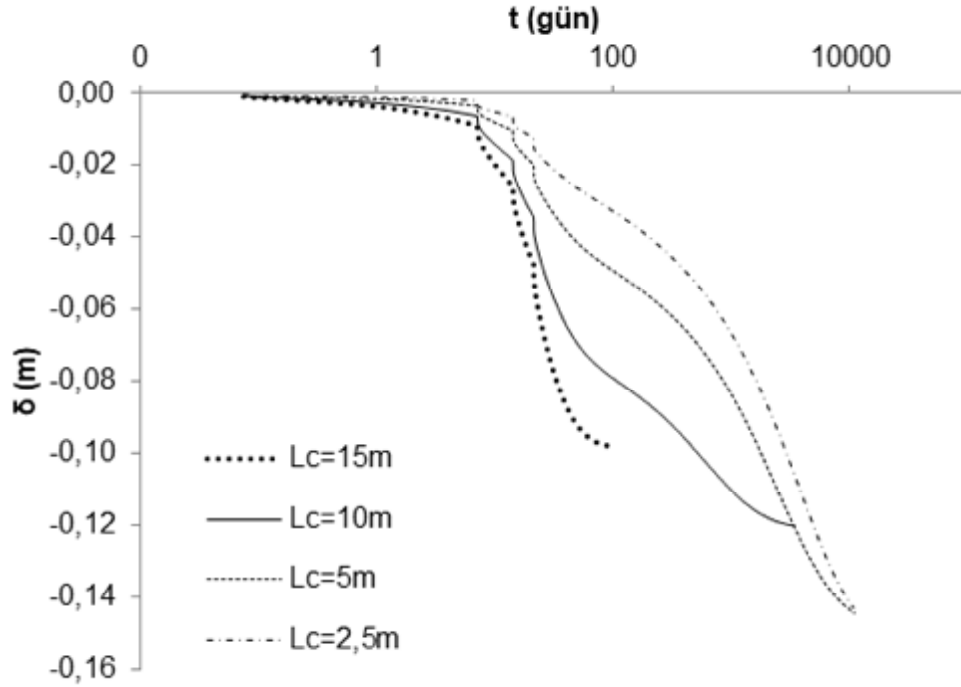
D_c Etkisi : Bu bölümde ise taş kolonlar arası mesafe $s=2.26m$ olarak sabit tutulmuş ve taş kolon çapı değiştirilerek sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analizlerde $E_s=5.2MPa$ ve $E_c=40MPa$ olarak alınmıştır.



Şekil 5.25. D_c değerlerine göre oturma-zaman grafiği

Şekil 5.25'te görülen oturma-zaman grafikleri incelendiğinde taş kolon çapı arttıkça oturmalar ve konsolidasyon süresi azalmaktadır. Çünkü kolon çapının artmasıyla sistemin drenaj kapasitesi artmakta, kolonun rijitlik modülü kil zeminin rijitlik modülünden çok fazla olduğu için de oturmalar azalmaktadır.

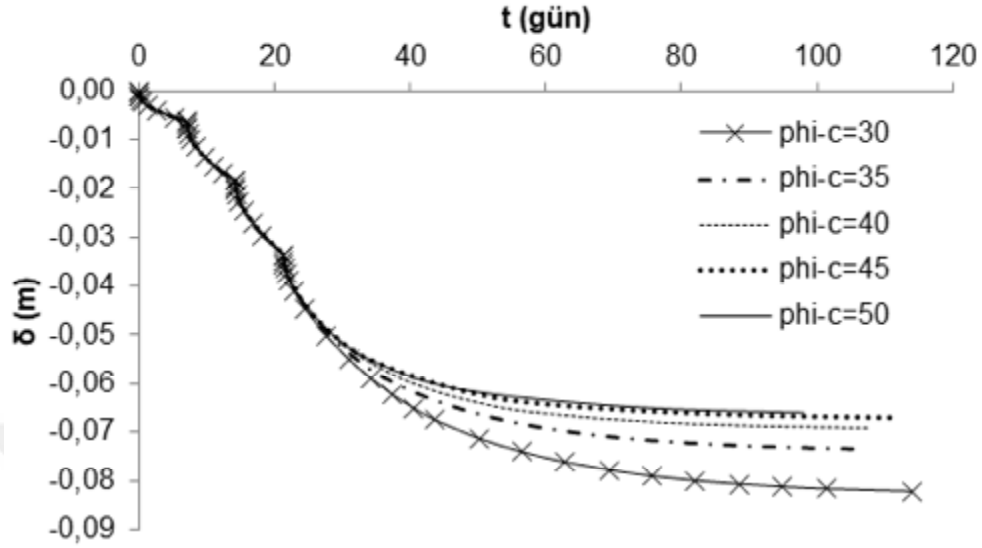
L_c Etkisi: Bu bölümde $D_c=0.80m$ ve $s=2.26m$ olarak sabit tutularak taş kolon boyu değiştirilmiş ve taş kolon boyunun oturma süresi ve miktarına etkisi araştırılmıştır. Analizlerde $E_s=5.2MPa$ ve $E_c=40MPa$ olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 5.26. Farklı L_c değeri için oturma-zaman eğrileri

Şekil 5.26'daki grafikler incelendiğinde kolon boyu arttıkça drenaj kapasitesi artacağından konsolidasyon süresi kısalmaktadır.

ϕ_c Etkisi: Bu bölümde ise, drenajlı koşullarda taş kolonun kayma mukavemeti açısının sonuçlara etkisi araştırılmıştır. Analizlerde $E_s=5.2\text{MPa}$, $E_c=40\text{MPa}$, $D_c=0.8\text{m}$, $L_c=11\text{m}$ ve $s=2.26\text{m}$ olarak alınmıştır.



Şekil 5.27. Farklı ϕ_c değerleri için oturma-zaman eğrileri

Taş kolonun ϕ_c değeri arttıkça konsolidasyon süresinde çok büyük bir değişim olmadığı, fakat ϕ_c değeri arttıkça oturmalarda azalma olduğu görülmektedir (Şekil 5.27).

6. TAŞ KOLON UYGULAMASI**6.1. Giriş**

Bu bölümde TÜBİTAK projesi kapsamında 2010-2013 tarihleri arasında arazide inşa edilmiş grup taş kolonların analitik ve sayısal yöntemlerle analizi yapılarak arazi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

6.2. Proje ve Arazi ile İlgili Bilgiler

Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü danışmanlığında gerçekleştirilen uluslararası ölçekli proje, İtalya'dan WESI Türkiye'den ise SOİLTEKNİK A.Ş. işbirliği ile gerçekleştirilmiştir. DAS-NAG (Data Acquisition System and Numerical Analysis for Geotechnics - Geoteknikte Veri Toplama Sistemleri ve Sayısal Analizler) adlı proje 2010-2013 yılları arasında tamamlanmıştır. Proje çalışmasında arazide inşa edilen tam ölçekli tekil ve grup taş kolon davranışı arazi ölüm sistemleri yardımı ile takip edilmiş ve incelenmiştir (Uysal, 2016).

Proje kapsamında seçilen deney sahası; Adana ili, Seyhan ilçesi, Yenidam Köyü Mevkiinde Batı Adana Atıksu Arıtma Tesisleri içerisinde yer almaktadır (Şekil 6.1 ve 6.2).



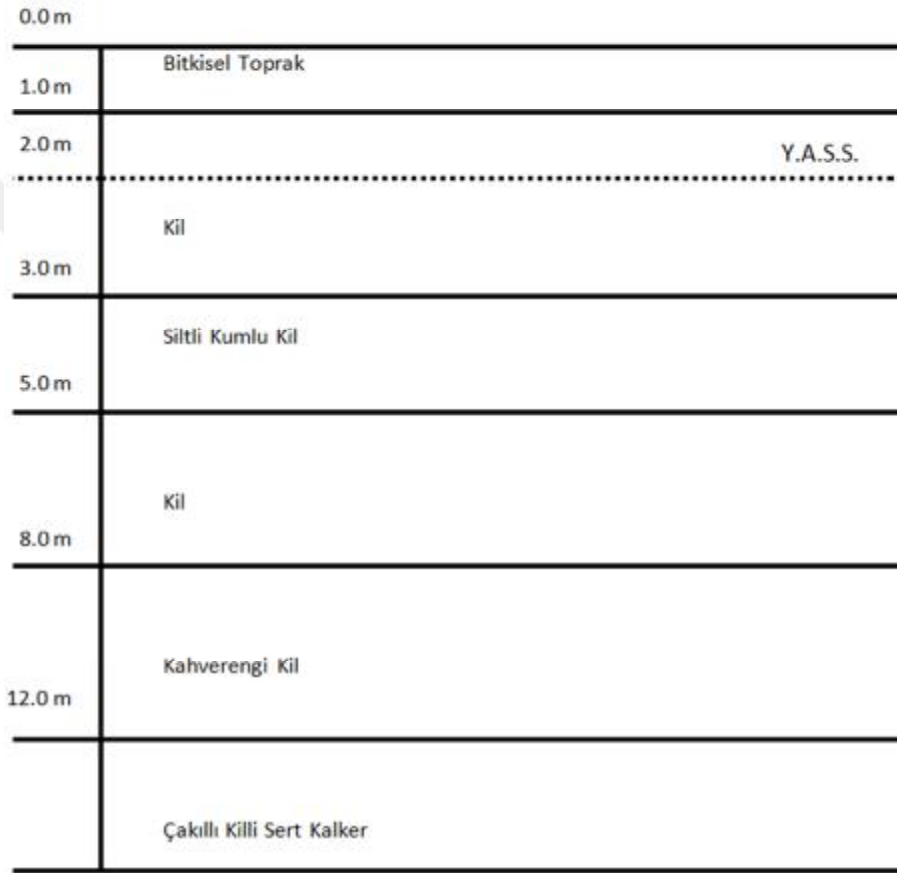
Şekil 6.1. Deney sahasının yeri (DAS-NAG,2013)



Şekil 6.2. Deney sahası (DAS-NAG,2013)

6.3. Zemin Özellikleri

Deney sahasının bulunduğu arazide daha önce farklı tarihlerde sondajlı zemin etütleri yapılmıştır (Uysal,2016). Bu zemin araştırmalarına ait sondaj logları incelendiğinde proje sahasının zemin profili Şekil 6.3'te gibi olduğu görülmüştür.



Şekil 6.3. Deney sahasına ait zemin profili

Deney sahasının bulunduğu bölgede açılan sondaj kuyularından farklı derinliklerden alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuarda kapsamlı şekilde sınıflandırma, mukavemet ve oturma deneyleri yapılmıştır

(Uysal,2016). Bu deneylerden elde edilen veriler ışığında Çizelge 6.1'deki zemin parametreleri belirlenmiştir (DAS-NAG,2013).

Çizelge 6.1. Deney sahasına ait zemin parametrelerinin derinlikle değişimi (DAS-NAG,2013)

Derinlik (m)	e_0	g (kN/m ³)	m_v (cm ² /kg)	C_r	C_c	κ	I	E_{oed} (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	AKO
0.5	0.820	19.2	0.040	0.06	0.260	0.020	0.114	25.00	19.2	5.90
1.5	0.831	19.2	0.020	0.02	0.013	0.010	0.056	50.00	38.5	3.60
2.5	0.643	20.5	0.140	0.09	0.670	0.040	0.300	7.14	5.5	1.08
3.5	0.851	21.5	0.040	0.06	0.284	0.027	0.120	25.00	19.2	2.00
4.5	0.870	20.3	0.040	0.05	0.273	0.022	0.120	25.00	19.2	1.53
5.5	0.654	20.3	0.030	0.05	0.213	0.022	0.120	33.30	25.6	2.10
7.0	0.920	17.6	0.027	0.08	0.330	0.035	0.140	37.00	28.5	1.70

6.4. Doğal Zeminde Yapılan Analizler

Bu bölümde öncelikle çalışma arazisinde iyileştirme öncesi doğal zeminin taşıma gücü ve oturma hesapları yapılacaktır. Daha sonra elde edilen sonuçlar iyileştirilmiş zeminde yapılan hesaplar ile karşılaştırılarak taş kolonların iyileştirmeye olan katkısı incelenecektir. Buradan elde edilen sonuçlarla arazi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak hem klasik hesap yöntemlerinin hem de sayısal yöntemlerin geçerliliği incelenmiş olacaktır.

6.4.1. Doğal Zeminin Taşıma Gücü Analizi

Öncelikle taş kolonla iyileştirilmemiş doğal zeminin taşıma gücü farklı taşıma gücü hesap yöntemleri ile hesaplanmıştır. Yapı ve zemin parametreleri Çizelge 6.2'deki gibidir.

Çizelge 6.2. Yapı ve zemin özellikleri (Uysal, 2016)

Temel tipi	Dairesel
Temel çapı (m)	5.53
Temel derinliği (m)	1
γ (kN/m ³)	17
q (sürşarj/kN/m ²)	17
c_u (kPa)	40
g (kN/m ³)	17
ϕ (°)	0

Terzaghi Yöntemi

$$q_d = K_1 c N_c + g_1 D_f N_q + K_2 N_g g_2 B \quad (6.1)$$

Çizelge 6.3. K_1 ve K_2 değerleri (Terzaghi)

Temel tabanı şekli	Şerit $L = \infty$	Dikdörtgen $B < L$	Kare $B = L$	Daire $L = B = D$
K_1	1	$1 + 0.2 \frac{B}{L}$	1.2	1.2
K_2	0.5	$0.5 - 0.1 \frac{B}{L}$	0.4	0.3

Çizelge 6.4. Taşıma gücü katsayıları (Terzaghi)

f (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N _c	5.7	7.3	9.6	12.9	17.7	25.1	37.2	58	96	172	348
N _q	1.0	1.6	2.7	4.4	7.4	12.7	22.5	41	81	173	415
N _y	0.0	0.5	1.2	2.5	5.0	9.7	19.7	42	100	298	1153

$q_d = 290.6 \text{ kPa}$ olarak hesaplanmıştır.

Meyerhof Yöntemi

$$q_d = cN_c s_c d_i b_c g_c + D_f g_1 N_q s_q d_q i_q b_q g_q + 0.5 g N_g B s_g d_g i_g b_g g_g \quad (6.2)$$

Çizelge 6.5. Taşıma gücü katsayıları (Hansen)

f (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
N _c	5.14	6.5	8.3	11.0	14.8	20.7	30	46	75	134	266
N _q	1.0	1.6	2.5	3.9	6.4	10.7	18	33	64	135	318
N _y	0.0	0.1	0.4	1.2	2.9	6.8	15	34	80	201	567

s şekil faktörleri ;

Şerit temelde , $s_c = s_q = s_y$

Dikdörtgen temelde , $s_c = s_q = 1 + 0,2 \frac{B}{L}$, $s_g = 1 - 0,4 \frac{B}{L}$

Kare temelde , $s_c = 1.3$, $s_q = 1.2$, $s_g = 0.8$

Daire temelde, $s_c = 1.3$, $s_q = 1.2$, $s_g = 0.6$

d derinlik faktörleri ($\emptyset = 0$ için) ;

$$d_c = 1 + 0,2 \frac{D_f}{B}, \quad d_q = 1, \quad d_g = 1$$

i yük eğimi faktörleri ($\emptyset = 0$ için) ;

$$i_c = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - H / A_c}, \quad i_g = 1, \quad i_q = 0$$

b temel tabanı eğimi faktörleri (temel tabanı düz ise) ;

$$b_c = b_q = b_g = 1$$

g zemin yüzü eğimi faktörleri (zemin yüzü düz ise) ;

$$g_c = g_q = g_g = 1$$

ise ;

$q_d = 266.2 \text{ kPa}$ olarak hesaplanmıştır.

Çalışmanın devamında doğal zeminin taşıma gücü Meyerhof yöntemi ile elde edilen 266.2 kPa olarak alınacaktır.

6.4.2. Doğal Zeminin Oturma Analizi

Çalışmanın bu bölümünde taş kolonsuz zemin üzerine inşa edilen silindirik tankın C_c yöntemi kullanılarak hesabı yapılmıştır. Müsaade edilebilir oturma değeri 10 cm olarak kabul edilmiştir. C_c yöntemi ile oturma hesabı :

$$DS > P_{c,se}; DS < P_{c,se}$$

$$S_c = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \frac{P_{c,se}}{P_z} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{P_{c,se}}{P_z} \quad (6.3)$$

$$DS < P_{c,se}$$

$$S_c = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \frac{P_{c,se}}{P_z} \quad (6.4)$$

Çizelge 6.6. C_c yöntemi ile oturma hesap tablosu

Tabaka Kalınlığı (m)	Derinlik (m)	C_c	AK O	σ'_z	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	P'_c	d (m)
1-2	0.5	0.260	5.90	9.60	60.0	69.60	56.64	0.038
2-3	1.5	0.130	3.60	33.00	59.4	92.40	118.80	0.005
3-4	2.5	0.670	1.08	59.25	57.6	116.85	63.99	0.120
4-5	3.5	0.284	2.00	99.50	56.4	155.90	199.00	0.006
5-6	4.5	0.273	1.53	145.85	52.8	198.65	223.15	0.004
6-7	5.5	0.213	2.10	202.50	50.4	252.90	425.25	0.003
7-9	7.0	0.330	1.70	255.70	45.0	300.70	434.69	0.006

Yapılan hesaplar sonucunda taş kolonsuz zeminde toplam oturma 18.21cm olarak hesaplanmıştır. Taşıma gücü yönünden bir sorun görülmemekte fakat $q=60\text{kN/m}^2$ taban basıncına sahip tank temel için oturma değerleri kabul edilebilir sınırların üzerindedir. Bu nedenle tank temelin inşa edilebilmesi için taş kolon yöntemi ile temel zeminin iyileştirilmesinin gerekli olduğu görülmektedir.

6.5. Taş Kolonla İyileştirilmiş Zeminde Yapılan Analizler

Bu bölümde taşıma gücü ve oturma analizleri yapıldıktan sonra iyileştirmeye ihtiyaç olduğu tespit edilen arazide yapılan taş kolonla iyileştirme çalışmaları analiz edilecektir.

6.5.1. Priebe(1995) Yöntemi ile Yapılan Analiz

İlk olarak Priebe (1995) yöntemi ile taş kolonla iyileştirilmiş zeminin oturma hesabı yapılacaktır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Çizelge 6.7'de, taş kolon parametreleri ise Çizelge 6.8'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 6.7. Zemin parametreleri

Zemin Tabakası [-]	Kalınlık m	γ kN/m ³	n [-]	ϕ [-]	c kPa	E _{oed,s} MPa
1	1	19.20	0.33	24	1	2.45
2	1	19.20	0.33	24	1	4.90
3	1	20.50	0.33	30	1	0.70
4	1	21.50	0.33	30	1	2.45
5	1	20.30	0.33	24	1	2.45
6	1	20.30	0.33	24	1	3.26
7	2	17.60	0.33	24	1	3.63

Çizelge 6.8. Taş kolon parametreleri

D _c m	s m	g _c kN/m ³	n _c [-]	E _{oed,c} MPa	f _c (°)
0.8	2	20	0.3	53.85	40

"*priebe_cal*" programı ile yapılan analizler sonucunda, arazide kullanılan taş kolonların çapı 0.8m ve kolonlar arası mesafe 2m olduğundan 60kPa düşey yük altındaki toplam oturma 11.6cm olarak elde edilmiştir.

6.5.2. Genel Yöntem ile Yapılan Analiz

Bu kısımda genel yöntem kullanılarak taş kolonla iyileştirilmiş zeminin oturma hesabı yapılacaktır. Analizde Priebe (1995) yöntemi ile yapılan analizde olduğu gibi düşey temel yükü, kolon çapı ve kolonlar arası mesafe değerleri araziye uygun olarak alınacaktır. Arazi verileri kullanılarak yapılan analizin hesap adımları aşağıda görüldüğü şekildedir.

$$a_s = 0.907 \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \frac{D_c}{s} \quad (6.5)$$

$$a_s = 0.907 * (0.8/2)^2 = 0.145$$

$$q_{ult,c} = 20c_u \quad (6.6)$$

$$q_{ult,c} = 20 * 40 = 800 \text{ kPa}$$

$$q_{ult,s} = 1.3N_c c_u \quad (6.7)$$

$$q_{ult,s} = 1.3 * 5.7 * 40 = 296.4 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = q_{ult,c} a_s + q_{ult,s} (1 - a_s) \quad (6.8)$$

$$q_{ult} = 800 * 0.145 + 296.4 * (1 - 0.145) = 369.42 \text{ kPa}$$

$$n = 1 + 0.217 \frac{\sigma_c}{\sigma_s} - 1 \quad (6.9)$$

$$n = 1 + 0.217 (40000/2500 - 1) = 4.255$$

$$S_c = \frac{1}{1 + a_s (n - 1)} S \quad (6.10)$$

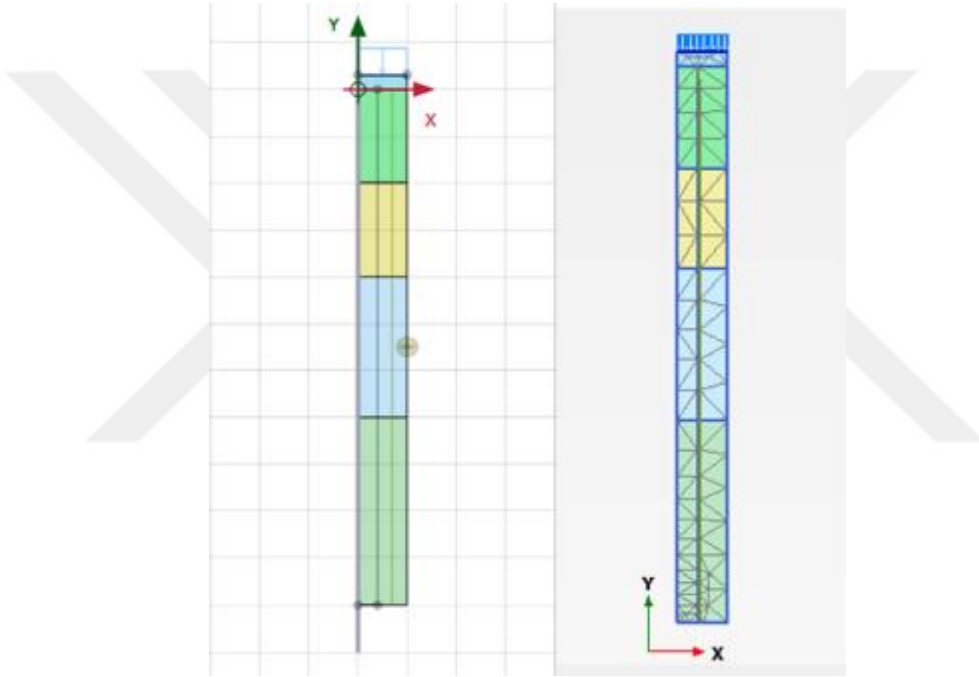
$S_c = 0.68S$ olduğundan genel yöntem ile yapılan analizde taş kolonlu zeminin oturması, $S_c = 0.68 * 18.205 = 12.38 \text{ cm}$ olarak hesaplanır.

6.5.3. Sonlu Elemanlar Programı İle Yapılan Analiz

Tez çalışmasının bu kısmında arazi verileri kullanılarak taş kolonla iyileştirilmiş zeminin sonlu elemanlar programı ile 2 boyutlu birim hücre ve 3 boyutlu tüm sistem analizleri yapılacaktır.

6.5.3.1. 2D Birim Hücre Analizi

Bu bölümde arazide grup kolonlardan önce inşa edilen tekil kolonun yükleme deneyi sayısal olarak modellenmiştir. Bu yükleme deneyi PLAXIS 2D bilgisayar programı ile modellenmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları arazi yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma eğrisi ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan geometrik model ve sonlu elemanlar ağı Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4. Geometrik model ve sonlu elemanlar ağı (2D)

Zemin davranışını temsil etmesi için yumuşak zemin krip (Soft Soil Creep,SSC) modeli kullanılmıştır. Modelde kullanılan parametreler deney arazisinden ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Zemin model parametreleri her bir tabaka için Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Zemin parametreleri

Zemin tabakası	g (kN/m ³)	$k_x=k_y$ (m/gün)	l^*	k^*	m^*	n	M	c_{ref} (kN/m ²)	f (°)
Kil (1-3m)	19.0	3.6E-05	0.0059	0.0012	0.0002	0.3	0.95	1	24
Kil (3-5m)	19.0	1.0E-04	0.1410	0.0280	0.0047	0.3	1.20	1	30
Kil (5-8m)	18.5	1.5E-05	0.0560	0.0110	0.0019	0.3	0.95	1	24
Kil (8-12m)	18.0	2.9E-05	0.0820	0.0150	0.0027	0.3	0.95	1	24

Taş kolonu temsil etmesi için ise pekleşme zemin (Hardening soil, HS) modeli kullanılmıştır. HS zemin modelinin kullanılma nedeni, taş kolona gelen yük nedeniyle kolonda yanal yönde genişleme oluşması ve bunu en iyi şekilde HS zemin modelinin temsil edeceğinin düşünülmesidir. HS zemin model parametreleri Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.10. Taş kolon parametreleri-1 (HS zemin modeli parametreleri)

g (kN/m ³)	$k_x=k_y$ (m/gün)	E_{50ref} (kN/m ²)	$E_{oed ref}$ (kN/m ²)	$E_{ur ref}$ (kN/m ²)	c (kN/m ²)
21	1	5.00E+04	5.00E+04	1.50E+05	5

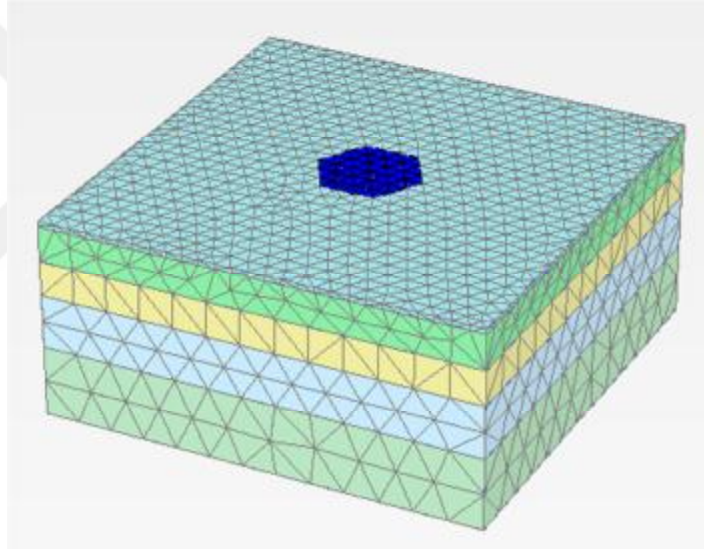
Çizelge 6.11. Taş kolon parametreleri-2 (HS zemin modeli parametreleri)

f (°)	γ (°)	n	p_{ref} (kN/m ²)	Power	K_{0nc}	R_f	R_{inter}
45	20	0.2	100	0.4	0.4	1	0.65

Arazi deneyi, sonlu elemanlar yöntemine dayalı 2 boyutlu bilgisayar programı kullanılarak birim hücre yaklaşımı ile sayısal olarak analiz edilmiştir.

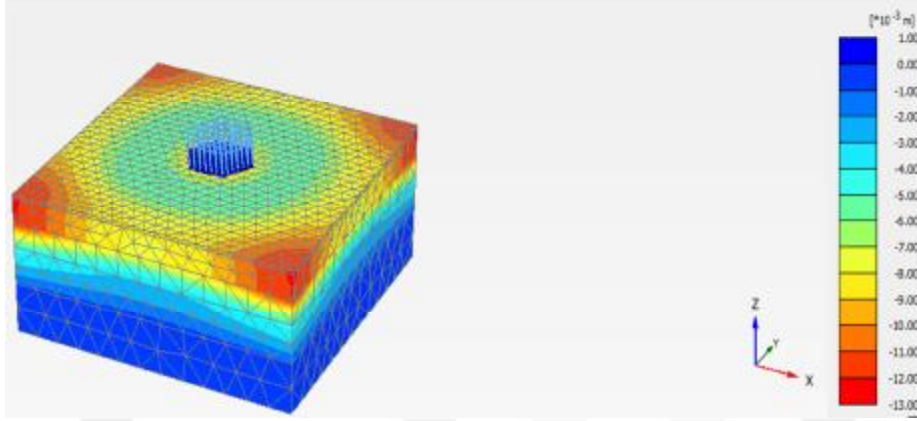
parametreleri her bir tabaka için Çizelge 6.9'da verilmiştir. Taş kolonu temsil etmesi için ise pekleşme zemin (Hardening soil, HS) modeli kullanılmıştır. HS zemin modelinin kullanılma nedeni, taş kolona gelen yük nedeniyle kolonda yanal yönde genişleme oluşması ve bunu en iyi şekilde HS zemin modelinin temsil edeceğinin düşünülmesidir. HS zemin model parametreleri Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Taş kolonların üzerine 30cm kalınlığında dolgu tabakası ve altıgen şekilde plaka tanımlanmıştır. Zemin ve yapısal eleman koşulları sağlandıktan sonra, çalışma ortamı orta sıklıkta sonlu elemanlar ağına ayrılmıştır (Şekil 6.6).



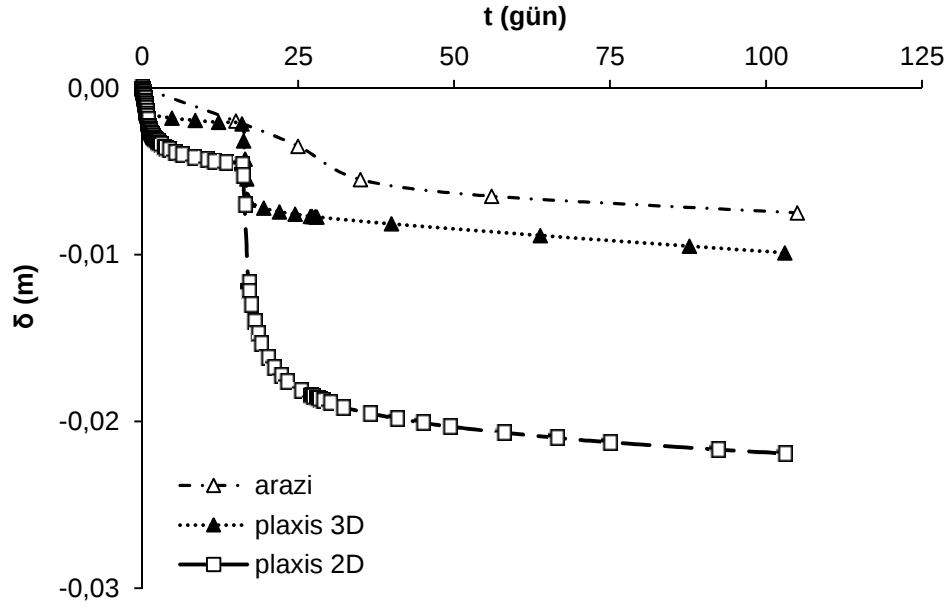
Şekil 6.6. Geometrik model ve sonlu elemanlar ağı (3D)

Analizde, deneye uygun olarak kademeli yükleme yapılmış ve suyun drene olması için gerekli bekleme süresi dikkate alınarak, drenajlı koşullarda konsolidasyon hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda meydana gelen düşey deplasman yaklaşık 1 cm mertebesinde olmuştur (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Toplam deformasyon görüntüsü (3D)

2D ve 3D ile yapılan sayısal analizler, arazi deneyi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.8). Arazi çalışması üç boyutlu olduğundan, gerçek davranışa yakın sonuç 3D analiz ile öngörülmüştür. Arazi deney sonucunda zamana bağlı meydana gelen deplasman yaklaşık 0.8cm mertebesinde iken, 2D birim hücre yaklaşımı ile yapılan analiz sonucunda meydana gelen deplasman yaklaşık 2cm civarında olmuştur. 3D analiz sonucunda zamana bağlı meydana gelen deplasman ise 1cm mertebesinde dir. Analiz sonuçları bu öngörü yü doğrulamış ve 3D analiz sonucu ile deney sonucu daha uyumlu çıkmıştır.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, taş kolon uygulaması için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi analitik yöntemler yardımı ile araştırılmıştır. Ayrıca, taş kolon tasarım parametrelerinin etkisi sayısal yöntemler yardımı ile de araştırılmıştır. Bunların yanı sıra tez kapsamında daha önce yapılmış olan bir arazi uygulaması ele alınmıştır. Söz konusu arazi uygulaması 2010-2013 tarihleri arasında TÜBİTAK projesi kapsamında arazide inşa edilmiş ve arazi ölçüm sistemleri ile davranışı takip edilmiş bir projedir. Araziden elde edilen ölçüm sonuçları ile yapılan analitik ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak analitik ve sayısal analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği araştırılmıştır. Tüm bu çalışmalar doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Kısa süreli stabilite analizlerinde,

- E_c/E_u oranı yani taş kolonun elastisite modülü arttıkça kompozit sistemin hem dayanımı hem de oturma davranışı iyileşmektedir. Bir başka deyişle uygulamada taş kolon ne kadar iyi sıkıştırılırsa sistemin drenajsız kayma dayanımı artmakta ve oturmalar azalmaktadır.
- E_c/E_u oranı arttıkça taşıma gücünün de arttığı görülmektedir.
- $E_c/E_u=10$ 'dan sonra ise eğrinin yaklaşık asimptot kaldığı yani kolon rijitliğinin önemli bir etkisinin kalmadığı görülmektedir.
- Genellikle uygulamada yumuşak kil zeminin rijitlik modülü düşüktür ve bu zemin içerisine inşa edilecek taş kolonun rijitlik modülünün kil zeminin rijitlik modülünden en az 10 katı daha büyük olması gerekir. Bu nedenle taş kolon malzemesinin imalat sırasında çok iyi şekilde sıkıştırılması gerekir.
- Uygulamada seçilecek taş kolon malzemesinin granülometrik özelliklerini belirleyen en önemli parametre dane çapı dağılımı ve onun içsel sürtünme

açısıdır. Taş kolonun içsel sürtünme açısı ϕ_c arttıkça yük taşıma kapasitesi artmakta ve oturmalar azalmaktadır.

- Kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti değeri arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı ve oturmaların azaldığı görülmektedir.
- Yapılan sayısal analizlerde, taş kolonun elastisite modülü 50MPa ve E_u/c_u oranı 300 olarak sabit tutulduğunda c_u değeri arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı ve oturma değerinin azaldığı görülmektedir.
- Kolonlar arası mesafe arttıkça taşıma kapasitesi azalmakta ve s/D_c oranı 5'den sonra ise taşıma kapasitesi yaklaşık olarak asimptot kalmaktadır. Yani s 'nin çok büyük değerlerde seçilmesi taş kolonların etkisini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- D_c parametresi ile ilgili yapılan sayısal analizler sonucunda, taş kolon çapı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığını görülmektedir. Fakat birim hücre çapı yani s parametresi sabit tutulduğu için D_c 'deki artış analizlerde sınır etkisi oluşturmakta ve sonuçları önemli ölçüde etkilememektedir. Bu nedenle sağlıklı bir değerlendirme yapmak mümkün değildir.
- L_c parametresi ile ilgili yapılan sayısal analizlerde, taş kolon boyu arttıkça taşıma gücünün artması beklenirken çok fazla bir değişim göstermediği gözlenmiştir. Bunun nedeni drenajsız koşullar nedeniyle kolon ile zemin arasında etkileşim beklendiği ölçüde gerçekleşmemesi olabilir.

Uzun süreli stabilite analizlerinde,

- Taş kolon rijitlik modülünün artması yani E_c/E_s oranının artması ile zamana bağlı oturmalar önemli ölçüde azalmaktadır.
- Taş kolonlar arası mesafe arttıkça birim hücre genişliği artacağı için konsolidasyon süresinde ve oturmalarda artış gözlemlenmiştir

- Taş kolon çapı arttıkça oturmalar ve konsolidasyon süresi azalmaktadır. Bu durumun sebebi ise, kolon çapının artmasıyla sistemin drenaj kapasitesi arttığından ve kolonun rijitlik modülü kil zeminin rijitlik modülünden çok fazla olduğu için oturmalar azalmaktadır.
- L_c parametresi ile ilgili yapılan sayısal analizlerde, kolon boyu arttıkça drenaj kapasitesi artacağından konsolidasyon süresi kısalmakta olduğu gözlenmiştir.
- Taş kolonun ϕ_c değeri arttıkça konsolidasyon süresinde çok büyük bir değişim olmadığı, fakat ϕ_c değeri arttıkça oturmalarda azalma olduğu görülmektedir.

Ayrıca tez kapsamında yapılan sayısal analizler sonucunda,

- Arazi çalışması üç boyutlu olduğundan, gerçek davranışa yakın sonuç 3D analiz ile öngörülmüştür. Arazi deney sonucunda zamana bağlı meydana gelen deplasman yaklaşık 0.8cm mertebesinde iken, 2D birim hücre yaklaşımı ile yapılan analiz sonucunda meydana gelen deplasman yaklaşık 2cm civarında olmuştur. 3D analiz sonucunda zamana bağlı meydana gelen deplasman ise 1cm mertebesinde dir. Analiz sonuçları bu öngörü yü doğrulamış ve 3D analiz sonucu ile deney sonucu daha uyumlu çıkmıştır.



KAYNAKLAR

- Adeli, N., 2013. Taş Kolonların Analiz ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ambily, A. P. ve Gandhi, S. R., 2007. Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, 4, 405-415.
- Ataman, Ş., 2011. Darbeli Taş Kolonlar (Geopier) İle İyileştirilmiş Zeminlerin Model Deneylerle İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balaam, N. P., Poulos, H.G. and Brown, P. T., 1977. Settlement analysis of soft clays reinforced with granular piles. Proc. 5th Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Bangkok, Vol. 1, 81-91.
- Barksdale, R. D., Bachus, R. C., 1983. A. Design and construction of stone columns. Vol. I, FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Borges, J. L., Domingues, T.S. and Cardoso, A. S., 2009. Embankments on soft soil reinforced with stone columns: numerical analysis and proposal of a new design method. Geotechnical and Geological Engineering, 27, Springer Science, 667-679.
- Brauns, J. (1978). Die anfangstraglast von schottersäulen im bindigen untergrund. Die Bautechnik, 55(8), 263-271.
- Cimentada, A., Da Costa A., 2009. Laboratory experimental analysis of radial consolidation around a stone column. Geotechnics of soft soils: Focus on ground improvement, London: Taylorand & Francis Group; pp 213-217.
- DAS-NAG, 2010-2013, 9100030, (Data Acquisition System and Numerical Analysis for Geotechnics).

- Demir, H., 2007. Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demir, S., 2011. Darbeli Kırmataş Kolonların İmalatında Zemin Davranışının İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Han, J. 2015. Principles and Practice of Ground Improvement. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Han, J., Ye, S. L., 1991. Field tests of soft clay stabilized by stone columns in coastal areas in China. Proceedings of the 4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Stresa, Italy, pp. 243–248.
- Kurt, E., 2011. Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Liew, S.S. and Tan, S.K., 2007. Performance of Reinforced Soil Wall Supported on Stone Columns. Proc. 16th Southeast Asian Geotechnical Conferences, Malaysia.
- Mccabe, B. A., Nimmons, G. J. And Egan, D., 2009. A review of field performance of stone columns in soft soils. Geotechnical Engineering 162, Issue GE6, ICE, December, 323-334.
- Mirsalehi, S., Bilsel H., 2012. Finite element modeling of stone columns in alluvial soils under an embankment. 3th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus.
- Namal, H. E., 2011. Yumuşak Killi Zeminlerde Taş Kolonlarla Zemin İyileştirilmesinin Laboratuvar Model Deneylerle Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Osmanoğlu, U., 1999. Yumuşak ve Gevşek Zeminlerin İyileştirilmesi: Yüksek Basıncılı Enjeksiyon Kolonları ve Taş kolonlar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Plaxis 8.0, 2006. Finite Element Code For Soil Rock Analyses, User Manual, Delf.
- Priebe, H. J., 1991. Vibro Replacement – Design Criteria and Quality Control, Deep Foundation Improvements: Design, Construction and Testing. ASTM STP 1089, Philadelphia, 62-72.
- Priebe, H.J., 1995. “The Design of Vibro Replacement.”, Ground Engineering, 1-13.
- Saroglu, H., Pateras S. K., 2008. Ground improvement of clayey soil formations using stone columns: A Case Study from Greece. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Uysal, F., 2016. Taş Kolonların Analiz ve Tasarımı. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Vekli, M., 2009. Taş Kolon İle Şev İyileştirmesinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. and Gaul A.J., 2002. Embankment Support: Comprasion of Stone Column and Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement. Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington D.C.



ÖZGEÇMİŞ

06.10.1992 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimlerini Adana’da tamamladı. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladığı lisans eğitimini 2014 yılında tamamladı. 2014 yılında Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Yazar, 2014 yılında İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya başladığı Adana Büyükşehir Belediyesinde halen çalışmaya devam etmektedir.



EKLER



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
Zemin Tabiiyatı	Kabınk	A_c	A/A_c	E_{max}/E_{min}	f_0	n_0	$(A_c/A)_0$	$(A_c/A)_1$	$(A_c/A)_2$	f_1	n_1	$(A_c/A)_1$	$(A_c/A)_2$	f_2	n_2	$(A_c/A)_2$	f_3	n_3		
1	1.0	0.50	6.89	22	1.181	1.80	0.82	0.22	0.14	1.20	1.78	6.52	220.21	0.0	3.37	4.04	1.00	1.78		
2	1.0	0.50	6.89	11	1.181	1.80	0.68	0.47	0.14	1.22	1.75	6.49	222.97	19.2	1.69	2.45	1.18	2.07		
3	1.0	0.50	6.89	77	1.181	1.80	0.94	0.06	0.14	1.19	1.80	6.54	218.34	38.4	11.77	12.02	1.46	2.63		
4	1.0	0.50	6.89	22	1.181	1.80	0.82	0.22	0.14	1.20	1.78	6.52	220.21	58.9	3.37	4.04	1.93	3.42		
5	1.0	0.50	6.89	22	1.181	1.80	0.82	0.22	0.14	1.20	1.78	6.52	220.21	80.4	3.37	4.04	2.92	4.04		
6	1.0	0.50	6.89	17	1.181	1.80	0.77	0.30	0.14	1.20	1.77	6.51	221.11	100.7	2.54	3.25	2.54	3.25		
7	2.0	0.50	6.89	15	1.181	1.80	0.75	0.33	0.14	1.21	1.76	6.50	221.51	121.0	2.28	3.01	2.28	3.01		
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \cdot \left[\frac{1/2 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{sc} \cdot f(\mu_s, A_c/A)} - 1 \right]$$
$$\bar{\frac{A_c}{A}} = \frac{1}{A_c/A + \Delta(A_c/A)}$$
$$\Delta\left(\frac{A_c}{A}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A_c}{A}\right)_1} - 1$$
$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = - \frac{4K_{sc}(n_0 - 2) + 5}{8K_{sc} - 2}$$
$$f(\mu_s, A_c/A) = \frac{(1 - \mu_s) \cdot (1 - A_c/A)}{1 - 2\mu_s + A_c/A}$$
$$K_{sc} = \tan^2(45^\circ - \phi_c/2)$$
$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{sc} \left(1 - \frac{A_c}{A} \right)} - 1 \right]$$
$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{\bar{A}_c}{A}}{4K_{sc} \left(1 - \frac{\bar{A}_c}{A} \right)} - 1 \right]$$
$$\pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4K_{sc}(n_0 - 2) + 5}{4K_{sc} - 1} \right]^2 + \frac{16K_{sc}(n_0 - 1)}{4K_{sc} - 1}}$$
$$\Delta\left(\frac{A_c}{A}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A_c}{A}\right)_1} - 1$$
$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = - \frac{4K_{sc}(n_0 - 2) + 5}{8K_{sc} - 2}$$
$$f_\theta = \frac{1}{1 + \frac{K_{sc} - W_g/W_c}{K_{sc}} \frac{W_c}{p_c}}$$
$$P_s = \frac{p}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - A_c/A}{p_c/p_s}}$$
$$\frac{p_c}{p_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{sc} \cdot f(\mu_s, A_c/A)}$$
$$f_\theta = \frac{1}{1 + \frac{K_{sc} - 1}{K_{sc}} \frac{\Sigma(N_c, \Delta d)}{p_c}}$$
$$f_s \leq \frac{D/D_i}{p_i/p_i}$$
$$n_{min} = 1 + \frac{A_c}{A} \left(\frac{D}{D_i} - 1 \right)$$
$$S_w = P \frac{d}{D_i \cdot n_2}$$
$$\Delta S = \frac{p}{D_i \cdot n_2} [(S/S_\infty)_l d_l - (S/S_\infty)_u d_u]$$

$$W_c = \Sigma(N_c \cdot \Delta d)$$
$$W_g = \Sigma(N_g \cdot \Delta d)$$
$$K_{sc} = 1 - \sin \phi_c$$

EK-3

Zemin Tabakası [-]	D_c m	s m	n_2 [-]	$\hat{\sigma}$ (taşkolonsuz) m	$\hat{\sigma}$ (taşkolonlu) m	$\hat{\sigma}$ toplam m
1	0,8	2	1,78	0,066	0,037	0,116
2			2,07	0,009	0,005	
3			2,63	0,171	0,065	
4			3,42	0,009	0,003	
5			4,04	0,008	0,002	
6			3,25	0,005	0,001	
7			3,01	0,009	0,003	
8			-			