

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN SİSMİK
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

SALAD ABDULLAHİ MOHAMED

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN SİSMİK
YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

SALAD ABDULLAHİ MOHAMED

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SAMSUN
2019

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Salad Abdullahi MOHAMED tarafından hazırlanan "Darbeli Kırmataş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerin Sismik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi"adlı tez çalışması.....tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Danışman Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DEMİR
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan

Üye

Üye

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum. .././20..

...imza....

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.



03/07/2019

Salad Abdullahi MOHAMED

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DARBELİ KIRMATAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN SİSMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Salad Abdullahi MOHAMED

Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı: Geoteknik

Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Gökhan DEMİR

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, yapının inşa edileceği zeminin taşıma gücü ve oturmalar açısından problem oluşturmayacak nitelikte olması durumunda genellikle yüzeysel temeller tercih edilmektedir. Son yıllardaki yüksek nüfus artışına bağlı olarak artan yapılaşma ihtiyacı, geoteknik mühendisliği açısından problemlili kabul edilen zeminlerin kullanımını da zorunlu hale getirmektedir. Bu tür zeminlerin iyileştirilmeden kullanılması çok ciddi can ve mal kayıplarına sebebiyet verebilmektedir ve bu durum neticesinde bu tür alanlarda zemin iyileştirilmesi kaçınılmaz bir durum haline gelmektedir. Günümüze kadar pek çok zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiş olup bu yöntemlerin uygulamada doğurduğu yüksek maliyetler geoteknik mühendislerini yeni yöntemler aramaya yönlendirmiştir. Bu çalışmada, mevcut yöntemlerle kıyaslandığında %20 ile %50 arasında değişen oranda tasarruf sağlayan darbeli kırmataş kolonların sismik yükler altında taşıma gücüne ve oturmalara nasıl bir katkı sağlayacağı incelenmiştir. Bu amaçla, farklı boy (4.5 m, 6.5 m, 8 m, 10 m) ve farklı kolon aralığı/çapı ($s/D=5$, $s/D=4$, $s/D=3$ ve $S/D=2$) değerleri dikkate alınarak oluşturulan iki boyutlu modellere deprem yükü (pseudo statik katsayı (k_n)) etkilendirilerek iyileştirme öncesi ve sonrası için taşıma gücü ve oturma değerleri elde edilmiştir. Tüm bu analizlerde Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilen zeminlerde taşıma gücünün arttığı ve oturmaların azaldığı görülmüştür. Ayrıca deprem ivmesinin artmasıyla taşıma gücünün azaldığı ve oturmaların arttığı sonucu elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Darbeli kırmataş kolon, deprem, taşıma gücü, oturma

ABSTRACT

Master's Thesis

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF IMPROVED SOILS WITH RAMMED AGGREGATE PIERS UNDER SEISMIC LOADS

Salad Abdullahi MOHAMED

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gökhan DEMİR

In civil engineering applications, generally, shallow foundations are preferred if the soil on which the building to be constructed will not cause problems in terms of bearing capacity and settlement. However, due to the high population growth in recent years, the increasing need for construction may necessitate the use of soils considered problematic in terms of geotechnical engineering. The use of this type of soils without any improvement can lead to serious loss of life and property and therefore the improvement of soils in such areas becomes inevitable. Until now, many soil improvement methods have been developed and the high costs caused by these methods have led geotechnical engineers to look for new methods. In this study, it's investigated how the rammed aggregate pier, which provide saving between 20% and 50% compared to the existing methods, will contribute to the bearing capacity and settlements under seismic loads. For this purpose, by applying seismic loads (pseudo static coefficient (k_h)) to two-dimensional models, which are formed by taking different column lengths (4.5 m, 6.5 m, 8 m, 10 m) and different column spacing/diameter values ($s/D=5$, $s/D=4$, $s/D=3$ ve $s/D=2$) into consideration, the bearing capacities and settlement values were obtained before and after the improvement. Plaxis 2D finite element software was used in all these analyses. It was seen that the bearing capacities increase and settlements decrease in the soils improved with rammed aggregate piers. Besides, with the increase in earthquake acceleration, bearing capacities decrease and settlements increase. The results are presented as tables and graphs.

Keywords: Rammed aggregate piers, earthquake, bearing capacity, settlement

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde bilgisi, desteği, ilgisi ve sabrıyla bana her zaman yardımcı olan ve her türlü imkânı sunan öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyduğum değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Arş. Gör. Utku KÖKTAN, Arş. Gör. Cenk Cuma ÇADIR ve Arş. Gör. Ferhat ŞAHİNKAYA'ya da yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada, 1904-A kodlu proje kapsamında alınan Plaxis 2D program çıktılarından faydalanılmış olup, katkılarından dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne teşekkür ederim.

Okul hayatım boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen ve beni sabırla destekleyen, her zaman yanımda olan canım ablam Aamina Abdullahi MOHAMED sevgi ve saygılarımı sunarım.

2019, Samsun

Salad Abdullahi MOHAMED

2.2.8.5.2. Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi.	32
2.2.8.5.3. Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilmiş bölgede kayma yenilmesi.....	33
2.2.8.5.4. Kolon ve zeminden oluşan bölge altında göçme meydana gelmesi.....	34
2.2.9. Sismik yükler altındaki taşıma gücü.....	35
2.2.9.1. Sismik yükler altındaki taşıma gücü kayıpları	35
2.2.9.2. Sismik yükler altında taşıma gücü hesabı	35
2.2.9.3. Yarı-statik (psödostatik) yaklaşım.....	38
2.2.9.3.1. Yarı-statik (psödostatik) katsayının seçimi	39
3. KIRMATAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ.....	42
3.1 Materyal	42
3.1.2. Deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerin oturmaların ve taşıma güçlerin analizleri.....	43
3.1.3. Deprem yükü (k_h) etkisi altında darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerin oturmaların ve taşıma güçlerin analizleri.....	45
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	46
3.2.1. plaxis sonlu elemanlar programı tanıtımı	48
3.2.1.2. Zemin eleman tipleri.....	50
3.2.1.3. Mesh (Ağ)	51
3.2.1.4. Zemin davranışının modellenmesi.....	52
3.2.1.4.1. Lineer Elastik zemin modeli (LE).....	52
3.2.1.4.2. Soft Soil zemin modeli (ss)	52
3.2.1.4.2. Soft Soil Creep Zemin Modeli (SSC).....	53
3.2.1.4.3. Modifiye Cam Clay Zemin Modeli (MCC)	53
3.2.1.4.4. Hardening Soil Zemin Modeli (HS).....	53
3.2.1.4.5. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli.....	54
3.2.1.4.6. Jointed-Rock zemin modeli (JR)	55
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
4.1. Deprem Etkisi Olmadan Darbeli Kırmataş Kolonlu Ve Kolonsuz Zeminlerin Oturmaların Ve Taşıma Güçlerin Analizlerin sonuçları	56
4.2. Deprem Yüğü (k_h) Etkisi Altında Darbeli Kırmataş Kolonlu ve Kolonsuz Zeminlerin Oturmaların ve Taşıma Güçlerin Analizlerin Sonuçları.....	61
4.2.1. Yıkıcı Depremlerde önerilen ($k_h = 0.2$) analizlerin sonuçları	61
4.2.2. Katastropik (Felakat Boyutunda) Depremlerde önerilen ($k_h = 0.5$) analizlerin sonuçları	65
5. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR

δ	çökme
K_m	Matris Zemin Rijitlik Modülü,
K_g	Darbeli Kırmataş Kolonlar Rijitlik Modülü
C_c	Zemin Sıkışabilirlik İndeksi
e_0	Başlangıç Boşluk Oranı
P_0	Düşey Efektif Gerilme
Δ_q	Düşey Gerilme Artışı
N_c	Taşıma Gücü Faktörleri
N_y	Taşıma Gücü Faktörleri
N_q	Taşıma Gücü Faktörleri
ρ	Zemin Birim Hacim Ağırlığı
σ_v	Efektif Jeoloji Basınç
n_s	Gerilme Konsantrasyon Oranı
R_a	Darbeli Kırmataş Kolon Alan Oranı
ϕ_g	Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı
ϕ_s	Zeminin İçsel Sürtünme Açısı
F_h	Yarı-Statik Yanal Kuvvet (kN)
m	Zemin Toplam Kütlesi (Kg)
a	Yatay İvme m/sn^2
g	Yer Çekim İvmesi (m/sn^2)
a_{max}	Maksimum Yatay İvme
γ_k	Kuru Hacim Ağırlığı
γ_d	Doygun Birim Hacim Ağırlığı

e	Boşluk Oranı
μ	Poisson Oranı
E	Elastisite Modülü
k_x ve k_y	Yatay Ve Düşey Permeabilite
ψ	Dilatasyon Açısı
DKK	Darbeli Kırmataş Kolon
\emptyset	Sürtünme Açısı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği.....	11
Şekil 2.2. Dinamik Kompaksiyon Yöntemi.....	13
Şekil 2.3. Vibrokompaksiyon Yöntemi	15
Şekil 2.4. Jet Grout Yöntem İmalatı	16
Şekil 2.5. Fore Kazık İmalat Aşamaları	17
Şekil 2.6. Vibro-Yerdeğiştirme imalat aşamaları	18
Şekil 2.7. Darbeli Kırmataş Kolonları Kullanabilecek Zemin Sınıfları	20
Şekil 2. 8. Geopier Sistemi İmalat Aşamaları	21
Şekil 2. 9. İmpact Sistemi İmalat Aşamaları	22
Şekil 2.10. Darbeli kırmataş kolonların üzerinde yapılan kesme deneyi sonuçları..	24
Şekil 2.11. Darbeli kırmataş kolonları üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi	24
Şekil 2.12. darbeli kırmataş kolonlarla desteklenmiş temeller için hesabi	25
Şekil 2.13. Darbeli Kırmataş Kolonlar İçin Geliştirilen Gerilme Konsantrasyonu Yay Modeli	27
Şekil 2.14. Muhtemel Göçme Mekanizmaları	30
Şekil 2.15. Basitleştirilmiş Coulomb Kayma Kamaları ($\delta \neq 0$)	36
Şekil 2.16. Coulomb Mekanizması (Δ Sürtünmenin Dikkat Alındığı Durum)	36
Şekil 2.17. Statik Ve Dinamik Şartlarda Taşıma Gücü Kamaları	36
Şekil 2 18. Deprem Kuvvetinin Yarı Statik Yöntemi	39
Şekil 3.1. Örnek Darbeli Kırmataş Kolonlu Zemin Kesiti Modeli	44
Şekil 3.2. darbeli kırmataş kolonsuz ve darbeli kırmataş kolonlu geometrik modelinin oluşturulması ve model parametrelerinin girilmesi.....	45
Şekil 3.3. Analitik Yöntemleri	46
Şekil 3.4. Sonlu Elemanlar Metodu çalışma mekanizması	47
Şekil 3.5. 2 boyutlu Elemanlar	48
Şekil 3.6. Plane Strain Modeli (a), Axisymmetry modeli (b)	50
Şekil 3. 7. Düğüm ve Gerilme Noktaları	51

Şekil 3.8. üç eksenli deneylerden E_o ve E_{50} 'nin tanımlanması	55
Şekil 4.1. Deprem kuvveti etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin oturmaların analiz sonrasındaki hali.	56
Şekil 4.2. deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.....	58
Şekil 4.3. deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.....	58
Şekil 4.4. Deprem kuvveti etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin taşıma güçleri analiz sonrasındaki hali.	59
Şekil 4.5. deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.	60
Şekil 4.6. deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.	60
Şekil 4.7. deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin oturma analiz sonrasındaki hali	61
Şekil 4.8. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.....	62
Şekil 4.9. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.	63
Şekil 4.10. deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin taşıma gücü analiz sonrasındaki hali.....	63
Şekil 4.11. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.	64
Şekil 4.12. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.....	65
Şekil 4.13. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.....	65
Şekil 4.14. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.....	66
Şekil 4.15. . Yarım statik ($kh=0.5$) deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.	67
Şekil 4.16. Yarım statik ($kh=0.5$) deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Zemin iyileştirme metotları ve kullanım amaçları	11
Çizelge 2.2. Zeminde Katkı Eklenip Eklenemeyeceği Göre Sınıflandırılması	12
Çizelge 2.3. DKK İmalat Aşamaları	20
Çizelge 3.1. Programda kullanılan geoteknik parametreleri	43
Çizelge 4.1. deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri.....	57
Çizelge 4. 2. deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü değerleri.....	59
Çizelge 4.3. deprem etkisinden($kh = 0.2$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri	62
Çizelge 4. 4. deprem etkisinden($kh = 0.2$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma ve taşıma gücü değerleri	64
Çizelge 4.5. deprem etkisinden($kh = 0.5$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri	65
Çizelge 4. 6. deprem etkisinden($kh = 0.5$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin gücü değerleri	66

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, zeminin taşıma kapasitesi yeterli olmayabilir. Böyle bir durumda, zeminin kapasitesini artırmak ve beklenen oturmaları azaltmak için zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir. Temel zeminlerinin problemlili olması durumunda ise en çok tercih edilen çözüm derin temel sistemi (kazıklı temeller) seçilerek temel sisteminin çözülmesidir. Yapının yüzeysel temellerle taşıyamamasına karar verildiğinde, yetersiz olan zemin tabakalarının iyileştirilmesi ya da derin kazık yapılması tercih edilebilir. Zemin iyileştirme yöntemlerinin ve kazıklı temellerin kullanılması maliyeti arttırdığından son yıllarda gelişen makine teknolojisi ve mühendislik uygulamaları problemlili zeminlerde yeni çözümlerin bulunması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Zemin iyileştirmelerinde temel amaç, statik ve dinamik yükler altındaki zeminin boşluk oranının katkı maddesi ilave edilmesi ya da mekanik araçlarla sıkıştırılarak azaltılması ve üzerindeki yapıyı güvenli bir şekilde taşıyabilecek duruma getirilmesi, konsolidasyonu hızlandırıp toplam oturma azaltılması, zeminin sıvılaşma riskinin azaltılması, dolgu ve şevlerin duyarlılığının sağlanmasıdır. 1970'li yıllardan beri üretilen birçok yeni yöntemle problemlili zeminler iyileştirilerek, zemindeki oturma problemi ortadan kaldırılmakta, taşıma kapasitesi artırılmakta ve depremlere dayanıklılık artmaktadır.

Darbeli Kırmataş yöntemi ilk olarak 1980'li yıllarında Dr. Nathaniel Fox tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem temellerin altındaki oturmalar uygun seviyede indirilmesi için kullanılacak bir teknoloji sağlamak amacıyla icat edilmiştir. Sistem, 1989 yılında ticari bina inşaatına sokulmuştur. Türkiye de ise 2005 yılından beri zemin iyileştirme yöntemi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Darbeli kırmataş kolonlar genel olarak zeminin yerini alarak düşey darbeleme enerjisi ile kırmataşın sıkıştırılması işlemine dayanan bir yöntemdir. Gevşek ve yumuşak zeminlerinin güçlendirilmesinde oldukça ekonomik bir çözümü sunması ile bu yöntem diğer yöntemleriyle kıyaslandığında %20 ile %50 arasında maliyet tasarrufu avantajı sağlamaktadır.

1989'den günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda darbeli kırmataş kolonların statik yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Sismik yükler altındaki davranışların çalışmalar sayısı diğer çalışmalara göre daha azdır. Özellikler deprem tehlikesi olan bölgelerde uygulanan darbeli kırmataş kolonların dinamik yükler altındaki oturmaların ve taşıma gücü kayıplarının incelemesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle Plaxis 2D sonlu elemanlar programı için giriş parametreleri belirlenmiş zemine, farklı boylarve farklı aralıklarda Darbeli Kırmataş Kolonlar eklenerek program yardımıyla model oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller farklı deprem yükleri (psedo-statik katsayı (kh) yardımıyla) uygulanarak analiz edilmişve yapılan analizler sonucunda, Darbeli Kırmataş Kolonlarının deprem yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Bütün analizlerde deprem yükü (psedo-statik katsayı (kh) arttıkka) etkisinin zeminin taşıma gücü değerine, düşey (oturma) ve yatay deplasman değerlerine etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Literatür özeti

Darbeli kırmataş kolonları ile ilgili 1989'den günümüze kadar farklı bölgelerde farklı araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar, yetersiz zeminin kısa kolonlarla güçlendirilmesi (Lawton vd, 1994), zemin kayma mukavemetin artışı (Fox vd, 1998), temeller güçlendirilmesi için kısa kolonlar kullanarak tasarım ve analizi (Wissmann vd, 2000), deprem sırasındaki betonarme temellerin performansı (Lawton, 2000), yüzeysel temel sistemlerinin yanal yüklere maruz kaldığında davranışları (Wissmann, 2001), yüzen temellerin tasarımı (Lien ve Fox, 2002), yumuşak zeminler üzerindeki karayolu dolguları kolonlar ile güçlendirilmesi (Lien vd, 2003) ve kil zeminin sıkıştırılması ve güçlendirilmesi (Lillis vd, 2004) gibidarbeli kırmataş kolonlar ilgili çalışmalar yapmışlardır.

Lawton vd (1994), kısa darbeli kırmataş kolonları temel altında yerleştirerek oturmaların kontrolü hakkında bir çalışma yapmışlardır.

Wissmann vd (2002), Darbeli kırmataş kolonlar kullanarak oturmalar ve genel stabilite kontrolü yönünde bir çalışma yapmışlardır. Darbeli kırmataş kolonları, tasarım parametreleri belirlemek için arazi ve laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Kolonlarda kullanılan agrega elemanlarının yüksek kayma dayanımı zeminlerin kayma direncini artırmakta ve bunun sonucunda göçmeye karşı iyileştirme sağlamaktadır. Arazide imalatı sırasında meydana gelen yanal gerilme artışları nedeniyle kolonların sağladığı rijitlikle oluşturulan kompozit malzemelerin rijitlikliği artmakta ve oturmalar azalmaktadır. Kolonların yumuşak kil zeminin üzerinde inşa edilerek kolon çaplı, aralıklı ve boyunu 0.76m, 1.8m ve 5.5m kullanılmışlardır. İnşaat sonrasında iyileştirme yapılan zeminde oturma oranının yaklaşık ölçümlerde 2.5cm bulurken iyileştirmemiş zeminde oranla yaklaşık %10 civarında azalmaktadır.

Kwong vd (2002), heyelanların duraylılığı için darbeli kırmataş kolonlar kullanılması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır.

Allgood vd (2003), darbeli kırmataş kolonları kullanarak yumuşak organik zeminler ve turba üzerine temel oluşturmak için bir vaka çalışması yapmışlardır.

Demir (2007), Yumuşak kil ve orta katı kil tabakalarından oluşan 22m kalınlığında killi zeminin üzerine 4 m yüksekliğinde inşa edilecek dolgu altında temel

zemininin oturmalarını ve taşıma gücü açısından davranışını incelemiştir. Klasik hesap yöntemleri ve Plaxis programından kullanılarak meydana gelecek oturmalar, taşıma gücü hesapları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Klasik hesap yöntemi ve sonlu elemanlar programı kullanırken iyileştirilmemiş zemin üzerinde dolgu inşa edilmesi durumunda davranışı modellenmiş, sonra taş kolon ve geopier kolonlarla iyileştirilmiş zeminin üzerinde dolgu yapılması halinde modellenerek yük altında davranışları analiz edilmiştir.

İyileştirilmemiş zeminde meydana gelecek oturmalar, klasik hesap yöntemleri ve Plaxis yazılımında sonlu elemanlar yöntemi ile sırasıyla 23.1 cm ve 21.3cm olarak hesaplanmıştır. Taşıma gücü değerleri ise aynı sırayla 166.2 kPa ve 166.0 kPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Farklı kolon çapları kullanarak taş kolon ve geopier kolonlar ile iyileştirilmiş zemin modelleri ayrı ayrı incelenmiştir. 100cm çaplı taş kolon ile iyileştirilmiş kil zeminde meydana gelmesi beklenen toplam oturmalar, klasik yöntemlerle ve Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemi ile sırasıyla 7.4 cm ve 8.5cm olarak bulunmuştur. Taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin için nihai taşıma gücü değerleri aynı sırayla 957 kPa ve 376 kPa olarak elde edilmiştir.

Klasik hesap yöntemlerinden ve Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizlerden elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere taş kolon ile iyileştirilen zeminde meydana gelmesi beklenen oturma değerleri, iyileştirilmemiş zemine göre çok daha az olmaktadır. Benzer şekilde zeminin taşıma kapasitesi ise artmaktadır. Zeminin 100cm çaplı geopier elemanlar ile iyileştirilmesi durumu için inceleme yapıldığında ise meydana gelmesi beklenen oturma değerleri, klasik yöntemden 13.63cm ve Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemine dayalı gerçekleştirilen analizlerden 13.4cm olarak bulunmuştur. Zeminin nihai taşıma gücü değerleri ise aynı sırayla 1210 kPa ve 395kPa olarak elde edilmiştir.

Geopier kolonlarla iyileştirilen zeminde, geopier kolon boylarının taş kolon boylarına göre daha kısa olmasına rağmen, taşıma gücünde artış sağlanmıştır. Yine aynı analizde Yine aynı analizde oturma değerleri ise taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminlere göre daha büyük çıkmıştır. Plaxis sonlu elemanlar programı vasıtasıyla elde edilen tüm taşıma gücü değerleri klasik yöntemlerle bulunanlara göre daha düşük çıkmaktadır. Sonuç olarak, klasik yöntemlere göre yapılan çözümler sonucunda iyileştirilmemiş zeminlerde meydana gelmesi beklenen oturma değerleri ile taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminde meydana gelmesi beklenen oturma değerleri karşılaştırıldığında, kolon çaplarına bağlı olarak %66 ile %68 arasında iyileşme elde

edilmektedir. Geopier elemanlar ile yapılan iyileştirme sonucunda ise aynı değerler %36 ile %41 arasında elde etmektedir. Plaxis programında sonlu elemanlar yöntemine dayalı analizlerden elde edilen değerlere göre oturma değerlerinde meydana gelen iyileştirme miktarları taş kolonlarla iyileştirildiğinde %57 ile %60, geopier elemanlarla iyileştirildiğinde ise %34 ile %37 arasında değişmektedir. Bu çalışma neticesinde, Geopier elemanların kısa olması ve uygulama yönteminin hızlı olması, ayrıca elde edilen taşıma gücü artışı bakımından da taş kolonlara yakın değerler vermesi geopier elemanları daha tercih edilebilir kılmaktadır sonucuna ulaşılmıştır (Demir, 2007).

David vd (2007), yapmış oldukları çalışmada 0.46 m derinliği, 2.29 m genişliği olan iki kare betonarme temel üzerinde tam ölçekli arazi yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Her temelin altına boyları farklı olan dört adet darbeli kırmataş kolon yerleştirilerek, kolon üzerindeki gerilme yoğunluğu, grup etkisi oturma, temel rijitliğini ve gerilmenin derinlikle değişimini yorumlamışlardır.

Daha kısa boya sahip kolonlarda yüksek basınç altında meydana gelen deformasyonlar, uzun boya sahip olan kolonlara göre daha az çıkmaktadır. Gerilme yoğunluğu oranı, yüksek basınçla yüklendiğinde 4'ten 5'e kadar artmakta, daha sonra ise azalmaktadır. Grup taş kolonların davranışları karşılaştırıldığında, yük-oturma grafiği 820kN'ye kadar aynı, 820 kN'den sonra daha fazla yük uygulandığında kısa kolonların uzun kolonlarına göre daha az rijitlik gösterdiğini göstermektedir.

Mohammed ve Towhata. (2010), yumuşak zeminlerde taşıma gücünün artırılması ve oturmaların azaltılması için günümüzde kullanılan darbeli kırmataş kolonların davranışları hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda DKK tarafından desteklenen yapıların performansının zemin matrisi ile kolonların rijitliğine ve kayma mukavemetine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu çalışmada yük-oturma grafiği üzerinden darbeli kırmataş kolon ve geogrid ile güçlendirilmiş darbeli kırmataş kolon deneysel olarak incelenmişlerdir. Sonuç olarak;

- Darbeli kırmataş kolonların geogrid ile güçlendirildiğinde taşıma kapasitesi gevşek kumlarda yaklaşık 2.27 kat, orta yoğun kumda 5.32, yoğun kumda ise 2.97 kat arttığı ortaya konmuştur ve bu durumun maliyet bakımından ciddi tasarruf sağladığı görülmüştür.
- Geogrid ile kaplanmış olan darbeli kırmataş kolonların oturma performansının kaplanmamış kolonlara göre gevşek kumda %66, orta yoğun kumda %78 ve yoğun kumda %64 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

- Güçlendirilmiş olan kolonların rijitlik modülünün, gevşek kumda yaklaşık %172, orta yoğun kumda %140 ve yoğun kumda ise %197 arttığı görülmüştür.
- Geogrid ile kaplanmış olan darbeli kırmataş kolonların imalat sırasında az agrega miktarı ve daha az sıkıştırma enerjisi ile diğer yöntemlerden daha düşük maliyet tasarrufu sağladığı ortaya konmuştur.
- Bu kolonların imalat sırasında çevre ve komşu yapılara zarar verici bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- Bu temel sisteminin kullanılmasının başta gevşek ve orta sıkı kumlar olmak üzere tüm kumlarda kullanımı uygun görülmüştür.

Thompson vd (2010), Plaxis 2D programını kullanarak darbeli kırmataş kolonların sayısal modellenmesi hakkında yaptıkları çalışmada, darbeli kırmataş kolonların modelleme yöntemlerinin, yük-yer değiştirme tepkisi ve malzeme gerilme tahminlerini modelde nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Belirlenmiş boşluk duvar yer değiştirmesi ve volumetrik gerilme modelleme yöntemleri kullanılmışlardır. Sonuç olarak volumetrik gerilme yöntemine dayanarak kolonlar yüklemesinin başlangıcındaki ortalama efektif gerilme, ön tanımlı deplasman yönteminden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Kurt (2011), Kırklareli ili, Lüleburgaz ilçesi, Sarımsaklı bölgesinde yapılan sondaj ve CPT çalışmalarının ardından saha zeminini iyileştirmek maksadıyla dört adedi darbeli kırmataş kolon ve dört adedi taş kolon olmak üzere toplam sekiz adet kolon sistemi imal edilmesi hakkında bir çalışma yapmıştır. On üç farklı tipte imalat yöntemi kullanılarak 50 cm çapında ve 6.50 m boyunda imal edilen bu kolonlara yükleme testi uygulanmıştır. Yükleme testinden elde edilen sonuçlar ile Plaxis 2D programında modellenen aynı kolonların analizinden elde edilen sonuçları kıyaslayarak yük altındaki oturmalar, kolon taşıma kapasitesi ve kolon rijitlik modülü parametreleri belirlenmiştir.

Tüm analizler, SP (Impact yöntemi ile imal edilen darbeli kırmataş kolon elemanı), SPD (öteleme yöntemiyle imal edilen taş kolon elemanı) ve SPR (ön delgi yöntemi ile imal edilen taş kolon elemanı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Arazide yükleme testi için 50 cm çaplı, 6.5 m boyunda imal edilen kolonlara 8 ton yük uygulandığında bulunan rijitlik değerleri, impact yöntemi ile imal edilmiş darbeli kırmataş kolon elemanı için (88-190 MN/m³), öteleme yöntemi ile imal edilen taş kolon elemanı için (10-40 MN/m³) ve ön delgi yöntemi ile imal edilen taş kolon elemanı için (10MN/m³) olarak bulunmuştur ve bu sonuçlara göre SPD rijitliğinin, SDR rijitliğine oranı yaklaşık 4 olarak elde edilmiştir. SP rijitliğinin, SPD rijitliğine oranı ise

2.2-8.8 arasında değiştiği kanıtlanmıştır. Arazi yükleme testinden elde edilen hesap sonuçlarına ve Plaxis 2D sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonuçlarına göre, SPR'de meydana gelen oturmanın, SPD'de meydana gelen oturmaya oranı 2 olarak elde edilmiştir. SPR'de meydana gelen oturmanın, SP'de meydana gelen oturmaya oranı ise 5 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak yapılan çalışma sonucunda, popüler bir zemin iyileştirme yöntemi olarak olan taş kolon elemanlarına göre, günümüz koşullarında uygulama kolaylığının yanı sıra ucuz ve oldukça rijit olan darbeli kırmataş kolon elemanlarının, taşıma kapasitesi ve oturma yönünden etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu arazide yapılan yükleme testi sonuçları ile kanıtlanmıştır.

Akyüzoğlu (2011), Afyon ilinde yapılan üst geçit köprüsü temel zemininin iyileştirilmesi için uygulanan darbeli kırmataş kolonların kapasite ve deformasyon davranışını incelemişlerdir. Temel altına 8-16m boylarında ve 1.7x1.7m ile 1.0x1.0m arasında değişen kare ve 50cm çaplı darbeli kırmataş kolonlar uygulamışlardır. DKK'leri tasarım yükünün %150'si kadar yükleyerek, mevcut teorik analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile sekiz adet yükleme deneyi gerçekleştirerek bu deneylerden elde edilen sonuçları değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak 8 ton ile 13.5 ton arasında yüklenen darbeli kırmataş kolonların üzerinde ölçülen deformasyon değerlerinin 9mm'den az olduğu ve zeminin rijitlik modülünü arttığını ortaya koymuşlardır.

Demir (2011), kırmataş kolon makinesi geliştirilerek laboratuvar ortamında bir darbeli kırmataş kolonu fiziksel olarak üretmiştir ve üretilen darbeli kırmataş kolonu farklı malzeme parametreleri kullanarak Plaxis 2D sonlu elemanlar programında modellemiş ve model üzerinde gerçekleştirdiği sayısal analizlerle zemin davranışın incelenmiştir. On üç farklı analiz yaparak, meydana gelen gerilme - Şekil değer'iştirme oranı ile hacimsel sıkışma oranları ve yanal toprak basıncında meydana gelen değer'işimi belirlemiştir. Yaptığı çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Poisson oranının değer i düşük ($<0,2$) alındığında kayma mukavemeti açısı arttığıca yanal toprak basıncı azalmaktadır.
- Poisson oranının değerleri yüksek ($>0,35$) alındığında yine kayma mukavemeti açısı arttığıca yanal toprak basıncı artmaktadır.
- DKK imalatı sırasında oluşan hacim artışı nedeniyle yanal toprak basıncı katsayısı artmaktadır.

- DKK'de, yükleme deneyinde elde edilen yük - yer değiştirme grafiği ile Plaxis 2D sonlu elemanlar programından elde edilen aynı grafik karşılaştırıldığında; yükleme deneyinde %5 civarında bir hacim artışı görülmüştür.

M.Halabian vd (2012),zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan darbeli kırmataş kolonların tekil ve grup halindeki davranışlarını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Bu çalışmada, temelleri destekleyen darbeli kırmataş kolonlarda kolon ve zemin etkileşimini anlayabilmek için Mohr-Coulomb ve plastisite (cap plasticity) modelleri kullanarak sayısal analizler yapmışlardır. Plastisite (cap plasticity) modeli, jeoteknik uygulamaların sonlu elemanlar ile modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve üç bölümden oluşur. Bunlar; a) shear failure surface (FS), b)elliptical cap (FC) ve c) transition region (ft). Sonuç olarak problemler zeminlere uygulanan darbeli kırmataş kolonların tekil ve grup olarak analizleri gerçekleştirildiğinde, her biri için kritik bir uzunluk olduğu görülmüştür ve izole edilmiş bir kolonun kritik uzunluğunun aynı koşullarda grup kolonların kritik uzunluğundan daha fazla olduğunu görülmüştür.

Kuruoğlu vd (2013), temel altına darbeli kırmataş kolonlar yerleştirilerek, farklı elastisite modülü (36mPa ile 72 mPa), farklı kohezyon (20kPa ile 30kPa), farklı boyutlar(2.4m ila 4.8m) ve farklı alan oranı (0.087 ila 0.34) kullanarak temel altındaki oturmaların ve iyileştirme faktörünün tahmin edilmesi hakkında bir çalışma yapmışlardır. Tam ölçekli yük testlerinin sonuçları ile kalibre edilmiş, basitleştirilmiş bir 3D sonlu eleman modeli (Kompozit Zemin Modeli) geliştirilmiştir.

Oturma iyileştirme faktörünün kolon modülü ve temel basıncı alan oranı arttıkça arttığı,. diğer yandan göçme mukavemeti, sıkıştırılabilir kilin kalınlığı ve temel büyüklüğü arttıkça ise azaldığı gözlenmiştir.

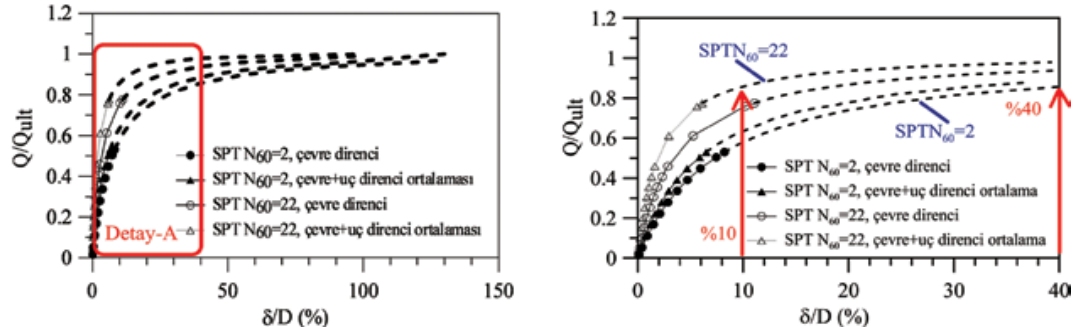
Beşler (2013), Plaxis 3D sonlu elemanlar programında gerçekleştirdiği analizlerden ve arazi yükleme deneylerinden elde ettiği sonuçları kullanarak, darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş zemin tabakalarında yük altında oturma ve taşıma gücü değerlerindeki değişimler üzerine bir çalışma yapmıştır. İyileştirilmiş zeminlerin taşıma gücü değerleri dikkate alındığında, arazi yükleme deneylerinden elde edilen sonuçlar ile mevcut yöntemlerden tahmin edilen değerler arasında önemli farklılıklar görülmemiştir. Ancak, arazi yükleme deneyleri yerine sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla elde edilen değerler dikkate alındığında, mevcut yöntemlerle tahmin edilen elastik oturma miktarları saha ölçümlerinden farklılıklar göstermiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen oturma sonuçları, arazi yükleme deneyinden elde edilen oturma kayıtlarıyla karşılaştırıldığında, tasarım yükünün%50'sine kadar makul

değerler sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak, zayıf zeminlerin darbeli kırmataş kolon veya kolonlar ile güçlendirilmesinin, zeminin rijitliğini ve mukavemetini arttırmada oldukça etkili bir yol olduğu ortaya konmuştur.

Osman ve Hashim (2013), inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılmak durumunda kalınan ve geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olarak sunulan geopier kolonları, temellerden elde edilen deneysel sonuçlar üzerinden değerlendirmişlerdir. Deney alanına 20cm çapında ve 60cm boyunda üç adet darbeli kırmataş kolon inşa etmişlerdir. Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş doğal zeminler üzerindeki temellerin taşıma gücü ve oturmaların hesaplanabilmesi için çeşitli yaklaşık yöntemler kullanmışlardır. Sonuç olarak darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilen temellerin oturma ve taşıma gücü değerleri sırasıyla 3.2mm ve 553.86 kN/m² olarak bulunurken doğal durumdaki temellerin oturma ve taşıma gücü değerleri ise sırasıyla 11.38mm ve 212.19 kN/m² olarak elde edilmiştir. Bu çalışma, darbeli kırmataş kolonlar ile iyileştirilen zeminlerin taşıma gücü ve oturma açısından çok daha iyi bir performans ortaya koyduğunu etkin bir şekilde göstermiştir.

Kanmaz(2014),yaptığı çalışmada rijit kolonlar (taş kolonlar ve darbeli kırmataş kolonlar) için göçme mekanizmaları, yerleştirme yöntemleri ve hesap yöntemleri üzerine incelemeler yapmıştır. Darbeli kırmataş kolonların oturma değerlerini hesaplamak için bir örnek problemler verilmiş ve verilen problemde döşeme yüklerine göre kolon hesabı ve shaft uzunluğu hesaplanarak,3.7m siltli kil tabakasının altında killi zemin bulunan ve yeraltı su seviyesi yüzeyden 1.5 m derinde olan zeminde, kolonun çapı ve uzunluğu sırasıyla 0.76m, 3.0m kullanılarak oturma analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerin ardından meydana gelen oturma miktarlarının azaldığı görülmüştür.

Çetin vd (2015), farklı bölgelerde inşa edilen 63 adet darbeli kırmataş kolonun kapasite performansı ve deformasyon temelli tasarımı üzerinde durmuşlardır. Darbeli kırmataş kolonların arazi yükleme testlerinin sonuçları, ağırlıklı ortalama yöntemi ile belirlenen temsili SPT N60 değerlerinin bir fonksiyonu olarak normalize edilen yük karşılık ile nihai taşıma gücü, mobilize karşı oturma grafikleri elde edilmiş ve ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:



Şekil 2. 1. Normalize Edilen Yük - Oturma Grafiği

- çok yumuşak ($N_{60} = 2-5$ darbe/30 cm) killer için çeper sürtünme direncinin DKK çapının % 40'ı mertebelerindeki deplasmanlarda mobilize olduğu, benzer olarak görece daha sert ($N_{60} = 20-25$ darbe/30 cm) killer için ise bu deplasman değerinin % 10 mertebelerinde olduğu görülmüştür
- çapla normalize edilmiş deplasman değerinin % 2-5 mertebelerine ulaştığı durumlarda kapasitenin % 30-50 mertebelerinde mobilize olduğu ve oturma davranışının doğrusal elastik şekilde bu mertebelere ulaştığı anlaşılmıştır.
- normalize kapasite mobilizasyon davranışının foraj ile teşkil edilmiş beton kazıkların davranışına kıyasla daha sünek olduğu belirlenmiştir.

Öner vd (2016), yaptıkları çalışmada 60cm çapında jet enjeksiyonu, 60cm çapında derin karıştırma, 40cm çapında donatısız beton kolon ve 50cm çapında çimentolu impact darbeleri kırmataş kolondan oluşan 18 adet rijit kolon imal etmişlerdir. Yapılan çalışma, boyları 15m olacak şekilde imal edilen kolonlar üzerinde yapılan arazi yükleme deneyi sonuçları üzerinden yürütülmüştür. Sonuç olarak normalize oturma/çap (S/D) yüzdesi ve yük/D grafiği karşılaştırıldığında farklı yöntemlerle imal edilen kolonlardan en yüksek kapasiteye sahip olan ve en rijit davranış gösteren derin karıştırma metodu ve forajsız donatısız beton kolonlardır. Diğer yandan benzer şekilde Impact darbeleri kırmataş kolonlar da yakın kapasite ve rijitlik göstermiştir. Bu sonuçlara göre en düşük rijitlik performansı ve kapasite gösteren ise Jet Grout kolonlarıdır.

Çetin vd (2017), darbeleri kırmataş kolonlar ile iyileştirilmiş liman sahasında saha yükleme deneyinde elde edilen veriler ile oturma davranışı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bölgede, sivilaşmaya karşı homojen bir tabakanın oluşturulması ve sismik yükler altında oturma miktarlarının azaltılması hedefi ile 6-18m boylarında ve 1.5-2m arasında aralıklarda kare yerleşimli darbeleri kırmataş kolon imalatı yapılmıştır. ön tasarım aşamasında seçilen parametreler kullanılarak aynı boyutlardaki deneme dolgusu 3 boyutlu olarak RocScience Settle 3D yazılımı kullanılarak modellenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, saha oturma ölçümleri ile sayısal modelleme sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu ve iyileştirme sonrası beklenen oturma miktarlarının proje kriterleri doğrultusunda beklenildiği gibi gerçekleşeceği sonucuna varılmıştır.

4.1. Zemin İyileştirme Yöntemleri

İnşaat mühendisliği uygulamalarında, zeminin taşıma kapasitesi yeterli olmayabilir. Böyle bir durumda, zeminin kapasitesini artırmak ve beklenen oturmaları azaltmak için zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir. Zemin iyileştirme yapıldığında, zeminin sıvılaşma potansiyeli, permeabilitesi, oturmaları, konsolidasyon hızı, su geçirgenliği, şişme-büzülme potansiyeli ve sıkışabildiği azalır, kayma mukavemeti ve taşıma gücü artar sonuç olarak zemin homojen hale gelir (Nuh AI, 2018).

Zemini iyileştirmek için farklı araştırmacılar tarafından birçok yöntem geliştirilmiştir. Bazı yöntemleri, zemin türüne göre, bazılarını zemin içinde veya üzerinde yaptığı değişikliğe göre bazılarını ise zemine katkı eklenip eklenmeyeceği durumlarına göre sınıflandırılmışlardır(Çizelge 2.1, 2.2).

Çizelge 2. 1. Zemin iyileştirme metotları ve kullanım amaçları (geopier found 2009)

Yöntem	Zemin türü			İyileştirme amaç							
	Kum	Silt	Kil	Taşıma gücü	Sıkılaştırma	Oturma kontrolü	Çevresel	Ekonomi	Hızlı işlem	Sıvılaşma	Azaltılmış geçirgenlik
Dinamik kompaksiyon	✓				✓			✓	✓		
Taş kolon TK		✓	✓	✓	✓	✓				✓	
DKK		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Ön yükleme		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
Düşey drenler		✓	✓			✓	✓				

Çizelge 2. 2. (devam)

Zemin soğutma (Doğrudan yöntem)	✓	✓	✓	✓			✓		✓
Zemin soğutma (Dolaylı yöntem)	✓	✓	✓	✓				✓	✓
geosentetikler	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓

Çizelge 2.2. Zeminde Katkı Eklenip Eklenemeyeceği Göre Sınıflandırılması (Chu Ve Vd 2009)

A. İri Daneli Zemin Ve Dolguda Katkısız	B. İnce Daneli Zeminde Katkısız	C. Katkılı Ve Cisim Eklemeli	D. İçitim Tipi Katkılı	E. Donatılandırma
A1.Dinamik kompsiyon	B1.Drenajlı dinamik konsolidasyon	C1.Taş kolon	D1.Daneli içitim	E1.Mekanik stabilizasyon
A2.Titreşimli kompaksiyon	B2.Önceden yüklemeli	C2.Darbeli kırmataş kolon	D2.Kimyasal enjeksiyon	E2.Geosentetikler
A3.patlatmalı sıkıştırma	B3.Emme ile önceden yüklemeli	C3.Kum kompaksiyon kazığı	D3.Karıştırma yöntemler	E3.Zemin akranları
A4.Elektrik uygulamalı sıkıştırma	B4.Yerine başka zemin koyarak	C4.Geotekstil kolonlar	D4.jet grout	E4.Çivileme
A5.Yüzeyden sıkıştırma	B5.Elektro kinetik konsolidasyon	C5.Rijit cisim yerleştirme	D5.Sıkıştırma enjeksiyonu	E5.Biyolojik yöntemler
	B6.İsıl işlemlerle	C6.kazıklı dolgular	D6.Telafi enjeksiyonu	
	B7.Suda patlatma ile sıkıştırma	C7.Bakteriyel yöntemler		

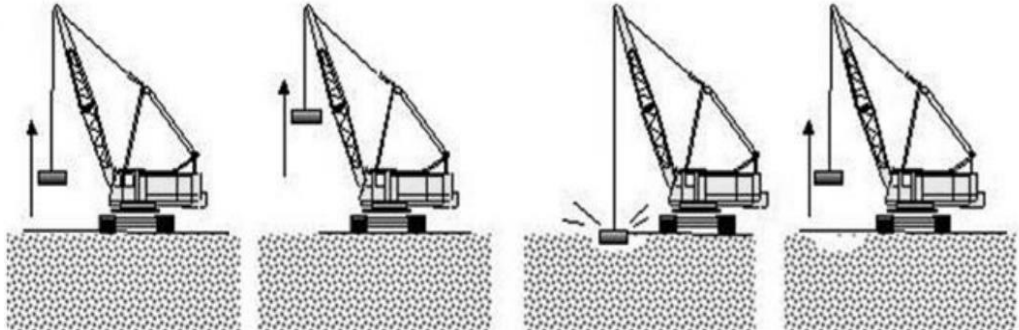
Son yıllarda Dünyada ve Ülkemiz'de yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri şu şekilde sıralanabilir.

- Dinamik Kompaksiyon (Ağırlık Düşürme)
- Titreşimli (vibro) kompaksiyon
- Ön Yükleme ve düşey Drenler
- Jet Grout
- Patlatma
- Forekazıklar
- Taş kolon
- Darbeli Kırmataş kolonlar
- Geotekstil ve Geosentetik

Yukarıda bahsedilen zemin iyileştirme yöntemlerinden bazıları sadece tek bir zemin için uygulanırken, bazıları ise birçok zemin için uygulanabilir.

2.2.1 . Dinamik kompaksiyon (Ağırlık düşürme)

Dinamik yöntem, gevşek ve suya doymun olmayan veya kontrolsüz zeminlerin sıkıştırılması için uygun maliyetli ve verimli bir yöntemdir. Genellikle yüksek enerji ile 10-40 metre yükseklikten 15 ila 40 ton ağırlığındaki büyük çelik ağırlığın serbest düşmeye bırakıldığı bir yöntemdir. Bu yöntem ilk olarak 1960'larda Fransa'da Mr.Louis Menard tarafından bulunan ve geliştirilen bir yöntemdir. Kullanılan vinçlerin ağırlığı projeye kriterlerine göre 80 ton ile 120 ton arasında değişmekte olup bir veya birkaç vuruşla zeminde farklı oturmalar azaltması ve sıkıştırması sağlanmaktadır.



Şekil 2. 2. Dinamik Kompaksiyon Yöntemi. (Larisch Ve Pervan 2017)

Bu yöntem uygulanırken zeminde vuruşlarla oluşan dalgaların yayılması deprem sakıncaları gibi çevrede mevcut yapıların çatlamalarından oturmalara kadar değişen yapısal hasarlar vermektedir. Bu yüzden uygulama sahasında yapıların olması durumunda uygulanamamaktadır. Genelde, liman, havaalanı platformları ve ağır depolama tesisleri (silolar) gibi büyük alanlarda uygulanmaktadır.

Sıkıştırma etkisinin derinlikle azalması aşağıdaki formüllerden doğru biçimde hesaplanabilir.

$$f(z) = \frac{f_2 - f_1}{Dz} (z - DZY)^2 \quad (2.1)$$

Burada;

$f(z)$: z Derinlikte İyileştirme Oranı

f_1 : Yüzeyde Maksimum İyileştirme Oranı (Boyutsuz) $\approx 0.008E$

E: Uygulanan Enerji (tm/m^2)

f_2 : Sağlanabilecek En Büyük İyileştirme Oranı

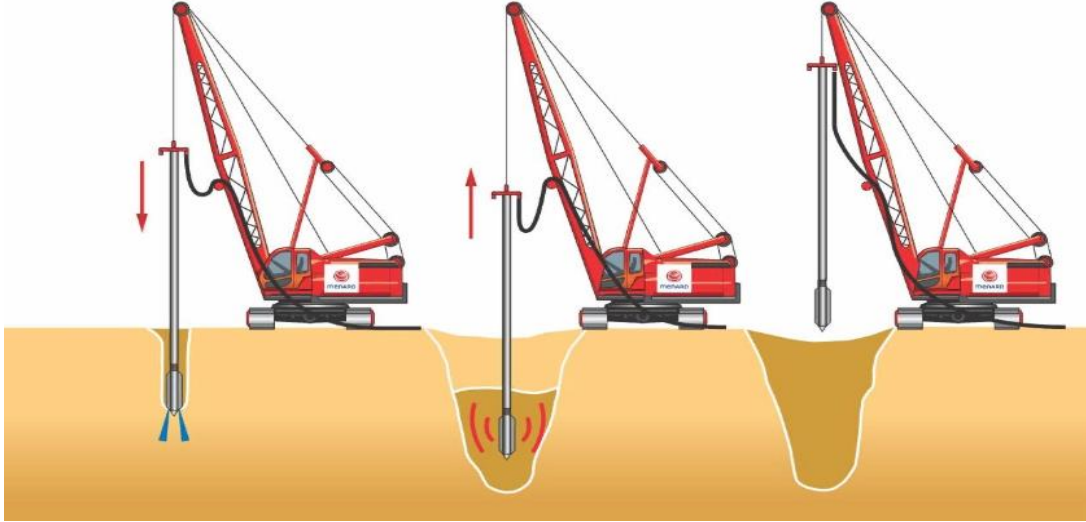
DZY: Doğal Zemin Yüzeyi Kotu

D: Dinamik Konsolidasyon İyileştirme Derinliği

2.2.2. Titreşimli (Vibro) kompaksiyon

Vibrokompaksiyon veya vibroflotasyon sistemi, gevşek ve kumlu zeminleri sıkıştıran ve zemin özelliklerini daha yoğun bir şekilde istenilen derinlikte yeniden düzenleyen bir tekniktir. İlk olarak 1934 yılında kullanılmaya başlayan, Hong Kong daki Chek Lap Kok havaalanı geniş alanda zeminin sıkıştırması için kullandıktan sonra popülerlik kazanmıştır. Bu yöntemde doğrudan iyileştirme yapılacak zeminin kum bakımından zengin olması gerekir. Çünkü ince taneli zeminlerde sıkıştırma yaparken titreşim etkisini absorbe edeceği için uygun bir sistem değildir.

Bu yöntemde uygulama yapılacak zemin içerisine vibratör ve su veya hava yardımıyla düşey olarak indirilip vibratörün alt uç kısımdaki jet aktif edilerek su veya havanın yüksek basınçlarla çıkması sağlanır. Zemine uygulandıktan sonra, zeminin boşluk oranı azalır, çevre basınç artar, sürtünme açısı ve rijitliği de artar. Dinamik kompaksiyon yöntemi çevredeki yapılar varken güvenli bir şekilde uygulanabilir.



Şekil 2. 3.Vibrokompaksiyon Yöntemi (Menard)

2.2.3 . Ön yükleme ve düşey drenler

Suya doymuş yumuşak kil zeminler düşük taşıma gücü ve büyük konsolidasyon oturmaları sebebiyle yapıların inşası için uygun olmayabilir. Bu tür zeminlerde yapı inşa edilmeden önce zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve konsolidasyon oturmalarını en az indirebilmek için ön yükleme yapılabilir. Genellikle yapı yüküne eşdeğer geçici bir toprak dolgu inşa edilir. Ve belli bir süre bekledikten sonra kaldırılır. Bu sayede zeminin boşluk oranı, su içeriği azaltılmış olup kayma dayanımı artırılmış ve ön konsolidasyon oturması sağlanmış olur.

Ön yükleme yapılırken bekleme sürenin kısaltılması ve oturmaların daha da hızlandırılması için düşey drenlerle (geosentetik dren veya kum dren) birlikte uygulanması önerilmektedir.

2.2.4 . Jet grout

Jet grout sistemi, yüksek kinetik enerji ile iyileştirilmesi planlanan zemine hızla enjekte edilerek zeminin doğal yapısını parçalayıp gevşetmek ve parçalanmış zeminin yerinde çimento şerbeti kullanarak yeni malzeme (kolon) oluşturulmaktadır. Bu yöntem ilk olarak 1970'li yıllarda Japonlar tarafından kullanmaya başlanmış ve, sonra aynı yıllarda İtalya'da ve Avrupa ülkelerinde de uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizde ise 1986 yılında uygulamaya başlanmıştır.

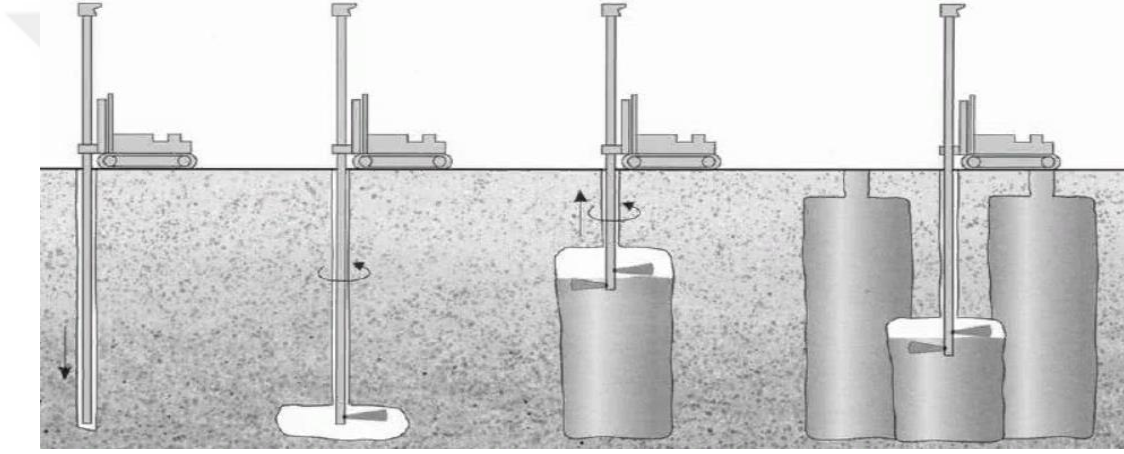
Jet grout yöntemi geniş bir alanda ve farklı tip zeminlerde uygulanabilmektedir. Bu uygulamalarda jet grout kolonu 3 ayrı yöntem (jet1, jet2 ve jet3) ile yapılabilir.

Jet1: bu yöntemde çimento ile su karıştırılarak yüksek basınçlı enjeksiyon doğrudan zemin içerisinde uygulanarak kolon teşkili ile elde edilir.

Jet2: bu yöntemde su-çimento yüksek basınçlı ve hava jeti yardımıyla doğrudan zemin içerisine uygulanarak kolon teşkili ile elde edilir.

Jet3: bu yöntemde su ve hava aynı kanaldan, su-çimento ayrı kanaldan farklı basınçlarla zemine basılır.

Jet1 sisteminde kolon çapı küçük çapta elde edilmesinden dolayı jet2 ve jet3 göre dayanımı daha yüksektir. Bu yüzden en çok kullanılan yöntemdir.



Şekil 2. 4. Jet Grout Yöntem İmalatı (Hayward 2015)

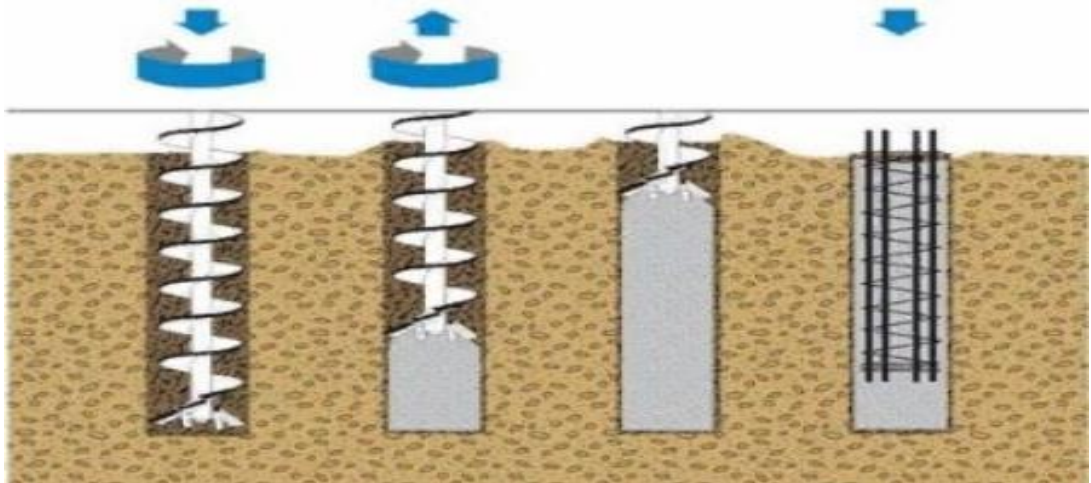
2.2.5 . Patlatma

Bu yöntem gevşek zeminler içerisinde belirli miktarda patlama yapılarak kayma ve sismik dalgaları üretmek suretiyle zeminin sıkıştırılmasına dayanan bir yöntemdir. Zeminin patlatmasından sonra zeminin boşluk oranı azalır, zemin sıkılığı da artırılmış olup, zemin mukavemeti daha sağlam hale gelmektedir. Maliyet açısından diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğundan, son zamanlarda daha fazla kullanılan bu yöntem uygulama aşamasında çok dikkat ihtiyacı olan bir yöntemdir. Yerleşim bölgelerinde uygulanmayan, en çok yollarda inşa edilirken zemin iyileştirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Ülkemizde de zemin iyileştirilmesi için kullanılmayan yöntemlerdendir.

2.2.6 . Fore kazıklar

Fore kazık yöntemi, yapıdan gelen yüklerin daha sağlam taşıma gücüne sahip olan zemine ulaştırmak ve oturmaların azaltılması için uygulanan bir yöntemdir. Çok yumuşak veya kendine tutamayan zeminlerde göçmeleri ve ekipman kayıplarını engellemek için muhafaza borusu kullanarak zemin içinde kuyu açılır ve açılan kuyuya içinde donatılar yerleştirilerek beton dökülür, kendine tutan zeminlerde ise muhafaza borusuz uygulanabilir. Bazen suya doygun zeminlerde muhafaza borusu uygulamadan bentonit ile fore kazıklar uygulanabilir. Muhafaza borusu, beton döküldükten sonra en kısa sürede çıkarılır. Fore kazık uygulamadan önce zemin etüt raporları incelenerek yer altı su seviyesi kontrol altında alınması gerekir. Beton kullanıldığı için yapım aşamada sahanın kuru kalması gerekmektedir.

Günümüz şartlarına göre uygulanan fore kazık çapları 30 cm ile 300 cm arasında değişmektedir. Bu yöntem kazıklı temellerde, deprem sırasında temeller altında oluşan hareketlerin azaltılması ve deprem sonrasında yüzey temellerde oluşan oturma sorunları önlemek için uygulanan bir yöntemdir. Toprak kayması, heyelanların önlenmesi içinde de uygulanan bir yöntemdir.



Şekil 2. 5. Fore Kazık İmalat Aşamaları (Yasın Yapı Zemin 2015)

2.2.7 . Taş kolonlar

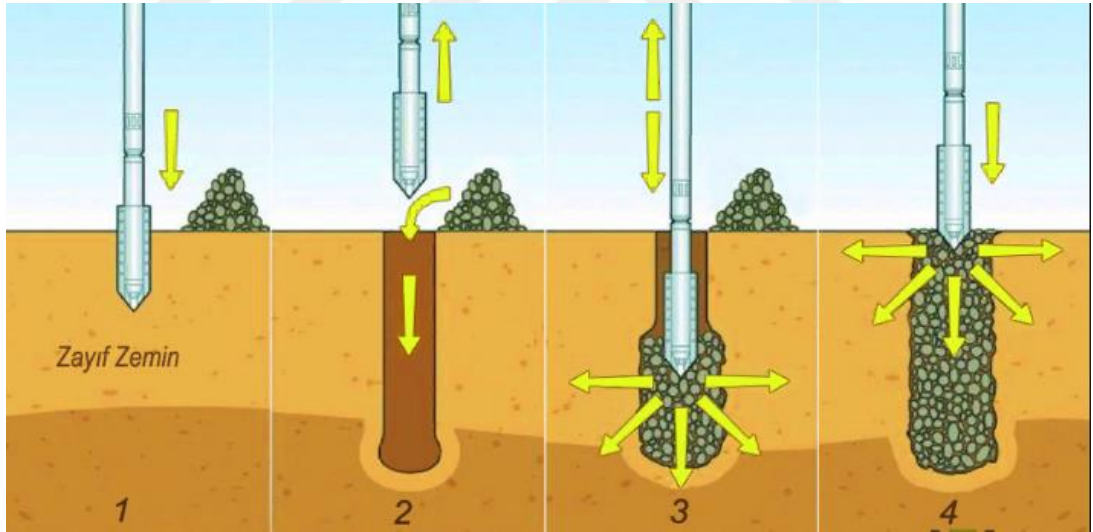
Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda başarı ile verimli sonuçlar alınan taş kolonlar gevşek zeminlerin sıkıştırılmasında ve yumuşak kohezyonlu zeminlerin güçlendirilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Taş kolonların geçmişine

baktığımızda, ilk olarak 1830'larda Fransa'da doğal zeminlerin güçlendirilmesi için kullanılmıştır. Daha sonra 1939 Almanya'da yeniden kullanılmaya başlanmıştır. Ardından 1950'de Avrupa ve 1972'de Amerika'da yaygın olarak uygulanmaya başlanmıştır.

Taş kolonlarla zemin güçlendirilmesi yapılarak, zeminin taşıma kapasitelerini arttırmak, oturmaların azaltmak, sıvılaşma potansiyelini azaltmak, dolgu ve şev stabilizesini sağlamak amaçlanır. Diğer yöntemlerine göre uygulama aşaması daha hızlı ve daha ekonomik olan taş kolonlar en verimli olarak baraj gövdelerinde, çok geniş kullanım alanlarında, dolgularda, silo, depo, tank temelleri altında ve yükleme alanlarında en çok kullanılan yerlerdir. Taş kolon uygulaması zemin koşullarına bağlı olarak iki farklı yöntemle yapılabilir.

2.2.7.1. Vibrokompaksiyon (vibroflotasyon) yöntemi

Bu yöntemde uygulama yapılacak zemin içerisine vibratör ve su veya hava yardımıyla düşey olarak indirilip vibratörün alt uç kısımdaki jet aktif edilerek su veya havanın yüksek basınçlarla çıkması sağlanır.



Şekil 2. 6. Vibro-Yerdeğiştirme imalat aşamaları (natural zemin)

2.2.7.2. Tokmaktama yöntemi

Tokmaktama yöntemi zemin içinde bir kuyu açılır ve kuyunun içerisinde kaplama borusu yerleştirilerek taş kolon malzemesi katmalar halinde doldurulur.

2.2.8. Darbeli kırmataş kolonları

2.2.8.1. Genel

Darbeli Kırmataş Kolonlar (DKK), genel olarak zeminin yerini alarak düşey darbeleme enerjisi ile kırmataşın sıkıştırılması işlemine dayanan, gevşek ve yumuşak zeminlerinin güçlendirilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Son zamanlarda diğer yöntemlerine göre daha ekonomik olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze kadar geliştirilen bu yöntemde yetersiz zeminin taşıma gücünün artırılması, zeminin kayma mukavemetin artırılması ve oturmaların uygun seviyelere indirilmesi amaçlanmaktadır (Lawton vd, 1994; Fox vd, 1998; Wissmann vd, 2000; Lawton, 2000; Wissman vd, 2001; Fox ve Lien, 2002; Lien vd, 2003; Lillis vd 2004; White vd, 2007). Darbeli Kırmataş Kolon yöntemi ile gevşek, kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması ve yumuşak kohezyonlu zeminlerin nispeten rijit kolonların oluşturulması hedeflenmektedir. Kolon imalatı sırasında kuyu içinde konulan agregaların yukarıdan darbeleme ile sıkıştırılırken taşlar alt kısımda yanıl olarak hareket etmeye zorlanır, böylece zemine sıkı bir hale getirerek zeminin rijitliği arttırmış olur ve sağlam bir temel oluşturulmaktadır (White vd, 2005; White ve Suleiman, 2006)

2.2.8.2. Yapım yöntemleri

Darbeli Kırmataş Kolonlar yapım aşamaları Fox ve Cowell (1998) tarafından şu şekilde tanımlanmıştır.

Projede belirlenmiş olan derinlik ve çaplarına göre uygun bir kazı aleti ile kuyu açılarak, kuyunun dibine kırmataş kolon malzemesi yerleştirilir ve darbe ile sıkıştırma işlemi uygulanıp 30 cm'lik bir tabaka halinde oluşturulmaktadır. Bu tabakalar tekrarlanarak yüzeye kadar yapılır ve zeminde istenilen kalınlık iyileştirmektedir.

Darbeli Kırmataş kolon sistemleri, uygulama yöntemleri açısından farklı gruplara ayrılmaktadır.

Çizelge 2. 3. DKK İmalat Aşamaları (Geopier Foundation Company, 2010)

sistem	Delgi Çapı (cm)	İmalat çapı (cm)	Darbe Tokmağı Çapı cm	Maksimum Darbe Tokmağı Uzunluğu (m)	Kolonlar aralığı
Geopier	76	76+	66	7,6	1,07
Geopier3	51-61	51- 61+	46-52	7,6	0,92
Pyramik	60	61+	15-56	7,6	0,92
impact	-	50+	36	13,7+	1,22
impactR	-	50+	31	13,7	1,22
Rampact3	-	46+	38-46	5	1,22

Darbeli Kırmataş Kolonların uygulanabileceği zeminlerin sınıflandırılması, Geopier Foundation Company tarafından 2010'da yapılmıştır.

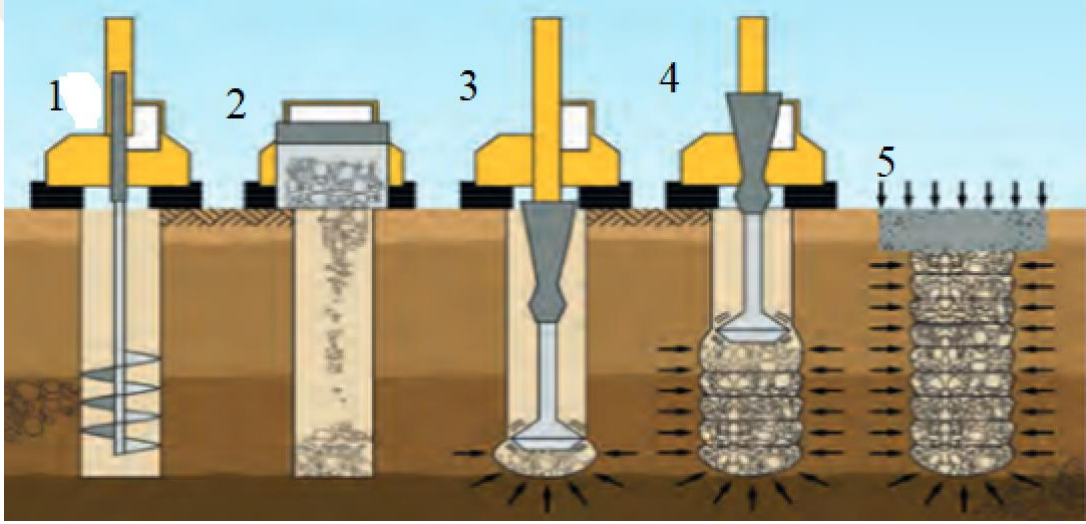
Sistem	Zemin Türü	Çakıl	Kum	Silt	Organik
Geopier					
Pyramid/ Geopier					
İmpact/ImpactR					
Rampact/Rampact3					

Şekil 2. 7.Darbeli Kırmataş Kolonları Kullanabilecek Zemin Sınıfları (Kurt, 2011)

2.2.8.2.1. Geopier sistemi (Replacement Method)

Geopier sistemi, kil, silt, organik ve değişken dolgu dahil zayıf zeminlere iyileştirmek için kullanılan yer değiştirme yöntemidir. Kolon hacmi kadar zayıf zemin çıkarılarak yerine kırmataş doldurulur.

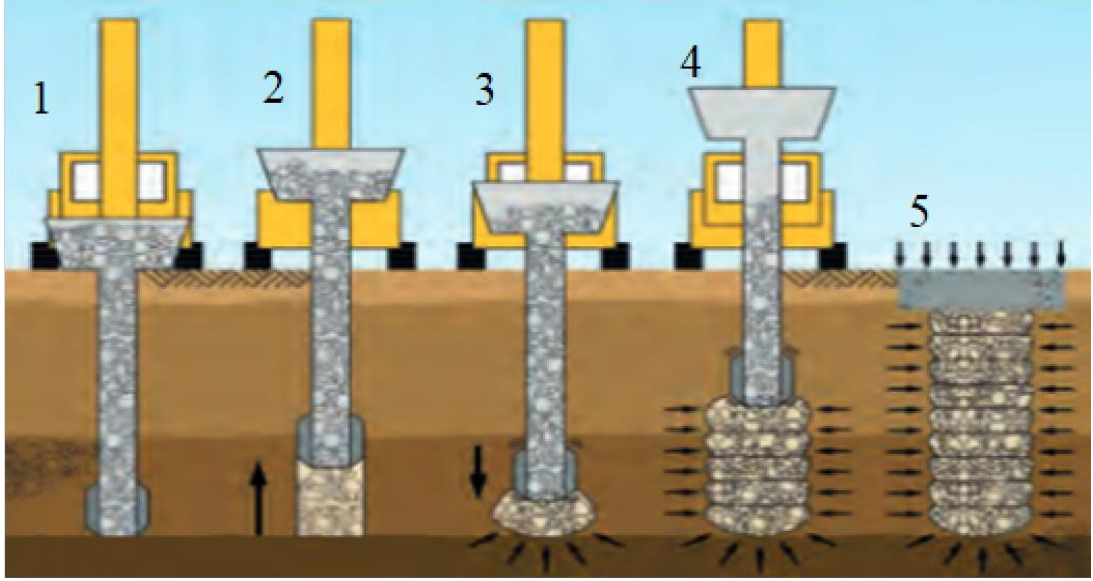
Geopier sisteminin imalatları dört aşamadan oluşmaktadır (Lawton vd 1994; wissmann vd 2000). İlk önce burguyla ile çukur açılır. Çukur derinliği tasarım ihtiyaçlarına göre 2 ile 10 metre arasında değişir(1). Açılan kuyunun içinde 46 cm kalınlığında kırmataş doldurarak pahlı tokmak ile sıkıştırma yapılır(2). 100cm yukarı 67 cm aşağı darbeleme yöntemi ile Kırmataş sıkıştırılarak ince tabakalar yapılır ve oluşan tabakalar sonucunda çevresindeki zeminin rijitliği artmış olur(3). Aynı işlemler tekrarlanarak zemin yüzeyine kadar tabakalar halinde yapılır(4).



Şekil 2. 8.Geopier Sistemi İmalat Aşamaları (Tensar İnternational Comporation, 2012)

2.2.8.2.2. Impact sistemi (Displacement Method)

İmpact sistemi, alt ucu geçici olarak kapalı olan 36 cm çaplı mandrel vibrasyonlu darbe ve itme kuvveti ile projede istenilen derinliğine kadar zemine indirilir. İçi boş olan mandrel borusu içine kırmataş malzemesi doldurulur. Mandrelin 100 cm yukarı kaldırılarak 67 cm aşağı indirilir ve 33 cm tabaka halinde sıkıştırma yapılır. Sıkıştırma hem vibratör hem de statik güç ile dinamik düşey darbeye oluşturulur ve kırmataş kuyunun etrafında doğru itilerek 36 cm olan kolon çapı 50 cm'ye genişler. Bunun sonucunda zeminin oturmaları kontrol altında alınarak zeminin taşıma kapasitesi artırılmış olur. Bu işlemler boyunca zemin dışarıya çıkarılmadığından çevre kirliliği oluşmamaktadır.



Şekil 2. 9.İmpact Sistemi İmalat Aşamaları (Tensar International Corporation, 2012)

Taş Kolon ve Darbeli Kırmataş Kolon birbirine benzer görünse de, iki yöntem arasında önemli farklılıklar vardır. Bu farklılıklar Lawton ve Fox (1994) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- Geopier kolonlarının uzunluğu kısa, genellikle genişliğinin 2 ila 8 katıdır.
- Darbe Kırmataş kolonları, zeminin kazılması veya özel olarak dizayn edilmiş mandrel zemine delinmesi ile inşa edilirken, taş kolonlar düşey ve yatay titreşimle imal edilir. Bu çevre zeminin parametrelerinde daha az değişikliğe neden olur.
- Darbe Kırmataş Kolonları, yatay titreşim yöntemi yerine düşey titreşim oluşturan, özel olarak tasarlanmış yüksek frekanslı tokmak kullanılarak yapılan yöntemdir.
- Darbe Kırmataş Kolonları, sıkıştırılması sonucunda oluşan ince kırmataş tabakaları çevredeki zeminde ve deformasyonlarda gerilmesi artmasına neden olur.
- Taş Kolonlarda kullanılan agregaları temiz olması gerekirken, Darbeli Kırmataş Kolonlarında farklı agregalar kullanılabilir.

2.2.8.3. Darbeli kırmataş kolonların özellikleri

2.2.8.3.1. Darbeli kırmataş kolon çapı

Darbe Kırmataş kolonların çapı uygulanacağı sahanın proje ve zemin özellikleri ve kullanacak imalat yöntemlerine göre değişiklik göstermektedir. Kazı yaptıktan sonra

geopier kolonlar çapı 76 cm, impact ile imal edilen kolonlar çapı 50 cm olduğunu bilinmektedir.

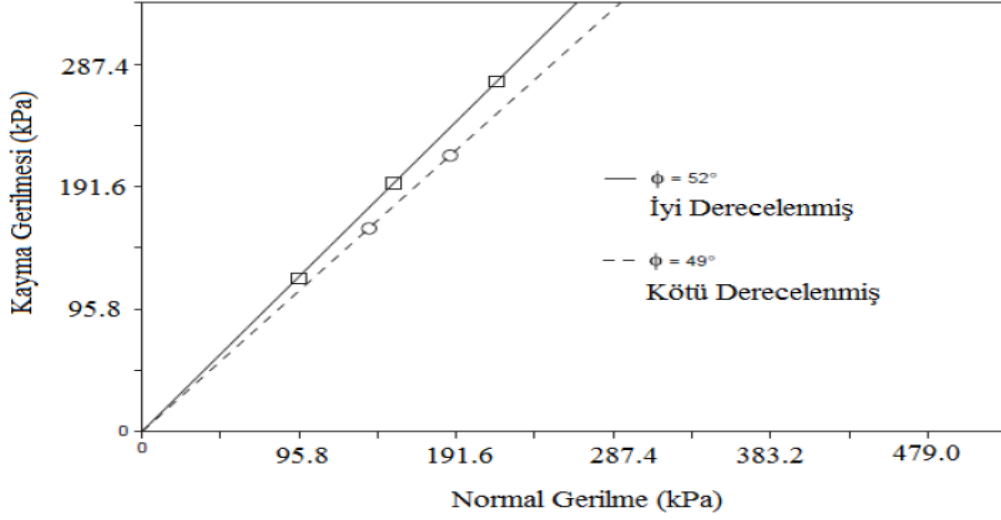
2.2.8.3.2. Darbeli kırmataş kolonlar derinliği

Genellikle taş kolonlar ile yapılan zeminin güçlendirilmesinde, sert zemine kadar ulaşması istenmektedir. Bazen sert zeminlerin çok derinlerde olduğu yada hiç bulunmadığı yerlerde Darbeli Kırmataş Kolonlar uygulanmaktadır. Diğer sistemlere göre orta derinlikte temel çözümü sunan bir yöntemdir. Geopier sistemi ile imal edilen kolonlarda kolon boyu maksimum 8m, Impact sistemi ile imalan edilenlerde ise kolon boyunun maksimum 18 m olduğu bilinmektedir.

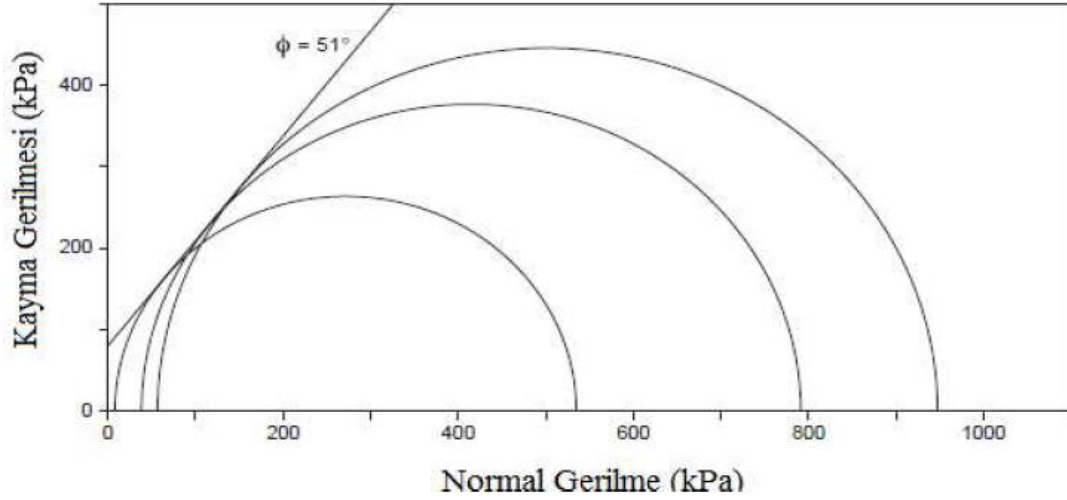
2.2.8.3.3. Darbeli kırmataş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı

Darbeli Kırmataş Kolonların temsili numuneler üzerinde arazide tam ölçekli kesme deneyleri ve laboratuvarda üç eksenli basınç deneyleri yapılarak mühendislik özelliklerini ortaya çıkarmak mümkündür. Wissmann ve diğ. (1999) Geopier kolonlarının kayma dayanımlarını, taşıma kapasitesi ve oturma kontrolü ile ilişkisi olarak analiz yapmışlardır. Arazide bitmiş çapı olan kolonların üzerinde uygulanan tam ölçekli kesme deneyi sonuçlarına göre; ince dane oranı sıfır olan malzeme ile imal edilen kolonların içsel sürtünme açısının 49° ve ince dane oranı %5-10 civarında olan malzeme ile imal edilen kolonların ise içsel sürtünme açısının 52° olduğunu bulunmuştur.

White, (2001), yaptığı çalışmada ise sıkıştırılmış Geopier kolonları üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi sonuçları göre ince dane oranı %5-10 civarında olan malzeme ile imal edilen kolonların içsel sürtünme açısının 51° olduğunu bulmuştur. Darbeli Kırmataş Kolonların imalatında kullanılan kırmataşın darbelemesi ve yüksek enerji ile sıkıştırılması sonucunda kolonların yanal olarak genişlemesi içsel sürtünme açısının yüksek çıkmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2. 10. Darbeli kırmataş kolonların üzerinde yapılan kesme deneyi sonuçları (Fox vd, 1998)



Şekil 2. 11. Darbeli kırmataş kolonları üzerinde uygulanan üç eksenli basınç deneyi (White, 2001)

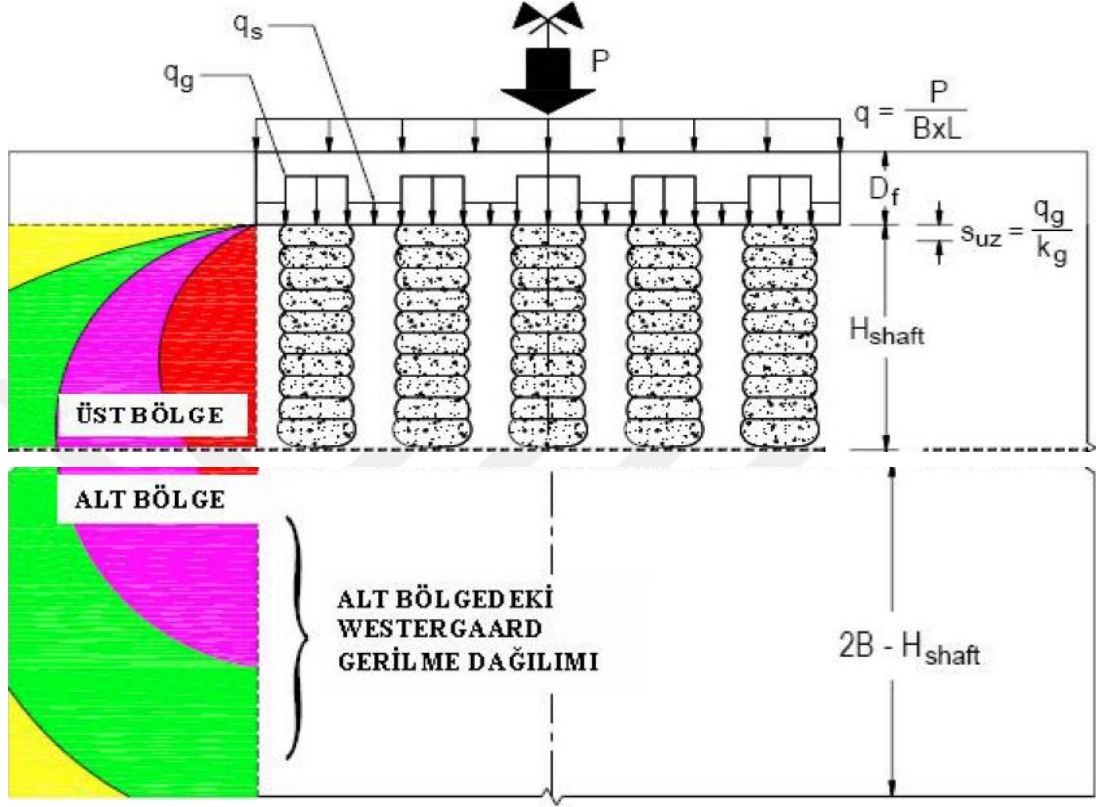
2.2.8.3.4. Darbeli kırmataş kolon agregasının dane çapı

Darbeli Kırmataş Kolon kullanılarak zemin iyileştirilmesi yapılırken, planlanan dolgu malzemesinin akma ve yükleme deneylerinden geçmesi ve bunların doğru seçimi gerekmektedir. Bugüne kadar kullanılan agreganın maksimum dane çapı 38 mm ile minimum çapı 13 mm arasında değişmektedir.

2.2.8.4. Darbeli kırmataş kolonları oturma hesabı

Darbeli Kırmataş Kolonlar kullanarak yumuşak zeminler iyileştirildiğinde karşımıza, zemin, darbeli kırmataş kolon ve temel sistemlerini içeren bir zemin yapı etkileşimi

oluşmaktadır. Geopier elemanları ile iyileştirilmiş zeminlerin oturmalarının tahmini, iyileştirmemiş zeminlerine göre daha zordur. Geopier kolonlar ile güçlendirme yapılan zeminde oturma tahminlerinde farklı yöntemler kullanılmaktadır (Fox ve Cowell, 1998).



Şekil 2. 12. Darbeli kırmataş kolonlarla desteklenmiş temeller için hesabi (Kanmaz, 2014)

Görüldüğü üzere zeminler iki tabaldan oluşur biri "üst bölge" olarak adlandırılırken diğer tabaka "alt bölge" olarak adlandırmaktadır. Üst bölge Geopier kolonlarla iyileştirme yapılan bölgedir. Üst bölgede kolon boyu (H_o), üst kalınlığı (H_{shaft}), kolon çapının (d_{shaft}) toplamı olarak adlandırılabilir.

Kolonlarla desteklenmiş temellerin toplam oturmaları aşağıdaki denklem ile açıklanmıştır.

$$S_T = S_{UZ} + S_{LZ} = S_{UZ} + S_{i,LZ} + S_{c,LZ} + S_{s,LZ} \quad (2.2)$$

Burada;

S_T : Meydana Gelebilecek Toplam Oturmayı

S_{uz} : Üst Bölgenin Ani Oturma Miktarı

S_{lz} : Alt Bölgenin Toplam Oturma Miktarı

$S_{i,Lz}$: Alt Bölgenin Ani Oturma Miktarı

$S_{c,Lz}$: Alt Bölgenin Birincil Konsolidasyon Oturması

$S_{s,Lz}$: Alt Bölgenin İkincil Konsolidasyon Oturması

Burada ikincil konsolidasyon oturması değeri daha çok küçük olduğu için ihmal edilerek formül daha basit hale getirilebilir.

2.2.8.4.1. Üst bölge oturmaları

Üst bölgenin oturması, kolonun kompozit rijitliğine ve kolon çevresinde bulunan sıkıştırılmış matris zemine bağlıdır. Meydana gelen oturma, kolon modülünün ve kolon malzemesi üzerindeki gerilme, matris zeminin modülü ve matris zemin üzerindeki gerilmelerin bir fonksiyonudur. Darbeli kırmataş kolon elemanları üzerinde gerilme konsantrasyonunun gelişmesini anlamak için bir yay modeli göstermektedir. Şekil (2.13), rijit bir temel, zemine temsil eden yumuşak yay, merkezli bir yük ve bütün yaylarda δ miktarı kadar bir çökme meydana gelmektedir.

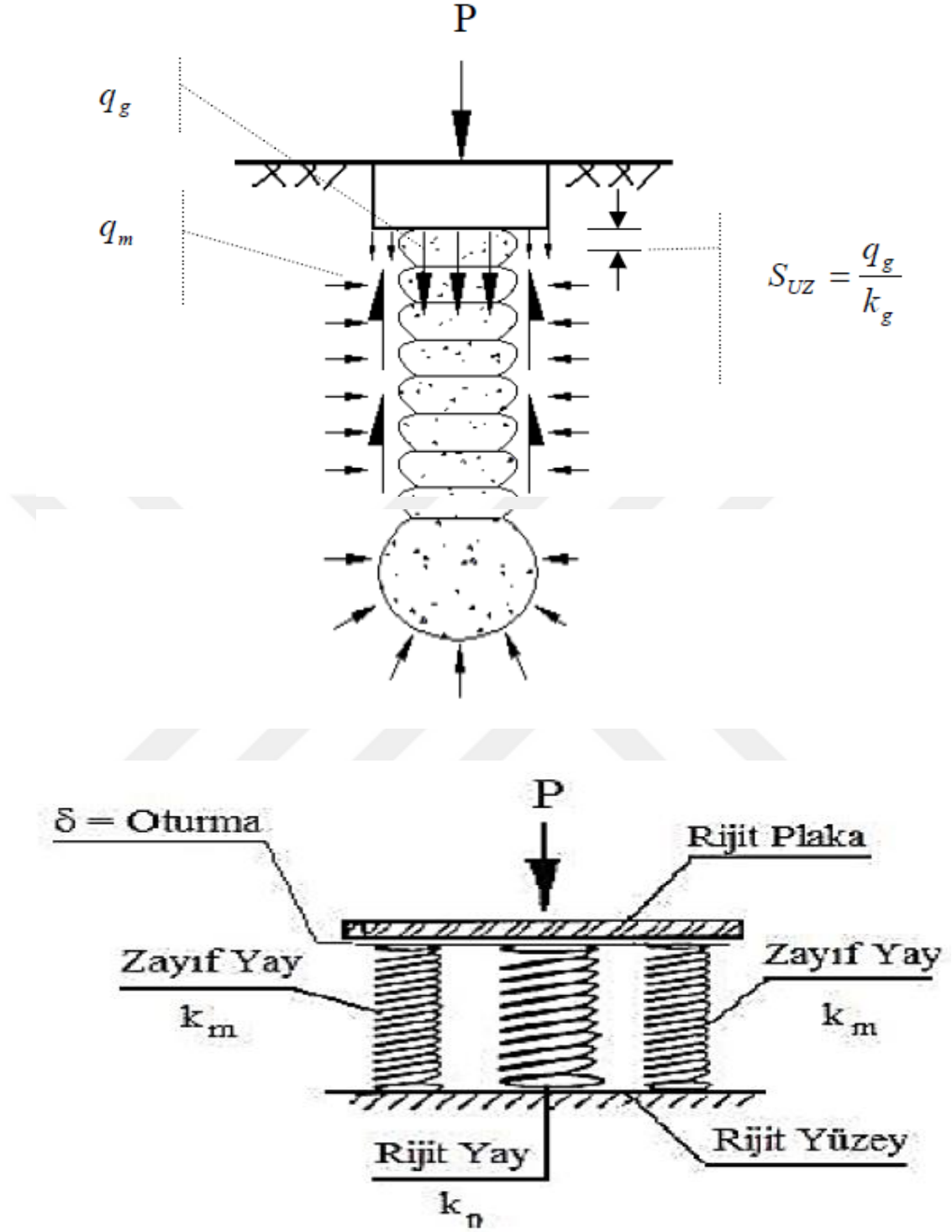
Buna göre P yükü;

$$P = -K\delta \quad (2.3)$$

k: yay sabit katsayısı

δ : çökme

olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.13. Darbeli Kırmataş Kolonlar İçin Geliştirilen Gerilme Konsantrasyonu Yay Modeli (Fox vd, 1998)

Bu nedenle, rijit yayların oluşturduğu direnç kuvveti, yumuşak yayların oluşturduğu kuvvetten daha büyük olacaktır. Darbeli kırmataş kolonlarla güçlendirilmiş sistemde, temellerin üst kısımlarında temel yükü tarafından oluşan gerilmeler (q_g), matris zemine etkileyen gerilmelerden (q_m) çok daha büyüktür. Eğer

temel tam olarak rijitlik gösterirse kolon içerisindeki oturmalar ve etrafındaki zeminin oturmaları birbirine eşit olacaktır. Bu durumda üst bölgedeki oturmalar aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_{uz} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{q_m}{k_m} \quad (2.4)$$

Burada;

K_m : Matris Zemin Rijitlik Modülü,

K_g : Darbeli Kırmataş Kolonlar Rijitlik Modülü

Olarak bilinmektedir.

Şekil 2.13'te gösterilen üst kısmı için düşey yönde toplama kuvvetleri aşağıdaki denklemi verir.

$$\sum F_V = 0 = qA - q_g A_g - q_m A_m \quad (2.5)$$

Burada;

$F_v =$ Düşey Yük,

$q =$ Temelden Gelen Ortalama Düşey Gerilme,

$A =$ Toplam Temel Alanı,

$q_g =$ Darbeli Kırmataş Kolon Üzerindeki Gerilme,

$A_g =$ Darbeli Kırmataş Kolon Alanı,

$q_m =$ Zemin Üzerindeki Gerilme,

$A_m =$ Zemin Alanı,

olarak tanımlanmaktadır. Bu denklem kullanarak darbeli kırmataş kolon ve zemindeki toplam düşey gerilmeler;

$$q_g = \frac{q \cdot n_s}{R_a(n_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (2.6)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(n_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (2.7)$$

$$R_a = \frac{A_g}{A} \quad (2.8)$$

$$R_s = \frac{q_g}{q_m} = \frac{K_g}{K_m} \quad (2.9)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada;

n_s = Gerilme konsantrasyon oranı,

R_a = Alan Değişirme Oranı,

R_s = Darbeli Kırmataş Kolon Ve Zemin Rijitlik Modülü Oranı,

olarak tanımlanmaktadır. Tamamen rijit temeller için Darbeli Kırmataş Kolon Ve Zemin Rijitlik Modülü Oranı (R_s), ve Gerilme konsantrasyon oranı (n_s), eşittir. yapılan ölçümlere göre gerilme konsantrasyon oranı rijit temeller için 4 ile 45 arasında değişmektedir. Bu eşitlikler kullanarak kolon ve zeminde gelen gerilme değerleri belirlenebilir.

$$q_g = \frac{q \cdot R_s}{R_a(R_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (2.10)$$

$$q_m = \frac{q}{R_a(R_s - 1) + 1} = q \cdot \mu_g \quad (2.11)$$

2.2.8.4.2. Alt Bölge Oturması

Alt Bölge oturması hesabında, zeminlerin oturma bileşenlerinin ve temelin altına yayılan yük derecesinin hesaplamaları için geleneksel geoteknik oturma çözüleme yöntemlerini içeren konsolidasyon oturması ve elastik oturma kullanılmaktadır. Elastik oturma değerleri, ampirik yaklaşımları kullanarak belirlenir. Alt bölgede oluşan konsolidasyon oturması ise yapılan ödometre deneylerin sonuçları değerlendirilerek belirlenir.

Elastik yöntemle meydana gelebilecek ani oturma aşağıdaki formüle kullanarak hesaplanmaktadır.

$$S_{i,LZ} = \frac{q_1 H_{LZ}}{E_{LZ}} \quad (2.12)$$

Ödometre deneylerinden çıkan değerlerle meydana gelebilecek birincil konsolidasyon oturması

$$S_{LZ} = H_{LZ} \left(\frac{C_c}{1 + e_0} \right) \times \log \left(\frac{P'_0 + \Delta q}{P'_0} \right) \quad (2.13)$$

Burada;

H_{LZ} = Alt Bölge Kalınlığı

E_{LZ} = Matris Zemin Elastisite Modülü

C_c = Zemin Sıkışabilirlik İndeksi

e_0 = Başlangıç Boşluk Oranı

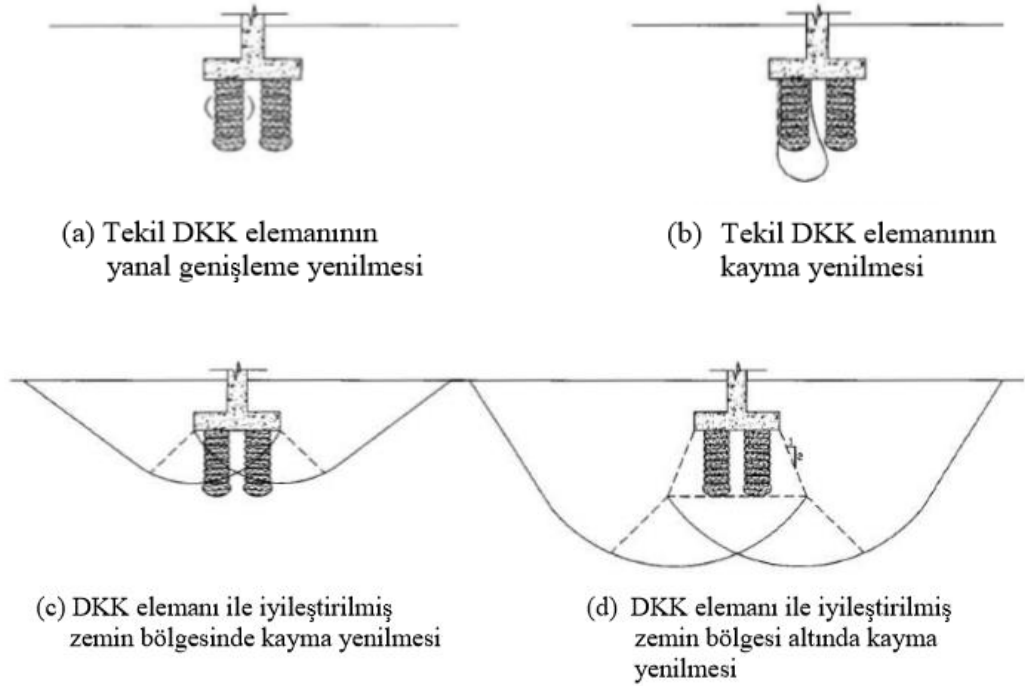
P_0 = Düşey Efektif Gerilme

Δ_q = Düşey Gerilme Artışı

olarak tanımlanır.

2.2.8.5. Darbeli kırma taş kolonlar ile desteklenmiş temelerde taşıma gücü hesabı

Darbeli kırma taş kolonlarla iyileştirilen zeminde yeterli taşıma kapasitesi oturma limitleri ile kontrol edilebilir. İyileştirilen zeminlere oturan temelerin taşıma kapasitesi, muhtemel göçme mekanizmalarına göre farklı tasarım yaklaşımları kullanarak bulunabilir. Tekil kolonlarda meydana gelebilecek göçme grup kolonlardaki ile benzerdir.



Şekil 2. 14. Muhtemel Göçme Mekanizmaları (Wissman, 1999)

2.2.8.5.1. Tekil darbeli kırmataş kolon elemanın yanal genişlemesi

Yumuşak zeminler içinde inşa edilen tekil darbeli kırmataş kolonların yanal genişleme göçmesi ilk olarak 1981 yılında Mitchel tarafından tanımlanmaya başlanmıştır. Kolon imal edildikten sonra boyu yeterince uzun ise, kolonun üsten gelen gerilme kolon alt kısmına transfer edilmeden önce kolonun bütün kayma mukavemetinin mobilize olmasını sağlanmaktadır. Kolon içerisinde gelişen kayma yüzeyi dışa doğru taşarak kolonun göçmesine neden olmaktadır. Hughes ve Withers (1974), laboratuvar ortamında yaptıkları çalışmada tekil kolonun yanal göçme durumlarını boşluk genişleme teorisi ile açıklamışlardır. Tekil kolonun yumuşak zeminin içinde inşa edildikten sonra üzerindeki nihai gerilme, kolon etrafındaki sınır radyal gerilmesi ve kolon elemanına ait Rankine pasif toprak basıncı katsayısına bağlıdır.

$$q_{ult,g} = \sigma_{r,lim} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_g}{2} \right) \quad (2.14)$$

Buradaki;

ϕ_g = kolonun içsel sürtünme açısı

$\sigma_{r,lim}$ = kolonun etrafındaki sınır radyal gerilme

İle tanımlanabilir.

Wismman (1999) yaptığı çalışmada temelden kaynaklanan düşey sınır gerilmeyi yanal genişleme, yenilme yöntemine göre hesaplanan değer içermediğinden ve darbeli kırmataş kolonun imal edilirken ek kayma ve normal gerilmeleri Rankine toprak basıncı durumunda alınmadığından buradaki değer konservatif bir değer olarak alınabilir.

Eğer temel altındaki zeminin homojen ise

$$Z_c = D_f + d_g \tan \left(45 + \frac{\phi_g}{2} \right) \quad (2.15)$$

Burada;

Z_c = Genişleme Beklenen Kritik Derinliği

D_f = Temel Derinliği

d_g = kolon çapı

\emptyset_g = darbeli kırmataş kolon içsel sürtünme açısı

Yardımla hesaplanmaktadır.

Hughes ve Withers (1974), yaptıkları eşitliği aşağıdaki durumlara dayandırmaktadır.

- Kolonlarda kohezyon bulunmamaktadır
- Zemin ve kolon ara yüzeylerinde oluşacak kesme kuvvetleri hesaba katılmaz
- Asal gerilmeler hem yatay hem de düşey etkiyen gerilmelerdir

2.2.8.5.2. Tekil darbeli kırmataş kolon elemanının kayma yenilmesi

Tekil kolon üzerine yüklenen toplam yük ($Q_{top,g}$), uç direnci ($Q_{tip,g}$), ve çevre sürtünmesi ($Q_{tip,g}$) tarafından kapsanmaktadır. Buradan;

$$Q_{top,g} = Q_{shaft} + Q_{tip,g} \quad (2.15)$$

denklemlerle bulunabilir. Bu denklemler gerilme cinsinden yazılırsa;

$$q_{ult,g}A_g = f_s A_{shaft} + q_{tip,g}A_g \quad (2.16)$$

ile hesaplanmaktadır. Buradaki;

$q_{ult,g}$ = Darbeli kırmataş kolonun nihai gerilme

A_g = Darbeli kırmataş kolonun alanı

f_s = Kolon boyunca birim ortalama sürtünmesi

A_{shaft} = Darbeli kırmataş kolonun çevre alanı

$q_{tip,g}$ = Darbeli kırmataş kolonun çevre direnci

olarak tanımlanmaktadır.

İmal edilen kolon boyu kısa ise, üsten gelen gerilme kolonun içerisindeki kayma yüzeyi gelişmeden önce uç kısmına doğru aktarılmaktadır. Göçme meydana gelme sebebi ise uç kısımda oluşan gerilmelerdir. Bu durumda aşağıdaki formül kullanılarak nihai taşıma gücü hesaplanabilir.

$$q_{ult,g} = \frac{f_s A_{shaft}}{A_g} + q_{tip,g} = \frac{4f_s d_{shaft} H_{shaft}}{d^2 + q_{tip,g}} \quad (2.17)$$

Burada;

H_{shaft} = Darbeli Kırmataş Kolonun Boyu

d = Darbeli Kırmataş Kolonun Çapı

d_{shaft} = İmalatan Sonra Yeni Oluşan Kolon Çapı

Terzaghi-Buisman denklemi kullanarak darbeli kırmataş kolonun uç kısmındaki taşıma gücü aşağıdaki formülü ile hesaplanabilir.

$$q_{ult,g} = q_{ult} = cN_c + 0,5d_{shaft}\rho N_y + \sigma_v^3 N_q \quad (2.18)$$

Buradaki;

N_c, N_y, N_q = taşıma gücü faktörleri

ρ = zemin birim hacim ağırlığı

σ_v = efektif jeoloji basınç

Drenajsız durumlarda;

Kolon boyunca birim ortalama çevre direnci kayma mukavemetine eşit olur.

$$f_s = S_u \quad (2.19)$$

O zaman denklem bu şekilde yazılmaktadır.

$$q_{tip,g} = S_u N_c \quad (2.20)$$

Drenajlı durumlarda;

Drenajlı durumlarda çevre direnci, zeminin sürtünme açısının tanjantı ile efektif yanal gerilmesine eşit olur. O zaman

$$f_s = \sigma_{v,ave}^3 \text{tg}\phi_s K_p = \left(D_f + \frac{H_{shaft}}{2} \right) \rho \text{tg}\phi_s \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi_s}{2} \right) \quad (2.21)$$

İle hesaplanabilir.

2.2.8.5.3. Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilmiş bölgede kayma yenilmesi

Yenilme mekanizmasında göçme düzleminin kolonlardan ve zeminden oluşan bölgeden (iyileştirilmiş bölgeden) geçtiği varsayılmaktadır. Bu durumda kayma düzlemi boyunca kayma dayanımı, darbeli kırmataş kolonun sürtünme direnci ve zeminin sürtünme direncine bağlıdır. İyileştirilmiş olan zemin bölgesinde yerel göçme,

geleneksel Terzaghi-Buisman ve kompozit zemin parametreleri taşıma kapasitesi eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Zemin parametreleri Priebe (1978)'a göre aşağıdaki denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\phi_{\text{comp}} = \text{tg}^{-1} [n_s \cdot R_a \cdot \text{tg}\phi_g + (1 - R_a n_s) \cdot \text{tg}\phi_s] \quad (2.22)$$

$$c_{\text{comp}} = (1 - R_s n_s) \cdot c_m \quad (2.23)$$

Burada;

n_s = Gerilme Konsantrasyon Oranı

R_a =Darbeli Kırmataş Kolon Alan Oranı

ϕ_g =Darbeli Kırmataş Kolon İçsel Sürtünme Açısı

ϕ_s =Zeminin İçsel Sürtünme Açısı

Genellikle temel altındaki kayma düzlemi hesaplanırken alan oranı üzerinde 0,4 gibi bir azaltma faktör kullanılması önerilir. Gerilmeler ve göçme düzlemi değişimlerini hesaplanmak için ise gerilme konsantrasyon oranı kullanılmaktadır. Darbeli kırmataş kolonların üst seviyede bu değerler tahmini olarak 12'dir.

2.2.8.5.4. Kolon ve zeminde oluşan bölge altında göçme meydana gelmesi

Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilmiş zemin bölgesi altındaki alanda göçme durumu meydana gelebilmektedir. Bu meydana gelen göçme durumlarının engellenebilmesi için geleneksel denklemlerden elde edilen sonuçları ve daha önceki çözümlerden hesaplanan değerleri karşılaştırıp, izin verilebilir taşıma kapasite belirlenebilir. İyileştirilmiş bölge altında oluşan gerilme 2:1 oranında arttığı kabulüyle bu bölge altındaki gerilme aşağıdaki denklem kullanılarak tanımlanabilir.

$$q_{\text{ult}} = q_{\text{bottom}} \frac{[(B + H)(L + H)]}{BL} \quad (2.24)$$

Burada;

q_{bottom} =İyileştirilmiş Bölge Alt Sınırında Oluşan Gerilme

B = Temel Genişliği

L = Temel Uzunluğu

H = İyileştirilmiş Bölge Kalınlığı

2.2.9. Sismik yükler altındaki taşıma gücü

2.2.9.1. Sismik yükler altındaki taşıma gücü kayıpları

Deprem etkisinden sonra yapılarda meydana gelen hasarlar, yoğunluk değişimine ve sıvılaşmaya bağlı olarak meydana gelmektedir. Eğer bu iki durum dışında hasarlar meydana gelirse sismik etkiden dolayı taşıma gücünün azalmasına bağlı olarak ve sıvılaşma durumunda göçme olacağından bahsedilmektedir(Çinioğlu, 2005). Günümüzde Uluslararası uygulamalarda deprem etkisinden sonra meydana gelen hasarların çoğunun sıvılaşma neticesinde olacağı düşünülmektedir. Ancak bunun dışında iyice araştırdığında taşıma gücü kayıplarının da az olduğu görülmektedir.

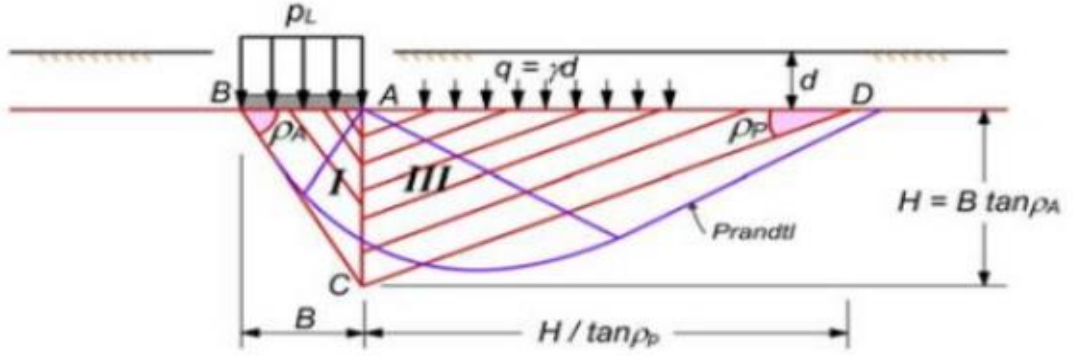
1999 yılında Kocaeli İzmit ve Adapazarı'nda deprem etkisinden oluşan hasarlar pek irdelenmediği için yaklaşımla sıvılaşma problemi olduğunu düşünülmüştür. Fakat oluşan göçmelerin birçoğunun taşıma gücü kaybı olduğu anlaşılmıştır. Tasarım aşamasında yüksek güvenlik katsayıları seçilmesine rağmen taşıma gücü göçmeleri meydana gelebilmektedir. En çok karşılaşılan belli başlı iki problem, temel altında hesaplanan zeminin kayma mukavemeti değerinin gerçek değerden daha büyük bulunması ya da tasarım aşamasında deprem yükünün etkisinden beklenen farklı etkiye sahip olmasıdır.

Kazıklı temel sistemlerinde de göçme meydana gelebilir. Fakat yapılan çalışmalar ve gözlemler, Darbeli kırmataş kolonlarla desteklenen temellerin diğer yöntemlere göre sismik yüklerden daha az etkilendiğini göstermektedir. Lawton (2000) yaptığı çalışmada darbeli kırmataş kolonlar ile güçlendirilmiş temellerin sismik yükler etkisi altındaki performansını incelenmiştir. Bu çalışmada yumuşak zeminlere gömülmemiş temel kullanıp büyük yatay kuvvetler vererek sismik yüklerle maruz kalan geopier temellerin üzerinde tam ölçekli testler yapılmıştır. Genel olarak sonuçlara bakıldığında, deprem etkisine maruz kalan temellerin altındaki zeminlerin darbeli kırmataş kolonlarla güçlendirildiğinde temellerin esnek olduğu ve küçük deplasmanlar verildiği görülmektedir.

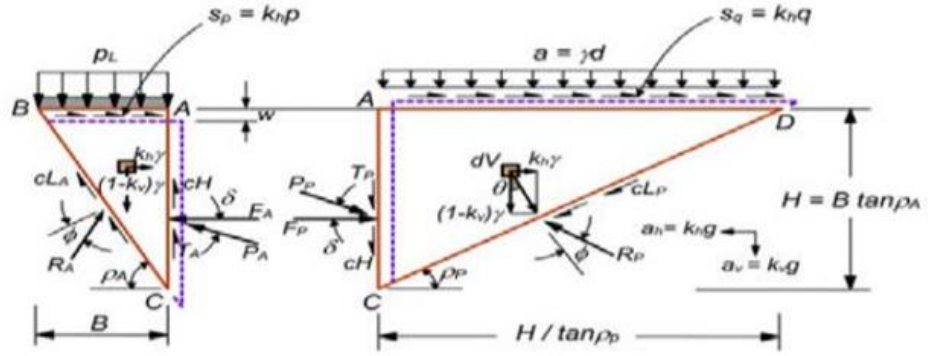
2.2.9.2. Sismik yükler altında taşıma gücü hesabı

Statik taşıma gücü hesaplanırken kullanılan Coulomb göçme mekanizmasına yatay ve düşey deprem ivmeleri (dinamik deprem etkisi) ekleyerek sismik yükler etkisindeki taşıma gücü faktörleri bulunabilir. Richards vd, (1990) yaptıkları çalışmada sismik etki ile taşıma gücü kayıplarının hesabına ve bu etkilerdeki davranış durumuna yer

vermişlerdir. Coulomb'un mekanizmasında hem sürtünme ihmal edilen basitleştirilmiş kayma kamaları, hem de sürtünme dikkate alınarak hesaplanmıştır.

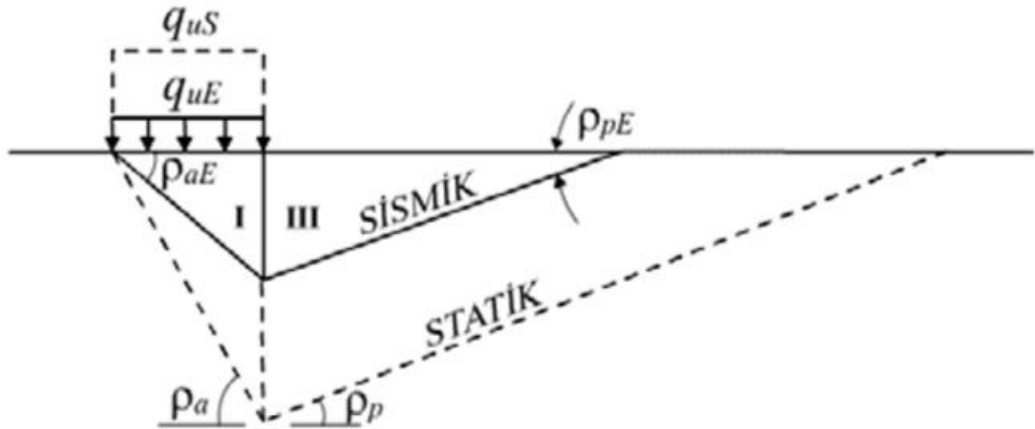


Şekil 2. 15. Basitleştirilmiş Coulomb Kayma Kamaları ($\delta \neq 0$) [Richards Vd, 1993]



Şekil 2. 16. Coulomb Mekanizması (Δ Sürtünmenin Dikkat Alındığı Durum) [Richards Vd, 1993]

Richards ve diğerleri. (1993) tarafından düzeltilen statik ve sismik şartlarında taşıma gücü kamaları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2. 17. Statik Ve Dinamik Şartlarda Taşıma Gücü Kamaları (Çincioğlu, 2005)

Daha önce anlattığı üzere Terzaghi (1943)'e göre sürekli temel için statik durumdaki taşıma gücü hesabı

$$q_{uS} = cN_c + \gamma L N_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (2.25)$$

Burada;

q_{uS} = Zeminde Kayma Göçmesi Sebep Olan Düşey Yük

B = Sürekli Temel Genişliği

L = Sürekli Temel Uzunluğu

γ = Zeminin Birim Hacim Ağırlığı

c = Kohezyon

N_c, N_γ, N_q = Taşıma Gücü Faktörleri

formülü ile hesaplanmaktadır. Deprem ivmelerinin etkisi yukarıdaki formüle eklenerek sismik taşıma gücü hesaplanabilir.

$$q_{uE} = cN_{cE} + \gamma L N_{qE} + 0.5\gamma B N_{\gamma E} \quad (2.26)$$

Buradaki $N_{cE}, N_{qE}, N_{\gamma E}$ sismik taşıma gücü faktörleri olarak tanımlanmaktadır.

Statik durumdaki taşıma gücü faktörleri sadece içsel sürtünme açısına bağlıdır. Ancak sismik durumdaki taşıma gücü faktörleri içsel sürtünme açısı (\emptyset), yatay-düşey ivme faktörleri (k_h, k_y) ve duvar sürtünme açısına bağlıdır.

$$N_{qE} = \frac{K_{PE}}{K_{AE}} \quad (2.27)$$

$$N_{cE} = (N_{qE} - 1) \cos \emptyset \quad (2.28)$$

$$N_{\gamma E} = \tan \rho_{AE} \left(\frac{K_{PE}}{K_{AE}} - 1 \right) \quad (2.29)$$

Olarak tanımlanmaktadır. Burada;

ρ_{AE} = Kama Açısı

K_{PE} ve K_{AE} = Sismik durum için aktif ve pasif yanal toprak basıncı

şeklinde tanımlanmaktadır. Tschebotarioff (1951)'e göre (Çinicioğlu, 2005)

$$\rho_{AE} = a + \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(1+\tan^2 a)[1+\tan(\delta+\theta) \cot a]} - \tan a}{1+\tan(\delta+\theta)(\tan a + \cot a)} \right) \quad (2.30)$$

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\theta+\delta) \sin(\phi-\theta)}{\cos(\delta+\theta)}} \right)^2} \quad (2.31)$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\theta+\delta) \sin(\phi-\theta)}{\cos(\delta+\theta)}} \right)^2} \quad (2.32)$$

yukarıdaki ifade ile bulunmaktadır. Burada $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{K_h}{1-K_v} \right)$, $a = \phi - \theta$ ve $\delta = \phi/2$ olarak tanımlanabilir. K_h ve k_v sırasıyla temel altındaki oluşan yatay ve düşey sismik ivme faktörleridir. Deprem ivmesinin arttırdığında pasif itki katsayısı (K_{PE}) azaltmakta ve aktif itki katsayısı (K_{AE}) ise artmaktadır. Deprem ivmesi kritik bir seviyeye ulaştığında aktif ve pasif yanal toprak basıncıları akışkanlaşma durumuna çıkarak birbirine eşit ($K_{PE} = K_{AE}$) olacak ve kama açısı sıfır değerine ulaşılacaktır. Bu durumda temel altındaki zeminler kaymaya başlanmaktadır.

2.2.9.3. Yarı-statik (psödostatik) yaklaşım

Başlangıcı 1920'lere dayanan deprem etkisinin hesaplaması için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ilk kez Terzaghi (1950) tarafından uygulanmıştır. Sismik etki yatay ve düşey ivmelerle analiz edilmektedir. Sismik yükünün hesaplanabilmesi için zeminin birim hacim ağırlığı sismik faktörle (k) çarpılarak yarı-statik kuvvet elde edilir. Ve elde edilen kuvvet sismik yüklerin altındaki sınır denge analizlerinde kullanılmaktadır.

Bu yöntemde sismik yükün zemin üzerindeki etkilerine ek olarak bir statik kuvvet etki ediyormuş gibi düşünüp uygulanmaktadır. Bu nedenle zemin kütlelerinden yanal bir kuvvet etki etmektedir. Genellikle Psödo-statik yanal kuvveti aşağıdaki formül kullanarak hesaplanabilir.

$$F_h = ma = \frac{wa}{g} = \frac{wa_{\max}}{g} = k_h w \quad (2.33)$$

Burada;

F_h = Yarı-Statik Yanal Kuvvet (kN)

m = zemin toplam kütlesi (kg)

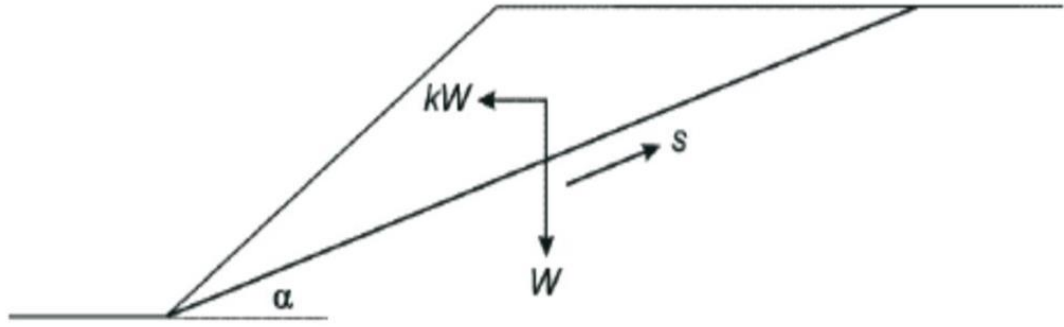
a = yatay ivme (m/sn^2)

g = yer çekim ivmesi (m/sn^2)

a_{max} = Maksimum yatay ivme.

Bu değer sismik yüklerin grafikleri pik ivme değeridir.

$k_h = \frac{a_{max}}{g}$: boyutsuz yarı statik katsayısı



Şekil 2. 18. Deprem Kuvvetinin Yarı Statik Yöntemi (Zienkiewicz, 1977)

Bir depremde hareketli kütleye hem düşey hemde yatay yönde yarı-statik kuvvetler etki edebilir. Ancak Psödostatik yaklaşımda düşey kuvvetin etkisi genellikle az olduğu için yok sayılarak sadece yatay kuvvet uygulanmaktadır. Bunun nedeni kayan zeminin üzerinde etkiyen düşey kuvvetin miktarının az olmasıdır. Buna ek olarak depremlerde çoğu yatay pik ivme değeri düşey pik ivme değerinden daha büyük olması dolayısıyla k_h 'nin k_v 'dan daha büyüktür.

2.2.9.3.1. Yarı-statik (psödostatik) katsayısının seçimi

Yatay yarı-statik katsayısı düşey yarı-statik katsayısından büyük olduğu için analizlerin sonucuna doğrudan etkileyen katsayısı seçimlerinin yarı-statik analiz olması en önemli aşamadır. Yarı-statik kuvveti hesaplanırken w ve k_h faydalanacak. w değeri kaya zeminin birim hacim ağırlığı kullanarak laboratuvarında belirlenir. Ancak k_h değerinin belirlenmesi oldukça zordur (Day, R.W, 2004).

Sismik katsayısının (k_h) belirlenmesi tecrübe gerektiren bir konu olduğundan aşağıdaki parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir (Day, R.W, 2004).

- Yarı statik katsayısı pik yer ivmesiyle (a_{max}) doğru orantılıdır. Bu nedenle yer pik ivmesinin değeri ne kadar büyük olursa yarı statik katsayısı da (k_h) o kadar büyük olmalıdır.
- Aynı şekilde depremin büyüklüğü ile yarı statik katsayısıyla doğru orantılı olduğundan deprem büyüklüğü artışı yarı statik katsayısının artışı sağlar.
- Kullanılan maksimum yarı statik katsayısının değeri hiçbir şartta a_{max}/g değerinden büyük olmamalıdır.
- Minimum yarı statik katsayısı bölgeler arasında değişebilir ama yapılan araştırmalarda (k_h) değerinin hiçbir zaman 0.15'in altında olmamalıdır (Day, R.W, 2004).

Birçok araştırmacı tarafından yarı statik katsayısı seçilirken yukarıda verilen bilgileri dikkate alınarak çeşitli öneriler yapılmıştır.

- Zemin göçmelerinde, küçük kayma kütlesi hesaplanırken $k_h = a_{max}/g$ formülü ile kullanılır.
- Orta büyüklükteki ve sıvılaşma analizlerinde zemin göçme kütlesi için $k_h = 0.65a_{max}/g$ kullanılır (Krinitzsky vd, 1993; Taniguchi ve Sasaki, 1986).
- Çok büyük zemin göçme kütlelerinde (dolgular, barajlar ve heyelanlar) en küçük k_h değeri kullanılır. Bu konuda Seed (1976) aşağıdakileri önermiştir.
- 8,5 büyüklüğünde sahip olan depremlerde faylara yakın bölgeler için $k_h=0.15$, yarı-statik emniyet faktörü ise $k_h \geq 1.15$ değerler kullanılmalıdır.
- 6.5 büyüklüğünde sahip olan depremlerde faylara yakın bölgeler için $k_h = 0.10$, yarı-statik emniyet faktöre ise $k_h \geq 1.115$ kullanılmaktadır.

Ayrıca sismik katsayısının belirlenmesinde daha önce yapılmış araştırmalarda ve yapılacak çalışmalarda bazı bilgiler bulunmaktadır (Day, R,w., 2004).

- Bu konuda Terzaghi (1950) depremin yıkıcılığına göre aşağıda verilen değerleri önermiştir;
 - Şiddetli Depremlerde (Rossi-Forrel IX) $K_h=0.1$
 - Yıkıcı Depremlerde (Rossi-Forrel IX) $K_h =0.2$
 - Katastropik (Felakat Boyutunda) Depremlerde $K_h =0.5$
- Dakoulas ile Gazetat (1986) ve Seed ile Martin (1966), yaptıkları araştırmada kayma kirişi modelleri kullanarak yarı statik katsayısının toprak barajlar için göçme kütlelerinin boyutuna bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir.
- Marcuson (1981), yaptığı çalışmada sismik hareketlerin etkisi küçültme ve büyütme durumu dikkat alınarak yarı statik katsayısı barajlar için $k_h=0.33a_{max}/g$ ve $k_h =0.5a_{max}/g$ değerlerini önermiştir.

- Kramer (1996), Franklin ve vd (1984) yaptıkları çalışmada deprem kayıtlarından faydalanarak barajlar için yarı statik katsayısının değeri 0.5 seçilmesini önermişlerdir.

Yukarıda verilen bilgileri dikkate alındığında temel atlındaki zeminlerde depremden gelen hasarların büyük deformasyona uğramadığı durumlarda, yarı statik analizin büyük ölçüde fayda sağladığı görülmüştür. Bu nedenle kh seçimi çok önemlidir. Sismik katsayının belirlenmesinde yukarıda verilen parametreler ve daha önce yapılan çalışmalar göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada plaxis programı içerisinde ki faklı yarı statik katsayılar kullanılmıştır.



3. KIRMATAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

3.1. Materyal

Bu bölümde sonlu elemanlar programı olan Plaxis 2D kullanılarak, darbeli kırmataş kolonsuz ve darbeli kırmataş kolonlu zemin modelleri oluşturulmuştur. Çalışmanın temel amacı darbeli kırmataş kolonların sismik yükler etkisi olmadan (statik) ve sismik yükler altındaki oturmalarını ve taşıma gücü kayıplarını incelemek ve darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilmiş zeminlerle, darbeli kırmataş kolonsuz zeminler arasındaki performans farkını daha net görebilmektedir. Bu çalışmada darbeli kırmataş kolonlar, zemine farklı uzunlukta (2.25B, 3.25B, 4B ve 5B) ve farklı ara mesafeyle (s/D:5, s/D:4, s/D:3 ve s/D:2) uygulanarak bu parametrelerin oturmalar ve taşıma gücü üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Zemin davranışın modellenirken Mohr-Coulomb modeli kullanılmıştır.

Kullanılma sebebi;

- Basit ve açık bir modeldir.
- Sınırlı sayıda ve açık parametrelerle çalışır.
- Çoğu pratik programa uygulanmaktadır.
- Göçme davranışını iyi temsil etmektedir.
- Zemin davranışı için birinci mertebe yaklaşımı göz önüne alınmaktadır.

ve ihtiyacı duyulan parametrelerin kolaylıkla laboratuvarında elde edilmesi nedeniyle bu model tercih edilmiştir.

Plaxis programında model oluşturulurken darbeli kırmataş kolonların etki mesafeleri de göz önünde bulundurularak 36 metre genişlik ve 12 metre derinlik aralığında olması gerektiği belirlenmiştir. Zemin profilindeki simetri göz önüne bulundurularak analizler sırasında 36 metre genişliğin yarısı modellenmiştir. Burada temel genişliği $B = 2$ metre olarak seçilmiştir. Temel genişliğindeki zemin alanın tam ortasında sağdan ve soldan eşit mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir.ve üzerine 18 ton yük ve 1 metre deplasman yükü uygulanmıştır. Uygulanan bu yüklerden dolayı oturmalar ve taşıma güçleri elde edilmiştir. Burada kullanılan 1 metre deplasman yük seçilmesindeki temel sebep zeminin maksimum taşınabileceği yüke hızlı bir şekilde ulaşmasıdır.

3.1.2. Deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerin oturmaların ve taşıma güçlerin analizleri

Bu kapsamda ilk önce deprem ivmesinin katsayısı kullanılmadan sadece statik durumdaki oturmalar ve taşıma güçleri hesaplanmıştır. Statik oturmaları temel üzerine temel genişliği boyunca uygulanan 18 tonluk yük ile hesaplanmış ve aynı zamanda uygulanan 1 metrelik deplasman yükü altında temel genişliği boyunca taşıma güçleri de hesaplanmıştır. Plaxis programında oluşturulan modellerde zemin malzemesi olarak kullanılan tabakaların ve darbeli kırmataş kolon malzemesinin özellikleri KURT, 2011 'in tezinden alınarak kullanılmıştır.(Çizelge3.1).

Çizelge 3.1. Programda kullanılan geoteknik parametreleri (KURT, 2011)

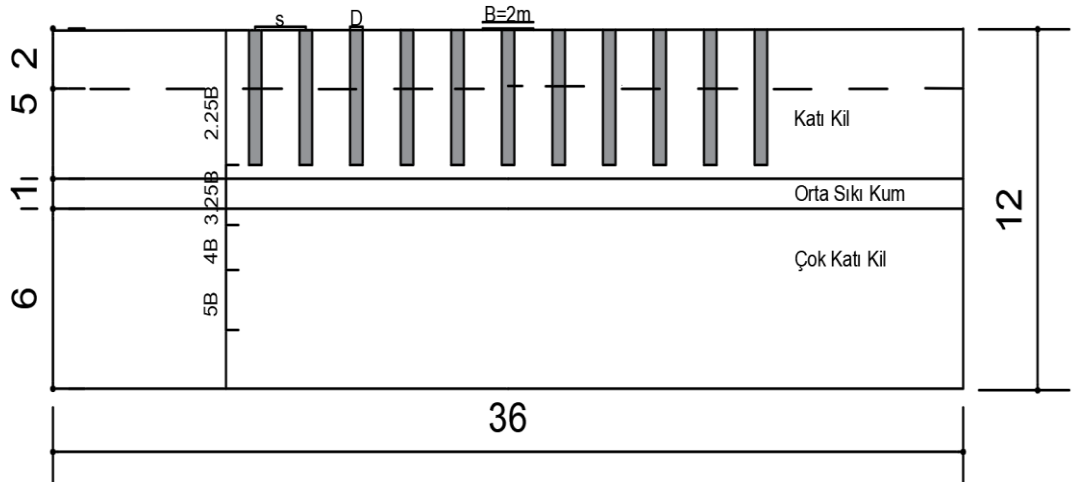
Parametreler	Katı Kil	Orta Sıkı-Çok Sıkı Kum/Çakıl	Çok Katı Kil	DKK
Malzeme Mode		Mohr-Coulomb		
Drenaj Durumu	Drenajsız	Drenajlı	Drenajsız	Drenajlı
γ_k (kN/m ³)	17	19	19	21
γ_d (kN/m ³)	19	20	20	22
e	1	0.5	1	0.3
E (kN/m ²)	10,000	20,000	25,000	150,000
μ	0.4	0.25	0.4	0.25
c_u (kN/m ²)	50	0.01	120	0.01
$\phi^{(o)}$	-	35	-	45

Çizelge 3.2 (devam).

$\psi^{(o)}$	-	5	-	12
$k_x(\text{m/gün})$	0.0001	10	0.0001	100
$K_y(\text{m/gün})$	0.0001	10	0.0001	100

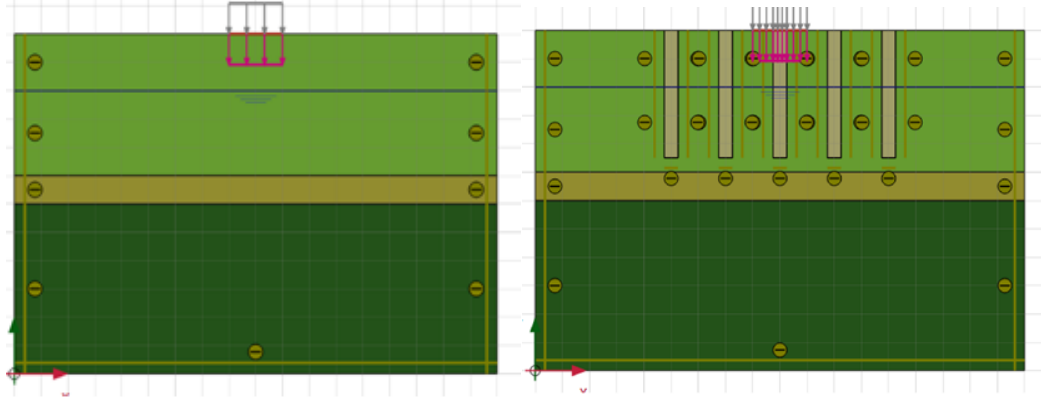
γ_k : kuru hacim ağırlığı, γ_d : doymun birim hacim ağırlığı, e : boşluk oranı, μ : poisson oranı, E : elastisite modülü, ϕ : sürtünme açısı, k_x ve k_y : yatay ve düşey permeabilite, ψ : dilatasyon açısı.

Yukarıda ölçüleri verilen zemin ve darbeleri kırmataş kolon malzeme özelliklerinin Plaxis programına girişi yapılarak darbeleri kırmataş kolonlu ve kolonsuz olmak üzere 2 boyutlu modeller oluşturulmuştur.



Şekil 3. 1.Örnek Darbeleri Kırmataş Kolonlu Zemin Kesiti Modeli

Çizelge3.1'de görüldüğü üzere zemin tabakaları geçirimsiz kaya üzerinde yeralan 6 m kalınlığında çok katı kil, üzerinde yeralan 1 m kalınlığında orta sıkı-çok sıkı kum ve onun üzerinde 5 m kalınlığındaki katı kil tabakalarından oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinin 2 metre altındadır. Bu modeller de darbeleri kırmataş kolonların çapı 50 cm kullanılarak zemin iyileştirilmesi yapılmıştır. Darbeleri kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelleri plaxis programında aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3. 2. Darbeli kırmataş kolonsuz ve darbeli kırmataş kolonlu geometrik modelinin oluşturulması ve model parametrelerinin girilmesi

Darbeli kırmataş kolonsuz ve darbeli kırmataş kolonlu geometrik modeller 15 düğümlü üçgen elemanlar ile modellenmiştir. Geometrik modelleri oluşturulup malzeme özellikleri girildiği yapıldıktan sonra mesh (ağ) sekmesinde tıklanarak referans noktası ve ağ sıklığı belirlenmiş olup ağ oluşturulmuştur. Bu şekilde geometrik zemin modelleri analize hazır hale getirilmiştir.

3.1.3. Deprem yükü (k_h) etkisi altında darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerin oturmaların ve taşıma güçlerinin analizleri

Yapılan çalışmada kullanılan deprem katsayısının (psedo-statik katsayısı) tayini için 1950 yılında terzaghi tarafından deprem yıkıcılığına göre önermiş olduğu değerleri kullanarak darbeli kırmataş kolonlu ve darbeli kırmataş kolonsuz zeminlerin oturmaları ve taşıma güçleri hesaplanmıştır. Deprem yükü deprem kuvveti olarak sismik katsayı şeklinde (k_h) etki ettirilirdi. Bu değer

- Şiddetli Depremlerde (Rossi-Forrel IX) $K_h=0.1$
- Yıkıcı Depremlerde (Rossi-Forrel IX) $K_h =0.2$
- Katastropik (Felakat Boyutunda) Depremlerde $K_h =0.5$

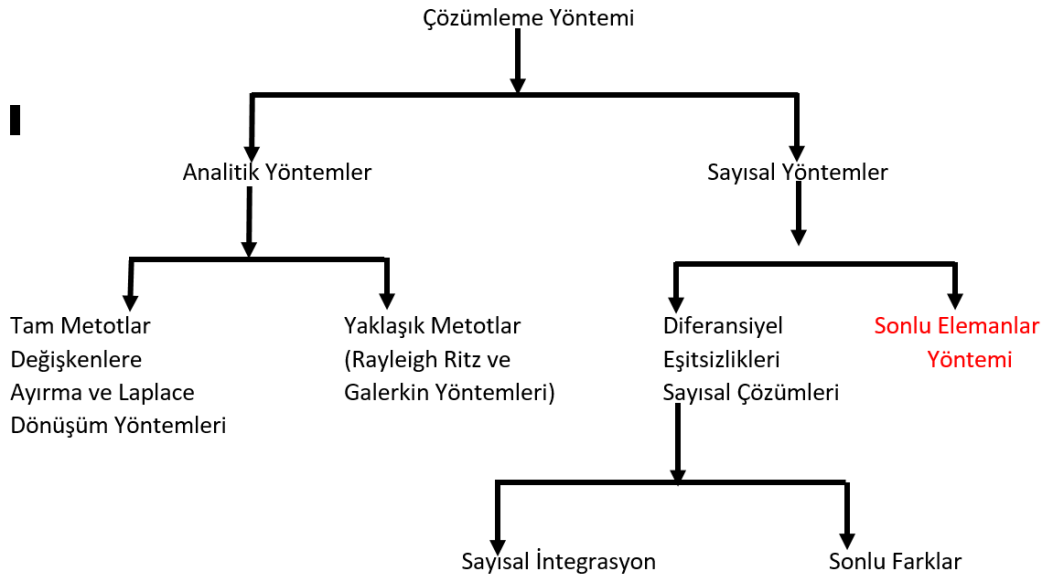
Şeklinde dikkate alınmaktadır.

Öncelikle psödo-statik parametrenin aktif hale getirilmesinden sonra yıkıcı depremler için önerilen ($k_h=0.2$) değer kullanılarak yatay yöndeki (acceleration x) ivme değeri uygulanmıştır. Böylelikle zemine sismik bir kuvvet uygulanarak deprem sonrası darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz durumlar için oturmalar ve taşıma güçleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde katastropik depremler için önerilen ($k_h=0.5$) değer kullanılarak darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz durumlar için oturmalar ve taşıma

güçleri tekrar hesaplanmıştır. Buradaki şiddetli depremlerde önerilen ($kh=0.1$) ivme değeri, deprem etkisi olmadan darbeli kıramtaş kolonlarla iyileştirilmiş zeminlerde hesaplanan oturmalar ve taşıma güçleri değerlerden daha büyük olmadığı için kullanılmamıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Geçmişten bugüne kadar zeminlerin davranışlarının belirlenmesi hakkında farklı çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen ampirik ve teorik yaklaşım yöntemleri detaylı olarak şekil 4.1’de verilmiştir(Rao, 2005). Yükün üniform olmaması, geometrinin düzgün olmayışı veya malzemenin doğrusal olmayan non-lineer davranış göstermesi, analitik çözümleri zor kılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak problem daha küçük parçalara ayrılarak ya da zeminin lineer-elastik bir ortam olduğu kabul ederek çözümlere gidilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemindeki temel amaç, karmaşık bir problemin çözümünü daha basit bir yöntemle değiştirmektir. Günümüzdeki teknolojik gelişmeler sayesinde çok karmaşık olan problemlerin rahat bir şekilde çözüme ulaşılabilir.

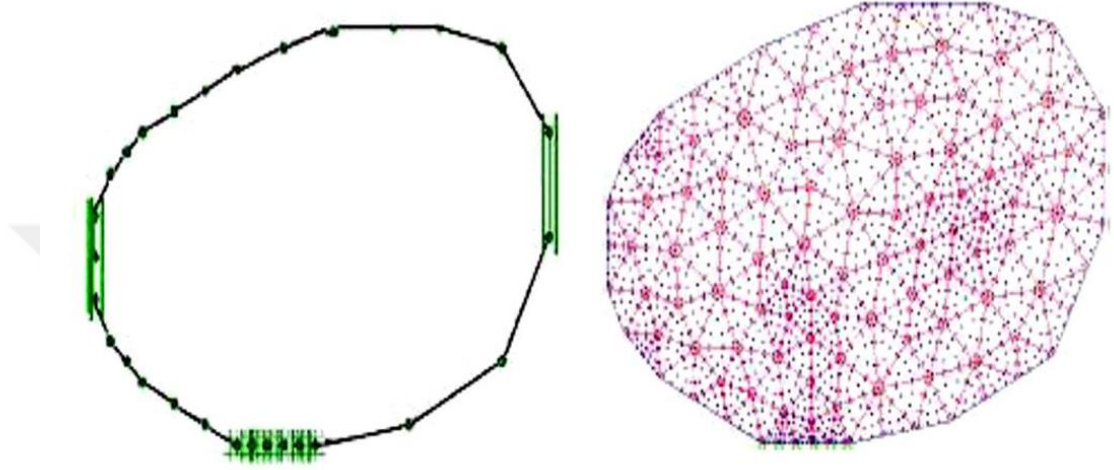


Şekil 3. 3. Analitik Yöntemleri (Rao, 2005)

Bu yöntemin uzay mühendisliği tarafından 1950 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojinin sayesinde 1970’lerde olgun hale getirilmiştir. Günümüzde inşaat, makine, elektrik, hidrodinamik ve uçak gibi çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Zemin mekaniği alanında ise 1966 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Clough ve Woodwar (1967) düşey ve yanal hareketler ile dolguda oluşan gerilmeleri

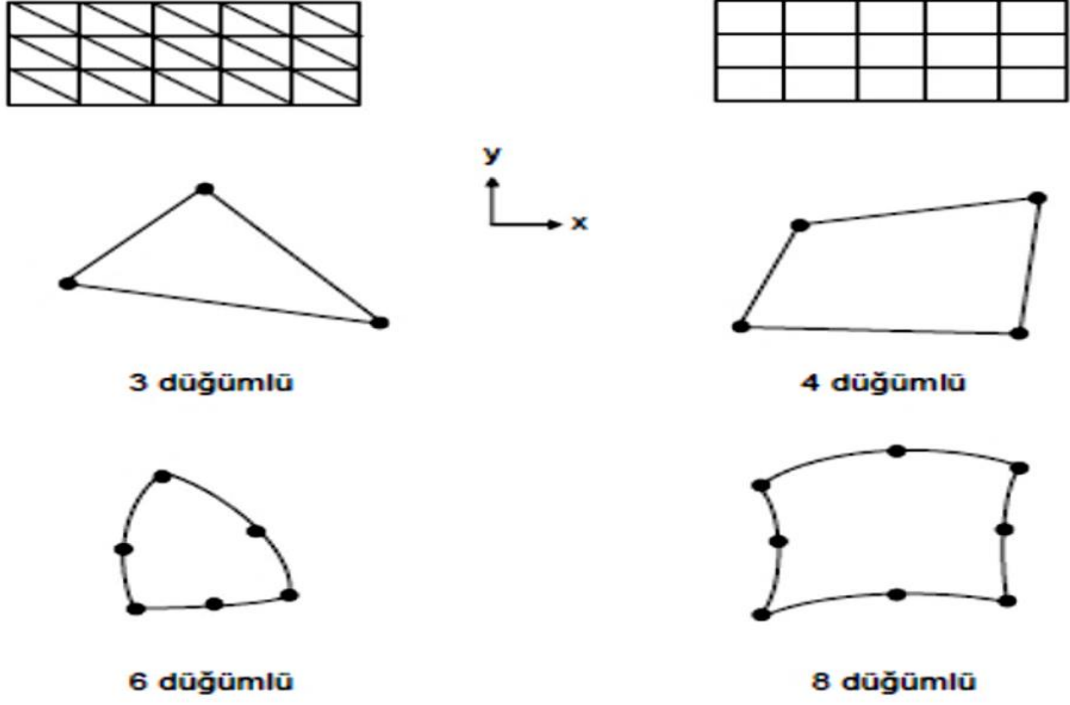
belirlemek için, 1966 yılında ise Reyes ve Deene yeraltında bulunan kayalarda yapılan kazı uygulamalarında bu metodu kullanmışlardır.

Çeşitli kalınlıklar tanımlanmış alanlara ve düğümlere ayrılmış bir plak olarak dönme, yer değiştirme ve eğim gibi parametreler hızlı bir şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 4.2'de sonlu elemanlar metodu çalışma mekanizması gösterilmektedir. Sistemin mantığı sonsuz sayıda noktanın sonsuz sayıdaki gerilmesidir.



Şekil 3. 4. Sonlu Elemanlar Metodu çalışma mekanizması (Brinkgreve, 2002)

Sonlu elemanlar yönteminin ilk adımı, karmaşık sistemde eleman adı verilen alanı alt bölgelere ayırmak ve daha sonra ayırdığı elemanları eşdeğer sonlu elemanlar ağına çevrilmektedir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemi genel olarak üçgen ya da dörtgen formdadır. Elemanları birbirine bağlayan düğüm noktalarına "node" adı verilmektedir. Eğrisel yüzeylerde her düğüm yüzeyin tam orta noktalarına konumlandırılırken, yüzeyler düz olduğunda ise düğüm noktaları elemanın köşe noktalarına yerleştirilmektedir (Tekin. A, 2011).



Şekil 3. 5. 2 boyutlu Elemanlar (Zienkiewicz, 1977)

Genel olarak düğüm noktaları birbirine sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen sonlu elemanlar metodunda sadece düğüm noktaları ile bağlanmaktadır. Bu durumda düğüm noktaları deplasmanların uygunluğu sağlanmaktadır. Karmaşık sistemler hesaplanırken nokta sayısının daha fazla kullanımı gerekmektedir. Nokta sayısı arttırdığı zaman işlem hacmi ve çözüm süresinin artması olumsuz bir durum gibi görünse de bu sorun son zamanlarda gelişen bilgisayar sayesinde kolay bir şekilde aşılmaktadır (Şahinkaya. 2016).

Günümüzde sonlu elemanlar programı olarak farklı programlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki boyutlu ve üç boyutlu olarak çözüm yapan plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

3.2.1. Plaxis sonlu elemanlar programı tanıtımı

Plaxis (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis), değişik geoteknik problemler için, sonlu elemanlar metoduyla stabilite ve deformasyon analizleri yapabilen bir bilgisayar programıdır. Program, bilgi girişine olanak veren (input) giriş programı, analizleri gerçekleştirilen (calculation) hesap programı, analiz yapıldıktan sonra sonuçları grafik olarak seçileyen (output) programı ve hesaplanan sonuçları ile istenilen grafiğin oluşturulmasına yardım eden eğri (curve) programından oluşmaktadır. Plaxis programı, geoteknik mühendisliğin diğer uygulama alanlarında

da geniş bir şekilde kullanılmaktadır. İlk olarak 1987 yılında Delft Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. İlk olarak kohezyonlu bir zemin üzerindeki nehir dolgularının analizini edilebilmesi için sonlu elemanlar programı plaxis 2D kullanarak uygulanmıştır. 1993 yılında ticari sektöründe kullanılabilecek bir yazılım haline getirilmiş ve 1998 yılında windows işletim sistemi üzerinde çalışabilir versiyonu çıkarılmıştır.

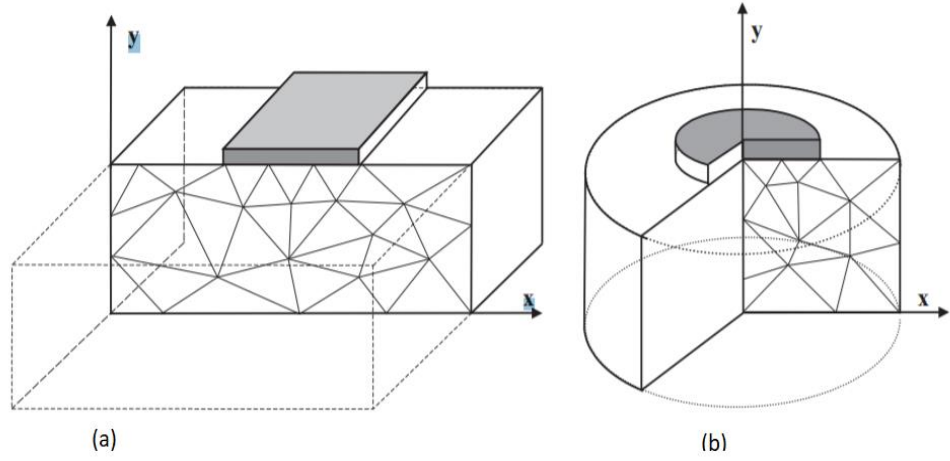
Günümüzde plaxis sonlu elemanlar programı, geoteknik mühendisliği alanında projelerinin tasarımı yaparken ihtiyacı duyulan zemin yapı etkileşimi, deformasyon ve stabilize analizleri, gerilme-şekil değiştirme, taşıma gücü, yükleme durumları, konsolidasyon, akım ağı, zeminin deprem yükü altındaki davranışı, zemin dinamik analizi ve malzemenin farklı olduğu durumlarda belirlemede kullanılmakta ve pratikte uygulanabilir gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir.

3.2.1.1. Geometrik modelin oluşturulması

Plaxis programında, analiz edilecek olan yeni projelerde ilk olarak geometri modelinin doğru bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Çizgilerden, noktalardan ve hücrelerden oluşan geometri modeli farklı zemin tabakalarını, inşa aşamalarını, yapısal elemanları ve yükleri temsil edilmektedir. Seçilen modelin analizin sonuçlarını etkilememek için modelin sınırları geniş tutulmalıdır. Plaxis paket programında iki tip modelleme seçeneği bulunmaktadır. Bunlar; düzlemsel deformasyon "Plane Strain" ve eksenel simetri "Axisymmetry" modelleme seçenekleridir.

- Plane strain; düzlemsel deformasyon yapan sistemlerin modellenen bu düzlem genellikle sayısal modellerin analizlerinde kullanılır. Belirli bir geometrinin bir şerit boyunca baştan sona uzadığı kabul edilir. Ve şeritten birim boyda alınan dilim oluşturulacak yeni projeler için kullanılır.
- Axisymmetry; bu modelleme seçeneğinde eksene göre simetriklik gösteren sistemler kullanılmaktadır.

Yukarıdaki her iki seçenekte y ve x eksenleri iki serbestlik dereceli olarak çözülmektedir. Bu çalışmada "Plane Strain" model seçeneği kullanılmıştır. Şekil 3.6'te modelleme türleri verilmiştir.



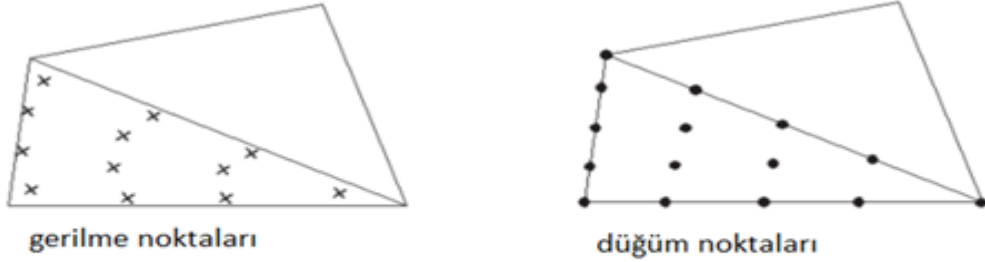
Şekil 3. 6.Plane Strain Modeli (a), Axisymmetry modeli (b) [plaxis 2D, 2019]

3.2.1.2. Zemin eleman tipleri

Plaxis programında, analiz edilecek olan zemin tabakaları veya hacim kümeleri 6 düğüm noktalı ve 15 düğüm noktalı olmak üzere iki tip üçgen elemanından biri kullanılmaktadır. Analizinde gerilmeler gerilme noktalarında, yer değiştirmeler ise düğüm noktalarında hesaplanmaktadır. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi üçgen elemanda, 6 düğüm noktalı 3 gerilme noktası varken 15 düğüm noktalı 12 gerilme noktası vardır. 15 düğüm noktalı daha hassas bir çözüm yapılmasına olanak sağlar. Ancak çözüm 6 düğüm noktalına göre daha uzun sürer. Genelde daha hızlı ve çabuk sonuç ulaşmak istenen ön çalışmada 6 düğüm noktalı eleman tipi kullanırken daha detaylı ve önem taşıyan problem analizlerinde 15 düğüm noktalı eleman tipine seçilmektedir. Bu çalışmada 15 düğüm noktalı eleman kullanılmıştır.



a) 6 noktalı üçgen elemanları



b) 15 noktalı üçgen elemanları

Şekil 3. 7.Düğüm ve Gerilme Noktaları

3.2.1.3. Mesh (Ağ)

Plaxis sonlu elemanlar programının analizlerde ağ mantığı, daha önceki başlıklarda bahsedildiği gibi sistemin küçük parçalara bölünerek analiz yapılması demektir. Karmaşık bir sistemin daha rahat çözümü için üçgen şeklinde küçük alanlara bölünmektedir. Ağ oluşturulmasında ne kadar daha fazla küçük alanlar oluşturursa o kadar daha hassas ve doğru hesap yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Diğer önemli nokta, ağ sıklığı artırıldığında gerilme yoğunluğu da artmış olacaktır. Başka bir deyişle analizlerin doğruluğu sağlanmış olacaktır. Sık ağ sistemi oluşturulması gereken bölgeler arasında yükün etki ettiği yüzey, şevin eğim yüzeyi, modelde temel var ise temelin alt kısmı, örnek olarak verilebilir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanarak ağ sıkılaştırılma ihtiyacı duyulan alanlar belirlenmektedir. Ağ parametrelerinden önemli olan ortalama ağ boyu (I_e), tane büyüklüğü faktörü (n_c)'ye ve model geometri ölçülerine bağlı olarak değişir. Ortalama ağ boyu, ağ parametreleri ve ortalama tane büyüklüğü arasında ilişkileri aşağıda verilmiştir.

$$I_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}} \quad (3.1)$$

Buradaki x_{max} , x_{min} , y_{max} ve y_{min} parametreleri model geometrisinin dış uzunluklarıdır. Sıklık derecesine göre tane büyüklük faktörünün (n_c) değişimi ise aşağıdaki şekil tanımlanmıştır.

➤ Çok sık	$n_c = 400$	1000 Eleman civarında
➤ Sık	$n_c = 200$	500 Eleman civarında
➤ Orta sıklık	$n_c = 100$	250 Eleman civarında
➤ Normal sıklık	$n_c = 50$	100 Eleman civarında
➤ Az sıklık	$n_c = 25$	50 Eleman civarında

3.2.1.4. Zemin davranışının modellenmesi

Geçmişten günümüzde mühendisler zemin mekaniği ile ilgili gerilme şekil değiştirme problemlerini zemin modellenmesinde rijit, plastik veya lineer elastik olarak çözmeye çalışmışlardır. Günümüzde gelişen teknoloji karmaşık zemin davranışına ve geometrilere ait problemlerin hesaplanabilecek hale gelmesini sağlamaktadır. Zeminin lineer ve elastik olmayan davranışı modellenirken daha kapsamlı teoriler gerekmektedir. Plaxis programında, Lineer Elastik, Soft Soil, Soft Soil Creep, Hardenin Soil, Hardenin Soil model with small strain stiffness ve Modifiye Cam-Clay gibi zeminin bünyesi farklı tanımlamalar kullanılmaktadır.

3.2.1.4.1. Lineer Elastik zemin modeli (LE)

Zeminin 3 yada 5 düğümlü olarak modellenen eski bir yöntemdir. Genellikler kaya gibi çok rijit ve büyük zemin kütlelerini modellenirken kullanılmaktadır. Ayrıca zemin davranışlarının modellenmesinde Hooke yasasına bağlıdır. Ve izotropik lineer elastik olarak kabul edilir. Programlarda Elastik modülü (E), ve Poisson oranı (μ) değerleri kullanılarak girilir.

3.2.1.4.2. Soft Soil zemin modeli (ss)

Bu model zemin mekaniğinde yumuşak ve gevşek zeminlerde zemin davranışının modellenmesi için geliştirilmiş izotropik, elasto-plastik modeldir (Brinkgereve, 1994). Bu tür zeminler diğer zeminlerle karşılaştırıldığında yüksek derecede sıkışabilir özelliğe sahip olan zeminlerdir. Bu model Modifiye Cam Kili modeline benzemektedir. Ancak akma fonksiyonu ve başlık modellenirken daha farklıdır. Başlangıçta ön konsolidasyon gerilmesi şartları vardır. Eğer kullanılan malzeme normal konsolide ise

ön konsolidasyon gerilmesi başlangıçtaki gerilmeye eşdeğerdir. Eğer kullanılan malzeme aşırı konsolide ise aşırı konsolidasyon oranına bağlıdır.

Soft Soil modellemek için toplam 7 zemin parametresine kullanılmaktadır. Bunlar modifiye İzotropik sıkışma indeksi (λ^*), Modifiye şişme indeksi (κ^*), kohezyon (c), İçsel sürtünme açısı (ϕ), Dilatasyon açısı (Ψ), Boşaltma ve tekrar yükleme poisson oran (v_{ur}) ve normal konsolide için yanal toprak basınç faktörü (K_o^{nc})'dür.

3.2.1.4.2. Soft Soil Creep Zemin Modeli (SSC)

Soft Soil modelinde olduğu gibi bu modelde yumuşak ve gevşek zeminlerin davranışının zamana bağlı olarak incelemesinde kullanılmaktadır. Bu model genelde derin kazıları ve tüneller gibi zamana bağlı deformasyonların meydana geldiği problemlerde kullanılmaktadır. Modellemek için giriş parametrelerinde SS modelde kullanılan parametrelerle aynıdır.

3.2.1.4.3. Modifiye Cam Clay Zemin Modeli (MCC)

Modifiye Cam Kili(Clay) zemin modeli,1960 yılında Scofield ve Wroth tarafından killi zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışı için ileri sürülen kritik durum kavramında geliştirilmiştir. Genelde malzemenin Hooke kanundan sonra plastik taraftaki davranışının matematiksel olarak modellenmesi için kullanılmaktadır(Schofield, Wroth 1968). Fakat Cam Kili bünye modülü doğru bir sonuç veremediği için yerine Modifiye Cam Kili zemin modeli geliştirilmiştir. Günümüzde uluslararası literatürde zemin bünye modellerinde en fazla bilinen model haline gelmiştir (Muir Wood, 1990).Bu model boşluk oranı (e) ve kritik durumu gösteren izotropik sıkıştırma eğrisi ve ortalama efektif gerilme (p') arasındaki logaritmik ilişki dikkat alınarak zemin gerilme-şekil değiştirme bünyesini modellemektedir.

Modifiye Cam Killi zemin modeli için laboratuvarından elde edilen zemin parametresine kullanılmaktadır. Bunlar; boşluk oranı (e_o), q-p düzlemi üzerindeki kritik durum çizgisi tanjantı (M), e-lnp' düzlemi üzerindeki İzotropik logaritmik sıkışma indeksi (λ), Kayma modülü (G), boşaltma ve tekrar yükleme durumdaki Poisson oranı (v_{ur}) ve e-lnp' düzlemi Şişme indeksi (k)'dir (plaxis 2D, 2011).

3.2.1.4.4. Hardening Soil Zemin Modeli (HS)

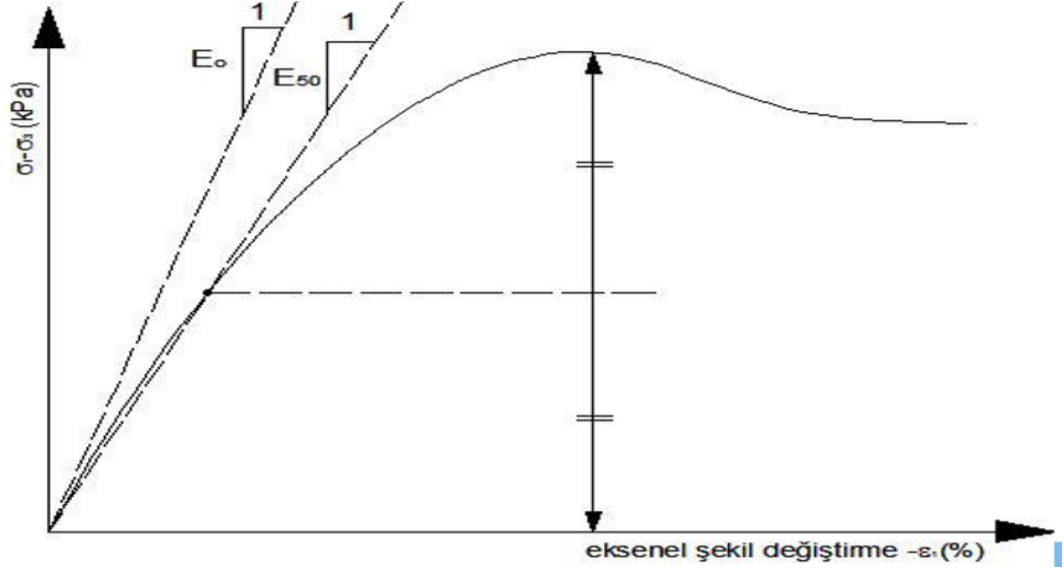
Hardenin Soil model (pekleşen zemin modeli), Mohr-Coloumb zemin modeline göre gelişmiş bir yapıya sahip olan ve daha çok farklı türdeki zeminlerin davranışlarını

modellemek için 1970 yılında Duncan ve Chang tarafından geliştirilmiş non-lineer bünye modelinin yeni bir uyarlamasıdır. Bu model geoteknik mühendislerce çok kullanılan bir yöntem olduğundan zemin davranışının modellenmesinde çift rijitlik malzeme parametresi kullanılarak çok kolay bir şekilde elde edilir ve gerilme düzeyi Sürtünme açısı (ϕ), Dilatasyon açısı (ψ), ve Kohezyon (c) Mohr-Coloumb benzer şekilde belirlenmektedir. Zemin rijitliği basınçla paralel olarak artmaktadır. HS zemin modeli, temelde drenajlı üç eksenli basınç deneyi içerisinde belirlenen aksel deformasyon ve deviatör gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklini almaktadır. Bu model hiperbolik zemin modelinin yerini almıştır fakat arasında önemli farklar vardır. İlk farklı Hardening Soil modelde, elastisite teorisi yerine plastisite teorisi kullanılır. İkinci fark zemin dilatansı ve göçme durumu tanımlanır, üçüncü fark ise, kayma başlığı içermektedir (Bildik, 2010). HS modelinde, modellemek için kullanılan hesap adımları fazla olduğundan hesaplama süresi oldukça uzundur.

HS small zemin modelinde ise geçmişteki bağıl rijitlik matrisi ve yükleme durumuna ek olarak hesaplara dahil edilmektedir. Eğer yükleme durumları gevşeme ve yumuşama gibi problemler oluşturursa tekrarlı yükler hesaba katılmadığı için kullanılması uygun değildir. Genelde dairesel yüklemelerde kullanılmaktadır.

3.2.1.4.5. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli

Mohr Coulomb zemin modeli, hesaplamaların hızlı ve kısa zamanda yapılabildiği elasto-plastik zemin modelidir. Programda, giriş bilgileri olarak 5 parametre ihtiyacı duyulmaktadır. Bunlar; Kohezyon (c), Poisson oranı (μ), Sürtünme açısı (ϕ), Elastik modülü (E) ve Dilatasyon açısı (ψ)'dir. Fakat modelde, K_0 doğru bir şekilde seçilerek zeminde başlangıçtaki yatay gerilme durumu oluşturulabilir. Genellikle üç eksenli deneylerde başlangıçtaki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi E_0 olarak gösterilir. Başlangıç rijitlik modülünün ve deviatör gerilmesinin %50'sine karşılık gelen rijitlik modülü secant modülü olarak E_{50} tanımlanabilir (Şekil 4.6). Zeminlerde ilk yükleme modülü E_{50} ve boşaltma modülü E_{ur} de basınç paralel olarak artmaktadır. Plaxis çözümlerinde, MC ve Elastik modelde basit rijitlik modülü olarak Young modülü kullanırken aynı zamanda farklı rijitlik modülü gösterilebilir.



Şekil 3. 8.üç eksenli deneylerden E_0 ve E_{50} 'nin tanımlanması (Plaxis 2D V8-Manual)

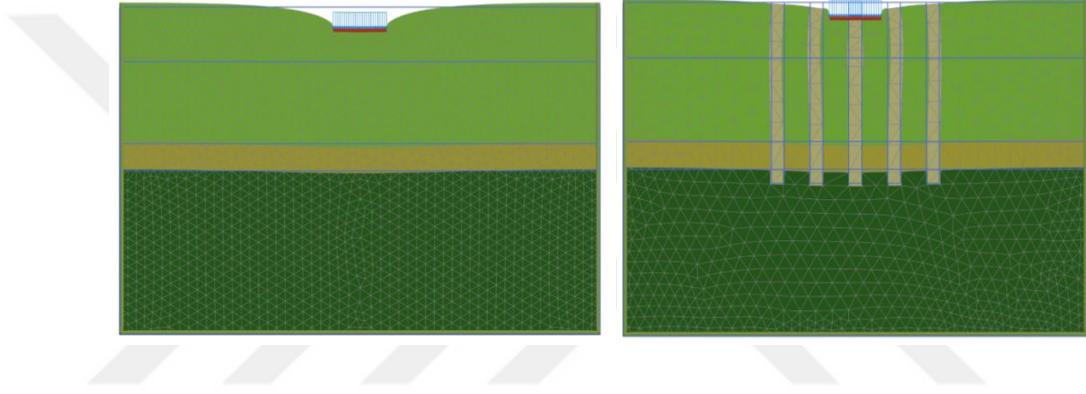
3.2.1.4.6. Jointed-Rock zemin modeli (JR)

Plastik kaymanın yalnızca sınırlı sayıda kayma doğrultularında gerçekleştiği anizotropik elasto-plastik model olarak tanımlanmaktadır. JR model, tabakalı veya birleşik kaya modellerinin davranışını kullanılmaktadır. Modelde giriş parametreleri için, Poisson oranı (ν), Elastisite modülü (E), Kohezyon (c), Dilatasyon açısı (ψ) ve Sürtünme açısı (ϕ) değerleri kullanılmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Deprem Etkisi Olmadan Darbeli Kırmataş Kolonlu Ve Kolonsuz Zeminlerin Oturmaların Ve Taşıma Güçlerin Analizlerin sonuçları

Oluşturulan darbeli kırmataş kolonlu ve darbeli kırmataş kolonsuz zemin modellerinin etkin deprem yükü olmadan (statik) analizleri yapılmış olup, oturmalar ve taşıma güçleri sırasıyla hesaplanmıştır. Oturmaların darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modellerinin analizden sonraki son halleri aşağıda şekillerde verilmiştir.



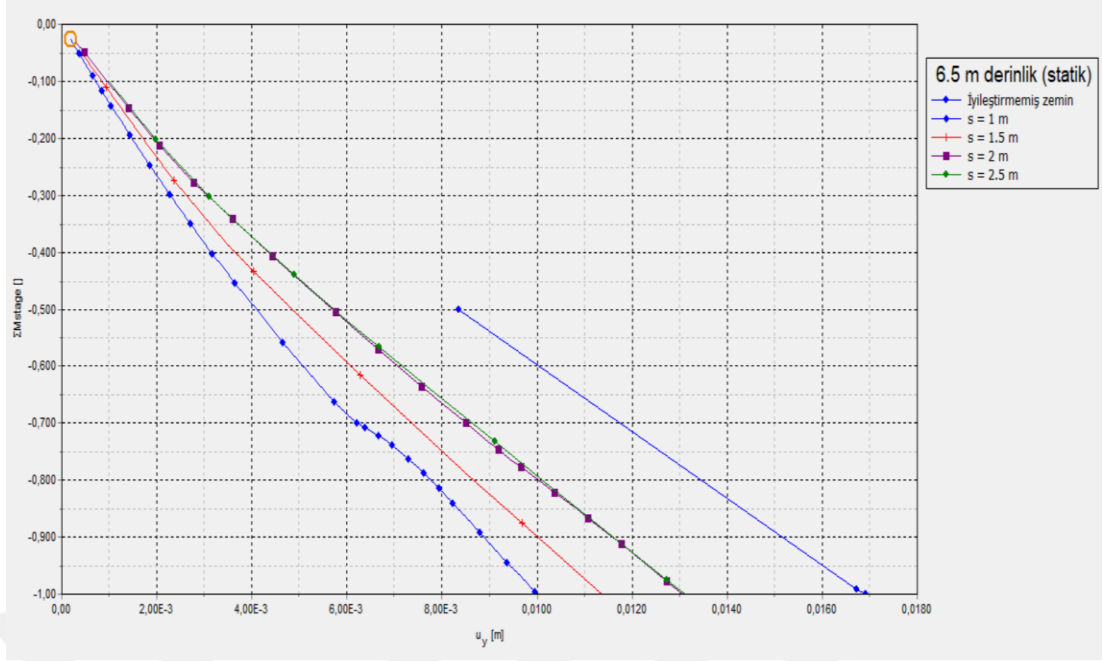
Şekil 4. 1. Deprem kuvveti etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin oturmaların analiz sonrasındaki hali.

Deprem kuvveti etkisi olmadan 90 KN/m^2 yayılı üniform yüke maruz kalan temel üzerinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu modellerin analizi sonucunda elde edilen oturma değerleri, darbeli kırmataş kolonlarının derinliğine ve kolonlarının arası mesafeye bağlı olarak değişimi aşağıdaki çizelge 4.1'de verilmiştir.

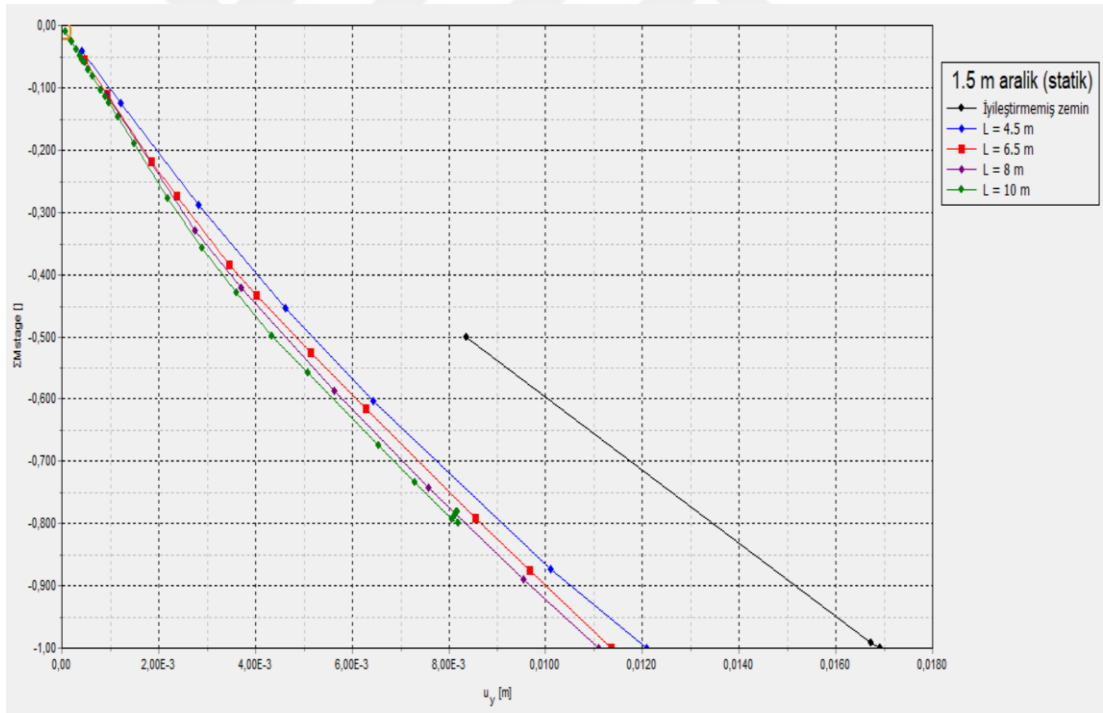
Çizelge 4. 1. Deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Oturma Değeri (mm)						
Darbeli Taş KolonsuzZeminde Oturma Değeri (mm)	Kolon Çapı(cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
17	50	L=4.5	14.00	13.85	12.09	8.70
		L=6.5	13.28	13.06	11.36	8.50
		L=8	13.26	12,20	11.09	7.50
		L=10	13.00	10.27	9.00	7.60

Deprem kuvveti etkisi olmadan yapılan analizlerde darbeli kırmataş kolonlu zeminlerde darbeli kırmataş kolonsuz zemine göre oturma değerlerinin azaldığı görülmüştür. Darbeli kırmataş kolonlu zeminlerde kolon aralıkları arttıkça oturma değerleri artma olduğu görülmektedir(Şekil 4.2). Analizler sırasında temel orta noktası (A noktası) yatay yer değiştirme değerlerinin referans noktası olarak seçilmiştir. Düşey kısmında ise yüklenen yükün temsili olarak çarpanları (Multipliers) ΣM_{stage} seçeneği olarak seçilmiştir. ΣM_{stage} , uygulanan belirli değişikliklerin miktarıdır. Dolayısıyla, değeri 0 ila 1 arasında değişmektedir. Bu öntanımlı yükün (90kN/m^2) %100'ünün uygulandığı ve belirtilen nihai duruma tamamen ulaşıldığı anlamına gelmektedir. Şekil 4.2. deki analizlerde darbeli kırmataş kolon derinliği sabit tutarak aralıkları değiştirilmiştir. Şekilde 4.3 de ise aralıkları sabit tutarak derinliği değiştirilmiştir. Şekiller incelediğinde darbeli kırmataş kolon boyları ile darbeli kırmataş kolon aralıklarındaki değişimler ile yapılan analizlerde sonuçların değerleri birbirine yakın olduğu görülmüştür.

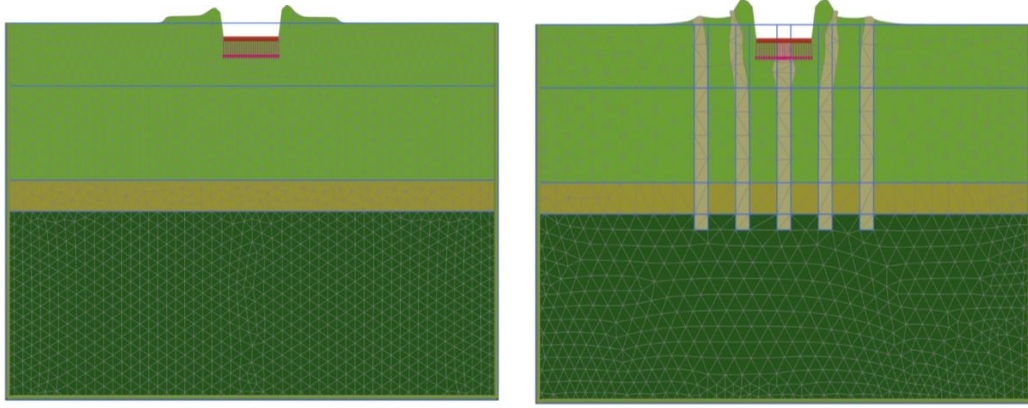


şekil 4. 2. Deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmatatş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.



şekil 4. 3. Deprem etkisi olmadan farklı darbeli kırmatatş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.

Taşıma güçlerinin elde edilebilmesi için darbeli kırmataş kolonlu ve darbeli kırmataş kolonsuz zemin modellerinin analizlerinden sonraki son hali aşağıdaki şekillerde elde edilmiştir.

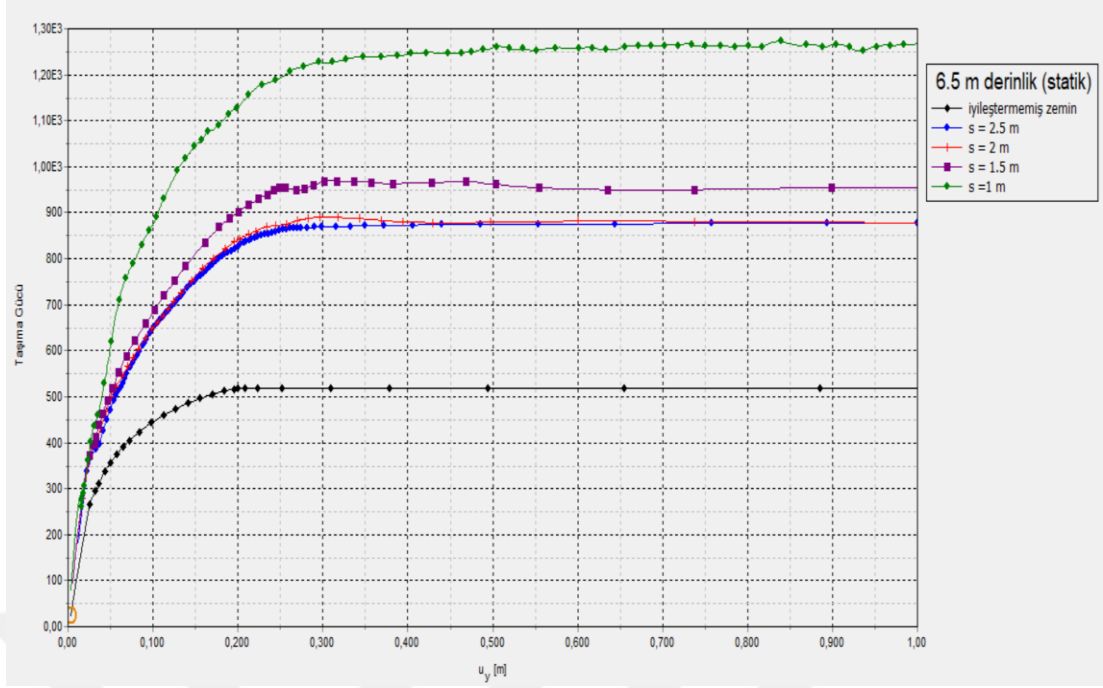


Şekil 4. 4. Deprem kuvveti etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin taşıma güçleri analiz sonrasındaki hali.

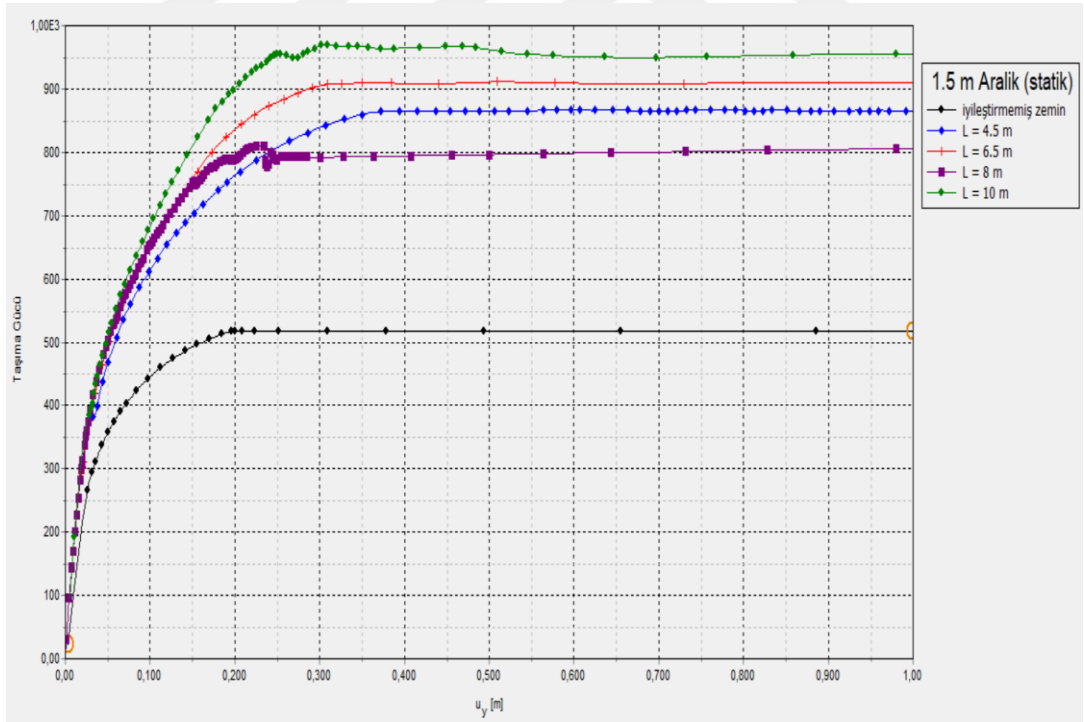
Oturma analizleri sonrasında benzer şekilde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu modellerin analizleri darbeli kırmataş kolonlarının derinliğine ve kolonlarının arası mesafe değişimine bağlı olarak yapılmış olup analiz sonucunda elde edilen taşıma gücü değerlerinin değişimi aşağıda çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4. 2. deprem etkisi olmadan darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Taşıma Gücü Değerleri (kN/m ²)						
Darbeli Taş Kolonsuz Zeminde Taşıma Gücü Değerleri (kN/m ²)	Kolon Çapı (cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
259.20	50	L=4.5	435.15	435.65	438.10	595.00
		L=6.5	435.85	436.90	455.45	630.00
		L=8	437.95	437.20	457.45	634.00
		L=10	438.00	439.20	477.65	636.50



Şekil 4. 5. deprem etkisi olmadan farklı darbeleri kırma taşıma kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.



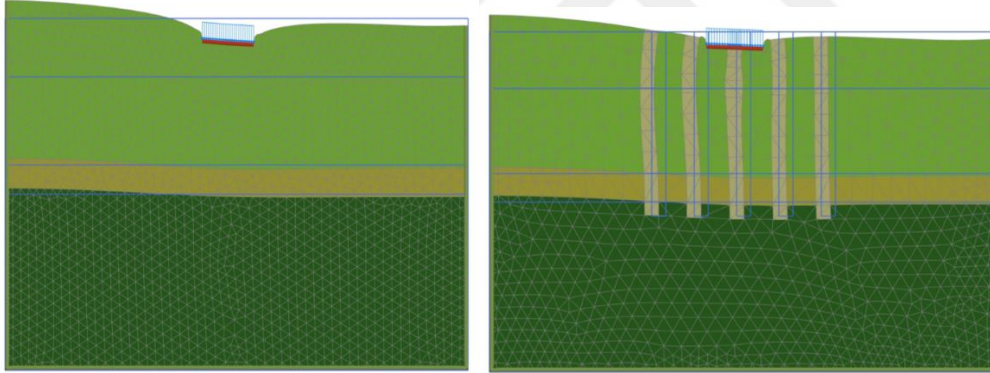
Şekil 4. 6. deprem etkisi olmadan farklı darbeleri kırma taşıma kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği

Sismik yüklerin etkisi olmadan hesaplanan analizlerde darbeli kırmataş kolonlu zeminlerde darbeli kırmataş kolonsuz zeminlerine göre taşıma gücü değerlerinin arttığı görülmektedir. Darbeli kırmataş kolonlu zeminlerde kolonların arasındaki mesafe küçüldüğünde taşıma gücü değerlerinin artmış olduğu görülmüştür. Bununla birlikte kolonların boyları arttıkça taşıma gücü değerleri de artmaktadır. Taşıma gücü grafikleri incelediğinde darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilen zeminde kolon aralıkları kolon boylarına göre birbirine daha yakın olduğunu görülmektedir.

4.2. Deprem Yüğü (k_h) Etkisi Altında Darbeli Kırmataş Kolonlu ve Kolonsuz Zeminlerin Oturmalarının ve Taşıma Güçlerinin Analizlerinin Sonuçları

4.2.1. Yıkıcı Depremlerde önerilen ($k_h = 0.2$) analizlerinin sonuçları

Darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerde analizler önerilen ($k_h = 0.2$) yarı statik katsayısının kullanılması ile yapılmıştır. Darbeli kırmataş kolonsuz ve darbeli kırmataş kolonlu zemin modellerinin düşey kuvvet ve deprem yüküne maruz kaldıktan sonraki oturma durumu aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

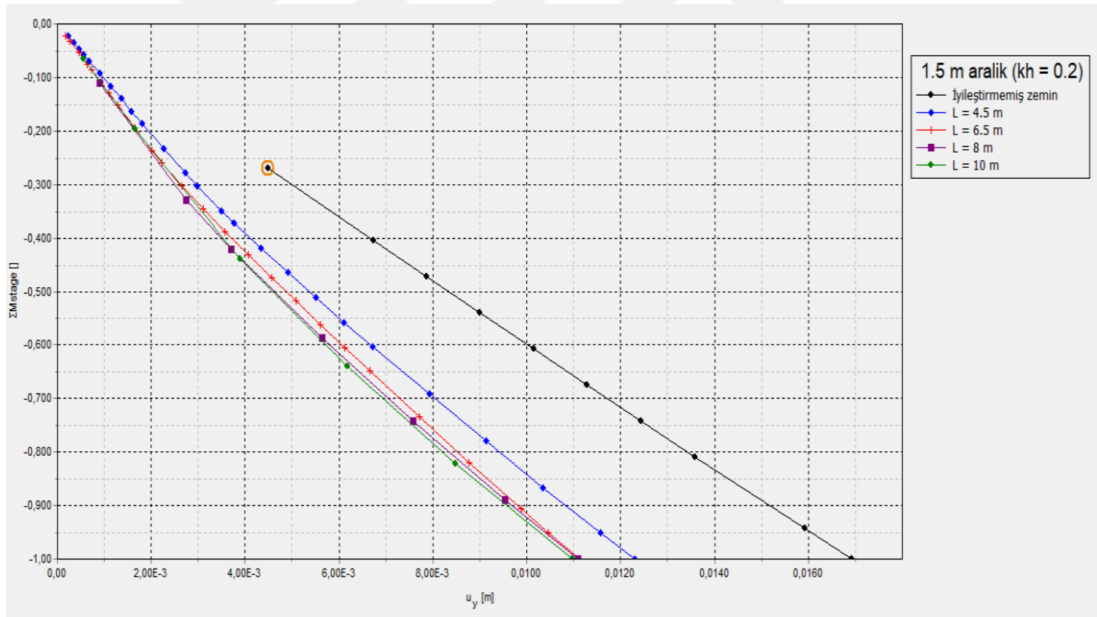


Şekil 4.7. Deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin oturma analiz sonrasındaki hali

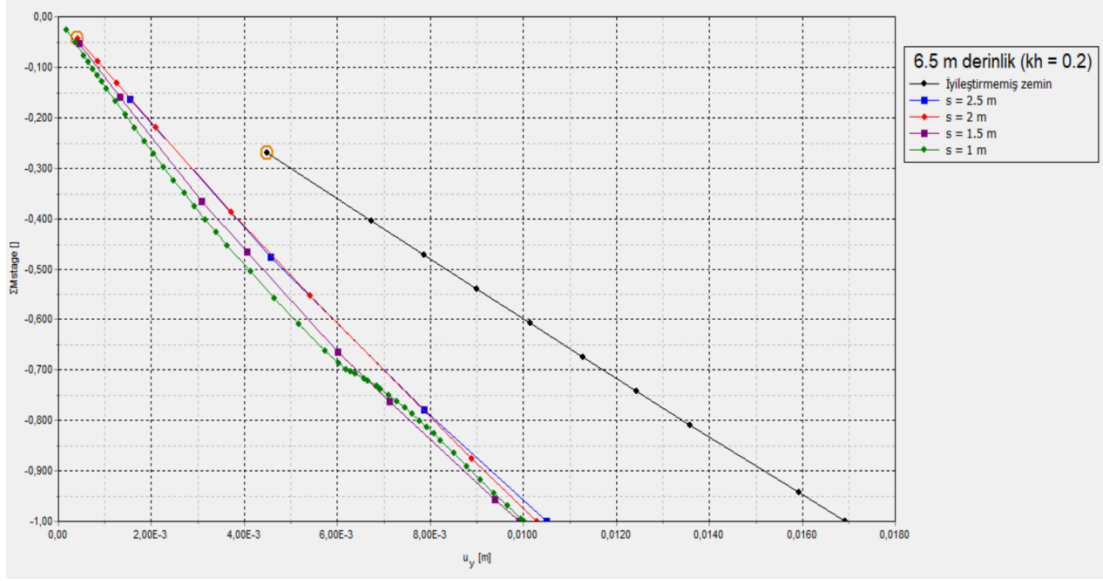
Deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu modellerinin kolonlar derinliğine ve kolonlar arası mesafeye bağlı olarak değişiminin esas alan analizleri sonucunda elde edilen oturma değerleri aşağıda çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.3. deprem etkisinden($kh = 0.2$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Oturma Değeri (mm)						
Darbeli Taş Kolonsuz Zeminde Oturma Değeri (mm)	Kolon Çapı (cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
18	50	L=4.5	14.82	14.50	12.09	12.4
		L=6.5	13.86	13.44	12.00	11.68
		L=8	13.86	13.00	11.09	10.19
		L=10	13.84	12.10	10.81	10.05

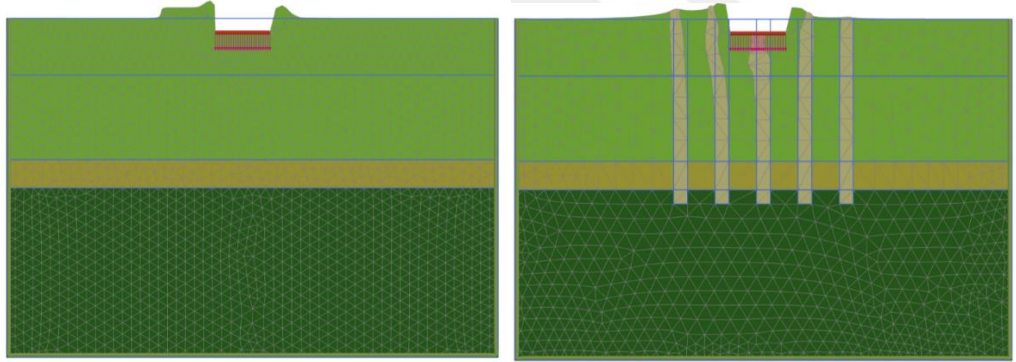


Şekil 4.8. Deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği.



Şekil 4. 9. deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği

Zemin modellerinin deplasman ve deprem yüküne maruz kaldıktan sonraki taşıma güçlerinin durumu ise aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

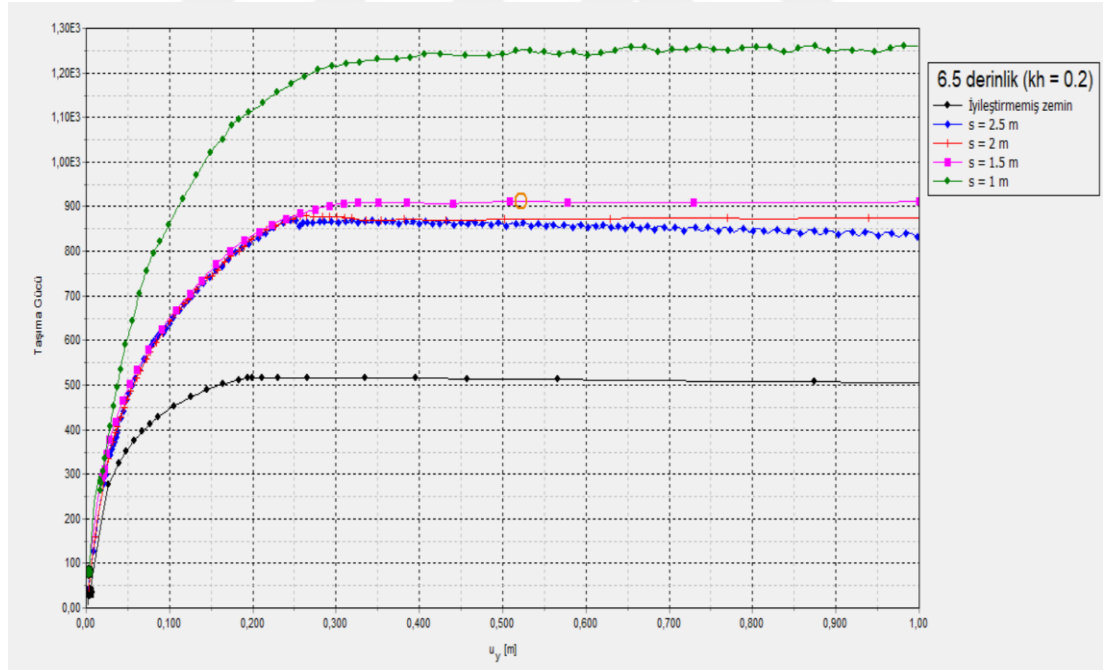


Şekil 4. 10. Deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonsuz ve kolonlu zemin modelinin taşıma gücü analiz sonrasındaki hali

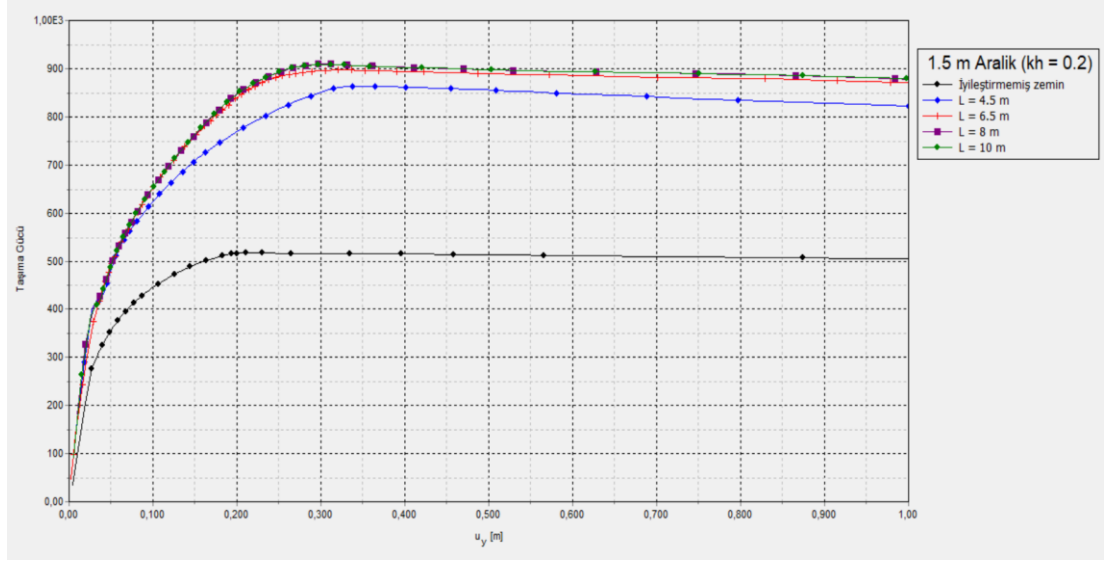
Darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerde deprem etkisi dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4. 4. deprem etkisinden(kh = 0.2) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma ve taşıma gücü değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Taşıma Gücü Değerleri (kN/m ²)						
Darbeli Taş KolonsuzZeminde Taşıma Gücü Değerleri (kN/m ²)	Kolon Çapı(cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
252.40	50	L=4.5	412.00	410.70	427.90	550
		L=6.5	415.00	421.70	437.70	570
		L=8	414.00	424.85	446.70	590
		L=10	416.25	432.25	459.70	598



Şekil 4.11. Deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.



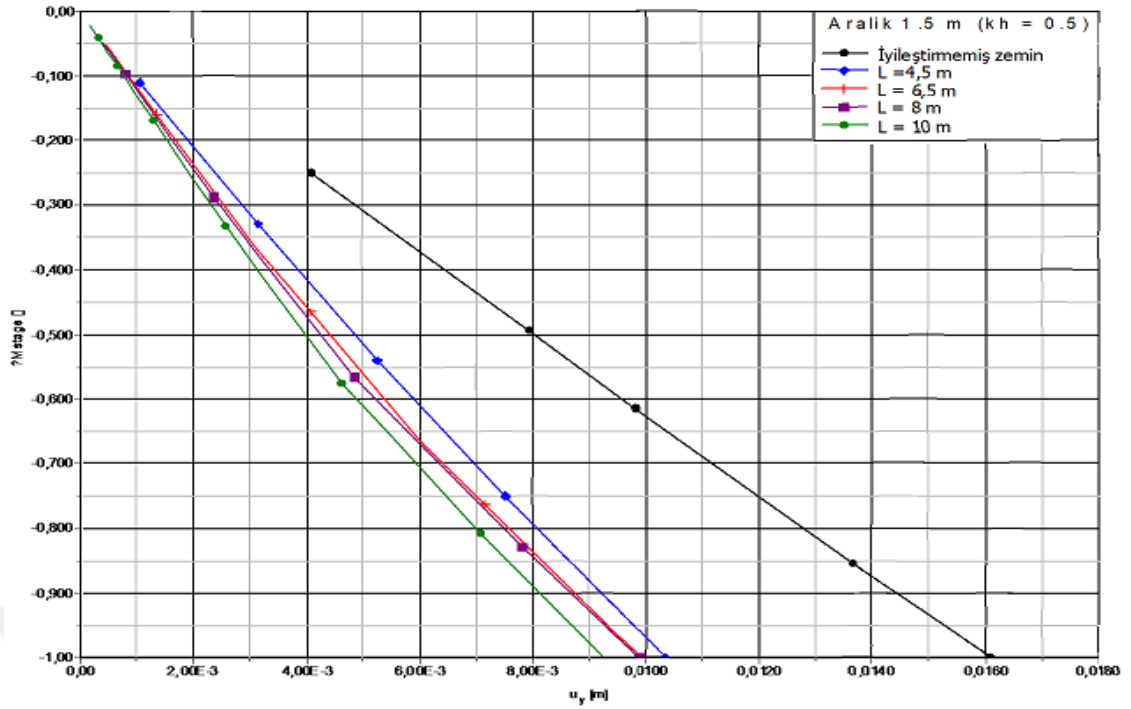
Şekil 4.12. Deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.

4.2.2. Katastropik (Felakat Boyutunda) Depremlerde önerilen ($k_h = 0.5$) analizlerin sonuçları

Darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zeminlerde yarı statik katsayısı değiştirilerek hesaplanmıştır. Katastropik deprem etkisi dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda elde edilen oturma değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deprem etkisinden ($k_h = 0.5$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin oturma değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Oturma Değeri (mm)						
Darbeli Taş Kolonsuz Zeminde Oturma Değeri (mm)	Kolon Çapı (cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
20	50	L=4.5	19.74	18.65	18.63	18.7
		L=6.5	18.42	18.49	17.88	18.01
		L=8	20.34	17.30	17.77	18.17
		L=10	22.10	17.97	17.65	17.50

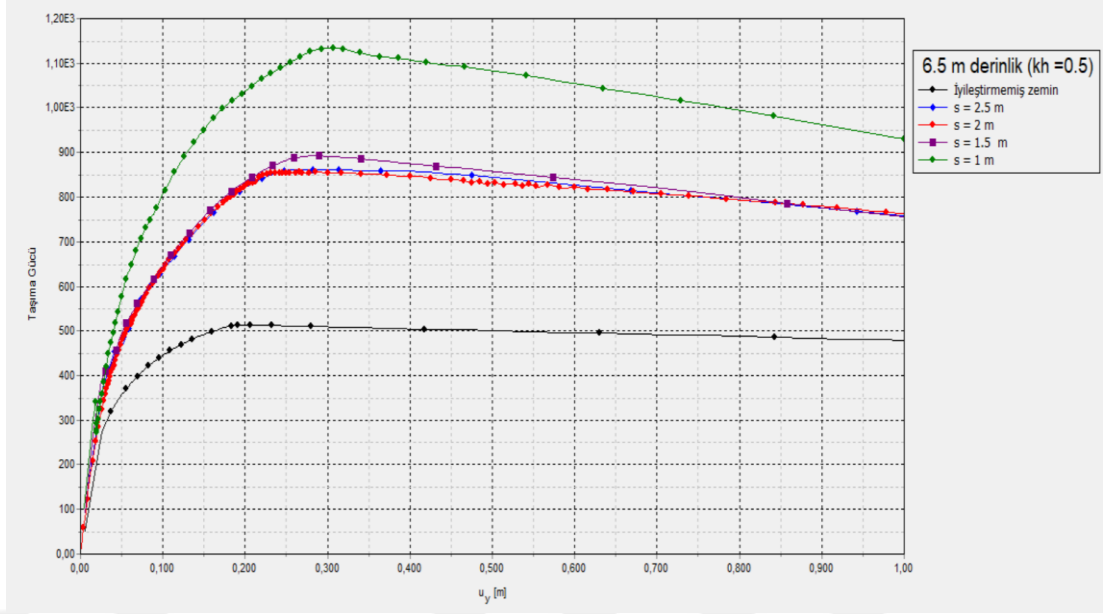


Şekil 4. 13. Deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin oturma grafiği

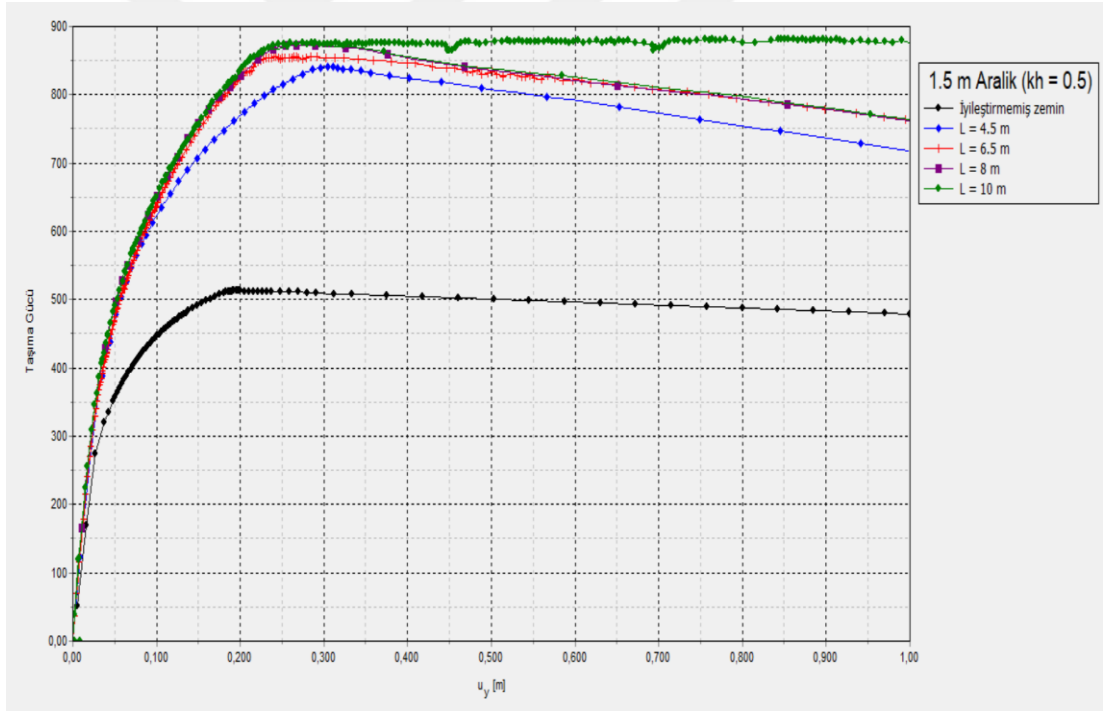
Katastrofik deprem etkisi dikkate alınarak yapılan analizler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4. 6. Deprem etkisinden ($k_h = 0.5$) sonra elde edilen darbeli kırmataş kolonlu ve kolonsuz zemin modelinin gücü değerleri

Darbeli Taş Kolonlu Zemin Taşıma Gücü Değerleri (kN/m^2)						
Darbeli Taş Kolonlu Zeminde Taşıma Gücü Değerleri (kN/m^2)	Kolon Çapı (cm)	Kolon Derinliği (m)	Kolonların Aralıkları (m)			
			s=2.5	s=2	s=1.5	s=1
239.50	50	L=4.5	361.80	359.05	354.70	464.5
		L=6.5	369.90	380.95	378.35	450.5
		L=8	375.50	381.05	380.00	484.0
		L=10	377.00	383.35	397.40	505.0



Şekil 4. 13. Yarım statik ($kh=0.5$) deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon aralıkları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.



Şekil 4. 14. Yarım statik ($kh=0.5$) deprem etkisinde farklı darbeli kırmataş kolon boyları ve kolonsuz zemin modelinin taşıma gücü grafiği.

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan darbeli kırmataş kolonlarının deprem kuvveti etkisindeki davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile detaylı olarak incelenmiştir. Analizlerin tamamı göz önüne alındığında, darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilen zeminlerin taşıma gücü darbeli kırmataş kolonsuz zeminlerin taşıma gücüne göre yüksek olduğu ve darbeli kırmataş kolonların kullanıldığı zeminlerde oturmaların da azaldığı görülmüştür. Deprem yükü olmadan ve sonrasında deprem yükü etkisindeki darbeli kırmataş kolonlarda kolon derinliğinin artmasına bağlı olarak taşıma gücü değerlerindeki artış daha belirgin hale gelmiştir. Darbeli kırmataş kolonlar arası mesafenin artmasıyla taşıma gücü değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Kolon derinliğinin artmasına bağlı olarak oturma değerlerinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde özetlenmiştir.

- Yapılan çalışmada darbeli kırmataş kolonlu ve darbeli kırmataş kolonsuz modeller kendi içinde kıyaslandığında darbeli kırmataş kolonu ile iyileştirilen zemin modellerinin taşıma gücü, darbeli kırmataş kolonsuz zemin modellerinin taşıma gücüne göre ortalama olarak 1.5 ila 3 kat mertebesinde artmıştır. Diğer taraftan deprem etkisindeki darbeli kırmataş kolonlu zemin modellerinin taşıma gücü değerleri kolonsuz zemin modellerinin taşıma gücü değerlerine göre 1.5-2.4 kat daha fazla olmaktadır.
- Deprem kuvveti etkisi olmadan yapılan analizlerde, darbeli kırmataş kolonu ile iyileştirilen zemin modellerinin oturması kolonsuz zemin modellerinin oturmasına göre ortalama 1.2- 2.3 kat daha az olmaktadır. Deprem kuvveti etkisinde yapılan analizlerde ise oturma darbeli kırmataş kolonlu zemin modelinde kolonsuz zemin modeline göre 1.2-2.4 kat daha azalmaktadır.
- Yapılan çalışmada darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilen zemin modellerinde, uygulanan kolon uzunluğunun (4.5 m, 6.5 m, 8 m, 10 m,) artışına bağlı olarak taşıma gücünde de artış meydana gelmiştir. Aynı şekilde kolon uzunluğunun artışına bağlı olarak oturmalarda da azalma meydana gelmiştir.
- Darbeli kırmataş kolonlu zemin modellerinde kolon aralıklarının (1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m) artışına bağlı olarak taşıma gücünde azalma meydana gelmiştir. Diğer taraftan kolon aralıklarının artışına olarak oturmalarda da artış meydana gelmiştir.
- Darbeli kırmataş kolonlarla iyileştirilen zemin modellerine farklı sismik yükler uygulandığında taşıma gücünde azalma olup oturmalarda da yükselme meydana

gelmektedir. Başka deyişle kh:0.2 sismik yük katsayısı zemine uygulandığında taşıma gücünde ortalama %6 , kh:0.5 uygulandığı zaman ise taşıma gücünde ortalama %16 azalma meydana gelmiştir..

- Deprem kuvveti etkisinde darbeli kırmataş kolonlu zeminlerde meydana gelen yatay deplasman (u_x) kolonsuz zeminlere göre düşük bulunmuştur. Ayrıca kolonlarla iyileştirilen zemin modellerinde kendi içinde kıyaslandığında yükselme meydana gelmiştir.
- Elde edilen oturmalar ve taşıma gücü değerleri genel olarak incelediğinde 10 m derinliğindeki 1 m aralıklı darbeli kırmataş kolon uygulanmış modellerin taşıma gücünün en yüksek değerde olduğu, oturmalara bakıldığında ise en düşük değere sahip olduğunu görülmüştür. Burada darbeli kırmataş kolon uzunluğunun artması ve darbeli kırmataş kolon aralığının azalması ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- Darbeli kırmataş kolon ile iyileştirilen zeminde kolon aralıklarının değişimi ile elde edilen taşıma gücü değerlerinin kolon boylarının değişimi ile elde edilen sonuçlara göre birbirine daha yakın olmuştur. Oturma değerleri ise darbeli kırmataş kolon boylarının değişimi ile elde edilen sonuçlar kolon aralıklarına göre elde edilen sonuçlardan birbirine yakın olduğu görülmüştür..
- Darbeli kırmataş kolonsuz zeminler ile darbeli kırmataş kolonlu zeminler karşılaştırıldığında, darbeli kırmataş kolonlarının, zeminin taşıma gücünü kayda değer bir şekilde artırdığı ve oturmalarıda azalttığı sonucuna ulaşmıştır. İhtiyacı bağlı olarak darbeli kırmataş kolon uzunluğu arttırılarak veya darbeli kırmataş kolon aralığı azaltılarak istenilen taşıma gücü ve oturma değerlerine ulaşabilir. Özellikle sert zeminin derinde bulunduğu yada hiç bulanmadığı durumlarda darbeli kırmataş kolonlar problemlili zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.
- Darbeli kırmataş kolonlar genel olarak geniş alanlarda kullanıldığı için ekonomi açısından sonuçlara baktığımızda minimum darbeli kırmataş kolon derinliğinin 6.5 m olması ve aralıklarının ise 1-2 m arasında olmasına önerilmektedir.
- Çalışmada bütün modeller düşey yük, deplasman yükü ile birlikte deprem yüküne de maruz kalmış olup, deprem yükü etkisinde de darbeli kırmataş kolonların iyi performans verdiği görülmüştür. Bu yüzden deprem bölgelerinde de problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde, darbeli kırmataş kolonlar uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, C. H. and Edil, T. B. 2007. Behaviour Of Geogrid-Reinforced Load Transfer Platforms For Embankment On Rammed Aggregate Piers. *Geosynthetics International*, 14:3, 141-153.
- Allgood, C., Wepler, L., Lien, B. and Fox, N. S. 2003. Geopier Intermediate Foundation Systems–Case Studies For Building Foundations Over Soft Organic Soils And Peat. In Proceeding Of The Nottingham Problematic Soils Conference.
- Anonim, 2019. Stone column. <http://www.naturalzemin.com/en/services/stone-column/>. (Erişim tarihi 22.05.2019).
- Anonim, 2019. Fore kazık. <http://www.yasinyapizemin.com/wp-content/uploads/2015/05/fore-kazik-4.jpg>. (Erişim tarihi 20.05.2019).
- Aza-Gnandji, R. and Kalumba, D. 2014. Experimental And Numerical Analysis Of The Behaviour Of Rammed Stone Columns Installed In A South African Soft Soil. *International Of Engineering Science And Innovative Technology (IJESIT)*, 3.
- Bal, E. K., Öner, L. ve Çet, K. Ö. 2017. Darbeli Kırmataş Kolonlar® (Dkk) İle İyileştirilen Liman Sahasında Alan Yükleme Deneyi İle Oturma Davranışının Gözlemlenmesine İlişkin Vaka Analizi. 7. Geoteknik Sempozyumu
- Beşler, O. F. 2013. A Soil Improvement Case Study Using Rammed Stone Column Systems. Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Ankara.
- Blackburn, T. W. and Farrell, T. M. 1998. Shopping Center Saved By Short Aggregate Piers. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 9.06, 988-991.
- Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P. A. 2002. PLAXIS Version 8: Finite element code for soil and rock analyses. *AA Balkema, Netherlands*.
- Carchedi, D. R., Monaghan, J. and Parra, J. 2006. Innovative stabilization of peat soils for railroad foundation using rammed aggregate piers. In *Ground Modification and Seismic Mitigation*, 127-134.
- Cetin, K. O., Bal, E. K. and Oner, L. 2016. Performance-Based Assessment Of Rammed Aggregate Piers. *International Congress On Advances In Civil Engineering*, Bogazici University, İstanbul.
- Chen, J. F., Han, J., Oztoprak, S. and Yang, X. M. 2009. Behavior of single rammed aggregate piers considering installation effects. *Computers and Geotechnics*, 36:7, 1191-1199.
- Çadır, C. 2016. Taş Kolon İle İyileştirilmiş Şevlerin Sonlu Eleman Yöntemi İle Sismik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Ana Bilim Dalı, Yozgat.
- Çinicioğlu, S. F. 2005. Zeminlerde Statik Ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı Ve Hesabı. Seminer, IMO İstanbul Şubesi.

- Day, R. W. 2004. *Geoteknik deprem mühendisliği el kitabı*. Gazi Kitabevi.
- Demir, H. 2007. Taş Kolon ve Geopier Uygulaması İle Zemin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Ana Bilim Dalı, 175, İstanbul.
- Demir, S. 2011. Darbeli Kırmataş Kolonların İmalatında Zemin Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Ana Bilim Dalı, 108, İstanbul.
- Farrell, T. and Taylor, A. 2004. Rammed Aggregate Pier Design and Construction in California; Performance, Constructability, and Economics. In *Structural Engineers Association of California Convention Proceedings. Placerville, CA. and liquefied behavior, Journal Geotech. Geoenviron. Eng.* 132:1, 54-62.
- Farrell, T., Fitzpatrick, B. and Kenney, W. 2008. Uplift Testing Of Rammed Aggregate Pier Systems. *Geotechnical Earthquake Engineering And Soil Dynamics Iv*, 1-14.
- FitzPatrick, B. T. and Wissmann, K. J. 2002. Geopier Shear Reinforcement for Global Stability and Slope Stability. *Technical Bulletin*, 5.
- FitzPatrick, B. T. and Wissmann, K. J. 2007. support of storage tanks using rammed aggregate piers. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 1503-1511.
- Fox, N. S. and Edil, T. B. 2001. Case Histories Of Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement Construction Over Peat And Highly Organic Soils. *Soft Ground Technology*, 146-157.
- Fox, N. S., Wepler, L. R. and Scherbeck, R. 2004. Geopier Soil Reinforcement System–Case Histories of High Bearing Capacity Footing Support and Floor Slab Support. Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- Fox, N. S. and Cowell, M. J. 1998. Geopier Foundation and Soil Reinforcement Manual. Geopier Foundation Company, Inc., Scottsdale, Arizona.
- Gaul, A. J. 2001. Embankment Foundation Reinforcement Using Rammed Aggregate Piers In Iowa Soils. Master Of Science Iowa State University Digital Repository.
- Gergin, A. ve Görgün, B. 2017. Yeraltı Su Seviyesi Yüksek Zeminlerde Temel Tasarımına Deprem Etkisi. 8.
- Halabian, A. M., Naeemifar, I. and Hashemolhosseini, S. H. 2012a. Numerical Analysis Of Vertically Loaded Rammed Aggregate Piers And Pier Groups Under Dynamic Loading. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 38, 58-71.
- Halabian, A. M., Naeemifar, I. and Hashemolhosseini, S. H. 2012b. Numerical Analysis Of Vertically Loaded Rammed Aggregate Piers And Pier Groups. *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement*, 165:3, 167-181.
- Hall, K., Wissmann, K. J., Caskey, J. M. and FitzPatrick, B. T. 2002. Soil Reinforcement Used to Arrest Bearing Capacity Failure at a Steel Mill.

Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques. Kuala Lumpur, Malaysia.

Kanmaz, H. 2014. Rijid Kolonların Farklı Zemin Ortamlarındaki Performansı. Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 95, İstanbul.

Konuk, Ç. 2005. Şev Stabilitesi Analizi ve Şevlerde Deprem Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 196, İstanbul.

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 Geoteknik Anabilim Dalı, 152, İstanbul.

Kuruoğlu, O., Horoz, A. and Erol, O. 2013. Settlements under footings on rammed aggregate piers. In *Proc., 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, French Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*, 3455-3458.

Kuruoğlu, Ö. 2008. A New Approach To Estimate Settlements Under Footings On Rammed Aggregate Pier Groups. Doctoral Dissertation, Graduate School of the Middle East Technical University, 163, Ankara.

Kwong, H. K., Lien, B. and Fox, N. S. 2002. Stabilizing Landslides Using Rammed Aggregate Piers. In *Proc., 5th Malaysian Road Conf.*, Kuala Lumpur, Malaysia.

Laman, M., Yıldız, A., Örnek, M. ve Demir, A. 2008. Zeminlerin Mekanik Davranışının Modellenmesi. XV. Ulusal Mekanik Kongresi, Isparta.

Lawton, E. C. 2000. Performance of GEOPIER reinforced soil foundations during simulated seismic tests on I-15 bridge bents. *Transportation research record*, 1736:1, 3-11.

Lawton, E. C. and Fox, N. S. 1994a. Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers. In *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, 962-974. .

Lawton, E. C. and Warner, B. J. 2004. Performance of a group of Geopier elements loaded in compression compared to single Geopier elements and unreinforced soil. *Final Rep., No. UUCVEEN*, 04-12.

Lawton, E. C., Fox, N. S. and Handy, R. L. 1994. Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers. In *In-situ deep soil improvement*, 121-132.

Lien, B. H. and Fox, N. S. 2001. Case Histories of Geopier Soil Reinforcement for Transportation Applications. Proceedings, Asian Institute of Technology Conference, Bangkok, Thailand.

Lien, B. H., Fox, N. S., Morales, E. M. and Han K. K. 2002a. Case Histories and Design of Floating Foundations With Geopier Rammed Aggregate Pier Elements. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Techniques. Kuala Lumpur, Malaysia.

- Lien, B., Fox, N. S. and Kwong, H. K. 2002b. Geopier Floating Foundations—A Solution for Roadway Embankments Over Soft Soils in Asia. In *Proceedings of the 2nd World Engineering Congress, Sarawak, Malaysia*.
- Lien, B.H., Fox, N.S. and Kwong, H. K. 2003. Rammed aggregate pier soil reinforcement system for roadway embankments over soft soils and peat. *Proceedings of the Twelfth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 489-492.
- Lillis, C., Lutenecker, A. J. and Adams, M. 2004. Compression And Uplift Of Rammed Aggregate Piers In Clay. *Geosupport 2004*, 497-507.
- Mitchell, J. K. 1981. Soil Improvement: State-of-the-Art Report. Session 12, Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden.
- Mungan, H. 2016. Zeminin Kırmataş Kolonları İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 89, İstanbul.
- Oliveira, T. M. De, Albino, J. L., Duarte, L. N., And Luís De Souza, T. P. Da S. E. 2017. Economic Technical Feasibility Of Modified Geopier Rap. *Modern Environmental Science And Engineering*, 03:07, 473-478.
- Osman, M. A. and Hashim, S. H. 2016. Experimental Evaluation Of Geopier Foundation. *Journal Of Building And Road Research*, 14:1.
- Osmanoğlu, D. 2007. Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 137. İstanbul.
- Pham, H. T., White, D. J. and Wissmann, K. J. 2005. Behavior Of Isolated Rammed Aggregate Piers From A Finite Element Analysis. *Support mechanism of rammed aggregate piers*, 1050, 46.
- Pitt, J. M., Gaul, A., Hoevelkamp, K. and White, D. J. 2003. Highway Applications For Rammed Aggregate Piers In Iowa Soils(No. TR-443). Iowa. Department Of Transportation. Bureau Of Research And Technology.
- Rao, S. S. 2005. *The Finite Element Method in Engineering*, Pergamon Pres, Oxford, 625s.
- Razeghi, H. R., Niroumand, B. and Ghiassian, H. 2011. A field study of the behavior of small-scale single rammed aggregate piers, *testing methodology and interpretation. Scientia Iranica*, 18:6, 1198-1206.
- Richards, R., Elms, D.G. and Budhu, M. 1993. Seismic bearing capacity and settlements of foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116:5, 662-674.
- Seed, H. B. and Chan, C. K. 1966. Clay strength under earthquake loading conditions. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div*, 92,4723.
- Sękowski, J., Kwiecień, S. and Kanty, P. The Influence Of Rammed Stone Column

- Formation Process On Mechanical Parameters Of The Surrounding Weak Soil. In XV Danube–European Conference On Geotechnical Engineering, 226, 09-11.
- Sharma, K., Deng, L. and Noguez, C. C. 2016. Field Investigation On The Performance Of Building Structures During The April 25, 2015, *Gorkha Earthquake In Nepal. Engineering Structures*, 121, 61-74.
- Stuedlein, A. W. and Holtz, R. D. 2013. Bearing Capacity Of Spread Footings On Aggregate Pier Reinforced Clay. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 139:1, 49-58.
- Sunbul, A. B., Mungan, H. and Sünbül, F. 2018. Evaluation of Static and Dynamic Behavior of Rigid Columns. *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2:1, 17-26.
- Şahinkaya, F. 2016. Yüzen Taş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminlerin Sismik Yükler Altındaki Davranışının Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 151, Yozgat.
- Tekin, A. (2018). Sonlu elemanlar ve limit denge yöntemleri ile şev stabilitesi analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geoteknik Anabilim Dalı, 154, İstanbul.
- Thompson, M. J. and Suleiman, M. T. 2010. Numerical Modeling Of Rammed Aggregate Pier Construction. *Geoflora* 2010, 1460-1469.
- Thompson, M. J., Wissmann, K. J. and Pham, H. T. 2009. Performance Monitoring Of A Rammed Aggregate Pier Foundation Supporting A Mechanically Stabilized Earth Wall. *Journal Of Performance Of Constructed Facilities*, 23:4, 244-250.
- Verildi, T. E., Savunuldu, T. ve Dan, T. 2007. Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Plaxis Programında Analiz Edilmesi. 137.
- White, D. J. and Pham, H. T. 2005. Influence Of Lateral Stress On Soil Behavior. *Support mechanism of rammed aggregate piers*, 1050, 9.
- White, D. J. and Suleiman, M. T. 2004. Design of short aggregate piers to support highway embankments. *Transportation research record*, 1868:1, 103-112.
- White, D. J., Pham, H. T. V. and Hoevelkamp, K. K. 2007. Support Mechanisms Of Rammed Aggregate Piers. I: Experimental Results. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 133:12, 1503-1511.
- White, D. J., Wissmann, K. J., Barnes, A. G. and Gaul, A. J. 2002. Embankment Support: A Comparison Of Stone Column And Rammed Aggregate Pier Soil Reinforcement. In *Proceedings Of The 55th Canadian Geotechnical And 3rd Joint IAH-CNC And CGS Groundwater Specialty Conferences*, 20-23.
- White, D. J. and Thomsan, M. J., 2006. Construction and Performance Monitoring of a Mechanically Stabilized Earth Wall Supported by Rammed Aggregate Pier. Iowa State University.
- Wissman, K. J., Lawton, E. C. and Farrell, T. M. 1999. Behavior of Geopier supported

foundation systems during seismic events. *Geopier Foundation Company, Inc., Technical bulletin*, 1.

Wissmann, K. J. and Fox, N. S. 2000. Design and Analysis of Short Aggregate Piers Used to Reinforce Soils for Foundation Support. Proceedings, Darmstadt Technical University Colloquium. Darmstadt, Germany.

Wissmann, K. J., Fitzpatrick, B. T., White, D. J. and Lien, B. H. 2002. Improving Global Stability And Controlling Settlement With Geopier Soil Reinforcing Elements. In Proceedings, 4th International Conference On Ground Improvement, 26-28, Kuala Lumpur, Malaysia .

Yakar, O. T. 2009. *Bilgisayar Programı Yardımı İle Kumlu Şevlerin Deprem Yükleri Altındaki Davranışı*. Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 138, İstanbul.

Yalçınkaya, E. 2004. Bir Boyutlu Modeller İçin Zemin Büyütmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 17:1.

Zeng, W. 2010. Assessment Of Matrix Soil Improvement Using Displacement Aggregate Piers. Master Of Science, Iowa State University, Digital Repository.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Nithiarasu, P. and Zhu, J. Z. 1977. The finite element method. London: McGraw-hill,3.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad Salaad Abdullahi MOHAMED
Doğum Yeri ve Tarihi Somaliya/Erigavo/02-02-1990
Lise Aljazeera Secondary School (2008-2012)
Lisans Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2013-2017)
Yüksek Lisans Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2017-2019)

İletişim

E-post Salaad48@gmail.com

Telefon +905535455868

Çalışılan Kurumlar Samsun Kale Yapı Denetim (2018-2019)