

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Güldem KORKMAZ**

**ZEMİN İYİLEŞTİRMEDE RİJİT KOLON ETKİSİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA-2019**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEMİN İYİLEŞTİRMEDE RİJİT KOLON ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Güldem KORKMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu Tez / /2019 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Prof. Dr. A. Azim YILDIZ  
DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK  
ÜYE

Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL  
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.  
**Kod No :**

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

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

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZEMİN İYİLEŞTİRMEDE RİJİT KOLON ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Güldem KORKMAZ

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
Yıl: 2019, Sayfa: 203

Jüri : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIÇIK  
: Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL

Bu çalışmada taş kolon, derin karışım ve jet grout gibi zemin iyileştirme yöntemleriyle oluşturulan rijit kolonların davranışı sayısal analizler yardımıyla araştırılmıştır. Sayısal analizlerde rijit kolonlarla ilgili detaylı parametrik çalışma yapılarak, farklı tasarım parametrelerinin (derinlik iyileştirme oranı, alan yerleşim oranı ve kolon rijitliği gibi) kompozit temel sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca tez kapsamında, literatürde yer alan derin karışım kolon yöntemi ile iyileştirilmiş bir arazi uygulamasının üç boyutlu sayısal analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları ile arazi ölçümleri karşılaştırılarak sayısal analizlerin doğruluğu gösterilmiştir. Aynı geometrik model ve zemin parametreleri kullanılarak farklı rijitliklere sahip taş kolon, derin karışım ve jet grout kolonları üç boyutlu olarak modellenmiştir. Bu analizlerde farklı rijitliğe sahip kolonların kompozit temel sistem davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma sonuçlarından, doğru ve güvenilir analizler yapıldığı takdirde uygulamada daha ekonomik, daha hızlı ve kolay yöntemler ile proje kriterlerinin sağlanabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Rijit kolon, Yüzen rijit kolon, Derin karışım kolon, Taş kolon, Jet grout kolon.

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# THE STUDY OF THE EFFECT OF THE RIGID COLUMN ON SOIL IMPROVEMENT

Güldem KORKMAZ

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

Supervisor : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
Year: 2019, Pages: 203  
Jury : Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Asst. Prof. Dr. Baki BAĞRIAÇIK  
: Asst. Prof. Dr. Firdevs UYSAL

In this study, the behaviour of embankment or foundation on soft clays improved with rigid column, such as stone, deep soil mixing and jet grout columns, were investigated by using numerical method. The effect of different design parameters (such as depth replacement ratio, area replacement ratio and column stiffness) on the composite foundation system were studied in the analyses. The numerical analyses have been performed by using PLAXIS computer software based on finite element method. The time dependent behavior of a test embankment on soft clay reinforced with deep mixing columns reported in the literature was analysed to verify the numerical results. Then, a parametric study was conducted to evaluate the influence of column rigidity and permeability on the composite foundation system. Finally, the predicted results indicate that the columns not only reduced the total settlement but also accelerated settlement time of the clay under the embankment loading, due to the much higher stiffness of the column material. The results show that more economical, faster and easier methods can be achieved when the behaviour of an embankment or a foundation on soft clays improved with rigid columns were accurately predicted in the numerical analyses.

**Keywords:** Rigid column, Floating rigid column, Deep mixing column, Stone column, Jet grout column.

## GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Tez çalışması kapsamında rijit kolonlarla iyileştirilen zemin ve yapı temellerinin tasarım ve analizine yönelik çözümler sunmak amacıyla bazı önemli parametrelerin etkisi analitik ve sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Çalışmanın büyük bir kısmını oluşturan sayısal analizler sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS 2D-3D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda uzun süreli (drenajlı) stabilite analizleri yapılmış ve analizlerde derinlik iyileştirme oranı, alan yerleşim oranı, sürşaj yükü ve kolon rijitliği gibi parametrelerin kompozit sisteme olan etkisi araştırılmıştır. Parametrik çalışmalarda etkisi araştırılmak istenen parametre dışındaki tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Parametrik çalışmada kullanılmak üzere daha önce yapılmış tam ölçekli bir laboratuvar model deney geometrisi ve model parametreleri kullanılarak iki boyutlu analizler yapılmış ve laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılarak güvenilirliği araştırılmıştır. Yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde, alan yerleşim oranı ve derinlik iyileştirme oranı parametrelerinin değerleri arttıkça oturmaların azaldığı ve konsolidasyon süresinin kısaldığı görülmüştür. Kolon rijitliği için yapılan analizlerde, yüzen kolonlarda rijitliğin artması ile oturmalarda ve konsolidasyon süresinde kayda değer bir değişim görülmemiştir. Fakat kolonlar sağlam tabakaya oturduğunda oturmalar önemli ölçüde azalmış ve konsolidasyon hızlanmıştır. Yük yoğunluğunun artırılması ile yüzen kolonlar zemine kısmen nüfuz ettiğinden oturmalar artmış ancak derinlik iyileştirme oranının büyük değerlerinde oturmalar azalmıştır.

Üniform yükleme koşullarında, yüzen kolonlarda derinlikle birlikte gerilme konsantrasyon oranı azalmakta ve derinlik boyunca oturmalar üniform değildir. Fakat kolonların sağlam tabakaya olan mesafesi kısaldıkça gerilme konsantrasyon oranı artmakta ve derinlik boyunca üniform oturmalar meydana gelmektedir.

Parametrik çalışmaların yanı sıra, 2010 yılında Japonya'da derin karışım kolonlarıyla iyileştirilen zeminde yapılan deneme dolgusunun geometrisi ve arazi

koşulları referans alınarak üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal analiz sonuçları ve arazi ölçümleri karşılaştırılarak kurulan modelin geçerliliği kontrol edilmiştir. Ardından aynı geometrik model ve zemin parametreleri kullanılarak farklı yöntemlerle imal edilen rijit kolon analizleri yapılmıştır. Taş kolonların sadece drenaj özelliğinden dolayı sistemde drenaj kanalı olarak görev yapmakta ve konsolidasyon süresini önemli derecede azaltmaktadır. Taş kolon drenaj ve rijitlik etkisi birlikte düşünüldüğünde kompozit sistemin hem oturmaları azalmakta hem de konsolidasyon hızlanmaktadır. Taş kolonların permeabilite özelliği ihmal edildiğinde ve sadece rijitlik etkisi göz önüne alındığında oturmalar azalmakta ancak konsolidasyon süresi çok etkilenmemektedir. Derin karışım ve jet grout kolonlarının sisteme olan rijitlik katkıları araştırıldığında rijitliğin artması ile oturmalar azalmakta ancak belli bir rijitlik üzerindeki değerlerde oturmalar etkilenmemektedir.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarımı yönlendiren, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, değerli katkılarını ve zamanını esirgemeyen danışman hocam, Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi birikimini ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Arslan TEKİNSOY'a teşekkür ederim.

Destekleri ve yardımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIAÇIK'a, Arş. Gör. Buse EMİRLER TOLUN'a, İnş. Yük. Müh. Umut DAĞAR'a, tüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında , zamanını ve bilgisini esirgemeyen, desteği ile yüksek lisans eğitimim boyunca moral ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, değerli arkadaşım Sherlock'a ve yeğenim Uzay Müh. Yücel BİLGİN'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her aşamasında yanımda olan, bu günlere gelebilmem için her türlü fedakarlığı yapan, destek ve sevgilerini esirgemeyen çok sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>SAYFA</b>
ÖZ .....	I
ABSTRACT.....	II
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET .....	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER .....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XVIII
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	7
2.1. Taş Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	7
2.2. Derin Karışım ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	17
2.3. Jet Grout ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	28
3. RİJİT KOLON YÖNTEMLERİ .....	35
3.1. Taş Kolon Yöntemi .....	35
3.2. Taş Kolon Uygulama Alanları.....	36
3.3. Taş Kolon İmalatı .....	37
3.3.1. Vibro- kompaksiyon Yöntemi .....	38
3.3.2. Vibro-yerdeğiştirme Yöntemi (Islak Yöntem).....	38
3.3.3. Vibro-öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem) .....	39
3.4. Taş Kolon Tasarım parametleri ve Prosedürü .....	40
3.5. Taş Kolon Kalite Kontrol Prosedürü .....	41
3.6. Taş Kolon Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları.....	42
3.7. Derin Karışım (Deep Mixing) Yöntemi.....	43
3.8. Derin Karışım Uygulama Alanları.....	44
3.9. Derin Karışım İmalatı .....	45
3.9.1. Kuru Yöntem .....	45

3.9.2. Islak Yöntem.....	46
3.10. Derin Karışım Tasarım Parametreleri ve Prosedürü.....	47
3.11. Derin Karışım Kalite Kontrol Prosedürü.....	48
3.12. Derin Karışım Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları.....	49
3.13. Jet Grout Yöntemi .....	50
3.14. Jet Grout Uygulama Alanları.....	51
3.15. Jet Grout İmalatı .....	53
3.15.1. Tekli Jet Sistemi (Jet 1) .....	54
3.15.2. İkili Jet Sistemi (Jet 2) .....	55
3.15.3. Üçlü Jet Sistemi (Jet 3).....	55
3.16. Jet Grout Tasarım Parametreleri ve Prosedürü.....	55
3.17. Jet Grout Kalite Kontrol Prosedürü .....	56
3.18. Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları.....	57
4. ANALİTİK YÖNTEMLER.....	59
4.1. Rijit Kolon Tasarım Hususları.....	59
4.2. Rijit Kolon Yük Aktarma Mekanizması.....	62
4.2.1. Rijit Temel – Eşit Deformasyon .....	63
4.2.2.Esnek Temel- Eşit Gerilme Yaklaşımı .....	63
4.2.3. Yatay Deformasyonsuz ve Yatay Deformasyonlu Birim Hücre.....	64
4.2.4. Kompozit Temel .....	69
4.3. Rijit Kolonlarda Taşıma Gücü Hesabı.....	72
4.3.1. Taş Kolon Taşıma Gücü .....	72
4.3.2. Derin Karışım Kolon Taşıma Gücü.....	76
4.3.3. Jet Grout Kolon Taşıma Gücü .....	78
4.4. Rijit Kolonlarda Oturma Hessabı .....	81
4.4.1.Taş Kolon Oturma Hesabı.....	81
4.4.2.Derin Karışım Kolon Oturma Hesabı.....	86
4.4.3. Jet Grout Kolon Oturma Hesabı.....	93
4.5. Rijit Kolonlarda Konsolidasyon Oturma Hesabı.....	97

4.5.1. Taş Kolonlarda Konsolidasyon .....	97
4.5.2. Derin Karışım Kolonlarında Konsolidasyon .....	105
4.5.3. Jet Grout Kolonlarda Konsolidasyon .....	106
4.6. Araştırma Kapsamında Yapılan Hesaplamalar .....	107
4.6.1. Sağlam Tabakanın Derinlerde Olması Durumunda Taşıma Gücü (Yüzen Kolonlar) .....	107
4.6.2. Kolonların Sağlam Tabakaya oturması Durumunda Taşıma Gücü (Uç Kolonlar) .....	114
4.6.3. Rijit Kolon Oturma Hesaplamaları .....	120
5. İKİ BOYUTLU (2D) SAYISAL ANALİZLER .....	127
5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	127
5.2. Sayısal Analizlerin Doğruluğunun Araştırılması .....	127
5.3. Parametrik Çalışma .....	133
5.3.1. Alan Değişim Oranının Etkisi .....	133
5.3.2. Derinlik İyileştirme Oranının Etkisi .....	140
5.3.3. Yük Yoğunluğunun Etkisi .....	143
5.5.4. Rijitlik Etkisi .....	145
6. ÜÇ BOYUTLU (3D) SAYISAL ANALİZLER .....	151
6.1. Giriş .....	151
6.2. Proje ve Arazi Bilgileri .....	151
6.3. Plaxis 3D Programı ile Yapılan Analizler .....	154
6.3.1. Kurulan Model ve Kullanılan Parametreler .....	154
6.3.2. Tam Ölçekli 3D Analizi .....	157
6.3.3. 3D Birim Hücre Analizi .....	165
6.4. Parametrik Çalışma .....	171
6.4. 1. Taş Kolonlar .....	171
6.4.2. Sadece Rijitlik Etkisi ile İyileştirme Sağlayan Kolonlar .....	177
6.5. Sayısal Analizlerle Rijit Kolon Yöntemlerinin Karşılaştırılması .....	181
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	187

KAYNAKLAR.....	191
ÖZGEÇMİŞ.....	203



## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 4. 1. Malzeme uygunluğu .....	59
Çizelge 4. 2. Farklı jet sistemleri ile oluşturulan kolonların tipik parametreleri (Han,2015) .....	61
Çizelge 4. 3. Tekil kolonun nihai taşıma kapasitesi.....	75
Çizelge 4. 4. $N\gamma$ * ve $Nq$ * değerleri (Vesic,1975; 1977).....	79
Çizelge 4. 5. Analitik hesaplamalarda kullanılan yapı ve zemin özellikleri .....	108
Çizelge 4. 6. Rijit kolon özellikleri ve hesap parametreleri .....	108
Çizelge 4. 7. Analitik çalışmalar ile elde edilen taşıma gücü değerleri .....	120
Çizelge 4. 8. Analitik çalışmalar ile elde edilen oturma değerleri .....	125
Çizelge 5. 1. Zemin model parametreleri (Chai ve Pongsivasathit, 2010).....	129
Çizelge 5. 2. Kolon model parametreleri (Chai ve Pongsivasathit, 2010) .....	129
Çizelge 5. 3. Parametrik çalışmada kullanılan değişkenler.....	133
Çizelge 5. 4. Farklı kolon çapları için hesaplanan alan değişim oranları ( $d_e=0.45m$ ).....	134
Çizelge 5. 5. Farklı kolon boyları için hesaplanan derinlik iyileştirme oranları ( $d_e=0.45m$ , $d_c=0.15m$ ) .....	141
Çizelge 6. 1. Arazi koşulları.....	156
Çizelge 6. 2. Model parametreleri.....	157
Çizelge 6. 3. Taş kolon rijitlik değerleri .....	172
Çizelge 6. 4. Analizlerde kullanılan taş kolon parametreleri .....	174
Çizelge 6. 5. Taş kolon model parametreleri .....	176
Çizelge 6. 6. Derin karışım kolon parametreleri .....	178
Çizelge 6. 7. Jet grout kolon rijitlik değerleri .....	180
Çizelge 6. 8. Jet grout kolon parametreleri .....	180



## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 2.1.	Taş kolonlarının yük oturma eğrisi .....	11
Şekil 2.2.	$\alpha$ ve $\beta$ 'nin tanımı .....	21
Şekil 2.3.	Kısmen gömülü zemin-çimento kolonlu yumuşak zeminin konsolidasyon diyagramı .....	25
Şekil 2.4.	(a) W/C oranı-Tek eksenli basınç mukavemet ilişkisi (b) Elastisite modülü- Tek eksenli basınç mukavemet ilişkisi (Kauschinger ve ark., 1992) .....	29
Şekil 3.1.	Taş kolon imalat aşamaları .....	37
Şekil 3.2.	Vibro-kompaksiyon .....	38
Şekil 3.3.	Vibro-yerdeğiştirme imalat aşamaları.....	39
Şekil 3.4.	Kuru yöntem imalat aşamaları .....	40
Şekil 3.5.	Derin karışım kolon veya duvarların şekilleri: (a) dairesel, (b) ikili, (c) dörtlü ve (d) panel.....	44
Şekil 3.6.	Derin karışım kolon konfigürasyon örnekleri: (a), (b) tekil kolon (kare ve üçgen düzen), (c), (d), (e),(g) duvar, (f) teğet ızgara, (h) teğet hücreler, (i) halka; (j) kafes, (k), (l) grup kolonları, (m) blok.....	45
Şekil 3.7.	Kuru derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları.....	46
Şekil 3.8.	Islak derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları .....	46
Şekil 3.9.	Derin karışım için tipik bir kalite kontrol prosedürü .....	49
Şekil 3.10.	Jet grout tipik uygulama alanları (a)Derin temeller, (b) (c) (d) Mevcut yapı temellerinin desteklenmesi, (e) (f) Yapıların desteklenmesi, (g) (h) (i) (j) Geçirimsizlik perdesi, (k) Diyafram duvar, (l) (m)Kazılar ve duvar arası, (n)Batardo .....	52
Şekil 3.11.	İki veya üç boyutlu jet grout uygulama örnekleri: (a) ve (b) diyafram duvarlar, (c) döşeme, (d) tünel, (e) şaft ve (f) blok.....	53
Şekil 3.12.	Jet grout yöntemi uygulama aşamaları .....	54

Şekil 3.13. Jet groutta kullanılan üç farklı enjeksiyon tekniğinin şematik gösterimi (Jet 1, Jet 2 ve Jet 3).....	55
Şekil 4.1. Rijit kolon imalat şekilleri (a) Kare (b) Üçgen .....	60
Şekil 4.2. Tij çekilme oranının jet grout kolon çapına etkisi .....	61
Şekil 4.3. Eşit deformasyon rijit temel durumu .....	63
Şekil 4.4. Eşit gerilme esnek temel durumu.....	64
Şekil 4.5. Birim hücre kavramı .....	65
Şekil 4.6. Kolonların yerleşim düzeni ve eşdeğer daire.....	66
Şekil 4.7. Birim hücre, yatay deformasyonlu ve deformasyonsuz kolon.....	66
Şekil 4.8. Farklı deformasyonlarda gerilme konsantrasyon oranı; (a) kolon-zemin yük paylaşımı (b) gerilme konsantrasyon oranı.....	69
Şekil 4.9. Kompozit temelde yük aktarma modeli.....	70
Şekil 4.10. Tekil kolon göçme mekanizması .....	72
Şekil 4.11. Beton kolonlu kompozit temel.....	80
Şekil 4.12. Modül oranına karşı gerilme konsantrasyon oranı.....	84
Şekil 4.13. Alan değişim oranı-iyileştirme faktörü.....	85
Şekil 4.14. Rijitlik oranına karşılık gelen gerilme konsantrasyon oranı .....	87
Şekil 4.15. Kolon penetrasyon yöntemi .....	90
Şekil 4.16. Kazıklı radye yönteminde eşdeğer kazık: (a) kolon grubu ve (b) eşdeğer kazık .....	93
Şekil 4.17. Serbest drenajlı taş kolon konsolidasyon modeli.....	98
Şekil 4.18. Boşluk suyu basıncının sönümlenmesi .....	102
Şekil 4.19. Taş kolonlarla güçlendirilmiş yumuşak temel için birim hücre modeli .....	103
Şekil 4.20. Kolonla güçlendirilmiş temelin konsolidasyonu .....	105
Şekil 4.21. Hesaplamalarda kullanılan rijit kolonların görünüşü.....	109
Şekil 4.22. Rijit kolonların sağlam tabakaya oturması .....	114
Şekil 5.1. Laboratuvar model deneyinin kurulumu.....	128
Şekil 5.2. Eksenel simetrik birim hücre modeli .....	130

Şekil 5.3. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (1) .....	131
Şekil 5.4. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (2) .....	131
Şekil 5.5. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (3) .....	132
Şekil 5.6. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (4) .....	132
Şekil 5.7. Alan değişim oranının oturma davranışı üzerindeki etkisi .....	134
Şekil 5.8. $\alpha$ ve $\beta$ arasındaki ilişkinin oturmaya etkisi .....	135
Şekil 5.9. Analiz deformasyon görüntüsü .....	136
Şekil 5.10. Analizlerde ve grafiklerde kullanılan bazı tanımlar .....	137
Şekil 5.11. Derinlik boyunca $\alpha$ değerinin gerilme konsantrasyon oranına etkisi .....	138
Şekil 5.12. Derinlik boyunca $\alpha$ değerinin oturma oranına etkisi .....	139
Şekil 5.13. Kolon ve zemin deformasyonunun derinlikle değişimi (a) zemin yüzeyinde, (b) zemin yüzeyinden 8 cm derinlikte, (c) 18 cm derinlikte, (d) 28 cm derinlikte .....	140
Şekil 5.14. Derinlik iyileştirme oranının etkisi .....	141
Şekil 5.15. Derinlik boyunca $\beta$ değerinin gerilme konsantrasyon oranına etkisi .....	142
Şekil 5.16. Derinlik boyunca $\beta$ değerinin oturma oranına etkisi .....	143
Şekil 5.17. Sürşarj yükünün etkisi .....	144
Şekil 5.18. Sürşarj yükü ve alan değişim oranı arasındaki ilişki .....	144
Şekil 5.19. Yük ve derinlik iyileştirme oranı arasındaki ilişki .....	145
Şekil 5.20. Yüzen kolonlarda rijitliğin etkisi .....	146
Şekil 5.21. Sağlam tabakaya oturmuş kolonlarda rijitliğin etkisi .....	147
Şekil 5.22. Kolonun sağlam tabakaya göre konumun deformasyon görüntüsü ...	148
Şekil 5.23. Rijitlik ve Oturma azaltma oranı arasındaki ilişki .....	149
Şekil 6.1. Çalışma dolgusunun yeri .....	152
Şekil 6.2. Deney sahasına ait zemin profili ve bazı mühendislik özellikleri .....	153
Şekil 6.3. Dolgu kesiti ve ölçüm noktaları .....	154
Şekil 6.4. Model geometrisi ve zemin tabakaları .....	155
Şekil 6.5. Zemin tabakalarının modellenmesi .....	158

Şekil 6.6. Derin karışım kolon imalatı .....	158
Şekil 6.7. Kolonların üstten görünüşü.....	159
Şekil 6.8. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin .....	159
Şekil 6.9. Dolgu inşası .....	159
Şekil 6.10. Kolonların dolgu altındaki görüntüsü .....	160
Şekil 6.11. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin üzerindeki dolgunun geometrik modeli ve sonlu elemanlar ağı .....	161
Şekil 6.12. Toplam deformasyonlar .....	162
Şekil 6.13. Düşey kesit deformasyon görüntüsü.....	162
Şekil 6.14. Kolon üstündeki ölçüm noktasının oturma -zaman karşılaştırma eğrisi .....	163
Şekil 6.15. Kolonlar arası ölçüm noktasının oturma -zaman karşılaştırma eğrisi	163
Şekil 6.16. -8.4 m derinlikteki ölçüm noktasının oturma- zaman karşılaştırma eğrisi .....	164
Şekil 6.17. Birim hücre geometrik model ve sonlu elemanlar ağı .....	165
Şekil 6.18. Birim hücre kolon imalatı .....	166
Şekil 6.19. Kolon üstten ve alttan görünüşü .....	166
Şekil 6.20. Zemin iyileştirilmesi ve dolgu inşası .....	167
Şekil 6.21. Birim hücre toplam deformasyon görüntüsü .....	168
Şekil 6.22. Birim hücre oturma -zaman karşılaştırma eğrisi.....	169
Şekil 6.23. Birim hücre oturma -zaman karşılaştırma eğrisi.....	169
Şekil 6.24. Karşılaştırmalı oturma- zaman grafiği.....	170
Şekil 6.25. Karşılaştırmalı oturma- zaman grafiği.....	171
Şekil 6.26. Taş kolon dren davranışı.....	173
Şekil 6.27. Taş kolon rijitlik ve dren etkisi .....	175
Şekil 6.28. Taş kolon rijitliği ve dren etkisinin oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki .....	175
Şekil 6.29. Taş kolonların sadece rijitliklerinden dolayı sisteme olan etkisi .....	177
Şekil 6.30. Derin karışım kolon rijitliğinin zemin iyileştirmedeki etkisi.....	178

Şekil 6.31. Derin karışım kolon rijitliği ve oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki .....	179
Şekil 6.32. Jet grout kolon rijitliğinin zemin iyileştirmedeki etkisi .....	180
Şekil 6.33. Jet grout kolon rijitliği ve oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki .....	181
Şekil 6.34. Farklı yöntemlerle imal edilen rijit kolonların karşılaştırmalı oturma-zaman eğrisi .....	182
Şekil 6.35. Taş kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü .....	183
Şekil 6.36. Taş kolonların boşluk suyu basınçlarına etkisi .....	183
Şekil 6.37. Derin karışım kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü .....	184
Şekil 6.38. Derin karışım kolonlarının boşluk suyu basınçlarına etkisi .....	184
Şekil 6.39. Jet grout kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü .....	185
Şekil 6.40. Jet grout kolonlarının boşluk suyu basınçlarına etkisi .....	185



## SİMGELER VE KISALTMALAR

$A$	: Toplam alan
$A_c$	: Kesit alanı
$A_e$	: Etki bölgesi alanı
$a_s$	: Alan değişim oranı
$A_s$	: Kolon toplam yüzey alanı
$A_t$	: Kolon uç kesit alanı
$A_{sr}$	: Radyenin altındaki zemin alanı
$A_{so}$	: Kolon çevresi dışındaki zemin alanı
$A_r$	: Radyenin alanı
$A_{tc}$	: Kolonların toplam kesit alanı
$A_g$	: Kolon ve zemini içeren eşdeğer kolon kesit alanı
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
$B$	: Temel genişliği
$B_r$	: Radye genişliği
$c$	: Kohezyon
$C_c$	: Zeminin sıkışma indisi
CPT	: Konik penetrasyon deneyi
$c_r$	: Zeminin radyal yöndeki konsolidasyon katsayısı
$c_{rm}$	: Zeminin radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
$c_u$	: Drenajsız kayma mukavemeti
$c_v$	: Zeminin düşey yöndeki konsolidasyon katsayısı
$c_{vm}$	: Zeminin düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
$d_c$	: Kolon çapı
$d_e$	: Birim hücre çapı
$D_s$	: Zeminin tek boyutlu sıkışma modülü
$D_s$	: Ödometrik rijitlik modülü
$D_c$	: Kolon bir boyutlu sıkışma modülü

$D_r$	: Rölatif sıklık
$DM$	: Derin karışım
$DKK$	: Derin karışım kolonu
$D_{10}$	: Granülometri eğrisinde %10 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)
$D_{20}$	: Granülometri eğrisinde %20 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)
$D_{50}$	: Granülometri eğrisinde %50 geçen yüzdeye karşılık gelen dane çapı (mm)
$E_c$	: Kolon elastisite modülü
$E_s$	: Zeminin elastisite modülü
$E_{eq}$	: Kompozit sistemin eşdeğer elastisite modülü
$e_0$	: Zeminin başlangıç boşluk oranı
$f_s$	: evre sürtünmesi
$G_L$	: Kolon ucundaki zeminin kayma modülü
$G_b$	: Kolon ucu altındaki zeminin kaymamodl
$G_{avg}$	: Kolonların uzunluğu içindeki zeminin ortalama kayma modülü
$h$	: Kil tabakasının kalınlığı
$h_{cp}$	: Kolonun nüfuz ettiği bölgesinin kalınlığı
$HS$	: Hardening soil modeli
$\dot{I}_R$	: İyileşme oranı
$K$	: Yanal zemin basıncı katsayısı
$k_x$	: Zeminin x eksenindeki permeabilitesi
$k_y$	: Zeminin y eksenindeki permeabilitesi
$k_z$	: Zeminin z eksenindeki permeabilitesi
$K_{pr}$	: Kazıklı radyenin rijitliği
$K_{eq}$	: Eşdeğer kazığın rijitliği
$K_r$	: Radye rijitliği

$L_c$	: Kolon boyu
$L_{eq}$	: Eşdeğer kazığın uzunluğu
$L_R$	: Uzunluk oranı
MC	: Mohr-Coulomb modeli
MCC	: Modifiye Cam Clay modeli
$m_{v,c}$	: Kolonun düşey yöndeki hacimsel sıkışma katsayısı
$m_{v,s}$	: Doğal zeminin hacimsel sıkışma katsayısı
$m'_{v,s}$	: Kolon inşaatından sonra zeminin hacimsel sıkışma katsayısı
N	: Kolon boyunca zeminin ortalama SPT N değeri
$N_D$	: Çap oranı ( $D_e/D_c$ )
n	: Yük paylaşım oranı
$N_{c, \gamma, q}$	: Taşıma gücü faktörleri
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
OC	: Organik içerik
P	: Uygulanan eksenel yük
$P_r$	: Radye tarafından taşınan yük
$P_{eq}$	: Eşdeğer kazık tarafından taşınan yük
$P_t$	: Kazıklı radye üzerindeki uygulanan toplam yük
$r_r$	: Radyenin yarıçapı
$r_{eq}$	: Eşdeğer kazık yarıçapı
$r_m$	: Kazık etki yarıçapı
s	: Rijit kolonlar arası merkezden merkeze mesafe
$S_s$	: Doğal zeminin oturması
$S_c$	: Kolonun oturması
$S'$	: İyileştirilmiş zemin tabakasını oturması
$S_{pr}$	: Kazıklı radyedeki oturma
$S_N$	: Uygunluluk sayısı

SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SEM	: Sonlu elemanlar analizi
SRR	: Oturma iyileştirme oranı
$q_{ult}$	: Kompozit sistemin nihai taşıma kapasitesi
$q_{ult,c}$	: Kolonun limit taşıma kapasitesi
$q_{ult,s}$	: Kolon çevresindeki zeminin limit taşıma kapasitesi
$q_{u,c}$	: Kolon arazi serbest basınç dayanımı
$Q_{ult,c}$	: Tekil kolon nihai taşıma kapasitesi
$Q_{ult,p}$	: Eşdeğer kolonun nihai yük kapasitesi
$q_t$	: Kolon uç direnci
$q_{tm}$	: Azaltılmış kolon uç direnci
$S_r$	: Uygulanan toplam yük altındaki radye oturması
SS	: Soft Soil zemin modeli
SSC	: Soft Soil Creep zemin modeli
$U_c$	: Kolon çevresi
$U_r$	: Radyal drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi
$U_{vr}$	: Düşey ve radyal konsolidasyon yüzdesinin ortak etkisi
$U_v$	: Düşey drenaj nedeniyle ortalama konsolidasyon yüzdesi
$T_r$	: Radyal drenaj nedeniyle zaman faktörü
$T_v$	: Düşey drenaj nedeniyle zaman faktörü
$\Delta\sigma_c$	: Kolondaki düşey gerilme
$\Delta\sigma_s$	: Zemindeki düşey gerilme
$\Delta\sigma_z$	: İlave düşey gerilme
$\gamma$	: Doğal birim hacim ağırlık
$\gamma_d$	: Doygun birim hacim ağırlık
$\gamma_w$	: Suyun birim hacim ağırlığı
$\varepsilon$	: Düşey deformasyon

$\varepsilon_c$	: Kolondaki düşey deformasyon
$\varepsilon_s$	: Zemindeki düşey deformasyon
$\varepsilon_z$	: Ortalama düşey deformasyon
$\nu$	: Poisson oranı
$\nu_c$	: Kolonun Poisson oranı
$\nu_s$	: Zeminin Poisson oranı
$\nu'$	: Drenajlı yükleme durumu için Poisson oranı
$\sigma_c$	: Kolona etkiyen gerilme
$\sigma_r$	: Kolon çevresine zeminden etkiyen yanıl gerilme
$\sigma_s$	: Zemine etkiyen gerilme
$\sigma'_{z,0}$	: Efektif jeolojik gerilme
$\sigma'_D$	: Kolona etkiyen sürşaj yükü
$\sigma'_s$	: Zemindeki ortalama efektif gerilme
$\sigma'_c$	: Kolondaki ortalama efektif gerilme
$\phi$	: Zeminin içsel sürtünme açısı
$\phi_c$	: Kolonun içsel sürtünme açısı
$\Psi$	: Zemin içindeki pasif göçme düzlemi açısı
$\Psi_p$	: Kolon içindeki pasif göçme düzlemi açısı
$f(a_s)$	: Alan değişim oranının etki faktörü
$g(\beta_L)$	: Derinlik iyileştirme etki faktörü
$h(\gamma_p)$	: İlave gerilmelerin zemin mukavemetine olan oranının etki faktörü
$\mu$	: Gerilme azalma oranı
$\kappa$	: Şişme eğrisinin eğimi

- $\kappa^*$  : Modifiye şişme endeksi  
 $\lambda$  : Doğal sıkışma eğrisinin eğimi  
 $\lambda^*$  : Modifiye sıkışma indeksi  
 $\lambda$  : Normal konsolidasyon ve kritik durum hattının eğimi  
 $\beta_m$  : Zemin taşıma kapasitesi azaltma faktörü  
 $\beta$  : Derinlik iyileştirme oranı  
 $a$  : Adhezyon katsayısı  
 $\alpha_{rp}$  : Radye-kazık etkileşim faktörü  
 $\beta$  : Sürtünme katsayısı  
 $\phi$  : Zeminin içsel sürtünme açısı  
 $\psi$  : Dilatasyon açısı

## 1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun artması ile birlikte daha fazla ev, ticari bina, yüksek katlı ofis binaları, otoyollar, demiryolları, tüneller, bentler inşa edilmekte ve bunun sonucunda da arazi kullanımında olan talepler artmaktadır. Bu nedenle uygun geoteknik şartlara sahip yapı alanlarının azalması, inşaat için uygun olmayan alanların kullanılması ihtiyacını arttırmıştır. Dolayısıyla bu alanlar, taşıma, oturma, kararsızlık, sıvılaşma, erozyon ve sızma gibi geoteknik problemler yaratmaktadır. Bu tür durumlarla başa çıkmak ve zemin parametreleri ile geoteknik koşulları iyileştirmek için sürekli bir gereksinim vardır.

İnşaat için uygun bir alanın seçimi, neredeyse tüm inşaat mühendisliği projelerinin en önemli konulardan biridir. Geoteknik mühendisliği açısından bakıldığında, uygun bir saha genellikle, temel zeminin (veya kayaç), kabul edilemeyecek ölçüde büyük deformasyonlara veya stabilite problemlerine neden olmadan yapıdan gelen yükü zemine aktarmak için yeterli dayanıma sahip olması şeklinde tanımlanmaktadır.

Bununla birlikte, uygun alanın, geoteknik ve mühendislik koşullarından ziyade sosyal veya ekonomik gereklilikler tarafından belirlendiği birçok uygulama bulunmaktadır. Örneğin, deniz taşımacılığına erişim kolaylığı için, Çin'deki Shanghai ve Tayland'daki Bangkok şehirleri, tipik olarak yumuşak kil veya kil benzeri tortularla kaplanmış olan kıyı bölgesinde yer almaktadır. Bu şehirlerin zeminleri, genellikle taşıma gücü yönünden çok zayıf olduğu için, büyük altyapılar, doğrudan zeminde inşa edilemezler. Birçok durumda, bu yumuşak birikintilerin mukavemet, sertlik ve permeabilite gibi mekanik özellikleri, altyapının ana bileşenlerinin oluşturulmasından önce, "zemin iyileştirme" teknikleriyle geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, kentleşmenin artması nedeniyle artık birçok şehirde artan arazi talebi mevcut olup, bu yüzden denizden geri kazanılan arazilerde havaalanları ve deniz limanları gibi yeni tesislerin geliştirilmesi gerekmektedir. Örnek olarak, Japonya'daki Kansai Uluslararası Havaalanı, Singapur'daki Changi

Uluslararası Havaalanı, Kore'deki Hong Kong Uluslararası Havaalanı ve Kore'deki Incheon Uluslararası Havaalanı sayılabilir. Bu tarz yeni geri kazanılan araziler genellikle pistleri ve terminal binalarını yeterli ölçüde destekleyemeyecek kadar zayıf olduğundan, zemin iyileştirmesi gerekmektedir.

Zemin iyileştirmenin neredeyse kaçınılmaz olarak gerekli olduğu uygulamaların bir başka örneği, demiryolu ve otoyol yapımında ortaya çıkmaktadır. Arazi kullanımındaki gereklilik nedeniyle bu ulaşım yolları genellikle yumuşak veya zayıf zeminli bölgelerden geçmektedir. Bu yumuşak zeminlerin mekanik özelliklerinin, ilgili zemin yapılarını yeterli ölçüde desteklemek ve ilgili ulaşırma altyapısının servis ömrü boyunca meydana gelecek residuel oturmaları azaltmak için genellikle iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bir proje uygulama sahasında elverişsiz zeminleri ve geoteknik koşulları iyileştirebilmenin birçok yolu mevcuttur. Bunlar; problemlı alandan vazgeçmek, mevcut arazi koşullarına uygun üst yapı tasarlamak, elverişsiz zeminleri kaldırıp ve daha iyi özellikli zeminlerle değiştirmek, zemin özelliklerini ve zemin koşullarını iyileştirmek olarak sıralanabilir. Birçok proje için zemin özelliklerini ve zemin koşulları iyileştirmek giderek daha gerekli hale gelmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemleri, zemin koşullarının yetersiz olduğu alanların kullanılmasına izin vermek ve zayıf zemin koşullarına rağmen ihtiyaç duyulan projelerin tasarlanması ve inşasına izin vermek için giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Zemin iyileştirme yönteminin seçiminde yapısal koşullar, geoteknik koşullar, çevresel kısıtlamalar, inşaat koşulları, güvenilirlik ve dayanıklılık gibi koşullar göz önünde bulundurulmalıdır. Yapı tipi ve şekli, yapının boyutları ve temeli, yapının ve temel elemanlarının sünekliği, yüklerin tipi, büyüklüğü ve dağılımı, arazi coğrafyası, jeolojik formasyonlar, zeminin tipi, yeri ve problemlı zemin tabakalarının kalınlığı, yaşı, bileşenleri, dolgu dağılımı ve yeraltı suyu seviyesi zemin iyileştirme yöntemi seçimini etkileyen faktörlerden bazılarıdır.

Mühendislik yapıların tasarımında elverişsiz zemin koşullarıyla karşı karşıya kalındığında, temel zemininin rijit kolonlar inşa edilerek iyileştirilmesi son zamanlarda yaygın bir şekilde kullanılmakta ve gittikçe önem kazanmaktadır. Farklı zemin koşullarında uygulanabilmesi diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha ekonomik olması ve daha kısa sürede imal edilebilmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Geoteknik uygulamalarda derin karışım (deep mixing), jet grout ve taş kolon yöntemleri ile zeminde oluşturulan rijit kolonlar mevcut zeminin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Taş kolon yöntemi, genel olarak yumuşak veya gevşek zeminin performansını arttırmak için zeminde düşey olarak inşa edilen ve granüler malzemenin sıkıştırılması ile oluşturulan kolon olarak tanımlanmaktadır. Taş kolon eski bir zeminin iyileştirme tekniğidir. Taş kolonlar, farklı zemin koşullarında ve farklı temel durumlarında uygulanabilirlikleri, ucuz ve inşa edilmesi kolay olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Taş kolonların, yumuşak zemine göre daha yüksek mukavemet, rijitlik ve geçirgenliğe sahip olması, taşıma kapasitesini arttırmakta, oturmaları azaltmakta dolguların ve şevlerin stabilitesini arttırmakta, zemin konsolidasyonunu hızlandırmakta ve sıvılaşma potansiyelini azaltmaktadır. Taş kolonla iyileştirilmiş zeminin performansı, boşluk oranı, yoğunluk, deformasyon modülü, kayma modülü ve iyileştirme sonrası zeminin sıkışma modül değerleri ile elde edilen değişimlerle değerlendirilmektedir. Bu teknik, kohezyonlu zemine iyileştirme ve drenaj etkisi sağlamanın yanı sıra, gevşek zeminin sıkılaşmasını da sağlamaktadır.

Derin karışım metodu, zeminin, çimento ve / veya kireç gibi bağlayıcı maddeler ile yerinde karıştırıldığı bir zemin iyileştirme yöntemidir. Derin karışım tekniği ilk olarak 1970'lerde Japonya ve İskandinav ülkelerinde geliştirilmiştir. Daha sonra, zemin mukavemetini arttırmak, geçirimsizliği azaltmak, sıvılaşmaya karşı direnci arttırmak, deformasyon özelliklerini iyileştirmek için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Tasarım gereksinimlerine, saha koşullarına, zemin ve kaya tabaklarına ve ekonomik özelliklere bağlı olarak, derin karıştırma yöntemlerinin kullanımı giderek yayılmaktadır. Bu yöntemler; zemin ve kaya stabilizasyonu, şev stabilitesi, sıvılaşma ve titreşim azaltma, yol, demiryolu, köprü temelleri, dolgular, kazı destek sistemlerinin inşası veya kazı alanlarına yakın yapıların korunması için önerilmiş ve uygulanmıştır.

Jet grout yöntemi, çok yüksek basınç altında su-çimento karışımlarının delgi içine püskürtülmesi ile yerinde silindirik kolonların oluşturulması işlemidir. Çimento çerbeti ile zemin karıştırılarak orijinal zemine kıyasla daha yüksek dayanımlı bir kompozit malzeme ile kolon oluşturulmaktadır. Jet grout yöntemi, klasik enjeksiyon yöntemlerinden farklı olarak neredeyse tüm zemin tiplerinde uygulanabilmekte ve bu durum yöntemi popüler zemin iyileştirme tekniklerinden biri kılmaktadır.

Jet grout, genellikle, zemin direncini arttırmak, zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek, geçirgenliğini ve porozitesini azaltmak, yeni ve mevcut temellerin oturmasını azaltmak, yüzeysel ve derin kazıları desteklemek ve barajlarda su sızdırmazlık yapısı oluşturmak gibi birçok farklı amaçla kullanılmaktadır. Jet kolonlarının dayanımı ve geçirimsizliği, jet enerjisine, yapım tekniğine, enjeksiyon karışım oranına, doğal zeminin özelliklerine ve oluşturulan karışımın homojenliğine bağlıdır.

Taş kolon, derin karışım ve jet grout yöntemleriyle oluşturulan kolonların ortak yönü yumuşak kil zemin içerisinde rijit kolon oluşturularak zeminin iyileştirilmesidir. Bu kolonların geometrik şekilleri birbirine benzese de gerek imalat gerekse de maliyet bakımından aralarında önemli farklar bulunmaktadır.

Son zamanlarda zemin iyileştirmede rijit kolon yöntemlerinin uygulanmasında artış gözlemlenmektedir. Rijit kolon yöntemleriyle yapılan iyileştirme uygulamalarında analiz ve tasarım için değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Sonlu elemanlar analizinin pratik ve kısa sürede sonuç veriyor olması rijit kolonlu

sistemlerin tasarımında, çokça tercih edilmektedir. Bu çalışmamızda birbirinden farklı rijitliğe sahip kolonların uzun süreli davranışı PLAXIS 2D-3D Sonlu Elemanlar Yazılımı ile modellenerek, rijit kolonların zemin iyileştirmedeki rolü araştırılmış, karşılaştırılmış ve değerlendirilmesi, yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, zemin iyileştirmede kullanılan farklı rijitlikteki kolonların etkisi, rijit taban, kolon rijitliği, kolon malzemesi, kolon çapı, kolon uzunluğu, sürüş yükü gibi uygulamaya yönelik parametrelerin tasarıma etkisi sayısal analizler yardımıyla araştırılmıştır.

**Bölüm 2’de**, “Önceki Çalışmalar” başlığı altında; rijit kolon takviyeli zemin ile ilgili literatür çalışmaları, mevcut tasarım ilkeleri, uygulama veya sayısal analizde kullanılan mevcut teoriler ve yaklaşımlar sunulmuştur.

**Bölüm 3’te**, "Rijit Kolonlar" başlığı altında; taş kolon, derin karışım, jet grout yöntemleriyle oluşturulan rijit kolonlu sistemlerin, uygulama alanlarından, imalatından, tasarım parametrelerinden ve analiz yöntemlerinden bahsedilmiştir.

**Bölüm 4’te**, "Analitik Yöntemler" başlığı altında; rijit kolonlu sistemlerin analitik çözüm yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca rijit kolonlu sistemlerin uygulamaları için önem arz eden ve göz ardı edilen parametrelerin etkisi araştırılmıştır.

**Bölüm 5’te**, "Sonlu Elemanlar Analizi" başlığı altında; üniform yükleme altında rijit kolonların davranışını araştırmak için yapılan sayısal analizler sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca, parametrik çalışmalar yapılarak rijit kolonların tasarım parametrelerinin kompozit temelin davranışına etkisi araştırılmıştır.

**Bölüm 6’da**, "Arazi Çalışması" başlığı altında; PLAXIS 3D sonlu elemanlar programı kullanılarak elde edilen analiz sonuçları ile arazi ölçümleri karşılaştırılıp sayısal analizlerin güvenilirliği ve doğruluğu araştırılmıştır. Ayrıca bu bölümde farklı rijitliğe sahip kolonların davranışı da incelenmiştir.

**Bölüm 7’de**, ise bu çalışma kapsamında elde edilen "Sonuçlar ve Öneriler" sunulmuştur.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Rijit kolonlar, geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirme amaçlı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Taş kolonlar, derin karışım kolonları, beton kolonlar ve jet grout kolonları örnek olarak sayılabilir. Zemine göre daha yüksek rijitliğe sahip bu kolonların davranışı literatürde çeşitli yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Bu bölümde konu ile ilgili; literatürde yer alan arazi, laboratuvar ve teorik çalışmalarının bir özeti sunulmuştur.

### 2.1. Taş Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

**Watts ve ark., (2000);** değişken bir dolguda, taş kolonlarla desteklenen ve desteklenmeyen şerit temelin performansı üzerinde yapılan deneyler sunulmuştur. Model deneyde, kolonların gerilmeyi aşağı doğru aktarmasının sonucu olarak, iyileştirilmiş bölgenin altındaki zemin tabakasının sıkıştırılmasıyla önemli bir oturma meydana geldiği görülmüştür. Bu nedenle, kısmen nüfuz eden kolonların tasarımı için derinliğin ciddi olarak incelenmesi önerilmiştir. Çalışma sonunda değişken bir dolgu üzerine yapılan şerit temelin, toplam ve farklı oturmalarının taş kolonlarla azaltılabileceği tespit edilmiştir.

**Wood ve ark., (2000);** taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin davranışını incelemek için model deneyler yapılmıştır. Deneylerde taş kolonlarının çapı, uzunluğu ve aralığı gibi parametrelerin etkisini araştırılmıştır. Kolonlar için optimum (kritik) bir uzunluğun olduğunu ve optimum ötesindeki bir uzunluğun, taş kolonlar için hiçbir avantaj sağlamadığı belirtilmiştir. Ayrıca, gerilmenin daha derinlere aktarılmasından dolayı, alan değiştirme oranı arttıkça optimum uzunluğun artması gerektiği ileri sürülmüştür. Bunlar dikkate değer bulgulardır, ancak temelin boyutu, alan değiştirme oranı ve kolon uzunluğu ile ilgili hiçbir ilişki niteliksel olarak saptanmamıştır.

**Kirsch ve Sondermann, (2003);** deformasyon ve şev stabilitesi analizlerinde kritik bir parametre olan, taş kolonların gerilme konsantrasyonu, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile araştırılmıştır. Sayısal sonuçlara dayanarak, taş

kolonların kare yerleşim düzeninde ve alan değişim oranı ( $A_c / A = 4$ ) 4 olduğu yerlerde, yükleme ile gerilme konsantrasyonunun arttığı gözlemlenmiştir.

**McKelvey ve ark., (2004);** kil zeminde imal edilen yüzen taş kolon grubunun, yük deformasyon özelliklerini incelemek için bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Deneylerde kil benzeri özelliklere sahip saydam bir madde ve kaolin kullanılmıştır. Saydam malzeme, yükleme sırasında deforme kolonların görsel olarak incelenmesine olanak tanımıştır. Çalışma sonunda, uzun kolonlarda yanal genişlemenin daha belirgin olduğu ve kısa kolonların ise zımbalama davranışı sergileme eğiliminde olduğu görülmüştür. Taş kolonların, yumuşak zeminin yük taşıma kapasitesini arttırdığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, çaplarının 6 katından uzun kolonların ( $l/d > 6$ ), yük taşıma kapasitesinde herhangi bir artış sağlamadığı ancak oturmayı azaltmaya katkı sağladığı tespit edilmiştir.  $L/d=10$  oranına sahip kolonların üst bölgesinde deformasyonlar gözlenirken, alt kısımlarında deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu nedenle McKelvey ve ark., (2004), malzeme mukavemetine bağlı olarak taş kolonun optimum uzunluğunun  $6d$  ila  $10d$  aralığında olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, temel boyutunun ve temelleri destekleyen kolon sayısının artması ile oturmaların azaldığı ifade edilmiştir.

**Chen ve Bailey, (2004);** Washington'un batısında bulunan bir çalışma alanında, dolgu projesinin altındaki zeminin iyileştirilmesi amacıyla taş kolon uygulamalı bir test programı yürütülmüştür. Taş kolonlar, başlangıçta zemin sıvılaşmasını azaltma, kayma mukavemetini artırma ve oturmaları azaltma amacıyla tasarlanmıştır. Taş kolonların çap, mesafe ve alan değişim oranı gibi değişken kontrol parametreleri ile dört farklı taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Taş kolonların imalatından önce ve sonra dört test alanının her birinde, uygulama performansının değerlendirilmesi için Standart Penetrasyon Testleri (SPT) ve Koni Penetrasyon Testleri (CPT) yapılmıştır. Çalışmalar neticesinde, %15'ten daha az ince tanecik içeren bölgelerde iyileşme olduğu fakat %15'in üzerinde ince tanecik içeren bölgelerde herhangi bir iyileşmenin sağlanmadığı ifade edilmiştir.

**Kirsch, (2006);** yumuşak zeminlerde, tekil ve kısmen gömülü taş kolonun oturma performansını değerlendirmek amacıyla, arazide yükleme deneyi sırasında ölçülen oturmalar kullanılarak, sonlu elemanlar yazılımı ile geri analiz yapılmıştır. Taş kolonların davranışı PLAXIS 3D (2013) bilgisayar programı ile üç boyutlu koşullarda araştırılmıştır. Sayısal modeller, arazi yükleme deneylerinin sonuçlarına göre doğrulanmıştır.

**Wehr ve Herle, (2006);** 6m uzunluğunda, 0.9m çapında yüzen taş kolonlarla desteklenen, 9 m yüksekliğindeki bir dolgunun, oturma oranını araştırmak amacıyla hem sayısal analizler gerçekleştirilmiş hem de analitik yöntemlerle hesaplamalar yapılmıştır. İyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumda oturmaların farklı yöntemlerle hesaplanması gerektiği ifade edilmiştir. Analitik çalışmalarda, ilk olarak nihai oturmaları tahmin etmek için Priebe (1995) yöntemi ve zamana bağlı oturmaları hesaplamak için de BalaamBooker (1981) yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal analizlerde PLAXIS 2D programı kullanılmış ve zemin Mohr-Coulomb zemin modeli ile modellenmiştir. Çalışmalar sonucunda, taş kolonların dolgunun oturmasını önemli ölçüde azalttığı, analitik yöntemler ve sayısal analizlerle elde edilen sonuçların uyum sağladığı gözlemlenmiştir.

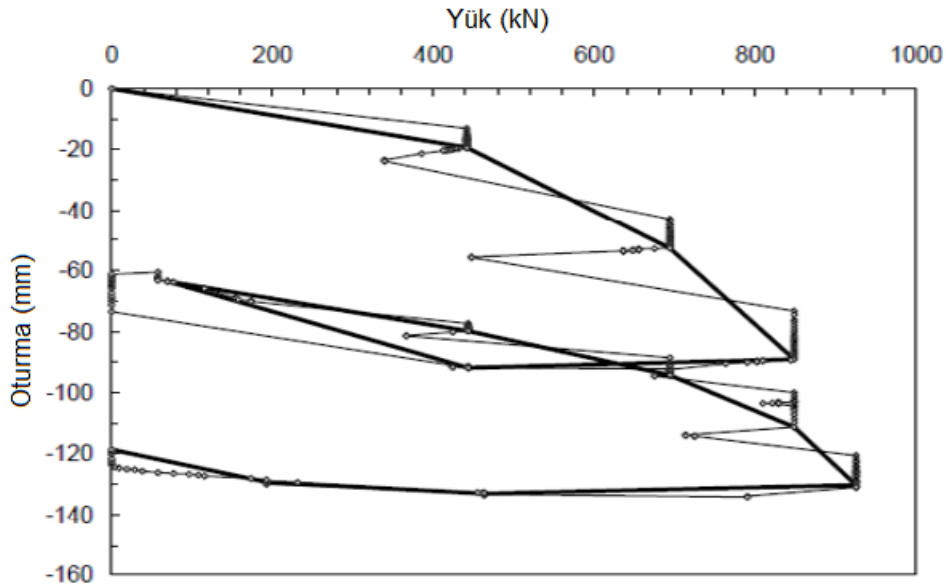
**Gäb ve ark., (2007, 2008);** Avusturya'nın Klagenfurt kentinde, yeni bir futbol stadyumu inşaatı için deneme dolgu çalışması yapılmış ve farklı ölçüm cihazları yerleştirilerek yaklaşık 14 ay boyunca okumalar yapılmıştır. 10.5 m yüksekliğindeki dolguyu desteklemek için yüzen kolonlar kullanılmıştır. Ayrıca bu kolonlar 14.5 m uzunluğunda,  $\alpha = 0.13$  alan değişim oranına ( $\alpha = A_c / A$ ;  $A_c =$  kolon kesit alanı,  $A =$  toplam etki alanı) sahip ve zayıf zemine yaklaşık 3.5 m nüfuz edecek şekilde teşkil edilmiştir. Ölçüm sonuçları ile, yüzen taş kolonların kullanılabilirliğini ancak kolonların altındaki iyileştirilmemiş yumuşak zemin tabakası için oturmaların önemli olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, bu özel durumda, yumuşak killi silt tabakası üzerindeki gevşek kum tabakası sıkılaştırılmış ve bu tabakanın oturmasını önemli ölçüde azaltılmıştır. Ayrıca, Üç boyutlu sonlu

elemanlar analizi kullanılarak geri analizler yapılmıştır. Analizlerde, pekleşme zemin modeli (HS), Modifiye Cam Kil (MCC) ve S-CLAY1 modelleri kullanılmıştır. HS modelinden elde edilen düşey deplasman sonuçlarının saha ölçüm değerlerinden fazla olduğu tespit edilmiştir. HS-küçük model ve MCC modeli, arazi ölçümlerinden daha düşük oturma değerleri verirken S-CLAY 1 sonuçlarının ölçülen değerlerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak sayısal analiz sonuçlarının, saha ölçümleri ile uyum sağladığı vurgulanmıştır.

**Black ve ark., (2007);** yumuşak kaolin kilinin (100 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde) taş kolonlarla iyileştirildiği, drenajlı ve drenajsız koşullarda test edildiği deneysel bir çalışma yapılmıştır. Geniş yayılı yüklemeye koşulu yansıtmak için hem tekil kolon hem de kolon grubu kullanılmıştır (temel kullanılmamıştır). Drenajlı deney sonunda, kolon gruplarında meydana gelen oturma, tekil kolonlardaki oturmaya göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, kolon grubundaki ince kolonların eğilmesinin, daha büyük çaplı tekil kolonun eğilmesinden daha kolay olmasına bağlanmıştır. Yazarlar ayrıca, aynı alan değiştirme oranı için, kolon grubunun tekil kolona göre daha az rijitlik sağladığını iddia etmişlerdir. Drenajsız deney sonunda, yüzen tekil taş kolon durumunda farklı oturmalar azalırken, kolon grubunda kayda değer bir azalma görülmemiştir. Ancak bu konuda bir açıklama yapılmamıştır.

**Black, (2007);** birim hücre modeli kullanılarak yapılan laboratuvar deneylerinde, 3.3 ila 10.5 aralığında çeşitli  $L / d$  oranlarına sahip tekil taş kolonun performansı incelenmiştir.  $L / d$  oranı 6.5 değerine yükseldikçe zımbalama ve yanal şişme göçmeleri gözlemlenmiştir.  $L / d$  oranı 8 değerine ulaştığında, kolonda belirgin bir zımbalama davranışı görülmemiştir. Bu nedenle yazar, kolonun optimum uzunluğunun  $(L) 8d$  olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, tekil bir kolon durumunda oturmayı kontrol etmek için belirli bir  $L / d$  değerinin kullanılmayacağı vurgulanmıştır. Kolon uzunluğunun artırılmasıyla taşıma kapasitesinde artış olmayacağı, ancak iyileştirilmiş zeminin daha az oturma yapacağı ileri sürülmüştür.

**Kirsch, (2008);** 3 m × 3 m'lik bir rijit kare temel ile yüklenen, beş taş kolondan oluşan bir kolon grubun davranışını araştırmak için kapsamlı yük testleri gerçekleştirilmiştir. 11 m kalınlığındaki yumuşak zemin içinde, 0,8 m çapında 9 m uzunluğunda kısmen gömülü taş kolonlar inşa edilmiştir. Yumuşak zeminin drenajsız kayma mukavemeti,  $c_u$  yaklaşık 12 kN / m<sup>2</sup> -18 kN/ m<sup>2</sup> olduğu belirlenmiştir. Yapılan yük testi, birkaç aşamada gerçekleştirilmiş ve toplam 10 gün boyunca devam edilmiştir. İki basınç ölçer hücresi, üç zemin basıncı hücresi ve bir boşluk suyu basıncı hücresi dahil olmak üzere tüm aletler taş kolonların imalatından önce yerleştirilmiştir. Sonuçlardan, 920 kN'lik ilk yükleme safhasının son aşamasında toplam 90 mm'lik bir oturma kaydedilmiştir. Daha sonra alan yerleşim oranı, iyileştirme faktörü, kolon uzunluğu ve kolonlar arasındaki yük dağılımı gibi parametrelerin etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal analizlerle hesaplanan değerlerin arazi ölçüm değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 1. Taş kolonlarının yük oturma eğrisi (Kirsch, 2008)

**Elshazly ve ark., (2008)**; grup taş kolonlardaki oturma analizlerinde, birim hücre kavramının güvenilirliği araştırılmıştır. Taş kolon tasarım yöntemlerinin çoğunun, grup taş kolonlar için uygun olmayan birim hücre konseptine dayandığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar tarafından, birim hücre oturması ile kolon gruplarının oturmasını ilişkilendirebilen, değiştirilmiş bir oturma düzeltme faktörü,  $f (f = S / S_{uc})$  geliştirilmiştir. Ancak önerilen düzeltme faktörünün çevredeki zeminin doğal parametrelerinden ve temelin boyutlarından etkilendiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, iyileştirilmiş zeminin uzun süreli oturmalarını belirlemek için de sayısal analiz yapılmıştır. Bazı durumlarda, özellikle yumuşak zeminlerde, kolon gruplarının oturma miktarının birim hücrenin oturma miktarından daha düşük olduğu ifade edilmiştir ve bunun da çevredeki zeminlerin düşük sınırlayıcı baskısından kaynaklanabileceği vurgulanmıştır.

**Serridge ve Sarsby, (2010)**; İskoçya'daki Bothkennar yumuşak kil araştırma sahasında yer alan aşırı-konsolide kil tabakasında, yüzen kolonlar üzerine inşa edilen temelin performansı araştırılmıştır. Çalışmalarının sonucunda, taş kolonların oturmayı azaltabildiği ve düşük katlı bina temellerine göçmeye karşı emniyet sağladığı açıkça görülmektedir.

**Killeen ve McCabe, (2010)**; taş kolonlarla iyileştirilmiş zemin üzerine yapılan, 3mx3m boyutlarında rijit bir temelin davranışını incelenmiştir. 3D sonlu elemanlar analizi yardımı ile kolon uzunluğu, yerleşim düzeni, kolonlar arası mesafe, kolon rijitliği gibi parametrelerin sistemin davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı  $\phi = 45^\circ$  olarak alınmış ve tüm zeminler için pekleşme zemin modeli (Hardening Soil, HS) kullanılmıştır. Analizler sonucunda, kolon uzunluğunun artması ( $L=10d$ ,  $L>10d$ ) ile oturma iyileştirme faktörü  $n$  değerinin arttığı ancak kolon uzunluğu  $L = 3d$ 'ye arttırılmadan önce oturma iyileştirilmesinde önemli bir artış olmadığı gözlemlenmiştir.

**Castro ve Sagaseta, (2010)**; taş kolonlu sistemin konsolidasyon hesabında, farklı analitik çözümlerin doğruluğunu değerlendirmek için sonlu elemanlar analizi

gerçekleştirilmiştir. Üniform yükleme koşulları altında iyileştirilmiş zemin için, Mohr-Coulomb zemin modelini benimsenmiş ve durumu basitleştirmek için, kompozit sistemin elastik olarak davrandığı varsayılmıştır. Ancak, sayısal model anlık ve yatay deplasmanları içerdiği için iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür. Sayısal modelde, yumuşak zeminlerde aşırı boşluk suyu basınçlarının dağılımı göz önüne alınmıştır, ancak birçok yaklaşımda kaydedilen konsolidasyon derecesi genellikle %40'tan fazla farklılık göstermemiştir. Bunun, başlangıçtaki aşırı boşluk suyu basınçlarının üniform bir şekilde dağılmamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir.

**Mohamedzein ve Al-Shibani, (2011)**; taş kolonlarla iyileştirilmiş, yumuşak bir zemine inşa edilen köprü yaklaşma dolgusu incelenmiştir. Taş kolonlar, tabaka kalınlığı 2.5m-8.5m olan zemine 0.5 m uzunluğunda inşa edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin dolgu yükü altındaki davranışı, oturma plakaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Analitik hesaplar ve sonlu elemanlar yöntemleri ile elde edilen değerler, arazi ölçümleriyle karşılaştırılmış ve çoğunda ölçülen değerlere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi çalışması sonunda,  $\beta = 0.5$  ( $\beta$  = zemin tabakasının kalınlığının, kolonun uzunluğuna oranı) derinlik oranına sahip yüzen taş kolonlarının, tam nüfuz eden kolonlar kadar etkili olabileceği görülmüştür. Ayrıca, oturma azaltma faktörünün alan değiştirme oranındaki artışla azaldığı ve  $\beta < 0.4$  durumunda oturma azaltma faktöründe dikkate değer bir azalma olmadığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte, bu optimum derinlik oranının çalışmanın yapıldığı sahaya özel olduğu ifade edilmiş ve bu derinlik oranının temelin büyüklüğüne, rijitliğine ve yumuşak zemin tabakasının kalınlığına bağlı olduğu vurgulanmıştır.

**Ng ve Tan, (2011)**; birim hücre kavramı kullanılarak, taş kolonun derinlik oranı ile ilgili parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sabit bir kalınlığa sahip yumuşak zeminde oluşturulan, farklı uzunluklardaki taş kolonlarda derinlik oranının etkisini anlamak için konsolidasyon analizi yapılmıştır. Sonuçlardan, derinlik oranı arttıkça aşırı boşluk suyu basıncının yayılma süresinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu

durumdan yola çıkarak, uzun taş kolonun, kısa bir kolondan daha hızlı ve daha etkili drenaj sağladığı dolayısı ile kısa kolonlardaki aşırı boşluk suyu basıncının uzun kolonlara göre daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. Öte yandan, taş kolon derinlik oranının artması ile daha az oturma ve boşluk suyun basıncında daha hızlı yayılma sağlanacağı belirtilmiştir.

**Shahu ve Reddy, (2011);** yüzen taş kolon grubu temelleri üzerinde tamamen drenajlı, yük kontrollü, küçük ölçekli bir laboratuvar model deneyi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar 3D analizi kullanılarak; kolon malzemesinin nem içeriği, alan değişim oranı, kolon uzunluğu ve sıklığı gibi çeşitli parametrelerinin etkisi değerlendirilmiştir. Modelde killi zemin davranışı modifiye Cam-kil modeli ile temsil edilirken, taş kolon ve granüler mat için Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarla alan oranı, kolon uzunluğu, aşırı konsolidasyon oranı, kolon rijitliği ve yumuşak zeminin gerilme oranı gibi parametrelerin yüzen taş kolonlu sistemleri etkilediği belirtilmiştir. Daha yüksek alan oranına ve daha uzun kolonlara sahip olan temelin daha düşük oturmaya sahip olacağını açıklanmıştır. Taş kolon üzerindeki granüler matın kalınlık ve içsel sürtünme açısının, oturma üzerinde daha az etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca model deneyler ve sayısal analizlerle elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Yazarlar tarafından, yüzen taş kolonların uygulamasında bir tasarım çizelgesi sağlanmıştır. Fakat yapılan deneylerin az (15 adet), FEM analizlerinin iri mesh yapması ve model kalibrasyonu nedeniyle şüpheli olmasından ve daha önce yapılan çalışmalar dikkate alındığında, tasarım çizelgesinin önemli mühendislik gerekçeleri olmaksızın çok genelleştirildiği görülmüştür.

**Killeen, (2012);** taş kolon kayma mukavemeti parametrelerinin ( $c, \phi$ ), kısmen gömülü taş kolon grubunun oturma performansına etkisini incelemek için bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde zemin modelleri, kolon yerleşim düzeni, yeraltı su seviyesi, kolon boyu ve çapı gibi parametreler sabit tutulup, kohezyon ve içsel sürtünme açısı etkileri araştırılmıştır. 0-10-20-30-40-50 kPa kohezyon ve  $5^\circ - 10^\circ - 15^\circ - 20^\circ - 25^\circ - 30^\circ - 35^\circ - 40^\circ - 45^\circ - 50^\circ$   $\phi$  değerleri için

analizler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte kolon malzemesinin rijitlik etkisini incelemek için sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Analizler sonucunda, taş kolonların oturma davranışının, kolon malzemesinin mukavemet parametrelerinin artması ile kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir.

**Castro ve ark, (2014);** yumuşak bir zeminin oturmasını azaltmada, taş kolon etkisini incelemek için sayısal analizler yapılmıştır. Çalışmada birim hücre modeli kullanılmıştır. Bothkennar kilini modellemek için S-CLAY1S zemin modeli, kolon ve dolgu malzemesi için Mohr-Coulomb zemin modeli seçilmiş ve karşılaştırma için modifiye Cam Kil modeli kullanılmıştır. Sonuçlarda; gerilme alanındaki değişikliklerin, yüksek yükleme ve yakın aralıklı kolonlar için faydalı olduğu, ancak daha düşük yüklerde, daha geniş aralıklı kolonlarda ve aşırı konsolide zeminlerde tam tersi olabileceği vurgulanmıştır. Radyal gerilmelerin artışı, zemin anizotropisinin değişmesi ve ön konsolidasyon basıncının artması (zemin rijitliğini artırır ve boşluk oranını azaltır) gibi değişikliklerin oturmayı azaltmada olumlu bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir.

**Ng ve Tan, (2014.a);** kısmen gömülü taş kolonlarla iyileştirilmiş bir temel sisteminin, oturmasını ve konsolidasyon özelliklerini incelemek için birim hücre modeli kullanılarak iki boyutlu (2D) sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Araştırma boyunca, drenajsız analizler yapılmıştır. Oturma için hesaplanan değerler ve zamanla fazla boşluk suyu basıncı dağılımı, farklı alan değiştirme oranları için karşılaştırılmıştır. Derinlik geliştirme oranının azalması, daha fazla oturmaya ve daha uzun konsolidasyon süresine neden olduğu tespit edilmiştir. Sayısal sonuçlara dayanarak yüzen kolonların konsolidasyon derecesini tahmin etmek için basit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin yalnızca U %60 için geçerli olduğu belirtilmiştir. Taş kolonlar için basitleştirilmiş yeni tasarım yöntemi, uzunluk oranı, alan değiştirme oranı, kolon malzemesinin sürtünme açısı, yük yoğunluğu ve imalat sonrası zemin basıncı gibi bir dizi parametrik çalışmaya dayanarak hesaplanmaktadır.

Ng ve Tan, (2014b); sonlu elemanlar yöntemini esas alan PLAXIS programı yardımıyla, kolon malzemesinin sürtünme açısı, granül tabaka kalınlığı, kolon rijitliği, zemin rijitliği ve yükleme yoğunluğu gibi parametrelerin oturma oranı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik sonuçlardan, taş kolon malzemesinin sürtünme açısının ve granül tabaka kalınlığının, oturma iyileştirme faktörleri üzerinde büyük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Zemin rijitlik etkisinin, kolon rijitlik etkisinden daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Zemin daha yumuşak ve / veya daha küçük bir yüklemeye tabi olduğunda daha iyi oturma iyileştirmelerinin elde edileceği vurgulanmıştır.

Ng, (2017); küçük ve büyük kolon grupları için yüzen taş kolonun oturma oranı üzerinde çalışan iki adet 2D sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle büyük kolon grupları için kısmen gömülü taş kolonların oturmasının tahmin edilmesi zordur. Bu çalışmada, birim hücre modeli kullanılmıştır. Kolon uzunluğu, alan değiştirme oranı, yükleme yoğunluğu ve yükleme sonrası yanal toprak basıncı gibi kilit parametrelerin oturma oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, kısmen gömülü taş kolonların oturma oranını hesaplamak için basitleştirilmiş bir çözüm önerilmiştir. Öte yandan, küçük bir gruptaki kısmen gömülü taş kolonun oturma performansı, farklı alan değiştirme oranı ve kolon uzunluğu bakımından incelenmiştir. Çalışmada sonlu eleman analizleri hem küçük hem de büyük kolon grupları için kilit parametrelerin oturma oranı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

#### Büyük Kolon Grupları

1. Kısmen gömülü taş kolonların oturma oranı, kolon uzunluğundan ve alan değiştirme oranından çok fazla etkilenmektedir.
2. Oturma oranı ve kolon uzunluğu arasında yakın doğrusal bir ilişki vardır.
3. Kolon malzemesinin sürtünme açısı, gerilme konsantrasyon oranı ve oturma oranı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

4. Yük yoğunluğu ve yükleme sonrası yanal toprak basıncı, oturma oranı ve gerilme konsantrasyon oranı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.
5. Büyük kolon grupları için tahmini oturma oranı için model geliştirildi.

#### Küçük Kolon Grupları

1. Optimum uzunluk,  $L_{opt}$  çoğunlukla 1.2D ile 2.2D arasında değişen temellerin boyutu ile kontrol edilir.
2. Optimum uzunluk, kolon sayısı ile değil, alan değiştirme faktörleriyle daha fazla etkilenir.
3. Belirli sayıda taş kolon için, alan değiştirme oranı arttığında oturma oranı artar.
4. Kolon grupları büyüdükçe, oturma oranı da artar.

#### 2.2. Derin Karışım ile İlgili Yapılan Çalışmalar

**Baker ve ark., (1997);** kısa kireç -çimento kolonunun (60 cm çapında, 5 m uzunluğunda) deformasyon modülünü ölçmek için arazi yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tam ölçekli deneysel zorluklardan dolayı, sahada çimento işlemine tabi tutulan zemin kütesinin deformasyon modülünü elde etmenin zor olduğu ifade edilmiştir. PLAXIS 2D programı yardımıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır ve kireç-çimento kolonlarının oturmayı önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. İyileştirilmiş kil zemindeki deformasyonların, kolonların taşıdığı gerilmeye ve dolayısıyla kolonların rijitliğine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

**Bergado ve ark., (1999);** Tayland'daki Bagna -Bangpakong Otoyolunda bir vaka çalışması yapılmıştır. Aşırı oturma ve stabilite sorunları olan bu yolu iyileştirmek için derin karışım yöntemi kullanılmıştır. Kolonlar, 0.6m çapında, 14m-16m uzunluğunda ve kolonlar arası mesafe 1.5m olacak şekilde imal edilmişlerdir. Taşıma kapasitesi, oturma ve stabilite ile ilgili deneyler ve sayısal analizler

yapılmıştır. Tahmin edilen düşey ve yatay deformasyonlar karşılaştırılmış ve genel olarak sahada gözlemlenen değerler ile yakın sonuçlar elde edilmiştir.

**Miki ve Furumoto, (2000);** derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmiş dolgu yüklemesinin, gerilme konsantrasyon oranını değerlendirmek için büyük ölçekli laboratuvar model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerilme konsantrasyon oranı, daha sonra deney sonuçlarına dayanan basit bir hesaplama modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, geogrid veya yüzey tabakası stabilizasyon yönteminin iyileştirme oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dolgunun yüksekliği ve iyileştirme oranı arttıkça, gerilme konsantrasyon oranının arttığı gözlemlenmiştir. Dolguda geogridin ya da yüzey tabakası stabilizasyon yönteminin kullanılmasıyla iyileştirme oranı azaltılmıştır. Özellikle, yüzey tabakası stabilizasyon yöntemi kullanımının kolonla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zemin arasındaki farklı oturmaları azaltmada etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, araştırmacılar derin karışım metodunun, saha koşullarına bağlı olarak ekonomik bir iyileştirme yolu olarak kullanılabileceği kanısına varmışlardır.

**Kitazume ve ark., (2000);** kolon rijitliği ve dış yüklerin, iyileştirilmiş zemin ve kolon davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için santrifüj deneyleri yapılmıştır. Bütün deneyler, drenajsız bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Farklı kolon rijitliklerine sahip model temeller, kırılma zarfları oluşturmak için çeşitli düşey ve yatay yük kombinasyonlarına tabi tutulmuştur. Deri karışım kolonlarıyla iyileştirilen zeminin, yükleme durumuna ve kolon rijitliğine bağlı olarak ya kırıldığı ya da göçtüğü ifade edilmiştir. Kolonların taşıma gücü,  $q_{uc}$  213 ila 27200 kPa arasında değişmiştir. Gerilme büyüklüğünün, deplasmanlardaki artışla birlikte hızlı bir şekilde arttığını ve en yüksek gerilmenin, üniform düşey deformasyonun yaklaşık 0.05 ila 0.10'unda meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, kırılma zarflarını belirlemek için deneysel veriler sonlu elemanlar yöntemi hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır.

**Shen ve ark., (2003);** derin karışım kolonlarının imalatı sırasında ve sonrasında çevredeki zeminlerde özellik değişikliklerine neden olan altı ana faktör

belirlenmiştir: zemin tiksotropisi, zemin kırılması, çimento penetrasyonu ve difüzyonu, sementasyon, konsolidasyon ve ısınma. Ariake kilinde zemin tiksotropisi, zemin kırılması ve sementasyonun etkilerini araştırmak için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları, çevreleyen kilde, kolonların kenarından kolonların yarıçapının iki katı bir mesafeye kadar özelliklerin değiştiğini göstermiştir. Bu etkili bölge içerisinde, su içeriğinin kolonlara yakın örneklerde azaldığı, pH değerlerinin ve elektriksel iletkenliğin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çevreleyen killerdeki drenajsız kayma mukavemetinin, karıştırma sırasında azaldığını, ancak 7 günlük bir sertleşme süresinden sonra yeniden mukavemet kazandığını ve bu çalışmada 28 gün boyunca artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir.

**Bergado ve ark., (2005);** derin karışım yöntemi ile iyileştirilmiş yumuşak kil zemin davranışını tam ölçekli bir deney ile gözlemlenmiş ve Tayland'daki köprü yaklaşma dolgusunun altındaki sistemin oturma mekanizması araştırılmıştır. Zemin çimento kolonları; 0.5 m çapında, 9 m uzunluğunda ve 1.5 m aralıklarla inşa edilmiştir. Kolonlar üzerine yapılan tam ölçekli dolgu yüklemesi bir yıla kadar izlenmiştir. Sonuçlara göre, yumuşak kilin dolgu yüklemesi altındaki oturması en az %70 oranında azaltılmıştır.

**Miao ve ark., (2008);** deri karışım kolonlarıyla iyileştirilen bir temelin konsolidasyon hesabı için analitik bir çözüm önerilmiştir. Bir veya iki yönlü düşey drenaj göz önüne alınarak, iki tabakalı sistemin konsolidasyon denklemini çözmek için Laplace dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Stehfest algoritması ise zamana bağlı yükleme için ters Laplace dönüşümünün çözümünde kullanılmıştır. Derin karışım kolonların kısmen nüfuz ettiği zemin üzerine inşa edilen bir dolgunun oturma- zaman ilişkisini hesaplamak için bir konsolidasyon algoritması kullanılmıştır. Önerilen çözüm kullanılarak hesaplanan oturmalar, bir vaka çalışmasında ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır ve sonuçların uyum sağladığı görülmüştür.

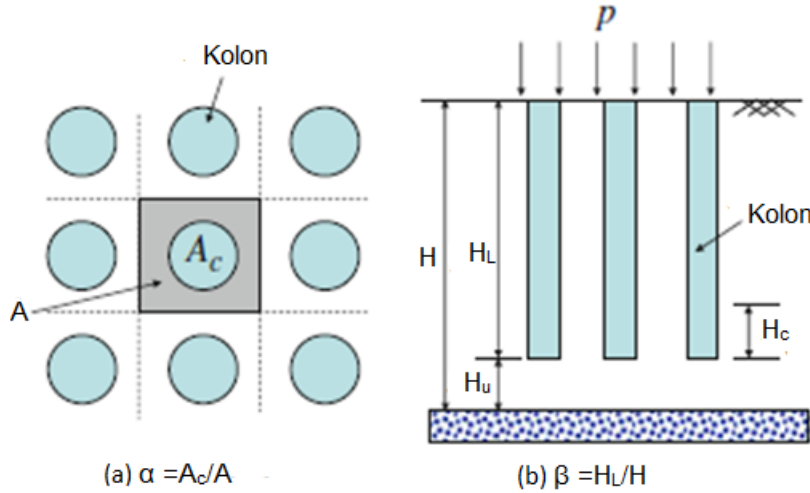
**Chai ve Pongsivasathit, (2010);** kısmen gömülü zemin-çimento kolonlarıyla iyileştirilmiş yumuşak zeminin oturma-zaman eğrisini tahmin etmek için bir yöntem önerilmiştir. Daha sonra, birim hücre kullanılarak sonlu elemanlar analizi

gerçekleştirilmiş ve öngörülen yöntemin doğruluğu araştırılmıştır. Yöntemin ana noktaları aşağıdaki gibidir:

- İyileştirilmiş zemin tabakasının, iki tabakalı bir sistem olabileceği ve konsolidasyon derecesinin iki tabakalı zeminin konsolidasyon teorisi ile hesaplanabileceği düşünülmektedir. Her tabakanın kalınlığını belirleme yöntemi, eşdeğer düşey iletkenlik ( $k_{v1}$ ) ve kolonla iyileştirilmiş zemin tabakasının bir kısmının hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_{v1}$ ) önerilmiştir. Önerilen yöntemin sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları arasında uyum sağlanmıştır.
- Kolonla iyileştirilmiş zemin tabakasının bir kısmının iyileştirilmemiş tabaka olarak ele alınması yöntemi, oturma hesaplamasında benimsenmiştir. Daha sonra tüm sistem için ortalama bir konsolidasyon derecesinin  $U(t)$  kullanılabilmesi varsayılarak, herhangi bir zamanda oturma miktarı hesaplanır.
- Öngörülen yöntem ile elde edilen tahmini sonuçlar, sonlu elemanlar analizi, laboratuvar deneyleri ve Japonya Fukuoka'daki 3 vakanın sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Yöntemin, kısmen gömülü zemin-çimento kolonları kullanılarak yumuşak killi zeminlerin iyileştirme tasarımında kullanılabilmesi öngörülmüştür.

**Chai ve ark., (2010);** çevredeki zemin tabakasından daha rijit olan zemin-çimento kolonlarının imalatıyla mekanik performansı iyileştirilen killi bir zemin tabakasının konsolidasyon oturmasının hesaplanması için basit bir yöntem önerilmiştir ve yöntem Fukuoka, Japonya'daki üç vakada uygulanmıştır. Yumuşak zemini iyileştirmede kısmen gömülü zemin-çimento kolonlarının kullanıldığı durumlarda, kolon üzerindeki gerilme konsantrasyonu, iyileştirme alanı oranı ( $\alpha$ ), derinlik geliştirme oranı ( $\beta$ ) ve kolon boyunca derinliğe göre değişmektedir.

Oturmalar hesaplanırken bu etkileri göz önüne almak için, zemin-çimento kolonlarıyla iyileştirilen zemin tabakasının alt bölümünün az bir miktarı, iyileştirilmemiş tabaka gibi davrandığı varsayılmış ve bu tabaka kalınlığının ( $H_c$ ) tanımlanması için bir yöntem tarif edilmiştir. Birim hücre modelinin kullanıldığı sonlu eleman analizi sonuçlarına dayanarak,  $H_c$  değerini belirlemek için  $\alpha$  ve  $\beta$  değişkenlerine bağlı iki bi-linear fonksiyonu önerilmiştir. Bu yöntem,  $\alpha - \beta$  yöntemi olarak adlandırılmıştır. Japonya Fukuoka'da üç vaka incelemesinde, yumuşak tabakaların oturmasını (sıkışmasını) hesaplamak için önerilen yöntem ve Japonya'da şu an kullanılan yöntem [Japon İnşaat Mühendisliği Enstitüsü (JICE)] öngörülmüştür. Hesaplanan sonuçların arazi verileri ile karşılaştırılması sonucunda, önerilen yöntemin, JICE yöntemine göre çok daha uyumlu sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.



Şekil 2. 2.  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin tanımı (Chai ve ark., 2010)

**Yin ve Fang, (2010);** Deri karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş yumuşak zeminin taşıma kapasitesi ve göçme mekanizmasının araştırılması için bir laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Model zeminin taşıma kapasitesi değerlerinin hesaplanmasında iki farklı yöntem kullanılmış ve ölçülen değerler ile

karşılaştırılmıştır. Mevcut zemin modelinin taşıma kapasitesinin hesaplanmasında, Basit Brom yönteminin daha uyumlu sonuçlar verdiği bulunmuştur. Ayrıca, yumuşak zeminde farklı konumlardaki boşluk suyu basınçlarının ölçülen değerlerinden, kolonların deformasyonu ve zemin konsolidasyonu arasında bağlantı olduğu bulunmuştur. Bu çalışma, ilk kez deri karışım kolonlarıyla iyileştirilen zemin modeli için kama şeklinde bir blok göçmesinin gözlemlendiğini göstermiştir.

**Yin ve Fang (2010);** tam gömülü derin karışım kolon grubu tarafından iyileştirilmiş yumuşak zeminin taşıma kapasitesi ve göçme modunu araştırmak için deneyler yapılmıştır. Model zeminin taşıma kapasitesini hesaplamak için iki farklı yöntem kullanılmış ve hesaplanan değerler ölçülenler değerlerle karşılaştırılmıştır. Mevcut model zeminin taşıma kapasitesini belirlemede, basit Brom metodunun daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca grup kolonlarda, kama şeklinde bir blok göçmesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

**Oliveira ve ark., (2011);** Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş, normal konsolide yumuşak zemin üzerine inşa edilen bir dolgunun davranışı, zemin-su formülasyonu kullanılarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde ilk olarak, derin karışım kolonların etkinliği incelenmiştir. Ardından, kolonlar arası mesafenin, dolgu ve kolonların deforme olabilirliliğinin, kolonların düşey permeabilite katsayısının zemin- kolon sistemi üzerindeki etkisini incelemek için parametrik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir:

1. Dolgu temelinin derin karıştırma kolonlarıyla iyileştirilmesi, oturmayı ve farklı oturmaları azaltır.
2. Derin karıştırma kolonlarıyla konsolidasyon süresi azalır. Çünkü kolon rijitliği ne kadar artarsa konsolidasyon katsayısı da o kadar büyük olur.
3. Beklentilere göre, rijit kolonların etki çapı arttıkça, oturmalar ve kolonlar üzerindeki düşey gerilmelerdeki artışlar daha yüksek olma eğilimindedir.

4. Kolonun permeabilitesi zeminin permeabilitesinden daha yüksek olduğunda derin karıştırma kolonu, kompozit sisteminin su akışını kontrol eden düşey dren gibi davranır; kolonun permeabilitesi, zeminin permeabilitesinden daha düşük olduğunda, su akışı zeminde meydana gelir.
5. Zemin-DMM sisteminin konsolidasyon süresi, sadece geçirgenliğe değil aynı zamanda kolonların rijitliğine de bağlıdır.

**Melentijevic ve Oteo, (2013);** zemin koşullarına bağlı olarak oturmuş bir sanayi binasının mevcut duvar temeli için ıslak derin zemin karıştırma kolonlarının uygulanmasına ilişkin bir vaka sunulmaktadır. Tasarım prosedürü ve oturma tahminleri, sonlu elemanlar analizine dayalı, 2 boyutlu aksenal simetrik koşullarla Plaxis 2D (8.6) ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerle elde edilen tahmini oturmaların, zemin-çimento kolonlarıyla iyileştirme yapıldıktan sonra, yapı döşemesinin yeniden yüklenmesi sonucunda gözlemlenen oturmalarla uyumlu olduğu vurgulanmıştır.

**Jiang ve ark., (2013);** tamamen gömülü derin karışım kolonlarıyla iyileştirilen yumuşak zeminlerin konsolidasyonu, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Bir birim hücrenin dörtte biri kullanılmış, kolon ve çevreleyen zemin elastik malzeme olarak modellenmiştir. İlk önce, sayısal modeli doğrulamak için literatürde taş kolon temeli ile ilgili örnek bir çalışma kullanılmıştır. Daha sonra derin karışım kolonunun tamamen nüfuz ettiği yumuşak zeminin gerilme transferini, oturmasını ve konsolidasyonunu analiz etmek için bu model kullanılmıştır. Yumuşak zemin kalınlığının, alan değişim oranı, kolon rijitliği ve kolon permeabilitesi gibi dört temel faktörün; kompozit temelin gerilme konsantrasyon oranı, oturma ve ortalama konsolidasyon derecesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yapılan analizlerden, oturma veya aşırı boşluk suyu basıncına dayalı olarak hesaplanan ortalama konsolidasyon süresinin aynı olduğu görülmüştür. Gerilme konsantrasyon

oranı, kolon rijitliği ve zaman ile artmıştır, ancak yumuşak zemin kalınlığının, alan değiştirme oranının ve kolon geçirgenliğinin etkisi önemli olmamıştır. Derin karışım kolonlu temelin oturmasının, kolon rijitliği, alan değiştirme oranıyla azaldığı fakat yumuşak zemin kalınlığının artması ile arttığı gözlemlenmiştir. Basitleştirilmiş yöntemin, sayısal sonuçlarla karşılaştırıldığında konsolidasyon oturmasını %10 daha fazla tahmin ettiği ifade edilmiştir.

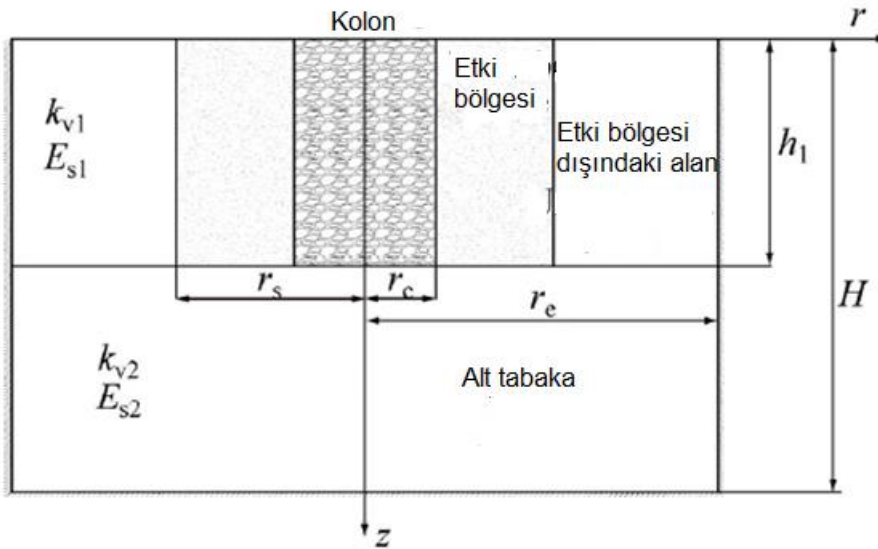
**Farouk ve Shahien, (2013);** derin karışım yöntemiyle yapılan zemin-çimento kolonlarının, Mısır'da henüz önemli bir ilgi görmediğini ifade etmişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında, Nil Nehri Deltası'ndan çıkarılan iki farklı doğal siltli kumlu zemin, farklı çimento dozları ve farklı su- çimento oranlarında örnekler hazırlamak için çimento ile karıştırılmıştır. İyileştirmeden sonra, mukavemet kazanmış numuneler test edilmiş ve bunların serbest basınç mukavemeti araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, grup zemin-çimento kolonları ile iyileştirilmiş şerit temel ve zemini arasındaki etkileşim incelenmiştir. Sonuçlar, araştırılan Nil delta zeminlerinin basınç dayanımının, çimento dozlarının daha düşük değerlerinde bile artabileceğini göstermiştir. Zemin basınç dayanımının, su/çimento oranının artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Zeminin iyileştirmede kullanılan zemin-çimento kolonlarının sayısına ve uzunluğuna bağlı olarak, iyileştirilmemiş zeminin maksimum oturmasında %80 bir azalma sağlanabileceği rapor edilmiştir.

**Gong ve ark., (2015);** iki tabakalı zeminin konsolidasyon teorisine dayanan, kısmen gömülü zemin- çimento kolonuyla iyileştirilen yumuşak zeminlerin konsolidasyon oturmasını tahmin etmek için basitleştirilmiş bir yöntem önerilmiştir. Zemin-çimento kolonuyla iyileştirilmiş zemin tabakasının konsolidasyonu için, eksenel simetrik konsolidasyon modeli ve eşit gerilme varsayımını birleştiren ana denklem türetilmiştir. Çalışma sonunda aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

- Konsolidasyon davranışı, kolon derinlik değiştirme oranı ile yakından ilişkilidir. Konsolidasyon oranı, artan  $h_1 / H$  ile artar. Derinlik

iyileştirme oranı küçük olduğunda, konsolidasyon oranı doğal zeminden daha yavaştır.

- Üst zemin tabakasının geçirgenliği, üst ve altta bulunan zemin tabakalarının konsolidasyon katsayıları aynı kalsa bile konsolidasyon davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Üst tabakanın geçirgenliği ne kadar büyük olursa, konsolidasyon oranı o kadar hızlı olur.
- Yükleme periyodu, ortalama konsolidasyon derecesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yükleme süresi ne kadar uzun olursa, konsolidasyon oranı o kadar yavaş olur.
- Kolondan-zemine toplam gerilme oranı, zamanla artar ve aşırı boşluk suyunun sönmülmesi ile kademeli olarak son değere yaklaşır.
- 



Şekil 2.3. Kısmen gömülü zemin-çimento kolonlu yumuşak zeminin konsolidasyon diyagramı (Gong ve ark., 2015)

**Chai ve ark., (2015);** Japonya'nın Saga kentinde, yüzen zemin-çimento kolonlarıyla iyileştirilen yumuşak killi zeminde inşa edilen bir dolgunun davranışı, üç boyutlu (3D) ve iki boyutlu (2D) sonlu eleman analizleriyle (FEM) araştırılmıştır.

2D analizinde kolon sıraları, sürekli duvar olarak modellenmiştir. Arazi ölçüm sonuçlarına ve sayısal analizlere dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. 3D ve 2D FEM sonuçlarının karşılaştırılması şunları göstermektedir: Zeminin oturması ve zeminde oluşan aşırı boşluk suyu basınçları açısından, 2D analizi kabul edilebilir sonuçlar sağlamakta ancak, dolgunun topuğu altında yanıl yer değıştirme ve kolonlardaki eğilme momenti için, 2D analizi yanlış sonuçlar vermektedir. Kolonların eğilmesine dikkat edildiğinde, 3D analizi yapılması önerilmektedir.
2. İnşaat sürecinde dolgu malzemesinin sıkıştırılmasının, dolgu topuğu altındaki kolonlarda yanıl yer değıştirmenin büyüklüğü ve şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu varsayılmıştır. Pragmatik olarak bu etki, rijitliği azaltarak ve dolgu malzemesinin poisson oranını artırarak dolaylı olarak simüle edilebilmektedir.
3. Hem arazide ölçülen hem de FEM sonuçları, kolonların sadece toplam oturmayı azaltmadığını, aynı zamanda, kolon malzemesinin rijitliğinden ötürü dolgu yüklemesi altındaki malzemenin konsolidasyon süresini de hızlandırdığını göstermektedir.

**Esmaili ve Khajehei, (2016);** gevşek kumlu zeminde inşa edilen dolguların davranışlarını anlamak için üç farklı laboratuvar araştırması yapılmıştır:

- I. Zemin iyileştirilmemiştir.
- II. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirme yapılmış ve kolonlar üçgen yerleşim düzeninde inşa edilmiştir.
- III. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirme yapılmış ve kolonlar kare yerleşim düzeninde inşa edilmiştir.

Çalışma sonunda, kare yerleşimli kolonlarla iyileştirmenin yapıldığı durum ile iyileştirme yapılmayan dolgu kıyaslandığında, taşıma kapasitesinde %64 artış ve dolgu kret oturmasında %40'lık bir azalma tespit edilmiştir. Ardından, üçgen yerleşimli kolon durumu ile referans dolgu karşılaştırıldığında, taşıma kapasitesinde %63 artış ve dolgu kret oturmasında %12'lik azalma elde edilmiştir. Bu, genellikle kare yerleşim düzenine sahip derin karışimli kolonların daha iyi performans gösterdiğini doğrulamaktadır. Kare yerleşimin, üçgen yerleşime kıyasla daha iyi performans göstermesi, derin karışım kolonların alan değiştirme kavramıyla ilişkili olabileceğini ifade etmişlerdir.

**Yao ve ark., (2016);** kolon uzunluğunun, alan değiştirme oranının ve sürşarj yükünün kompozit temel oturması üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kolon uzunluğu 40 cm ile 100 cm arasında değişirken, alan değişim oranı 0.023 ile 0.093 arasında değişmiştir. Deney sonuçlarından, alan değiştirme oranının ve sürşarj yükünün sabit olduğu durumlarda, kolon uzunluğunun artmasıyla temel oturmasının azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı kolon uzunluğu ve sürşarj yükü için, alan değiştirme oranı arttıkça temeldeki oturmanın azalacağı ifade edilmiştir.

**Chai ve ark., (2017);** dolgu yükü altında, derin karışım kolonunda eğilme ve eğilme momentinin büyüklüğü, üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Sayısal sonuçlara dayanarak, derin karışım kolonunun eğilmesini dikkate alan bir tasarım yöntemi oluşturulmuştur. Önerilen yöntemlerin kullanılabilirliği, daha önce derin karışım kolonunda yapılan model deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalarla, kolonlardaki maksimum eğilme momentinin değerini etkileyen ana faktörlerin: dolgu yükünün büyüklüğü, zemin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitlik indeksi, kolon alan iyileştirme oranı ve kolon çapı olduğu tespit edilmiştir.

**Frikha ve ark., (2017);** Tunus yumuşak kilinin, zayıf mukavemet özellikleri, sıkıştırılabilirliği ve yüksek organik madde içeriği (%22) nedeniyle sorunlu zemin kategorisinde olduğunu ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmanın ilk adımında, derin

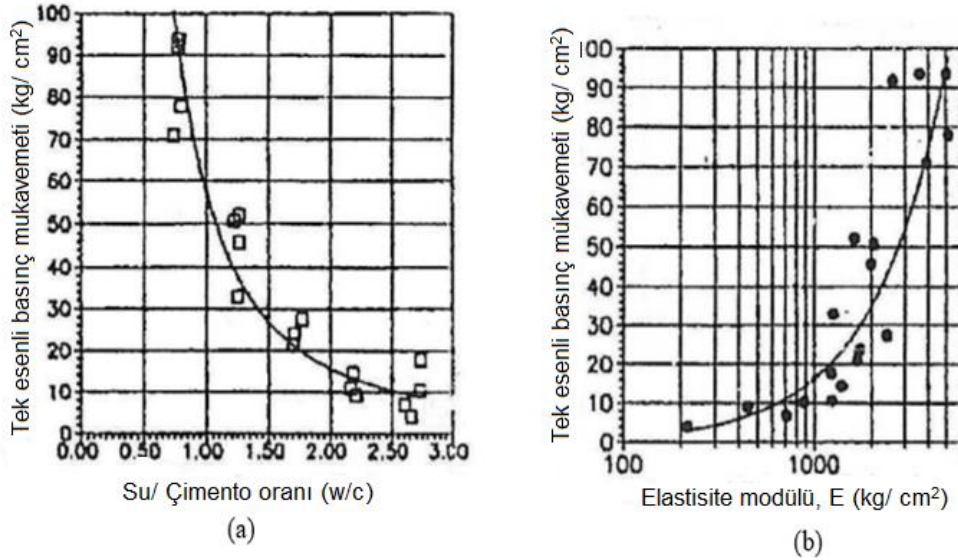
karışım ile yapılan iyileştirmenin yumuşak kilin davranışına etkisini değerlendirilmiştir. İkinci adımda ise; çeşitli deney parametrelerinin, derin karıştırma kolonuyla iyileştirilmiş yumuşak Tunus kilinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde beş parametre çalışılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Laboratuvar çalışması, kayma dayanımındaki artışın derin karışım kolonunun imalatından sonra, erken başladığını göstermiştir. Derin karışım kolonu ile güçlendirilmiş Tunus yumuşak kilinin drenajsız kayma mukavemeti, kürlenme zamanı ile yarı doğrusal olarak artmıştır. Kürlenme süresi 7 günden 28 güne arttığında, drenajsız kayma mukavemeti iki kat artmıştır.
- Enjeksiyon basıncı (IP); arttırıldığında, drenajsız kayma mukavemeti artmıştır.
- Drenajsız kayma mukavemetindeki artış esas olarak su çimento oranına bağlıdır. Sadece su- çimento oranı arttırıldığında, drenajsız kayma mukavemeti azalmıştır.
- Delme aletlerinin dönme hızı [V (dev / dak)] arttırıldığında, drenajsız kayma mukavemeti azalmıştır.
- Konsolidasyon basıncının arttırılması ile drenajsız kayma mukavemeti artmıştır.

### 2.3. Jet Grout ile İlgili Yapılan Çalışmalar

**Kauschinger ve ark., (1992);** jet grout yöntemiyle iyileştirilen, Boston mavi kili zeminin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Farklı su çimento oranları kullanılarak deneyler yapılmış ve su çimento oranı arttıkça, zemin çimento karışımının (soilcrete) basınç mukavemetinin azaldığı ayrıca serbest basınç mukavemeti arttıkça elastisite modülünün arttığı tespit edilmiştir. Boston mavi kili

için, serbest basınç mukavemeti 0.5 MPa -9.5 MPa ve elastisite modülü 20 MPa - 500 MPa arasında değişmiştir.



Şekil 2.4. (a) W/C oranı-Tek eksenli basınç mukavemet ilişkisi (b) Elastisite modülü-Tek eksenli basınç mukavemet ilişkisi (Kauschinger ve ark., 1992)

**Hsieh ve ark., (2003);** altı kademeli bir bodrum kat kazısının yan yüzeyindeki diyafram duvarın deplasmanını azaltmak ve duvar pasif direncini arttırmak amacıyla, kazı alanındaki zemin kütlesi kısmen jet ile doldurulmuştur. Jet enjeksiyonunun etkisini değerlendirmek için sayısal analizler yapılmıştır. Duvar deplasmanı ve zemin oturmaları üzerinde yapılan arazi ölçümleri ve jet kolonlarının, duvar davranışı üzerindeki etkinliği doğrulanmıştır.

**Durgunoğlu ve ark., (2004);** zemini jet grout kolonlarıyla iyileştirilmiş, Karamürsel'deki İpek Kâğıt Fabrikası'nın performansı, 17 Ağustos 1999 depremi sonrası incelenmiştir. Yaptıkları inceleme sonrasında, deprem yüklemesi altında, zeminin sıvılaşma potansiyeli nedeniyle meydana gelebilecek olası hasarlara karşı, %7-%10 alan değiştirme oranı sağlayan jet-grout zemin ıslahının etkili olduğu tespit

edilmiştir. Yapısal hasar incelemeleri, iyileştirilmemiş zemin üzerine inşa edilmiş komşu yapıların olduğu yerlerde yapılmıştır.

**Bergado ve Lorenzo, (2005);** iyileştirilmiş yumuşak kil zemin üzerine inşa edilmiş 6.0 m yüksekliğindeki bir deneme dolgusunun analizi sunulmaktadır. Kolonlar, jet karıştırma tekniği kullanılarak zemine inşa edilmiştir. Dolgu inşaatı sırasında ve sonrasında yüzey, oturmalar ve yanal hareketler izlenmiştir. Derin karıştırma iyileştirmesinin, temel zeminin oturmasını ve yanal hareketini sırasıyla %70 ve %80 kadar azalttığı tespit edilmiştir. Hemen hemen aynı yükseklikte bir başka iyileştirilmiş dolgu ile karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde, jet grout ile yapılan zemin iyileştirmesinin etkinliği doğrulanmıştır. Bu tekniğin hem iyileştirilmiş zemin hem de bu zemin üzerine yapılan dolgunun mühendislik özelliklerinde sağladığı ifade edilmiş ve aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- (1) Yumuşak kil temelini, yanal direncini ve taşıma kapasitesini artırır.
- (2) Güçlendirilmiş duvar / dolgunun yanal hareketini en aza indirir ve iyileştirilmiş zemin kütlelerinin bütünlüğünü iyileştirir;
- (3) Yumuşak kil temelini konsolidasyon hızını artırır
- (4) İyileştirilmiş temelini sıkıştırılabilirliğini ve güçlendirilmiş dolgunun oturmasını azaltır.

**Coulter ve Martin, (2006a);** tünel inşaatı ve desteği için kullanılan yatay jet grout kolonlarının imalatında kullanılan, tipik bir harç karışımının özelliklerini değerlendirmek için laboratuvar deney programı gerçekleştirilmiştir. Arazideki 600 mm çaplı jet grout kolonları ile 76 mm çapındaki laboratuvar numuneleri arasındaki ölçek farkı, laboratuvar numunelerinin sabit bir sıcaklıkta tutulduğu odadaki yalıtkan silindire yerleştirilerek giderilmiştir. Laboratuvarda, ilk jetin uygulanmasından 12 saat sonra yapılan ölçümde mukavemet ve rijitlikte hızlı bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Mukavemet ve rijitlik özelliklerinin sıcaklıkla ilişkili olduğunu ve bu nedenle alandaki sıcaklık ölçümlerinin, mukavemet ve rijitliği tahmin etmek için

yararlı bir gösterge olabileceği tespit edilmiştir. Yüzey oturmalarının ve deformasyonlarının, kazı desteğinde yatay jet kolonları kullanılarak kontrol edilebileceği belirtilmiş bununla birlikte, jet harcının mukavemet kazanmasına izin vermek için bitişik kolonların imalatları arasında yeterli zamana izin verilmesi gerektiği ve böylece jet grout şemsiyesi tarafından yeterli tünel desteğinin sağlanacağı vurgulanmıştır.

**Coulter ve Martin, (2006b);** İsviçre'deki Aeschertunnel tünel yapımı hakkında bilgi verilmiştir. Tünel kazısının buzultaşında olduğu bölümlerde, kazı desteği için tünel ön yüzündeki kemerde jet grout kullanılmıştır. Jet grout işlemi ve tünel ağzının kazılması sırasında alınan ölçümler, geleneksel tünel açma yöntemlerine kıyaslandığında, çalışma alanında daha dar bir oturma çukurunun meydana geldiği gözlemlenmiştir. Böyle bir oturma çukurunun meydana gelmesinin, jet grout işleminde kullanılan yüksek basınçlarla ilişkili olduğu ileri sürülmektedir. Ayrıca sonlu elemanlar programı Phase2 kullanılarak kapsamlı geri analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen oturma çukurunun, ölçülenle uyum sağladığı görülmüştür. Aeschertunnel'deki oturma gözlemleri, jet grout işleminin nispeten küçük bir hacim kaybına yol açabileceğini göstermektedir.

**Nıkbakhtan ve Osanloo, (2009);** jet grout yönteminin, işlem öncesi ve sonrası zemin özellikleri ve grout basıncı, grout akışının zemin çimento kütlelerinin tek eksenli basınç mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, iyileştirilmiş zemin üzerinde beş tip laboratuvar deneyi yapılmıştır: tek eksenli basınç, üç eksenli basınç, doğrudan kesme, Brezilya yarma deneyi ve Schmidt çekici deneyleri. Deneylerden elde edilen sayısal sonuçlara göre, harç basıncını ve akışını arttırarak, zeminin tek eksenli basınç dayanımı (MPa) logaritmik olarak artmıştır. Ayrıca jet grout, kohezyon ve sürtünme açısı gibi özellikleri büyük ölçüde arttırmıştır.

**Nıkbakhtan ve ark., (2010);** İran'daki Shahriar barajında stabiliteyi geliştirmek ve geçirimsizliği sağlamak amacıyla jet grout yöntemi kullanılmıştır. Deneme jet kolonları imal edilerek, jet grout yönteminin prensipleri ve etkili

parametreleri analiz edilmiştir. Daha sonra, deneme jet kolonlarından alınan numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Jet kolon çapının ölçülmesine ve yapılan deney sonuçlarına dayanarak; çap, serbest basınç mukavemeti, su, harç, hava basıncı, kaldırma ve dönme hızı sırasıyla 1.2 ~ 1.5 m, 2 ~ 3 MPa, 370 ~ 390 bar, 10 ~ 15 bar, 6 ~ 8 bar, 7 ~ 8 cm / dak ve 7 ~ 8 cm / dak olarak tahmin edilmiştir. Tüm bu çalışmalar neticesinde, Shahriar barajında kullanılan gerçek jet grout parametreleri belirlenmiştir.

**Chepurnova, (2014);** Moskova'nın Tarihi Merkezinde bulunan iki benzer şantiyede elde edilen bulgulara dayanarak, Jet grout uygulamasından kaynaklı zeminde meydana gelen hareket bozulmalarının minimum değerini elde etmek için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bir mühendisin, sonlu eleman modellemesi uygulayarak, temel iyileştirilmesinden kaynaklı “teknolojik oturmayı” tahmin edebileceği ve bunun, birbiriyle ilişkili birçok parametreye bağlı olan jet grout tekniği için özellikle önemli olduğu vurgulanmıştır. Jet grout nedeniyle minimum deformasyon değerlerinin (sadece bu çalışmada dikkate alınmıştır), 2-3 mm'den az olmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışma ile deformasyonların gerçek değeri, bazı nedenlerden olayı ya az ya da fazla tahmin edildiği durumlarda, temelin iyileştirilmesinden kaynaklanan deformasyonların dikkate alınması gerektiğinin önemini ortaya konmuştur.

**Borges ve Guerra, (2014);** Sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir bilgisayar programı kullanılarak, jet grout duvarı ile tutulan killi bir zemindeki, silindirik bir kazının konsolidasyona bağlı davranışını analiz etmek için çalışmalar yapılmıştır. Kazı çapının, duvarın gömülme uzunluğunun ve duvar malzemesinin elastik modülünün etkilerini analiz etmek için parametrik bir çalışma da yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir:

1- Çevresel basınç gerilmeleri, eğilme momentleri ve duvarın yatay deplasmanları kazı çapıyla önemli ölçüde artmakta, aynı zamanda iyileştirilmiş zeminin üst yüzeyinin oturması da artmaktadır.

2- Duvarın gömülme uzunluğu, duvar yüzeylerindeki zemin basıncını ve çevresel basınç gerilmelerini, eğilme momentlerini ve duvarın yatay yer değiştirmelerini önemli ölçüde etkilememektedir. Bu faktörün ana etkisi, iyileştirilmiş zeminin üst yüzeyindeki konsolidasyon oturmalarında meydana gelmekte ve bu faktör azaldığında oturma önemli ölçüde artmaktadır.

3- Duvarın yatay yer değiştirmeleri, duvarın elastisite modülü (E) ile önemli ölçüde azalmaktadır.

**Pinto ve ark., (2016);** yeni bir terminal inşası için, yapılan tersane dolgusu altında kullanılan jet kolonların teknik ve ekonomik avantajları ayrıca nihai unsurların yapımından önce ve inşaat sırasında sahadaki uygulama kontrolü sunulmuştur. Bu çalışma, aslında jet kolonlarının, geniş ve kapsamlı geoteknik uygulamalarında nasıl kullanılabilceğine örnek olmuştur.

**Goh, (2017);** jet enjeksiyon kolonları ile desteklenen yumuşak killerdeki kazılar için, göçmeye karşı güvenlik faktörünü değerlendirmek amacıyla sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinden, jet grout levhası ve duvar arasındaki yüzey sürtünmesinin, kazı sisteminin göçmeye karşı direncine katkıda bulunan kilit bir bileşen olduğu görülmüş ve güvenlik sayısı, kazı alanının arması ile azalmıştır. Ayrıca, jet grout kolonlarıyla desteklenen derin kazılarda meydana gelecek göçme olasılığını tahmin etmek için bir elektronik tablo şablonu verilmiştir.



### 3. RİJİT KOLON YÖNTEMLERİ

Hızla artan dünya nüfusu, teknolojinin gelişmesiyle birlikte hızlı kentleşmeye neden olmuştur. Bu durum, zayıf zeminlerde mühendislik yapılarının inşasını zorunlu kılmıştır. Genellikle bu zeminler, aşırı oturma özelliğine sahip ve taşıma gücü bakımından yetersizdir. Dolayısı ile zayıf zeminler, üst yapıdan gelen yükleri güvenle taşıyamaz. Böyle durumlarda başa çıkmak için yapı yüklerinin daha sağlam derin tabakalara iletilmesini sağlayan, geleneksel inşaat yöntemlerine göre ekonomik, modern derin zemin iyileştirme teknikleri geliştirilmiştir. Bu zemin iyileştirme teknikleri, zeminden daha rijit bir malzemedan kolonlar oluşturarak (rijit kolon), zemin kütlelerinin derinlemesine iyileşmesini sağlamaktadır. Ayrıca uygun iyileştirme yönteminin seçimi, zemin koşulları, alana yakın materyaller, tercih edilen yöntemin maliyeti ve etkinliği gibi bir dizi faktöre dayanmaktadır.

Sonuç olarak rijit kolonlar, yapı inşa edilmesinin zorunlu olduğu zayıf zeminlerde, sismik etkiler altında sivilaşmayı, oturmayı ve zemin hareketlerini en aza indirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu bölümde, taş kolon, deep mixing, jet grout yöntemleriyle teşkil edilen elemanların uygulama alanları, imalat yöntemleri, yöntemlerin avantajları ve sınırlamaları, tasarım parametreleri ve kalite kontrolü hakkında bilgi verilmiştir.

#### 3.1. Taş Kolon Yöntemi

Zemin iyileştirmede çok eski bir yöntem olan taş kolonlar, muhtemelen eski Iraklılar tarafından MÖ 2. veya 3. yüzyılda kullanılmıştır. Hatra'da (Irak'ın Ninova ilinde yer alan bir antik kent) yapılan arkeolojik araştırmalar sırasında, kireç harcıyla kaplanmış üniform kaya parçaları ile dolu çukurlar bulunmuştur (Al-Obaidy, 2000). Daha sonra Fransa'da 1830 yılında, ordu mühendisleri tarafından Bayonne'deki ağır silahların bulunduğu depo ve demir fabrikasından oluşan yapının temelini desteklemek için taş kolonlar kullanılmıştır (Babu vd., 2013).

1937 yılında Almanya'nın Keller firması tarafından vibro sıkıştırma tekniği, gevşek kumları sıkılaştırmak için kullanılmıştır (McCabe ve ark., 2007). 1950'lerden önce zemin iyileştirmesi sadece kohezyonsuz zeminlerle sınırlı iken, 1956 yılında yüksek oranda (>%15) ince dane içeren kumlu ve kohezyonlu zeminleri iyileştirmek için vibro taş kolon tekniği kullanılmıştır. Bugün, bu teknik birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede yaygın olarak uygulanmaktadır.

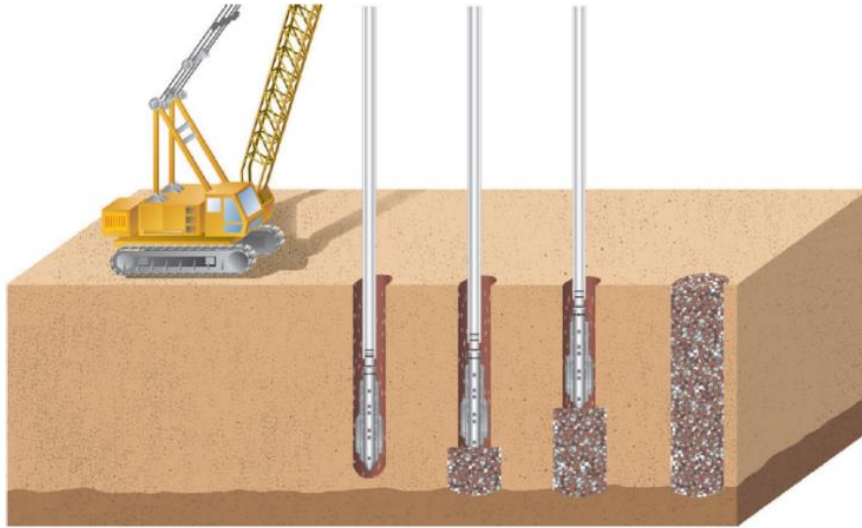
Taş kolonlar, yapımında granüler dolgu malzemesi (kıırma taş) veya (mucur) kullanıldığından dolayı literatürde, 'granüler kolon' ya da 'granüler kazık' olarak da anılmaktadır. Kolonlar çevreleyen zemine göre daha yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip olduklarından, daha fazla yük taşırlar. Bununla birlikte, granüler dolgunun geçirgenliği çevreleyen zeminden daha yüksektir. Sonuç olarak, kolonlar taşıma kapasitesini, stabiliteyi ve kayma mukavemetini artırmak, konsolidasyonu hızlandırmak bununla birlikte toplam oturmayı azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, taş kolonlar deprem riski olan bölgelerde, sismik olaylar sırasında, temelin stabilitesini arttırarak sıvılaşma potansiyelini de azaltırlar.

### 3.2. Taş Kolon Uygulama Alanları

- ❖ Toprak Dolgu barajlar
- ❖ Otoyol, demir yolu ve köprü yaklaşım dolguları
- ❖ Deniz ve açık deniz yapıları
- ❖ Liman / havaalanı tesisleri
- ❖ Enerji santral yapıları
- ❖ Kimyasal tesisler
- ❖ Kanalizasyon arıtma tesisleri
- ❖ Büyük depolama tankları
- ❖ Ticari ve endüstriyel yapılar
- ❖ Binalar

### 3.3. Taş Kolon İmalatı

Taş kolonların yapımında, öncelikle titreşim ve su/hava jeti yardımıyla, tasarım derinliğine vibroprob indirilerek dairesel bir boşluk oluşturulur. Ardından bu boşluk, seçilmiş granüler malzemeler ile tabakalar halinde zemin yüzeyine kadar doldurulur. Kalınlığı 30-120 cm arasında değişen tabakalardaki granüler malzemenin sıkışması için vibroprob tabakaya batırılıp çıkarılır. Ayrıca tam sıkışmanın sağlanması için prob, kısa süreliğine tabakalar üzerinde bırakılır ve bu şekilde yüze kadar ard arda sıkıştırılmış tabakalardan taş kolon oluşturulmuş olur (Şekil 3.1).

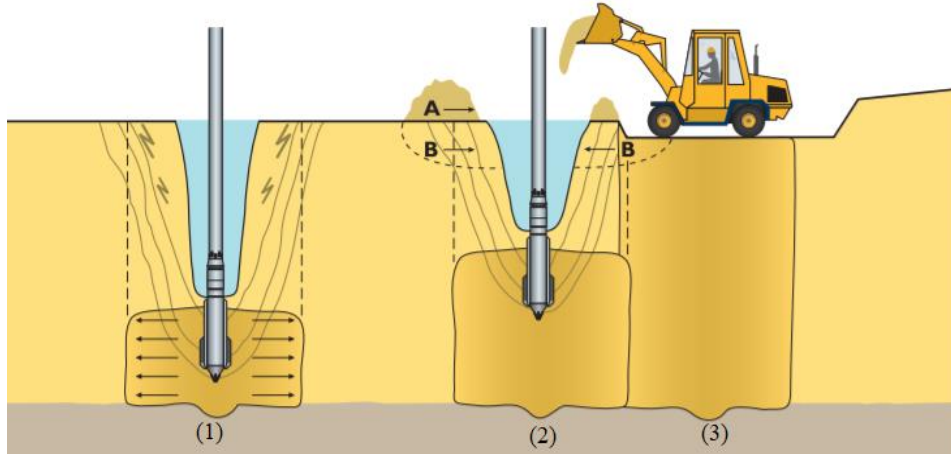


Şekil 3.1. Taş kolon imalat aşamaları (<https://www.haywardbaker.com>)

Taş kolonların imalatında kullanılacak yöntemin seçimi temel olarak, yükleme aralığına, zemin koşullarına (zemin cinsine ve zemin drenajsız kayma mukavemeti) ve gerekli iyileştirme derinliğine bağlıdır. Taş kolon imalat yöntemleri aşağıda başlıklar halinde incelenmiştir.

### 3.3.1. Vibro- kompaksiyon Yöntemi

Vibro-kompaksiyon yöntemi, ince dane oranı %20 (tercihen %10'dan az) olan kohezyonsuz zeminlerin sıkılığını arttırmak için kullanılmaktadır. Vibro-kompaksiyon, çoğunlukla taşıma kapasitesini arttırmakta, oturma ve sıvılaşma potansiyelini azaltmaktadır. Zeminin başlangıç ve hedeflenen sıkılığına bağlı olarak, kolonların merkezler arası mesafesi 1.5 ila 3.5 m ve dizilimi kare, dikdörtgen veya üçgen olacak şekilde uygulanmaktadır (Han, J., 2015). Şekil 3.2’de görüldüğü gibi vibratör, su veya hava jeti yardımı ile tasarım derinliğine indirilir. Daha sonra zemin yüzeyine kadar 0.3-0.5 m aralıklarla geri çekilmeye başlanır ve işlem üstten (A) veya yerinde yapılan (B) geri dolgu ile tamamlanır.

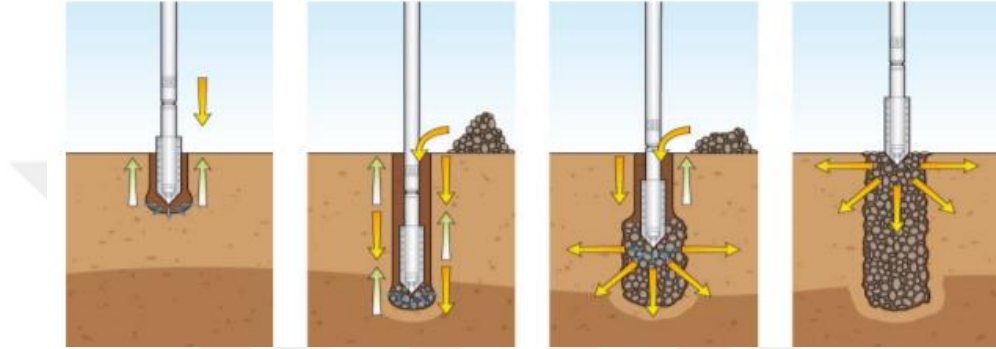


Şekil 3. 2. Vibro-kompaksiyon (<http://www.kellerholding.com>)

### 3.3.2. Vibro-yerdeğiştirme Yöntemi (Islak Yöntem)

Vibro-yerdeğiştirme, drenajsız kayma mukavemeti 15 kPa'dan yüksek kohezyonlu zeminlerde, uygun maliyetli ve çok kullanılan bir derin vibrasyon yöntemidir. Bu yöntemde su jeti, yumuşak malzemeleri gevşetmek ve kaldırmak ayrıca çukurun stabilizasyonunu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu durum vibratörün oluşturduğu çukuru açık tutar ve zemin yüzeyinden eklenen ilave malzemenin, probun ucuna ulaşmasını sağlar. Vibro-kompaksiyon yönteminde

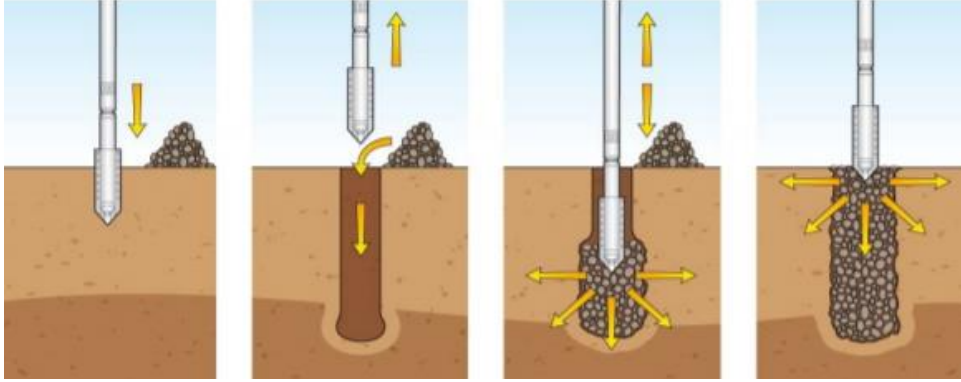
olduğu gibi yüksek basınçlı su jeti kullanılarak, vibratör istenilen derinliğe kadar indirilir. Ardından dolgu malzemesi, sonda etrafında oluşturulan çukur boyunca zemin yüzeyinden eklenir ve vibratör zemin yüzeyine kadar 0.7-1 m aralıklarla çekilip indirilerek dolgu sıkıştırılır ve işlem tamamlanır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Vibro-yerdeğiştirme imalat aşamaları (Taube, 2001)

### 3.3.3. Vibro-öteleme Yöntemi (Kuru Yöntem)

Vibro-öteleme yöntemi, drenajsız kayma mukavemeti 15 ila 60 kPa arasında değişen, karazsız kohezyonlu zeminlerde uygundur. Uygulama alanında vibratör titreşim, kendi ağırlığı ve basınçlı hava yardımı ile zemini öteleyerek bir kuyu oluşturur. Tasarım derinliğine erişildiğinde, vibratör zeminden çıkarılır ve dolgu malzemesi tabakalar halinde doldurulur. Ardından kuyuya tekrar vibratör indirilerek taşlar ve çevreleyen zemin sıkıştırılır. Bu şekilde, yaklaşık 0.5–0.6 m çapında iyi bir şekilde sıkıştırılmış taş kolonlar oluşturulur.



Şekil 3. 4. Kuru yöntem imalat aşamaları (Taube, 2001)

#### 3.4. Taş Kolon Tasarım parametleri ve Prosedürü

Geoteknik problemlere ve imalat yöntemlerine bağlı olarak, genellikle aşağıdaki tasarım parametrelerine ihtiyaç duyulur (Han, 2015):

- Zemin cinsi (kohezyonlu veya kohezyonsuz)
- Sorunlu zemin derinliği
- Yeraltı suyu seviyesi
- Kohezyonsuz zeminin başlangıç ve hedeflenen boşluk oranı
- Kısa süreli analizler için kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve uzun süreli analizler için efektif içsel sürtünme açısı
- Kohezyonlu zeminlerin konsolidasyon katsayısı, kolon ve zemin sıkışma katsayısı
- Kolon çapı ve iyileştirme alanı
- Kolonların yerleşim düzeni ve kolonlar arası mesafe
- Kolon dolgu malzemesinin içsel sürtünme açısı
- İzin verilen oturma miktarı ve taşıma kapasitesi

Belirli bir alan ve temel sistemi için taş kolonların uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla, doğal ve iyileştirilmiş zeminin performansları değerlendirilir.

Taş kolonlarla istenilen sonuçlara (taşınma kapasitesini ve sıkılaşmayı artırma, oturmayı azaltma gibi) ulaşıp ulaşılmadığı belirlenir. Taş kolonlar aşağıdaki şekilde tasarlanabilir:

1. İmalatın yapılacağı alan incelenir ve sıkılaşmanın mümkün olup olmadığı belirlenir.
2. Taş kolon imalat yöntemi seçilir.
3. Geleneksel oturma hesaplamaları kullanılarak, doğal zeminin önerilen yükleme koşullarındaki oturması hesaplanır.
4. Tasarım gereksinimlerini karşılamak için gerekli olan oturma azaltma faktörü belirlenir ve taş kolonun gerekli oturma azaltmasını sağlayıp sağlamayacağı saptanır.
5. Taş kolonların uzunluğu, çapı ve mesafesi belirlenir. Taş kolonların uzunluğu hesaplanan oturma değerlerinden belirlenebilir. Kolon çapı ve mesafesi ise, mühendislerin tecrübesine dayanarak belirlenmektedir.
6. Tekil taş kolonların ve zeminin nihai yük taşıma kapasitesine dayanarak kompozit temelin taşıma kapasitesi belirlenir.
7. Hesaplamalardan en az biri proje gereksinimlerini karşılamazsa yineleme gerekebilir.

#### 3.5. Taş Kolon Kalite Kontrol Prosedürü

Kalite kontrolü, kolon tasarım parametrelerinin ve inşaat sonrası yapılan deneylerin izlenmesini içermektedir. İnşaat sürecinde;

- İyileştirme derinliği
- Penetrasyon ve sıkıştırma sırasında titreşim enerjisi
- Penetrasyon süresi
- Her bir kolonun yapımında kullanılan agrega miktarı
- Öngörülemeyen durumlar ve karşılaşılan engeller

- Zemin oturması

gibi kalite kontrol ögeleri sürekli olarak kaydedilmekte ve böylece iyi sıkıştırılmış bir kolonun inşa edilmesi sağlanmaktadır. Taş kolon imalatında, kolonların yerleşim düzeninin ve uzunluğunun belirlenmesine bağlı olarak kolon çapının doğrulanması önemlidir. Taş kolonların performansı yükleme deneyleri kullanılarak değerlendirilmektedir. Her ne kadar kazık yükleme deneylerine benzetilse de kazık deneylerinin aksine hem kolon hem de kolon etrafındaki zemin alanı yüklenmektedir. Ayrıca amaçlanan yapıyı desteklemek için iyileştirilmiş zeminin performansı oturma göstergeleri, inklonometre, vb. aletlerin sonuçlarına göre değerlendirilmektedir.

#### 3.6. Taş Kolon Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları

1. Taş kolonlar, zayıf zeminlerin taşıma gücünü artırır ve zemin tabakalarının oturmasını azaltır ve böylece zemin üzerinde yüzeysel temellerin yapımını mümkün kılar.
2. Taş kolonlar yüksek geçirgenliklerinden dolayı düşey dren gibi çalışırlar ve konsolidasyon sürecini hızlandırırlar. Ayrıca boşluk suyu basınçlarının sönmülmesini hızlandırarak, zeminin sıvılaşıma potansiyelini azaltır. Drenlerden farklı olarak imalattan sonra bekleme süresi yoktur. Dolgu yapılacaksa imalattan hemen sonra yapılabilmektedir.
3. Taş kolon yöntemi, diğer derin iyileştirme yöntemleri ve kazık ile karşılaştırıldığında daha ekonomiktir.
4. İmalatında kullanılan malzemenin doğal olmasından dolayı çevre üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

Avantajlarının yanı sıra taş kolonlar hassas killerde kullanıldığında, kilin kayma dayanımı yeterince arttırılmadığından, istenilen zemin iyileştirilmesi sağlanamamaktadır. Ayrıca kil parçacıkları, kolonun etrafını tıkar ve radyal drenajın azalmasına neden olur. Taş kolonlar, kolonlar arası mesafe az olduğunda yüksek yanal basınçlara ve bitişik yapıların deformasyonuna neden olabilmektedir. Taş kolon imalatında, yüksek titreşimlerden dolayı alana yakın yapılarda ciddi çatlaklar meydana gelebilir. Barksdale ve Bachus (1983), taş kolon tekniğinin en çok, yumuşak sıkıştırılabilir killerde / siltlerde ve gevşek siltli kumlarda etkili olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte taş kolonlar, çevreleyen zeminden büyük ölçüde yanal destek alırlar ve dolayısıyla çok zayıf zeminlerde kullanılmaya uygun değildir. Çevreleyen zeminin dayanımı zayıf ise, kolonlarda meydana gelen deformasyonlar da artmaktadır.

### **3.7. Derin Karışım (Deep Mixing) Yöntemi**

Derin karışım yöntemi, özel ekipmanlar kullanılarak bağlayıcı maddelerin (kireç, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu) zemine enjekte edilmesi ve yerinde karıştırılması esasına dayanmaktadır. Derin karışımın ilk uygulaması 1954'te ABD'de yapılmıştır. Fakat yöntemin araştırılmasına ve geliştirilmesine Japonya öncülük etmiştir. Kireç bağlayıcısı kullanılarak bu yöntem, 1960'lı yıllardan beri Japonya'da ve daha sonra İsveç'te uygulanmıştır. 1975 yılında yumuşak deniz zeminlerini stabilize etmek için, bağlayıcı olarak sıvı çimento harcı kullanılmıştır. 1987 yılında Fransa'da, Bachy şirketi, karıştırma araçlarının çekilmesi sırasında çimentolu zeminin karıştırmasını ve sıkıştırmasını sağlayan "Colmix" teknolojisini geliştirmiştir (Bruce, 2000). Günümüzde, bu zemin iyileştirme yöntemi çok çeşitli mühendislik uygulamalarında pratik, ekonomik ve çevresel çözümler sunmakta ve dünya çapında kullanılmaktadır (Japonya, Malezya, Fransa, Belçika, Singapur, Tayland, Vietnam, Türkiye vb.).

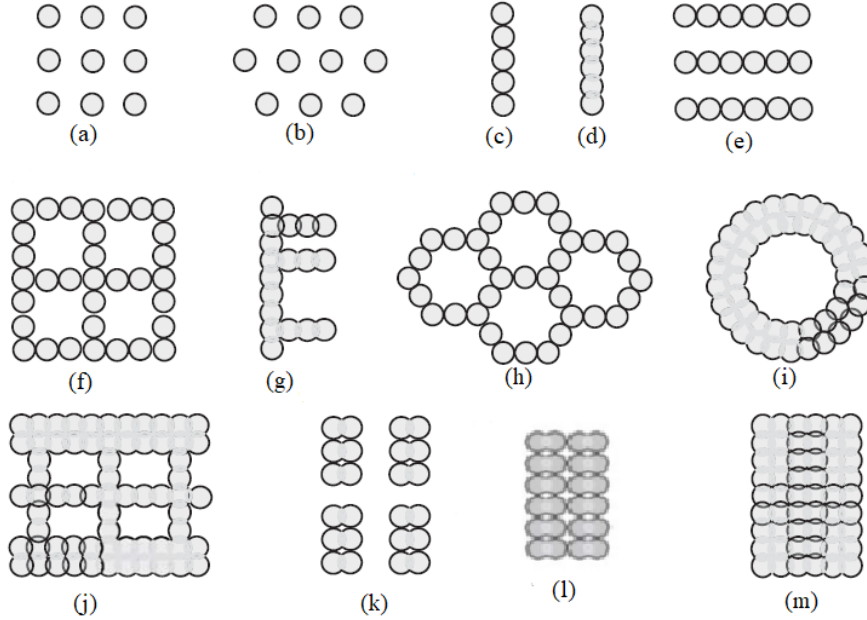
**3.8. Derin Karışım Uygulama Alanları**

- ❖ Binalar, duvarlar, dolgular dahil olmak üzere üstyapıların desteklenmesi
- ❖ Rıhtım duvarları, iskele yapıları ve dalgakıranlar dahil deniz ve deniz uygulamaları
- ❖ Şev stabilizasyonu
- ❖ Kazı desteği
- ❖ Titreşim azaltma
- ❖ Sıvılaşmayı önleme/azaltma
- ❖ Yapı temelleri
- ❖ Sızıntı ve kirlilik kontrolü

Derin karışım kolonları Şekil 3.5'te gösterildiği gibi dört farklı şekilde ve genellikle Şekil 3.6'da gösterilen tipik konfigürasyonlarla uygulanmaktadır.



Şekil 3.5. Derin karışım kolon veya duvarların şekilleri: (a) dairesel, (b) ikili, (c) dördü ve (d) panel (Han,2015)



Şekil 3.6. Derin karışım kolon konfigürasyon örnekleri: (a), (b) tekil kolon (kare ve üçgen düzen), (c), (d), (e),(g) duvar, (f) teğet ızgara, (h) teğet hücreler, (i) halka; (j) kafes, (k), (l) grup kolonları, (m) blok (Topolnicki, 2004)

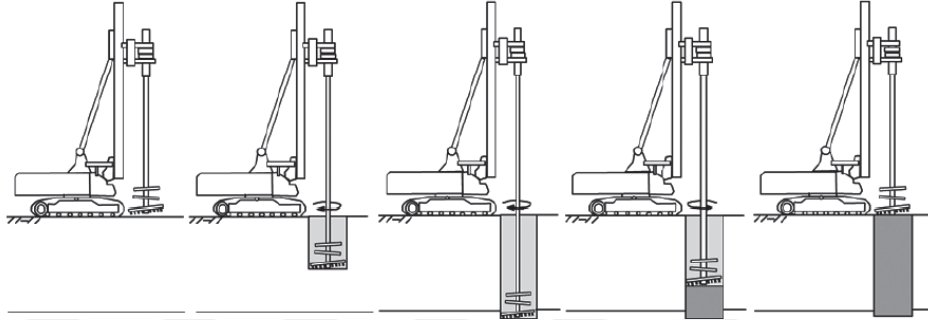
### 3.9. Derin Karışım İmalatı

Derin karışım yönteminde kireç, çimento, uçucu kül ve bunların kombinasyonlarından oluşan bağlayıcılar toz veya bulamaç halinde zemine enjekte edilerek karıştırılmaktadır. Derin karıştırma, ıslak veya kuru bir yöntemle yapılabilir (bağlayıcı ve ekipman türüne, uygulanış biçimine göre).

#### 3.9.1. Kuru Yöntem

Kuru yöntem, nem içeriği yüksek olan yumuşak zeminler için daha uygundur ve bu nedenle zemin kuru bağlayıcılarla karıştırılmaktadır. Kuru derin karıştırma ile, 0.5- 1.2 m çaplı kolonlar 15- 25 m derinliğe kadar inşa edilebilmektedir. Bu yöntemde, karıştırma aleti uygulama alanının üzerine yerleştirilir ve zemin karıştırılarak kolon imalat derinliğine kadar bir kuyu oluşturulur. İstenilen derinliğe ulaşıldığında, şaft geri çekilir ve aynı zamanda toz

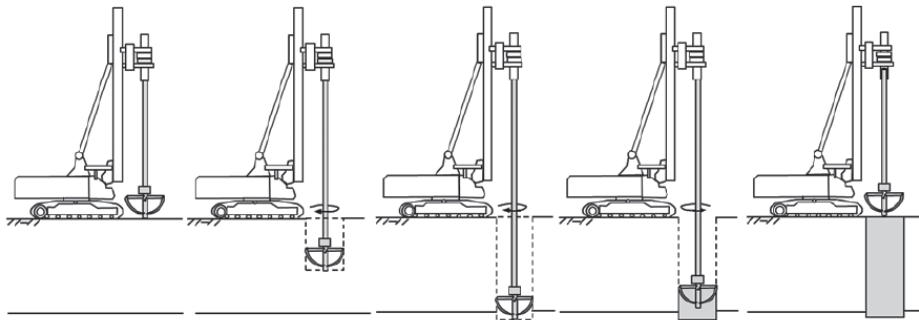
halindeki bağlayıcı basınçlı havayla zemine enjekte edilir, karıştırma aletiyle zemin ve bağlayıcıyı karıştırılır (Şekil 3.7).



Şekil 3. 7. Kuru derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları (Han, 2015)

### 3.9.2. Islak Yöntem

Islak yöntem, su içeriği az olan yumuşak kil ve siltlerde, ince daneli kumlarda ve tabakalı zeminlerde daha uygundur. Islak karıştırmada, en yaygın bağlayıcı çimentodur ancak farklı katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Bağlayıcı madde su ile önceden karıştırılıp bulamaç haline getirilerek zemine enjekte edilir. Islak derin karıştırma ile, 1.0-1.6 m çaplı kolonlar en fazla 50 m derinliğe kadar inşa edilebilir.



Şekil 3. 8. Islak derin karıştırma yöntemi uygulama aşamaları (Han, 2015)

**3.10. Derin Karışım Tasarım Parametreleri ve Prosedürü**

Derin karışım tasarım parametreleri ve tasarım prosedürü uygulama tipine bağlıdır.

- ❖ Zemin cinsi, nem içeriği, yeraltı suyu seviyesi, permeabilite, drenajsız kayma mukavemeti, içsel sürtünme açısı ve rijitliği
- ❖ Bağlayıcı türü (kireç, çimento...)
- ❖ İmalat yöntemi
- ❖ Kolon boyutları ve şekilleri
- ❖ İzin verilen oturma miktarı ve taşıma kapasitesi
- ❖ İyileşme derinliği

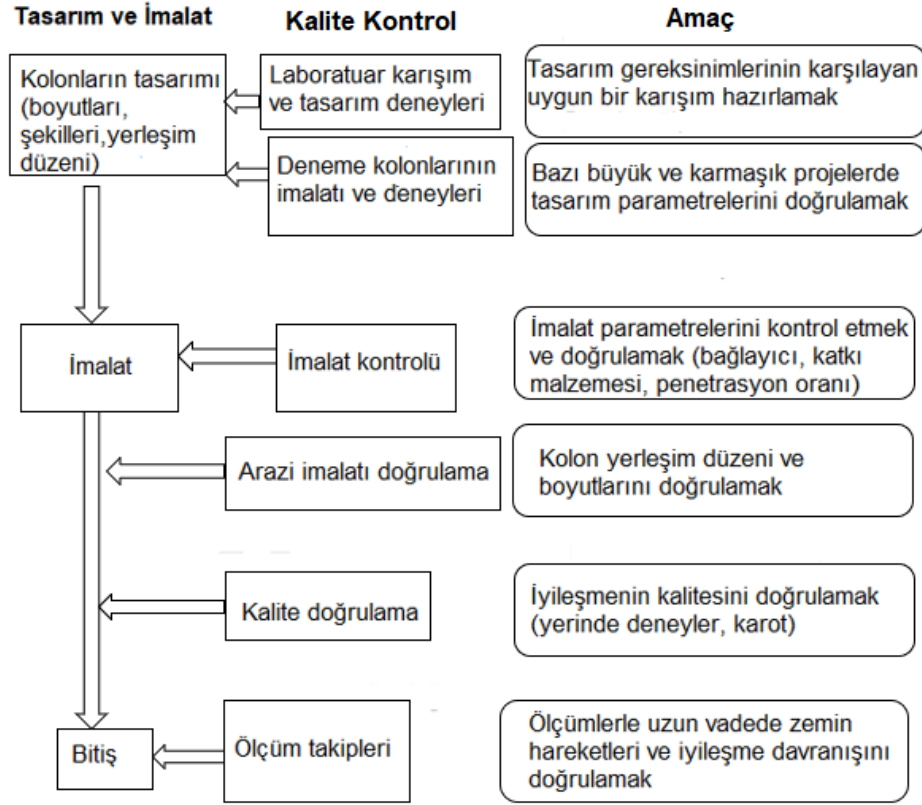
Tasarım Prosedürü;

1. Uygulama alanı belirlenir
2. Derin karıştırma için imalat yöntemi ve bağlayıcı türü seçilir.
3. Üst yapının boyutlarına ve yüklerin büyüklüğüne bağlı derin karışım uygulama şekli seçilir (duvar sistemi, blok sistemi, ızgara sistemi).
4. Kolon taşıma gücü hesaplanır.
5. Minimum kolon uzunluğu belirlenir.
6. Kompozit temelin oturması ve konsolidasyon derecesi hesaplanır.
7. Eğer dolgu desteklenmişse gerekli stabilite analizleri yapılır.
8. Hesaplamalarda en az biri proje gereksinimlerini karşılamazsa yineleme gerekebilir

**3.11. Derin Karışım Kalite Kontrol Prosedürü**

Tasarım gereksinimlerini karşılayan (kalite ve boyut) stabilize zemin kolonları imal etmek için bağlayıcının miktarı ve içeriği de dahil olmak üzere tüm parametrelerin kontrol edilmesi ve izlenmesi gerekmektedir.

İnşaat çalışmalarından sonra, tasarım kalitesini doğrulamak için (örneğin; süreklilik, dayanıklılık, permeabilite ve boyut gibi) yerinde iyileştirilmiş zemin kolonları araştırılmalıdır. Zemin-çimento kolonunun sürekliliği, düzgünlüğü ve kalitesi yerinde yapılan deneyler ile, deneme bir kolonun gözlemlenmesiyle ya da karot numunelerle doğrulanmaktadır. Kolondan alınan numunelerin serbest basınç dayanımına dayanarak, iyileştirilmiş zeminin mühendislik özellikleri belirlenir. Kolonun kalitesi, esas olarak iyileştirilmiş zeminin homojenliğine bağlıdır. Bununla birlikte sondaj makinesi, karot aleti ve işçilerin becerisi de kolon kalitesini etkilemektedir. Kalite kontrol ve kalite güvencesi, kolonların imalat kayıtlarının, laboratuvar ve saha doğrulama deneylerinin sonuçlarının değerlendirilmesiyle sağlanabilir. Her bir kolon imalat kaydında, tarih ve imalat süresi, kolonun uzunluğu, karıştırma şaftının penetrasyon / geri çekilme oranları, bıçak dönüş hızı, pompalanan bulamacın basınç ve akış hızı veya enjekte edilen bağlayıcı gibi inşaat bilgilerinin yer aldığı bir çizelge bulunmalıdır. Derin karışım için Şekil 3.9'daki doğrulama testleri yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. 9. Derin karışım için tipik bir kalite kontrol prosedürü (Larsson, 2005)

### 3.12. Derin Karışım Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları

1. İnşaat süreci hızlıdır.
2. Proje gereksinimlerini karşılamak için yükleme duru ve zemin türü göz önünde bulundurularak, bağlayıcı oranı değiştirilip derin karıştırma kolonlarından istenilen mukavemet elde edilebilir.
3. Zemin yerinde iyileştirildiği için, ekstradan taşınması ve kullanılması gereken malzeme gerektirmez. Örneğin, taş kolon yöntemi için büyük hacimde granül dolgu gereklidir.

4. Taş kolon veya kum sıkıştırma kolonları gibi geleneksel granül zemin iyileştirme yöntemlerinden farklı olarak, derin karıştırma kolonlarının imalatı sırasında çok daha az gürültü ve titreşim oluşur.
5. Birçok zemin türünde ve birçok uygulama alanında kullanılmaktadır.
6. Büyük derinliklere uygulanabilir.
7. İmalat ekipmanlarının çeşitliliği verimlilik sağlar.
8. Modern kontrol sistemleri, derin karıştırma elemanlarının etkin kalite kontrolünü sağlar ve bu da yöntemin güvenilirliğini artırır.

Bununla birlikte, derin karışım yöntemi nispeten ekipmanların yüksek taşıma maliyeti, kolon kalitesindeki yüksek değişkenlik ve standartlaştırılmış kalite kontrol yöntemlerinin eksik olması açısından sınırlamalara sahip olabilmektedir.

### 3.13. Jet Grout Yöntemi

Çok Yüksek Basıncılı (Very High Pressure) Enjeksiyon olarak da bilinen jet grouting, ilk olarak 1950 yılında Pakistan'da Cementation şirketi (Cementation Co.) tarafından uygulanmıştır (Lunardi, 1997). Ancak genel olarak yöntemin japonya'da ortaya çıktığı kabul edilmektedir. 1970'li yıllarda iki jet enjeksiyon yöntemi geliştirilmiştir. Nakanishi (1974) tarafından geliştirilen ilk yöntem "Chemical Churning Pile" veya CCP jet grouting olarak adlandırılmıştır. Kimyasal veya çimento bazlı karışımların 1-2 mm çapındaki nozullardan yüksek basınçlarda zemine enjekte edilmesi ve delme borusunun çekilip etrafında döndürülmesi ile zemin-çimento kolonu oluşturulmuştur. Yahiro (1973) tarafından "jet grouting" olarak adlandırılan ikinci yöntem geliştirilmiştir. Yöntem, su jeti kullanılarak zeminin parçalanmasına, enjeksiyon malzemesi ile yer değiştirmesine ve çimentolaşmasına dayanmaktadır.

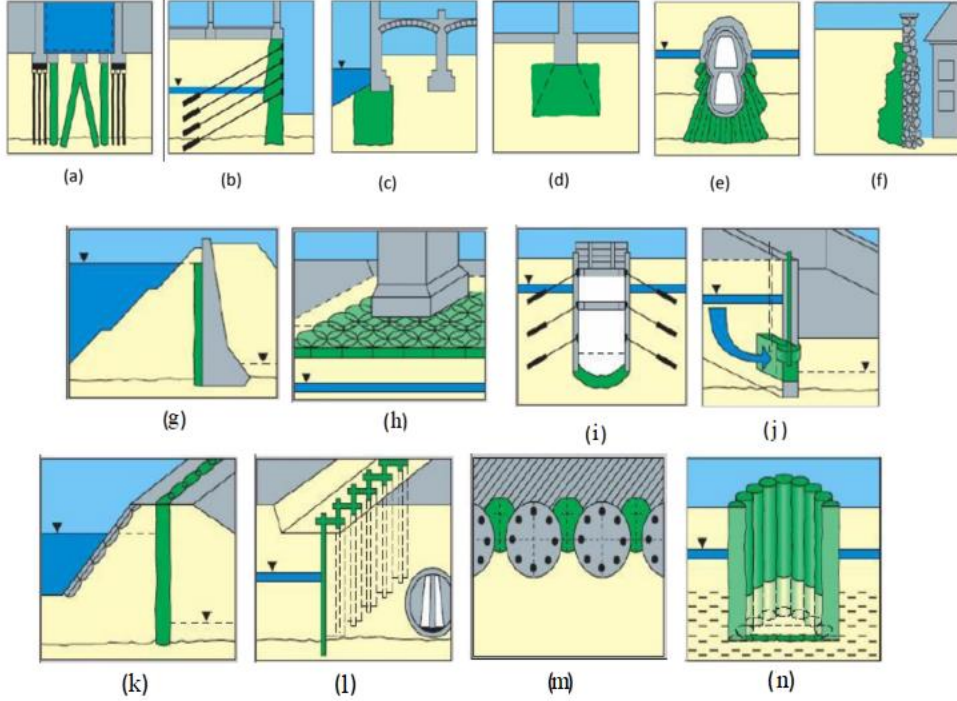
Japonya'da jet grout yönteminde birçok değişim ve gelişim meydana gelmiştir. Bunların en önemlisi, "Jumbo Special Grout" (JSG) adı verilen yöntemdir. Yöntemde, hava jeti ile kaplanan bir çimento harcı kullanılmıştır (Ichise, 1974). JSG

yöntemi ile, CCP kolonlarından 1.5-2.0 kat daha büyük çaplı kolonlar elde edilebilmektedir. Japonya'daki ilk gelişmeyi takiben jet grout 1980'lerde Almanya, Fransa, Brezilya ve İtalya'da popülerlik kazanmıştır. Sonraki yıllarda, yöntem önemli ölçüde gelişmiştir ve şu anda dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 3.14. Jet Grout Uygulama Alanları

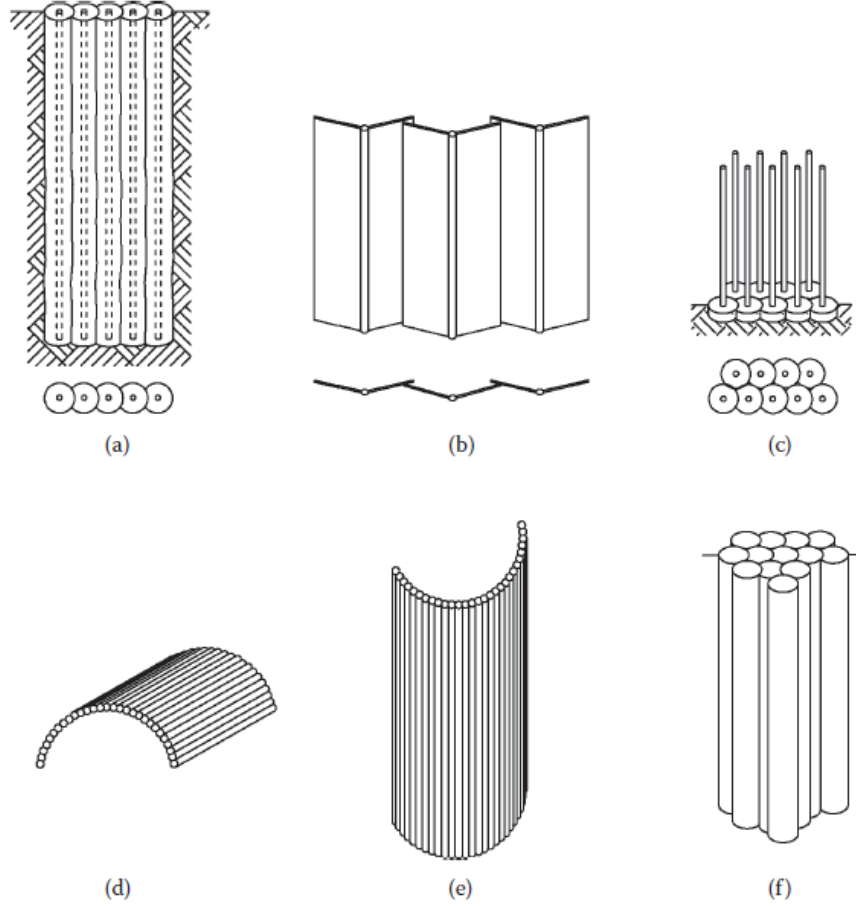
Jet enjeksiyonu birçok uygulama alanına sahiptir:

- ❖ Mevcut yapı temellerinin desteklenmesi ve zemininin iyileştirilmesinde
- ❖ Artan yük ve oturma durumunda kazıklı temel yerine yükün daha derin sağlam tabakalara aktarılmasında
- ❖ Geniş temellerin altındaki zeminin iyileştirilmesinde
- ❖ Geçirimsizlik perdelerin imalatında
- ❖ Kazı desteğinde ve yeraltı suyunun kazı tabanına akışını engellemede
- ❖ İstinat duvarları ve destek yapılarında
- ❖ Şev stabilitesinde
- ❖ Sıvılaşmayı azaltmada
- ❖ Dolgu veya yarmaların güvenliğini arttırmada
- ❖ Tünel inşaatlarında zemin stabilitesini sağlamada
- ❖ Kazı veya tünel açma sırasında mevcut yapıları destekleme, zemin veya yapı hareketini önlemede
- ❖ İnşaat sırasında veya uzun vadede tünelin üst cidarlarını veya kenarlarını desteklemede
- ❖ Yanal hareketi önlemek veya azaltmak için kazık veya duvarlara destek sağlamak



Şekil 3.10. Jet grout tipik uygulama alanları (a)Derin temeller, (b) (c) (d) Mevcut yapı temellerinin desteklenmesi, (e) (f) Yapıların desteklenmesi, (g) (h) Geçirimsizlik perdesi, (k) Diyafram duvar, (l) (m)Kazılar ve duvar arası, (n)Batardo (Keller. a.ş)

Jet grout kolonları, yerleşim düzenine bağlı olarak genellikle Şekil 3.11’de gösterilen tipik konfigürasyonlarla uygulanmaktadır.

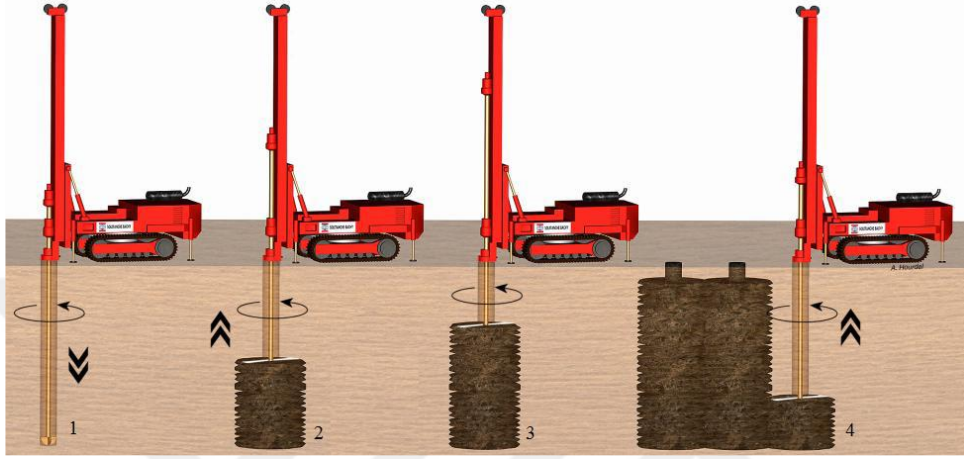


Şekil 3.11. İki veya üç boyutlu jet grout uygulama örnekleri: (a) ve (b) diyafram duvarlar, (c) döşeme, (d) tünel, (e) shaft ve (f) blok (Croce, Flora ve Modoni, 2014, s.98)

### 3.15. Jet Grout İmalatı

Jet grout, yüksek basınçlı jetler (yaklaşık 400 bar) kullanılarak doğal zeminin aşınmasını, çimento harcı ile karıştırılmasını ve kısmen çimento bileşenleri ile değiştirilmesini içeren bir yöntemdir. Bu yöntem ile mukavemet, permeabilite ve gerilme özellikleri doğal zeminden daha iyi olan “soilcrete” olarak da adlandırılan zemin-çimento kolonları oluşturulur. Yöntemin uygulanmasında, özel delgi ekipmanları ile tasarım derinliğine kadar zemin delinmekte ve püskürtme

nozullarından yüksek basınçta grout enjekte edilerek sabit bir hızla zemin yüzeyine doğru kaldırılmaktadır (Şekil 3.12).

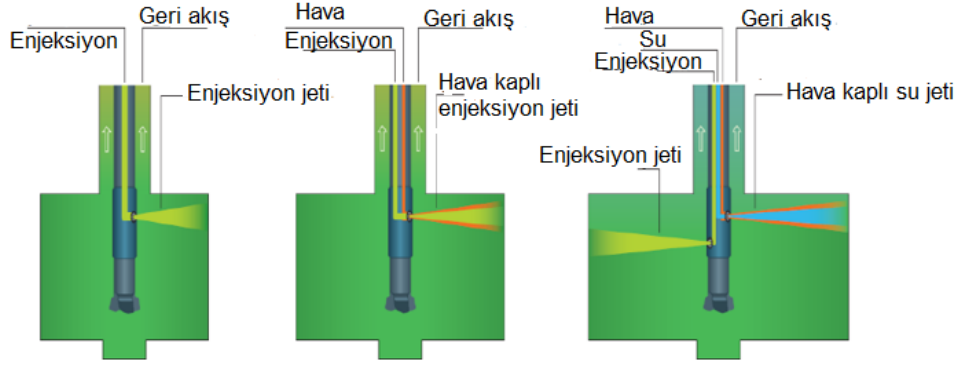


Şekil 3.12. Jet grout yöntemi uygulama aşamaları (Soletanche Bachy)

Jet grout kolonları genel olarak iyileştirme sonrası hedeflenen zemin özelliklerine, uygulama alanına, projeye yönelik tasarım faktörlerine (kolon çapı, kolon rijitliği vb.) göre farklı yöntemler ile imal edilmektedirler. Bu yöntemler tekli jet sistemi (jet 1), ikili jet sistemi (jet 2) ve üçlü jet sistemi (jet 3)'dir. Birbirine benzeyen bu yöntemlerin en ayırt edici özelliği, zemine enjekte edilen akışkanın sayısı ve türüdür (Yahiro ve Yoshida 1973).

#### 3.15.1. Tekli Jet Sistemi (Jet 1)

Uygulanması en kolay ve en çok tercih edilen yöntemdir. Zeminin aşınması ve çimentolanması, yüksek bir enerji jeti kullanılarak çimento harcı ile sağlanmaktadır ve yöntem özellikle yatay enjeksiyon için kullanılmaktadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Jet groutta kullanılan üç farklı enjeksiyon tekniğinin şematik gösterimi (Jet 1, Jet 2 ve Jet 3) (Keller Company)

### 3.15.2. İkili Jet Sistemi (Jet 2)

Zeminin aşınmasını ve çimentolanmasını sağlayan akışkanın (genellikle çimento harcı) bir hava jeti içinde püskürtüldüğü yöntemdir (Şekil 3.13). Bu yöntemde, jetin kesme etkisini arttırmak için kullanılan basınçlı hava, enerji kayıplarını azaltarak yöntemin etkinliğini arttırmaktadır. Jet 2 yönteminde, jet 1 yöntemine göre daha büyük çaplı kolonlar oluşturulmaktadır.

### 3.15.3. Üçlü Jet Sistemi (Jet 3)

Zeminin aşınmasını sağlayan yüksek enerjili su jetinin bir hava jeti içinde kullanıldığı ve çimentolanmanın da eş zamanlı olarak, su ve hava jetinin altında bulunan bir nozuldan daha düşük bir basınçla yapıldığı yöntemdir (Şekil 3.13).

## 3.16. Jet Grout Tasarım Parametreleri ve Prosedürü

Jet grout tasarım parametreleri ve prosedürü deep mixing ile benzerdir.

Tasarım parametreleri:

- ♦ Zemin özellikleri ve yükleme durumu
- ♦ İyileşme derinliği

- ◆ Kolon boyutları ve yerleşim düzeni
- ◆ Enjeksiyon sisteminin seçimi (jet 1, jet 2, jet 3)
- ◆ İyileştirme sonrası hedeflenen zemin özellikleri
- ◆ İzin verilen oturma miktarı ve taşıma kapasitesi

Tasarım Prosedürü;

1. Uygulama alanı belirlenir
2. Yapının boyutlarına ve önemine göre iyileştirme derinliği belirlenir
3. Zemin geoteknik koşullarına bağlı olarak enjeksiyon türü seçilir.
4. Enjeksiyon parametreleri tayin edilir.
5. Kolon uzunluğu belirlenir.
6. Kolon taşıma gücü hesaplanır.
7. Kompozit temelin oturması ve konsolidasyon derecesi hesaplanır.
8. Gerektiğinde stabilite analizleri yapılır.
9. Hesaplamalardan en az biri proje gereksinimlerini karşılamazsa yineleme gerekebilir.

#### 3.17. Jet Grout Kalite Kontrol Prosedürü

- Jet grout yönteminin kullanılmasına karar verilmeden önce, çimento içeriğinin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir laboratuvar araştırmasının yapılması gerekmektedir.
- Ayrıca iyileştirme işlemine başlamadan önce uygulama alanında, hedeflenen özelliklerin sağlanması için deneme kolonları oluşturulur.
- Jet grout kolonunun bütünlüğünü ve düzgünlüğünü kontrol edilir.
- Jet grout kolonunun boyutlarını doğrulanır.
- Jet grout kolonunun taşıma gücünü değerlendirilir.

- Tekil kolon ve kompozit temel yükleme deneyleri yapılır.
- İyileştirilmiş zeminin mukavemetini ve rijitliğini doğrulamak için karot numuneler alınır ve basınç dayanımları belirlenir. Eğer karot örneklerinin iyileştirme tasarım özelliklerine uygun olduğu tespit edilirse, jet grout uygulamasına başlanır.

#### 3.18. Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Sınırlamaları

1. Jet grout hemen hemen her zemin türünde ve değişik çaplarda uygulanabilmektedir.
2. Jet grout kolonunun mukavemeti ve geçirgenliğinin kontrol edilebilir olması daha ön görülebilir bir zemin stabilizasyonu sağlar.
3. Yöntem sınırlı (dar) alanlarda başarıyla uygulanmaktadır.
4. Taş kolonlarda olduğu gibi, zemin yüzeyine kadar kolon oluşturmaktan ziyade, zeminin istenilen bir derinlikte iyileştirilmesi mümkündür.
5. Yöntemin uygulanmasında çok az gürültü veya titreşim meydana gelmektedir.

Jet grout uygulamasında, sondaj kuyusu boyunca geri akışı kontrol etme ihtiyacıdır. Çünkü meydana gelecek tıkanma, kolon çapını ve mukavemetini etkileyebilmektedir. Ayrıca imalat sırasındaki atığı uzaklaştırmak da önemli bir sorundur. Yöntem özel emek, ekipman ve imalat ekipleri gerektirdiğinden dolayı pahalıdır. Yüksek plastisiteli ve organik zeminlerde kolon mukavemeti ve çapı genelde hedeflenenden daha küçük olabilmektedir. Bazen de kolon çapları hedeflenenden daha büyük olabilmektedir.



#### 4. ANALİTİK YÖNTEMLER

Bu bölümde rijit kolon tasarım koşulları, rijit kolonlu temellerin analizinde kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin kullanılmasıyla yapılan hesaplamalar hakkında bilgi verilmiştir.

##### 4.1. Rijit Kolon Tasarım Hususları

- ★ Genel kurallar (Kolon malzemesi, yerleşim düzeni, kolon çapı, alan yerleşim oranı, iyileştirme alanı ve iyileştirme derinliği)
- ★ Taşıma kapasitesi
- ★ Oturma

**Taş Kolon Malzemesi:** Brown (1977) tarafından vibro-yerdeğiştirme yöntemi için dolgu malzemesinin uygunluğunu değerlendirmek üzere bir derecelendirme sistemi geliştirilmiştir (Çizelge 4.1).

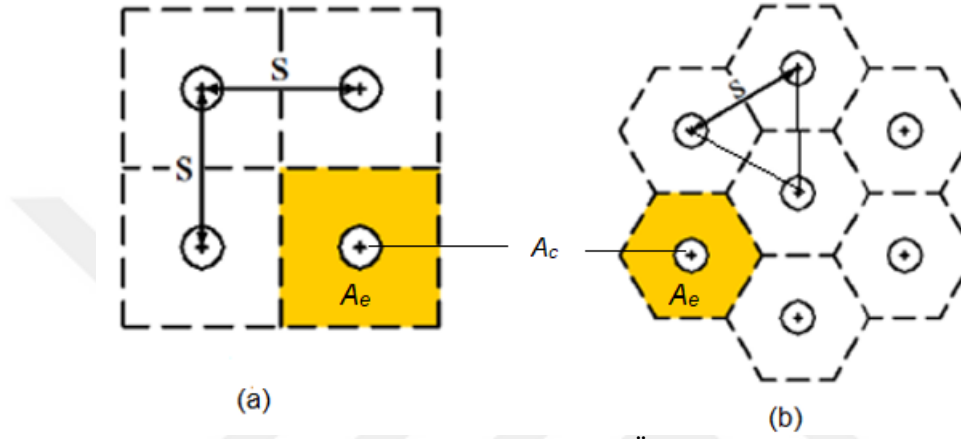
$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (4.1)$$

burada,  $S_N$  uygunluk sayısı,  $D_{50}$ ,  $D_{20}$  ve  $D_{10}$  sırasıyla granülometri eğrisinde geçen %50, %20 ve %10'a karşılık gelen dane çapıdır (mm).

Çizelge 4.1. Malzeme uygunluğu

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

**Yerleşim Düzeni:** Rijit kolonlar, alanın zemin koşullarına uygun olacak şekilde genellikle Şekil 4.1’de gösterildiği gibi kare, eşkenar üçgen yerleşim düzeninde inşa edilirler.



Şekil 4. 1. Rijit kolon imalat şekilleri (a) Kare (b) Üçgen (Killeen, 2012)

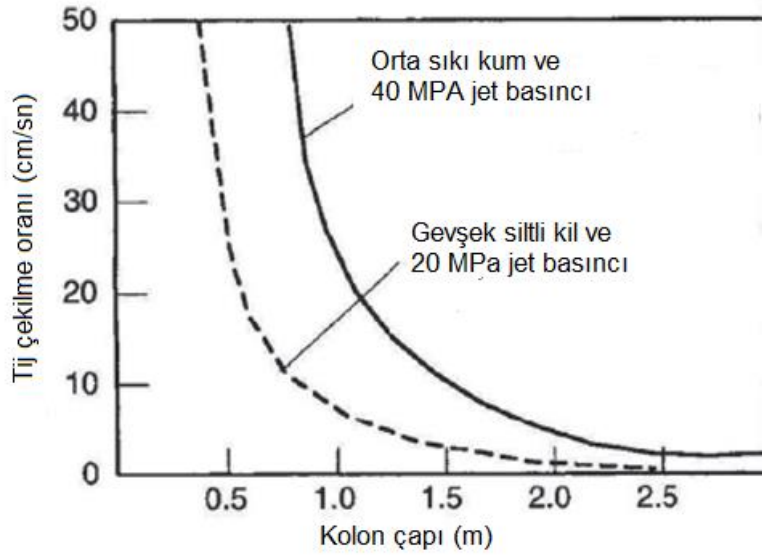
**Kolon Çapı:** Taş kolon çapı, tecrübeye ve yayınlanan amprik değerlere bağlı olarak belirlenmektedir. Kolon çapı imalat yöntemine, zemin türüne, drenajsız kayma mukavemetine ve kullanılan titreşimli probun özelliklerine göre değişmektedir. Uygulamada genellikle 600-1500 mm olduğu söylenebilir.

Derin karıştırma kolonlarının çapı 0.5-1.75 m, kolonlar arası mesafe genellikle 1.0- 1.5 m ve normal uygulamalarda kolon uzunluğu genellikle 10-30 m arasında değişmektedir. Bazı durumlarda, özellikle liman yapıları için 60 m uzunluğunda çimento kolonları kullanılmıştır (Bruce, 2001).

Farklı jet sistemleri için jet grout kolonların tipik parametreleri Çizelge 4.2.’de sunulmaktadır. Şekil 4.2’de kolon çapının tijn çekilme oranına, zemin yoğunluğuna ve jet basıncına bağlı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. Farklı jet sistemleri ile oluşturulan kolonların tipik parametreleri (Han,2015)

Jet Sistemi ve Zemin Türü		Serbest Basınç Mukavemeti (MPa)	Kolon Çapı (m)
Jet 1	Kum ve Çakıl	7.0-20.0	0.6-0.9
	Kil	1.7-7.0	0.6-0.9
Jet 2	Kum ve Çakıl	3.5-4.0	0.9-1.8
	Kil	1.0-7.0	0.9-1.5
Jet 3	Kum ve Çakıl	3.5-10.0	1.5-2.5
	Kil	1.0-5.0	0.9-1.8



Şekil 4.2. Tij çekilme oranının jet grout kolon çapına etkisi (Han, 2015)

**İyileştirme Alanı ve İyileştirme Derinliği:** İyileştirme alanı ve iyileştirme derinliği, saha koşullarına, zemin özelliklerine, performans gereksinimlerine ve üstyapıların önemine göre belirlenmelidir. Genel olarak, iyileştirme alanı temelin oturduğu alandan daha büyük olmalıdır ve temel alanının dışında bir ya da iki sıra kolon yapılabilir fakat sıvılaşma eğilimi olan zeminde, iki ya da dört sıra kolon yapılabilir. İyileştirme derinliği tipik olarak 5-15 m arasındadır (Han, 2015).

**Alan Değişim Oranı (  $a_s$  ):** Kolon kesit alanının etki bölgesinin alanına oranıdır ve Eşitlik (4.2) ile hesaplanmaktadır. Kolon etki bölgesi ve alanı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

$$a_s = \frac{A_c}{A_e} = C \left( \frac{D_c}{s} \right)^2 \quad (4.2)$$

burada,

$a_s$  : Alan değişim oranı

$A_c$ : Kolon kesit alanı

$A_e$ : Etki bölgesinin alanı

$d_c$ : Kolon çapı

$s$ : Kolonlar arası mesafe

$C$ : Sabit (kare yerleşim için  $\frac{\pi}{4} = 0.785$ ; üçgen yerleşim için  $\pi(2\sqrt{3}) =$

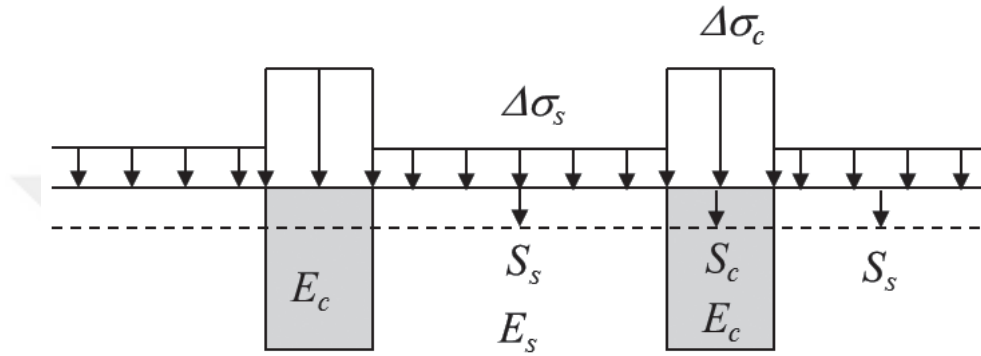
0.907)

#### 4.2. Rijit Kolon Yük Aktarma Mekanizması

Analitik yaklaşımlarda rijit kolon analizinde, zemin ve kolonun birlikte kompozit bir temel oluşturduğu varsayılmaktadır. Kompozit temelde kolon ve zemin beraber çalışarak yapıdan gelen yükleri paylaşırlar ve göçmeye karşı kayma direncini arttıırırlar. Rijit kolonların analizinde iki yaklaşım kullanılmaktadır. (1) Rijit temel altında eşit veya üniform deformasyon varsayımı (2) Esnek temel altında eşit veya üniform gerilme varsayımı.

#### 4.2.1. Rijit Temel – Eşit Deformasyon

Kompozit temelde eşit deformasyon durumunda, zemine göre daha rijit olan kolonlar daha yüksek gerilmeye maruz kalırlar ( $S_c=S_s$  ve  $\Delta\sigma_c>\Delta\sigma_s$ ). Yük paylaşım oranı ( $n$ ) ile gösterilir ve Eşitlik (4.3) ile hesaplanır.



Şekil 4.3. Eşit deformasyon rijit temel durumu (Han, 2015)

$$n = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_s} \quad (4.3)$$

$S_c$  : Kolon oturması

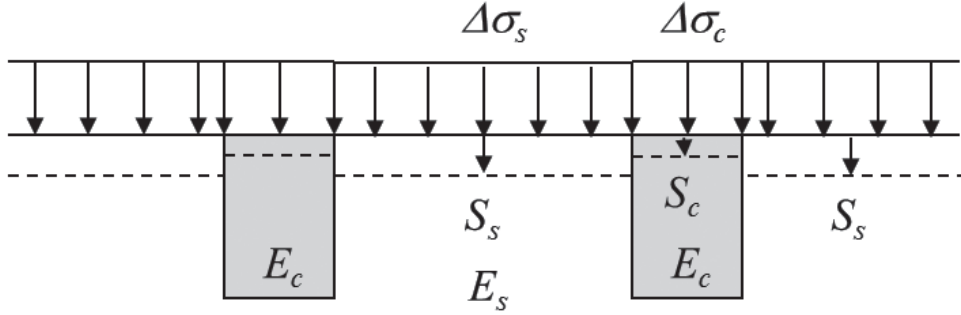
$S_s$  : Zemin oturması

$\Delta\sigma_c$ : Kolondaki düşey gerilme

$\Delta\sigma_s$ : Zemindeki düşey gerilme

#### 4.2.2. Esnek Temel- Eşit Gerilme Yaklaşımı

Esnek temelde eşit gerilme durumunda kolon ve zemin aynı yükü taşır yani gerilme konsantrasyon oranı  $n=1$ 'dir. Fakat kolon ve zemin oturmaları farklıdır ( $\Delta\sigma_c=\Delta\sigma_s$   $S_s > S_c$ ).

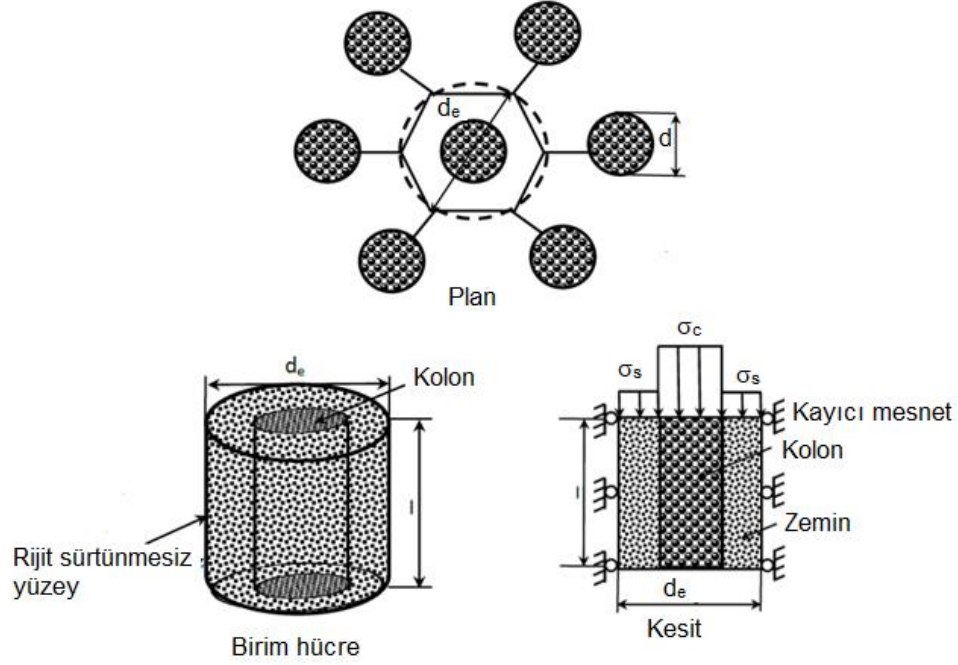


Şekil 4.4. Eşit gerilme esnek temel durumu

$$n = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_s} = 1 \quad (4.4)$$

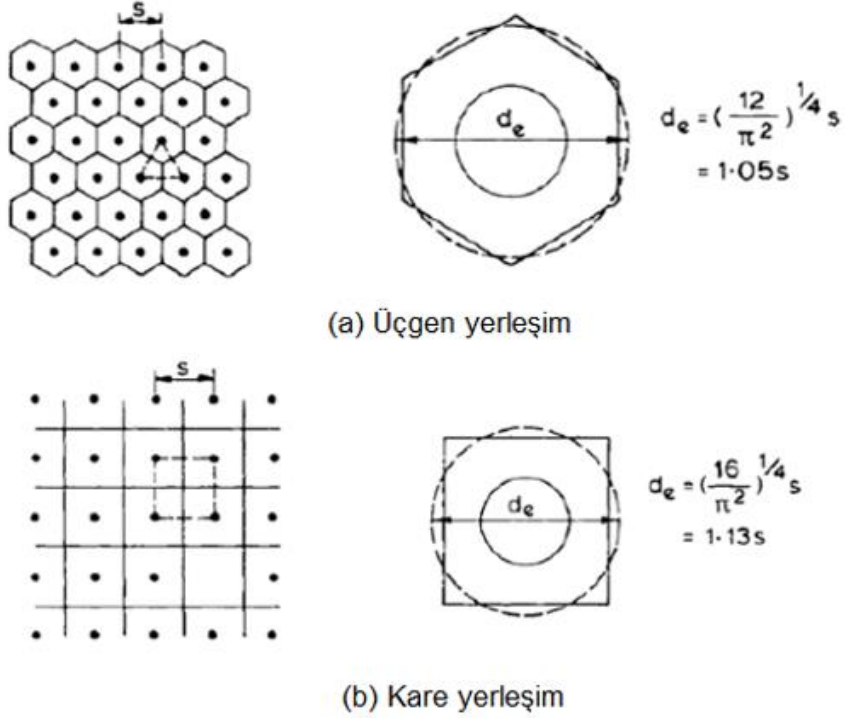
#### 4.2.3. Yatay Deformasyonsuz ve Yatay Deformasyonlu Birim Hücre

Bir kolon ve etrafındaki zeminden oluşan birim hücre, üniform geniş yüklü bir alana inşa edilmiş kolon takviyeli bir temelin analizi için kullanılmaktadır. Birim hücre kavramında, kolonların belirli bir geometrik düzende inşa edildiği, davranışlarının aynı olduğu, sınır koşullarının etkisinin ihmal edildiği ve kullanılan malzemelerin özelliklerinin aynı olduğu varsayılmaktadır (Balaam ve Booker, 1981; McKelvey ve Sivakumar, 2000). Şekil 4.5'te gösterildiği gibi kolonun yatay deformasyon yapmasına izin vermeyen bir boyutlu (1D) birim hücre, birçok teorik çalışmada ve analizlerde kullanılmıştır.



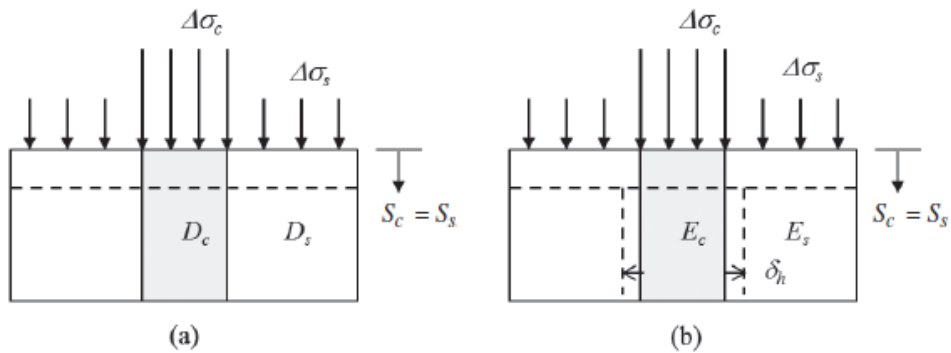
Şekil 4.5. Birim hücre kavramı (Barksdale ve Bachus, 1983)

Kolonların etki bölgesi, yerleşim düzenine göre değişir ve birim hücrede etki alanı eşdeğer bir daireye benzetilir ve bu dairenin çapı eşdeğer çap olarak isimlendirilir ( $d_e$ ). Ayrıca birim hücrenin boyutları kolonlar arası mesafeye ( $s$ ) ve yerleşim düzenine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Kolonların yerleşim düzeni ve eşdeğer daire (Balaam ve Booker, 1981)

Castro ve Sagaseta (2011) ve Jiang ve ark. (2013) tarafından, Şekil 4.7 (b) 'de gösterildiği gibi kolonun yanal deformasyon yapmasına izin veren birim hücrenin, kolon takviyeli yumuşak temellerin oturmasını ve konsolidasyon oranını etkilediği bulunmuştur.



Şekil 4.7. Birim hücre, yatay deformasyonlu ve deformasyonsuz kolon

1D birim hücre eşit düşey deformasyon koşulunda:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_c}{D_c} = \frac{\Delta\sigma_s}{D_s} \quad (4.5)$$

$\varepsilon_z = z$  derinliğindeki düşey deformasyon

$\Delta\sigma_c =$  Kolondaki düşey gerilme

$\Delta\sigma_s =$  Zemindeki düşey gerilme

$D_c =$  Kolonun 1-D rijitlik modülü

$D_s =$  Zeminin 1-D rijitlik modülü

**Gerilme Konsantrasyon Oranı:** Kolonlar çevreleyen zeminden daha rijit olduklarından, başta kolon ve zemin yükleri paylaşırlar. Ancak zamanla yapıdan aktarılan yüklerin büyük bir kısmı kolonlar tarafından taşınır ve çevreleyen zeminle arasındaki sürtünme direnci etkisiyle daha derinlerdeki sağlam tabakaya aktarılır. Gerilme konsantrasyon oranı, 1-D koşullarda Eşitlik (4.6) ile hesaplanmaktadır:

$$n_{1-D} = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_s} = \frac{D_c}{D_s} \quad (4.6)$$

$\sigma_c$  : Kolona etkiyen gerilme

$\sigma_s$  : Zemine etkiyen gerilme

3D koşullarda kolon yatay deformasyonuna izin verdiğinde:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_{cz} - \nu(\Delta\sigma_{cx} + \Delta\sigma_{cy})}{E_c} = \frac{\Delta\sigma_{sz} - \nu(\Delta\sigma_{sx} + \Delta\sigma_{sy})}{E_s} \quad (4.7)$$

$$n_{3-D} \neq \frac{E_c}{E_s} \quad (4.8)$$

$\Delta\sigma_{cx}, \Delta\sigma_{cy}, \Delta\sigma_{cz}$  = sırasıyla x, y, z yönünde kolona etkiyen gerilmeler

$\Delta\sigma_{sx}, \Delta\sigma_{sy}, \Delta\sigma_{sz}$  = x, y, z yönlerinde zemine etkiyen gerilmeler

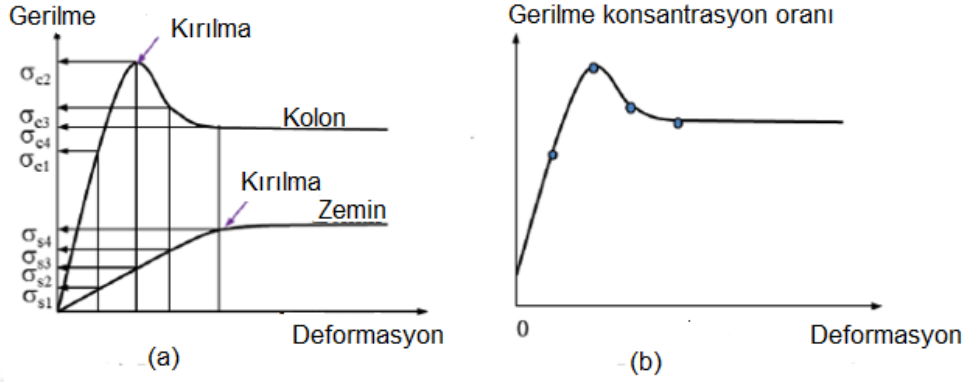
$E_c$  = Kolon elastisite modülü

$E_s$  = Zemin elastisite modülü

Sonuç olarak, kolon yatay deformasyonu göz önüne alındığında hesaplanan gerilme konsantrasyon oranı, yatay deformasyon göz önüne alınmadan hesaplananıkinden daha düşüktür.

$$n_{3-D} < n_{1-D} \quad (4.9)$$

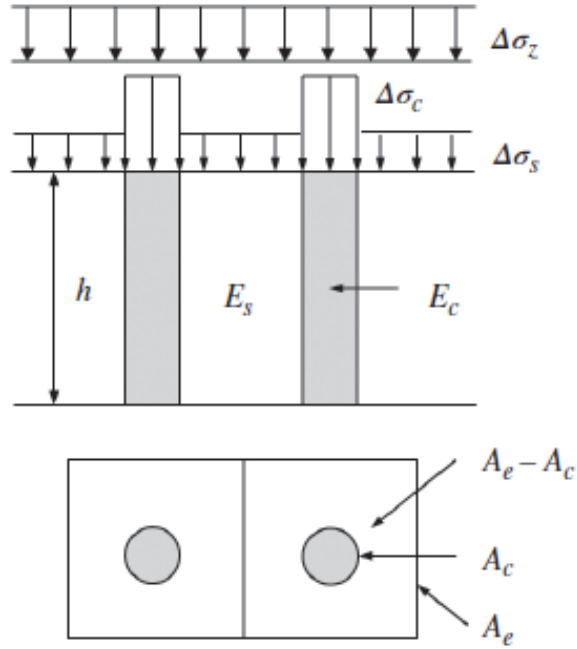
Kolon ve zemin farklı gerilme-deformasyon ilişkisine sahip olduklarından, gerilme konsantrasyonu oranı (n), sabit değildir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi kolon ve zemin özelliklerine, gerilme deformasyon seviyesine bağlıdır. Başlangıçta deformasyonla birlikte n değerinde bir artış olur ve bu da zeminden kolona yük aktarıldığını gösterir. İlerleyen zamanda deformasyonun artmasıyla n azalır ve bu da yükün kolondan zemine aktarıldığını gösterir. Konsolidasyon sonunda bu oran sabit kalır (Han ve Ye, 2001; Jiang ve ark. 2013).



Şekil 4.8. Farklı deformasyonlarda gerilme konsantrasyon oranı; (a) kolon-zemin yük paylaşımı (b) gerilme konsantrasyon oranı (Han,2015)

#### 4.2.4. Kompozit Temel

Kazıklı temellerin tasarımında, tüm yükler kazıklar tarafından taşınır ve çevreleyen zeminler herhangi bir yükü paylaşmaz. Kolon ve zeminde oluşan kompozit temelde, kazıklı temellerden farklı olarak uygulanan yük kolon ve zemin arasında paylaşılır ve birlikte deforme olurlar. Kompozit temeller için şimdiye kadar geliştirilen çoğu teori, rijit yükleme ve eşit gerilme koşullarına dayanmaktadır. Rijit yükleme altında, kolonlar ve zemin üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 4.9'da gösterildiği gibi basitleştirilebilir ve aşağıdaki eşitlikler kurulabilir.



Şekil 4.9. Kompozit temelde yük aktarma modeli (Han, 2015)

$$\Delta\sigma_z A = \Delta\sigma_s (A_e - A_c) + \Delta\sigma_c A_c \quad (4.10)$$

$\Delta\sigma_z$  = Kompozit temel üzerine uygulanan ortalama düşey gerilme

Eşitlik (4.10)'da gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_s (1 - a_s) + \Delta\sigma_c a_s \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada,  $a_s$ ; alan yerleşim oranıdır. Gerilme konsantrasyon oranı,  $n = \Delta\sigma_c / \Delta\sigma_s$  göz önünde bulundurulduğunda, Eşitlik (4.11) yeniden yazılabilir.

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_s \left[ (1 - a_s) + na_s \right] = \left[ 1 + (n - 1)a_s \right] \Delta\sigma_s \quad (4.12)$$

Zemine etkiyen gerilme,

$$\Delta\sigma_s = \mu \Delta\sigma_z \quad (4.13)$$

$$\mu = \frac{1}{1 + (n - 1)a_s} \quad (4.14)$$

burada;  $\mu$  gerilme azaltma faktörüdür. Eşitlik (4.14), gerilme azaltma faktörünün 1'den küçük olduğunu ve gerilme konsantrasyon oranının ve / veya alan değiştirme oranının artmasıyla azaldığını göstermektedir.

Kolon ve zemindeki deformasyonların 1-D ve eşit olduğu varsayılırsa:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon_z \quad (4.15)$$

$\varepsilon_c$ : Kolondaki düşey deformasyon

$\varepsilon_s$ : Zemindeki düşey deformasyon

$\varepsilon_z$ : Ortalama düşey deformasyon

Eşitlik (4.11)'in Eşitlik (4.15) 'e bölünmesi ile

$$E_{eq} = E_s (1 - a_s) + E_c a_s \quad (4.16)$$

elde edilir. Burada;

$E_{eq}$ : Kompozit temelin eşdeğer modülü

Eşitlik (4.16) şu şekilde ifade edilebilir.



$$\sigma_r = \left( \Delta\sigma_s + \frac{2c_u}{\sin 2\Psi} \right) \left( 1 + \frac{\tan \Psi_p}{\tan \Psi} \right) \quad (4.18)$$

$\sigma_r$  : Kolon etrafındaki zeminden gelen yanal gerilme

$c_u$ : Drenajsız kayma mukavemeti

$\Psi$  : Zemindeki pasif göçme düzlemi açısı

$\Psi_p$  : Kolondaki pasif göçme düzlemi açısı ( $\Psi_p = 45 + \phi_c/2$ )

$\phi_c$  : Kolonun içsel sürtünme açısı

Kolonun pasif kayma göçmesi dikkate alınarak;

$$\Delta\sigma_c = \sigma_r K_p \quad (4.19)$$

Burada  $K_p$  pasif toprak basınç katsayısıdır, yani  $\tan^2 \Psi_p$ .

Eşitlik (4.18)'de  $\sigma_r$ , göçme düzlemi açısı  $\Psi$  ile değişir. Maksimum yanal direnç, aşağıdaki matematiksel işlemde kritik açıyı belirleyerek çözülebilir:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \Psi} = 0 \quad (4.20.a)$$

$$\frac{\partial \sigma_s}{2c_u} \tan \Psi_p = -\frac{\tan \Psi}{\tan 2\Psi} - \frac{\tan \Psi_p}{\tan 2\Psi} - \frac{\tan \Psi_p}{\sin 2\Psi} \quad (4.20.b)$$

Eşitlik 4.20.b'den, kritik açı ( $\Psi$ ), elde edilir ve daha sonra, Eşitlik 4.18 ve 4.20'de yerine konularak çevreleyen zemindeki düşey gerilme ( $\Delta\sigma_s$ ) ile kolonun nihai taşıma kapasitesi hesaplanır.

Çevreleyen zemindeki düşey gerilme sıfır ise, Eşitlik 4.20.b basitleştirilebilir.

$$\tan\Psi_p = \frac{1}{2} \tan\Psi (\tan^2\Psi - 1) \quad (4.21)$$

Taş kolonların sürtünme açıları çoğunlukla  $35^\circ - 45^\circ$  arasındadır (Greenwood, 1970; Munfakh ve diğerleri, 1983). Eğer  $\phi_c$ 'nin  $38^\circ$  olduğu varsayılırsa (tipik bir değer),  $\Psi = 61^\circ$  ve tekil taş kolonun nihai taşıma kapasitesi:

$$q_{ult,c} = 20.75c_u \quad (4.22)$$

Farklı araştırmacılar tarafından çözümler elde edilmiştir. Fakat çözümlerin çoğunda, yanal zemin direnci için ortak bir denklem bulunmaktadır:

$$\sigma_r = \sigma_{r0} K_l c_u \quad (4.23)$$

$\sigma_{r0}$  : Yanal zemin gerilmesi

$K_l$  : Farklı araştırmacılar tarafından elde edilen bir sabit

Tekil bir taş kolonun nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$q_{ult,c} = (\sigma_{r0} + K_l c_u) K_p = K' K_p c_u \quad (4.24)$$

$K', \sigma_{r0}$  etkisini göz önünde bulunduran bir sabittir. Yüzeysel derinlikte önemli değildir.

Çizelge 4.3.'te farklı araştırmacıların elde ettiği sabitler ( $K'K_p$ ) verilmiştir. Küçük değerler, düşük sürtünme açısına sahip granüler kolonlar için kullanılırken (kum sıkıştırma kolonları), daha büyük değerler, yüksek sürtünme açısına sahip granüler kolonlar için kullanılmaktadır (darbeli agrega kolonları gibi).

Çizelge 4.3. Tekil kolonun nihai taşıma kapasitesi

$c_u$ (kPa)	Zemin Türü	$K'$	$K'K_p$	Referans
19.4	Kil	4.0	25.2	Hughes and Withers (1974)
19.0	Kil	3.0	15.8-18.8	Mokashi et al. (1976)
-	Kil	6.4	20.8	Brauns (1978)
20.0	Kil	5.0	20.0	Mori (1979)
-	Kil	5.0	25.0	Broms (1979)
15.0-40.0	Kil	-	14.0-24.0	Han (1992)
-	Kil	-	12.2-15.2	Guo and Qian (1990)

Tekil bir taş kolonun nihai taşıma kapasitesini yaklaşık olarak tahmin etmek için aşağıdaki formülün kullanılması önerilir:

$$q_{ult,c} = 20c_u \quad (4.25)$$

Kolon ve etrafındaki zeminin mukavemetlerini benzer bir gerilme seviyesinde harekete geçirdiği için, taş kolon takviyeli kompozit temelin nihai taşıma kapasitesi ( $q_{ult}$ ) aşağıdaki gibi tahmin edilebilir (Han,2015):

$$q_{ult} = q_{ult,c}a_s + q_{ult,s}(1 - a_s) \quad (4.26)$$

$q_{ult,s}$ , kolon etrafındaki zeminin nihai taşıma kapasitesi olup, Barksdale (1987) tarafından önerilen şekilde  $5*c_u$  olarak tahmin edilebilir.

### 4.3.2. Derin Karışım Kolon Taşıma Gücü

Tekil DM kolonunun nihai taşıma kapasitesi; kolonun mukavemetine, kolon ile zemin arasındaki sürtünme direncine ve kolonun uç direncine bağlıdır. Tekil bir kolonun nihai taşıma kapasitesi ( $Q_{ult,c}$ ), aşağıdaki iki formülden, taşıma kapasitesi daha az olan kullanılarak tahmin edilebilir (Han ve ark., 2002):

$$Q_{ult,c} = q_{u,c} A_c \quad (4.27)$$

$$q_{u,c} = \alpha_1 \alpha_2 q_{ul} \quad (4.28)$$

$$Q_{ult,c} = f_s U_c L_c + q_{tm} A_c \quad (4.29)$$

$$q_{tm} = \lambda_E q_t \quad (4.30)$$

$q_{u,c}$ : Kolon arazi serbest basınç dayanımı

$q_{ul}$ : İyileştirilmiş zemin numunesinin laboratuvar serbest basınç dayanımı

$\alpha_1$ : Laboratuvar dayanımının arazi dayanıma oranının düzeltme faktörü (genellikle arazi çalışmaları için 0.3–1.0 veya denizcilik çalışmaları için 1.0)

$\alpha_2$ : Model numunenin, tam ölçekli kolona olan oranının düzeltme faktörü (genellikle 0.70)

$f_s$ : Çevre sürtünmesi

$U_c$ : Kolon çevresi

$L_c$ : Kolon uzunluğu

$\lambda_E$ : Uç taşıma kapasitesi azaltma katsayısı (genel olarak 0.4 ile 0.6 arasında değişir)

$q_{tm}$ : Azaltılmış kolon uç taşıma kapasitesi

$q_t$ : Kazık uç direncine bağlı olarak tahmin edilen uç direnci,

Çin'de Zemin İyileştirme Teknik Kodunda (Çin Akademisi Araştırma Akademisi, 2000) zemin tipine uygun ortalama çevre sürtünmesi önerilmiştir:

Tip I: Çok yumuşak kil ( $OC > 5\%$ ,  $e_0 > 1.5$ ),  $f_s = 5 - 8$  kPa ;

Tip II: Yumuşak kil ( $OC > 5\%$ ,  $1.0 < e_0 \leq 1.5$ ),  $f_s = 8 - 12$  kPa ;

Tip III: Kil ( $OC < 5\%$ ,  $e_0 \leq 1.0$ ),  $f_s = 12 - 15$  kPa , burada OC organik içeriktir ve  $e_0$  boşluk oranıdır.

Japonya Yapı Merkezi (1997) çevre sürtünmesi ve uç taşıma kapasitesi için aşağıdaki formülasyonları geliştirmiştir:

Killi zeminler için:

$$f_s = c_u \quad (4.31)$$

$$q_{tm} = 6c_u \quad (4.32)$$

Kum zeminler için:

$$f_s = \frac{10N}{3} \text{ (kPa)} \quad (4.33)$$

$$q_{tm} = 75N_t \quad (4.34)$$

$c_u$ : Kolon boyunca zeminin ortalama kohezyonu (kPa)

N: Kolon boyunca zeminin ortalama SPT N değeri

$c_{ut}$ : Kolon ucunun altındaki zeminin kohezyonu (kPa)

$N_t$ : Kolon ucu altındaki SPT N değeri

Bir DM kolonlu kompozit temelinin ( $q_{ult}$ ) nihai taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Han ve ark. 2002):

$$q_{ult} = a_s \frac{Q_{ult,c}}{A_c} + \beta_m (1 - a_s) q_{ult,s} \quad (4.35)$$

$\beta_m$ : Zemin taşıma kapasitesinin hareket faktörü (tipik olarak sürtünmeli kolonlar için 0.5- 1.0 veya uç taşıyıcı kolonlar için 0.1-0.4)

$q_{ult,s}$ : Kolon etrafındaki zeminin nihai taşıma kapasitesi

#### 4.3.3. Jet Grout Kolon Taşıma Gücü

Tekil bir jet kolonun nihai yük taşıma kapasitesi ( $Q_{ult,c}$ ), tekil rijit kazık yük taşıma kapasitesi yöntemine göre önerilebilir. Yani;

$$Q_{ult,c} = f_s A_s + q_t A_t \quad (4.36)$$

$A_s$ : Kolon yüzey alanı

$A_t$ : Kolon uç kesit alanı

Drenajsız koşullarda çevre sürtünmesi  $\alpha$  yöntemi ile tahmin edilebilir. Yani;

$$f_s = \alpha c_u \quad (4.37a)$$

Burada  $\alpha$  çoğunlukla 0.5-1.0 arasında değişen ara yüz azaltma faktörüdür.

Drenajlı koşullarda çevre sürtünmesi  $\beta$  yöntemi ile tahmin edilebilir. Yani;

$$f_s = \beta_t \sigma'_{z0} \quad (4.37b)$$

$$\beta_i = K \tan \delta_i \sigma'$$

$\sigma_{z0}$  : Efektif gerilme

K: Tipik olarak 0.5K<sub>0</sub>-1.0K<sub>0</sub> arasında değişen yanıl toprak basıncı katsayısı

K<sub>0</sub>: Sükunetteki yanıl toprak basıncı katsayısı

$\delta_i$ : Ara yüz sürtünme açısı, çoğunlukla zeminin içsel sürtünme açısının ( $\phi'$ )

0.8-1.0 katıdır.

Drenajsız koşullarda uç direnci:

$$q_t = N^* c_u \approx 9c_u \quad (4.38)$$

Drenajlı koşullarda uç direnci:

$$q_t = 0.5d_c N_\gamma^* + \sigma_D' N_q^* \quad (4.39)$$

d<sub>c</sub>: Kolon çapı

$\sigma_D'$ : Kolon ucundaki efektif gerilme

$N_\gamma^*, N_q^*$  Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4. 4.  $N_\gamma^*$  ve  $N_q^*$  değerleri (Vesic,1975; 1977)

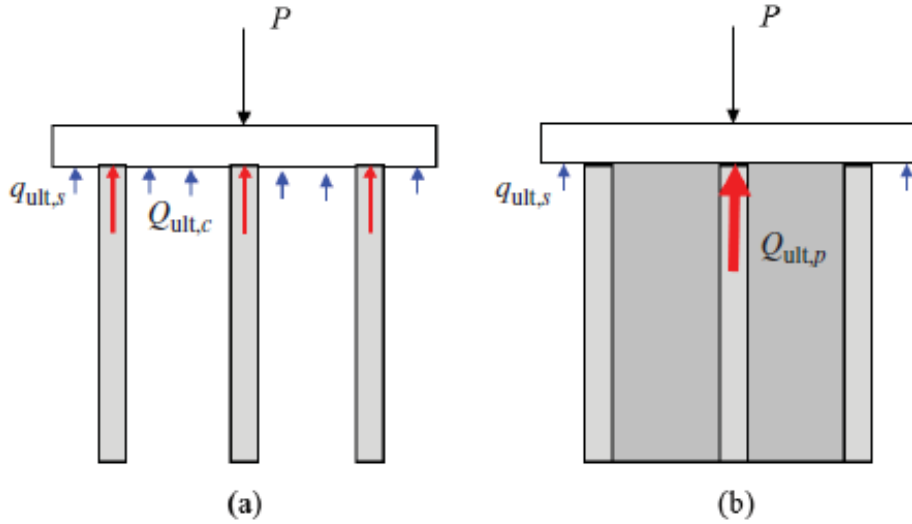
$\phi'(^{\circ})$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
$N_\gamma^*$	3.3	4.3	5.8	7.4	10	14	19	25	32	48	66	90	120	180
$N_q^*$	13	16	21	26	33	42	54	69	90	130	170	220	290	400

Tekil kolonun nihai taşıma kapasitesi, betonun drenajsız kayma mukavemeti ile sınırlandırılmalıdır. Yani;

$$Q_{ult,c} \leq q_u A_c \quad (4.40)$$

$q_u$ : Betonun drenajsız kayma mukavemeti (genel olarak 28 günde 20 MPa)

Beton kolonlu bir kompozit temelin nihai taşıma kapasitesi ( $q_{ult}$ ), Poulos (2001) tarafından, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi kazıklı bir radye temel için önerilen iki yöntemden taşıma kapasitesi daha az olan kullanılarak tahmin edilebilir. (1) zemin ve tüm beton kolonların yük kapasitelerinin toplamı ve (2) Eşdeğer kolon ve kolonun çevresi dışındaki zemin taşıma kapasitelerinin toplamı (eşdeğer kolon).



Şekil 4.11. Beton kolonlu kompozit temel (Han,2015)

$$Q_{ult1} = \sum Q_{ult,ci} + q_{ult,s} A_{sr} \quad (4.41a)$$

$$Q_{ult2} = Q_{ult,p} + q_{ult,s} A_{so} \quad (4.41b)$$

$Q_{ult,ci}$  : Tekil kolonun nihai taşıma kapasitesi

$q_{ult,s}$  : Zeminin nihai taşıma kapasitesi

$A_{sr}$  : Radyenin altındaki zemin alanı

$Q_{ult,p}$  : Eşdeğer kolonun nihai taşıma kapasitesi

$A_{so}$  : Kolonun çevresi dışındaki zemin alanı

Önceki hesaplamalarda olduğu gibi, drenajsız koşullarda sürtünmeyi hesaplamak için  $\alpha$  yöntemi ve drenajlı koşullarda  $\beta$  yöntemi kullanılmalıdır (eşdeğer bir kolon için  $\alpha = 1$ ).

Uç direncini hesaplamak için; drenajsız durumda drenajsız kayma kuvveti, drenajlı durumda ise içsel sürtünme açısı kullanılmalıdır.

#### 4.4. Rijit Kolonlarda Oturma Hessabı

##### 4.4.1. Taş Kolon Oturma Hesabı

Han (2010), granüler kolonlarla desteklenmiş temellerin oturmasının hesaplaması için kullanılan yöntemleri özetlemiştir. (1) gerilme azaltma yöntemi (Aboshi ve ark., 1979), (2) iyileştirme faktörü yöntemi (Priebe, 1995) ve (3) elastik-plastik yöntem (Pulko ve Majes, 2005; Castro ve Sagasetta, 2009).

**Gerilme Azaltma Yöntemi:** Oturma hesaplarında gerilme azaltma yöntemi esas alınmaktadır. Geniş yüklü bir alan altında doğal zeminin oturması aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S = m_{v,s} \Delta \sigma_z h \quad (4.42)$$

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

$\Delta \sigma_z$  : İlave düşey gerilme

$h$ : Kil tabakasının kalınlığı

Zemin hacimsel sıkışma katsayısı:

$$m_{v,s} = \frac{1}{D_s} = \frac{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{E_s(1-\nu_s)} \quad (4.43)$$

$D_s$ : Ödometrik rijitlik modülü

$\nu_s$ : Zeminin Poisson oranı

Yumuşak killerde ödometre rijitlik modülü aşağıdaki eşitlik ile de hesaplanabilir.

$$D_s = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_{z0}}{C_c} \quad (4.44)$$

$e_0$ : Zeminin başlangıç boşluk oranı

$\sigma'_{z0}$ : Efektif jeolojik gerilme

$C_c$ : Zeminin sıkışma katsayısı

Aşırı konsolide zeminlerde (toplam gerilme, ön konsolidasyon gerilmesinden daha az ise),  $C_c$  yerine  $C_r$  kullanılmalıdır.

Zeminin sıkışmasına bağlı olarak kompozit temelin oturması:

$$S' = m'_{v,s} \Delta \sigma_s h = m'_{v,s} \mu \Delta \sigma_z h \quad (4.45)$$

$m'_{v,s}$ : Kolon inşaatından sonra zeminin hacimsel sıkışma katsayısı

$\mu$ : Gerilme azalma oranı

Kompozit temel oturmasının doğal zeminin oturmasına oranı

$$\frac{S'}{S} = \frac{m'_{v,s}}{m_{v,s}} \mu \quad (4.46)$$

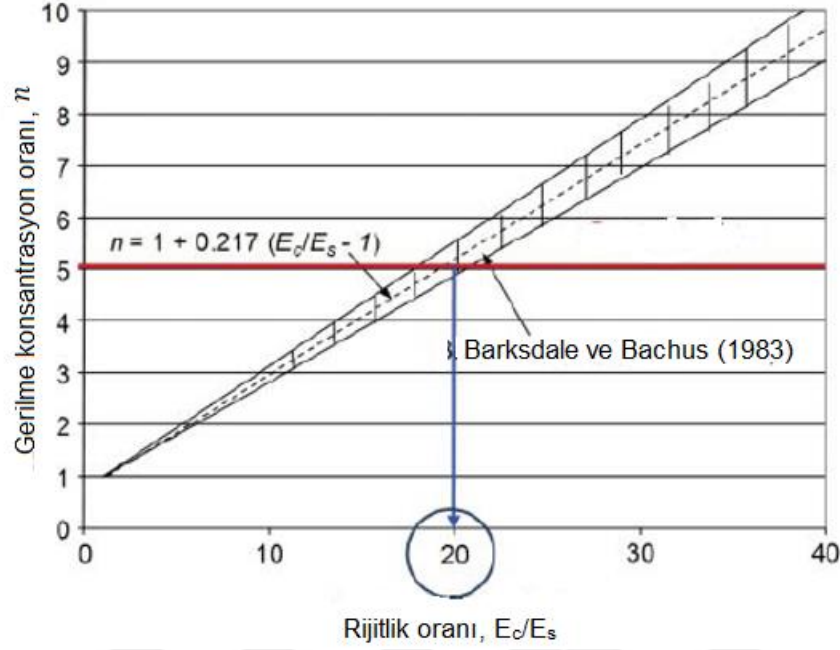
Yumuşak zeminler için kolon inşaatından önceki ve sonraki hacimsel sıkışma değeri çok fazla değişmez.

$$m'_{v,s} = m_{v,s} \quad (4.47)$$

$$\frac{S'}{S} = \mu \quad (4.48)$$

$$S' = \frac{1}{1 + a_s(n-1)} S \quad (4.49)$$

Barksdale ve Bachus (1983), gerilme konsantrasyon oranını belirlemek için Şekil 4.12'de gösterildiği gibi ampirik bir tasarım çizelgesi geliştirmişlerdir.



Şekil 4.12. Modül oranına karşı gerilme konsantrasyon oranı (Han,2015)

Gerilme konsantrasyon oranının ortalama değerine aşağıdaki gibi yaklaşılabılır (Han, 2010):

$$n = 1 + 0.217 \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right) \quad (4.50)$$

$E_c$ : Kolon elastisite modülü

$E_s$ : Zemin elastisite modülü

Arazi verilerine göre  $E_c / E_s \leq 20$  ile sınırlandırılmalıdır. Rijit yükleme altındaki granüler kolonlar için tipik gerilme konsantrasyon oranı, 2 -4 arasında iken; dolgu yüklemesi altında 1- 2 arasında değişebilmektedir.

**İyileştirme Faktörü Hesabı**

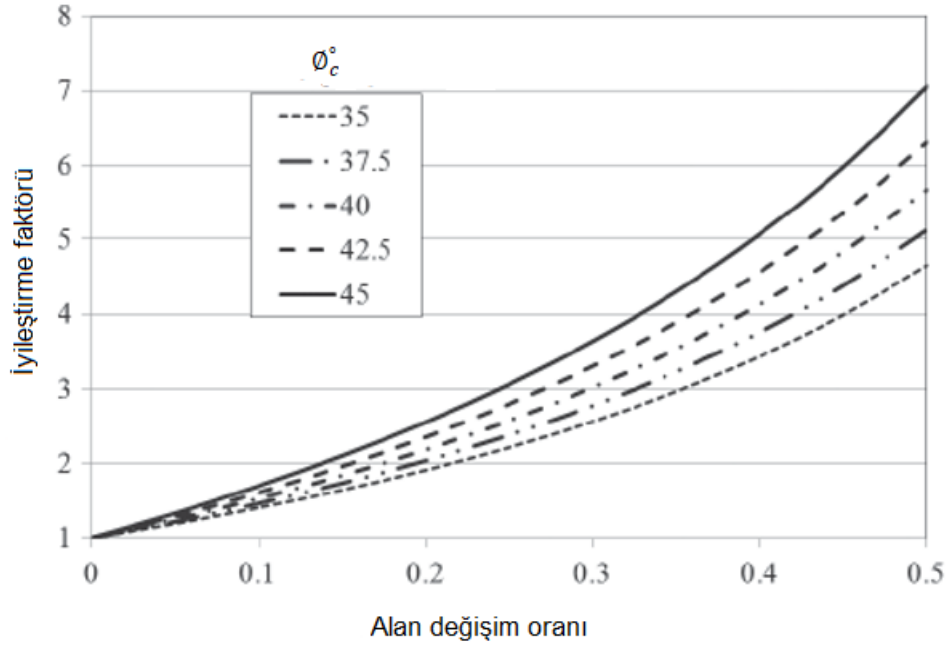
Priebe (1995), taş kolon takviyeli yumuşak temellerin oturmasını hesaplamak için temel iyileştirme faktörü yöntemini önermiştir.

$$S' = \frac{1}{I_f}, I_f = 1 + a_s \left[ \frac{5 - a_s}{4(1 - a_s) \tan^2(45^\circ - \phi_c / 2)} - 1 \right]$$

(4.51)

$I_f$ : Şekil 4.14'te de gösterilen iyileştirme faktörü

$\phi_c$ : Kolon malzemesinin sürtünme açısı



Şekil 4.13. Alan değişim oranı-iyileştirme faktörü (Priebe, 1995)

Priebe (1995), temel iyileştirme faktörüne ek olarak kolon sıkıştırılabilirliğini ve efektif jeolojik gerilmeyi de dikkate almıştır. Modifiye iyileştirme faktörü yöntemi olarak adlandırılan bu tür bir değerlendirme için, formüller ve tasarım çizelgeleri Priebe (1995) tarafından bulunmuştur. Bununla birlikte, temel iyileştirme faktörü yöntemi uygulamada daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

**Elastik- Plastik Yöntem:** Pulko ve Majes (2005), Castro ve Sagasetta (2009) elastik-plastik modellere dayanan granüler kolon takviyeli yumuşak temelin oturmasını hesaplamak için yöntemler önermişlerdir. Bu yöntemlerde yumuşak zeminin elastik olduğu varsayılırken, granüler kolonların sabit dilatasyon açısı ile Mohr Coulomb geçme kriterini izleyerek lineer elastik- tam plastik olduğu kabul edilmiştir. Plastiklik, kolonun üst kısmı ile başlar ve uygulanan yük artışı ile kolonun bütün uzunluğuna kadar uzanabilir. Bu yöntem teorik olarak güvenilirdir. Ancak uygulamada daha karmaşıktır. Priebe (1995), uygulamada taş kolon takviyeli yumuşak temellerin oturmasını tahmin etmek için en çok tercih edilen yöntemlerdendir (McCabe ve Egan, 2010).

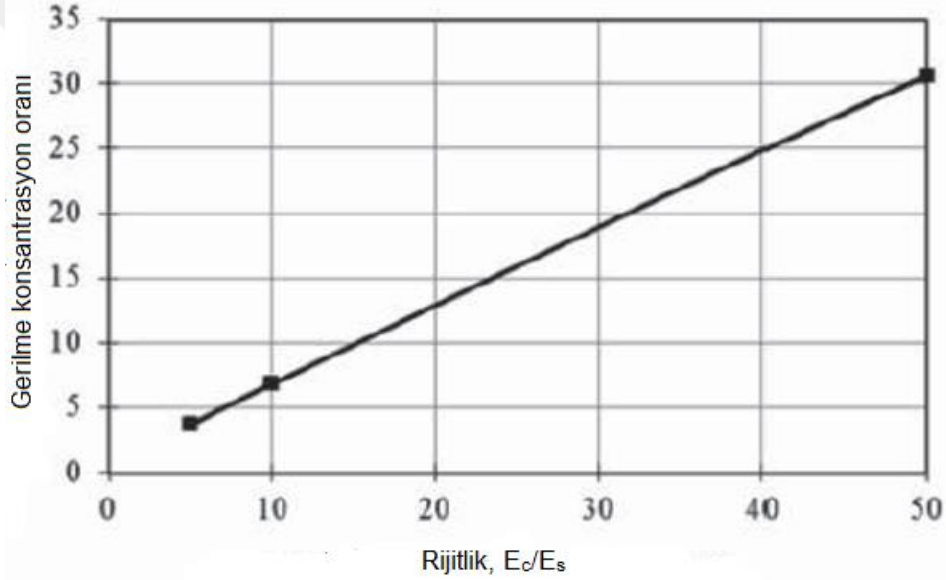
#### 4.4.2. Derin Karışım Kolon Oturma Hesabı

Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş temellerin oturmasını tahmin etmek için kolon rijitliğine bağlı olarak farklı yöntemleri kullanılabilir. Oturma hesaplamaları için kullanılan üç yöntem aşağıda sunulmuştur.

**Gerilme Azaltma Yöntemi:** Granül kolonlar için kullanılan gerilme azaltma yöntemi (Eşitlik 4.49), DM kolonları için kullanılabilir:

$$S' = \frac{1}{1 + a_s(n-1)} S$$

Gerilme konsantrasyonu oranı ( $n$ ), Şekil 4.14'teki tasarım tablosu kullanılarak tahmin edilebilir. Bu tasarım çizelgesi hem kolonun hem de zeminin elastik olduğu, yükleme plakasının veya temelin rijit olduğu ve kolonun uç kolon olduğu varsayımlarına dayanılarak geliştirilmiştir. Jiang ve ark. (2013) gerilme azaltma yöntemi ile DM kolon takviyeli temelin oturmasının %10'dan az hata ile hesaplandığını göstermiştir. Kitzume ve Terashi (2013), kolon rijitliğinin zemin rijitliğine oranının ( $E_c/E_s$ ), genellikle 10 ila 20 arasında değiştiğini belirtmiştir.



Şekil 4.14. Rijitlik oranına karşılık gelen gerilme konsantrasyon oranı (Jiang ve ark., 2013)

Gerçekte; kolon yükleme altında eğilebilir. Bu nedenle; gerilme konsantrasyon oranı, kolonun mukavemeti ile sınırlandırılmalıdır. Jiang ve ark. (2014), kolonun serbest basınç dayanımını ve zeminin elastik davranışını dikkate alarak maksimum gerilme konsantrasyon oranını belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir.

Kolondaki maksimum düşey gerilmeler (zemin yüzeyine yakın düşük efektif gerilmeler göz ardı edilerek) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta\sigma_{c\max} = q_u + K\Delta\sigma_s \quad (4.52)$$

K: Pasif ve sükunetteki toprak basınç katsayısı arasındaki yanıl toprak basınç katsayısıdır. Eşit gerilme koşulu altında birim hücrenin kuvvet dengesine dayanarak, zemin üzerindeki düşey gerilme aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\Delta\sigma_s = \frac{\Delta\sigma_z - a_s q_u}{a_s K + (1 - a_s)} \quad (4.53)$$

$\Delta\sigma_z$ : Birim hücre üzerindeki ortalama düşey gerilmedir.

Bu nedenle, maksimum gerilme konsantrasyon oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$n_{\max} = \frac{\Delta\sigma_{c\max}}{\Delta\sigma_s} = \frac{q_u [a_s K + (1 - a_s)]}{\Delta\sigma_z - a_s q_u} \quad (4.54)$$

Önceki denklemde, uygulanan ortalama düşey gerilme,  $a_s q_u$  'dan büyük olmak zorundadır; aksi takdirde kolonda akma olmaz. Kolonun akması durumunda, Şekil 4.14'ten saptanan gerilme konsantrasyon oranı  $n$ , aşağıdaki denklemle sınırlandırılmalıdır:

$$n \leq n_{\max} \quad (4.55)$$

**Kazıklı Radye Yöntemi:** Han ve ark. (2009), Horikoshi ve Randolph (1999) tarafından kazıklı radyeler için önerilen yöntemin, DM kolon takviyeli yumuşak

temellerin oturmasını hesaplamak için kullanılabileceğini doğrulamıştır. Bu yöntem, dairesel veya kare temeller altında uç veya yüzen DM kolon takviyeli yumuşak temeller için geçerlidir ve “jet grout kolon oturma hesabı” başlığı altında ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

**Kolon Penetrasyon Yöntemi:** Sağlam tabakaya oturmayan (yüzen) kolon takviyeli yumuşak temelin oturması, iyileştirilmiş bölgenin sıkıştırılması ve iyileştirilmiş bölgenin altındaki tabakanın da sıkışması sonucu meydana gelmektedir. Kolonlar ve zemin arasındaki rijittlik farkı nedeniyle, yoğun yükleme altındaki kolonlar zemine biraz batabilir. Chai ve ark., (2010) ve Pongsivasathit ve ark., (2013) kolon penetrasyonunun, iyileştirilmiş alanın alt kısmının Şekil 4.15'te gösterildiği gibi “iyileştirilmemiş” bir tabaka olarak değerlendirildiği, yumuşak bir zeminle çevrili DM kolon takviyeli temelin oturmasını hesaplamak için bir yöntem önermişlerdir.



$g(\beta_L)$ : Derinlik iyileştirme etki faktörü

$h(\gamma_p)$ : Uygulanan basıncın zemin mukavemetine olan oranının etki faktörü

Kolonların üzerinde rijit bir levha olduğunda,

$$f(a_s) = \begin{cases} 0.75 - 2.5a_s, & a_s \geq 0.20 \\ 0.4 - 1a_s, & 0.2 < a_s \leq 0.45 \\ 0, & a_s > 0.45 \end{cases} \quad (4.57)$$

Derinlik iyileştirme oranı ve basınç-mukavemet oranı:

$$g(\beta_L) = \begin{cases} 1.62 - 1.6\beta_L, & 0.2 \leq \beta_L \leq 0.7 \\ 0.5, & 0.7 \leq \beta_L \leq 0.9 \end{cases} \quad (4.58)$$

$$\beta_L = \frac{L_c}{h} \quad (4.59)$$

$$h(\gamma_p) = 0.27 \ln(\gamma_p) - 0.41 \quad (4.60)$$

$$\gamma_p = \frac{\Delta\sigma_z p_a^{1.5}}{c_u^{2.5}} \quad (4.61)$$

$p_a$ : Atmosfer basıncı

İyileştirilmiş bölgedeki oturma, aşağıdaki gibi kompozit temelin oturmasına bağlı olarak hesaplanır:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{1i} h_i}{D_{ci} a_s + (1 - a_s) D_{si}} \quad (4.62)$$

$D_{ci}$  : Kolon sıkışma modülü

$D_{si}$  : Zemin sıkışma modülü

$h_{1i}$  : İyileştirilmiş bölgedeki zeminin tabaka kalınlığı

$\Delta\sigma_{1i}$  : İyileştirilmiş bölgedeki ilave düşey gerilme

AASHTO (2006) 'da yer alan kazık grupları için gerilme dağılımı yöntemi,  $\Delta\sigma_{1i}$  gerilmesini 4 (H): 1 (V) gerilme dağılımı ile tahmin etmek için kullanılabilir. Ayrıca iyileştirilmiş bölgenin altındaki (penetrasyon bölgesi dahil) oturma, kazık grupları için kullanılan gerilme dağılımı yöntemi kullanılarak hesaplanabilir:

$$S_2 = \sum_{i=1}^m h_{2i} \frac{C_{ci}}{1 + e_{0i}} \log \left( 1 + \frac{\Delta\sigma_{2i}}{\sigma'_{z0i}} \right) \quad (4.63)$$

$C_{ci}$ : Alt zemin tabakasının sıkışma indeksi

$e_{0i}$ : Alt zemin tabakasının başlangıç boşluk oranı

$h_{2i}$ : İyileştirilmeyen bölgedeki zemin tabaka kalınlığı

$\sigma'_{z0i}$ : Alt tabakadaki başlangıç efektif gerilme

$\Delta\sigma_{2i}$ : 2 (H): 1 (V) gerilme dağılımı ile tahmin edilen iyileştirilmeyen bölgedeki ilave gerilme

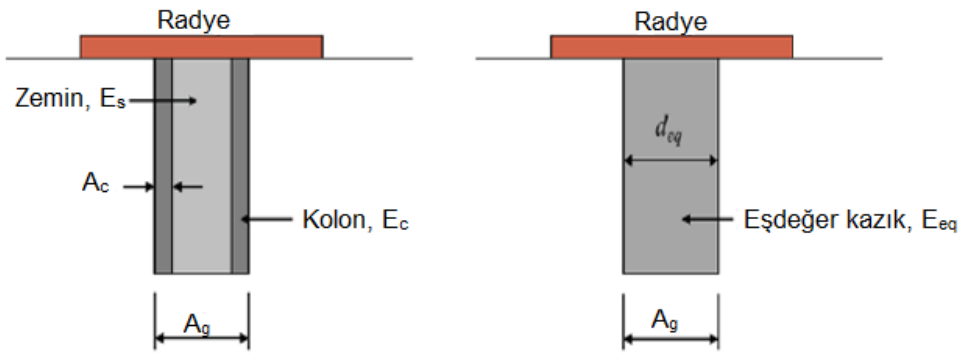
Temelin toplam oturması, iyileştirilmiş bölge içindeki ve iyileştirilmiş alanın altındaki oturmaların toplamıdır. Diğer bir deyişle,

$$S' = S_1 + S_2 \quad (4.64)$$

elde edilir.

#### 4.4.3. Jet Grout Kolon Oturma Hesabı

Sağlam tabakaya oturan kolonlarla iyileştirilen temellerin oturması çoğu durumda sorun teşkil etmemektedir. Ancak; eğer beton kolonlar yük taşıyamazsa, oturma bir sorun haline gelebilmektedir. Beton kolon takviyeli temellerin oturması, kazıklı radye veya kazık grupları için kullanılan yöntemle tahmin edilebilir. Horikoshi ve Randolph (1999) ve Poulos (2001) kazık-radye etkileşimine dayanan kazıklı radyelerin oturmasını hesaplamak için basitleştirilmiş bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Horikoshi ve Randolph (1999), Şekil 4.16'da gösterildiği gibi kazıklı radye yöntemi için eşdeğer kolon konseptini kullanmışlardır.



Şekil 4.16. Kazıklı radye yönteminde eşdeğer kazık: (a) kolon grubu ve (b) eşdeğer kazık (Han,2015)

Bu yöntemin uygunluğunu kontrol etmek için, önce bir  $R_f$  faktörü hesaplanmalıdır, ki bu Eşitlik (4.65) ile hesaplanır.

$$R_f = (N_{cl} s / L_c)^{0.5} \quad (4.65)$$

$R_f$  faktörü 2'den küçükse, eşdeğer kolon yaklaşımı uygundur. Bu yöntemde, eşdeğer modül

$$E_{eq} = E_s + (E_c - E_s) \frac{A_{tc}}{A_g} \quad (4.66)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

$E_{eq}$  : Eşdeğer kazık modülü

$A_{tc}$  : Kolonların toplam kesit alanı

$A_g$  : Kolonları ve kolonlar arasındaki zemini içeren kolon grubunun toplam alanı Şekil 4.17'deki (b) kazık-radye sisteminin rijitliği,

$$K_{pr} = \frac{P_{eq} + P_r}{S_{pr}} = \frac{K_{eq} + K_r (1 - 2\alpha_{pr})}{1 - (K_r / K_{eq}) \alpha_{pr}^2} \quad (4.67)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

$K_{pr}$  : Kazık-radye sisteminin rijitliği

$P_{eq}$  : Eşdeğer kazık tarafından taşınan yük

$P_r$  : Radye tarafından taşınan yük

$S_{pr}$  : Kazık-radye sisteminin oturması

$K_{eq}$  : Eşdeğer kazığın rijitliği

$K_r$  : Zemin üzerindeki radyenin rijitliği

$\alpha_{pr}$  : Kazık- radye etkileşim faktörü

Kolon takviyeli yumuşak temelin oturması ( $S'$  veya  $S_{pr}$ ), uygulanan toplam yükün ( $P = P_{eq} + P_r$ ) kazık-radye sisteminin rijitliği ( $K_{pr}$ ) ile bölünerek hesaplanabilir. Yumuşak zeminin kolonsuz rijitliği (rijit radye varsayılarak),

$$K_r = \frac{P_r}{S} = \frac{E_s A_r}{(1 - \nu_s^2) B_r I_s} \quad (4.68)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

$S$  : Radyenin oturması

$A_r$  : Radyenin alanı

$B_r$  : Radyenin genişliği veya çapı

$I_s$  : Etki faktörü (kare bir radye için 0.88, dairesel bir radye için 0.79)

Kazık-radye etki faktörü,

$$a_{pr} = 1 - \frac{\ln(r_r / r_{eq})}{\ln(r_m / r_{eq})} \quad (4.69)$$

$r_r$  : Radyenin yarıçapı

$r_{eq}$  : Eşdeğer kazık yarıçapı

$r_m$  : Tekil kazık maksimum etki yarıçapı, Eşitlik (4. 70) yardımı ile hesaplanır.

$$r_m = Cr_c \left\{ 0.25 + \xi \left[ 2.5x\rho x(1-\nu_s) - 0.25 \right] \right\} xL_c \quad (4.70)$$

$$\xi = G_L / G_b \quad (4.71)$$

$$\rho = G_{avg} / G_L \quad (4.72)$$

$G_L$  : Kolon ucundaki zeminin kayma modülü

$G_b$  : Kolon ucu altındaki zeminin kayma modülü

$G_{avg}$  : Kolonların uzunluğu içindeki zeminin ortalama kayma modülü

C:  $L_c / r_c > 5$  ise  $C=0$ ,  $L_c / r_c \leq 5$  ise  $C = 5$

Eşdeğer kazığın rijitliği:

$$K_{eq} = G_L x r_{eq} x \left[ \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu_s)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu_L L_{eq}) L_{eq}}{\zeta \mu_L L_{eq} r_{eq}}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \frac{4\eta}{(1-\nu_s)\xi} \frac{\tanh(\mu_L L_{eq}) L_{eq}}{\mu_L L_{eq} r_{eq}}} \right] \quad (4.73)$$

$$\eta = r_{eq,b} / r_{eq} \quad (4.74)$$

$r_{eq,b}$  : Eşdeğer kazık yarıçapı

$L_{eq}$  : Eşdeğer kazığın uzunluğu (=  $L_c$ )

$$\zeta = \ln(r_{m,p} / r_{eq}) \quad (4.75)$$

$r_{m,p}$ : Eşitlik (4.70)'te  $r_c$  yerine  $r_{eq}$  yazılarak hesaplanan kazık maksimum etki yarıçapı

$$\begin{aligned}\mu_L x L_{eq} &= \sqrt{2(\zeta x \lambda)} (L_{eq} / r_{eq}) \\ \lambda &= E_{eq} / G_L\end{aligned}\quad (4.76)$$

Üniform eşdeğer bir kazık için,  $\eta = 1$ 'dir.

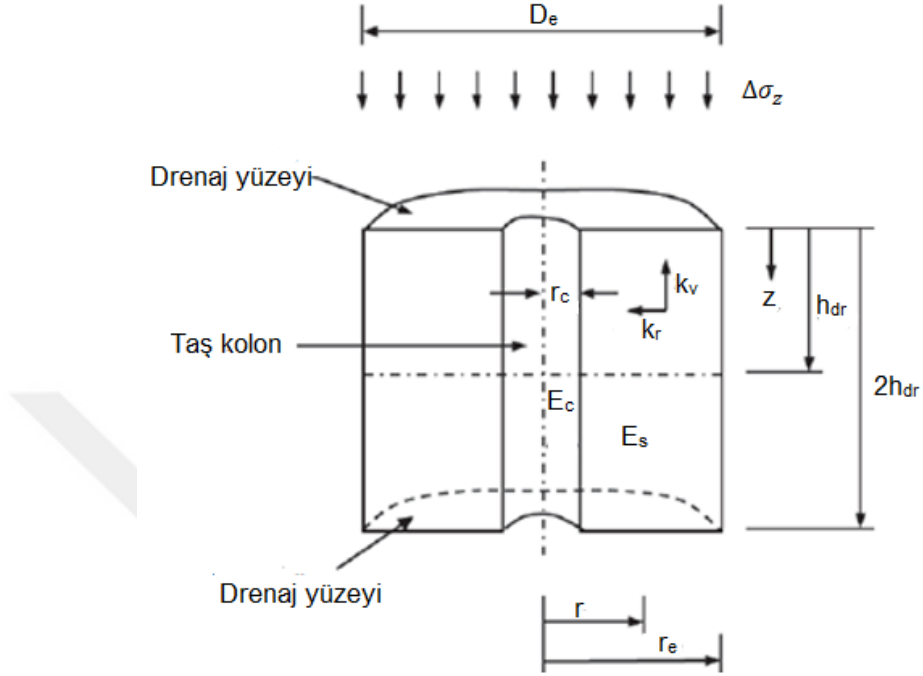
#### 4.5. Rijit Kolonlarda Konsolidasyon Oturma Hesabı

##### 4.5.1. Taş Kolonlarda Konsolidasyon

Han ve Ye (2001) serbest drenajlı, taş kolon takviyeli yumuşak temellerin konsolidasyon oranı için basitleştirilmiş bir çözüm geliştirmişlerdir (Şekil 4.17). Yumuşak zemindeki aşırı boşluk suyu basıncı, düşey ve radyal drenajlara bağlı olarak dağılmaktadır. Su, serbest akışlı taş kolonuna ulaştığında hemen dağıldığı varsayılmaktadır. Ayrıca, taş kolonun ve zeminin aynı gerilme altında eşit deforme olduğu varsayılmaktadır. Yani;

$$\frac{\partial e_s}{1 + e_s} = \frac{\partial e_c}{1 + e_c} \quad (4.76)$$

burada  $e_s$ : zemin boşluk oranı ve  $e_c$ : kolon boşluk oranıdır.



Şekil 4.17. Serbest drenajlı taş kolon konsolidasyon modeli

Hücrenin üst kısmına  $\Delta\sigma_z$  basıncı uygulanır, kolon ve zemin tarafından aşağıdaki gibi paylaşılır:

$$\Delta\sigma_s A_s + \Delta\sigma_c A_c = \Delta\sigma_z A_e \quad (4.77)$$

Eşitlik (4.76)'dan aşağıdaki ilişki elde edilebilir:

$$\partial\sigma'_s = \frac{m_{v,c}}{m_{v,s}} \partial\sigma'_c \quad (4.78)$$

$\sigma'_s$ : Zemindeki ortalama efektif gerilme

$\sigma'_c$ : Kolondaki ortalama efektif gerilme

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

Eşitlik (4.77) ve (4.78)'in birleştirilmesi ve toplam zemin gerilmesinin ( $\sigma = \sigma'_s + \bar{u}$ ) dikkate alınması ile aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{\partial \sigma'_s}{\partial t} = -\frac{m_{v,c}}{m_{v,s}} \frac{A_s}{A_c} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = -\frac{m_{v,c} A_s}{m_{v,c} A_s + m_{v,s} A_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4.79)$$

burada,  $\bar{u}$  zemindeki ortalama aşırı boşluklu suyu basıncıdır.

Zeminde meydana gelen hacim değişiminin, zeminden drene olan suya eşit olduğu varsayımına dayanarak, aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$\frac{k_r}{\gamma_w} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{m_{v,s} m_{v,c} (1 - a_s)}{m_{v,c} (1 - a_s) + m_{v,s} a_s} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4.80)$$

$$c_{rm} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c_{vm} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4.81)$$

$$c_{rm} = c_r \left( 1 + n \frac{1}{N_D^2 - 1} \right) = c_r \left( 1 + n \frac{a_s}{1 - a_s} \right) \quad (4.82)$$

$$c_{vm} = c_v \left( 1 + n \frac{1}{N_D^2 - 1} \right) = c_v \left( 1 + n \frac{a_s}{1 - a_s} \right) \quad (4.83)$$

$c_r$  : Zeminin radyal yöndeki konsolidasyon katsayısı

$c_{rm}$ : Zeminin radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

$c_v$ : Zeminin düşey yöndeki konsolidasyon katsayısı

$c_{vm}$ : Zeminin düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

$N_D$ : Çap oranı ( $D_e/D_c$ )

$k_v$ : Zemin düşey yöndeki geçirgenliği

$k_r$ : Zemin radyal yöndeki geçirgenliği

$\gamma_w$ : Su birim ağırlığı

$U$ :  $r$  mesafesindeki aşırı boşluk suyu basıncı

Düşey drenaj için Terzaghi bir boyutlu çözümü kullanılabilirken, radyal drenaj için Barron çözümü (Barron, 1948) kullanılabilir. Terzaghi (1943), bir boyutlu düşey drenaj altında zemin konsolidasyon derecesi için aşağıdaki yaklaşık ilişkileri önermiştir:

$$0 < U_v < 52.6\% \text{ için } U_v = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad (4.84a)$$

$$U_v > 52.6\% \text{ için } U_v = 1 - 0.81 * 10^{-1.07T_v} \quad (4.84b)$$

$U_v$ : Düşey drenajdan dolayı ortalama konsolidasyon yüzdesi

$T_v$ : Düşey drenajdan dolayı zaman faktörü

Barron (1948), serbest drenajlı bir kum drenine doğru radyal akış nedeniyle oluşan konsolidasyon derecesi için aşağıdaki çözümü önermiştir:

$$U_r = 1 - e^{-\frac{8}{F(N_D)} T_r} \quad (4.85)$$

$$F(N_D) = \frac{N_D^2}{N_D^2 - 1} \ln(N_D) - \frac{3N_D^2 - 1}{4N_D^2} \quad (4.86)$$

$U_r$ : Radyal drenajdan dolayı ortalama konsolidasyon yüzdesi

$T_r$ : Radyal drenajdan dolayı zaman faktörü

Düşey ve radyal drenajdan dolayı zeminin konsolidasyon derecesi genel olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Carillo, 1942):

$$U_{vr} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (4.87)$$

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

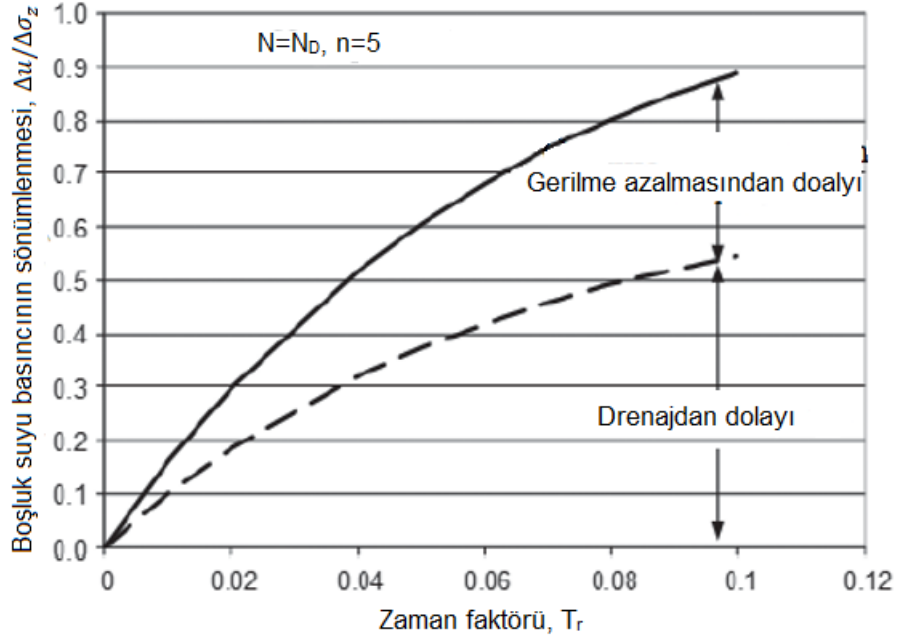
Taş kolon takviyeli temellerde, Terzaghi'nin tek boyutlu düşey konsolidasyon derecesi için, zaman faktörünün hesaplanmasında zeminin düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı kullanılabilir.

$$T_{vm} = c_{vm} t / h_{dr}^2 \quad (4.88)$$

Barron'un (Barron, 1948) radyal konsolidasyon derecesi için, zeminin radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı kullanılarak zaman faktörü hesaplanabilir.

$$T_{rm} = c_{rm} t / d_e^2 \quad (4.89)$$

Şekil 4.18 boşluk suyu basıncının dağılımı veya konsolidasyon oranının hem kolonun drenajına hem de yumuşak zemindeki gerilmenin azalmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Konsolidasyon sırasında, zemin üzerindeki gerilme kolona aktarılır. Böylece, zemin üzerindeki gerilme azalır, bu yüzden zemindeki aşırı boşluk suyu basıncı serbest kalır.



Şekil 4.18. Boşluk suyu basıncının sönmülmesi (Han ve Ye, 2001)

Han ve Ye (2002) ayrıca, Şekil 4.19'da gösterildiği gibi, smear ve kuyu direncine sahip taş kolonla güçlendirilmiş yumuşak temelin konsolidasyon derecesi için basitleştirilmiş bir çözüm geliştirmiştir:



$k_r$ : Örselenmemiş zeminin radyal yöndeki geçirgenliği

$k_s$ : Örselenmiş zeminin radyal yöndeki geçirgenliği

Han (2010), taş kolonların geçirgenliğini hesaplamak için dren geçirgenlik formülünü kullanmıştır:

$$k = \frac{2.19x(D_{10})^{1.478} n_p^{6.654}}{(P_{200})^{0.597}} \quad (4.92)$$

$k$ : Taş kolonun geçirgenliği ( m / s )

$P_{200}$ : 200 nolu elekten geçen danelerin yüzdesi

$n_p$ : Taş kolonun porozitesi,  $\left(1 - \frac{\gamma_k}{\gamma_w G_s}\right)$

$\gamma_k$ : Taş kolonun kuru birim hacim ağırlığı

$\gamma_w$ : Suyun birim hacim ağırlığı

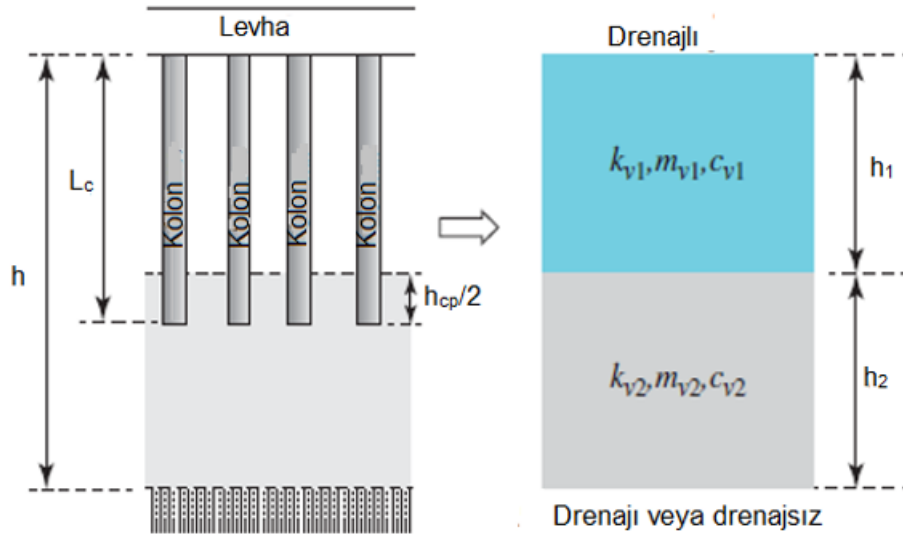
$G_s$ : Özgül ağırlık

Han (2010), killi bir zeminde yapılan taş kolon uygulamasında kil parçacıkları için  $D_{10} = 5\mu\text{m}$  kullanmıştır. Smear ve kuyu direnci etkilerini ayırmak için saha verileri yetersiz olduğundan bu iki etkiyi birleştirmiştir. Kuyu direnci etkisi dikkate alınarak elde edilen oturma oranı, arazi verileri ile karşılaştırıldığında, kuyu direnci etkisi olmayan çözümden daha yakın sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, Eşitlik (4.91) aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir:

$$F_m' = \frac{N_D^2}{N_D^2 - 1} \left( \ln N_D - \frac{3}{4} \right) + \frac{1}{N_D^2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{4N_D^2} \right) + \frac{32}{\pi^2} \left( \frac{k_r}{k_c} \right) \left( \frac{h_{dr}}{d_c} \right)^2 \quad (4.93)$$

#### 4.5.2. Derin Karışım Kolonlarında Konsolidasyon

Lorenzo ve Bergado (2003), birim hücre kavramına dayanan DM kolon takviyeli temellerin konsolidasyon oranını tahmin etmek için analitik model üretmişlerdir. Modelde, DM kolonunun çevredeki zemine göre daha yüksek bir geçirgenliğe sahip olduğu ve çevreleyen zeminden dışarı akan suyun tümünün DM kolonuna girdiği ve daha sonra kolondan düşey olarak dışarı aktığı varsayılmaktadır. Tek boyutlu Terzaghi'nin çözümü, DM kolonunun konsolidasyon derecesini hesaplamak için kullanılmıştır. Lorenzo ve Bergado (2003), Han ve Ye (2001, 2002)'nin yaptığı gibi taş kolon temellerinin sağlamlaştırılması için radyal drenajı modellememişlerdir. Chai ve Pongsivasathit (2009), DM kolon temelinin Şekil 4.20'de gösterildiği gibi kompozit bir temel olarak dikkate almışlardır.



Şekil 4.20. Kolonla güçlendirilmiş temelin konsolidasyonu (Chai ve Pongsivasathit,2009)

Bununla birlikte, Chai ve Pongsivasathit (2009), Chai ve arkadaşları (2001) tarafından düşey drenaj için geliştirilen formül ile kompozit temelin eşdeğer

geçirgenliğini hesaplamayı önermişlerdir. Sonuç olarak eşdeğer hacimsel sıkışma katsayısı ve kompozit temelin geçirgenliği aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$m_{v1} = \frac{1}{a_s D_c + (1 - a_s) D_s} \quad (4.94)$$

$$k_{v1} = \left( 1 + \frac{1.5 h_1^2}{F_m(N_D) d_e^2} \frac{k_r}{k_v} \right) k_v \quad (4.95)$$

$$F_m(N_D) = \ln \frac{N_D}{N_S} + \frac{k_r}{k_s} \ln(N_S) - \frac{3}{4} + \frac{8 h_1^2 k_r}{3 d_e^2 k_c} \quad (4.96)$$

$m_{v1}$ : Eşdeğer tabakanın hacimsel sıkışma katsayısı

$h_1$ : Eşdeğer tabakanın kalınlığı

$k_r, k_v$ : Radyal ve düşey yönlerde zemin geçirgenliği

$k_s$ : Smear bölgesinin geçirgenliği

$k_c$ : Kolon geçirgenliği

Eşdeğer parametrelerle, iki tabakalı zeminlerin konsolidasyonu için Zhu ve Yin (1999) 'in çözümü, konsolidasyon derecesini hesaplamak için kullanılabilir. Chai ve Pongsivasathit (2009), penetrasyon bölgesinin yarısının ( $h_{cp}/2$ ) iyileştirilmemiş" tabakanın bir parçası olarak kullanıldığını belirtmiş ve bu basitleştirilmiş yöntem sayısal olarak hesaplanan konsolidasyon derecesi ile karşılaştırıldığında yakın sonuçlar vermiştir.

#### 4.5.3. Jet Grout Kolonlarda Konsolidasyon

Beton kolon takviyeli temelde, kolonlar sağlam tabakaya oturuyorsa konsolidasyon oranı tasarım açısından problem olarak görülmemelidir. Çünkü beton kolonlar yükün büyük bir kısmını taşır ve ani oturmalar gerçekleşir. Beton kolonlar

zemine kısmen nüfuz ettiğinde, konsolidasyon oranı sorun olabilir. Kısmen nüfuz eden jet grout kolon destekli bir temelin konsolidasyon oranı için çözüm geliştirmek amacıyla araştırma yapılması gerekmektedir (Han, 2015).

#### 4.6.Araştırma Kapsamında Yapılan Hesaplamalar

Bu kısımda aynı boy, çap, yerleşim düzeninde ve aynı zemin koşullarında imal edilen farklı rijitliklerdeki taş kolon, derin karışım ve jet kolonlarının zemin iyileştirmedeki etkisi araştırılmıştır. Bu kolonlarla iyileştirilen zemin ve temel sisteminin taşıma gücü ve oturmaları hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar aynı örnek verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen oturma ve taşıma gücü değerleri doğal zeminkilerle karşılaştırılıp elde edilen iyileşme miktarı hesaplanmıştır.

##### 4.6.1. Sağlam Tabakanın Derinlerde Olması Durumunda Taşıma Gücü (Yüzen Kolonlar)

Rijit kolonlarla iyileştirilmesi planlanan alan, drenajsız kayma mukavemeti ( $c_u$ ) 40 kPa ve kalınlığı 15 m olan yumuşak kilden oluşmaktadır. Yer altı suyu seviyesi zemin yüzeyinden 1.0 m derindedir. YASS'ın üstünde ve altında kalan zemin birim ağırlığı sırasıyla 18 ve 19 kN/m<sup>3</sup>'tür. Bu alanda 4mx4m boyutunda ve derinliği  $D_f = 1.0$  m olan kare bir temel inşa edilecektir. Bu temel, 10 m uzunluğunda, 2 m aralıklı ve 0.8 m çapında eşkenar üçgen yerleşim düzeninde tasarlanmış kolonlarla (5 adet) desteklenecektir. Tekil bir kolonun ve temelin nihai yük taşıma kapasitesini hesaplayalım.

Rijit kolon taşıma gücü ve oturma hesaplamalarında kullanılan zemin parametreleri, kolonların malzeme ve geometrik özellikleri Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir.

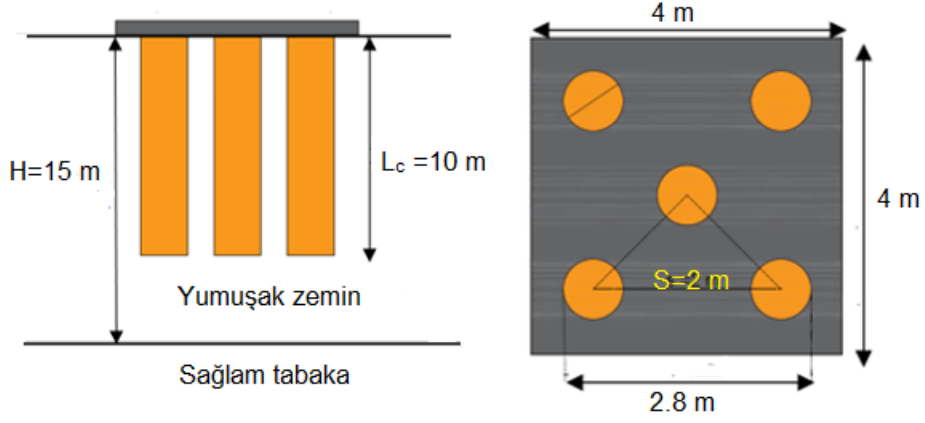
Çizelge 4.5. Analitik hesaplamalarda kullanılan yapı ve zemin özellikleri

Parametreler	
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19
$\nu$	0,35
E (kPa)	6000
c (kPa)	40
Temel uzunluğu (m)	4
Temel genişliği (m)	4
Temel derinliği (m)	1

Çizelge 4.6. Rijit kolon özellikleri ve hesap parametreleri

Parametre	Taş Kolon	Derin Karışım Kolon	Jet Grout Kolon
$L_c$ (m)	10	10	10
$D_c$ (m)	0.8	0.8	0.8
s (m)	2	2	2
Yerleşim düzeni	Üçgen	Üçgen	Üçgen
E (MPa)	50	100	5e+2
$q_u$ (MPa)	-	3	-
$\gamma_{unsat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	20	22	22
$\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	22	24	24
$k_x=k_v$ (m/gün)	1	-	-
$D_{10}$	%20	-	-

Yüzen rijit kolonlu temel sisteminin hesaplamalarında kullanılan kolon çapı, uzunluğu, yerleşim düzeni ve sayısı Şekil 4.21 'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Hesaplamalarda kullanılan rijit kolonların görünüşü

**Taş Kolon Taşıma Gücü**

Tekil taş kolon nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,c} = K \cdot c_u = 20 \times 40 = 800 \text{ kPa}$$

Kolon etrafındaki doğal zeminin nihai taşıma kapasitesi (Meyerhof),

$$q_{ult,s} = c N_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B_f s_\gamma d_\gamma$$

$$s_c = 1 + 0.2x \frac{B_f}{L_f} = 1 + 0.2x \frac{4}{4} = 1.20$$

$$d_c = 1 + 0.2x \frac{D_f}{B_f} = 1 + 0.2x \frac{1}{4} = 1.05$$

$$q_{ult,s} = c N_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q$$

$$q_{ult,s} = 40 \times 5.14 \times 1.2 \times 1.05 + 18 \times 1 \times 1 \times 1 = 277.06 \text{ kPa}$$

Alan değişim oranı,

$$a_s = 0.907 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 = 0.907 \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.15$$

Kompozit temelin nihai taşıma kapasitesi,

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

$$q_{ult} = 800 \times 0.15 + 277.06 \times (1 - 0.15) = 352.95 \text{ kPa}$$

$$q_{ult,e \min} = \frac{q_{ult}}{G.S} = \frac{352.95}{3} = 117.65 \text{ kPa}$$

#### Derin Karışım Kolon Taşıma Gücü

Tekil kolon alanı,

$$A_c = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.50 \text{ m}^2$$

Alan değişim oranı,

$$a_s = 0.907 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 = 0.907 \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.15$$

Tekil kolon nihai yük kapasitesi,

$$Q_{ult,c1} = q_{u,c} A_c = 3000 \times 0.50 = 1507.97 \text{ kN}$$

Kolon uç direnci,

$$q_t = 9c_u = 360 \text{ kPa}$$

$$f_s = axc_u = 0.9 \times 40 = 36 \text{ kPa}$$

$$U_c = \pi D = \pi \times 0.8 = 2.51 \text{ m}$$

$$L_c = 10 \text{ m}$$

$$q_{tm} = \lambda q_t = 0.5 \times 360 = 180 \text{ kPa}$$

$$Q_{ult,c2} = f_s U_c L_c + q_{tm} A_c = 36 \times 2.51 \times 10 + 180 \times 0.50 = 995.26 \text{ kPa}$$

$$Q_{ult,c2} < Q_{ult,c1}, Q_{ult} = Q_{ult2} = 995.26 \text{ kN}$$

Zemin taşıma gücü,

$$q_{ult,s} = cN_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B_f s_\gamma d_\gamma$$

$$q_{ult,s} = cN_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q$$

$$q_{ult,s} = 277.06 \text{ kPa}$$

Temelin nihai taşıma kapasitesi;

$$q_{ult} = a_s \frac{Q_{ult,c}}{A_c} + \beta_m (1 - a_s) q_{ult,s} = 0.15 \times \frac{995.26}{0.50}$$

$$+ 0.5 \times (1 - 0.15) \times 277.06 = 405.762 \text{ kPa}$$

Temelin nihai taşıma kapasitesi

$$q_{e \min} = \frac{q_{ult}}{GS} = \frac{405.762}{3} = 135.254 \text{ kPa}$$

### Jet Grout Kolon Taşıma Gücü

Kolonun uç alanı,

$$A_t = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.50 \text{ m}^2$$

Kolon gövde alanı,

$$A_c = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.50 m^2$$

Kolon yüzey alanı,

$$A_s = \pi x 0.8 x 10 = 25.13 m^2$$

Tekil kolon nihai yük taşıma kapasitesi,

$$f_s = a x c_u = 0.9 x 40 = 36 kPa$$

Kolon uç direnci,

$$q_t = 9c_u = 360 kPa$$

Kolon yük kapasitesi

$$Q_{ult,c} = f_s A_s + q_t A_t = 36 x 25.13 + 360 x 0.50 = 1085.73 kN$$

Kolon nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,c} = \frac{1085.73}{0.50} = 2162.37 kPa$$

Zemin nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,s} = c N_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B_f s_\gamma d_\gamma$$

$$q_{ult,s} = c N_c s_c d_c + \sigma_z N_q s_q d_q = 277.06 kPa$$

Temelin altındaki zemin alanı

$$A_{sr} = A_r - N_{cl} A_c = 4 \times 4 - 5 \times 0.50 = 13.49 m^2$$

Tekil kolon ve zemin göz önüne alınarak temelin nihai yük kapasitesi

$$Q_{ult1} = \sum Q_{ult,ci} + q_{ult,s} A_{sr} = 5 \times 1085.73 + 277.06 \times 13.49 = 9165.25 kN$$

Beş kolonu içeren eşdeğer bir kolon düşünüldüğünde, kesit alanı ve yüzey alanı

$$A_{pt} = 2.8 \times 2.8 = 7.84 m^2$$

$$A_{ps} = 4 \times 2.8 \times 10 = 112 m^2$$

Eşdeğer kolonun çevre sürtünmesi

$$f_{ps} = \alpha c_u = 0.9 \times 40 = 36 kPa$$

Eş değer kolonun uç direnci,

$$q_{pt} = 9c_u = 360 kPa$$

Eşdeğer sistemin nihai taşıma kapasitesi

$$Q_{ult,p} = f_{ps} A_{ps} + q_{pt} A_{pt} = 36 \times 112 + 360 \times 7.84 = 6854.4 kN$$

Eşdeğer kolon ve zemin katkısını göz önünde bulundurularak temelin nihai yük kapasitesi;

$$Q_{ult2} = Q_{ult,p} + q_{ult,s} A_{so} = 6854.4 + 277.06 \times (4 \times 4 - 2.8 \times 2.8) = 9115.18 kN$$

$$Q_{ult2} < Q_{ult1}, Q_{ult} = Q_{ult2} = 9115.18 kN$$

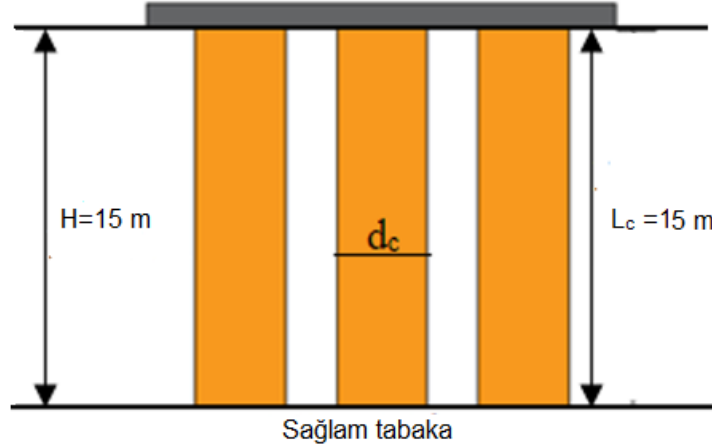
Temelin nihai taşıma kapasitesi

$$q_{ult} = \frac{Q_{ult}}{A_f} = \frac{9115.18}{4 \times 4} = 569.69 kPa$$

$$q_{emin} = \frac{q_{ult}}{GS} = \frac{569.69}{3} = 189.89 kPa$$

#### 4.6.2. Kolonların Sağlam Tabakaya Oturması Durumunda Taşıma Gücü (Uç Kolonlar)

Önceki başlıkta incelenen probleme ilave olarak kolonlar sağlam tabakaya oturturulmuştur. Yumuşak zeminin altında bulunan sağlam tabakanın doygun birim ağırlığı  $20 \text{ kN/m}^3$  ve içsel sürtünme açısı  $40^\circ$ 'dir. Çalışmada kullanılan diğer tüm parametreler aynıdır. Sağlam tabakanın, sistemin nihai taşıma kapasitesine olan etkisini inceleyelim. Kompozit sistemdeki kolonların yerleşim düzeni ve sayısı Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Rijit kolonların sağlam tabakaya oturması

#### Taş Kolon Taşıma Gücü

Tekil taş kolon nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,c} = K.c_u = 20 \times 40 = 800 \text{ kPa}$$

Kolon etrafındaki doğal zeminin nihai taşıma kapasitesi (Meyerhof),

$$q_{ult,s} = 277.06 \text{ kPa}$$

$$a_s = 0.907 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 = 0.907 \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.15$$

Kompozit temelin nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult} = 352.95 \text{ kPa}$$

$$q_{ult,e\min} = \frac{q_{ult}}{G.S} = \frac{352.95}{3} = 117.65 \text{ kPa}$$

#### Derin Karışım Kolon Taşıma Gücü

Tekil kolon alanı,

$$A_c = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.502 \text{ m}^2$$

Alan değişim oranı,

$$a_s = 0.907 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 = 0.907 \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.15$$

Tekil kolon nihai taşıma kapasitesi,

$$Q_{ult,c1} = q_{u,c} A_c = 3000 \times 0.502 = 1507.97 \text{ kN}$$

Kolon uç direnci,

$$q_t = 0.5 d_c N_{\gamma}^* + \sigma'_D N_q^*$$

$$q_t = 30626.40 \text{ kPa}$$

$$f_s = 36 \text{ kPa}$$

$$U_c = 2.51 \text{ m}$$

$$L_c = 10 \text{ m}$$

$$q_{tm} = 15313.2 \text{ kPa}$$

$$Q_{ult,c2} = 8602.03 \text{ kPa}$$

$$Q_{ult,c1} < Q_{ult,c2}, Q_{ult} = Q_{ult1} = 1507.97 \text{ kN}$$

Zemin taşıma gücü,

$$q_{ult,s} = 277.06 \text{ kPa}$$

Temelin nihai yük kapasitesi;

$$q_{ult} = 553.78 \text{ kPa}$$

Temelin nihai taşıma kapasitesi

$$q_{emin} = 184.59 \text{ kPa}$$

**Jet Grout Kolon Taşıma Gücü**

Kolonun uç alanı,

$$A_t = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.50m^2$$

Kolon gövde alanı,

$$A_c = \pi x \left( \frac{0.8}{2} \right)^2 = 0.50m^2$$

Kolon yüzey alanı,

$$A_y = \pi x 0.8 x 15 = 37.70m^2$$

Tekil kolon nihai taşıma kapasitesi,

$$f_s = axc_u = 0.9 x 40 = 36kPa$$

Kolon uç direnci,

$$q_t = 0.5d_c N_\gamma^* + \sigma'_D N_q^*$$

$$q_t = 45926.40kPa$$

Kolon yük kapasitesi

$$Q_{ult,c} = 24442.30kN$$

Kolon nihai yük taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,c} = 48626.40kPa$$

Zemin nihai taşıma kapasitesi,

$$q_{ult,s} = 277.06kPa$$

Temelin altındaki zemin alanı

$$A_{sr} = A_r - N_{cl} A_c = 4 \times 4 - 5 \times 0.502 = 13.49m^2$$

Tekil kolon ve zemin göz önüne alınarak temelin nihai yük kapasitesi

$$Q_{ult1} = 125948.05kN$$

Beş kolon içeren eşdeğer bir kolon düşünüldüğünde, kesit alanı ve yüzey alanı

$$A_{pt} = 2.8 \times 2.8 = 7.84m^2$$

$$A_{ps} = 4 \times 2.8 \times 15 = 168m^2$$

Eşdeğer kolonun sürtünme katsayısı

$$f_{ps} = \alpha c_u = 0.9 \times 40 = 36kPa$$

Eş değer kolonun uç direnci,

$$q_{pt} = 0.5B_p N_\gamma^* + \sigma'_D N_q^*$$

$$q_{pt} = 45992.40kPa$$

Eşdeğer sistemin nihai taşıma kapasitesi

$$Q_{ult,p} = 366628.42kN$$

Eşdeğer kolon ve zemin katkısını göz önünde bulundurularak temelin nihai yük kapasitesi;

$$Q_{ult2} = 368889.19kN$$

$$Q_{ult1} < Q_{ult2}, Q_{ult} = Q_{ult1} = 125948.05kN$$

Temelin nihai taşıma kapasitesi

$$q_{ult} = 7871.75kPa$$

$$q_{emin} = 2623.92kPa$$

Aynı zemin koşullarında, yüzen ve sağlam tabakaya oturan rijit kolonların kullanıldığı temel uygulamasının analitik hesaplamalar sonucundaki taşıma gücü değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. Taş kolon taşıma gücü hesap yöntemi uç direncine ait herhangi bir parametre içermediğinden, kolonlar sağlam tabakaya otursa da taşıma gücünde bir değişim olmamıştır. Beton kolon taşıma gücü hesap yöntemlerinde ise uç direnci dikkate alındığı için kolonlar sağlam tabakaya oturduğunda, sağlam tabakanın katkısı değerlendirilmiş ve kompozit sistemin taşıma gücü artmıştır.

Çizelge 4. 7. Analitik çalışmalar ile elde edilen taşıma gücü değerleri

Kolon Türü	Taşıma Gücü Değerleri ( $q_{ult,emin}$ ) kPa	
	Sürtünme Kolon Durumu	Uç Kolon Durumu
Kolonsuz	92.35	
Taş kolon	117.65	117.65
Derin karışım	135.25	184.59
Jet grout	189.89	2623.92

#### 4.6.3. Rijit Kolon Oturma Hesaplamaları

Taşıma gücü hesaplarında kullanılan probleme ve Çizelge 4.5-4.6'daki parametreler kullanılarak taş kolon, derin karışım ve jet grout kolonlu kompozit sistemin oturması hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar iyileştirilmemiş zemin oturmasıyla karşılaştırılarak meydana gelen iyileşmeler incelenmiştir.

#### Taş Kolon Oturma Hesabı

$$m_{v,s} = \frac{1}{D_s} = \frac{(1+v_s)(1-2v_s)}{E_s(1-v_s)} = \frac{(1+0.35)(1-2 \times 0.35)}{6 \times (1-0.35)}$$

$$m_{v,s} = 0.103846154 MPa^{-1} = 0.0001038 kPa^{-1}$$

$$S = m_{v,s} \Delta \sigma_z h = 0.18845 m = 188.45 mm$$

$$n = 1 + 0.217 \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right) = 2.59$$

$$\mu = \frac{1}{1 + a_s(n-1)} = 0.81$$

Kompozit temelin oturması

$$S' = S\mu = 153.19 mm$$

#### Derin Karışım Oturma Hesabı

Derin karışım kolonlu kompozit temelin oturması hem gerilme azaltma yöntemi hem de kazıklı radye yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

#### Gerilme azaltma yöntemi

$$m_{v,s} = \frac{1}{D_s} = \frac{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)}{E_s(1-\nu_s)} = \frac{(1+0.35)(1-2 \times 0.35)}{6 \times (1-0.35)}$$

$$m_{v,s} = 0.103846154 MPa^{-1} = 0.0001038 kPa^{-1}$$

$$S = m_{v,s} \Delta \sigma_z h = 0.11845 m = 118.45 mm$$

$$n = 1 + 0.217 \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right) = 4.4$$

$$\mu = \frac{1}{1 + a_s (n - 1)} = 0.67$$

Kompozit temelin oturması

$$S' = S \mu = 79.36 mm$$

#### Kazıklı Radye Yöntemi

$$S' = Spr = \frac{P}{Kpr} = 24.1 mm$$

#### Jet Grout Oturma Hesabı

Jet grout kolonlarının oturma hesabı kazıklı radye yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

$$R_f = \sqrt{\frac{N_{cl} \cdot x_s}{L_c}} = \sqrt{\frac{5 \times 2}{10}} = 1 < 2 \text{ bu nedenle eşdeğer kazık yöntemi uygundur.}$$

Kolon grubunun (eşdeğer kazık) alanı

$$A_g = 2.8 \times 2.8 = 7.84 m^2$$

Radyenin yarıçapı

$$r_r = \sqrt{\frac{A_r}{\pi}} = \sqrt{\frac{4x4}{\pi}} = 2.26 \text{ m}$$

Eşdeğer kazığın yarıçapı

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{A_g}{\pi}} = \sqrt{\frac{7.84}{\pi}} = 1.58 \text{ m}$$

Eşdeğer kazığın uzunluğu

$$L_{eq} = L_c = 10 \text{ m}$$

Kolonların toplam alanı

$$A_{tc} = \sum A_{ci} = 5x\pi x 0.4^2 = 2.51 \text{ m}^2$$

Kolon elastisite modülü

$$E_c = 5 * 10^2 \text{ MPa}$$

Eşdeğer kazığın modülü

$$E_{eq} = 6 + (5 * 10^2 - 6) \times \frac{2.51}{7.84} = 164.36 \text{ MPa}$$

Zemin kayma modülü

$$G_s = G_L = \frac{6}{2x(1+0.35)} = 2.22 \text{ MPa}$$

Üniform zemin için

$$\xi = \frac{G_L}{G_B} = 1 \text{ ve } \rho = \frac{G_{av}}{G_L} = 1$$

Eşdeğer kazık için

$$\eta = \frac{r_{eq,b}}{r_{eq}} = 1$$

Eşdeğer kazığın uzunluğunun çapına oranı,

$$L_{eq} / r_{eq} = 10 / 1.58 = 6.33 > 5, C=0$$

Eşdeğer kazığın maksimum etki yarıçapı

$$r_{m,p} = Cx r_{eq} + \left\{ 0.25 + \xi \left[ 2.5x\rho x(1-v_s) - 0.25 \right] \right\} x L_{eq} = 16.25 \text{ m}$$

$$\zeta = \ln \left( \frac{16.25}{1.58} \right) = 2.33$$

$$\lambda = \frac{164.36}{2.22} = 73.96$$

$$\mu_L x L_{eq} = \sqrt{\frac{2}{\zeta x \lambda}} x \frac{L_{eq}}{r_{eq}} = \sqrt{\frac{2}{2.33 x 73.96}} x \frac{10}{1.58} = 0.68$$

$$\tan(\mu_L x L_{eq}) = \tanh(0.68) = 0.59$$

Eşdeğer kazığın rijitliği

$$K_{eq} = 2.22 \times 1.58 \times \left[ \frac{\frac{4 \times 1}{(1-0.35)1} + 1 \times \frac{2\pi}{2.33} \times \frac{\tanh(0.68)}{0.68} \times \frac{10}{1.58}}{1 + \frac{1}{\pi \times 73.96} \times \frac{4 \times 1}{(1-0.35)1} \times \frac{\tanh(0.68)}{0.68} \times \frac{10}{1.58}} \right]$$

$$K_{eq} = 64.30 \text{ MN/m}$$

Zemin üzerindeki radyenin rijitliği (radyenin rijit olduğu varsayılır)

$$K_r = \frac{P_r}{S} = \frac{E_s A_r}{(1-\nu_s^2) B_r I_s} = \frac{6 \times 16}{(1-0.35^2) \times 4 \times 0.88} = 31.08 \text{ MN/m}$$

Kolon uzunluğunun çapına oranı,  $L_c / r_c = 10 / 0.4 = 25 > 5$  bu yüzden  $C=0$

$$r_m = \left\{ 0.25 + \xi \left[ 2.5 \rho x (1 - \nu_s) - 0.25 \right] \right\} \times L_c = 16.25 \text{ m}$$

Kazık- radye etkileşim faktörü

$$a_{rp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{2.26}{1.58}\right)}{\ln\left(\frac{16.25}{1.58}\right)} = 0.85$$

Kazıklı radyenin rijitliği

$$K_{pr} = \frac{64.30 + 31.08 \times (1 - 2 \times 0.85)}{1 - \left(\frac{31.08}{64.30}\right) \times 0.85^2} = 65.41 \text{ MN/m}$$

Kazıklı radyenin oturması

$$S' = S_{pr} = \frac{P}{K_{pr}} = 17.36 \text{ mm}$$

Çizelge 4.8. Analitik çalışmalar ile elde edilen oturma değerleri

Kolon Türü	Oturma Değerleri (mm)
Kolonsuz	188.45
Taş kolon	153.10
Derin karışım	79.36
Jet grout	17.36

Yapılan analitik çalışmalara bakılacak olursa, taşıma gücü hesaplamalarında kolon rijitliği ile ilgili herhangi bir parametre kullanılmamıştır. Ama hesaplama yöntemlerinin farklı olmasından dolayı elde edilen taşıma gücü değerleri de farklıdır. Kolon rijitlik etkisi oturma hesaplamalarında göz önünde bulundurulmuştur. Fakat gerçekte kompozit sistemin taşıma gücü ve oturma davranışına etkisi olan bazı parametreler, geleneksel yöntemlerle yapılan hesaplamalarda istenilen etkiyi oluşturmamakta ya da sistem davranışını etkilememektedir. Geleneksel yaklaşımlarda yapılan kabuller ve basitleştirmelerden kaynaklı rijit kolonların zemin iyileştirmedeki etkisi tam olarak değerlendirilememektedir. Rijit kolonlu kompozit sistem, sonlu elemanlar yöntemi ile doğru bir şekilde modellendiğinde kolonların gerçek davranışı gözlemlenebilir. Amacımız soraki bölümlerde Plaxis paket programı yardımı ile bir model kurup klasik yöntemlerin gerçek davranışı ne kadar yansıttığını ve yöntemlerin güvenilirliğini araştırmaktır.



## 5. İKİ BOYUTLU (2D) SAYISAL ANALİZLER

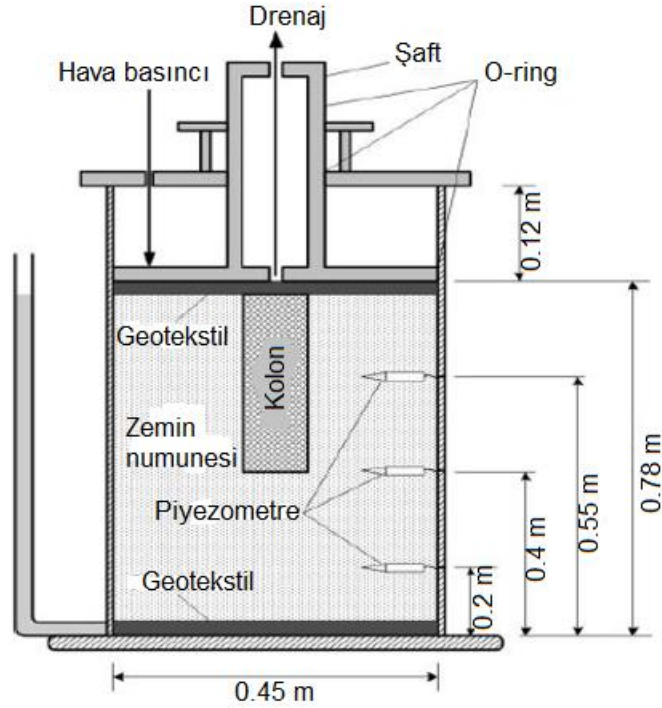
### 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu bölümde, rijit kolonlarla iyileştirilen zemin ve yapı temellerinin analizi ve tasarımına yönelik çözümler sunmak ve analitik çözümlerin güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla arazi ve laboratuvar deneylerinde kullanılan malzeme parametreleri, yükleme şartları ve problemin geometrisi PLAXIS 2D paket programı yardımıyla modellenmiştir.

### 5.2. Sayısal Analizlerin Doğruluğunun Araştırılması

Yapılan sayısal analizlerde öncelikle problem geometrisinin, yükleme koşullarının, kullanılan zemin modeli ve parametrelerinin kalibrasyonu gerekmektedir. Bu amaçla Chai ve Pongsivasathit (2010) tarafından deep mixing kolonları ile ilgili yapılan laboratuvar çalışması referans alınmıştır. Chai ve Pongsivasathit (2010), yumuşak zeminde inşa edilen yüzen zemin-çimento kolonunun konsolidasyon davranışını araştırmak için büyük çapta laboratuvar model deneyleri gerçekleştirmişlerdir (Şekil 5.1).

Laboratuvar deney modeli 0.45m çapında ve 0.9m yüksekliğindedir. Deneylerde kullanılan zemin, likit limiti %108 ve plastik limiti %59 olan Ariake kilidir. Kolon inşası için, Japonya'daki yumuşak killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan tipik bir çimento türü kullanılmıştır. Drenajı sağlamak için zemin numunesinin altına ve üstüne 3 mm kalınlığında geotekstil konulmuş ve üç farklı noktaya piyezometre yerleştirilmiştir. Zemin numunesinin hazırlanması sırasında, ön konsolidasyon sürecini hızlandırmak için numunenin ortasına bir mini prefabrike düşey dren (mini-PVD) yerleştirilmiştir. Yükleme sistemi Şekil 5.1'de gösterildiği kurulmuş ve 40 kPa'lık bir hava basıncı uygulanmıştır ve konsolidasyon basıncı yaklaşık 38 kPa'ydı. Konsolidasyon sırasında model zeminin üst kısmında oturmalar ve boşluk suyu basınçları monitörden gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. Laboratuvar model deneyinin kuruluşu

Ön konsolidasyon derecesi %90'a vardığında yükleme durdurulmuş ve mini-PVD çıkarılmıştır. PVD çıkarıldıktan sonra yeri zeminle doldurulmuştur. Eğer model duvarı ve zemin arasındaki sürtünme ihmal edilirse, yüklemeden önceki efektif düşey gerilme 34 kPa'dır. Arayüz sürtünme açısının  $2^\circ$  ve yanal zemin basınç katsayısının ( $K_0$ ) 0.5 olduğu gözönüne alındığında sürtünme, ortalama konsolidasyon derecesini yaklaşık 2 kPa kadar azaltabilir. Bu nedenle ortalama efektif düşey gerilme 32 kPa olarak tahmin edilmiş ve oturma hesaplamalarında kullanılmıştır. Model zeminin ortasında ön tasarım derinliğine kadar 150-246 mm çapında bir delik açılmıştır. Kazılan zemin çimento ile karıştırılarak tekrar deliğin içine doldurulmuştur. Kolon içinde hava kabarcıklarının oluşmasını engellemek için çelik bir çubuk yarımı ile zemin tabaka tabaka sıkıştırılmıştır. Konsolidasyon deneyinden önce kolonun mukavemet kazanması için iki hafta beklenmiştir.

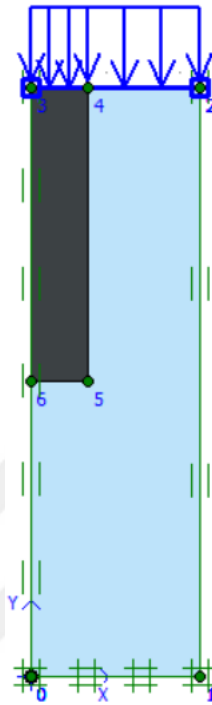
Model zeminin üst kısmına üç tabaka geotekstil serilip yükleme sistemi tekrar kurulmuş ve 100 kPa'lık (konsolidasyon basıncı 95 kPa) hava basıncı uygulanarak oturmalar ve boşluk suyu basınçları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, zemin çimento kolonun elastisite modülü  $6 \times 10^4$  kPa, poisson oranı 0.2 ve kolonun hidrolik iletkenliği  $3.65 \times 10^{-4}$  m/gün elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin, kolon model ve parametreleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2'de gösterilen aksenal simetrik birim hücre modeli kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Zemin model parametreleri (Chai ve Pongsivasathit, 2010)

Zemin tabakası Soft Soil	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_x=k_y$ (m/gün)	$\lambda$	$K$	$e_0$	$c_k$	OCR	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)
H=0.78 m	13.6	6E-04	0.65	0.065	3.3	1.32	1.0	0.0	30

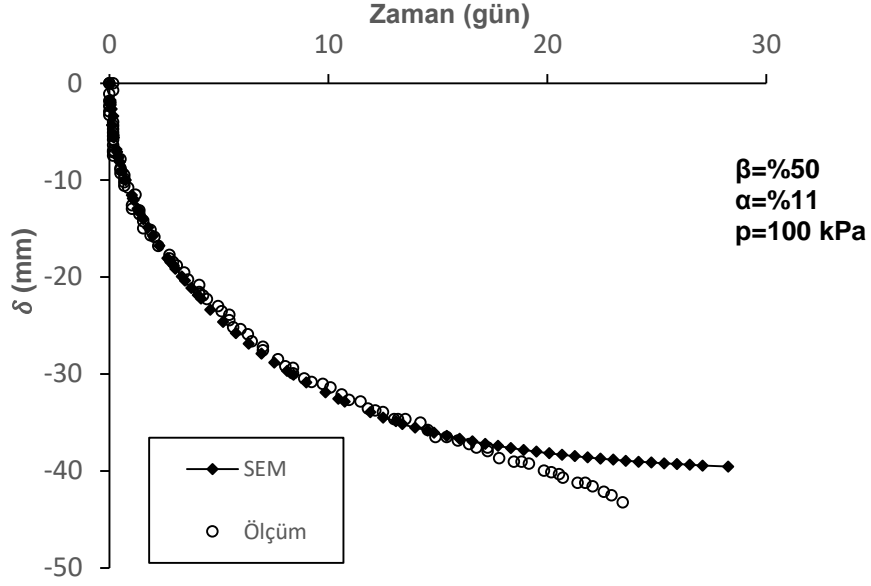
Çizelge 5.2. Kolon model parametreleri (Chai ve Pongsivasathit, 2010)

Kolon Mohr Coulomb	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_x=k_y$ (m/gün)	E (kPa)	$e_0$	$c_k$	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
$L_c=0.39$ m $D_c=0.15$ m	14.0	3.65E-04	6E+04	3.3	1.32	250.0	30

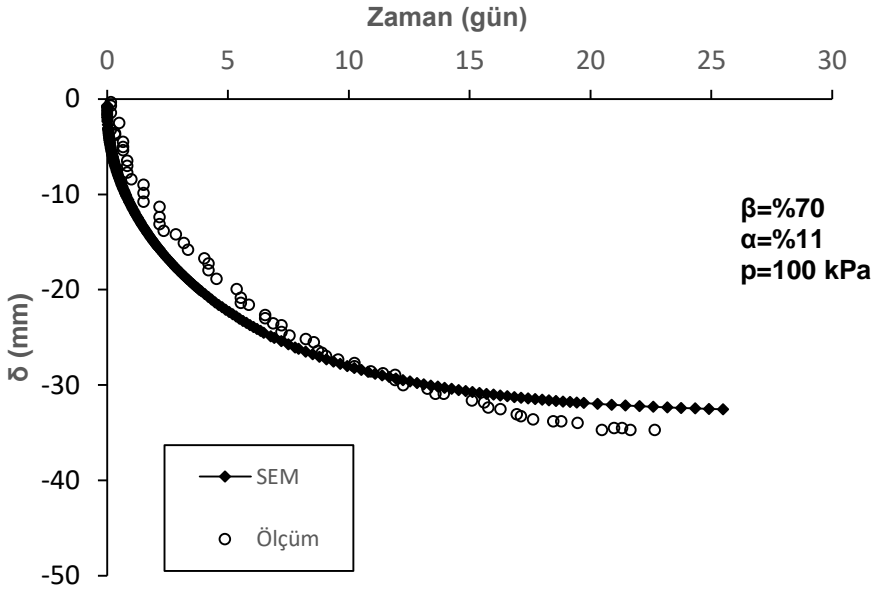


Şekil 5.2. Eksenel simetrik birim hücre modeli

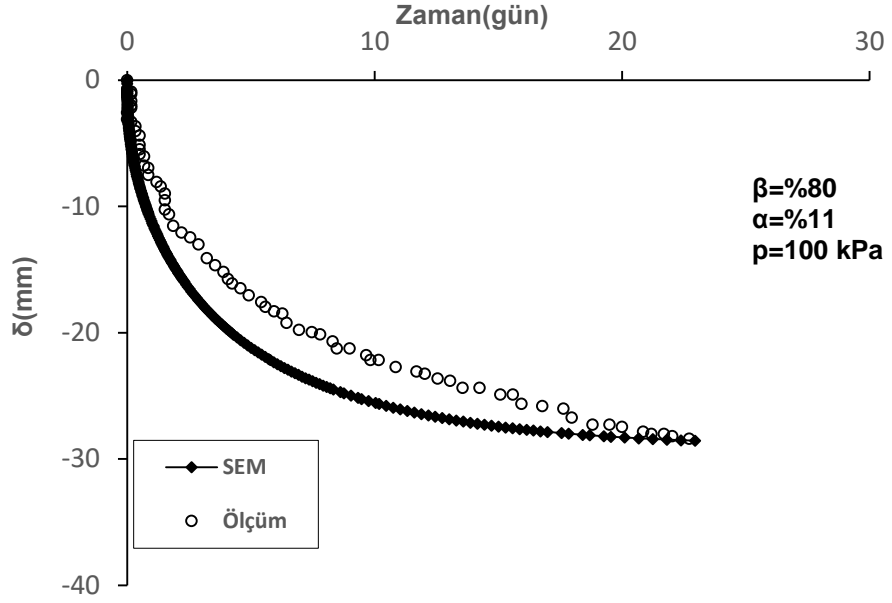
Konsolidasyon süreci sırasında, yüzen kolonlar zemine kısmen nüfuz ederler. Bu nispi penetrasyon alan değişim oranı ( $\alpha = A_c/A$ ,  $A_c$ : Kolon alanı,  $A$ : Birim hücre alanı), derinlik iyileştirme oranı ( $\beta = L_c/H$ ,  $L_c$ : kolon boyu,  $H$ : Kil tabakasının kalınlığı) ve yük yoğunluğu gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu etkileri incelemek için dört farklı laboratuvar deneyi yapılmış ve zamana bağlı oturma değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerle yapılan sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.



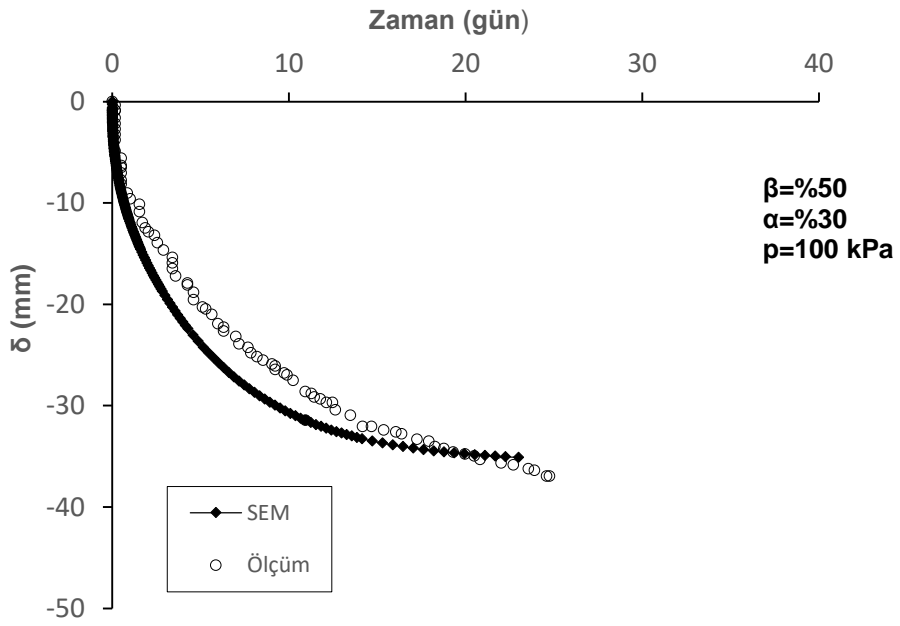
Şekil 5.3. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (1)



Şekil 5.4. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (2)



Şekil 5.5. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (3)



Şekil 5.6. Laboratuvar ölçümleri ve sayısal analizlerin karşılaştırılması (4)

Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar ile Chai ve Pongsivasathit (2010) tarafından ölçülen laboratuvar sonuçları Şekil 5.3- 5.6'da karşılaştırılmıştır. Şekiller incelendiğinde sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu da problem için oluşturduğumuz geometrik modelin ve sonuçların doğru olduğunu kanıtlamaktadır.

### 5.3. Parametrik Çalışma

Çalışmanın bu kısmında, alan değişim oranı, derinlik iyileştirme oranı, kolon rijitliği ve yük yoğunluğu gibi parametrelerin rijit kolonlu kompozit sistemin gerilme konsantrasyon oranı, oturma ve konsolidasyon derecesi üzerindeki etkilerini incelemek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Etkisi araştırılan parametre dışındaki tüm koşullar sabit tutulmuş ve uzun süreli stabilite analizleri yapılmıştır. Analizlerde yukarıda kalibrasyonunu yaptığımız problem geometrisi ve Çizelge 5.1'de verilen zemin ve kolon parametreleri kullanılmıştır. Etkisi araştırılan değişkenler de Çizelge 5.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 5. 3. Parametrik çalışmada kullanılan değişkenler

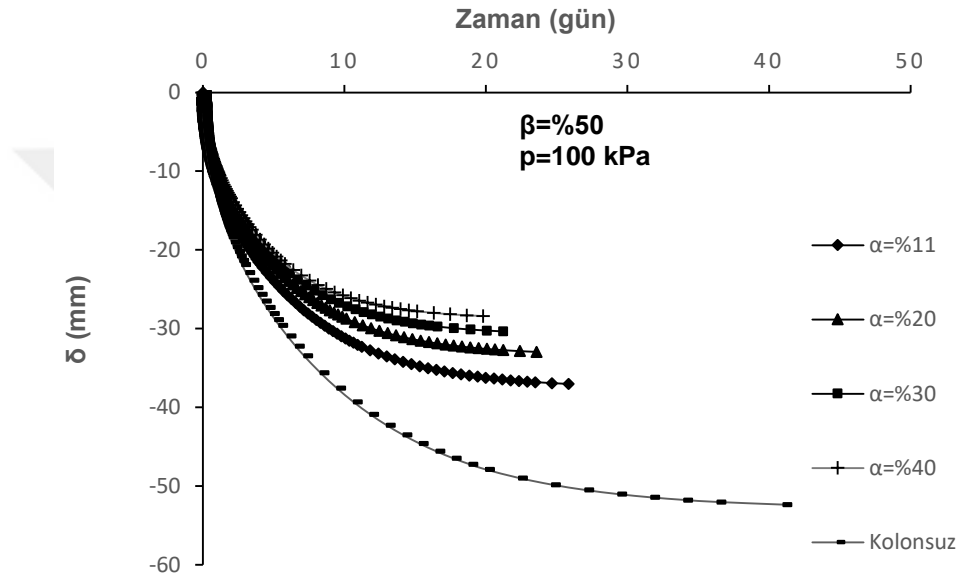
Parametre	Değişken Değeri
$\alpha$	0.11, 0.2, 0.3, 0.4
$\beta$	0.4, 0.5, 0.6, 0.8
$p$ (kPa)	100, 110, 160, 200
$E_c$ (MPa)	10,15,20,40,60,80,100

#### 5.3.1. Alan Değişim Oranının Etkisi

Kolon boyu, uygulanan yük ve birim hücre çapı sabit tutularak kolon çapındaki değişimin dolayısı ile de  $\alpha$  parametresinin oturma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma için Çizelge 5.4'teki farklı kolon çaplarına karşılık gelen alan değişim oranı değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 5.4. Farklı kolon çapları için hesaplanan alan değişim oranları ( $d_c=0.45m$ )

$d_c$ (m)	$A_c$	$A_c / A$	$\alpha$ (%)
0.15	0.17	0.11	11
0.20	0.03	0.20	20
0.25	0.05	0.30	30
0.29	0.06	0.40	40

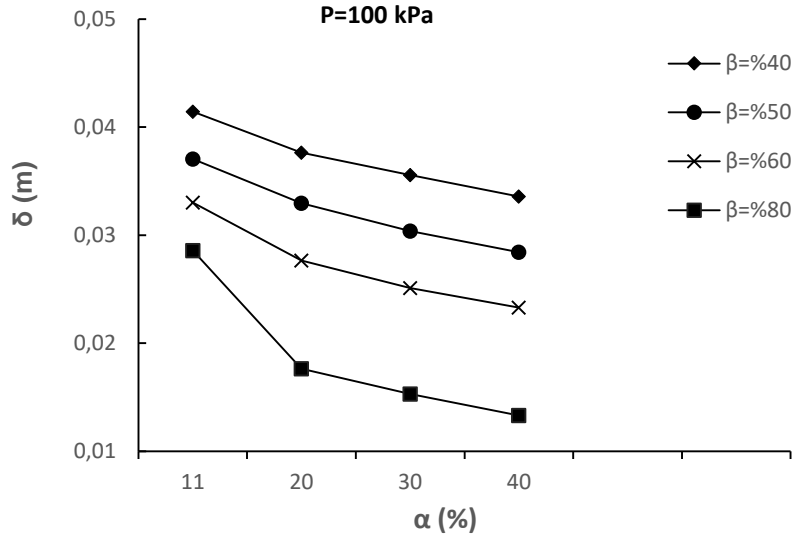


Şekil 5.7. Alan değişim oranının oturma davranışı üzerindeki etkisi

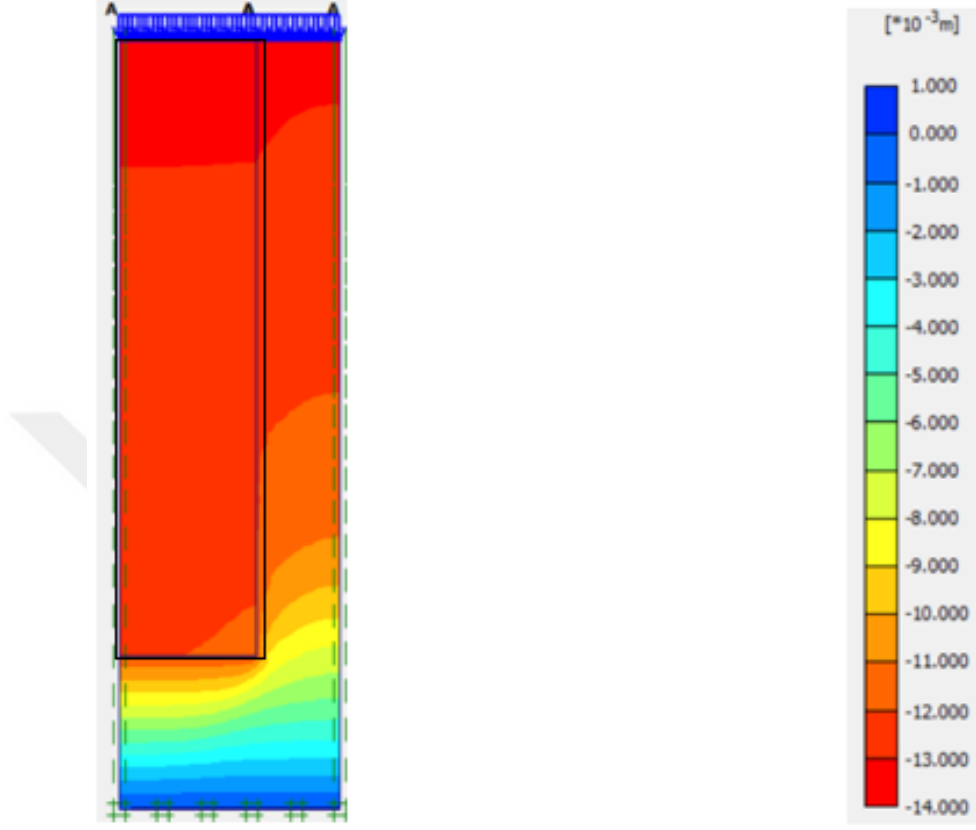
Şekil 5.7'de farklı  $\alpha$  (%) değerleri için hesaplanan oturma-zaman eğrisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi alan değişim oranı arttıkça oturmalar azalmakta ve konsolidasyon süresi kısalmaktadır.

Şekil 5.8'de alan değişim oranı ve derinlik geliştirme oranı arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 5.8'den görüldüğü üzere alan  $\alpha$ 'nın %40 ve  $\beta$ 'nin %80 olduğu durumda en küçük oturma değeri elde edilmiştir ve doğal zemin oturmasıyla karşılaştırıldığında oturma %25 oranında azalmıştır. Bu da kolon çapının ve boyunun beraber artırılması ile oturmalarda önemli derecede azalma meydana

geldiğini göstermektedir. Ayrıca  $\alpha=0.4$  ve  $\beta=0.8$  için elde edilen düşey deformasyonlar Şekil 5.9’da verilmiştir.

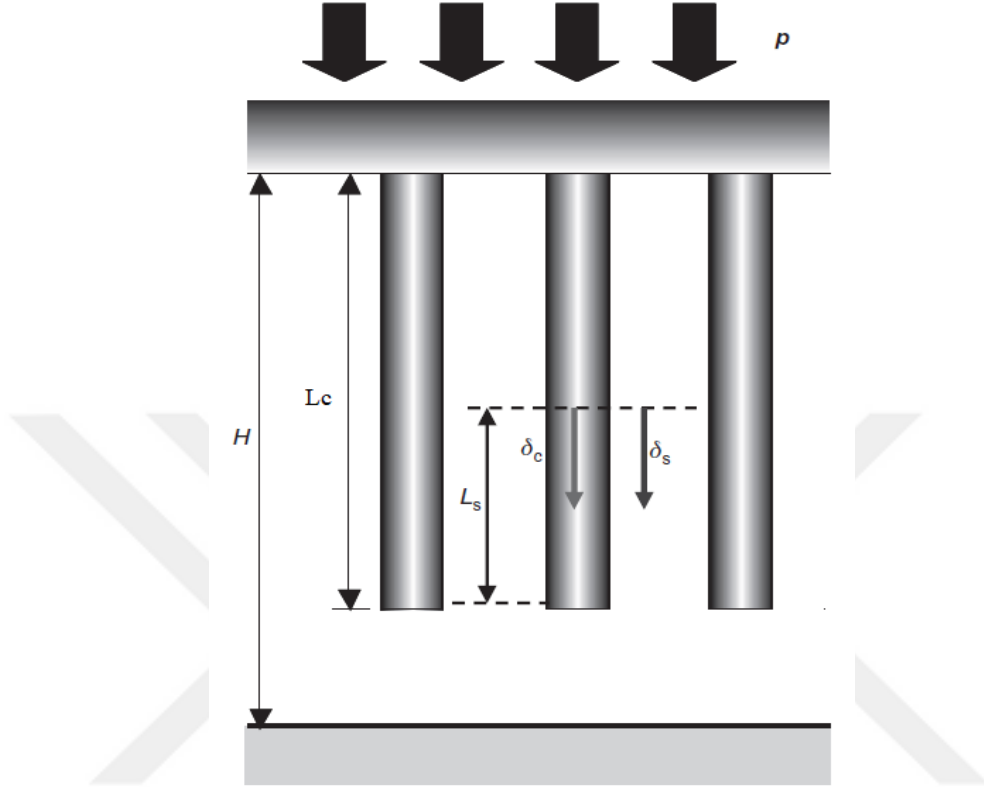


Şekil 5.8.  $\alpha$  ve  $\beta$  arasındaki ilişkinin oturmaya etkisi



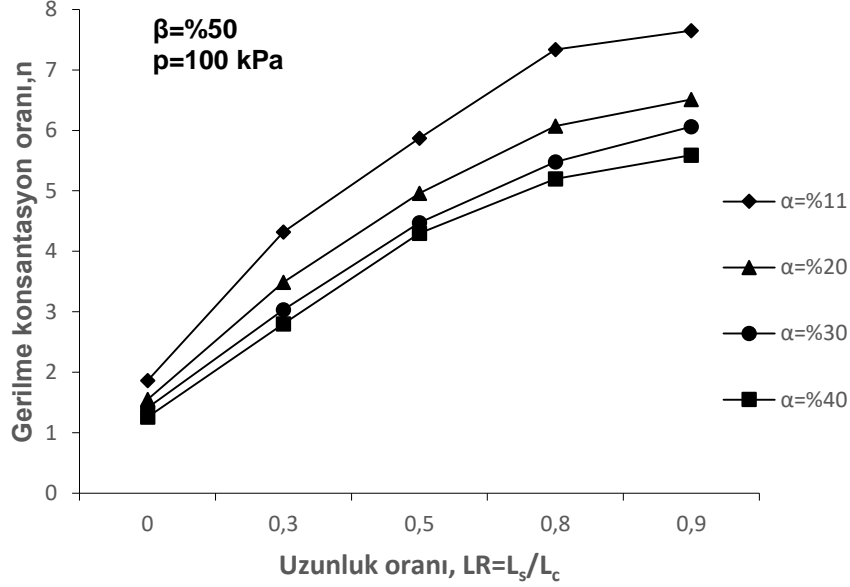
Şekil 5.9. Analiz deformasyon görüntüsü

Alan değişim oranının gerilme konsantrasyon üzerindeki etkisini araştırmak için kolon ucundan itibaren zemin yüzeyine doğru dört farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Ölçüm alınan noktanın uzunluğu ( $L_s$ ) kolon boyuna ( $L_c$ ) oranlanıp bir uzunluk oranı (LR) elde edilmiştir (Şekil 5.10).



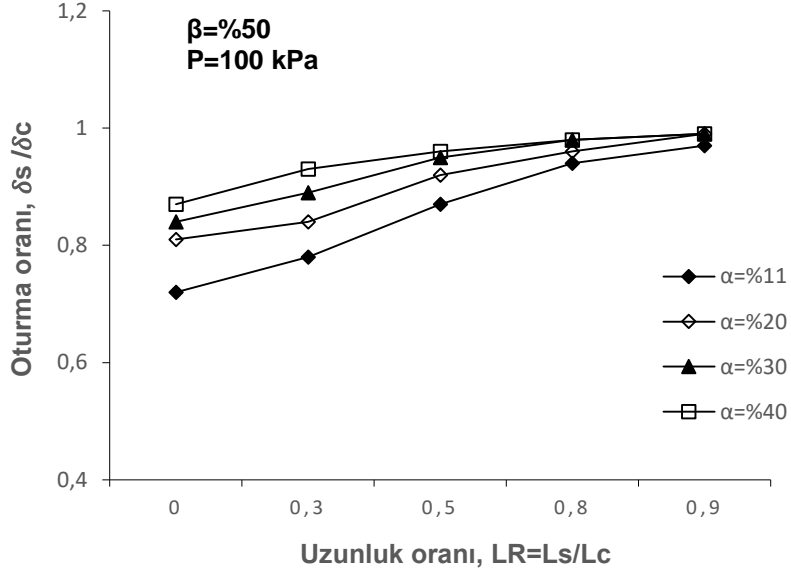
Şekil 5.10. Analizlerde ve grafiklerde kullanılan bazı tanımlar (Chai ve ark. 2010)

Farklı  $\alpha$  değerlerinde, gerilme konsantrasyon oranının derinlikle değişimi Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi yük uygulanan noktadan kolona gelen gerilme değeri en büyük değere sahiptir ve kolon boyunca gerilme oranı azalmıştır. Yine Şekil 5.11’e bakılacak olursa, alan değişim oranının artmasıyla birlikte gerilme konsantrasyon oranında azalma meydana gelmiştir. Bu etkinin, kolona uygulanan yükün sabit olması ve  $\alpha$  değerine bağlı kolon alanının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

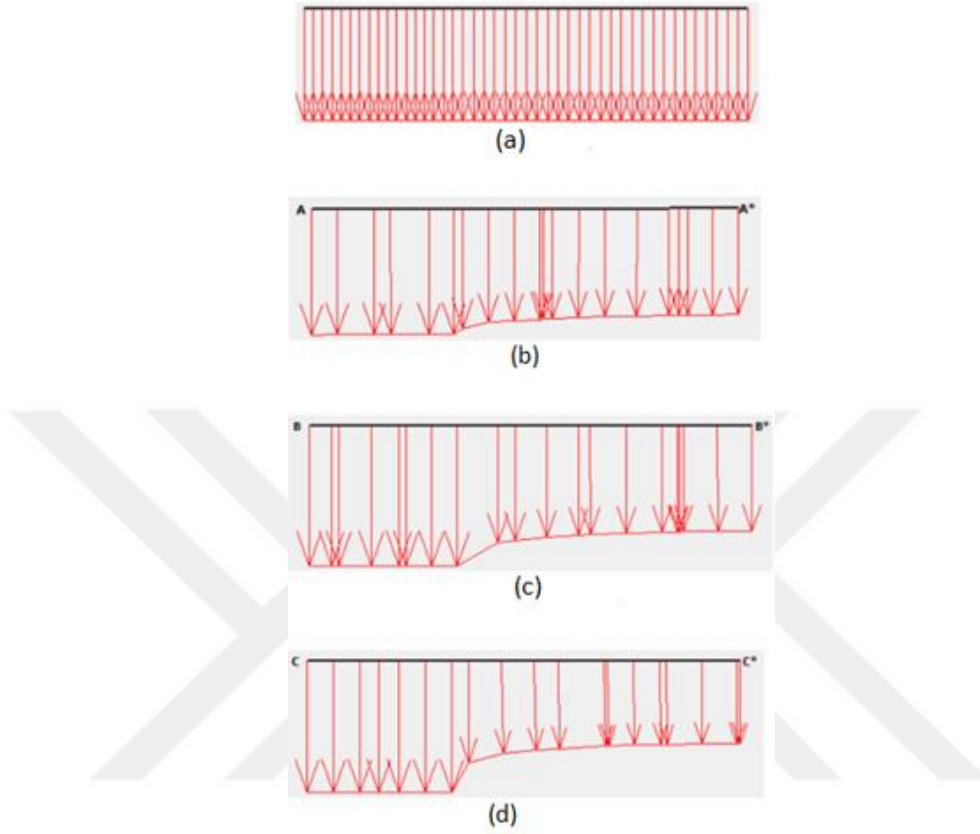


Şekil 5.11. Derinlik boyunca  $\alpha$  değerinin gerilme konsantrasyon oranına etkisi

Ayrıca ölçüm alınan herbir noktada zemin ve kolon deformasyonları ayrı ayrı hesaplanıp oturma oranının derinlikle değişimi de incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir. Şekillere bakılacak olursa, yükleme noktasında kolon ve zemin üniform oturmaktadır fakat derinlere doğru inildiğinde kolonda meydana gelen deformasyonlar daha fazladır ve kolon zemine kısmen nüfuz etmektedir.



Şekil 5.12. Derinlik boyunca  $\alpha$  değerinin oturma oranına etkisi



Şekil 5.13. Kolon ve zemin deformasyonunun derinlikle değişimi (a) zemin yüzeyinde, (b) zemin yüzeyinden 8 cm derinlikte, (c) 18 cm derinlikte, (d) 28 cm derinlikte

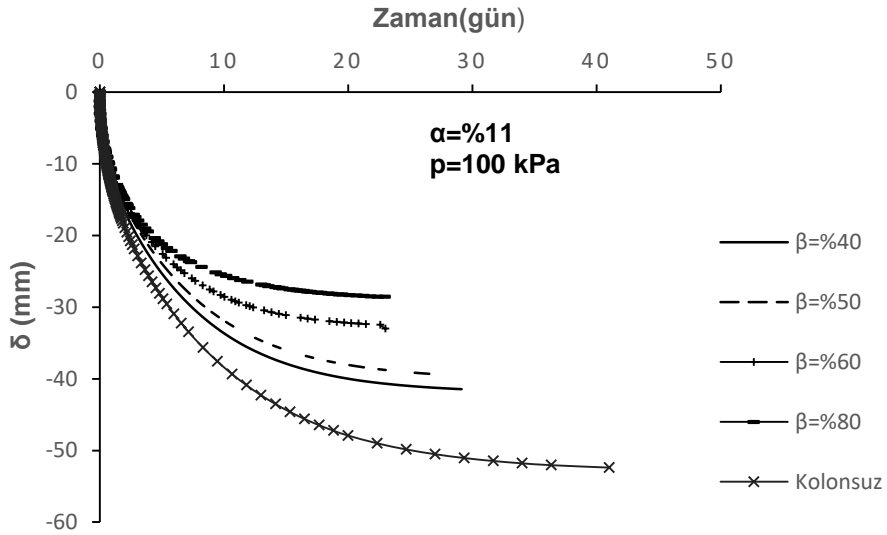
### 5.3.2. Derinlik İyileştirme Oranının Etkisi

Analizlerde kolon çapı sabit tutularak kolon boyunun dolayısı ile de derinlik iyileştirme oranının ( $\beta$ ) oturma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmada kullanılan, farklı kolon boylarına karşılık gelen derinlik iyileştirme oranları Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Farklı kolon boyları için hesaplanan derinlik iyileştirme oranları (de=0.45m, dc=0.15m)

$L_c$ (m)	$L_c / H$	$\beta$ (%)
0.31	0.4	40
0.39	0.5	50
0.47	0.6	60
0.62	0.8	80

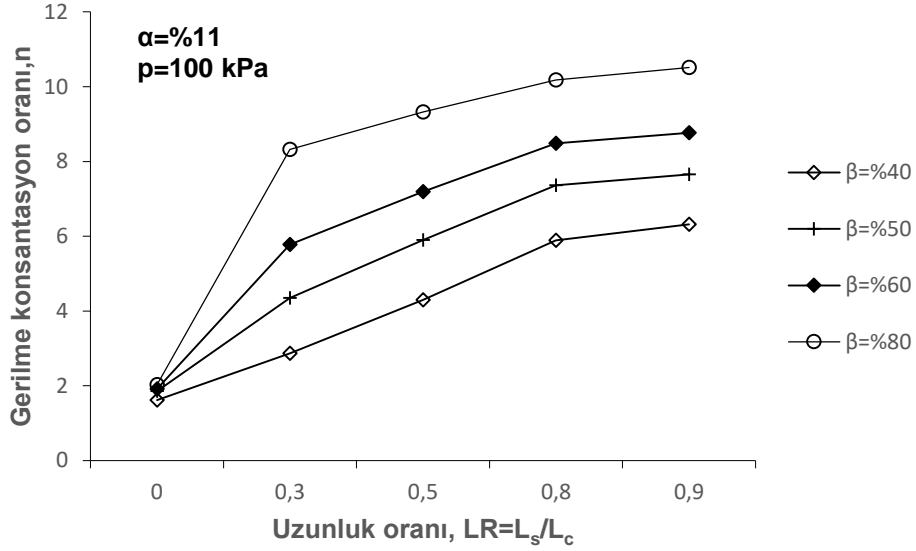
Farklı  $\beta$  değerleri için elde edilen oturma değerleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Kolon çapı ve sürşarj yükünün sabit olduğu durumda kolon uzunluğunun artması ile sistemin oturması önemli derecede azalmıştır.



Şekil 5.14. Derinlik iyileştirme oranının etkisi

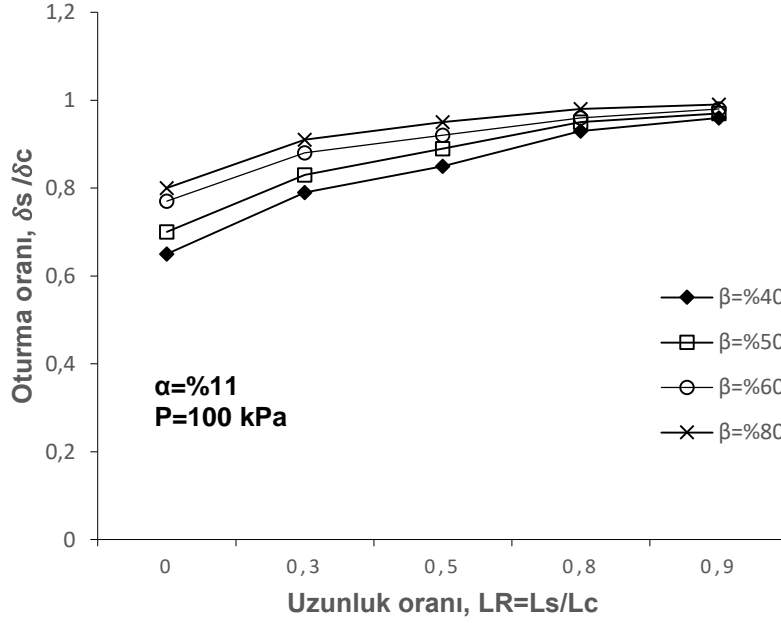
$\beta$  değerinin gerilme konsantrasyon oranına etkisini araştırmak için kolon derinliği boyunca ölçümler alınmış ve farklı derinlik iyileştirme oranlarında analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.15'te verilmiştir. Kolona gelen en büyük gerilme değeri yükün uygulandığı bölgededir. Kolon ucuna yaklaştıkça gerilme oranında azalma meydana gelmiştir. Derinlik iyileştirme oranının artması ile

$n$  değerinde artış meydana gelmiştir. Bu etkinin boy arttıkça kolon etrafındaki sürtünme direncinin artmasından ve kolonların sağlam tabakaya olan mesafesinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.15. Derinlik boyunca  $\beta$  değerinin gerilme konsantrasyon oranına etkisi

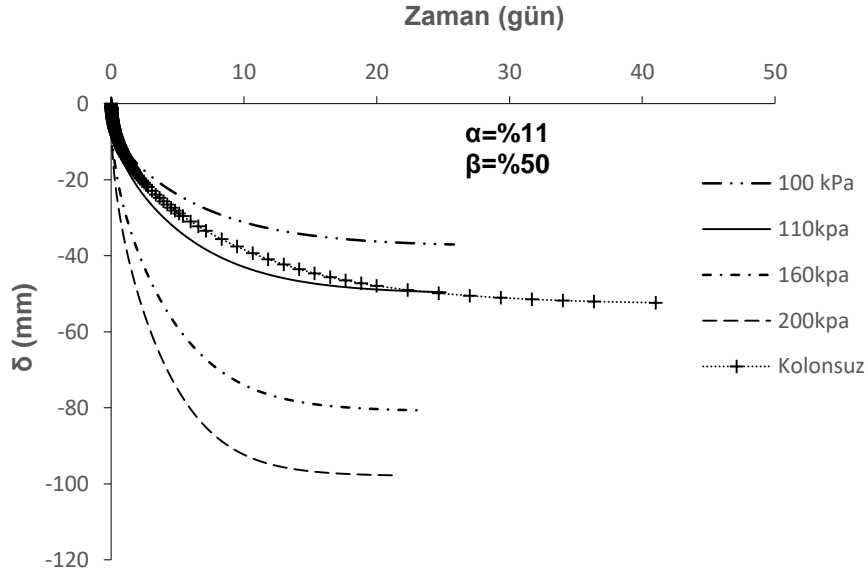
Farklı  $\beta$  değerleri için zemin ve kolon deformasyon oranının derinlikle değişimi de incelenmiştir.  $\beta$  arttığında kolon boyu artarak rijit tabana yaklaşmakta ve kolon zemine az miktarda nüfuz etmektedir. Bu nedenle kolon ve zemin arasındaki oturma farkı oldukça azdır. Özetle  $\beta$  değerlerinin artmasıyla birlikte oturma oranı da artmıştır yani oturmalar üniformlaşmıştır (Şekil 5.16).



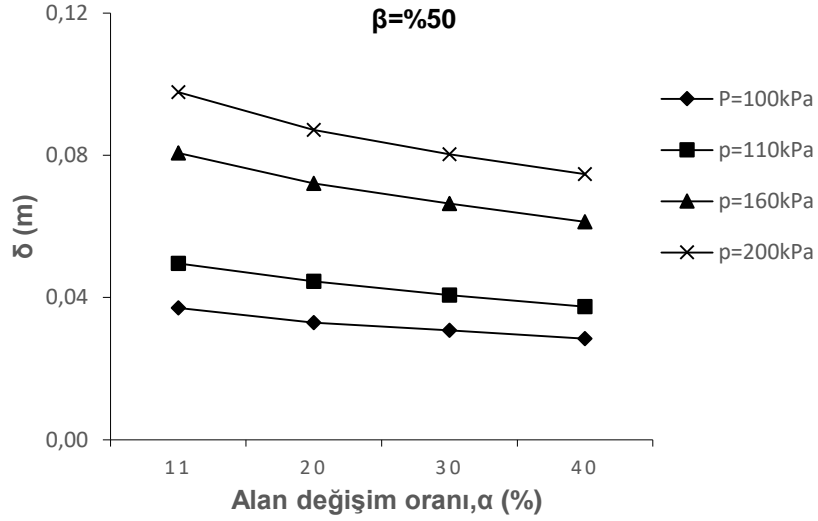
Şekil 5.16. Derinlik boyunca  $\beta$  değerinin oturma oranına etkisi

### 5.3.3.Yük Yoğunluğunun Etkisi

Uygulanan sürşarj yükün kompozit sistemin oturmasına etkisini araştırmak için  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri sabit tutularak yük değeri değiştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 5.17’de verilmiştir. Kolon çap ve boyunun sabit olduğu durumda sürşarj yükünün artması ile oturmalar artmıştır. Yük yoğunluğunun artması ile kolon zemine daha çok oturmaktadır.

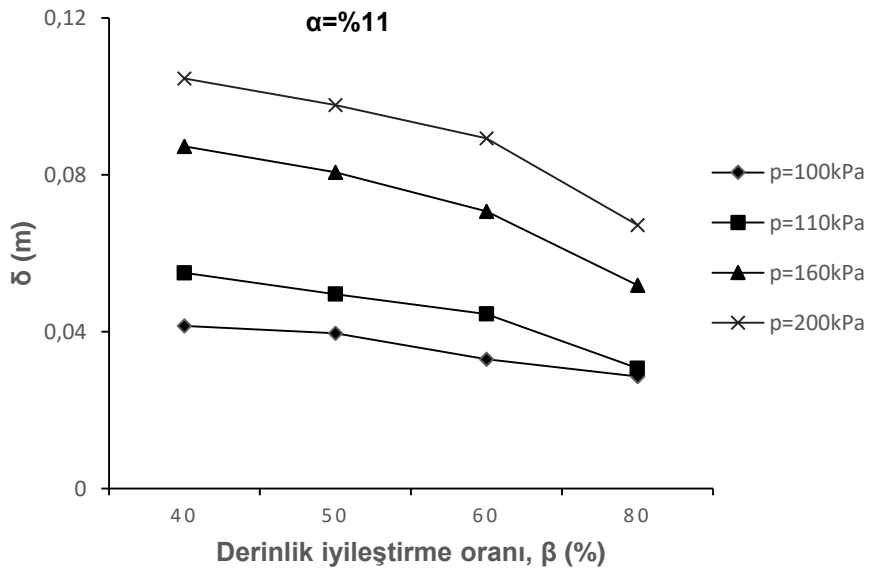


Şekil 5.17. Sürşarj yükünün etkisi



Şekil 5.18. Sürşarj yükü ve alan değişim oranı arasındaki ilişki

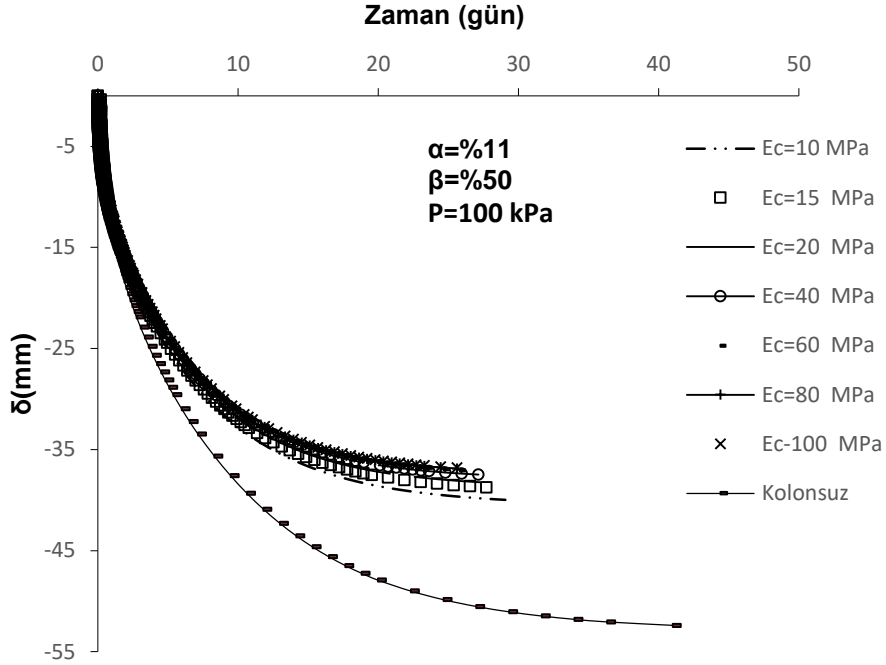
Şekil 5.18’de görüldüğü gibi derinlik iyileştirme oranı sabit tutulmuş, her bir yük kademesi için alan değişim oranı %11, %20, %30, %40 olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Yük değeri arttıkça, küçük alan değişim oranında daha çok oturma meydana gelmiştir. Şekil 5.19’a bakacak olursak bu sefer alan değişim oranı sabit tutulmuş ve derinlik geliştirme oranı %40, %50, %60, %80 için farklı yük değerleri ile analizler yapılmıştır. Sürşarj yükünün büyük ve derinlik iyileştirme oranının küçük değerlerinde kaydedilen oturma daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.19. Yük ve derinlik iyileştirme oranı arasındaki ilişki

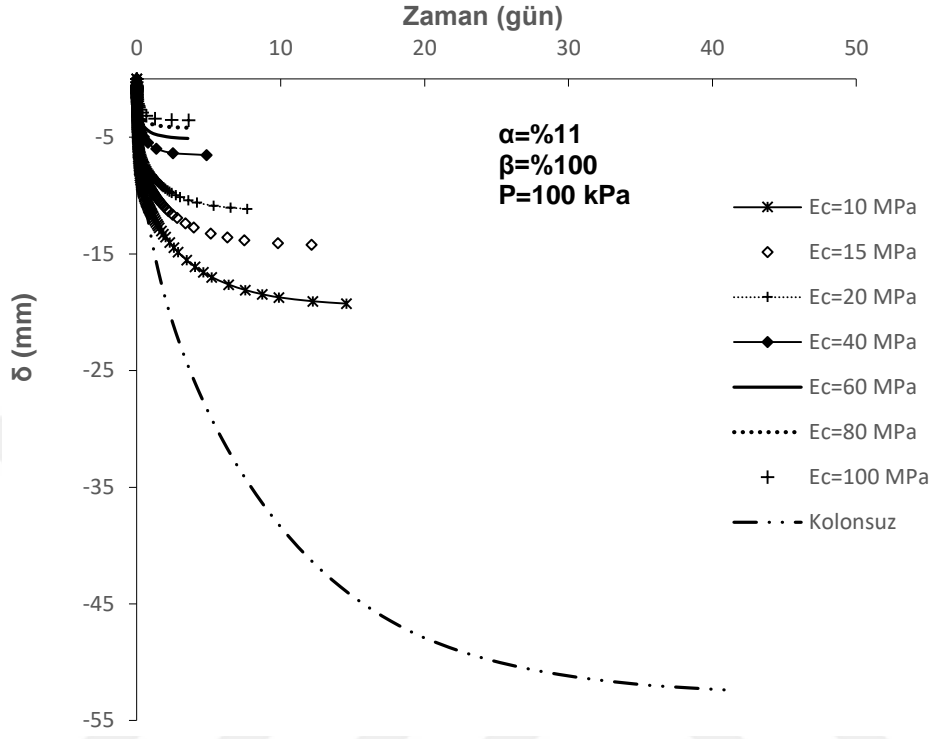
#### 5.5.4. Rijitlik Etkisi

Kolonlar kendisini çevreleyen zeminden daha rijittir. Fakat kolon rijitliğini etrafındaki zeminin yanıl desteği de etkilemektedir. Bu çalışmada, zemin elastisite modülü  $E_s$  sabit tutulup,  $E_c=10-100$  MPa arasında değiştirilerek kolon rijitlik etkisi incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.20’de verilmiştir. Kolon sağlam tabakaya oturmadığı durumda, rijitliğinin artmasıyla oturmalarda önemli bir azalma olmamıştır.



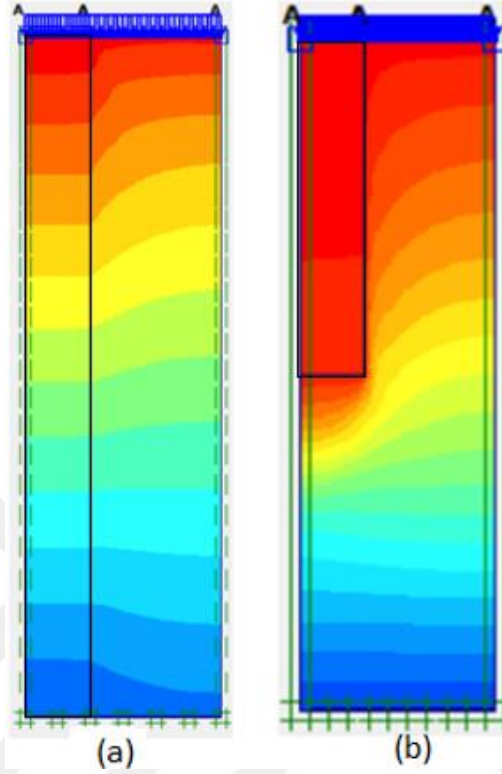
Şekil 5.20. Yüzen kolonlarda rijitliğin etkisi

Kolonlar sağlam tabakaya oturduğu durumda ( $\beta=1$ ) rijitliğin kompozit sisteme olan katkısı araştırılmıştır. Farklı rijitliklerde yapılan parametrik çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.21’de verilmiştir. Kolon boy, çap ve sürşarj yükünün sabit olduğu durumda rijitliğin artmasıyla oturmalar azalmış ve konsolidasyon süresi kısalmıştır. Şekilden de anlaşıldığı gibi 60 MPa üzerindeki değerlerde rijitliğin oturmayı ve konsolidasyon süresini etkilememektedir.



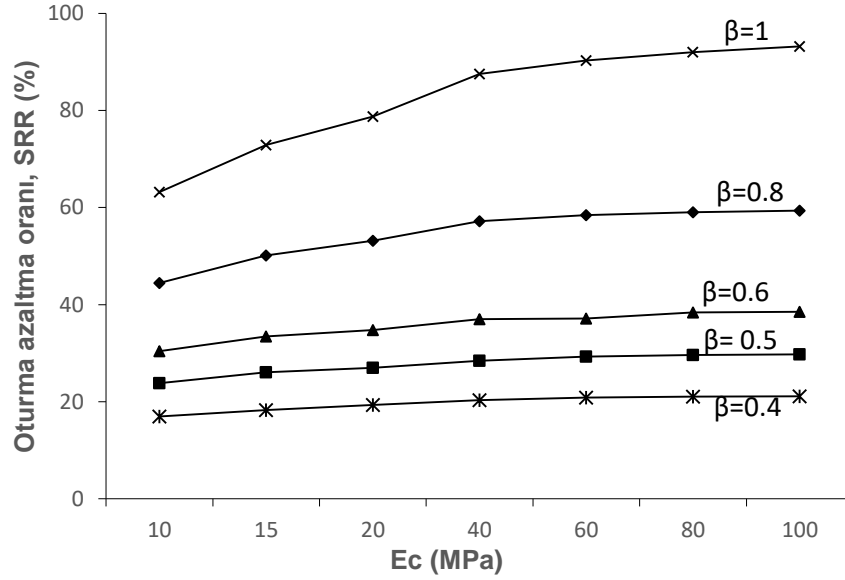
Şekil 5.21. Sağlam tabakaya oturmuş kolonlarda rijitliğin etkisi

Kolonların sağlam tabakaya göre konumlarının deformasyon görüntüsü Şekil 5.22’de verilmiştir. Rijitlik 60 MPa iken kolon sağlam tabakaya oturduğunda kaydedilen düşey deformasyon değeri 0.5 cm iken (Şekil 5.22a), yüzen kolonlarda ( $\beta$  %50) elde edilen oturma değeri 3.7 cm’dir (Şekil 5.22b).



Şekil 5.22. Kolonun sağlam tabakaya göre konumun deformasyon görüntüsü

Kolon rijitliği ve sağlam tabakaya olan mesafesi dikkate alınarak yapılan analizler neticesinde oturmalarda gözlemlenen iyileştirmeler Şekil 5.23'te verilmiştir. Doğal zeminin 100 kPa'lık yük altındaki oturması 52.38mm'dir. Farklı rijitliklerde elde edilen oturma değerleri doğal zeminin oturmasına bölünerek iyileştirme oranı hesaplanmıştır ( $\delta_c / \delta_s$ ). Daha sonra bu oran birden çıkarılarak iyileştirme değeri elde edilmiştir ( $1 - \delta_c / \delta_s$ ). Sağlam tabakaya oturan kolonlarda rijitliğin 10, 60 ve 100 MPa değerlerinde oturmalarda sırasıyla %63.21, %90.28, %93.22 oranında iyileşme sağlanmıştır. Sonuç olarak, kolonlar sağlam tabakaya yaklaştıkça rijitlik etkisinin daha etkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.23. Rijitlik ve Oturma azaltma oranı arasındaki ilişki

Bu bölümde yapılan parametrik çalışmalar neticesinde rijit kolon uygulamaları için kolon boyu, çapı, rijitliği ve sürşaj yükünün etkisi açıkça görülmüştür. Dolayısı ile uygulama alanı zemin koşulları ve proje gereksinimleri göz önünde bulundurularak gerekli rijitlikte, çapta ve uzunlukta kolon inşasına karar verilmelidir. Ayrıca yapılan çalışmalar neticesinde zemine kısmen nüfuz eden kolonlarda, yükün büyük bir kısmı kolonlar tarafından taşınmakta bir kısmı da zemin tarafından taşınmaktadır. Ayrıca derinlik boyunca meydana gelen oturmalar üniform değildir. Kolonlar sağlam tabakaya yaklaştıkça zemine aktarılan gerilme azalmakta ve derinlikle oturmalar üniformlaşmaktadır.



## 6. ÜÇ BOYUTLU (3D) SAYISAL ANALİZLER

### 6.1. Giriş

Bu bölümde Japonya’da bir yol yapımı sırasında arazide dolgu altına inşa edilmiş derin karışım kolonlarının sayısal yöntemlerle (PLAXIS 3D) analizi yapılarak arazi ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğruluğu teyit edildikten sonra aynı zemin koşulları ve geometrik model kullanılarak birtakım parametrik araştırma yapılmıştır.

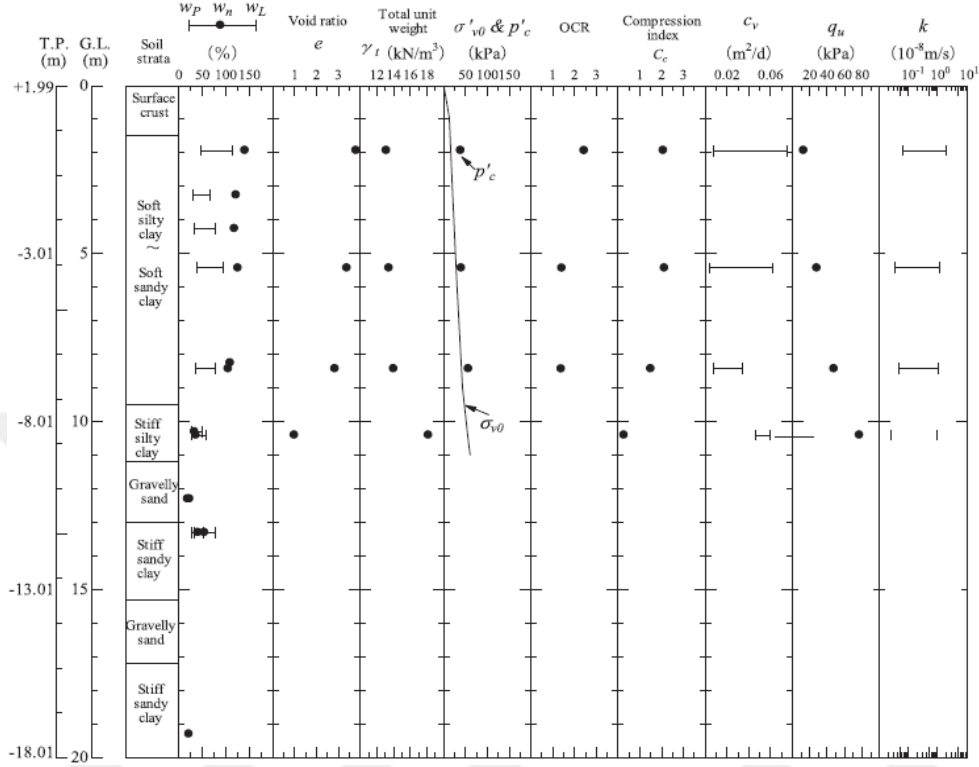
### 6.2. Proje ve Arazi Bilgileri

Bu bölümde, Igaya Y. ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada yer alan proje ve uygulama alanı zemin özellikleri kısaca özetlenmiştir. Şekil 6.1’de gösterildiği gibi Japonya’nın Ariake Denizinin bir kesimi etrafında otoyol planlanmış ve 2010 yılında Saga Vilayeti’ne ait bölüm için inşaat başlatılmıştır. Bu yol, çoğunlukla 5.0-8.0 m’lik yüksekliğine sahip dolgularla tasarlanmıştır. Yol boyunca, neredeyse zemin yüzeyinden 10-30 m arasındaki derinliklere kadar yumuşak bir Ariake kil birikintisi olduğu rapor edilmiştir. Ariake kili, yüksek sıkıştırılabilirlik ve düşük mukavemete sahiptir (Hino ve ark. 2012). Proje tasarım gerekleri: (1) dolgu ve yol yüzeyinin residüel oturması inşaatın tamamlanmasından sonra 0,3 m’den az olmalıdır; (2) yol boyunca düşey ve yatay yer değiştirmeler  $\pm 50$  mm’den az olmalıdır ve (3) yol inşaatının yeraltı suyu üzerinde hiçbir etkisi olmamalıdır. Bu gereklilikleri yerine getirmek için, zemin yüzen zemin-çimento kolonlarıyla iyileştirilmiştir. Önerilen yöntemin performansını doğrulamak için bir deneme dolgusu inşa edilmiştir. Deneme dolgusunun yeri, Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Çalışma dolgusunun yeri (Chai ve ark. 2015)

Zemin profili ve deneme sahasındaki zemin tabakalarının bazı mühendislik özellikleri Şekil 6.2'de özetlenmiştir. Bu bölgede, 1,5 m kalınlığındaki yüzey tabakasının altında yaklaşık 8 m kalınlığında yumuşak siltli kil ve / veya kumlu bir kil tabakası (Ariake kil tabakası) vardır. Aşağıda, yaklaşık 1.7 m kalınlığında nispeten sert siltli bir kil tabakası, çakıllı kum ve siltli-kumlu kil tabakaları mevcuttur. Yeraltı suyu seviyesinin sondaj sırasında zemin yüzeyinin yaklaşık 0,5 m altında olduğu tespit edilmiştir. Saga Ovası'nda yeraltı suyu seviyesi normalde yaklaşık zemin yüzeyinin 0,5–1,5 m altındadır. Yumuşak Ariake kili başlangıçta aşırı konsolide, doğal su içeriği ( $w_n$ ) genel olarak %100'den fazla ve karşılık gelen likit limit değerinden ( $w_L$ ) daha büyüktür. Zemin tabakalarının sıkışma indeksi ( $C_c$ ) yaklaşık 2.0'dir. Şekil 6.2'de kullanılan diğer semboller şunlardır: plastik limit,  $w_p$ ; konsolidasyon katsayısı,  $c_v$ ; hidrolik iletkenlik,  $k$ , düşey efektif gerilme,  $P'_c$ ; aşırı konsolidasyon oranı, OCR ve serbest basınç dayanımı,  $q_u$ .

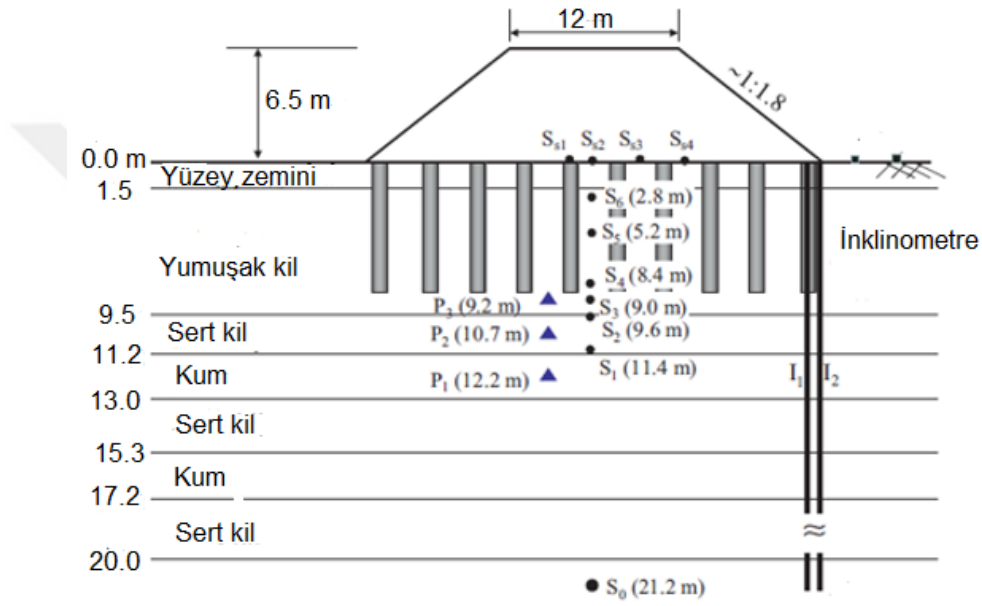


Şekil 6.2. Deney sahasına ait zemin profili ve bazı mühendislik özellikleri

Dolgu inşasından önce zemin yüzün derin karışım kolonları ile iyileştirilmiştir. Kolonlar 1.2 m çapında, 8.5 m uzunluğunda ve kolonlar arası mesafe (s) 1.9m olacak şekilde kare yerleşim düzeninde imal edilmişlerdir. Kolon imalatında, su/ çimento oranı %150 olan 150 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanılmıştır. Kolonların tasarım serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) 600 kpa olmasına rağmen iyileştirmeden bir ay sonra yapılan laboratuvar deneylerinden  $q_u$  1000 kPa'dan fazla ölçülmüştür.

Deneme dolgusunun yüksekliği 6.5 m'dir. Dolgunun temel boyutları (uzunluk x genişlik) 55mx 33.6m ve dolgu plan boyutları 33.4m x 12m'dir. Dolgu merkezinin altında zemin yüzeyinde ön görülen oturma yaklaşık 0.5 m'dir. Dolgu malzemesi olarak ayrıştırılmış granit kullanılmış ve doldurma oranı yaklaşık 0.06 m/gündür. Dolgu malzemesinin ortalama birim ağırlığı 19 kN/m<sup>3</sup>'tür. Oturma ( $S_{s1}$ - $S_{s5}$ ,

$S_0$  - $S_6$ ), yanal yer değiştirmeler ve boşluk suyu basınçlarının ( $P_1$ ,  $P_2$  ve  $P_3$ ) ölçülmesi için bazı önemli ölçüm cihaz noktalarının ve dolgunun kesidi Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Dolgudan dolayı zemin yüzeyine uygulanan yatay gerilmeyi azaltmaya yönelik, dolgu tabanına yaklaşık 0.5m'lik düşey aralıklarla iki kat elmas şeklindeki çelik tel örgü yerleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Dolgu kesiti ve ölçüm noktaları

### 6.3. Plaxis 3D Programı ile Yapılan Analizler

Arazi verileri kullanılarak derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin, Plaxis 3D programı ile birim hücre kullanılarak ve tüm sistemden bir dilim alınarak modellenip analiz edilmiştir.

#### 6.3.1. Kurulan Model ve Kullanılan Parametreler

Düzlemsel gerilme koşullarında tam ölçekli bir dolgunun sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Modellenen alanın toplam uzunluğu 80 m, genişliği derin karışım kolonları arasındaki mesafe (1.9m) kadar ve düşey kalınlığı zemin



parametreleri Çizelge 6.1 Çizelge 6.2’de verilmiştir. Tabloda verilen  $K$  değeri 0.1 $\lambda$  olarak varsayılmıştır ve  $c_k$  değeri de 0.5\* $e_0$  olarak hesaplanmıştır (Chai ve ark., 2015). Su seviyesinin zemin yüzeyinden -1m’de olduğu varsayılmıştır. Yanal zemin basınç katsayısı  $K_0$ , zemin yüzeyinden itibaren 4m’ye kadar (OCR>1.5) 0.6 ve geri kalan tüm zemin tabakaları için 0.5 alınmıştır.

Derin karışım kolonlarının gerilme-deformasyon ilişkisi linear elastik model ile temsil edilmiştir. Kolon için kullanılan parametre değerleri:  $E = 100$  MPa;  $\nu = 0.15$ ’tir. Kolonların hidrolik iletkenliği denk geldiği zemin tabakasının değeri ile aynı alınmıştır. Analizlerde, dolgu malzemesinin kalınlığını ve karşılık gelen yükü doğru bir şekilde simüle etmek için dolgu yüksekliği 6m olarak modellenmiştir. Arazi koşullarındaki yükleme durumu göz önüne alınarak dolgu 0.5m kalınlıkta on iki aşamada ve su basınçlarının sönümlenmesi için gerekli bekleme süresi dikkate alınarak, drenajlı koşullarda stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1. Arazi koşulları

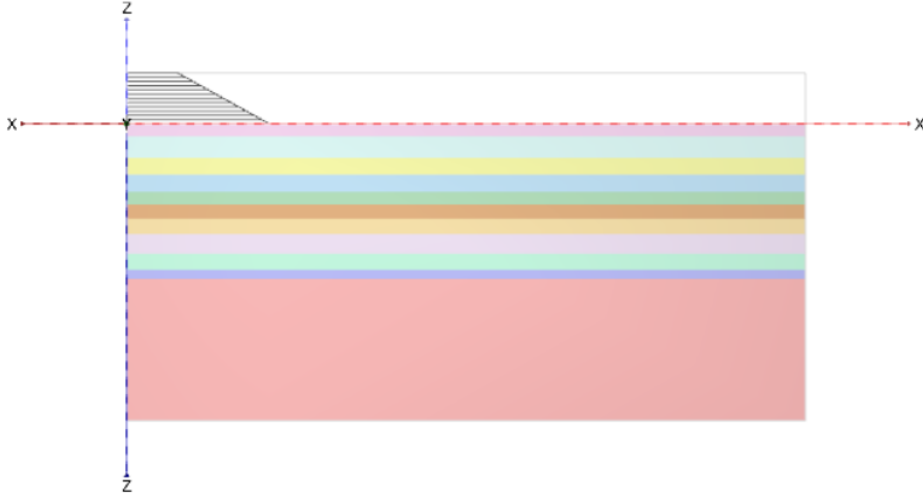
Derinlik (m)	Zemin tabakası	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_v$ (m/gün)	$k_y$ (m/gün)	$e_0$	OCR
0.0-1.5	Yüzey	16.0	6E-4	9.1 E-4	1.5	2.0
1.5-4.0	Yumuşak Kil-1	13.4	4.4 E-4	6.6 E-4	3.1	2.0
4.0-6.0	Yumuşak Kil-2	14.0	5.3 E-4	7.9 E-4	2.81	1.5
6.0-8.0	Yumuşak Kil-3	14.1	5.6 E-4	8.4 E-4	2.58	1.5
8.0-9.5	Yumuşak Kil-4	14.3	4.6 E-4	6.9 E-4	2.49	1.5
9.5-11.2	Sert Kil	18.0	25 E-4	25 E-4	1.1	1.5
11.2-13	Kum	18.0	250 E-4	250 E-4	0.8	-
13-15.3	Sert Kil	18.0	25 E-4	25 E-4	0.8	1.5
15.3-17.2	Kum	19.0	250 E-4	250 E-4	0.8	-
17.2-18.3	Sert Kil	19.0	25 E-4	25 E-4	0.7	1.5
18.3-35.0	Kum	19.0	250 E-4	250 E-4	0.7	-
Dolgu Malzemesi		19.0	1 E-4	1 E-4	0.7	-

Çizelge 6.2. Model parametreleri

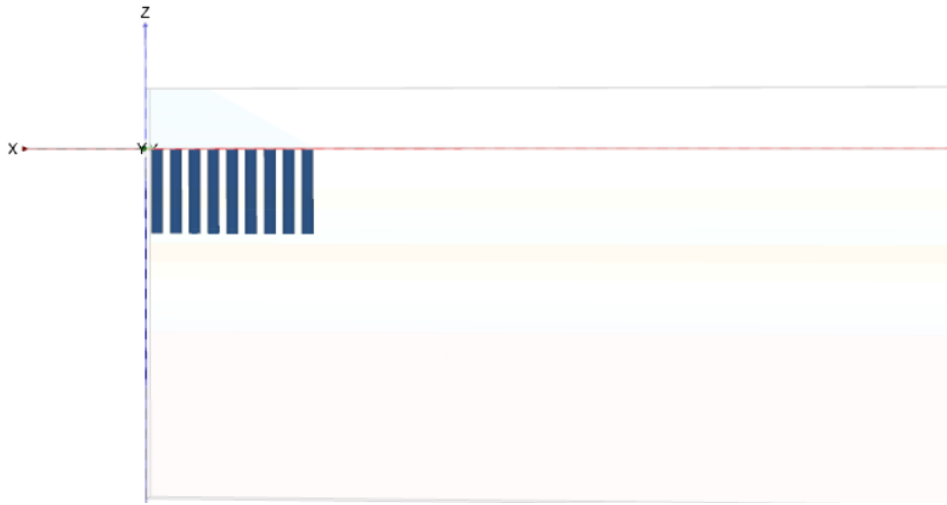
Derinlik (m)	Zemin tabakası	$\lambda$	$\kappa$	c (kPa)	$\phi^\circ$	$\nu$	M	E (MPa)
0.0-1.5	Yüzey	0.25	0.025	-		0.15	1.2	-
1.5-4.0	Yumuşak Kil-1	0.87	0.087	-		0.15	1.2	-
4.0-6.0	Yumuşak Kil-2	0.87	0.087	-		0.15	1.2	-
6.0-8.0	Yumuşak Kil-3	0.58	0.058	-		0.15	1.2	-
8.0-9.5	Yumuşak Kil-4	0.43	0.043	-		0.15	1.2	-
9.5-11.2	Sert Kil	0.15	0.015	-		0.15	1.4	-
11.2-13	Kum	-		20	35	0.1	-	25
13-15.3	Sert Kil	0.12	0.012	-		0.15	1.4	-
15.3-17.2	Kum	-		20	35	0.1	-	25
17.2-18.3	Sert Kil	0.12	0.012	-		0.15	1.4	-
18.3-35.0	Kum	-	-	20	35	0.1	-	20
Dolgu Malzemesi		-	-	20	35	0.3	-	1

### 6.3.2. Tam Ölçekli 3D Analizi

Tez çalışmasının bu kısmında, sayısal analizlerde kullanılacak model geometrisinin ve kabul edilen zemin modellerinin uygunluğu Japonya, Saga'da yapılan çalışmaya ait ölçüm değerleri referans alınarak doğrulanmıştır. Daha sonra kalibrasyonu yapılan geometrik model üzerinden kolon rijitlik etkisi araştırılmıştır. Modele ait görüntüler Şekil 6.5-6.10 arasında gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Zemin tabakalarının modellenmesi



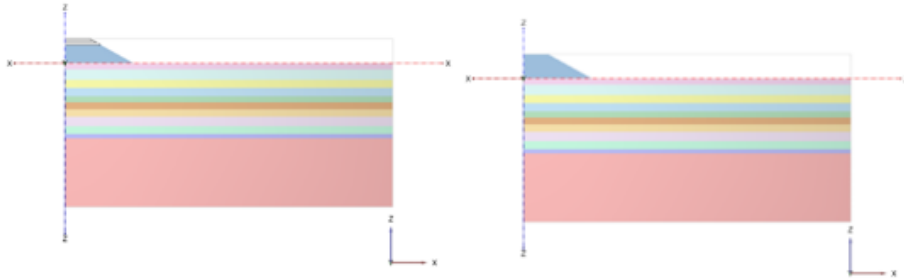
Şekil 6.6. Derin karışım kolon imalatı



Şekil 6.7. Kolonların üstten görünüşü



Şekil 6.8. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin

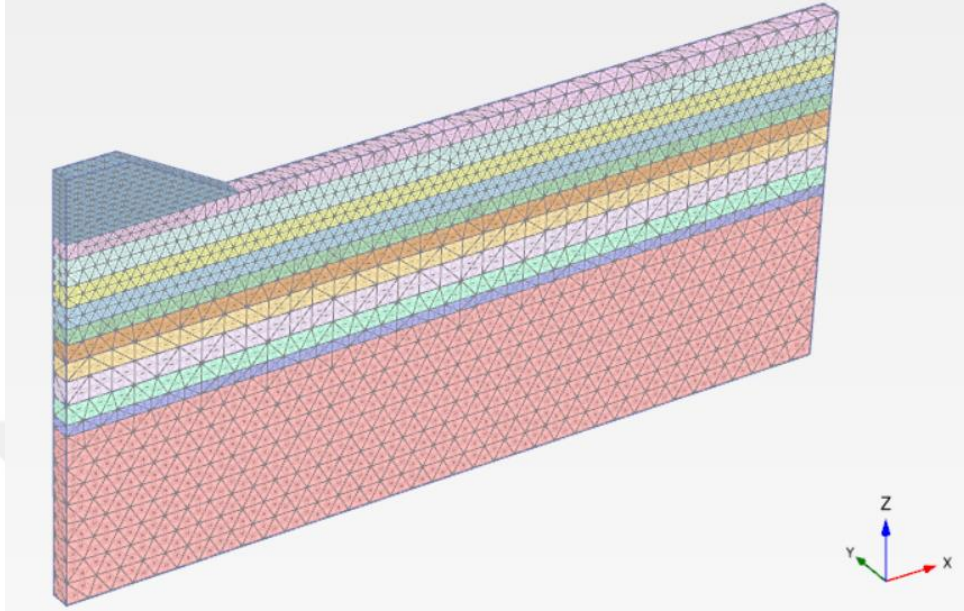


Şekil 6.9. Dolgu inşası



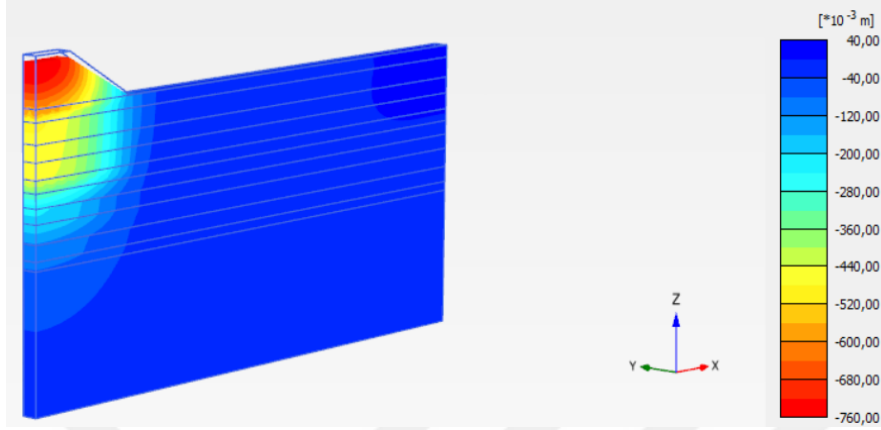
Şekil 6.10. Kolonların dolgu altındaki görüntüsü

Zemin, yapısal elemanlar ve dolgu koşulları sağlandıktan sonra, model çok iyi sıklıkta sonlu elemanlar ağına ayrılmıştır (Şekil 6.11). Toplam düğüm sayısı yaklaşık 27079 ve toplam eleman sayısı 16161'dir.

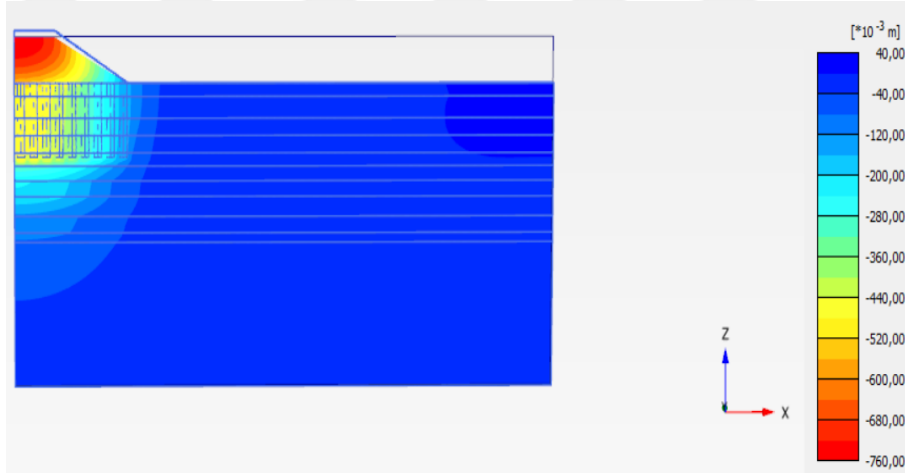


Şekil 6.11. Derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin üzerindeki dolgunun geometrik modeli ve sonlu elemanlar ağı

Arazi koşullarındaki yükleme durumu göz önüne alınarak dolgu 0.5m kalınlıkta on iki aşamada ve su basınçlarının sönümlenmesi için gerekli bekleme süresi dikkate alınarak, drenajlı koşullarda konsolidasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde meydana gelen deformaasyonlar Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te verilmiştir.

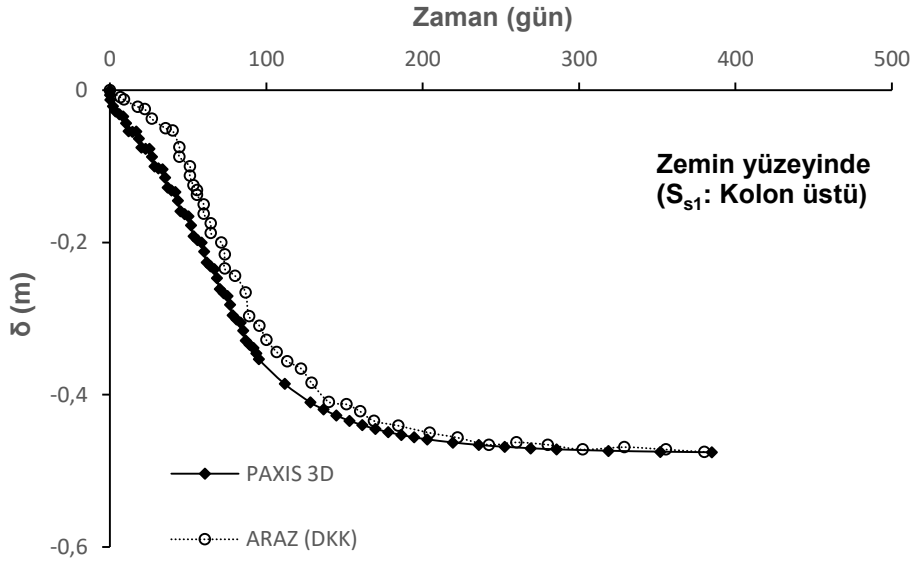


Şekil 6.12. Toplam deformasyonlar

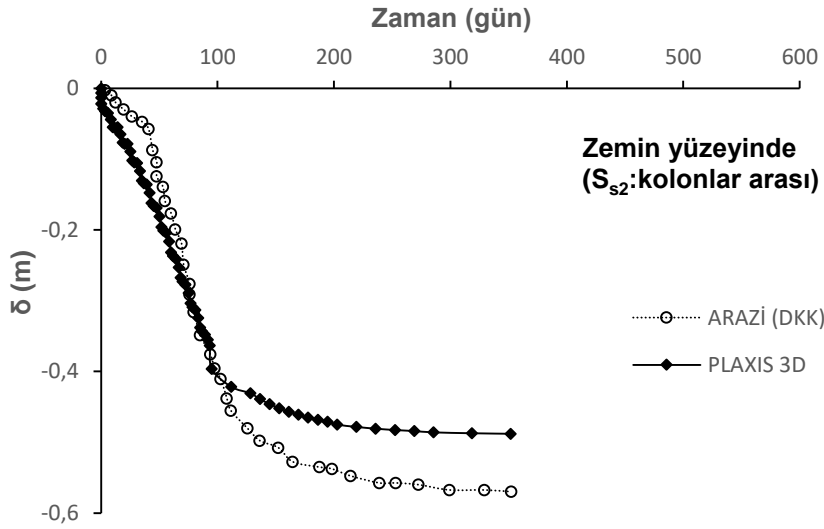


Şekil 6.13. Düşey kesit deformasyon görüntüsü

3D sayısal analizler sonucunda elde edilen oturma değerleri ile  $S_{s1}$ ,  $S_{s2}$  ve  $S_4$  (bakınız Şekil 6.3) arazi ölçüm noktalarındaki oturmalar karşılaştırılmıştır (Şekil 6.13- 6.15).



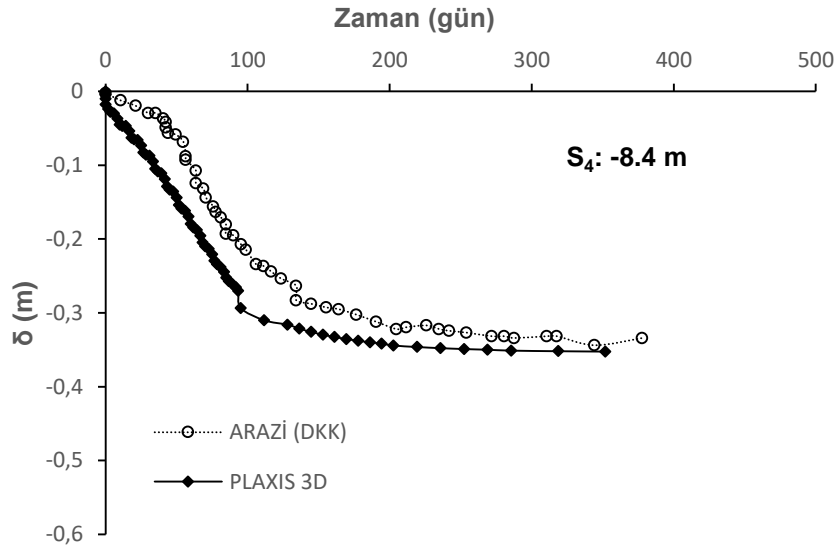
Şekil 6.14. Kolon üstündeki ölçüm noktasının oturma -zaman karşılaştırma eğrisi



Şekil 6.15. Kolonlar arası ölçüm noktasının oturma -zaman karşılaştırma eğrisi

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'teki hem ölçülen hem de hesaplanan veriler, kolonlar arasındaki oturmanın kolonun tepesindekinden yaklaşık 0.1 m daha fazla

olduğunu göstermektedir. Ayrıca-8.4m'de ölçülen ve hesaplanan oturma değeri 0.35m'dir (Şekil 6.16). Zemin yüzeyindeki kolonlar arası oturma değerinin-8.4 m'deki oturma değerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Neden olarak, kolonların çevreleyen zemine göre daha fazla oturduğu yani kolonların zemine nüfuz ettiği söylenebilir.

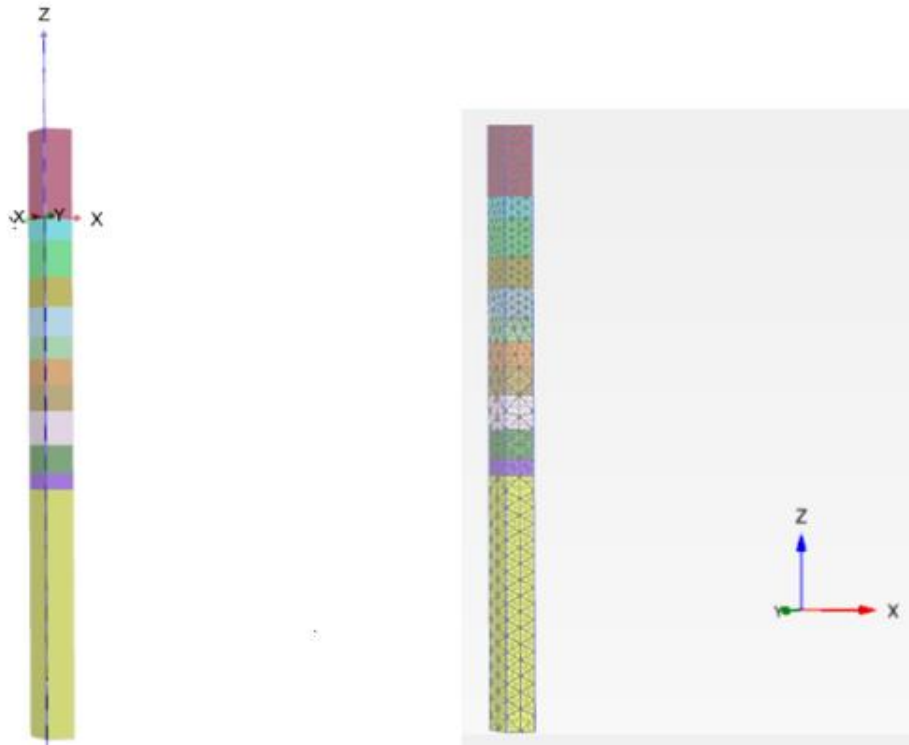


Şekil 6.16. -8.4 m derinlikteki ölçüm noktasının oturma- zaman karşılaştırma eğrisi

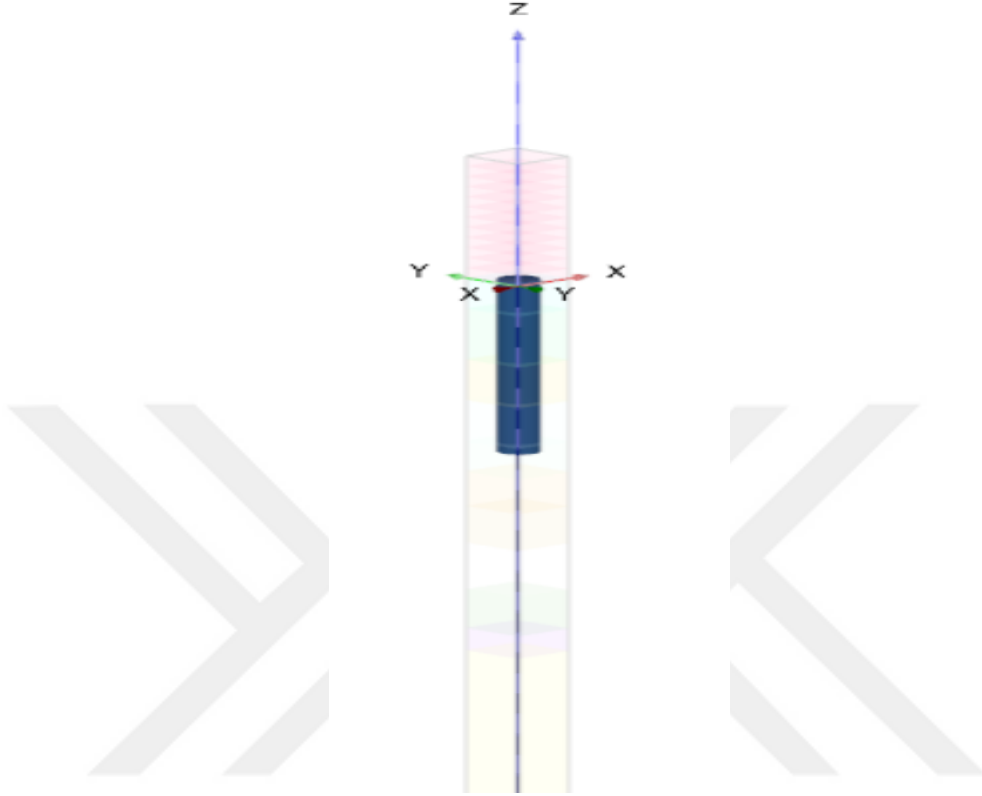
3D analizler, arazi koşullarını yansıttığı için gerçek davranışa yakın sonuçlar elde edilmiştir. Arazi ölçümleri sonucunda  $S_{s1}$ ,  $S_{s2}$  ve  $S_4$  ölçüm noktalarında zamana bağlı ölçülen deplasman değerleri sırasıyla 0.48m, 0.58m ve 0.35m iken, 3D analiz sonucunda bu noktalarda meydana gelen deplasmanlar ise 0.48m, 0.49m ve 0.35m'dir. Yapılan çalışmalar neticesinde 3D analiz sonucu ile arazi ölçümlerinin makul seviyede uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca bu sonuçlardan yola çıkarak seçilen geometrik modelin, sınır koşullarının ve zemin modelinin sistem davranışını doğru yansıttığı anlaşılmaktadır.

### 6.3.3. 3D Birim Hücre Analizi

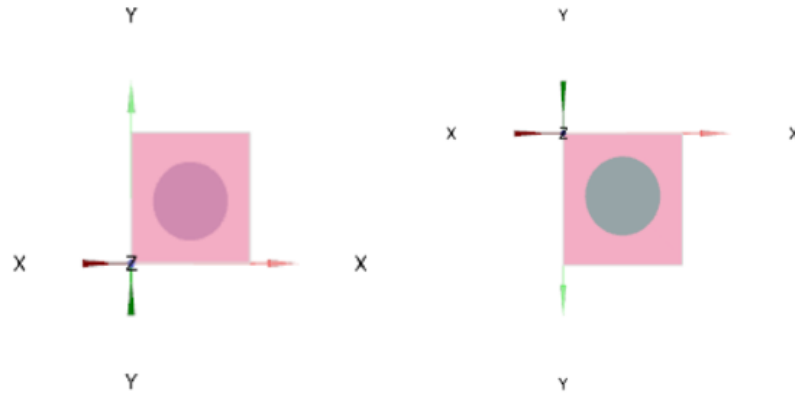
Genellikle bu tür sistemlerde, basitleştirme amacıyla sistemin merkezinde yer alan kolon ve onun etki bölgesi esas alınarak birim hücre analizleri yapılmaktadır. Bu nedenle bu bölümde birim hücre analizlerinin sistem davranışını ne derecede doğru modellediği araştırılmıştır. Bu amaçla yukarıda bahsi geçen projedeki dolgunun merkezinin altında yer alan kolon ve etki bölgesi esas alınarak birim hücre yöntemi ile analiz yapılmıştır. Zemin, kolon parametreleri ve sınır koşulları yukarıda anlatıldığı gibidir. Birim hücre model geometrisi 1.9m genişliğinde kare kesitli olup 35m derinliğindedir (Şek.6.17).



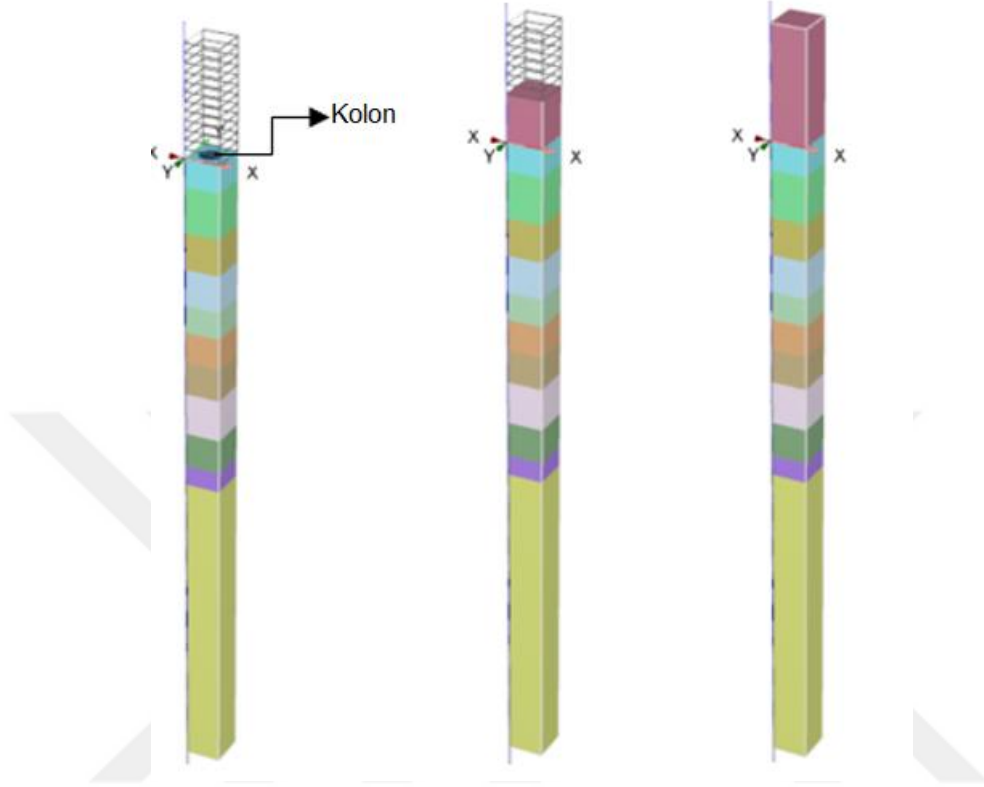
Şekil 6.17. Birim hücre geometrik model ve sonlu elemanlar ağı



Şekil 6.18. Birim hücre kolon imalatı

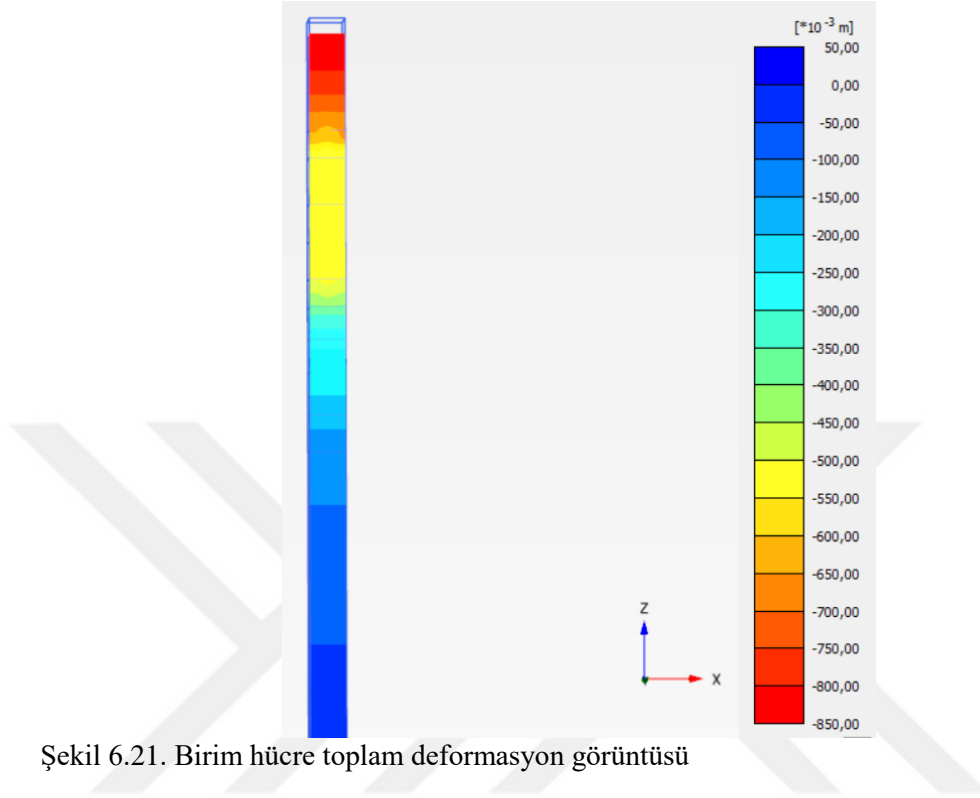


Şekil 6.19. Kolon üstten ve alttan görünüşü



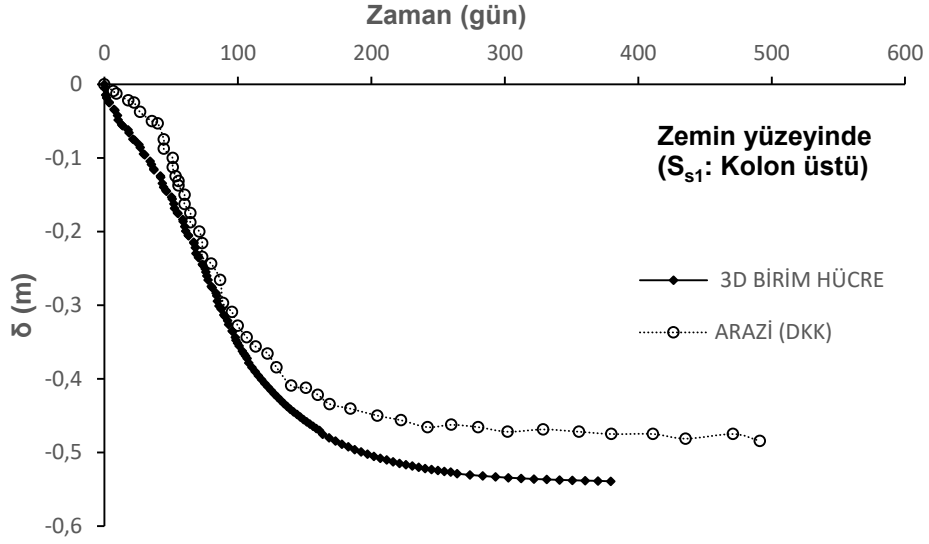
Şekil 6.20. Zemin iyileştirilmesi ve dolgu inşası

Yapılan 3D birim hücre analizinde de arazi koşullarındaki yükleme durumu göz önüne alınarak kademeli yükleme yapılmış ve drenajlı koşullarda stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonunda meydana gelen deformasyonlar Şekil 6.21’de verilmiştir.

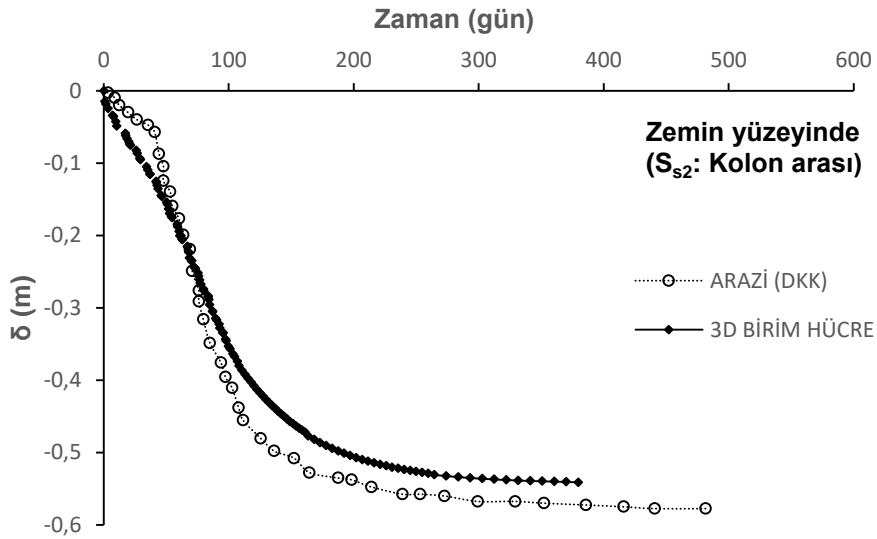


Şekil 6.21. Birim hücre toplam deformasyon görüntüsü

Yapılan 3D birim hücre analiz sonuçları arazi yükleme deneyinden elde edilen yük-oturma eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.22 ve Şekil 6.23).



Şekil 6.22. Birim hücre oturma -zaman karşılaştırma eğrisi

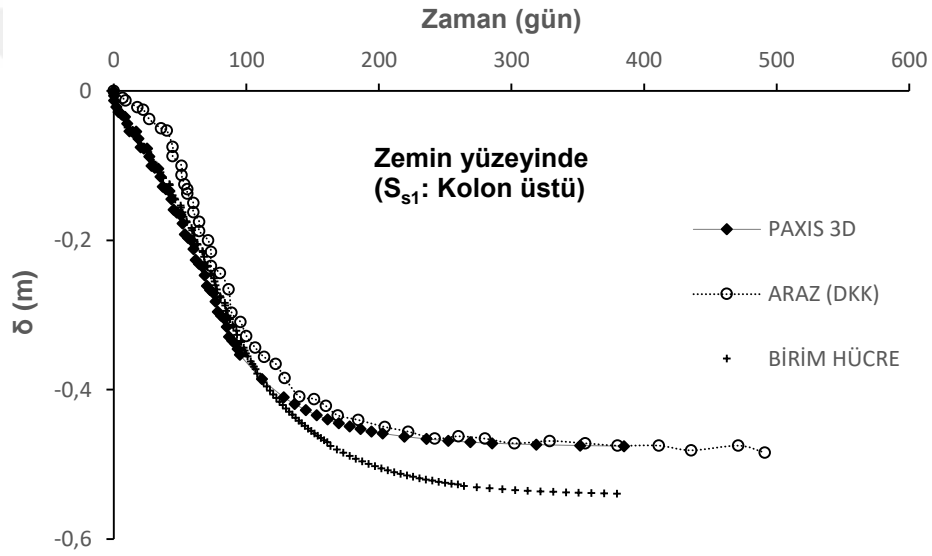


Şekil 6.23. Birim hücre oturma -zaman karşılaştırma eğrisi

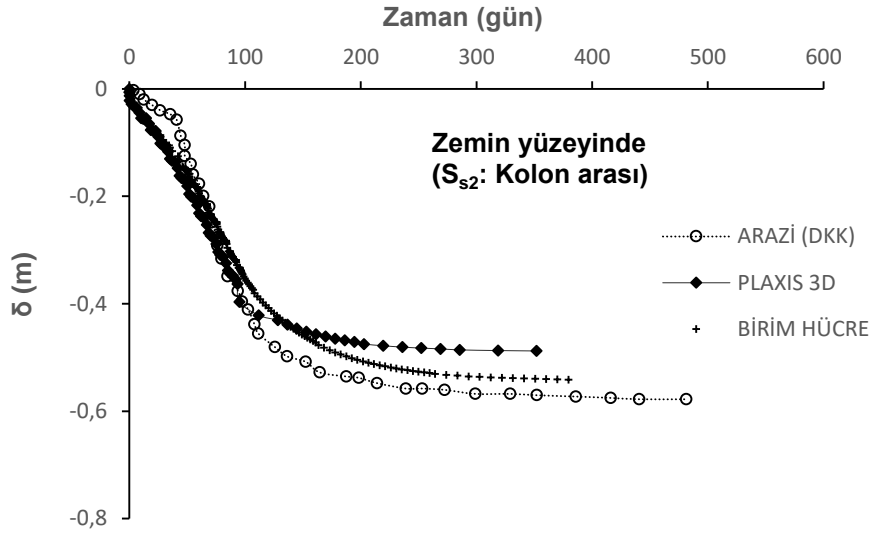
$S_{s1}$  ve  $S_{s2}$  ölçüm noktalarında zamana bağlı ölçülen deplasman değerleri sırasıyla 0,48m ve 0,58m iken, birim hücre analiz sonucunda bu noktalarda meydana

gelen deplasman değerleri 0.54m'dir.Yapılan çalışmalarla, birim hücre analiz sonuçlarının arazi ölçüleriyle makul düzeyde uyumlu olduğu söylenebilir.

Birim hücre ve tam ölçekli 3D ile yapılan analizler, arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.24- 6.25). Arazi ölçümlerine en yakın davranış 3D tam ölçekli analizlerle elde edilmiştir fakat birim hücre analizleri de gerçek davranışı genel olarak yansıtmaktadır. Bu da sayısal analizlerde birim hücre kullanımının güvenilirliğini kanıtlamaktadır.



Şekil 6.24. Karşılaştırmalı oturma- zaman grafiği



Şekil 6.25. Karşılaştırmalı oturma- zaman grafiği

#### 6.4. Parametrik Çalışma

Bu bölümde, rijitlikleri birbirinden farklı olan taş kolon, derin karışım ve jet grout kolonları kullanılarak yapılan zemin iyileştirmesinin sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yöntemlerle yapılan rijit kolonların zemin iyileştirmedeki performansı ve zemin davranışı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

##### 6.4. 1. Taş Kolonlar

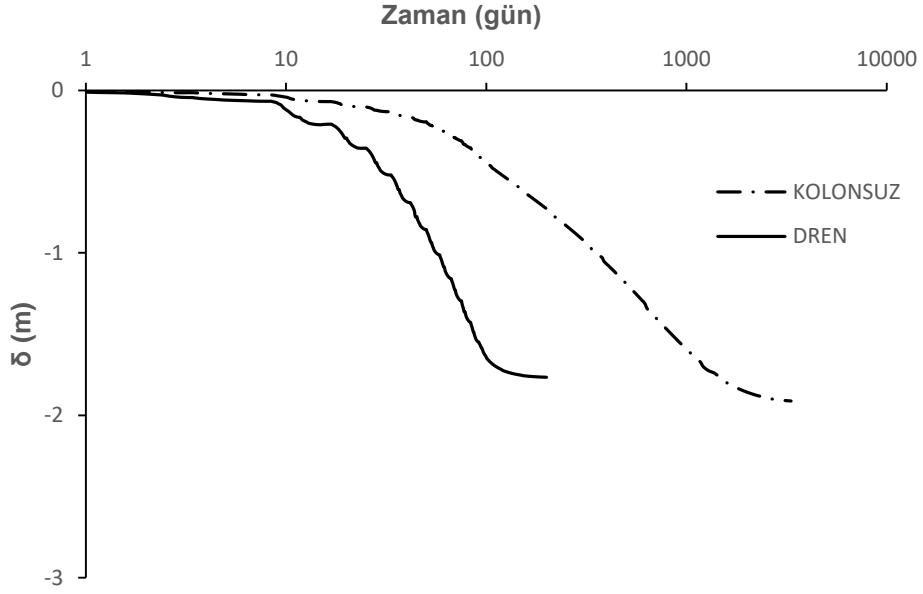
Bu yöntem, hem zeminde bir drenaj kanalı gibi çalışarak konsolidasyonu hızlandırmakta hem de sahip olduğu rijitlik nedeniyle oturmaları azaltmaktır. Bu bölümde taş kolonların hem düşey dren etkisi hem de rijitlik etkisi birlikte değerlendirilmiştir.

Literatürde yapılan araştırma neticesinde, genelde kırma taş malzeme kullanılarak imal edilen taş kolonların rijitliklerinin 10-70 MPa arasında değiştiği görülmüştür (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Taş kolon rijitlik değerleri

Kaynaklar	Elastisite Modülü (MPa)
Malarvizhi (2007)	2.5
Shahu ve Reddy (2014).	4-24
Ng ve Tan (2014)	30
Killeen ve McCabe (2014)	30-70
Guatif ve ark., (2007)	32
Castro ve ark., (2014)	35
Ng ve Tan (2015)	40
Chen ve ark., (2015)	40
Ambily ve Gandhi (2007)	45
Kempfert ve Raithel (2002)	50
Elsawy ve ark., (2009)	55
Sexton ve McCabe (2016)	70

Taş kolonlar yüksek geçirgenliklerinden dolayı zeminde drenaj kanalı görevi görmektedir. Taş kolonların bu etkisinin incelenmesi için 3D analizler yapılmıştır. Taş kolonların sadece düşey dren gibi çalıştığı ve sisteme rijitlik bakımından herhangi bir katkısı olmadığı düşünülerek kolon için rijitlik parametresi kullanılmamıştır. Yani analizlerde kolon elastisite modülü göz ardı edilmiştir. Kolonlar, denk geldiği tabakalardaki zemin modelleri ve parametreleri kullanılarak modellenmiştir. Kolon malzeme parametresindeki tek değişken ise permeabilitedir ve değeri  $k_x=k_y=k_z=1$  m/gün alınmıştır. Analiz sonuçları Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi taş kolonlarla drenaj boyu kısaltılarak zemindeki boşluk suyu basınçları hızla sönmelenmekte ve bu nedenle de konsolidasyon önemli ölçüde hızlanmaktadır. İyileştirilmemiş zeminde elde edilen oturma miktarı ve oturmanın gerçekleşmesi için kaydedilen süre sırasıyla 1.9m ve 3480 gündür. Dren olarak modellenen taş kolonlarla bu oturma miktarı 209 günde elde edilmiştir (Şekil 6.26).



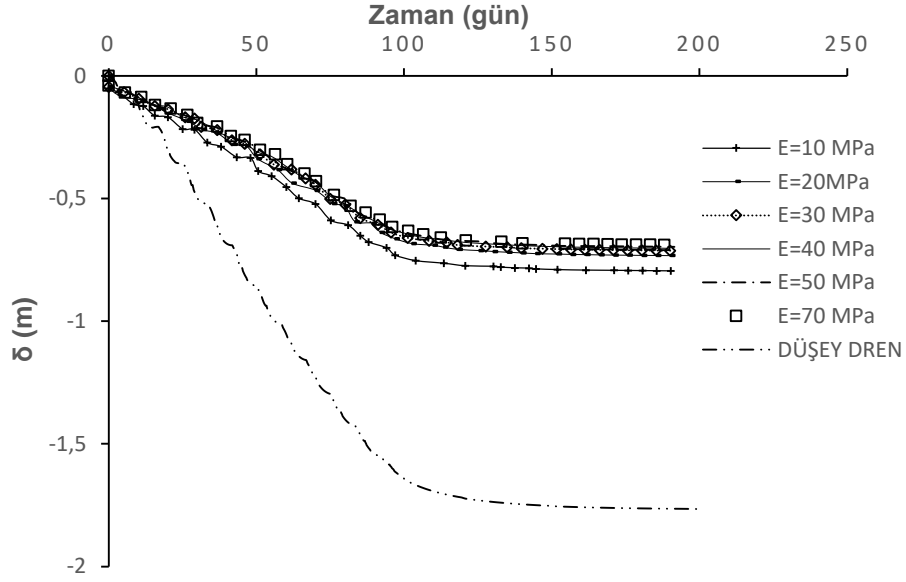
Şekil 6.26. Taş kolon dren davranışı

Taş kolonların permeabilitesi ve rijitliği inşa edildiği zeminden yüksektir. Dolayısı ile rijitliklerinden dolayı da dayanıma ve oturma davranışına katkı sağlamaktadırlar. Taş kolonlarla iyileştirilen zeminde kolon rijitliği ve dren etkisi birlikte değerlendirildiğinde ne ölçüde iyileşme meydana geldiğini görmek amacıyla bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, kolon boyutları ve zemin parametreleri yukarıdaki arazi çalışması ile aynı alınmıştır. Taş kolonlar Mohr Coulomb (MC) malzeme modeli ile modellenmiştir ve taş kolonlar için kullanılan diğer parametreler de Çizelge 6.3'te verilmiştir.

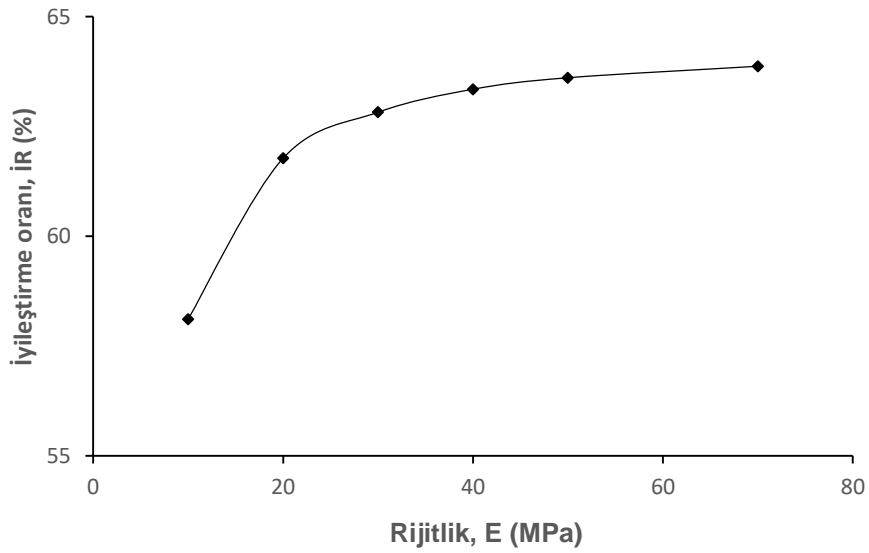
Çizelge 6.4. Analizlerde kullanılan taş kolon parametreleri

Parametreler	Taş Kolon Malzemesi
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22.0
$k_x=k_z$ (m/gün)	1.0
$k_y$ (m/gün)	1.0
$E$ (MPa)	10.0-70.0
$\nu$	0.30
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.0
$\phi$ (°)	45
$\psi$ (°)	15

Parametrik araştırmada taş kolonlar için 10-70 MPa arasında değişen elastisite değerleri kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.27’de görölmektedir. Bu sonuçlardan yararlanarak, herbir rijitlik değerine karşılık kaydedilen oturma miktarı doğal zeminin oturmasına bölünerek iyileştirme oranı hesaplanmış ( $\delta_c / \delta_s$ ) ve daha sonra bu oran birden çıkarılarak iyileştirme derecesi ( $\dot{I}R=1-\delta_c / \delta_s$ ) elde edilmiştir (Şekil 6.28). Şekil 6.28’e bakılırsa yapılan parametrik çalışmada 20 MPa üzerindeki rijitliklerde oturmanın çok etkilenmediği görölmektedir. Dolayısı ile yapılan çalışma için taş kolon rijitliği minimum 20 MPa alınması önerilebilir. Oturması 1.91m olan zemin, rijitliği 20 MPa’lık taş kolonlarla iyileştirildiğinde %62 oranında iyileşme sağlanmaktadır. Ayrıca iyileştirilmemiş zeminde meydana gelen oturma süresi 3480 gün iken taş kolonlarla iyileştirildiğinde bu süre 198 gün olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlara dayanarak kolonların sadece toplam oturmayı azaltmadığı, aynı zamanda dren gibi çalışarak zeminin konsolidasyon hızını da arttırdığı söylenebilir (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. Taş kolon rijitlik ve dren etkisi



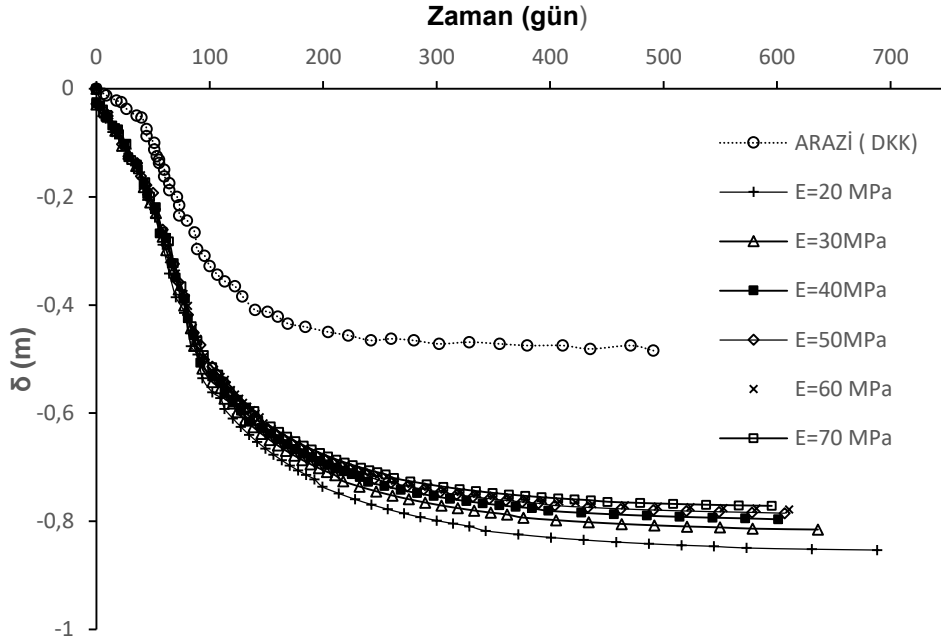
Şekil 6.28. Taş kolon rijitliği ve dren etkisinin oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki

Bu bölümde son olarak, taş kolonların drenaj özelliğinden değil de sadece rijitliklerinden dolayı sisteme olan katkıları incelenmiştir. Yani taş kolonların drenaj özelliği göz ardı edilmiştir. Kolon permeabilitesi geldiği zemin tabakasının permeabilite değeriyle aynı alınmış ve farklı rijitliklerde analizler yapılmıştır. Kolonlar yine MC malzeme modeli ile modellenmiştir ve kolon için kullanılan diğer parametreler Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Taş kolon model parametreleri

Parametreler	Taş Kolon Malzemesi
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	22
$E$ (MPa)	20-70
$\nu$	0,30
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0
$\phi$ (°)	45
$\psi$ (°)	15
$k_x=k_y=k_z$ (m/gün)	Denk geldiği zemin tabakasının permeabilite değeri ile aynı alınmıştır.

Şekil 6.29'da taş kolonların permeabilitesi denk geldiği zemin tabakanın permeabilite değeriyle aynı alındığında oturma değerlerinde ve konsolidasyon süresinde meydana gelen değişimler görülmektedir. Rijitliğin artmasıyla birlikte oturmalar azalmıştır. Ancak arazi ölçüm sonuçlarıyla kıyaslandığında taş kolonlar konsolidasyon süresini kısaltmamıştır.



Şekil 6.29. Taş kolonların sadece rijitliklerinden dolayı sisteme olan etkisi

#### 6.4.2. Sadece Rijitlik Etkisi ile İyileştirme Sağlayan Kolonlar

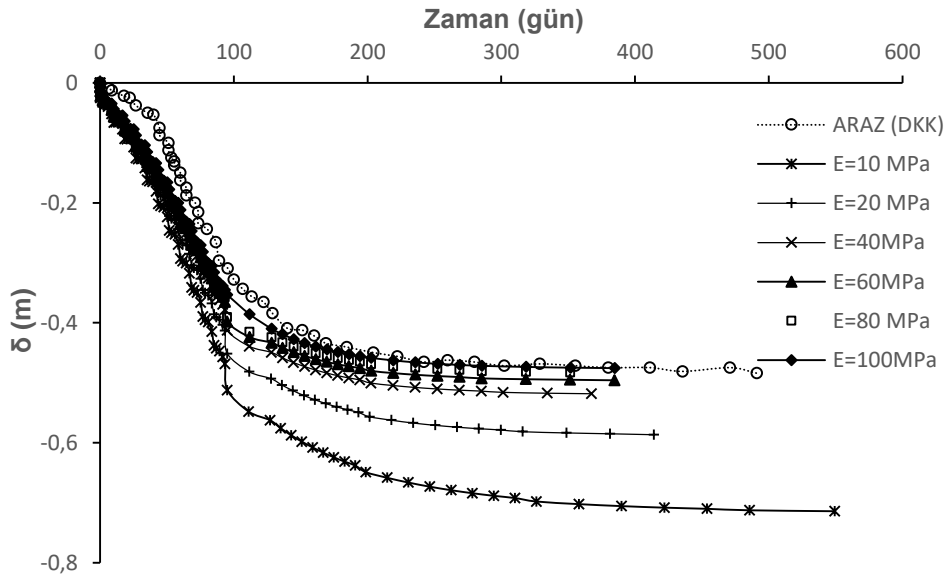
Çalışmamızın bu kısmında derin karışım ve jet grout yöntemleriyle yapılan yüksek modüllü beton kolonların zemin iyileştirmedeki etkisi irdelenmiştir. Genel olarak, zemin iyileştirmede kullanılan beton kolonlar (deep mixing, jet grout) sisteme rijitlik bakımından katkı sağlamaktadır. Bu yöntemlerle taş kolonlardan daha rijit kolonlar elde edilmektedir. Fakat bu kolonlar geçirimsiz oldukları için drenaj kapasiteleri yoktur. Derin karışım kolonları, mevcut zeminle karıştırılıp oluşturulduğu için rijitliği jet grout kolonlarından düşük fakat taş kolonlarından yüksektir.

3D sayısal analizlerde beton kolonlar için kullanılan boy, çap ve zemin parametreleri arazi çalışması ile aynıdır. Beton kolonlar Linear Elastik malzeme modeli ile modellenmiştir. Öncelikle Derin karışım kolonları için 10-20-40-60-80-

100 MPa elastisite değerleri kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Kolonlar için kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.6. Derin karışım kolon parametreleri

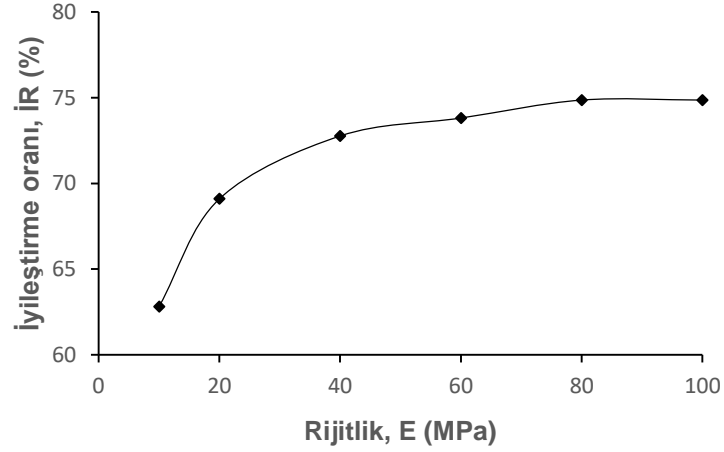
Parametreler	Derin Karışım Kolon Malzemesi
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	24
$E$ (MPa)	10-100
$\nu$	0,15
$k_x=k_y=k_z$ (m/gün)	Denk geldiği zemin tabakasının permeabilite değeri ile aynı alınmıştır.



Şekil 6.30. Derin karışım kolon rijitliğinin zemin iyileştirmedeki etkisi

Şekil 6.30'da derin karışım kolonlarının rijitlik etkisi görülmektedir. Derin karışım kolonları için yapılan analizlerde rijitliğin artması ile oturmalar azalmaktadır.

meydana gelmiştir. Elde edilen oturma değerlerinden iyileştirme oranı hesaplanarak hangi rijitlik değerinde ne kadar iyileşme sağlandığı da Şekil 6.31’de verilmiştir.



Şekil 6.31. Derin karışım kolon rijitliği ve oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki

Şekil 6.31’e bakılırsa rijitliğin 40 MPa üzerindeki değerleri için oturmanın çok etkilenmediği görülmektedir. Dolayısı ile yapılan çalışma için derin karışım kolon rijitliği minimum 40 MPa alınması önerilebilir. İyileştirilmemiş zemin oturması 1.91m iken, 40 MPa rijitliğinde derin karışım kolonlarıyla iyileştirildiğinde kaydedilen oturma değeri 0.52 m’dir. Yani zemin, rijitliği 40 MPa olan derin karışım kolonlarıyla iyileştirildiğinde oturmalarda %73 oranında iyileşme kaydedilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, genellikle akışkan, yarı akışkan/ katı kıvamda malzemelerin basınç altında zemine enjekte edilmesiyle imal edilen jet kolonların elastisite modüllerinin 150- 20000 MPa arasında değiştiği görülmüştür (Çizelge 6.6).

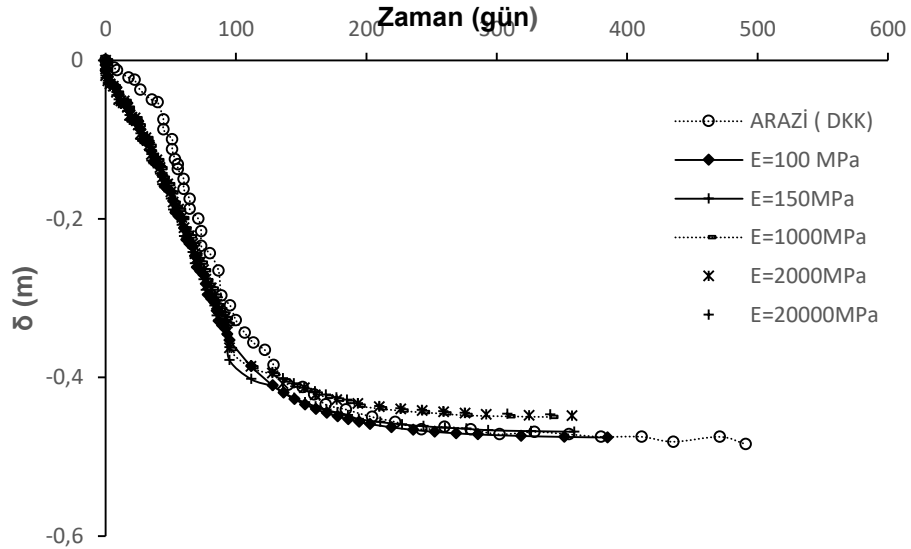
Çizelge 6.7. Jet grout kolon rijitlik değerleri

Kaynaklar	Elastisite Modülü (MPa)
Borges ve Guerra (2014)	150
Goh (2017)	150
Algin (2016)	3200
Racansky ve ark., (2006)	5000
Racansky ve ark., (2006)	20000

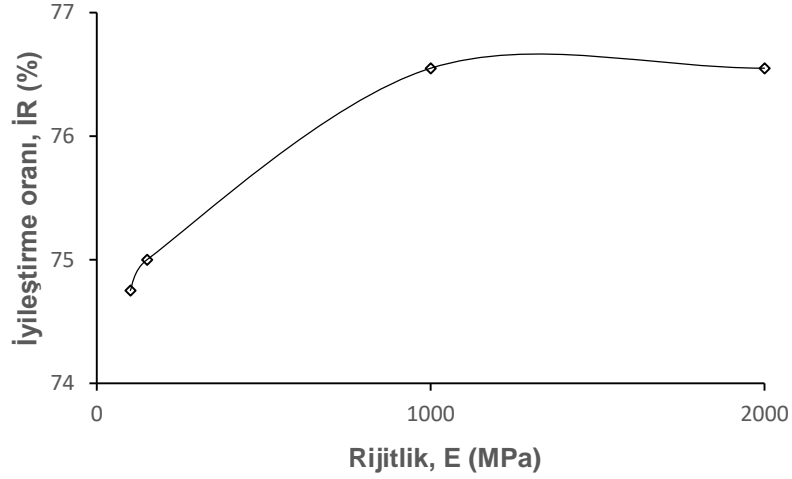
Jet grout kolonları için 100-150-1000-2000-20000 MPa elastisite değerleri kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Kolonlar için kullanılan diğer malzeme parametreleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Jet grout kolon parametreleri

Parametreler	Jet Grout Kolon Malzemesi
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	24
E (MPa)	150-20000
$\nu$	0,15



Şekil 6.32. Jet grout kolon rijitliğinin zemin iyileştirmedeki etkisi

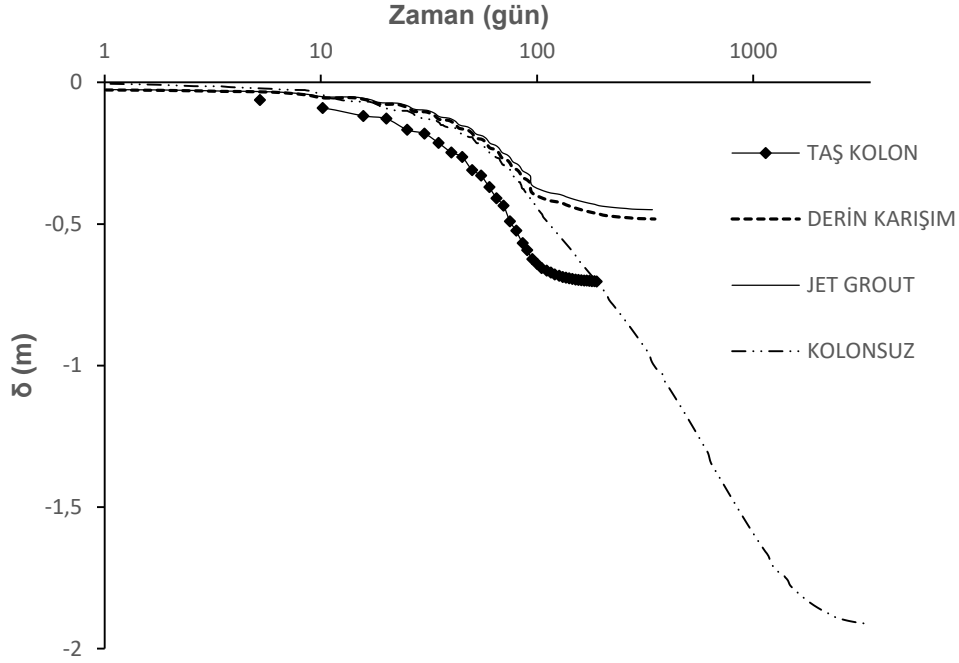


Şekil 6.33. Jet grout kolon rijitliği ve oturma iyileştirme oranı arasındaki ilişki

Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'te jet grout kolonlarının rijitlik etkisinin sisteme olan etkisi görülmektedir. Rijitliğin artmasıyla oturmalar azalmıştır fakat 1000 MPa üzerindeki değerlerde oturmalar azalmalar meydana gelmemiştir. Hatta rijitliğin artması ile oturmalar sabit kalmıştır (Şekil 6.33). Yapılan çalışma sonucunda jet kolon rijitliği minimum 1000 MPa önerilebilir. Zeminin doğal oturması 1.91m iken, 1000 MPa rijitliğindeki jet grout kolonlarıyla yapılan iyileştirme sonrası oturma değeri 0.45 m olarak kaydedilmiştir. Oturmalar %76 oranında iyileşme sağlanmıştır.

#### 6.5. Sayısal Analizlerle Rijit Kolon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

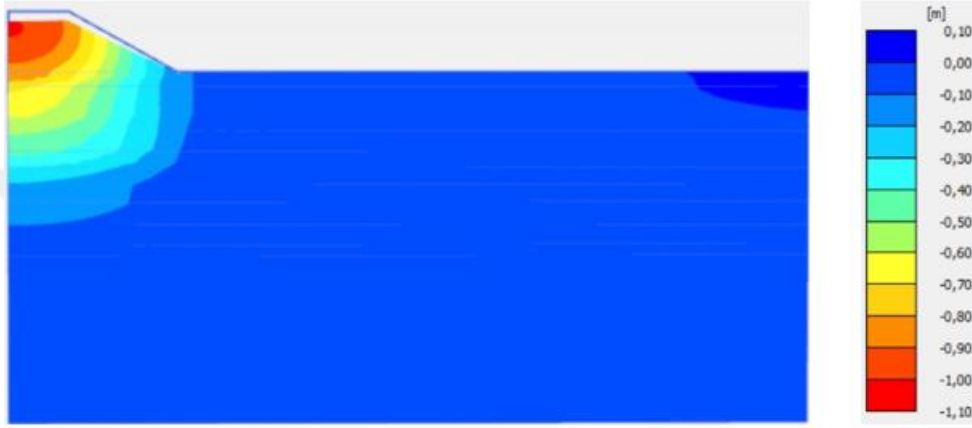
Aynı zemin koşullarında ve aynı boyutlarda taş kolon, derin karışım ve jet grout yöntemlerinin kullanılması halinde bu kolonların zemin iyileştirmedeki rolü araştırılmıştır. Taş kolon, derin karışım ve jet grout yöntemi için kullanılan rijitlik değerleri sırasıyla 40 MPa, 80 MPa ve 1000 MPa'dır.



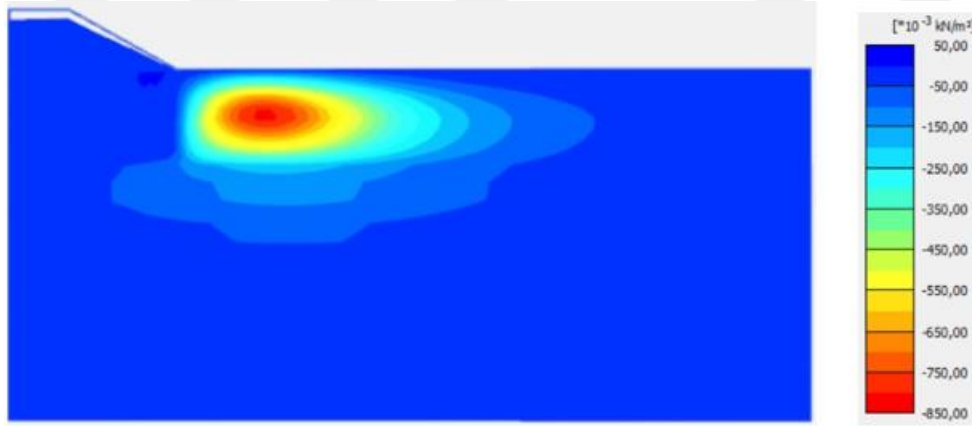
Şekil 6.34. Farklı yöntemlerle imal edilen rijit kolonların karşılaştırmalı oturma-zaman eğrisi

Şekil 6.34'te iyileştirilmesi planlanan bir zeminde farklı yöntemlerle ve farklı jijitliklerde imal edilecek kolonların uzun vadede iyileştirmedeki etkisi görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en düşük oturma değeri jet grout yöntemi ile elde edilmiş olup değeri 0,45 m'dir. Derin karışım ve taş kolon için kaydedilen oturma değerleri de sırasıyla 0,48m ve 0,7 m'dir. Doğal zeminin iyileştirmeden önceki oturma miktarı ise 1,9 m'dir. Elde edilen oturma değerlerine bakılacak olursa jet grout yöntemi ile %77, derin karışım yöntemi ile %73 ve taş kolon yöntemi ile %64 iyileştirme sağlanmaktadır. Proje gereksinimlerine bağlı olarak hangi yöntemle rijit kolon imal edileceğine karar verilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu iyileşme oranlarına bakıldığında, jet grout ve derin karışım yöntemlerinin birbirine yakın iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Bu da maliyet, imalat hızı ve kolaylık açısından daha uygun olan derin karışım yönteminin jet grout yerine tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.

Ayrıca analiz sonrasında elde edilen toplam düşey deplasmanlar ve boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi Şekil 6.35-40'ta verilmiştir. Derin karışım ve jet grout kolonlu kompozit sistem deformasyon görüntülerinden de yöntemlerin birbirine yakın iyileşmeler sağladığı görülmektedir.



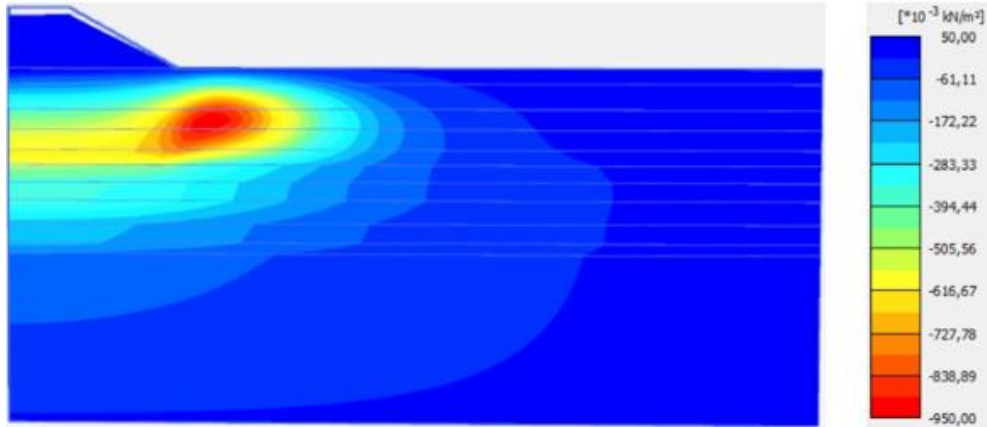
Şekil 6. 35. Taş kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü



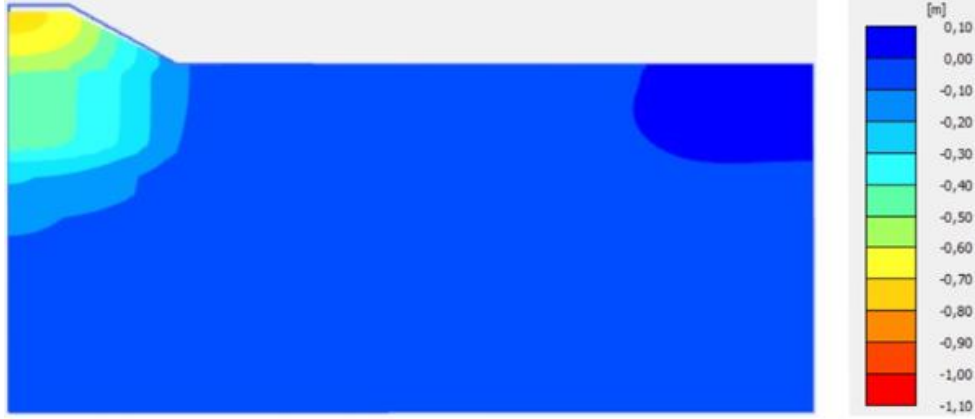
Şekil 6.36. Taş kolonların boşluk suyu basınçlarına etkisi



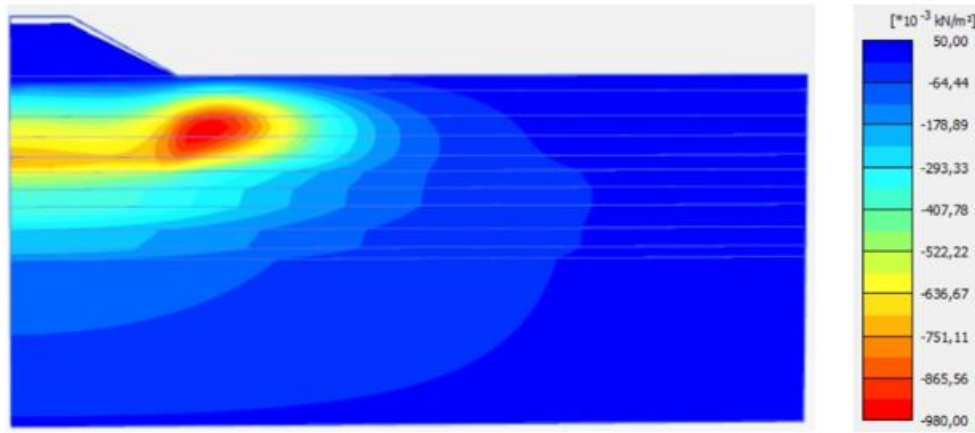
Şekil 6.37. Derin karışım kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü



Şekil 6.38. Derin karışım kolonlarının boşluk suyu basınçlarına etkisi



Şekil 6.39. Jet grout kolonlu kompozit sistemin toplam deformasyon görüntüsü



Şekil 6.40. Jet grout kolonlarının boşluk suyu basınçlarına etkisi

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak kolonların sadece toplam oturmaya azaltmadığı, aynı zamanda zeminin konsolidasyon hızını da arttırdığı söylenebilir. Ayrıca taş kolonların beton kolon yöntemlerinden farklı olarak, sisteme rijitlik etkisinin yanı sıra drenaj katkısının da olduğu açıkça görülmektedir. Bu da taş kolonların drenaj etkisiyle konsolidasyon süresini önemli ölçüde kısaltıldığını kanıtlamaktadır.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, taş kolon, derin karışım ve jet grout yöntemleriyle oluşturulan rijit kolon uygulamaları için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi hem geneleksen yaklaşımrlarla hem de sayısal yöntemler yardımı ile araştırılmıştır. Ayrıca doğal zeminin, oturma ve taşıma gücü hesaplamaları yapılmış ve zemin rijit kolonlarla iyileştirildikten sonra, kompozit sistemde meydana gelen değişimler literatürdeki hesap yöntemleri ve sayısal analizlerle araştırılmıştır. Yapılan 2D-3D sayısal analizlerde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı PLAXIS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Parametrik çalışmada kullanılmak üzere daha önce yapılmış tam ölçekli bir laboratuvar model deney geometrisi ve model parametreleri kullanılarak iki boyutlu analizler yapılmış ve laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılarak güvenilirliği araştırılmıştır.

Ayrıca tez kapsamında, 2010 yılında Japonya Saga'da derin karışım kolonlarıyla iyileştirilmiş zemin üzerine inşa edilen bir deneme dolgununun 3D sayısal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Söz konusu dolgunun davranışı arazi ölçüm sistemleri ile davranışı takip izlenmiştir. Araziden alınan ölçüm sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak analizlerin doğruluğu araştırılmıştır.

Araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Rijit kolonlu zemin iyileştirmesinde, alan değişim oranı ( $\alpha$ ) arttıkça kompozit sistemin hem dayanımı hem de oturma davranışı iyileşmektedir.
- Derinlik iyileştirme oranı ( $\beta$ ) arttıkça kompozit sistemin taşıma gücü artmakta, oturmalar azalmakta ve konsolidasyon hızlanmaktadır.
- Yüzen kolonlarda, yük yoğunluğunun artması ile kolonların zemine nüfuz etmesi sonucu oturmalarda artışlar gözlenmiştir. Ayrıca alan yerleşim oranı, derinlik iyileştirme oranı ve yük yoğununun etkisi birlikte

değerlendirildiğinde kolonun büyük boy ve çap değerlerinde daha az oturma meydana gelmiştir.

- Zemin elastisite modülü  $E_s$  sabit tutulup kolon rijitliği yani  $E_c$  değiştirildiğinde, yüzen kolonlarda rijitliğin artmasıyla oturmalarda kayda değer bir azalma olmamıştır. Fakat kolonlar sağlam tabakaya oturduğunda ( $\beta=1$ ) rijitliğinin artmasıyla oturmalarda önemli ölçüde azalmalar meydana gelmiştir.
- Üniorm yükleme koşullarında yüzen rijit kolonlarda, yükün büyük bir kısmı rijit kolonlara aktarılmakta bir kısmı da zemin tarafından taşınmaktadır. Derinlik boyunca gerilme konsantrasyon oranı azalmaktadır ve meydana gelen oturmalar üniform değildir.
- Üniorm yükleme koşullarında, sağlam tabakaya oturan rijit kolonlarda, yük genel olarak kolonlar tarafından taşınmakta çok az bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Fakat derinlikle zemin gerilmelerinin kolona aktarıldığı dolayısı ile de gerilme konsantrasyon oranının arttığı görülmektedir. Ayrıca derinlikle oturmalar üniformlaşmaktadır.
- PLAXIS 3D analiz sonuçları ile arazi ölçümlerinin makul seviyede uyumlu olduğu görülmüştür. Bu da üç boyutlu analizlerinin arazi koşullarını yansıttığı için gerçek davranışa yakın sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.
- Genellikle kompozit sistemlerin sayısal analizlerinde basitleştirme amacıyla sistemin merkezinde yer alan kolon ve onun etki bölgesi esas alınarak yapılan birim hücre analizlerinin, gerçek davranışı genel olarak yansıttığı görülmüştür.
- Analitik yöntemlerde yapılan kabuller nedeniyle kompozit temel sistemindeki bazı önemli parametrelerin etkisi dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle analitik yöntemlerde rijit kolonların gerçek davranışı tam

anlamıyla yansıtılmadığı için sayısal analizlerle desteklenmesi gerekmektedir.

- Taş kolonların sadece düşey dren gibi çalıştığı ve sisteme rijitlik bakımından herhangi bir katkısı olmadığı durumda, taş kolonlarla drenaj boyu kısaltılarak zemindeki boşluk suyu basınçları hızla sönmülmekte ve bu nedenle de konsolidasyon önemli ölçüde hızlanmaktadır.
- Taş kolonların rijitlik ve düşey dren etkisi birlikte göz önünde bulundurulduğunda kolonların sadece toplam oturmaya azaltmadığı, aynı zamanda dren gibi çalışarak zeminin konsolidasyon hızını da arttırdığı söylenebilir. 20 MPa üzerindeki rijitliklerde oturma çok etkilenmediği görülmüştür. Zemin, rijitliği 20 MPa'lık taş kolonlarla iyileştirildiğinde %62 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Taş kolonların permeabilite etkisi göz ardı edilerek sisteme sadece rijitlik bakımından olan etkisi araştırıldığında, rijitliğin artmasıyla birlikte oturmalar azalmıştır. Ancak arazi ölçüm sonuçlarıyla kıyaslandığında taş kolonlar konsolidasyon süresini kısaltmamıştır.
- Derin karışım kolonlarında rijitliğin artması ile oturmalar azalmalar meydana gelmiştir. Fakat rijitliğin 40 MPa üzerindeki değerleri için oturma çok etkilenmediği görülmüştür. Zemin, rijitliği 40 MPa olan derin karışım kolonlarıyla iyileştirildiğinde oturmalar %73 oranında iyileşme görülmüştür.
- Jet grout kolonlarında rijitliğin artmasıyla oturmalar azalmıştır. Fakat 1000 MPa üzerindeki değerlerde, rijitliğin artması ile oturmalar sabit kalmıştır. Zemin, rijitliği 1000 MPa olan jet kolonlarıyla iyileştirildiğinde oturmalar %76 oranında iyileşme sağlanmıştır.
- Taş kolon rijitliği 40MPa, derin karışım kolon rijitliği 80MPa ve jet grout kolon rijitliği 1000 MPa olacak şekilde yapılan zemin

iyileştirmesinde, jet grout yöntemi ile %77, derin karışım yöntemi ile %73 ve taş kolon yöntemi ile %64 iyileştirme sağlanmıştır. Bu iyileştirme oranlarına bakıldığında, jet grout ve derin karışım yöntemlerinin birbirine yakın iyileştirmeler sağladığı görülmektedir. Bu da maliyet, imalat hızı ve kolaylık açısından daha uygun olan derin karışım yönteminin jet grout yerine tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.

- Zeminde farklı yöntemlerle ve farklı rijitliklerde imal edilen kolonların uzun sürede iyileştirmedeki etkisine bakıldığında belli bir rijitlik değerinden sonra otumaların etkilenmediği görülmüştür. Bu nedenle proje kriterlerine bağlı olarak en uygun kolon imalat yönteminin seçilmesi gerekir. Böylece tasarımcılar için daha ekonomik, kolay ve hızlı yöntemlerin seçilmesi sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Aboshi, H., 1979. The compozer, a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. In Proc. of 1st Int. Conf. on Soil Reinforcement, Vol. 1, pp. 211-216.
- Algin, H. M., 2016. Optimised design of jet-grouted raft using response surface method. Computers and Geotechnics, 74, 56-73.
- Al-Obaidy, N., 2000. Full scale tests on stone piles (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis).
- Ambily, A. P., and Gandhi, S. R., 2007. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 133 (4), 405-415.
- Babu, M. D., Nayak, S., and Shivashankar, R., 2013. A critical review of construction, analysis and behaviour of stone columns. Geotechnical and Geological Engineering, 31 (1), 1-22.
- Baker, S., Liedberg, N. S. D., and Sällfors, G., 1997. Deformation properties of lime cement stabilised soil in the working state. In Proceedings Of The International Conference On Soil Mechanics And Foundation Engineering- International Society For Soil Mechanics And Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1667-1672.
- Balaam, N. P., and Booker, J. R., 1981 . Analysis of rigid rafts supported by granular piles. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 5 (4), 379-403.
- Barksdale, R. D., and Bachus, R. C., 1983. Design and construction of stone columns, vol. I (No. FHWA/RD-83/026; SCEGIT-83-104). Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Barron, R. A., 1948. Consolidation of fine-grained soils by drain wells.

- Bergado, D. T., Ruenkraitergsa, T., Taesiri, Y., and Balasubramaniam, A. S., 1999. Deep soil mixing used to reduce embankment settlement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 3 (4), 145-162.
- Bergado, D. T., and Lorenzo, G. A., 2005. A full-scale study on cement deep mixing in soft Bangkok clay. In Elsevier Geo-Engineering Book series, Vol. 3, pp. 305-325. Elsevier.
- Bergado, D. T., Lorenzo, G. A., Taechakumthorn, C., and Balasubramiam, A. S., 2005. Compression behavior of high water content cement-admixed clay. Proceedings of Deep Mixing, 5, 221-230.
- Black, J. A., 2007. The settlement performance of a footing supported on soft clay reinforced with vibrated stone columns. Queen's University of Belfast, Northern Ireland.
- Black, J., Sivakumar, V., and McKinley, J. D., 2007. Performance of clay samples reinforced with vertical granular columns. Canadian geotechnical journal, 44 (1), 89-95.
- Borges, J. L., and Guerra, G. T., 2014. Cylindrical excavations in clayey soils retained by jet grout walls: numerical analysis and parametric study considering the influence of consolidation. Computers and Geotechnics, 55, 42-56.
- Borges, J. L., and Guerra, G. T., 2014. Cylindrical excavations in clayey soils retained by jet grout walls: numerical analysis and parametric study considering the influence of consolidation. Computers and Geotechnics, 55, 42-56.
- Brauns, J., 1978. Initial bearing capacity of stone columns and sand piles. In Int. Symp. on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice, Vol. 1, pp. 497-512.
- Bruce, D. A., 2000. An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications (No. FHWA-RD-99-138,).

- Carrillo, N., 1942. Simple two and three dimensional case in the theory of consolidation of soils. *Journal of Mathematics and Physics*, 21 (1-4), 1-5.
- Castro, J., and Sagaseta, C., 2009. Consolidation around stone columns. Influence of column deformation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33 (7), 851-877.
- Castro, J., and Sagaseta, C., 2010. Numerical modelling of consolidation around stone columns. In *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp. 879-884. CRC Press.
- Castro, J., and Sagaseta, C., 2011. Consolidation and deformation around stone columns: Numerical evaluation of analytical solutions. *Computers and Geotechnics*, 38 (3), 354-362.
- Castro, J., Karstunen, M., and Sivasithamparam, N., 2014. Influence of stone column installation on settlement reduction. *Computers and Geotechnics*, 59, 87-97.
- Chai, J. C., Miura, N., Kirekawa, T., and Hino, T., 2010. Settlement prediction for soft ground improved by columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 163 (2), 109-119.
- Chai, J., and Pongsivasathit, S., 2010. A method for predicting consolidation settlements of floating column improved clayey subsoil. *Frontiers of Architecture and Civil engineering in China*, 4 (2), 241-251.
- Chai, J. C., Shrestha, S., Hino, T., Ding, W. Q., Kamo, Y., and Carter, J., 2015. 2D and 3D analyses of an embankment on clay improved by soil-cement columns. *Computers and Geotechnics*, 68, 28-37.
- Chai, J. C., Shrestha, S., Hino, T., and Uchikoshi, T., 2017. Predicting bending failure of CDM columns under embankment loading. *Computers and Geotechnics*, 91, 169-178.
- Chen, B. S., and Bailey, M. J., 2004. Lessons learned from a stone column test program in glacial deposits. *Geotechnical Special Publication*, 508-519.

- Chen, J. F., Li, L. Y., Xue, J. F., and Feng, S. Z., 2015. Failure mechanism of geosynthetic-encased stone columns in soft soils under embankment. *Geotextiles and Geomembranes*, 43 (5), 424-431.
- Chepurnova, A., 2014. Assessing the influence of jet-grouting underpinning on the nearby buildings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (2), 105-112.
- Coulter, S., and Martin, C. D., 2006. Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland. *Tunnelling and underground space technology*, 21 (5), 542-553.
- Coulter, S., and Martin, C. D., 2006. Single fluid jet-grout strength and deformation properties. *Tunnelling and underground space technology*, 21 (6), 690-695.
- Croce, J., Flora, A., and Modoni, G., 2014. *Jet Grouting Technology Design and Control*, CRC Press, London 298s.
- Durgunoglu, H. T., Chinchelli, M., Ikiz, S., Emrem, C., Hurley, T., & Catalbas, F., 2004. Soil improvement with jet-grout columns: A case study from the 1999 Kocaeli earthquake.
- Elsawy, M., Lesny, K., and Richwien, W., 2009. Behavior of ordinary and encased stone columns studied by FEM analysis.
- Elshazly, H. A., Hafez, D. H., and Mossaad, M. E., 2008. Reliability of conventional settlement evaluation for circular foundations on stone columns. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26 (3), 323.
- Esmaili, M., and Khajehei, H., 2016. Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (5), 651-659.
- Farouk, A., and Shahien, M. M., 2013. Ground improvement using soil-cement columns: Experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal*, 52 (4), 733-740.

- Frikha, W., Zargayouna, H., Boussetta, S., and Bouassida, M., 2017. Experimental study of Tunis soft soil improved by deep mixing column. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35 (3), 931-947.
- Gäb, M., Schweiger, H., Thurner, R., and Adam, D., 2007. Field trial to investigate the performance of a floating stone column foundation. In 16th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering “Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development”. Millpress.
- Gäb, M., Schweiger, H. F., Kamrat-Pietraszewska, D., and Karstunen, M., 2008. Numerical analysis of a floating stone column foundation using different constitutive models. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Geotechnics of Soft Soils-Focus on Ground Improvement*, pp. 137-142.
- Goh, A. T. C., 2017. Deterministic and reliability assessment of basal heave stability for braced excavations with jet grout base slab. *Engineering Geology*, 218, 63-69.
- Gong, X. N., Tian, X. J., and Hu, W. T., 2015. Simplified method for predicating consolidation settlement of soft ground improved by floating soil-cement column. *Journal of Central South University*, 22 (7), 2699-2706.
- Greenwood, D. A., 1970. Mechanical improvement of soils below ground surface. In *Inst Civil Engineers Proc, London/UK/*.
- Guétif, Z., Bouassida, M., and Debats, J. M., 2007. Improved soft clay characteristics due to stone column installation. *Computers and Geotechnics*, 34 (2), 104-111.
- Han, J., and Ye, S. L., 2001. Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7), 597-603.
- Han, J., and Gabr, M. A., 2002. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128 (1), 44-53.

- Han, J., and Ye, S. L., 2002. A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects. *International Journal of Geomechanics*, 2 (2), 135-151.
- Han, J., Yang, X. M., Chen, J. F., and Porbaha, A., 2009. Settlement calculation of deep mixed foundations. In *Proceedings of International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization*, pp. 19-21.
- Han, J., 2010. Consolidation settlement of stone column-reinforced foundations in soft soils. In *New Technologies on Soft Soils, Proceedings of the Symposium on New Techniques for Design and Construction on Soft Clays, Brazil* (Almeida M (ed.)). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 167-179.
- Han, J., 2015. *Principles and Practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Hayward Baker Company, <https://www.haywardbaker.com/>
- Hino, T., Jia, R., Sueyoshi, S., and Harianto, T., 2012. Effect of environment change on the strength of cement/lime treated clays. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6 (2), 153-165.
- Horikoshi, K., and Randolph, M. F., 1999. Estimation of overall settlement of piled rafts. *Soils and Foundations*, 39 (2), 59-68.
- Hsieh, H. S., Wang, C. C., and Ou, C. Y., 2003. Use of jet grouting to limit diaphragm wall displacement of a deep excavation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129 (2), 146-157.
- Igaya, Y., Hino, T., and Chai, J. C., 2011. Measured behavior of a trial embankment on floating column improved soft Ariake clay deposit. *Lowland Technol Int*, 13 (1), 41-6.
- Jiang, Y., Han, J., and Zheng, G., 2013. Numerical analysis of consolidation of soft soils fully-penetrated by deep-mixed columns. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17 (1), 96-105.

- Kauschinger, J. L., Perry, E. B., and Hankour, R., 1992. Jet grouting: State-of-the-practice. In *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, pp. 169-181. ASCE.
- Keller Company. The soilcrete-jet grouting process. <http://www.kellerge.com.au>
- Kempfert, H. G., and Raithel, M., 2002. Experiences on dike foundations and landfills on very soft soils. In *International Symposium on Soft Soils Foundation Engineering, Mexico*.
- Killeen, M.M., 2012. Numerical modelling of small groups of stone columns, Ph.D. thesis, National University of Ireland, Galway.
- Killeen, M. M., and McCabe, B. A., 2014. Settlement performance of pad footings on soft clay supported by stone columns: a numerical study. *Soils and Foundations*, 54 (4), 760-776.
- Kirsch, F., and Sondermann, W., 2003. Field measurements and numerical analysis of the stress distribution below stone column supported embankments and their stability. In *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice*, pp. 17-19.
- Kirsch, F., 2006. Vibro stone column installation and its effect on ground improvement. In *Proceedings of the International Conference on Numerical Modelling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, pp. 115-124.
- Kirsch, F., 2008. Evaluation of ground improvement by groups of vibro stone columns using field measurements and numerical analysis. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Geotechnics of Soft Soils, Glasgow*, pp. 241-248.
- Kitazume, M., Okano, K., and Miyajima, S., 2000. Centrifuge model tests on failure envelope of column type deep mixing method improved ground. *Soils and Foundations*, 40 (4), 43-55.
- Larsson, S., 2005. State of Practice Report–Execution, monitoring and quality control. *Deep Mixing*, 5, 732-785.

- Lunardi, P., 1997. Ground improvement by means of jet-grouting. *Ground improvement*, 1 (2), 65-85.
- Malarvizhi, S. N., 2007. Comparative study on the behavior of encased stone column and conventional stone column. *Soils and Foundations*, 47 (5), 873-885.
- McCabe, B., McNeill, J., and Black, J. A., 2007. Ground improvement using the vibro-stone column technique. In *Transactions of the Institution of Engineers of Ireland*. Institution of Engineers in Ireland.
- McCabe, B., and Killeen, M. M., 2010. A numerical study of factors affecting the performance of stone columns supporting rigid footings on soft clay. In *7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Taylor and Francis.
- McKelvey, D., and Sivakumar, V., 2000. A review of the performance vibro stone column foundations. In *3rd International Conference on Ground Improvement Techniques*, pp. 245–254. Singapore.
- McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., and Graham, J., 2004. Modelling vibrated stone columns in soft clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 157 (3), 137-149.
- Melentijevic, S., Arcos, J. L., and Oteo, C., 2013. Application of cement deep mixing method for underpinning. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 2549-2552.
- Miao, L., Wang, X., and Kavazanjian Jr, E., 2008. Consolidation of a double-layered compressible foundation partially penetrated by deep mixed columns. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134 (8), 1210-1214.
- Miki, H., and Furumoto, K., 2000. Model tests about the deep mixing soil stabilization method with low improvement ratio. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.

- Mohamedzein, Y. E. A., and Al-Shibani, I. H., 2011. Performance of an embankment supported on soft soil reinforced by stone columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164 (4), 213-224.
- Muir Wood, D., Hu, W., and Nash, D. F. T., 2000. Group effects in stone column foundations: model tests. *Geotechnique*, 50 (6), 689-698.
- Munfakah, G.A., Sarkar, S.K., and R.J. Castelli, R.J., 1983. Performance of a test embankment founded on stone columns. *Proceedings of the International Conference on Advances in Pilings*.
- Ng, K. S., and Tan, S. A., 2011. The modeling of floating stone column using unit cell concept. In *Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology, and Mineral Resources of INDOCHINA*, Khon Kaen, Thailand, pp. 152-160.
- Ng, K. S., and Tan, S. A., 2014. Design and analyses of floating stone columns. *Soils and Foundations*, 54 (3), 478-487.
- Ng, K. S., 2017. Settlement Ratio of Floating Stone Columns for Small And Large Loaded Areas. *Journal of GeoEngineering*, 12 (2), 89-96.
- Nikbakhtan, B., and Osanloo, M., 2009. Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (3), 498-505.
- Nikbakhtan, B., Ahangari, K., and Rahmani, N., 2010. Estimation of jet grouting parameters in Shahriar dam, Iran. *Mining Science and Technology (China)*, 20 (3), 472-477.
- Oliveira, P. J. V., Pinheiro, J. L., and Correia, A. A., 2011. Numerical analysis of an embankment built on soft soil reinforced with deep mixing columns: Parametric study. *Computers and Geotechnics*, 38 (4), 566-576.
- Pinto, A., Tomásio, R., and Marques, G., 2016. Ground Improvement with Jet Grouting Solutions at the New Cruise Terminal in Lisbon, Portugal. *Procedia engineering*, 143, 1495-1502.

- Poulos, H. G., 2001. Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, 51 (2), 95-114.
- Priebe, H. J., 1995. The design of vibro replacement. *Ground engineering*, 28(10), 31.
- Racanský, V., Thurner, R., and Kummerer, C., 2006. Design of a deep building pit with numerical and limit equilibrium methods. In *Numerical Methods in Geotechnical Engineering: Sixth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (Graz, Austria, 6-8 September 2006)* (Vol. 22, p. 431). CRC Press.
- Serridge, C. J., and Sarsby, R. W., 2008. A review of field trials investigating the performance of partial depth vibro stone columns in a deep soft clay deposit. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Geotechnics of Soft Soils-Focus on Ground Improvement*, pp. 293-298.
- Sexton, B. G., and McCabe, B. A., 2016. Stone column effectiveness in soils with creep: a numerical study. *Geomechanics and Geoengineering*, 11 (4), 252-269.
- Shahu, J. T., and Reddy, Y. R., 2011. Clayey soil reinforced with stone column group: model tests and analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (12), 1265-1274.
- Shahu, J. T., and Reddy, Y. R., 2014. Estimating long-term settlement of floating stone column groups. *Canadian Geotechnical Journal*, 51 (7), 770-781.
- Shen, S. L., Huang, X. C., Du, S. J., and Han, J., 2003. Laboratory studies on property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns. *Marine Georesources and Geotechnology*, 21 (1), 15-35.
- Shien, N. K., and Ann, T. S., 2014. Parametric study on the settlement improvement factor of stone column groups.
- Soletanche Bachy, <http://soletanche-bachy.com>
- Taube, M., and Herridge, J., 2002, October. Stone columns for industrial fills. In *33rd Ohio River Valley Soil Seminar (ORVSS)*, Vol. 18.

- Topolnicki, M., 2004. In situ soil mixing. *Ground improvement*, 2, 331-428.
- Vesic, A. S., 1977. Design of pile foundations. NCHRP synthesis of highway practice, (42).
- Watts, K. S., Johnson, D., Wood, L. A., and Saadi, A., 2000. An instrumented trial of vibro ground treatment supporting strip foundations in a variable fill. *Ground and Soil Improvement*, 129.
- Wehr, J., and Herle, I., 2006. Exercise on calculation of stone columns–Priebe method and FEM. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 773-776.
- Yahiro, T., and Yoshida, H., 1977. U.S. Patent No. 4,047,580. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Yao, K., Yao, Z., Song, X., Zhang, X., Hu, J., and Pan, X., 2016. Settlement evaluation of soft ground reinforced by deep mixed columns. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (6), 460-465.
- Yin, J. H., and Fang, Z., 2010. Physical modeling of a footing on soft soil ground with deep cement mixed soil columns under vertical loading. *Marine Georesources and Geotechnology*, 28 (2), 173-188.



## ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Bitlis'te doğdu. İlk ve orta öğrenimlerini Bitlis'te lise öğrenimini Kars'ta tamamladı. 2011 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2015 yılında mezun oldu. 2016 yılında Ç.Ü. Fen Bilimleri enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017 yılında Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesine araştırma görevlisi olarak atandı. Yazar, halen Şırnak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.