

S. M. ORAL, 2019

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAŞ KOLON VE DÜŞEY DRENLE YAPILAN İYİLEŞTİRMENİN  
KONSOLİDASYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

SÜVEYDA MERVE ORAL

Eylül 2019



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TAŞ KOLON VE DÜŞEY DRENLE YAPILAN İYİLEŞTİRMENİN  
KONSOLİDASYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

SÜVEYDA MERVE ORAL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doktor Öğretim Üyesi Firdevs UYSAL

Eylül 2019

Süveyda Merve ORAL tarafından Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL danışmanlığında hazırlanan “Taş kolon ve düşey drenle yapılan iyileştirmenin konsolidasyona etkisinin incelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Baki BAĞRIÇIK, Çukurova Üniversitesi

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2019

**Prof. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Süveyda Merve ORAL



## ÖZET

### TAŞ KOLON VE DÜŞEY DRENLE YAPILAN İYİLEŞTİRMENİN KONSOLİDASYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ORAL, Süveyda Merve  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman : Doktor Öğretim Üyesi Firdevs UYSAL

Eylül 2019, 101 sayfa

Bu tez çalışmasında zayıf zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerden taş kolon ve düşey dren yöntemleri incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, taş kolon ve düşey drenler için geliştirilen analitik ve sayısal yöntemler araştırılmıştır. İkinci kısımda, bu iki yöntemin tasarımı için kritik önem arz eden bazı tasarım parametrelerinin etkisi zamana bağlı olarak sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal analizler için Plaxis bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Parametrik çalışmada, taş kolonların çapı ve boyu, kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı, kolonlar arası mesafe ve kolon rijitliği, düşey drenlerin ise dren boyu, örselenmiş bölgenin büyüklüğü ve permeabilite değişimi ve drenler arası mesafenin tasarımdaki etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın son kısmında, Singapur şehrinin Changi bölgesinde inşa edilen araştırma dolgusu, taş kolon ve düşey dren yöntemleri ile sayısal olarak iki boyutlu analiz edilmiştir. Analiz sonuçları ile arazi ölçümleri karşılaştırılarak bu iki yöntemin performansı değerlendirilmiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Taş kolon, düşey dren, konsolidasyon, plaxis, sayısal modelleme, vaka analizi

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF THE EFFECT TO IMPROVEMENT WITH STONE COLUMN AND VERTICAL DRAIN ON CONSOLIDATION

ORAL, Süveyda Merve  
Niğde Ömer Halisdemir University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Firdevs UYSAL

September 2019, 101 pages

In this study, stone column and vertical drain methods were examined. In the first stage of the study, analytical and numerical methods which were developed for stone columns and vertical drains were investigated. In the second stage, the effect of some design parameters, which are critical for the design of these two methods, was investigated numerically. Plaxis software programme was used for the numerical analysis. In the parametric study, design parameters (the diameter and length of the stone columns, the internal friction angle of the column material, drain length, permeability changes of the smear region etc.) were investigated. In the last part of the study, the research fill constructed in Changi area in Singapore was analyzed numerically with stone column and vertical drain methods. The performance of these two methods were evaluated by comparing the results of the analysis with the field measurements.

*Keywords:* Stone column, vertical drain, consolidation, plaxis, numerical modelling, case study

## ÖN SÖZ

Oturma davranışı ani oturma ve konsolidasyon oturması olarak iki bileşenden oluşur. Ani oturmalar inşaat süresince yapı yükünün zemine etkisi ile oluştuğu için bazı özel zeminler dışında tehlike arz etmez. Konsolidasyon oturması ise zamana bağlı meydana geldiği için tamamlanması uzun süreler almaktadır ve yapılarda meydana gelen hasarlar çoğu kez konsolidasyon oturmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu yüksek lisans çalışmasında, zayıf zemin tabakalarının yerinde iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerden düşey dren ve taş kolon yöntemlerinin konsolidasyona etkisi araştırılmıştır. Bu iki yöntemin tasarım parametreleri ve literatürde yer alan bir vaka analizindeki performansları sayısal olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan sayısal analizler ile bu uygulama yöntemlerinin ulusal ölçekte anlaşılması ve sonraki çalışmalara model olması da amaçlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışması süresince alanındaki bilimsel hakimiyetinden, tecrübelerinden ve insani desteğinden faydalandığım, yakın ilgi ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sadece bu tez çalışması boyunca değil hayatımın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi yönden desteklerini esirgemeyen, bugünlere gelebilmem için her türlü fedakarlığı yapan, varlık sebeplerim çok kıymetli babam Aytekin ORAL ve annem İmran ORAL' a teşekkürlerim sonsuzdur.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
FOTOĞRAF VE VB. MALZEMELER DİZİNİ .....	ix
SİMGE VE KISALTMALAR .....	x
BÖLÜM I .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II .....	6
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	6
2.1 Giriş .....	6
2.2 Taş Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	6
2.3 Düşey Drenler ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	12
BÖLÜM III .....	18
ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLER .....	18
3.1 Taş Kolonlar İçin Geliştirilen Analitik Yöntemler .....	18
3.1.1 Balaam ve Booker (1981) .....	23
3.1.2 Castro ve Sagaseta (2008) .....	23
3.1.3 Priebe (1995) .....	24
3.1.3.1 İyileştirme faktörü hesabı .....	24
3.1.3.2 Kolon sıkışabilirlik etkisinin değerlendirilmesi .....	25
3.1.3.3 Derinlik etkisinin dikkate alınması .....	27
3.1.3.4 Uyumluluk kontrolleri .....	29
3.1.4 Zamana bağlı konsolidasyon davranışı yöntemleri .....	30
3.2 Düşey Drenler İçin Geliştirilen Analitik Yöntemler .....	37
3.3 Taş Kolonların Sayısal Analizi .....	44
3.4 Düşey Drenlerin Sayısal Analizi .....	50
BÖLÜM IV .....	53
SAYISAL ÇALIŞMALAR ve VAKA ANALİZİ .....	53
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR ve VAKA ANALİZİ .....	53
4.1 Plaxis Bilgisayar Yazılımı .....	53

4.2 Taş Kolon Tasarım Parametrelerinin Araştırılması .....	54
4.3 Düşey Drenlerin Tasarım Parametrelerinin Araştırılması .....	67
4.4 Vaka Analizi .....	74
4.4.1 Arazi bilgileri.....	74
4.4.2 Vakanın sayısal analizi .....	79
BÖLÜM V .....	87
SONUÇLAR.....	87
KAYNAKLAR .....	90
ÖZ GEÇMİŞ.....	101



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Malzeme nitelik oranları.....	19
Çizelge 3.2. Taş kolon tipine göre kullanılan ekipman ve çapları.....	21
Çizelge 3.3. Düşey drenlerin eşdeğer çap dönüşümleri.....	39
Çizelge 4.1. Taş kolon ve zemin parametreleri ( $E_c/E_u$ etkisi).....	56
Çizelge 4.2. Taş kolon ve zemin parametreleri ( $\phi_c$ etkisi) .....	59
Çizelge 4.3. Taş kolon ve zemin parametreleri ( $D_c$ etkisi) .....	61
Çizelge 4.4. Taş kolon ve zemin parametreleri ( $L_c$ etkisi).....	63
Çizelge 4.5. Taş kolon ve zemin parametreleri ( $s$ etkisi).....	65
Çizelge 4.6. Zemin parametreleri ( $k_h/k_s$ etkisi).....	69
Çizelge 4.7. Zemin parametreleri ( $k_h/k_s$ etkisi).....	69
Çizelge 4.8. Literatürde yer alan $r_s/r_m$ oranları .....	73
Çizelge 4.9. Zeminin fiziksel ve mekanik parametreleri .....	76
Çizelge 4.10. Düşey drenler için kullanılan zemin parametreleri.....	80
Çizelge 4.11. Taş kolon parametreleri .....	82
Çizelge 4.12. Taş kolonların analizi için kullanılan zemin parametreleri .....	82

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Eşkenar üçgen tasarımı .....	20
Şekil 3.2. Kare tasarım.....	20
Şekil 3.3. Radyal yerleşim .....	21
Şekil 3.4. $\mu_s=1/3$ için iyileştirme faktörü - alan oranı grafiği .....	25
Şekil 3.5. $\mu_s =1/3$ için alan düzeltme ve kolon sıkışabilirlik oranları .....	27
Şekil 3.6. Derinlik Faktörü Tayini .....	29
Şekil 3.7. Derinlik faktörü limit değerleri.....	30
Şekil 3.8. Taş kolon modelinin tanımlanması.....	32
Şekil 3.9. Düşey drenlerin çalışma mekanizması .....	38
Şekil 3.10. Düşey dren kesiti .....	39
Şekil 3.11. Düşeylerin yerleşim düzeni .....	40
Şekil 3.12. Düşeylerin yerleşim düzeni .....	41
Şekil 3.13. Örselenme etkisi .....	41
Şekil 3.14. Düşey dreni çevreleyen örselenmiş bölgenin kesiti .....	42
Şekil 3.15. Birim hücre yaklaşımı. (a) plan (b) birim hücre (c) kesit .....	45
Şekil 3.16. Taş kolonların eşkenar üçgen dizilimi (a) plan, (b) geometrisi .....	46
Şekil 3.17. Karma sistemde kolon-zemin arasındaki yük paylaşımı .....	49
Şekil 4.1. Tekil taş kolonun birim hücre modeli .....	55
Şekil 4.2. Taş kolon rijitliğinin zamana bağlı oturmaya etkisi .....	57
Şekil 4.3. Taş kolon rijitliğinin oturma azaltma faktörü ile değişimi .....	57
Şekil 4.4. Taş kolon rijitliğinin iyileştirme faktörü ile değişimi.....	58
Şekil 4.5. $\mu_c$ 'nin zamana bağlı oturmaya etkisi .....	59
Şekil 4.6. $\mu_c$ değerinin oturma azaltma faktörüyle değişimi.....	60
Şekil 4.7. $\mu_c$ değerinin iyileştirme faktörüyle değişimi .....	60
Şekil 4.8. Kolon çapının zamana bağlı oturmaya etkisi .....	61
Şekil 4.9. Kolon çapının oturma azaltma faktörü ile değişimi .....	62
Şekil 4.10. Kolon çapının iyileştirme faktörü ile değişimi .....	62
Şekil 4.11. Kolon boyunun zamana bağlı oturmaya etkisi .....	63

Şekil 4.12. Kolon boyunun oturma azaltma faktörü ile değişimi .....	64
Şekil 4.13. Kolon boyunun iyileştirme faktörü ile değişimi.....	64
Şekil 4.14. Kolonlar arası mesafenin zamana bağlı oturmaya etkisi .....	66
Şekil 4.15. Kolonlar arası mesafenin oturma azaltma faktörü ile değişimi.....	66
Şekil 4.16. Kolonlar arası mesafenin iyileştirme faktörü ile değişimi .....	67
Şekil 4.17. Düşey drenin birim hücre modeli .....	68
Şekil 4.18. $k_h/k_s$ oranının zamana bağlı oturmaya etkisi .....	70
Şekil 4.19. Düşey dren boyunun zamana bağlı oturmaya etkisi.....	71
Şekil 4.20. Düşey drenler arasındaki mesafenin zamana bağlı oturmaya etkisi.....	72
Şekil 4.21. Örselenmiş bölge büyüklüğünün zamana bağlı oturmaya etkisi .....	73
Şekil 4.22. Arazinin yer aldığı bölge .....	74
Şekil 4.23. Deney sahası .....	74
Şekil 4.24. Araziye ait zemin profili.....	75
Şekil 4.25. Zemin profili.....	76
Şekil 4.26. Araştırma bölgeleri .....	78
Şekil 4.27. Pilot araştırma sahaları (a), araştırma alanlarının kesiti (b) .....	78
Şekil 4.28. Vaka analizindeki düşey drenlerin birim hücre modeli.....	80
Şekil 4.29. 1.5m aralıklı düşeylerin arazi ölçümleri ve sayısal analizinin karşılaştırılması .....	81
Şekil 4.30. 2m aralıklı düşeylerin arazi ölçümleri ve sayısal analizinin karşılaştırılması .....	81
Şekil 4.31. Vaka analizindeki taş kolonların birim hücre modeli.....	83
Şekil 4.32. Taş kolon çapının vaka arazisinde incelenmesi.....	84
Şekil 4.33. 1.5m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması .....	85
Şekil 4.34. 2m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması .....	86

## FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Taş kolon uygulaması .....	3
Fotoğraf 1.2. Düşey dren .....	4
Fotoğraf 1.3. Düşey drenlerin inşası .....	4



## SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$D_c$	Taş kolonun çapı
$S$	Kolonun merkezinden diğer kolonun merkezine olan mesafe
$\nu_s$	Zeminin poisson oranı
$\nu_c$	Taş kolonun poisson oranı
$A_r$	Taş kolon alanının etki bölgesi alanına oranı
$E_{m,c}$	Kolonun ödometrik elastisite modülü
$E_{m,s}$	Zeminin ödometrik elastisite modülü
$K_{ac}$	Taş kolon malzemesinin aktif itki katsayısı
$A_c$	Taş kolon alanı
$A$	Toplam alan
$f_d$	Derinlik faktörü
$W_s$	Zeminin ağırlığı
$W_c$	Taş kolon malzemesinin ağırlığı
$P_c$	Temelden dolayı taş kolona etkileyen yük
$P_s$	Temelden dolayı zemine etkileyen yük
$P$	Temel yükü
$K_{oc}$	Taş kolon malzemesinin sükünetteki toprak basıncı katsayısı
$D$	Taş kolon malzemesinin tek boyutlu sıkışma modülü
$D_s$	Zeminin tek boyutlu sıkışma modülü
$c_r$	Radyal akış durumundaki konsolidasyon katsayısı
$c_v$	Düşey akış durumundaki konsolidasyon katsayısı
$u$	Zemin içindeki bir (r,z) noktasında meydana gelen boşluk suyu basıncı
$\bar{u}$	Zemindeki z derinliğinde ortalama boşluk suyu basıncı
r ve z	Şekil 3.8'de yer alan zemin koordinatları
t	Zaman
$u_z$	Düşey akış ile meydana gelen boşluk suyu basıncı
$u_r$	Radyal akış ile meydana gelen boşluk suyu basıncı
$u_0$	Başlangıç boşluk suyu basıncı

$T_r$	Radyal akış durumunda zaman faktörüdür.
$d_c$	Dren çapı
$d_e$	Drenden etkilenen bölgenin çapı
$\mu_s$ ve $\sigma_c$	Kolon etrafındaki zemin ve taş kolonun taşıdığı ortalama toplam gerilme
$A_c$ , $A_s$	Kolon ve zeminin kesit alanı
$m_{v,c}$	Taş kolonun hacimsel sıkışma katsayısı
$m_{v,s}$	Taş kolon etrafındaki zeminin hacimsel sıkışma katsayısı
$V$	Silindir zemin kitlesinin hacmi
$A_s$	Birim hücredeki zeminin alanı
$k_r$	Zeminin radyal doğrultudaki permeabilite katsayısı
$k_v$	Zeminin düşey doğrultudaki permeabilite katsayısı
$\gamma_w$	Suyun birim ağırlığı
$a_s$	Alan değişim oranı
$c'_r$	Radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
$c'_v$	Düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı
$T'_r$	Radyal akış için modifiye zaman faktörü
$T'_v$	Düşey akış için modifiye zaman faktörü
$N$	Çap oranı ( $d_e/d_c$ )
$n_s$	Denge durumundaki dağılım faktörü
$\zeta$	Poisson oranı faktörü
$E_c$	Taş kolonun elastisite modülü
$E_s$	Taş kolon etrafındaki zeminin elastisite modülü
$k_s$	Örselenmiş bölgenin permeabilitesi
$S$	Örselenmiş bölgenin büyüklüğü
$a$	Dren genişliği
$b$	Dren kalınlığı
$d_w$	Eşdeğer dren çapı
$U_h$	Ortalama yanal konsolidasyon derecesi
$c_h$	Radyal konsolidasyon katsayısı
$d_e$	Zemin silindirinin çapı
$\mu$	Örselenme ve kuyu direnci faktörü
$d_w$	Düşey drenin eşdeğer çapı
$d_s$	Örselenme bölgesinin çapı

$l$	Dren boyu
$q$	DüŖey drenin deŖarj kapasitesi
$z$	Düzlem deformasyon koŖullardaki yatay düzlem derinliği
$k_h$	ÖrselenmiŖ bölgedeki yatay permeabilite katsayısı
$k$	ÖrselenmemiŖ bölgedeki yatay permeabilite katsayısı
$A_c$	SıkıŖtırmadan sonra taŖ kolonun alanı
$c_1$	TaŖ kolon dizilimine göre bulunan sabit bir katsayı
$\sigma_c$	TaŖ kolona etkiyen gerilme
$\sigma_s$	Zemine etkiyen gerilme
$\mu_c$	TaŖ kolondaki gerilme oranı
$B$	Düzlem Ŗekil deđiŖtirme koŖullarındaki birim hücrenin yarı geniŖliđi
$R$	Eksenel simetrik birim hücrenin yarı geniŖliđi
$r_w$	Drenin yarıçapı
$r_s$	ÖrselenmiŖ bölgenin yarıçapı
$k$	Doğal zeminin yatay permeabilitesi
$k_s$	ÖrselenmiŖ bölgenin yatay permeabilitesi
$k_{pl}$	Düzlem Ŗekil deđiŖtirme koŖullarındaki permeabilite
$k_{ax}$	Eksenel simetrik koŖullarındaki permeabilite
$r_e$	Birim hücrenin yarıçapı
$r_m$	EŖ değer mandrel yarıçapı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
MC	Mohr Coulomb
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SS	Soft Soil

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Yeryüzündeki hızlı nüfus artışından dolayı günümüzde inşaat sektörü için yer sıkıntıları yaşanmaktadır bu durum sonucunda ise mühendislik özellikleri bakımından yetersiz durumda olan zeminlerde yapılaşmaya mecbur kalınmaktadır. Bu tür sorunlu zeminlerde ise çeşitli yöntemlerle zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirmesi yoluna gidilmektedir.

Zayıf zeminlerin düşük taşıma gücü ve aşırı oturma özelliği, bu tür zeminler üzerine inşa edilecek yapılarda önemli hasarlara neden olabilmektedir. Zayıf zemin şartlarına sahip sahalarda inşa edilecek yapılarda geleneksel temel inşaatı yöntemleri pahalıya mal olmakta ve ekonomikliğini kaybetmektedir. Bu tür zeminlerde geleneksel yöntemler ile yapılan inşaat maliyetinin yüksek olması, çevre faktörlerinin oluşturduğu sayısız sıkıntılar ve bunların aşılmasındaki güçlükler nedeniyle oldukça dikkatli olunması gerekmektedir.

Zayıf zemin koşullarına sahip uygulama alanlarında inşaat öncesinde zemin ve yapının durumu düşünülerek uygun bir derin temel uygulaması seçilmeli ya da temel zemininde zemin iyileştirme yöntemi uygulanmalıdır. Derin temel uygulamaları pahalı bir çözüm olduğu için uygun bir yöntem ile temel zeminin iyileştirilmesi daha efektif bir çözüm yöntemi olabilmektedir. Zemin iyileştirmesi; mühendislik açısından yetersiz zeminin çeşitli uygulamalar sonucunda kullanılabilir hale getirilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Zayıf zeminlerde yerinde zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanılması son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Uygulama özellikle 1950'li yıllardan sonra Geoteknik mühendisliğinin en önemli uygulama alanlarından biri haline gelmiş olup, bu alanda birçok farklı iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. İyileştirme yönteminin seçiminde güvenilirlik, uygulanabilirlik ve ekonomi gibi birçok parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler;

### **Yüzeysel Zemin İyileştirme Yöntemleri**

- ✓ Kompaksiyon

- ✓ Kireçle stabilizasyon
- ✓ Çimento stabilizasyonu
- ✓ Bitümle stabilizasyon

### **Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri**

- ✓ Patlatma kompaksiyonu
- ✓ Dinamik kompaksiyon
- ✓ Düşey drenler
- ✓ Elektro-osmoz
- ✓ Isıtma-dondurma
- ✓ Taş kolonlar
- ✓ Kompaksiyon kazıkları
- ✓ Derin Karıştırma
- ✓ Enjeksiyon

### **Diğer Zemin İyileştirme Yöntemleri**

- ✓ Geotekstil Serme
- ✓ Kazma ve Değiştirme

Bu tez çalışması kapsamında zayıf zemin tabakalarının yerinde iyileştirilmesi için kullanılan yöntemlerden düşey dren ve taş kolon yöntemleri incelenmiştir. Bu çalışmada her iki yöntemin de en temel özelliği olan zamana bağlı konsolidasyon (oturma) davranışı incelenmiştir. Çünkü oturma davranışı yapılarda önem arz eder ve yapılarda hasara sebep olan birincil faktörlerdendir. Oturma davranışı ani oturma ve konsolidasyon oturması olarak iki bileşenden oluşur. Ani oturmalar inşaat süresince yapı yükünün zemine etkisi ile oluştuğu için bazı özel zeminler dışında tehlike arz etmez. Konsolidasyon oturması ise zamana bağlı meydana geldiği için tamamlanması uzun süreler almaktadır. Yapılarda meydana gelen hasarlar çoğu kez konsolidasyon oturması ile zamana bağlı olarak gerçekleşir.

Taş kolonlar genellikle sorunlu zemin olarak nitelendirilen yumuşak veya gevşek zeminler üzerine inşa edilecek yapıların temel zeminini iyileştirmek için uygulanan bir zemin iyileştirme yöntemidir (Fotoğraf 1.1). Taş kolon yönteminin en efektif kullanımı drenajsız kayma mukameti 7-50 kPa değerine sahip yumuşak kil zeminlerde

görülmektedir (Barksdale ve Bachus, 1983). Taş kolonlar, özellikle demir ve kara yolu dolgusu, çok katlı olmayan binalar gibi hafif yapıların altındaki zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır (Cimentada ve Da Costa, 2009).

Taş kolonlar genellikle zeminin taşıma gücünün artırılması, yumuşak zeminlerde radyal permeabilite ile ilave boşluk suyu basınçlarının hızlı bir şekilde sönmülmesinin sağlanması ve bu şekilde zeminde meydana gelen birincil konsolidasyonun hızlandırılması, kolonun yüksek rijitlik modülü nedeniyle zeminde düşey gerilmelerin taş kolonlar tarafından karşılanması sonucunda oturmaların azaltılması, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve şev stabilitesinin artırılması gibi farklı amaçlar için kullanılır. Hem ekonomik olması hem de pratik uygulama kolaylığı nedeniyle taş kolonlar günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat ülkemizde çok bilinen bir yöntem olmadığı için sınırlı sayıdaki projede bu uygulama yapılmıştır.



**Fotoğraf 1.1.** Taş kolon uygulaması (Uysal, 2016)

Düşey drenler kullanılarak uygulanan ön yükleme yönteminde, zemin konsolidasyonunun hızlandırılarak meydana gelecek olası oturmaların azaltılması, kayma mukavemetinin ve taşıma gücünün artırılması amaçlanmaktadır. Bu yöntem, zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan diğer uygulamalar içinde ekonomi ve uygulanabilirlik açısından oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Düşey drenler özellikle yüksek su muhtevasına sahip, kohezyonlu, düşük dayanıma sahip yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Düşey drenler, zemin içindeki suyun drenaj yolunu düşeyden yanala doğru kısaltarak, birincil konsolidasyonu hızlandırmaktadır. Bu şekilde uzun süreler devam eden konsolidasyon sürecinin daha uygun sürelerde tamamlanmasına olanak sağlanmaktadır. Düşey drenler çapları 5 cm ve 10 cm arasında olan prefabrike

bant drenlerin, içi boş bir mandrel vasıtasıyla zemin içerisine sürülmesi şeklinde inşa edilir (Fotoğraf 1.3).



**Fotoğraf 1.2.** Düşey dren (URL-2, 2019)



**Fotoğraf 1.3.** Düşey drenlerin inşası (URL-3, 2019)

Zamana bağlı oturma problemleri yapılar için sorun yaratan önemli faktörlerdendir. Olası oturmaların tahmin edilip, bu yönde tedbirlerin alınması uygulama mühendisleri için çoğu zaman sorun teşkil etmektedir.

Taş kolonlar ve prefabrik düşey drenler çalışma prensibi olarak benzerdir. Her iki yöntemde de zemin içindeki drenaj yolunu kısaltmakta ve zamana bağlı meydana gelen

oturmalar hızlandırılmaktadır. Bu iki yöntem de gerek ekonomi gerek ise de uygulama kolaylığı ile alternatif uygulama yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında her iki iyileştirme yönteminin de özellikle oturmaların azaltılması konusunda sağladığı avantajlar irdelenmiştir. Ayrıca bu iki yöntemin karşılaştırılması örnek bir vaka üzerinde yapılarak, yöntemler arası benzerlik ve farklılıklar belirtilerek, yöntem seçimi hakkında çeşitli öneriler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizler ile bu uygulama yöntemlerinin ulusal ölçekte anlaşılmasına yardımcı olunacaktır. Bu tez çalışmasına ait bölümler aşağıda verilmiştir.

**Bölüm 2'de**, taş kolon ve düşey drenli zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili analitik ve sayısal (nümerik) çalışmaların detaylı literatür araştırmasına yer verilmiştir.

**Bölüm 3'de**, bu her iki zemin ıslah yönteminin özellikle konsolidasyon davranışına etkisi için geliştirilen analitik ve sayısal yöntemler araştırılmıştır.

**Bölüm 4'te**, sayısal çalışmalar ve vaka analizi başlığı altında ilk olarak taş kolonlar ve düşey drenler için tasarımda önem arz eden bazı parametrelerin zamana bağlı oturma davranışındaki performansları parametrik olarak incelenmiştir. İkinci kısımda, düşey dren inşa edilmiş bir vaka analizi üzerinde sayısal olarak taş kolon uygulaması yapılarak, bu arazide taş kolonlu durum analiz edilmiştir. Her iki yöntem için de birim hücre yöntemi ile tek bir taş kolon ve düşey dren analiz edilmiştir. Sayısal çalışmalar kapsamında sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. İki boyutlu eksenel simetrik olarak kurulan modeller ile her iki yöntemin zamana bağlı oturmalar açısından gösterdiği iyileştirme etkisi incelenerek, bu yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır.

**Bölüm 5'te** ise, tez kapsamında yapılan tüm çalışmaların sonucundaki bulgular değerlendirilmiş olup elde edilen sonuçlar, *Sonuçlar ve Öneriler* başlığı altında sunulmuştur.

## BÖLÜM II

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1. Giriş

Taş kolon ve düşey dren yöntemleri yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi amacı ile sıkça kullanılan iyileştirme yöntemlerindedir. Bu yöntemler çok eski tarihlerden günümüze kadar ilgi görmekle birlikte, analitik, sayısal ve uygulamalı (laboratuvar ve arazi) çalışmalar ile günümüzde de araştırılmaktadır. Bu bölümde taş kolon ve düşey dren uygulamalarına yönelik yapılan detaylı literatür araştırma sonucu sunulmaktadır.

#### 2.2. Taş Kolonlar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

##### **Juran vd. (1988)**

Bu çalışmada zeminlerin iyileştirme yöntemleri karşılaştırılmalı olarak incelenerek taş kolonların temel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Taş kolonların yerleşim aralıkları, alan değiştirme oranlarından da bahsedilmiştir. Taş kolon uygulamalarında alan değiştirme oranının genellikle %20 ve %40 arasında değiştiği ifade edilmiştir. Taş kolonların alan değiştirme oranının %15'den az olduğu durumlarda, düşük yüklemelerde konsolidasyonu hızlandırmak ve farklı oturmaları azaltmak amacıyla kullanıldığı vurgulanmıştır.

##### **Andreou ve Papadopoulos (2006)**

Çalışmada yumuşak kil zeminde inşa edilen taş kolonlar sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak modellenmiştir. Çalışmadaki temel amaç taş kolon uygulamasında önem arz eden tasarım parametrelerinin etkisini incelemektir. Çalışma parametrik olarak yapılmış olup birim hücre yöntemi esas alınmıştır. Yapılan analizlerde gerilme dağılımı, alan yer değiştirme oranı, kolon ve zeminin dayanım parametreleri ve yatay deplasmanlar incelenerek sonuçlar sunulmuştur.

**Wehr ve Herle (2006)**

Çalışmada, ince daneli zemin üzerinde yer alan ve yüksekliği 9m olan bir dolgu davranışı analitik ve sayısal olarak araştırılmıştır. Araştırmada tamamen gömülü olmayan 0.9m çap ve 6m boyundaki taş kolonlar üçgen dizilim şeklinde tasarlanmıştır. Çalışmanın analitik kısmında Pribe (1995) ve Balaam-Booker (1981) yaklaşımları kullanılmıştır. Sayısal analizler ise Plaxis 2D programı ile düzlem deformasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmalar neticesinde taş kolonların, zemin konsolidasyonunu 16 gün gibi kısa bir sürede tamamlanmasını sağladığı ve oturmaları yaklaşık %40 oranında azalttığı görülmüştür.

**Han vd. (2007)**

Bu çalışmada, sekiz adet taş kolon destekli genişletilmiş dolgu ve iki adet iyileştirilme uygulanmamış vaka analizleri sunulmuştur. Çalışmada iki boyutlu sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, temel dolgusunun kolonlarla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumları yumuşak zemin üzerindeki gerilmeler ve deformasyonlar ile sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada düşey ve yatay deplasmanlar, maksimum oturma ve genişlemenin neden olduğu ilave gerilmeler gibi parametreler araştırılmıştır. Çalışma ile dolguların genişlemesinden dolayı oluşacak olan problemlerin giderilmesi için taş kolonların kullanılabilmesi belirtilmiştir.

**Saroglou ve Pateras (2008)**

Yunanistan'da yapılması planlanan bir otoyol inşası için elverişsiz zemin koşullarının iyileştirilmesi çalışması taş kolonlar ile yapılmıştır. Çalışmada 3m yüksekliğinde dolgu ve 14m uzunluğunda taş kolonlar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda oturma süresinin 12 ay daha azaldığı ve toplam oturma miktarının da 14cm'den 7cm'ye kadar düştüğünü tespit edilmiştir.

**Zahmatkesh ve Choobbasti (2010)**

Bu çalışmada taş kolonların yumuşak kil zeminin oturmasına etkisi araştırılmıştır. Sayısal analizlerde Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmış ve analizler Plaxis programı yardımıyla yapılmıştır. Çalışmada zemindeki yanal gerilme artışı taş kolon uygulaması yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra hesaplanarak gerilme azalma oranı, SRR (settlement reduction ratio) tanımlanmıştır. Yumuşak kil zeminde taş kolon ve zemin

arasındaki gerilme farkının taş kolon uygulamasından sonra taş kolonların aralarındaki mesafelere de bağı olarak önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

#### **Castro ve Sagasetta (2011)**

Bu çalışmada taş kolon uygulaması ile iyileştirme yapılmış zeminde, taş kolonun etrafını saran zeminin konsolidasyon davranışı ve oluşan deformasyonlar araştırılmıştır. Çalışmada birim hücre modeli esas alınarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak farklı analiz türleri ve zemin modellerinin performansları değerlendirilmiştir.

#### **Mirsalehi ve Bilsel (2012)**

Çalışmada dolgu altında kalan alüvyon zemine grup taş kolon uygulanmıştır. Plaxis bilgisayar programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle zeminin konsolidasyon süresi, boşluk suyundaki basınç değişimi ve düşey oturmalar araştırılmıştır. Taş kolon ve dolgu için drenajlı, dolgu altındaki zemin için drenajsız 500 günlük analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda ise oturma ve konsolidasyon süresi açısından imal edilecek en elverişli taş kolon uzunluğunun 15m ve aralarındaki uzaklığın 1.5m olduğu tespit edilmiştir.

#### **Zhang vd. (2012)**

Çalışmada, geosentetik ile kaplı taş kolonlarla güçlendirilmiş temellerin konsolidasyonunun hesaplanması için teorik bir çözüm geliştirilmiştir. Yöntemde kolonun ve kolon etrafındaki zeminin hacimsel deformasyonları yazarlar tarafından önceden hesap edilerek, kolon ve zemin içindeki yatay ve düşey yönlü akışlar bu çözümde dikkate alınmıştır. Geosentetiksiz çözümün ise, mevcut çözümün yeniden uyarlayıp sonuçlarının karşılaştırılması ile elde edileceği belirtilmiştir. Ayrıca, geosentetiklerin kompozit zeminin konsolidasyonuna etkisi araştırılmış ve elastik durumda, geosentetiklerin kompozit zeminin konsolidasyonunu hızlandırmada ihmal edilebilir bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

#### **Adeli (2013)**

Bu çalışmada bir arazide yapılması planlanan grup taş kolonların analizi hem analitik hem de sayısal yöntemlerle araştırılıp değerlendirilmiştir. Analizlerde birim hücre modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kolonda kullanılan malzemenin kayma

mukavemeti açısı  $40^0$  den fazla, rijitlik modülü oranı ise ( $E_c/E_s$ ) 10'dan fazla olmalıdır sonucuna varılmıştır.

### **Sexton ve McCabe (2013)**

Bu çalışmada, çeşitli iyileştirme faktörlerini tespit etmek için Plaxis 2D kullanılarak, bir tanesi krip davranışını modelleyen farklı zemin modelleri ile iki boyutlu eksenel simetrik analizler yapılmıştır. Oturma iyileşme faktörünün tahmini için, iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. İlk yaklaşımda, biri krip davranışını esas alan iki modelin karşılaştırılması yapılırken, ikinci yaklaşımda sadece krip davranışını esas alan model kullanılmıştır. Oturma iyileştirme faktörü, farklı alan-yer değiştirme oranları, modüler oran ve kolon boyları üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, birincil oturma iyileştirme faktörlerinin popüler analitik tasarım yöntemlerinden bazıları ile uyum içinde olduğu, ancak krip oturma iyileşme faktörleri ile eşdeğer (kullanılan yaklaşıma bağlı olarak) veya daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, birincil yerleşim iyileştirme faktörleri modüler oran ile bağımlılık gösterirken, krip oturma iyileştirme faktörünün göreceli olarak bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

### **Castro vd. (2014)**

Çalışmada, taş kolonların doğal yumuşak kilde meydana getirdiği oturma azalmaları sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmada esas olarak taş kolonun imalatından dolayı yumuşak zeminde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Analizlerde taş kolonlar birim hücre kavramı esas alınarak eksenel simetrik olarak modellenmiştir. Bothkennar kili, anizotropi ve yeniden bağlanmanın hesaba katıldığı S-CLAY1 ve S-CLAY1S zemin modelleri kullanılarak modellenmiştir. Modifiye Cam kili modeli de karşılaştırma yapmak amacı ile kullanılmıştır. Sonuç olarak, radyal ve ortalama gerilmedeki artışlar gibi arazide meydana gelen değişimlerin yüksek yükleme ve yakın kolon aralıkları durumları için olumlu olurken, düşük yük mertebelerinde, geniş kolon aralıklarında ve aşırı konsolide zemin durumlarında olumsuz yönde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, zemin dokusundaki yönelimin zeminde meydana gelen oturmayı azalttığı, kolon imalatı esnasında zeminde meydana gelen bozulmanın ise iyileştirmeyi azalttığı belirtilmiştir.

### **Sexton vd. (2014)**

Çalışmada, tamamen gömülü taş kolonların oturma tahmini için kullanılan ve Plaxis 2D eksenel simetrik analiz ile uyum içerisinde olan en yaygın yöntemler için kapsamlı bir

araştırma yapılmıştır. Hem kolon malzemesi hem de iyileştirilen yumuşak zemin için Hardening Soil Model (Pekleşen Zemin Modeli) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, büyük modüler oranlarda elastik oturma tahmin yöntemlerinin aşırı büyük sonuçlar verdiği, elasto-plastik tahmin yöntemlerinin ise sonlu eleman tahminleri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, bazı tasarım parametrelerinin etkisini belirlemek için parametrik çalışmalar yapılmıştır.

#### **Ayhan (2016)**

Çalışma Kocaeli İli Başiskele İlçesinde yapılmıştır. Zemin iyileştirmesi gerekli bir arazide taş kolon ve fore kazık uygulamaları yapılarak zemindeki iyileşme dereceleri karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda iyileştirme öncesi ve sonrasında elde edilen değerler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Plaxis programı ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmaya göre üst yapı yükü çok fazla olmayan yapılarda düşük maliyeti, uygulama kolaylığı ve suyu drene etme gibi özelliklerinden dolayı taş kolon imalatının uygun olacağı önerilmiştir.

#### **Das ve Deb (2018)**

Çalışmada, dolgu yükü altında taş kolon ile iyileştirilmiş zeminin laboratuvar model deneyleri ve üç boyutlu sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, taş kolon ve zemin üzerinde meydana gelen gerilme değişimleri farklı kolon çap ve aralıkları için ölçülmüştür. Ayrıca sonlu farklar yazılımı ile zamana bağlı meydana gelen oturma, gerilme ve boşluk suyu basıncındaki değişimler hesaplanmıştır. Sayısal analizlerde taş kolon ve kum dolgu için Mohr-Coulomb, yumuşak kil için ise Cam kili zemin modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak dolgu yüzeyinde farklı oturma meydana gelmemesi için en az dolgu yüksekliğinin taş kolonlar arası mesafenin iki katından fazla olması gerektiği tespit edilmiştir. Taş kolonlarda meydana gelen en fazla yanal deformasyonunda taş kolon çapının yaklaşık 2.5 katında olduğu gözlemlenmiştir.

#### **Gaber vd. (2018)**

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini esas alan Plaxis 2D programı ile tekil bir taş kolon, birim hücre ve düzlem deformasyon yaklaşımları kullanılarak analiz edilmiş ve bu iki analizin performansları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda taş kolonun çapı, kolonlar arasındaki mesafe, taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı ve yumuşak zeminin drenajsız kayma mukavemeti parametreleri araştırılmıştır. Ayrıca, zeminin oturma

faktörü ve aşırı boşluk suyu basıncı değerleri de tasarım parametreleri kapsamında araştırılmıştır. Çalışmada düzlem deformasyon modelinde oturma faktörünün 2.2 ile 3.2 arasında değiştiği, bu durumda oturmanın iki katından daha fazla iyileştirildiği vurgulanmıştır. Birim hücre modelinde ise, oturma faktörünün 1.53'ü geçmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, oturmadaki iyileştirme değerleri, taş kolonlar için yaygın olarak kullanılan teorik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Birim hücre modeli ile elde edilen aşırı boşluk suyu basıncı değerlerinin düzlem deformasyon ile elde edilenlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

#### **SivaSankara Reddy vd. (2018)**

Bu çalışmada dolgu altında grup taş kolonlarla iyileştirilmiş zeminin performansı; Plaxis 2D programı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Özellikle taş kolonların yumuşak zeminin konsolidasyonuna etkisi ele alınmıştır. Bu kapsamda düşey efektif gerilmelerdeki artış, konsolidasyon süresi ve aşırı boşluk suyu basıncı parametreleri araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle, taş kolon kullanımının etkinliğinden bahsedilmiştir. Daha sonra; kil tabakasının ve dolgunun yüksekliği, taş kolonların boy değişimi ve alan değiştirme oranının etkisini incelemek için bir takım parametrik çalışmalar yapılmıştır.

#### **Sharma vd. (2019)**

Bu çalışmada, taş kolonların killi bir zeminin konsolidasyon özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Taş kolonun görelî alanının konsolidasyon özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için standart proktor ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonunda taş kolonun artan çekirdek alanının, killi zemine taş kolon uygulandığındaki boşluk oranı ve bu oranının değişimini, kompozit malzemenin sıkışma katsayısını, kompozit zeminin hacim değişim katsayısını, konsolidasyon katsayısını, sıkışma indisini ve konsolidasyonun %90'nun gerçekleşmesi için gereken zamanı etkilediği belirtilmiştir.

#### **Verma ve Jain (2019)**

Çalışmada, Polavaram'daki Godavari Nehri boyunca inşa edilen bir toprak dolgu altına yerleştirilen taş kolonların performansı araştırılmıştır. Oturma tahminleri denge yöntemi (azaltılmış gerilme yöntemi) ve Priebe Metodu kullanılarak yapılmıştır. Priebe yöntemi ile oturma azaltma faktörü değeri 0.528 elde edilirken, denge yönteminde bu değeri 0.863 olarak tespit edilmiştir. İyileştirilmemiş zeminde beklenen oturmanın 3m büyüklüğünde

olduğu belirtilerek, iyileştirme neticesinde bu değerin 1.58m ile 2.59m mertebelerinde elde edilebileceği vurgulanmıştır.

### **2.3. Düşey Drenler ile İlgili Yapılan Çalışmalar**

#### **Hansbo (1981)**

Çalışmada, düşey drenlerin kuyu direnci ve örselenme etkisinin de değerlendirildiği ince daneli zeminlerin konsolidasyonu için geliştirilen bir çözüm yöntemi sunulmaktadır. Bu çözüm sonucu elde edilen sonuçlar, mevcut karmaşık çözüm yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı dren türlerinin tahliye kapasitesi ve örselenme etkisini değerlendirmek için de parametrik çalışmalar yapılmıştır. Prefabrik ve bant şeklinde olan drenlerin performansları tartışılarak, performansları kum drenler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, laboratuvar deneyleri ile farklı prefabrik drenlerin deşarj kapasiteleri araştırılarak filtre gereksinimleri analiz edilmiştir.

#### **Hird vd. (1995)**

Çalışmada, yeni geliştirilen ve düşey drenlerin performanslarını düzlem deformasyon koşullarda sonlu elemanlar yöntemi ile analiz eden çözüm yöntemi, yumuşak zemin üzerine inşa edilmiş üç farklı vaka analizinde kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizlerde yanal deformasyona izin verilmeyen birim hücre modeli kullanılmıştır. Her üç vaka analizinde de aksenal simetrik ve eş değer düzlem deformasyon koşullarında yapılan analizler ile edilen konsolidasyon derecesinin uyumlu olduğu görölmüştür. Bu çözümlerin dolguların iki boyutlu analizinde kullanılabilceği belirtilmiştir.

#### **Indraratna ve Redana (1997)**

Çalışmada, düşey drenlerin örselenme etkisini araştırmak için Modifiye Cam kili zemin modeli kullanılarak yapılan iki boyutlu düzlem deformasyon analizleri sunulmaktadır. Örselenme etkisinin araştırılması için, Malezya yumuşak kilinde yapılan deneylerin doğruluğu araştırılmıştır. Analizlerde örselenmiş bölgenin yarıçapı ve permeabilitesi eş değer düzlem deformasyon koşullarına dönüştürölmüştür.

#### **Indraratna vd. (1999)**

Bu çalışmada, İkinci Bangkok Uluslararası Havaalanının yapılacağı yumuşak kil zeminini iyileştirmek için yapılan düşey dren uygulamasında meydana gelen oturmadaki

azalmayı, örselenme etkisini de hesaba katarak değerlendirmek için yapılan büyük ölçekli üç tane dolgunun performans değerlendirmesi sunulmuştur. Analizlerde, klasik eksenel simetrik koşulların iki boyutlu düzlem deformasyon koşullarına dönüştürüldüğü yöntem kullanılmıştır. Analizler neticesinde dolgunun merkezinde yer alan tekil drenlerde örselenme etkisinin hesaba katılmasının önemli olduğu vurgulanmıştır.

#### **Lin vd. (2000)**

Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilen eşleştirme şemaları birim hücre yaklaşımı ve tam ölçekli prefabrik düşey dren analizlerinde kullanılmıştır. Kuyu direncini hesaba katarak düşey drenin permeabilitesini modellemek için ara yüz elemanı kullanılmıştır. Örselenme etkisini hesaba katmak için ise, tanımlanan akış koşullarında eşdeğer permeabilite tanımlanmıştır. Önerilen eşleşme yöntemi ile yapılan eksenel simetrik birim hücre analizleri ile teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Ayrıca iki tabakalı birim hücre modelleri de teorik çözüm yöntemleri ile karşılaştırılmış ve oldukça iyi bir uyum yakalanmıştır.

#### **Hawlder vd. (2002)**

Düşey drenler ile iyileştirilen kil zeminin konsolidasyonunda değişkenlerin etkisini belirlemek için parametrik çalışma yapılmıştır. Killerin konsolidasyonunda, drenaj uzunluğu ve kilin yapısal akışkanlığının etkisini göz önünde bulunduran temel bir model geliştirmiştir. Bu modelde konsolidasyon katsayısı kullanmak yerine permeabilite ve sıkışabilirlik kullanılmıştır. Konsolidasyon sırasında örselenmiş bölgenin etkisi araştırılmıştır. Killerin akışkanlığının geniş aralıklı drenler için önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Konsolidasyonun gerçekleşme süreci dren etrafında merkeze en yakın örselenmiş bölge tarafından kontrol edilmekte olduğu, merkeze daha uzak olan örselenmiş bölgenin etkisinin daha az olduğu sonucuna varılmıştır

#### **Borges (2004)**

Düşey drenler kullanılarak yumuşak zemin üzerindeki dolgu davranışını analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal bir model oluşturulmuştur. Bu model düşey drenli ve drensiz dolgular üzerinde uygulanmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, düşey drenlerin toplam konsolidasyon süresini yaklaşık 5000 günden 500 güne indirerek olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yapılan analizlerde dolgu inşaat süresi sonunda maksimum oturmanın, düşey dren kullanılmaması durumunda 8.4cm iken düşey dren

kullanılması durumunda 13.8cm olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak da düşey drenlerin zeminin boşluk oranını azaltarak temel zemininin özelliklerinde iyileştirme sağladığı vurgulanmıştır.

#### **Chu vd. (2004)**

Çalışma Singapur'un Doğu Changi bölgesinde yapılmıştır. Bölgeye zemin iyileştirme projesi kapsamında 140 milyon metreden fazla prefabrik düşey dren yerleştirilmiştir. Uzun yıllar süren çalışma sonucunda elde edilen deneyimlere dayanılarak mandrel tipi, örselenme etkisi, zemin parametreleri ve dren malzemesinin kalitesi gibi faktörlerin düşey drenin çalışma performansını etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada prefabrik düşey drenin kalitesini test etmek için de çeşitli yöntemler sunulmuştur.

#### **Basu ve Prezzi (2007)**

Çalışmada, prefabrik düşey drenlerle inşa edilmiş dolguların konsolidasyon süresince zeminin örselenme etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan 100mmx4mm boyutlu düşey drenler üçgen yerleşim düzeni ile tasarlanmıştır. Analizlerde Terzaghi-Rendulic konsolidasyon teorisi ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre örselenme etkisinin zeminin konsolidasyon hızını azalttığı görülmüştür. Geçiş bölgesinin konsolidasyon süresince belirli bir etkiye sahip olduğu bununla birlikte örselenmiş ve geçiş bölgelerinin genişliği arttıkça konsolidasyon hızının yavaşladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, düşey dren aralığı, mandrel boyutu ve şeklinin düşey drenin performansını etkilediği belirtilmiştir.

#### **Bouassida ve Hazzar (2008)**

Bu çalışmada, Tunus'ta yer alan yüksek sıkışabilirliğe sahip, killi kum ve zayıf kum tabakaları olan yaklaşık 6 metre yüksekliğe sahip dolgu zemini için iki farklı iyileştirme yöntemi çalışılmıştır. Dolgu zemininin temel problemleri taşıma gücünün az olması ve zeminde yüksek miktarda oturma potansiyeli olmasıdır. Önerilen iyileştirme yöntemlerinden ilki düşey dren olup, düşey dren derinliği yaklaşık 10m'dir. İkinci yöntem ise taş kolon olup, taş kolon uygulaması da yine 10m olarak seçilmiştir. Dolguda meydana gelen oturma miktarı zamana bağlı bir fonksiyon gibi değerlendirilmiştir. Çalışmada her iki yöntem teknik ve ekonomik olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu projede düşey drenler ile karşılaştırıldığı zaman taş kolonların yaklaşık sekiz aylık bir süre kazancı sağladığı ve ekonomik olarak da daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

### **Abuel-Naga ve Bouazza (2009)**

Çalışmada, eşit akış hızı yaklaşımı kullanılarak prefabrik bir düşey drenin (PVD) eşdeğer çapı sayısal olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, eşdeğer dairesel kuyunun, PVD kuyusu ile benzer kontrollü pompalama koşullarına maruz kalması durumunda, benzer boşalma sağlayabilmesi esasına dayanmaktadır. Sayısal çalışmalardan basit eşdeğer çap denklemi elde edilmiştir. Önerilen denklem, benzer denklemler ve literatürde mevcut olan deneysel sonuçlar ile tartışılmaktadır. Çalışma sonuçlarının konunun anlaşılması ve prefabrik düşey dren kuyusunun eşdeğer çapının hesaplanması için yeni bilgiler sunduğu belirtilmiştir.

### **Yildiz (2009)**

Çalışmada, iki boyutlu düzlem deformasyon ve üç boyutlu birim hücre yaklaşımları, ileri düzey zemin modelleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve doğruluğu araştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçları eşleşme yöntemi ile elde edilen sonuçların tatmin edici olduğunu, ancak mükemmel olmadığını göstermiştir. Ayrıca Finlandiya'da yer alan Haarajoki dolgusuna tam ölçekli düzlem deformasyon analizi yapılarak sonuçlar arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

### **Chen vd. (2016)**

Bu çalışmada, orta Çin'de yer alan Jiujiang yakınlarındaki Jiangxi şehrindeki çok yumuşak bir kil yatağı üzerine bulunan dolgu zeminine inşa edilen prefabrik düşey drenlerin efektif derinliğinin belirlenmesi amacı ile yapılan bir vaka analizi sunulmaktadır. Dolgu yüksekliği 5.3m olup, dolgunun imalat süresi yaklaşık bir yıldır. Düşey drenler 8.5m derinliğe kadar inşa edilip, 1.5m aralıklar ve üçgen dizilimle inşa edilmiştir. İmalat esnasındaki yumuşak zeminin durumu arazi ölçümleri ve sonlu eleman modelleri ile analiz edilmiştir. Dolgunun etki ettiği yük, yine bu analizler ile takip edilerek, dolgunun oturması, aşırı boşluk suyu basınçları ve zemindeki gerilme artışları izlenmiştir. Düşey drenlerin etkili derinliği üç farklı yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda bu bölgedeki etkili dren derinliğinin 10m ve 12.8m arasında olduğu tespit edilmiştir.

**Mert (2018)**

Bu çalışma, İstanbul Halkalı bölgesinde düşey drenlerle iyileştirilmiş bir zeminin oturma analizlerini takip etmek amacı ile yapılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar (FEM) ve üç boyutlu konsolidasyon analizleri (3DCONS) yapılmıştır. Analizlerde farklı geçirimsizlik oranları ( $k_h/k_v$ ), düşey dren aralıkları ( $S_{dren}$ ) ve dren boyları ( $L_{dren}$ ) değişimlerinin konsolidasyon oturmalarına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ise  $k_h/k_v$  değeri düşük zeminlerde düşey drenin uygulanabilir bir yöntem olduğu ve düşey dren uygulamasında tasarım parametrelerinin (dren aralığı ve boyu) optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Rajesh vd. (2018)**

Çalışmada, prefabrik düşey drenler (PVD) ile iyileştirilen yumuşak zemin üzerinde yer alan dolgunun sayısal modeli sunulmaktadır. Araştırma, Hindistan Nellore’de yer alan ticari bir dolguda meydana gelen oturmalar ve aşırı boşluk suyu basıncının doğruluğunun araştırılması amacı ile yapılmıştır. Araştırma kapsamında dren aralığı, örselenmeden dolayı permeabilitedeki azalma ve yarı gömülü düşey drenlerin performansı gibi bazı parametreler araştırılmıştır. Analizler Plaxis 2D ile eksenel simetrik olarak yapılmıştır. Analizlerde düşey drenlerin konsolidasyonu için klasik eksenel simetrik çözüm düzlem deformasyon koşullarına dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, arazi ölçümleri ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak benzerlik ve farklılıklar irdelenmiştir. Analiz sonuçları ile arazideki örselenme tespit edilmiştir. Ayrıca, düşey drenlerin %75-80’ine karşılık gelen bir optimum dren boyu olduğu, bu boyun arazideki yumuşak zeminin düşey konsolidasyonu için yeterli olduğu ve ekonomik bir çözüm sunacağı belirtilmiştir.

**Nguyen ve Kim (2019a)**

Çalışmada, deşarj kapasitesinin zamana bağlı olarak azalması geniş deformasyon teorisi esas alınarak sayısal olarak araştırılmıştır. Önerilen çözümde, düşey drenlerin imalatı ile zeminde meydana gelen örselenme, radyal hidrolik iletkenlik için doğrusal olmayan bir dağılım gibi ele alınmıştır. Önerilen bu çözüm yöntemi, Saga Havalimanı’ndaki saha verilerine uygulanmıştır ve çözümün saha verilerine yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

**Nguyen ve Kim (2019b)**

Çalışmada, prefabrik düşey dren ile iyileştirilmiş zeminler için eşdeğer düzlem deformasyon modeli önerilmiştir. Eksenel simetrik modelin düzlem deformasyon koşullarındaki toplam akış eşleştirmesi ile eşdeğer yatay permeabilite, eksenel simetrik bir modelde boşaltılacak toplam su hacminin eşleştirilmesi ile elde edilmiştir. Dren geometrisi de alan oranının dengelenmesi ile bulunmaktadır. Önerilen modelde örselenme ve kuyu direnci etkileri de hesaba katılmıştır. Ayrıca önerilen bu model, iki vaka analizinde doğrulanmış ve sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

**Li vd. (2019)**

Bu çalışmada, doygun olmayan sonsuz bir zemin tabakasında yer alan düşey bir drenin eksenel simetrik konsolidasyonu için analitik bir çözüm yöntemi sunulmuştur. Yöntemde, aşırı boşluk-hava ve boşluk suyu basınçları homojen kısmi diferansiyel denklemlere dönüştürülmektedir. Sonrasında çeşitli ayrıştırma yöntemleri ile zaman çözümü elde edilmektedir. Son olarak aşırı boşluk-hava basıncının düzenli değişimi, aşırı boşluk suyu basıncı ve normalize edilmiş oturma değerleri, hava-su geçirgenlik oranı, yatay-düşey permeabilite ve derinliğe karşı araştırılmıştır. Sonuç olarak sunulan çözüm yönteminin güvenilir olduğu ve daha karmaşık konsolidasyon problemleri için bir referans olabileceği sonucuna varılmıştır.

## BÖLÜM III

### ANALİTİK VE SAYISAL YÖNTEMLER

Bu bölümde taş kolon ve düşey drenler için yaygın olarak kullanılan analitik yöntemler ve bu yöntemlerin kullandığı bazı temel parametreler izah edilmiştir.

#### 3.1 Taş Kolonlar İçin Geliştirilen Analitik Yöntemler

Taş kolonlar taşıma gücünü artırma özelliğinin yanı sıra, konsolidasyon oturmalarının hızlandırılması ve toplam oturma miktarının azaltılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Taş kolonlar, zeminlerin zayıf özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra çalışma performansı açısından düşey drenlere benzerdir. Taş kolonlar yüksek permeabiliteye sahip granüler malzemeden oluşur bundan dolayı taş kolonlar düşey drenler gibi çevresindeki zeminde bulunan suyun tahliye olmasını sağlamaktadır. Bu özelliklerinden dolayı zeminin konsolidasyonunu hızlandırıp imalat sonrasındaki oturmaları azalmaktadır.

Taş kolonların oturma davranışı üzerindeki iyileştirilmesinin ölçütü iyileştirme faktörüdür ( $\eta$ ). İyileştirme faktörü, doğal zeminde meydana gelen oturma miktarının, iyileştirilmiş zeminde meydana gelen oturmaya oranı olarak ifade edilir. İyileştirme faktörü oturma miktarını tahmin edebilmek için ön tasarım esnasında kullanılan en yaygın parametrelerdendir. İyileştirme faktörü için literatürde birçok farklı yaklaşım yöntemi geliştirilmiştir. Doğal zemindeki oturma miktarına bağlı olarak iyileştirilmiş zeminde meydana gelebilecek oturma miktarının tahmini, iyileştirme faktörü yardımıyla yapılmaktadır. Bazı araştırmacılar ise iyileştirme faktörünü ters çevirerek ( $1/\eta$ ) oturma azaltma faktörünü ( $\beta$ ) kullanmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, oturmaların tahmin edilebilmesi için en güvenilir yöntemin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar olduğu görülmüştür (Fatahi vd., 2012).

Literatürde farklı analitik yaklaşımlar ile oturmaların tahmin edildiği görülmektedir. Bu yaklaşımlardan bazılarında ve esas aldığı parametrelere aşağıda değinilmiştir. Ancak en yaygın olarak kullanılanı ise kullanımının basit olmasından dolayı Priebe Yöntemidir (Priebe, 1995).

Taş kolonlar için bazı tasarım kriterleri mevcuttur bunlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Kolonun malzemesi
- Kolonların yerleşim şekli
- Kolonun çapı
- Alan yerleşim oranı
- Taşıma kapasitesi hesabı
- Oturma hesabı

#### ***Kolonun Malzemesi***

Taş kolonların imalatı sırasında kolon malzemesi olarak genelde kırma taş mıcır kullanılmaktadır ve bu malzeme için Han (2015) tarafından aşağıdaki eşitlik önerilmiştir.

$$S_N = 1.7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (3.1)$$

$S_N$  uygunluk sayısıdır. Süspansiyonda kalan, yüzde miktarına (%50, %20, %10) karşılık gelen tane boyutları ise  $D_{50}$ ,  $D_{20}$  ve  $D_{10}$ ' dur. Yukarıdaki formül ile elde edilen  $S_N$  değerine göre malzemenin kalitesi Çizelge 3.1 'de görülmektedir.

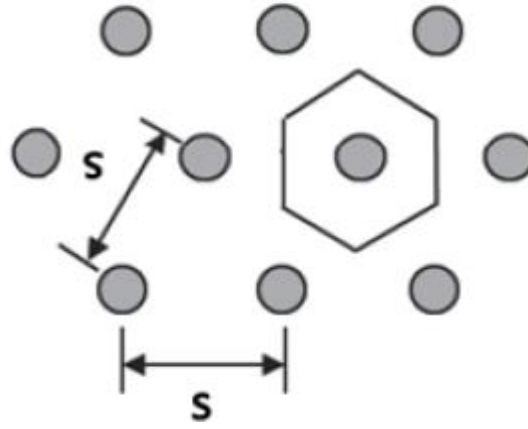
**Çizelge 3.1.** Malzeme nitelik oranları

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

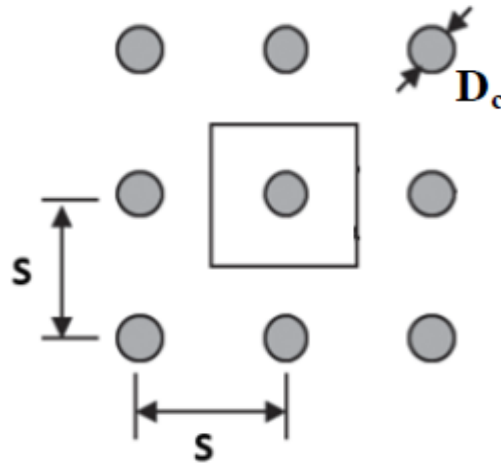
#### ***Kolonların Yerleşim Şekli***

Genellikle eşkenar üçgen (Şekil 3.1) şeklinde yerleşimi yapılan taş kolonlar kare (Şekil 3.2) şeklinde de inşa edilebilmektedir. Eşkenar üçgen diziliminde her bir taş kolonun

arasındaki açı kare dizilime göre daha küçüktür bu durum da ise birbirine daha yakın bir taş kolon tasarımı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.1. Eşkenar üçgen tasarımı

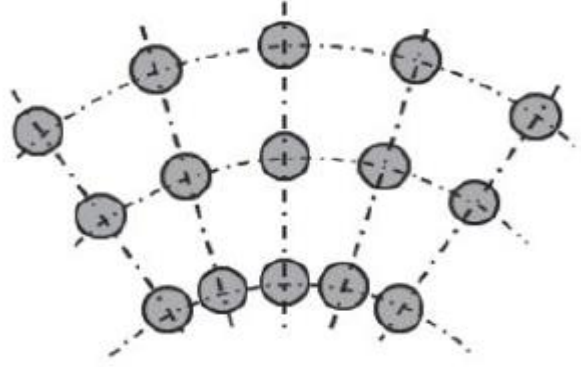


Şekil 3.2. Kare tasarım

$D_c$  : Kolonun çapı

$S$  : Kolonun merkezinden diğer kolonun merkezine olan mesafe

Bazı durumlarda ise taş kolonlar için radyal yerleşim de tasarlanabilmektedir (Şekil 3.3).



**Şekil 3.3.** Radyal yerleşim

### ***Kolonun Çapı***

Taş kolon uygulaması yapılırken seçilmiş olan imalat yöntemine göre taş kolonun çapı da değişiklik göstermektedir. Çizelge 3.2' de taş kolonların çapları gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Taş kolon tipine göre kullanılan ekipman ve çapları (Han, 2015)

Kolon Tipi	İmalat Ekipmanları	Çap (m)
Kum Sıkıştırma Kolonları	Muhafaza	0.6 - 0.8
Taş Kolonlar	Vibro - prob	0.5 - 1.2
Darbeli Kıрма Taş Kolonlar	Auger ve tokmak	0.7 - 0.9
Vibro - Beton Kolonlar	Vibro - prob	0.5 - 0.6 gövdede, 0.6 - 0.9 uçlarda
Kontrollü Sıkışma Kolonları	Geri kaçış auger	0.3 - 0.5
Geosentetik Kaplı Kolonlar	Kapalı yada açık muhafaza	0.7 - 0.9

### ***Alan Yerleşim Oranı***

Taş kolonların analizi yapılırken birim hücre yöntemi olarak isimlendirilen yöntem kullanılarak sadece bir adet kolon ve o kolona ait etki bölgesi temel alınmaktadır. Bundan dolayı tasarım açısından en önemli parametrelerden biri taş kolonun etki bölgesi içerisinde kalan kesit alanıdır. İyileştirme yapılan zeminde performans değerlendirmesi yapılırken zeminde taş kolon ile değiştirilen hacim çok önemlidir ve bu değişen hacmi

belirlemek için alan yerleşim oranı veya bir başka deyişle alan değişim oranı kavramları kullanılmaktadır.

### ***Taşıma Kapasitesi Hesabı***

Taş kolonların tasarım kriterlerinden biri de taşıma kapasitesinin hesabıdır. Taş kolonların taşıma kapasitesi taş kolon malzemesinin özelliklerine, kolonun yerleşim düzenine ve doğal zeminin özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Tek bir taş kolon ya da kolon grubunun nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi için oluşabilecek göçme şeklinin dikkate alınması gerekmektedir. Taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için ise literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir.

### ***Oturma Hesabı***

Taş kolonların tasarımı için en önemli tasarım parametrelerinden birisi de oturma hesabıdır. İyileştirme yapılan zemindeki oturmalar araştırmacılar tarafından farklı olarak isimlendirilmiştir kimi araştırmacılar oturma oranı, kimisi ise iyileştirme faktörü şeklinde tanımlamıştır. Barksdale ve Bachus (1983), oturma oranı kavramını kullanmıştır. Bu oran iyileştirilmiş zemindeki oturmanın doğal zeminde meydana gelen oturmaya oranı olup 1'den küçüktür. Elias vd. (2006), oturma oranını doğal zeminde meydana gelen oturmanın iyileştirilmiş zeminde meydana gelen oturmaya oranı olarak tanımlamış ve bu oran 1'den büyüktür. Taube ve Herridge (2002), oturma oranı kavramını kullanmıştır ve bu değeri 2-3 arasında elde ederek, bu aralıktaki değerler için oturmaların azaltılabileceğini belirtmiştir. Priebe (1995), İyileştirme faktörü ( $\beta$ ) kavramını kullanmıştır ve bu faktör zeminin doğal durumuna göre iyileştirme performansı hakkında bilgi vermektedir.

Günümüzde taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerde meydana gelen oturmaları tahmin etmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler ampirik, yarı ampirik, analitik ve sayısal yaklaşımları esas almaktadır.

Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan taş kolon yöntemi birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu alanda birçok analitik çalışma yapılmıştır. Taş kolonların performansının değerlendirilebilmesi için birçok ampirik ve teorik yaklaşım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden yaygın kullanılan bazıları ise aşağıda sunulmuştur.

### 3.1.1. Balaam ve Booker (1981)

İyileştirme yöntemiyle güçlendirilen zeminler üzerinde rijit temellerin ne kadar oturma yapacağını tahmin edebilmek için önerilen yöntemdir. Yöntemde birim hücre kavramı esas alınmıştır. Kolon ve zemin davranışının elastik davranış sergilediği düşünülerek zemindeki akma dikkate alınmamaktadır. Kolon-zemin ara yüzünde kolon ile zeminde meydana gelen radyal gerilme ve deplasmanların birbirine eşit olduğu kabul edilir. Eşitlik (3.2)' de yöntem için tanımlanan faktör verilmiş olup bu eşitliğe göre iyileştirme faktörü birimsiz ve  $v_s$ ,  $v_c$ ,  $A_r$ ,  $E_{m,c}/E_{m,s}$  parametrelerinden oluşmaktadır.

$$\eta = 1 + A_r \left( \frac{E_{m,c}}{E_{m,s}} - 1 \right) - \frac{2A_r(1-A_r) \left[ \frac{v_c}{1-v_c} \frac{E_{m,c}}{E_{m,s}} - \frac{v_s}{1-v_s} \right]^2}{\frac{1}{(1-v_c)} \frac{E_{m,c}}{E_{m,s}} (1-A_r) + \frac{1}{(1-v_s)} (A_r + 1 - 2v_s)} \quad (3.2)$$

- $v_s$  : Zemin poisson oranı
- $v_c$  : Taş kolon poisson oranı
- $A_r$  : Taş kolon alanının etki bölgesi alanına oranı
- $E_{m,c}$  : Kolonun ödometrik elastisite modülü
- $E_{m,s}$  : Zeminin ödometrik elastisite modülü

### 3.1.2. Castro ve Sagaseta (2008)

Yöntemin amacı iyileştirme faktörünü tahmin etmektir. Basit elastik teoriye dayanan bu yöntem kapalı form analitik bir çözüm sağlamaktadır. İyileştirme faktörü ( $\eta$ ), Eşitlik (3.3)' de tanımlanmıştır.

$$\eta = 1 + A_r \left( \frac{E_{m,c}}{E_{m,s}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

- $A_r$  : Alan oranı
- $E_{m,c}$  : Kolonun ödometrik elastisite modülü
- $E_{m,s}$  : Zeminin ödometrik elastisite modülü

### 3.1.3. Priebe (1995)

Priebe (1995) taş kolon iyileştirmesi yapılan zeminin oturma değerlerini tahmin edebilmek amacıyla birim hücre kavramı kullanan bir yöntem tercih etmiştir. Avrupa'da yaygınca kullanılan yöntemlerden biri olmasının sebebi kullanımının basit olmasıdır. Priebe taş kolonun performansını etkileyen tüm parametreleri kullanmamaktadır.

Yöntemin amacı iyileştirilen zeminin parametrelerinin elde edilmesidir. Yöntemde kolonun iyileştirme etkisiyle zeminin başlangıçtaki durumu karşılaştırılmaktadır. Ayrıca zeminin iyileştirme öncesi ve sonrası karşılaştırılarak iyileştirme faktörü belirlenmektedir.

#### 3.1.3.1. İyileştirme faktörü hesabı

Priebe (1995)' in önerdiği yöntemde, kolonun rijit bir tabaka üzerine yerleştiği kabul edilmiştir. Yöntemde kompozit sisteminin yalnızca yatay deformasyonlar sebebiyle oturma gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Taş kolonun malzemesinde kayma olduğu düşünülürken, kolonun etrafındaki zeminin elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Taş kolon inşaatı yapılırken çevredeki zeminin fazlaca yer değiştirmeye maruz kalmasından ötürü yanal toprak basınç katsayısı  $K=1$  olarak kabul edilmiştir. Bu durumda iyileştirme faktörü ( $n_0$ );

$$K_{AC} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi_c}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$f(\mu_s, A_c / A) = \frac{(1 - \mu_s)(1 - A_c / A)}{1 - 2\mu_s + A_c / A} \quad (3.5)$$

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[ \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c / A)} - 1 \right] \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

$K_{ac}$  : Taş kolon malzemesinin aktif itki katsayısı

$\mu_s$  : Zemin poisson oranı

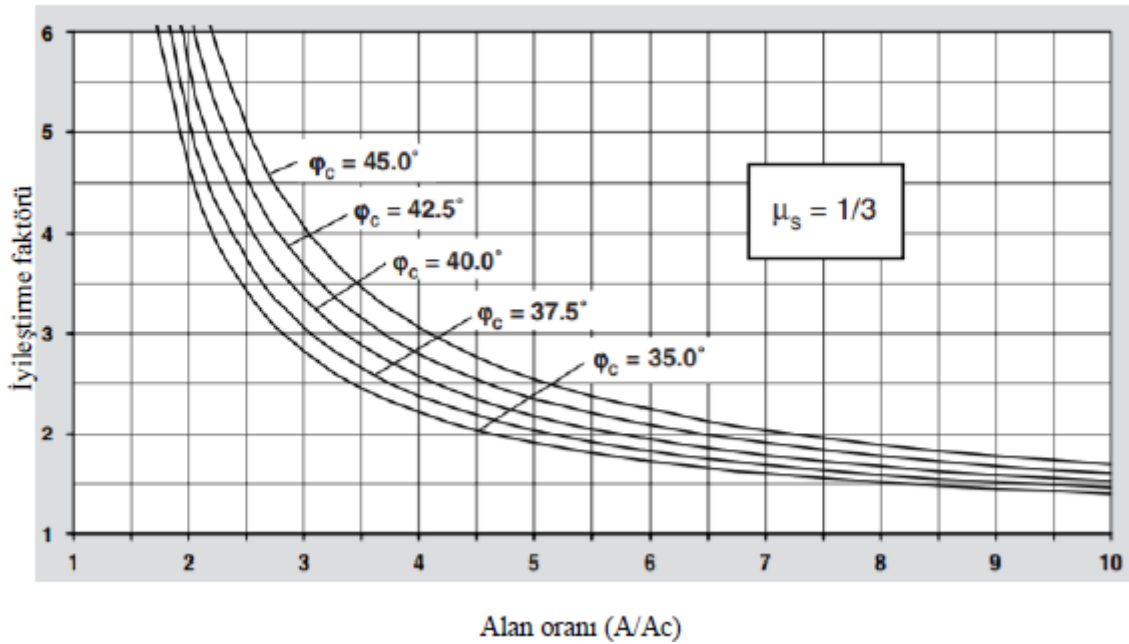
$A_c$  : Taş kolon alanı

$A$  : Toplam alan

Poisson oranı  $\mu_s = 1/3$  alınarak son oturma miktarı belirlenmektedir. İyileştirme faktörü ise Eşitlik (3.7) ile hesaplanabilir.

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[ \frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{AC} \left( 1 - \frac{A_c}{A} \right)} - 1 \right] \quad (3.7)$$

Kolon malzemesinin içsel sürtünme açısına göre  $\mu_s = 1/3$  durumunda iyileştirme faktörü ve ters alan oranı aşağıda verilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4.  $\mu_s = 1/3$  için iyileştirme faktörü - alan oranı grafiği (Priebe, 1995)

### 3.1.3.2. Kolon sıkışabilirlik etkisinin değerlendirilmesi

Taş kolon malzemesinde yapılan sıkıştırma işlemi yerinde hala sıkışma durumuyla söz konusudur. Kolon üzerine gelebilecek herhangi bir yük sonucunda kolon kendi bünyesinde sağ ve sol tarafa doğru açılmaya uğrayıp oturmalar oluşturabilir. Teoriye göre

$A/A_c$  oranı 1 olduğu durumda iyileştirme faktörünün hesabı sonsuzdur bu durum görünürde ise kolonun kompaksiyon özelliğine göre farklılık belirtmektedir. Priebe ise iyileştirme faktörünü kolon ve çevresindeki zeminin tek eksenli sıkışma modülleri ( $D_c/D_s$ ) oranıyla sınırladığını savunmuştur.  $\mu_s = 1/3$  olması durumunda Eşitlik (3.8) kabul edilmiştir.

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{2(4K_{AC} - 1)} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{4K_{AC}(n_0 - 2) + 5}{4K_{AC} - 1}\right]^2 + \frac{16K_{AC}(n_0 - 1)}{4K_{AC} - 1}} \quad (3.8)$$

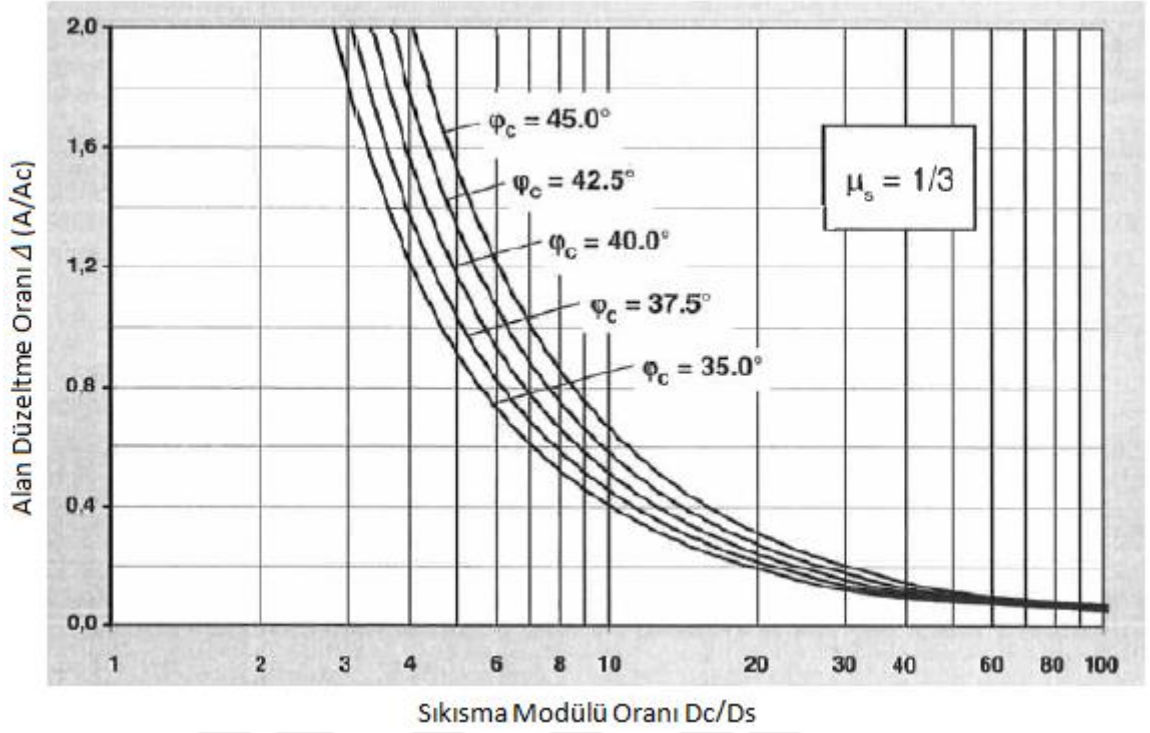
Eşitlik (3.9)' da görüldüğü gibi alan oranında ( $A/A_c$ ) düzenleme ile Eşitlik (3.10)' da azaltılmış iyileştirme faktörü hesaplanarak kolon malzemesinin sıkışabilirliği belirlenmektedir.

$$\Delta(A/A_c) = \frac{1}{(A_c/A)_1} - 1 \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{\overline{A_c}}{A}\right) = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (3.10)$$

$$n_1 = 1 + \frac{\overline{A_c}}{A} \left[ \frac{1/2 f(\mu_s, \overline{A_c}/A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c/A)} - 1 \right] \quad (3.11)$$

Poisson oranı = 1/3 olan zeminlerde kolon sıkışabilirlik düzeltmesi eğrileri Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5.  $\mu_s = 1/3$  için alan düzeltme ve kolon sıkışabilirlik oranları (Priebe, 1995)

### 3.1.3.3. Derinlik etkisinin dikkate alınması

Taş kolonların dışa doğru genişlemesine neden olan etken kolon ve zemin arasındaki başlangıç koşullarındaki düşey basınç farklılıklarıdır.

Zemindeki yanal basınç derinlikle artmaktadır. Kolon ise derinlik arttıkça zemin tarafından daha çok desteklenecektir bu durum kolonun taşıma kapasitesinin artacağı anlamına gelmektedir. Priebe (1995) bu durumu önce göz ardı etmiş daha sonra ise başlangıçtaki düşey basınç farkının değişmediği kabulünü yapmıştır. İyileştirme faktörünün etkisiyle kolon ve zemin arasındaki basınç farkı lineer olarak değişmektedir. Bu durumdan ötürü 1' den büyük bir değer alan  $f_d$  (derinlik faktörü) tanımlanmıştır. Derinlik faktörü başlangıçtaki zeminin üst noktası ( $z=0$ ) ve iyileştirme derinliğindeki ( $z>0$ ) basınç farkı oranıdır. Bunun için iyileştirme faktörü  $n_1$ , son iyileştirme faktörü  $n_2=f_d.n_1$  şekline dönüştürülecektir.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - W_s / W_c}{K_{0c}} \frac{W_c}{P_c}} \quad (3.12)$$

$$P_c = \frac{P}{\frac{A_c}{A} + \frac{1 - \frac{A_c}{A}}{\frac{P_c}{P_s}}} \quad (3.13)$$

$$\frac{P_c}{P_s} = \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c / A)}{K_{AC} f(\mu_s, A_c / A)} \quad (3.14)$$

$$W_c = \sum (\gamma_c \Delta d) \quad (3.15)$$

$$W_s = \sum (\gamma_s \Delta d) \quad (3.16)$$

$$K_{0c} = 1 - \sin \phi_c \quad (3.17)$$

$$n_2 = f_d \cdot n_1 \quad (3.18)$$

$f_d$  : Derinlik faktörü

$W_s$  : Zeminin ağırlığı

$W_c$  : Taş kolon malzemesinin ağırlığı

$P_c$  : Temelden dolayı taş kolona etkiyen yük

$P_s$  : Temelden dolayı zemine etkiyen yük

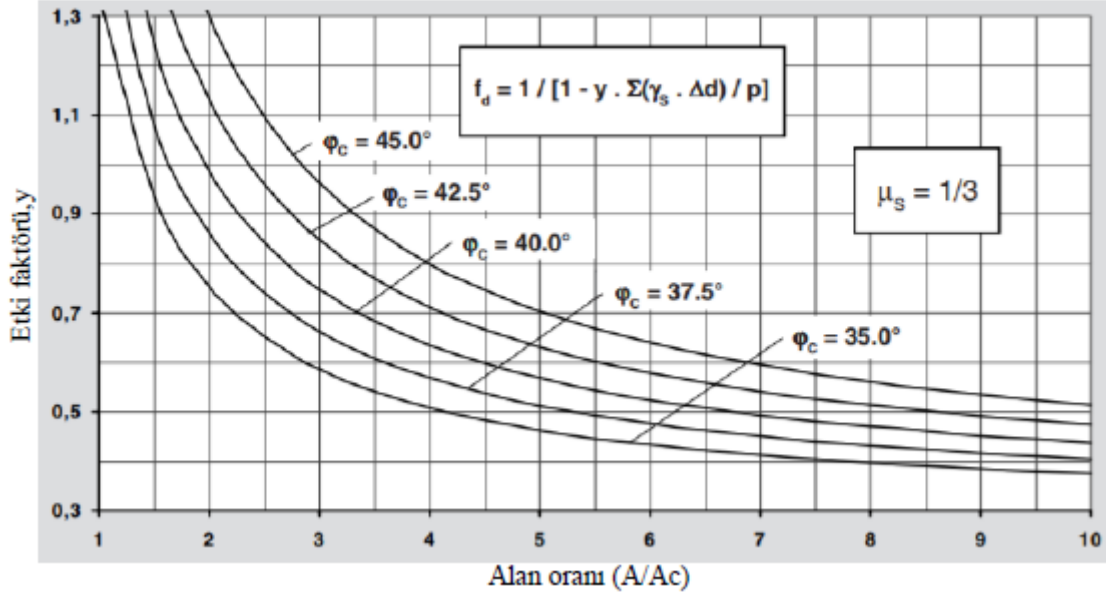
$P$  : Temel yükü

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

Zeminin birim hacim ağırlığı ile taş kolon malzemesinin birim hacim ağırlığı Şekil 3.6' da gösterildiği gibi eşit kullanılmıştır fakat güvenlik nedeniyle bu kabul uygun değildir. Düşük olan birim hacim ağırlık değeri esas alınmıştır. Derinlik düzeltme faktörü ise Eşitlik (3.19)' da hesaplanmaktadır.

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - 1}{K_{0c}} \frac{W_c}{P_c}} = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c} - 1}{K_{0c}} \frac{\sum(\gamma_s \Delta d)}{P_c}} \quad (3.19)$$

$\mu_s=1/3$  ve kolon malzemesinin farklı içsel sürtünme açısı için etki faktörü alan oranı değişimi gösterilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Derinlik Faktörü Tayini (Priebe,1995)

### 3.1.3.4. Uyumluluk kontrolleri

Düşey kolonun malzemesinin sıkışabilirliği düşünülerek kolonların yük taşımalarının son bulacağı durumlar belirlenmelidir. Bu nedenle ilk olarak yapılan uyumluluk kontrolü derinlik faktörü ile yapılandır. Bu kontrolün yapılması için zemin şartlarının özellikle rijit veya sıkı olması gerekmektedir. Derinlik arttıkça zeminin kolona uygulayacağı destek artar böylece kolonda yanal genişleme bir noktada son bulur. Derinlik faktörünün ise sonsuza kadar artmayacağı kabul edilmiştir. Bundan dolayı kolon malzemesindeki sıkışma kompozit malzemedeki sıkışmadan daha fazla olmamalıdır. Bu durumda kolon malzemesinin kompaksiyonu ile derinlik faktörü en yüksek değerine ulaşır (Şekil 3.7).

Derinlik faktörü ( $f_d$ ) 1'den küçük değer aldığı durumlarda dikkate alınmamalıdır.

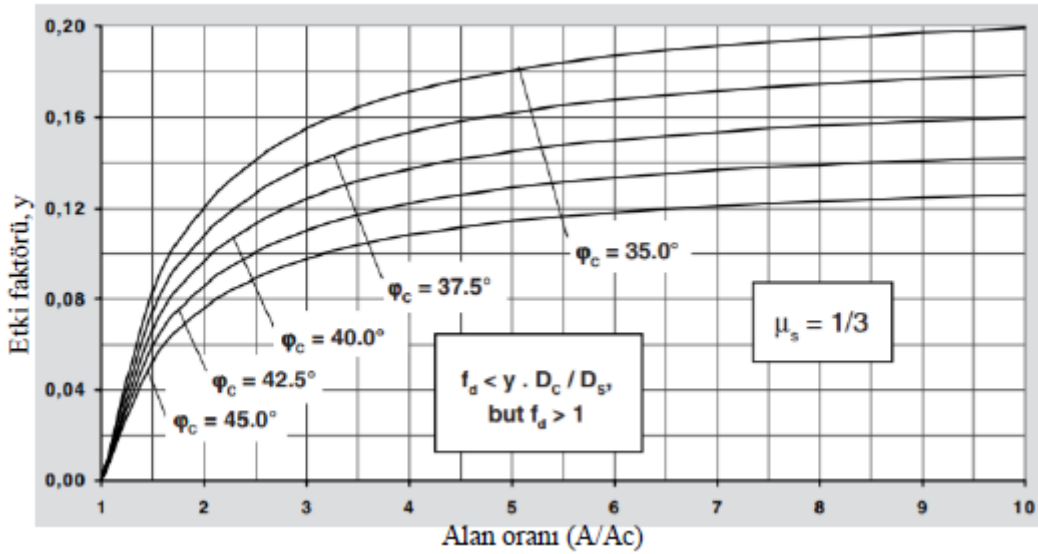
$$f_d \leq \frac{D/D_s}{P_c/P_s} \quad (3.20)$$

$D$  : Taş kolon malzemesinin tek boyutlu sıkışma modülü

$D_s$  : Zeminin tek boyutlu sıkışma modülü

İkinci olarak yapılan kontrol ise en büyük iyileştirme faktörü değeri ile ilgili olan bir kontroldür. Arazi tabakalarının yumuşak veya gevşek yapıdaki zemin cinslerinde olması gerekmektedir. İlk yapılan kontrol ile benzer şekilde yapılmaktadır. Bu kontroldeki amaç kolon malzemesinin sıkışabilirliğinin kolonu çevreleyen zeminin sıkışabilirliğini aşmaması içindir.

$$n_{\max} = 1 + \frac{A_c}{A} \left( \frac{D}{D_s} - 1 \right) \quad (3.21)$$



Şekil 3.7. Derinlik faktörü limit değerleri (Priebe,1995)

### 3.1.4. Zamana bağlı konsolidasyon davranışı yöntemleri

Taş kolonlar bilindiği üzere konsolidasyonu hızlandırarak zemindeki drenajı sağlamaktadır. Birçok araştırmacı çalışmalarında bu konu üzerinde durmuştur.

Konsolidasyon teorisini radyal akış ile inceleyen ilk araştırmacılarından biri Barron'dur. Barron (1947) konsolidasyon konusunu dūşey dren uygulaması yapılmış olan iyi derecelenmiş bir zeminde incelemiştir. Çalışma teorisini açısından dūşey drenler ile tař kolonlar birbirine benzedikleri için geliştirilen bu basit yaklaşımlar her ikisi içinde geliştirilecek olan birçok yöntemin temelini oluşturmuştur.

Barron (1947), Terzaghi'nin geliştirmiş olduğu bir boyutlu akış teorisinin üzerine çalışmasını yapmıştır. Barron (1947) yönteminde eşit deformasyon kabul yapmıştır. Örselenme etkisini ve kuyu direncini ihmal etmiştir. Konsolidasyon oranını ise zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır.

$$c_r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.22)$$

$c_r$  : Radyal akış durumundaki konsolidasyon katsayısı

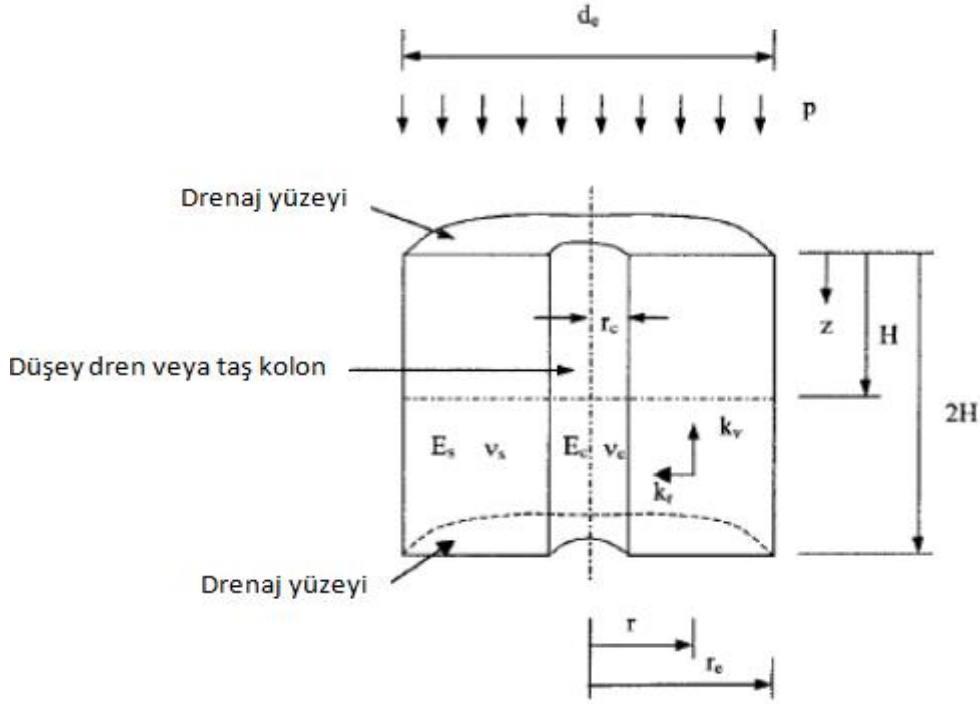
$c_v$  : Dūşey akış durumundaki konsolidasyon katsayısı

$u$  : Zemin içindeki bir  $(r, z)$  noktasında meydana gelen boşluk suyu basıncı

$\bar{u}$  : Zemindeki  $z$  derinliğinde ortalama boşluk suyu basıncı

$r$  ve  $z$  : Şekil 3.8'de yer alan zemin koordinatları

$t$  : Zaman



Şekil 3.8. Taş kolon modelinin tanımlanması (Han ve Ye, 2001)

Eşitlik 3.22' de tanımlanan düşey akış ve toplam radyal tek tek ele alınırsa aşağıdaki eşitlikteki gibi olmaktadır.

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = c_r \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} \right) \quad (3.24)$$

$u_z$  : Düşey akış ile meydana gelen boşluk suyu basıncı

$u_r$  : Radyal akış ile meydana gelen boşluk suyu basıncı

Radyal yöndeki çözüm ise aşağıda verildiği gibidir.

$$u_r = \frac{4\bar{u}}{d_e^2 F(N)} \left[ r_e^2 \ln \left( \frac{r}{r_c} \right) - \frac{r^2 - r_c^2}{2} \right] \quad (3.25)$$

$$\bar{u} = u_0 e^{\lambda} \quad \lambda = \frac{-8T_r}{F(N)} \quad N = \frac{d_e}{d_c} \quad T_r = \frac{c_r t}{d_c^2} \quad (3.26)$$

$$F(N) = \frac{N^2}{N^2 - 1} \ln(N) - \frac{3N^2 - 1}{4N^2} \quad (3.27)$$

- $u_0$  : Başlangıç boşluk suyu basıncı  
 $T_r$  : Radyal akış durumunda zaman faktörüdür.  
 $d_c$  : Dren çapı  
 $d_e$  : Drenden etkilenen bölgenin çapı  
 $t$  : Zaman periyodu

Radyal yöndeki konsolidasyon derecesi ise;

$$\bar{U}_r = 1 - e^{-\frac{s}{F(N)} T_r} \quad (3.28)$$

şeklindedir.

Han ve Ye (2002), çalışmasında kil zemine uygulanmış olan taş kolonun davranışını analitik olarak incelemiştir. Çalışmasında taş kolonun hem direncini hem de yüksek permabilitesini birlikte ele alarak konsolidasyon üzerindeki etkisini inceleyip teorik bir yöntem geliştirmiştir ve bazı kabuller yapmıştır. Yapılan kabullerden bazıları ise aşağıdaki gibidir.

- Killi zemin içerisinde imal edilen taş kolondan ve zeminden meydana gelecek problemde deformasyonlar sadece bir doğrultuda olmakla birlikte düşey doğrultudadır.
- Taş kolonun ve zeminin davranışı lineer elastiktir.
- Taş kolonun elastisite modülü etrafını saran zeminin elastisite modülünden daha yüksektir.
- Tüm derinlik boyunca deformasyonlar eşit kabul edilir.
- Taş kolona yük, rijit temel ile birlikte anlık uygulanır ve konsolidasyon süresince sabittir.
- Taş kolon ve çevresini saran zemin sadece düşey yönde sıkıştırılabilir.

- Taş kolonun etrafını saran bölge tam doygun haldedir ve zemin suyu sıkıştırılmaz.
- Taş kolona yük uygulandığı anda kolonun etrafını saran zeminde üniform boşluk suyu basıncı oluşur ve yükün tamamı bu basınç tarafından karşılanır. Yapılan bu kabul Barron (1947) ile aynı doğrultudadır.

Kolon ve etrafındaki zeminin herhangi bir zamanda taşıdığı yük ;

$$\bar{\sigma}_s A_s + \bar{\sigma}_c A_c = pA \quad (3.29)$$

( $\sigma_s$  ve  $\sigma_c$ ) :Kolon etrafındaki zemin ve taş kolonun taşıdığı ortalama toplam gerilme

$A_c, A_s$  : Kolon ve zeminin kesit alanı

Toplam alan  $A= A_c +A_s$  şeklinde ifade edilir.

Han ve Ye (2001) değiştirilmiş konsolidasyon katsayılarıyla birim hücrenin konsolidasyon eşitliğini tasarlamıştır. Birim hücre kavramı sonraki bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır. Zeminde suyun tahliye edilmesiyle birlikte hacimsel olarak bir azalma meydana gelecektir bu azalma ise;

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial e_s}{1+e_s} \left( \frac{2\pi r dr dz}{\partial t} \right) = -\frac{m_{v,s} m_{v,c} A_s}{m_{v,s} A_s + m_{v,c} A_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} (2\pi r dr dz) \text{ şeklindedir.} \quad (3.30)$$

$m_{v,c}$  : Taş kolonun hacimsel sıkışma katsayısı

$m_{v,s}$  : Taş kolon etrafındaki zeminin hacimsel sıkışma katsayısı

$V$  : Silindir zemin kitlesinin hacmi

$A_s$  : Birim hücredeki zeminin alanı

Tahliye edilen suyun miktarı ise eşitlik 3.31 ile bulunur.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\left[ \frac{k_r}{\gamma_w} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] 2\pi r dr dz \quad (3.31)$$

$k_r$  : Zeminin radyal doğrultudaki permeabilite katsayısı

$k_v$  : Zeminin düşey doğrultudaki permeabilite katsayısı

$\gamma_w$  : Suyun birim ağırlığı

Silindirik zemin ile tahliye edilen su miktarı eşitlikleri eşitlenir ise;

$$\frac{k_r}{\gamma_w} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{m_{v.s} m_{v.c} (1 - a_s)}{m_{v.c} (1 - a_s) + m_{v.s} a_s} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.32)$$

$$a_s = \frac{A_c}{A_c + A_s} \quad (3.33)$$

$a_s$  : Alan değişim oranı

Birim hücrenin konsolidasyonunu ifade eden eşitlik 3.34 deki gibi bulunur.

$$c'_r = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c'_v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.34)$$

$c'_r$  : Radyal yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

$c'_v$  : Düşey yöndeki modifiye konsolidasyon katsayısı

$$c'_r = \frac{k_r}{\gamma_w} \frac{m_{v.c} (1 - a_s) + m_{v.s} a_s}{m_{v.s} m_{v.c} (1 - a_s)} \quad (3.35)$$

$$c'_v = \frac{k_v}{\gamma_w} \frac{m_{v.c} (1 - a_s) + m_{v.s} a_s}{m_{v.c} (1 - a_s) + m_{v.s} a_s} \quad (3.36)$$

Radyal ve düşey yöndeki toplamın tüm konsolidasyon oranı;

$$U_{rv} = 1 - (1 - U_r)(1 - U_v) \quad (3.37)$$

şeklinde dir. Yaklaşık çözüm eşitlik 3.38' da verilmiştir.

$$U_{rv} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-[8/F(N)]T_v} - [x^2/4]T_v \quad (3.38)$$

$$T'_r = \frac{c'_r t}{d_c^2} \quad T'_v = \frac{c'_v t}{H^2} \quad (3.39)$$

$T'_r$  : Radyal akış için modifiye zaman faktörü

$T'_v$  : Düşey akış için modifiye zaman faktörü

$H$  : Düşey yüzeydeki serbest drenaj sınırından geçirimsiz olan sınır arasındaki yükseklik

Radyal akış tarafından oluşan konsolidasyon Barron eşitliğinde ki gibi kabul edilmekle birlikte değiştirilmiş zaman faktörü kullanılmıştır.

$$U_r = 1 - e^{-[8/F(N)]T'_r} \quad (3.40)$$

$N$  : Çap oranı ( $d_e/d_c$ )

Han ve Ye (2001), değiştirilmiş konsolidasyon katsayılarını aşağıdaki gibi farklı katsayılar kullanarak da tanımlamıştır.

$$c'_r = c_r \left( 1 + n_s \frac{1}{N^2 - 1} \right) \quad (3.41)$$

$$c'_v = c_v \left( 1 + n_s \frac{1}{N^2 - 1} \right) \quad (3.42)$$

$$n_s = \frac{\sigma_{cs}}{\sigma_{ss}} = \frac{m_{v.s}}{m_{v.c}} = \xi \frac{E_c}{E_s} \quad (3.43)$$

$$\xi = \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)(1 - \nu_c)}{(1 + \nu_c)(1 - 2\nu_s)(1 - \nu_s)} \quad (3.44)$$

$n_s$  : Denge durumundaki dağılım faktörü

$\xi$  : Poisson oranı faktörü

$E_c$  : Taş kolonun elastisite modülü

$E_s$  : Taş kolon etrafındaki zeminin elastisite modülü

$\nu_c$  : Taş kolonun poisson oranı

$\nu_s$  : Zeminin poisson oranı

Han ve Ye (2002), örselenme ve kuyu direncini de çalışmasında hesaba katarak teorik bir çözüm önermiştir.

$$U_r = 1 - e^{-[8/F(N)]T_r'} \quad (3.45)$$

$$F_m' = \frac{N^2}{N^2 - 1} \left( \ln \frac{N}{S} + \frac{k_r}{k_s} \ln S - 3/4 \right) + \frac{S^2}{N^2 - 1} \left( 1 - \frac{k_r}{k_s} \right) \left( 1 - \frac{S^2}{4N^2} \right) + \frac{k_r}{r_s} \frac{1}{N^2 - 1} \left( 1 - \frac{1}{4N^2} \right) + \frac{32}{\pi^2} \left( \frac{k_r}{k_s} \right) \left( \frac{H}{d_c} \right)^2 \quad (3.46)$$

$$c_r' = \frac{k_r}{\gamma_w} \frac{m_{v,c}(1 - a_s) + m_{v,s}a_s}{m_{v,s}m_{v,c}(1 - a_s)} \quad (3.47)$$

$k_s$  : Örselenmiş bölgenin permeabilitesi

$S$  : Örselenmiş bölgenin büyüklüğü

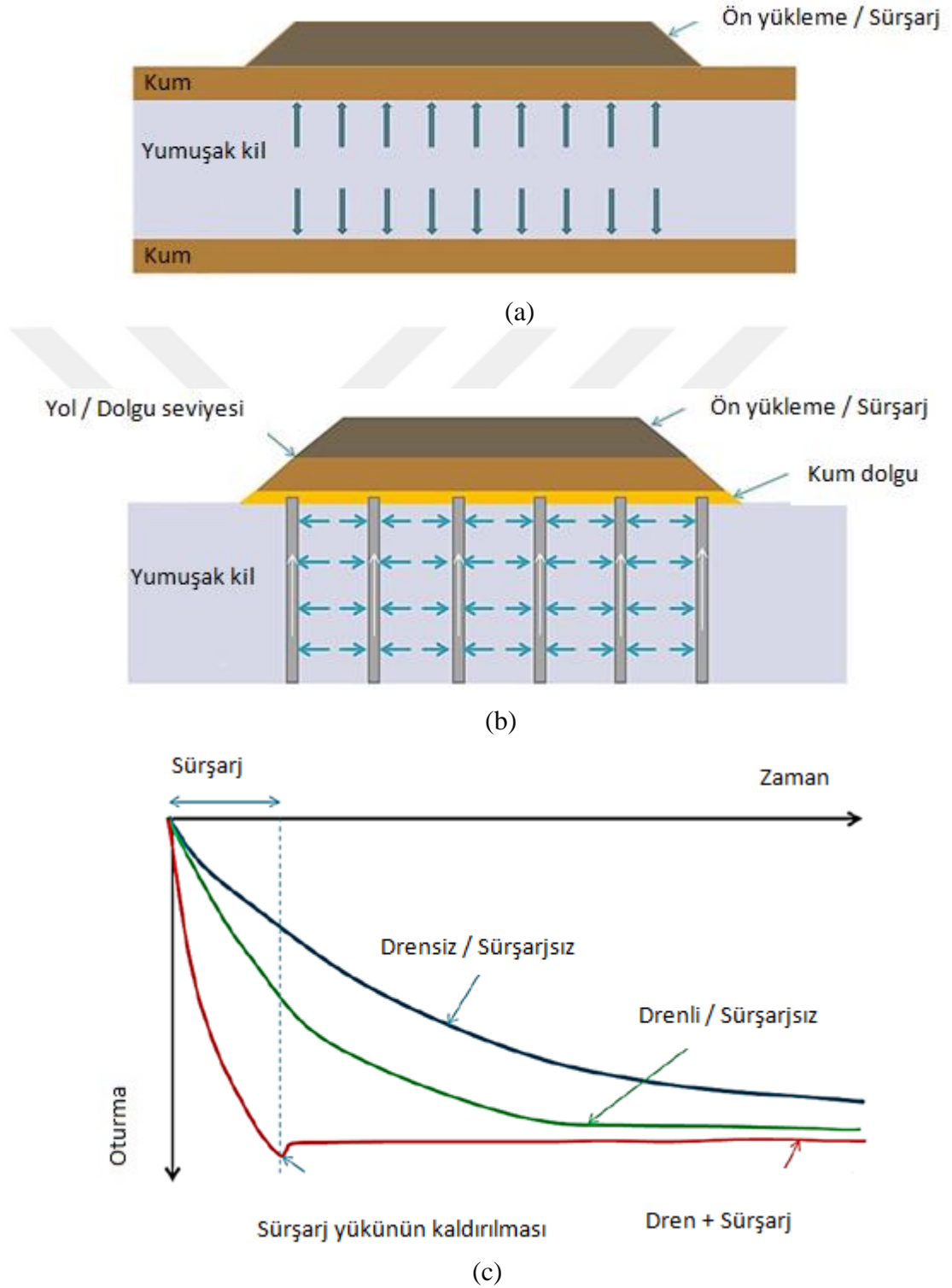
Bu tez kapsamında taş kolonların performansının değerlendirilebilmesi için önerilen yöntemlerden Han ve Ye (2001) ve Barron (1947) tarafından önerilen yöntemler tercih edilmiştir.

### 3.2. Düşey Drenler İçin Geliştirilen Analitik Yöntemler

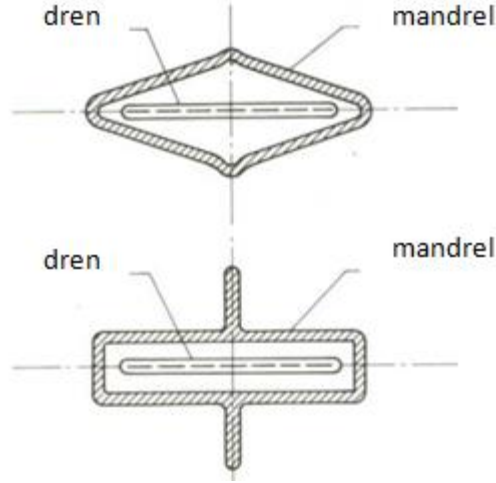
Düşey drenler yumuşak killerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Yöntemin temel işlevi zemin içindeki suyun drenaj yolunu kısaltarak zeminin konsolidasyonunu hızlandırmak ve radyal drenajı aktif hale getirmektedir. Böylece imalat sonrasında oturmalar azalarak kayma mukavemeti artmaktadır (Holtz vd. 1991) (Şekil 3.9). Drenlerin uygun yerleşim yöntemi ve aralığı ile yerleştirilmesi ile konsolidasyon süresi azaltılabilmektedir. Ayrıca, düşey drenlerin tasarımı için sürşarj yükü, dren aralıkları, dren türü, ön yükleme periyotları, konsolidasyon derecesi ve yatay akış için gerekli olan konsolidasyon katsayısı önem arz etmektedir.

Tipik bir düşey dren 100 mm genişlik ve 3-4 mm kalınlığa sahiptir ve plastik bir orta çekirdeği çevreleyen ince bir geotekstil filtreden oluşur. Düşey drenlerin imalatı için çoğu kez kapalı uçlu mandreller kullanılmaktadır. Mandrelin zemine yer değiştirmesi ile açılan boşluğa düşey drenler yerleştirilmektedir (Hird ve Moseley, 2000). Eşkenar

dörtgen, dikdörtgen, kare ve dairesel olmak üzere dört farklı mandrel çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan eşkenar dörtgen ve dikdörtgen mandreller en yaygın kullanılamdır (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. Düşey drenlerin çalışma mekanizması (Sakleshpur vd., 2018)



**Şekil 3.10.** Düşey dren kesiti (Holtz vd., 1991)

Düşey drenlerle ilgili birçok yaklaşımda boşluk suyu basıncının dairesel bir kesite sahip bir drene tahliye olduğu varsayılmaktadır. Wang ve Jiao (2004) ise analitik bir çözüm yöntemi sunarak, akışın dairesel bir kesit değil de poligona benzeyen küçük bir dörtgen bölgeye iletildiğini önermiştir. Bant şeklindeki drenlerin silindirik drenaj esasını kullanan çözüm yöntemleri ile analiz edilebilmesi için dikdörtgen kesitler eşdeğer dairesel bölgelere dönüştürülmelidir. Bu dönüştürme için literatürde çeşitli eşitlikler sunulmaktadır (Çizelge 3.3).

**Çizelge 3.3.** Düşey drenlerin eşdeğer çap dönüşümleri (Azari, 2015)

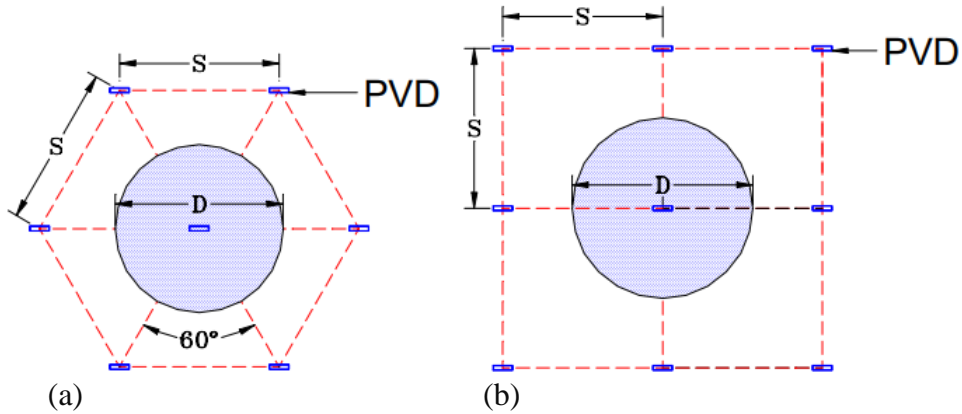
Önerilen Denklem	Referans
$d_w = 2 \frac{(a+b)}{\pi}$	Hansbo (1981)
$d_w = \frac{(a+b)}{2}$	Atkinson ve Eldred (1981)
$d_w = \left(\frac{4ab}{\pi}\right)^{0.5}$	Fellenius ve Castonguay (1985)
$d_w = 0.5a + 0.7b$	Long ve Corvo (1994)

- a : Dren genişliği
- b : Dren kalınlığı
- $d_w$  : Eşdeğer dren çapı

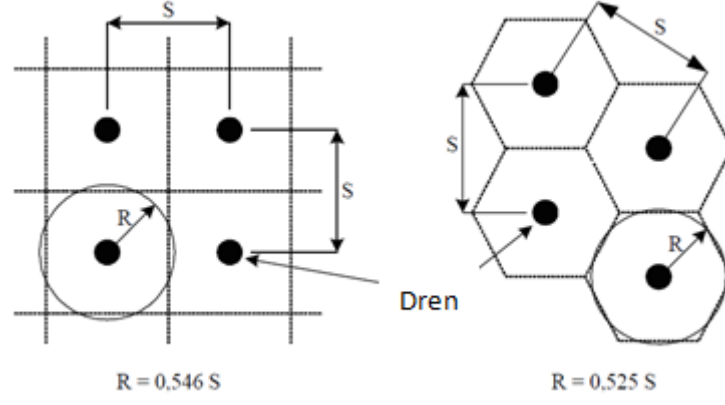
Düşey drenler genellikle kare veya üçgen biçimlerde yerleştirilir ve etki bölgesi, tek bir drene akan boşluk suyu ile kaplanmış alan olarak kabul edilir (Şekil 3.11). İmalat açısından kare yerleşim düzeni basit olmasına rağmen, üçgen yerleşim düzeni drenler için uniform konsolidasyon sağladığı için daha sık kullanılmaktadır (Holtz vd., 1991). İmalat ile oluşan kare veya altıgen etki bölgeleri, sayısal çözümlerde kullanılmak için eşdeğer dairesel alanlara dönüştürülür (Eşitlik 3.48, 3.49).

$$D=1.05s \text{ (kare dizilim için)} \quad (3.48)$$

$$D=1.13s \text{ (üçgen dizilim için)} \quad (3.49)$$

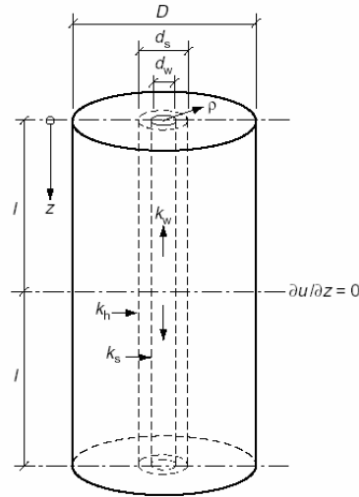


Şekil 3.11. Düşey drenlerin yerleşim düzeni (URL-1, 2019)

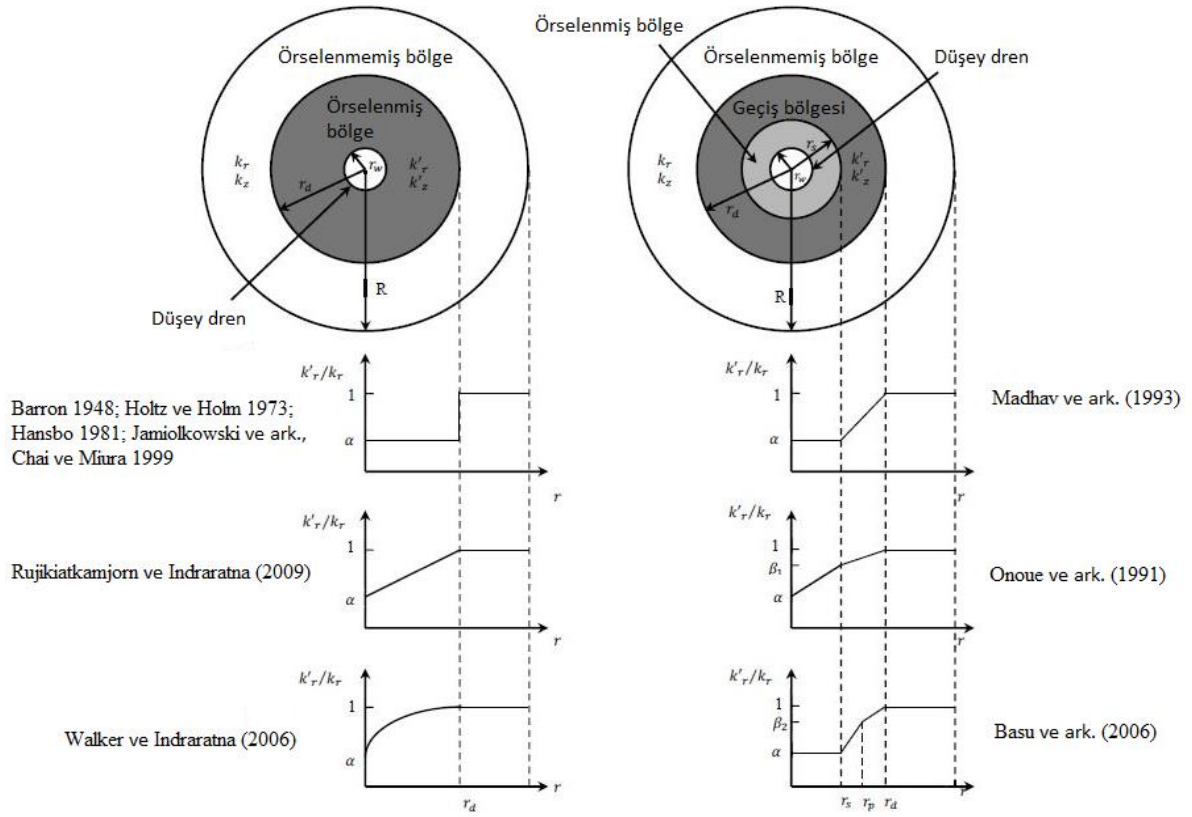


**Şekil 3.12.** Düşey drenlerin yerleşim düzeni

Mandrel ile düşey drenlerin imalatı yapılırken, özellikle mandrele yakın bölgelerde, zemin önemli ölçüde örselenir ve hasar görür. Böylece örselenmiş (smear) bölge oluşmaktadır. Bu bölgede zemin geçirirliliği (permeabilite) azalmakta ve sıkışabilirlik artmaktadır (Lo ve Mesri, 1994). Zemin geçirgenliğinin azalması da konsolidasyon sürecini azaltmaktadır. Barron (1948) ve Hansbo (1981), dren etrafındaki örselenmiş ve örselenmemiş zemini silindirik bölgelere ayırmıştır (Şekil 3.13). Bu yaklaşım birçok analitik yöntem için temel olmuştur. Örselenmeden dolayı permeabilitedeki azalmanın miktarını ölçmek için standart bir yöntem bulunmamaktadır. Ancak, permeabilite değişiminin zemin türüne ve zeminin düşey drene olan yatay uzaklığı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu kapsamda farklı hipotezler geliştirilmiştir (Şekil 3.14).



**Şekil 3.13.** Örselenme etkisi (Smear effect, Hansbo 1981)



**Şekil 3.14.** Düşey dreni çevreleyen örselenmiş bölgenin kesiti (Azari, 2015)

Drenlerin deşarj (boşaltma) kapasitesi en önemli tasarım parametrelerindedir. Bu parametre, drenin yapıldığı malzeme, dren uzunluğu ve drenlerde meydana gelen katlanmalar gibi faktörlere bağlıdır. Dren boyunun önemli olmasının nedeni, yanal zemin basıncının artması ile dren kanallarının daralması ve su tahliyesinin zorlaşmasıdır. Ayrıca drenlerin katlanması da dren çekirdeğine olan akışı azaltmaktadır. Deşarj kapasitesinin hesaplanması için drenlerin direnç kapasitesinin analiz edilmesi gerekmektedir. Ancak deşarj kapasitesi, drenlerin performansında dren aralığı ve örselenme kadar büyük bir etkiye sahip olmadığı için genelde hesaplara dahil edilmemektedir.

Drenler çalışırken zemindeki konsolidasyonun, drenin deşarj kapasitesini geçmesi durumunda, drenler bünyesine su almamak için direnç gösterecektir. Bu duruma kuyu direnci (well resistance) adı verilmektedir. Bu durum daha çok dren filtrelerindeki bozulmadan dolayı dren kesitinin azalmasından ya da ince daneli zeminin filtre içine girip akış için gerekli alanı azaltmasından kaynaklanmaktadır. Prefabrik bir düşey drenin deşarj kapasitesinin 100-150 m<sup>3</sup>/yıl seviyesini aşması durumunda kuyu direncinin etkili olmadığı öne sürülmektedir.

Düşey drenlerin yatay doğrultudaki konsolidasyon katsayısı, düşey doğrultudakinden daha yüksektir, bu nedenle radyal yöndeki drenaj yolu önemli ölçüde azaltılmaktadır. Barron (1948), düşey drenlerin radyal konsolidasyonu için en kapsamlı çözüm yöntemi sunmuştur (Indraratna, 2003). Barron'un radyal konsolidasyon teorisi birim hücre kavramı esasına dayanarak kuyu direnci ve zemindeki örselenmeyi de hesaba katmaktadır. Birçok yaklaşımın temeli olan bu teori, sonraları çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Yoshikuni ve Nakanodo, 1974; Hansbo, 1981; Onoue, 1988). Bu teoriler çoğu kez birim hücre yöntemini kullanarak radyal yöndeki konsolidasyonu analiz etmiş ve aşağıda iyi bilinen eşitlikleri sunmuşlardır;

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{\mu}\right), \quad (3.50)$$

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} \quad (3.51)$$

$$\mu = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{k_h}{k_s}\right) \ln(s) - 0.75 + \pi(2lz - z^2) \left(\frac{k_h}{q_w}\right) \quad (3.52)$$

$$n = (d_e / d_w) \quad (3.53)$$

$$s = (d_s / d_w), \quad (3.54)$$

$U_h$  : Ortalama yanal konsolidasyon derecesi

$T_h$  : Zaman faktörü

$c_h$  : Radyal konsolidasyon katsayısı

$t$  : Zaman

$d_e$  : Zemin silindirinin çapı

$\mu$  : Örselenme ve kuyu direnci faktörü

$d_w$  : Düşey drenin eşdeğer çapı

$d_s$  : Örselenme bölgesinin çapı

$l$  : Dren boyu

$q$  : Düşey drenin deşarj kapasitesi

$z$  : Düzlem deformasyon koşullardaki yatay düzlem derinliği

$k_h$  : Örselenmiş bölgedeki yatay permeabilite katsayısı

$k$  : Örselenmemiş bölgedeki yatay permeabilite katsayısı

### 3.3. Taş Kolonların Sayısal Analizi

Günümüzde kompleks bir problemi basitleştirerek, problemin doğru sonucunu ya da yaklaşık sonucunu elde etmeyi sağlayan yönteme sonlu elemanlar yöntemi denilmektedir. Yöntem 1970 yıllarından itibaren Geoteknik mühendisliğinde kullanılmaktadır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak birçok bilgisayar programı geliştirilmiştir. Karmaşık zemin problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında ise yaygın olarak kullanılan Plaxis paket programı kullanılmıştır. Plaxis yazılımı ile detaylı bilgi sonraki bölümde verilmiştir.

Taş kolonların sayısal analizlerinin yapılma amacı arazi ve laboratuvar çalışmalarına yardımcı olmaktır. Sayısal modelleme çalışmaları ön tasarım olmakla birlikte problemin gerçek boyutları ile değerlendirilmesi açısından pratik, hızlı ve kapsamlı bir çalışmadır. Sayısal modelleme yapılırken problemin doğru sonucuna ulaşmak için model geometrinin doğru bir şekilde oluşturulması ve zemin parametrelerinin doğru seçilmesi gereklidir. Ambily ve Gandhi (2007), taş kolon analizleri yapılırken yaşanan zorluklardan ötürü bu problemlerin sonlu elemanlar yöntemi gibi ileri düzey sayısal yöntemlerle analiz edilmesi gerektiğini savunmuşlardır.

Taş kolonların sayısal analizi literatürde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır ve yapılan bu çalışmaların birçoğunda aksel simetrik birim hücre yaklaşımı esas alınmıştır. Bu yaklaşım ise daha çok grup taş kolonların sayısal analizi için kullanılmaktadır.

Sayısal analiz yapılırken problemin en gerçekçi şekilde analizinin yapılabilmesi için sistemin üç boyutlu (3B) şekilde analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekir. 3B sayısal modelde grup taş kolonlardaki her bir kolonun ve o kolonu çevreleyen zeminin modellenmesi çok fazla çözüm aşaması gerektirmektedir. Bu gibi zorluklardan ötürü çözümlemenin kolaylaştırılması için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir.

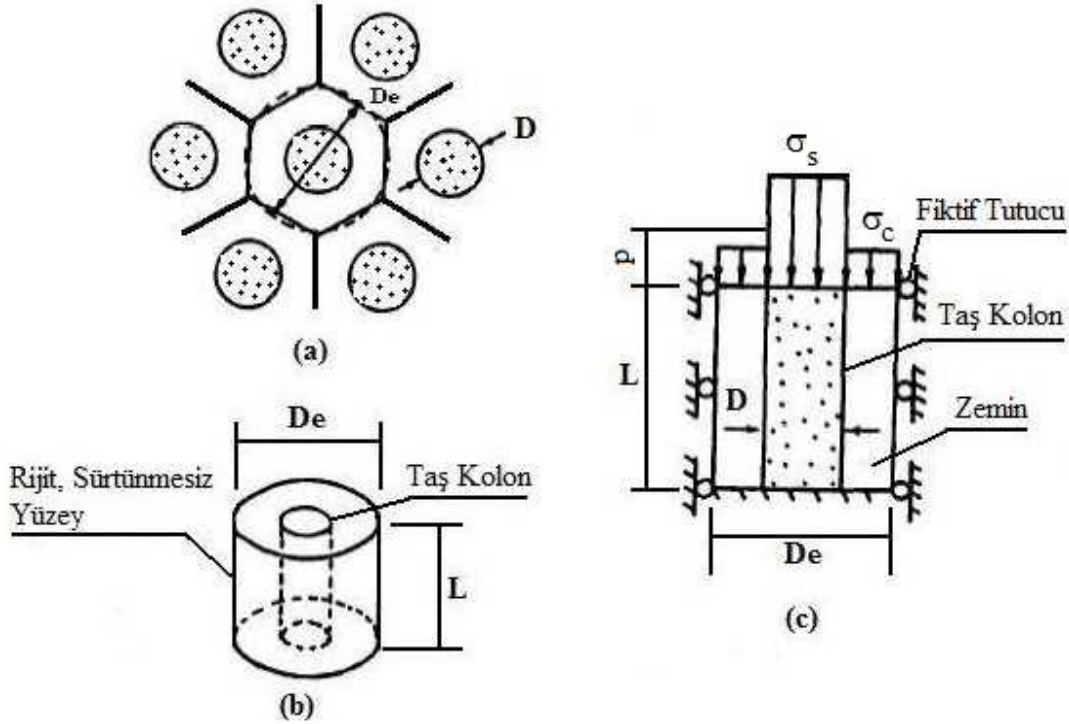
Yaygın olarak kullanılan beş temel yaklaşım şöyledir;

- Birim Hücre Yaklaşımı (İki boyutlu aksel simetrik)

- İki Boyutlu Düzlem Deformasyon Yaklaşımı (Plane Strain)
- Homojenleştirme Tekniği
- Ortalama Hacim Yöntemleri (Eksenel simetrik yaklaşım)
- Üç Boyutlu Modelleme

### ***Birim Hücre Yaklaşımı (İki Boyutlu Eksenel Simetrik)***

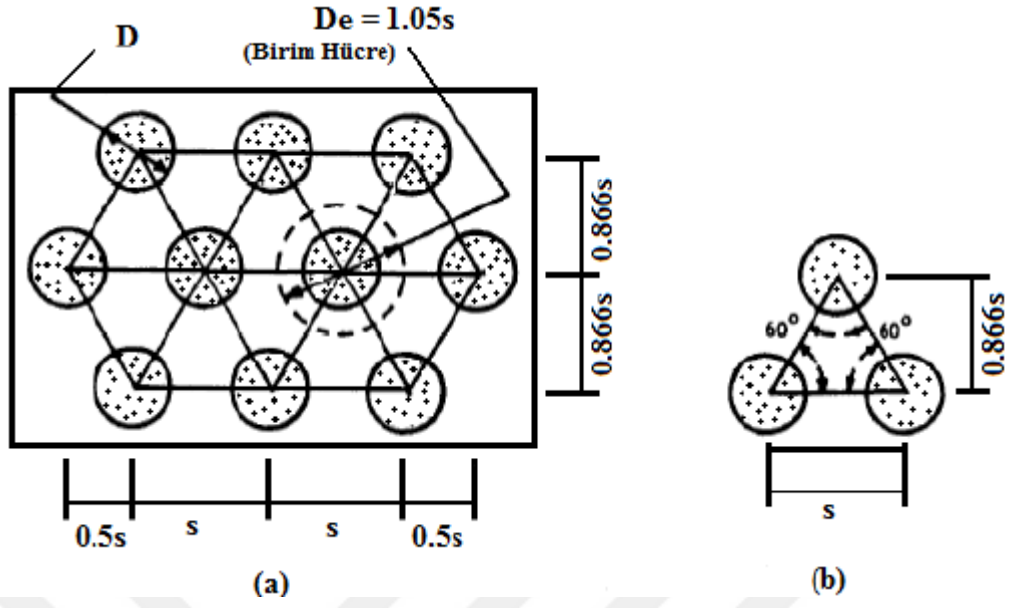
Taş kolonlar genelde grup olarak tasarlanmakla birlikte analitik yaklaşımlarda çözümlemenin kolay yapılabilmesi için 2D koşullarda sadece bir kolon ve bu kolonun etrafını çevreleyen zemin dikkate alınır. Deformasyonların yalnızca düşey yönde olduğu kabulü yapılır yanal yöndeki deformasyonlara izin verilmez. Gerilme konsantrasyonu, eşdeğer çap, alan değişim oranı birim hücre kavramı için etkili faktörlerdir.



**Şekil 3.15.** Birim hücre yaklaşımı. (a) plan (b) birim hücre (c) kesit (Priebe, 1995)

### **Eşdeğer Çap**

Oturma ve stabilite analizlerini doğru bir şekilde hesaplayabilmek amacıyla kolon ve kolonun çevresindeki zemin bir bütün olarak düşünülmektedir. Üçgen yerleşim modelinde taş kolon ve kolonu çevreleyen zemin alanı Şekil 3.16' de gösterilmiştir. Şekillerde gösterildiği gibi kolonu çevreleyen zemin alanı düzgün altıgendir ve hesaplamaların kolaylığı açısından bu alan aynı değerde bir daire olarak düşünülebilir.



**Şekil 3.16.** Taş kolonların eşkenar üçgen dizilimi (a) plan, (b) geometrisi (Priebe, 1995)

Eşkenar üçgen dizilimli ve kare dizilimli taş kolonların eşdeğer çapları Eşitlik 3.55 ve Eşitlik 3.56' daki gibidir (Barksdale ve Bachus, 1983).

$$D_e = 1.05s \quad (3.55)$$

$$D_e = 1.13s \quad (3.56)$$

Sonuç olarak  $D_e$  eşdeğer çapına sahip tek bir adet kolon ile bu kolonu çevreleyen zeminin oluşturduğu silindirik biçimli hacim 'birim hücre' olarak adlandırılmaktadır. Burada kolonun merkezi, birim hücre modelinin de merkezi olmaktadır.

### Alan Değişim Oranı

Taş kolon analizi yapılırken sadece bir adet kolon ve o kolonun etki bölgesi yani birim hücre yöntemi dikkate alınmaktadır. Bundan dolayı tasarım açısından en önemli parametrelerden biri taş kolonun; etki bölgesi içerisinde kalan kesit alanıdır. İyileştirme yapılan zeminin performansı değerlendirilirken taş kolon ile değiştirilen zeminin hacmi çok önemlidir ve bu hacmi hesaplamak için alan yerleşim oranı (alan değişim oranı) kavramı kullanılmaktadır. Alan değişim oranı Eşitlik 3.57' deki gibi gösterilebilir.

$$a_c = \frac{A_c}{A} \text{ Eşitlik} \quad (3.57)$$

$A_c$  : Sıkıştırılmadan sonra taş kolonun alanı

$A$  : Birim hücrenin toplam alanı

Zemin alan oranı ise;

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (3.58)$$

$$a_c = 1 - a_s \quad (3.59)$$

formülleri yardımıyla hesaplanır. Bu formüller dışında alan değişim oranı

$$a_s = c_1 \left( \frac{D}{s} \right)^2 \quad (3.60)$$

bağıntısı ile de bulunabilir.

$D$  : Sıkıştırılan taş kolonun çapı

$s$  : Taş kolonların merkezlerinin arasındaki uzaklık

$c_1$  : Taş kolon dizilimine göre bulunan sabit bir katsayı

$c_1$  katsayısı, kare dizilim için  $\pi/4$ ; eşkenar üçgen dizilim için  $\pi/2\sqrt{3}$  olarak alınır.

Eşkenar üçgen dizilimine göre  $a_s$ ;

$$a_s = 0.907 \left( \frac{D}{s} \right)^2 \quad (3.61)$$

şeklinde hesaplanır.

### Gerilme Konsantrasyonu

Basitçe yük paylaşım oranı olarak ifade edilen gerilme konsantrasyon oranı ( $n$ ) karma sisteme etkiyen yükten dolayı kolon ve zeminde oluşacak olan basınçların oranıdır (Eşitlik 3.62). İlk başlarda üniform olarak sisteme dağılan bu yük daha sonraları taş kolonda gerilme artışına neden olur. Taş kolonu çevreleyen zemine etkiyen gerilme ise azalır. Taş kolon malzemesi zemine kıyasla fazla rijitlik gösterdiği için kompozit sisteme etkiyen gerilmelerin büyük bir bölümünü karşılar.

$$n_{1-D} = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_s} = \frac{D_q}{D_s} \quad (3.62)$$

$\sigma_c$  : Taş kolona etkiyen gerilme

$\sigma_s$  : Zemine etkiyen gerilme

Birim hücre içerisindeki bir derinlik için ortalama gerilme, düşey kuvvetlerin dengesi için verilen alan oranı yardımıyla Eşitlik 3.63 ile hesaplanır.

$$\sigma = \sigma_c a_c + \sigma_s (1 - a_c) \quad (3.63)$$

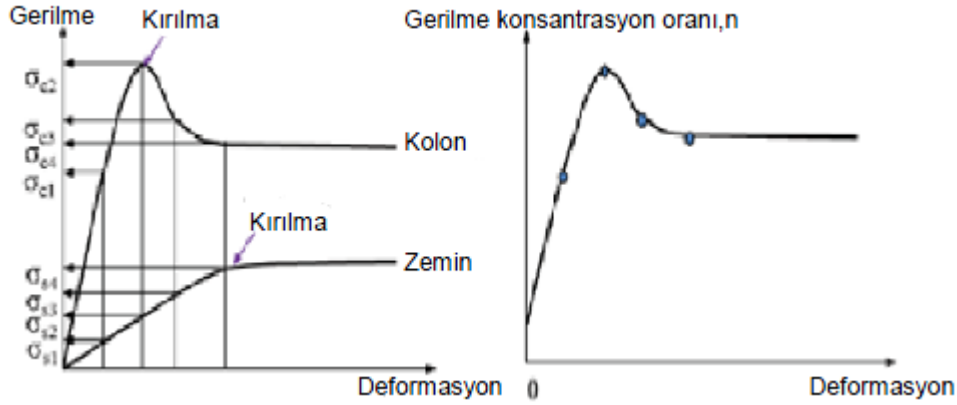
Zeminde ve taş kolonda oluşacak gerilmeler ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_s \sigma \quad (3.64)$$

$$\sigma_c = \frac{n\sigma}{[1 + (n-1)a_c]} = \mu_c \sigma \quad (3.65)$$

$\mu_s$  : zemindeki gerilme oranı

$\mu_c$  : taş kolondaki gerilme oranı



Şekil 3.17. Karma sistemde kolon-zemin arasındaki yük paylaşımı (Han, 2015)

Yukarıdaki eğriler incelenerek aşağıdaki sonuçlara varılabilir.

- Kolon ve zeminin rijitlik derecelerinin birbirinden farklı olmasından dolayı gerilme konsantrasyon oranı sabit kalmayıp zamanla bağlantılı olarak devamlı değişiklik göstermektedir.
- İlk anlarda  $n$  artarak maximum bir seviyeye ulaşır. Daha sonra deformasyonun artışıyla birlikte  $n$  azalır ve kolondan zemine yük geçer.
- Yükün zeminden kolona veya kolondan zemine transfer oluşu  $n$  'nin artıp azalışıyla ilgilidir ve bu oran konsolidasyon sonunda sabit kalır.
- Gerilme konsantrasyon oranı taş kolonlarda genellikle 1 ila 5 arasındadır.

### ***İki Boyutlu Düzlem Deformasyon (Plane Strain) Yaklaşımı***

Birçok araştırmacı tarafından incelenen yöntem daha çok arazi koşullarında dolgu gibi uzayıp giden problemlerin analizinde kullanılmaktadır. Problemlerin analizleri düzlem deformasyon yaklaşımı ile iki boyutlu olarak gerçekleştirilir. Eksenel simetrik yaklaşımda birim hücrenin düzlem deformasyon koşullara dönüştürüldüğü bir yöntem izlenmektedir. Bu yaklaşımda üç boyutlu gerçek bir problemin iki boyutlu koşullara dönüştürülmesi için model geometrisinin veya parametrelerin arasında bir dönüşüm yapılır.

### ***Homojenleştirme Tekniği***

Ortalama hacim yönteminde taş kolon ile iyileştirilmiş zemin homojen bir malzeme olarak düşünülür ve bu malzeme kompozit zemin parametreleri kullanılarak modellenir (Schweiger, 1989). Bu en basit ortalama hacim yöntemi 'homojenleştirme' olarak

adlandırılmaktadır. Bu teknikte kompozit malzemenin gerilme-deformasyon davranışı ve zemin-kolon bloğunun yükleme altındaki davranışı incelenir.

### ***Ortalama Hacim Yöntemleri (Eksenel Simetrik Yaklaşım)***

Bu yöntemde dairesel yükleme altındaki taş kolonlar taş malzemedan oluşan halkalar biçiminde modellenmektedir bu durumda imalat etkisi dikkate alınmamaktadır. Eksenel simetrik yaklaşımda, eksenel simetrik koşullarda eşdeğer alana sahip silindirik bir halka esastır. Bu kompozit malzemenin gerilme-deformasyon davranışının tanımlanması durumunda sistem davranışı her türlü yükleme ve sınır koşullarında analiz edilmekle birlikte kolon-zemin etkileşimi modellenememektedir. Bununla birlikte kolon ve zeminin lineer olmayan gerilmeye bağlı davranışı ve kolon-zemin rijitlik farkı hesaba katılmaz bu durumdan ötürü göçme ve göçmeye yakın durumlarda gerçekçi olmayan göçme mekanizmaları ortaya çıkar. Bu yaklaşım ilk olarak Mitchell ve Huber (1985) tarafından taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerde kullanılmıştır.

### ***Üç Boyutlu Modelleme***

Üç boyutlu modelleme arazi koşullarını en gerçekçi şekilde temsil eden yaklaşımdır. Fakat taş kolonlarla yapılan iyileştirme problemleri karmaşık ve zor olduğu için daha pratik olan yaklaşımlar kullanılmaktadır.

### **3.4. Düşey Drenlerin Sayısal Analizi**

Karmaşık düşey dren davranışını modellemek, zemin davranışını tahmin etmek ve analitik yaklaşımların sınırlamalarını azaltmak için birçok sayısal analiz türü kullanılmaktadır. Sayısal analizler için kullanılan çok sayıda yazılım (Plaxis, Crisp, Flac, Abaqus vb.) bulunmaktadır. Bu yazılımlar sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi yöntemleri kullanarak karmaşık geoteknik problemleri kısa bir sürede çözebilmektedir. Bunlardan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde düşey drenlerin sayısal analizi ile ilgili geliştirilmiş birçok yaklaşım bulunmaktadır (Mesri vd.1994; Zhu ve Yin 2000; Indraratna ve Redana 2000; Indraratna vd. 2005 a, b; Indraratna vd. 2007).

Düşey drenlerin 3D (üç boyutlu) analizleri problemin geometrisi ve dren sayısı göz önüne alındığı zaman oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle problemin iki boyutlu

analizi daha hızlı bir çözüm sunmaktadır. Ancak düşey drenlerin sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu olarak analiz edilmesi mümkün değildir. Düşey drenlerin etrafındaki zeminin konsolidasyon davranışı taş kolonlardaki gibi aksenel simetrik bir problemidir. Dolgular ise 2 boyutlu düzlem şekil değiştirme koşullarda analiz edilmektedir. Bu sebeple, dolgu altındaki aksenel silindirik geometriye sahip düşey drenlerin analizi yapılırken eşdeğer düzlem şekil değiştirme koşullarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme işlemi gerçekleştirilebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Hird vd., 1992; Indraratna and Redana, 1998). Bu yöntemler ise genellikle Barron ve Hansbo tarafından geliştirilen analitik çözümler esas alınmıştır. Dönüşümler yapılırken drenler arasındaki aralığı ve/veya dren etrafındaki zeminin permeabilitesinde değişiklikler yapılmaktadır. Bu dönüşüm (eşleme) yöntemleri esnasında bazı kabuller yapılmaktadır; zeminin lineer elastik davranış gösterdiği, zemindeki deplasmanların üniform olduğu, permeabilitenin sabit kaldığı ve yatay deplasmanların oluşmadığı bu kabullerden bazılarıdır. Bilindiği üzere, bu kabuller yumuşak zemin davranışını yansıtmamaktadır, bu nedenle daha gerçekçi yaklaşımlar geliştirilmektedir. Sonraki bölümde günümüzde sıkça kullanılan eşleştirme yöntemleri sunulmaktadır.

### ***Hird vd. (1992)***

Bu yöntemde, geometrik uygunluk dikkate alınmış ve tek bir düşey dren esas alınarak birim hücre modeli kullanılmıştır. Dönüştürmede, zeminin permeabilitesi değiştirilmez ve örselenmiş bölge gösterilmez. Eşitlik 3.64 kullanılarak aksenel simetrik koşullardan düzlem şekil değiştirmeye dönüşüm sağlanmaktadır.

$$\frac{B}{R} = \left\{ \left( \frac{3}{2} \right) \left[ \ln \left( \frac{R}{s} \right) + \left( \frac{k}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_s}{r} \right) - \left( \frac{3}{s} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.66)$$

B : Düzlem şekil değiştirme koşullarındaki birim hücrenin yarı genişliği

R : Aksenel simetrik birim hücrenin yarı genişliği

$r_w$  : Drenin yarıçapı

$r_s$  : Örselenmiş bölgenin yarıçapı

k : Doğal zeminin yatay permeabilitesi

$k_s$  : Örselenmiş bölgenin yatay permeabilitesi

*Hird vd. (1992)* tarafından geliştirilen bir diğer eşleme yöntemi ise Eşitlik 3.65 da görülen bağıntı ile tanımlanmıştır. Bu yöntemde ise permeabilite değerleri aksel simetrik ve düzlem şekil değiştirme koşulları arasında dönüştürüldüğü için permeabilite eşleme yöntemi de denilmektedir.

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2}{3 \left[ \ln \left( \frac{R}{r_s} \right) + \left( \frac{k_{ax}}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_s}{r_w} \right) - \left( \frac{3}{4} \right) \right]} \quad (3.67)$$

$k_{pl}$  : düzlem şekil değiştirme koşullarındaki permeabilite

$k_{ax}$  : aksel simetrik koşullarındaki permeabilite

*Hird vd. (1992)* tarafından geliştirilen birleşik eşleme yöntemi olarak da adlandırılan bir diğer yöntem ise Eşitlik 3.66'da görüldüğü gibi hem geometrik hem de permeabilite değerlerinin değiştirilerek uygulandığı yöntemdir. Bu yöntemde sonlu elemanlar ağı istenen geometrik koşullara göre ayarlanabilmektedir.

$$\frac{k_{pl}}{k_{ax}} = \frac{2B^2}{3R^2 \left[ \ln \left( \frac{R}{r_s} \right) + \left( \frac{k_{ax}}{k_s} \right) \ln \left( \frac{r_s}{r_w} \right) - \left( \frac{3}{4} \right) \right]} \quad (3.68)$$

## BÖLÜM IV

### SAYISAL ÇALIŞMALAR ve VAKA ANALİZİ

#### 4. SAYISAL ÇALIŞMALAR ve VAKA ANALİZİ

Bu bölümde taş kolon ve düşey drenlerin zamana bağlı davranışı Plaxis bilgisayar yazılımı ile detaylı olarak araştırılmıştır. Sayısal çalışmalar kapsamında ilk olarak taş kolon ve düşey drenlerin davranışında önem arz eden tasarım parametrelerinin zamana bağlı davranışa etkisi araştırılmıştır. Sonraki bölümde literatürden seçilen ve Singapur’da inşa edilmiş Changi dolgusu sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada arazide yapılan ölçüm sonuçları, oluşturulan taş kolon ve düşey drenli sayısal model sonuçları karşılaştırılarak düşey dren ve taş kolonların bu arazideki performansları değerlendirilmiştir.

##### 4.1. Plaxis Bilgisayar Yazılımı

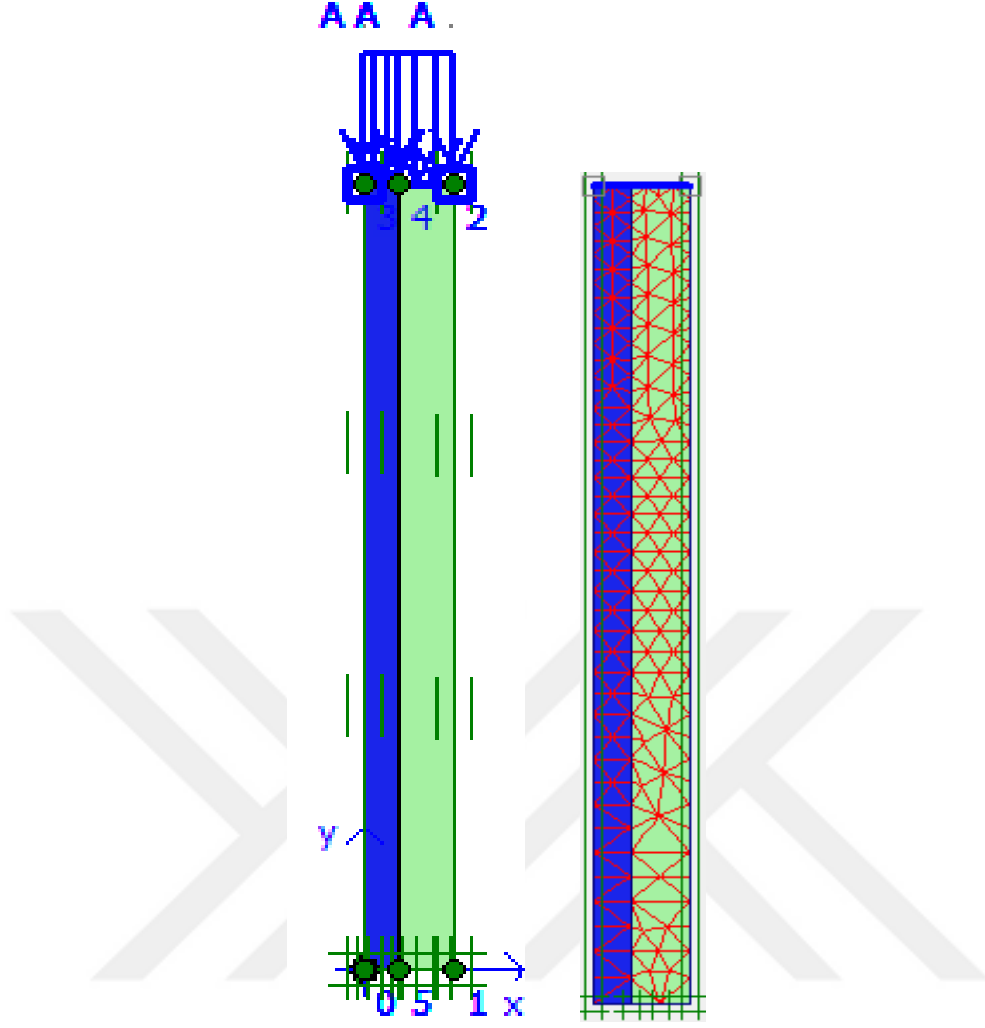
Plaxis Hollanda Delf Üniversitesinde geliştirilmiş bir bilgisayar yazılımıdır. Program ilk olarak, yumuşak zemin üzerine inşa edilen dolguların analizi için tasarlanmıştır. 1993 yılında ticari bir yazılım haline dönüştürülmüştür ve 1998 yılında ise programın Windows sürümü çıkarılmıştır. Plaxis bilgisayar yazılımı, sonlu elemanlar yöntemini esas alarak deformasyon, stabilite ve dinamik analizleri yapabilmektedir. Kullanım kolaylığı nedeni ile uygulama mühendisleri tarafından da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Program, problem çözümlerini dört aşamada yapmaktadır. İlk aşamada (*Input*), problemin geometrisi, malzeme özellikleri ve başlangıç koşulları tanımlanmaktadır. İkinci aşamada (*Calculation*) problemin çözümü yapılmaktadır. Üçüncü aşamada (*Output*) analiz sonuçları alınırken, dördüncü aşamada (*Curves*) ise analiz sonuçları grafik olarak değerlendirilmektedir.

## 4.2 Taş Kolon Tasarım Parametrelerinin Araştırılması

Bu bölümde, taş kolonların imalatında önemli olan tasarım parametrelerinin (elastisite modülü, taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısı, taş kolon çapı ve boyu, kolonlar arası mesafe) taş kolonların zamana bağlı oturmaları üzerindeki etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde önceki bölümde detaylı olarak izah edilen ve tek bir taş kolon davranışını yansıtan birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. Analizler iki boyutlu eksenel simetrik koşullarda ve 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Sınır koşulları belirlenirken yan yüzeylerde yatay hareketin tutulu olduğu kabul edilmiş ve zeminin sadece düşey yönde hareketine izin verilmiştir ( $u_x=0$ ,  $u_y \neq 0$ ). Su seviyesinin zeminin üst yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir. Birim hücre yüklemesinin her bir kademesi 25kPa tanımlanarak, dört kademe toplam yük 100kPa değerine çıkarılmıştır. Her bir yüklemde yedi gün süreli konsolidasyon analizi yapılmış, bu yük yüz gün bekleme bırakılarak sonraki yükleme kademesine geçilmiştir. Analizlerde hesaplama aşamasından önce başlangıç gerilme koşulları ve boşluk suyu basınçları oluşturulmuştur.

Zemin ve taş kolonu modellemek için yaygın olarak kullanılan Mohr Coulomb (MC) zemin modeli kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan kolon ve zemin model parametreleri literatürde yer alan mertebelerde seçilmiştir. Bu bölümde yapılan parametrik çalışmalarda etkisi araştırılan tasarım parametresi değiştirilerek diğer model parametreleri sabit tutulmuştur. Kullanılan model parametreleri ilgili bölümlerde verilmiştir.



Şekil 4.1. Tekil taş kolonun birim hücre modeli

#### ***Taş Kolon Rijitliğinin Değerlendirilmesi ( $E_c/E_u$ Etkisi)***

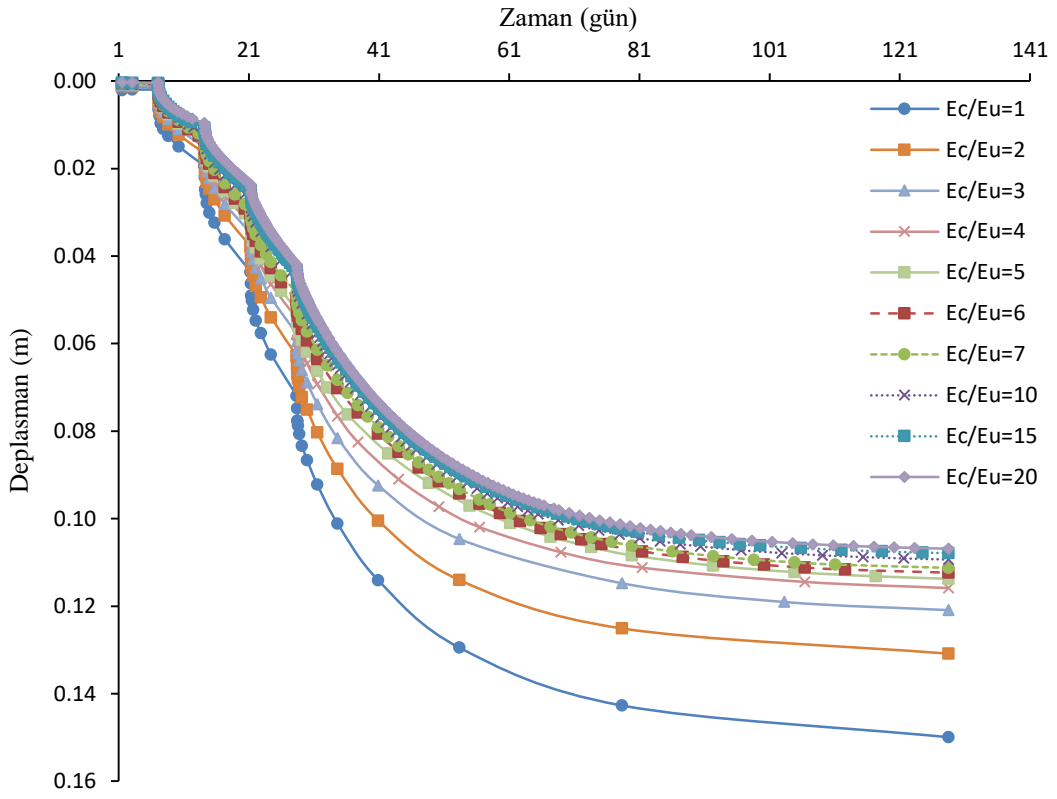
Taş kolonların elastisite modülü ( $E_c$ ), tasarım için önem arz eden parametrelerdendir. Bu parametrenin etkisini araştırmak için zeminin drenajsız koşullardaki elastisite modülü ( $E_u=5\text{MPa}$ ) sabit tutularak kolonunki değiştirilmiştir. Taş kolon çapı ( $D_c$ ), 0.80m, kolon boyu ( $L$ ) 10m ve kolon merkez mesafesi ( $s$ ) 2m alınarak sabit tutulmuştur. Kolon rijitliğinin etkisini görmek için  $E_c/E_u$  oranı değiştirilerek zamana bağlı meydana gelen oturmalar değerlendirilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin ve taş kolon parametreleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Taş kolon ve zemin parametreleri ( $E_c/E_u$  etkisi)

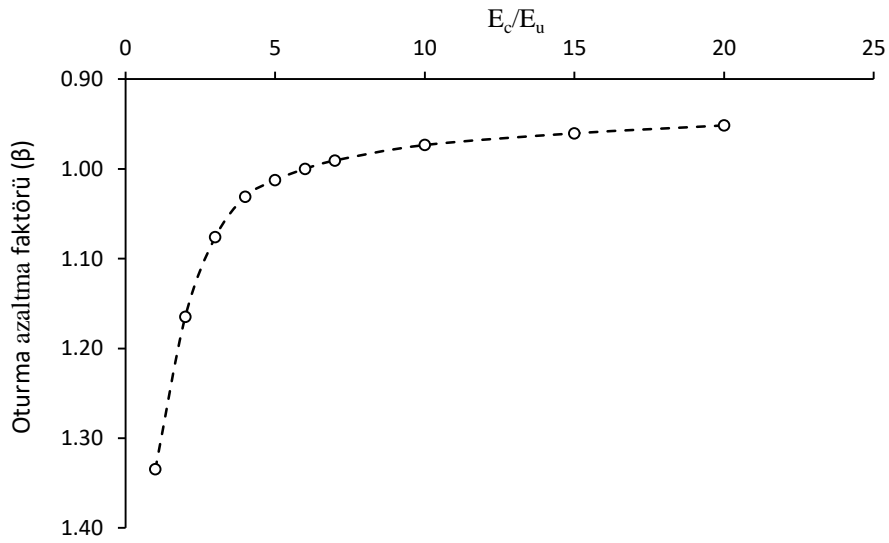
Parametreler	Zemin	Taş Kolon
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	2E-5	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	5000	Değişken
$\nu$	0.3	0.3
c (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
$\phi$	25	30

Taş kolonların zemine göre daha rijit olması iyileştirme açısından önemlidir. Yapılan parametrik çalışmalarda da bu durum tespit edilmiştir. Taş kolonun elastisite modülünün artması ile zeminde meydana gelen oturma miktarı azalmaktadır (Şekil 4.2). Deb (2008) ise, taş kolon rijitliğinin artması ile maksimum oturmanın azaldığı, ancak fark oturmanın arttığını belirtmiştir. Oo (2004),  $E_c/E_u$  oranının artması ile ortalama konsolidasyon oranının arttığını belirtmiştir. Bu çalışmada yapılan parametrik araştırmalarda kolon rijitliğinin 25,000 kPa ( $E_c/E_u=5$ ) değerinden sonra oturmada önemli ölçüde değişim olmadığı görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer davranış trendi görülmekle birlikte bu oran Kırnak (2017)'de  $E_c/E_u=7$ , Uysal (2016)'de  $E_c/E_u=10$ , olarak elde edilmiştir.

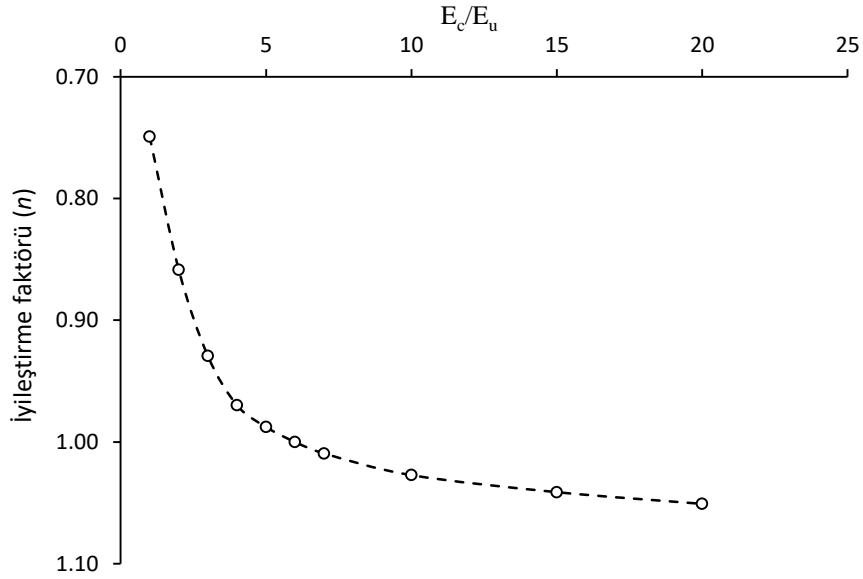
Bu bölümde ayrıca, değişen  $E_c/E_u$  oranının iyileşme faktörü ( $n$ ) ve oturma azaltma faktörü ( $\beta$ ) ile değişimi araştırılmıştır (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4). Rijitlik oranının artması ile iyileştirme oranının arttığı ve oturma azaltma faktörünün azaldığı tespit edilmiştir. Ancak değişimlerin  $E_c/E_u > 5$  değerinden sonra azalmakta olduğu görülmektedir. Bu durumda  $E_c/E_u$  oranının en az 5 olması gerektiği tespit edilmiştir. Bu serideki parametrik çalışmalarda taş kolonların iyi sıkıştırılması gerektiği, ancak fazla sıkıştırmanın da efektif olmayacağı belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Taş kolon rijitliğinin zamana bağlı oturmaya etkisi



Şekil 4.3. Taş kolon rijitliğinin oturma azaltma faktörü ile değişimi



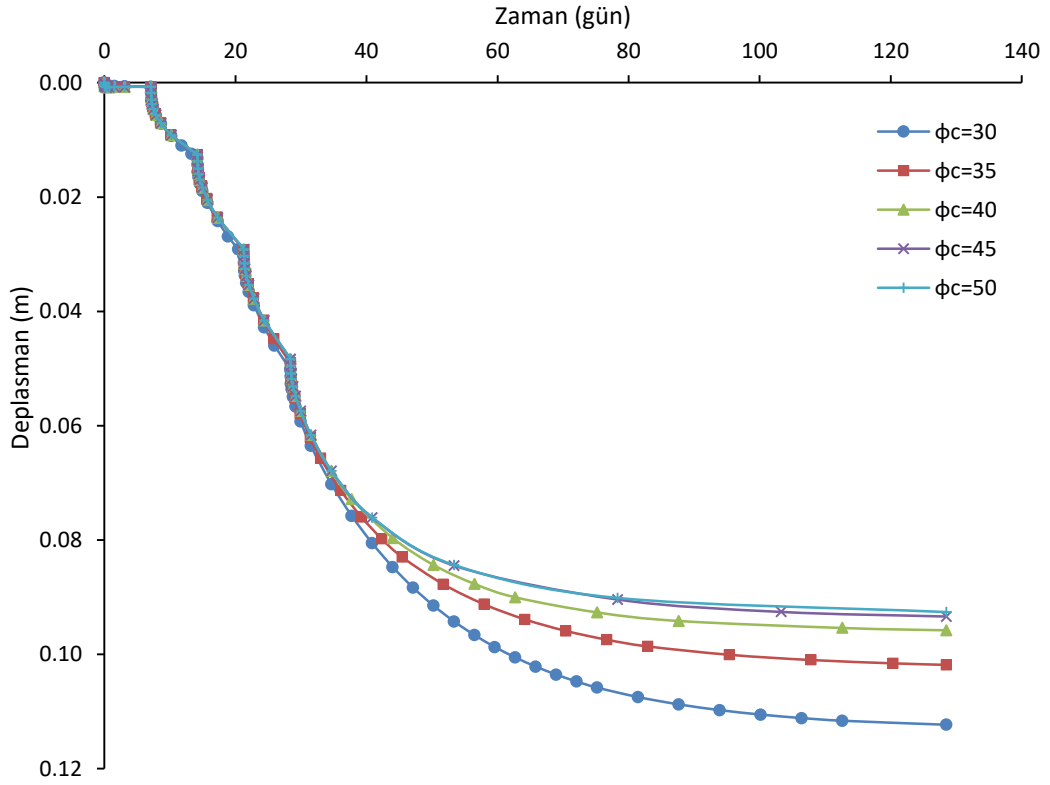
Şekil 4.4. Taş kolon rijitliğinin iyileştirme faktörü ile değişimi

#### $\phi_c$ Etkisi

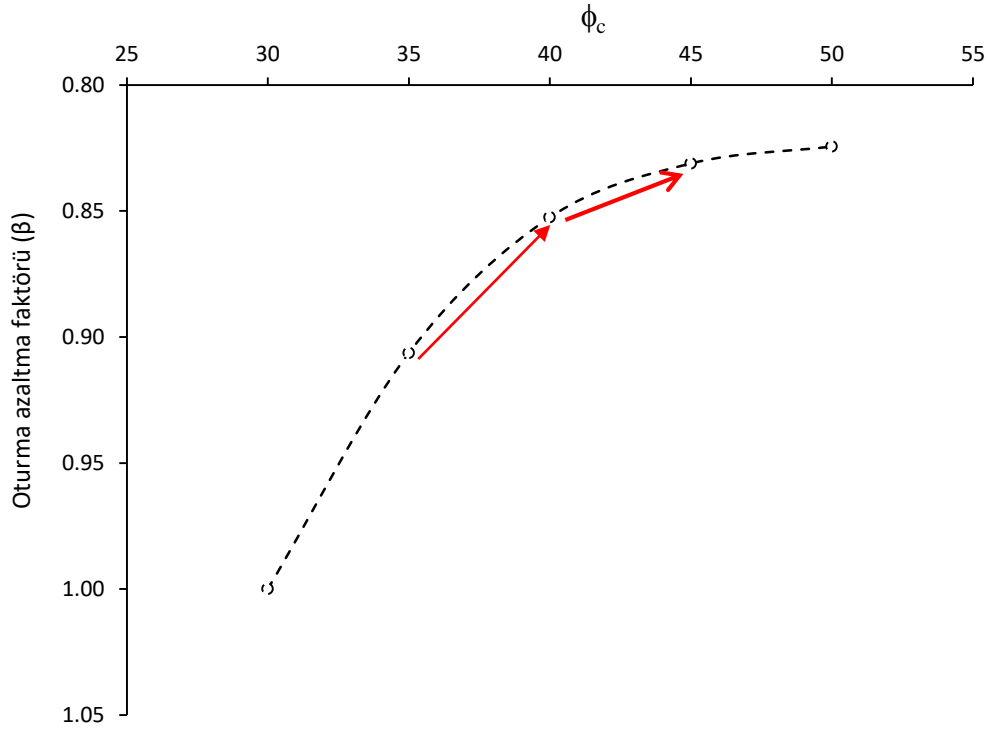
Taş kolon malzemesinin içsel sürtünme açısının ( $\phi_c$ ) başka bir ifade ile granülometrik özelliklerinin oturma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır (Şekil 4.5). Analizlerde kullanılan model parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Değişen içsel sürtünme açılarının ilk birkaç ay içerisinde fark yaratmazken zamanla içsel sürtünme açısının artması ile oturmaların azaldığı ve dolayısıyla da kolonun taşıma gücünün arttığı görülmektedir. Ancak  $\phi_c=40^0$ 'den sonra oturmadaki azalmanın önemli olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.7'de  $\phi_c$ 'nin  $n$  ve  $\beta$  ile değişimi verilmiştir.  $\phi_c$ 'nin artması ile iyileşme oranının arttığı, oturma azaltma faktörünün azalttığı tespit edilmiştir. Ancak  $\phi_c=40$  değerinden sonra her iki parametredeki değişimin önemli ölçüde olmadığı belirlenmiştir. Benzer sonuçlar Adeli (2013)'de görülmektedir. Shien ve Ann (2014)'de genellikle artan sürtünme açıları ile oturmaların azaldığını, özellikle büyük yükleme koşullarında sürtünme açısının oldukça fazla önem arz ettiğini belirtmiştir. Bu serideki analizler ile taş kolon malzemesinin uygun granülometrik özelliklere sahip olması gerektiği tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Taş kolon ve zemin parametreleri ( $\phi_c$  etkisi)

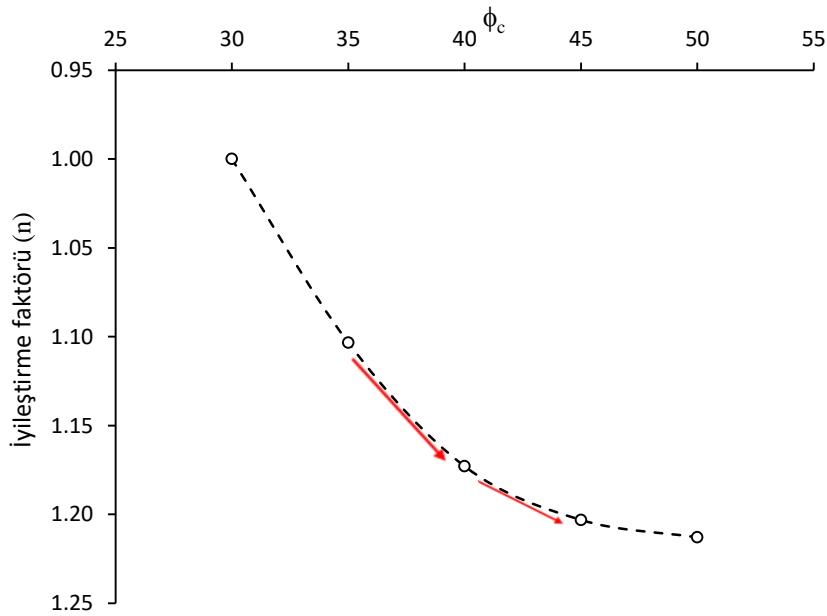
Parametreler	Zemin	Taş Kolon
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	2E-5	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	5,000	30,000
$\nu$	0.3	0.3
c (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
$\phi$	25	Değişken



**Şekil 4.5.**  $\phi_c$ 'nin zamana bağlı oturmaya etkisi



Şekil 4.6.  $\phi_c$  değerinin oturma azaltma faktörüyle değişimi



Şekil 4.7.  $\phi_c$  değerinin iyileştirme faktörüyle değişimi

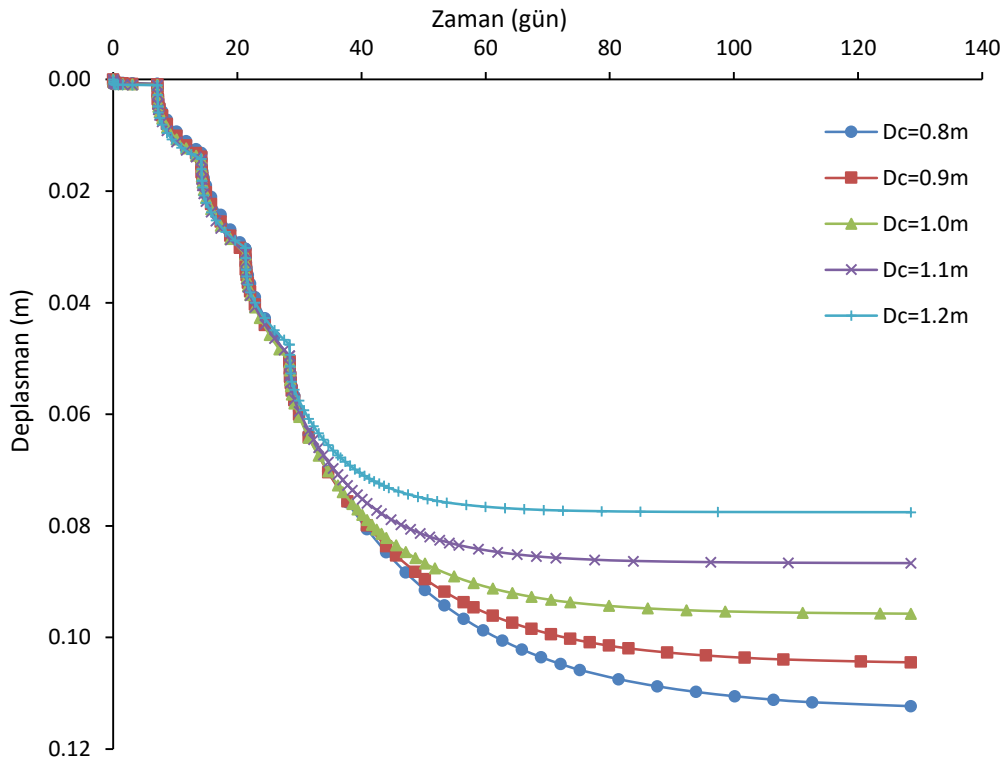
### *D<sub>c</sub> Etkisi*

Bu bölümde taş kolon çapının ( $D_c$ ) kompozit malzemenin zamana bağlı oturmasına olan etkisi araştırılmıştır (Şekil 4.8). Analizlerde kullanılan model parametreleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Analiz sonucunda taş kolonun çapının artması ile oturmaların önemli

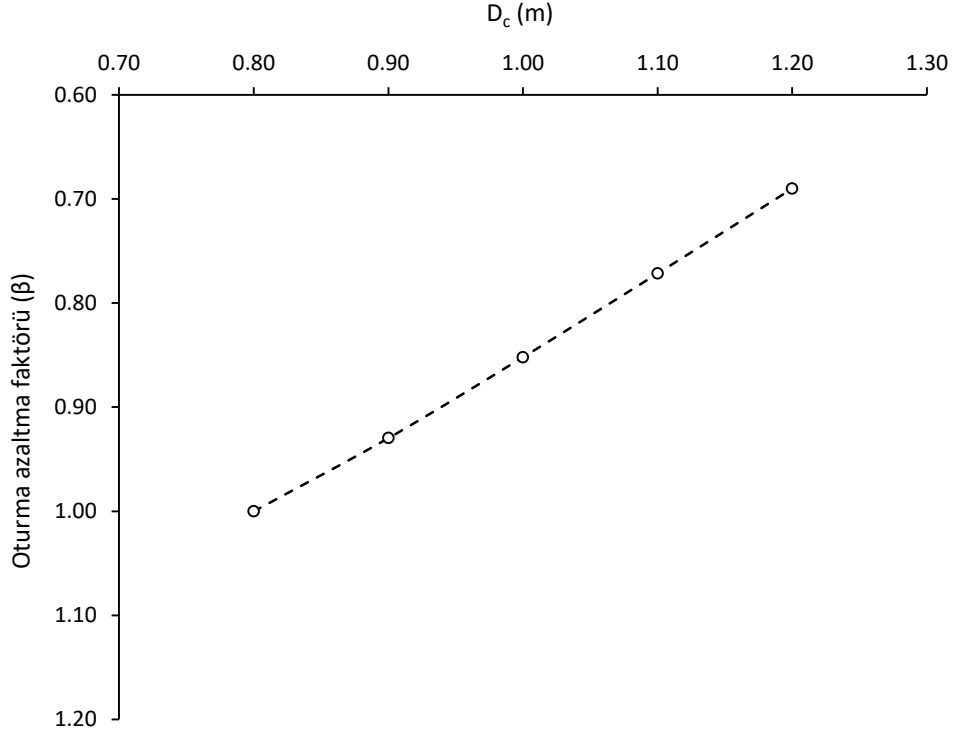
ölçüde azaldığı görülmüştür. Ayrıca taş kolon çapının  $n$  ve  $\beta$  ile değişimi de araştırılmıştır (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Taş kolonun çapının artması ile iyileştirme faktörünün arttığı, oturma azaltma faktörünün azaldığı tespit edilmiştir. Uysal (2016), Adeli (2013) ve Kırnak (2017) artan kolon çapı ile oturmaların azaldığını konsolidasyonun ise hızlandığını tespit etmiştir. Ayrıca Mohtasham ve Khodaparast (2018), kolon çapının artması ile temel altında meydana gelen oturma ve konsolidasyon süresinin önemli ölçüde azaldığını vurgulamıştır.

**Çizelge 4.3.** Taş kolon ve zemin parametreleri ( $D_c$  etkisi)

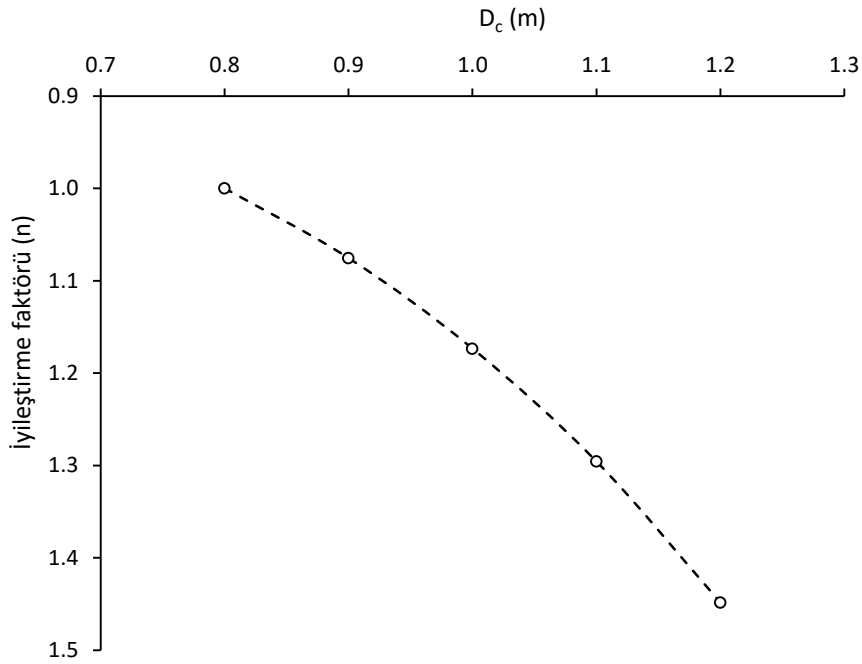
Parametreler	Zemin	Taş Kolon
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	2E-5	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	5,000	30,000
$\nu$	0.3	0.3
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
$\phi$	25	30



**Şekil 4.8.** Kolon çapının zamana bağlı oturmaya etkisi



Şekil 4.9. Kolon çapının oturma azaltma faktörü ile değişimi



Şekil 4.10. Kolon çapının iyileştirme faktörü ile değişimi

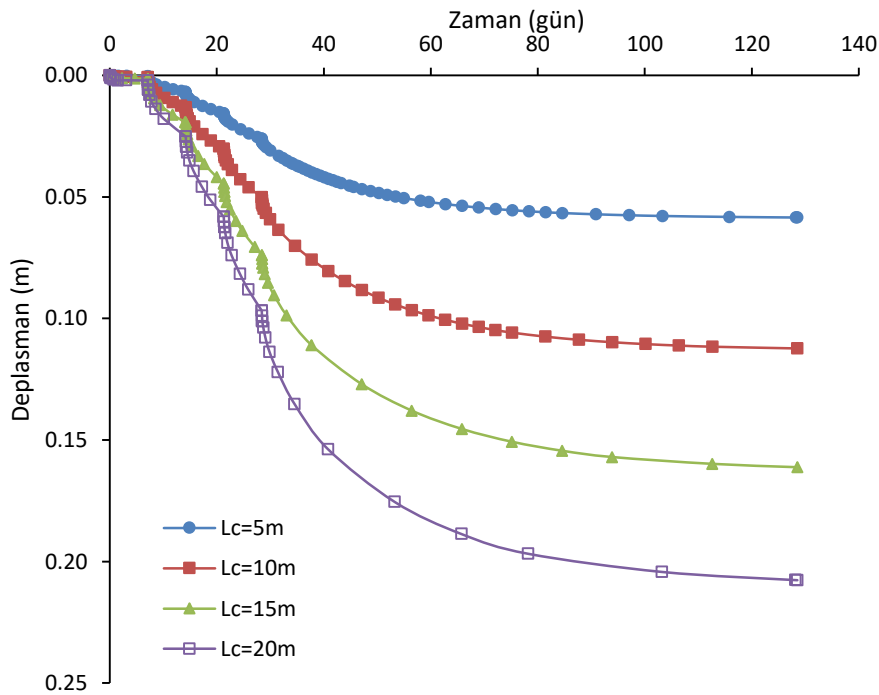
#### ***$L_c$ Etkisi***

Kolon boyu taş kolonların önemli tasarımın parametrelerindedir. Bu bölümde değişen kolon boyunun (5, 10, 15 ve 20m ) zamana bağlı oturmaya etkisi araştırılmıştır (Şekil

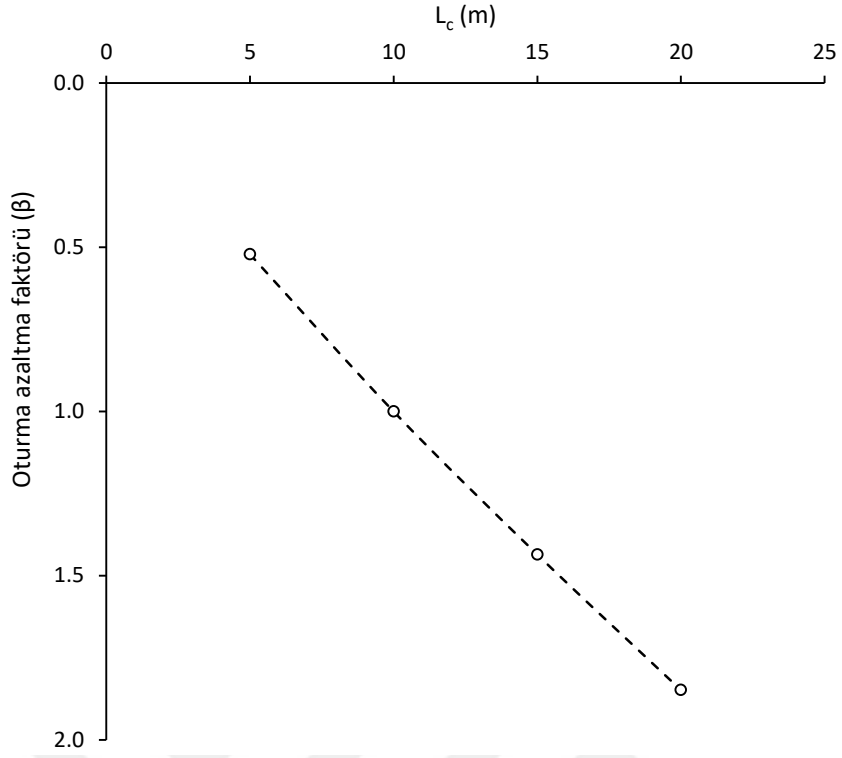
4.11). Analizlerde kullanılan model parametreleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Parametrik araştırmalar ile kolon boyunun artması ile zamana bağlı oturmalarında arttığı tespit edilmiştir. Mohtasham ve Khodaparast (2018) ise kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte, suyun drenaj alanının arttığı ve bu şekilde boşluk suyu basıncının daha hızlı bir oranda azaldığını belirtmiştir. Kırnak (2017) kolon boyunun artmasıyla konsolidasyon sũresinin azaldığını belirtmiştir. şekil 4.12 ve şekil 4.13’de kolon boyunun  $n$  ve  $\beta$  ile değişimi araştırılmıştır. Kolon boyunun artması ile  $\beta$ ’nın artarak,  $n$  değerinin ise azaldığı tespit edilmiştir. Bu serideki analizlerle kolon boy seğiminin tasarım için ˆnemli parametrelerden biri olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, boy seçiminde uygulamanın yapılacağı zemin birimleri de gˆz ˆnũne alınmalıdır.

**Çizelge 4.4.** Taş kolon ve zemin parametreleri ( $L_c$  etkisi)

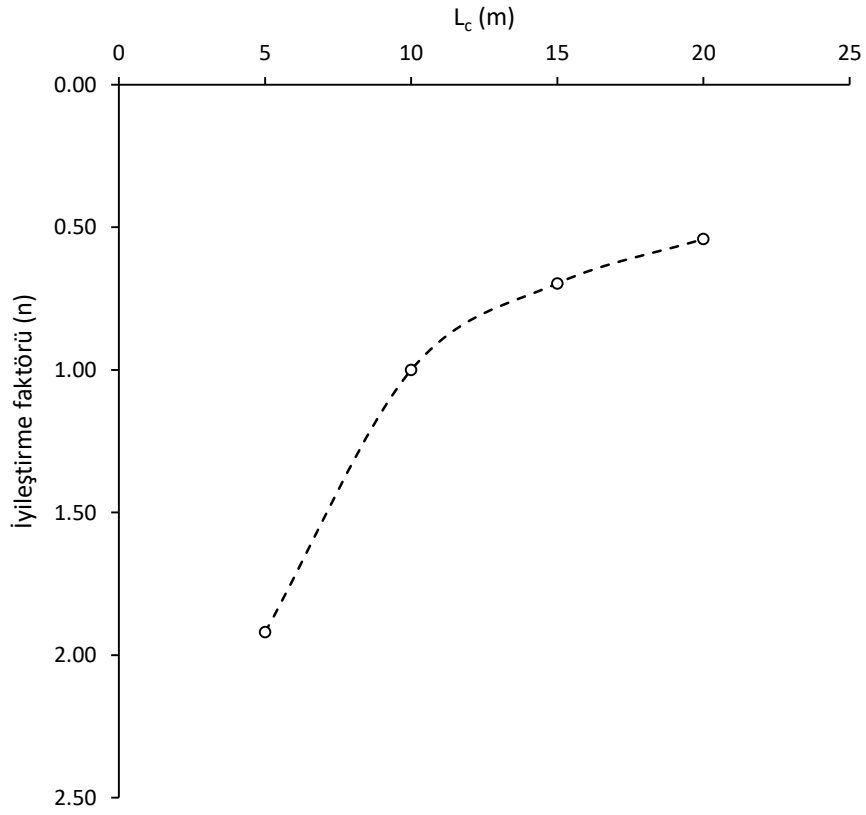
Parametreler	Zemin	Taş Kolon
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19
$k_h=k_v$ (m/gũn)	2E-5	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	5,000	30,000
$\nu$	0.3	0.3
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
$\phi$	25	30



**Şekil 4.11.** Kolon boyunun zamana bağlı oturmaya etkisi



Şekil 4.12. Kolon boyunun oturma azaltma faktörü ile değişimi



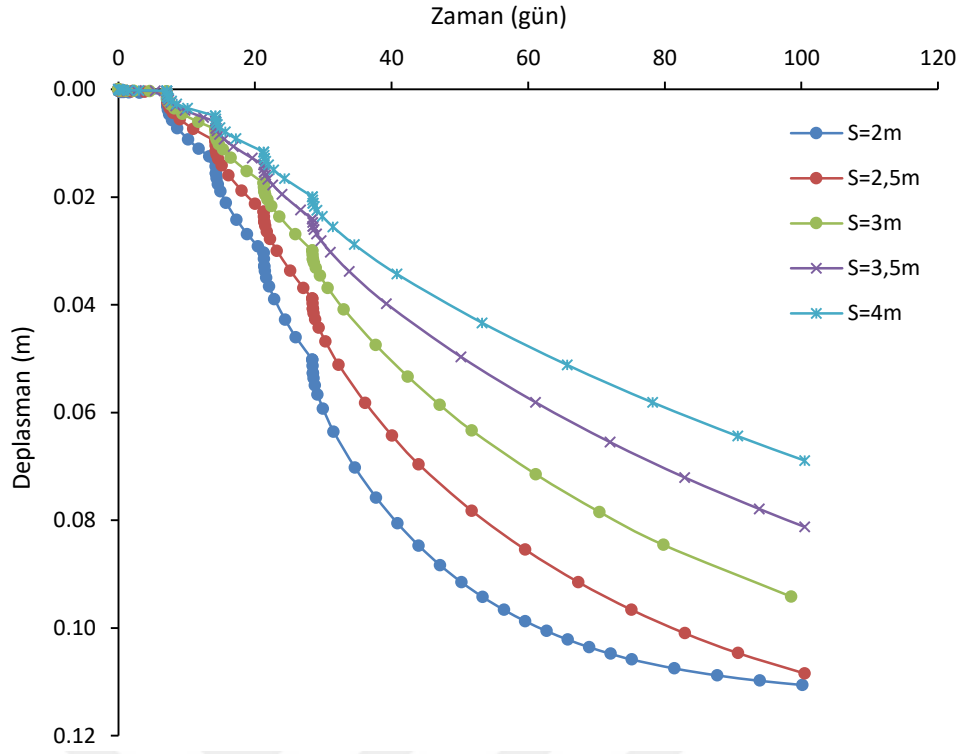
Şekil 4.13. Kolon boyunun iyileştirme faktörü ile değişimi

### ***S Etkisi***

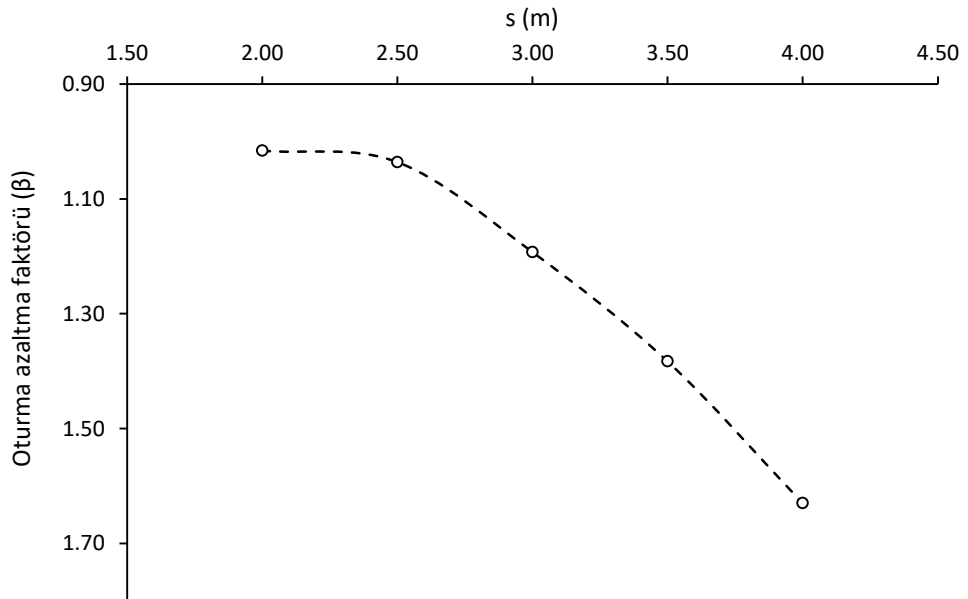
Bu serideki analizlerde taş kolonların merkezleri arasındaki mesafenin ( $s$ ) kompozit malzemenin konsolidasyonuna olan etkisi araştırılmıştır (Şekil 4.14). Bunun için kolon çapı ( $D_c=0.8m$ ) sabit bırakılarak birim hücrenin boyutu değiştirilmiştir. Analizlerde kullanılan model parametreleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre taş kolonlar arasındaki mesafe azaldıkça oturmalar önemli ölçüde artmakta ve konsolidasyon hızı artmaktadır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da ise kolonlar arası mesafenin  $n$  ve  $\beta$  ile değişimi araştırılmıştır. Oo (2004), yaptığı çalışmada taş kolonlar arasındaki mesafenin artmasıyla konsolidasyonun azaldığını belirtmiştir. Adeli (2013) kolonlar arası mesafe azaldıkça oturmaların arttığı dolayısıyla konsolidasyonun hızlandığı sonucuna varılmıştır. Vekli (2009) kolonlar arası mesafenin artması ile oturma azaltma faktörünün de arttığını elde etmiştir. Uysal (2016) kolonlar arasındaki mesafenin azalması ile konsolidasyon süresinin kısaldığını tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Taş kolon ve zemin parametreleri (s etkisi)

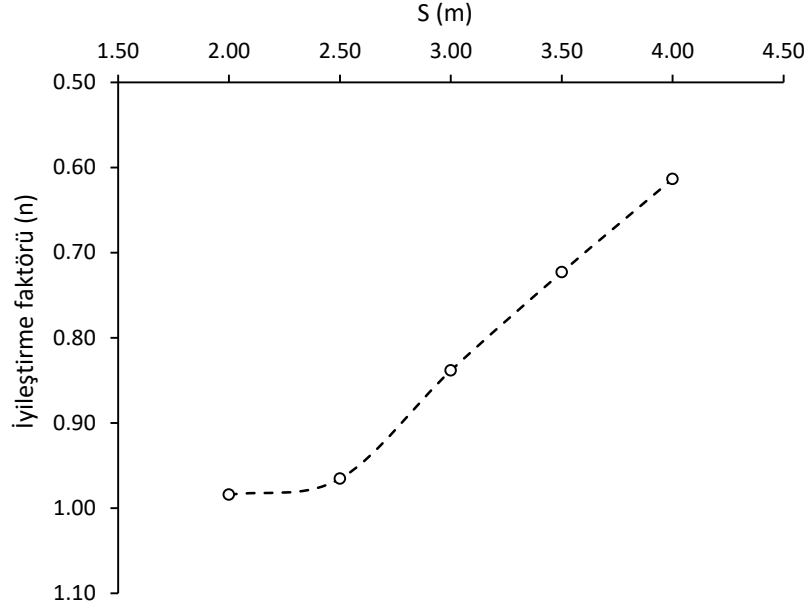
<b>Parametreler</b>	<b>Zemin</b>	<b>Taş Kolon</b>
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	2E-5	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	5,000	30,000
$\nu$	0.3	0.3
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	1	0
$\phi$	25	30



Şekil 4.14. Kolonlar arası mesafenin zamana bağlı oturmaya etkisi



Şekil 4.15. Kolonlar arası mesafenin oturma azaltma faktörü ile değişimi

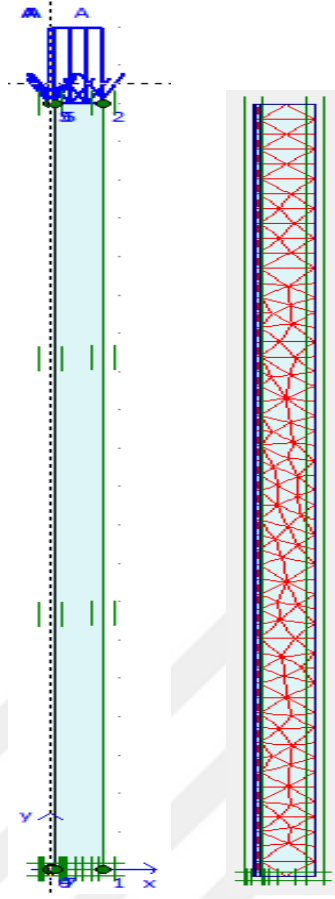


**Şekil 4.16.** Kolonlar arası mesafenin iyileştirme faktörü ile değişimi

### 4.3. Düşey Drenlerin Tasarım Parametrelerinin Araştırılması

Tez çalışmasının bu bölümde düşey drenlerin permeabilite, dren boyu, drenler arası mesafe, örselenmiş bölgenin büyüklüğü gibi tasarım parametrelerinin zamana bağlı oturmalar üzerindeki etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Sayısal modelleme Lin vd. (2000) esas alınarak yapılmıştır. Sayısal analizlerde önceki bölümde detaylı olarak izah edilen ve tek bir düşey drenin davranışını yansıtan birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. Analizler iki boyutlu aksel simetrik koşullarda ve 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.17). Sınır koşullar belirlenirken yan yüzeylerde yatay hareketin tutulu olduğu kabul edilmiş ve zeminin sadece düşey yönde hareketine izin verilmiştir ( $u_x=0$ ,  $u_y \neq 0$ ). Su seviyesinin zeminin üst yüzeyinde olduğu kabul edilmiştir. Analizlerde hesaplama aşamasından önce başlangıç gerilme koşulları ve boşluk suyu basınçları oluşturulmuştur. Analizlerde düşey dren, örselenmiş bölge ve doğal zemin için Soft Soil (SS) zemin modeli kullanılarak zamana bağlı drenajsız analizler yapılmıştır.

Bu bölümde yapılan parametrik çalışmalarda etkisi araştırılan tasarım parametresi değiştirilerek diğer model parametreleri sabit tutulmuştur. Kullanılan model parametreleri ilgili bölümde verilmiştir.



Şekil 4.17. Düşey drenin birim hücre modeli

#### *$k_h/k_s$ Etkisi*

Düşey drenler zemine çelik bir mandrel kullanılarak yerleştirilirler. Bu imalat yapılırken dren çevresinde yer alan zeminde bozulmalar (smear zone) meydana gelmektedir. Başka bir ifade ile dren etrafında örselenmiş bir bölge oluşmaktadır. Bu örselenme, zemin yapısına, drenlerin yapım şekline, muhafazanın boyutlarına ve şekline bağlıdır. Örselenen bölgedeki yatay permeabilite örselenmemiş zemine göre oldukça düşük bir değer almakta ve zeminin konsolidasyon sürecini azaltmaktadır. Örselenmiş bölge genişliği ( $r_s$ ) Bergado vd. (1993a, b)'de önerildiği gibi eşdeğer mandrel çapının ( $r_m$ ) iki katı olarak alınmıştır ( $r_s=2r_m$ ).

Bu serideki analizlerde örselenmiş bölgenin permeabilitesinin ( $k_s$ ) zemin konsolidasyonuna etkisini araştırmak için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun için örselenmemiş zeminin yatay permeabilitesi  $k_h$  ile  $k_s$  oranı ile parametrik bir araştırma yapılmıştır. Sayısal analizlerde düşey drenin boyu 20m alınarak sabit tutulmuştur. Düşey drenin permeabilitesi,  $k=1$  olarak sabit tutulup, değişen  $k_h/k_s$  oranları ile zamana bağlı

oturmalar değerlendirilmiştir. Analizlerde kullanılan düşey dren, örselenmiş ve örselenmemiş zemin parametreleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Birim hücre yüklemesi 40 kPa tanımlanarak toplamda 10,000 gün sürelik konsolidasyon analizleri yapılmıştır (Şekil 4.18). Analizler sonucunda  $k_h/k_s$  oranının artması, başka bir ifade ile örselenmiş bölgenin permeabilitesinin azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir. Düşey drene ait özellikler de Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** Zemin parametreleri ( $k_h/k_s$  etkisi)

Parametreler	Doğal Zemin	Örselenmiş Bölge
$\lambda^*$	0.15	0.15
$\kappa^*$	0.018	0.018
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	17
$k_h=k_v$ (m/gün)	2,740E-04	Değişken
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	1	1
$\phi$	27	27

**Çizelge 4.7.** Zemin parametreleri ( $k_h/k_s$  etkisi) (Lin vd., 2000)

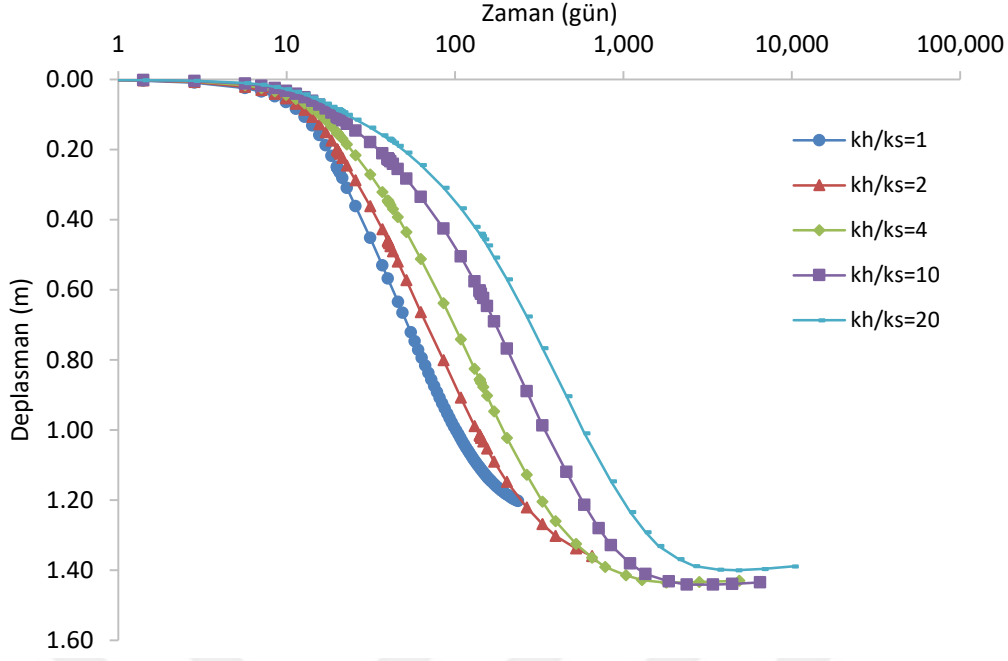
Yükseklik (m)	$r_e$	$r_s$	$r_m$	$r_w$
20	0.75	0.06	0.03	0.025

$r_e$  : Birim hücrenin yarıçapı

$r_s$  : Örselenmiş bölgenin yarıçapı

$r_m$  : Eş değer mandrel yarıçapı

$r_w$  : Eş değer dren yarı çapı

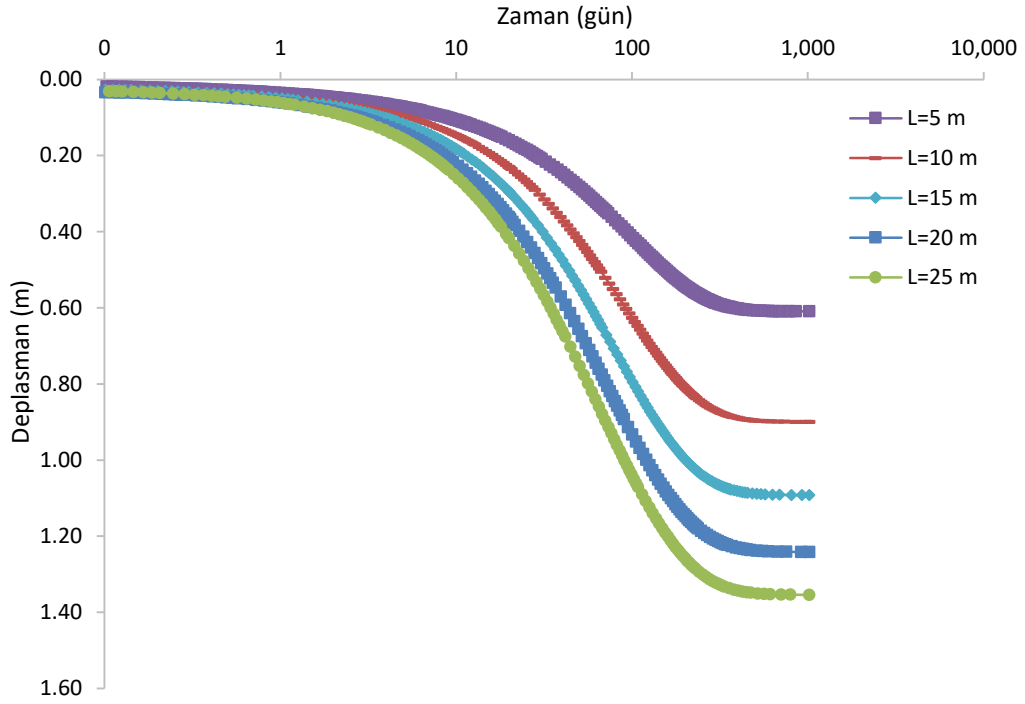


**Şekil 4.18.**  $k_h/k_s$  oranının zamana bağlı oturmaya etkisi

### *L Etkisi*

Düşey drenlerin boyu önemli tasarım parametrelerindedir. Dren boyu seçilirken genellikle dren boyları sıkışabilen birimleri geçmesi istenir. Bu şekilde suyun dren boyunca radyal yönde tahliyesi sağlanacaktır. Mert (2018), drenlerin kısa kalması durumunda, iyileştirilmemiş zeminde radyal drenaj sağlanmadığından konsolidasyon hızının düşeceğini belirtmiştir.

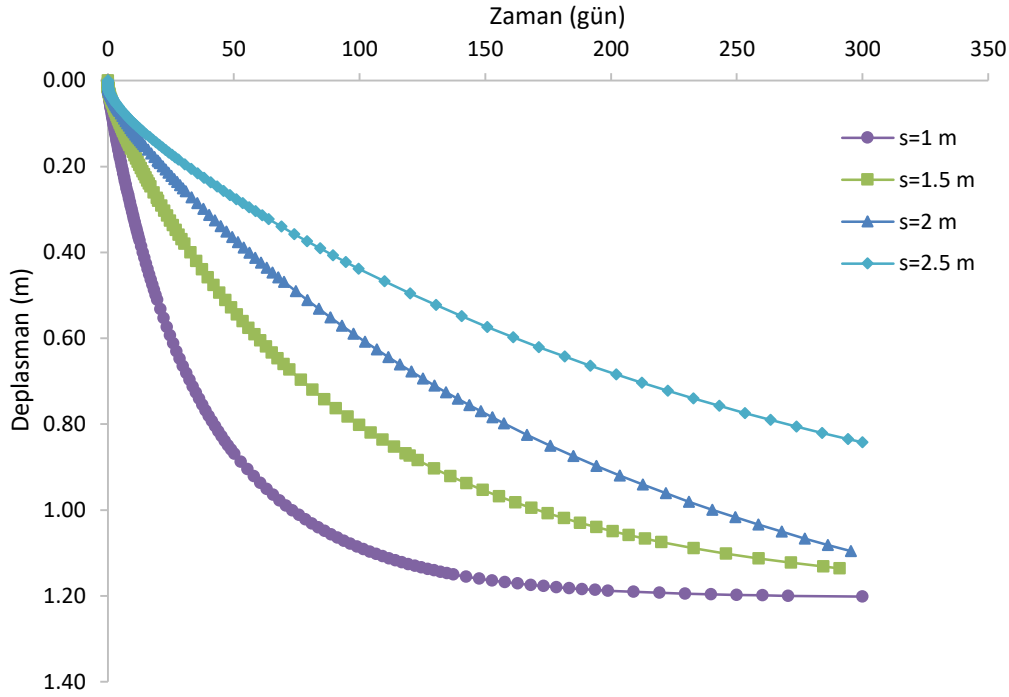
Bu seri analizlerde değişen dren boylarının (5m, 10m, 15m, 20m ve 25m) zamana bağlı oturmaya etkisi araştırılmıştır.  $k_h/k_s$  oranı ve düşey dren mesafesi sabit tutularak dren boyu değiştirilmiştir. Zemin parametreleri olarak önceki bölümde kullanılan parametreler kullanılmıştır. Birim hücreye 40 kPa yük, 1000 gün boyunca uygulanmıştır. Analizler sonucunda dren boyunun azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.19). Dren boyunun artması ile konsolidasyonun hızlandığı görülmektedir. Ancak, drenaj uzunluğu arttıkça kuyu direncinde artışlar meydana gelmekte ve drenlerin deşarj kapasitesi azalmaktadır. Bu nedenle dren tasarımında optimum dren boyu tespit edilmelidir.



Şekil 4.19. Düşey dren boyunun zamana bağlı oturmaya etkisi

### *S Etkisi*

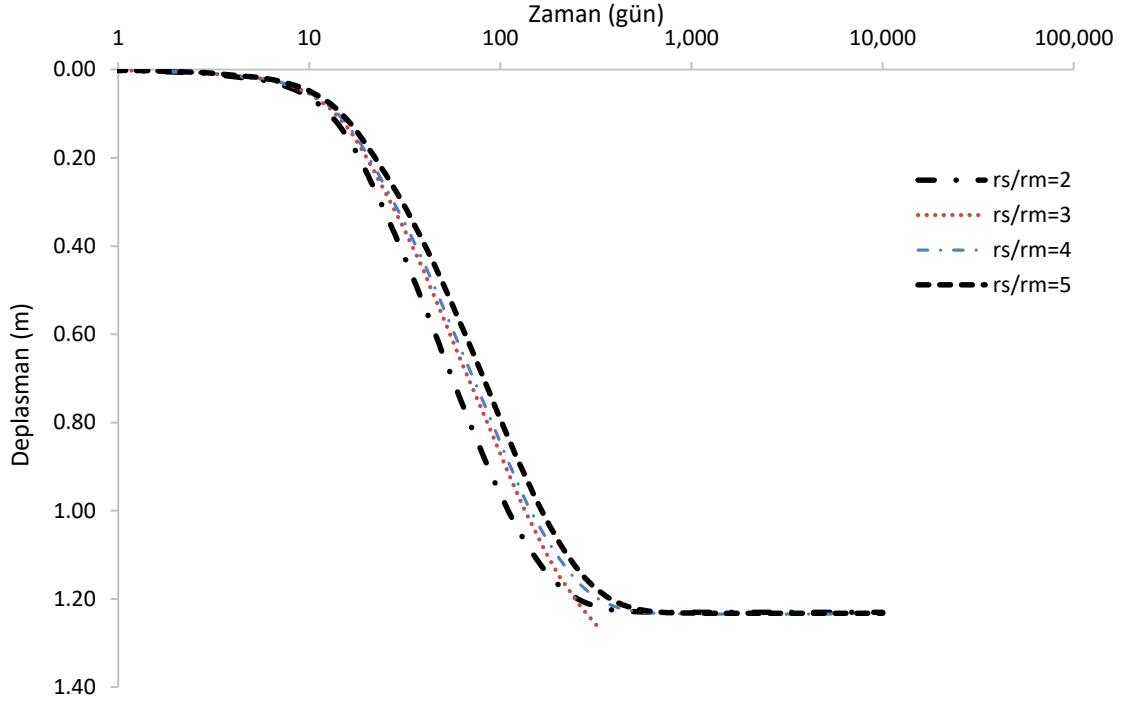
Bu bölümdeki analizlerde düşey drenlerin arasındaki mesafenin ( $s$ ) konsolidasyona olan etkisi araştırılmıştır. Drenler arasındaki mesafe ( $s$ ) 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 m olarak model kurulmuştur.  $k_h/k_s$  oranı ve dren boyu sabit tutularak birim hücrenin genişliği değiştirilmiştir. Birim hücreye 40 kPa yük, 1000 gün boyunca uygulanmıştır. Zemin parametreleri olarak önceki bölümde kullanılan parametreler kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda drenler arasındaki mesafe azaldıkça zamana bağlı oturmaların arttığını, konsolidasyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.20). Al-Soud (2016), daha düşük aralıklara sahip drenlerin dolgu zeminini daha rijit hale getirdiğini belirtmiştir.



Şekil 4.20. Düşey drenler arasındaki mesafenin zamana bağlı oturmaya etkisi

### **Örselenmiş Bölgenin Büyüklüğü**

Bu serideki analizlerde düşey dren imalatı ile dren etrafında örselenen bölgenin büyüklüğünün zamana bağlı oturmaya etkisi araştırılmıştır. Analizlerde  $k_h/k_s$  oranı, dren boyu ve birim hücrenin genişliği sabit tutularak örselenmiş bölgenin yarıçapı ( $r_s$ ) değiştirilmiştir. Birim hücreye 40 kPa yük, 1000 gün boyunca uygulanmıştır. Örselenmiş bölgenin yarıçapı ( $r_s$ ) ve eş değer dren yarıçapı ( $r_w$ ) oranı 2, 3, 4 ve 5 değerleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda örselenmiş bölgenin büyüklüğü kullanılan oranlarda büyük bir fark yaratmazken, örselenmiş bölge büyüklüğünün artması ile konsolidasyon hızı azalmaktadır. Bu durum örselenmiş bölgede yer alan permeabilitenin doğal zemine göre oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.8’de literatürde yer alan  $r_s/r_m$  oranları verilmektedir. Tasarım için bu çizelge dikkate alınabilir.



Şekil 4.21. Örselenmiş bölge büyüklüğünün zamana bağlı oturmaya etkisi

Çizelge 4.8. Literatürde yer alan  $r_s/r_m$  oranları (Iskandar, 2018)

No.	Researchers	Depth of Installation (m)	Sand Mat Thickness (mm)	Patterns Installation	Installation Distance (m)	Mandrel		Height of Embankment (m)	Speed of Installation (mm/s)	Type of Soil	Field Data Back-Calculation	$s^*/r_s$ or $s^*/r_s^*$	$s^*/k_s$
						Shape	Dimension (mm <sup>2</sup> )						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Bergado <i>et al.</i> (1991) [6]	8.0	1,000	Square	1.2	Rectangular	45 x 150, 150 x 150			Soft Clay, Bangkok	Analytical	2.0	$k_s = k_v$
2	Bergado <i>et al.</i> (1992) [7]	8.0	300	Triangle	1.5	Rectangular	150 x 45	4.00	-	Soft Clay, Bangkok	Analytical	2.5 *	10.0
3	Bergado <i>et al.</i> (2000) [8]	12.0	1,500	Square	1.0; 1.2; 1.5	Rectangular	-	4.20	-	Soft Clay, Bangkok	Analytical	2.0	5.0
4	Saowapakpiboonet <i>et al.</i> (2010) [9]	10.0	-	Triangle	0.85	Rectangular	-	-	-	Soft Clay, Bangkok Soft Clay, Bangkok	Analytical Analytical	2.0 2.0	7.2 6.6 (+v)
5	Hiep and Chung (2018) [10]	30.0 - 35.0	500 - 800	Triangle	1.5	Rectangular	120 x 80	6.00 - 8.00	-	Clay, Mekong Delta	Analytical	2.0	2.0
6	Indraratna and Redana (2000) [11]	12.0 18.0	1,500 -	Square Triangle	1; 1.2; 1.5 1.3	Rectangular Rectangular	- -	4.20 -	- -	Soft Clay, Bangkok Muar Clay Deposit	FEM FEM	4-5 * 4-5 *	$k_s = k_v$ $k_s = k_v$
7	Chai and Miura (1999) [12]	25.0	500	Square	1.5	Rectangular	-	3.50	-	Soft Clay, Ariake	FEM	3.0	10.0
8	Chai <i>et al.</i> (1995) [13]	18.0	-	Triangle	1.2	Rectangular	-	4.70	-	Muar Clay Deposit	FEM	4.2 *	2.0

## 4.4. Vaka Analizi

### 4.4.1. Arazi Bilgileri

Bu tez kapsamında seçilen arazi, Malezya yarımadasının güney ucunda bulunan Singapur Cumhuriyeti'nin başkenti olan Singapur şehrinin Changi bölgesinde yer almaktadır (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23).

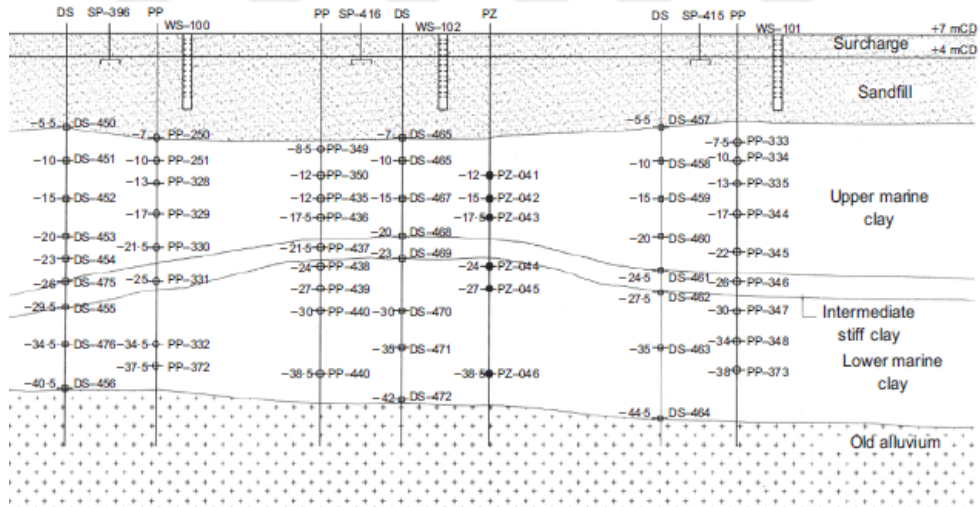


Şekil 4.22. Arazinin yer aldığı bölge

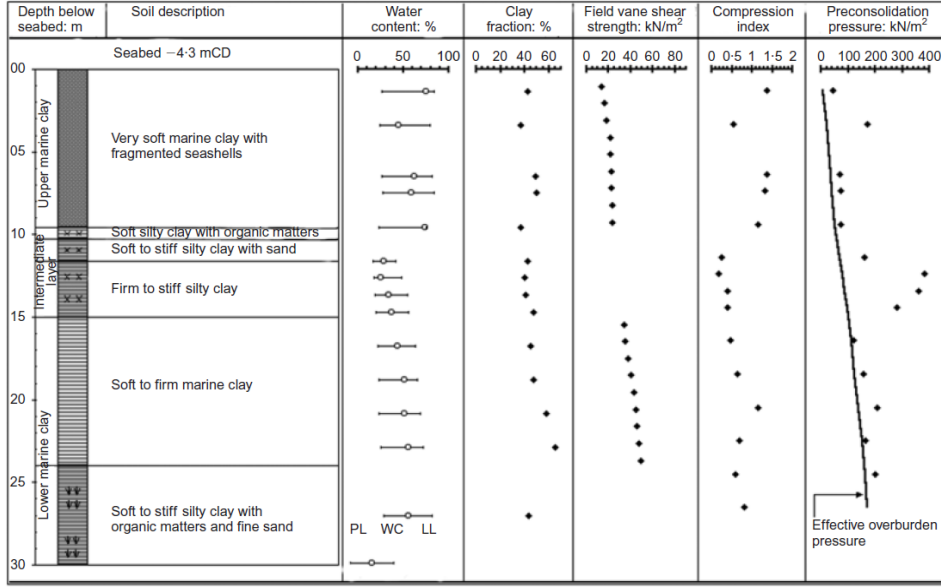


Şekil 4.23. Deney sahası

Bölgede yapılan zemin araştırmaları sonucunda elde edilen zemin profili Şekil 4.24'de verilmiştir. Changi Singapur deniz kili alüvyon ile kesilen vadilerin içinde uzanmaktadır. Arazi üst deniz kili (upper marine clay) ve alt deniz kili (lower marine clay) katmanı olmak üzere iki ayrı deniz kili katmanından oluşmaktadır. Orta sert kil (intermediate marine clay) katmanı ise bu iki tabakayı birbirinden ayıran farklı bir deniz kili tabakasıdır. Arazide yapılan zemin araştırmaları ile elde edilen indeks ve mukavemet parametreleri Şekil 4.25 ve Çizelge 4.9'da görölmektedir. Üst deniz kili yumuşak bir yapıya sahip ve su içeriği % 70-88 arasındadır. Likit limit değeri % 80-90, plastik limit değeri %20-28 aralığında değişmektedir. Zemin genellikle aşırı konsolide durumdadır. Alt deniz kili % 65-90 likit limit ve % 20-30 aralığında plastik limit değerlerine sahip olup, zeminin su içeriği % 40-60 oranlarındadır. Orta sertlikteki kil tabakası üst deniz kili ile alt deniz kili arasında sıkışmış durumdadır. Bu katman genel olarak sert kumlu silt veya kumlu kil zemin danelerinden oluşmaktadır. Orta sertlikteki kil tabakası yaklaşık % 50 oranında likit limit, % 18-20 değerleri arasında plastik limit ve % 10-35 değerleri arasında su içeriğine sahiptir.



Şekil 4.24. Araziye ait zemin profili (Arulrajah vd., 2005)



Şekil 4.25. Zemin profili (Chu vd., 2009)

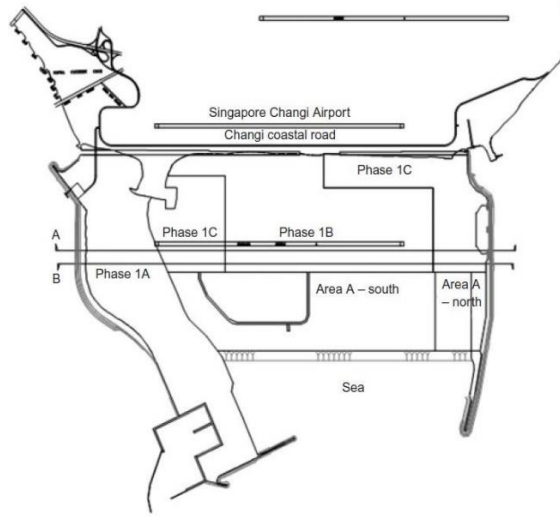
Çizelge 4.9. Zeminin fiziksel ve mekanik parametreleri (Chu vd., 2009)

	Deniz Üst Kili (Upper Marine Clay)	Deniz Orta Kili (Intermediate Marine Clay)	Deniz Alt kili (Lower Marine Clay)
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.2 - 15.7	18.6 - 19.6	15.7-16.7
Su içeriği (%)	50 - 85	10 - 40	40 - 66
Likit limit (%)	70 - 95	30 - 70	60 - 90
Plastik limit (%)	20 - 28	18 - 20	20 - 30
$e_0$	1.8 - 2.2	0.5 - 0.9	1.1 - 1.7
$G_s$	2.60 - 2.72	2.68 - 2.76	2.70 - 2.75
$C_c$	0.6 - 1.5	0.2 - 0.3	0.4 - 1.0
$C_r$	0.1 - 0.2	0.02 - 0.15	0.05 - 0.2
$C_\alpha$	0.012 - 0.025	0.004 - 0.023	0.012 - 0.023
OCR	1.5 - 7.0	3.0 - 4.0	1.8 - 2.0
$C_v$ (m <sup>2</sup> /yıl)	0.5 - 1.7	-	0.5-2.3
$C_h$ (m <sup>2</sup> /yıl)	2.0 - 4.0	-	3.0-6.0
$k$ (m/s)	$10^{-8}$ - $10^{-9}$	-	$10^{-9}$ - $10^{-10}$

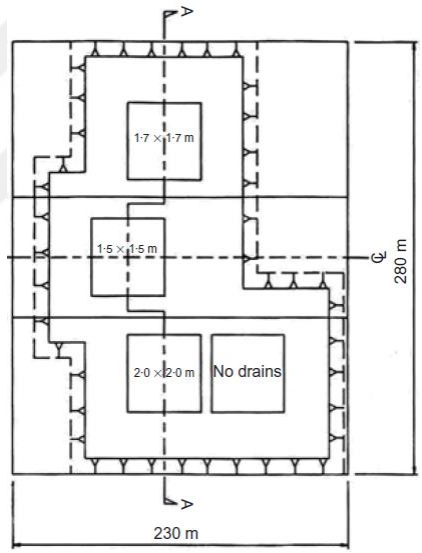
İncelenen bu bölgede Changi Doğu Islah Projesi gerçekleştirilmiştir. Proje, 1991-2005 yılları arasında beş aşamada gerçekleştirilerek, Changi Uluslararası Hava Limanı ve altyapı tesisleri için yaklaşık 2000 hektarlık bölge iyileştirilmiştir (Şekil 4.26). Her bir çalışma aşaması yaklaşık beş yıl sürmüştür. Proje kapsamında, 272 milyon ton kum

hidrolik yer değiştirme yöntemi ile sıkıştırılarak 15m derinliğe kadar dolgu yapılmıştır. Bu yöntem ile gevşek durumdaki kuma üç farklı derin sıkıştırma yöntemi uygulanarak daha sıkı hale gelmesi sağlanmıştır. Bu amaçla ağır yükler ile derin sıkıştırma, rezonans sıkıştırma (Müller resonance compaction, MRC) ve vibro-flatasyon yöntemleri uygulanmıştır. İyileştirme çalışmaları kapsamında, konsolidasyon sürecini hızlandırmak için ön yükleme yapılarak prefabrik düşey drenler kullanılmıştır. Dolguda kullanılan malzeme denizden çıkarılarak elde edilmiş olup ortalama dane büyüklüğü 0.4 ile 0.8 mm arasında değişmektedir. Araziye yaklaşık 18 aylık bir ön yükleme uygulanmıştır. Tüm projede 170 milyon metre prefabrik düşey dren kullanılmış olup, bu rakam bu uygulamaya dünyadaki en büyük projelerden biri olma özelliği kazandırmıştır. Bölge zemin profilinin değişkenlik göstermesi nedeni ile yapılan düşey dren uygulamasının performansının değerlendirilmesi amacı için proje sürecinde birçok pilot çalışma yapılmıştır (şekil 4.27).

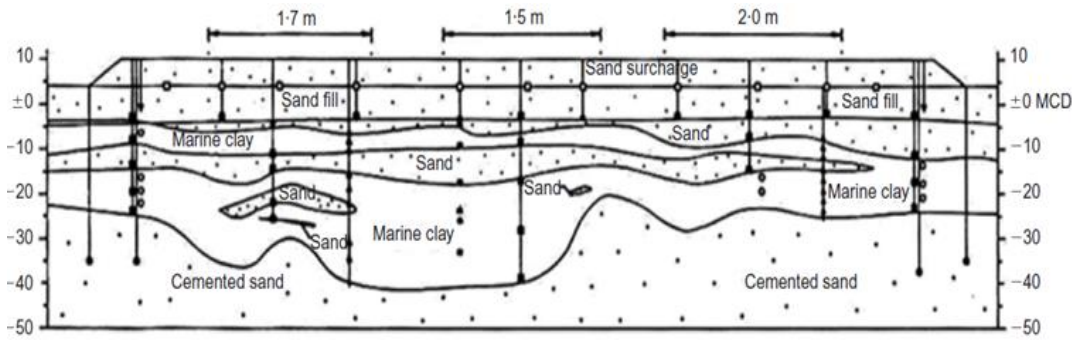
Pilot testler ayrıca tam ölçekli model testleri olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalarda aynı ön yüklemeye maruz farklı dren aralıklı (1.5m, 1.7m, 2m, 2.5m ve 3m) ve drensiz bölgeler oluşturularak zemindeki konsolidasyon incelenmiştir. Tüm pilot bölgelere ölçüm sistemleri kurularak, testler süresinde boşluk suyu basıncı, düşey ve yanal zemin deformasyonları derinlik boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçümler ile yaklaşık 1350 gün sonunda 2m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 1.7m oturma, 2.5m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 1.25m oturma ve 3m aralıklarla imal edilen düşey drenli zeminde 0.9m oturma gerçekteşiği görülmüştür. Ayrıca iyileştirme sonucunda, düşey dren kullanılan bölge konsolidasyonunun %70-80 arasında olduğu ancak kontrol bölgesinde bu oranın % 30-40 mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Changi Doğu Islah Projesi ile ilgili detaylı bilgiler Bo vd. (2003), Arulrajah vd. (2005), Chu vd., (2009), çalışmalarından elde edilebilir.



Şekil 4.26. Araştırma bölgeleri (Chu vd., 2009)



(a)



(b)

Şekil 4.27. Pilot araştırma sahaları (a), araştırma alanlarının kesiti (b) (Chu vd., 2009)

#### 4.4.2 Vakanın Sayısal Analizi

Bu bölümdeki çalışmalarda Changi Doğu Islah Projesi sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma Plaxis bilgisayar yazılımı ile iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Arazideki zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan model sonuçları arazide alınan gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak tez kapsamında incelenen taş kolon ve düşey dren yöntemlerinin etkinliği araştırılmıştır.

##### *Düşey Drenlerin Modellenmesi*

Düşey drenlerin analizi için önceki bölümlerde bahsedilen aksel simetrik birim hücre modeli kullanılmıştır. Analizlerde tek bir dren ve etrafındaki zemin modellenmiştir (Şekil 4.28). Bu analizlerde mevcut arazi zemin koşulları üç tabaka olarak birbir modellenmiştir. Dolgu yüksekliği 6m dir. Analiz sonuçları arazi ölçüm sistemlerinden elde edilen veriler ile karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan model parametreleri literatürden alınarak Çizelge 4.10'da verilmiştir. Analizlerde örselenme etkisini de dikkate almak için dren etrafındaki zeminin eş değer permeabilitesi kullanılmıştır. Bu kapsamda Lin vd., (2000)'nin önerdiği eşitlik (Eşitlik 4.1) kullanılmıştır.

$$k_e = \frac{kh \ln(re/rw)}{\ln(re/rs) + (kh/ks) \ln(rs/rw)} \quad (4.1)$$

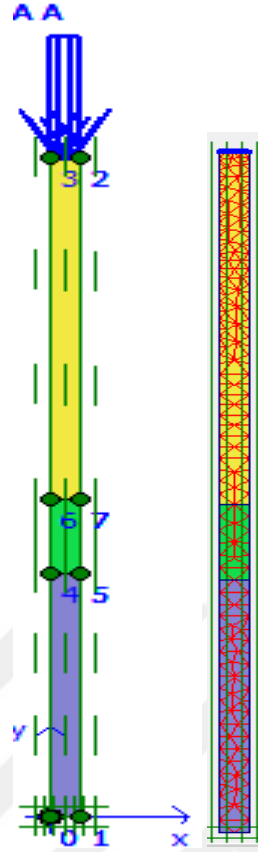
$r_e$  : Birim hücrenin yarıçapı

$r_s$  : Örselenmiş bölgenin yarıçapı

$r_w$  : Eş değer dren yarı çapı

$k_h$  : Örselenmemiş zeminin yatay permeabilitesi

$k_s$  : Örselenmiş bölgenin yatay permeabilitesi

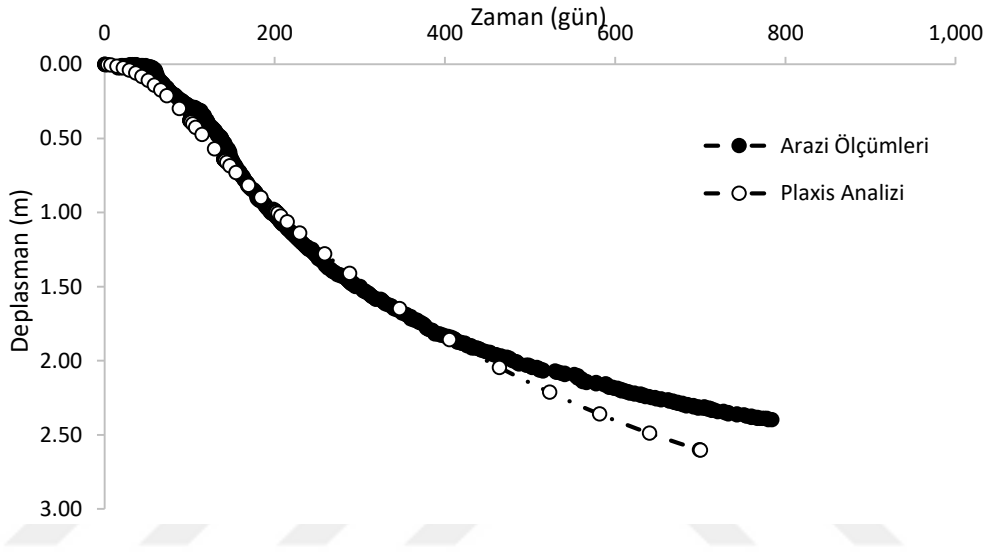


Şekil 4. 28. Vaka analizindeki düşey drenlerin birim hücre modeli

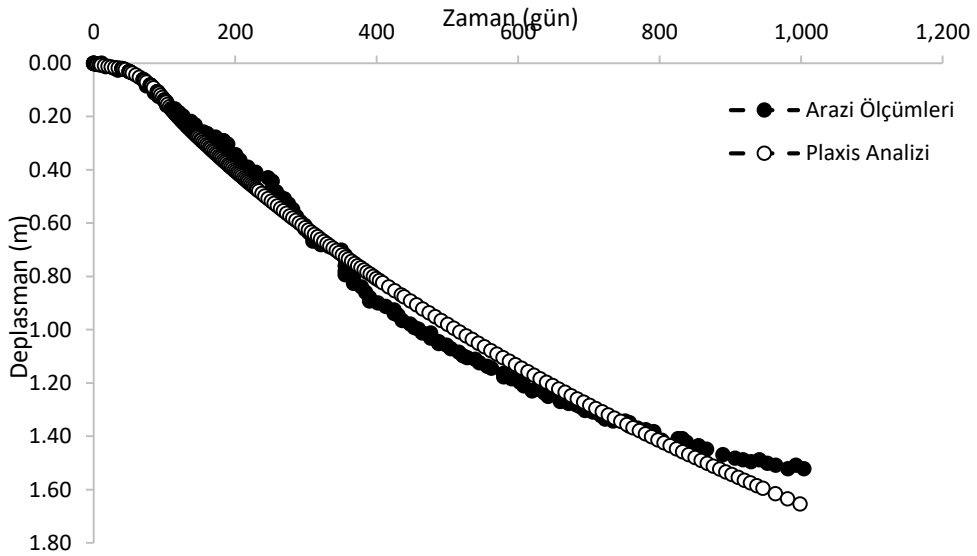
Çizelge 4.10. Düşey drenler için kullanılan zemin parametreleri (Arulrajah vd., 2005)

Mohr-Coulomb Model	İyileştirme Dolgusu	Soft Soil Model	Deniz Üst Kili	Deniz Orta Kili	Deniz Alt Kili
Tip	Drenajlı	Tip	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.00	$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.00	15.00	15.00
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.00	$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.50	15.50	16.00
$k_h$ (m/gün)	1.000	$k_h$ (m/gün)	$2.66 \cdot 10^{-5}$	$6.25 \cdot 10^{-5}$	$2.81 \cdot 10^{-5}$
$k_v$ (m/gün)	1.000	$k_v$ (m/gün)	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$3.13 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$
$E_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	13000	$\lambda$	0.150	0.060	0.170
$\nu$	0.300	K	0.018	0.011	0.025
$G_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	5000.000	c (kN/m <sup>2</sup> )	1.00	1.00	1.00
$E_{\text{oed}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	17500.000	$\phi$	27.00	32.00	27.00
$c_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	1.00	$\psi$	0.00	0.00	0.00
$\phi$	31.00	$V_{\text{ur}}$	0.150	0.150	0.150
$\psi$	0.00	$k_o^{\text{nc}}$	0.55	0.47	0.55

Bu seride yapılan ilk analizlerde kare yerleşim düzeni ile imal edilmiş 1.5m aralığa sahip düşey drenler sayısal olarak analiz edilerek arazide yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.29). Ardında 2m dren aralığına sahip pilot bölgenin sayısal analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.30). Analiz sonuçları karşılaştırıldığı zaman sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan sayısal modellerin doğruluğu karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.29. 1.5m aralıklı düşeylerin arazi ölçümleri ve sayısal analizinin karşılaştırılması



Şekil 4.30. 2m aralıklı düşeylerin arazi ölçümleri ve sayısal analizinin karşılaştırılması

### ***Taş Kolonların Modellenmesi***

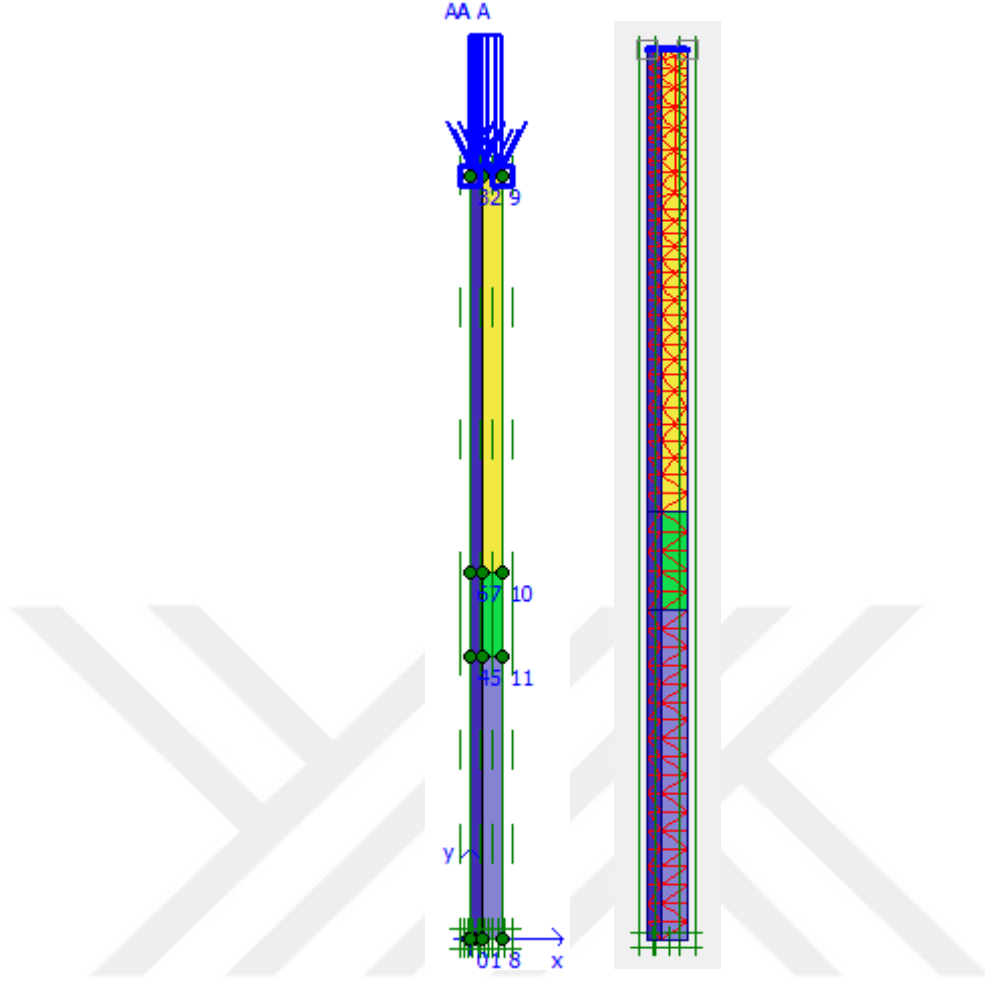
Taş kolonların sayısal analizi için de yine aksenal simetrik birim hücre modeli kullanılmıştır. Changi Doğu Islah Projesinde ön yükleme yöntemi ve düşey dren uygulamaları yapılmıştır. Bu seri analizlerde, aynı arazide taş kolon uygulaması yapılması durumunda meydana gelecek oturmadaki azalma değerlendirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle uygun taş kolon çapının tespiti için arazide parametrik bir araştırma yapılmıştır (Şekil 4.31). Taş kolon ve zeminin parametreleri literatürden seçilmiş olup, Çizelge 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.

**Çizelge 4. 11.** Taş kolon parametreleri (Uysal, 2016)

<b>Parametreler</b>	<b>Taş Kolon</b>
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19
$k_h=k_v$ (m/gün)	1
E (kN/m <sup>2</sup> )	30,000
$\nu$	0.3
c (kN/m <sup>2</sup> )	0
$\phi$	30

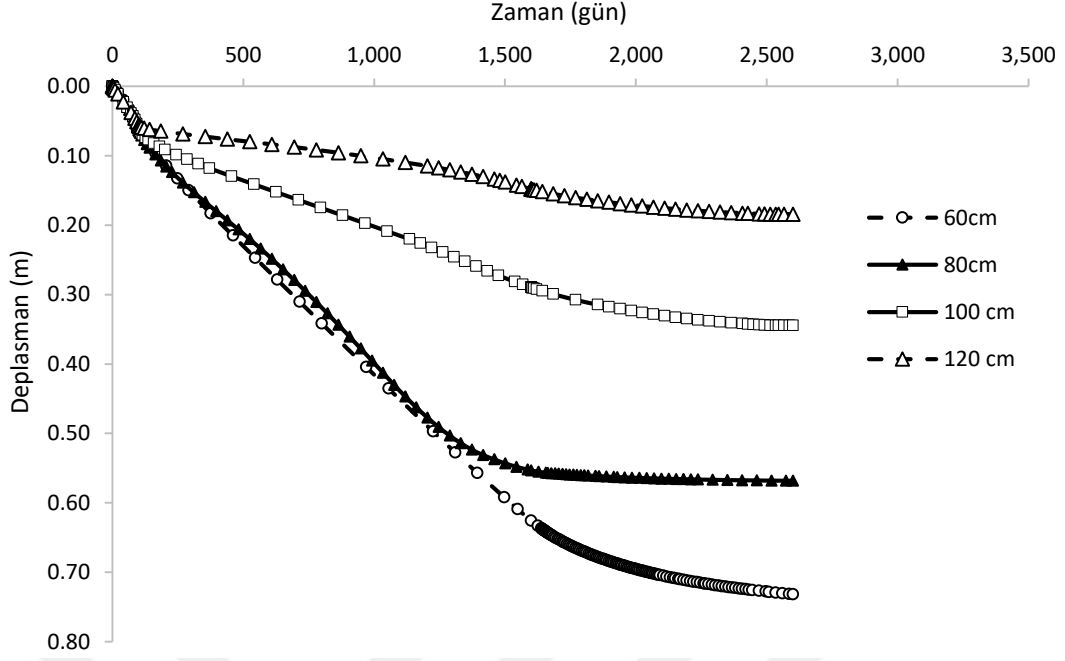
**Çizelge 4.12.** Taş kolonların analizi için kullanılan zemin parametreleri (Arulrajah vd., 2005)

<b>Mohr-Coulomb Modeli</b>	<b>İyileştirme Dolgusu</b>	<b>Soft Soil Model</b>	<b>Deniz Üst Kili</b>	<b>Deniz Orta Kili</b>	<b>Deniz Alt Kili</b>
Tip	Drenajlı	Tip	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.00	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.00	15.00	15.00
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.00	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.50	15.50	16.00
$k_h$ (m/gün)	1.000	$k_h$ (m/gün)	$3.67 \cdot 10^{-5}$	$8.64 \cdot 10^{-5}$	$3.89 \cdot 10^{-5}$
$k_v$ (m/gün)	1.000	$k_v$ (m/gün)	$1.84 \cdot 10^{-5}$	$4.32 \cdot 10^{-5}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$
$E_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	13000.000	$\lambda$	0.150	0.060	0.170
$\nu$	0.300	K	0.018	0.011	0.025
$G_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	5000.000	c (kN/m <sup>2</sup> )	1.00	1.00	1.00
$E_{oed}$ (kN/m <sup>2</sup> )	17500.000	$\phi$	27.00	32.00	27.00
$c_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	1.00	$\psi$	0.00	0.00	0.00
$\phi$	31.00	$V_{ur}$	0.150	0.150	0.150
$\psi$	0.00	$k_o^{nc}$	0.55	0.47	0.55



**Şekil 4.31.** Vaka analizindeki taş kolonların birim hücre modeli

Taş kolon çapının tespiti için 1.5m kolon aralıklarına sahip farklı çaplardaki taş kolonların performansları değerlendirilmiştir. Bu analizlerin yapılmasındaki amaç, aynı aralıklardaki düşey drenler ile karşılaştırma yapabilmek için seçilecek uygun kolon çapının belirlenmesidir. Sonuçlar incelendiği zaman, beklenildiği gibi kolon çapının artması oturmaların hızlandırılmasına yardımcı olmuştur (Şekil 4.32). En düşük kolon çapının (60cm) maksimum 0.732m oturma değerine sahip olduğu görülmektedir.

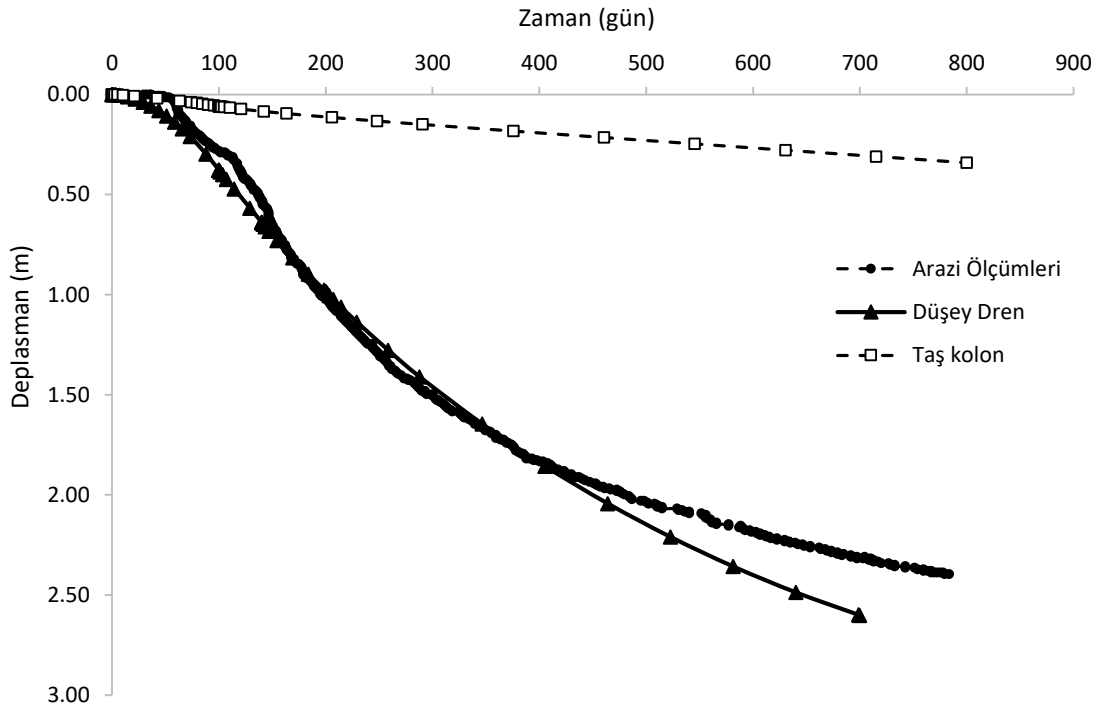


**Şekil 4.32.** Taş kolon çapının vaka arazisinde incelenmesi

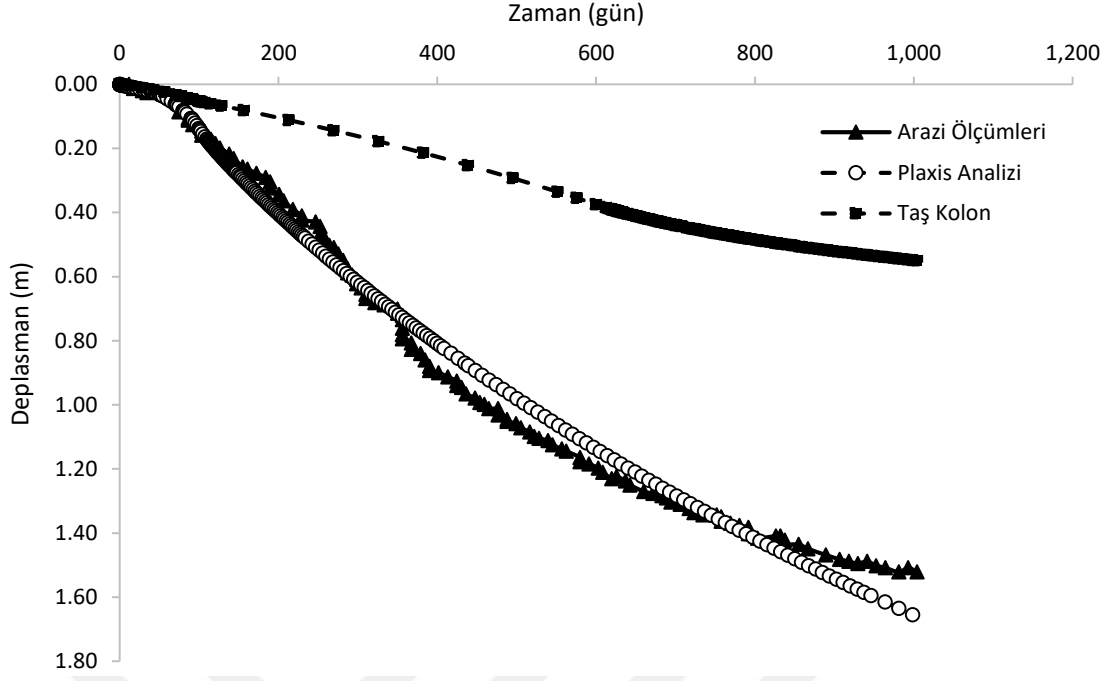
Parametrik kolon çapı çalışması ile en küçük kolon çapına sahip olan (60cm) taş kolon performansı drenli arazi ölçümleri ve doğruluğu tespit edilen sayısal dren analizleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.33). Düşey dren ve taş kolonlar arasındaki mesafe 1.5m'dir. Gerek taş kolon gerek ise de düşey dren analizlerinde aynı zemin parametreleri kullanılmıştır. Farklı olarak düşey dren analizlerinde örselenme etkisi hesaba katılmıştır. Her iki iyileştirme yönteminin performansı değerlendirildiği zaman, aynı mesafeye sahip taş kolonların düşey drenlere göre oturmalarının azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılmasında oldukça iyi performans gösterdiği görülmektedir. Benzer karşılaştırma 2m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ve 2m aralıklı dren arazi ölçümleri ile de yapılmıştır (Şekil 4.34). Bu karşılaştırmada yine en düşük çapa sahip (60cm) taş kolonlar kullanılmıştır. Karşılaştırma ile taş kolonların düşey drenlere göre oldukça iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bouassida ve Hazzar (2008), Tunus'ta oldukça zayıf zemin özelliklerine sahip bir arazide 6m yüksekliğinde inşa edilmesi planlanan bir dolgu için taş kolon ve düşey dren uygulamalarının maliyet ve performans değerlendirmesini yapmıştır. Çalışmada taş kolonların taşıma gücünün artırılması, konsolidasyon oturmalarının azaltılması ve hızlandırılması konusunda oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir. Maliyet açısından yapılan değerlendirmede taş kolonların yaklaşık %16,6 daha ekonomik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca taş kolonların proje süresinde sekiz aylık kazanç sağladığı da belirlenmiştir. Ancak, Tunuslu yetkililerin benzer projelerde

düşey dren yönteminde daha tecrübeli olması nedeni ile bu çalışmada düşey dren yöntemi ile iyileştirmeye gidilmiştir.

Vaka analizi kapsamında yapılan çalışmalar değerlendirildiği zaman, olası iyileştirme yöntemlerinden uygun olanın seçilmesi konusunda detaylı bir araştırma yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu araştırmalar öncelikle yöntemlerin performansları, uygulanabilirliği ve ekonomik olarak değerlendirilmesi olacaktır. Bouassida ve Hazzar (2008) çalışmalarında olduğu gibi, bahsi geçen faktörlerin yanı sıra uygulayıcıların performansları da iyileştirme yönteminin seçilmesinde oldukça önem arz eden parametrelerdendir.



**Şekil 4.33.** 1.5m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.34. 2m aralıklı dren ve taş kolon sayısal analizleri ile drenli arazi ölçümlerinin karşılaştırılması

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Çalışma kapsamında taş kolon ve düşey dren uygulamalarının zamana bağlı konsolidasyon davranışı incelenmiş olup tasarım açısından önem arz eden bazı parametrelerin etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Yine tez kapsamında, Singapur şehrinin Changi bölgesinde uygulanan Changi Doğu Islah Projesinde, taş kolon ve düşey dren yöntemleri sayısal olarak Plaxis yazılımı ile iki boyutlu olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları ile arazi ölçümleri karşılaştırılarak bu iki yöntemin performansı değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

#### *Taş Kolon Tasarım Parametrelerinin Araştırılması*

- Yapılan parametrik çalışmalarda taş kolonların zemine göre daha rijit olması iyileştirme açısından önemlidir. Taş kolonun elastisite modülünün artması ile konsolidasyon hızlanmakta ve oturmalar azalmaktadır.
- Rijitlik oranının ( $E_c/E_u$ ) artması ile  $n$  (iyileştirme faktörü) artmakta,  $\beta$  (oturma azaltma faktörü) ise azalmaktadır. Ancak değişimler  $E_c/E_u > 5$  değerinden sonra önemli ölçüde azalmamaktadır. Bu durumda  $E_c/E_u$  oranının en az 5 olmasının yeterli olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer davranış trendi görülmekle birlikte bu oran Kırnak (2017)'de  $E_c/E_u=7$ , Uysal (2016)'da  $E_c/E_u=10$ , olarak elde edilmiştir. Taş kolonların iyi sıkıştırılması gerekmektedir ancak fazla sıkıştırma işlemi de efektif değildir.
- Değişen içsel sürtünme açıları yüklemmeden sonraki ilk birkaç ay içerisinde fark yaratmamaktadır. Ancak, zamanla içsel sürtünme açısının artması ile oturmalar azalmakta ve kolonun taşıma gücü artmaktadır.
- $\phi_c$ 'nin artması ile iyileşme oranı artmakta,  $\beta$  azalmaktadır. Ancak,  $\phi_c > 40$  değerinden sonra bu parametrelerde önemli ölçüde değişim görülmemektedir. Benzer sonuçlar Adeli (2013)'de görülmektedir.
- Taş kolonun çapının artması ile oturmalar önemli ölçüde azalmaktadır. Taş kolonun çapının artması ile  $n$  artmakta,  $\beta$  azalmaktadır. Uysal (2016), Adeli (2013) ve Kırnak (2017) artan kolon çapı ile oturmaların azaldığını

konsolidasyonun ise hızlandığını tespit etmiştir. Ayrıca Mohtasham ve Khodaparast (2018), kolon çapının artması ile temel altında meydana gelen oturmanın ve konsolidasyon süresinin önemli ölçüde azaldığını vurgulamıştır.

- Kolon boyunun artması ile zamana bağlı oturmalar artmaktadır. Kolon boyunun artması ile  $\beta$  artmakta,  $n$  değeri ise azalmaktadır. Mohtasham ve Khodaparast (2018) ise kolon uzunluğunun artmasıyla birlikte, suyun drenaj alanının arttığı ve bu şekilde boşluk suyu basıncının daha hızlı bir oranda azaldığını belirtmiştir. Kırnak (2017) kolon boyunun artmasıyla konsolidasyon süresinin azaldığını belirtmiştir.
- Taş kolonlar arasındaki mesafe azaldıkça oturmalar önemli ölçüde artmakta ve konsolidasyon hızı artmaktadır. Taş kolonlar arasındaki mesafe arttıkça  $\beta$  artmakta,  $n$  azalmaktadır. Oo (2004), yaptığı çalışmada taş kolonlar arasındaki mesafenin artmasıyla konsolidasyonun azaldığını belirtmiştir. Adeli (2013) kolonlar arası mesafe azaldıkça oturmaların arttığı dolayısıyla konsolidasyonun hızlandığı sonucuna varılmıştır. Vekli (2009) kolonlar arası mesafenin artması ile oturma azaltma faktörünün de arttığını elde etmiştir. Uysal (2016) kolonlar arasındaki mesafenin azalması ile konsolidasyon süresinin kısaldığını tespit edilmiştir.

#### ***Düşey Drenlerin Tasarım Parametrelerinin Araştırılması***

- Sayısal analizler ile,  $k_h/k_s$  oranının artması başka bir ifade ile örselenmiş bölgenin permeabilitesinin azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir.
- Analizler sonucunda dren boyunun azalması ile zamana bağlı oturmaların azaldığı tespit edilmiştir. Dren boyunun artması ile konsolidasyon hızlanmaktadır. Ancak, drenaj uzunluğu arttıkça kuyu direncinde artışlar meydana gelmekte ve drenlerin deşarj kapasitesi azalmaktadır. Bu nedenle dren tasarımında optimum dren boyu tespit edilmelidir.
- Yapılan analizler sonucunda drenler arasındaki mesafe arttıkça zamana bağlı oturmalar azalmaktadır. Drenler arasında mesafe azaldıkça konsolidasyon süresi de azalmaktadır.

- Örselenmiş bölge büyüklüğünün artması ile konsolidasyon hızı azalmaktadır. Bu durum örselenmiş bölgede yer alan permeabilitenin doğal zemine göre oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

#### ***Vaka Analizi Sonuçları***

- Her iki iyileştirme yönteminin performansı değerlendirildiği zaman, aynı mesafeye sahip taş kolonların düşey drenlere göre oturmalarının azaltılması ve konsolidasyonun hızlandırılmasında oldukça iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
- Vaka analizi kapsamında yapılan çalışmalar değerlendirildiği zaman, olası iyileştirme yöntemlerinden uygun olanın seçilmesi konusunda detaylı bir araştırma yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu araştırmalar öncelikle yöntemlerin performansları, uygulanabilirliği ve ekonomik olarak değerlendirilmesi olacaktır.

## KAYNAKLAR

Abuel-Naga, H. and Bouazza, A., “Equivalent diameter of a prefabricated vertical drain”, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), 227-231, 2009.

Adeli, N., Taş Kolonların Analiz ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 59-67, 2013.

Al-Soud, M. S., “Numerical analysis of prefabricated vertical drains improved soft soil beneath an embankment during staged construction”, *Journal of Engineering and Development*, 20(1), 151-163, 2016.

Ambily, A. P. and Gandhi, S. R., “Behaviour of stone columns based on experimental and fem analysis”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133, ss.405-415, 2007.

Andreou, P. and Paadopoulos, V., “Modelling stone columns in soft clay. Proc. Num. Meth. Geotech. Engng”, *Taylor and Francis Group, London*, ISBN 0-415-40822-9, 2006.

Arulrajah, A., Nikraz, H. and Bo, M. W., “Finite Element Modeling of Marine Clay Deformation under Reclamation Fills Ground Improvement”, *Journal of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(3), 105-118, 2005.

Ayhan, Ö., Seçilen Bir Sahada Taş Kolon ve Fore Kazık ile Yapılan İyileştirmenin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, s. 56-61, 2016.

Azari, B., Behaviour of soft soil improved with vertical drain accelerated preloading incorporating visco-plastic deformation. PhD Thesis, *University of Technology*, s. 41-73, 2015.

Balaam, N. P. and Booker, J. R., “Analysis of rigid rafts supported by granular piles”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5, 379–403, 1981.

Barksdale, R. D. and Bachus, R. C., “Design and construction of stone columns.” Vol. I FHWA/RD-83/026, *Federal Highway Administration, Washington, D.C.*, 1983.

Barron, R. A., “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, *Proceedings, ASCE*, 73(6), s. 811–835, 1947.

Barron, R. A., “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, *Transactions of the American Society of Civil Engineering*, 113, 718-742, 1948.

Basu, D. and Prezzi, M., “Effect of The Smear And Transition Zones Around Prefabricated Vertical Drains Installed in a Triangular Pattern on The Rate of Soil Consolidation”, *International Journal of Geomechanics*, 7(1), 34-43, 2007.

Basu, D., Basu, P. and Prezzi, M., “Analytical solutions for consolidation aided by vertical drains”, *Geomechanics and Geoengineering*, 1(1), 63-7, 2006.

Bergado, D. T., Chai, J. C., Abiera, H. O., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., “Improvement of soft Bangkok clay using vertical drains”, *Geotextiles and Geomembranes 12*, No. 4, s. 327-349, 1993.

Bergado, D. T., Mukherjee, K., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., “Prediction of vertical-band-drain performance by finite element method”, *Geotextiles and Geomembranes 12*, No. 6, s. 567-586, 1993.

Bo, M. W., Chu, J., Low, B. K. and Choa, V., “Soil Improvement: Prefabricated Vertical Drain Technique”, ISBN 981-243-044-X, *Thomson Learning, Singapore*, s. 341, 2003.

Borges, J. L., “Three-Dimensional Analysis of Embankments on Soft Soils Incorporating Vertical Drains by Finite Element Method”, *Computers and Geotechnics*, 31: 665-676, 2004.

Bouassida, M. and Hazzar L., “Comparison between Stone Columns and Vertical Geodrains with Preloading Embankment Techniques”, paper 7.18a. CD Rom of, **6<sup>th</sup> Int. Conf. On Case Histories in Geotechnical Engineering**. Arlington VA, August (USA), s. 11-18, 2008.

Castro, J., and Sagaseta, C., "Influence of stone column deformation on surrounding soil consolidation", *Proceedings of the Second International Workshop on Geotechnics of Soft Soils*, Scotland. 2008.

Castro, J. and Sagaseta C., “Consolidation and deformation around stone columns: Numerical evaluation of analytical solutions”, *Comput Geotech*, 38(3), 354–362, 2011.

Chai, J. and Miura, N., “Investigation of factors affecting vertical drain behavior”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(3), 216-226, 1999.

Chen, J., Shen, S. L., Yin, Z. Y., Xu, Y. S. and Horpibulsuk, S., “Evaluation of effective depth of PVD improvement in soft clay deposit: a field case study”, *Marine Georesources and Geotechnology*, 34(5), 420-430, 2016.

Chu, J., Bo, M. W. and Arulrajah, A., “Soil improvement works for an offshore land reclamation”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 162(1), 21-32, 2009.

Chu, J., Bo, M.W. ve Choa, V., “Practical Considerations for Using Vertical Drains in Soil Improvement Projects”, *Geotextiles and Geomembranes*, 22: 101-117, 2004.

Cimentada, A. and Da Costa A., “Laboratory experimental analysis of radial consolidation around a stone column” *Geotechnics of soft soils: Focus on ground improvement*, *London: Taylorand and Francis Group*; s. 213-217, 2009.

Das, A. K. and Deb, K., “Experimental and 3D numerical study on time-dependent behavior of stone column–supported embankments”, *International Journal of Geomechanics*, 18(4), 04018011, 2018.

Deb, K., “Modeling of granular bed-stone column-improved soft soil”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomech.* 32, 1267-1288, 2008.

Elias, V., Welsh, J., Warren, J., Lukas, R., Collin, J. G. and Berg, R. R., “Ground improvement methods”, Vol. 1, *Federal Highway Administration Publication*, No. NHI-06-020, Washington, D.C, 2006.

Fatahi, B., Basack, S., Premananda, S. and Khabbaz, H., “Settlement Prediction and Back Analysis of Young’s Modulus and Dilation Angle of Stone Columns”, *Australian Journal of Civil Engineering*, 10(1), 67-79, 2012.

Gaber, M., Kasa, A., Abdul-Rahman N. and Alsharif, J., “Simulation of Stone Column Ground Improvement (Comparison between Axisymmetric and Plane Strain)”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, DOI: 10.3844/ajeassp.2018.129.137, 11 (1), 129-137, 2018.

Han, J. and Ye, S. L., “A theoretical solution for consolidation rates for stone column reinforced foundations accounting for smear and well resistance effects”, *Int. J. Geomech.*, 2(2), 135-151, 2002.

Han, J. and Ye, S. L., “Simplified solution for the consolidation rate of stone column reinforced foundations”, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 597–603, 2001.

Han, J., Oztoprak, S., Parsons, R. L. and Huang, J., “Numerical analysis of foundation columns to support widening of embankments”, *Computers and Geotechnics*, 34(6), 435-448, 2007.

Han, J., Principles and Practice of Ground Improvement. *John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 2015.*

Hansbo, S., “Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains”, *In Proc. Of the 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.*, Stockholm, 3, 677–682, 1981.

Hawladar, B.C., Imai, G. and Muhunthan, B., “Numerical Study of The Factors Affecting The Consolidation of Clay with Vertical Drains”, *Geotextiles and Geomembranes*, 20: 213-239, 2002.

Hird, C. C., Pyrah, I. C., Russell, D. and Cinicioglu, F., “Modelling the effect of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground”, *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 795-807, 1995.

Hird, C.C. and Moseley, V.J., “Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil”, *Geotechnique*, 50(1), 89-97, 2000.

Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D., “Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground”, *Géotechnique*, 42. 499-511, 1992.

Holtz, R.D., Jamiolkowski M.B., Lancellotta R. and Pedroni R., “Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance”, *CIRIA*: London; 1-131, 1991.

Holtz, R.D. and Holm, B.G., “Excavation and sampling around some sand drains at Ska-Edeby, Sweden”, In Proceedings of the Sixth Scandinavian Geotechnical Meeting, Trondheim, Oslo, Sweden, *Norwegian Geotechnical Institute*, s. 79-85, 1973.

Indraratna, B. and Redana, I. W., “Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, 37(1), 132-145, 2000.

Indraratna, B. and Redana, I. W., “Plane-strain modeling of smear effects associated with vertical drains”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 474-478, 1997.

Indraratna, B. and Redana, I.W., “Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation”, *J. Geotech. and Geoenvironmental Engineering*, 124, 180-184, 1998.

Indraratna, B., Bamunawita, C., Redana, I.W. and McIntosh, G., “Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice”, *Ground Improvement*, 7(3), 127-137, 2003.

Indraratna, B., Redana, I. W. and Balasubramaniam, A. S., “Settlement prediction of embankments stabilised with prefabricated vertical drains at Second Bangkok International Airport Prédiction d’aménagement au second aéroport international de Bangkok, de remblais stabilisés à l’aide de drains verticaux préfabriqués”, *In Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance: Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Amsterdam, Netherlands, 7-10 June 1999 (s. 1505). Taylor and Francis US, 1999.

Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C. and Sathananthan, I., “Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading”, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(4), 994-1014, 2005a.

Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C. and Wijeyakulasuriya, V., Soft clay stabilisation using prefabricated vertical drains and the role of viscous creep at the site of Sunshine Motorway, *Queensland. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Australia New Zealand conference on Geomechanics*, 21-24 October 2007, s. 96-101, 2007.

Indraratna, B., Sathananthan, I., Rujikiatkamjorn, C. and Balasubramaniam, A. S., “Analytical and numerical modeling of soft soil stabilized by prefabricated vertical drains incorporating vacuum preloading”, *International Journal of Geomechanics*, 5(2), 114-124, 2005b.

Iskandar, R. and Tarigan, A., “A Review on the Characteristics of the Smear Zone: Field Data Back Calculation Compared with Laboratory Testing”, *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1), 2018.

Juran, I., Chen, C. L., Acar Y. B. and Gurmazi, A., “A comparative study of soil improvement techniques for highway embankments”, *Federal Highway Administration*, Louisiana, 276, 1988.

Kırnak, E., Taş Kolon Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 71-86, 2017.

Li, T., Qin, A., Pei, Y. and Sun, D. A., “Axisymmetric Consolidation of Unsaturated Soils with Vertical Drain with Radial and Vertical Drainage”, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 233, No. 3, s. 032044). IOP Publishing, February 2019.

Lin, D. G., Kim, H. K. and Balasubramaniam, A., “Numerical modeling of prefabricated vertical drain”, *Geotechnical Engineering*, 31(2), 2000.

Lo, D. O. K. and Mesri, G., Settlement of test fills for Chek Lap Kok airport. in Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, edited by A.T. Yeung and G. Fealio, s. 1082—1099, *American Society of Civil Engineers*: New York, 1994.

Madhav, M. R., Park, Y. M. and Miura, N., “Modelling and study of smear zones around band shaped drains”, *Soils and Foundation*, 33(4), 135-147, 1993.

Mert, A. C., Düşey Drenlerle (PVD) İyileştirilmiş Kilde Konsolidasyon Oturmalarının Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 54-69, 2018.

Mesri, G., Lo, DOK, and Feng, TW., “Settlement of embankments on soft clays”, *In Proc. Settlement*, 94, s. 8-76, 1994.

Mirsalehi, S. and Bilsel, H., “Finite element modeling of stone columns in alluvial soils under an embankment”, *3<sup>th</sup> International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2012.

Mitchell, J. K. and Huber, T. R., “Performance of a stone column foundation”, *J Geotech Eng* 111(2), 205–223, 1985.

Mohtasham, M. R. and Khodaparast, M., “Investigation of the Effect of Dimensional Characteristics of Stone Column on Load-Bearing Capacity and Consolidation Time”, *Civil Engineering Journal*, 4(6), 1437-1446, 2018.

Nguyen, B. P. and Kim, Y. T., “Radial consolidation of PVD-Installed normally consolidated soil with discharge capacity reduction using large-strain theory”, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 243-254, 2019a.

Nguyen, B. P. and Kim, Y. T., “An analytical solution for consolidation of PVD-installed deposit considering nonlinear distribution of hydraulic conductivity and compressibility”, *Engineering Computations*, 36(2), 707-730, 2019b.

Onoue, A., Ting N. H., Germaine, J.T. and Whitman, R.V., “Permeability of disturbed zone around vertical drains”, *Geotechnical Engineering Congress Proceedings of the Congress of the Geotechnical Engineering Division, Geotechnical Special Publication 27*, ASCE, New York, s. 879–890, 1991.

Onoue, A., “Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration. Technical note”, *Soils and Foundations* 28 (4), 165–174, 1988.

Oo, K.K., Analysis Of Stone Column Reinforced Foundation Using Finite Element Method. Master's Thesis, *Department Of Civil Engineering National University Of Singapore*, Singapore, s. 60-66, 2004.

Plaxis 8.0, Finite Element Code For Soil Rock Analyses, *User Manual*, Delf, 2006.

Priebe, H. J., “The Design of Vibro Replacement.”, *Ground Engineering*, 1-13, 1995.

Rajesh, B. G., Chukka, S. K. and Dey, A., “Finite Element Modeling of Embankment Resting on Soft Ground Stabilized with Prefabricated Vertical Drains”, *Elastic*, 10, 06, 2018.

Rujikiatkamjorn, C. and Indraratna, B., "Design procedure for vertical drains considering a linear variation of lateral permeability within the smear zone", *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3), 270-280, 2009.

Sakleshpur, V. A., Prezzi, M. and Salgado, R., "Ground Engineering using Prefabricated Vertical Drains: A Review", *Geotechnical Engineering*, 49(1), 45-64, 2018.

Saroglou, H. and Pateras, S. K., "Ground improvement of clayey soil formations using stone columns: A Case Study from Greece", *The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India, 2008.

Schweiger, H. F., "Finite element analysis of stone column reinforced foundations", *Inst. für Bodenmechanik, Felsmechanik u. Grundbau*, 1989.

Sexton, B. G. and McCabe, B. A., "Numerical modelling of the improvements to primary and creep settlements offered by granular columns", *Acta Geotechnica*, 8(4), 447-464, 2013.

Sexton, B.G., McCabe, B. A. and Castro, J., "Appraising stone column settlement prediction methods using finite element analyses", *Acta Geotechnica* 9(6) 993-1011, 2014.

Sharma, U., Soni, D. K. and Kumar, S. N., "Influence of Stone Columns on the Consolidation Characteristics of a Clayey Soil", *Environmental Geotechnology*. Springer, Singapore, 153-159, 2019.

Shien, N. K. and Ann, T. S., "Parametric Study On The Settlement Improvement Factor Of Stone Column Groups", *ESTEEM Academic Journal*, 10(1), 2014.

SivaSankara Reddy D.V., Chittaranjan M., Ravi Kumar Reddy C. and Kowshik K., "Performance Evaluation of Stone Column Installed Soft Ground- A Parametric Study with Numerical Investigation", *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(2S), 7-13, 2018.

Taube, M. G. and Herridge, J., “Stone columns for industrial fills”, *In 33<sup>rd</sup> Ohio River Valley Soil Seminar* (ORVSS)(Vol. 18) (October, 2002).

URL-1 [http://seafco.co.th/src/pdf/Technical\\_Support/P-V-D.pdf](http://seafco.co.th/src/pdf/Technical_Support/P-V-D.pdf), 20.07.2019.

URL-2 <http://www.zetas.com.tr/index.php?id=211000&dil=TR>, 20.07.2019.

URL-3 <http://erkegrouptr.blogspot.com/2010/12/wick-drain-nedir.html>, 27.06.2019.

Uysal, F., Taş Kolonların Analiz ve Tasarımı. Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 45-99, 2016.

Vekli, M., Taş Kolon İle Şev İyileştirmesinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, s. 123-128, 2009.

Verma, A. K. and Jain, A., “Evaluation Of Settlement Behaviour Of Clay Foundation Improved Using Stone Column”, *International Dam Safety Conference*, February, 887-899, 2019.

Wang, X. S. and Jiao, J. J., “Analysis of soil consolidation by vertical drains with double porosity model”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(14), 1385-1400, 2004.

Walker, R. and Indraratna, B., “Vertical drain consolidation with parabolic distribution of permeability in smear zone”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7), 937-941, 2006.

Wehr, J. and Herle, I., “Exercise on calculation of stone columns - Priebe method and FEM.”, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Graz, s. 773-776, 2006.

Yildiz, A., “Numerical modeling of vertical drains with advanced constitutive models”, *Computers and Geotechnics*, 36(6), 1072-1083, 2009.

Yoshikuni, H. and Nakanodo, H., “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells with Finite Permeability”, *Japan Soc. Soil Mech. and Found. Eng.* 14(2), 35-46, 1974.

Zahmatkesh, A. and Choobbasti, A. J., “Investigation of Bearing Capacity and Settlement of Strip Footing on Clay Reinforced with Stone Columns”, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(8), 3658-3668, 2010.

Zhang, Y., Chan, D. and Wang, Y., “Consolidation of composite foundation improved by geosynthetic-encased stone columns”, *Geotextiles and Geomembranes*, 32, 10-17, 2012.

Zhu, G. and Yin, J. H., “Finite element consolidation analysis of soils with vertical drain”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24: 337-366, 2000.

## ÖZ GEÇMİŞ

Süveyda Merve Oral, 10.02.1992 tarihinde Niğde' de doğdu. İlköğretimini 23 Nisan Havacılar İlköğretim Okulu' nda ve lise eğitimini Niğde Anadolu Lisesi' nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nden 1 yıl İngilizce hazırlık öğrenimi aldıktan sonra Haziran 2015' de mezun oldu. 2016 - 2017 Öğretim Yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2016 yılında İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya başladığı Niğde Belediyesinde halen çalışmaya devam etmektedir.



