



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLEN YUMUŞAK KİLLERİN
DEFORMASYON VE GÖÇME DAVRANIŞI

Caner DURMUŞ

DANIŞMAN

Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma, 13.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ


Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU
Boğaziçi Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmam boyunca bilgisi, desteği, ilgisi ve sabrıyla bana her zaman yardımcı olan ve gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Eğitimim boyunca görüş, tavsiye ve kaynak yardımlarıyla değerli katkılarından dolayı Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU'na, Prof. Dr. İlknur BOZBEY'e ve Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a ve Doç. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Hayatım boyunca karşılaştığım zorlukları aşmamda, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, güç veren ve ayaklarım üzerinde durmamı sağlayıp bu günlere gelmemi sağlayan ailemin her bir bireyine ayrı ayrı ve çalışmam boyunca manevi yardımlarını esirgemeyen eşim Pınar DURMUŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Nehir'ime...

Haziran 2019

Caner DURMUŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xviii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
2.1 İYİLEŞTİRME UYGULAMASI GEREKTİREN ZEMİNLER	4
2.2 ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	5
2.2.1 Mekanik Stabilizasyon	8
2.2.2 Hidrolik Stabilizasyon	10
2.2.3 Fiziksel Ve Kimyasal Stabilizasyon	12
2.2.4 Ekleme ve Sınırlama.....	13
2.3 TAŞ KOLON İMALATI	14
2.3.1 Vibro Sıkıştırma (Kompaksiyon) Yöntemi	18
2.3.2 Vibro Yerdeğiştirme (Taş Kolon) Yöntemi	21
2.3.2.1 Üstten Beslemeli Islak Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi.....	21
2.3.2.2 Üstten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi	22
2.3.2.3 Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi.....	23
2.3.2.4 Vibro-Cat Yöntemi	24
2.3.2.5 Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) Yöntemi	25
2.3.3 Taş Kolon İmalatında Kullanılan Malzemeler	27
2.3.4 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması	28
2.4 TAŞ KOLON TASARIMI.....	29
2.4.1 Tekil Taş Kolon.....	29
2.4.1.1 Göbeklenme Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri	30
2.4.1.2 Zımbalanma Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri	33

2.4.1.3 Genel Taşıma Gücü Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri	34
2.4.2 Taş Kolon Grubu	35
2.4.2.1 Kemerlenme Etkisi	36
2.4.2.2 Birim Hücre Prensibi.....	37
2.4.3 Taş Kolonlarda Oturma Tahmini.....	40
2.4.3.1 Denge Metodu.....	40
2.4.3.2 Priebe Metodu.....	41
2.4.3.3 Greenwood Metodu.....	42
2.4.3.4 Granüler Duvar Metodu	43
2.4.3.5 Sayısal Analiz Metodu	44
2.5 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	45
2.5.1 Taş Kolonlu Temelerde Grup Etkisi: Model Testleri (Wood vd. 1999).	46
2.5.1.1 Model Testleri.....	46
2.5.1.2 Sayısal Analiz.....	48
2.5.1.3 Sonuçlar	49
2.5.2 Taş Kolonların Sonlu Elemanlar İle Modellemesi: Bir Vaka (Tan vd. 2005).....	53
2.5.2.1 Taş Kolon Birim Hücresi	53
2.5.2.2 Taş Kolonun Sayısal Analizi.....	54
2.5.2.3 Birim Hücresinin Sonlu Elemanlar Analizi.....	56
2.5.2.4 Örnek Vaka - New Pantai Otoyol Dolgusunda Taş Kolon Çalışması	58
2.5.2.5 Sonuçlar.....	59
2.5.3 Taş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminleri Basitleştirilmiş Düzlem Deformasyon Modellemesi (Tan vd. 2008).....	60
2.5.3.1 Önerilen Çözüm Yöntemleri.....	60
2.5.3.2 Birim Hücre Dönüşümlerinin Karşılaştırılması	62
2.5.3.3 Saha Verileri İle Karşılaştırma.....	66
2.5.3.4 Sonuçlar.....	71
2.5.4 Basitleştirilmiş Eşdeğer İyileştirme Bölgesi Yöntemi (Tan vd. 2013).....	71
2.5.4.1 Eşdeğer Rijitliğin Belirlenmesi.....	72
2.5.4.2 Eşdeğer Permeabilitenin Belirlenmesi	73
2.5.4.3 Doğrulama.....	74
2.5.4.4 Sonuçlar.....	75
2.5.5 Taş Kolonlar İle Zemin İyileştirmenin Modellenmesi (Weber, 2007).....	75
2.5.5.1 Santrifüj Aleti.....	77

2.5.5.2 Santrifüj İçerisinde Taş Kolonu İmalatı	77
2.5.5.3 Kullanılan Ölçüm Cihazları.....	79
2.5.5.4 Kullanılan Malzemeler	79
2.5.5.5 Kilin İşlenmesi	82
2.5.5.6 Deney Modellerinin Hazırlanması.....	83
2.5.5.7 Deney Model Geometrisi	84
2.5.5.8 Sonuçlar.....	85
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	86
3.1 PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI.....	86
3.1.1 Programa Giriş.....	89
3.1.2 Malzeme Modelleri ve Özellikleri.....	94
3.1.2.1 Mohr-Coulomb (MC) Model.....	95
3.1.2.2 Hardening Soil – Pekleşen Zemin (HS) Modeli.....	97
3.1.2.3 Soft Soil Creep – Yumuşak Zemin Akma (SSC) Modeli.....	100
3.1.2.4 Drenaj Tipi.....	102
3.1.2.5 Başlangıç Ön Konsolidasyon Gerilmesi.....	103
3.2 SANTRİFÜJ DENEY SONUÇLARI	105
3.2.1 Başlangıç Parametrelerinin Belirlenmesi	106
3.2.2 Sonuçlar.....	107
3.3 SAYISAL MODELLERİN HAZIRLANMASI.....	110
3.3.1 Örselenmiş Bölge (Smear Zone) Dönüşümleri	111
3.3.2 Metot 1 Dönüşümleri.....	113
3.3.3 Metot 2 Dönüşümleri.....	114
3.3.4 Metot 3 Dönüşümleri.....	115
4. BULGULAR.....	117
4.1 DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ VE MALZEME MODELLERİ İLE YAPILAN ANALİZLER	118
4.1.1 Metot-1 Sayısal Model Analizleri	119
4.1.2 Metot-2 Sayısal Model Analizleri	124
4.1.3 Metot-3 Sayısal Model Analizleri	129
4.1.4 Dönüşüm Yöntemi ile Malzeme Modeli Seçimi	132
4.2 TEMEL SİSTEMİ ETKİSİ.....	135
4.3 KOLON ÇAPI ETKİSİ	141
4.4 KOLON BOYU ETKİSİ.....	146
4.4.1 Geotekstil Temel	147

4.4.2 Rijit Temel.....	152
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	160
KAYNAKLAR	164
EKLER	165
ÖZGEÇMİŞ	166



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002).	6
Şekil 2.2: Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları (Sağlamer, 1985).	7
Şekil 2.3: Dinamik kompaksiyon için kullanılan ekipmanlar.	9
Şekil 2.4: Silindirlerde yükleme durumları.	9
Şekil 2.5: Düşey drenler ile ıslah edilmiş saha.	11
Şekil 2.6: Diyafram duvar ve palplanş duvar ile suyun tutulması.	11
Şekil 2.7: Taş kolon imalat aşamaları, a-penetrasyon, b-temizleme, c-kurulum, d-bitiş.	16
Şekil 2.8: Vibro sistemler için uygun zemin gradasyonları (Schmidt ve Seitz, 1998).	16
Şekil 2.9: Vibro kompaksiyon yönteminde zemin iyileştirme mekanizması.	18
Şekil 2.10: Vibro kompaksiyon yöntemi ile taş kolon imalatı.	19
Şekil 2.11: Granüler zeminlerde vibratöre uzaklığına bağlı davranış (Rodger, 1979).	19
Şekil 2.12: Granüler zeminlerde ivmeye bağlı davranış (Rodger, 1979).	20
Şekil 2.13: İyileştirme öncesi ve sonrası elde edilen a-SPT, b-CPT dirençleri.	20
Şekil 2.14: Üstten beslemeli ıslak yöntem ile taş kolon imalat aşamaları.	22
Şekil 2.15: Dipten beslemeli kuru yöntem ile taş kolon imalat aşamaları.	24
Şekil 2.16: Vibro-Cat tipi vibratörlerin detay görünümü (Kirsch ve Kirsch, 2010).	25
Şekil 2.17: Forajlı darbeli kırmataş yapım aşamaları.	26
Şekil 2.18: Forajsız darbeli kırmataş yapım aşamaları.	27
Şekil 2.19: Tekil kolonlarda göçme mekanizmaları (Barksdale ve Bachus, 1983).	29
Şekil 2.20: Taş kolona etkiyen farklı tip yükleme durumları.	30
Şekil 2.21: Farklı araştırmacılar tarafından gözlenmiş z_b/D aralıkları (Çekinmez, 2014).	31

Şekil 2.22: Taşıma gücünün kilin G/s_u ve kolonun L/D oranlarıyla değişimi (Madhav vd., 2005).....	34
Şekil 2.23: N_γ , N_c ve N_q değerleri (Madhav ve Vitkar, 1978).....	35
Şekil 2.24: Kolon gruplarında göçme mekanizmaları (Kirsch, 2004).	36
Şekil 2.25: Dairesel göçme mekanizması (Aboshi ve diğ., 1979, 1991).	36
Şekil 2.26: Kemerlenme davranışı, a-Waterton ve Foulsham (1984), b- Hewlett ve Randolph, (1988).....	37
Şekil 2.27: Birim hücre prensibi (Kirsch ve Kirsch, 2010).....	38
Şekil 2.28: Farklı kolon yerleşimleri için birim hücre hesabı 1-üçgen, 2-kare, 3-altıgen dizilim.....	38
Şekil 2.29: Oturma iyileştirme oranı – Denge yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).....	41
Şekil 2.30: Oturma iyileştirme oranı (Priebe, 1988).....	42
Şekil 2.31: Oturma iyileştirme oranı (Greenwood, 1970).....	43
Şekil 2.32: Oturma iyileştirme oranı – Granüler duvar yöntemi (Van Impe ve De Beer, 1983).....	44
Şekil 2.33: Alan oranı karşılaştırması : a-taş kolon yerleşimi, b-Alan oranının sayısal karşılaştırılması.....	47
Şekil 2.34: Hazırlanan sayısal analiz modeli (Wood 1999).....	48
Şekil 2.35: Gözlenen deformasyon mekanizmaları (Wood 1999).....	49
Şekil 2.36: Kolonlarda gözlenen deformasyon fotoğrafları, a $-L/r_0=2$, $A_s=\%24$, $r_c=5.5$ mm, b $-L/r_0=2$, $A_s=\%30$, $r_c=8.75$ mm, c $-L/r_0=3.4$, $A_s=\%24$, $r_c=8.75$ mm, d $-L/r_0=3.2$, $A_s=\%24$, $r_c=5.5$ mm.	50
Şekil 2.37: a – Rijit temel altında oluşan kama; b – β açısının alan oranıyla değişimi.	51
Şekil 2.38: Sayısal analiz sonucunda kolonlarda oluşan oturma profili, Kolon uzunluğu/temel genişliği: a – 0.25; b – 0.50; c – 0.75. Kolon aralığı/temel genişliği; A – 0.425; B – 0.325; C – 0.225; D – 0.125; E – merkezde.....	51
Şekil 2.39: Model temelleri için normalize edilmiş yük-oturma sonuçları.....	52
Şekil 2.40: Gerilme dağılımı, a – fiziksel model, b – sayısal model.....	53
Şekil 2.41: Birim hücrenin eksenel simetrik modelden eşdeğer düzlem deformasyona modele dönüşümü.....	54
Şekil 2.42: Ortalama konsolidasyon oranının karşılaştırılması.....	57

Şekil 2.43: Gelişmiş zemin modelleri kullanılarak elde edilen ortalama konsolidasyon oranının karşılaştırılması.	58
Şekil 2.44: Dolgunun sayısal modeli.	58
Şekil 2.45: Oturmaların karşılaştırması, a – Dolgu merkezindeki oturmalar, b – Dolgu yüzeyindeki oturmalar.	59
Şekil 2.46: Üç boyutlu problemin iki boyutlu düzlem deformasyon modele dönüşümü, a-Metot 1, b-eksenel simetrik, c-Metot 2 (Indraratna ve Redana, 2000, Tan ve diğ., 2008).....	61
Şekil 2.47: Birim hücrenin sonlu elemanlar modellemesi (Tan ve diğ., 2008).	63
Şekil 2.48: Oturmalar ve ilave boşluk suyu basınçları, a-Durum1, b-Durum2 (Tan ve diğ., 2008).....	65
Şekil 2.49: Birim hücre modelinde konsolidasyon sonucu elde edilen plastik noktalar (Tan ve diğ., 2008).	66
Şekil 2.50: Simetrik dolgu geometrisine ait kesit (Tan ve diğ., 2008).....	66
Şekil 2.51: SP1 ve SP2 noktaları için saha ile analiz oturmalarının karşılaştırılması (Tan ve diğ., 2008).....	67
Şekil 2.52: Dolgu oturma profili (Tan ve diğ., 2008).	68
Şekil 2.53: Analizler sonucunda elde edilen ilave boşluk suyu basınçları (Tan ve diğ., 2008).....	69
Şekil 2.54: Konsolidasyon sonunda modellerde gözlenen plastik noktalar (Tan ve diğ., 2008).....	70
Şekil 2.55: Konsolidasyon sonunda Metot 2’de yatay deplasmanlar (Tan ve diğ., 2008).	70
Şekil 2.56: Düzeltme faktörü grafikleri, a- $\phi'_c=40$, b- $\phi'_c=45$, - $\phi'_c=50$ (Tan ve diğ., 2013).....	72
Şekil 2.57: Alan değiştirme ve permeabilite oranlarına bağlı kompozit malzeme permeabilitesi (Tan ve diğ., 2013).....	73
Şekil 2.58: Analiz modelleri, a-düzlem deformasyon, b-eşdeğer kolon metodu (Tan ve diğ., 2013).....	74
Şekil 2.59: Zamana bağlı a-oturma, b-ilave boşluk suyu basıncı karşılaştırması (Tan ve diğ., 2013).....	74
Şekil 2.60: Deplasman karşılaştırması, a-oturma, b-yatay deplasman (Tan ve diğ., 2013).....	75
Şekil 2.61: Santrifüj modeli prensibi (Schofield, 1980).	76

Şekil 2.62: Farklı modellerde gerilmelerin karşılaştırılması (Laue, 2002).	76
Şekil 2.63: Tambur santrifüjün şematik kesiti (Springman vd., 2001).	77
Şekil 2.64: Kum kolonu imalat aleti (Weber 2007).	78
Şekil 2.65: Kum kolonu imalat aleti (Weber 2007).	78
Şekil 2.66: Kil malzemesinin işlenmesi (Weber 2007).	82
Şekil 2.67: Kil malzemesinin yerleştirilmesi, a-doldurulması için silindir üzerine yerleştirilen vakum kabı, b-döner silindir yüzeyine serilmiş kil şerbeti (Weber 2007).	83
Şekil 2.68: Kolon ve ölçüm aletlerine ait yerleşim planı, a-santrifüj modeli, b-şematik gösterim.	84
Şekil 2.69: Tambur içi model boyutları (Weber 2007).	85
Şekil 3.1: Sonlu eleman örnekleri a-bir boyutlu, b-iki boyutlu, c-üç boyutlu elemanlar.	87
Şekil 3.2: Geometrinin sonlu elemanlara ayrılması.	87
Şekil 3.3: Proje özellikleri, model ayarları.	89
Şekil 3.4: Düzlem deformasyon model.	90
Şekil 3.5: Eksenel simetrik model.	91
Şekil 3.6: Plaxis 2D versiyon 2016.01 giriş ekranı.	91
Şekil 3.7: Plaxis 2D ile modellenmiş iksa geometrisi.	93
Şekil 3.8: Plaxis 2D sonuç ekranı.	94
Şekil 3.9: Mohr-Coulomb model için gerilme-şekil değiştirme grafiği.	96
Şekil 3.10: Üç eksenli basınç deneyi ile E_0 , E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} belirlenmesi.	97
Şekil 3.11: Üç eksenli basınç deneyi ile E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} belirlenmesi.	98
Şekil 3.12: Odömetre deneyi ile E_{oed}^{ref} belirlenmesi.	98
Şekil 3.13: Ödometre testi sonucu idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Vermeer ve Neher, 1999).	101
Şekil 3.14: Zamana bağlı şekil değiştirme (Vermeer ve Neher, 1999).	101
Şekil 3.15: Mevcut düşey gerilmeler ile ön konsolidasyon arasındaki ilişki.	104
Şekil 3.16: Model kurulum aşamalarında düşey efektif gerilme değerleri (Weber, 2007).	106

Şekil 3.17: Model kurulumu sonunda (50g ivme altında) zemin parametreleri, a-aşırı konsolidasyon oranı, b-birim hacim ağırlık (Weber, 2007).	106
Şekil 3.18: 50g ivme durumunda zemin parametreleri, a-su içeriği, b-boşluk oranı (Weber, 2007).....	107
Şekil 3.19: v5-s3 sektörüne ait kesit görünüş (Weber, 2007).	107
Şekil 3.20: Kolon imalatının zemine etkisi, a-gözlemsel, b-mikroskobik inceleme (Weber, 2007).....	108
Şekil 3.21: Kolon imalatının eksen uzaklığına bağlı çevre zemine etkisi, a-porozite, b-yoğunluk (Weber, 2007).....	108
Şekil 3.22: Zamana bağlı oturma grafiği (Weber, 2007).	109
Şekil 3.23: a-kolon imalatı, b-dolgu imalatı aşamalarında boşluk suyu basıncı grafiği (Weber, 2007).....	109
Şekil 3.24: Dolgu imalat aşamalarında ölçülen ilave boşluk suyu basınçları, a-ilk kademe, b-ikinci kademe (Weber, 2007).	110
Şekil 3.25: Sonlu elemanlarda taş kolon imalat aşamaları, a-lineer elastik malzeme ile deplasmanların tanımlanması, b-kolon ve örselenme bölge malzemelerinin atanması.	111
Şekil 3.26: A-A doğrultusuna ait Metot 1 sonlu elemanlar modeli.	114
Şekil 3.27: A-A doğrultusuna ait Metot 2 sonlu elemanlar modeli.	114
Şekil 3.28: A-A doğrultusuna ait kolon sınırlarında hazırlanan Metot 3 sonlu elemanlar modeli.	116
Şekil 3.29: A-A doğrultusuna ait dolgu altında hazırlanan Metot 3 sonlu elemanlar modeli.	116
Şekil 4.1: Başlangıç durumunda düşey efektif gerilme.	117
Şekil 4.2: Başlangıç durumunda, a-AKO, b-boşluk oranı.	118
Şekil 4.3: Metot-1 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :13,91 cm).....	119
Şekil 4.4: Metot-1 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.	119
Şekil 4.5: Metot-1 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :15,10 cm).....	119
Şekil 4.6: Metot-1 HS malzeme modelinde plastik noktalar.	120
Şekil 4.7: Metot-1 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :15,82 cm).....	120
Şekil 4.8: Metot-1 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.	120

Şekil 4.9: Metot-1 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	121
Şekil 4.10: Metot-1 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	121
Şekil 4.11: Kolon imalat aşamasında İ.B.S.B, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.....	122
Şekil 4.12: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.....	123
Şekil 4.13: Metot-2 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :25,04 cm).....	124
Şekil 4.14: Metot-2 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.	124
Şekil 4.15: Metot-2 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :30,51 cm).....	124
Şekil 4.16: Metot-2 HS malzeme modelinde plastik noktalar.	125
Şekil 4.17: Metot-2 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :33,85 cm).....	125
Şekil 4.18: Metot-2 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.	125
Şekil 4.19: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	126
Şekil 4.20: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	127
Şekil 4.21: Kolon imalat aşamasında İ.B.S.B, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.....	127
Şekil 4.22: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.....	128
Şekil 4.23: Metot-3 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :15,66 cm).....	129
Şekil 4.24: Metot-3 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.	129
Şekil 4.25: Metot-3 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :9,77 cm).....	129
Şekil 4.26: Metot-3 HS malzeme modelinde plastik noktalar.	130
Şekil 4.27: Metot-3 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{max} :9,68 cm).....	130
Şekil 4.28: Metot-3 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.	130
Şekil 4.29: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	131
Şekil 4.30: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.	131
Şekil 4.31: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.....	132

Şekil 4.32: Model düzenlenmesi ile elde edilen deplasman grafiği.....	134
Şekil 4.33: Model düzenlenmesi ile elde edilen boşluk suyu basıncı grafiği.	134
Şekil 4.34: Düzenlenmiş model ile Metot-3 yöntemi deplasman kıyaslaması.	135
Şekil 4.35: $z=7,50$ m derinlik için farklı temel sistemlerinde elde edilen deplasman profili.	136
Şekil 4.36: $z=7,50$ m derinlik için farklı temel sistemleri orta noktalarında elde edilen zamana bağlı deplasman profili.	136
Şekil 4.37: $z=25,00$ m derinlik için farklı temel sistemlerinde elde edilen deplasman profili.	137
Şekil 4.38: $z=25,00$ m derinlik için farklı temel sistemleri orta noktalarında elde edilen zamana bağlı deplasman profili.	137
Şekil 4.39: $z=25,00$ m derinlik ve esnek temel altındaki zemin ve kolonlarda hesaplanan gerilmeler.....	138
Şekil 4.40: $z=25,00$ m derinlik ve esnek temelli modelde deplasman profili.	138
Şekil 4.41: $z=25,00$ m derinlik ve rijit temel altındaki zemin ve kolonlarda hesaplanan gerilmeler.....	139
Şekil 4.42: $z=25,00$ m derinlik ve rijit temelli modelde deplasman profili.	139
Şekil 4.43: Temel kenarında elde edilen yatay deplasmanlar, a) $z=7,5$ m, b) $z=25,0$ m.	140
Şekil 4.44: Farklı çaplı kolonlar için hazırlanan analiz modelleri, a- $r_c=30$ cm ($b_c=9,2$ cm), b- $r_c=60$ cm ($b_c=18,2$ cm), c- $r_c=90$ cm ($b_c=27,4$ cm).	142
Şekil 4.45: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temeğe ait oturma profili.	143
Şekil 4.46: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temeğe ait zamana bağlı oturma.....	143
Şekil 4.47: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için boşlu suyu basıncı değerleri.	144
Şekil 4.48: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temeğe ait oturma profili.	144
Şekil 4.49: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temeğe ait zamana bağlı oturma.....	145
Şekil 4.50: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için boşlu suyu basıncı değerleri.	145

Şekil 4.51: $z=25,0$ m, $a_r=12\%$ için hazırlanan analiz modelleri, a-ıslahsız durum, b-kolon boyu=1,00 m, c-kolon boyu=6,00 m, d-kolon boyu=15,00 m.	147
Şekil 4.52: $z=25,00$ m ve kolonsuz durum için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	148
Şekil 4.53: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	148
Şekil 4.54: $z=25,00$ m ve 6,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	149
Şekil 4.55: $z=25,00$ m ve 15,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	149
Şekil 4.56: Kolon boyuna bağlı geotekstil örtüde elde edilen oturma profilleri.....	150
Şekil 4.57: Kolon boyuna bağlı geotekstil örtüde hesaplanan oturma değerleri.....	151
Şekil 4.58: Kolon boyuna bağlı oturmalarda meydana gelen iyileştirme oranı.....	151
Şekil 4.59: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı grafiği.....	152
Şekil 4.60: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı.....	152
Şekil 4.61: $z=25,00$ m ve kolonsuz durum için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	153
Şekil 4.62: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	153
Şekil 4.63: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	154
Şekil 4.64: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.....	154
Şekil 4.65: Kolon boyuna bağlı rijit temelde elde edilen oturma profilleri.	155
Şekil 4.66: Kolon boyuna bağlı rijit temelde hesaplanan oturma değerleri.....	156
Şekil 4.67: Kolon boyuna bağlı oturmalarda meydana gelen iyileştirme oranı.....	156

Şekil 4.68: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı grafiği.....	157
Şekil 4.69: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı.....	157
Şekil 4.70: Kolon boyuna oturma değerleri.....	158
Şekil 4.71: Dolgu yükü altında elde edilen kayma yüzeyleri.....	159
Şekil 4.72: Dolgu yükü altında meydana gelen ve iyileştirme oranlarını etkileyen bölgeler.....	159



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Zemin cinsine göre stabilizasyon metodu (Tunç, 2001-2002).....	7
Tablo 2.2: Stabilizasyon metotları (Tunç, 2001-2002).....	8
Tablo 2.3: Model testlerde kullanılan zemin özellikleri (Wood 1999).	47
Tablo 2.4: Model testlerin özeti.....	59
Tablo 2.5: Birim hücre modeli için malzeme parametreleri.....	63
Tablo 2.6: Birim hücre modeli için malzeme parametreleri.....	67
Tablo 2.7: Malzeme parametreleri.....	74
Tablo 2.8: Birmensdorf kilinin mekanik sınıflandırması.	80
Tablo 2.9: Birmensdorf kilinin mekanik özellikleri.	80
Tablo 2.10: Normal konsolide Birmensdorf kilinin mekanik özellikleri.	80
Tablo 2.11: Kuvars kumunun özellikleri.	81
Tablo 2.12: Geogrid özellikleri (Weber, 2007).	81
Tablo 2.13: Dolgu malzemesi (kurşun) özellikleri.....	82
Tablo 2.14: Deneylere ait model özellikleri.	85
Tablo 3.1: Malzeme modeli için kullanılabilir drenaj tipi.	103
Tablo 3.2: Santrifüj deneyinde kullanılan malzemelere ait parametreler (Weber, 2007) ...	105
Tablo 3.3: 3D model için yumuşak kil ve örselenme bölgelerine ait parametreler.....	112
Tablo 3.4: Metot 1 için taş kolon ve zeminlere ait parametreler.	113
Tablo 3.5: Metot 2 için taş kolon ve zeminlere ait parametreler.	115
Tablo 3.6: Metot 3 için zemin parametreleri.	116
Tablo 4.1: 3 boyutlu model geometrilerinin düzlem deformasyon modele dönüşümü.	141

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Alan
A_c	: Kolon alanı
A_{red}	: Alan azaltma oranı
A_s	: Zemin alanı
a	: Merkezci ivme
a_r	: Alan oranı
b_c	: Düzlem deformasyonda kolon kesitinin yarısı
C	: Birim hücre geometri katsayısı
C_c	: Ödometre deneyinden elde edilen sıkışma indeksi
C_s	: Kabarma/Tekrar yükleme indeksi
C_{ud}	: Homojendlik katsayısı
c	: Drenajsız mukavemet
D	: Çap
D_e	: Birim hücre çapı
D_{eq}	: Kompozit malzemeye ait sınırlama faktörü
D_r	: Rölatif sıkılık
D_{10}	: %10 geçeni karşılayan efektif dane çapı
D_{60}	: %60 geçeni karşılayan efektif dane çapı
E	: Elastisite modülü
$E_{composite}$: Kompozit malzemenin elastisite modülü
E_{oed}	: Ödometre deneyinden elde edilen elastisite modülü
E_u	: Drenajsız durumda zeminin elastisite modülü
e_0	: Zeminin ilk boşluk oranı
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Tabaka kalınlığı
K_{ac}	: Aktif gerilme katsayısı
K_{pc}	: Taş kolonun pasif gerilme katsayısı
K_s	: Zemin yanal itki basıncı katsayısı
K_0	: Sukünetteki toprak basıncı katsayısı
k_{eq}	: Homojenleştirilmiş zemin permeabilitesi

k_h	: Yatay permeabilite
k_v	: Düşey permeabilite
D_e	: Birim hücre çapı
L	: Uzunluk
l_{max}	: Maksimum boy
l_{min}	: Minimum boy
M_s	: Zeminin ödometre modülü
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
C_s	: Kabarma/Tekrar yükleme indeksi
e_0	: Zeminin ilk boşluk oranı
H	: Tabaka kalınlığı
K_s	: Zemin yanıl itki basıncı katsayısı
β	: Oturma iyileştirme oranı, yanıl açıl
K_{ac}	: Aktif gerilme katsayısı
q_0	: Uniform yayılı sürşarj yükü
M_s	: Zeminin ödometre modülü
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
N_c, N_q, N_γ	: Taşıma gücü faktörleri
N_{corr}	: Elastisite modülü düzeltme faktörü
n	: Gerilme dağılım katsayısı, yerçekimi faktörü
P	: Toplam düşey gerilme
q	: Sürşarj yükü
q_{ult}	: Nihai taşıma gücü
q_0	: Uniform yayılı sürşarj yükü
R	: Çap
r	: Yarıçap
r_c	: Kolon yarıçapı
S_t	: Birincil konsolidasyon oturması
s	: Kolon aralığı
S_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
T_v	: Zaman faktörü
\bar{U}	: Konsolidasyon derecesi
w	: Su muhtevası
z_b	: Göbeklenme derinliği

Z_m	: Model derinliği
Z_p	: Prototip derinliği
β	: Oturma iyileştirme oranı, yanal açısı
λ^*	: Modifiye sıkışma indeksi
K^*	: Modifiye şişme indeksi
$\bar{\phi}$: Ortalama kayma direnci açısı
ϕ'	: Efektif kayma direnci açısı
γ	: Özgöl ağırlık
γ_s	: Katı birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	: Zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı
γ_{unsat}	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
ν	: Poisson oranı
ν_{su}	: Drenajsız durumda zeminin poisson oranı
σ	: Normal gerilme
σ'	: Efektif normal gerilme
σ_z	: z derinliđinde dūřey normal basınç gerilmesi
σ_3	: Dūřey asal gerilme
ω	: Açısal hız

Kısaltmalar

Açıklama

AX	: Eksenel simetrik
BSB	: Boşluk suyu basıncı
C	: Kolon
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CPT	: Koni penetrasyon testi
DKK	: Darbeli kırmataş kolon
ECM	: Eşdeğer kolon metodu
EN	: Avrupa normları
GM	: Siltli çakıl
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
GS	: Killi çakıl
GW	: İyi derecelenmiş çakıl
HS	: Pekleşen zemin (Hardening Soil) modeli

IP	: Plastisite indisi
İBSB	: İlave boşluk suyu basıncı
LL	: Likit limit
MC	: Mohr-Coulomb zemin modeli
PL	: Düzlem deformasyon
S	: Zemin
SC	: Killi kum
SM	: Siltli kum
SP	: Kötü derecelenmiş kum
SPT	: Standart penetrasyon testi
SSC	: Yumuşak zemin akma (Soft soil creep) modeli
SW	: İyi derecelenmiş kum
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAŞ KOLONLAR İLE İYİLEŞTİRİLEN YUMUŞAK KİLLERİN DEFORMASYON VE GÖÇME DAVRANIŞI

Caner DURMUŞ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Bu tez çalışmasında yaygın kullanım alanı olan zemin iyileştirme yöntemlerinden taş kolonların deformasyon davranışı incelenmiştir. Yumuşak kil içerisinde imal edilen taş kolonların, dolgu altındaki davranışını araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan iki boyutlu sayısal modeller hazırlanarak analizler yapılmıştır. Sayısal modellerde birim hücre prensibinin dikkate alındığı, taş kolon imalatları için eşdeğer alan oranı ile eşdeğer rijitlik ve basitleştirilmiş eşdeğer iyileştirme olmak üzere üç farklı modelleme yöntemi incelenmiş ve problemin iki boyutlu düzlem deformasyon şartlara dönüşümü sağlanmıştır. Aynı zamanda yumuşak kil birim davranışının en doğru şekilde tanımlanabilmesi için “Mohr-Coulomb”, “Pekleşen Zemin” ve “Yumuşak Zemin Akma” modelleri kullanılarak analizler yapılmıştır. İlk etapta, yapılan farklı analiz sonuçları, santrifüj ortamında yapılan deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Santrifüj ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar; başlangıç gerilme koşulları, boşluk suyu basıncı, efektif gerilmeler, aşırı konsolidasyon oranı ve deplasmanlar bakımından kıyaslanmıştır. En uygun dönüşüm yöntemi ile birlikte malzeme modeli belirlenerek, ikinci etapta temel sistemi ve taş kolonun geometrik özelliklerinin değişimine bağlı elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

İrdelenen sonuçlar arasında, grup kolon içerisindeki yenilme mekanizmaları, dolgu altında imal edilecek esnek ve rijit temeller için deplasman kıyaslaması, aynı alan oranına sahip farklı çaplarda taş kolon gruplarının iyileştirme etkileri, model derinliğinin etkileri, taş kolon boyu ile deplasman arasındaki etkileşimler bulunmaktadır.

Haziran 2019, 192. sayfa.

Anahtar kelimeler: Zemin İyileştirme, Taş Kolon, Birim Hücre, Alan Yer Değiştirme Oranı, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Plaxis 2D



SUMMARY

M.Sc. THESIS

FAILURE AND DEFORMATION MECHANISM OF SOFT CLAYS IMPROVED BY STONE COLUMNS

Caner DURMUŞ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Deformation behavior of stone columns, which are widely used as a ground improvement method, were investigated within the scope of this thesis. Two dimensional numerical models were analyzed by using finite element method to investigate the behavior of stone columns constructed in soft clay. Three different modeling methods have been studied in this thesis which take principle of unit cell into consideration for the construction of stone columns. These models use equivalent area ratio, equivalent stiffness and simplified equivalent improvement methods. In this way, the problem is converted to two-dimensional plane deformation conditions. Also, “Mohr-Coulomb”, “Hardening Soil” and “Soft Soil Creep” models were used in the analyses to describe the behavior of the soft clay most accurately. At the first stage, the results of the analyses were compared with the test results performed in centrifuge. Centrifuge test results and numerical analyses results were compared in terms of initial stress conditions, pore water pressure, effective stresses, over consolidation ratio and displacements. Material model was determined by using the most appropriate conversion method and at the second stage, the analyses results depending on the foundation system and geometrical properties of stone columns were evaluated. The results of the study include; failure mechanisms of column groups, comparison of displacements for flexible and rigid foundations under embankments, effect of improvement by column groups which have different area ratio with different diameters, effect of model depths, interaction between stone column length and displacements

June 2019, 192 pages.

Keywords: Ground Improvement, Stone Column, Unit Cell, Area Replacement Ratio, Finite Element Method, Plaxis 2D



1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme ile orantılı yerleşim ihtiyacına karşın, kullanılabilir uygun araziler yeterli olmamaktadır. Yapı imalatına uygun arazilerin azalması nedeniyle, yapılaşmaya uygun olmayan ya da önceki dönemlerde tercih edilmeyen elverişsiz zeminli arazilerde de yapılaşma ihtiyaçları hâsıl olmuştur. Bunun yanı sıra elverişsiz zeminli arazilerde yapılaşmanın bir başka nedeni de, liman, köprü gibi yapıların su seviyesinde, yumuşak zeminler üzerine imal edilmesi gerekliliğidir.

Yumuşak zeminler üzerine zorunlu hale gelen yapılaşma, beraberinde birçok mühendislik problemini ve akabinde bu sorunların çözümü için yeni yöntem ve tekniklerin geliştirilmesini de gündeme getirmiştir. Yapılan uygulamalarda, stabilite (taşıma gücü) ve oturma kriterlerinin sağlanabilmesi için; zemin iyileştirmesi ile yükü taşıyan tabakanın mukavemet özelliklerinin artırılması ya da kazıklı sistemler ile yükün taşıma gücü yüksek zemin tabakalarına aktarılması ile gerekli güvenliğin sağlanmasına çalışılır. Uygulamanın yapılacağı sahanın ve üst yapının özelliklerine göre en uygun sistemin seçilmesi mümkündür.

İlk olarak 1830 yıllarında Fransa'da kullanılan ve Avrupa, Kanada, Japonya'da 1950'lerde, 1970'lerden itibaren de Amerika'da kullanılmaya başlayan taş kolonlar, dünya genelinde, yumuşak zeminlerde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olmasına karşın ülkemizde diğer metotlara nazaran daha az bilinen ve uygulamada daha az tercih/tavsiye edilen yöntemlerden biri olmaktadır. Bunun nedeni taş kolonlar ile iyileştirme projelerini hazırlayabilecek kalifiye mühendis olmamasının yanı sıra imalat yapabilecek yeterlilikte uygulamacının da bulunmamasıdır.

Bu tez çalışmasında, Thomas Michael Weber tarafından yapılan doktora çalışması kapsamında yürütülen santrifüj deneyler esas alınarak, yumuşak kil tabakası içerisinde imal edilen taş kolonların dolgu yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. Çalışma üç ana bölüm altında değerlendirilmiştir.

Genel kısımlar bölümünde zemin iyileştirme yöntemleri incelenmiştir. Aynı bölümde bu çalışmaya konu olan taş kolonlar ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Malzeme ve Yöntem bölümünde, yumuşak kil zeminler içerisinde imal edilmiş taş kolonlar ile ilgili literatür çalışmalarının yanı sıra kullanılacak sonlu elemanlar programının incelenmesi yer almaktadır. Yapılan literatür çalışması sonucunda, Muir Wood, D. Hu, W. ve Nash D. F. T. (2000) tarafından yapılan “Taş Kolonlu Temelerde Grup Etkisi: Model Testleri”, S.A. Tan ve Khine Khine Oo (2005) tarafından yapılan “Taş Kolonların Sonlu Elemanlar Modellemesi: Bir Vaka”, S. A. Tan, S. Tjahyono ve K. K. Oo (2008) tarafından yapılan “Taş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminleri Basitleştirilmiş Düzlem Deformasyon Modellemesi”, K.S. Ng, S.A. Tan (2013) tarafından yapılan “Taş Kolon Tasarımında Basitleştirilmiş Homojenizasyon Yöntemi” ile 2007 yılında Zürih/İsviçre’de yapılan, Thomas Michael Weber’in doktora tezine konu olan santrifüj çalışmaları referans olarak alınmıştır. Yapılan literatür taraması sonucunda, üç boyutlu bir sistemin iki boyutlu (düzlem deformasyon) hale getirilmesi amacıyla yapılması gereken dönüşümler irdelenmiştir.

Bulgular bölümünde, Thomas Michael Weber’in doktora tezine konu olan santrifüj deneyinde incelenen modellerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi mevcuttur. Üç boyutlu bir sistemin iki boyutlu (düzlem deformasyon) hale getirilmesi amacıyla yapılan dönüşümler ile gerçekçi olan yaklaşım ortaya konulmuştur. Bunun için farklı başlangıç gerilmelerine tabi tutulan kolonsuz model ile kolonlu modelin analizleri yapılarak elde edilen veriler modele örnek teşkil eden santrifüj deneyiyle mukayese edilmiş ve kabul edilen yaklaşımlar ile Plaxis yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal modelin geçerliliği ortaya konulmuştur. Sınırlı derinliğe sahip santrifüj deney modeli daha uzun kolonların deplasman ve göçme davranışlarının tartışılması ve göçme mekanizmalarının irdelenmesi için arttırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, artan kolon boyuna bağlı oturma değerlerinin, dolgu altında bulunan farklı bölgelere göre doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve belirli bir derinlikten sonra oturmaların neredeyse sabit kaldığı görülmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

İnşaat mühendisliğinde yapıların, her zaman zemin üzerinde ya da zemin içerisinde yapılma zorunluluğu vardır. Bu nedenle zeminler, taşıyıcı birim olarak temel altı malzemesi ya da inşaat malzemesi olarak bütün projelerde karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde nüfus, kentleşme ve sanayileşme artışı ile orantılı kullanılabilir uygun arazi artışı olmaması, hatta uygun zeminli arazilerin hızla azalması nedeniyle farklı alternatiflerin değerlendirilmesi gerekebilir.

1. Uygun zemin kapasitesi bulunmayan parselden vezgeçilerek yeni bir arazi seçilebilir. Günümüzde bu yöntemi uygulanabilmesi son derece zordur. Çünkü yatırımcıların sahip oldukları araziye bir başka saha ile değiştirmesi ya da yatırım yapmış olduğu sahadan vazgeçmesi mümkün değildir. Bu yöntem sadece elinde çok büyük araziler bulunduran kurumlar için geçerli olabilmektedir. Örneğin 10 dönümlük bir arazisi, bulunan bir devlet kurumunun 1 dönümlük bir alanda imalat yapması gerektiğinde, bütün saha için bir ön araştırma yaptıktan sonra en uygun bölgeyi seçip yapısını tasarlayabilir.
2. Yapı, zeminden beklenen davranışa uyum sağlayabilecek biçimde projelendirilebilir. Temel altında bulunan zemin, taşıma gücü ve oturmalar açısından zayıf ise akla gelen bir diğer çözüm yöntemi, yapının projesini değiştirmektir. Kat adedi değişiklikleri ile zemin üzerinde oluşacak gerilmeler istenilen mertebelere getirilebilir ya da temel sistemi bu duruma göre projelendirilebilir. Örneğin bu tür zeminler üzerine temel sistemi radye jeneral temel olarak projelendirilerek yapı yüklerinin yumuşak zemin tabakaları üzerine üniform yayılması sağlanabilir.
3. Zayıf zemin kaldırılarak yerine taşıma gücü yüksek olan zeminler yerleştirilebilir. Zayıf tabaka kalınlığının az olması halinde bu tabakalar uzaklaştırılabilir ve yerine taşıma gücü yüksek zeminler kontrollü dolgu yapım tekniklerine uygun olarak yerleştirilir ve yeni temel zemini oluşturularak temel sistemi bu tabaka üzerine yapılır. Ancak tabaka kalınlığının fazla olması durumunda, bu yöntem maliyet, zaman ve mühendislik bakımından uygun bir alternatif değildir.
4. Taşıma gücü zayıf olan zeminler uygun bir yöntemle geçilerek temeller sağlam tabakada inşa edilebilir. Zayıf zemin tabaka kalınlığının değiştirme alternatifi için fazla olması durumunda yapı yükleri farklı yöntemler (betonarme ya da donatısız fore ve mini kazık, jet grout vs.) ile sağlam tabakaya aktarılabilir.

5. Temel zemini uygun değil ise arazide yapılacak işlemler ile yerinde iyileştirilmesi yöntemine de gidilebilir. Günümüzde bu alternatif farklı uygulamalar ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Hangi uygulamanın optimum sonuç için uygun olduğuna karar verilirken öncelikle zemin problemi belirlenmesi ve bu sorun için bir çözüm seçilmesi gereklidir. Söz konusu problemler aşağıda belirtilenlerden bir veya birkaçı olabilir.

- Sıvılaşma potansiyelinin olması,
- Taşıma gücünün karşılanamaması,
- İmalat esnasında veya sonrasında oluşabilecek toplam oturmalar,
- Yapı dengesini bozabilecek veya kalıcı hasarlara yol açacak farklı oturmalar,
- Yapının su seviyesi altında yapılma zorunluluğu,
- Temel kazısı sırasında karşılaşılabilecek problemler,
- Şev duraysızlığı,
- Zemin üzerinden kaldırılan yük sonrasında meydana gelecek kabarmalar.

Bu gibi sorunların karşısında öncelikle problemlili zemini tanımak ve bu zemin için en uygun iyileştirme yöntemini seçmek gereklidir.

2.1 İYİLEŞTİRME UYGULAMASI GEREKTİREN ZEMİNLER

Arazide zayıf zemin olarak karşımıza çıkacak olan zemin türleri aşağıda belirtilmiş ve kısaca özelliklerinden bahsedilmiştir.

Turbalık ve bataklık zeminler : İçerisinde bulunan bitkisel maddelerin çürümesi ile büyük ölçüde deformasyon yapabilme özelliğine sahiptirler. Bu tip zeminlerin taşıma güçleri çok düşük kadardır. Bu özellikleri nedeniyle karşılaşılması hiç istenmeyen bir zemin grubudur.

Yumuşak killer : Taşıma gücü turbalık ve bataklık zeminlere göre daha iyi olmasına karşın çok düşük yükler altında bile büyük deformasyonlar yapabilecek bir zemin grubudur.

Gevşek kumlar ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyonlar : Yukarıda bahsedilen iki zemin grubuna göre nispeten daha kullanılabilir bir zemin grubudur. Orta kapasitede taşıma gücü değerlerine sahiptir ve yük altındaki deformasyon değerleri de sınırlı

kalabilir. Bu tip zeminlerden tekrarlı yükler etkisi altında dayanım kaybına bağı olarak taşıma gücünde azalma ve aşırı deformasyon beklenebilir. Özellikle yeraltı su seviyesi altındaki gevşek kumlarda tekrarlı yükler sonucunda sıvılaşma riski meydana gelebilir. Sıvılaşma anında zemin mukavemeti sifira düşer ve buna bağı olarak aşırı deformasyonlar nedeni ile toptan göçmeler meydana gelebilir.

Yukarıda bahsi geçen zeminler, çalışma alanında karşılaşılan sorunlu zemin grupları içerisinde yer almakta olup yapı özelliklerine bağı olarak iyileştirilmeleri gerekebilir. Ancak elverişsiz zemin tanımı sadece bu zemin grupları ile sınırlı değildir. Yapının kullanım amacına bağı olarak sert killer, sıkı kumlar ya da ayrışmış kaya birimler bile elverişsiz olarak tanımlanabilir.

Projenin başarısı ve iyileştirmenin istenen kriterleri sağlaması için tekrarlı kontroller ve değerlendirmeler yapılmalıdır. İyileştirme öncesi ve sonrasında yapılan deneyler karşılaştırılarak bilgi sahibi olunur. Kontrol amaçlı yapılacak deneyler şu şekilde sıralanabilir.

- Araziden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri (tek eksenli, üç eksenli basınç deneyi, konsolidasyon deneyi vb.),
- Standart Penetrasyon Testi (SPT)
- Koni Penetrasyon Testi (CPT)
- Presiyometre Deneyi
- Veyn Deneyi
- Yüzeyde ve Derinde Plaka Yükleme Deneyleri
- Jeofizik Yöntemler (Sismik ölçümler)

2.2 ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Olumsuz zemin koşullarının iyileştirilmesi, mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal ile ekleme ve sınırlama başlıkları altında dört ana grupta değerlendirilebilir. Belirlenen uygun yöntemin uygulanması ile kayma ve taşıma gücü dayanımını artırmak, ilave gerilmeler altında oluşacak toplam ve farklı oturmaya azaltmak, zeminden su sızıntısını azaltmak mümkün hale gelmektedir. Söz konusu iyileştirme yöntemleri Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir.

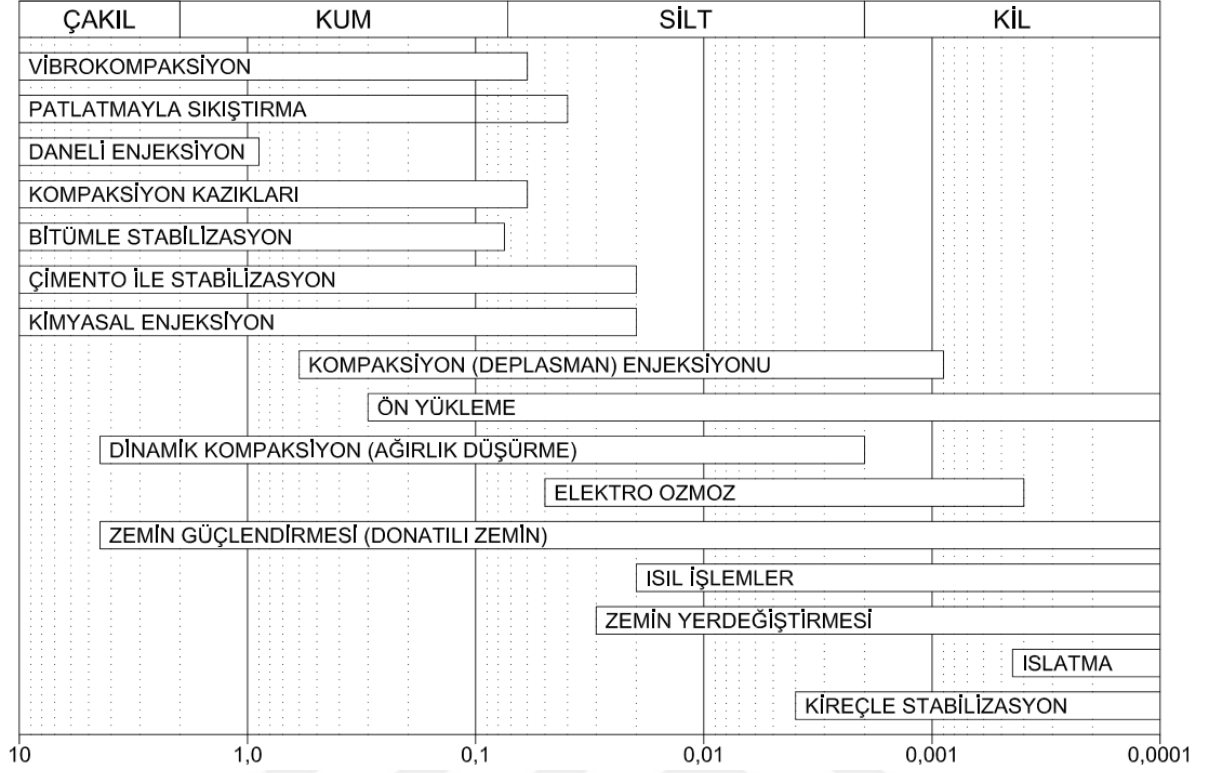


Şekil 2.1: Zemin ıslah yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002).

Zemin iyileştirme yöntemi seçiminde istenilen iyileştirmenin nedeni ve hangi dereceye kadar yapılmak istenmesinin yanı sıra;

- Maliyet,
- Zaman,
- Jeolojik yapı,
- Malzeme ve uygulama araçlarının elde edilebilirliği,
- Yer altı ve yer üstü yapılarına olası etkileri,
- Yer altı suyu kaynaklarında olası kirlilik,
- İyileştirmede kullanılan malzeme dayanıklılığı,
- İyileştirme yönteminin güvenilirliği,
- Sızıntı koşulları,
- İyileştirmenin denetimi gibi etkenler önemli rol oynamaktadır.

Söz konusu iyileştirme yöntemleri her zemin için uygun olmayıp farklı zemin grupları için alternatif iyileştirme yöntemleri mevcuttur. Farklı araştırmacılar tarafından, zemin cinsine göre zemin iyileştirme yöntemlerinin seçimi Şekil 2.2 ve Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Dane boyutuna göre zemin iyileştirme metotları (Sağlamer, 1985).

Tablo 2.1: Zemin cinsine göre stabilizasyon metodu (Tunç, 2001-2002).

Zemin Bileşimi	Tavsiye Edilen Stabilizasyon	Amaç
Organik madde	Mekanik stabilizasyon	Diğer metodlar etkisizdir.
Kum	Mekanik stabilizasyon Çimento Asfalt	İnce ve plastik olmayan malzeme karıştırılarak stabiliteyi arttırmak Mukavemeti arttırmak Kohezyon sağlamak
Silt	Mekanik ve kimyasal stabilizasyon	Zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; • Alofenler • Kaolin	Kireç veya kireç-uçucu kül karışımı Kum ile mekanik stabilizasyon Çimento Kireç	Mukavemeti arttırmak Stabiliteyi arttırmak Kısa süreli mukavemeti arttırmak İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak
• İllit	Çimento Kireç	Kısa süreli mukavemeti arttırmak İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak
• Montmorillenit	Kireç	İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak

Dane boyutuna göre iyileştirme dışında stabilizasyonun hangi amaçla yapılmak istendiği de iyileştirme yönteminin seçimi için önemli bir kriterdir.

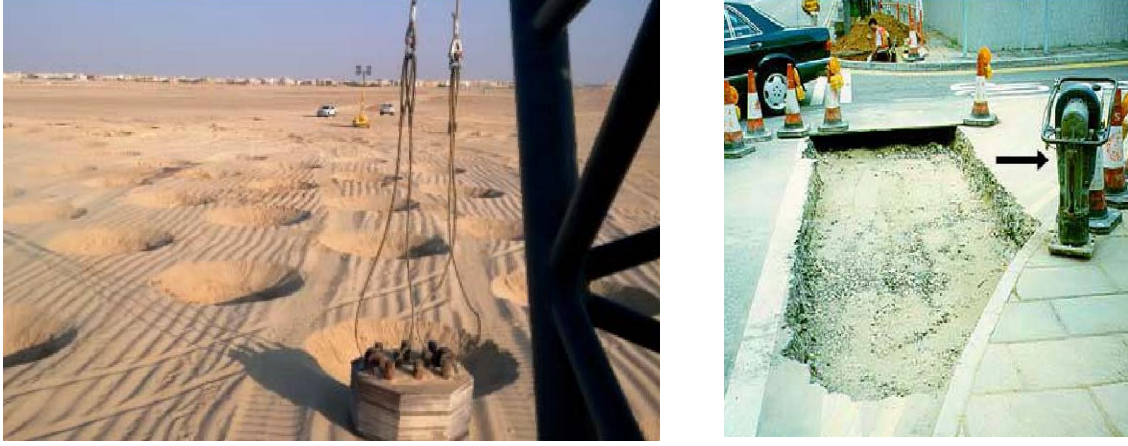
Tablo 2.2: Stabilizasyon metotları (Tunç, 2001-2002).

Amaç	Stabilizasyon Tekniği
Taşıma gücü	Vibrokompaksiyon Taş kolon Dinamik kompaksiyon Patlatma Kireç/çimento kolonları Enjeksiyon Kum/çakıl kompaksiyon kazığı Drenaj Kireç/çimento/bitüm stabilizasyonu
Ani Oturma	Vibrokompaksiyon Dinamik kompaksiyon Patlatma Enjeksiyon Kireç/çimento kolonları Kum/çakıl kolonları Taş kolon
Konsolidasyon	Önyükleme Kum dren Enjeksiyon Taş kolon Kireç/çimento kolonları
Konsolidasyon oturmasının hızlandırılması	Kum dren Önyükleme Kum/çakıl kompaksiyon kazığı
Şev stabilitesi	Payanda dolgusu Drenaj Enjeksiyon Zemin çivisi Taş kolon Kum/çakıl kolon

2.2.1 Mekanik Stabilizasyon

Zemin daneleri arasındaki hava boşluklarının farklı sıkıştırma teknikleri ile azaltılmasıdır. Boşlukların azalması ile zeminin, yoğunluğu, taşıma kapasitesi, sıkışabilirliği, şişme ve büzülme potansiyeli, geçirgenliği vb. mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır.

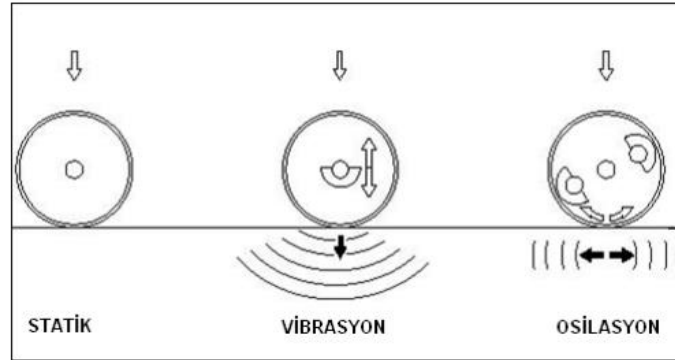
Dinamik Sıkıştırma: Belirli bir ağırlığın tekrarlayan hareketler ile zemin üzerinde kuvvet oluşturması yöntemidir. Örnek olarak, bir vinç tarafından büyük bir ağırlığın zemin üzerine defalarca düşürülüp kaldırılması olabileceği gibi bir el makinası (kompaktör, zıpzıp vb.) tarafından zemin üzerinde tekrarlayan kuvvet oluşturmakta gösterilebilir. zemini titreştirmek ve yüzeye yakın zeminlerin yoğunluğunu arttırmak amacıyla, büyük bir ağırlığı zemin yüzeyine defalarca kaldırıp düşüren bir vinçten oluşur.



Şekil 2.3: Dinamik kompaksiyon için kullanılan ekipmanlar.

Statik Sıkıştırma: İslah edilmek istenen bölgede konumlanan ya da gezdirilen sıkıştırma ekipmanlarının kendi ağırlıkları ile sıkıştırma işlemini yapmasıdır. İlave bir titreşim kuvveti uygulanmadığından çok etkili bir iyileştirme yöntemi olmamasına karşın çevre yapılar nedeni ile (yakında bulunan eski yapılar, köprü üzerindeki alanlar vb.) zorunlu bölgelerde kullanılmaktadır.

Darbeli Silindir: Darbe kuvveti silindirin kendi ağırlığı haricinde vibrasyon veya osilasyon hareketleri ile sağlanmaktadır. Statik sıkıştırma kuvvetine nazaran 3 kata kadar hareketli ağırlık uygulanması nedeni ile daha çok tercih edilen yöntemdir.



Şekil 2.4: Silindirlere yüklenme durumları.

Derinde Titreşim: İyileştirilebilir zemin tabakalarının derinlerde olması halinde bu tabakalara ulaşan sondalar yapılarak titreşim kuvveti ile ıslah edilmesi sağlanır. Gevşek kum çökellerin derinde olması durumunda, sıvılaşma tehlikesini azaltmada en güvenilir ve en kapsamlı yöntemlerden biri olduğu düşünülmektedir.

Sıkıştırma kazıkları: Önceden dökülmüş beton kazıklar veya bir ucu kapalı boş çelik kazıklar gibi büyük yer değiştirme kazıklarının zemine çakılması ile zeminin yoğunluğu artırılmasıdır. Hem çakma işlemi esnasında oluşan titreşim hem de çakım esnasında kazığın yerini aldığı zemin birimlerin hareketleri ile gevşek birimler sıkıştırılır. Kazıklar genellikle yerinde bırakıldığı için diğer sıkıştırma yöntemlerine nazaran daha maliyetlidir.

Titreşimli Tabla: Farklı dane boyutuna sahip birimlerin, bir tabla üzerinde karıştırılması yöntemidir. Burada zorlama ile yapılan bir sıkıştırma işlemi görülmemesine rağmen uygun granülometride seçilen zeminlerin karıştırılması ile boşluk oranının minimum düzeye çekilmesi amaçlanmaktadır.

Patlatma: Derinde bulunan gevşek birimler içerisine yerleştirilen patlayıcıların ardışık patlatılması basınç dalgaları oluşturması gevşek zeminlerin sıkıştırılması hedeflenmektedir. Bu yöntemin çevresi boş araziler dışında, birbirine bitişik yapılarda, kullanılması son derece risklidir.

2.2.2 Hidrolik Stabilizasyon

Zemin içerisindeki suyun farklı yöntemler ile tutulması veya uzaklaştırılmasıdır. Zemin boşlukları arasında bulunan suyun uzaklaştırılması ile daha yüksek yoğunluğa ve dolayısıyla taşıma kapasitesi, sıkışabilirliği, şişme ve büzülme potansiyeli, geçirgenliği vb. mühendislik özellikleri daha uygun bir birim elde edilmeye çalışılır. Aynı zamanda suyun tutulması, çalışma sahası içerisine girmemesi de hedeflenebilir.

Ön Yükleme: Geçirimsizliği az olan, normal konsolide kil gibi, zeminlerde imalat öncesinde yapı ağırlığından fazla bir yük ile yüklenmesi ile yapı altında oluşabilecek konsolidasyon oturmalarının büyük bir kısmının gerçekleştirilmesi hedeflenir. Statik yükleme işlemine benzer olsa da statik yükleme işleminde, zemin içerisindeki hava boşluklarının azaltılması hedeflenirken bu yöntemde zemin içerisinde bulunan ve çok uzun sürelerde tahliye edilecek suyun daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve zemin içerisindeki boşlukların azaltılması amaçlanmaktadır.

Geosentetikler: Ön yükleme aşamasında veya yapı altında, drenaj yolunun kısaltılması için geosentetiklerden (düşey drenler) yararlanılabilir. Kullanılacak malzemeler ile zemin birimler içerisinde bulunan suyun daha hızlı uzaklaştırılabilmesi amaçlanmaktadır. Konsolidasyon

oturmalarının iyileştirilmesi haricinde, geçirimsizliği düşük olan ve sıvılaşma riski bulunan zemin birimlerinde de kullanılabilir.



Şekil 2.5: Düşey drenler ile ıslah edilmiş saha.

Diyafram Duvar: Çalışma sahasına gelebilecek suyun kontrol edilebilmesi için kullanılır. Kazı makineleri ile açılan, dar ve derin hendeklerin, kil veya betonla doldurulması ile su geçirmez bir cephe elde edilir.

Palplanş Duvar: Ahşap, betonarme veya çelikten üretilen, bir dizi halinde zemin içerisine çakılan elemanlar ile oluşturulan su geçirmez düşey sürekli duvarlardır. Diyafram duvarda olduğu gibi suyun tutulması hedeflenmektedir.



Şekil 2.6: Diyafram duvar ve palplanş duvar ile suyun tutulması.

Geomembran: Zemin yüzeyine ya da içerisine konularak su geçirmez bir sınır elde edilmesi amaçlanmaktadır. Havuz, yapay lagün gibi yapıların imalatlarında kullanıldığı gibi zemin içerisinde kalan yapısal elemanların ya da ıslak hacimlerin korunması için yalıtım elemanı olarak kullanılabilir.

Basıncılı Hava: Zemin içerisine yerleştirilen ekipmanlar ile verilecek basınçlı hava sayesinde suyun uzaklaştırılması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda uygulanan basınç ile zemin daneleri sıkıştırılarak iyileştirme gerçekleştirilir.

Pompalama: Farklı katkı maddelerinin zemin içerisine basınç uygulamak sureti ile yerleştirilmesi işlemidir. Suyu uzaklaştırması ve sınırlandırması etkisi ile hidrolik bir yöntem olduğu gibi zemin içerisine ilave edilen malzemeler nedeni ile fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemler dışında kum drenler, taş kolon, vakumlu su emme metodu, drenaj kuyuları, elektro-osmoz ve ısıtma yöntemi de hidrolik iyileştirme yöntemleri arasında yer almaktadır.

2.2.3 Fiziksel Ve Kimyasal Stabilizasyon

Daneler arasındaki boşlukların serbest veya basınçlı katkı maddeleri ile doldurulması veya suyun fiziksel halinin değiştirilmesidir.

Enjeksiyon: Zemin içine süspansiyon veya çözelti halinde bazı maddelerin enjekte edilmesidir. Enjeksiyon sırasında zemin içerisine püskürtülen süspansiyonlar, bentonit, çimento, kireç, asfalt gibi su içinde dağılmış katı maddelerden oluşabildiği gibi bazı durumlarda da kimyasal çözeltiler zemine enjekte edilmektedir. Püskürtülen malzeme zemin içerisindeki boşluklara yayılmakta ve daha sonra sertleşerek zemin özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrışmış kaya birimlerindeki eklemleri, çatlakları veya yer altı boşluklarını doldurmada kullanılabildiği gibi zemin içerisinde bulunan gevşek birimlerin sıkıştırılması için basınçlı enjeksiyon kullanımı da gerçekleştirilebilir.

Isıtma – Soğutma: Termal etki sayesinde, zemin suyunu buharlaştırarak (ısıtma) ya da dondurarak (soğutma) zeminin istenilen kıvama getirilmesi amaçlanmaktadır.

Isıtma sayesinde zemin suyunun buharlaştırılması ve zeminin katılaştırılması hedeflenir. Yeterli ısıya ulaşıldığında katılaşma kalıcı olabilmektedir. 900⁰ C'de kil zeminler katılaşarak tuğla

olabilir. Örneğin Rusya’da, sondaj delikleri açıldıktan sonra sondaj kuyusunda basınç altında benzin veya gaz sıvı yakıtın yakılması ile yüksek sıcakla zeminin iyileştirilmesi gerçekleştirilmektedir.

Suya doygun akma ve göçme eğilimi gösteren zeminlerde açık kazı, tünel, yeraltı kazısı yapımını kolaylaştırmak amacıyla boşluk suyunu dondurulabilir. Böylece zemin boşluklarında bulunan buzun katılığı, zeminin katılığı ve kayma mukavemeti arttırılmış olur.

Jet Grout: İyileştirme yapılacak derinliğe kadar bir delgi yapılması sonrasında zemin içerisindeki ekipmanların ucunda bulunan ince püskürtme deliklerinden (nozzle) yüksek basınçta çimento-su karışımının verilmesidir. Böylece hem zemin kendi içerisinde sıkıştırılarak mukavemeti arttırılırken hem de zemin birimleri ile karışan enjeksiyon şerbeti yapısal bir eleman olarak homojen ve belirli bir çapta kolon oluşturmuş olur.

Çimento vb. Katkı Malzemeleri: Çimento, kireç, uçucu kül, bitüm, reçine gibi malzemeler ile zemin karıştırılarak mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu malzemelerin zemine eklenmesi ile zemin içerisinde ilave bağ kuvvetleri oluşturulmakta, boşlukların azaltılması sağlanmaktadır. Yüzeysel ıslahlar için kullanılabilirdiği gibi derin karıştırma yöntemleri ile daha alt birimlerde de iyileştirmeler yapılabilir. Özellikle ulaşım yapılarında kullanılan bu sistem yapı temellerinde ve su yapılarında da kullanılmaktadır.

2.2.4 Ekleme ve Sınırlama

Zemin içerisine ilave edilen malzemeler ya da zemin hareketlerinin sınırlandırılması ile zemin mühendislik özelliklerinin istenilen mertebelere getirilmesi için yapılan uygulamalardır. Bir doğrultu boyunca veya açılı bir şekilde zemin içerisine ilave edilecek şerit, donatı, hasır veya zemin çivileri sayesinde deformasyon yapmak isteyen zeminlerin ilave çekme gerilmesi alması ya da ankrajlar ile zemine ön germe verilerek deplasmanların sınırlandırılması sağlanabilir.

Aynı zamanda, zemin üzerine/önüne yapılacak kafes duvar, gabion eleman veya bohçalama duvarlar ile bir set oluşturularak deplasmanlar engellenebilir.

Bunun yanı sıra düşey yönde zemin ile ortaklaşa yük taşıması amacı ile taş kolon, geokolon gibi imalatlar ile zemin ıslahı gerçekleştirilebilir. Bu tip kolonlar, hem taşıma gücüne hem de oturmanın azalmasına katkıda bulunurlar. Ayrıca, düşey dren gibi çalışıp drenaj yolunu kısaltır

ve konsolidasyon hızlarını artırırlar. Kohezyonu az, fakat ince taneli (killi-siltli kum) zeminlerde sıvılaşmaya karşı da önerilmektedir. Alüvyon ve değişken zeminlerde vibrokompaksiyon ile birlikte uygulanmaktadır. Taş kolon ile zemin iyileştirme yöntemi hakkında daha detaylı bilgiye Bölüm 2.3'te yer verilecektir.

Bahsedilen yöntemlerden bazıları farklı iyileştirme teknikleri içerisinde de yer almaktadır. Örneğin taş kolon imalatı ekleme ve sınırlama yöntemleri içerisinde bulunurken, drenaj yolunu kısaltması bakımından hidrolik iyileştirme ve zeminin sıkıştırılması sağlandığı için de mekanik stabilizasyon içerisinde yer alabilmektedir. Bunun yanı sıra kireçle stabilizasyon fiziksel ve kimyasal etkilerinin yanı sıra zemin içerisinde bulunan suyu kendi bünyesine hapsedmesi bakımından hidrolik yöntem olarakta kabul edilebilir.

2.3 TAŞ KOLON İMALATI

Elverişsiz zeminlerde inşaat yapma zorunluluğu ile birlikte geleneksel temel inşaatı yöntemleri ekonomikliğini yitirmektedir. Geleneksel temel inşaatı yöntemlerinin, maliyet, zaman ve çevre faktörlerinin oluşturduğu sayısız sıkıntılar nedeniyle geçmişte de bazı yöntemleri uygulanmış, yerinde zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır ve kötü zeminlerde ekonomik çözümler elde edilmiştir. Bu yöntemlerin bazıları günümüzde uygulanmaya devam etmektedir.

Yerinde iyileştirme yöntemleri arasında yer alan taş kolonlar ile iyileştirme yöntemi 1830'lardan günümüze kadar başarı ile uygulanmış bir yöntemdir. İlk olarak Fransa'nın Boyenne şehrinde yumuşak nehir yatakları üzerine kurulu cepaneliklerin ağır temellerinin desteklenmesi için askeri mühendisler tarafından 18. yy'de kullanılan bu yöntem, Avrupa genelinde 1950 sonlarından itibaren geniş bir kullanım alanına sahip olabilmışken, Amerika'da 1972'den sonra sınırlı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde yurtdışında çok sık uygulanmasına rağmen ülkemizde henüz sık kullanılan bir metot olamamıştır. Taş kolon imalatı sadece yumuşak killi zeminlerde uygulanmamakta, günümüze kadar yapılan çalışmalarda yumuşak killerin yanı sıra siltler ve killi-siltli kumlarda da kullanımının iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Başlıca kullanım amaçları;

- Konsolidasyon süresini azaltmak,
- Toplam ve farklı oturmaları azaltmak,
- Taşıma kapasitesini arttırmak,

- Sıvılaşma riskini azaltmak
- Dolgu ve şevlerde stabiliteyi sağlamak olarak özetlenebilir.

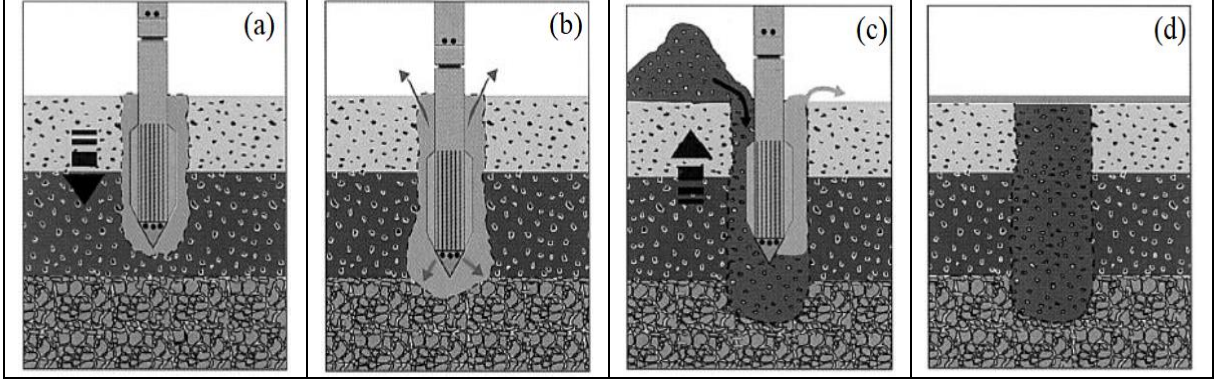
Geçirgenliği az olan ince daneli zeminlerde başlıca kullanım amacı, drenaj yolunun kısaltılması ile konsolidasyon süresini azaltarak arazide meydana gelecek konsolidasyon oturmasını hızlandırmaktır. Geçirgenliği daha fazla olan taş kolon içerisindeki su hareketi, ince daneli zemin içerisindeki hareketine nazaran daha kolay olduğundan, zemin suyu taş kolonlar ile kolayca drene edilebilir. Bu hidrolik etkisi sayesinde kohezyonu az ve ince daneli (belirli oranlarda kil-silt ihtiva eden ince kum) zeminlerde sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla da kullanılmaktadır. Taş kolon imalatı ile zemine kazandırılan özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kohezyonsuz zeminlerde, taş kolon imalatı sırasında oluşan titreşim ve yer değiştirme sayesinde zeminin sıkılık derecesinde artış sağlanır. Bu durum kohezyonlu zeminler için geçerli değildir. Titreşimler kil zeminin kısmen yanal ötelenmesine neden olmakta, ancak zeminin kayma dayanımında bir artış veya sıkışabilirliğinde bir azalma yaratmamaktadır.
- Yumuşak zemin ve içerisinde oluşturulan yüksek dayanım ve yoğunluğa sahip taş kolonlardan oluşan sistem kompozit bir malzeme gibi davranarak daha yüksek taşıma gücü kapasitesine sahip olur.
- Drenaj yolunun kısaltılması yüksek geçirgenlik kapasitesine sahip taş kolonlar sayesinde meydana gelebilecek aşırı boşluk suyu basıncı engellenir.
- Sıkıştırma yöntemleri ile imal edilen taş kolon uygulamasında kolon etrafındaki zeminde yanal gerilme artışı meydana gelir.

Uygulanacak projenin özelliklerine göre taş kolonlar yukarıda sıralanan iyileştirme özelliklerinin birini veya birkaçını birlikte yerine getirebilmektedir.

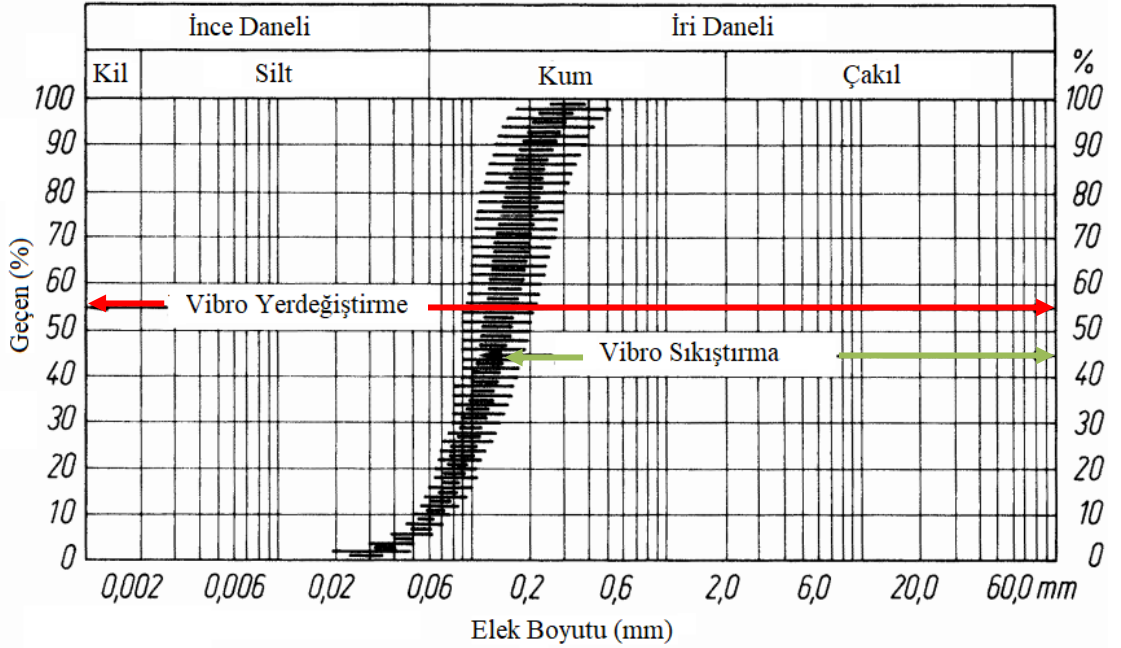
Taş kolon imalatı 4 ana bölümden oluşmaktadır. İlk aşama olan penetrasyon aşamasında, su ve/veya hava jetleri ile vibratörün (prob) kendi ağırlığı ve titreşim enerjisi ile istenilen derinliğe ulaşılır. İkinci aşamada basınçlı su veya hava ile kuyu temizliği sağlanır. Kurulum aşamasında, ekipman geri çekilerek veya besleme ile açılan kuyu belirle kademelerde (0.30 ile 1.00 m arasında) taş kolon malzemesi ile doldurulur. Doldurulan malzeme vibratörler vasıtasıyla ya da uygulanacak basınç ile sıkıştırılır. Sıkışan malzeme arasındaki boşluklar azalırken düşey yönde

boyda kısalma ve yatay yönde genişleme sağlanabilir. Bu işlem taş kolon oluşturulana kadar tekrarlanarak imalat tamamlanır.



Şekil 2.7: Taş kolon imalat aşamaları, a-penetrasyon, b-temizleme, c-kurulum, d-bitiş.

Genel uygulamalarda, taş kolonlar 6.0 ile 20.0 metre uzunluklarında yapılabilmektedir. Özel uygulamalar ile 43.0 derinliğinde taş kolon imalatı yapılabilmektedir (Wehr ve diğ., 2005). Tipik kolon çapları 0.5 m ile 1.0 m arasında ve kolonların merkezden merkeze mesafeleri 1.5 ile 2.5 m arasında değişebilmektedir. Taş kolon malzemesi olarak, içerisindeki ince dane oranı %5-10 olan ve 10 – 75 mm arası kırma taş malzeme yaygın olarak kullanılmasına karşın, sahada bulunabilecek malzemeye göre doğal agrega karışımları da kullanılmaktadır.



Şekil 2.8: Vibro sistemler için uygun zemin gradasyonları (Schmidt ve Seitz, 1998).

Şekil 2.8, vibro kompaksiyon ile vibro yerdeğiştirmenin uygulanabileceği zemin dane boyutunu göstermektedir. İri daneli zeminler içerisinde yapılacak vibro sıkıştırma yönteminde, probun zemin içerisindeki titreşimi ile zemin daneleri arasındaki boşluklar azaltılırken, genellikle ince daneli zeminler içerisinde kullanılan vibro yerdeğiştirme yönteminde ise titreşim ile zemin içerisinde, taş kolon oluşturmak için gerekli hacmin oluşturulması hedeflenmektedir. Çünkü ince daneli zeminlerde titreşim ile zemin içerisinde yanal ötelenme olmasına karşın kohezyonun olumsuz etkilenmesi nedeni ile zeminin kayma dayanımında bir artış ya da sıkışabilirliğinde bir azalmanın oluşmadığı kabul edilmektedir.

İnce daneli zeminlerde vibro yerdeğiştirmenin uygulama sınırı, zeminin drenajsız kayma mukavemetine bağlıdır. Taş kolon malzemesinin bağlayıcı özelliği olmaması nedeniyle yerdeğiştirme aşamasında mevcut zeminin kendini tutmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle de çok yumuşak zeminlerde uygulanamaz. Yapılan alışmalar incelendiğinde drenajsız kayma mukavemeti için çeşitli alt sınır değerleri belirlenmiştir. Örneğin Greenwood'a (1970) göre $s_u=7.5$ kPa değer yeterli iken Greenwood ve Kirsch'de (1983) $s_u=15$ kPa olması istenilmektedir. Almanya'da drenajsız kayma mukavemeti (s_u) için 15 kPa ile 25 kPa aralığı belirlenmiştir (Road Research Society, 1979). Zamanla bu değerlerin yüksek olduğu ve $s_u=5$ kPa olmasının yeterli olduğu belirlenmiştir (Priebe, 2003). Asya'da yapılan baraj inşaati problemlerinde elde edilen tecrübe ile $s_u=5$ kPa'lık değer yeterli olduğu kanıtlanmıştır (Raju, 1997).

Drenajsız kayma mukavemeti için st sınır değerleri, Barksdale ve Bachus'a (1983) göre 50 kPa ile 100 kPa arasında belirlenmiştir. Bu değerlerin üzerindeki zeminlerin, iyileştirmeye gerek duymayan yeterli taşıma gücüne sahip olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda drenajsız kayma mukavemeti değerleri yüksek olan zeminlerde penetrasyon işlemi oldukça zorlaşmaktadır.

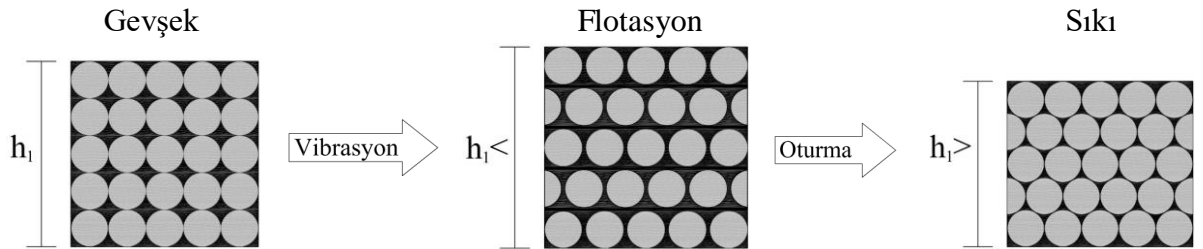
Taş kolonlar ile zemin iyileştirmesi, projeye ve uygulama alanındaki zemine bağlı olarak farklı tekniklerle yapılabilir. Bu teknikler arasında, vibro sıkıştırma, üstten beslemeli ıslak, üstten beslemeli kuru ve dipten beslemeli kuru vibro yerdeğiştirme gibi uzun zamandır uygulanan genel yöntemler olduğu gibi Kirsch ve Kirsch tarafından geliştirilen, vibratörün içerisine yerleştirilen besleme borusu ile dipten besleme yöntemi (vibro-cat) veya Sentez-Geopier Foundations Grubu tarafından geliştirilen forajlı ve forajsız imalatı yapılabilen darbeli kırmataş kolon (DKK) sistemleri de yer almaktadır.

2.3.1 Vibro Sıkıştırma (Kompaksiyon) Yöntemi

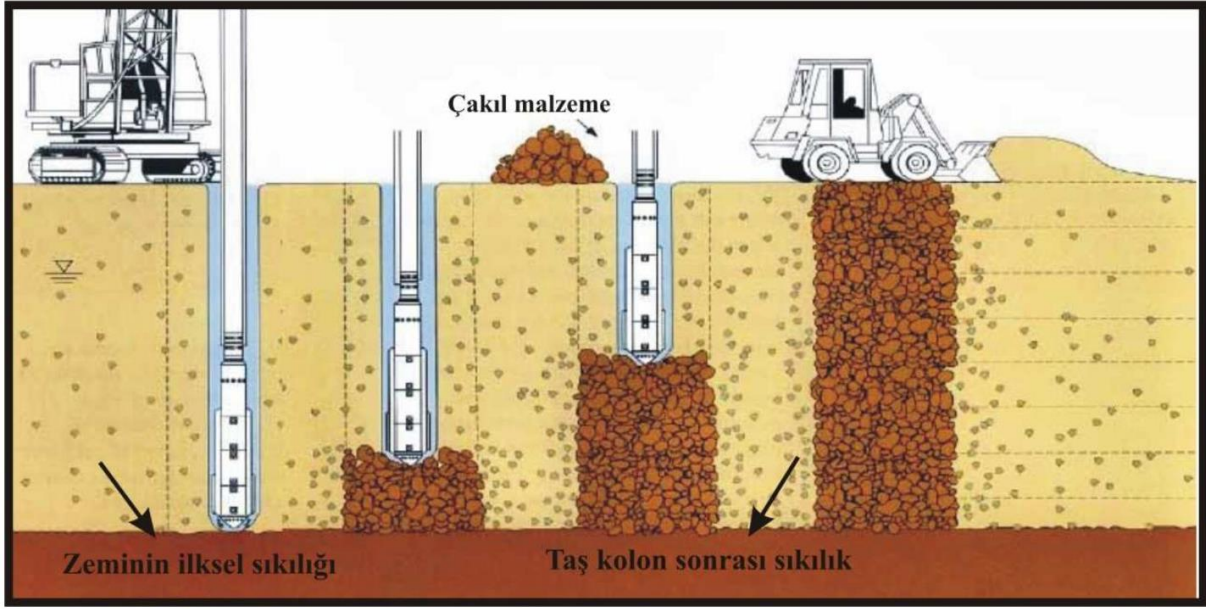
Genellikle ince dane oranı %15'ten az (siltli-killi kumlar, temiz kumlar ve çakıllar), Standart Penetrasyon Deneyi direnci (SPT) 20 darbe/30 cm'den düşük (çok gevşek, gevşek ve orta sıkı) ve bağıl yoğunluğu %50'den az olan zeminlerde uygulanmaktadır. Degen (1977), Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS)'ne göre tanımlanmış zemin türlerine uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Yapılan çalışmaya göre:

- İyi derecelenmiş çakıllar (GW) ve iyi derecelenmiş kumlar (SW), yöntemin uygulanabileceği ideal zeminlerdir.
- Kötü derecelenmiş üniform çakıllarda (GP) ve kötü derecelenmiş üniform kumlarda (SP) $D_{60}/D_{10} \leq 2$ olduğu durumlarda çok iyi iyileşme sağlanır.
- Siltli ve killi çakıllarda (GM ve GC), kil oranının $> \%2$, silt oranının $> \%10$ olduğu koşullarda sıkıştırma sağlanamaz.
- Siltli kumlarda (SM), silt oranının $> \%8$ olduğu ve killi kumlarda (SC), kil oranının $> \%2$ olduğu durumda uygulanamaz.

Uygulamaya, su veya hava jetleri ile beslenen vibratörün istenilen derinliğe indirilmesi ile başlanır. Eksantrik ağırlığın dönmesi sonucunda oluşan titreşim ve vibratörün çelik kılıfı ile etkileşim halinde bulunan zeminde, tüm derinlik boyunca büyüklüğü değişmeyen, merkezkaç kuvveti ile gevşek zeminin düşey gerilmeler sayesinde sıkışması sağlanır. Sıkışma ile zeminde meydana gelen hacim azalması ilave edilen sıkıştırılmış kırmataş dolgu ile dengelenir. Düşey gerilmelerin ve yanal zemin desteğinin az olduğu üst kotlarda (0.5 m derinlik) ise yeterli sıkışma sağlanamamaktadır. Söz konusu derinliklerde, üst yapı inşaatları öncesinde bir kazı yapılarak sıkıştırılmış granüler bir dolgu ile iyileştirmenin tamamlanması önerilmektedir.



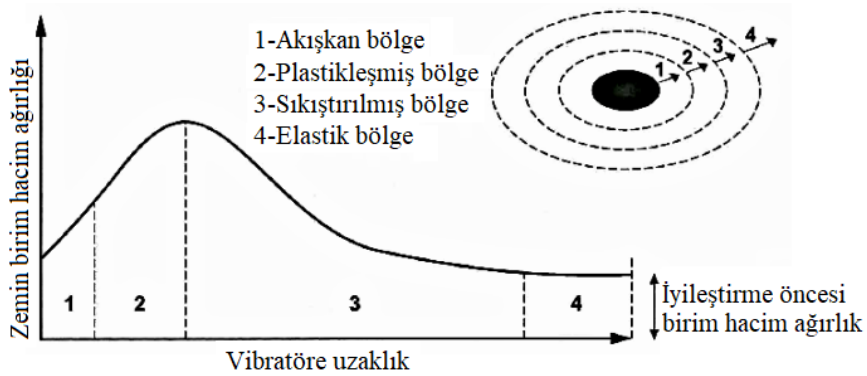
Şekil 2.9: Vibro kompaksiyon yönteminde zemin iyileştirme mekanizması



Şekil 2.10: Vibro kompaksiyon yöntemi ile taş kolon imalatı

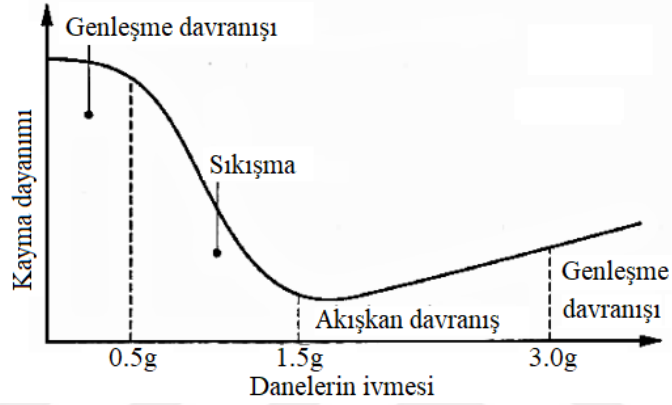
Su seviyesi üzerinde veya altında başarı ile uygulanan yöntem ile zeminde %70-80 mertebesinde rölatif sıklık (D_r) elde edilebilir. İyileştirme oranı, zemin özelliklerinin yanı sıra uygulama derinliği, vibrasyon frekansı, ivmesi ve merkezkaç kuvveti ile sıkıştırma için geçen süreye de bağlıdır.

Yapılan uygulama sonucunda, yüksek yoğunluklu bir çekirdek bölge ve merkezden uzaklaştıkça yoğunluğu azalan iyileştirilmiş bir alan oluşturulmaktadır. Vibratörün sıkıştırma etkisi uygulama noktasından uzaklaştıkça azalmakta ve bu uzaklığa bağlı olarak değişik davranış biçimlerinin ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 2.11).



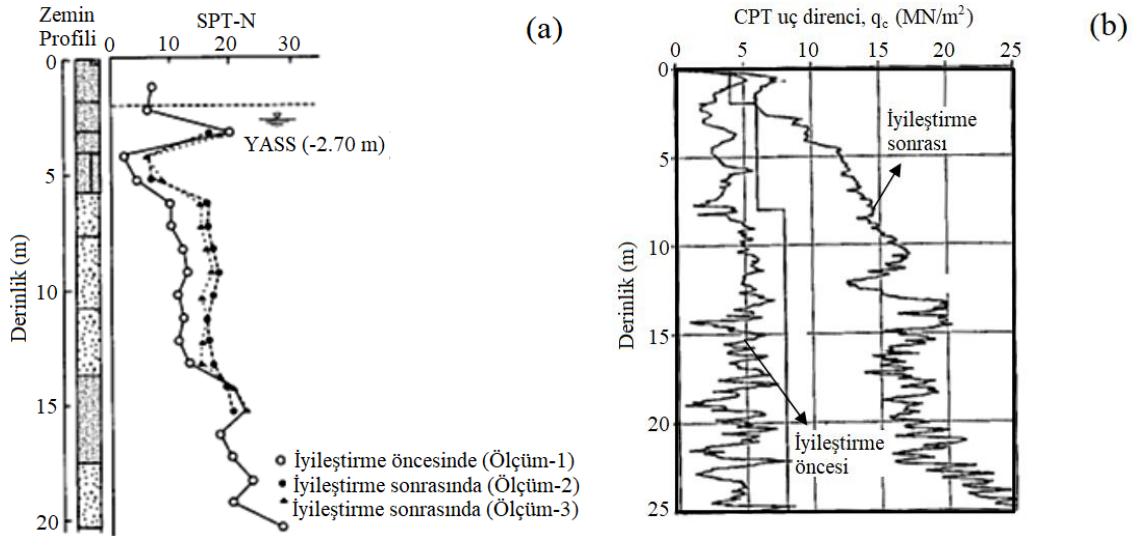
Şekil 2.11: Granüler zeminlerde vibratöre uzaklığına bağlı davranış (Rodger, 1979).

Sıkıştırma etkisi ancak zemin daneleri arasındaki rezidüel sürtünme direncinin aşılması ile oluşabilmektedir. Bu konudaki araştırmalara göre 0.5g mertebesindeki bir ivme ile ortaya çıkan dinamik gerilmeler nedeniyle zeminde genişleme görülmektedir. Ancak artan ivme ile sıkıştırma oranı sürekli artmamakta hatta 1.5 – 2.0g mertebesindeki ivme sonucunda zemin akışkan bir hal almakta ve 3.0g mertebesindeki bir ivmeden sonra zemin yapısında yeniden bir genişleme hareketi oluşmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Granüler zeminlerde ivmeye bağlı davranış (Rodger, 1979).

Vibro sıkıştırma uygulaması öncesi ve sonrasında elde edilen tipik bir SPT-derinlik ilişkisi (JGS, 1998) ve CPT koni uç direncindeki artışlar Şekil 2.13'te gösterilmektedir (Kirsch ve Kirsch, 2010).



Şekil 2.13: İyileştirme öncesi ve sonrası elde edilen a-SPT, b-CPT dirençleri.

2.3.2 Vibro Yerdeğiştirme (Taş Kolon) Yöntemi

İnce dane oranı yüksek (kohezyonlu) veya birbirinden farklı tabakalara sahip karışık zeminler, vibro kompaksiyon yöntemi ile istenilen mertebelerde sıkıştırılmaz. Literatürde vibratörün yanal darbeleri ile kuyu çeperlerinde yanal gerilme artışı olduğu ve gerilme altında zamanla ince daneli zeminlerin konsolide olarak özelliklerinin bir miktar iyileştiği yönünde bulgular yer almasına rağmen iyileşmenin ihmal edilir mertebelerde olduğu ve tasarımda dikkate alınmaması gerektiği belirlenmiştir. Bu nedenle 1960'ların başında Almanya'da vibro yerdeğiştirme yöntemi geliştirilmiştir.

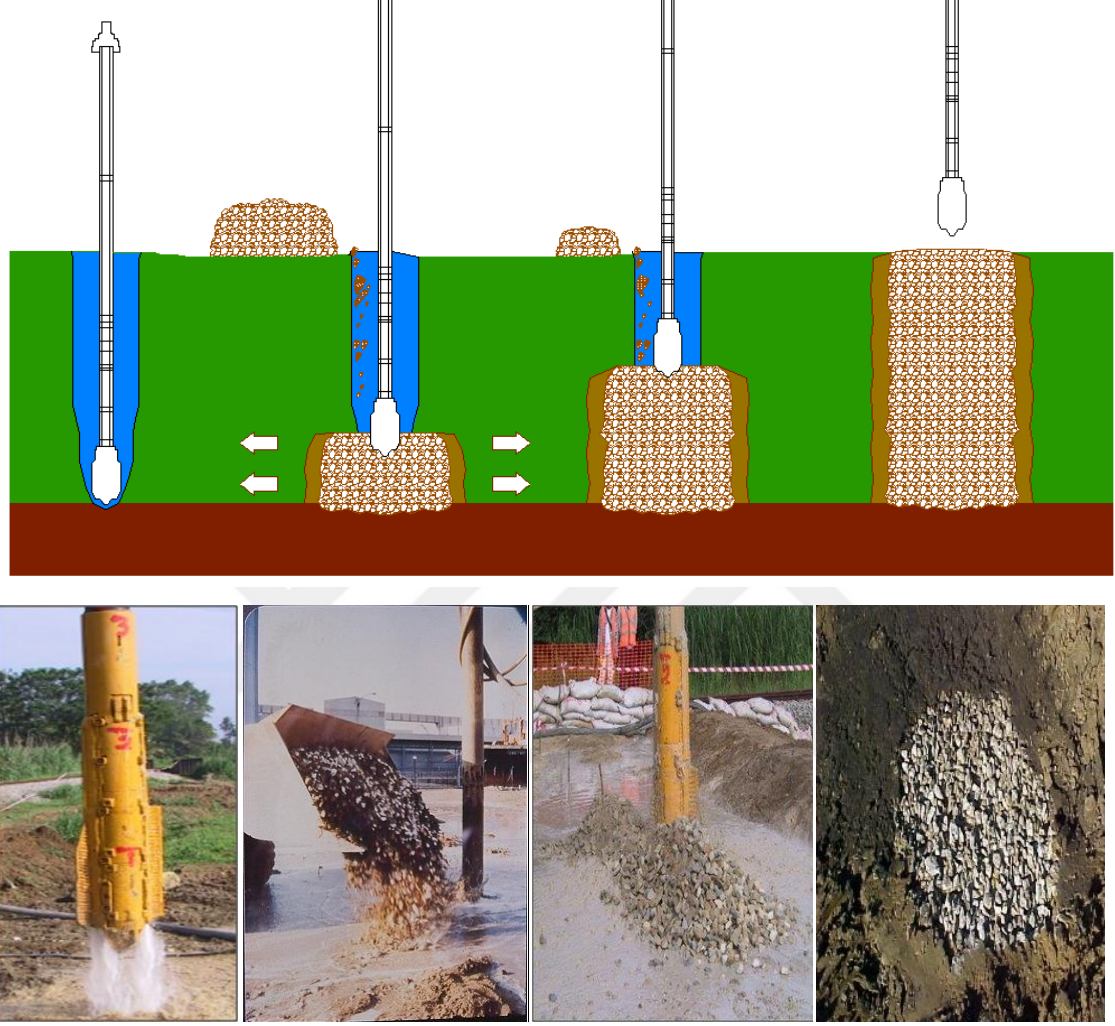
İmalat sırasında, vibro kompaksiyon yöntemindekine benzer bir prob kullanılır. Prob zeminde hava veya su jetleri ile ilerlerken zeminin ötelenmesi sağlanır. Proje derinliğine ulaşıldıktan sonra oluşturulan boş hacim, prob dışarı çekilerek veya içten beslenerek taş kolon malzemesi ile doldurulur. Doldurulan malzemenin sıkışması ve radyal olarak yayılması sağlanır. Bu adımlar gerekli taş kolon oluşturulana kadar tekrarlanır. Zeminin drenajsız kayma dayanımına bağlı farklı uygulama yöntemleri vardır.

2.3.2.1 Üstten Beslemeli Islak Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

Su altında ve drenajsız kayma dayanımının $s_u = 10 - 30 \text{ kN/m}^2$ aralığında olan killer için uygun bir yöntemdir. Düşük basınçlı ancak yüksek hacimli su jeti, vibratörün zemin içerisinde ilerlemesine yardımcı olmakta, sürekli su sirkülasyonu ile açılan kuyunun göçmeye karşı stabilitesini sağlamakta, kuyu çeperlerinden dökülen zemin su sirkülasyonu ile yüzeye taşınmakta ve kuyu içerisine yerleştirilen çakılın düzgün dağılımına katkıda bulunmaktadır. Özellikle, kuyu stabilitesinin kritik olduğu, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak zeminlerde bu yöntem tercih edilmektedir. Proje derinliğine ulaşıldığında su jeti ile kuyu temizlenir. Temizlik aşaması sonrasında vibratör kuyu içerisinden çıkartılarak, oluşturulan boş hacim belirlenen yüksekliğe kadar (0.3 ile 1.0 m.) taş kolon malzemesi ile doldurulur. Bu malzeme içerisine tekrar vibratör indirilerek titreşim ile sıkıştırma işlemi yapılır. Sıkıştırılan malzeme zemin içerisinde yanal olarak ötelenip kolon çapı genişletilir (Şekil 2.14).

Hızlı imalat ve yüksek çapta taşıma gücü kapasitesine sahip kolon, imalat aşamasında kuyu stabilitesinin sağlanması ve geniş gradasyon aralığında malzeme kullanılması gibi avantajları

bulunmasının yanı sıra imalat esnasında yüksek hacimli su kullanılmasından ve bu suyun zemin ile karışmış bulamaç halinin depolanmasının zorluğu gibi dezavantajları da mevcuttur.



Şekil 2.14: Üstten beslemeli ıslak yöntem ile taş kolon imalat aşamaları

2.3.2.2 Üstten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

İmalat aşamaları üstten beslemeli ıslak yerdeğiştirmeye benzer olan bu yöntemde su jetleri yerine hava jetleri kullanılmaktadır. Drenajsız kayma dayanımının (s_u) 30 ile 50 arasında değişen, daha yüksek dayanımlı, kendini tutabilen kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır. Vibratör ve ilave edilen tıjlerin ağırlıkları ile zemin içerisinde ilerleme sağlanmaktadır. Hava jetleri ile ilerleme hızı artırılır. Planlanmış derinliğe inildiğinde vibratör kuyu içerisinde çıkarılarak oluşturulan kuyu belirlenen yüksekliğe kadar (0.3 ile 1.0 m.) taş kolon malzemesi ile doldurulur. Bu malzeme içerisinde tekrar vibratör indirilerek titreşim ile sıkıştırma işlemi yapılır. Bu işlemler proje boyunca kolon oluşuncaya kadar tekrarlanır.

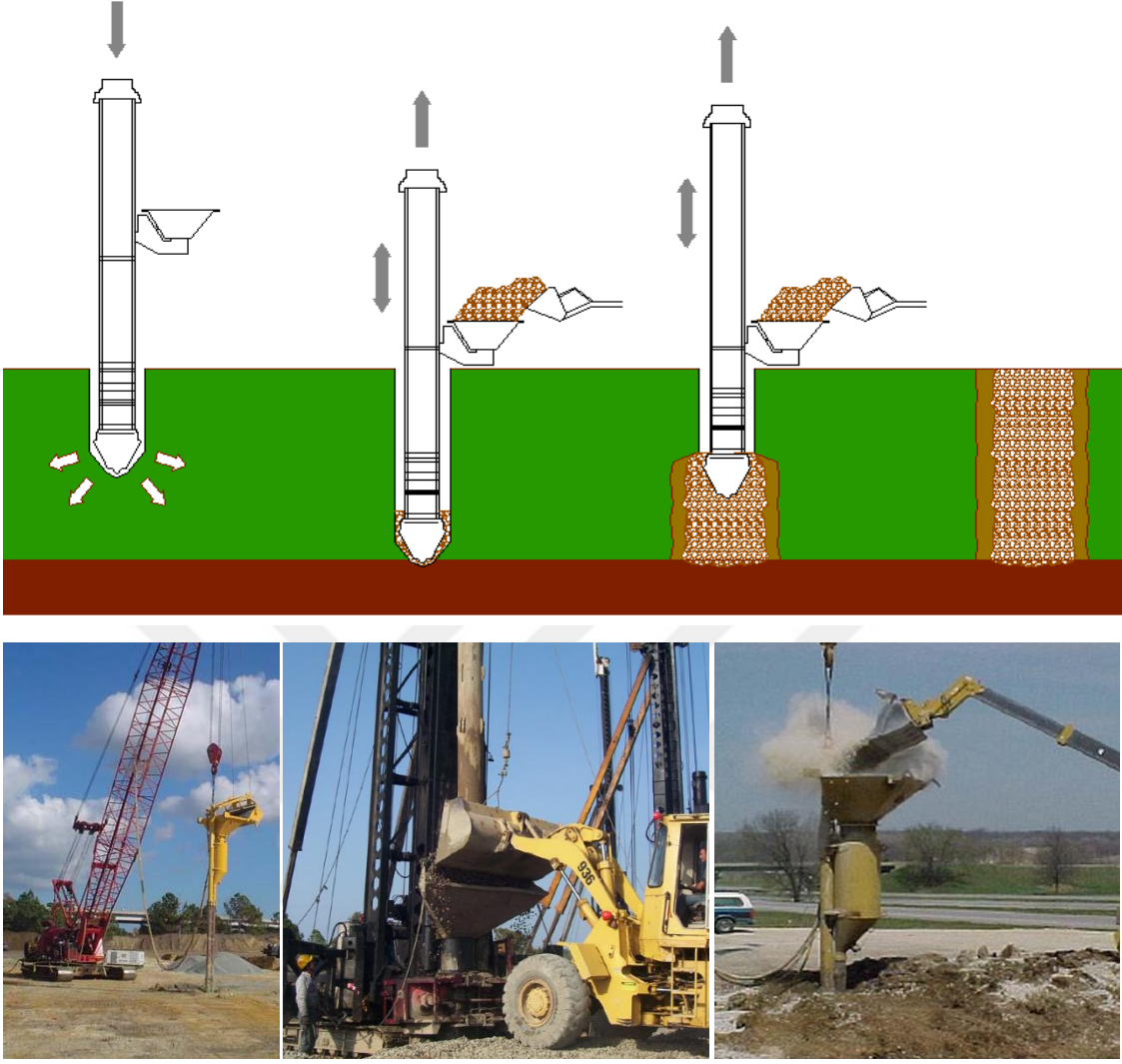
Islak yönteme kıyasla, su kullanılmaması yöntemin en büyük avantajı iken daha yavaş imalat, daha küçük çaplı ve taşıma kapasitesi daha düşük olan kolon imalatı, sınırlı gradasyonda kolon malzemesi kullanılabilmesi yöntemin dezavantajları arasındadır.

2.3.2.3 Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi

Derin uygulamalarda veya drenajsız kayma mukavemeti düşük killerde ($s_u \approx 10 \text{ kN/m}^2$), vibratörün yüzeye çıkarılması sonucunda kuyuda göçmeler oluşabilir. Bu nedenle vibratörün kuyudan çıkarılmasını gerektirmeyen, dolgunun vibratörün uç kısmından yapılmasını sağlayan Dipten Beslemeli Kuru Vibro-Yerdeğiştirme Yöntemi geliştirilmiştir.

Bu sistemde vibratör bir çelik borunun ucuna bağlanmıştır. Sisteme, tremi borusu şeklinde ikinci bir boru ile malzeme besleme kovası monte edilmiştir. İmalat, hava jeti de kullanılabilen delgi ile proje derinliğine inilmesiyle başlar. Ekipman belirlenen aralıklarla yukarı çekilirken kuyu dibi, besleme borusundan akan taş dolgu malzemesi ile doldurulur. Sonrasında vibratör taş dolguya daldırılarak titreşim ile kolon malzemesi sıkıştırılır ve yanal olarak ötelenip kolon çapı genişletilir. Bu işlemler proje boyunda kolon oluşuncaya kadar tekrarlanır. Üstten beslemeli yöntemlere kıyasla daha derin uygulamalar yapılabilmektedir. 24.0 m'den derin uygulamaların yapılabildiği görülmüştür ve yer altı su seviyesinin altında da imalat yapılabilmektedir.

Kolon imalatında 10 – 40 mm tane boyutuna sahip çakıl veya kırmataş malzeme kullanılması önerilmektedir. Kullanılacak dolgu malzemesinin direk kuyu içerisine aktarılması nedeniyle diğer yöntemlere nazaran dolgu tasarrufu sağlanır ve kullanılacak malzeme miktarı hesaplarında daha az hata yapılmaktadır. Hava ile yapılan delgi sayesinde sulu yöntemlere kıyasla daha temiz bir imalat yapılabilmektedir.

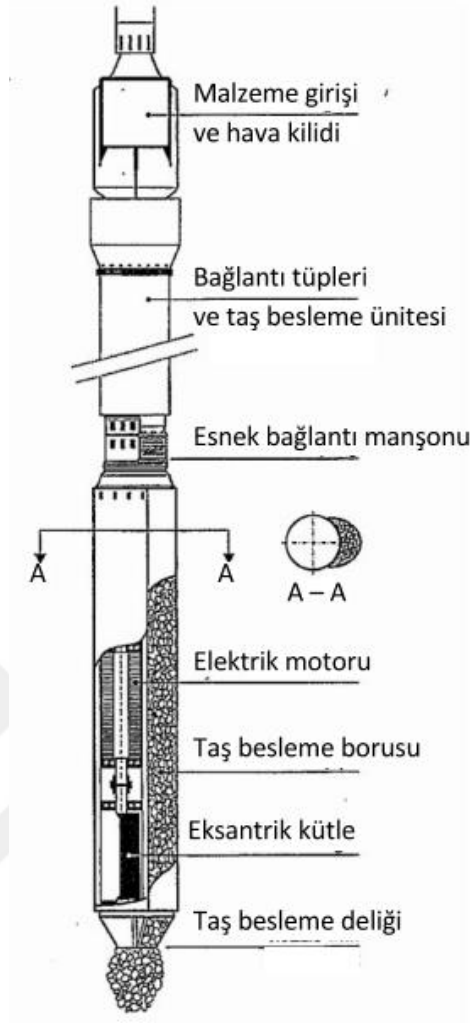


Şekil 2.15: Dipten beslemeli kuru yöntem ile taş kolon imalat aşamaları

2.3.2.4 Vibro-Cat Yöntemi

Dipten beslemeli kuru vibro-yerdeğiştirme yöntemi ile aynı aşamalara sahip yöntemde tremi borusu şeklinde ikinci bir boru ile besleme uygulaması yerine vibratörün içerisine yerleştirilen bir boru sayesinde besleme yapılmaktadır.

Vibro-Cat yöntemi ile oluşturulan kolonlar eliptik bir kesite sahiptir. Bu eliptik kesit tasarım aşamasında eşdeğer dairesel kesite dönüştürülmektedir. Sistem genellikle orta şiddette (yaklaşık 5 bar) dip hava jeti ile çalışmakta olup; ilerleme gücü, ilerleme hızı ve uygulama derinliği olarak diğer sistemlerden daha avantajlı konumdadır.



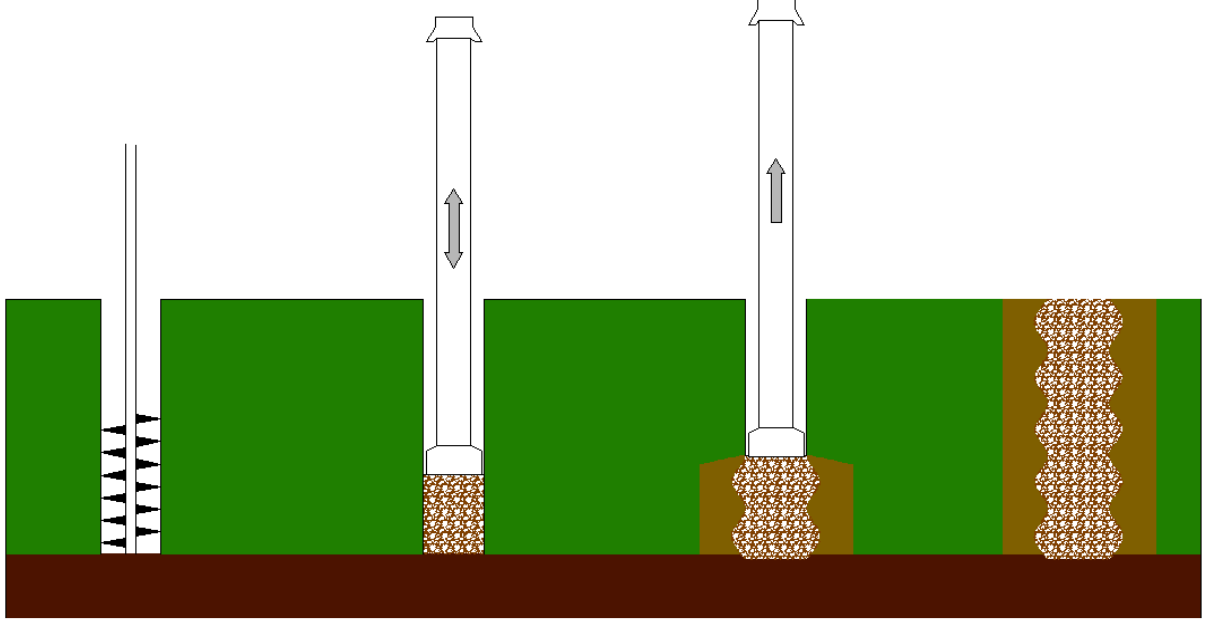
Şekil 2.16: Vibro-Cat tipi vibratörlerin detay görünümü (Kirsch ve Kirsch, 2010).

2.3.2.5 Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) Yöntemi

Sentez-Geopier Foundations Grubu tarafından geliştirilen bu yöntemde forajlı ve forajsız olmak üzere iki farklı teknikte imalat yapılabilir. Kohezyonlu veya granüler zayıf ve iyi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Yer altı su seviyesinin altında imalat yapılabilir.

Forajlı imalat yöntemi kendini tutabilen, kuyu içerisinde stabilite problemi bulunmayan zeminlerde uygulanmaktadır. Yapılan foraj sonrasında oluşan kuyu içerisine belirli yükseklikte taş kolon malzemesi doldurulur. Diğer yöntemlerin aksine dolgu vibratörler yardımı ile sıkıştırılmak yerine kuyu çapındaki özel bir pahlanmış kafa ile dinamik düşey darbeleme enerjisi ile sıkıştırılır. Üstten uygulanan darbe ile kırmataş tabakası düşey yönde sıkışırken zemin içerisinde yatay yönde genişleyerek bir dip soğanı oluşur. Oluşan genişleme hareketi sayesinde kolon çevresindeki zeminde de sıkışma meydana gelir.

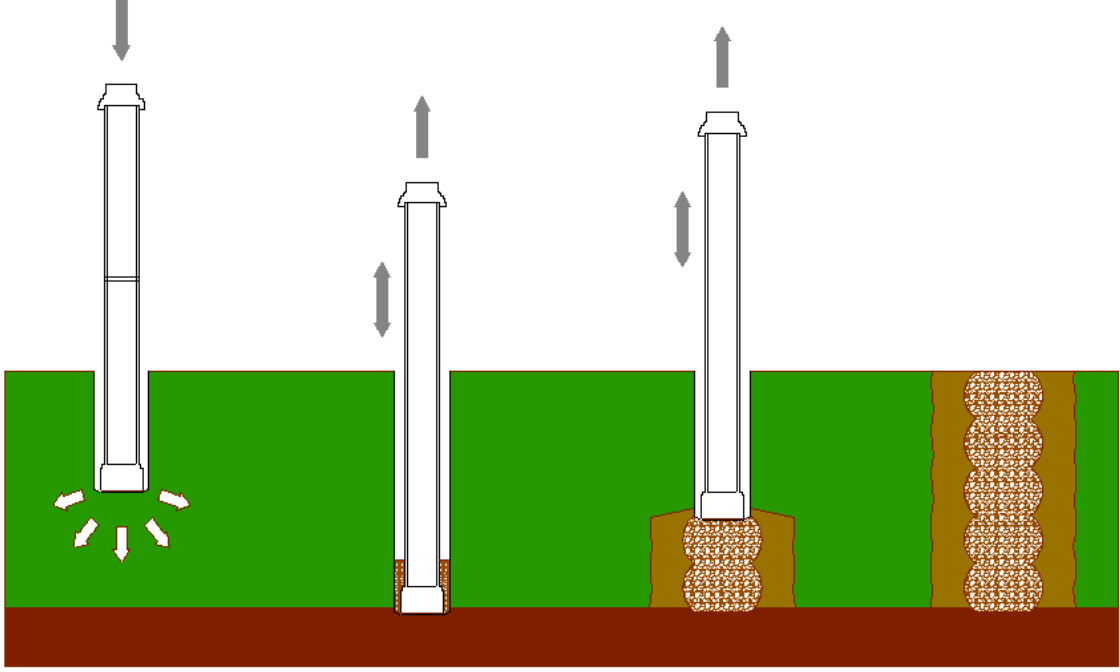
Yöntemin dezavantajı, yapılan foraj sonucunda çıkan zeminin depolanması ya da nakledilmesi gerekliliğidir. Bu yöntem ile yer altı su seviyesinin altında yapılan foraj kuyularında stabilite sorunu görülebilmektedir.



Şekil 2.17: Forajlı darbeli kırmataş yapım aşamaları

Forajsız darbeli kırmataş kolonlar yönteminde ise foraj yapılmadan, alt ucu özel silindirik sıkıştırma kafası şeklinde olan içi boş shaft, zemine düşey vibrasyonla çakılarak kuyu oluşturulur. Ötelenme ile oluşturulan kuyular sayesinde zemin kuyudan çıkarılmamaktadır. Kuyu dibine inildiğinde, shaftın ve özel sıkıştırma kafasının içinden üstten besleme ile yaklaşık 100 cm kalınlıkta taş kolon malzemesi kuyu içerisine doldurulur. Üstten düşey yönlü darbeleme sistemi ile kuyu tabanına dökülmüş olan kırmataş yaklaşık 33 cm kalınlığa düşene kadar sıkıştırılır. Böylece yanlara doğru genişlemiş dip soğanı oluşur ve soğan çevresindeki zemin yanal olarak sıkıştırılmış olur. Kuyunun içindeki shaft tekrar yukarı kaldırılma kırmataş oluşturulmuş soğanın üzerine doldurulur. Düşey yönlü darbeleme işlemi tekrar yapılır. Bu işlemler proje boyunda kolon oluşuncaya kadar tekrarlanır.

Yapılan imalattan dışarıya herhangi bir zemin çıkarılmadığı için çevre kirliliği oluşturmaz. Ancak sert zeminlerde veya yüzey sürtünme kuvveti yüksek zeminlerde shaftın ilerleme zorluğu sistemin dezavantajıdır. Diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında sadece vibrasyon etkisi ile sıkıştırma işlemine kıyasla düşey darbeleme sonucunda daha sıkı bir çekirdek bölgenin yanı sıra çevre zemininde sıkıştırılması yöntemin avantajları arasında gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Forajsız darbeli kırmataş yapım aşamaları

2.3.3 Taş Kolon İmalatında Kullanılan Malzemeler

Malzeme seçiminde yapılırken, bulunabilirlik, iyileştirilecek zemin koşulları ve uygulanacak yöntemle ilgili olarak değişik gradasyonda kırmataş veya doğal kum-çakıl malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılacak malzemelerin yeraltı suyunun kimyasal etkilerinden ve vibratörün aşındırıcı titreşimlerinden etkilenmeyecek özellikte olması gerekmektedir. Gradasyon belirlenirken sıkışabilme kapasitesini ve yüksek geçirgenliğe sahip olmasını engellemeyecek nitelikte olmasına dikkat edilmelidir. Avrupa normları EN 14371: vibratörlü derin sıkıştırma yöntemleri, EN 1097-2 ve EN 13450: kırmataş malzemelerin fiziksel özellikleri duraylı taş kolon malzemelerinin seçimi için gerekli özellikleri vermektedir.

Yumuşak kohezyonlu zeminlerde genellikle ince gradasyonlar veya kum kullanılması önerilmektedir. Kumun ince malzeme oranının %15'ten az ve ortalama dane çapının 0.2 mm'den büyük olması gereklidir. Maksimum dane çaplarının üstten beslemeli ıslak sistemlerde 100 mm, dipten beslemeli kuru sistemlerde 25 mm ile sınırlı tutulması önerilmektedir (Stark ve Yacyshyn, 1991).

2.3.4 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

İmalat yöntemleri önceki bölümlerde verilen taş kolon uygulamasının kalitesi; zemin koşulları, taş kolon malzemesi, vibratör özellikleri ve kolon yapım yöntemine bağlı değişkenlik göstermektedir. Bu yöntemlerin uygulanacak zemin cinsi, avantajları ve dezavantajları incelendiğinde;

- Vibro sıkıştırma yöntemi, gevşek, ince dane oranı %15'ten az (siltli-killi kumlar, temiz kumlar ve çakıllar) olan granüler zeminlerde uygunmaktadır. Yapılan iyileştirme sonucunda, yüksek yoğunluklu bir çekirdek bölge ve merkezden uzaklaştıkça yoğunluğu azalan iyileştirilmiş bir alan oluşturulmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde istenilen mertebelerde iyileştirme sağlanamaktadır.
- Vibro yer değiştirme yöntemi sonucunda genel olarak ince daneli zeminlerde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.
- Drenajsız kayma dayanımı düşük, kuyu içerisinde göçmelerin meydana geleceği düşünülen zeminlerde yer değiştirme yöntemleri arasında bulunan ıslak yöntem seçilebilir. Yöntemin, geniş gradasyon aralığında taş kolon malzemesi kullanımı ve kuyu stabilitesinin sağlanması gibi avantajlarına karşın yüksek hacimlerde su ihtiyacı ve zemin ile karışan su nedeniyle oluşan bulamaç sonucunda saha kirliliği gibi dezavantajları mevcuttur.
- Drenajsız kayma dayanımı düşük zeminlerde seçilebilecek diğer bir alternatif dipten beslemeli yöntemdir. Vibratörün kuyu içerisinden çıkarılmasını gerektirmeyen yöntemde kuyu içi stabilitesinin sağlanmasına gerek yoktur. Ancak geri dolgu için seçilebilecek malzemenin gradasyon aralığı üstten beslemeli yöntemlere kıyasla daha sınırlıdır. Çevre kirliliği bakımından sulu sisteme göre daha avantajlıdır.
- Göçme riski olmayan, kendini tutabilen zeminler için üstten beslemeli kuru yöntem seçilebilir. Maliyet, su ihtiyacı ve çevre kirliliği bakımından üstün olan sistemde daha küçük çaplı ve taşıma kapasitesi daha düşük olan kolon imalatı dezavantajlar arasında yer almaktadır.
- Darbeli kırmataş yöntemi ise forajlı ve forajsız seçimi yapılarak bütün tip zeminlerde uygulanabilir. Sadece vibrasyon etkisi ile sıkıştırma işlemine kıyasla düşey darbeleme sonucunda daha sıkı bir çekirdek bölgenin yanı sıra çevre zemininde sıkıştırılması avantajları arasında yer almaktadır.

2.4 TAŞ KOLON TASARIMI

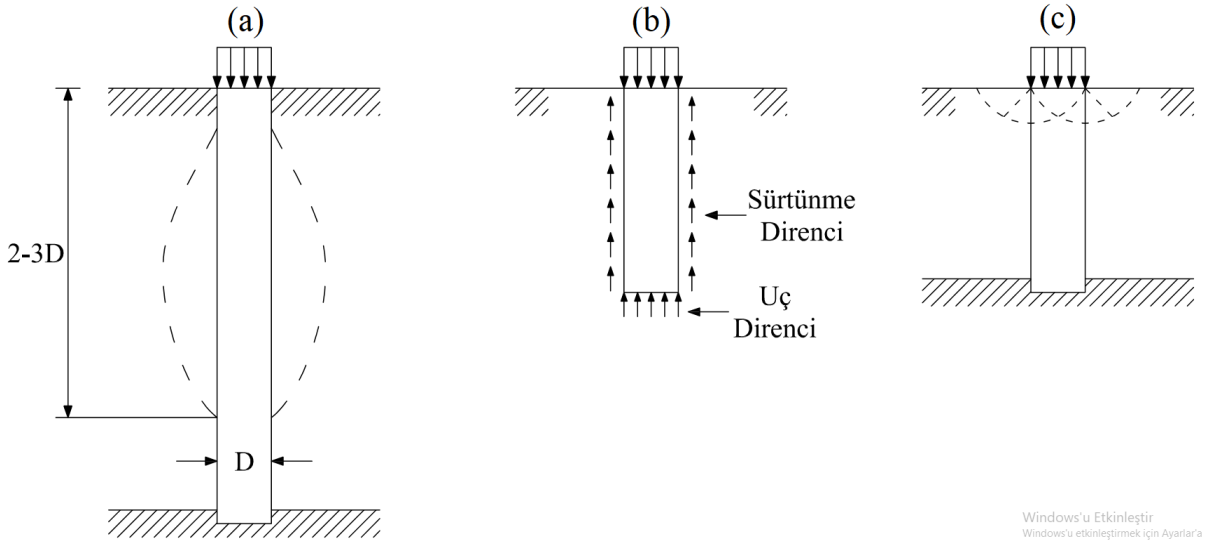
Yumuşak zemin ve içerisinde oluşturulan yüksek dayanım ve yoğunluğa sahip taş kolonlardan oluşan sistem kompozit bir malzeme gibi davranır. Oluşturulan bu kompozit malzemenin stabilitesi, kolon ve onu çevreleyen zemin arasında oluşan kayma etkisine bağlıdır. Taş kolonların yenilme mekanizmaları oluşturulduğu yumuşak zemin birimin derinliğine, kolon boyuna, kolonun yüzer konumda veya sağlam zemine uzanmasına bağlı olarak değişmektedir.

2.4.1 Tekil Taş Kolon

Homojen yumuşak bir zemin içerisinde imal edilen tekil taş kolonda yenilme mekanizmaları,

- Toplam boyu, çapının 4 ile 6 katından uzun imal edilen kolonlarda yüzeyden 2 ile 3 çap derinliğinde göbeklenme (bulging) tipi,
- Yüzer konumdaki kısa tekil kolonun zımbalanma tipi,
- Sağlam zemine kadar inen kısa kolonlar da genel taşıma gücü tipi yenilmeler olarak 3 grupta incelenebilir.

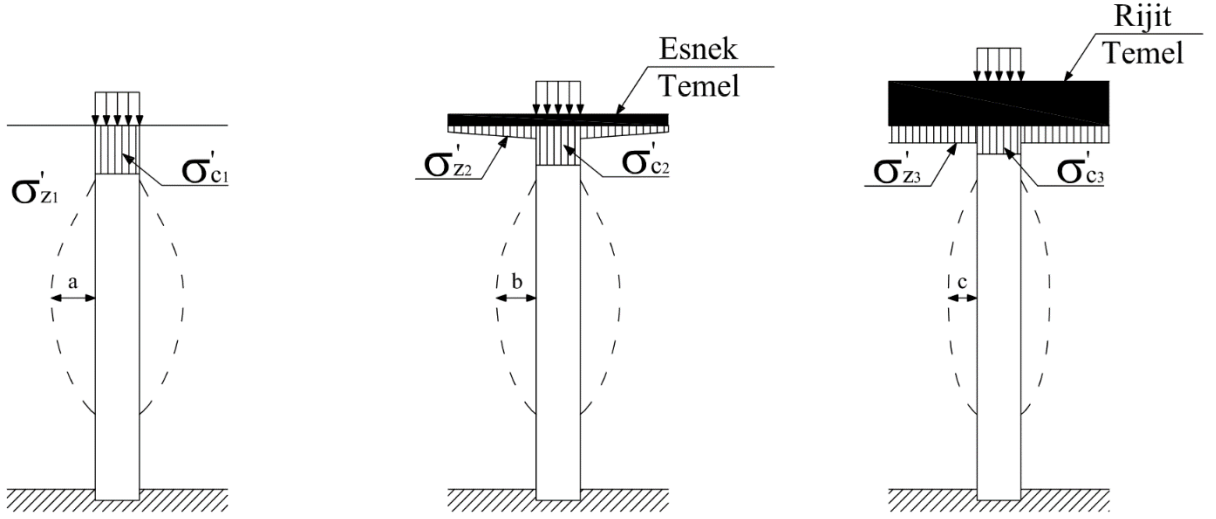
Her bir yenilme mekanizması için taşıma gücü belirlenmesine yönelik farklı yaklaşımlar bulunmaktadır.



Şekil 2.19: Tekil kolonlarda göçme mekanizmaları (Barksdale ve Bachus, 1983)

Bunlara ek olarak, yükleme alanı ve temel rijitliğine bağlı olarakta yenilme mekanizmaları değişiklik göstermektedir. Yükün sadece tekil kolon alanı üzerine etkilmesi halinde zeminde

herhangi bir gerilme artışı olmayacağından kolon taşıma kapasitesi kadar bir yük taşınabilir ($\sigma'_{z1}=0$). Kolonlarda oluşacak göbekenme mertebeleri çok büyük olacaktır (Şekil 2.20-a). Kolon çapından geniş esnek bir temel ile yükün etkitilmesi durumunda yük uygun oranda kolon ile zemin üzerine dağıtılamayacağı için kolon üzerinde meydana gelecek yüksek ilave gerilmeler buna bağlı olarak göbekenme değerleri oluşacaktır. Aynı yükleme durumu, kolon çapından geniş rijit bir temel ile etkitilmesi durumunda ise daha üniform bir yük dağılımı nedeni ile zeminde meydana gelecek yanal genişleme engellenir ve böylece oturmalar azaltılıp, taşıma gücü artırılmış olur. Kolonlarda meydana gelen göbekenme değerleri $a>b>c$ olacak şekilde gösterilebilir.



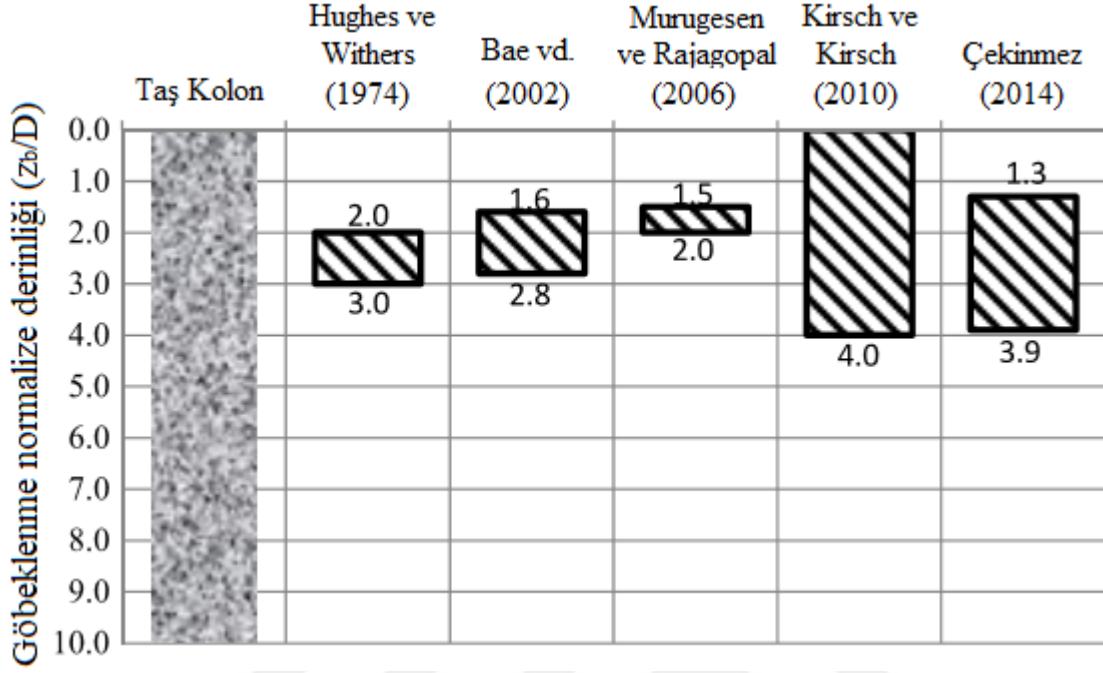
Şekil 2.20: Taş kolona etkiyen farklı tip yükleme durumları.

2.4.1.1 Göbekenme Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri

Yenilme mekanizmaları içerisinde en yaygın olarak gözlemlenen tipin göbekenme olduğu bilinmektedir (Barksdale ve Bachus, 1983). Yenilmenin ana nedeni olarak, yük altındaki taş kolonun genişleme hareketinin zeminin yanal gerilmelerini yenmesi gösterilebilir. Göbekenme tipi yenilmelere karşı iki farklı yaklaşım ile taşıma gücü kapasitesi hesapları yapılabilmektedir.

- Kavite genişleme teorisinde taş kolon sonsuz uzunlukta, etrafını çevreleyen zemine doğru genişleyen bir silindir olarak modellenmekte ve radyal genişleme kolon etrafındaki zeminin nihai pasif direncine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Genişleme ile derinlik boyunca sabit bir çap büyümesinden ziyade, kolon göbekenme şeklinde bir deformasyon yapmaktadır (Barksdale ve Bachus, 1983). Farklı araştırmacılar tarafından gözlemlenmiş

göbeklenme derinliği (z_b) aralığının taş kolon çapına oranı $1.5-2.0*D$ ile $0.0-4.0*D$ aralığında değişmektedir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Farklı araştırmacılar tarafından gözlenmiş z_b/D aralıkları (Çekinmez, 2014).

Bu teoride kolonun yenilme esnasında etrafındaki yanal çevre basıncı (σ_3) nihai pasif direnç olarak kabul edilir ve kolonun nihai taşıma gücü (q_{ult}) 2.1 denklemleri ile hesaplanır. Barksdale ve Bachus (1983) bu yöntemin doğruluğunu sonlu elemanlar analizleri ile de desteklemiştir.

$$q_{ult} = \sigma_3 * K_{pc} \quad (2.1a)$$

$$K_{pc} = \frac{(1 + \sin\phi'_c)}{(1 - \sin\phi'_c)} \quad (2.1b)$$

K_{pc} : taş kolonun pasif gerilme katsayısı

ϕ'_c : taş kolon malzemesinin efektif kayma direnci açısıdır.

Hughes ve Withers (1974) kaolin tipi kil içerisinde tek bir taş kolonu sadece kolon alanı üzerinde yükleyerek, zemindeki ve kolondaki deformasyonları radyografi tekniği ile gözlemlemişlerdir. Ayrıca deney süresince, göbeklenmenin oluşması beklenen derinlik aralığında deney hücresinin duvarına koydukları yük hücresi ile de radyal gerilmeleri ölçmüşlerdir. Deney sonunda simetri eksenini etrafında üniform radyal birim deformasyon oluştuğunu ve benzerlikleri nedeniyle presiyometre deney koşulları ile aynı olduğu kabulü ile

yaptıkları dönüşüm ile kolonun etrafındaki nihai yanal çevre basıncının (σ_3) denklem 2.2a'dan ve nihai taşıma gücünün (q_{ult}) denklem 2.2b'den hesaplanabileceğini önermişlerdir.

$$\sigma_3 = \sigma_{r0} + s_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2s_u(1 + v_{su})} \right] \quad (2.2a)$$

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{r0} + s_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2s_u(1 + v_{su})} \right] \right\} x \left[\frac{(1 + \sin\phi'_c)}{(1 - \sin\phi'_c)} \right] \quad (2.2b)$$

σ_{r0} : Toplam gerilme cinsinden sürşarj yükü altında zemin yanal gerilmesi

s_u : Kohezyonlu zeminin drenajsız kayma dayanımı

E_u : Drenajsız durumda zeminin deformasyon modülü

v_{su} : Drenajsız durumda zeminin poisson oranıdır.

Hughes ve Withers (1974), drenajsız durumda yapılmış çok sayıda presiyometre deney sonucunu inceleyerek nihai taşıma gücü formüllerini sadeleştirmişlerdir (Denklem 2.3a ve 2.3b).

$$\sigma_3 = \sigma_{r0} + 4s_u \quad (2.3a)$$

$$q_{ult} = (\sigma_{r0} + 4s_u) x \left(\frac{(1 + \sin\phi'_c)}{(1 - \sin\phi'_c)} \right) \quad (2.3b)$$

Greenwood (1970), Madhav vd. (1979) ve Vesic (1972) gibi araştırmacılar tarafından da genleşme teorisi ile ilgili bağıntılar elde edilmiş ve taş kolon nihai taşıma gücünün tahmin edilebileceği belirtilmiştir.

- b) Taşıma gücü faktörü yaklaşımında kolonun maksimum yanal desteğinin kilin pasif direncine eşdeğer olduğu kabulü yapılmıştır. Bu yaklaşımda kolonların kohezyon ve etrafındaki kilin de sürtünme açısı kayma dirençlerinin olmadığı, kolon nihai taşıma gücüne ulaşıldığında hem kolonun hem de kil dayanımının tamamen mobilize olduğu ve yenilme tipinin göbekenme şeklinde oluştuğu kabul edilmektedir.

Hughes ve Withers (1974) model deney sonuçlarını değerlendirerek kil zeminler içerisinde teşkil edilen tekil taş kolonların nihai taşıma gücünün (q_{ult}) 2.4 formülü ile hesaplanabileceğini ifade etmişlerdir.

$$q_{ult} = c_u \times N_c \quad (2.4)$$

N_c taşıma gücü faktörü olarak tanımlanmış olup model deney sonuçlarına göre araştırmacılar bu faktörün 25.2 olarak alınmasını önermişlerdir. Thornburn (1975) ise yaptığı model deney sonuçlarına göre taşıma gücü faktörünün tekil kolonlarda 25.0 olduğunu ifade etmektedir. Ancak Vesic (1972), Gibson ve Anderson (1961) Hughes vd. (1975) Greenwood (1970) ve Bell (1915) tarafından yapılan çalışmalarda N_c değeri için 7 ile 27 arasında farklı değerler elde edilmiş ve 25 değerinin üst limit olarak alınabileceği belirtilmiştir.

Gerek deneysel gerekse numerik analizler sonuçlarına göre tekil kolon taşıma gücünü temsil eden taşıma gücü faktörünün (N_c) sabit bir değer olmadığı ve,

- kolon malzemesi sürtünme açısı (ϕ'_c)
- alan yerdeğiştirme oranını temsil eden kolon aralık/çap oranı (s/D)
- kolon çevresine etkileyen sürşarj yükü (q) gibi parametrelere bağlı olarak değiştiğini vurgulamışlardır.

2.4.1.2 Zımbalanma Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri

Yumuşak zemin içerisinde oluşturulan kısa kolonlarda, çevre sürtünmesi ile taban direnci toplamının gelen yükü karşılamaması halinde meydana gelir. Zımbalanma yenilmesine karşı nihai taşıma gücünü (q_{ult}), kolonun çevresindeki zeminle sürtünmesinden kaynaklanan direnç ile uç direncin toplamı olarak hesaplamak mümkündür. Hughes ve Withers (1974) bu tip yenilmelerin önlenmesi için minimum kolon boyutunu belirlemişlerdir.

$$l_{min} = \frac{D}{4} \times \left(\frac{\sigma_s}{s_u} - 9 \right) \quad (2.5)$$

D : Taş kolon çapı,

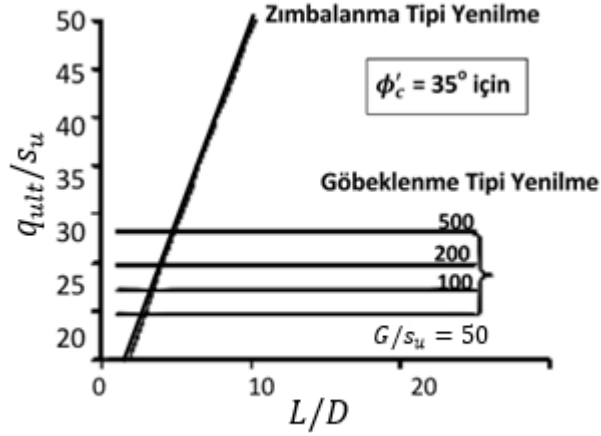
σ_s : Taş kolonda hesaplanan toplam düşey gerilme,

s_u : Kohezyonlu zeminin drenajsız kayma dayanımıdır.

Yapılan hesap, taş kolon ağırlıkları ihmal edilerek uç direnci varsayımı üzerine kurulmuştur (Scott, 1963). Brauns'a (1978) göre bu yaklaşım ile aynı zamanda maksimum kolon uzunluğuda belirlenebilir. Çünkü kolonlar belirli bir uzunluktan sonra yük aktarımı yapamayacaktır.

$$l_{max} = \frac{d}{4} x \frac{\sigma_s}{s_u} \quad (2.6)$$

Madhav vd. (2005) zımbalanma tipi yenilmelerde, taş kolon taşıma gücünün kolon boy/çap oranı ile doğru orantılı olarak arttığı; göbeklenme tipi bir yenilme mekanizmasında ise taşıma gücünün kolon boy/çap oranına bağlı olmaksızın, kilin G/s_u (kayma modülü/drenajsız kayma dayanımı) oranı ile doğru orantılı olarak arttığını ifade etmiştir (Şekil 2.22).



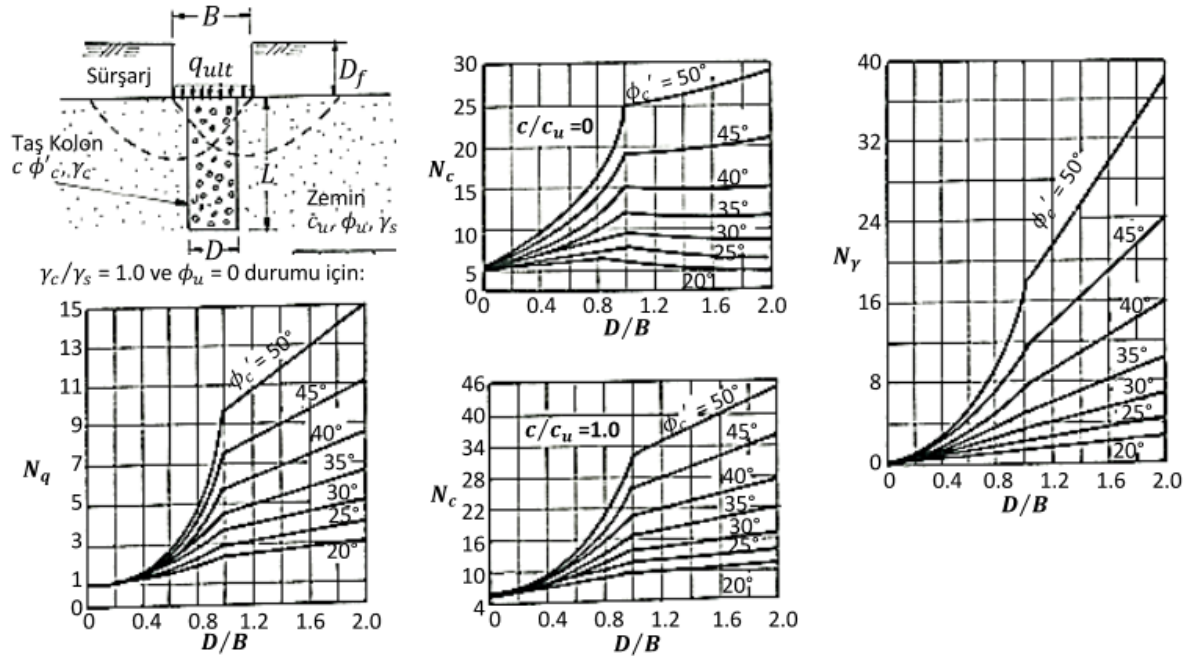
Şekil 2.22: Taşıma gücünün kilin G/s_u ve kolonun L/D oranlarıyla değişimi (Madhav vd., 2005).

2.4.1.3 Genel Taşıma Gücü Tipi Yenilmeler için Taşıma Gücü Hesaplama Yöntemleri

Barksdale ve Bachus (1983) genel taşıma gücü yenilmesinin düşey gerilmelerin en az olduğu zemin yüzeyinde oluşacağını belirtmiştir. Genel taşıma gücü yenilmesine karşı oluşabilecek nihai direnç (q_{ult}) için Madhav ve Vitkar (1978) tarafından 2.7 denkleminin kullanılması önerilmiştir.

$$q_{ult} = \frac{1}{2} \gamma_s B N_\gamma + c N_c + D_f \gamma_s N_q \quad (2.7)$$

N_γ , N_c ve N_q değerleri taşıma gücü faktörleri olup Şek. 2.23'ten alınmaktadır.



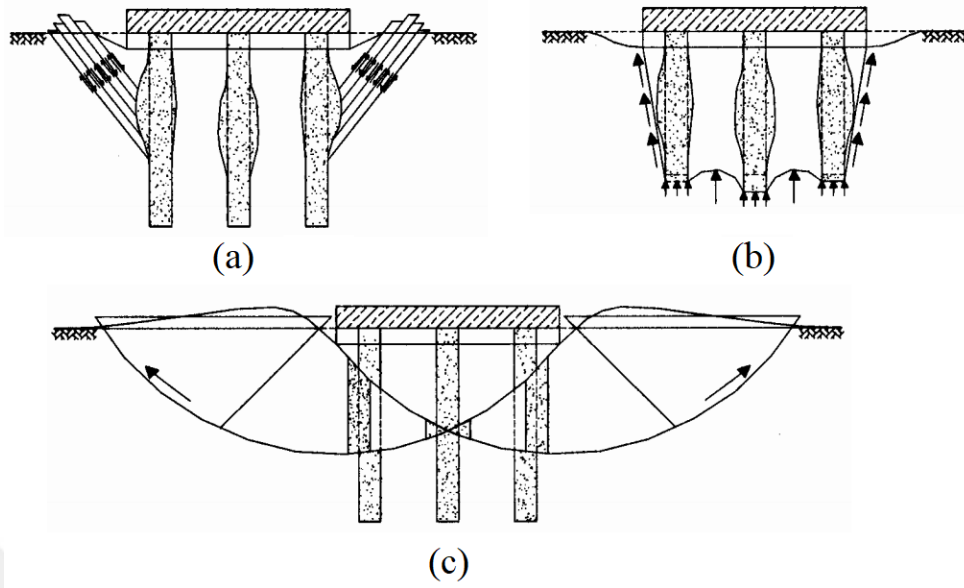
Şekil 2.23: N_γ , N_c ve N_q değerleri (Madhav ve Vitkar, 1978).

2.4.2 Taş Kolon Grubu

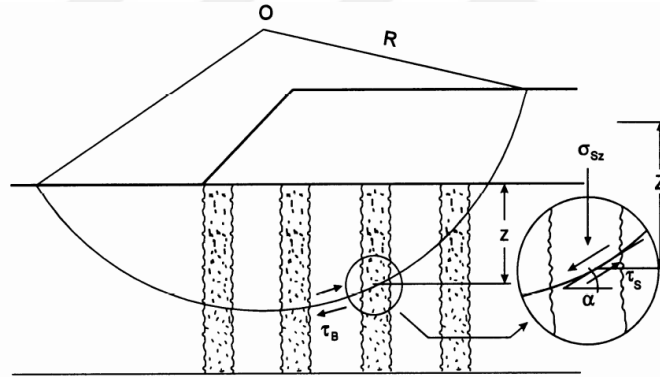
Kolonlar arasında bulunan zemin ve yükleme durumu nedeniyle kolon gruplarında meydana gelecek yenilme mekanizmaları farklı ve karmaşık görünse de, tekil kolonda oluşacak yenilme mekanizmalarına benzer yapıdadır.

- Yanal gerilmelerin aşılması – göbeklenme,
- Zımbalanma,
- Genel göçme mekanizmaları mevcuttur.

Ancak yüke, kolon özelliklerine ve sınır koşullarına bağlı olarak grup içerisinde bulunan kolonlarda farklı yenilme mekanizmaları görülebilmektedir. Bu yenilme tipleri haricinde eğimli kenarlara sahip dolgu ile yüklenen iyileştirilmiş alanlarda şev stabilitesinin aşılmasına benzer dairesel göçme mekanizması ile de karşılaşmaktadır.



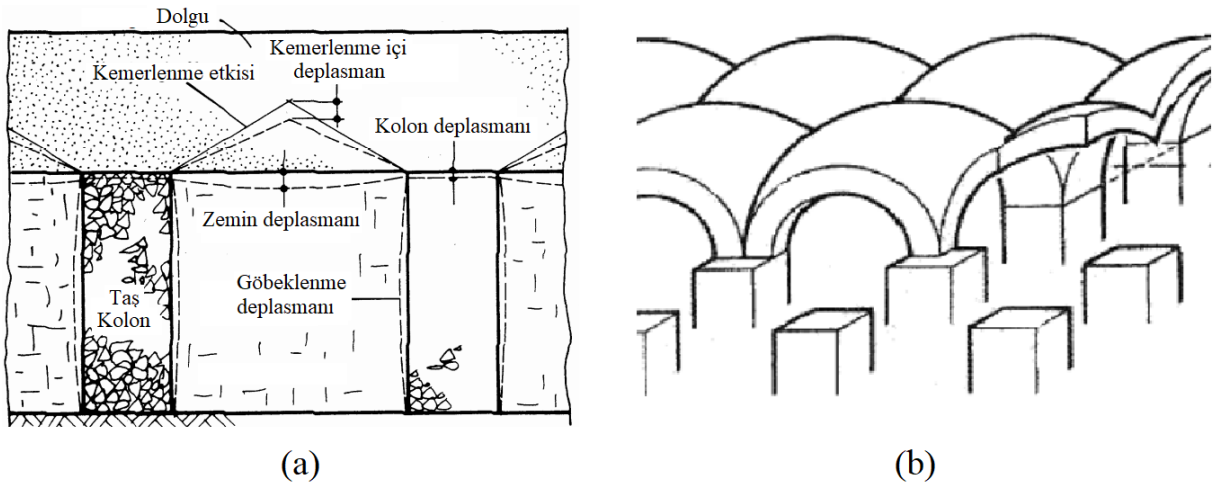
Şekil 2.24: Kolon gruplarında göçme mekanizmaları (Kirsch, 2004).



Şekil 2.25: Dairesel göçme mekanizması (Aboshi ve diğ., 1979, 1991).

2.4.2.1 Kemerlenme Etkisi

Yumuşak zemin birim içerisinde oluşturulan sıkı taş kolon elemanların temelsiz ya da esnek bir temel ile yüklenmesi durumunda gerilmelerin taş kolon üzerlerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Kolon üstlerinde oluşan yay şeklindeki gerilme artışına kemerlenme denir. Kemerlenme oluşumu ve mertebesi, dolgu yüksekliği, kolon aralığı, kolon çapı, zemin ve dolgu birim parametreleri, temel özellikleri gibi birçok nedene bağlıdır.

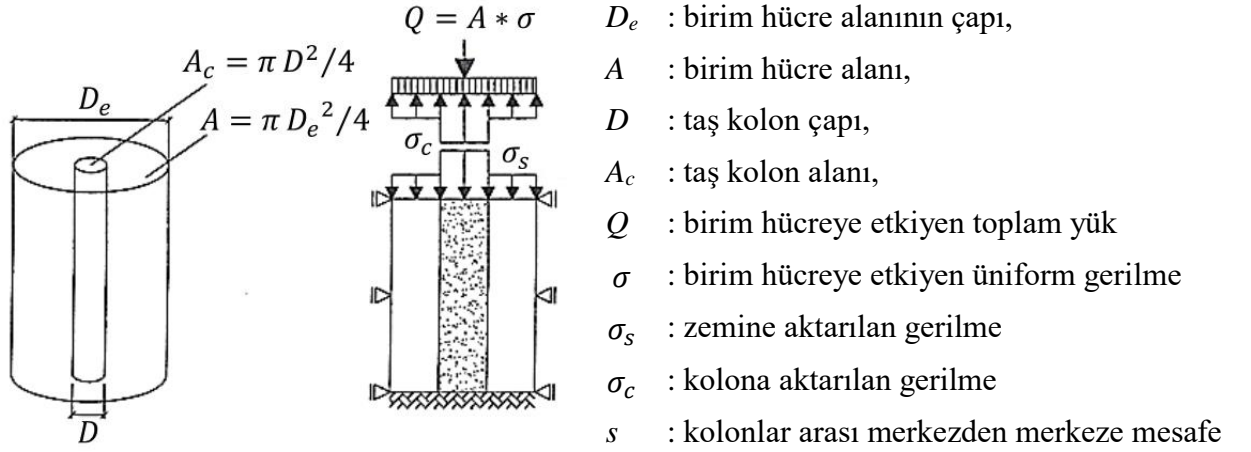


Şekil 2.26: Kemerlenme davranışı, a-Waterton ve Foulsham (1984), b- Hewlett ve Randolph, (1988).

2.4.2.2 Birim Hücre Prensihi

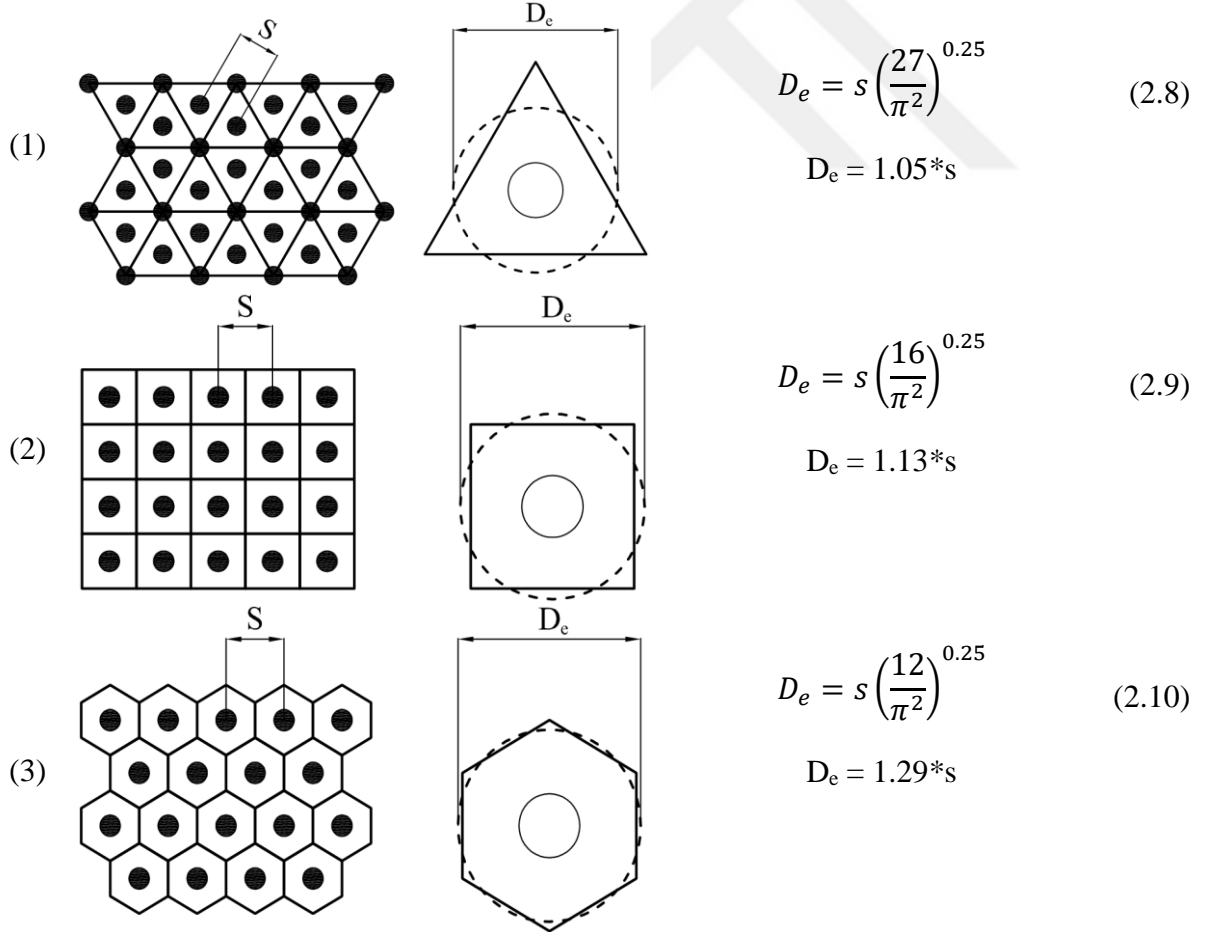
Uygulamada tek taş kolondan ziyade yüklemeye altında birbirleri ile etkileşim halinde çok sayıda taş kolon imal edilmektedir. Aynı çapta ve birbirleri ile eşit mesafeye sahip çok sayıda taş kolon yerleşimi literatürde “sonsuz yerleşim düzenindeki taş kolonlar” olarak anılmaktadır. Sonsuz yerleşim düzenindeki taş kolonların yüklemeye altındaki davranışları Priebe Yöntemi olarak da bilinen “birim hücre” prensibi ile açıklanmaktadır. Birim hücre prensibine göre yerleşim içerisindeki her kolonun aynı davranmakta ve tek bir kolon modelinin tüm davranışı temsil ettiği kabul edilmektedir. Aynı zamanda birim hücre sınırlarında yanıl deformasyonun ve sürtünme direncinin oluşmadığı varsayılmaktadır. Balaam ve Booker (1981) ve Ambily ve Gandhi (2007) yaptıkları numerik analizler sonucunda birim hücre prensibinin taş kolon gruplarındaki kenar kolonlar hariç kolon davranışını gerçekçi bir şekilde temsil ettiğini belirtmişlerdir. Kirsch ve Kirsch (2010) yüklemeye alanı genişliğinin taş kolon boyundan 3 kat daha büyük olduğu 50’den fazla taş kolonlu gruplar içerisindeki tek bir taş kolon davranışını gerçekçi bir şekilde birim hücre prensibi ile analiz edilebileceğini vurgulamışlardır.

Üçgen, kare ya da altıgen dizilim gibi farklı hücre geometrisinde imal edilebilen birim hücre prensibinde eşdeğer çap, alan oranı ve gerilme konsantrasyonu gibi faktörler etkilidir.



Şekil 2.27: Birim hücre prensibi (Kirsch ve Kirsch, 2010).

- a) Eşdeğer çap (D_e), farklı dizilime sahip taş kolon geometrisinin birim hücre prensibine uyarlanması için dizilim modelini idealize etmek için kullanılmaktadır. Dizilim alanına eşit olarak hesaplanan dairesel alanın çapına denilir.



Şekil 2.28: Farklı kolon yerleşimleri için birim hücre hesabı 1-üçgen, 2-kare, 3-altıgen dizilim.

- b) Alan oranı (a_r), taş kolon ile iyileştirilen alanın, birim hücre alanına oranıdır (Denk. 2.11). İyileştirme performansı bakımından önemli etkiye sahiptir. Alan oranı ne kadar büyük ise yumuşak zemin yerine geçen taş kolon alanı ve iyileştirme mertebesi de o kadar büyüktür.

$$a_r = \frac{A_c}{A} = \frac{D^2}{D_e^2} = \frac{1}{C^2} \left(\frac{D}{s} \right)^2 \quad (2.11)$$

A_c : Taş kolon alanı,

A : Birim hücre alanı.

C : Geometri katsayısı olup Denklem 2.8, 2.9 ve 2.10'a göre üçgen yerleşim için 1.05, kare yerleşim için 1.13 ve altıgen yerleşim için 1.29 alınmaktadır.

- c) Gerilme konsantrasyonu, birim hücrenin etkiyen toplam yük hücrenin içerisinde kalmaktadır ancak (Denklem 2.12), zemine göre daha rijit davranan taş kolonda (kemerlenme etkisi) gerilme artışı ve zeminde de gerilme azalması meydana gelir (Şekil 2.20 ve 2.27). Bu gerilme dağılımında, taş kolona etkiyen düşey gerilmenin (σ_c) etkileşim alanı içerisindeki zemine etkiyen düşey gerilmeye (σ_s) oranı gerilme dağılım katsayısı (n) olarak tanımlanmaktadır (Denklem 2.13).

$$\sigma = \sigma_c \frac{A_c}{A} + \sigma_s \left(1 - \frac{A_c}{A} \right) = a_r \sigma_c + (1 - a_r) \sigma_s \quad (2.12)$$

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (2.13)$$

Kitazume (2005) sıkıştırılmış kum kazıklarda gerilme konsantrasyonu için yapılan araştırma sonuçlarını özetlemiş ve elde edilen verilerin diğer yöntemlerle imal edilen taş kolonlar için de kullanılabileceğini ifade etmiştir. Araştırmacının başka araştırmacıları da kaynak göstererek ve özellikle ölçüm sonuçlarını dikkate alarak dikkat çektiği hususlar aşağıda özetlenmiştir:

- Deneysel verilere göre, uygulanan sürşarj ile ters orantılıdır. Artan yük mertebelerine paralel olarak azalmaktadır.
- Yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonuçlarına göre 4 ile 7 arasında değiştiğini belirtmiştir. Ancak, Greenwood (1991) rijit şerit temel ile yükleme durumunda gerilme dağılım katsayısının 2.0 ile 4.0 arasında, Özkeskin (2004) 2.0 ile 4.5 arası, Pham ve

White (2007) 4.0 ile 5.5 arası ve Çekinmez (2014) 3.5 ile 8.5 arasında değiştiğini yaptıkları büyük ölçekli saha deneyleri ile kanıtlamışlardır.

- Yüzeyde en yüksek değere sahip olup, derinlikle azalmaktadır.
- Kolon ve çevresindeki zeminin rijitlik oranlarına bağlıdır

2.4.3 Taş Kolonlarda Oturma Tahmini

Taş kolonlarda oturma hesapları, basitleştirici kabuller ile yapılan ampirik bağıntılar ve sonlu elemanlar, sonlu farklar gibi zemin ve kolon özellikleri ile yükleme durumlarını daha gerçekçi tanımlayabilen bilgisayar programları ile yapılabilmektedir. Bu bölümde, sıklıkla kullanılan ve yaklaşık sonuçlar ile ön tasarım için ideal olan ampirik bağıntılara yer verilmiştir.

Ampirik bağıntılar, sabit çap ve boyda taş kolonlar ile iyileştirilmiş sonsuz genişlikte bir alanın yüklendiği kabulüne yani birim hücre prensibine dayanmaktadır.

2.4.3.1 Denge Metodu

Özellikle Japonya'da, sıkıştırılmış kum kazıklarının oturma hesaplarında kullanılan bu yöntem bir boyutlu konsolidasyon teorisi, gerilme faktörünü ve birim hücre kavramını birleştirerek geliştirilmiştir.

Zemin ve kolonun aynı oranda sıkışacağı kabul edilerek ve klasik tek boyutlu konsolidasyon teorisinden sıkışabilir kil katmanının konsolidasyon oturması Denklem 2.14 ile hesaplanır.

$$S_t = \left(\frac{C_c}{1 + e_0} \right) \log_{10} \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_s}{\sigma'_{v0}} \right) H_t \quad (2.14)$$

S_t : Taş kolon ile iyileştirilmiş zeminde oluşan birincil konsolidasyon oturması,

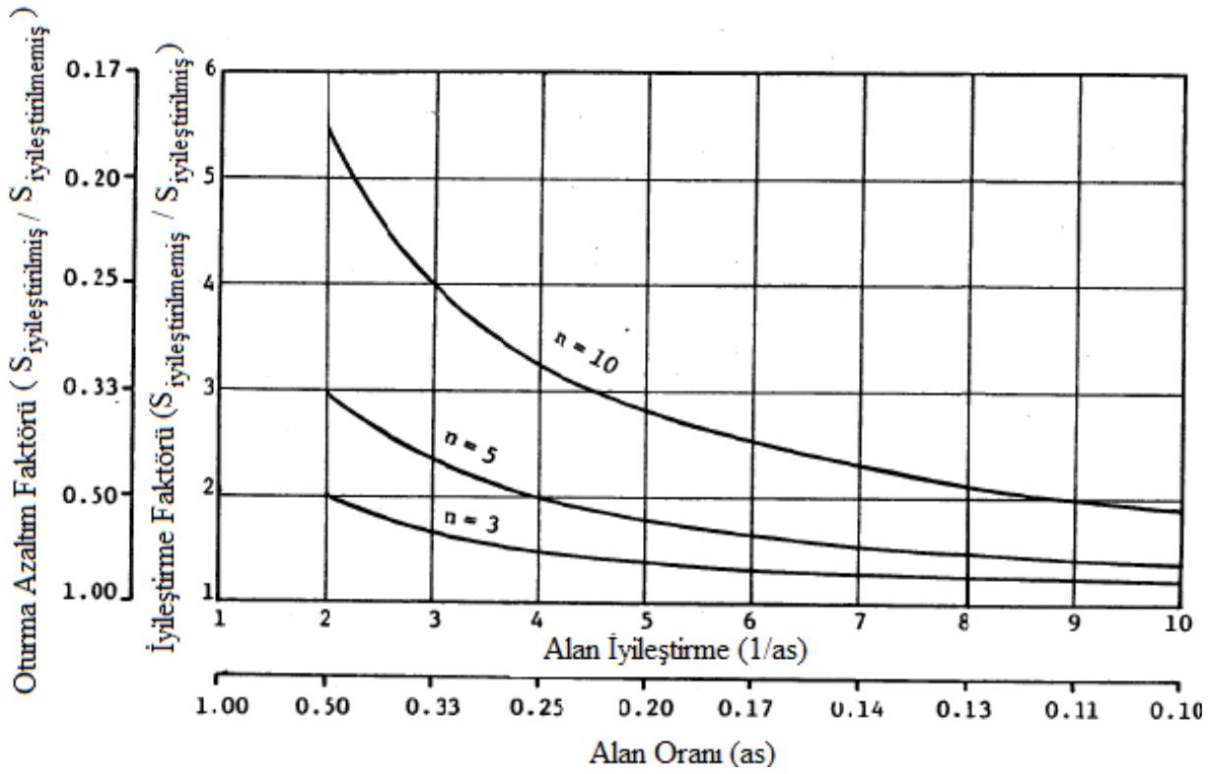
H_t : İyileştirilmiş zemin tabakasının kalınlığı,

σ'_{v0} : Zemin tabakasındaki ortalama başlangıç efektif düşey gerilme,

$\Delta\sigma_s$: Uygulanan sürşarj yükün zeminde oluşturduğu ilave düşey gerilme ($n_s x \Delta\sigma$),

C_c : Ödometre deneyinden elde edilen sıkışma endeksi,

e_0 : Zeminin ilk boşluk oranıdır.



Şekil 2.29: Oturma iyileştirme oranı – Denge yöntemi (Barksdale ve diğ., 1983).

2.4.3.2 Priebe Metodu

Priebe (Baumann ve Bauer, 1974; Priebe, 1988, 1993 ve 1995; Mosoley ve Priebe, 1993) tarafından geliştirilen ve birim hücre prensibine dayanan yöntemde;

- Kolon ucunda deplasman oluşmayacağı,
- Kolonun malzemesinin sıkışmayacağı,
- Kolon ve zemin birim ağırlıklarının ihmal edilmesi gibi kabuller yapılmaktadır.

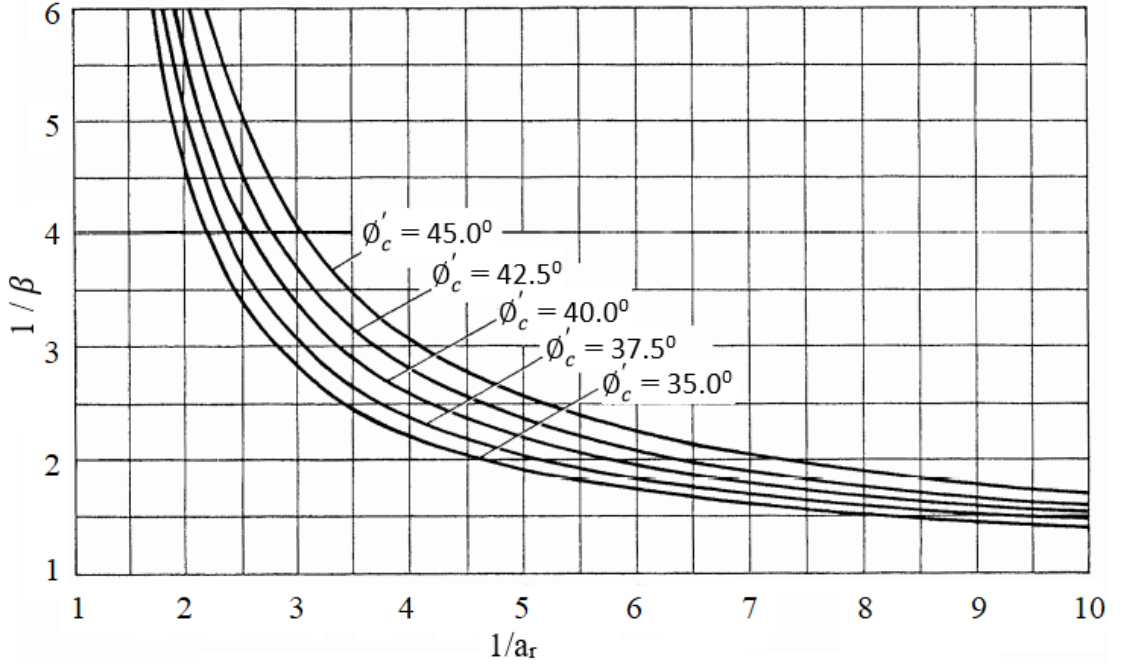
Yapılan kabuller sonucunda, uç taşıma gücü yetersizliği yenilmesi olmayacak ve göbeklenme deplasmanı tüm kolon boyunca sabit olacaktır. Kolonun başlangıçta makaslama gerilmeleri altında yenildiği ve çevresindeki zeminin buna elastik bir reaksiyon verdiği kabul edilmiştir. Ayrıca, kolon imalatı sırasında gerçekleşen örselenmeler sonucu zemin yanal itki basıncı katsayısı değerinin $K_s = 1$ olduğu duruma kadar deplase olduğu kabul edilmektedir. Nihai oturmalar için çoğu zaman yeterli olan Poisson oranı $\nu_s = 1/3$ kabulü ile yapılan değerlendirme sonucunda oturma iyileştirme oranı (β);

$$\beta = 1 + \frac{A_c}{A} \left\{ \frac{5 - (A_c/A)}{4K_{ac} [1 - (A_c/A)]} - 1 \right\} \quad (2.15)$$

A_c : Taş kolon alanı,

K_{ac} : Kolon malzemesinin aktif gerilme katsayısı, $K_{ac} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'_c}{2} \right)$,

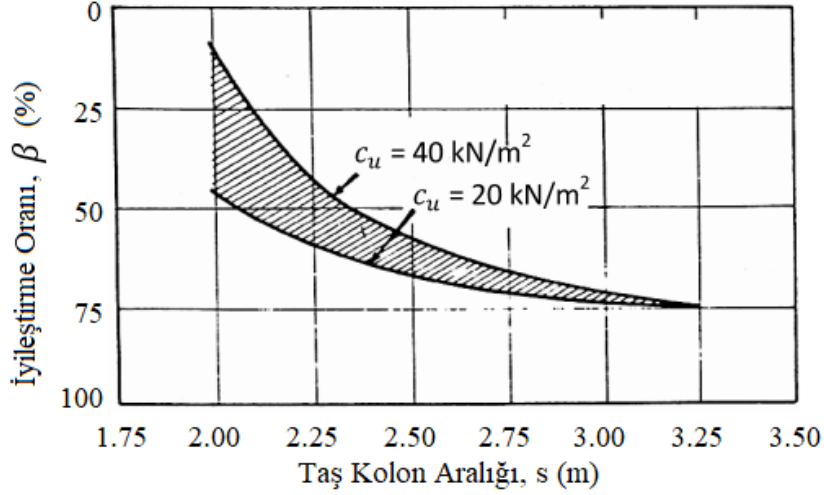
ϕ'_c : Kolon malzemesinin içsel sürtünme açısıdır.



Şekil 2.30: Oturma iyileştirme oranı (Priebe, 1988).

2.4.3.3 Greenwood Metodu

Greenwood (1970) iyileştirilmiş kilin drenajsız kayma dayanımı ve taş kolon aralığına bağlı Şekil 2.31'de verilen iyileştirme oranlarını önermiştir. Belirlenen iyileştirme oranları kolon çapından bağımsız sadece kolonlar arası mesafeye bağlıdır. Kolon ucunun rijit bir zeminde olduğu varsayılmaktadır. Abakta iyileşme oranları, kil zeminin drenajsız kayma mukavemeti 20 – 40 kN/m aralığı için verilmiştir.



Şekil 2.31: Oturma iyileştirme oranı (Greenwood, 1970).

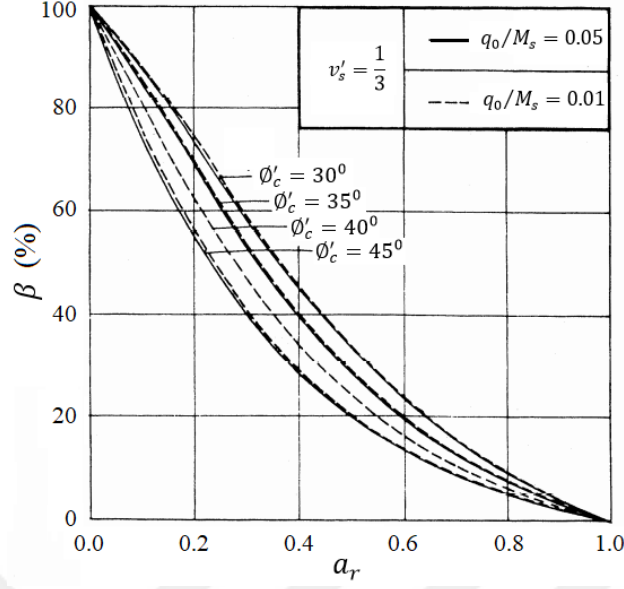
2.4.3.4 Granüler Duvar Metodu

Van Impe ve De Beer (1983) tarafından geliştirilen bu yöntemde iyileştirme oranı (β), beş bilinmeyenli bir fonksiyon (Denklem 2.16) çözümü ile elde edilmektedir ve sonucu diyagram olarak Şekil 2.32'de verilmektedir. Yöntemde, kolonların limit denge durumuna ulaştığında, kolon deformasyonlarının sabit hacimde ilerlediği kabul edilmektedir. Belirlenen iyileştirme oranı vasıtası ile iyileştirilmiş zeminde oluşacak oturma hesaplanabilir (Denklem 2.17).

$$\beta = f\left(a_s, \phi'_c, v'_s, \frac{q_0}{M_s}\right) \quad (2.16)$$

$$S_t = \beta H(1 - v_s^2) \left[1 - \frac{v_s^2}{1 - v_s}\right] \frac{q_0}{M_s} \quad (2.17)$$

- a_r : Alan oranı,
- ϕ'_c : Taş kolon malzemesinin kayma direnci açısı,
- v'_s : Zeminin poisson oranı,
- q_0 : Uniform yayılı sürşarj yükü,
- M_s : Zeminin ödometre modülü,
- H : Sıkışabilir tabaka kalınlığıdır.



Şekil 2.32: Oturma iyileştirme oranı – Granüler duvar yöntemi (Van Impe ve De Beer, 1983).

2.4.3.5 Sayısal Analiz Metodu

Karmaşık problemlere sahip geoteknik mühendisliğinde farklı yaklaşımlar ile problemleri daha basit hale getirerek ideal çözümlerin yapılması amacıyla nümerik yöntemler metodu geliştirilmiştir. Geçmişte yapılan kabuller ile çok basit hale getirilen geometriler için kurulan denklemler el ile yapılabilmekte iken çözüm hassasiyetlerinin yeterli olmaması nedeni ile daha karmaşık geometriler ve çok sayıda eleman için oluşturulan denklemlerin çözümü için bilgisayarlar kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojisinin gelişimi ile birlikte denge, uygunluk, malzeme davranışı ve sınır koşullarını daha gerçekçi tanımlayabilen ve ideal çözüme daha da yaklaşan programlar geliştirilmiştir.

Barksdale ve Bachus (1983) yumuşak bir zemin içerisinde oluşturulan taş kolon tasarım diyagramlarını elde etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Bu çalışmada lineer olmayan zemin davranış modeli kullanılmış, sistem parametrelerinin değiştirilmesi ile farklı diyagramlar geliştirmişlerdir. Böylece o yıllarda sadece araştırmalarda kullanılan sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarını pratikte mühendisler tarafından kullanılabilir hale getirmişlerdir.

Son yıllarda tasarımda geleneksel tasarım diyagramlarını kullanmaktan ziyade sonlu elemanlar yöntemi ile modeli simüle etmek pratikte daha yaygın bir hal almıştır. Sonlu elemanlar yöntemi malzeme ve yöntem başlığı altında daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.5 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Taş kolonlar ile ilgili literatürde birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Geçmişte tekil kolon davranışı ve bu davranışın modellenmesi hakkında, Hughes ve Withers (1974), Priebe (1976), Balaam ve Booker (1981), Barksdale ve Bachus (1983), Poorooshasb ve Meyerhof (1997) gibi önemli araştırmacılar çalışmalar yapmıştır. Bu tez çalışmasına referans olarak 5 adet çalışma seçilmiştir. Çalışma konuları kısaca aşağıda verilmiş, detayları sonraki bölümlerde yer almaktadır.

1. Göçme mekanizmaları: Muir Wood, D., Hu, W. ve Nash, D. F. T. tarafından 2000 yılında sunulan makalede, araştırmacılar yük altında tekil kolon modellemesinin sadece göbeklenme davranışı göstereceğini ancak kolon grupları halinde modelleme sonucunda kolonun geometrisine (uzunluk, çap, mesafe vb.), lokasyonuna ve zemin özelliklerine bağlı farklı tipte deformasyon mekanizmalarının elde edilebileceğini yapmış oldukları model deney ve sayısal analizler ile sunmuşlardır.
2. Metot 1: S.A. Tan ve Khine Khine Oo tarafından 2005 yılında sunulan makalede, üç boyutlu bir problem olan taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminin yük altındaki davranışını 2 boyutlu düzlem deformasyon modelde oluşturabilmek için permeabilite ve rijitlik dönüşümleri yer almaktadır.
3. Metot 2: S. A. Tan, S. Tjahyono, ve K. K. Oo, 2008 yılında Metot 1 dönüşümleri sonucunda elde edilen permeabilite ve rijitlik parametrelerinin konsolidasyon süresini farklı tanımladığını ve özellikle uzun dönem deplasmanları hesaplamak için yeterli olmadığını, bunun yerine kolon geometrisinde yapılacak dönüşümler sonucunda daha uygun sonuçlar elde edilebileceğini vaka verileri kullanılarak yapılan sayısal analizler ile göstermişleridir.
4. Metot 3: K.S. Ng, S.A. Tan tarafından 2013 yılında yapılan çalışmalar sonucunda zemin ve kolondan meydana gelen kompozit malzemenin daha kolay modellenebilmesi amacıyla iyileştirilmiş bölge için homojenleştirilmiş tek bir zemin tanımlanabileceğini belirtilerek sayısal ve vaka analizleri ile doğrulanmıştır.
5. Thomas Michael Weber tarafından 2007 yılında hazırlanan doktora tezinde, santrifüj içerisinde imal edilecek model üzerinde oluşturulacak merkezkaç kuvveti etkisi ile normal yer çekimi ivmesi altındaki zeminlerden daha yüksek gerilme elde ederek model ölçeklendirmesinin yapılabileceğini laboratuvar çalışmaları ile sunmuştur.

İncelenen çalışmalardan her biri bu teze referans olması bakımından son derece önemlidir. Çünkü Thomas Michael Weber tarafından kurulan santrifüj düzeneğinin sayısal modellerinin oluşturulmasında S. A. Tan, S. Tjahyono, K.S. Ng, ve K. K. Oo tarafından yapılan dönüşümler kullanılmış ve kolon gruplarında meydana gelen deplasman profilleri Muir Wood, D., Hu, W. ve Nash, D. F. T. çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır.

2.5.1 Taş Kolonlu Temelerde Grup Etkisi: Model Testleri (Wood vd. 1999).

Temel yüklerine maruz kalan kil içerisinde imal edilen taş kolonların davranışlarının irdelenmesi için model testleri yapılmıştır. Model deneylerinde, taş kolonların deformasyon şekillerinin ve kolonların yükü çevredeki zemine aktarma mekanizmasının belirlenebilmesi için içten çıkarma/kazıma tekniği kullanılmıştır. Bu testlerde, taş kolon çapının, uzunluğunun ve aralığının değişim etkisi irdelenmiştir.

Tek kolon davranışı, klasik testler ile Hughes ve Withers (1974) tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, silindirik bir hazne içerisinde bulunan kil birim içerisinde imal edilen taş kolonun yüklenmesi sonucunda kolonda meydana gelen deformasyonları gözlemek için laboratuvar radyografisi kullanılmış ve kolonun göbeklenme deformasyonunun, yaklaşık dört kolon çapına ulaştığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada tekil taş kolon davranışı incelenmiş olmasına karşın uygulamada kolon grupları kullanılmaktadır. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda, rijit bir temel altında imal edilen taş kolon grubunda; çap, aralık ve uzunluk ile yük aktarma mekanizmaları arasındaki etki irdelenmiştir. Model deneyleri normal yerçekimi altında yapıldığı için gerilme davranışları bakımından yeterli değildir. Aynı zamanda herhangi bir ölçeklendirme yapılmadığından dolayı sadece kolon gruplarının genel davranışını tanımlamak için kullanılabilir.

2.5.1.1 Model Testleri

Testlerde kullanılan zemine ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Test başlangıcında kil birimin drenajsız mukavemetinin (c) belirlenmesi için laboratuvarda Vane deneyi yapılmıştır. Genel olarak 300 mm çapındaki tank içerisine yerleştirilen kaolin kili maksimum $\sigma_v=120$ kPa altında konsolide edilmiş sonrasında gerilme değeri 30 kPa'ya düşürülerek şişmesine izin verilmiştir. Belirlenen konsolidasyon geçmişi oluşturulduktan sonra taş kolon imalatı kullanılan burğu aleti sayesinde yerdeğiştirme tekniği ile yapılmıştır.

Tablo 2.3: Model testlerde kullanılan zemin özellikleri (Wood 1999).

Kaolin	Likit Limit	0.63
	Plastik Limit	0.36
	Kil Oranı <math><2\mu\text{m}</math>	%60
	Drenajlı Kayma Mukavemeti Açısı	23°
İnce Kum	Baskın Mineral	Kuvars
	Ortalama Dane Çapı	0.21 mm
	Üniformluk Katsayısı D_{50}/D_{10}	1.2
	Maksimum Boşluk Oranı	0.84
	Minimum Boşluk Oranı	0.51
	Kritik Durum Kayma Mukavemeti Açısı	~ 30°

Yükleme 100 mm çapında rijit dairesel temel kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüklem tamamlandıktan zemin birimler içerisinde oluşturulan taş kolonun granüler malzemesi boşaltılıp yerine alçı dökülmüş ve kil zeminin temizlenmesi/kazılması ile dökülen alçılar açığa çıkarılarak yüklem sonucunda, kolonlarda oluşan deformasyonlar net bir şekilde gözlenebilmiştir (Şekil 3.17).

Kolon geometri etkisinin incelenmesi için değiştirilen parametreler;

r_0 : yüklem temelini yarıçapı,

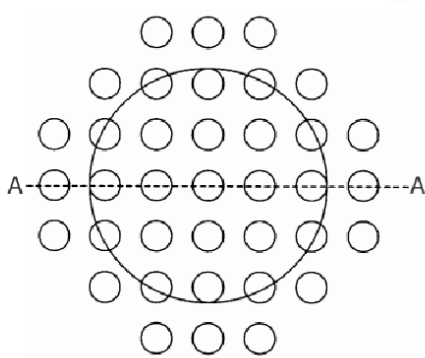
L : Kolon uzunluğu,

r_c : Kolon yarıçapı,

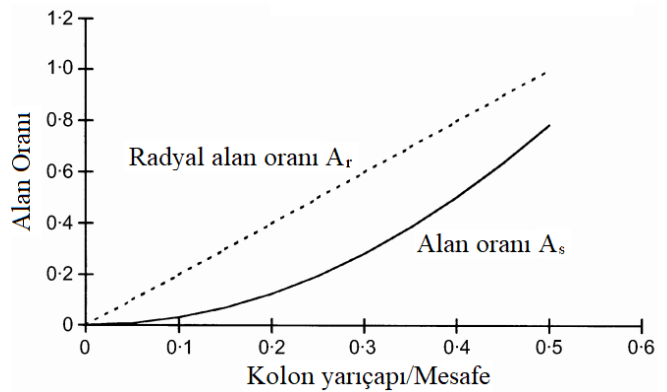
s : Kolonların merkezden merkeze mesafesi

A_s : taş kolon ile iyileştirilen alanın, birim hücre alanına oranıdır.

$$A_s = \pi \left(\frac{r_c}{s} \right)^2 \quad (3.18)$$



(a)

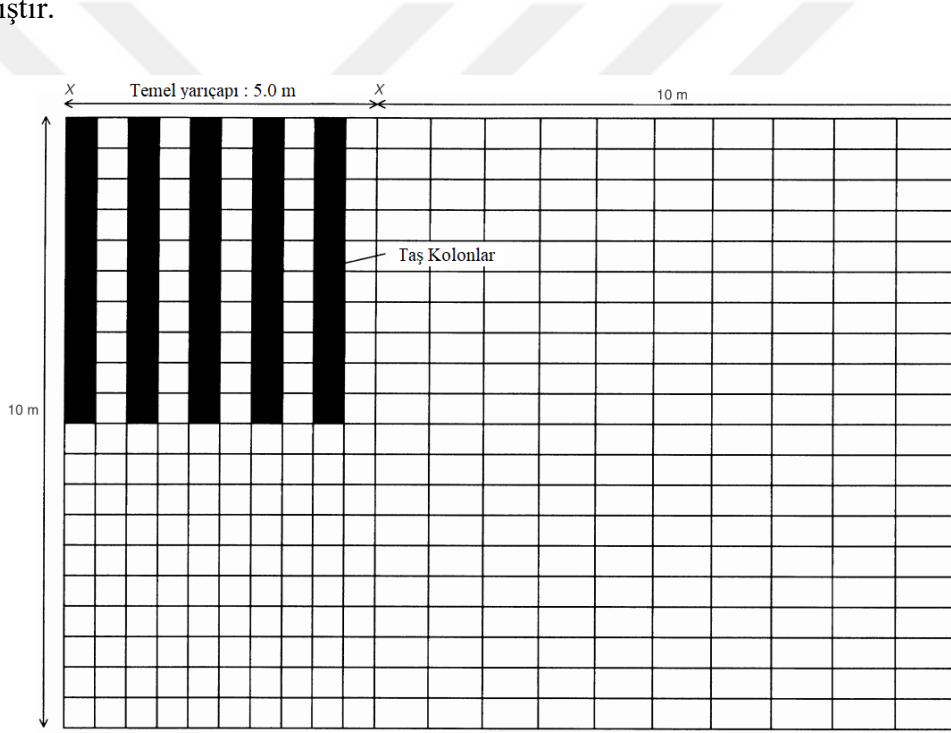


(b)

Şekil 2.33: Alan oranı karşılaştırması : a-taş kolon yerleşimi, b-Alan oranının sayısal karşılaştırılması.

2.5.1.2 Sayısal Analiz

Yapılan çalışmanın esas amacı fiziksel modelleme üzerine olmasına karşın elde edilen sonuçların desteklenmesi ve tahmin oluşturulabilmesi amacıyla, sonlu farklar metodu ile çalışan FLAC programı kullanılarak sayısal analizlerde yapılmıştır (Itasca, 1996). Sayısal analizler ile deformasyon mekanizmaları ile kil ve kolon arasındaki gerilme dağılımlarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Sayısal model oluşturulurken, düzlem deformasyon modelde oluşturulan dikdörtgen şekil ile zemin tanımlanarak uygun bölgelerin özellikleri değiştirilip taş kolonlar oluşturulmuştur (Şekil 3.17). Yükleme aşamasında, aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmaması için model tamamen drenajlı tanımlanmıştır. Deplasmanlar belirlenen sabit hızda etkilenmiştir.



Şekil 2.34: Hazırlanan sayısal analiz modeli (Wood 1999).

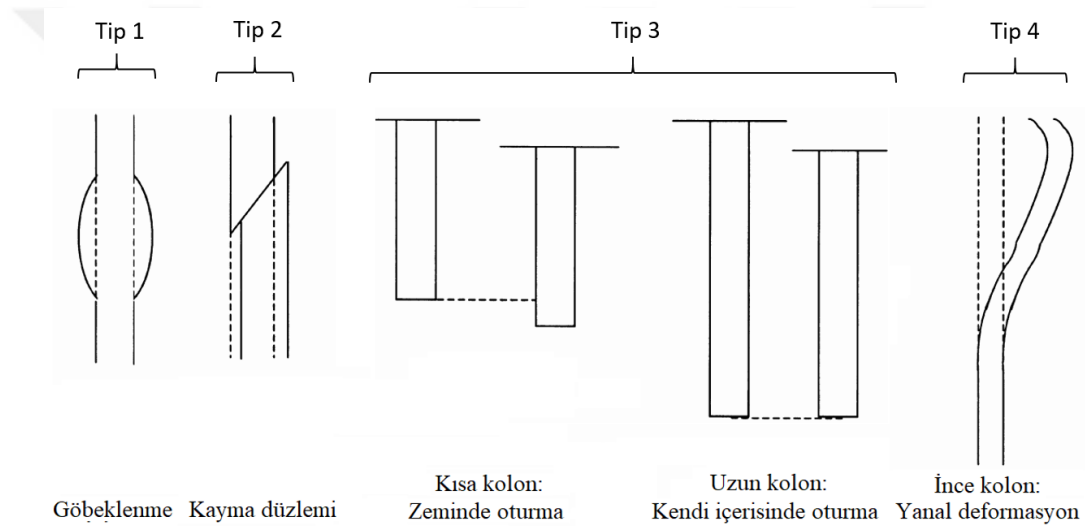
3 boyutlu kolon yerleşimi ve dairesel temelden oluşan fiziksel model ile düzlem deformasyonda oluşturulan sayısal model arasında farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıkların tanımlanabilmesi için fiziksel model sonuçları kullanılmış ve etkileşim derecesinin elde edebilmesi için düzlem deformasyonda kullanılan alan oranının fiziksel modelde kullanılanıdan yüksek olması gerektiği bulunmuştur. Şekil 2.33-a'da şematik olarak gösterilen kolon yerleşiminde belirli bir alana sahip kolonlar düzlem deformasyonda sonsuz uzunluktaki elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle düzlem deformasyonda oluşturulan modeldeki radyal alan oranı Denklem 2.18'de

yapılan hesapla (A_r) daha yüksek elde edilmektedir. A_r ile A_s arasında yapılan kıyaslama Şekil 2.33-b'de gösterilmektedir.

$$A_r = 2 \left(\frac{r_c}{s} \right) \quad (2.18)$$

2.5.1.3 Sonuçlar

Taş kolonların geometrisine bağlı olarak farklı deformasyon biçimleri görülmektedir. Elde edilen deformasyon biçimlerine ait şematik çizimler Şekil 2.35 ve çıkarılan taş kolon fotoğrafları Şekil 2.36'da verilmektedir.

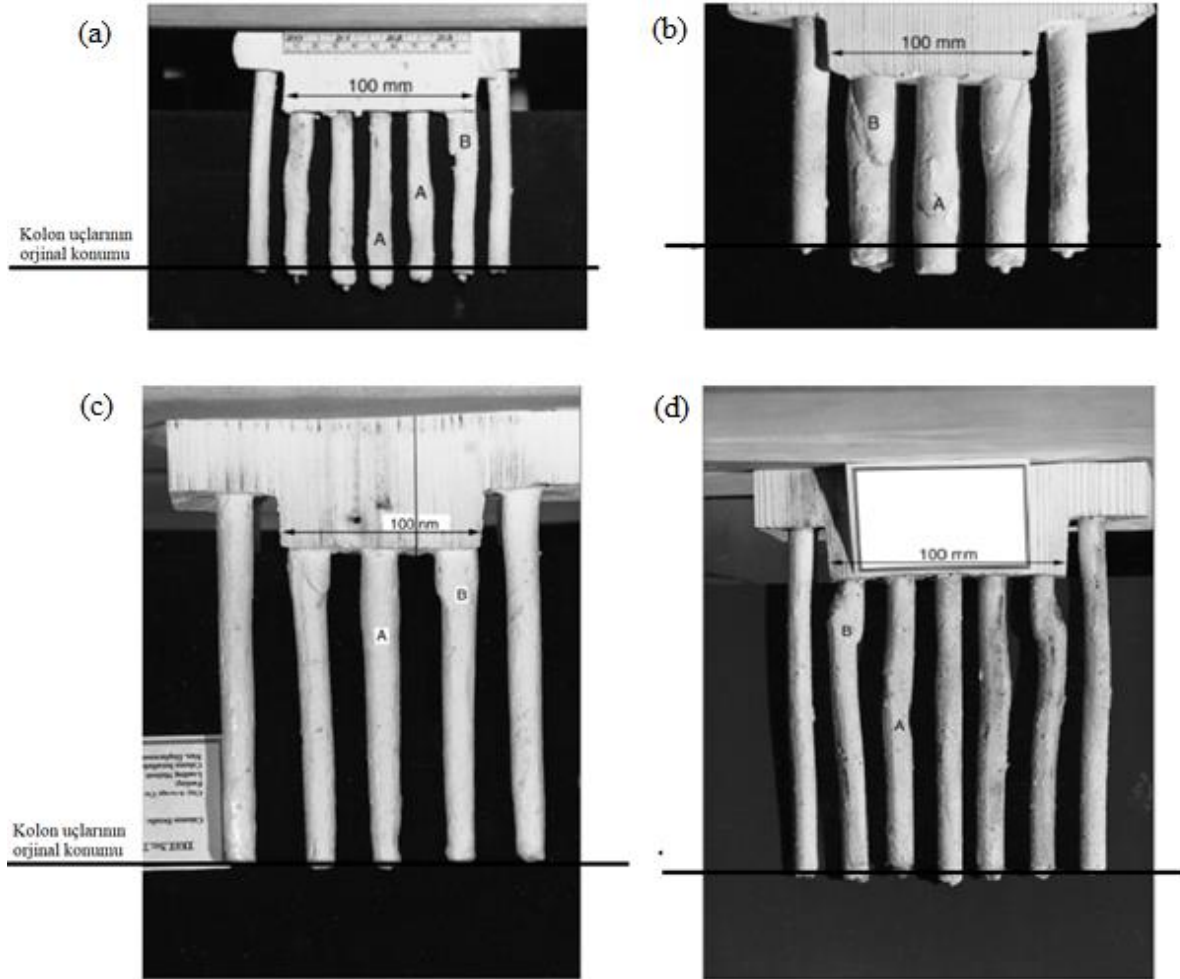


Şekil 2.35: Gözlenen deformasyon mekanizmaları (Wood 1999).

1. Komşu kolonlar tarafından radyal genişlemesine yeterli direnç sağlanamayan yüklü kolonda, gerilmelerin kolon içerisinde artması halinde kalıcı bir deformasyon hareketi olan göbeklenme gözlenir.
2. Düşük yanal dirence sahip bir kolonun yüksek gerilme altında kalması halinde, yük aktarımı için uygun duruma ulaşmadan kolonda kayma düzlemi meydana gelebilir. Böyle bir kayma düzlemi genel göçme mekanizmasından kaynaklanan deformasyonlar veya kolon üzerinde oluşan çift yönlü gerilmelere bağlanabilir.
3. Kolon boyunun, uygulanan yükün önemli bir kısmını kolon tabanına aktaracak kadar kısa olması halinde gerilmeler kolon ucu altındaki zemine aktarılır. Şekil 2.36-a ve b'deki kolonlarda yükün kil birime aktarıldığı görülmektedir. Bu durum, taş kolonunun

bir kazık gibi davranmasına örnektir. Şekil 2.36 c'deki uzun kolonlarda ise yükün kolon içerisinde sönmülenererek düşük oranda kil birime aktarıldığı görülmektedir.

4. Taş kolonun aksenal yük altında direnç göstermesi amaçlanmıştır ancak yanal yüklemeye karşı dirençli olması beklenmemektedir. Şekil 2.35'te Tip 4 mekanizmasında görüldüğü üzere kolon merkezinin yer değişimi, temel altındaki kilde meydana gelen yanal hareketlerin bir göstergesidir. Bu deformasyon biçiminde kolonlar, yanal yüklü kazıklar gibi hareket etmektedir.

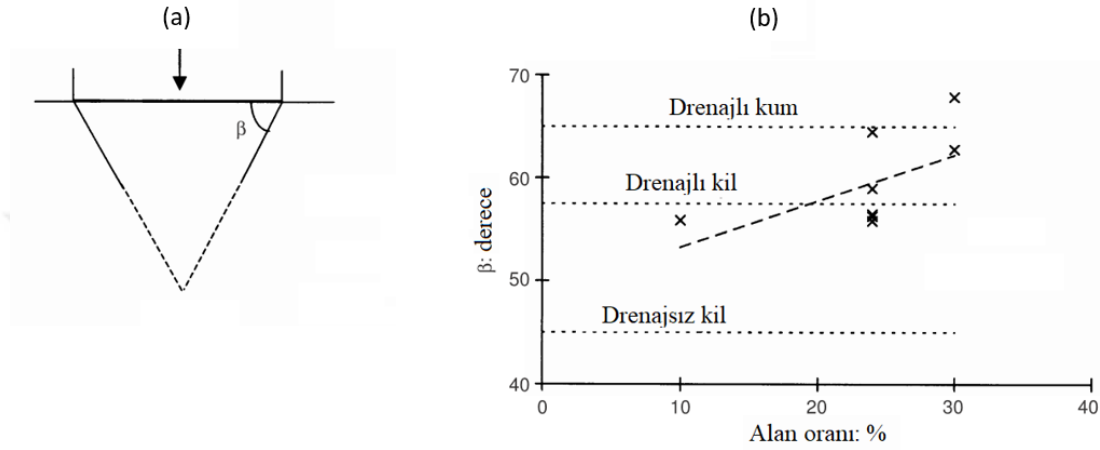


Şekil 2.36: Kolonlarda gözlenen deformasyon fotoğrafları, a – $L/r_0=2$, $A_s=\%24$, $r_c=5.5$ mm, b – $L/r_0=2$, $A_s=\%30$, $r_c=8.75$ mm, c – $L/r_0=3.4$, $A_s=\%24$, $r_c=8.75$ mm, d – $L/r_0=3.2$, $A_s=\%24$, $r_c=5.5$ mm.

Kayma düzlemlerinin veya göbekenmenin oluşum yerleri ile ilgili yapılan gözlem sonuçları, iyileştirilmiş zeminde temel etki alanının tahmini için kullanılabilir. Kama şeklindeki bu bölgenin " β " yanal açısı, A_s arttıkça artış gösterir (Şekil 2.37-a). Düzlem deformasyon ve aksenal simetrik modeller arasındaki farklar bir kenara bırakılırsa, bu açı zemin birimin ortalama kayma açısı " $\bar{\phi}$ " ile bağlantılıdır (Denklem 2.19).

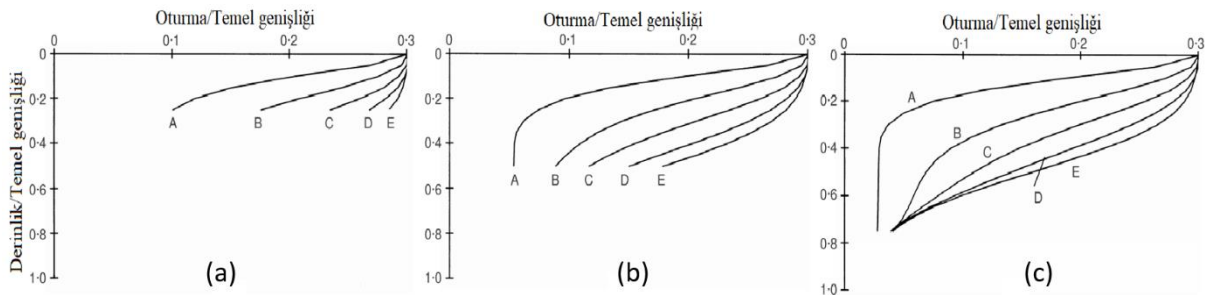
$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\bar{\phi}}{2} \quad (2.19)$$

Deneysel sonuçlar düzensizdir, ancak $\bar{\phi}$ değeri $A_s = \%30$ için yaklaşık 41° mertebesinde elde edilmiştir. $\%10$ ile $\%24$ alan oranlarında ise kilin drenajlı kayma açısına yakın ve 23° olarak elde edildiği görülmüştür (Şekil 2.37-b).



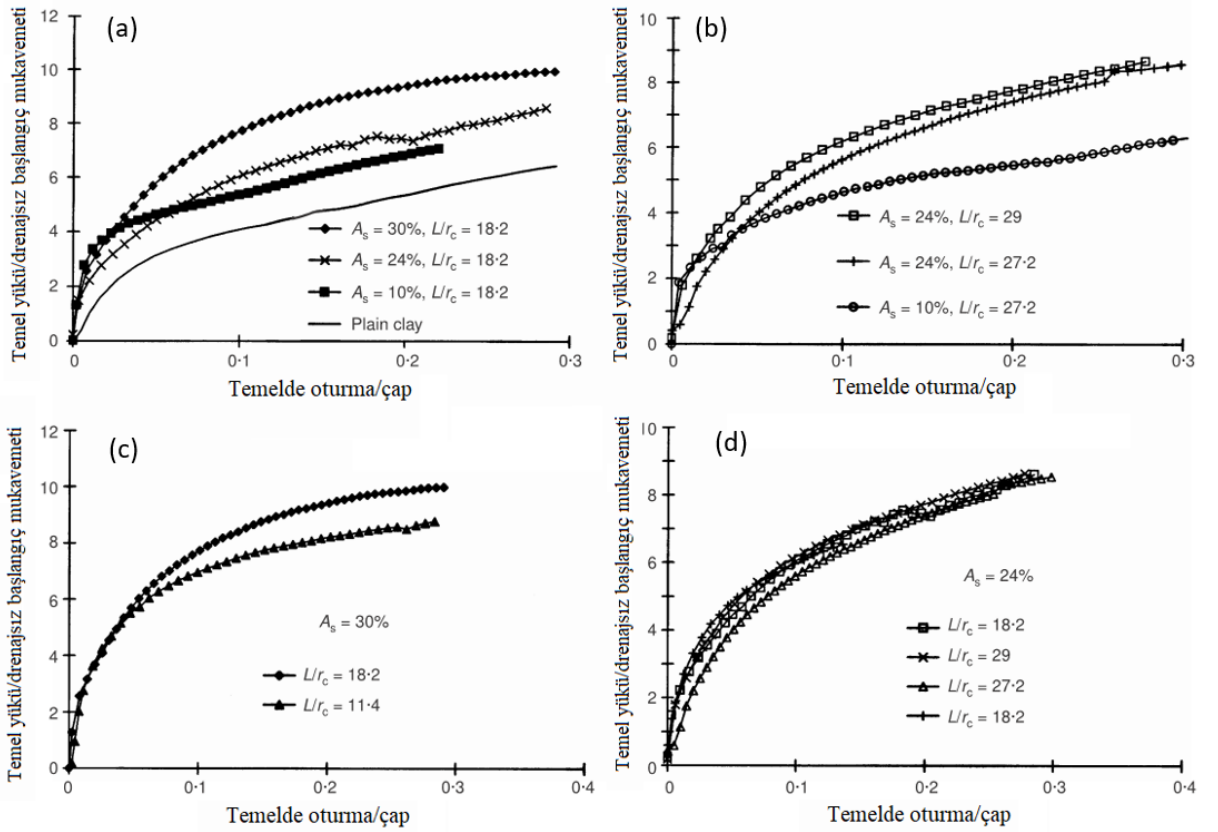
Şekil 2.37: a – Rijit temel altında oluşan kama; b – β açısının alan oranıyla değişimi.

Fiziksel modele paralel olan sayısal analiz sonuçlarına göre, farklı uzunluğa sahip taş kolonlar için elde edilen düşey deformasyonlar Şekil 2.38’de verilmektedir. Elde edilen eğimler düşey gerilmelerin değişimine bağlıdır. Temel kenarında bulunan A kolonunda gerilmeler zemin yüzeyinde son derece yüksektir. Temel ortasında bulunan E ile D kolonlarında ise maksimum gerilmeler azalmaktadır. Uzun kolonlarda ise uygulanan yük kolonların sıkışması ile sönümlenmektedir (Şekil 2.38-c).



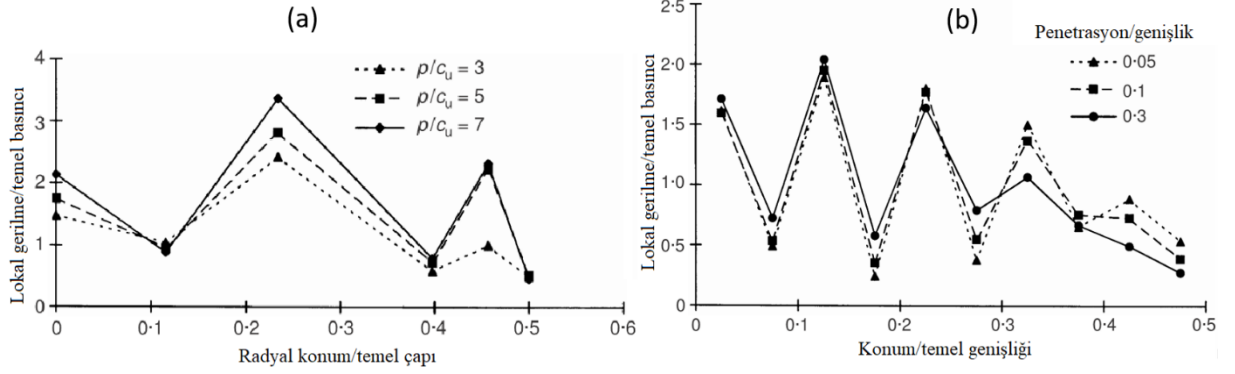
Şekil 2.38: Sayısal analiz sonucunda kolonlarda oluşan oturma profili, Kolon uzunluğu/temel genişliği: a – 0.25; b – 0.50; c – 0.75. Kolon aralığı/temel genişliği: A – 0.425; B – 0.325; C – 0.225; D – 0.125; E – merkezde.

Sayısal analizden elde edilen alan oranı ile kolon boyuna bağlı değişimler incelenmiştir (Şekil 2.39). (a) ve (c) görselleri kısa kolonlara, (b) ve (d) görsellerinde ise uzun kolonlara ait sonuçlar yer almaktadır. Alan oranının artmasına bağlı olarak mukavemet ve rijitlik artarak beklenen etki görülmektedir (Şekil 2.39-a ve b). Önceki bölümlerde de açıklandığı gibi kolon uzunluğunun etkisi belirli bir boya kadar geçerlidir (Şekil 2.39-c). Belirli bir uzunluktan sonra kolon boyunun arttırılmasının etkisi kalmamaktadır (2.39-d). Genel deformasyon mekanizmasının alan oranına bağımlılığından yola çıkılarak Şekil 2.37’de verilen kamanın derinleşmesi halinde, kritik uzunluğunda artması gerektiği söylenebilir.



Şekil 2.39: Model temelleri için normalize edilmiş yük-oturma sonuçları.

Şekil 2.40-a'da %24 alan oranı için minyatür basınç detektörleri ile ölçülen düşey gerilmelerin radyal dağılımı gösterilmiştir. Taş kolonlarda yüksek, kolonlar arasında kalan kil zeminde ise düşük gerilme değerleri elde edilmiştir. En yüksek gerilme değerleri merkezde bulunan ve komşu kolonlar tarafından karşı direnç etkisi altındaki kolonlarda görülürken temel kenarında yer alan kolonlarda daha düşük mertebelerde elde edilmiştir. Farklı kolon sayılarına sahip sayısal analiz sonuçlarında da benzer durum görülmektedir (Şekil 2.40-b).



Şekil 2.40: Gerilme dağılımı, a – fiziksel model, b – sayısal model.

2.5.2 Taş Kolonların Sonlu Elemanlar İle Modellemesi: Bir Vaka (Tan vd. 2005)

Çalışmanın amacı, taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerin iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesini sağlamaktır. Sonlu elemanlar yönteminde tekil taş kolonun analizi için aksel simetrik birim hücre modeli kullanılabilir. Bununla birlikte, kolon gruplarını iki boyutlu modelleyebilmek için eşdeğer düzlem deformasyon birim hücresine dönüştürülmesi gerekmektedir. Önerilen dönüşüm tasarısı, Han & Ye (2001) tarafından yapılan, basitleştirilmiş analitik yöntemler ile birim hücrenin bileşik rijitliği ve alan oranına ilişkin prensiplere dayanmaktadır.

2.5.2.1 Taş Kolon Birim Hücresi

Barron'un drenaj kuyusu ve radyal yönde konsolidasyon teorisine dayanarak taş kolon modeli, aksel simetrik birim hücre modeli olarak idealize edilebilir. Birim hücre prensibi, zemin ile çevrili dairesel hücrenin merkezinde bulunan taş kolondan oluşmaktadır. Taş kolon ve çevresinde bulunan zemin için alan oranı (a_s) Denklem 2.20'de verildiği gibi ifade edilebilir. Taş kolon ve düzlemindeki zeminin düşey doğrultudaki hacimsel sıkışma katsayısı ise Denklem 2.21 ile hesaplanabilir.

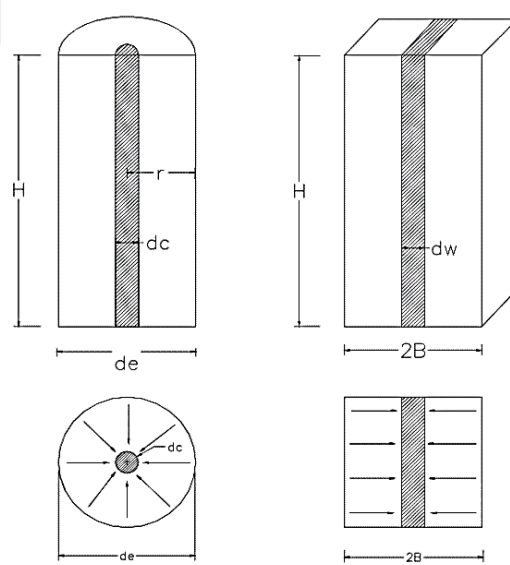
$$a_s = A_c / (A_c + A_s) \quad (2.20)$$

$$m_v = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E(1 - \nu)} \quad (2.21)$$

Burada E=elastisite modül değeri ve ν =poisson oranıdır.

2.5.2.2 Taş Kolonun Sayısal Analizi

Taş kolon ile iyileştirilmiş zeminin iki boyutlu modellenmesi için, eksenel simetrik model birim hücrenin eşdeğeri düzlem deformasyon model birim hücresine dönüştürülmelidir. Taş kolon birim hücresinin en önemli özelliği (zemin+kolon) kompozit malzeme davranışdır. Gerçekten, zeminin kompozit özelliğinin eksenel simetrik ve düzlem deformasyon durumlarında aynı olduğu yani aynı kompozit rijitlik değerine sahip olduğu varsayılır. Taş kolon ve düzlemindeki zemin birim farklı malzeme özelliklerine ve rijitliğe sahiptir. Düzlem deformasyon modelde hesaplanacak alan oranı, taş kolon çapının ve düzlem deformasyon durumunda taş duvar genişliği ile aynı olduğu varsayıldığı için eksenel simetrik modeldekinden farklı olacaktır. Eksenel simetrik modelde, taş kolon diziliminin geometriye bağlı sabitleri göz önüne alınmalıdır. Ancak modelleme kolaylığı bakımından düzlem deformasyon modelde oluşturulacak taş duvar kalınlığının, eksenel simetrik modeldeki kolon çapına eşit alınması kabul edilebilir. Yapılan kabul neticesinde alan oranının iki model arasında fark meydana getireceği Şekil 2.41’de açıkça gösterilmiştir.



Şekil 2.41: Birim hücrenin eksenel simetrik modelden eşdeğer düzlem deformasyona modele dönüşümü.

Eksenel simetrik birim hücrenin kompozit rijitliği, taş kolon rijitliği ve düzlemindeki zeminin rijitliği ile alan oranına bağlı olarak Denklem 2.22 ile hesaplanır.

$$E_{composite} = E_{col,ax} \times a_{s,ax} + E_{soil,ax} \times (1 - a_{s,ax}) \quad (2.22)$$

$a_s = A_{col}/(A_{col} + A_{soil})$; alan oranı

$E_{composite}$; birim hücredeki kompozit malzemenin rijitliği

$E_{col,ax}$; aksel simetrik modelde taş kolon malzemesinin rijitliği

$E_{soil,ax}$; aksel simetrik birim hücrede çevre zemin malzemesinin rijitliği

Elde edilen rijitlik değeri, taş kolonlar ile iyileştirilmiş zemin kompozitinin rijitliğini temsil etmektedir. Önerilen rijitlik dönüşümlerinde, aksel simetrik ve düzlem deformasyon modeli için kompozit rijitlik eşit olmalıdır. İlâveten alan oranı düzlem deformasyon birim hücre geometrisi kullanılarak yeniden hesaplanmalıdır. Düzlem deformasyon birim hücre modelinde taş kolon yerine tanımlanan duvarda ve düzlemindeki zeminde gerilme koşulları değişir. Bu nedenle her iki zeminde rijitliğin dönüştürülmesi gerekmektedir. Birim hücre içerisindeki zeminin rijitliği sabit tutulurken taş duvar rijitliği Denklem 2.23 ile yeniden hesaplanmalıdır.

$$E_{composite} = E_{col,pl} \times a_{s,pl} + E_{soil,pl} \times (1 - a_{s,pl}) \quad (2.23)$$

$E_{col,pl}$; düzlem deformasyon modelde taş kolon malzemesinin rijitliği

$E_{soil,pl}$; düzlem deformasyon birim hücrede çevre zemin malzemesinin rijitliği

Hird vd. (1992) tarafından, aksel simetrik ve eşdeğer düzlem deformasyon modeli birim hücrelerindeki ortalama konsolidasyon derecesinin eşit olacağı kabul edilmiştir (Denk. 2.24).

$$\bar{U}_{hpl} = \bar{U}_{hax} \quad (2.24)$$

Önerilen dönüşüm yönteminde, aksel simetrik ve düzlem deformasyon modellerde, iyileştirilmiş zeminin aynı alanda temsil edildiği kabul edilmektedir. Bu nedenle, taş kolon düzlem deformasyon model için eşdeğer permeabilite Denklem 2.25 ile hesaplanabilir.

$$\frac{T'_{hpl}}{F(N)_{pl}} = \frac{T'_{hax}}{F(N)_{ax}} \quad (2.25)$$

Modellerin, aynı geometriyi ve konsolidasyon derecesini temsil ettiği dikkate alındığında daha da basitleştirilebilir (Denklem 2.26).

$$\frac{c'_{hpl}}{F(N)_{pl}} = \frac{c'_{hax}}{F(N)_{ax}} \quad (2.26)$$

Eksenel simetrik ve eşdeğer düzlem deformasyon birim hücreleri için alan oranının yanı sıra, kolon ve zemin için hacimsel sıkışma katsayısı dönüştürme yönteminin dâhil edilmesi ile permeabilite dönüşümü Denklem 2.27 halini alır.

$$\frac{k_{hpl}}{k_{hax}} = \frac{F(N)_{pl}}{F(N)_{ax}} \left[\frac{m_{v,s}m_{v,c}(1-a_s)}{m_{v,c}(1-a_s) + m_{v,s}a_s} \right]_{pl} \left[\frac{m_{v,c}(1-a_s) + m_{v,s}a_s}{m_{v,s}m_{v,c}(1-a_s)} \right]_{ax} \frac{B^2}{R^2} \quad (2.27)$$

$$F(N) = [N^2/(N^2 - 1)]\ln(N) - (3N^2 - 1)/(4N^2) \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'de eksenel simetrik model için $N = d_e/d_c$ ve düzlem deformasyon model için $N = 2B/d_w$ olarak alınır.

Zeminin, özellikle yumuşak zeminlerin davranışı, doğada bazen doğrusal değildir. Bu nedenle, eksenel simetrik modelin eşdeğer düzlem deformasyon modele dönüştürülmesi için önerilen yöntemin doğrusal olmayan zemin modelleri için doğrulanması gerekmektedir. Doğrulama için, hem eksenel simetrik hem de düzlem deformasyon birim hücreleri için sonlu eleman analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Gelişmiş zemin modelleri zeminin doğrusal olmayan davranışını ve gerilmeye bağlı davranışını göz önünde bulundurduğundan, eksenel simetrik durumdan düzlem deformasyon durumuna dönüşümde zemin rijitlik düzeltmesi dikkate alınmalıdır. Alan küçültme oranının, düzlem deformasyon modelde yumuşak zemin rijitliğinin belirlenmesinde etkisi olduğu düşünülmektedir. Eksenel simetrik modelin düzlem deformasyon modele dönüşümünde çevre zemin için kullanılacak alan azaltma oranının, alan oranlarına bağlı olarak Denklem 2.29'daki şekilde tanımlanabilir.

$$A_{red} = \frac{(1-a_s)_{pl}}{(1-a_s)_{ax}} \quad (2.29)$$

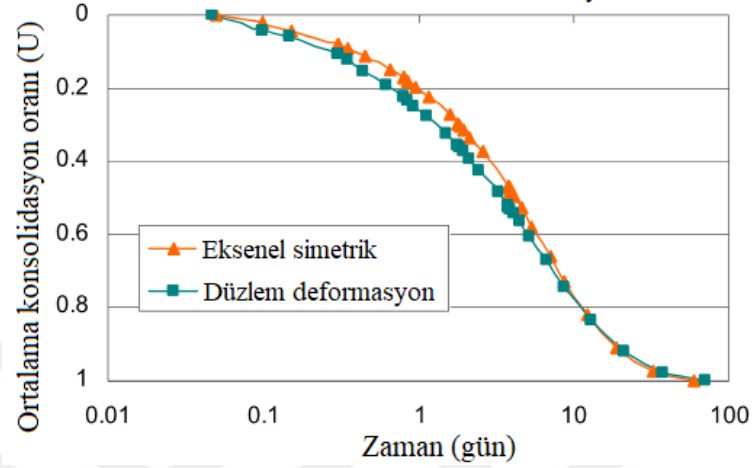
Hesaplanan alan azaltma faktörünün dâhil edilmesi ile düzlem deformasyon model için eşdeğer zemin rijitliği Denklem 2.30 ile hesaplanabilir.

$$E_{soil,pl} = A_{red} \times E_{soil,ax} \quad (2.30)$$

2.5.2.3 Birim Hücrenin Sonlu Elemanlar Analizi

Hazırlanan modellerde eşit düşey gerilme teorisinin sağlanması için sert bir plaka üzerine yük uygulanmıştır. Plaxis ile sonlu elemanlar analiz modelleri kurulurken belirlenen rijitlik ve permeabilite dönüşüm yöntemleri kullanılmıştır. Eksenel simetrik model ile eşdeğer düzlem

deformasyon modeller için yapılan konsolidasyon hızı karşılaştırması Şekil 2.42'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, düzlem deformasyon model için önerilen dönüşümlerin aksel simetrik model ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.42: Ortalama konsolidasyon oranının karşılaştırılması.

Yapılan bir diğer analizde, gelişmiş zemin modellerinde taş kolon performansının izlenmesi amacıyla, kolon çevresinde bulunan zemini temsil etmek için Yumuşak Zemin Modeli – SS (Cam-Clay benzeri) kullanılmıştır. Gelişmiş zemin modeli için alan azaltma oranı dönüşüm yöntemleri dikkate alınarak, modifiye sıkışma indeksi (λ^*) ve modifiye şişme indeksi (K^*) gibi parametreler için dönüşümler yapılmıştır.

$$\lambda^* = \frac{C_c}{\ln 10(1+e)} = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \quad (2.31)$$

$$K^* = \frac{\lambda^*}{5} \quad (2.32)$$

$$E_{oed} \approx \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_y}{C_c} \quad (2.33)$$

$$E_{oed} \approx \frac{(1+\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (2.34)$$

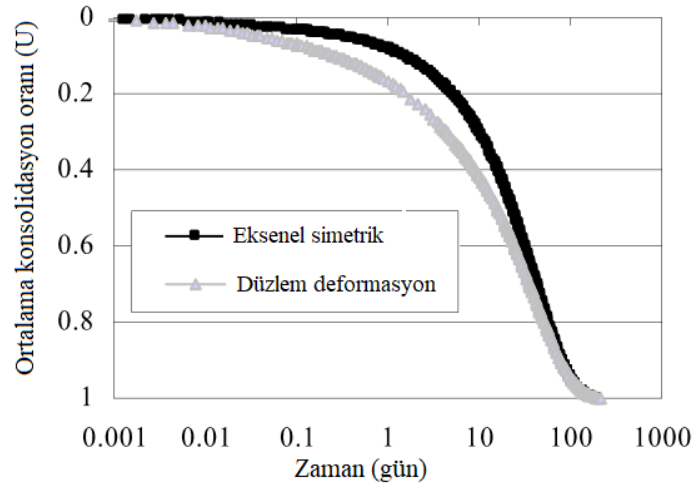
σ'_y : Zemindeki ortalama düşey gerilme

e_0 : Başlangıç boşluk oranı

C_c : Tek yönlü sıkışma parametresi

ν : Poisson oranıdır.

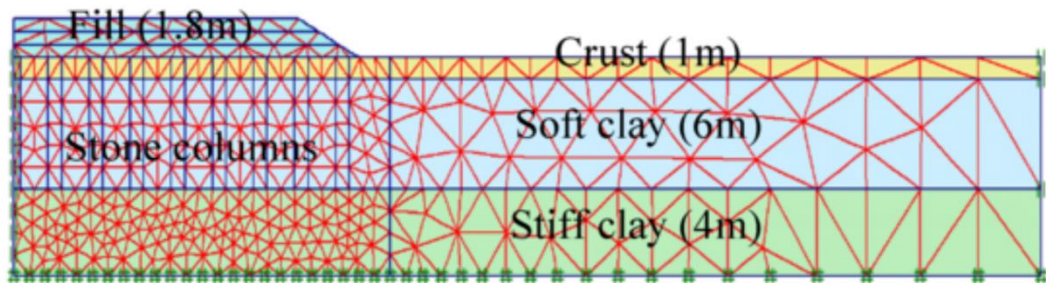
Gelişmiş zemin modeli kullanılarak yapılan analizler sonucunda aksel simetrik ve eşdeğer düzlem deformasyon modelleri için konsolidasyon hızları karşılaştırılmıştır (Şekil 2.43).



Şekil 2.43: Gelişmiş zemin modelleri kullanılarak elde edilen ortalama konsolidasyon oranının karşılaştırılması.

2.5.2.4 Örnek Vaka - New Pantai Otoyol Dolgusunda Taş Kolon Çalışması

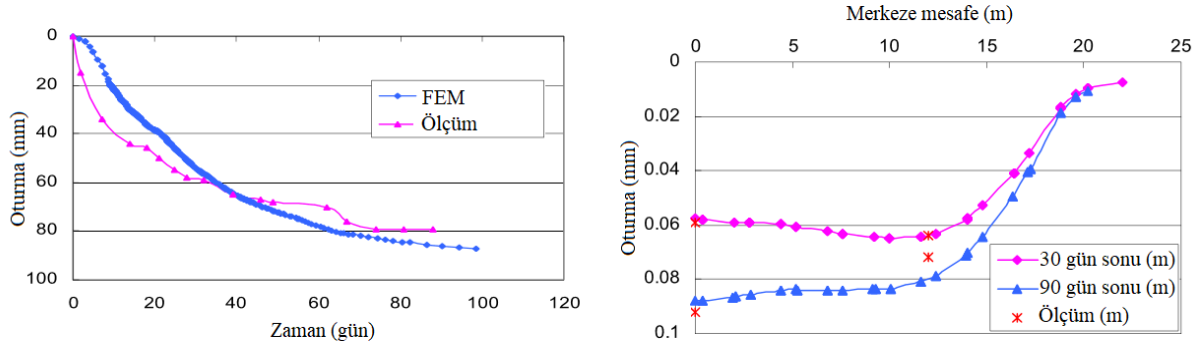
Malezya'daki New Pantai otoyolu, Penchala Toll Plaza projesi test dolgularında, yumuşak kil birimlerde ağır ulaşım araçları altında yüksek oturma değerlerine ulaştığı görülmüştür. Yumuşak kil birimin iyileştirilmesi için en uygun yöntem olarak taş kolon imalatı belirlenmiş ve sonlu elemanlar modelleri kullanılarak yapılan geri analizler ile iyileştirilmiş zeminde oluşan deplasmanlar hesaplanmıştır. Test dolgusu ve taş kolon yerleşimi simetriktir. Bu nedenle, dolgunun sadece yarısı modellenmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 2.44'te verilmiştir.



Şekil 2.44: Dolgunun sayısal modeli.

Kil için yumuşak zemin modeli, diğer zeminler için ise Mohr-Coulomb modeli kullanılmıştır. Dolgu altına imal edilen taş kolonlar, eşdeğer düzlem deformasyon modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Konsolidasyonlu analizler yapılarak elde edilen sonuçlar saha ölçüleriyle karşılaştırılmıştır. Sahadaki deplasmanlar, dolgu altına yerleştirilen plakalarının periyodik okumaları ile elde edilmiştir. Dolgu merkezi ile yüzeyinde, ölçülen ve hesaplanan oturmaların

karşılaştırılması Şekil 2.45'te verilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.45: Oturmaların karşılaştırması, a – Dolgu merkezindeki oturmalar, b – Dolgu yüzeyindeki oturmalar.

Tablo 2.4: Model testlerin özeti.

Parametre	Dolgu	Kabuk	Yumuşak Kil	Sert Kil	Taş Kolon
Malzeme Modeli	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Yumuşak Zemin	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Davranış Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı	Drenajsız
γ_{unsat} (kN/m ³)	18	17	15	18	19
γ_{sat} (kN/m ³)	20	18	15	20	20
k_h (m/gün)	1	0,03	3,00E-04	3,00E-04	10
k_v (m/gün)	1	0,01	1,00E-04	1,00E-04	10
v'	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
E_{ref} (kN/m ²)	15000	15000	-	40000	30000
c_{ref} (kN/m ²)	19	3	1	3	5
Φ'	26	28	20	30	40
λ'	-	-	0,12	-	-
κ'	-	-	0,024	-	-
R_{inter}	1	1	1	1	1

2.5.2.5 Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir: Dolgu altındaki taş kolon ile iyileştirilmiş zemin, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile düzlem deformasyon modelde analiz edilebilir. Bunun için, taş kolonun aksel simetrik yapısını eşdeğer düzlem deformasyon hale dönüştürmek gerekmektedir. Aksel simetrik taş kolon birim hücrelerini eşdeğer düzlem deformasyon birim hücrelerine dönüştürmek için önerilen dönüşüm yöntemi kullanılabilir.

2.5.3 Taş Kolonlar İle İyileştirilmiş Zeminleri Basitleştirilmiş Düzlem Deformasyon Modellemesi (Tan vd. 2008)

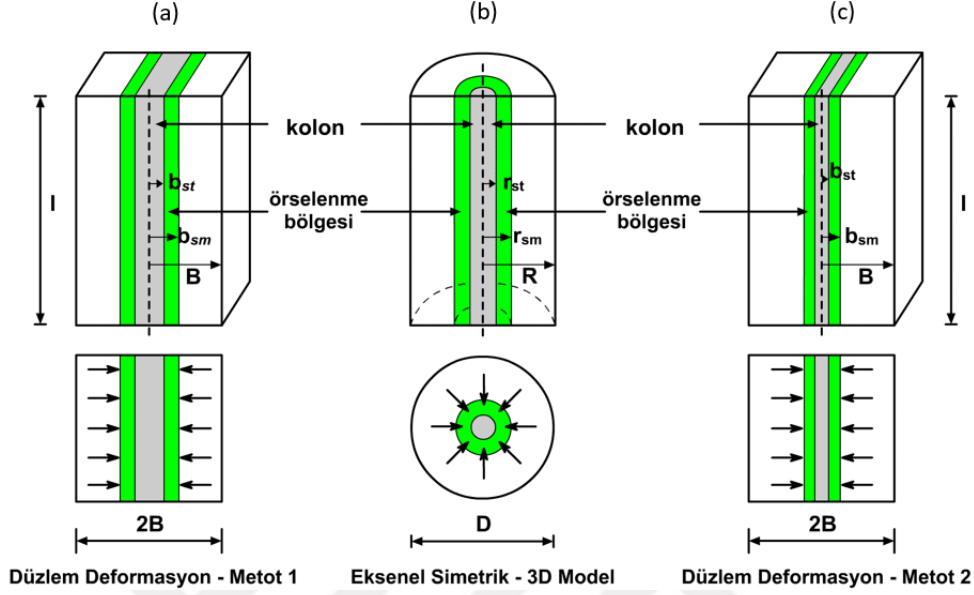
Taş kolon ile iyileştirmenin temel amaçları, iki etki ile temel zemininin birincil konsolidasyonunu hızlandırmaktır. İlk etki, yüksek kolon permeabilitesi sayesinde, ilave boşluk suyu basıncının daha hızlı sönümlenmesine olanak sağlayan radyal drenaj etkidir. İkinci etki ise, yüksek kolon rijitliği sayesinde zeminde oluşacak düşey gerilmeleri ve buna bağlı oluşacak ilave boşluk suyu basıncının azaltılmasıdır. Han ve Ye (2001), tarafından iki etkinin katkılarını hesaba katan taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerin konsolidasyon oranı için basitleştirilmiş bir analitik çözüm geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen çözüm yöntemi, homojen zemin özellikleri ve nizami taş kolon yerleşimlerine sahip yük altında tek boyutlu deformasyon gerçekleştiren basit modellerde geçerlidir. Çok boyutlu alan uygulamalarının iki boyutlu sayısal modellenmesi amacıyla eksenel simetrik birim hücresinin eşdeğer düzlem-deformasyon modele dönüştürülmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu dönüşüm yöntemleri, eşdeğer düzlem deformasyon permeabilitesi veya eşdeğer düzlem deformasyon geometrisine bağlı analitik çözümlerin türevlerini içermektedir. Bu çalışmanın amacı, taş kolon birim hücresinin eşdeğer düzlem deformasyon modelde elde edilmesi ve düzlem deformasyon sayısal analizlerde çok kolonlu iyileştirilmiş zeminler için uygulanabilirliğini araştırmak ve uygunluğunu iki aşamada test etmektir. Birinci aşamada, eksenel simetrik ile üç boyutlu birim hücre modellerinin sayısal sonuçları karşılaştırılmış, ikinci aşamada ise Malezya'daki bir dolgu vakasındaki verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada örselenme bölgesi (smear zone:kolon kurulumu nedeniyle çevredeki topraktaki bozulma) ve ince kolon geçirgenliğinin etkileri dâhil edilmemiştir.

2.5.3.1 Önerilen Çözüm Yöntemleri

Basit bir yaklaşıma dayanarak, eksenel simetrik birim hücre modelini eşdeğer düzlem deformasyon modele dönüştürmek için iki yöntem önerilmiştir (Şekil 2.46).

Önerilen yöntemlerden Metot 1'deki kabuller ile yapılması gereken dönüşüm yöntemleri bir önceki başlık altında detaylı şekilde anlatılmıştır. Diğer bir yöntem olan Metot 2 ise düşey drenaj sistemini eşdeğer drenaj duvarlarına dönüştürmek için Indraratna ve Redana (1997) tarafından düşey drenaj çalışmasında önerilmiş olan hem eksenel simetrik hem de düzlem deformasyon koşullarında kolon drenaj kapasitesinin eşdeğerlik fikrine dayanır. Bu yöntemde,

her iki model için kolon ve çevre zemin alanı korunmaktadır. Düzlem deformasyon modelde kolon genişliği Denklem 2.35 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.46: Üç boyutlu problemin iki boyutlu düzlem deformasyon modele dönüşümü, a-Metot 1, b-eksenel simetrik, c-Metot 2 (Indraratna ve Redana, 2000, Tan ve diğ., 2008)

$$b_c = B \times \frac{r_c^2}{R^2} \quad (2.35)$$

Yapılan dönüşüm sonucunda daha küçük kolon genişliği ile daha uzun akış yolu elde edilir (Şekil 3.30-c). Birim hücrenin eksenel simetrik modeldeki yarıçapı ile düzlem deformasyondaki genişliği arasındaki denklem 2.36'da verilmiştir (Barron 1948).

$$R = 1.13B \quad (2.36)$$

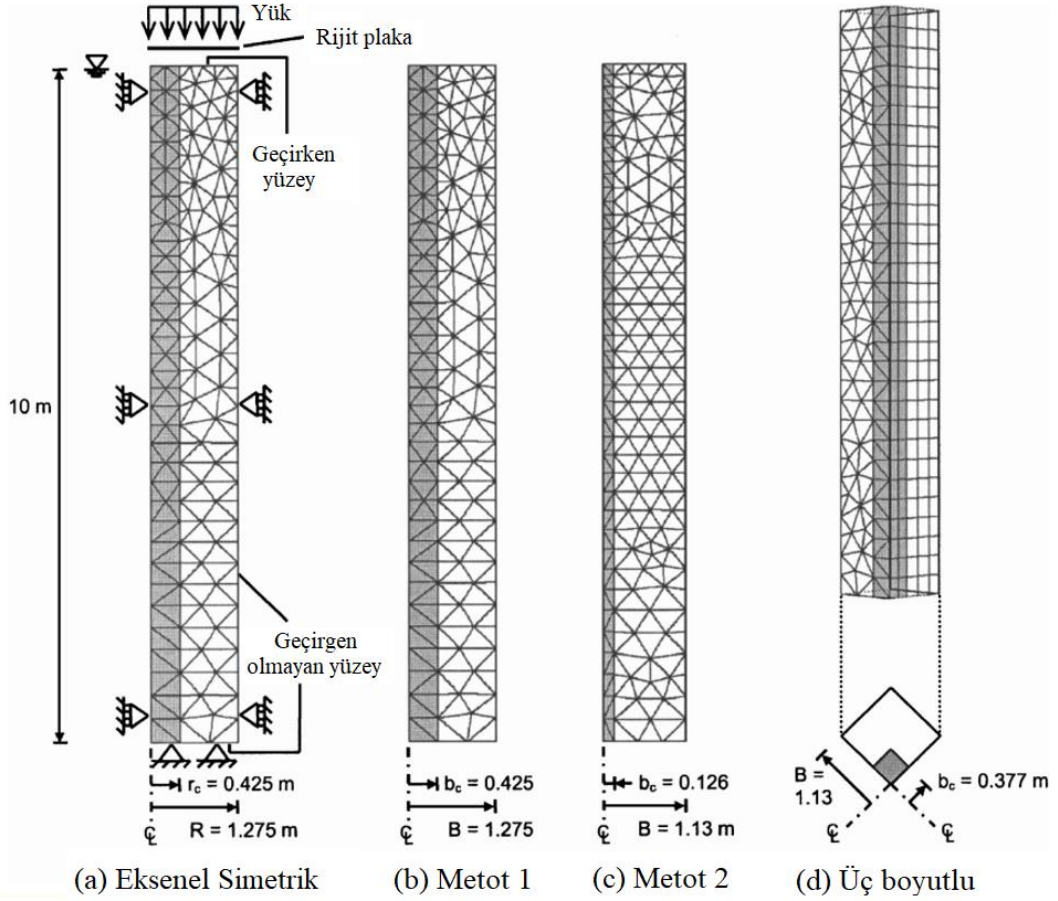
Yüksek alan değiştirme oranına sahip çok kolonlu uygulamalarda bu yöntem Metot 1 yerine tercih edilebilir, çünkü Metot 1'de yapılacak modellemede eksenel simetrik modele kıyasla daha büyük kolon alanı ile kolon drenaj kapasitesi elde edilebilir. Düzlem deformasyon kolon rijitliği Denklem 2.22 ile 2.23 eşitliğinden elde edilir. Önceki yöntemde olduğu gibi ($E_{s,pl} = E_{s,ax}$), eksenel simetrik ve düzlem deformasyon modellerde kolon alanının eşitliği ($a_{s,pl} = a_{s,ax}$) kolon geometrisinde dönüşüm yapıldığı için ($E_{s,pl} = E_{s,ax}$) eşit elastisite modüllerine neden olur. Ancak eşit akış yolu uzunluğu varsayımı taşınması nedeniyle zemin permeabilitesi Denklem 2.27 kullanılarak benzer şekilde eşitleştirilemez. Kolaylık için zemin permeabilitesi, eksenel simetrik model ile düzlem deformasyon modellerde eşit alınabilir ($k_{h,pl} = k_{h,ax}$ ve $k_{v,pl} = k_{v,ax}$).

2.5.3.2 Birim Hücre Dönüşümlerinin Karşılaştırılması

Önerilen dönüşüm yöntemlerinin doğrulanması amacıyla, konsolidasyon işlemi altındaki birim hücre modellerinin sayısal analizleri, eksenel simetrik ve eşdeğer düzlem-deformasyon geometrisine dayanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2.47). Eksenel simetrik model simetri nedeniyle ikiye bölünmüştür ve 10,0 m yükseklik ile 2,55 m dış yarıçapa ve 0.850 m taş kolon yarıçapına sahiptir. Model dikey kenarlarda yatay yönlü, tabanda ise her yönlü sabitlenmiş ve eşit düşey gerilme elde edebilmek için yük üstten rijit bir plaka yardımıyla uygulanmıştır. Su seviyesi zemin yüzeyindedir ve konsolidasyonun gerçekçi analizi için sadece üst yüzey geçirgen olarak tanımlanmıştır. Şekil 2.47-b ve c, sırasıyla Metot 1 ve 2 için oluşturulmuş eşdeğer düzlem deformasyon modellerini göstermektedir. Metot-1 ve Metot-2 modellerinin eşdeğer dış genişlikleri sırasıyla $R=B$ ve Denklem 2.36'ya dayanır ve bu modeller için sınır koşulları, su seviyesi ve yükleme koşulları eksenel simetrik modelle aynıdır. Metot 1 için kolon genişliği eksenel simetrik modele eşit iken Metot 2 için kolon genişliği Denklem 2.35 yardımıyla 0.252 m hesaplanmıştır. Şekil 2.47-d 'deki model, birim hücrenin üç boyutlu görünümüdür, simetri nedeniyle sadece dörtte biri gösterilmiştir. Bu modelin amacı, dikdörtgen geometri kullanılarak üç boyutlu etkileri inceleyip geometrik dönüşümlerden kaynaklanan olası hataların elde edilmesini sağlamaktır. Kare kolon ve drenaj bölgesi genişlikleri Denklem 2.36'dan elde edilmiş ve sırasıyla 0.753 ve 2.26 m'dir. Sınır koşulları, su seviyesi ve yükleme koşulları eksenel simetrik duruma eşittir. Birim hücre modelleri için malzeme parametreleri Tablo 2.5'de verilmektedir. Zemin drenajsız yumuşak kil olarak modellenmiştir. Taş kolon, karakteristik rijitlik ve mukavemet parametrelerine sahip homojen bir drenaj malzemesi olarak idealleştirilmiştir. Kil ile taş kolon birim hacim ağırlıkları eşit alınmıştır, böylece başlangıç gerilmesi oluşturulurken iki malzemenin ortalama efektif gerilmelerindeki farklılık nedeniyle ilave boşluk suyu basıncı üretilmesi engellenmiş ve ilave boşluk suyu basıncının üretilmesinde tek etkenin uygulanan 100 kPa yük olması sağlanmıştır. Kolon malzemesinin elastisite modülü, zeminin on katı kabul edilmiştir. Taş kolon için permeabilite değeri, Tablo 2.5'te yumuşak kil için belirlenen değerin 10,000 katı olacak şekilde alınmıştır. Metot 1'de, Denklem 2.22 ile 2.23 eşitliği ile Denklem 2.27 kullanılarak kolon malzemesi için elastisite modülü 12.000 kPa ve kil için yatay permeabilite katsayısı 2.60×10^{-9} m/s elde edilmiştir. Kilin düşey doğrultuda ki permeabilitesi, yatay permeabilite değerinin 1/3'ü olduğu kabul edilmiştir. Sayısal hatalardan kaçınmak için, koheziona sıfır harici bir değer verilmiştir.

Tablo 2.5: Birim hücre modeli için malzeme parametreleri.

Model	$\gamma_s = \gamma_c$ (kN/m ³)	ν'	E_s (kPa)	E_c (kPa)	$k_{h(s)}$ (m/s)	$K_{v(s)}$ (m/s)	MC Parametreleri			
							c'_s (kPa)	ϕ'_s (derece)	c'_c (kPa)	ϕ'_c (derece)
Eksenel Simetrik, Metot 2 ve Üç boyutlu	15	0.3	3000	30000	$3.47 \cdot 10^{-9}$	$1.16 \cdot 10^{-9}$	0.1	22	1	40
Metot 1	15	0.3	3000	12000	$2.60 \cdot 10^{-9}$	$1.16 \cdot 10^{-9}$	0.1	22	1	40

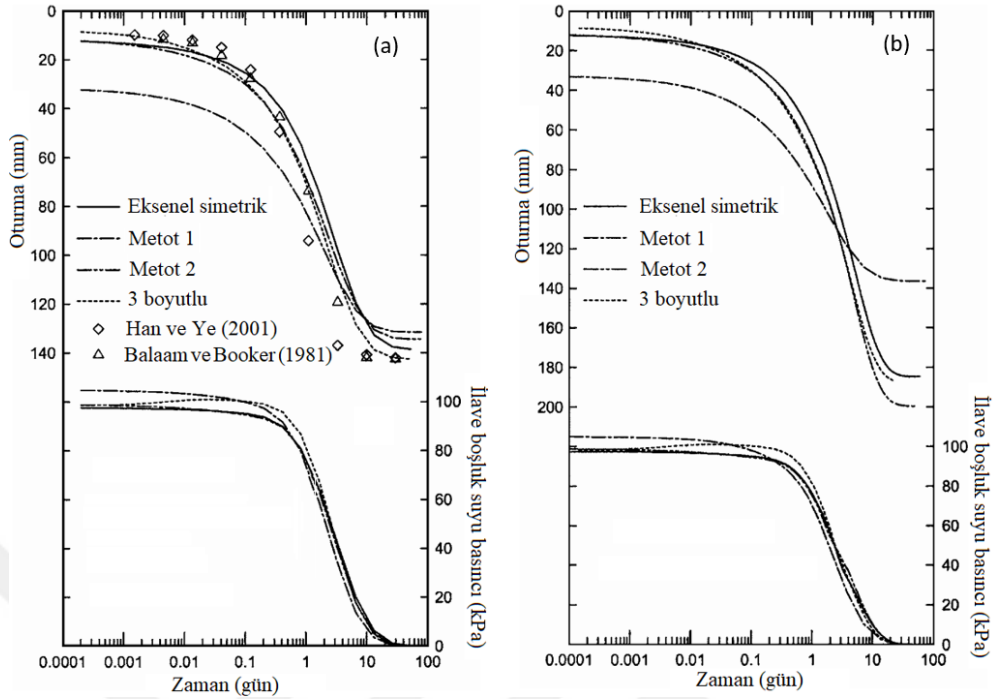
**Şekil 2.47:** Birim hücrenin sonlu elemanlar modellemesi (Tan ve diğ., 2008).

Analizler, Her birim hücre modelindeki malzemeler için $K_0=0.7$ alınarak başlangıç gerilmelerinin oluşturulması ve yüzeyde 100 kPa'lık yükün anlık (drenajsız) düşey yönlü uygulanması ile başlatılmıştır. Ani yükleme sonucunda modelde ilave boşluk suyu basınçları meydana gelmesi nedeniyle yükleme aşaması sonrasında ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi (<0.01 kPa) için konsolidasyon aşaması tanımlanmıştır.

Birim hücre malzemelerinin tasarımında iki durum ele alınmıştır. İlk durumda (Durum 1) her iki malzeme için Young modülü ve poisson oranı ile tanımlanan lineer izotropik elastik model kullanılmıştır. İkinci durumda (Durum 2), mukavemet parametreleri Tablo 2.5'te sunulan Mohr-Coulomb modeline idealize edilmiştir.

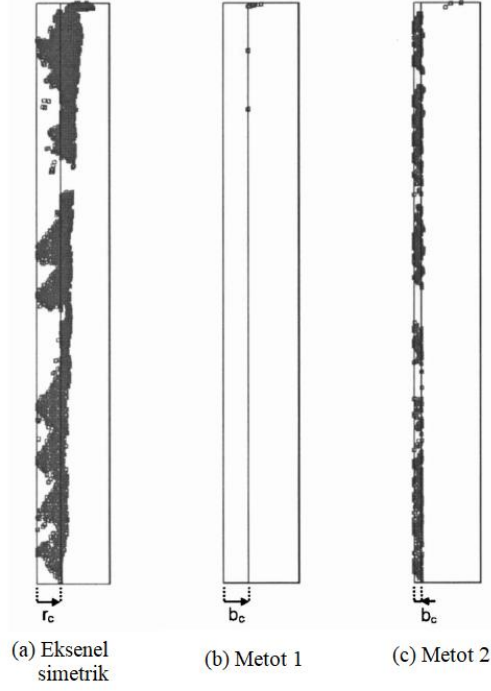
Analizler sonucunda yüzeyde oluşacak oturmalar ve ilave boşluk suyu basınçları ölçülmüştür. Şekil 2.48-a'da Durum 1 için konsolidasyon sonuçları verilmektedir. İlave boşluk suyu basıncı için ilk değer 100 kPa olması beklenir. Metot 1 modelinde % 5 fazla elde edilmesi dışında sonuçlar gayet iyidir. Eksenel simetrik modelin oturma eğrisi, Han ve Ye (2001) 'in analitik çözümü ve Balaam ve Booker'ın (1981) sayısal çözümüne sırasıyla %20 ve %8 fark oluşturmasına karşın makul mertebelere sahiptir.

Üç boyutlu model için oturma ve ilave boşluk suyu basıncı eğrileri, eksenel simetrik durum ile kıyaslandığında 4 mm ve 6 kPa'lık fark görülmektedir. Oluşan farkların, eksenel simetrik modelden düzlem deformasyon ve üç boyutlu dikdörtgen modele yapılan geometrik dönüşümlerden kaynaklandığını düşünülmektedir. Metot 2 modelinde gözlenen sapma sadece 8 mm ile sınırlı olduğundan, eksenel simetrik duruma oldukça benzer olduğu kabul edilmiştir. Bununla birlikte, Metot 1 modelinde deplasmanlarda 20 mm civarında önemli bir farklılık görülmektedir. Bu, drenajlı davranışı, konsolidasyon başlangıcında drenajsız yumuşak kilden daha az sert olan modeldeki taş kolonun diğer modellere nazaran daha büyük kesit alanına sahip olmasına ve diğer modellerle karşılaştırıldığında konsolidasyon başlangıcında yumuşak kilin daha yüksek oranda yük taşımasına bağlanır. Bunun sonucunda, yumuşak kilde daha büyük gerilmeler ve dolayısıyla modelde ilk oturmanın ve başlangıç durumunda ilave boşluk suyu basıncının % 5 daha fazla oluşmasına neden olmuştur. Bu farklılıklara rağmen, 10 gün sonunda tüm modellerde yaklaşık 140 mm'lik oturmalar ve yaklaşık sıfır olan ilave boşluk suyu basıncına ulaşılmıştır. Yani düzlem deformasyonda lineer elastik yapı modeli kullanılarak oluşturulan modellerin, oturmalar bakımından makul bir doğrulukla eksenel simetrik durumu temsil edebildiği görülmektedir.



Şekil 2.48: Oturmalar ve ilave boşluk suyu basınçları, a-Durum1, b-Durum2 (Tan ve diğ., 2008).

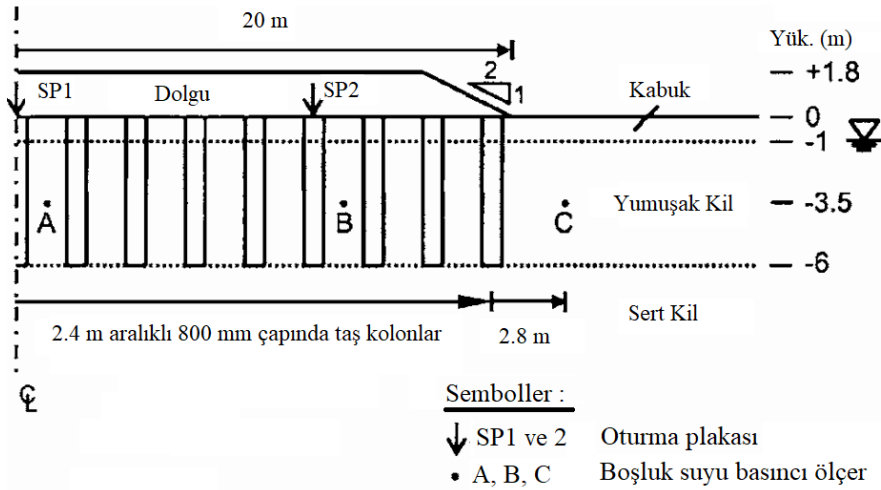
Şekil 2.48-b'de, Durum 2 için yapılan analiz sonuçları görülmektedir. Üç boyutlu ve eksenel simetrik durumlar için elde edilen eğriler, Durum 2 modellenmesinde de eksenel simetrikten dikdörtgen geometriye dönüşümde minimum hata oluştuğunu göstermektedir. Metot 2'de elde edilen oturma eğrisinin %8 farklılık göstermesi dışında eksenel simetrik durumla uyumludur. Elde edilen ilave boşluk suyu basınçları eksenel simetrik model ile uyumludur. Durum 1 analizlerinde olduğu gibi, Metot 1 modelinde, daha önce açıklanan nedenden dolayı başlangıç konsolidasyon aşamasında 21 mm fazla oturma ve %5 fazla ilave boşluk suyu basıncı değerleri elde edilmiştir. Daha da önemlisi, uzun dönem oturmalarında 190 mm ile %25 daha az oturma hesaplanmıştır. Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılarak yapılan analizlerde elde edilen farklılığın nedenini açıklamak için, analizler sonunda her bir modelin malzeme gerilme durumu kontrol edilmiş ve Şekil 2.49'da sunulmuştur. Eksenel simetrik modelde (Şekil 2.49-a), kolon çevresinde ve devamında yoğunlaşmış sayısız plastik nokta görülmektedir. Metot 2 modelinde (Şekil 2.49-c), kolon çevresinin ötesinde daha az dağınık olmasına rağmen, benzer dağılım gözlenirken, Metot 1 modelinde (Şekil 2.49-b) neredeyse hiç plastik nokta gözlenmemiştir. Metot 2'de oluşan plastik akma, eksenel simetrik model oturmalarını taklit etmesine izin verirken, Metot 1 rijitliği daha düşük bir oturmaya neden olmaktadır. Bu nedenle, Mohr-Coulomb zemin modeliyle Metot 1'de yapılan analizlerde, farklılıklar görülmektedir.



Şekil 2.49: Birim hücre modelinde konsolidasyon sonucu elde edilen plastik noktalar (Tan ve diğ., 2008).

2.5.3.3 Saha Verileri İle Karşılaştırma

Doğrulamanın ikinci aşamasında, 2003 yılında New Pantai otoyolu, Penchala Toll Plaza projesi için yapılan dolgu inşaatı önerilen dönüşüm yöntemleri modellenmiştir. Taş kolon ile iyileştirilmiş zemin ve dolgu geometrisi soldan simetrik olarak Şekil 2.50'de verilmiştir. Dolgu 20 m genişliğinde ve 1.8 m yüksekliğindedir.



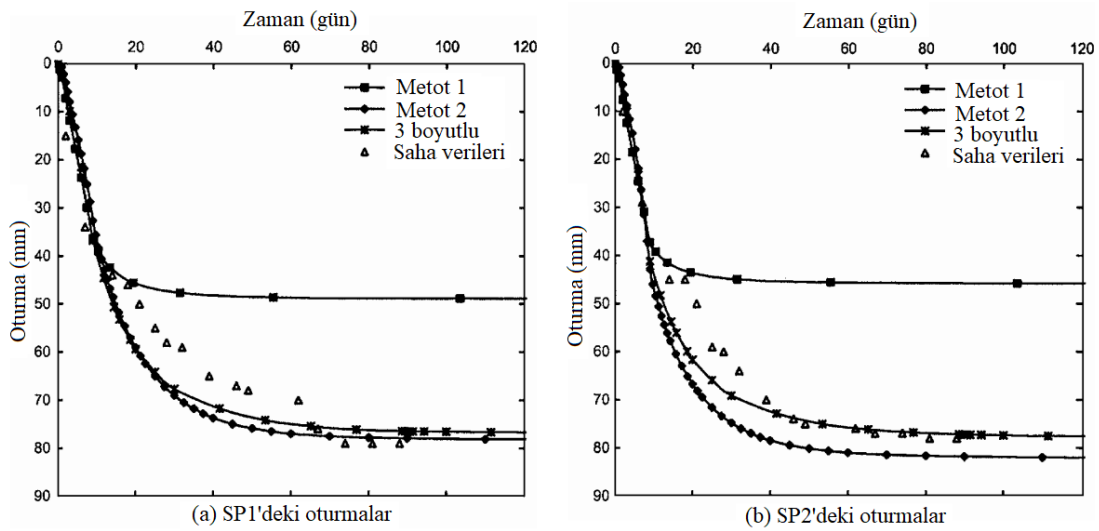
Şekil 2.50: Simetrik dolgu geometrisine ait kesit (Tan ve diğ., 2008).

Kare diziliminde imal edilen taş kolonlar, dolgu altından başlayıp sert kil tabakasına üzerinde bitecek şekilde 6 m uzunluğa sahiptir. Yeraltı suyu seviyesi, yüzeyin bir metre altındadır. Şekil 2.50'de gösterilen iki plaka (SP1 ve SP2), oturmaları ölçmek için dolgunun ortasına ve 8 m kenarına yerleştirilmiştir. Dolgu için Metot 1, Metot 2 ve üç boyutlu olacak şekilde üç sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Taş kolon (duvar) genişlikleri Metot 1'de 0.80 m (gerçek kolon çapına eşit) ve Metot 2'de Denklem 2.35 kullanılarak 0.21 m olarak belirlenmiştir. Her modelde kolon aralığı 2.4 m olarak alınmıştır. Yazılım sınırlamaları nedeniyle, üç boyutlu modeldeki taş kolonlar dairesel geometri yerine Denklem 2.36 kullanılarak eşdeğer kare kesit alanıyla modellenmiştir. Tüm modellerde, zemin malzemeleri Mohr-Coulomb modelinde tanımlanmış ve parametreleri Tablo 2.6'da verilmiştir. Parametreler, Metot 1 için kullanılan Denklem 2.22 ile 2.23 eşitliğinden ve 2.27 ile dönüştürülmüş Young modülü ve yatay permeabilite katsayısı hariç tüm modeller için aynıdır.

Tablo 2.6: Birim hücre modeli için malzeme parametreleri.

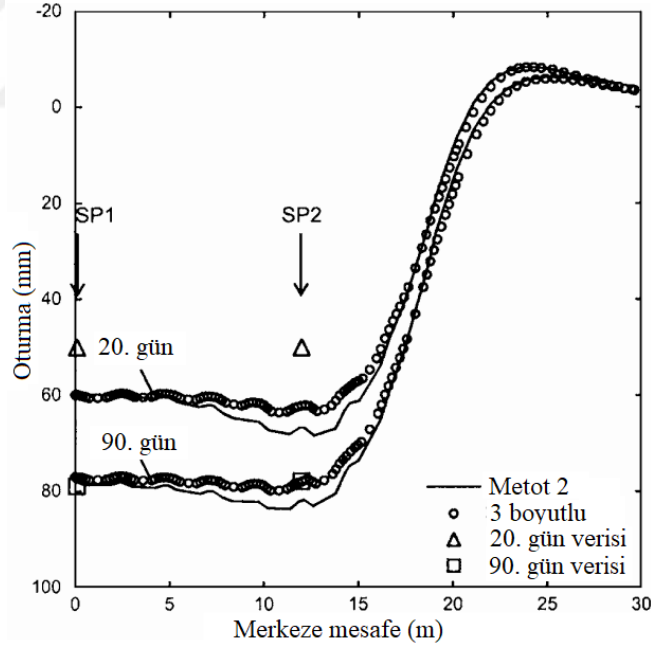
Malzeme	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ν'	E (kPa)	k_h (m/s)	k_v (m/s)	c' (kPa)	ϕ' (derece)
Dolgu	18	20	0.3	15000	$1.67 \cdot 10^{-5}$	$1.67 \cdot 10^{-5}$	3	33
Kabuk	17	18	0.3	15000	$3.47 \cdot 10^{-7}$	$1.67 \cdot 10^{-7}$	3	28
Yumuşak Kil	15	15	0.3	1100	$3.47 \cdot 10^{-9}$ a	$1.67 \cdot 10^{-9}$	1	20
Sert Kil	18	20	0.3	40000	$3.47 \cdot 10^{-9}$	$1.67 \cdot 10^{-9}$	3	30
Taş Kolon	19	20	0.3	30000	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \cdot 10^{-4}$	5	40

(a) işaretli değerler sadece Metot 2 ve üç boyutlu modeller içindir; Metot 1 için karşılık gelen değerler $E=8670$ kPa ve $k_h=1.68 \cdot 10^{-9}$ m/s



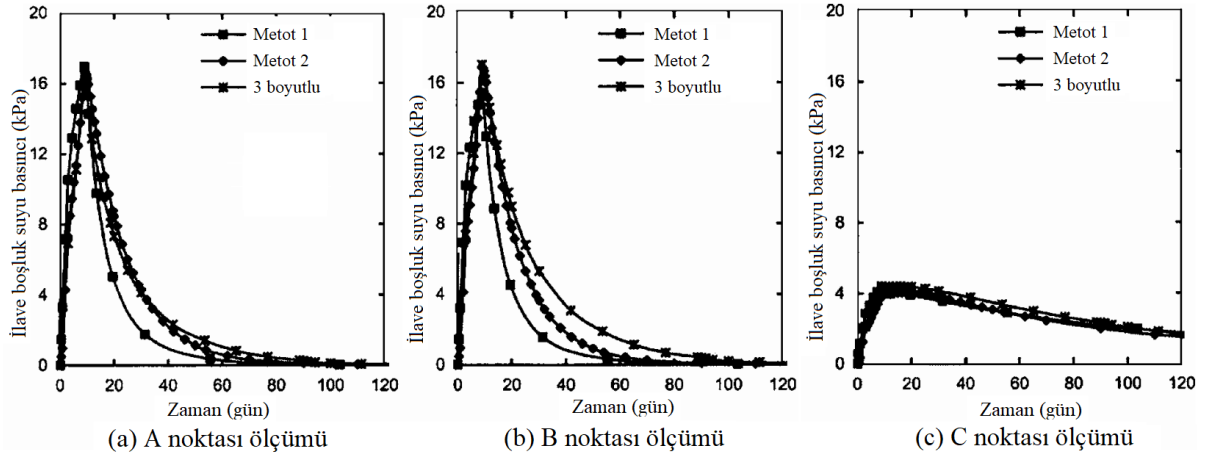
Şekil 2.51: SP1 ve SP2 noktaları için saha ile analiz oturmalarının karşılaştırılması (Tan ve diğ., 2008).

Şekil 2.51-a ve b'de, yerleştirilen SP1 ve SP2 noktalarında ölçülen oturmalar ile sayısal analizler sonucunda elde edilen oturmaların karşılaştırılması verilmektedir. Her iki ölçüm noktasında da, Metot 2 modelinde elde edilen oturmalar, herhangi bir zamanda, 6 mm veya %9'dan daha az bir farkla, üç-boyutlu modellerin üzerinde hesaplanmıştır. Oturmaların fazla elde edilmesi, önceki birim hücre analiz sonuçlarına paraleldir. Gözlenen fark, arasında zemin bulunan kolonların düzlem deformasyon modelde duvar elemanlara dönüştürülmesinden kaynaklanan geometrik azalmaya ve toplam yüzey sürtünmesindeki azalmayla birlikte daha düşük mertebede oluşacak iyileştirme etkisinden kaynaklanmaktadır. Farklılıklara rağmen, her iki model de, alan verisinin yaklaşık %90'ı için % 15 sapma ile sınırlı olduğundan, alan verilerini makul bir doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Sapmanın %8'den az olduğu 60 günden uzun süre için daha iyi bir uygunluk görülmüştür. Öte yandan, Metot 1 modelinde oturma eğrileri diğer eğrilerden yaklaşık 9 gün sonra uzaklaşır ve nihai durumda 50 mm'de kalarak saha ölçümünün (80 mm) çok altında kalmıştır. Bu fark, Mohr-Coulomb modeli ile yapılan birim hücre analiz sonuçları ile paraleldir (Durum 2).



Şekil 2.52: Dolgu oturma profili (Tan ve diğ., 2008).

Metot 2 ve üç boyutlu modeller ile yapılan analizler sonucunda 20 ve 90 günlerindeki oturma profilleri Şekil 2.52'de gösterilmiştir. Şekil 2.51'den alınan saha ölçüleriyle kıyaslandığında SP1 ve SP2 ile aynı yerleşim noktalarında yapılan ölçümlerde 90. günde, 20. günden daha uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Her iki modelde de oturma profilleri, farkın sadece 6 mm ile sınırlı kaldığı merkezden 5 ila 15 m arasındaki bölgedeki hafif sapma hariç, benzerdir.

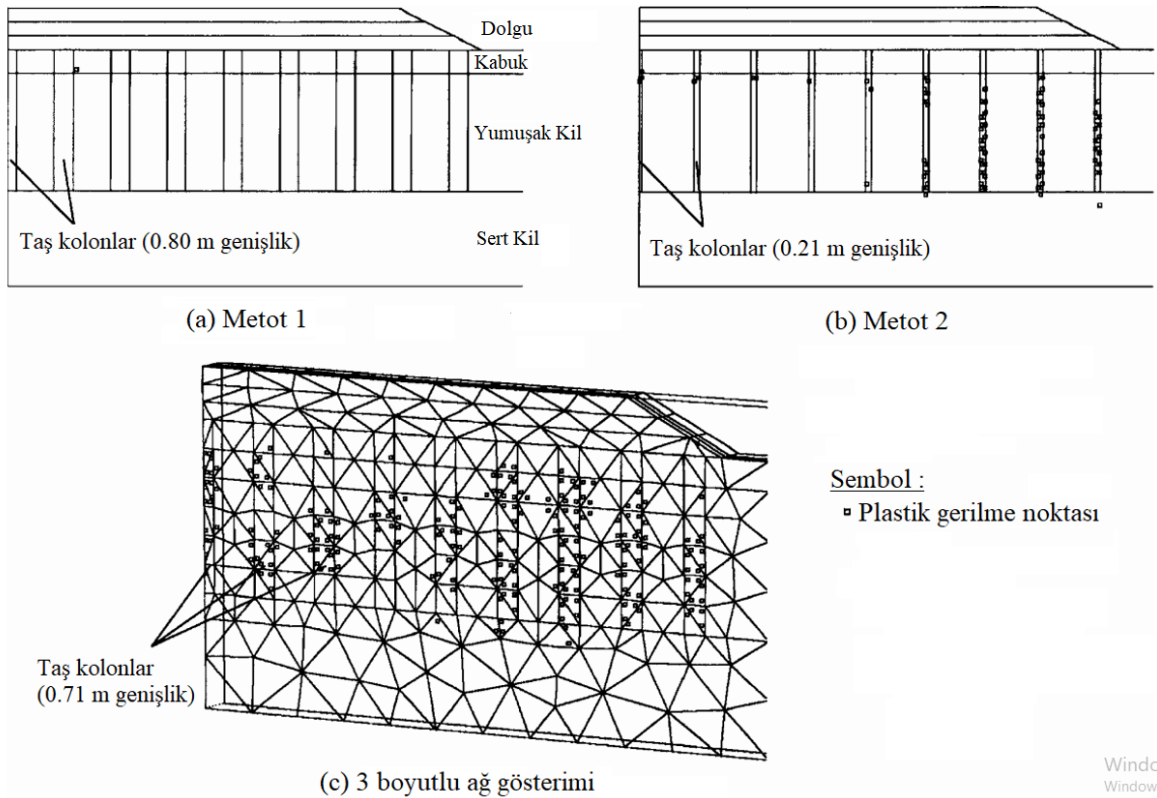


Şekil 2.53: Analizler sonucunda elde edilen ilave boşluk suyu basınçları (Tan ve diğ., 2008)

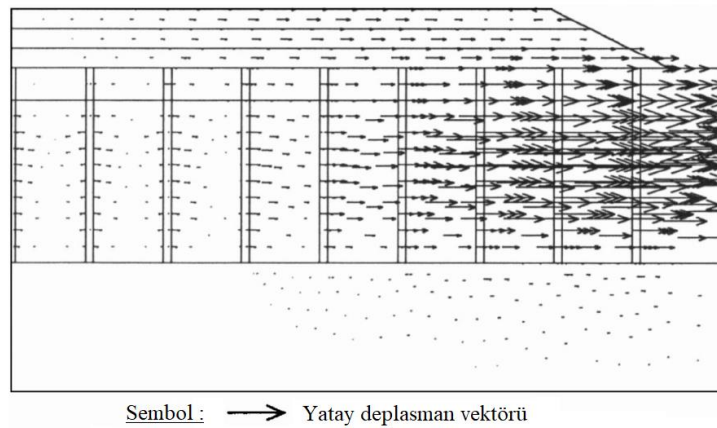
Şekil 2.53'te, Şekil 2.50'de gösterilen A, B ve C noktaları için zamana bağlı ilave boşluk suyu basıncı değerleri verilmektedir. Şekil 2.53-a ve b'de gösterilen ilave boşluk suyu basıncı A ve B noktalarında dolgu imalatından dolayı yaklaşık 17 kPa başlangıç pik değerine ulaşmakta ve 100 gün sonunda neredeyse sıfıra ulaşmaktadır. Üç boyutlu modele nazaran ilave boşluk suyu basınçları Metot 1 modelde daha hızlı sönümlenmiştir. Gözlenen farklılık önceki birim hücre analiz sonuçlarına paraleldir (Şekil 2.48-b) ve daha büyük drenaj kapasitesine sahip olmasına bağlanabilir. Metot 2 modeli için, A noktasında hesaplanan ilave boşluk suyu basınçları üç boyutlu model ile uyumluluk göstermektedir, ancak B noktasında 2 kPa civarında daha düşük değerler elde edilmiştir. Öte yandan, dolgu kenarından 2 m uzaklıktaki C noktasında, ilave boşluk suyu basıncı, dolgu yükünün azalan etkileri nedeniyle daha düşük pik değerlerine sahiptir ve üç modelde de hemen hemen aynı şekilde tam sönümlenmemektedir. Bunun sebebi olarak ölçüm noktasının taş kolonlara mesafesi gösterilebilir. Buradaki ilave boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için 120 günden daha uzun bir süre gerekmektedir ve taş kolonlar ile konsolidasyonun hızlanması bu noktada pek etkili değildir.

Şekil 2.51'de gösterilen Metot 1 ve Metot 2 modellerindeki oturma farklarını açıklamak için konsolidasyon sonunda elde edilen gerilme durumları Şekil 2.54'te verilmiştir. Metot 2'de ve üç boyutlu modellerde (Şekil 2.54-b ve c), özellikle kolon çevresinde plastik akma noktaları görülmektedir. Dolgu kenarına yakın kolonlarda, iç bölgede bulunan kolonlara nazaran daha fazla plastik nokta görülmüştür. Gözlenen bu durum nedeniyle Metot 2 modelinin dış kolonlarında daha büyük deformasyona, özellikle yatay deplasmanlara neden olur (Şekil 2.55). Gözlenen bu davranış, yumuşak kilde şerit temel altında imal edilen küçük bir grup taş kolon

davranışının deneysel çalışılması ile uyumludur. Şekil 2.54-a'da görülen Metot 1 modelindeki kolon malzemesinde ise hiç plastik akma noktası oluşmamıştır ve birim hücre modeli (Şekil 2.49-b) analiz sonuçlarına benzer olduğu görülmektedir. Bu durum daha büyük kolon kesit alanına sahip kolonlarda hem kesme hem de eğilme rijitlik kapasitelerinin yüksek olmasına bağlanmıştır. Oluşan rijitlik artışı ile model, diğer modellerin aksine hatalı ve daha düşük değerlerde oturmalar elde edilmiştir.



Şekil 2.54: Konsolidasyon sonunda modellerde gözlenen plastik noktalar (Tan ve diğ., 2008).



Şekil 2.55: Konsolidasyon sonunda Metot 2'de yatay deplasmanlar (Tan ve diğ., 2008).

2.5.3.4 Sonuçlar

Bu çalışmada, taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminin eşdeğer düzlem deformasyon modele dönüşümlerinin yapılabilmesi için Metot 1 ve Metot 2 olmak üzere iki basit dönüşüm yöntemi incelenmiştir. Yöntemler arasındaki temel farklar, kolon geometri dönüşümleri ile zemin permeabilite eşleştirilmesidir. Metotların geçerliliği birim hücre analizleri ve sahada imal edilen dolguya ait veriler ile karşılaştırılması olarak iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada, lineer elastik malzeme modellemesi durumunda her iki yönteme ait sonuçlar aksenal simetrik ve üç boyutlu model sonuçları ile karşılaştırıldığında uzun vadeli konsolidasyon oturmaları bakımından uyumludur. Bununla birlikte, Mohr-Coulomb malzeme modellemesi yapıldığında, uzun dönem analizlerinde daha iyi sonuçlar elde edilen Metot 2'ye nazaran Metot 1'de daha düşük oturmalar elde edilmiştir. Metot 1'deki farklılıklar, yükleme altındaki konsolidasyon aşamasında kolonlarda plastik akmaların tam olarak oluşturulamamasına bağlanmıştır. Dolgu imalatının Mohr-Coulomb modeli kullanılarak analiz edildiği ikinci aşamada, benzer durumlar grlmştir. Metot 1, alan verilerine kıyasla iki ölçüm noktasında %38 daha düşük nihai oturmalar ile hatalı sonuçlar verirken, Metot 2, konsolidasyonun ilk 60 gününde saha oturmalarından ufak sapmalar gösterse de daha makul sonuçlar vermektedir. Metot 2, oturma eğrilerinde (%9 fark) ve ölçüm noktalarından birinde ilave boşluk suyu basıncı dağılım oranına rağmen, üç boyutlu model sonuçlarıyla uyumluluk göstermektedir. Bu nedenle, Metot 1'de elasto-plastik malzemelerle yapılan taş kolon ile iyileştirilmiş zemin analizlerinde hatalı sonuçlar vermekte ve düzlem deformasyon modellemeler yapılırken Metot 2 dönüşümlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir.

2.5.4 Basitleştirilmiş Eşdeğer İyileştirme Bölgesi Yöntemi (Tan vd. 2013)

Basitleştirilmiş eşdeğer iyileştirme bölgesi yöntemi, kompozit zemin için eşdeğer malzeme özelliklerini belirleyerek taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerini modellemek için geliştirilmiştir. Yönteme eşdeğer kolon metodu (ECM) denir. Bu yöntem ile kompozit malzeme için sadece eşdeğer rijitlik belirlenmez, aynı zamanda eşdeğer permeabilite de sağlanır. Yöntem, iki boyutlu sonlu elemanlarda, aksenal simetrik birim hücre analizleri kullanılarak türetilmiştir. Hesaplanan oturmalar ile iyileştirilmiş zemin için tek bir rijitlik değeri kullanılarak hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmış ve bir düzeltme faktörü elde edilmiştir. Bağıntı, alan değiştirme oranı, yk ve kolon malzemesinin sürtünme açısı gibi temel parametreler için tasarım çizelgeleri şeklinde özetlenmiştir. Farklı alan değiştirme oranları için yapılan seri analizler sayesinde,

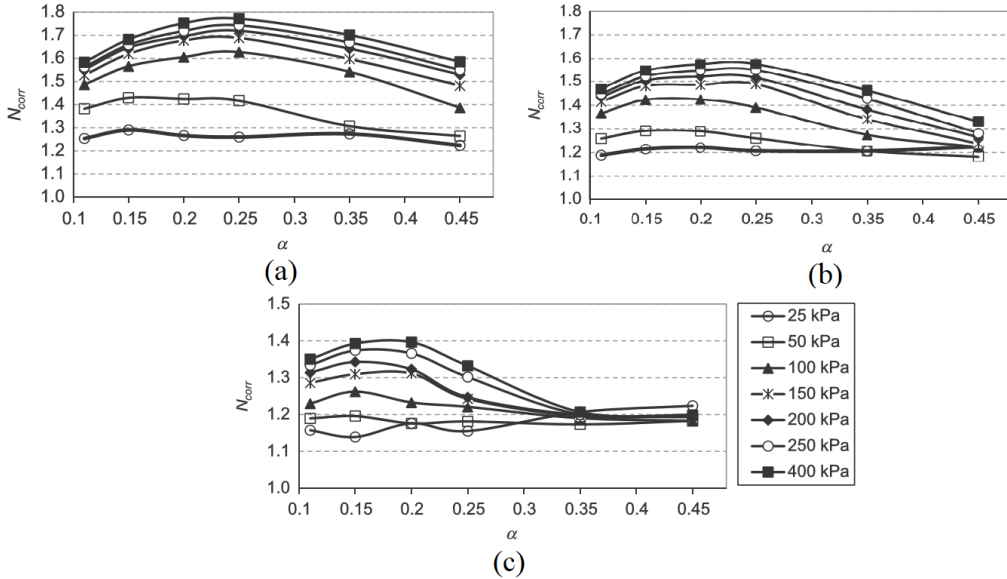
eşdeğer permeabilite ve farklı permeabilite oranları için tasarım çizelgesinde oluşturulmuştur. ECM, mevcut tasarım yöntemleri ve saha verileri ile uyumluluk göstermektedir. Önerilen yöntemin diğer homojenizasyon tekniklerine göre avantajı, sonlu eleman programında, özellikle dolgu problemlerinde, konsolidasyon süresini tahmin etme yeteneğinin yanı sıra, kolay modelleme yapılmasına imkan sağlamasıdır.

2.5.4.1 Eşdeğer Rijitliğin Belirlenmesi

Metot 1’de taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerin ortalama kompozit rijitliğini ($E_{composite}$) elde edilmesinde kullanılan Denklem 2.22 bu çalışmada da eşdeğer rijitliğin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ancak 2008 yılında Tan vd. tarafından yapılan çalışmalarda, rijitlik dönüşümleri ile oluşturulan modellerde plastik akma noktalarının oluşmamasına bağlı oturmalarda hatalı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Gözlenen hataların giderilmesine yönelik bu çalışmada bir düzeltme faktörü (N_{corr}) sunulmaktadır.

Yapılan seri analizler ile farklı alan oranına, yüklemeye ve kolon malzemesinin içsel sürtünme açısına bağlı düzeltme faktörü grafikleri Şekil 2.56’da verilmiştir. Elde edilen düzeltme faktörü ile homojenleştirilmiş malzemenin rijitliği Denklem 2.37 ile hesaplanabilir.

$$E_{eq} = \frac{E_{composite}}{N_{corr}} \quad (2.37)$$



Şekil 2.56: Düzeltme faktörü grafikleri, a- $\phi'_c=40$, b- $\phi'_c=45$, c- $\phi'_c=50$ (Tan ve diğ., 2013).

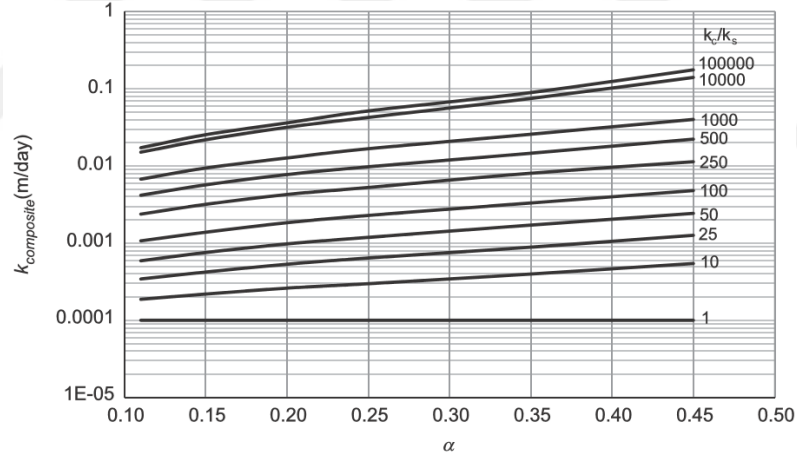
2.5.4.2 Eşdeğer Permeabilitenin Belirlenmesi

İyileştirilmiş zeminler için eşdeğer permeabilitenin belirlenebilmesi için ilk olarak, farklı alan değiştirme oranları ve kolon permeabilitesine sahip sonlu elemanlar analizlerinden %90 konsolidasyon derecesi için süreler elde edilmiştir. Sonrasında ise malzemelerin izotropik ve homojen olduğu varsayılarak, konsolidasyon katsayısı (c_v) Terzaghi'nin zaman faktörü kullanılarak hesaplanmış (Denklem 2.38) ve elastisite teorisi kullanılarak kompozit permeabilite değerinin ($k_{composite}$) hesaplanabileceği belirtilmiştir (Denklem 2.39).

$$c_v = 0.848 \frac{d^2}{t_{90}} \quad (2.38)$$

$$k_{comp} = \frac{c_v \gamma_w}{D_{eq}} \quad (2.39)$$

D_{eq} , tek bir zemin olarak tanımlanan kompozit malzemeye ait sınırlama faktörüdür.



Şekil 2.57: Alan değiştirme ve permeabilite oranlarına bağlı kompozit malzeme permeabilitesi (Tan ve diğ., 2013).

Yapılan analizler sonucunda, farklı alan ve permeabilite oranlarına bağlı kompozit malzeme permeabilitesi ($k_{composite}$) değerleri Şekil 2.57'de verilmektedir. Elde edilen kompozit malzeme permeabilitesinden de homojenleştirilmiş malzemenin permeabilitesi elde edilebilmektedir (Denklem 2.40).

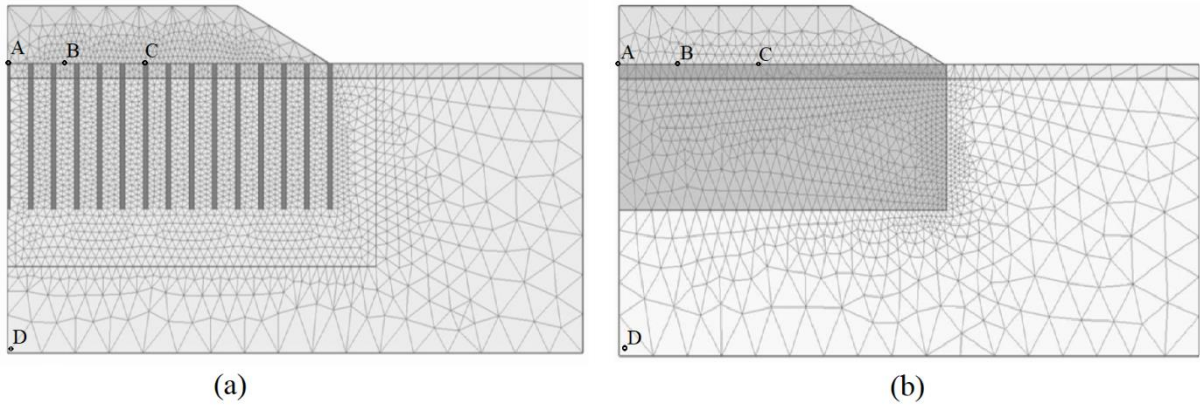
$$k_{eq} = \frac{k_{comp} k_s}{1 \times 10^{-4}} \quad (2.40)$$

2.5.4.3 Doğrulama

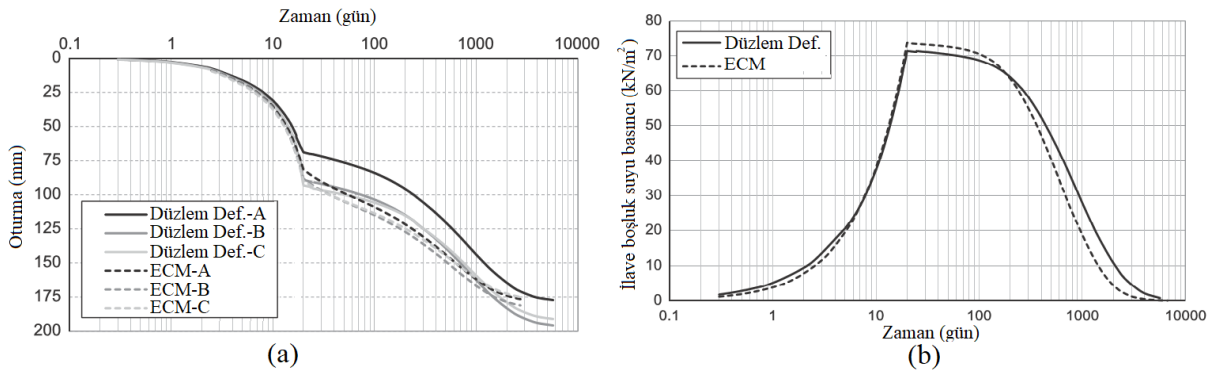
Yapılan dönüşümlerin karşılaştırılabilmesi amacıyla Metot 2 (Şekil 2.58-a) ile homojenleştirilmiş zemin (Şekil 2.58-b) modelleri oluşturulmuştur. Şekil 2.56 ile 2.57 kullanılarak rijitlik ve permeabilite dönüşümleri yapılmıştır (Tablo 2.7). Oluşturulan modellere ait zamana bağlı oturma ve ilave boşluk suyu basıncı değerleri Şekil 2.59'da, dolgu altında hesaplanan oturmalar ile zeminde hesaplanan yatay deplasmanlar Şekil 2.60'ta, verilmektedir.

Tablo 2.7: Malzeme parametreleri.

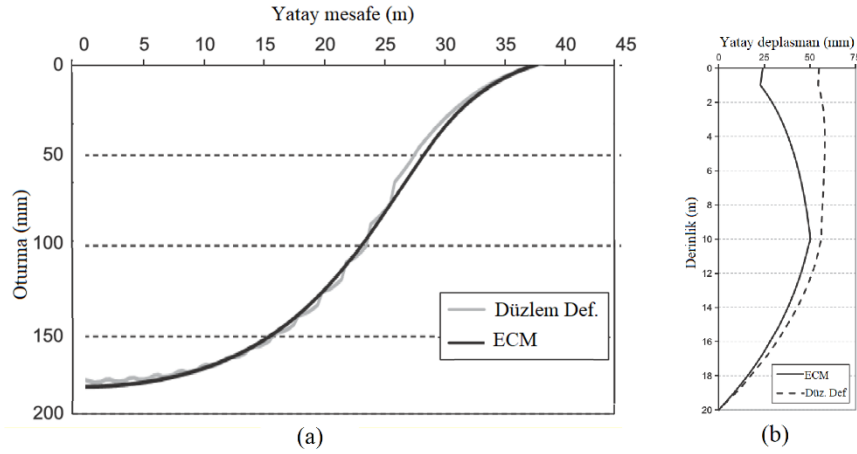
Malzeme	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ν'	E (kPa)	k_v (m/gün)	c' (kPa)	ϕ' (derece)	E_{eq} (kPa)	k_{veq} (m/gün)
Dolgu	20	20	0.3	15000	-	1	35		
Kabuk	19	20	0.3	15000	0.001	1	30		
Yumuşak Kil	18	18	0.3	5000	0.001	1	25		
Taş Kolon	19	20	0.3	50000	1.0	1	50		
Kolon+Kabuk	-	-	0.3	-	-	-	-	11667	0.032
Kolon+Kil	-	-	0.3	-	-	-	-	18333	0.032



Şekil 2.58: Analiz modelleri, a-düzlem deformasyon, b-eşdeğer kolon metodu (Tan ve diğ., 2013).



Şekil 2.59: Zamana bağlı a-oturma, b-ilave boşluk suyu basıncı karşılaştırması (Tan ve diğ., 2013).



Şekil 2.60: Deplasman karşılaştırması, a-oturma, b-yatay deplasman (Tan ve diğ., 2013).

2.5.4.4 Sonuçlar

Homojenleştirme metodu, modellemenin hızlı yapılabilmesine olanak sağlayan ve hem oturmalar hem de konsolidasyon sürelerini tahmin etmede makul sonuçlar elde edilmiş bir yöntemdir. Sunulan tasarım şeması ile farklı yüklemeler, taş kolon için içsel sürtünme açısı ve alan değiştirme oranları hesaba katılarak eşdeğer rijitliğin belirlenebilmesinde yardımcı olur. Bazı saha çalışmaları (uç kolonları ve yüzen kolon uygulamaları) ile doğruluğu test edilmiştir. Bununla birlikte, konsolidasyon veya yükleme sırasında permeabilite ve konsolidasyon katsayısındaki değişiklikler bu yöntemde dikkate alınmaz. Parametre aralığı ve yapılan varsayımlar dışında bu yöntemi kullanırken dikkatli olunmalıdır.

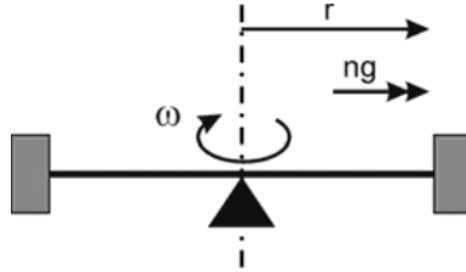
2.5.5 Taş Kolonlar İle Zemin İyileştirmenin Modellenmesi (Weber, 2007)

Santrifüjün kullanılması ilk olarak Edouard Phillips (1869) tarafından irdelenmiş devam eden yıllarda yapılan çalışmalar ile geliştirilmiştir. Santrifüj modellemenin temel ilkesi, sabit bir eksen etrafında dairesel dönme hareketi ile merkezkaç kuvvetlerin oluşturulmasına dayanmaktadır. Oluşturulan kuvvetin etkisi ile açısal hız (ω) ve yarıçapa (r) bağlı bir merkezci ivme (a) meydana gelir.

$$a = \omega^2 \cdot r \quad (2.41)$$

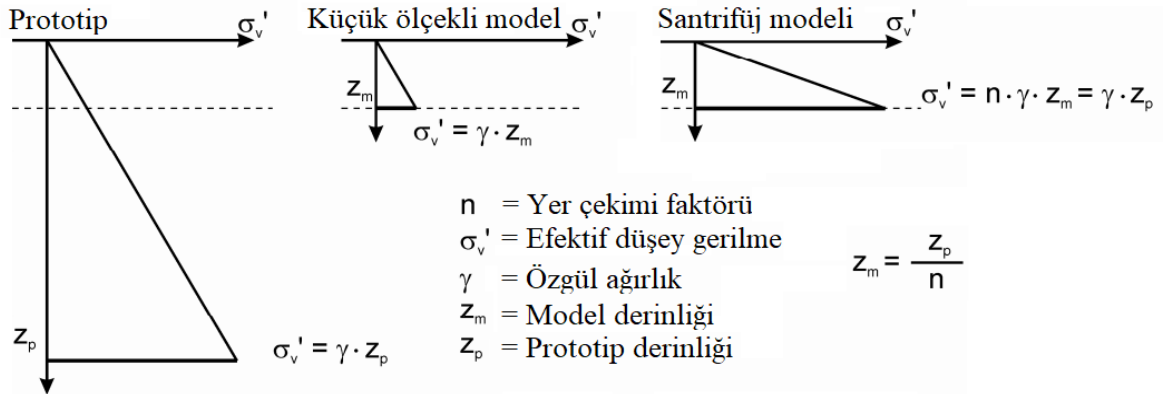
$$n \cdot g = \omega^2 \cdot r \quad (2.42)$$

Santrifüj ile bir zemin modeli üzerinde yapay olarak arttırılmış bir yer çekimi alanı oluşturulabilir (Şekil 2.61). Arttırılan yer çekimi alanının oluşturulması, Denklem 2.41’de, merkezci ivmenin yer çekimi faktörü (n) ile ilişkilendirilmesi ile yapılabilmektedir.



Şekil 2.61: Santrifüj modeli prensibi (Schofield, 1980).

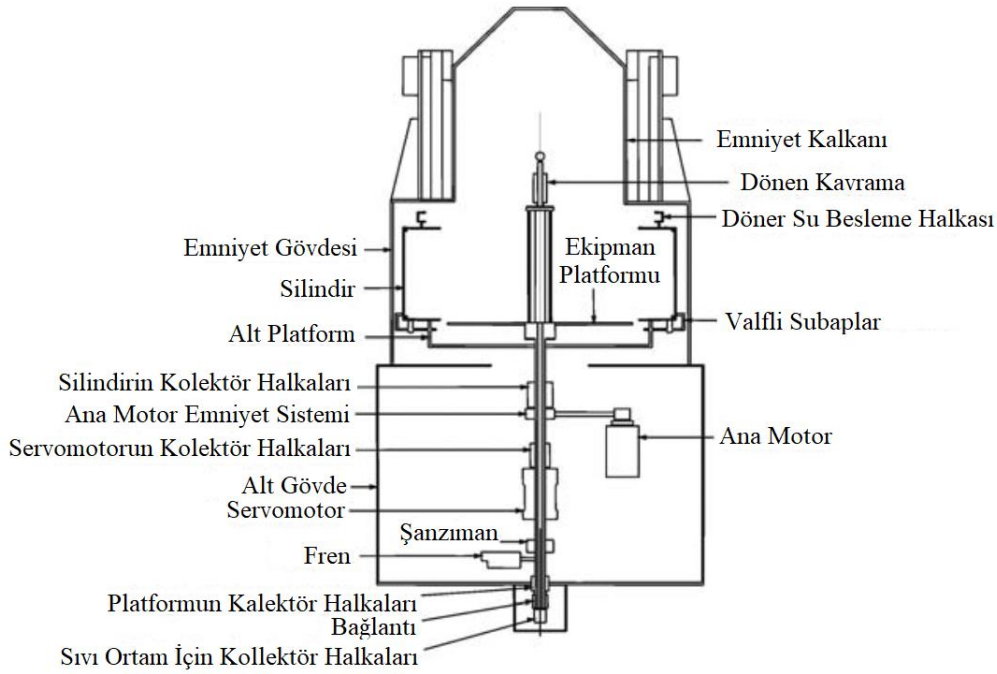
Şekil 2.62’de, oluşturulan küçük ölçekli modele kıyasla santrifüj modelinin gerilme durumları kıyaslanmaktadır. Merkezci ivme sayesinde, büyük ölçekli modelde elde edilen gerilmeler, santrifüj içerisinde oluşturulan küçük ölçekli bir modelde de oluşturulabilir. Gerçek modelde hesaplanan gerilmelerin elde edilmesi için, prototip için seçilecek geometrik boyutlar, dönme etkisi ile oluşturulan açısal hız ve yarıçapa bağlı hesaplanan yer çekimi faktörü (n) oranında azaltılabilir. Örneğin yerçekiminin 100 kat hızlandırılmasına maruz bırakılan 10 cm. yüksekliğinde bir zemin, 10 metre kalınlığındaki bir zemin tabakasının gerilme dağılımını temsil eder. Gerilmelerin doğru olarak elde edilebilmesi, diğer küçük ölçekli model deneylerine kıyasla santrifüj modellemenin en önemli avantajıdır.



Şekil 2.62: Farklı modellerde gerilmelerin karşılaştırılması (Laue, 2002).

2.5.5.1 Santrifüj Aleti

Deneyin yapıldığı ETH Zürih santrifüj laboratuvarında, İngiltere'deki Huddersfield'den Thomas Broadbent & Sons Ltd. tarafından imal edilen 1.1 metrelik yarıçaplı bir tambur santrifüj aleti kullanılmaktadır. Kullanılan ekipman sayesinde yerçekimi ivmesinin 440 katına kadar çıkabilen alette izin verilen maksimum model kütlesi 2 tondur. Santrifüj aletinin şematik gösterimi Şekil 2.63'te verilmiştir.



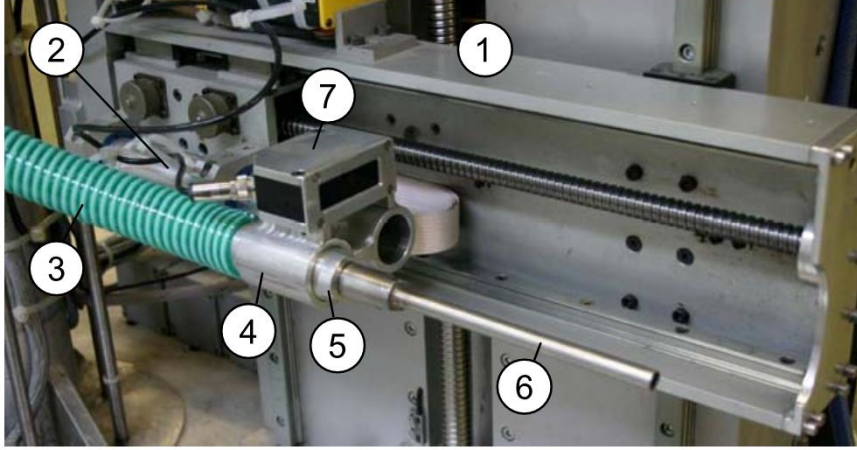
Şekil 2.63: Tambur santrifüjün şematik kesiti (Springman vd., 2001).

2.5.5.2 Santrifüj İçerisinde Taş Kolonu İmalatı

Santrifüj aleti içerisinde kum kolonlarının davranışlarını gerçekçi bir şekilde incelemek için dönme işlemi devam ederken kolonların imal edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle dönme işlemi devam ederken imalatları yapabilecek bir alet geliştirilmiştir. Geliştirilen kolon imalat aleti, takım platformunun çalışma kolu üzerine monte edilmiştir ve şematik olarak Şekil 2.64'te gösterilmiştir. Aletin ana bileşenleri;

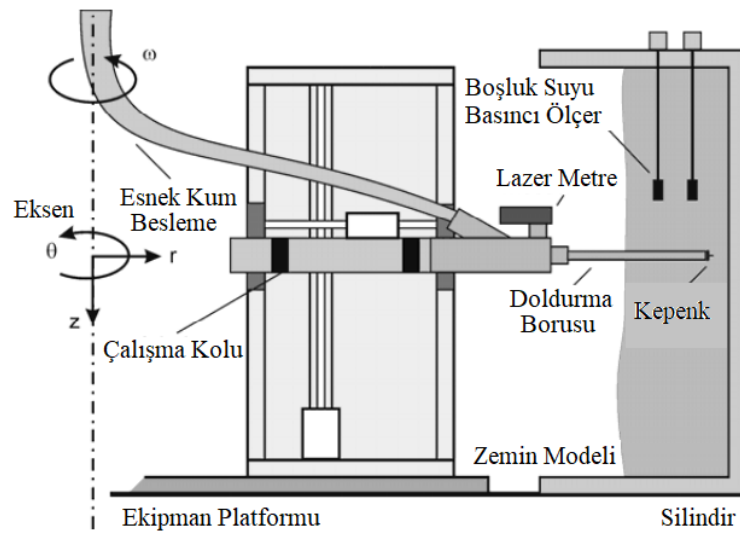
1. Step motor çalışma kolu,
2. Montaj aleti tutucusu,
3. Kum beslemesi için esnek hortum,
4. Kum giriş bölmesi,

5. Kum geçiş parçası,
6. Kum kolonu imalat borusu,
7. Lazerli mesafe lerden oluşmaktadır.



şekil 2.64: Kum kolonu imalat aleti (Weber 2007).

şekil 2.65'te kolonunun üretim işlemi gösterilmektedir. Kurulum aracının doldurma borusu kile batırılır. Doldurma borusunun kil ile tıkanmasını önlemek için kepenk sistemi kullanılır. İmalat öncesinde, kolonların yapılacağı bölgede zemin yüzeyine yerleştirilen levhalar tüp ile birlikte kile batırılır ve istenilen kolon derinliğine ulaştıktan sonra besleme sistemi içinden kum dökülerek kolonlar oluşturulur. İmalat tamamlandıktan sonra levhalar zemin içerisinde kalacak şekilde besleme sistemi geri çekilir.



şekil 2.65: Kum kolonu imalat aleti (Weber 2007).

Arazide yapılan kolon imalatı ile santrifüj aleti içerisinde yapılan imalat yöntemleri arasında önemli iki fark mevcuttur. Birincisi sahada, boru tıkanmasını önlemek için, prob toprağa hava/su basıncı altında batırılırken, prototipte doldurma borusu kepenk yardımı ile zemin içerisine itilir. İkinci fark ise santrifüj içerisinde yapılan imalatta herhangi bir titreşim verilemediğinden kolonunun sıkıştırılması, sadece yeniden doldurma ile gerçekleştirilebilir. İmalat yöntemi her ne kadar sahada yapılan imalatı tam anlamıyla doğru bir şekilde tanımlayamasa da farklı çalışmalarda kullanılan normal yerçekimi (1g) altında yapılan imalatlardan daha gerçekçidir. Çünkü zeminin fiziksel özellikleri daha uygun olarak tanımlanabilmektedir.

2.5.5.3 Kullanılan Ölçüm Cihazları

Santrifüj deneyleri sırasında modelleri gözlemlemek için çeşitli ölçüm cihazları gereklidir. Ayrıca, zeminin başlangıç özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için aşağıda kısaca bahsedilen çeşitli ölçüm cihazları kullanılmıştır.

- Laboratuvarında yumuşak killerin drenajsız kayma mukavemetini ölçmek için, T-çubuk penetrometre kullanılmıştır.
- Konik penetrasyon aleti (CPT), ile uç basıncı, çevre sürtünmesi ve ucun arkasındaki gözenek suyu basıncı ölçülebilir. Bu çalışmada kullanılan aletin ucu 60 derecelik bir açığa sahiptir. Proben çapı 11.3 mm ve çevre sürtünmesini ölçen milin uzunluğu 36.9 mm'dir. Proben içinde, 2 yük hücresi bulunmaktadır. İlk yük hücresi sadece uç basıncını ölçer, diğer hücre ise toplam yük, uç basıncı ve çevre sürtünmesini yansıtır.
- Zemin modellerinde boşluk suyu basıncının sürekli ölçümü için, DRUCK PDCR 81 minyatür ölçüm aletleri kullanılmıştır. Kullanılan sensörlerin ölçüm aralığı tasarımına bağlı olarak en fazla 7 bardır. Su basıncının ölçümü, ölçüm membranının atmosferik hava basıncına karşı genişlemesine bağlıdır. Seramik bir filtre, membranı çevreleyen zeminden korur.

2.5.5.4 Kullanılan Malzemeler

Tüm santrifüj deneyleri için, Zürih yakınlarındaki Birmensdorftan gelen kil kullanılmıştır. Kullanılan deniz tabanı kilinin özelliklerinin araştırılması için örselenmiş ve örselenmemiş kil üzerinde detaylı çalışmalar yapılmıştır (Fauchère, 2000, Fleischer, 2000, Panduri, 2000, Züst,

2000, Basler, 2002, Küng, 2003, Messerklinger ve diğ., 2003; Plötze ve arkadaşları, 2003; Trausch Giudici, 2003; Nater, 2005; Messerklinger, 2006).

Sınıflandırma, kıvam ve akış limitleri, Atterberg'e (1913) göre belirlenmiştir. Kil içeriğinin belirlenmesi, hidrometre deneyi ile gerçekleştirilmektedir. Tablo 2.8'de, santrifüj deneyi modelinden iki kil örneği incelemesinin ortalama değerleri gösterilmektedir. Tablo 2.9'da Küng (2003) tarafından yapılan çalışmalarda Birmensdorf kilinin üç eksenli ve ödometre testlerinin sonuçları yer almaktadır. Santrifüj deneylerinde kullanılması için, başlangıçtaki yaklaşık % 100 su içeriğine sahip kil modeli, kademeli olarak hazırlanır.

Tablo 2.8: Birmensdorf kilinin mekanik sınıflandırması.

Sınıflandırma (USCS)	CH
Kil İçeriği (<2 μ m - %)	42
Likit Limit (LL - %)	58
Plastik Limit (PL - %)	19
Plastisite İndisi (IP - %)	39

Tablo 2.9: Birmensdorf kilinin mekanik özellikleri.

Katı Birim Hacim Ağırlığı	γ_s	(g/cm ³)	2.75
Efektif Sürtünme açısı	ϕ'_{cv}	(°)	24.5
Efektif Kohezyon	c'	kN/m ²	0
Sıkışma İndeksi	C_c	(-)	0.49
Tekrar Yükleme İndeksi	C_s	(-)	0.03
Cam-Clay Parametresi	M	(-)	0.97
Cam-Clay Sıkışma Katsayısı	λ	(-)	0.21
Cam Clay Kabarma Katsayısı	κ	(-)	0.01

Tablo 2.10: Normal konsolide Birmensdorf kilinin mekanik özellikleri.

Doygun Birim Hacim Ağırlığı	γ_{sat}	(g/cm ³)	1.82
Boşluk Oranı	e	(-)	1.10
Su Muhtevası	w	(-)	0.40
Permeabilite Katsayısı	k	(m/s)	1.5.10 ⁻⁹
Konsolidasyon Katsayısı	c_v	(m ² /s)	1.3.10 ⁻⁷
Sıkışma İndeksi	C_c	(-)	0.44
Tekrar Yükleme İndeksi	C_s	(-)	0.05

Taş kolon imalatında kullanılacak malzeme için işlenmiş ve elenmiş, tane büyüklüğü 0.5 - 1.0 mm arasında olan kuvars kumu kullanılmıştır. Seçilen malzeme özellikleri Tablo 2.11'de verilmektedir. Kuvars kumu kötü derecelenmiş (SP) olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 2.11: Kuvars kumunun özellikleri.

Sınıflandırma (USCS)	SP	
Tane Şekli	Yuvarlak Kenarlı	
Homojenlik Katsayısı	C_{ud}	1.40
Katı Birim Hacim Ağırlığı	γ_s (g/cm ³)	2.65
Kuru Birim Hacim Ağırlığı - ASTM D 4253, 2002 Metot 1A	γ_d (g/cm ³)	1.62
Kuru Birim Hacim Ağırlığı - ASTM D 4253, Metot 1B	γ_d (g/cm ³)	1.60
Kuru Birim Hacim Ağırlığı - ASTM D 4254, 2002 Metot A	γ_d (g/cm ³)	1.50
Kuru Birim Hacim Ağırlığı - ASTM D 4254, Metot C	γ_d (g/cm ³)	1.39
Efektif Sürtünme açısı	ϕ'_{cv} (°)	37
Sıkışma İndeksi	C_c (-)	0.088
Tekrar Yükleme İndeksi	C_s (-)	0.007
Permeabilite Katsayısı	k (m/s)	$2.0 \cdot 10^{-3}$

Dolgu imalatı öncesinde, dolgu altında yaklaşık 300 kN/m'lik bir gerilme mukavemetine sahip geogrid eleman temel olarak kullanılacaktır. Gerilme değeri gerçek boyutlu imalat için belirlenmiş olup model hazırlanırken gözenek boyutu ve gerilme mukavemeti değerleri ölçeklendirilmiştir. Tablo 2.12'de seçilen geogrid elemanın özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.12: Geogrid özellikleri (Weber, 2007).

İsim	Tenax-Kap/L	Tenax-Joint
Malzeme	Fiberglas	Fiberglas
Gözenek Boyutu (mm)	6.0*4.0	2.8*2.8
Kalınlık (mm)	0.30	0.25
Gerilme Direnci (kN/m)	10.0	7.8
Esneme Sınırı (%)	4.0	3.0

Santrifüj deneylerindeki dolgu için farklı malzemeler kullanılmıştır. İlk iki testte (deney v1 ve v2), kuvars kumu kullanılmış ancak dolgu imalatı esnasında elverişsiz yerleşme ve santrifüj silindirinin sınırlı derinliğinden dolayı, sadece düşük dolgu yükleri modellenenmiştir. Test kabında, seçilen kil tabakası üzerine sadece 5 cm kalınlığında bir dolgu tabakası imal edilebilmektedir. Söz konusu yüksekli, 50 g ile ölçeklendirme yapıldığında 2.5 m'lik bir dolgu yüksekliğine karşılık gelmektedir. Bu nedenle sonraki santrifüj deneylerinde kurşun parçaları dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Kurşun parçaları ile kum dolgunun yoğunlukları karşılaştırıldığında, yaklaşık 3.5 kat daha yoğun olan kurşun parçaları sayesinde daha yüksek

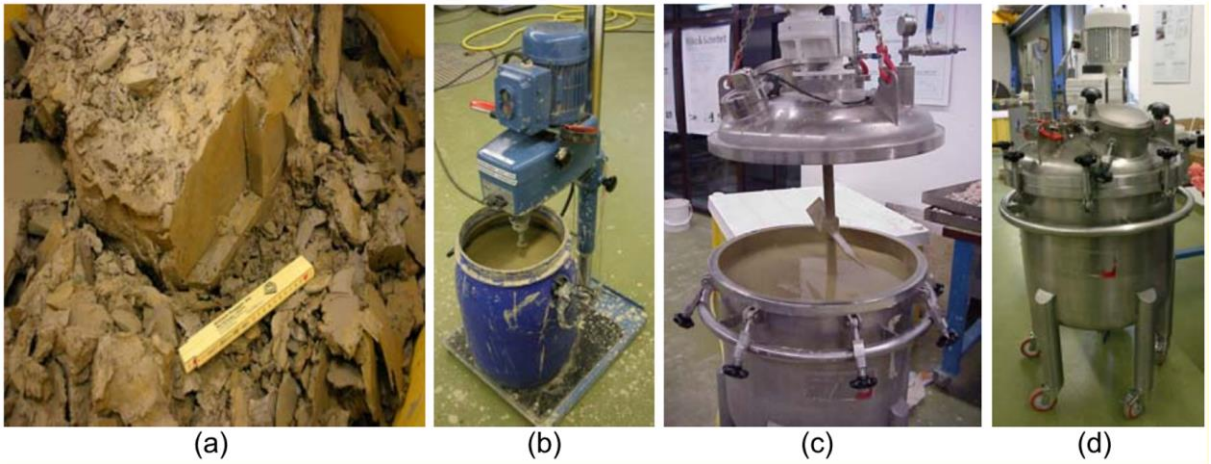
dolgu yükleri modellenebilmektedir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan kurşuna ait özellikler Tablo 2.13'te verilmektedir.

Tablo 2.13: Dolgu malzemesi (kurşun) özellikleri.

Malzeme Çapı	R	(mm)	2.00
Katı Birim Hacim Ağırlığı	γ_s	(g/cm ³)	11.34
Kütle Yoğunluğu	γ	(g/cm ³)	6.72
En Küçük Kuru Yoğunluk	γ_{dmin}	(g/cm ³)	6.47
Doymun Birim Hacim Ağırlığı	γ_{sat}	(g/cm ³)	5.96
Efektif Sürtünme açısı	ϕ'_{cv}	(°)	25
Sıkışma İndeksi	C_c	(-)	0.032
Kabarma/Tekrar Yükleme İndeksi	C_s	(-)	0.002

2.5.5.5 Kilin İşlenmesi

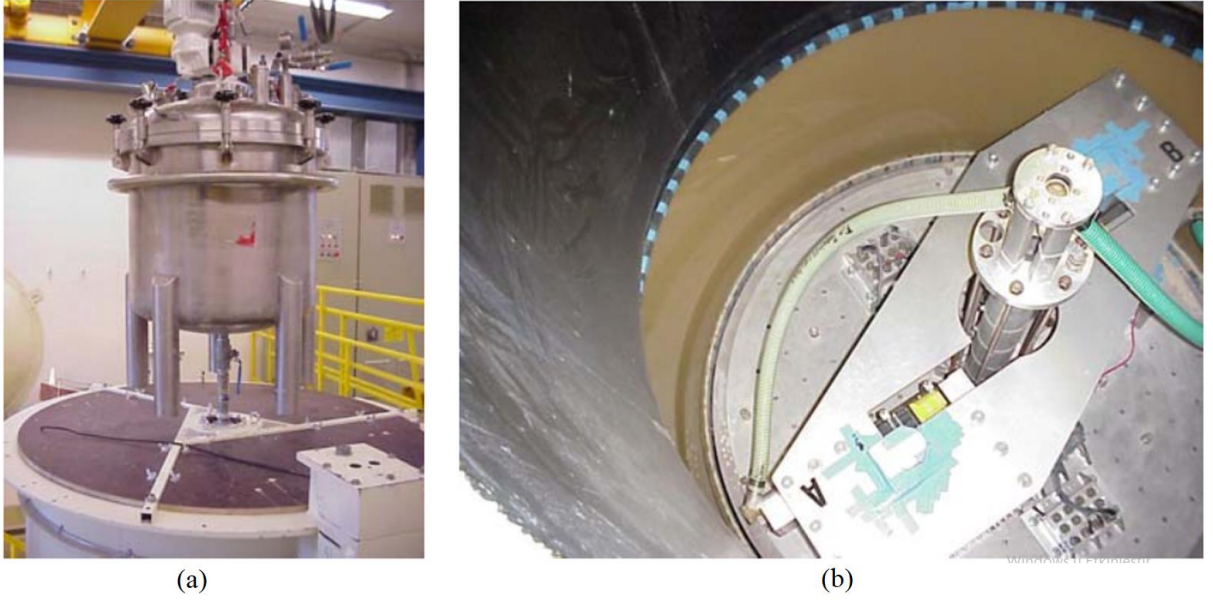
Prensipte, örselenmemiş veya hazırlanmış zemin örnekleri ile çalışmak mümkündür. Ancak örselenmemiş zeminlerin hazırlanmasının getirdiği zorluklar nedeni ile santrifüj çalışmalarında işlenmiş/hazırlanmış malzemeler ile çalışılmıştır. Malzemenin işlenmesi için başlangıçta parçalara ayrılır (Şekil 2.66-a). Kil parçalarına su eklenip pervane mikseri ile şerbete dönüştürülür (Şekil 2.66-b). %100 ile %120 su içeriğinde, kil iyi işlenebilir kıvama gelmektedir. Karıştırma işleminden sonra kil şerbeti elenerek, taş, çakıl, kum ve organik madde kalıntılarından uzaklaştırılır. Son olarak, şerbet, sıkışmış hava kabarcıklarını uzaklaştırmak ve doygunluğu arttırmak için birkaç saat vakum altında orta derecede karıştırılır (Şekil 3.22-c/d).



Şekil 2.66: Kil malzemesinin işlenmesi (Weber 2007).

2.5.5.6 Deney Modellerinin Hazırlanması

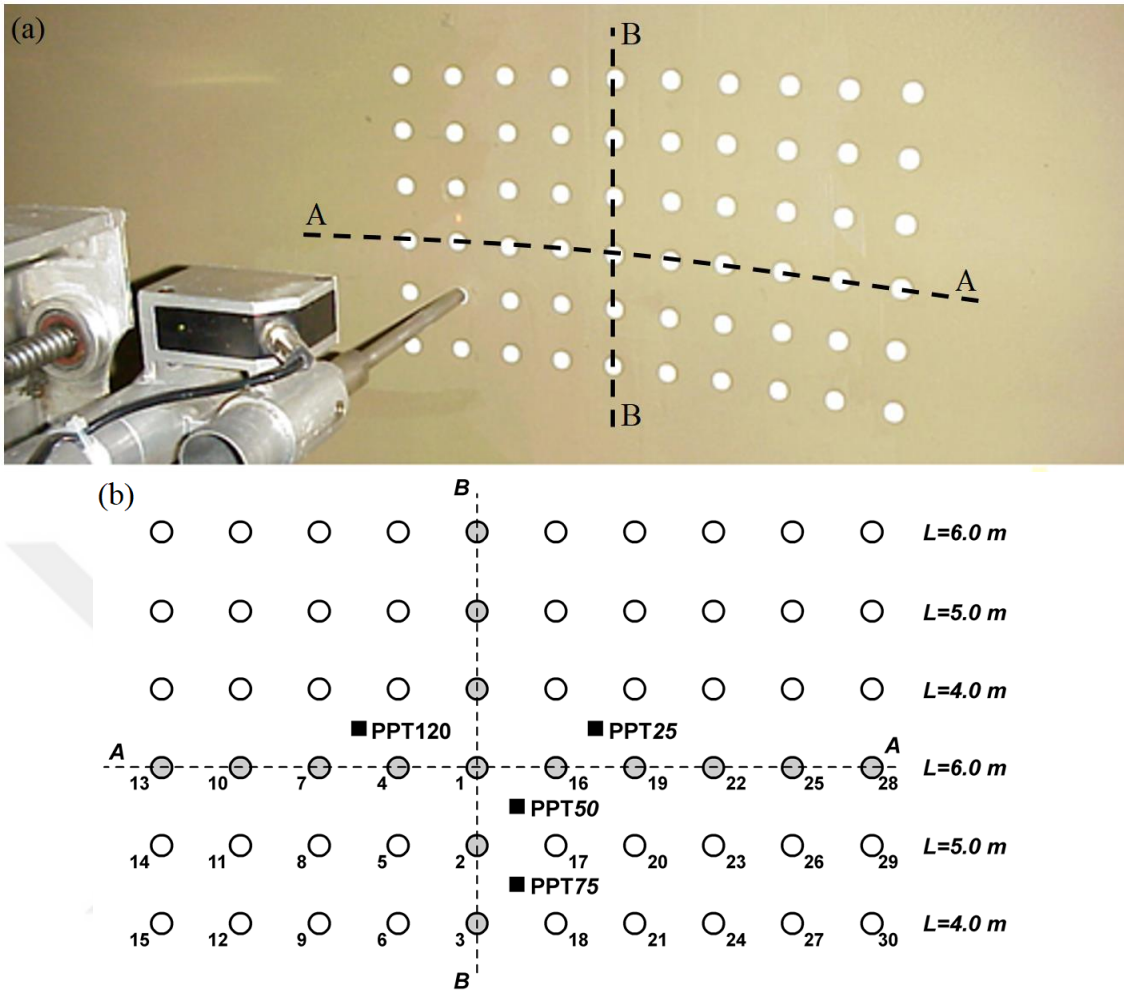
Hazırlanan kil şerbeti, karıştırma tamburundan silindire doldurularak, zemin kademeler halinde imal edilmiştir (Şekil 2.67). Kademeli imalatın sebeplerinden biri vakum tankının kapasitesi iken bir diğer nedende ince tabakalar halinde serilen kilin konsolidasyon sürelerinin de kısa olmasıdır. Kalın tabaka halinde imal edilecek kil için çok uzun konsolidasyon süresi gerekmektedir.



Şekil 2.67: Kil malzemesinin yerleştirilmesi, a-doldurulması için silindir üzerine yerleştirilen vakum kabı, b-döner silindir yüzeyine serilmiş kil şerbeti (Weber 2007).

Hazırlanan kil modeli üzerinde boşluk suyu basınçölçerler belirlenen noktalarda, kum kolon montaj aleti vasıtasıyla istenilen derinliklerde yerleştirilmiştir. Yerleştirilen ölçüm cihazlarından test süresi boyunca sürekli ölçüm alınmıştır. Ölçüm aletlerinin yerleştirilmesi sonrasında model, test için hazır hale gelmiştir ve bu aşamada kil normal konsolidedir. Akabinde imalat aşamaları maddeler halinde verilecek olursa;

- Santrifüj aleti 60g ivme ile döndürülerek kil yerleşimi yapılmış, sonrasında ölçek oranı (1/50) olarak belirlenen 50g ivme ile dönme hareketi devam ettirilmiştir.
- Belirlenen noktalara doldurma borusunun tıkanmaması için levhalar yerleştirilerek dönme işlemi devam ederken kolon imatları yapılmış (Şekil 2.68).
- Temel malzemesi olan geotekstil örtü yerleştirilmiş,
- Dolgu imalatı yapılmış ve dolgu altında zaman-oturma davranışı gözlenmiştir.



Şekil 2.68: Kolon ve ölçüm aletlerine ait yerleşim planı, a-santrifüj modeli, b-şematik gösterim.

Model 60g dönme hızında iken, boşluk suyu basınçlarının oluşturulmasında teknik sorunlar meydana gelmiştir. Vanalarda oluşan sızıntılar nedeniyle, su akışı durdurulamamış, bundan dolayı bu aşamada ilave boşluk suyu basınçları oluşturulamamıştır. Ancak devam eden aşamalarda (50g dönme hızında) sorun çözülerek ilave boşluk suyu basınçlarının oluşması sağlanmıştır. Karşılaşılan problem nedeni ile kil zeminde yüksek aşırı konsolidasyon oranları (2,5~3,0) meydana gelmiştir.

2.5.5.7 Deney Model Geometrisi

Tambur içerisinde hazırlanan zemin 700*750 mm'lik alanlara sahip sekiz sektöre ayrılarak farklı deneyler yapılmıştır. Hazırlanan modellere ait şematik gösterimler Şekil 2.69'da her bir deney için belirlenen özellikler ise Tablo 2.14'te verilmektedir. Bütün deneylerde dolgu malzemesi olarak kurşun parçaları kullanılmış ve dolgu altında geogrid elemanlar ile temel sistemi oluşturulmuştur. Yer altı su seviyesi her model için zemin yüzeyindedir.

Tablo 2.14: Deneylere ait model özellikleri.

Deney	v5_s1	v5_s2	v5_s3	v5_s4	v5_s5	v5_s6	v5_s7	v5_s8
A_c/A_s (%)	-	-	12	5	8	10	12	12
a (mm)	-	-	31	48	38	34	31	31
n_s	-	-	60	32	40	60	60	60
n_r	-	-	6	4	5	6	6	6
L (mm)	190	200	230	190	200	200	230	230
B (mm)	30	40	50	40	40	30	50	50
H_1 (mm)	15.4	36	14.8	17.4	15.3	11.7	14.8	13
H_2 (mm)	15.4	-	14.2	17.8	13.7	19.4	14.2	16.9
σ_v (kPa)	83	-	86	104	86	92	86	88
t_k (min)	253	-	47	253	211	211	47	166

A_c/A_s (%) : Yer değiştirme oranı

n_s : Toplam kolon sayısı

n_r : Kesit boyunca kolon sayısı

H_1 (mm) : 1. aşama dolgu yüksekliği

H_2 (mm) : 2. aşama dolgu yüksekliği

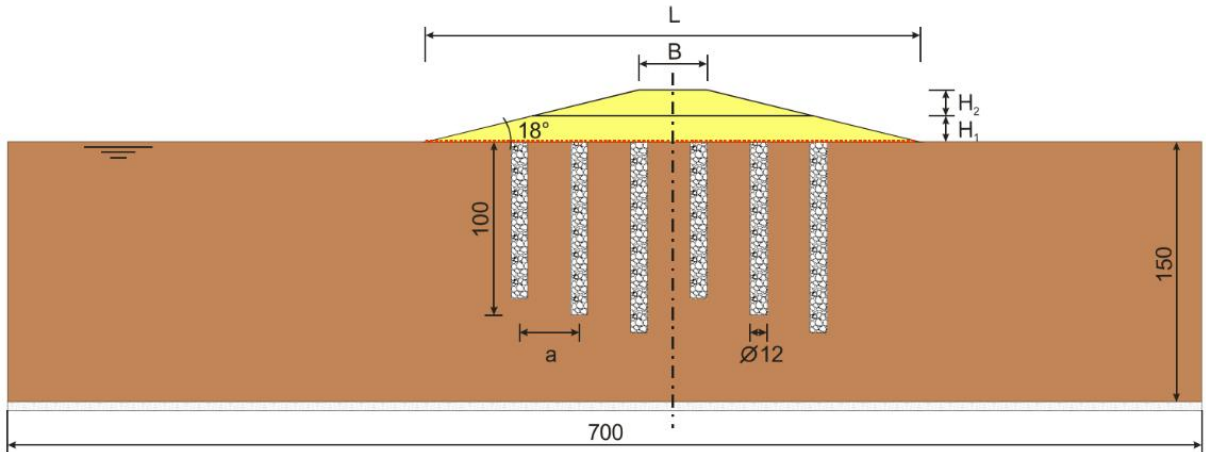
t_k (min) : İlk aşama dolgu imalatı sonrasında geçen konsolidasyon zamanı

a (mm) : Kolonlar arası mesafe

L (mm) : Dolgu taban genişliği

B (mm) : Dolgu tepe genişliği

σ_v (kPa) : Dolgu altı gerilme

**Şekil 2.69:** Tambur içi model boyutları (Weber 2007).

2.5.5.8 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırma verisi olarak kullanılacağından dolayı detaylı olarak bir sonraki ana başlıkta (Malzeme ve Yöntem) incelenmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

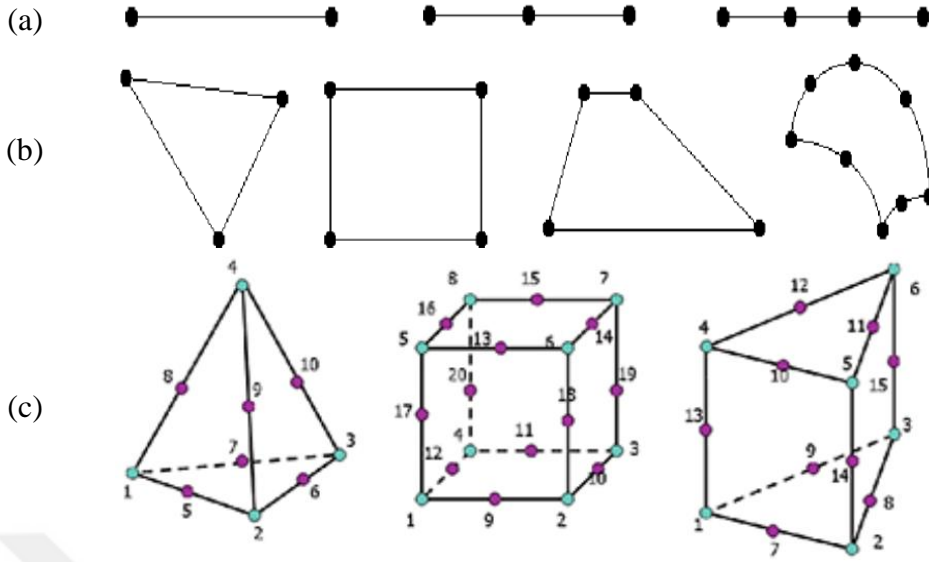
Bu tez çalışmasında kullanılacak ana elemanlar taş kolonlar ile ilgili literatür çalışmaları ile sonlu elemanlar programıdır. Aynı zamanda Thomas Michael Weber, S. A. Tan, S. Tjahyono, K.S. Ng, ve K. K. Oo tarafından yapılan çalışmalar kullanılacak dönüşümlerin elde edilebilmesi bakımından yöntemi belirlemektedir.

3.1 PLAXIS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI

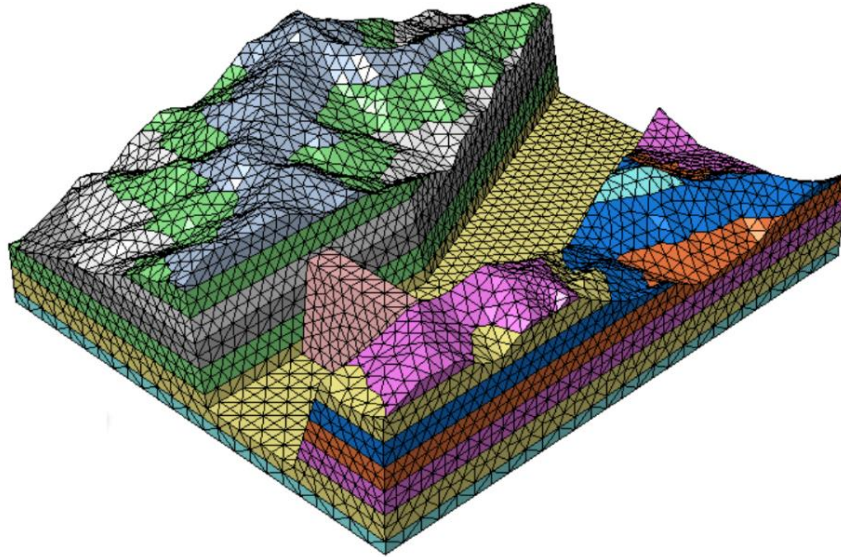
Mühendislikte analitik olarak çözemediğimiz problemleri sayısal olarak çözebilmekteyiz. Sayısal analiz matematiğin bir dalı olup sürekli değişkenleri olan problemlerin çözümünde diferansiyel denklem, integral veya bilgisayar yardımı ile çözümlenebilir. İkinci dereceden denklemler, sayısı fazla olmayan cebirsel denklem sistemleri, lineer diferansiyel denklemler ve sistemleri veya düzgün geometriye sahip kısmi türevli lineer diferansiyel denklemler için analitik çözümler yapılabilmesine karşın büyük denklem sistemleri, lineer olmama durumu ve karmaşık geometri durumlarında sayısal yöntemler uygulanmaktadır. Teknoloji ve bilgisayarların gelişimine bağlı olarak sayısal analiz metotları da gelişmektedir. Bu metotlara örnek olarak:

- Sonlu Elemanlar (Finite Element Method, FEM),
- Rastsal Sonlu Elemanlar (Random Finite Element Method, RFEM),
- Sonlu Farklar (Finite Difference Method, FDM),
- Ayrık Elemanlar (Discrete Element Method, DEM),
- Malzeme Nokta Metodu (Material Point Method, MPM) gösterilebilir.

Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan Plaxis 2D versiyon 2016.01 programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık yükleme, geometri ve malzeme özelliklerine sahip problemlerin çözümünde kullanılabilir. Yöntemde, analitik olarak çözülemeyecek elemanların parçalara ayrılması ile çözülmesi prensibi vardır (Şekil 3.1 ve 3.2). Yöntem ilk olarak gerilme analizi hesaplamalarında kullanılmıştır. Günümüzde ise köprü, baraj, tünel, şev, dolgu/yarma, zemin iyileştirme gibi her türlü geoteknik tasarımın yanı sıra gerilme, akışkanlar, biyomekanik, akustik ve uçak/otomotiv gibi mühendisliğin ilgilendiği neredeyse her konuda kullanımı mevcuttur.



Şekil 3.1: Sonlu eleman örnekleri a-bir boyutlu, b-iki boyutlu, c-üç boyutlu elemanlar.



Şekil 3.2: Geometrinin sonlu elemanlara ayrılması.

Sonlu sayıda küçük elemanlara bölünen parçaların ortak noktaları düğüm noktası olarak adlandırılır ve bu noktalarda diferansiyel denklemler yazılıp integre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Örneğin malzeme bünye davranışı denklemi 3.1 formülü ile gösterilmiştir. Malzeme bünye davranışı, genellikle efektif gerilmedeki değişim oranı ile şekil değişim oranı ilişkisini tanımlar (Denklem 3.2).

$$\underline{\dot{\sigma}'} = \underline{M} \underline{\dot{\epsilon}} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\sigma}'_{xx} \\ \dot{\sigma}'_{yy} \\ \dot{\sigma}'_{zz} \\ \dot{\sigma}'_{xy} \\ \dot{\sigma}'_{yz} \\ \dot{\sigma}'_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E'}{(1-2\nu')(1+\nu')} \begin{bmatrix} 1-\nu' & \nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & 1-\nu' & \nu' & 0 & 0 & 0 \\ \nu' & \nu' & 1-\nu' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}'_{xx} \\ \dot{\epsilon}'_{yy} \\ \dot{\epsilon}'_{zz} \\ \dot{\gamma}'_{xy} \\ \dot{\gamma}'_{yz} \\ \dot{\gamma}'_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Rijitlik matrisinin hesaplanması için ise yerdeğiştirme fonksiyonlarının oluşturulması gerekmektedir. Genel ifadesi ile verilen rijitlik matrisi Denklem 3.3'te verilmiştir.

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3.3)$$

$\{F\}$ = Yükleme vektörü,

$[K]$ = Geometri, malzeme vb. özellikleri matrisi

$\{U\}$ = Yerdeğiştirme vektörüdür.

Oluşturulan denklem ile yerdeğiştirme $\{U\}$ ve geometri, malzeme özellikleri biliniyor $[K]$ ise yükleme fonksiyonu elde edilebilir ya da yapılacak dönüşümler ile yükleme $\{F\}$ ve geometri, malzeme özellikleri $[K]$ biliniyor ise yerdeğiştirme $\{U\}$ belirlenebilir.

Geoteknik mühendisliğinde tasarım için;

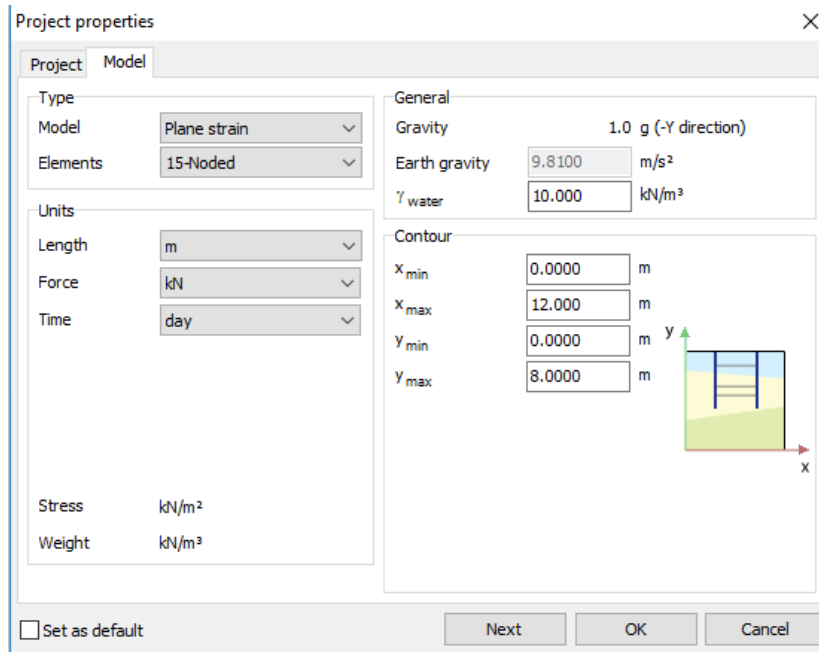
- Geometrik özelliklere (Topoğrafya, zemin profili, YASS durumu, komşu yapı yerleşimleri, tasarım kısıtları vb.)
- Malzeme özelliklerine (zemin, kaya birim, yapısal eleman parametreleri vb.)
- Süre (imalat aşamaları ve süreleri, yapı ömrü vb) gibi özelliklerin bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1.1 Programa Giriş

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programı son yıllarda, kullanıcı ara yüzünün gelişmesi, farklı malzeme özelliklerinin eklenmesi gibi yenilemeler ile kullanıcılar için daha kolay ve hızlı çözümler bulmasında önemli rol oynamaktadır. Hollanda Delfh Teknik Üniversitesi tarafından 1987 yılında tasarlanan program ile yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi sağlanmıştır. Sonraki yıllarda ise, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Plaxis ile yapılacak analizlerde farklı aşamalar ile problemin tanımlanması gereklidir. İlk olarak program açıldığında karşımıza proje özellikleri ekranı gelmektedir. Bu ekranda “Project” sekmesi modelin ismi, dosya lokasyonu, şirket anteti gibi özelliklerinin belirlenmesini sağlar. “Model” sekmesinde ise;

- Model tipi (düzlem deformasyon, aksenel simetrik),
- Düğüm noktası (6 veya 15 düğüm noktası),
- Analiz birimleri (m, ft, kN, kip, saniye, gün vb.),
- Yerçekimi ve su özellikleri ($g=9.81 \text{ m/s}^2$, $\gamma_{su}=10 \text{ kN/m}^3$)
- Modelin sınır koşullarının belirlenmesi (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max}) sağlanır (Şekil 3.3).

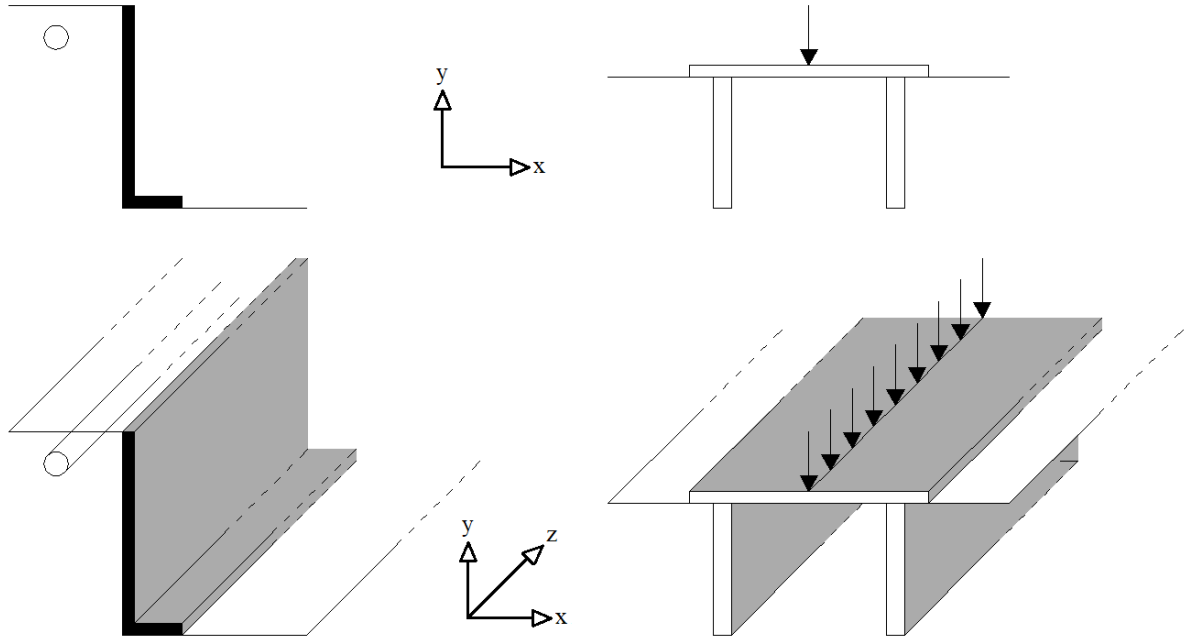


Şekil 3.3: Proje özellikleri, model ayarları.

Model ayarları sekmesinde bulunan yer çekimi ile su özellikleri standarttır ve çok özel model oluşturulması haricinde değiştirilmesine gerek yoktur. Birimler çalışılacak sisteme göre belirlenebilir. Sınır koşulları seçiminde dikkat edilmesi gereken husus, analizi yapılacak bölgeyi etkilemeyecek mesafelerin seçilmesidir. Örneğin bir temel altı kazık tasarımı yapılırken y_{\min} değerinin kazık alt kotlarına çok yakın seçilmesi, kazık uçlarında gerçekte oluşacak deplasmanların elde edilememesine neden olur ve doğru çözüm gerçekleştirilememiş olur. Düğüm noktası seçiminde 15 nokta seçimi daha fazla denklem ve daha az hata yapılmasını sağladığı gibi bazı modellerde fazla nokta-doğru sonuç ilişkisi bazen geçerli olmamaktadır. Yapılan çözümde yakınsama hataları nedeni ile sonuçlar hatalı çıkabilir ya da elde edilemeyebilir.

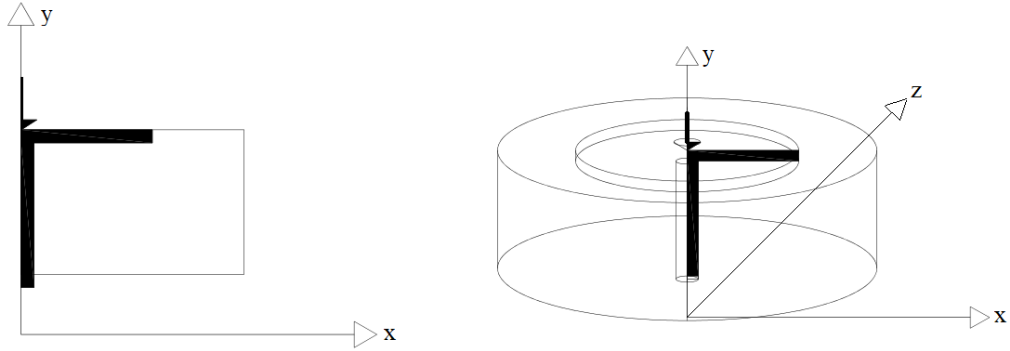
Model seçimini detaylı olarak incelemek gereklidir. Program kullanıcıya iki farklı model seçebilmesine imkân tanır. Bunlar düzlem deformasyon ve eksenel simetrik modellerdir. Her iki modelde de kullanıcı iki boyutlu geometri tanımlayabilmektedir.

Düzlem deformasyon modelinde tanımlanan geometri, tanımlanmayan 3. ekseninde sonsuz uzunlukta olarak kabul edilir (Şekil 3.4). Bu nedenle model seçildiğinde bazı dönüşümlerin yapılması gerekebilir.



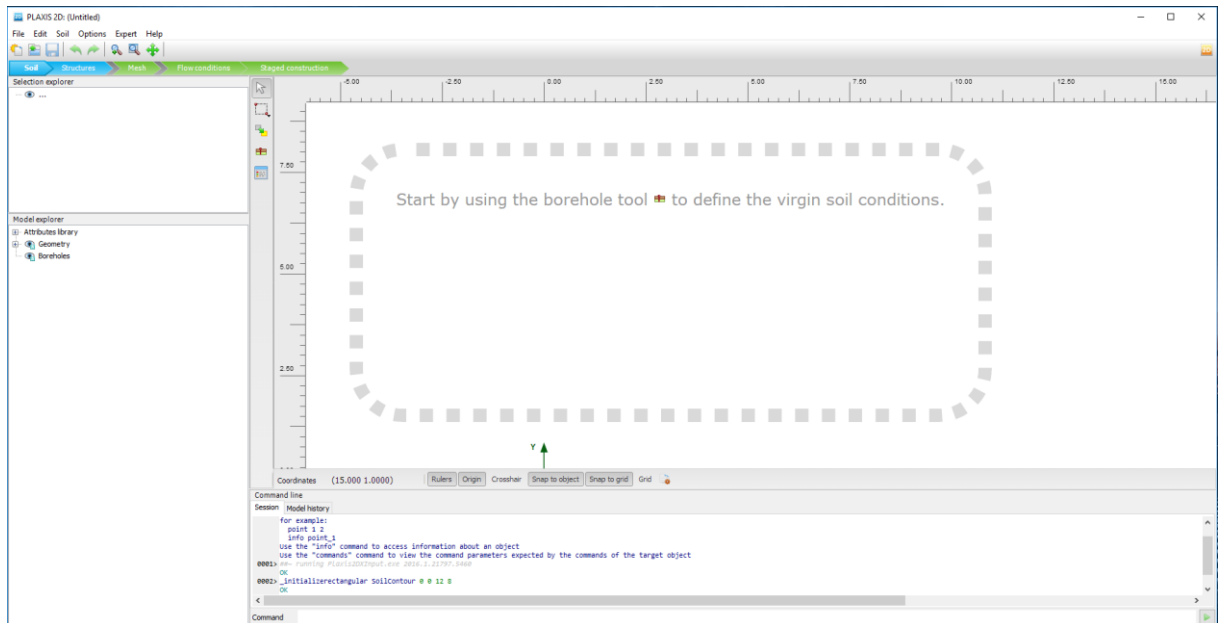
Şekil 3.4: Düzlem deformasyon model.

Eksenel simetri modeli ise 2 boyutlu tanımlanan geometrinin y eksenini orijinde 360° döndürülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu model genellikle tekil kazık analizlerinde kullanılmaktadır. Eğer eksenel simetri ile temel altı kazık tasarımı ya da istinat duvarı analizi yapılırsa tamamen hatalı sonuçlar elde edilecektir.



Şekil 3.5: Eksenel simetrik model.

Proje ve model ayarları yapıldıktan sonra programın giriş ekranı gelmektedir. Giriş ekranında “Soil” (Zemin), “Structures” (Yapısal Elemanlar), “Mesh” (Ağ-Sonlu Elemanlara Bölme), “Flow Conditions” (Akış Koşulları) ve “Staged Construction” (İmalat Aşamaları) sekmeleri takip edilerek analizler gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Plaxis 2D versiyon 2016.01 giriş ekranı.

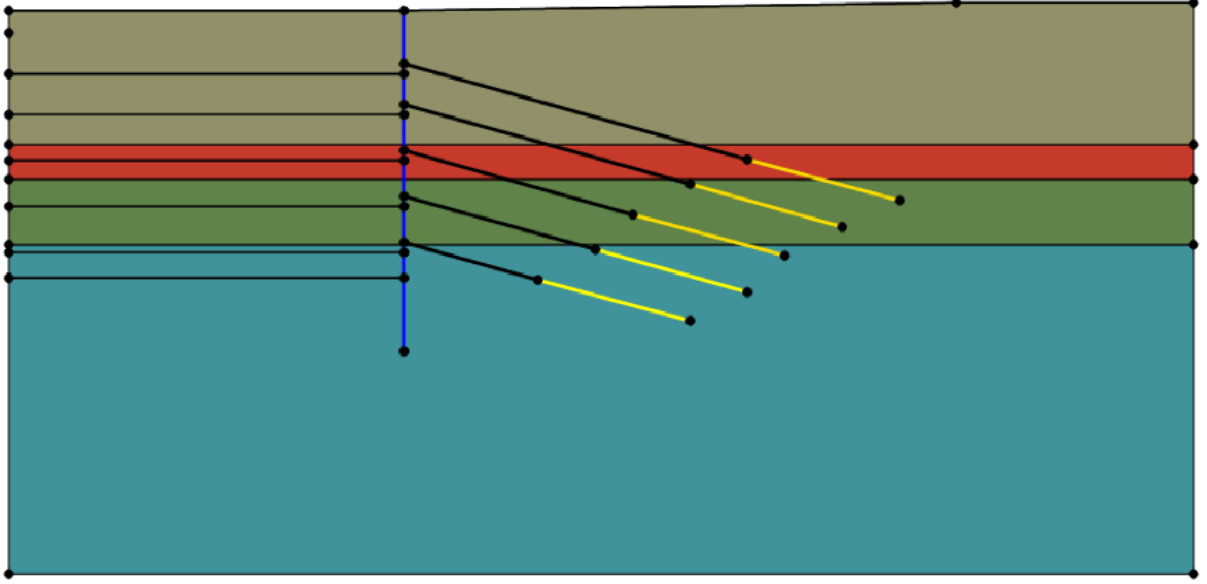
“Soil” sekmesinde sondaj kuyuları eklenerek arazi topoğrafyası ve tabakalanması tanımlanabilir ya da “Structures” sekmesinden de aynı işlem gerçekleştirilebilir. Aynı şekilde malzeme özellikleri iki sekmeden de yapılabilmektedir.

“Structures” sekmesinde, bütün yapısal elemanlara ait geometriler tanımlanabilmektedir (yükleme durumu, zemin tabakaları, deplasman-ısı-akış sınır koşulları, tünel, ankraj, kazık vb.). Aynı zamanda malzeme özellikleri de tanımlanabilmektedir. Tanımlanabilen malzemeler zemin ve ara yüzey, plaka elemanlar, geogridler, zemin içi kiriş-kolonlar ve ankrajlardır. Malzeme özellikleri Bölüm 3.1.2 detaylı olarak incelenecektir.

“Mesh” sekmesinde oluşturulan geometrik model üçgen sonlu elemanlara ayrılır. Bu sekmede oluşturulan ağın boyutları da belirlenebilir. Aynı zamanda grafiklerde kullanılabilmesi için düğüm noktaları veya gerilme noktalarının seçimi yapılabilir.

“Flow Conditions” sekmesinde su seviyesi, sınırları belirlenebildiği gibi istenilen bölgenin kuru hale getirilebilmesi de sağlanabilir.

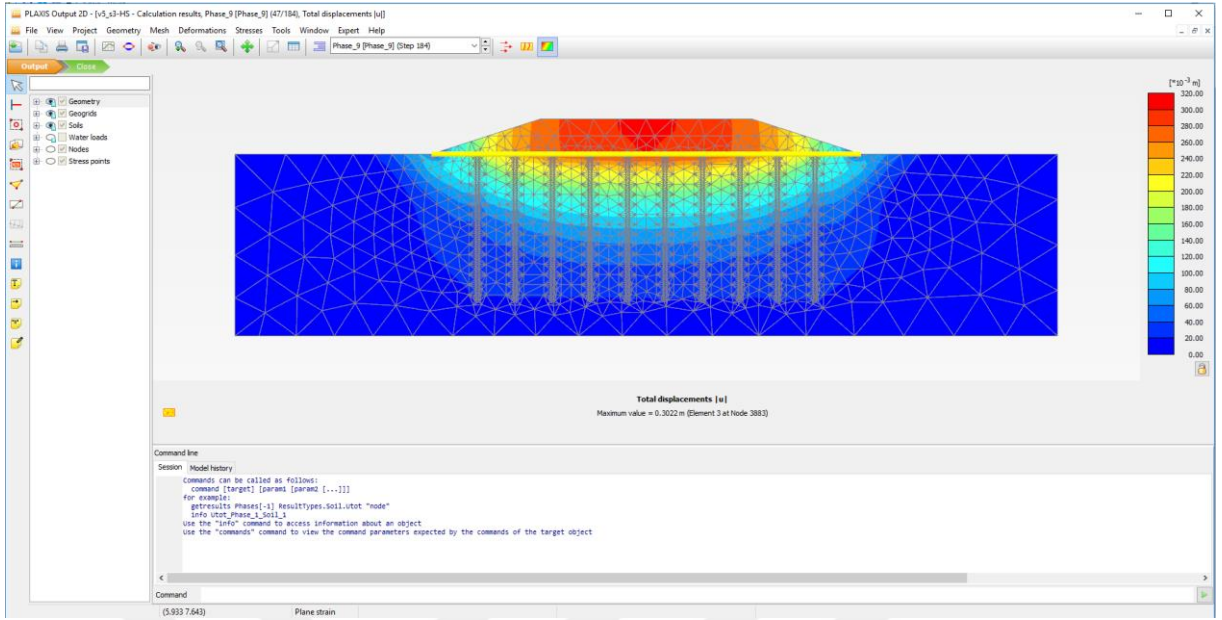
“Staged Construction” sekmesinde ise imalat aşamaları sahada yapılacak adımlar taklit edilerek tanımlanır. Bu noktada aşamaları gerçeğe mümkün olduğunca benzetmek gerekmektedir. Aksi halde elde edilecek sonuçlar gerçekte oluşacak durumu yansıtmayabilir. Örneğin dolgu altında bulunan zemin içerisinde taş kolon imalatı yapılırken, önce taş kolonlar, zemin birim içerisinde ve zemini sıkıştırarak imal edilmeli ardından dolgu imalatı gerçekte yapılacak kademeler halinde ve aynı zaman dilimleri kullanılarak yüklenmelidir. Ya da kademeli iksa kazılarında sahada olduğu gibi önce kazık imalatı yapılmalı, ardından kademe kazısı ve sonraki aşamada ankraj imalatları yapılmalıdır ve bu döngü nihai kota kadar tekrarlanmalıdır. Kazı ve ankraj imalatlarının aynı aşamada tanımlanması ile sistem deplasman yapmaya müsaade edilmemiş olacağından dolayı gerçekte oluşacağından daha az deplasmanlar elde edilebilir. İmalat aşamalarının tanımlanması için önceki bölümlerde imalatın bütün aşamalarına ait geometrinin oluşturulmuş olması gerekmektedir. Örneğin kademeli bir iksa modelinde “Structures” sekmesinde kazık elemanı, her kazı kademesine ait kazı çizgisi, bütün ankraj ve kökler tanımlanmalıdır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Plaxis 2D ile modellenmiş iksa geometrisi.

İlk aşama her zaman başlangıç durumunu temsil eder ve “Initial Phase” olarak adlandırılmıştır. Bu aşamada modelin başlangıç gerilmeleri hesaplanır. Başlangıç gerilmelerinin hesabı için K_0 yöntemi, alan gerilmesi ya da yerçekimi yüklemesi tipleri seçilebilir. K_0 ve alan gerilmesi yöntemlerinde başlangıç efektif gerilmeler, boşluk suyu basıncı ve durum parametreleri direk oluşturulur. Ancak denge durumu belli değildir. Düz bir topografyaya sahip modellerde başlangıç gerilmeleri bu yöntemler kullanılarak belirlenebilir. Ancak eğimli bir arazi yapısı olan modellerde başlangıç gerilmelerinin sonlu eleman hesaplamaları sonucunda oluşturulduğu yerçekimi yüklemesi ile başlatılması gereklidir. Sonraki aşamalar kullanıcının tanımlayacağı imalat adımlarıdır. Bu adımlar tanımlanırken zemin ekleme-kaldırma, yapısal eleman aktif-pasif etme, su seviyesinin ayarlanması yapılabilir. Bu imalat adımları için plastik, konsolidasyon ve güvenlik olmak üzere üç farklı hesaplama tipi belirlenmiştir. Zamana bağlı hesap yapılması halinde konsolidasyon tipi seçilmelidir. Ya da zamandan bağımsız oluşacak nihai durum sonuçlarını elde etmek için plastik yöntem ile analizler yapılabilir. Modelin göçmeye karşı dayanımını elde etmek için “safety” tip analizler yapılır.

Yapılan analiz sonrasında hesap sonuçlarının kontrol edilebildiği sayfaya geçiş yapılır. Bu bölümde ise zeminde meydana gelecek deformasyonlar, toplam ve efektif gerilmeler, yapısal elemanlara ait deplasmanlar ve kesit tesirleri, boşluk suyu basınçları, analiz bilgileri (Şekil 3.8) görüntülenebildiği gibi rapor oluşturma veya grafik oluşturma sayfalarına geçiş yapılabilir.



Şekil 3.8: Plaxis 2D sonuç ekranı.

3.1.2 Malzeme Modelleri ve Özellikleri

Programda, önceki bölümde de belirtildiği gibi zemin ve ara yüzey, plaka elemanlar, geogridler, zemin içi kiriş-kolonlar ve ankrajlar tanımlanabilmektedir. Her bir malzeme için farklı modeller mevcuttur.

Zemin elemanlar için 13 farklı tip malzeme modeli seçilebilir.

- Linear Elastic model, zemin davranışı temsil etmek için çok yeterli olmayan model genellikle zemin içerisinde bulunan rijit yapılar için kullanılır.
- Mohr-Coulomb (MC) model, genel olarak bilinen ve lineer elastik, tam plastik modelde zemin tabakaları için ortalama bir rijitlik değeri belirlenir. Bundan dolayı hızlı ve yaklaşık sonuçların elde edildiği ön tasarım analizlerinde kullanılması önerilir.
- Hardening Soil (HS) model, zemin tanımlaması için kullanılan gelişmiş bir modeldir. Kum ve çakılın yanı sıra kil ve silt gibi daha yumuşak zeminleri modellemek için kullanılabilir. Modelde ilk yükleme altındaki rijitliğin yanı sıra boşaltma-tekrar yükleme rijitliğide yer almaktadır.
- Hardening Soil Small (HSsmall), Hardening Soil benzeri model, küçük gerilmelerden büyük gerilmelere kadar olan farklı reaksiyon tepkisini taklit eden gerilmeye bağlı rijitlik parametresini içermektedir.

- Soft Soil (SS) model, normal konsolide kil veya turba benzeri yumuşak zeminlerin modellenmesi için kullanılmaktadır. İlk yükleme ve tekrarlı yüklemeler için en iyi sonucu verir.
- Soft Soil Creep (SSC) model, normal konsolide killer veya turba gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışını modellemek için kullanılabilir. Soft Soil model gibi ilk ve tekrarlı yükleme için rijitlik parametreleri bulunmaktadır.
- Jointed Rock (JR) model, plastik kaymanın sınırlı doğrultuda oluşabileceği anizotropik elastik, tam plastik bir modeldir. Katmanlı veya eklemli kayaların anizotropik davranışlarını modellemek için kullanılabilir.
- Modified Cam-Clay (MCC) model, normal konsolide yumuşak zeminlerin kritik durum modellerinde kullanılabilir. Boşluk oranı ile ortalama efektif gerilmeler arasında logaritmik bir ilişki kabulü yapılmaktadır.
- NGI-ADP modeli, kil tipi zeminlerin drenajsız yükleme durumlarında, kapasite, deformasyon ve zemin yapısı etkileşimlerinin tayini için kullanılabilir. Farklı gerilme yolları için farklı anizotropik kayma mukavemetleri tanımlanabilir.
- Hoek-Brown (HB) modeli kayaların izotropik durumlarını tanımlamak için kullanılır. Kaya birim için sabit bir rijitlik tanımlanır. Kayma ve çekme göçmeleri lineer olmayan mukavemet eğrisi ile tanımlanır.
- Sekiguchi-Ohta (Inviscid-Viscid) modelleri, kil tipi zeminler için zamandan bağımsız Cam-Clay benzeri efektif gerilme modelidir.
- Kullanıcı tanımlı model ile Plaxis programı içerisinde sunulan modellerde farklı bir yapısal model oluşturmak mümkündür.

Seçilecek modellerde genel olarak drenaj tipi, birim hacim ağırlık, boşluk oranı, mukavemet ve rijitlik parametreleri, granülometri, permeabilite, ara yüzey özellikleri ile aşırı konsolidasyon parametreleri tanımlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında 3 farklı malzeme modeli kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

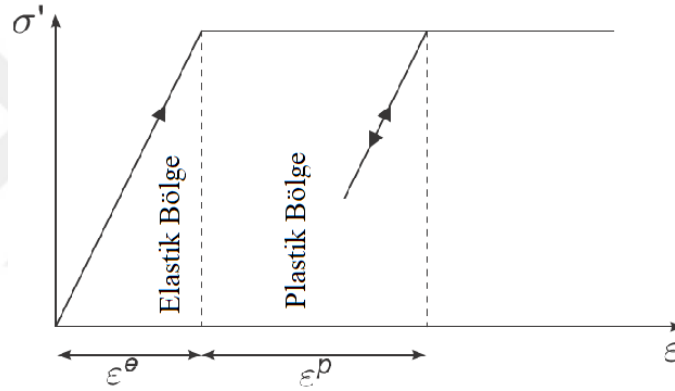
3.1.2.1 Mohr-Coulomb (MC) Model

Zeminler gerilme veya deformasyon değişiklikleri altında doğrusal olmayan davranış gösterirler. Genellikle ön tasarım için kullanılan modelde ise zemin rijitlikleri gerilmeden bağımsızdır ve malzemenin göçmeye kadar lineer elastik davranış yaptığı kabul edilir. Modelde

elastik ve plastik davranış net sınırlarla belirlenmiştir. İlk yükleme ile sonrasında yapılacak tekrarlı yükleme durumlarında gerilme-şekil değiştirme doğrusu her zaman aynı eğime sahiptir (Şekil 3.9).

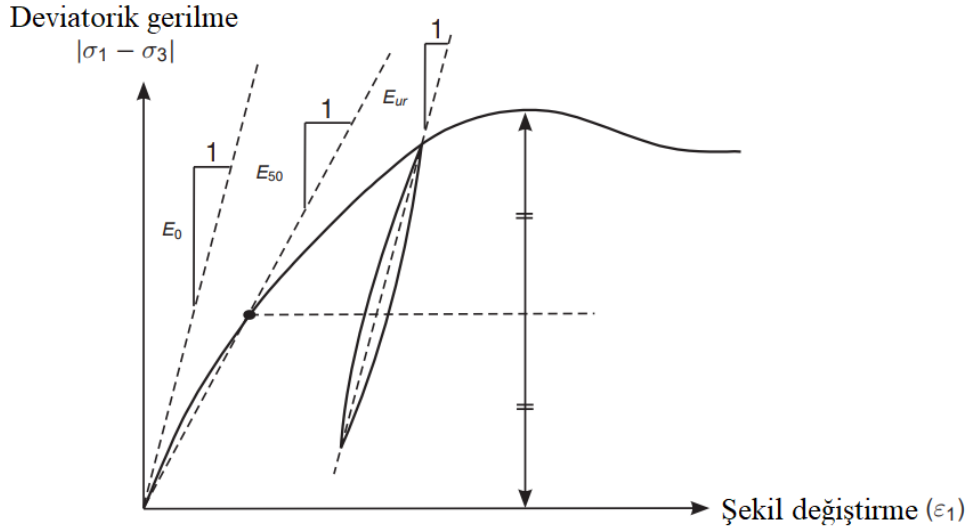
Her zemin modeli için gerekli kuru ve doymun birim hacim ağırlık (γ_{unsat} , γ_{sat}), başlangıç boşluk oranı (e_{init}) ve geçirgenlik katsayıları (k_x , k_y) yanı sıra gerekli temel zemin parametreleri;

E'	: Young modülü	(kN/m^2),	Alternatif \Rightarrow	G	: Kayma modülü	(kN/m^2)
ν'	: Poisson oranı	(-),		E_{oed}	: Odömetre modülü	(kN/m^2)
c'_{ref}	: Kohezyon	(kN/m^2),				
ϕ'	: Kayma açısı	($^\circ$),				
ψ	: Genleşme açısı	($^\circ$),				
σ_t	: Gerilme dayanımıdır	(kN/m^2).				



Şekil 3.9: Mohr-Coulomb model için gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinin başlangıç eğimi (tanjant modülü) E_0 ile gösterilirken, sekant modülü E_{50} ile gösterilmektedir (Şekil 3.10). Bu modelde Young modülü (E') olarak tanımlanan gerilme-şekil değiştirme doğrusunun eğimi için tek bir değer tanımlanabilmektedir. Tanımlanacak değer için, lineer elastik aralığı geniş malzemelerde daha uygun sonuçlar elde edilebilmesi açısından E_0 yerine E_{50} , boşaltma-tekrar yükleme durumlarını temsil eden modellerde ise E_{ur} kullanılabilir.



Şekil 3.10: Üç eksenli basınç deneyi ile E_0 , E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} belirlenmesi.

Alternatif olarak girilebilen kayma modülü (G) ve odömetre modülü (E_{oed}), Young modülü (E') ile poisson oranına bağlı 3.4 ile 3.5 denklemleri ile hesaplanabilir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.4)$$

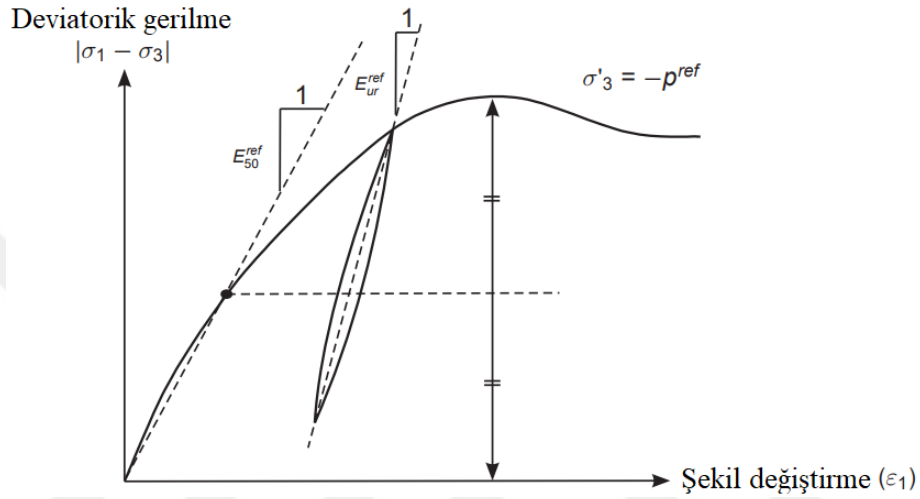
$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \quad (3.5)$$

Alternatif parametrelerden birine özel bir değer girilmesi halinde Young modülü (E') değeri program tarafından tekrar hesaplanırken, poisson oranı (ν) değeri sabit kalır. Sadece alternatif parametrelerin girilmesi halinde poisson oranı değeri “0” olarak kabul edilmiş olacaktır.

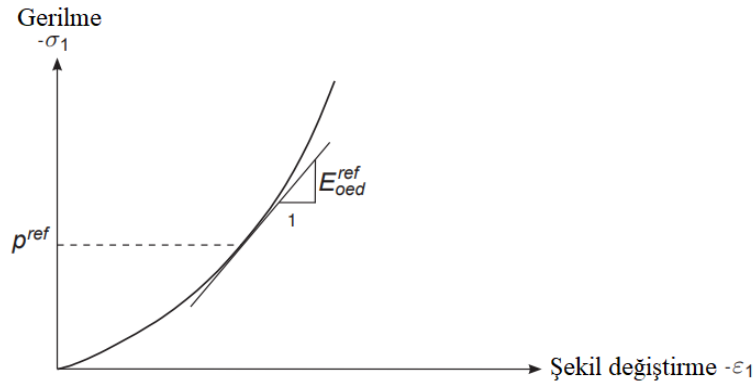
3.1.2.2 Hardening Soil – Pekleşen Zemin (HS) Modeli

Hardening Soil (pekleşen zemin) modelin, Mohr-Coulomb modelden farkı akma yüzeyinin asal gerilme aralığı ile sınırlı olmayıp, plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak genişleyebilmesidir. Mohr-Coulomb modelin aksine zemin rijitliği gerilme artışına bağlı olarak artmaktadır. Üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değişirme grafiği Mohr-Coulomb modelde doğrusal olarak tanımlanırken, Pekleşen Zemin (HS) modelde hiperbolik olarak tanımlanmaktadır. İlave olarak üç eksenli basınç deneyi ile odömetre deneyinden elde edilen 3 farklı rijitlik parametresinin tanımlanması ile gerçek zemin davranışına daha yakın sonuçların elde edilmesi mümkün olmaktadır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12). Mohr-Coulomb model için gerekli ana parametrelerin yanı sıra, rijitliğin tanımlanması için Young modülü yerine;

- m : Gerilmeye bağılı rijitlik katsayısı (-),
- E_{50}^{ref} : Birincil deviatorik yüklemeye bağılı plastik rijitlik (kN/m²),
- E_{oed}^{ref} : Birincil sıkışmaya bağılı plastik rijitlik (kN/m²),
- E_{ur}^{ref} : Boşaltma – tekrar yüklemeye bağılı elastik rijitlik (kN/m²),
- ana parametrelerin tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 3.11: Üç eksenli basınç deneyi ile E_{50}^{ref} ve E_{ur}^{ref} belirlenmesi.



Şekil 3.12: Odömetre deneyi ile E_{oed}^{ref} belirlenmesi.

Müdahale edilmemesi halinde;

$$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} \text{ ve} \quad (3.6)$$

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \text{ olarak belirlenmektedir.} \quad (3.7)$$

Rijitliğin gerilmeye bağlı katsayısı (m) kuvveti ile belirlenir ve kil gibi ince daneli zeminlerde bu değer 1.0 mertebelerinde alınması önerilirken kum gibi iri daneli zeminler için 0.5 mertebelerinde alınması önerilmektedir. Silt, kumlu kil, siltli kil, siltli kum vb. zeminlerde ise ince dane oranına bağlı olarak belirlenen değerlerin arasında bir değer seçilmesi gerekmektedir. Zemin daneleri inceldikçe 1.0, irileştikçe 0.5 değerine daha yakın değerler seçilebilir.

Tanımlanan parametreler üç eksenli yükleme deneyinden elde edilen referans değerlerdir. Program tanımlanan referans parametreleri kendi içerisinde, mukavemet ve gerilme değerlerine bağlı olarak dönüştürerek model için kullanılmaktadır (Denklem 3.8 – 3.9 ve 3.10).

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\phi - \sigma'_3 \cdot \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \cdot \sin\phi} \right)^m \quad (3.8)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\phi - \sigma'_3 \cdot \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \cdot \sin\phi} \right)^m \quad (3.9)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cos\phi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \cdot \sin\phi}{c \cdot \cos\phi + p^{ref} \cdot \sin\phi} \right)^m \quad (3.10)$$

Denklemlerde bulunan p^{ref} değeri, üç eksenli yükleme deneyindeki yanal gerilme (σ'_3) için belirlenen değerdir. Program varsayılan değer olarak 100 kN/m² almaktadır. Üç eksenli yükleme deneyinde yanal gerilme olarak başka bir değer kullanılmış ise p^{ref} değerinin düzenlenmesi gerekmektedir.

Rijitlik parametrelerin alternatifleri olarak konsolidasyon deneyinden elde edilebilen;

- C_c : Sıkışma indeksi (-),
 C_s : kabarma ya da tekrar yükleme indeksi (-),
 e_{init} : Başlangıç boşluk oranı (-),

parametreleri de kullanılabilir. Konsolidasyon parametrelerinin kullanılması halinde E_{50}^{ref} değeri E_{oed}^{ref} değerinin 1.25 katı olarak program tarafından otomatik olarak atanmaktadır. Tanımlanabilen ana rijitlik parametrelerinin yanı sıra hâlihazırda varsayılan değerlerin tanımlandığı gelişmiş parametrelerde mevcuttur.

v_{ur}	: Boşaltma – tekrar yükleme için poisson oranı – (varsayılan $v_{ur}=0.2$)	(-)
p^{ref}	: Rijitlik için referans gerilme – (varsayılan $p^{ref} = \sigma'_3 = 100 \text{ kN/m}^2$)	(kN/m ²)
K_0^{nc}	: Normal konsolidasyon değeri – (varsayılan $K_0^{nc}=1-\sin \phi'$)	(-)
R_f	: Göçme oranı – (varsayılan $R_f=q_f/q_a=0.9$)	(-)

3.1.2.3 Soft Soil Creep – Yumuşak Zemin Akma (SSC) Modeli

Sıkışabilir yumuşak zeminler için Hardening Soil-Pekleşen Zemin (HS) ve Soft Soil-Yumuşak Zemin (SS) modelleri kullanılabilir. Ancak her ikisinde de akma, yani ikincil sıkışma etkisi tanımlanamamaktadır. Bu nedenle yumuşak zeminlerin zamana bağlı ikincil sıkışma (akma) etkilerinin tanımlanabilmesi için Soft Soil-Yumuşak Zemin modelinin devamı olarak Brinkgreve, Broere & Waterman (2006) tarafından Soft Soil Creep-Yumuşak Zemin Akma (SSC) modeli tanımlanmıştır. Bu modeli diğer modellerden ayıran bazı özellikler mevcuttur.

- Gerilmeye bağlı rijitlik (logaritmik sıkıştırma davranışı),
- Birincil yükleme ile tekrarlı yükleme ve boşaltma arasındaki fark,
- Zamana bağlı (ikincil) sıkışma,
- Aşırı konsolidasyon basıncı belleği,
- Mohr-Coulomb göçme kriterini takip eden zemin mukavemeti,

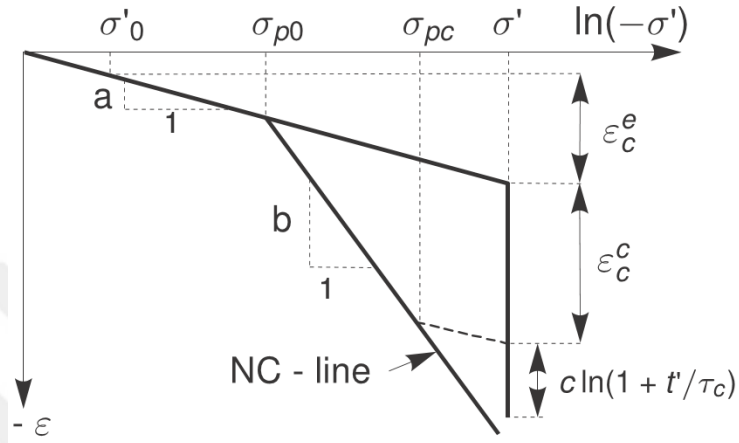
SSC modeli için temel tek boyutlu akma modeli Buisman (1936), Šuklje (1957), Bjerrum (1967) ve Garlanger (1972) araştırmalarına dayanmaktadır. Yaptıkları çalışmalara göre toplam gerilmeler elastik ve inelastik (viskoplastik veya akma) gerilmeler olarak iki kısımdan oluşur. Akma gerilmesi sadece sabit etkili gerilimler altında değil aynı zamanda konsolidasyon aşamasına dahil edilmiştir. Dahası, ön konsolidasyon basıncı, zaman boyunca biriken akma gerilmesine yakından bağlıdır (Bjerrum, 1967). Gerilme – şekil değiştirme arasındaki bağıntı Denklem 3.11’de ve Şekil 3.13’te verilmektedir.

$$\varepsilon = a. \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0}\right) + (b - a). \ln\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_{c,0}}\right) + c. \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right) \quad (3.11)$$

$$a = \frac{C_s}{(1 + e_0). \ln 10} \quad (3.12)$$

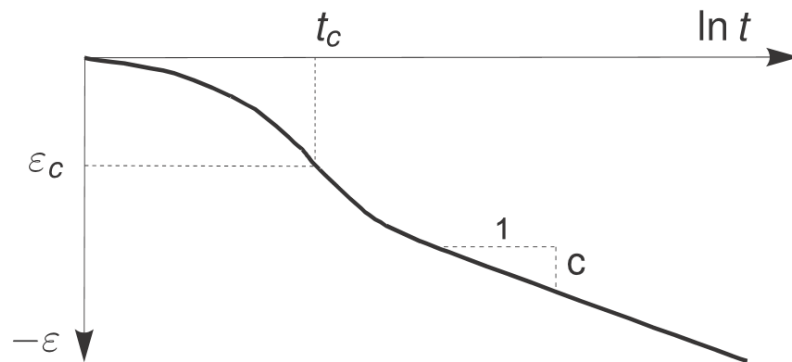
$$b = \frac{C_c}{(1 + e_0) \cdot \ln 10} \quad (3.13)$$

$$c = \frac{C_\alpha}{(1 + e_0) \cdot \ln 10} = \frac{C_B}{\ln 10} \quad (3.14)$$



Şekil 3.13: Ödometre testi sonucu idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Vermeer ve Neher, 1999).

- σ'_0 = Başlangıç efektif gerilme,
- σ_{p0} = Başlangıç gerilmesi öncesi ön konsolidasyon gerilmesi,
- σ_{pc} = Ön sıkışma gerilmesi,
- σ' = Efektif gerilme.



Şekil 3.14: Zamana bağlı şekil değiştirme (Vermeer ve Neher, 1999).

Yumuşak Zemin Akma (SSC) modelde genel mukavemet parametreleri;

- c'_{ref} : Kohezyon (kN/m²),
- ϕ' : Kayma açısı (°),
- ψ : Genleşme açısı (°),

tanımlanmalıdır. Rijitlik parametreleri için Modifiye Cam Clay (MCC) model için kullanılan indekslerin düzenlenmesi ile elde edilen esas (Denklem 3.11 – 3.12 ve 3.13) veya konsolidasyon deneyinden elde edilen alternatif parametreler tanımlanabilmektedir.

Esas Parametreler;

κ^* : Düzenlenmiş şişme indeksi (-),

λ^* : Düzenlenmiş sıkışma indeksi (-),

μ^* : Düzenlenmiş akma indeksi (-),

Alternatif Parametreler;

C_c : Sıkışma indeksi (-),

C_s : kabarma ya da tekrar yükleme indeksi (-),

C_s : kabarma ya da tekrar yükleme indeksi (-),

e_{init} : Başlangıç boşluk oranı (-),

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e} = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \quad (3.11)$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} \cong \frac{2C_s}{2.3(1+e)} \quad (3.12)$$

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3(1+e)} \quad (3.13)$$

3.1.2.4 Drenaj Tipi

Drenaj tipi için drenajlı, drenajsız ve gözeneksiz davranış olmak üzere 3 farklı alternatif belirlenmiştir.

- Drenajlı davranışta ilave boşluk suyu basıncı oluşturulmaz. Tamamen kuru ya da yüksek geçirgenliğe sahip zeminlerde (çakıl, kum) veya ilave boşluk suyu basıncı oluşturmayacak yavaşlıkta yüklemelerde kullanılır. Aynı zamanda drenajsız yükleme veya konsolidasyon davranışlarına gerek duyulmaması halinde uzun dönem zemin davranışını modellemek içinde kullanılabilir.
- Drenajsız davranış, suya doymuş zeminlerde, boşluk suyunun zemin daneleri arasında serbestçe akmadığı durumlarda kullanılır. Hızlı yükleme ve/veya kil gibi düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde boşluk suyunun akışı bazen ihmal edilebilir mertebelerde olabilmektedir. İlave gerilmeler nedeni ile ilave boşluk suyu basıncı oluşacaktır. Drenajsız olarak tanımlanan tüm tabakalar, yer altı su seviyesinin üzerinde olsalar dahi drenajsız olarak davranacaklardır. Drenajsız zemin davranışını tanımlayabilmek için 3

farklı yöntem mevcuttur. Metot A, rijitlik ve mukavemet parametrelerinin efektif olarak tanımlandığı drenajsız ve kısa dönem malzeme davranışdır. Zeminin sıkışmaz hale gelebilmesi için yüksek bulk (sıkışma) modülü değeri otomatik olarak tanımlanır ve ilave boşluk suyu basınçları hesaplanır. Metot B, rijitlik parametrelerinin efektif olarak ve mukavemet parametrelerinin drenajsız kayma dayanımı olarak tanımlandığı drenajsız veya kısa dönem malzeme davranışdır. Metot C ise rijitlik ve mukavemet parametrelerinin drenajsız olarak tanımlandığı yöntemdir. İlave boşluk suyu basıncı açıkça hesaplanmaz ancak efektif gerilmelere dâhil edilir.

- Gözeneksiz (non-porous) davranış boşluk suyu basıncının meydana gelmediği malzemeler için tanımlanır. Bazı malzeme modelleri ile birlikte kullanılabilen drenaj tipi genellikle beton, kaya birimler veya yapısal elemanlar için kullanılır.

Farklı malzeme modelleri için drenaj tipleri tablo 3.1’de verilmektedir.

Tablo 3.1: Malzeme modeli için kullanılacak drenaj tipi.

Malzeme Modeli	Drenaj Tipi				Gözeneksiz
	Drenajlı	Drenajsız			
		Metot A	Metot B	Metot C	
Linear Elastic	✓	✓		✓	✓
Mohr-Coulomb	✓	✓	✓	✓	✓
Hardening Soil	✓	✓	✓		
Hardening Soil Small	✓	✓	✓		
Soft Soil	✓	✓			
Soft Soil Creep	✓	✓			
Jointed Rock	✓				✓
Modified Cam-Clay	✓	✓			
NGI-ADP	✓		✓	✓	
Hoek-Brown	✓				✓
Sekiguchi-Ohta	✓	✓			
Kullanıcı Tanımlı	✓				✓

3.1.2.5 Başlangıç Ön Konsolidasyon Gerilmesi

Zeminler geçmişte maruz kaldıkları gerilme ve diğer değişimleri unutmazlar ve bunları zemin yapısında korurlar. Aşırı konsolide killer üzerinde yapılan deneyler sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi, büyük farklar görülebilen iki farklı eğimden meydana gelmektedir. Zemin hafızasındaki gerilmeden azı altında daha küçük oranlarda şekil değiştirdiği için ilk bölgenin eğimi azdır. Bu eğim yeniden konsolidasyon eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Deneyin devamında zemin hafızası üstünde gerilmeler tanımlandığında ise eğim ilk bölgeye kıyasla daha

yüksek mertebelerde elde edilmektedir. Bu bölgedeki eğri ise bakir sıkışma eğrisi olarak tanımlanmaktadır.

Plaxis'te gelişmiş modeller kullanılırken, başlangıç ön konsolidasyon gerilmesinin belirlenmesi gerekmektedir. Mühendislik uygulamasında, düşey ön konsolidasyon gerilmesini, (σ_p) kullanmak çok yaygın olmakla birlikte Plaxis'te, akma yüzeyinin başlangıç pozisyonunu belirlemek için eşdeğer izotropik ön konsolidasyon basıncına (p_p^{eq}) ihtiyaç duymaktadır.

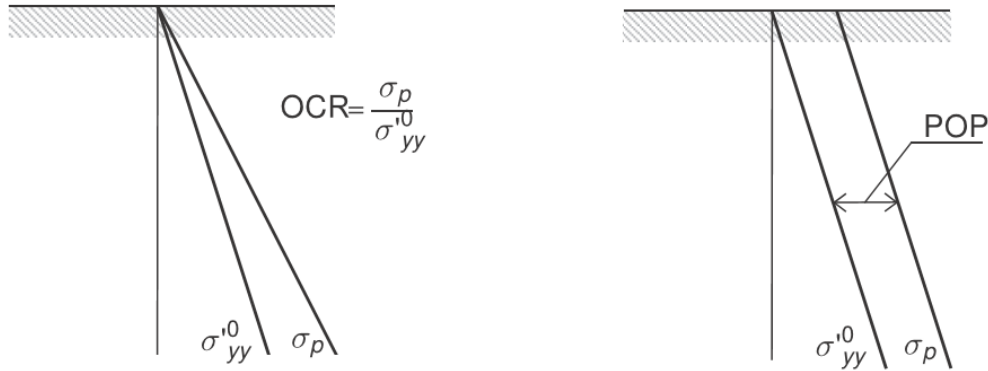
Kullanılacak modele bağlı olarak eşdeğer izotropik ön konsolidasyon gerilmesi hesapları farklıdır. Hardening Soil-Pekleşen Zemin modelinde;

$$p_p^{eq} = \sqrt{(p')^2 + \frac{q^2}{\alpha^2}} \quad (3.14)$$

Sof Soil Creep-Yumuşak Zemin Akma modelinde;

$$p_p^{eq} = p' + \frac{q^2}{M^2(p' + c \cot \phi)} \quad (3.15)$$

Bir malzeme aşırı konsolide ise, daha önce ulaşılan en büyük düşey gerilme (σ_p) ile mevcut etkiyen düşey gerilme (σ_{yy}^0) hakkında bilgi gereklidir. Plaxis'te ön konsolidasyon basıncının tanımı için "Aşırı Konsolidasyon Oranı" (OCR veya AKO) veya Ön Aşırı Yükleme Basıncı (POP-ÖAYB) tanımları yapılabilmektedir (Şekil 3.15)



Şekil 3.15: Mevcut düşey gerilmeler ile ön konsolidasyon arasındaki ilişki.

$$\sigma_p = \sigma'_{yy} + POP \quad (3.16)$$

$$\sigma_p = \sigma'_{yy} * OCR \quad (3.17)$$

Ön aşırı yükleme basıncı kullanıldığında mevcut düşey gerilmeler derinlik boyunca bu değer ile toplanarak ön konsolidasyon basıncı elde edilir (Denklem 3.16). Aşırı konsolidasyon oranının kullanılması halinde ise ön konsolidasyon basıncının tayini için derinlik boyunca hesaplanan mevcut gerilmeler tanımlanan değer ile çarpılır (Denklem 3.17).

Plaxis programı ön konsolidasyon gerilmesi için tanımlanan OCR-AKO ve POP-ÖAYB değerlerini sadece dengenin aranmadığı, başlangıç efektif gerilmenin, boşluk suyu basıncının ve durum parametrelerinin direk hesaplandığı K_0 hesap tipindeki başlangıç aşamasında dikkate alınır. Yer çekimi yüklemesi ile yapılan başlangıç aşamasında ise bu değerler dikkate alınmadan normal konsolide gerilme durumu sonuçlarını elde edilmektedir.

3.2 SANTRİFÜJ DENEY SONUÇLARI

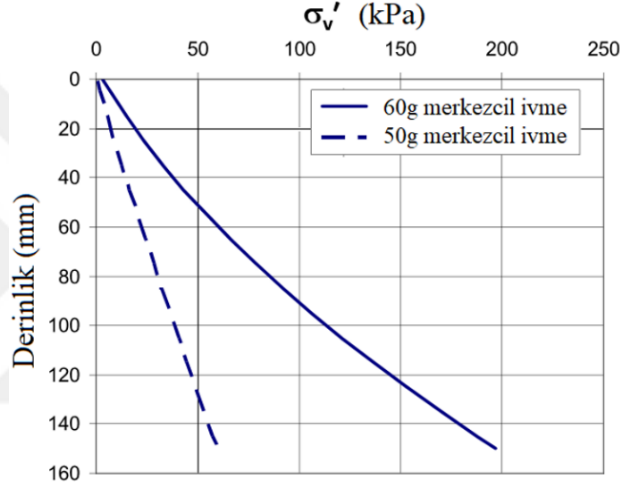
Weber (2007) tarafından yapılan “Taş Kolonlar İle Zemin İyileştirmenin Modellenmesi” çalışmasında belli bir ölçek ile modellenmiş zemin üzerine uygulanan merkezkaç kuvveti ile büyük model gerilmelerinin sağlanması ve bu prototipte taş kolonlar ile güçlendirilmiş zeminin dolgu altında oturma davranışı incelenmiştir. Santrifüj modelinde kullanılan zeminlere ait mukavemet ve rijitlik parametreleri ile boyutlar Tablo 3.2’de verilmektedir. Yapılan çalışmada farklı sektörlere ayrılmış 8 adet model bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında v5-s3 çalışması referans olarak alınarak sayısal analiz sonuçları deney verileri ile kıyaslanacaktır. Önceki bölümde de bahsedildiği üzere kilin yerleştirilmesi aşamasında (60g) teknik sebeplerden dolayı boşluk suyu basıncı oluşturulamamış ancak devam eden aşamalarda bu sorun çözülmüştür.

Tablo 3.2: Santrifüj deneyinde kullanılan malzemelere ait parametreler (Weber, 2007)

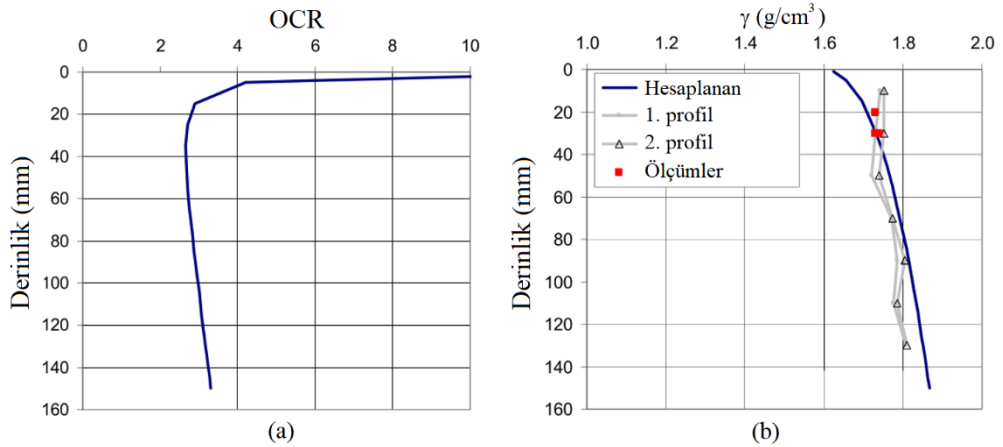
Malzeme	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C_c	C_s	C_α	e_0	c (kPa)	ϕ (°)	k (m/s)
Dolgu	59,3	59,3	-	-	-	-	1,0	35	0,1
Yumuşak Kil	17,85	17,85	0,35	0,05	0,0067	1,3	-	-	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Taş Kolon	17,0	20,6	-	-	-	-	1,0	37	$1,0 \cdot 10^{-5}$

3.2.1 Başlangıç Parametrelerinin Belirlenmesi

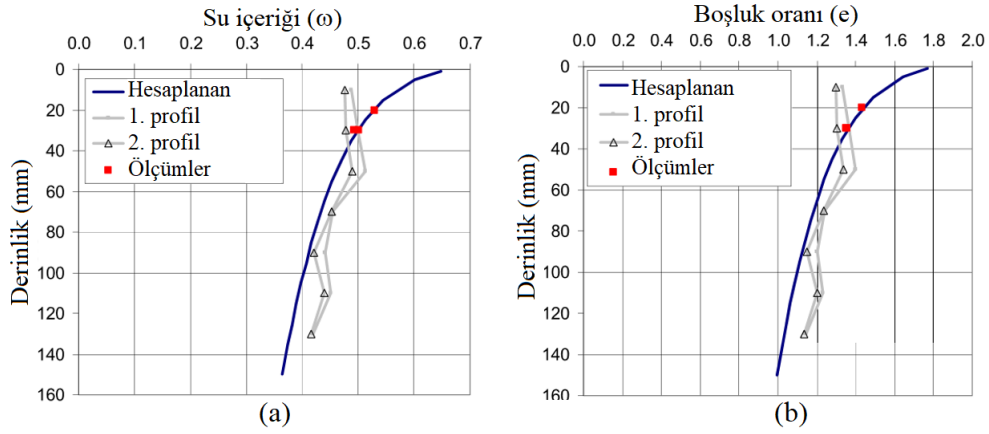
Kurulan santrifüj modelinde zemin özelliklerinin elde edilmesi ve önceki veriler ile kıyaslanması yapılmıştır. Oluşturulan model üzerinde yapılan deneyler ve ölçümler neticesinde zemin birimi olarak kullanılan Birmensdorf kili için elde edilen parametrelerin önceki çalışmalar ile %90 mertebesinde bir uyum sağladığı görülmüştür. Şekil 3.16'da başlangıç durumlarında elde edilen düşey efektif gerilme değerleri, Şekil 3.17'de aşırı konsolidasyon oranı ile birim hacim ağırlık okumaları ve Şekil 3.18'de su içeriği ile boşluk oranı değerleri verilmektedir.



Şekil 3.16: Model kurulum aşamalarında düşey efektif gerilme değerleri (Weber, 2007).



Şekil 3.17: Model kurulumu sonunda (50g ivme altında) zemin parametreleri, a-aşırı konsolidasyon oranı, b-birim hacim ağırlık (Weber, 2007).



Şekil 3.18: 50g ivme durumunda zemin parametreleri, a-su içeriği, b-boşluk oranı (Weber, 2007).

3.2.2 Sonuçlar

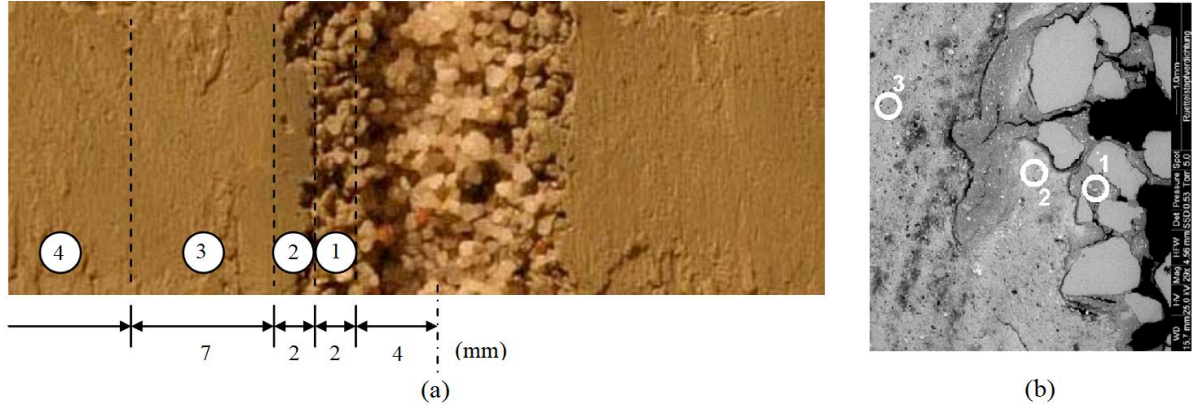
Dolgu ve konsolidasyon aşamaları sonunda santrifüj aleti doldurularak meydana gelen deformasyon biçimlerinin gözlenebilmesi için Şekil 2.68'de verilen B-B düzleminde kesit alınarak incelenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: v5-s3 sektörüne ait kesit görünüşü (Weber, 2007).

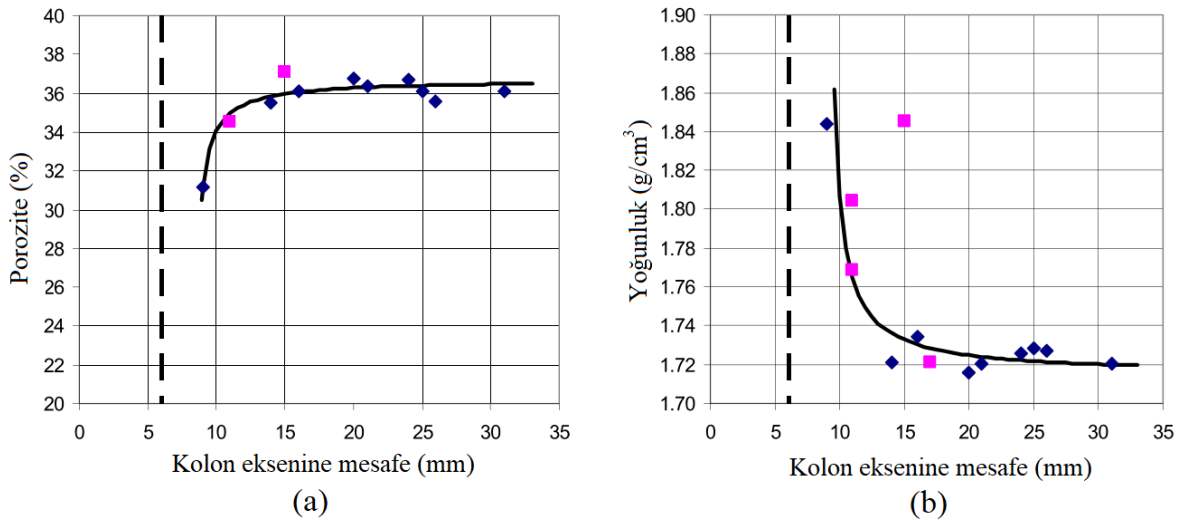
Yapılan gözlemsel ve mikroskobik incelemeler sonucunda kolon imalatından dolayı zeminde 4 bölgenin olduğu görülmüştür (Şekil 3.20). Kolon alanı içerisinde bulunan 1. bölgede, kil+kum karışımının meydana geldiği görülmektedir. 2. bölgede kolon imalatı sırasında imalat borusunun kesme etkisi ile kilde deformasyonlar/örselenme meydana gelmiştir. 3. bölgede gözle görünür bir farklılık olmamasına karşın yapılan deneyler sonucunda normal bölgede bulunan kilden daha yoğun ve düşük permeabiliteye sahip olduğu anlaşılmıştır. 4. bölge normal

bölge olarak düşünülebilir ve herhangi bir etkileşim gözlenmemiştir. Oluşan bu bozulmalar nedeniyle kolon çevresinde kolon çapının yaklaşık 2,0 ile 2,5 katı bir alanın etkilendiği söylenebilir.



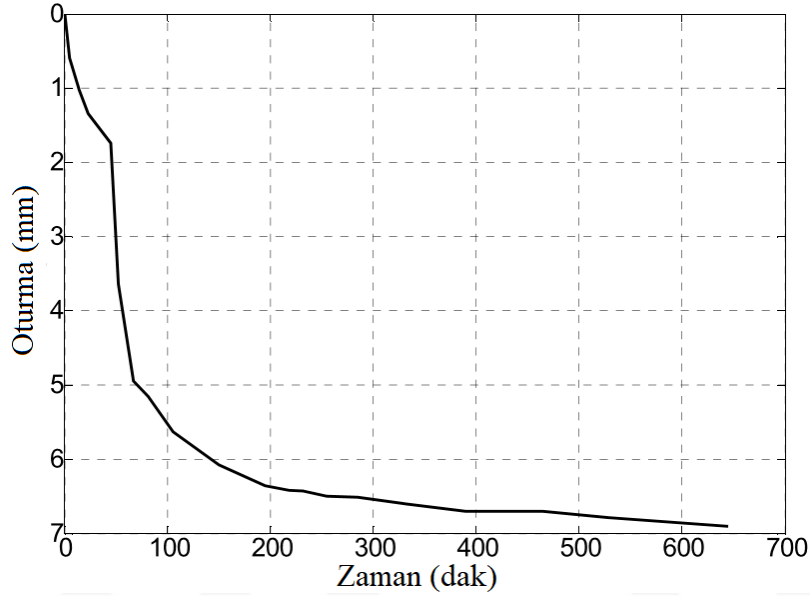
Şekil 3.20: Kolon imalatının zemine etkisi, a-gözlemsel, b-mikroskopik inceleme (Weber, 2007).

Santrifüj deneyinin farklı sektöründen alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda kolon eksenine mesafeye bağlı olarak porozite oranında maksimum %14 mertebesinde azalma ve yoğunlukta maksimum %8 oranında artış meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3.21). En yoğun etki kolon yüzeyinden başlayıp eksene 2 kolon yarıçapı mesafede gözlenmiş olup kolon ekseninden yaklaşık 2,5 kolon yarıçapından sonra normal değerlere ulaşılabilmektedir.

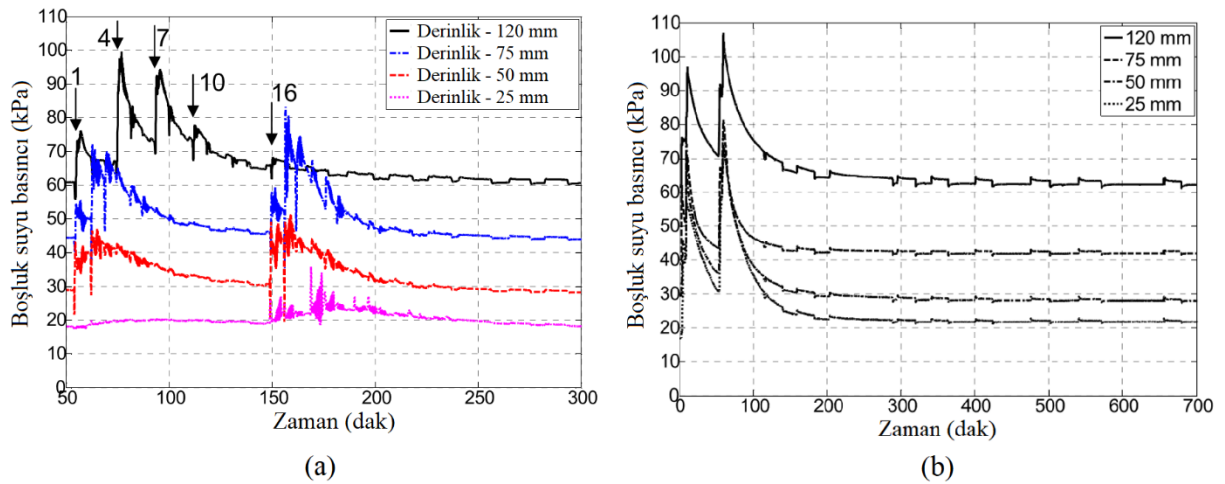


Şekil 3.21: Kolon imalatının eksen uzaklığına bağlı çevre zemine etkisi, a-porozite, b-yoğunluk (Weber, 2007).

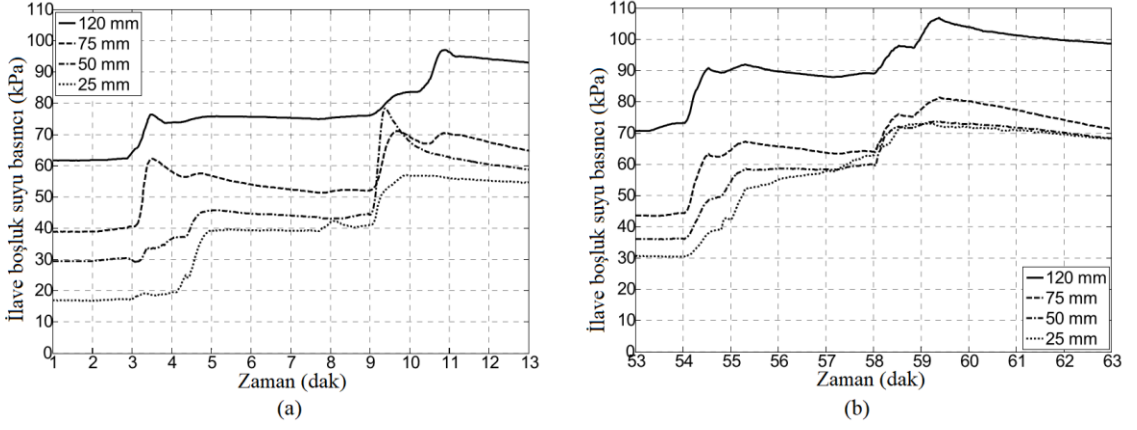
Taş kolon ve dolgu imalatı ile akabinde yapılan konsolidasyon aşamaları boyunca dolgu ortasında bulunan zemin yüzeyinde oturmalar ve Şekil 2.68’te şematik gösterimde verilen farklı lokasyon ve derinliklerde, boşluk suyu basıncı değerleri kontrol edilmiştir (Şekil 3.21 ile 3.22). Aynı zamanda dolgu imalatı aşamalarında elde edilen boşluk suyu basıncı grafikleri Şekil 3.23’te verilmektedir.



Şekil 3.22: Zamana bağlı oturma grafiği (Weber, 2007).



Şekil 3.23: a-kolon imalatı, b-dolgu imalatı aşamalarında boşluk suyu basıncı grafiği (Weber, 2007).

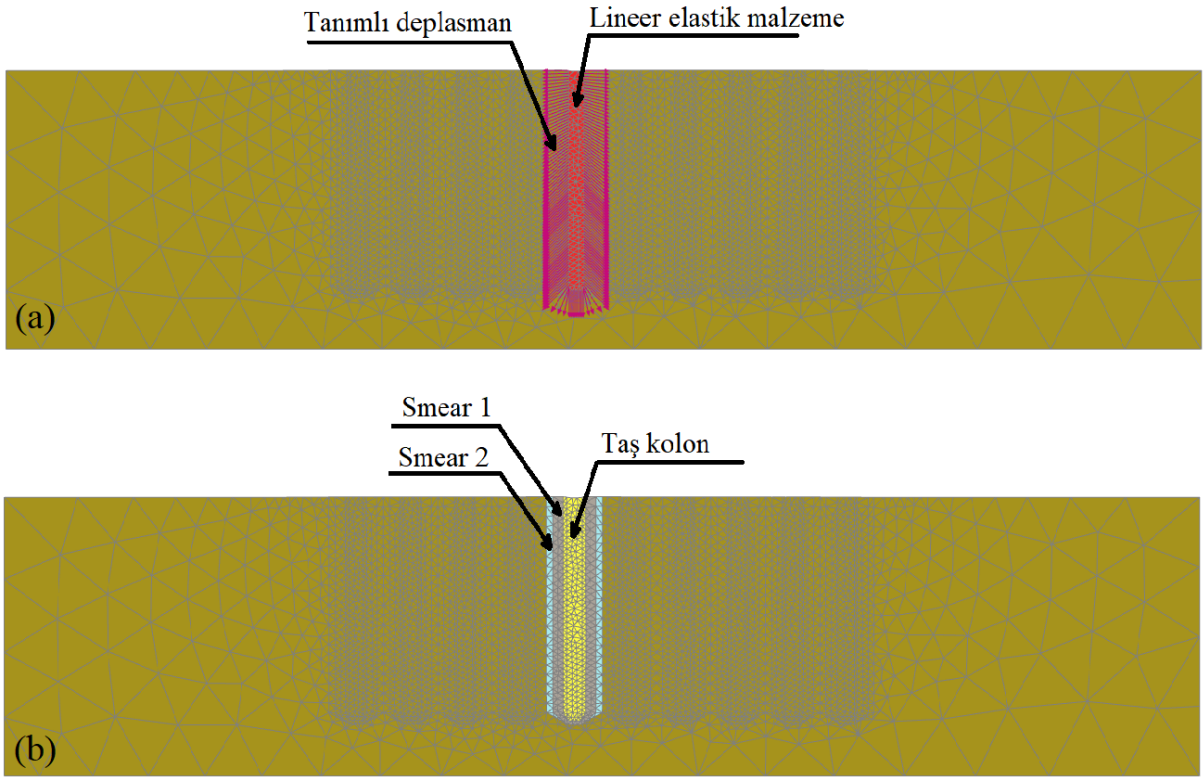


Şekil 3.24: Dolgu imalat aşamalarında ölçülen ilave boşluk suyu basınçları, a-ilk kademe, b-ikinci kademe (Weber, 2007).

3.3 SAYISAL MODELLERİN HAZIRLANMASI

Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda 3 boyutlu bir problem olan taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminin 2 boyutlu düzlem deformasyon modelde rijitlik ve permeabilite parametrelerinin yanı sıra geometrik dönüşümler yapılarak tanımlanabileceği görülmektedir. Önerilen dönüşüm yöntemleri Weber (2007) tarafından yapılan santrifüj deneyinin modellenmesinde kullanılarak analizler sonucunda elde edilen veriler deney sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Analizlerde yumuşak kil birim parametreleri, Mohr-Coulomb (MC), pekleşen zemin (HS) ve yumuşak zemin akma (SSC) için tekrarlanarak malzeme modeli etkisi irdelenecektir.

Her bir kolon imalatı 2 aşamada modellenmiştir. İlk aşamada kum kolon imalat borusu çapına denk -Metot 1'de boru çapına eşit, Metot 2'de ise kolon çapında yapılan dönüşümler uygulanmış- bir lineer elastik malzeme zemin içerisinde tanımlanmıştır (Şekil 3.25) ve bu malzemeye deplasman uygulanarak kolon çapına kadar zeminin sıkıştırılması sağlanmıştır. İkinci aşamada ise uygulanan deplasmanlar kaldırılarak kolon ve çevresinde oluşturduğu örselenme bölgeleri tanımlanmıştır. Kolon imalatları santrifüj deneyinde belirlenen sıra gözetilerek aşamalar halinde tanımlanarak boşluk suyu basınç ölçerlerde oluşturdukları etkiler incelenebilmiştir. Bütün kolon imalatları tamamlandıktan sonra ilave boşluk suyu basıncının sönmülenebilmesi için konsolidasyon aşaması tanımlanmış ve bu imalatlara bağlı deplasmanlar sıfırlanarak dolgu aşamalarına geçilmiştir.



Şekil 3.25: Sonlu elemanlarda taş kolon imalat aşamaları, a-lineer elastik malzeme ile deplasmanların tanımlanması, b-kolon ve örselenme bölge malzemelerinin atanması.

Yapılması gereken bir diğer dönüşümde, santrifüj etkisi ile ölçeklendirilen modelin normal boyutlara çevrilmesi için uygulanacaktır. Bu kapsamda yapılacak geometrik dönüşümlerde gerilmelerin oluşturulabilmesi için uygulanan ivme oranı (50g), zaman dönüşümlerinde ise ivmenin karesi oranı kullanılacaktır.

3.3.1 Örselenmiş Bölge (Smear Zone) Dönüşümleri

Yapılan santrifüj deneyi sonuçlarında kolon eksenine mesafeye bağlı olarak porozite oranında değişimler meydana geldiği görülmüştür. Bu kapsamda yapılan incelemeler neticesinde kolon yüzeyinde yaklaşık %14,6 azalan porozite değeri eksene 2 kolon yarıçapı mesafede %3,2 oranında azalmıştır. Bu bölgedeki ortalama azalma oranı %8,9 olarak elde edilmiştir. Porozite değeri eksene 2,5 kolon çapı mesafeden sonra normal değerine ulaşmaktadır. Bu bölgede meydana gelen ortalama azalma oranı ise %1.6 olarak elde edilmiştir.

Porozitede (n) meydana gelen azalma oranları kullanılarak Denklem 3.18 yardımı ile boşluk oranı (e) hesaplanmıştır. Elde edilen boşluk oranı yumuşak zemin akma (SSC) malzeme

modelinde örselenmiş bölge için rijitlik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Aynı zamanda Denklem 3.19 ile örselenmiş bölge için permeabilite katsayısı (k) hesabı yapılmıştır.

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (3.18)$$

$$k = 1,4 \times e^2 \times k_{0,85} \quad (3.19)$$

e ; boşluk oranı

n ; porozite oranı

k ; herhangi bir boşluk oranı için zeminin permeabilite katsayısı

$k_{0,85}$; $e=0,85$ için zeminin permeabilite katsayısı

Sayısal analiz modeli oluşturulan santrifüj deneyi sektöründe, kolon çapı 60 cm ve kolonlar arası mesafe 155 cm'dir. Yapılan gözlemsel ve mikroskobik incelemeler ile deneyler sonucunda kolon imalatı sırasında, zeminde 2 farklı örselenme bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Bu sebeple analiz modellerinde de iki farklı örselenmiş bölge tanımlanacaktır. İlk bölge (Smear 1) çapı kolon çapının 2 katına eşit ve 120 cm, ikinci bölge çapı ise kolon çapının 2,5 katından fazla tanımlanması gerekmektedir. Kolonlar arası mesafenin 155 cm olması nedeniyle 2. bölgenin komşu kolona ait 2. örselenmiş bölge ile kesiştiği ve dolgu altındaki zeminin neredeyse tamamen etkilendiği görülmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda örselenme bölgelerine ait parametreler Tablo 3.3'te verilmiştir. Hesaplamalar 3 boyutlu ve aksenal simetrik modeller için geçerli olmakla birlikte 2 boyutlu düzlem deformasyon modeller için ayrıca metot dönüşümlerinin yapılması gerekmektedir. Ancak yapılan analizler sonucunda verilen permeabilite katsayıları ile boşluk suyu basınçlarının bütün metot ve malzeme modellerinde çok hızlı oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle yapılan geri analizler ile analizlerde kullanılacak permeabilite katsayıları yeniden belirlenmiştir.

Tablo 3.3: 3D model için yumuşak kil ve örselenme bölgelerine ait parametreler.

Malzeme	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C_c	C_s	C_α	e_0	k_{deney} (m/s)	k_{analiz} (m/s)
Yumuşak Kil	17,85	17,85	0,35	0,05	0,0067	1,3	$1,50 \cdot 10^{-9}$	$5,00 \cdot 10^{-10}$
Smear 1	18,75	18,75	0,35	0,05	0,0067	1,03	$9,35 \cdot 10^{-10}$	$3,12 \cdot 10^{-10}$
Smear 2	18,05	18,05	0,35	0,05	0,0067	1,25	$1,39 \cdot 10^{-9}$	$4,64 \cdot 10^{-10}$

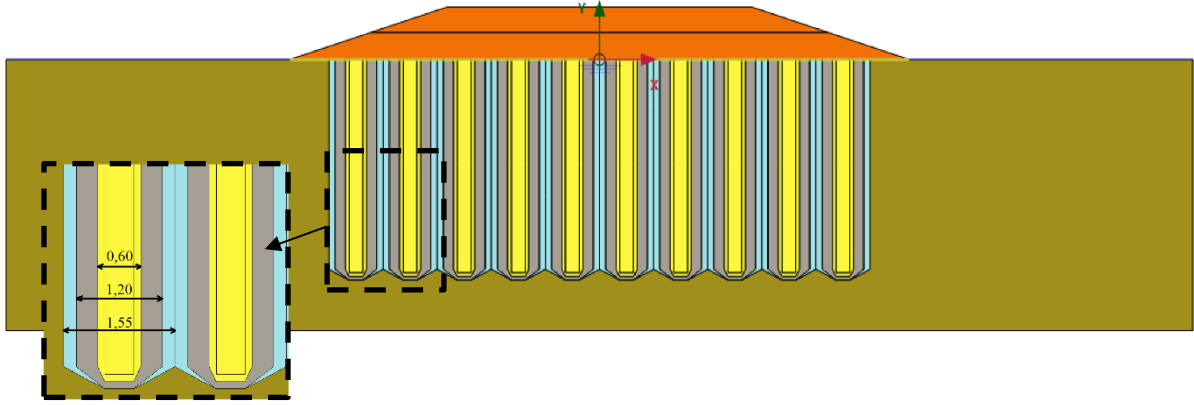
3.3.2 Metot 1 Dönüşümleri

İlk aşamada Tan (2005) tarafından önerilen ve sonraki çalışmalarında yeterli plastik akma noktalarının oluşmadığı belirlenen Metot 1 modeli oluşturulmuştur. Bu modelde kolon (duvar) ve örselenme bölge genişlikleri 3 boyutlu problemde belirlenen çapa (kolon: 0,60 m, smear1:1,20 m, smear2:1,55 m) eşit tutularak rijitlik ve permeabilite parametreleri Bölüm 2.5.2’de önerilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3.4). Oluşturulan analiz modeli Şekil 3.26’da ve dönüşümler sonucunda farklı malzeme modelleri için elde edilen parametreler Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4: Metot 1 için taş kolon ve zeminlere ait parametreler.

	3 Boyutlu	Metot 1	
Geometri	$r_{st} = 0,3 \text{ m}$	$b_{st} = 0,30 \text{ m}$	
	$r_{sm(1)} = 0,60 \text{ m} \quad [\sim 2.0r_c]$	$b_{sm(1)} = 0,60 \text{ m}$	
	$r_{sm(2)} = 0,775 \text{ m} \quad [\sim 2.6r_c]$	$b_{sm(2)} = 0,775 \text{ m}$	
	$B = 0,775 \text{ m}$	$B = 0,775 \text{ m}$	
Yumuşak Kil	Permeabilite	$k_{h,cl} = 5,00E-10 \text{ m/s}$	$k_{h,cl(p)} = 2,26E-10 \text{ m/s}$
	Rijitlik	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_a = 0,0067, e = 1,3$ HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,3$ MC $E_{ref} = 1500 \text{ kPa}, n = 0,35$	
	Mukavemet	$c = 1,0 \text{ kPa}, f = 24,5^0$	
Taş Kolon	Permeabilite	$k_{h,st}$ ve $k_{h,st(p)} = 1,000E-05 \text{ m/sn}$	
	Rijitlik	MC $E_{ref} = 50000 \text{ kPa}$ $\nu = 0,3$	$E_{ref} = 16195 \text{ kPa}$ $\nu = 0,3$
	Mukavemet	$c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 37,0^0, \psi = 10^0$	
Smear 1	Permeabilite	$k_{h,sm} = 3.12E-10 \text{ m/sn}$	$k_{h,sm(p)} = 5,17E-11 \text{ m/s}$
	Rijitlik	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_a = 0,0067, e = 1,03$ HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,03$ MC $E_{ref} = 1300 \text{ kPa}, \nu = 0,35$	
	Strength	$c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 20,0^0$	
	Permeabilite	$k_{h,sm} = 4,64E-10 \text{ m/sn}$	$k_{h,sm(p)} = 2,05E-10 \text{ m/s}$
Smear 2	Rijitlik	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_a = 0,0067, e = 1,25$ HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,25$ MC $E_{ref} = 1450 \text{ kPa}, \nu = 0,35$	
	Mukavemet	$c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 23,0^0$	

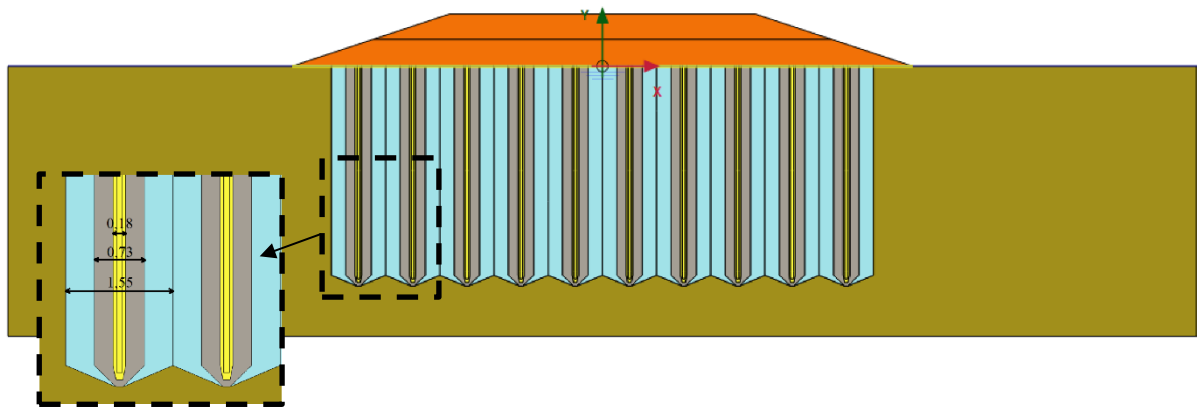
Oluşturulan sayısal modelde, kolon imalatı nedeniyle yumuşak kil birimde meydana gelen örselenmenin tanımlanabilmesi için 2 adet bölge eklenmiştir. Eklenen örselenme bölgelerinin çapları yapılan çalışmalar referansında 2D (1,20 m) ve 2,50D’nin üzerinde (1,55 m) olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3.26: A-A doğrultusuna ait Metot 1 sonlu elemanlar modeli.

3.3.3 Metot 2 Dönüşümleri

Tan (2008) tarafından önerilen yöntemde kolon rijitlikleri ile zemine ait permeabilite katsayıları sabit tutulurken kolon geometrisinin dönüştürülmesi gerekmektedir. Bölüm 2.5.2’de detayları verilen dönüşümler ile hem taş kolon hem de birinci örselenme bölgesi (Smear1) için geometrik dönüşümler yapılmıştır. Kolon çapı yapılan dönüşümler sonucunda 18,2 cm ve Smear-1 bölgesinin çapı 73,0 cm olarak elde edilmiştir. İkinci örselenme bölgesi, kolona ait birim hücrenin tamamında meydana geldiğinden dolayı herhangi bir dönüşüm yapılmamış ve 155 cm çapına sahip olarak modele dâhil edilmiştir. Bu metoda için yapılacak analizlerde kullanılan geometrik özellikler ile malzeme parametreleri Tablo 3.5’te, oluşturulan analiz modeli Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27: A-A doğrultusuna ait Metot 2 sonlu elemanlar modeli.

Tablo 3.5: Metot 2 için taş kolon ve zeminlere ait parametreler.

	3 Boyutlu	Metot 2
Geometri	$r_{st} = 0,3 \text{ m}$	$b_{st} = 0,092 \text{ m}$
	$r_{sm(1)} = 0,60 \text{ m} \quad [\sim 2.0r_c]$	$b_{sm(1)} = 0,365 \text{ m}$
	$r_{sm(2)} = 0,775 \text{ m} \quad [\sim 2.6r_c]$	$b_{sm(2)} = 0,775 \text{ m}$
	$B = 0,775 \text{ m}$	$B = 0,775 \text{ m}$
Yumuşak Kil	Permeabilite $k_{h,cl} = 5,00E-10 \text{ m/s}$	$k_{h,cl(p)} = 5,00E-10 \text{ m/s}$
	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_\alpha = 0,0067, e = 1,3$	
	Rijitlik HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,3$	
	MC $E_{ref} = 1500 \text{ kPa}, n = 0,35$	
Mukavemet $c = 1,0 \text{ kPa}, f = 24,5^0$		
Taş Kolon	Permeabilite $k_{h,st} \text{ ve } k_{h,st(p)} = 1,000E-05 \text{ m/sn}$	
	Rijitlik MC $E_{ref} = 50000 \text{ kPa}$	$E_{ref} = 50000 \text{ kPa}$
	$\nu = 0,3$	$\nu = 0,3$
	Mukavemet $c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 37,0^0, \psi = 10^0$	
Smear 1	Permeabilite $k_{h,sm} = 3.12E-10 \text{ m/sn}$	$k_{h,sm(p)} = 3,12E-10 \text{ m/s}$
	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_a = 0,0067, e = 1,03$	
	Rijitlik HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,03$	
	MC $E_{ref} = 1300 \text{ kPa}, \nu = 0,35$	
Strength $c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 20,0^0$		
Smear 2	Permeabilite $k_{h,sm} = 4,64E-10 \text{ m/sn}$	$k_{h,sm(p)} = 4,64E-10 \text{ m/s}$
	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_a = 0,0067, e = 1,25$	
	Rijitlik HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,25$	
	MC $E_{ref} = 1450 \text{ kPa}, \nu = 0,35$	
Mukavemet $c = 1,0 \text{ kPa}, \emptyset = 23,0^0$		

3.3.4 Metot 3 Dönüşümleri

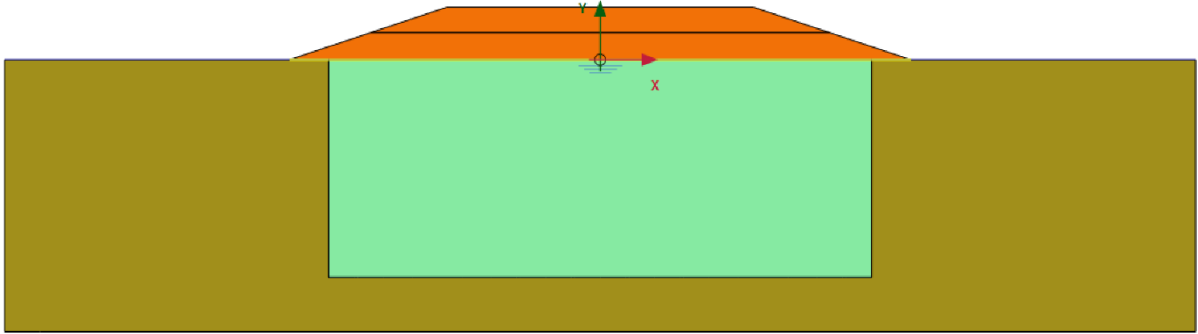
Tan vd. (2013) tarafından önerilen yöntemde, dolgu altında taş kolonlar ile iyileştirilen bölgede, analizler sonucunda elde edilen abaklar ile rijitlik ve permeabilite dönüşümleri yapılmalıdır. Bölüm 2.5.3'te detayları verilen abaklar yardımı ile taş kolonlar ile iyileştirilmiş bölge için rijitlik ve permeabilite dönüşümleri yapılmıştır. Bu yöntemde kolonlar aşamalar halinde tanımlanmadığı için kolon imalatları süresince ilave boşluk suyu karşılaştırılması yapılamayacaktır.

Hazırlanan sayısal modelde zemin içinde bulunan kolonların dış sınırlarına kadar olan alanda eşdeğer iyileştirme bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 3.28). Ancak dolgu şev bölgelerinin altında kalan yumuşak kil birim nedeniyle deplasman profilleri sağlıklı elde edilememiştir. Bu nedenle dolgu sınırları referans alınarak eşdeğer iyileştirme bölgesi oluşturulmuştur (Şekil 3.29). Sunulan abaklarda 37^0 'lik kayma açısı için herhangi bir veri bulunmadığından dolayı elde edilen abaklardan yapılan iterasyon ile N_{corr} değeri 1,522 elde edilmiş ve eşdeğer rijitlik değeri elde

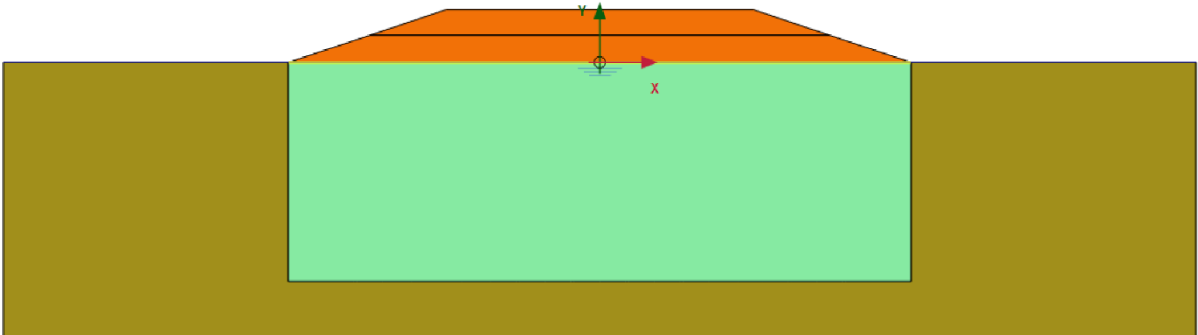
edilirken kullanılmıştır. Tan vd. tarafından yapılan çalışmada mukavemet parametrelerinde herhangi bir dönüşümün yapılması gerektiği bahsedilmediğinden, hazırlanan modelde eşdeğer iyileştirme bölgesi için yumuşak kile ait mukavemet parametreleri kullanılmıştır (Tablo 3.6).

Tablo 3.6: Metot 3 için zemin parametreleri.

	3 Boyutlu	Metot 2
Yumuşak Kil	Permeabilite	$k_{h,cl} = 5,00E-10 \text{ m/s}$
	Rijitlik	SSC $c_c = 0,35, c_s = 0,05, c_\alpha = 0,0067, e = 1,3$ HS $c_c = 0,35, c_s = 0,05, e = 1,3$ MC $E_{ref} = 1500 \text{ kPa}, n = 0,35$
	Mukavemet	$c = 1,0 \text{ kPa}, f = 24,5^\circ$
Eşdeğer Alan	Permeabilite	$k_{h,st}$ ve $k_{h,st(p)} = 1,000E-07 \text{ m/sn}$
	Rijitlik	$E_{ref} = 5930 \text{ kPa}, \nu = 0,3$
	Mukavemet	$c = 1,0 \text{ kPa}, \phi = 24,5^\circ$



Şekil 3.28: A-A doğrultusuna ait kolon sınırlarında hazırlanan Metot 3 sonlu elemanlar modeli.

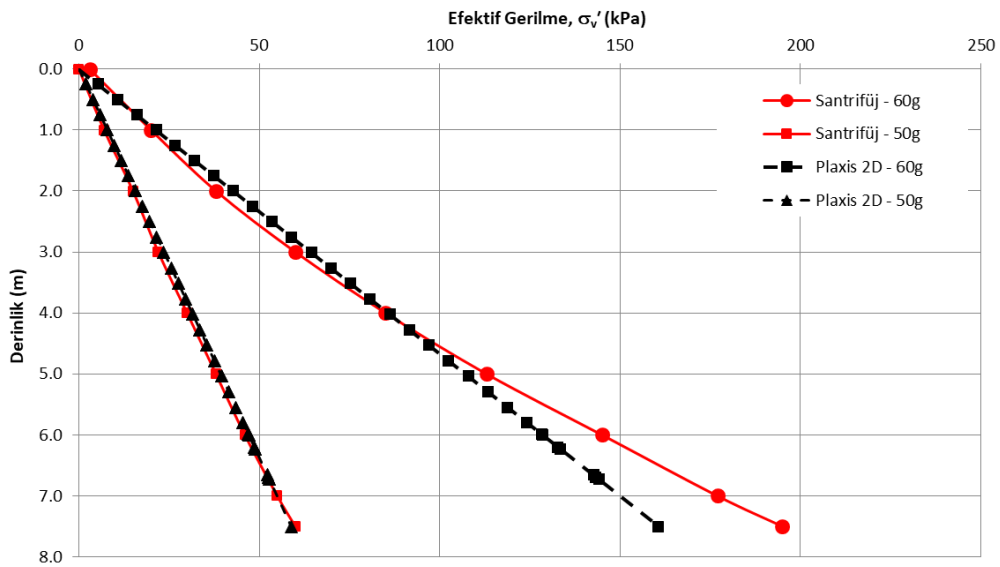


Şekil 3.29: A-A doğrultusuna ait dolgu altında hazırlanan Metot 3 sonlu elemanlar modeli.

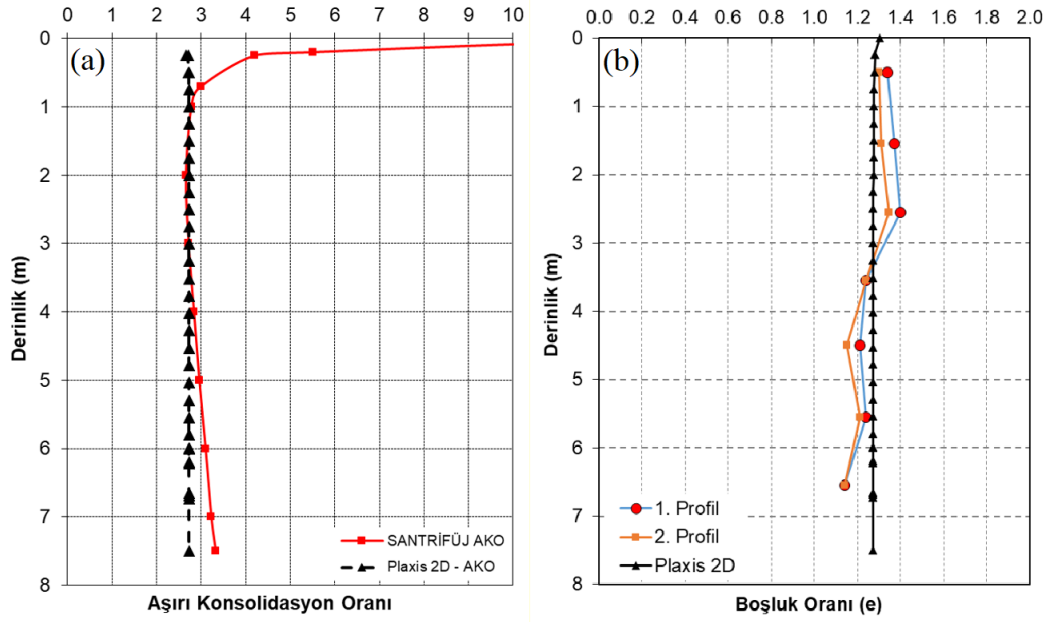
4. BULGULAR

Bu bölümde önceki başlıklar altında detayları verilen geometrik ve/veya parametrik dönüşüm yöntemleri ile hazırlanan sayısal model sonuçlarının santrifüj verileri ile mukayesesi yapılarak, belirlenecek en uygun model üzerinde seri analizler yapılacaktır. Kıyaslama, ilk etapta başlangıç koşullarının uygunluğu için yapılmıştır. Bu kapsamda, santrifüj deneyinden elde edilen, derinliğe bağlı efektif gerilmeler, aşırı konsolidasyon oranı ve boşluk oranları, sayısal modelde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal modellerinin hazırlanması aşamasında bahsedildiği üzere 60g dönme hızında iken boşluk suyu basınçlarının oluşturulmasında teknik sorunlar meydana gelmiş ve ilave boşluk suyu basınçları oluşturulamamış, devam eden aşamada sorun çözülerek ilave boşluk suyu basınçları elde edilebilmiştir. Bu nedenle 60g aşamasında düşey efektif gerilme değerleri toplam düşey gerilmelere eşittir. Oluşturulan sayısal analiz modelinde de bu etkinin sağlanabilmesi için ilk aşamada yer altı suyu tanımlanmayarak boşluk suyu basınçlarının oluşmasının önüne geçilmiş, devamında kurulan 50g aşamasında su tablası zemin yüzeyinde tanımlanarak ilave boşluk suyu basınçlarının oluşması ve düşey efektif gerilmelerinin azalması sağlanmıştır (Şekil 4.1). Oluşturulan aşamalar ile efektif gerilme değerleri ve buna bağlı zeminde aşırı konsolidasyon oranının tanımlanabilmesi sağlanmıştır (Şekil 4.2-a).



Şekil 4.1: Başlangıç durumunda düşey efektif gerilme.



Şekil 4.2: Başlangıç durumunda, a-AKO, b-boşluk oranı.

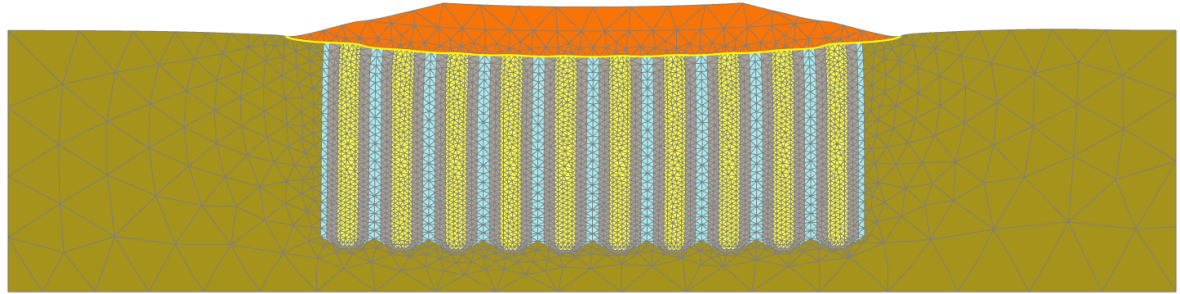
Sayısal modelde yapılan analizler sonucunda hesaplanan başlangıç koşullarında zemin özellikleri santrifüj deney verileri ile oldukça uyumlu elde edilmiştir. Bu veriler malzeme modeli ve metotlardan bağımsız olarak her bir analizin başlangıç aşamasında aynıdır. Başlangıç koşullarının uygunluğu doğrulandıktan sonra her bir metot ve malzeme modeli için analizler gerçekleştirilerek deplasman profilleri ve değerleri ile kolon imalat aşamalarında ve dolgu imalatı ile akabinde tanımlanan konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı değerleri elde edilmiştir. Metot-1 ve Metot-2 modellerinde kolon imalatları santrifüj deneyinde belirtilen sıralama ile gerçekleştirilerek ilave boşluk suyu basıncı kıyaslanması yapılabilirken Metot-3'te herhangi bir kolon imalat aşaması bulunmadığı için bu kıyaslama gerçekleştirilememiştir.

4.1 DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ VE MALZEME MODELLERİ İLE YAPILAN ANALİZLER

Önerilen farklı dönüşüm yöntemlerinde sırasıyla Mohr-Coulomb (MC), pekleşen zemin (HS) ve yumuşak zemin akma (SSC) malzeme modelleri kullanılarak santrifüj deneyi sonlu elemanlar ortamında modellenerek analizler yapılmıştır.

4.1.1 Metot-1 Sayısal Model Analizleri

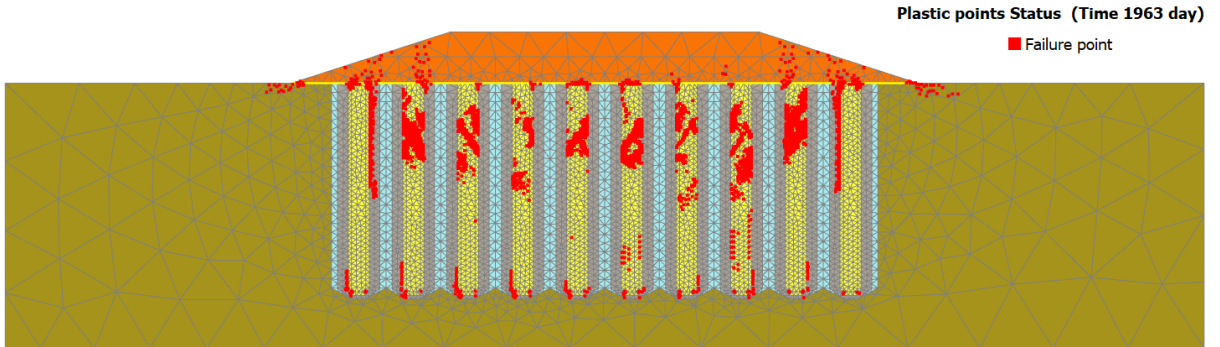
Bu dönüşüm metodunda, kolon ve örselenme bölgelerine ait geometriler sabit tutulmuş, taş kolon malzemesi için rijitlik ve yumuşak kil için permeabilite dönüşümleri yapılmıştır.



Deformed mesh |u| (scaled up 5.00 times) (Time 2133 day)

Maximum value = 0.1391 m (Element 3 at Node 15522)

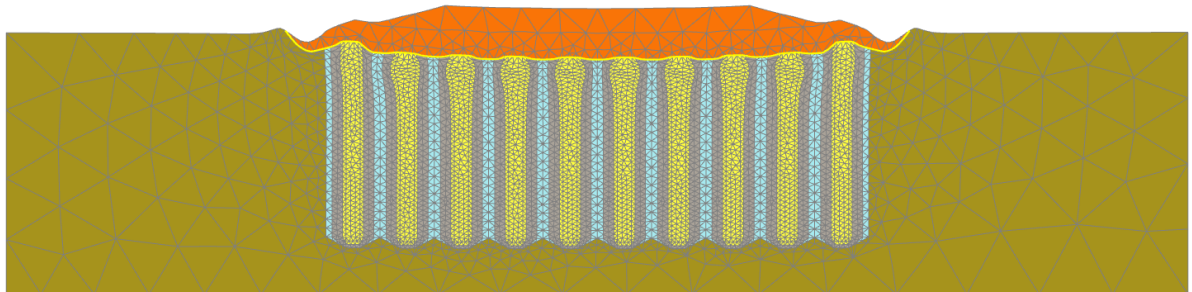
Şekil 4.3: Metot-1 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :13,91 cm).



Plastic points Status (Time 1963 day)

■ Failure point

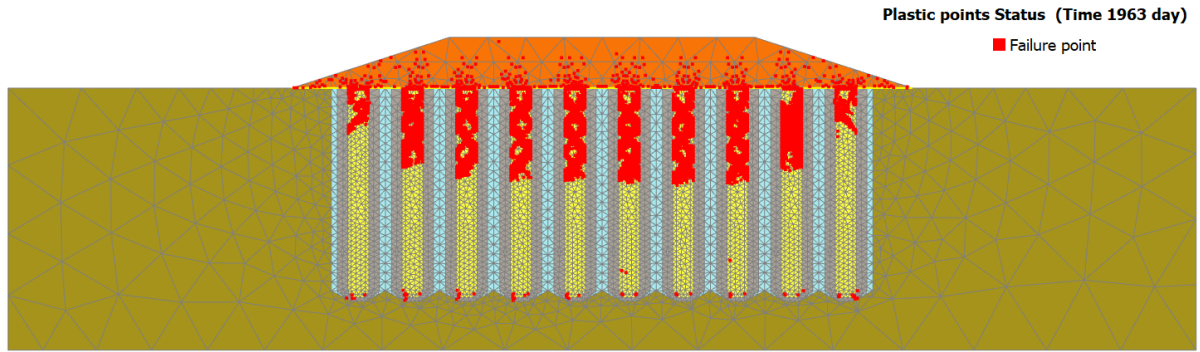
Şekil 4.4: Metot-1 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.



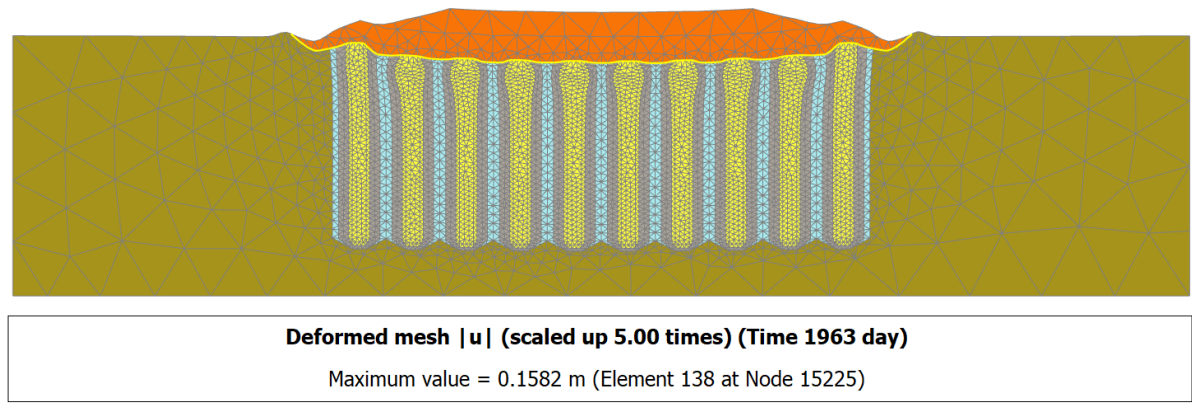
Deformed mesh |u| (scaled up 5.00 times) (Time 1963 day)

Maximum value = 0.1510 m (Element 229 at Node 15103)

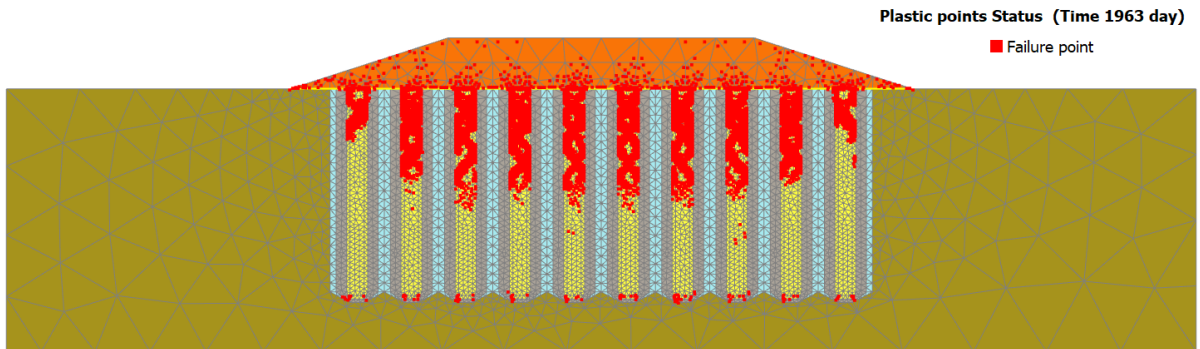
Şekil 4.5: Metot-1 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :15,10 cm).



Şekil 4.6: Metot-1 HS malzeme modelinde plastik noktalar.



Şekil 4.7: Metot-1 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :15,82 cm).

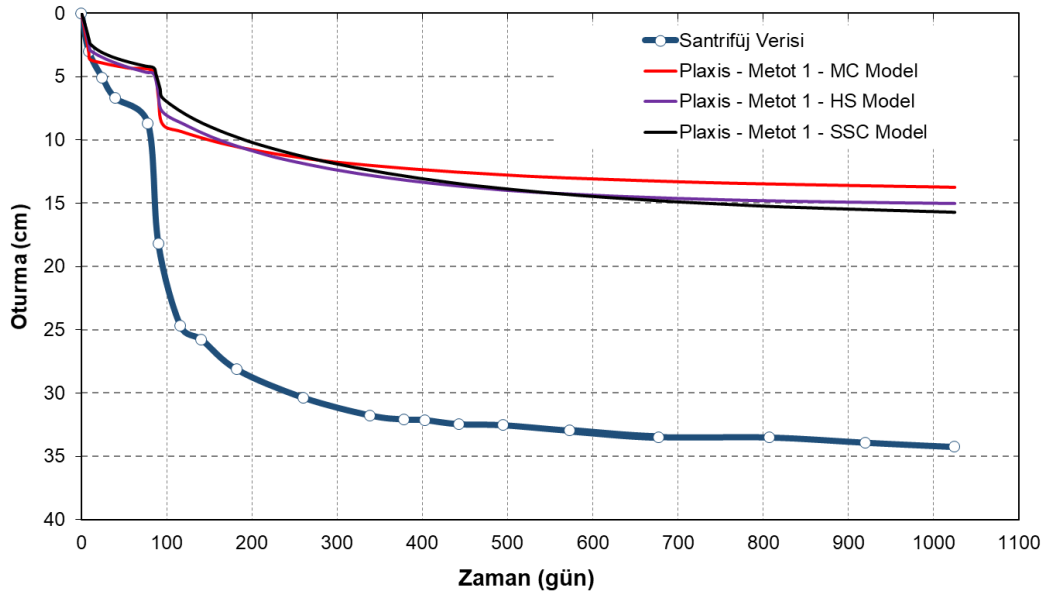


Şekil 4.8: Metot-1 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.

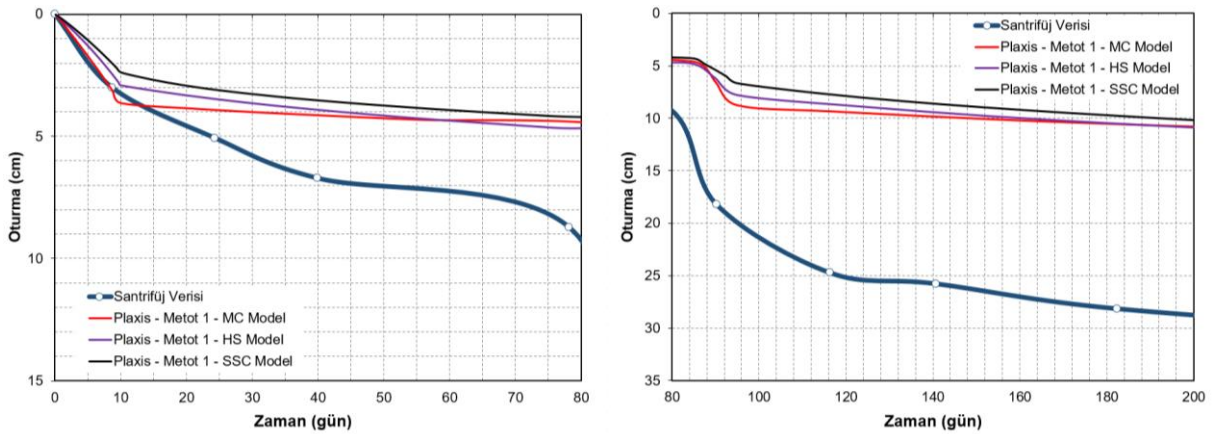
Yapılan analizler sonucunda elde edilen plastik noktalar kontrol edildiğinde MC malzeme modelinde kolonların yüzeye yakın bölgesinde ve sınırlı sayıda elde edilmiştir. Diğer malzeme modellerinde ise orta kolonlarda daha derinde, kenar kolonlara gidildikçe derinliği azalan bir plastik nokta profili görülmektedir. Ancak buna karşın üç modelde de yeterli noktanın oluşmadığı gözlenmiştir. Aynı zamanda deplasman mekanizmaları kontrol edildiğinde MC malzeme modelinde Tip-3 olarak tanımlanan (zeminde veya kolonların kendi içerisinde oturma) mekanizmaya benzeştiği görülmektedir. Diğer iki modelde ise en dışta bulunan

kolonlarda Tip 4 (yanal deformasyon) ve diğer bütün kolonlarda Tip 1 (göbeklenme) hareketlerinin oluştuğu görülmüştür.

Dolgu imalatı ve akabinde tanımlanan konsolidasyon aşamalarında hesaplanan en büyük deplasman değeri yumuşak zemin akma (SSC) malzeme modelinde elde edilmesine rağmen santrifüj deneyinde elde edilen deplasman değerinin çok altında kalmıştır. Elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.9’da santrifüj verileri ile kıyaslanmıştır. Dolgu imalat aşamalarına göre yapılan kıyaslama ise Şekil 4.10’da verilmiştir.



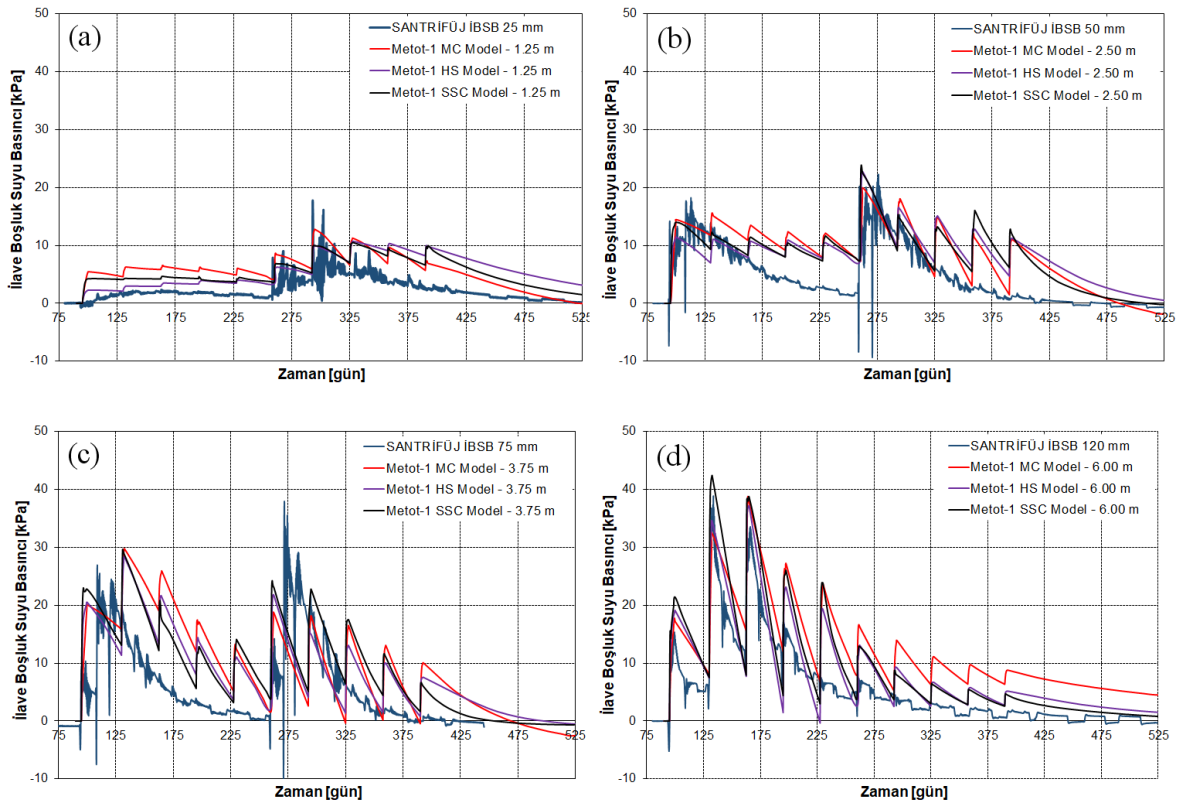
Şekil 4.9: Metot-1 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.



Şekil 4.10: Metot-1 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.

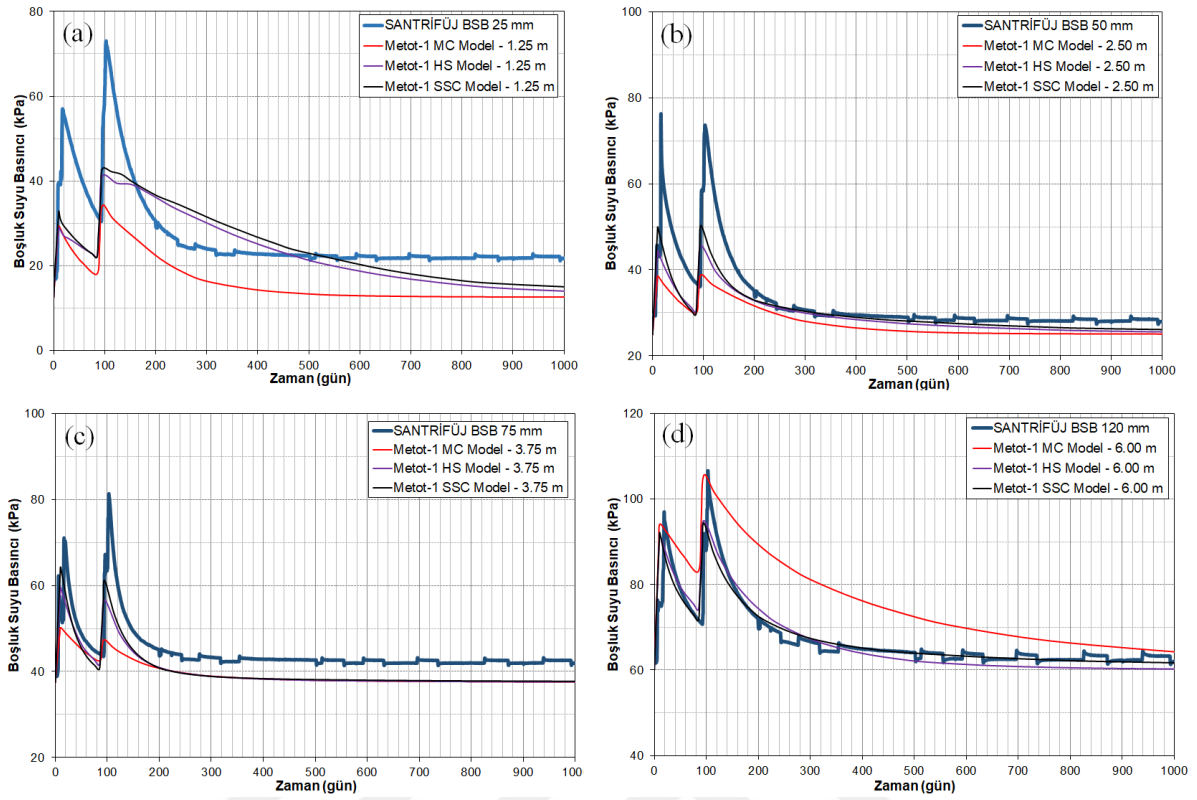
Elde edilen grafikler incelendiğinde; ilk kademe dolgu imalatında deney ile sayısal model oturma değerleri (3,15 cm) benzer mertebelerde elde edilmiş iken ilk kademe dolgu sonrası tanımlanan konsolidasyon aşamasında farklar görülmeye başlamıştır. İlk konsolidasyon aşaması sonrasında santrifüj deneyinde elde edilen 8,70 cm'lik oturma değerine karşın analiz sonuçlarında ortalama 4,50 cm oturma değeri elde edilmiştir. 2. kademe dolgu aşamasında fark daha da artarak analiz sonuçları santrifüj deney verilerinden uzaklaşmıştır. İlave boşluk suyu basıncının sıfırlandığı süre sonunda ise santrifüj deneyine ait oturma değerleri 34,25 cm'ye ulaşırken analiz sonuçlarında en büyük 15,82 cm'lik bir oturma miktarı elde edilebilmiştir.

Kolon imalat aşamalarında elde edilen ilave boşluk suyu basınçları her bir derinlik için Şekil 4.11'de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.12'de ise dolgu ve devamında tanımlanan konsolidasyon aşamaları için boşluk suyu basıncı karşılaştırmaları verilmektedir.



Şekil 4.11: Kolon imalat aşamalarında İ.B.S.B. a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.

Kolon imalat aşamalarında genel olarak bütün malzeme modellerinde ait sonuçlar santrifüj verileri ile uyumlu elde edilmiştir. Sadece 3,75 m derinlik için analiz sonuçları santrifüj deney verilerinde bir miktar yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni santrifüj deneyinde yerleştirilen boşluk suyu basıncı ölçerin kolon aksına uzaklığı gösterilebilir.

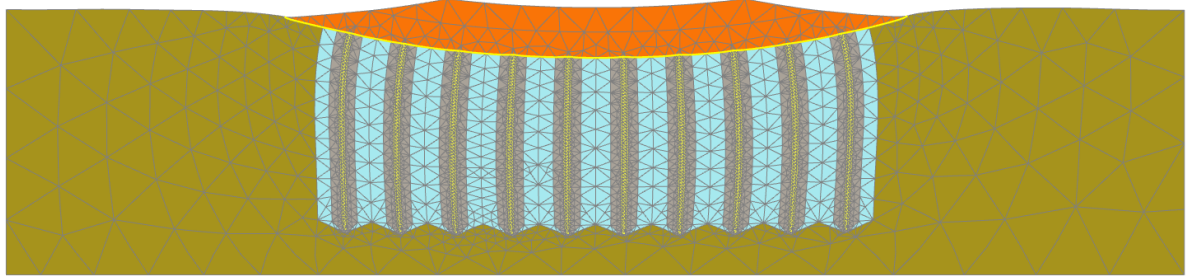


Şekil 4.12: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.

Boşluk suyu basıncı değerleri kontrol edildiğinde pekleşen zemin (HS) ile yumuşak zemin akma (SSC) zemin modellerinin değerleri birbiri ile örtüşmesine rağmen santrifüj deney verilerinin altında kalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, daha rijit olan taş kolon alanı, dolgu yükünün önemli bir bölümünü karşılayarak zeminde daha az gerilmenin meydana gelmesine sebebiyet vermesidir. MC malzeme modelinde ise genel olarak çok daha az boşluk suyu basıncının olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarakta deformasyon mekanizmaları gösterilebilir. Diğer iki modelde dolgu altındaki kolonlarda göbelenme ile yanal deformasyonlar gözlenirken MC modelde, kolonların Tip 3 deformasyon mekanizmasına sahip olduğu ve sanki bir kazık gibi davranarak yükü uç bölgesinde bulunan zemine aktardığı Şekil 4.3'te de görülmüştür. Yükün aktarılmasına bağlı olarak Şekil 4.12-d'de görüldüğü üzere kolon uç bölgesinde boşluk suyu basınçları yüksek mertebelerde elde edilmiştir. Bir diğer dikkat çeken hususta, boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi sonrasında elde edilen değerlerden görülmektedir ki B.S.B. ölçerlerin derinlikleri kurulum aşamasında belirtilen derinliklerden farklıdır. Bu farklılıklar kurulum aşamasında yapılan yanlış yerleşimlerin yanı sıra kolon imalatı ya da dolgu sonrası meydana gelen oturmalara da bağlı olabilir.

4.1.2 Metot-2 Sayısal Model Analizleri

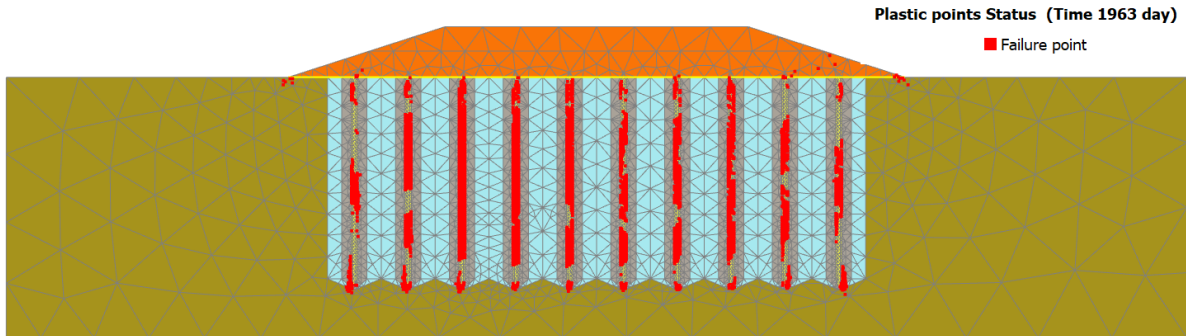
Bu dönüşüm metodunda, kolon, yumuşak kil ve örselenme bölgelerine ait zemin parametreleri sabit tutulmuş, taş kolon ve örselenme bölgesi geometrilerinde dönüşümler yapılmıştır.



Deformed mesh |u| (scaled up 5.00 times) (Time 1963 day)

Maximum value = 0.2504 m (Element 13 at Node 13166)

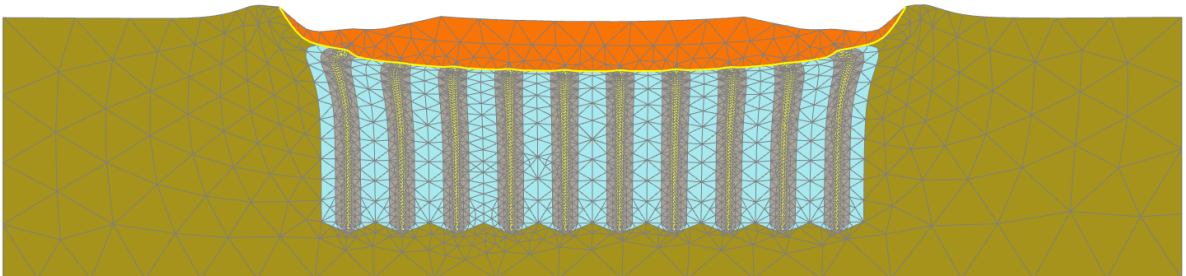
Şekil 4.13: Metot-2 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :25,04 cm).



Plastic points Status (Time 1963 day)

■ Failure point

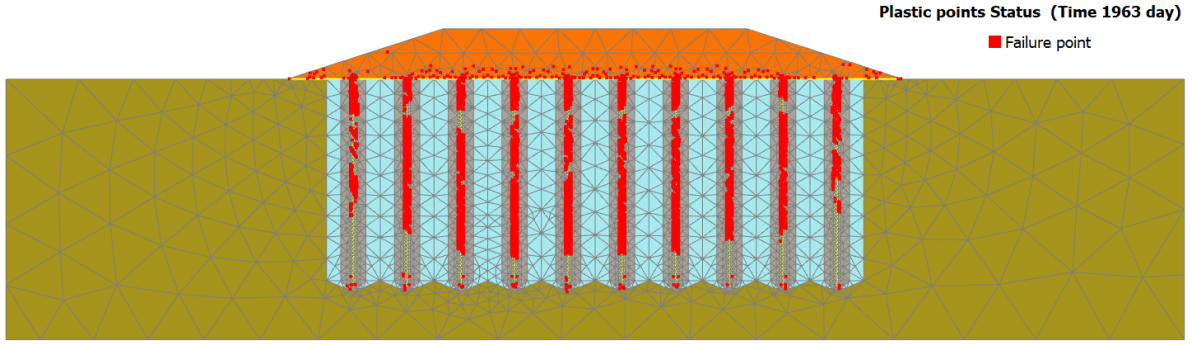
Şekil 4.14: Metot-2 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.



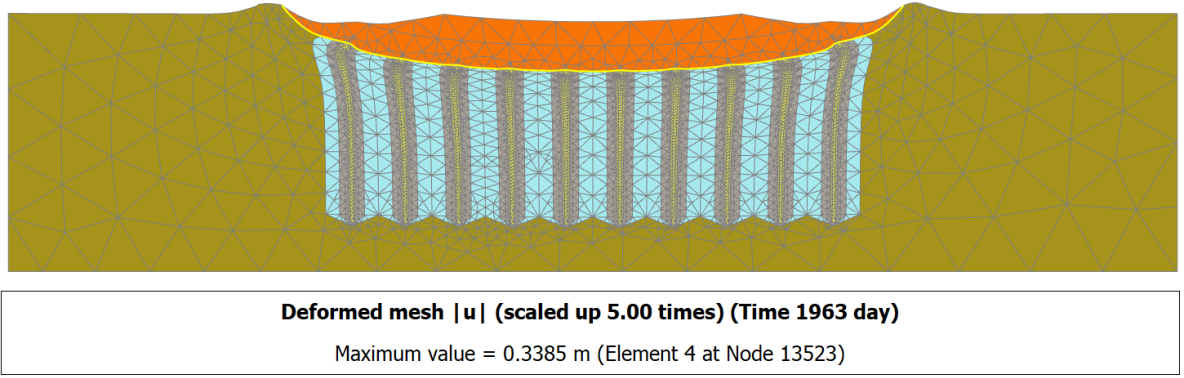
Deformed mesh |u| (scaled up 5.00 times) (Time 1963 day)

Maximum value = 0.3051 m (Element 4 at Node 13520)

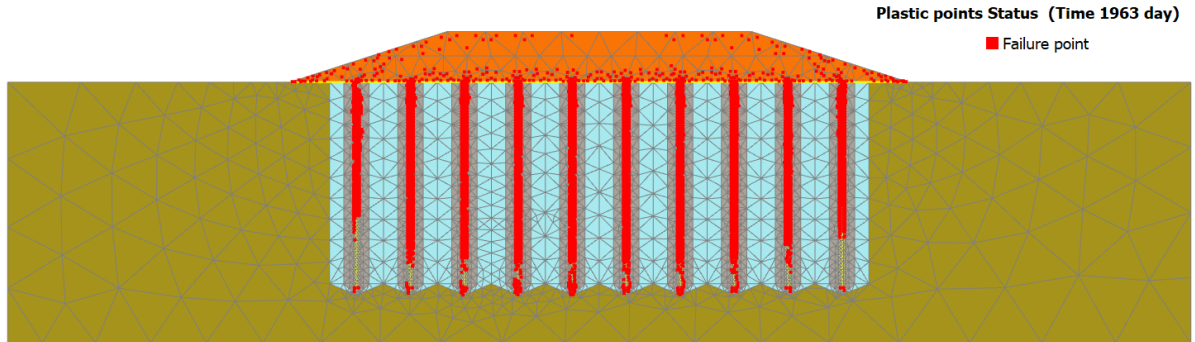
Şekil 4.15: Metot-2 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :30,51 cm).



Şekil 4.16: Metot-2 HS malzeme modelinde plastik noktalar.



Şekil 4.17: Metot-2 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :33,85 cm).

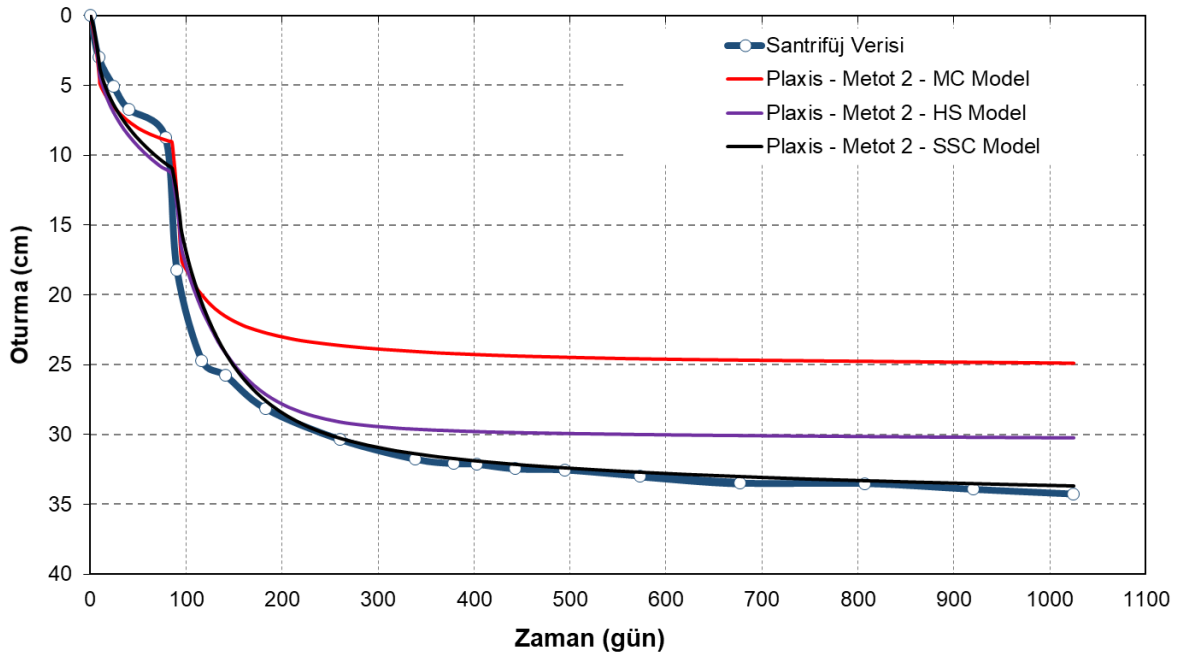


Şekil 4.18: Metot-2 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.

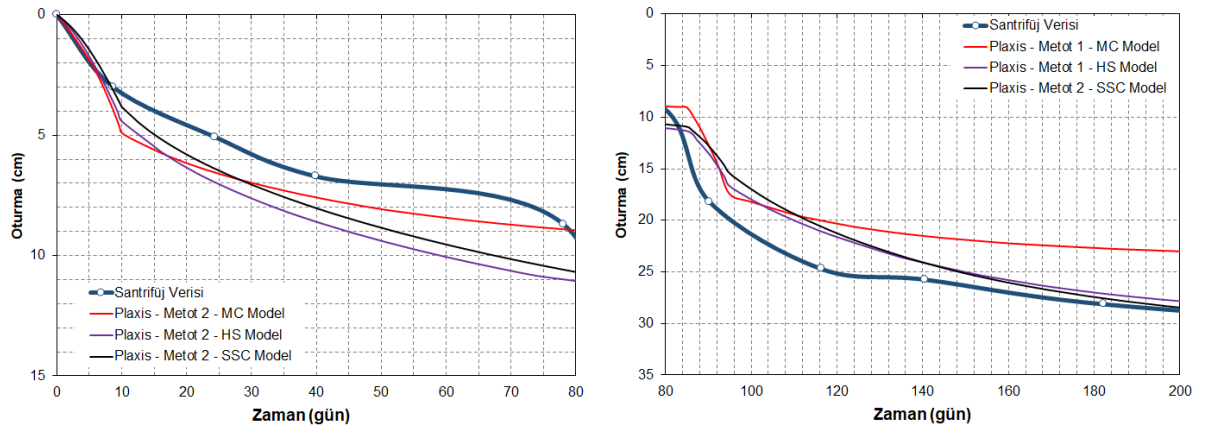
Yapılan analizler sonucunda elde edilen plastik noktalar kontrol edildiğinde MC malzeme modelinde diğer modellere nazaran daha az nokta oluşmasına karşın Metot-1 ile karşılaştırıldığında daha makul mertebelerde görülmektedir. Her malzeme modeli için kolon bölgesinin tamamında elde edilen plastik noktalar deplasman değerlerini de etkilemiştir. Deplasman mekanizmaları kontrol edildiğinde MC malzeme modelinde merkezden uzaklaştıkça kısmi yanal deformasyonlar görülmesine karşın genel olarak kolon uç bölgesinde bulunan zeminde veya kolonların kendi içerisinde oturma yaptığı görülmektedir. Diğer iki

modelde ise en dışta bulunan kolonlarda maksimum yanal deformasyon gözlenirken diğer kolonlarda da bu mekanizma etkisi görülmektedir. Dolgu orta bölgesinde bulunan kolonlarda ise göbekenme mekanizması görülmektedir.

Dolgu imalatı ve akabinde tanımlanan konsolidasyon aşamalarında hesaplanan deplasman profilleri incelendiğinde pekleşen zemin (HS) ile yumuşak zemin akma (SSC) malzeme modeli ikinci dolgu aşamasına kadar neredeyse santrifüj deney verileri ile birebir örtüşmektedir. 2. dolgu imalatı sonrasında tanımlanan konsolidasyon aşamasında ise bu malzeme modellerine ait verilerde farklılıklar gözlenmiştir. Bunun nedeni ise Plaxis'e ait malzeme modelleri tanımlanırken belirtilen, SSC malzeme modelinde zeminlerin zamana bağlı ikincil sıkışma (akma) etkilerinin tanımlanabilmesidir. MC malzeme modelinde ise elastik ve plastik davranışın net sınırlarla belirlenmesi sonucunda yükleme aşamalarında oturmaların büyük ölçüde tamamlandığı, konsolidasyon aşamasında ise çok daha az oturmalar meydana gelmesi ile diğer modellere nazaran %30 daha az oturma hesaplanmıştır. Elde edilen oturma değerleri Şekil 4.19'da santrifüj verileri ile kıyaslanmıştır. Dolgu imalat aşamalarına göre yapılan kıyaslama ise Şekil 4.20'de verilmiştir.

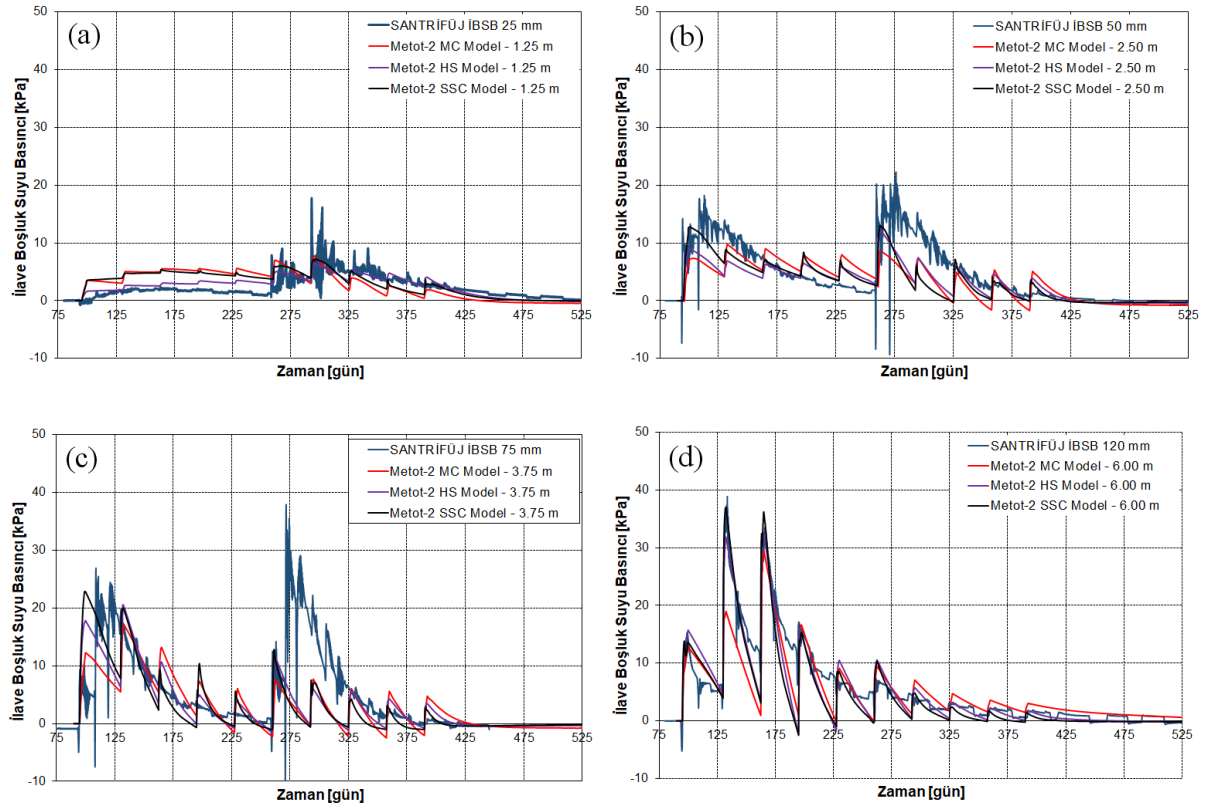


Şekil 4.19: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.



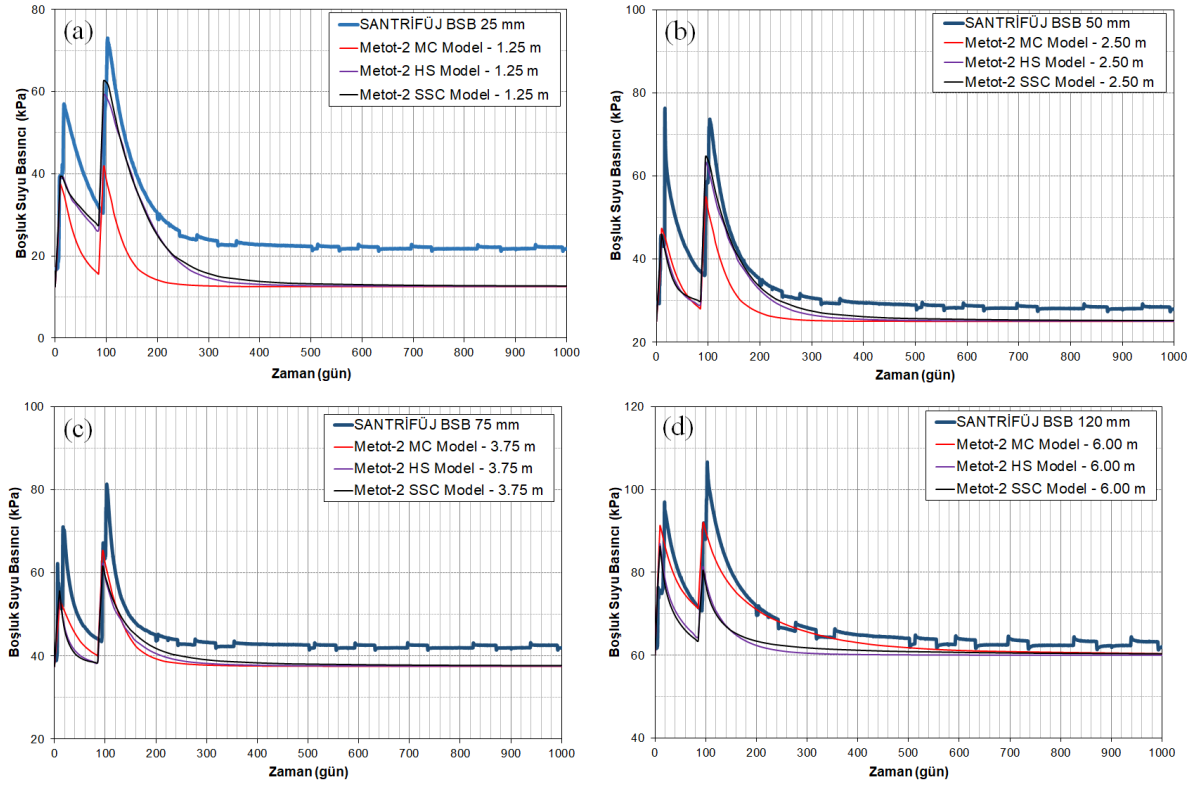
Şekil 4.20: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.

Kolon imalat aşamalarında elde edilen ilave boşluk suyu basınçları her bir derinlik için Şekil 4.21’de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.22’de ise dolgu ve devamında tanımlanan konsolidasyon aşamaları için boşluk suyu basıncı karşılaştırmaları verilmektedir.



Şekil 4.21: Kolon imalat aşamasında İ.B.S.B. a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.

Kolon imalat aşamalarında genel olarak bütün malzeme modellerinde ait sonuçlar santrifüj verileri ile uyumlu olmasına karşın Metot-1’de de gözlemlendiği üzere 3,75 m derinlik için farklar görülmüştür. Nedeni ise yerleştirilen boşluk suyu basıncı ölçerin kolon aksına uzaklığı olarak düşünülmektedir.

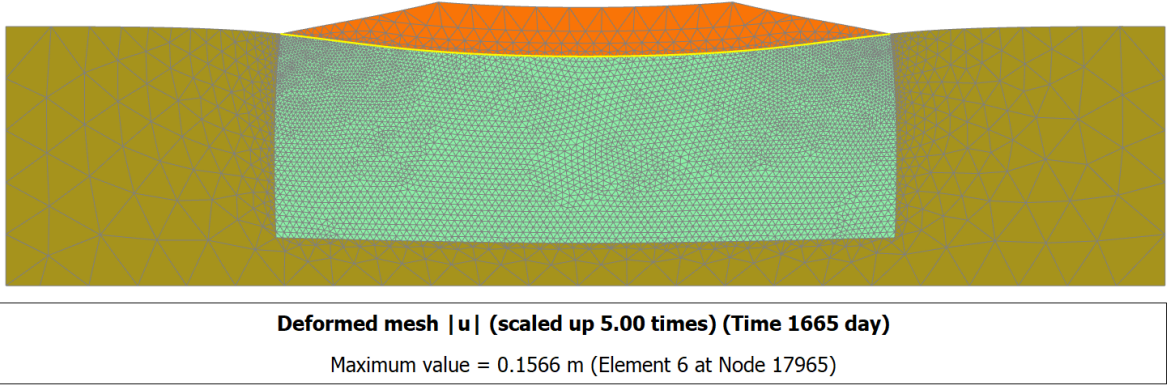


Şekil 4.22: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.

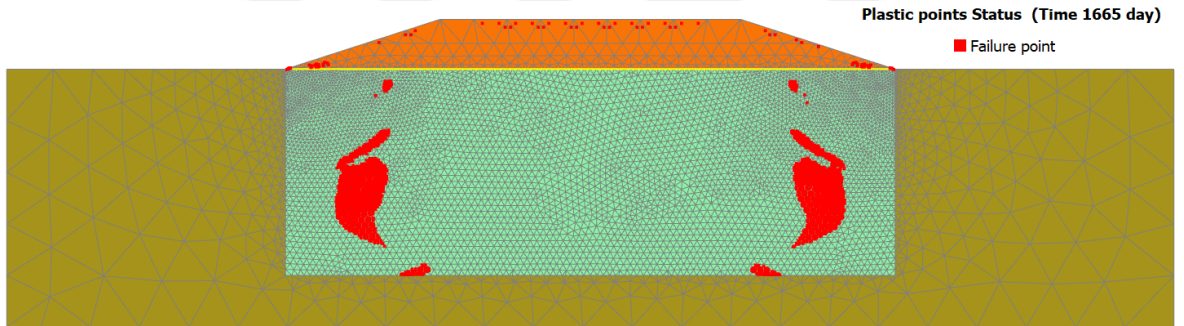
Dolgu imalat aşamalarında boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde santrifüj deneyi verileri ile pekleşen zemin (HS) ve yumuşak zemin akma (SSC) zemin modellerinden elde edilen değerler birbiri ile örtüşmektedir. MC malzeme modelinde ise Metot-1 benzeri bir davranış ile deformasyon mekanizmasına bağlı daha az boşluk suyu basıncı oluşmuştur. Yükün aktarılmasına bağlı olarak 3 derinlikte MC model için hesaplanan boşluk suyu basıncı diğer malzeme modellerinin altında kalmasına karşın 6,00 m derinlikte diğer malzeme modellerin üzerinde elde edilmiştir.

4.1.3 Metot-3 Sayısal Model Analizleri

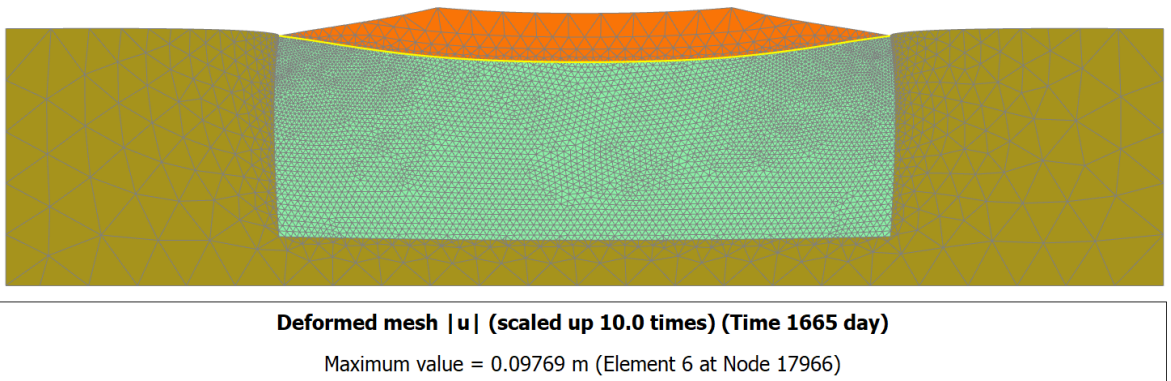
Bu yöntemle ait sayısal analiz modeli hazırlanırken ilk etapta kolon sınırları referans alınarak eşdeğer iyileştirme bölgesi (E.İ.B.) tanımlanmıştır (Şekil 3.28). Tanımlanan eşdeğer iyileştirme bölgesi için rijitlik ve permeabilite dönüşümleri sonrasında analizler yapılmıştır.



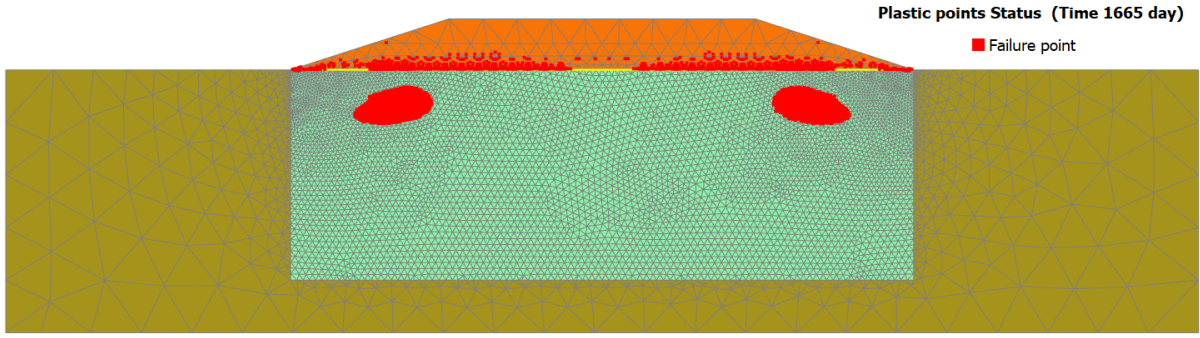
Şekil 4.23: Metot-3 Mohr-Coulomb malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :15,66 cm).



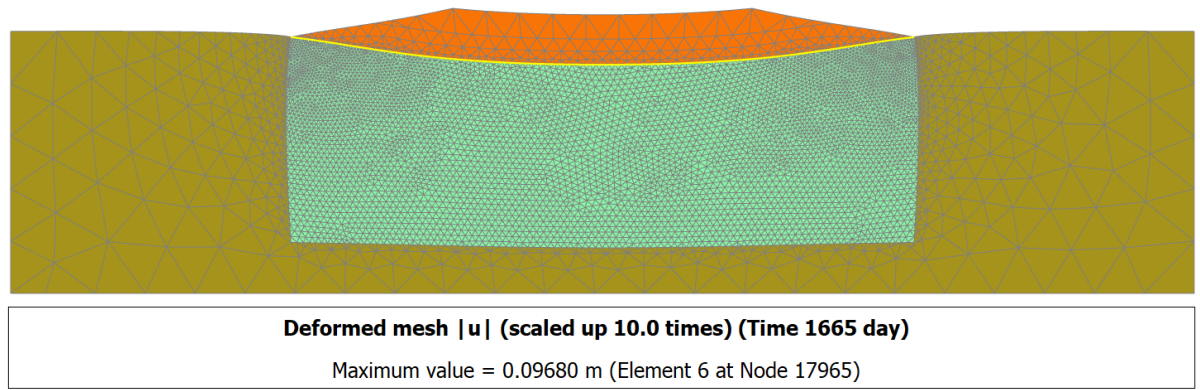
Şekil 4.24: Metot-3 Mohr-Coulomb malzeme modelinde plastik noktalar.



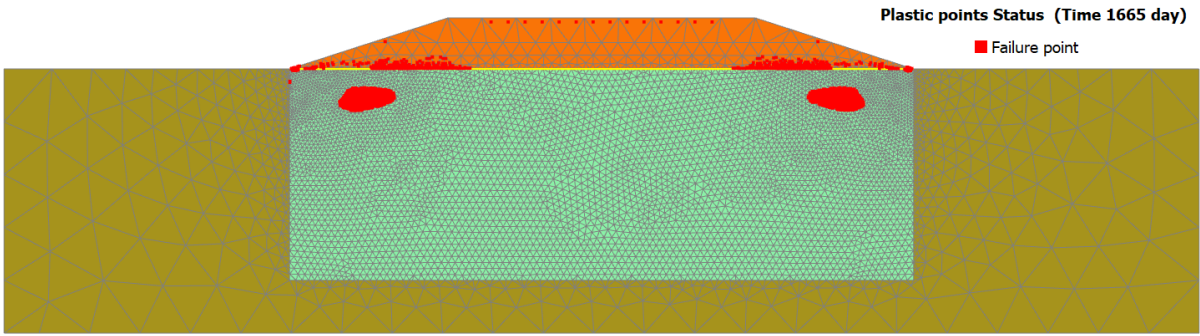
Şekil 4.25: Metot-3 HS malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :9,77 cm).



Şekil 4.26: Metot-3 HS malzeme modelinde plastik noktalar.



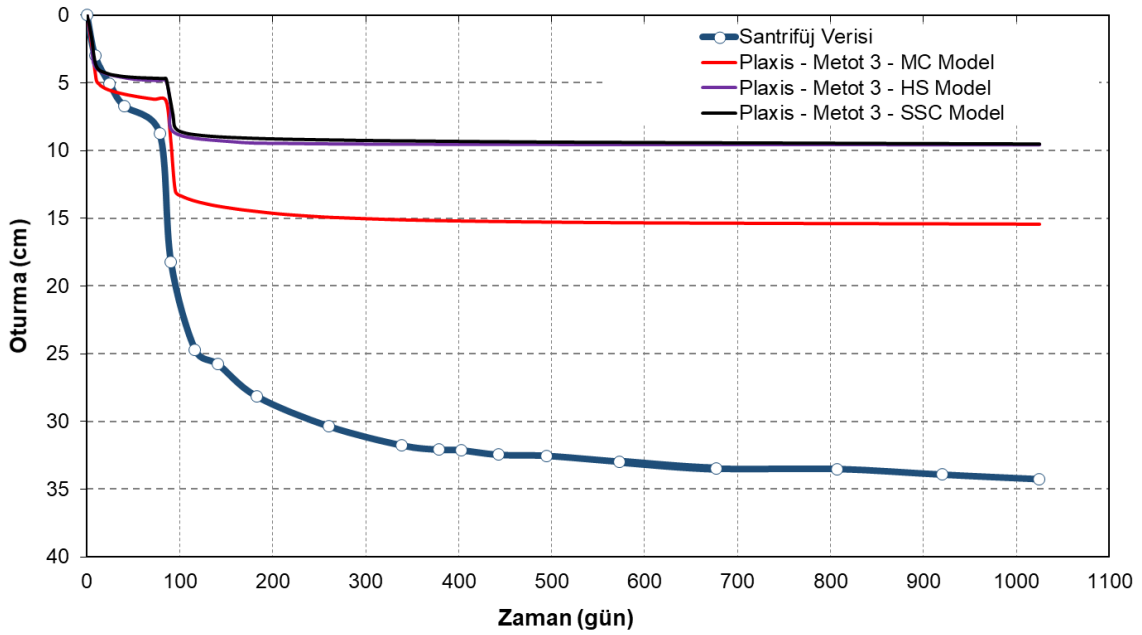
Şekil 4.27: Metot-3 SSC malzeme modelinde deplasman profili (u_{\max} :9,68 cm).



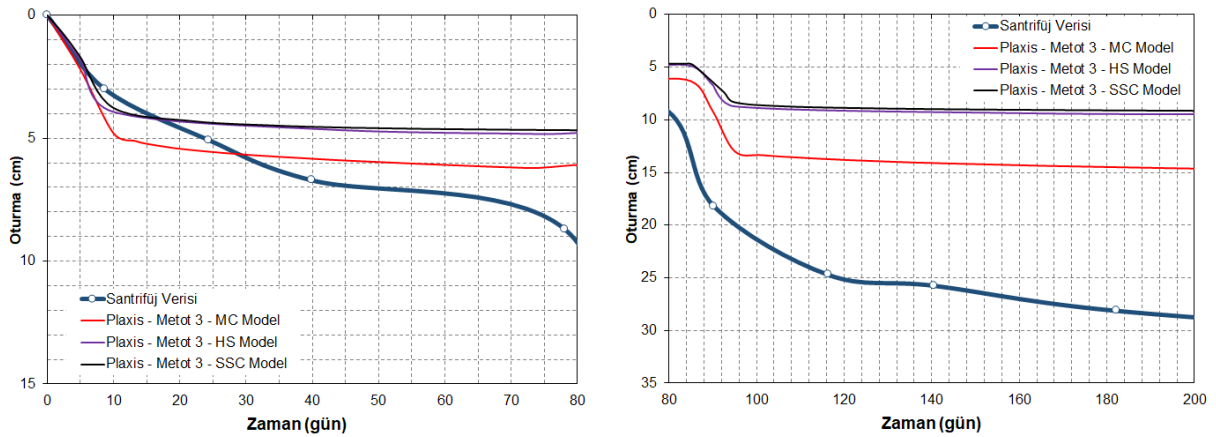
Şekil 4.28: Metot-3 SSC malzeme modelinde plastik noktalar.

Farklı malzeme modelleri için yapılan analizlerde elde edilen deplasman değerleri Metot-1 değerlerinin de altında kalmaktadır. Diğer dönüşüm metotlarının aksine bu yöntemde MC malzeme modelinde daha fazla deplasman hesaplanmıştır (Şekil 4.29). Analizler sonucunda elde edilen plastik noktalar ise sadece eşdeğer iyileştirme bölgesinin kenar kısımlarında, yatay deplasmanların en fazla olduğu bölgelerde görülmektedir. Bir diğer dikkat çeken husus, konsolidasyon aşamalarında oturma oluşmamasıdır. Bunun üç sebebi olabilir. Birincisi, eşdeğer iyileştirme bölgesinin lineer elastik-tam plastik (MC) malzeme özelliğinde tanımlanmasıdır. İkinci neden olarak, yapılan dönüşüm sonrasında belirlenen permeabilite katsayısı nedenlidir.

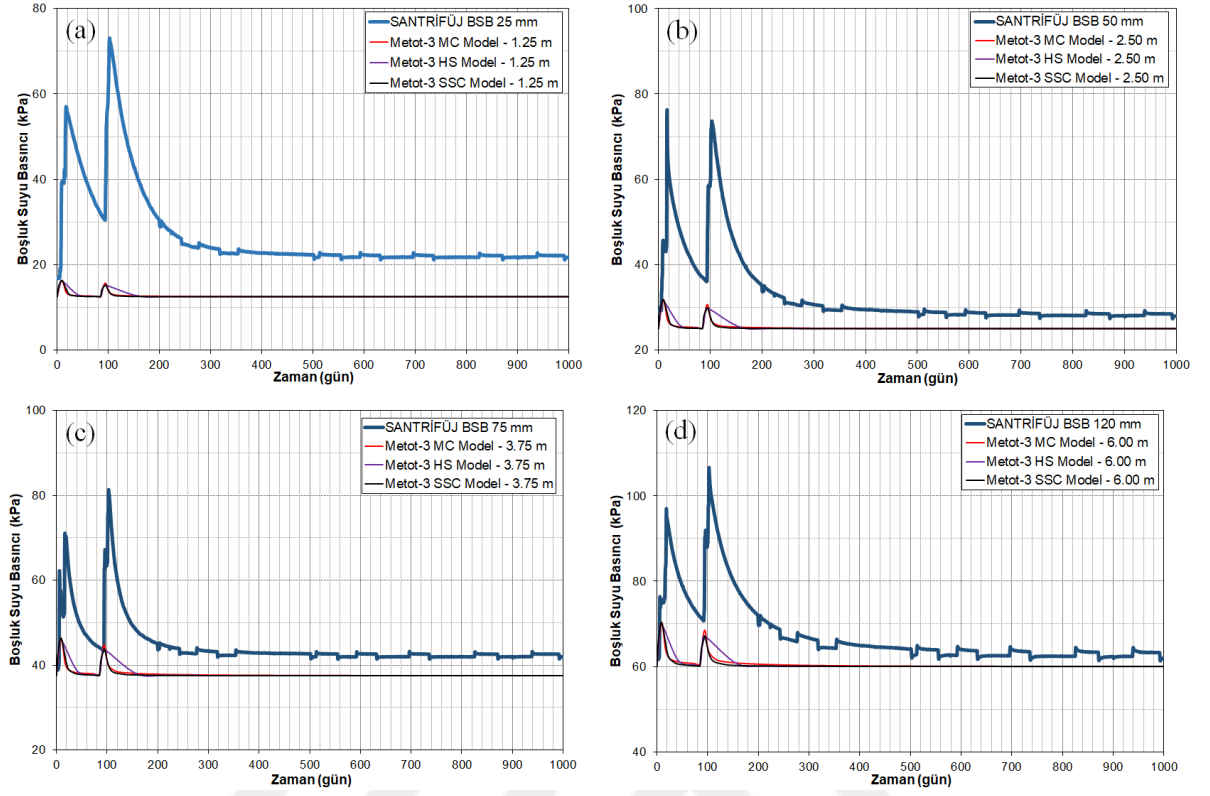
Boşluk suyu basınçları kontrol edildiğinde eşdeğer iyileştirme bölgesi içerisinde seçilen noktalarda çok az ilave boşluk suyu basıncı oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.31). Sebeplerden üçüncüsü olarak model derinliği düşünülmektedir. Eşdeğer iyileştirme bölgesi için Tan (2013) tarafından çalışılan varsayımsal modelde kolon uç kısımları ile model tabanı arasında belirli bir kalınlık bulunmakta ve dolgu tarafından oluşan ilave gerilmeler kolonlar ve eşdeğer iyileştirme bölgesi ile aktarılarak kolon bölgesi altında kalan zeminde oturmalara neden olmaktadır. Ancak santrifüj modelinde, kolon ucu ile taban arasında sınırlı bir kalınlık mevcuttur ve sıkışabilir tabaka kalınlığı nedeniyle deplasmanların kısıtlı mertebelerde elde edildiği öngörülmektedir.



Şekil 4.29: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.



Şekil 4.30: Metot-2 ve santrifüj deneyi oturmalarının kıyaslanması.



Şekil 4.31: Dolgu ve konsolidasyon aşamalarında boşluk suyu basıncı, a-1,25 m, b-2,50 m, c-3,75 m, d-6,00 m derinlik.

Deplasman değerlerinin sınırlı elde edilmesinde öngörülen üçüncü neden, ilerleyen bölümde model derinliğinin artırılması ile elde edilen Metot-2 analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

4.1.4 Dönüşüm Yöntemi ile Malzeme Modeli Seçimi

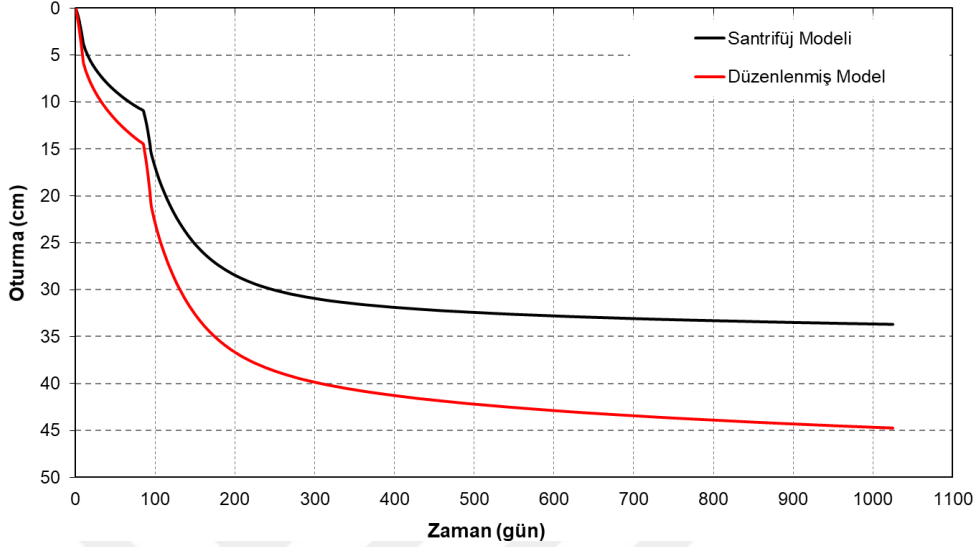
Kullanılan dönüşüm metotları ile malzeme modellerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde;

- Metot-1 yönteminde kullanılan bütün malzeme modelleri için hesaplanan toplam oturma değerleri, santrifüj verisine kıyasla %50~60 aralığında daha az elde edilmesi nedeniyle kullanılabilir bir yöntem olmaktan çok uzaktır.
- Metot-1'de kolonlarda daha az oluştuğu görülen plastik noktalar nedeniyle oturma değerlerinin düşük elde edileceği Tan vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarla da öngörülmüştür. Aynı zamanda daha geniş bir alana sahip rijitliği fazla taş kolonlar gerilmelerin büyük bir kısmını alarak yumuşak kil birimde daha az ilave boşluk suyu basıncı oluşmasına ve buna bağlı olarakta konsolidasyon aşamalarında daha az oturmaların değerlerinin elde edilmesine neden olmaktadır.

- Metot-2 MC malzeme modelinde elastik ve plastik davranışın net sınırlara sahip olması ve deformasyon mekanizması nedenlerinden dolayı deney verilerinin yaklaşık %30 altında oturma değerleri elde edilmiştir. Bu malzeme modelinde deplasman uygulaması ile tanımlanan kolon imalat aşamalarında santrifüj deneyine yakın ilave boşluk suyu basınçları hesaplanırken dolgu aşamalarında deney verilerinin altında değerler elde edilmiştir.
- Metot-2 HS malzeme modelinde 2. dolgu aşaması sonuna kadar deplasman değerleri gayet makul iken 2. konsolidasyon aşamasında yeterli oturma elde edilemeyerek deney verilerinin %12 altında oturma değerleri ile analiz tamamlanmıştır.
- Metot-2 SSC modelde zamana bağlı ikincil sıkışma (akma) etkilerinin tanımlanabilmesi ile 2. dolgu sonrasına kadar HS model ile benzer hesaplanan oturma değerleri 2. konsolidasyon aşamasında santrifüj değerleri ile neredeyse birebir örtüşmektedir.
- Metot-3 modelde farklı malzeme modelleri kullanılarak yapılan analizler neticesinde hesaplanan toplam oturma değerleri, santrifüj verisine kıyasla %60~70 aralığında daha az elde edilmesi nedeniyle kullanılabilir bir yöntem olmaktan çok uzaktır. Ancak derinliği arttırılmış model üzerinde yapılacak analizler ile tekrar karşılaştırılarak uygunluğu incelenecektir.
- Elde edilen bütün veriler birlikte değerlendirildiğinde dolgu altında taş kolonlar ile iyileştirilmiş yumuşak kil zeminin modellenmesi için en uygun dönüşüm yönteminin Metot-2 olduğu ve en uygun malzeme modelinin yumuşak zemin akma (SSC) olduğu görülerek bundan sonra yapılacak analizlerde kullanılmasına karar verilmiştir.

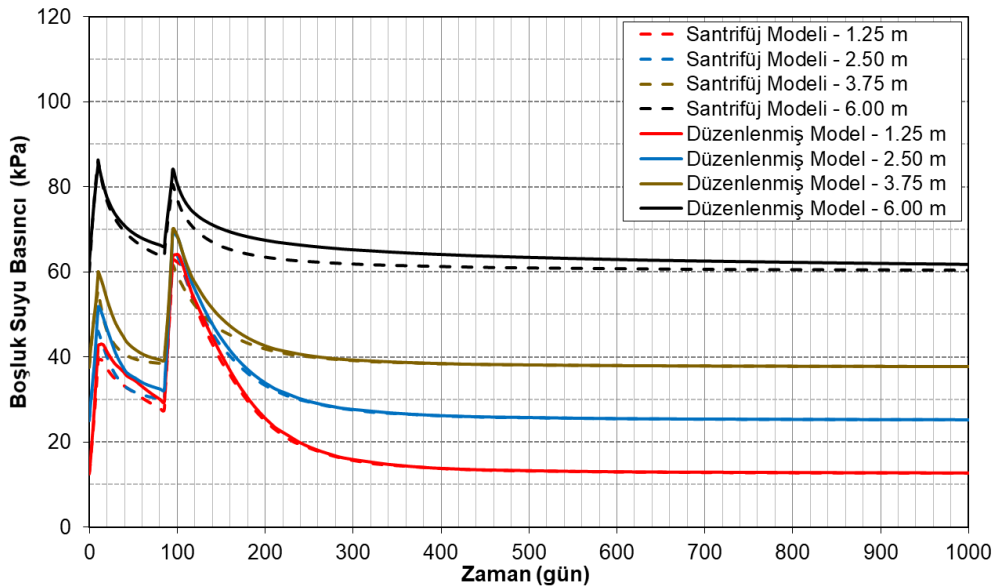
Belirlenen dönüşüm yöntemi ve malzeme modeli üzerinde farklı analizlerin yapılabilmesi için geometride ve analiz aşamalarında bazı değişiklikler yapılmıştır. Yapılan değişikliklerin sebeplerinden biri kolon boyu etkisinin incelenebilmesi için daha derin bir modele gereksinim duyulması iken bir diğer neden de farklı sayıda kolon tanımlanacak olması nedeniyle imalat sıralamasına gerek duyulmaması ve kolon imalat aşamasında boşluk suyu basıncı değerlerinin incelenmeyecek olmasıdır. Bundan dolayı yumuşak kil birime ait kalınlık 7,50 m'den 25,0 m'ye arttırılmış ve her bir kolonun tek tek imalatının tanımlandığı aşamalar kaldırılarak tek bir aşamada hem kolonlar hem de örselenme bölgeleri tanımlanmıştır. Yumuşak kil birim kalınlığının arttırılması sonucunda sıkışabilir tabaka kalınlığı artmış ve doğal olarak oturma değerlerinde artış gözlenmiştir (Şekil 4.32). Metot-2 ve SSC malzeme modeli kullanılan analiz

modeline santrifüj modeli denilmiş yapılan değişiklikler sonrasında oluşturulan model için de düzenlenmiş model tanımlaması yapılmıştır.

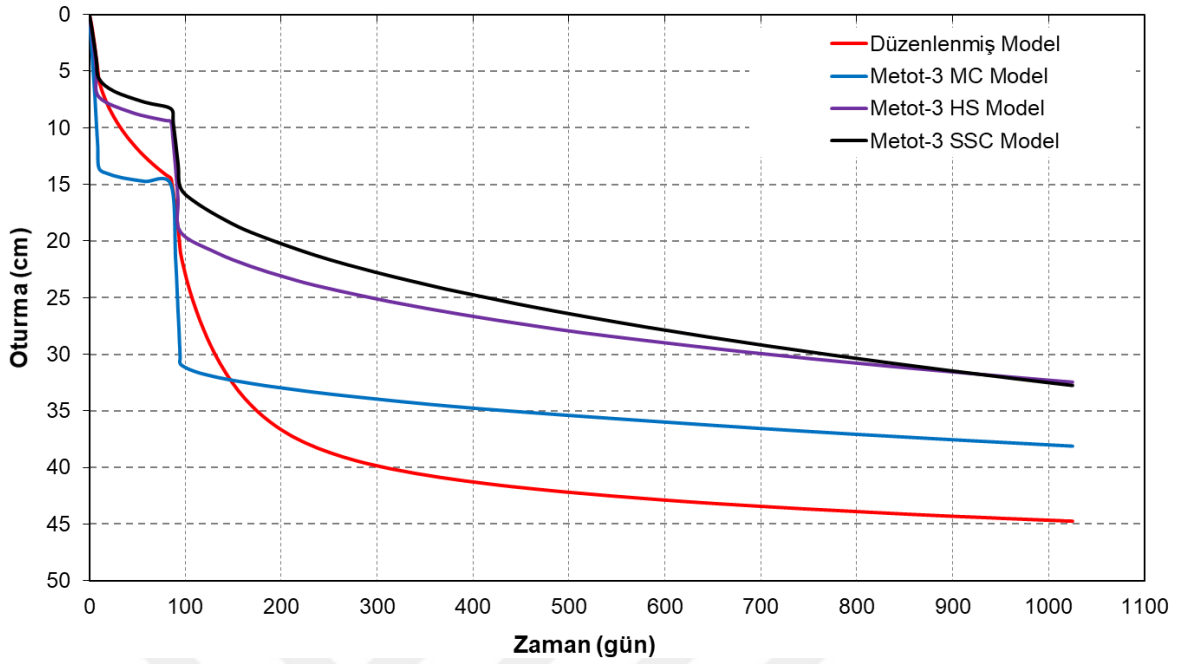


Şekil 4.32: Model düzenlenmesi ile elde edilen deplasman grafiği.

Model düzenlemesi sonucunda dolgu ve konsolidasyon aşamalarında farklı derinlikler için elde edilen boşluk suyu basınçları karşılaştırıldığında genel olarak uyumlu bir sonuç elde edilmiştir. Dolgu aşamalarında boşluk suyu basınçları aynı mertebelerde artarken 3,75 m ve 6,00 m derinliklerde elde edilen boşluk suyu basınçlarının biraz daha yavaş sönümlendiği gözlenmektedir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33: Model düzenlenmesi ile elde edilen boşluk suyu basıncı grafiği.

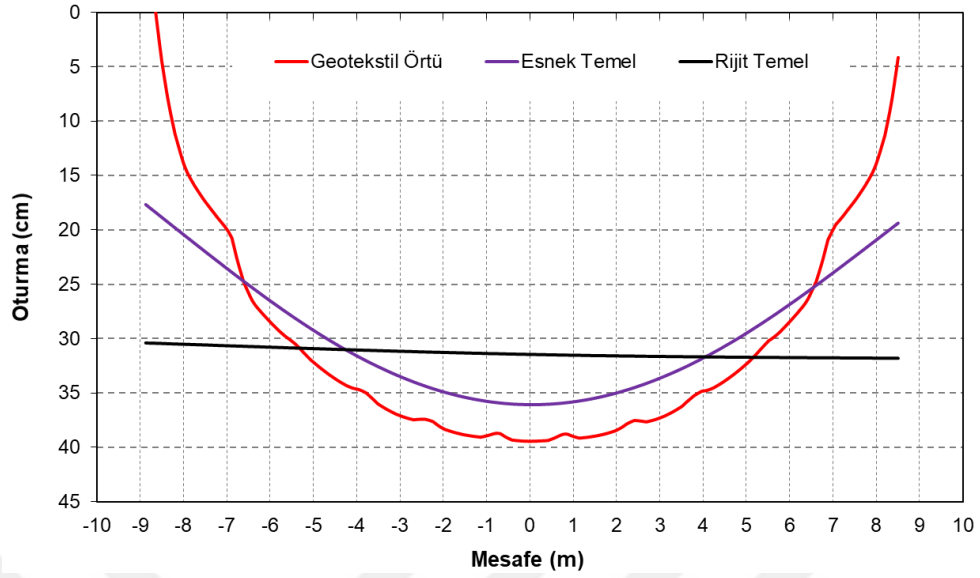


Şekil 4.34: Düzenlenmiş model ile Metot-3 yöntemi deplasman kıyaslaması.

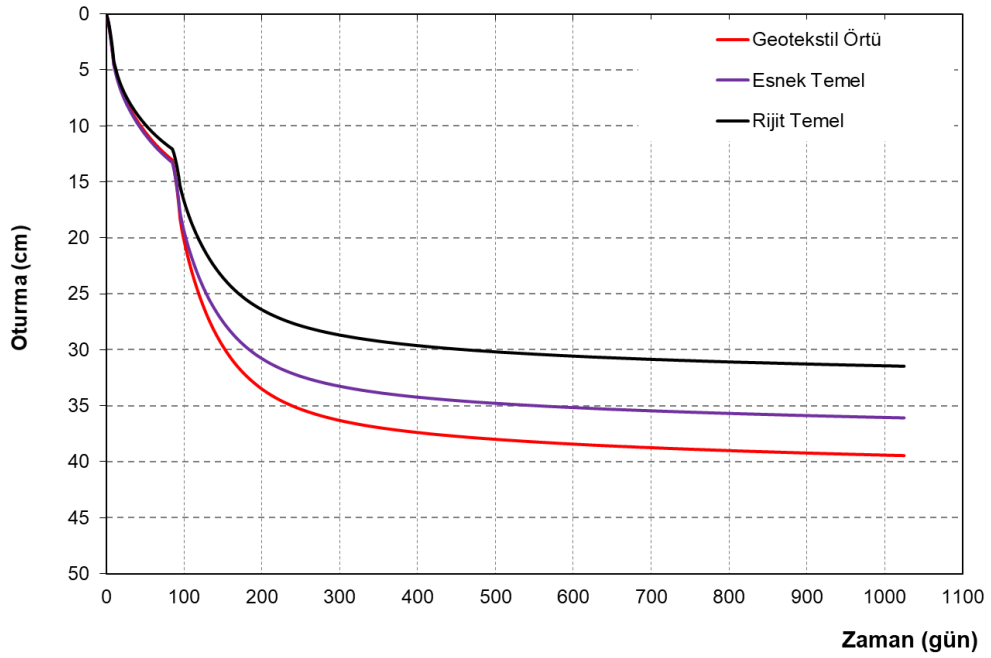
Düzenlenen model ile Metot-3 için oluşturulan derin model sonuçları karşılaştırıldığında MC malzeme modelinde, diğer malzeme modellerine kıyasla daha büyük oturmalar elde edilmiş olup Metot-2 SSC modeline nazaran %15 mertebesinde az oturma elde edilmiştir (Şekil 4.34). Diğer malzeme modellerinde ise %25 oranında oturma farkları görülmüştür. Elde edilen deplasman profilleri bir önceki karşılaştırmada hesaplanan %60~70 oranındaki oturma farklarına kıyasla daha makul mertebelere sahiptir. Ancak en uygun yöntem için Metot-2 ve en uygun malzeme modeli için yumuşak zemin akma (SSC) seçimini değiştirmemiştir.

4.2 TEMEL SİSTEMİ ETKİSİ

Farklı temel sistemlerinin etkisinin incelenmesi için dolgu altında elastik bir geotekstil örtü, esnek bir temel ($t=20$ cm) ve rijit bir temel ($t=100$ cm) olması durumları kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerde kolon yüksekliği $H=6,00$ m, kolon çapı $D=60$ cm ve kolon aralığı $s=1,55$ m olması durumuna tekabül eden %12 alan yerdeğiştirme oranı kullanılmıştır. Temeller için kullanılan malzemeler ağırlıksız olarak tanımlanmıştır. Temele ait rijitlik parametreleri temeli oluşturan malzemenin elastisite modülü 30 GPa alınarak modellenmiştir. Dolgu imalatı önceki analizlerde yapıldığı gibi 2 kademe olarak modellenmiş ve sonrasında oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi ($\Delta u < 1,0$ kPa) için konsolidasyon aşaması tanımlanmıştır. Model derinliğinin etkisinin incelenebilmesi için santrifüj deney modelinde seçilen derinlik ($z=7,50$ m) ile derinleştirilmiş modeller ($z=25,0$ m) için analizler tekrarlanmıştır.

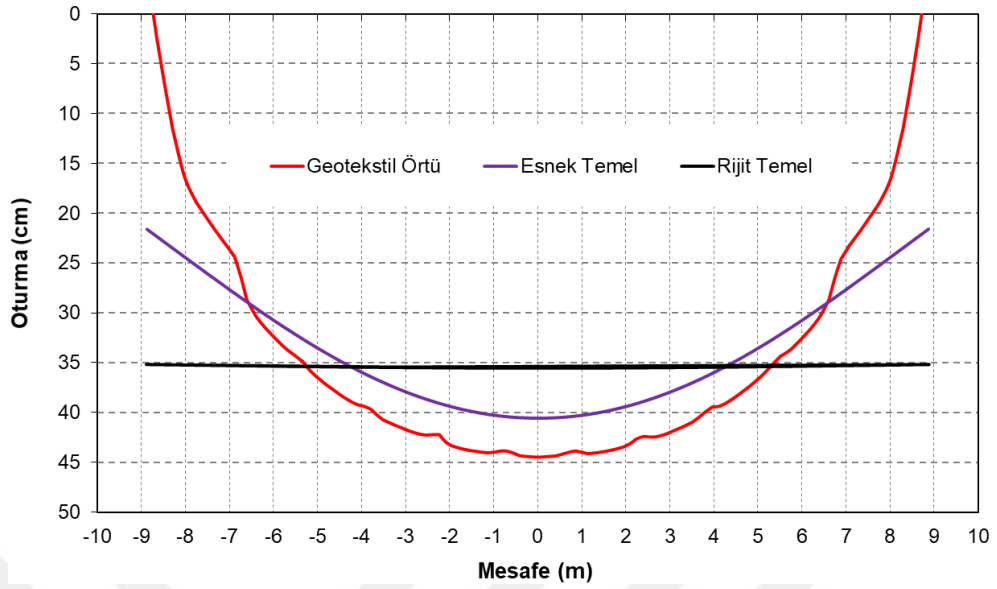


Şekil 4.35: $z=7,50$ m derinlik için farklı temel sistemlerinde elde edilen deplasman profili.

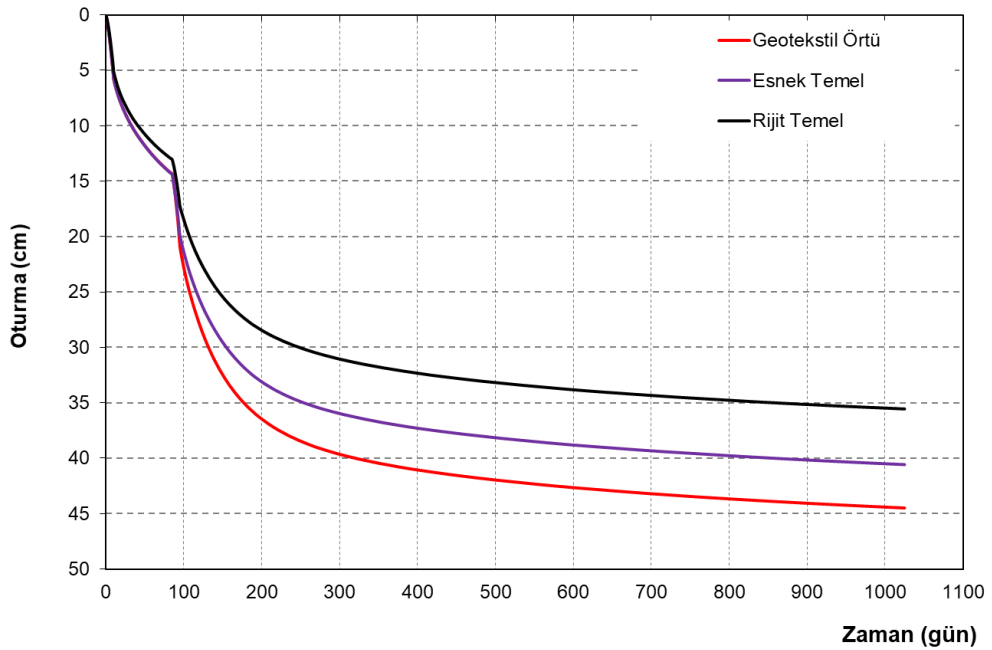


Şekil 4.36: $z=7,50$ m derinlik için farklı temel sistemleri orta noktalarında elde edilen zamana bağlı deplasman profili.

$z=7,50$ m derinlik için yapılan analizlere ait sonuçlar Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmektedir. Sığ modelde geotekstil örtü altında elde edilen oturmalar (39,45 cm) referans olarak alındığında, esnek temelli ($t=20$ cm) modelde deplasmanların %8,5 oranında azalarak 36,08 cm'ye düştüğü, rijit temelli ($t=100$ cm) modelde ise %21,1 oranında azalarak 31,11 cm'ye düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.37: $z=25,00$ m derinlik için farklı temel sistemlerinde elde edilen deplasman profili.

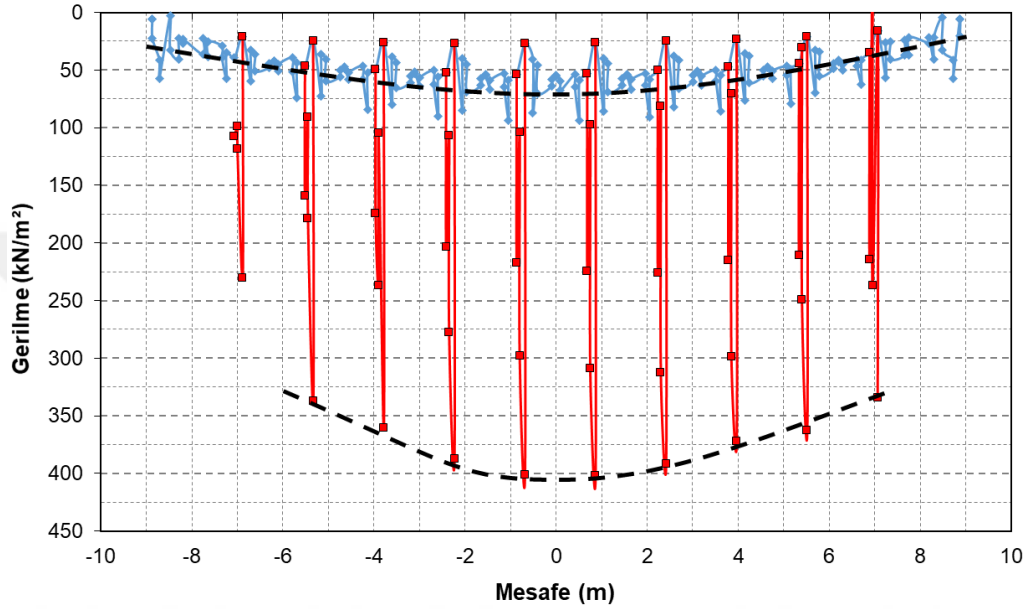


Şekil 4.38: $z=25,00$ m derinlik için farklı temel sistemleri orta noktalarında elde edilen zamana bağlı deplasman profili.

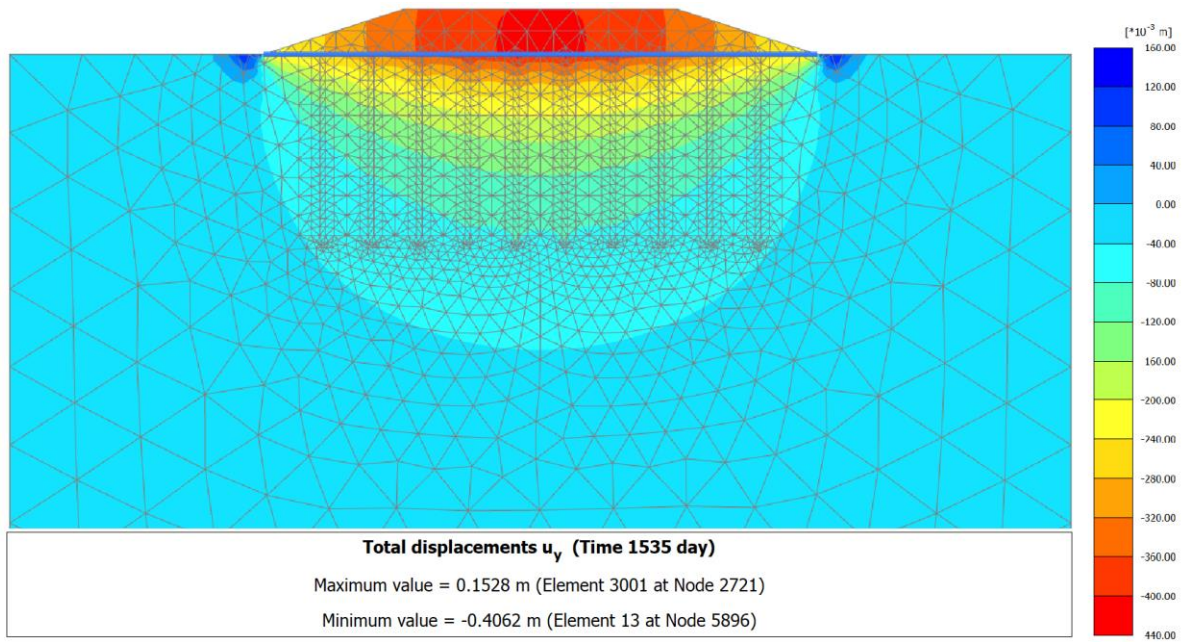
$z=25,00$ m derinlik için yapılan analizlere ait sonuçlar Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmektedir.

Derin modelde geotekstil örtü altında elde edilen oturmalar (44,49 cm) referans olarak alındığında, esnek temelli ($t=20$ cm) modelde deplasmanların %8,8 oranında azalarak 40,58 cm'ye düştüğü, rijit temelli ($t=100$ cm) modelde ise %20,0 oranında azalarak 35,55 cm'ye düştüğü görülmektedir.

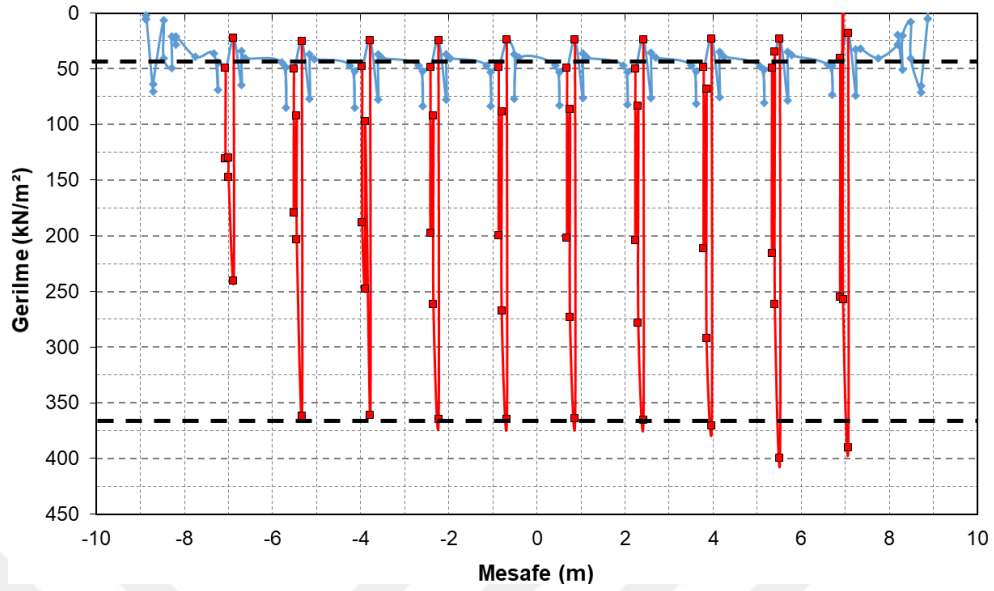
İki model derinliği için yapılan analizlerde, her bir temel sistemi için farklı deplasman profilleri elde edilmiştir. Deplasman profilleri incelendiğinde dikkat çeken bir diğer husus farklı oturma mertebeleridir. Temelin rijitleşmesi ile beklenildiği üzere farklı oturma mertebelerinde de azalma meydana gelmiştir. Bunun en önemli nedeni, uygulanan yükün temel rijitliğine bağlı olarak zeminde daha üniform bir gerilme meydana getirmesi gösterilebilir.



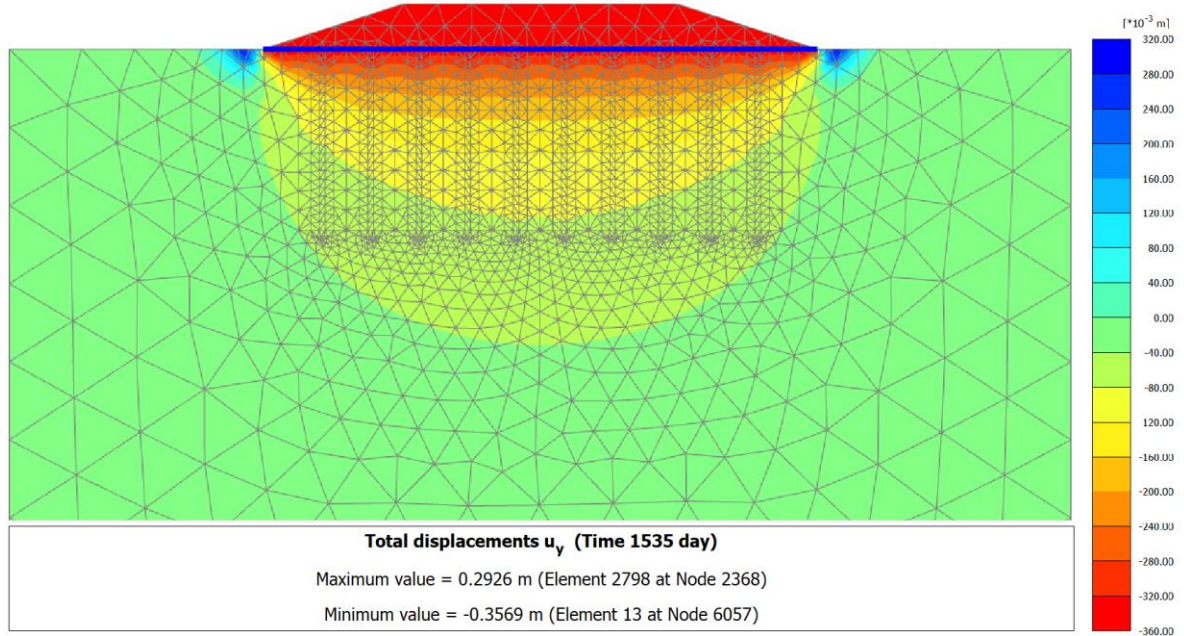
Şekil 4.39: $z=25,00$ m derinlik ve esnek temel altındaki zemin ve kolonlarda hesaplanan gerilmeler.



Şekil 4.40: $z=25,00$ m derinlik ve esnek temelli modelde deplasman profili.



Şekil 4.41: $z=25,00$ m derinlik ve rijit temel altındaki zemin ve kolonlarda hesaplanan gerilmeler.

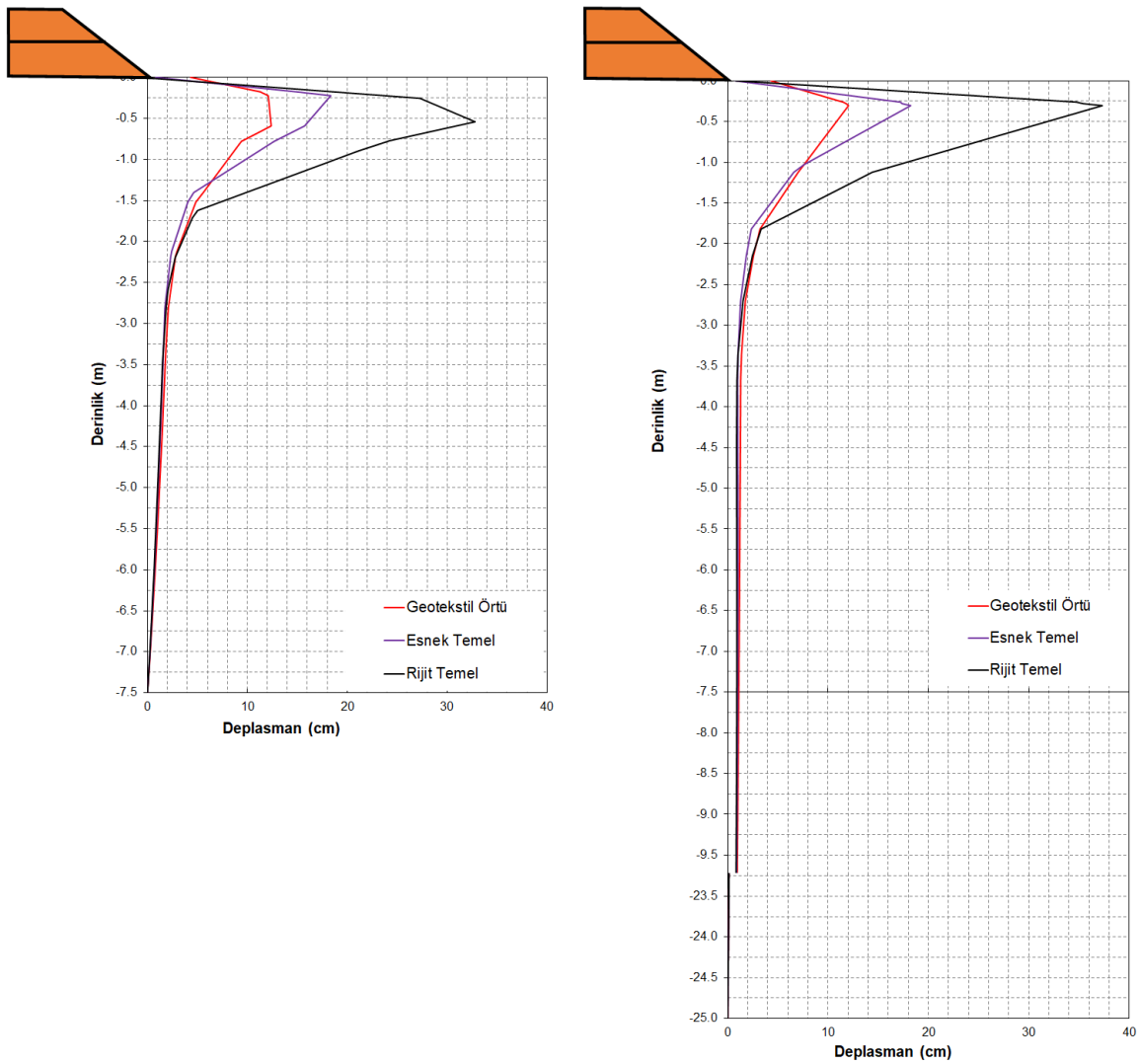


Şekil 4.42: $z=25,00$ m derinlik ve rijit temelli modelde deplasman profili.

Yapılan analizler sonucunda görülmektedir ki, dolgu yükünün zemine aktarımı temel rijitliğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Esnek bir temele sahip modelde kenar kolonlar üzerinde daha az gerilmenin meydana geleceği ve gerilme değerlerinin orta kolonlara gidildikçe artacağı ve oturmalarında buna bağlı bir profile meydana geleceği (Şekil 4.39 ve 4.40), daha rijit bir temele sahip modelde ise her bir kolon üzerinde meydana gelen gerilme değerinin

yaklaşık olarak eşit dağılacağı ve temelde daha üniform bir oturmanın meydana geleceği (Şekil 4.41 ve 4.42) görülmektedir.

Her iki model derinliği içinde temelin rijitleşmesine bağlı olarak yatay deplasmanlarda artış meydana geldiği Şekil 4.43'te görülmektedir. $z=7,50$ m derinlik için maksimum yatay deplasmanlar, geotekstil örtü için 12,39 cm, esnek temel için 18,34 cm ve rijit temel için 32,80 cm elde edilmesine karşın $z=25,00$ m derinlikte maksimum yatay deplasmanlar, geotekstil örtü için 12,03 cm, esnek temel için 18,22 cm ve rijit temel için 37,30 cm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.43: Temel kenarında elde edilen yatay deplasmanlar, a) $z=7,5$ m, b) $z=25,0$ m.

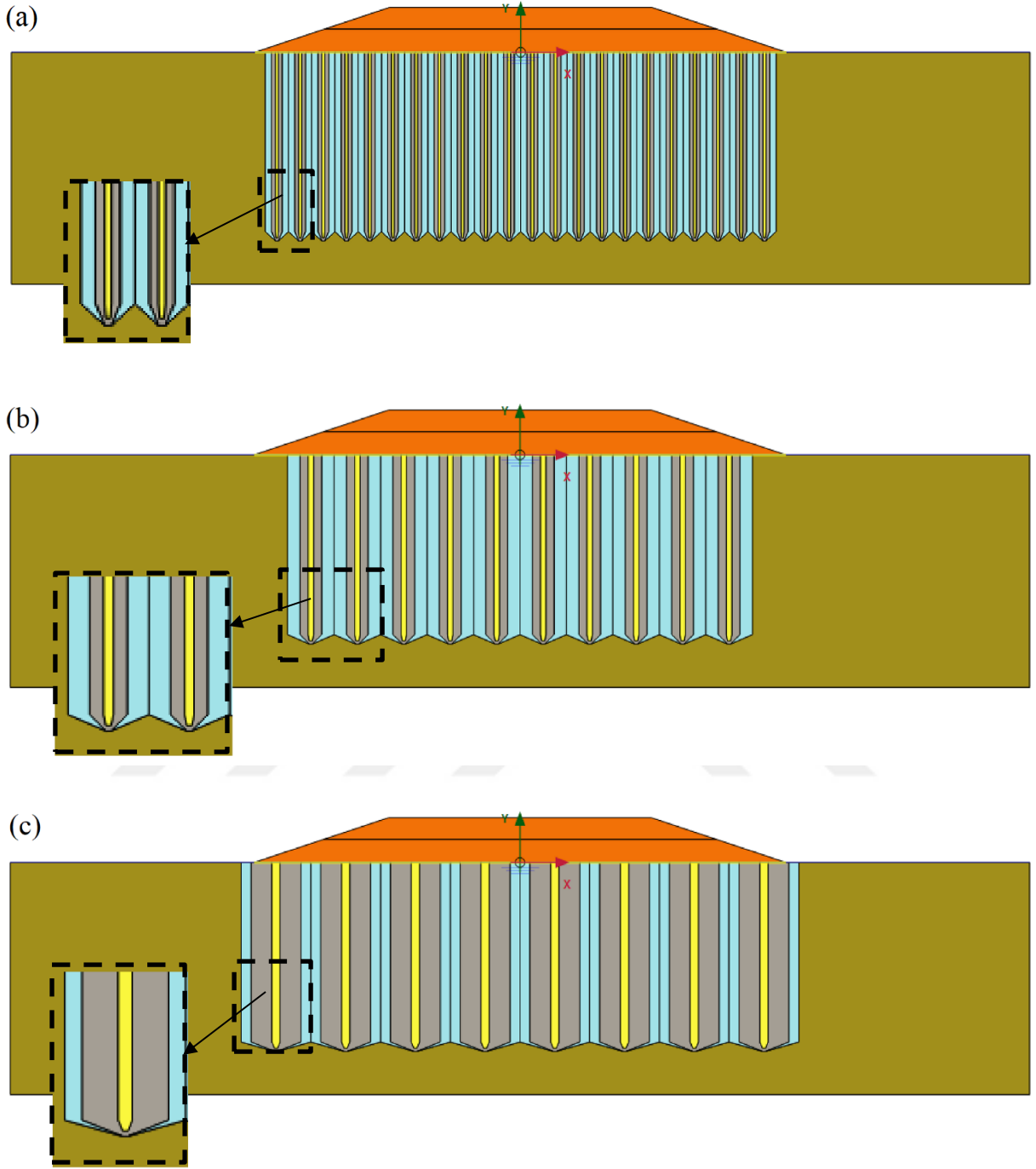
4.3 KOLON ÇAPI ETKİSİ

Merkezden merkeze mesafe değiştirilmeden kolon çapının artırılması yani alan oranının büyütülmesi sonucunda oturmalarda meydana gelecek azalma mertebesi birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ise alan oranı sabit iken kolon çapında yapılacak değişikliklerin, deplasman profili ile boşluk suyu basıncı sönümlenme hızına etkileri araştırılmıştır. Bunun için kolon çapları 30 cm, 60 cm ve 90 cm seçilmiş, kolonlar arası mesafeler birim hücre prensibine göre hesaplanmıştır. Kolon çapının 60 cm ve kolonlar arası mesafenin 1,55 olması durumunda alan oranı %12 olarak elde edilmektedir. 30 cm çapındaki kolonlarda merkezden merkeze mesafe 0,775 cm ve 90 cm çaplı kolonlar için ise 2,325 m olarak hesaplanmıştır. Örselenmiş alan çapları da aynı yöntem ile yeniden hesaplanmıştır. Buna göre 30 cm çapındaki kolon çevresinde bulunan 1 nolu örselenme bölgesinin çapı 60 cm, 2 nolu örselenme bölgesinin çapı 77,5 cm olarak belirlenmiştir. 90 cm'lik kolon için ise 1 nolu örselenme bölgesinin çapı 180 cm, 2 nolu örselenme bölgesinin çapı 235 cm olarak belirlenmiştir. Yapılan geometrik düzenlemeler sonucunda 3 boyutlu model geometrisinin düzlem deformasyon modele dönüşümleri Tablo 4.1'de, 7,5 m derinlik için oluşturulan modellere ait görseller ise Şekil 4.44'te verilmektedir.

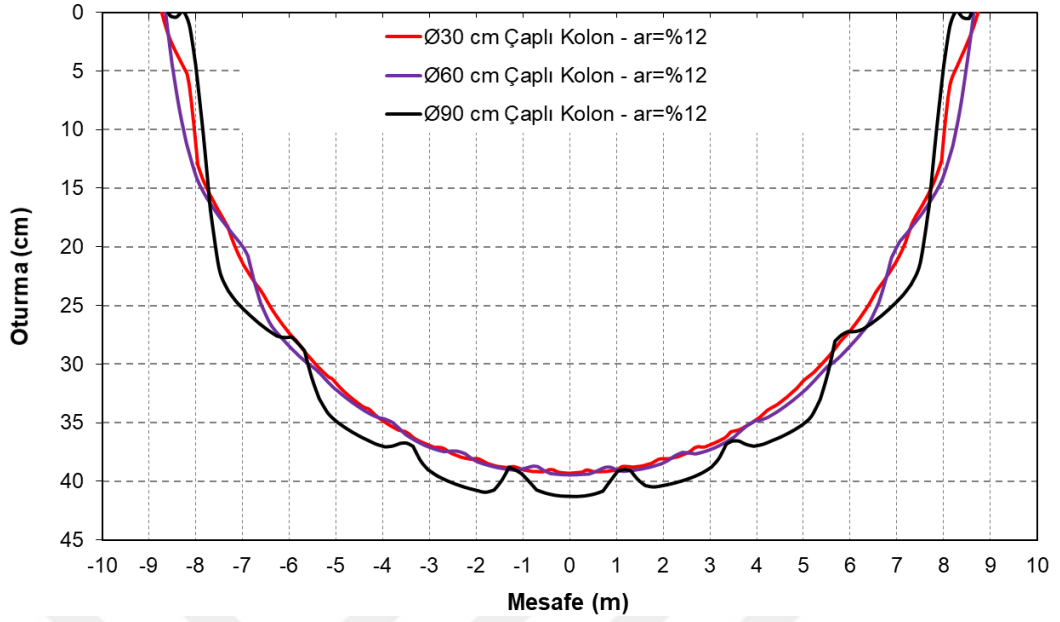
Tablo 4.1: 3 boyutlu model geometrilerinin düzlem deformasyon modele dönüşümü.

Ø30 cm		Ø60 cm		Ø90 cm	
3D Model	Düzlem Def. Model	3D Model	Düzlem Def. Model	3D Model	Düzlem Def. Model
$r_c = 0.150 \text{ m}$	$b_c = 0.046 \text{ m}$	$r_c = 0.300 \text{ m}$	$b_c = 0.091 \text{ m}$	$r_c = 0.450 \text{ m}$	$b_c = 0.137 \text{ m}$
$r_{sm1} = 0.300 \text{ m}$	$b_{sm1} = 0.182 \text{ m}$	$r_{sm1} = 0.600 \text{ m}$	$b_{sm1} = 0.365 \text{ m}$	$r_{sm1} = 0.900 \text{ m}$	$b_{sm1} = 0.697 \text{ m}$
$r_{sm2} = 0.388 \text{ m}$	$b_{sm2} = 0.388 \text{ m}$	$r_{sm2} = 0.775 \text{ m}$	$b_{sm2} = 0.775 \text{ m}$	$r_{sm2} = 1.163 \text{ m}$	$b_{sm2} = 1.163 \text{ m}$
$B = 0.388 \text{ m}$	$B = 0.388 \text{ m}$	$B = 0.775 \text{ m}$	$B = 0.775 \text{ m}$	$B = 1.163 \text{ m}$	$B = 1.163 \text{ m}$
$2B = 0.775 \text{ m}$	$2B = 0.775 \text{ m}$	$2B = 1.550 \text{ m}$	$2B = 1.550 \text{ m}$	$2B = 2.325 \text{ m}$	$2B = 2.325 \text{ m}$
$A_c = 0.071 \text{ m}^2$	$A_{c(pl)} = 0.071 \text{ m}^2$	$A_c = 0.283 \text{ m}^2$	$A_{c(pl)} = 0.283 \text{ m}^2$	$A_c = 0.636 \text{ m}^2$	$A_{c(pl)} = 0.636 \text{ m}^2$
$A_{sm1} = 0.283 \text{ m}^2$	$A_{sm1(pl)} = 0.283 \text{ m}^2$	$A_{sm1} = 1.131 \text{ m}^2$	$A_{sm1(pl)} = 1.131 \text{ m}^2$	$A_{sm1} = 2.545 \text{ m}^2$	$A_{sm1(pl)} = 3.240 \text{ m}^2$
$A_{sm2} = 0.472 \text{ m}^2$	$A_{sm2(pl)} = 0.601 \text{ m}^2$	$A_{sm2} = 1.886 \text{ m}^2$	$A_{sm2(pl)} = 2.403 \text{ m}^2$	$A_{sm2} = 4.246 \text{ m}^2$	$A_{sm2(pl)} = 5.406 \text{ m}^2$
$A = 0.601 \text{ m}^2$	$A_{(pl)} = 0.601 \text{ m}^2$	$A = 2.403 \text{ m}^2$	$A_{(pl)} = 2.403 \text{ m}^2$	$A = 5.406 \text{ m}^2$	$A_{(pl)} = 5.406 \text{ m}^2$
$a_r(ax) = 12\%$	$a_r(pl) = 12\%$	$a_r(ax) = 12\%$	$a_r(pl) = 12\%$	$a_r(ax) = 12\%$	$a_r(pl) = 12\%$

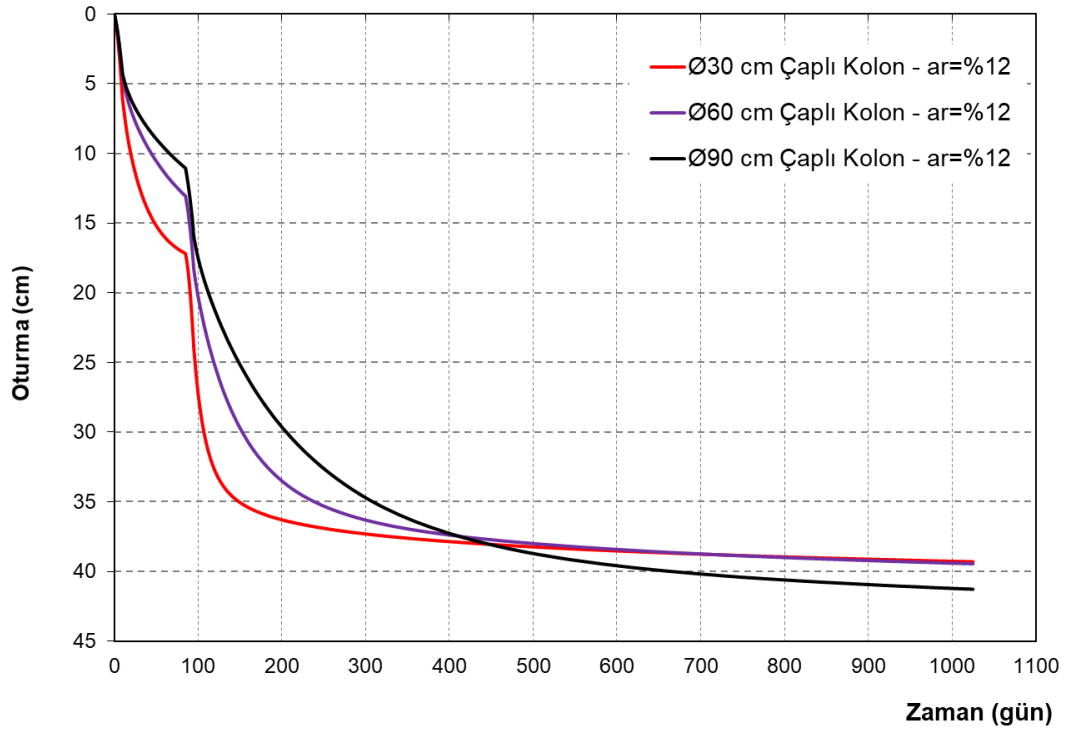
Zemin, örselenme bölgeleri ve kolon parametreleri referans model ile aynı seçilmiştir. Yapılacak dolgu altında geotekstil örtü kullanılmıştır. Analizler hem 7,5 m hem de 25,0 m model derinlikler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece sıkışabilir tabaka kalınlığının etkisi de incelenmiştir. Yapılan analizlerde geotekstil örtü birimde meydana gelen oturmalar ile zamana bağlı oturmaların yanı sıra 2,50 m ve 6,00 m derinlikler için boşluk suyu basınçlarının değişimleri de incelenmiştir.



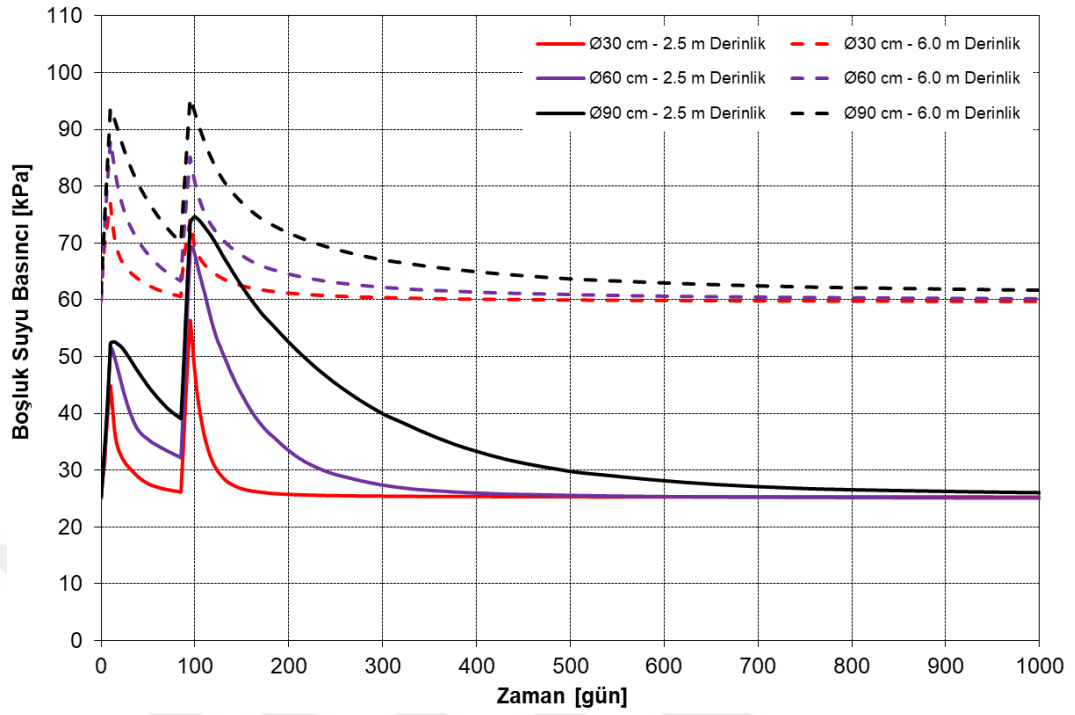
Şekil 4.44: Farklı çaplı kolonlar için hazırlanan analiz modelleri, a- $r_c=30$ cm ($b_c=9,2$ cm), b- $r_c=60$ cm ($b_c=18,2$ cm), c- $r_c=90$ cm ($b_c=27,4$ cm).



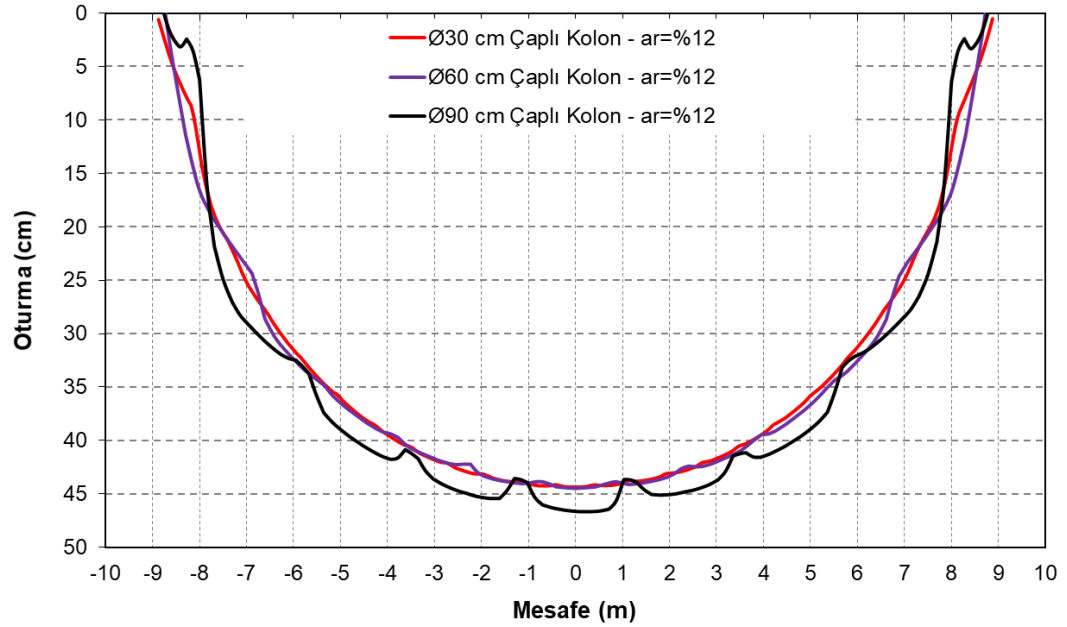
Şekil 4.45: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temele ait oturma profili.



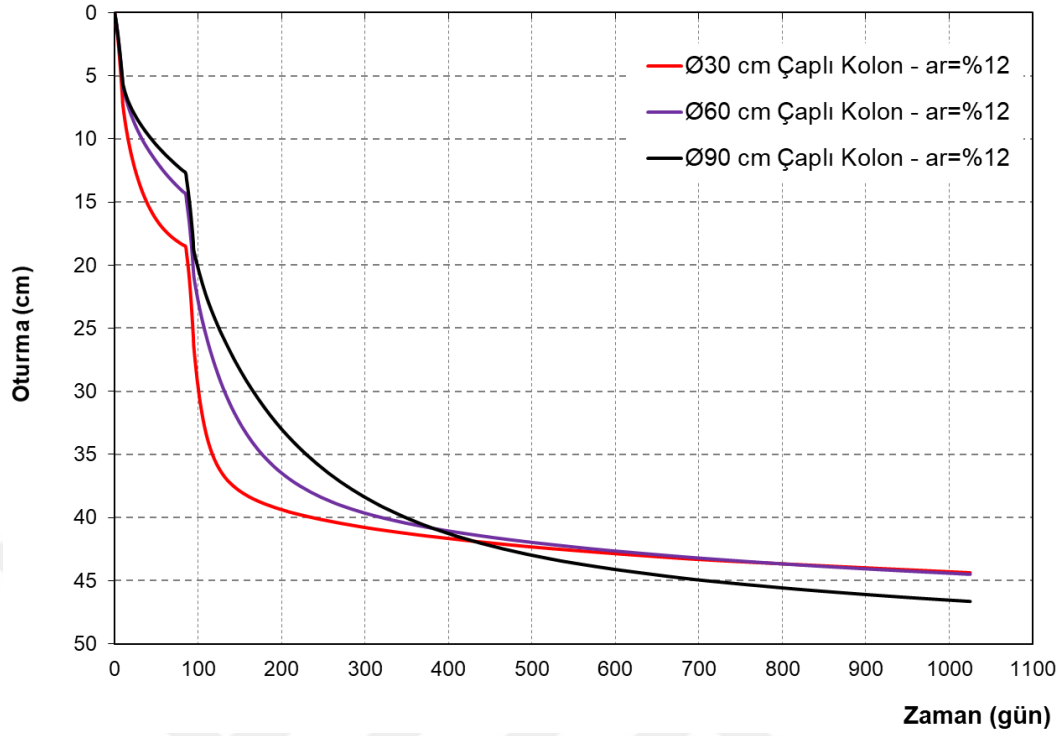
Şekil 4.46: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temele ait zamana bağlı oturma.



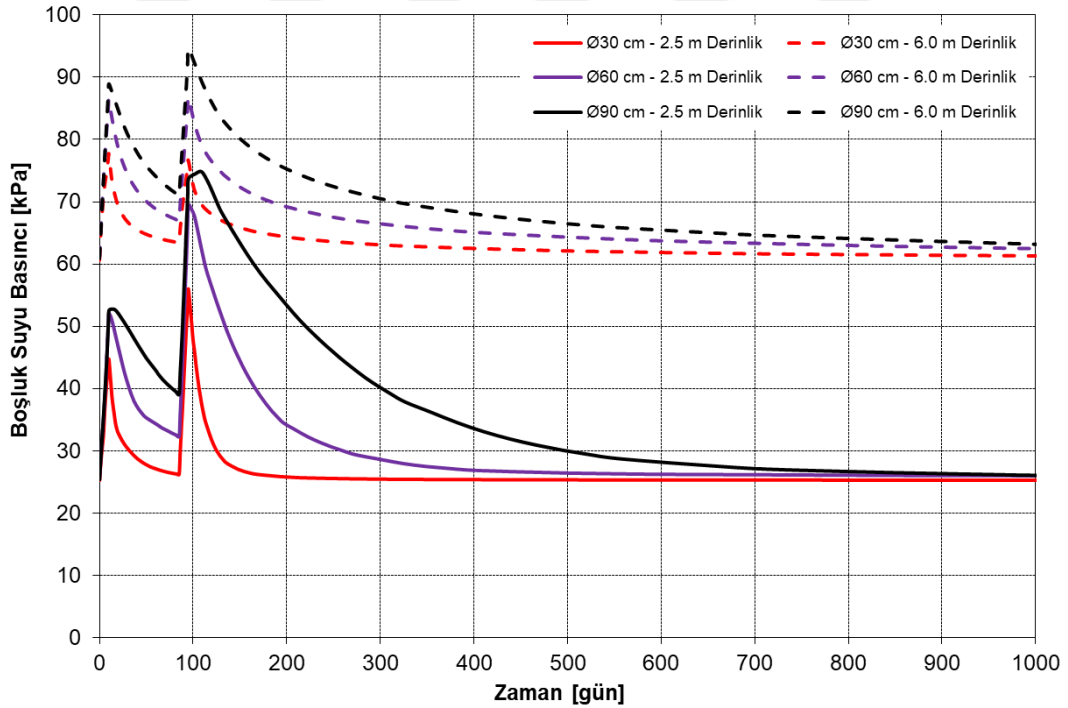
Şekil 4.47: $z=7,50$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için boşlu suyu basıncı değerleri.



Şekil 4.48: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temele ait oturma profili.



Şekil 4.49: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için geotekstil temele ait zamana bağlı oturma.



Şekil 4.50: $z=25,00$ m, $a_r=\%12$ ve farklı çapta kolonlar için boşluk suyu basıncı değerleri.

Yapılan analizler sonucunda geotekstil örtü elemanda elde edilen oturma profilleri kolon çaplarına bağlı ufak değişikliklere rağmen yaklaşık aynı mertebelerde elde edilmiştir. 7,50 m zemin derinliğine sahip modelde maksimum oturmalar, 30 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş

geotekstil örtü ortasında 39,31 cm, 60 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş geotekstil örtü ortasında 39,45 cm ve 90 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş geotekstil örtü ortasında 41,28 cm olarak hesaplanmıştır. 25,00 m zemin derinliğine sahip modelde maksimum oturmalar, 30 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş geotekstil örtü ortasında 44,37 cm, 60 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş geotekstil örtü ortasında 44,49 cm ve 90 cm çaplı kolonlar ile iyileştirilmiş geotekstil örtü ortasında 46,67 cm olarak hesaplanmıştır. 90 cm çaplı kolonlarda gözlenen oturma artışlarının sebebi olarak, kolon lokasyonlarının, dolgunun orta bölgesinden uzaklaşması gösterilebilir. Şekil 4.45 ve Şekil 4.48’de sunulan geotekstil örtü altındaki oturma profilleri incelendiğinde, kolonların bulunduğu bölgelerde oturmaların diğer çaplar için elde edilen değerlere eşit olduğu, kolonlar arasında kalan bölgelerde ise farkların meydana geldiği yapılan öngörüü desteklemektedir.

Analiz sonuçları incelendiğinde esas farklılığın boşluk suyu basıncı sönümlenme hızlarında meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.47 ile Şekil 4.50 incelendiğinde kolon çapının küçülmesi ile boşluk suyu basıncı sönümlenme hızlarında artış meydana geldiği ve buna bağlı olarak nihai durumda yaklaşık aynı mertebelerde elde edilen oturmaların daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.46 ve Şekil 4.49). Sahada yapılacak imalatlarda, oturmaların daha hızlı gerçekleşmesi istenildiği takdirde aynı alan oranına sahip daha küçük çaplı kolonların kullanılması uygun olacaktır.

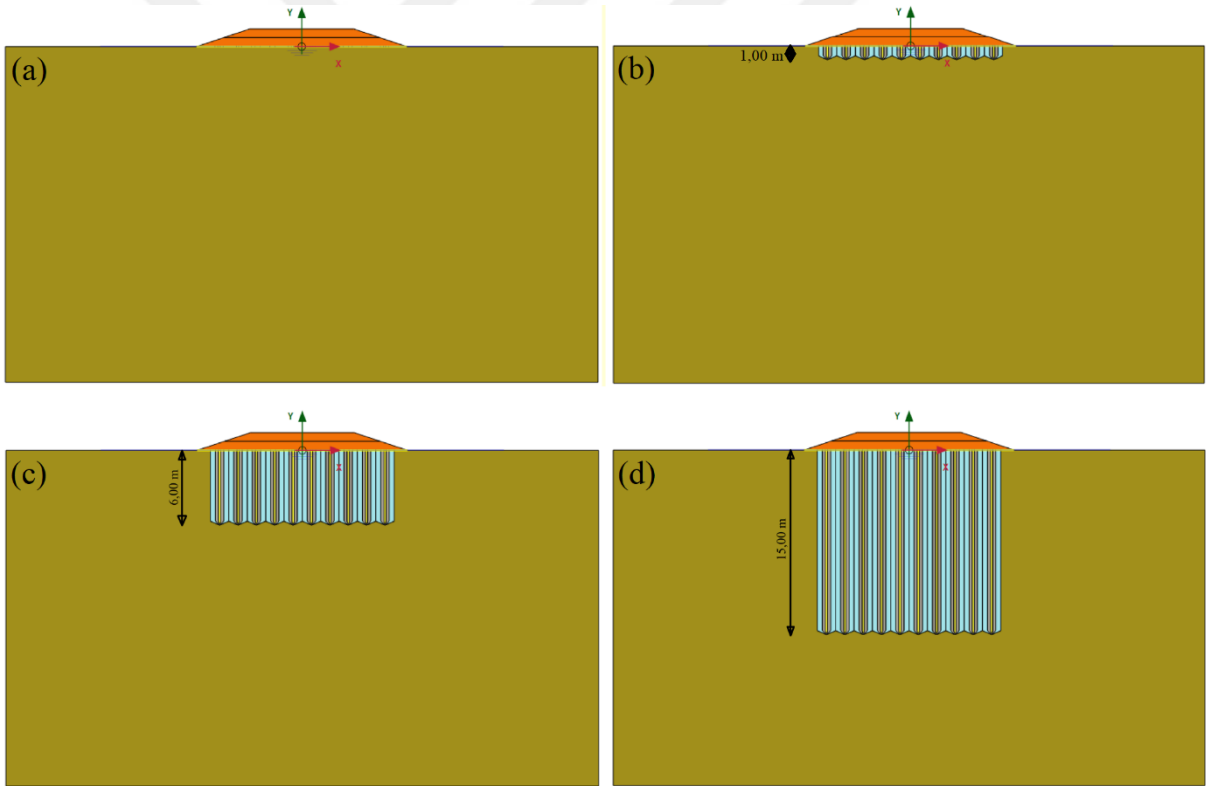
4.4 KOLON BOYU ETKİSİ

Kolon boyunun oturmalar üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için farklı kolon boyları modellenerek analizler yapılmıştır. Referans değerlerin elde edilebilmesi için ilk olarak herhangi bir iyileştirme yapılmamış (ıslahsız) durum modellenerek analiz yapılmıştır. Daha sonra kolon boyları 1,0’er metre arttırılarak toplam 15,0 m’ye kadar farklı boyda kolonlar modellenerek seri analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde kolon çapının $D=60$ cm ve kolon aralığının $s=1,55$ m olması durumuna tekabül eden %12 alan yerdeğiştirme oranı kullanılmıştır. İlave yüklemelerin oluşmaması için rijit temel ağırlıksız olarak modellenmiştir. Temele ait eksenel rijitlik ve eğilme rijitliği ise temeli oluşturan malzemenin elastisite modülü 30 GPa alınarak modellenmiştir. Zemin, örselenme bölgeleri ve kolon parametreleri referans model ile aynı seçilmiştir. Her bir dolgu kademesinden sonra oluşan ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ($\Delta u_{ilave} < 1,0$ kPa) için yükleme aşamalarını takiben konsolidasyon aşamaları tanımlanmıştır.

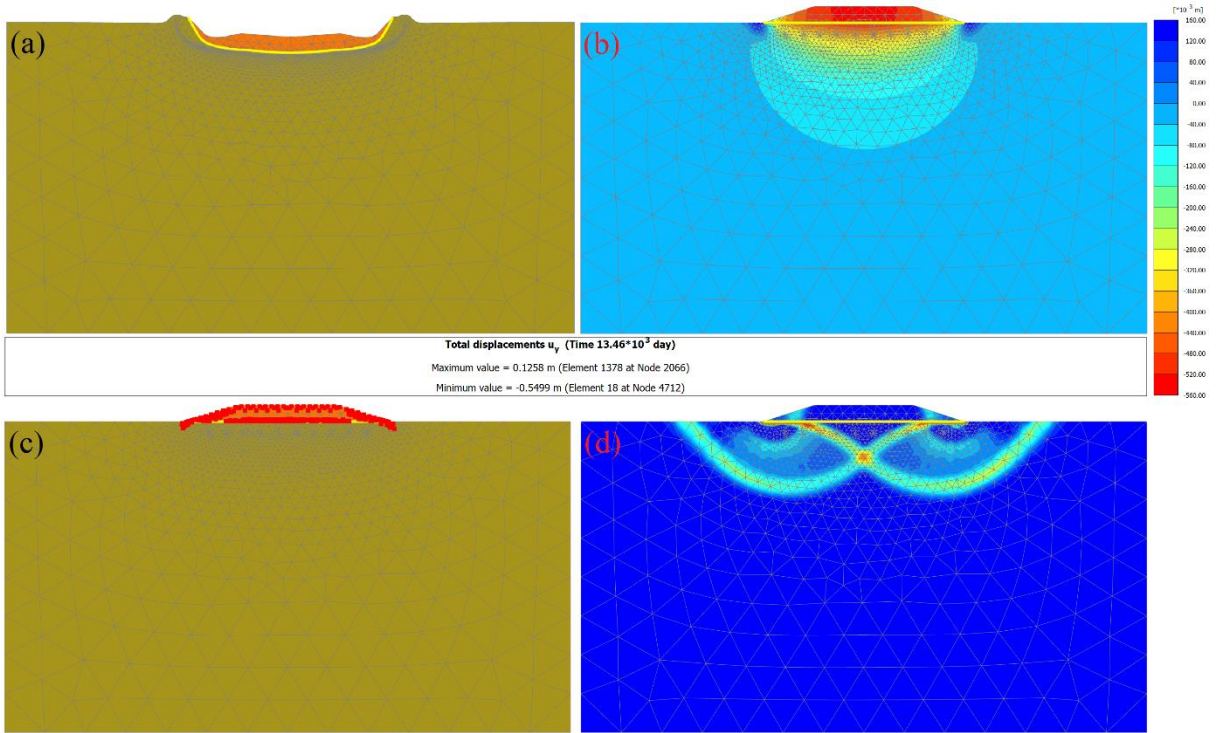
Kolon boylarının farklı temel sistemlerindeki etkilerinin incelenmesi için dolgu altında elastik bir geotekstil örtü ile rijit ($t=100$ cm) bir temel modellenmiştir. Yapılan analizlerde temellerde meydana gelecek oturma profillerinin yanı sıra 6,00 m derinlik için ilave boşluk suyu basınçlarının değişimleri de incelenmiştir. Aynı zamanda ikinci konsolidasyon aşamasından (oturmaların tamamlandığı) sonra tanımlanan güvenlik aşaması ile dolgu altında meydana gelecek kayma yüzeylerinin tayini yapılmıştır.

4.4.1 Geotekstil Temel

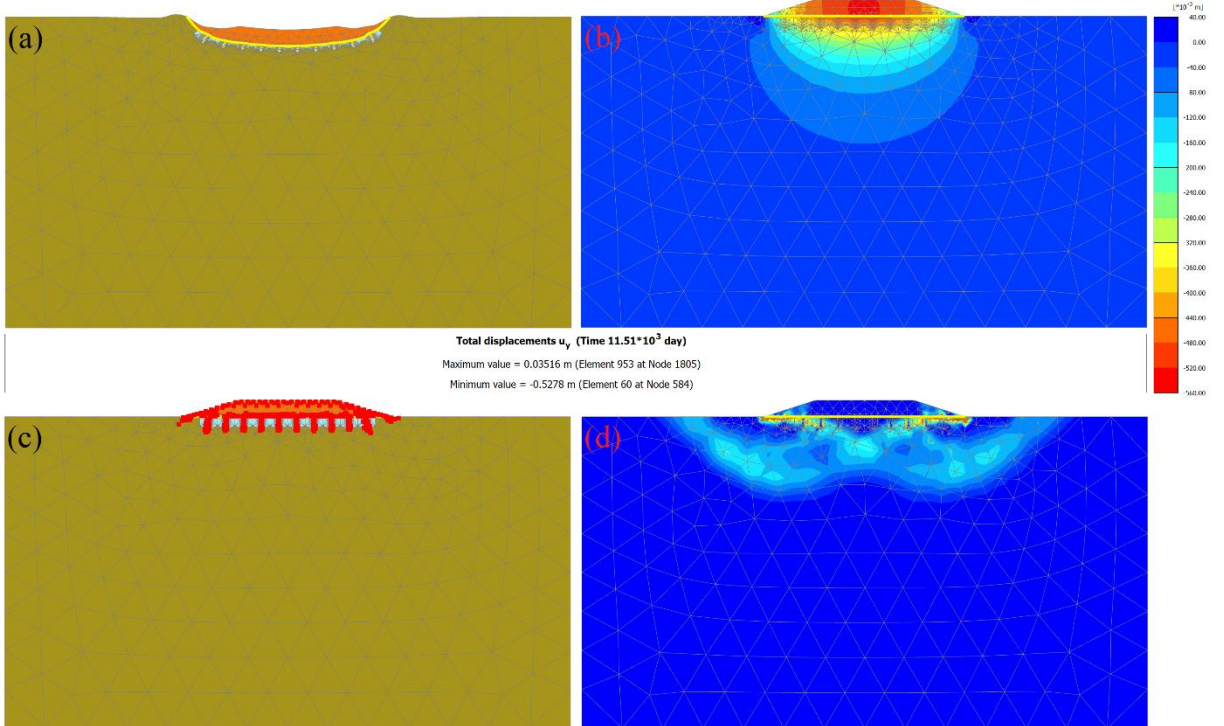
Geotekstil örtü ile oluşturulan kolonsuz durum, 1,00 m, 6,00 m ve 15,00 m boyunda kolonlar için hazırlanan analiz modelleri Şekil 4.51’de verilmiştir. Aynı modellere ait sonuç görselleri sırasıyla Şekil 4.52 ile Şekil 4.55 arasında verilmektedir.



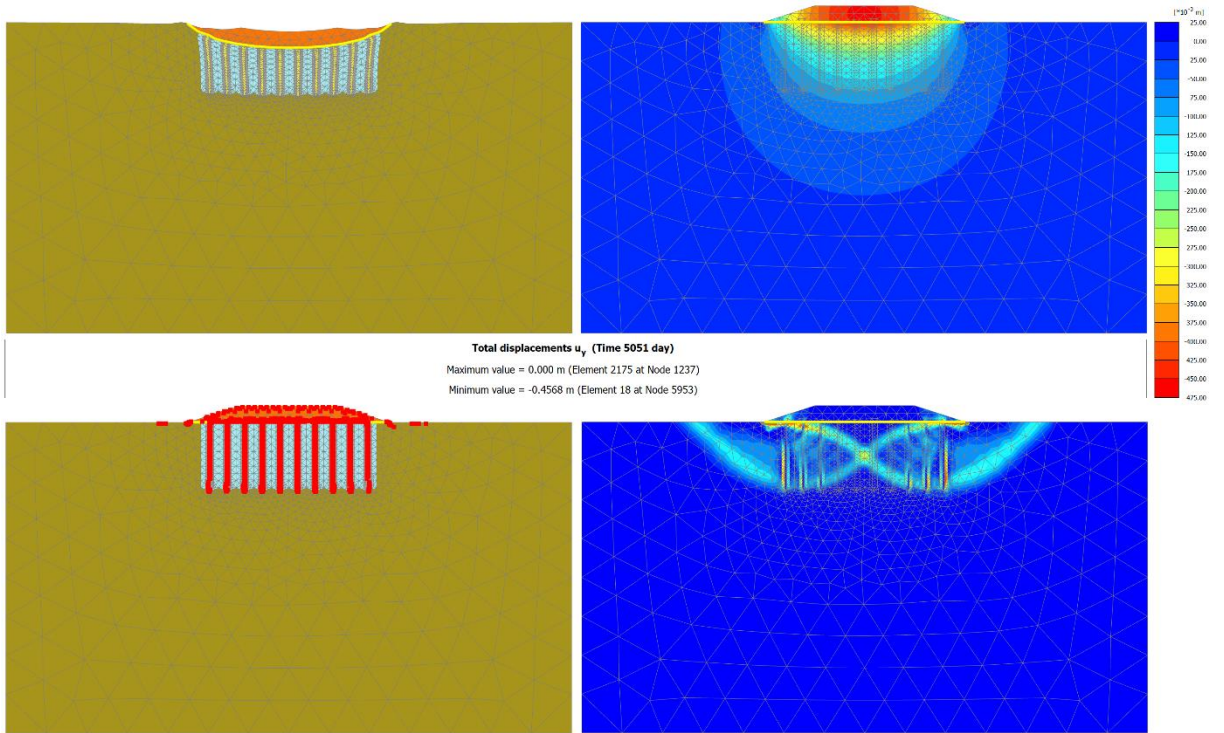
Şekil 4.51: $z=25,0$ m, $a_r=\%12$ için hazırlanan analiz modelleri, a-ıslahsız durum, b-kolon boyu=1,00 m, c-kolon boyu=6,00 m, d-kolon boyu=15,00 m.



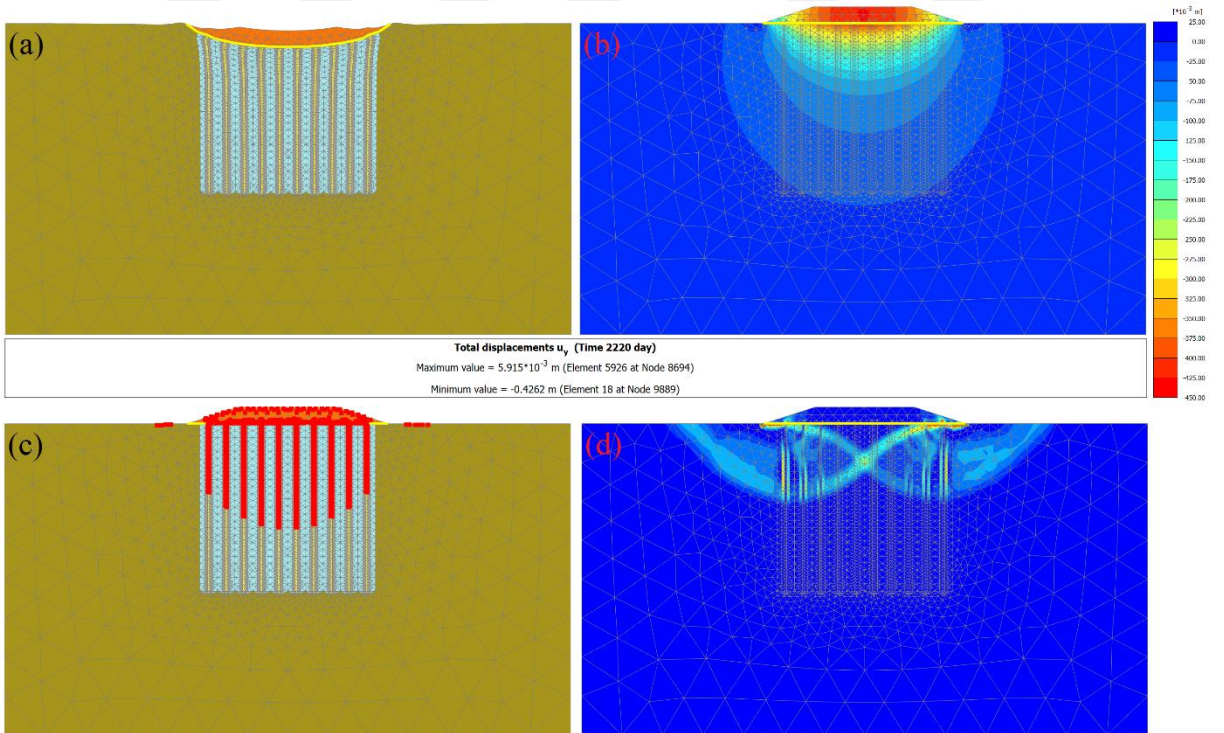
Şekil 4.52: $z=25,00$ m ve kolonsuz durum için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düsey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



Şekil 4.53: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düsey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



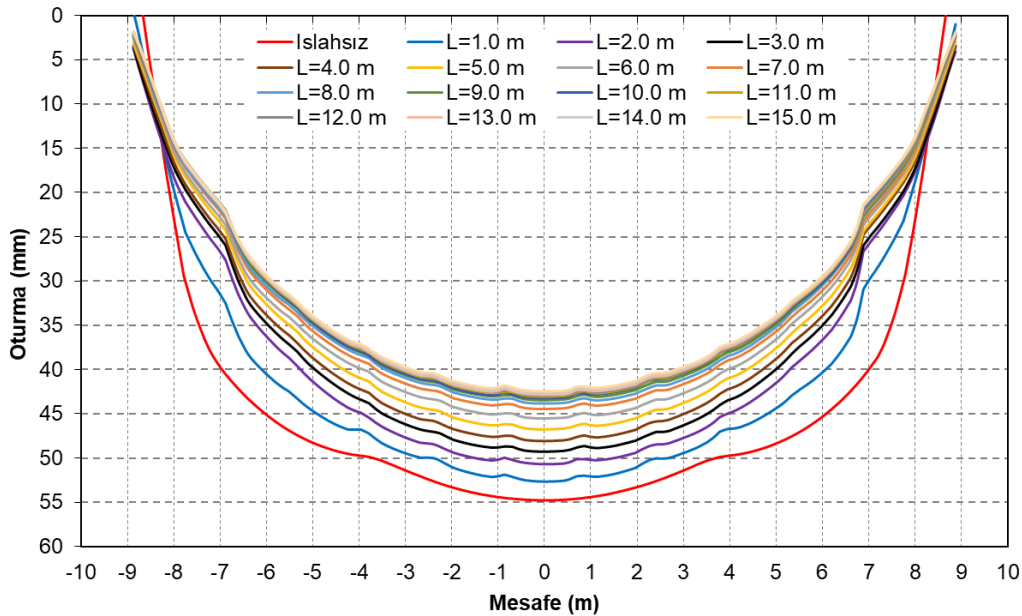
Şekil 4.54: $z=25,00$ m ve $6,00$ m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



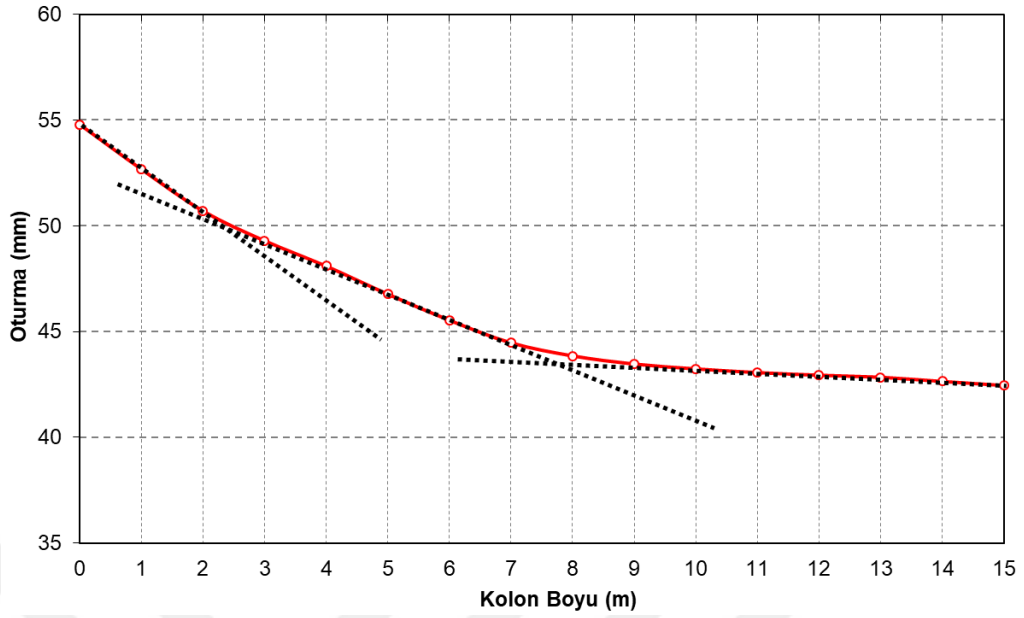
Şekil 4.55: $z=25,00$ m ve $15,00$ m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.

Kolonsuz durumdan 15,00 m boyundaki kolonlara kadar her 1,0 m için yapılan seri analiz sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.56 ile 4.60 arasında verilmiştir. Bu grafiklerde kolon boyunun değişimine bağlı oturma profilleri, iyileştirme oranları, ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı ile yatay deplasmanlar yer almaktadır.

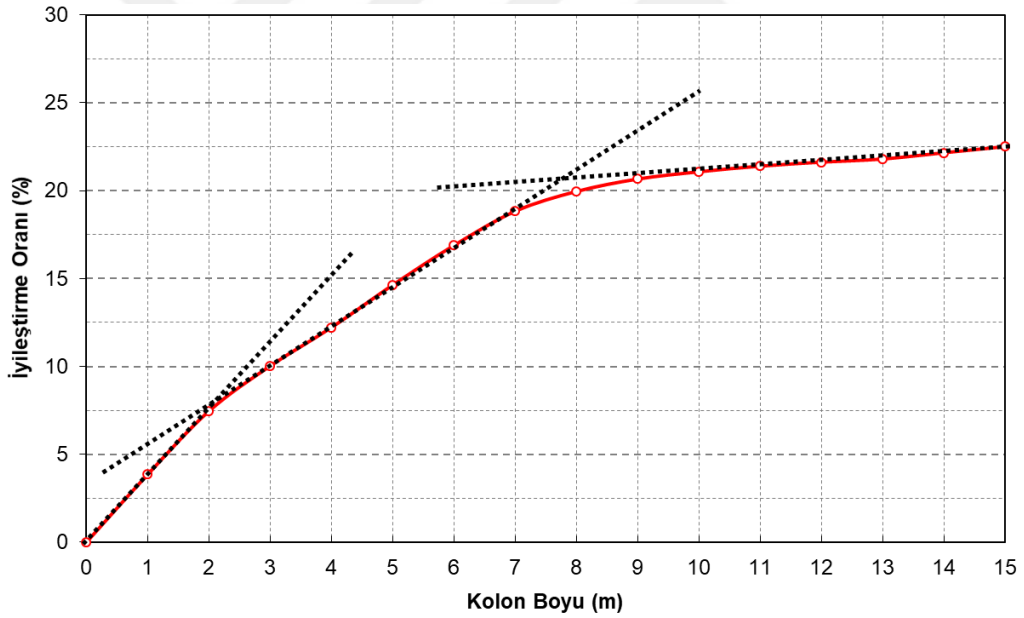
Şekil 4.56 ile Şekil 4.58 arasında kolon boyuna bağlı oturma değerlerinde meydana gelen değişim yer almaktadır. Yapılan analizlere göre ıslahsız durumda geotekstil örtü tabakası altında 54,78 cm'lik oturma hesaplanırken kolon boyunun artmasına bağlı olarak deplasman değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen azalma miktarları kolonsuz durum değerleri referans alındığında 15,00 m boyundaki kolon için %22,5 mertebesindedir. Ancak iyileştirme oranının kolon boyundaki değişimle doğru orantılı olmadığı ve 3 farklı eğime sahip olduğu Şekil 4.57 ve 4.58'de sunulan grafiklerde görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 2,00 metreye kadar olan kolon boyları için her 1,0 metre boyundaki kolon için iyileştirme oranı %3,73 mertebesinde hesaplanırken oturmalar 54,78 cm'den 50,70 cm'ye düşmüştür. 2,00 ile 7,00 metreye kadar olan kolon boyları için her 1,0 metre boyundaki kolon için %2,45 mertebesinde elde edilirken oturma değerleri 50,70 cm 'den 44,47 cm'ye düşmüştür. 7,00 metreden uzun kolonlar için ise kolon boyunun oturmaları önemli ölçüde değiştirmediği ve her 1,0 metre boyundaki kolon için iyileştirme oranının %0,46 mertebesinde kalarak oturma değerlerini 43,85 cm'den 42,45 cm'ye düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4.56: Kolon boyuna bağlı geotekstil örtüde elde edilen oturma profilleri.



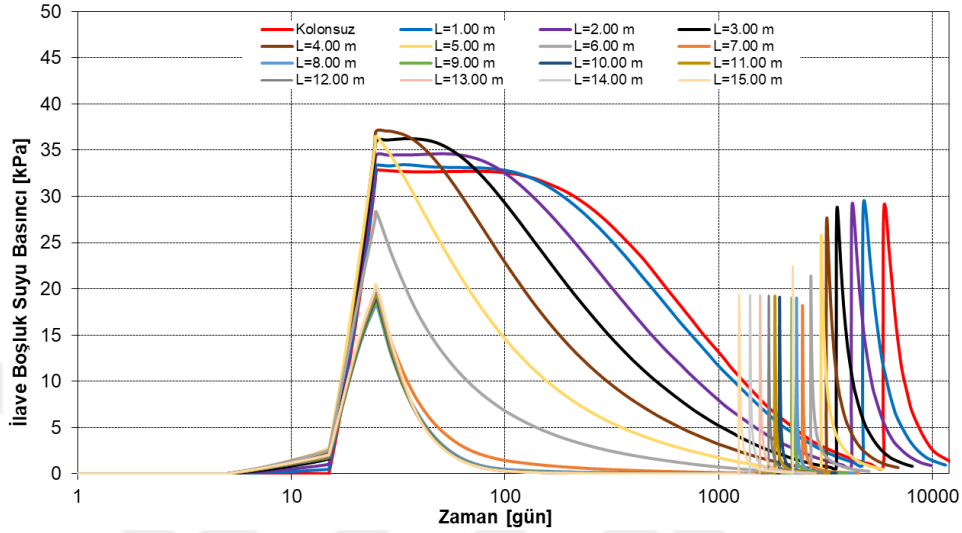
Şekil 4.57: Kolon boyuna bağlı geotekstil örtüde hesaplanan oturma değerleri.



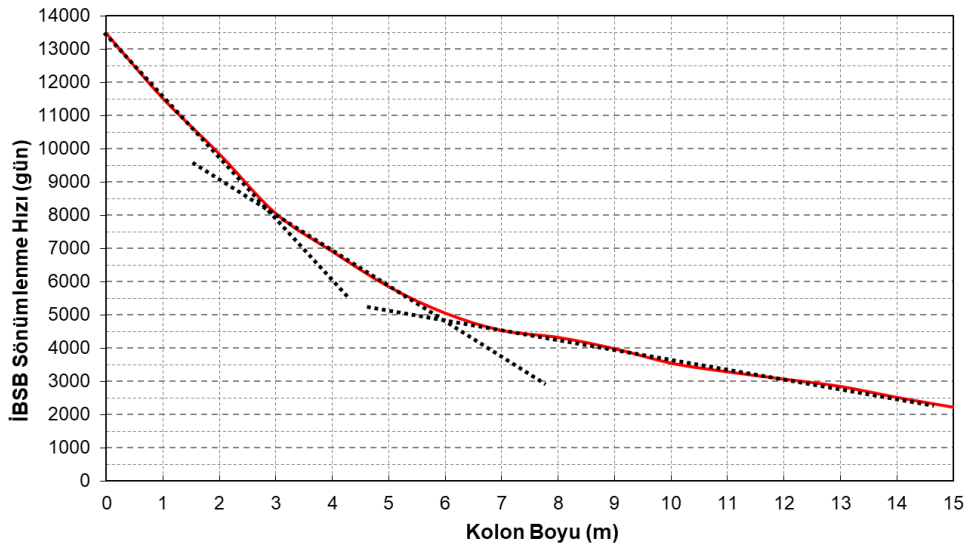
Şekil 4.58: Kolon boyuna bağlı oturmalarda meydana gelen iyileştirme oranı.

6,00 m derinlikte tanımlanan ilave boşluk suyu basıncı ölçüm noktasından alınan veriler Şekil 4.59'da yer almaktadır. Elde edilen grafik incelendiğinde ilk yükleme ve akabinde tanımlanan konsolidasyon aşamaları için kolonsuz durumdan 7,00 m'ye kadar olan uzunluklarda ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızının arttığı, sonrasında ise neredeyse değişmediği söylenebilir. Ancak ikinci dolgu kademesinin aktif edilmesi ve sonrasında tanımlanan konsolidasyon aşamaları için ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı her kolon boyu için değişkenlik göstermiştir. Şekil 4.60'ta verilen kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı

sönümlenme hızı grafiği oturma grafiğine benzer eğrilere sahiptir. Buna göre 3,00 m'den kısa kolonlarda her 1 metre boyundaki kolon için sönümlenme oranı %13,5 iken 3,00 metre ile 6,00 m arasında bu oran %10,9'a ve 6,00 m'den uzun kolonlar için ise %6,2'ye düşmektedir.



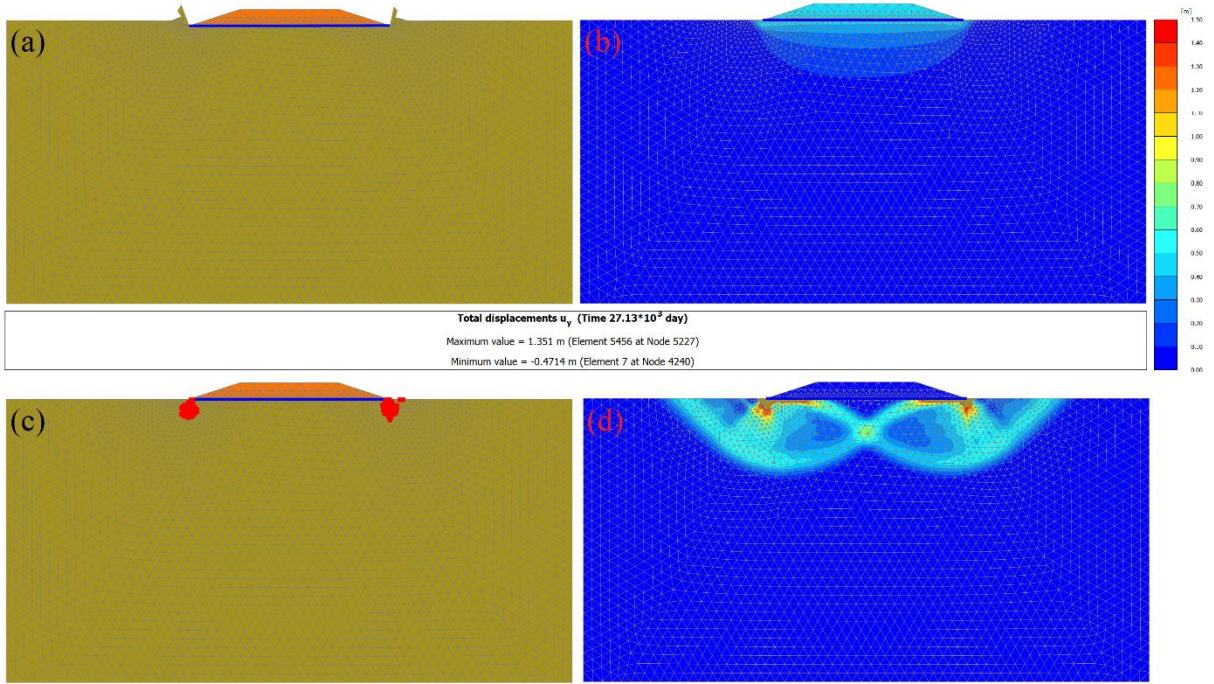
Şekil 4.59: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı grafiği



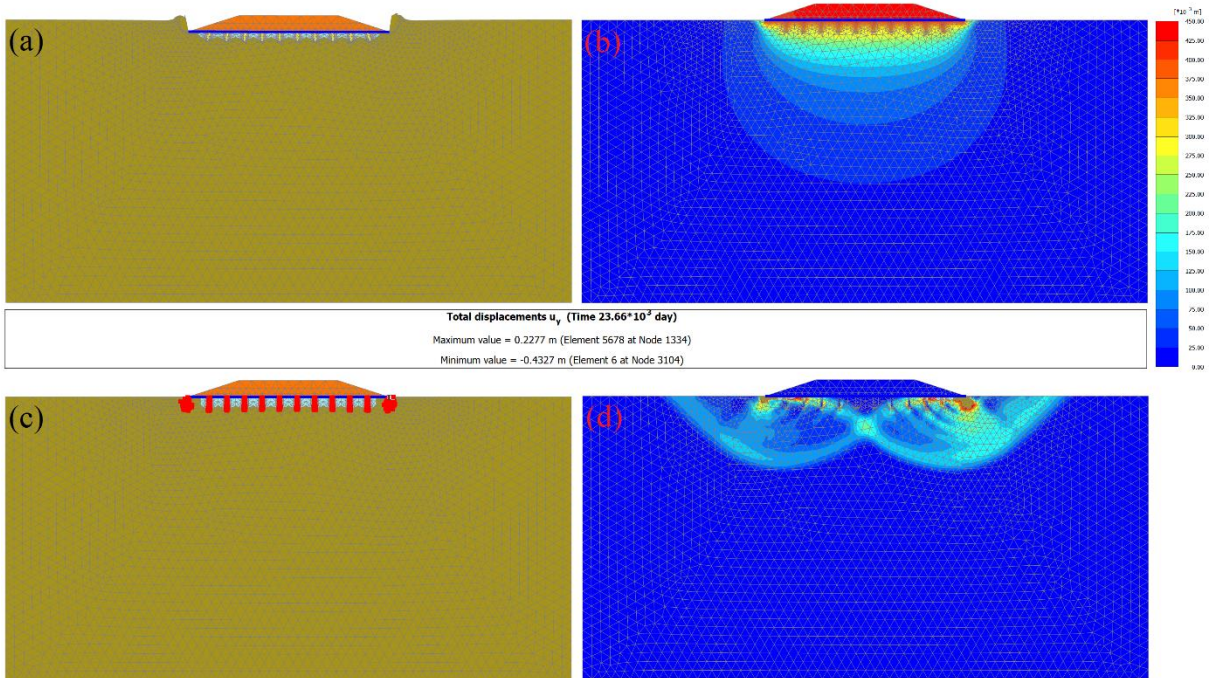
Şekil 4.60: Kolon boyuna bağlı ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı.

4.4.2 Rijit Temel

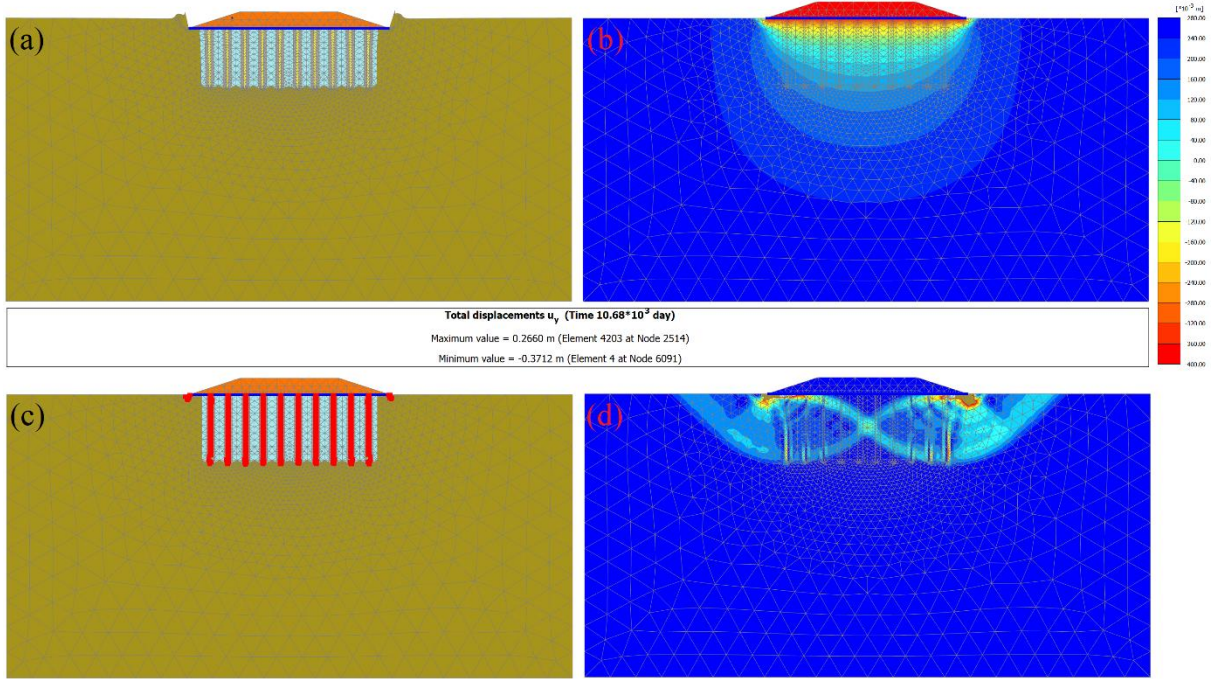
100 cm kalınlığında rijit temel ile oluşturulan analiz modelleri geotekstil modelin benzeri görsellere sahiptir. Kolonsuz durum, 1,00 m, 6,00 m ve 15,00 m boyunda kolonlar için yapılan analizlere ait sonuç görselleri sırasıyla Şekil 4.61 ile Şekil 4.64 arasında verilmektedir.



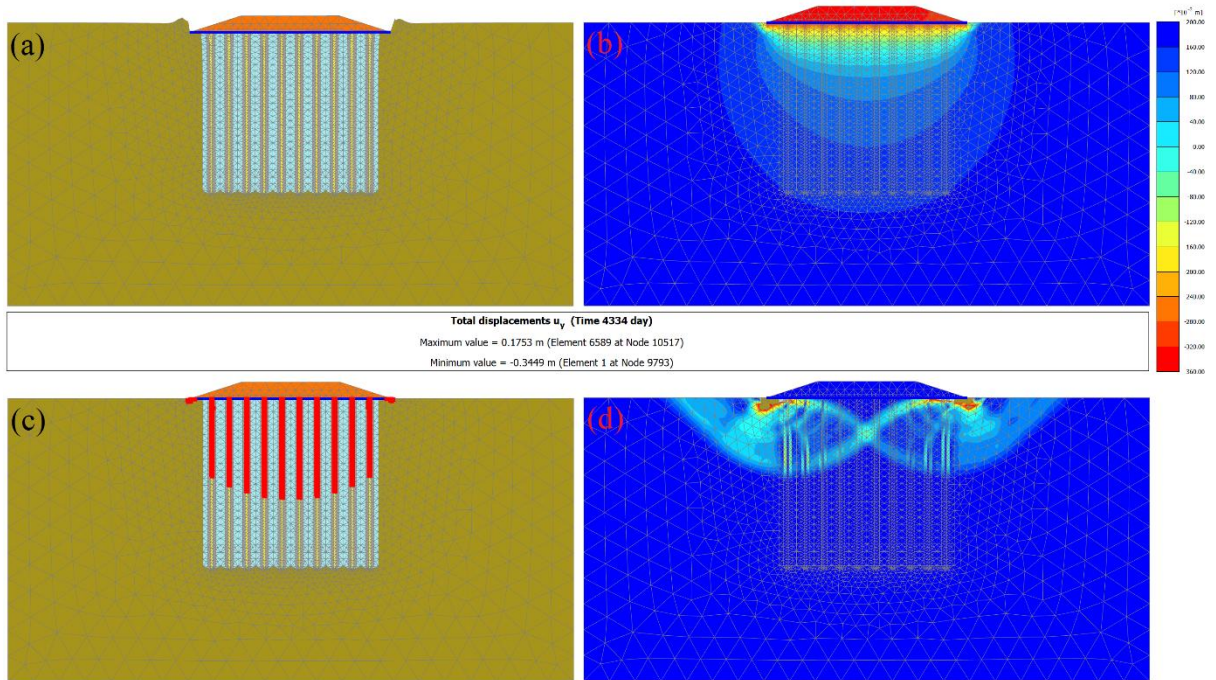
Şekil 4.61: $z=25,00$ m ve kolonsuz durum için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düsey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



Şekil 4.62: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düsey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



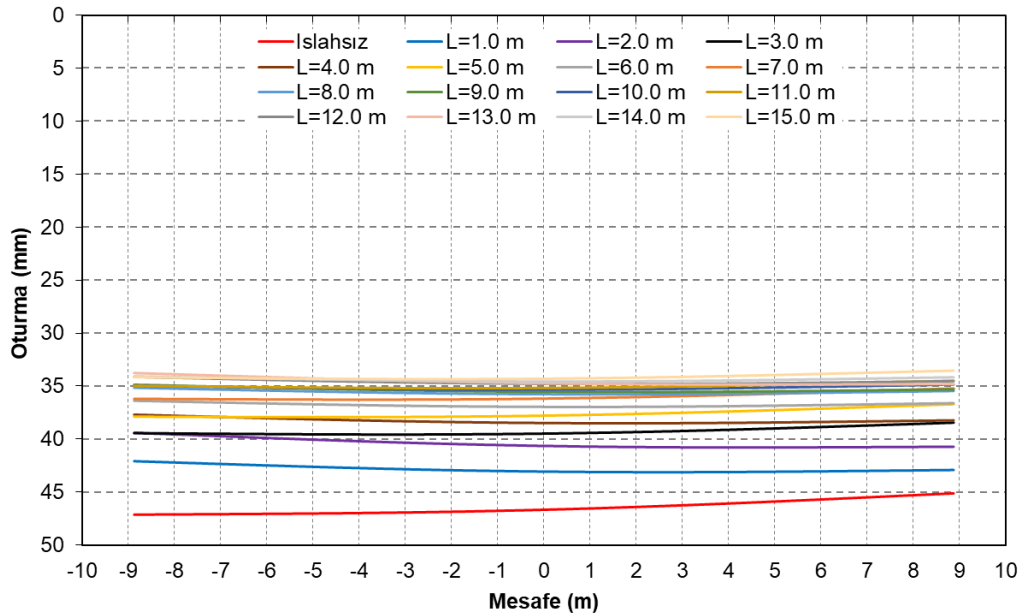
Şekil 4.63: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.



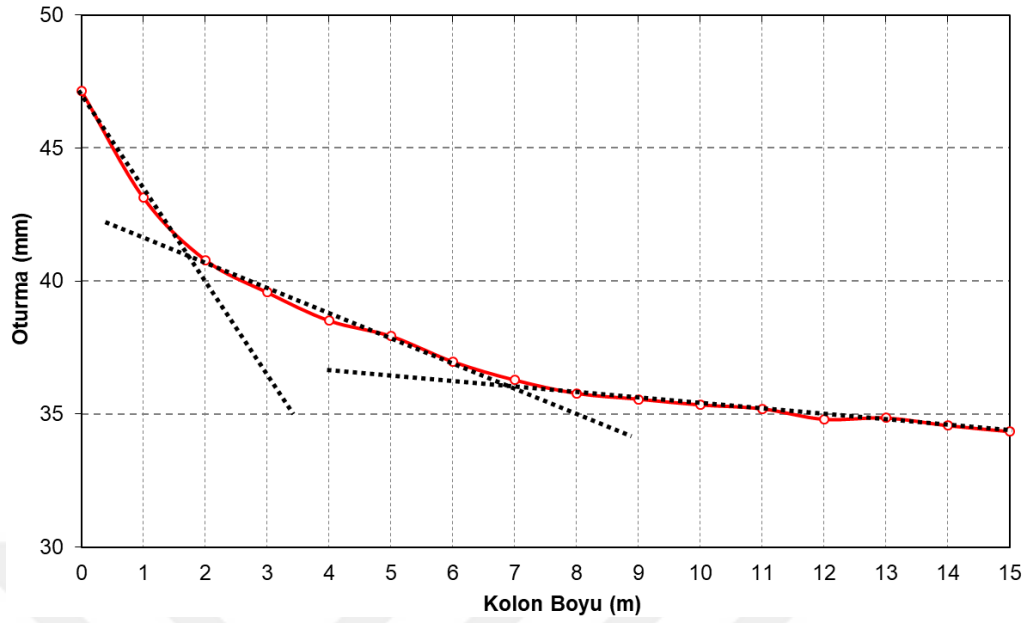
Şekil 4.64: $z=25,00$ m ve 1,00 m boylu kolonlar için analiz görselleri, a-deplasman profili, b-düşey deplasmanlar, c-plastik noktalar, d-güvenlik analizi sonucu elde edilen kayma yüzeyleri.

Kolonsuz durumdan 15,00 m boyundaki kolonlara kadar her 1,0 m için yapılan seri analiz sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.65 ile 4.69 arasında verilmiştir. Bu grafiklerde kolon boyunun değişimine bağlı oturma profilleri, iyileştirme oranları, ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı ile yatay deplasmanlar yer almaktadır.

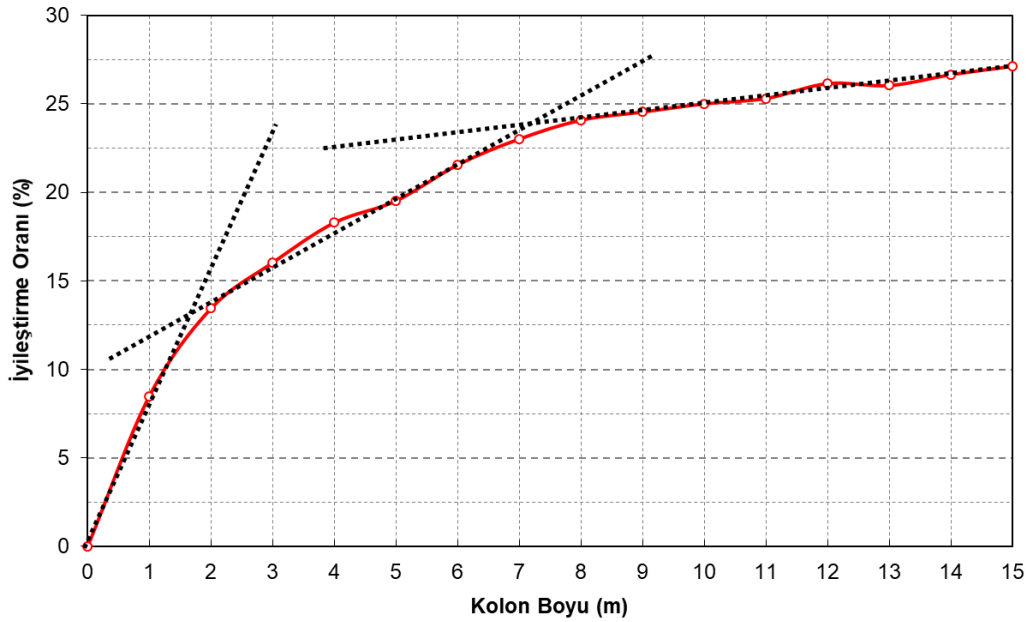
Şekil 4.65 ile Şekil 4.67 arasında kolon boyuna bağlı oturma değerlerinde meydana gelen değişim yer almaktadır. Yapılan analizlere göre ıslahsız durumda rijit temel altında 47,13 cm'lik oturma hesaplanırken kolon boyunun artmasına bağlı olarak deplasman değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen azalma miktarları kolonsuz durum değerleri referans alındığında 15,00 m boyundaki kolon için %27,1 mertebesindedir. Ancak iyileştirme oranının kolon boyundaki değişime orantısı geotekstil örtü altında hesaplanan biçimde 3 farklı eğime sahip olduğu Şekil 4.66 ve 4.67'de sunulan grafiklerde görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 2,00 metreye kadar olan kolon boyları için her 1,0 metre boyundaki kolon için iyileştirme oranı %6,72 mertebesinde hesaplanırken oturmalar 47,13 cm'den 40,79 cm'ye düşmüştür. 2,00 ile 7,00 metreye kadar olan kolon boyları için her 1,0 metre boyundaki kolon için %2,21 mertebesinde elde edilirken oturma değerleri 40,79 cm'den 36,28 cm'ye düşmüştür. 7,00 metreden uzun kolonlar için ise kolon boyunun oturmaları önemli ölçüde değiştirmedeği ve her 1,0 metre boyundaki kolon için iyileştirme oranının %0,57 mertebesinde kalarak oturma değerlerini 35,78 cm'den 34,34 cm'ye düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4.65: Kolon boyuna bağlı rijit temelde elde edilen oturma profilleri.



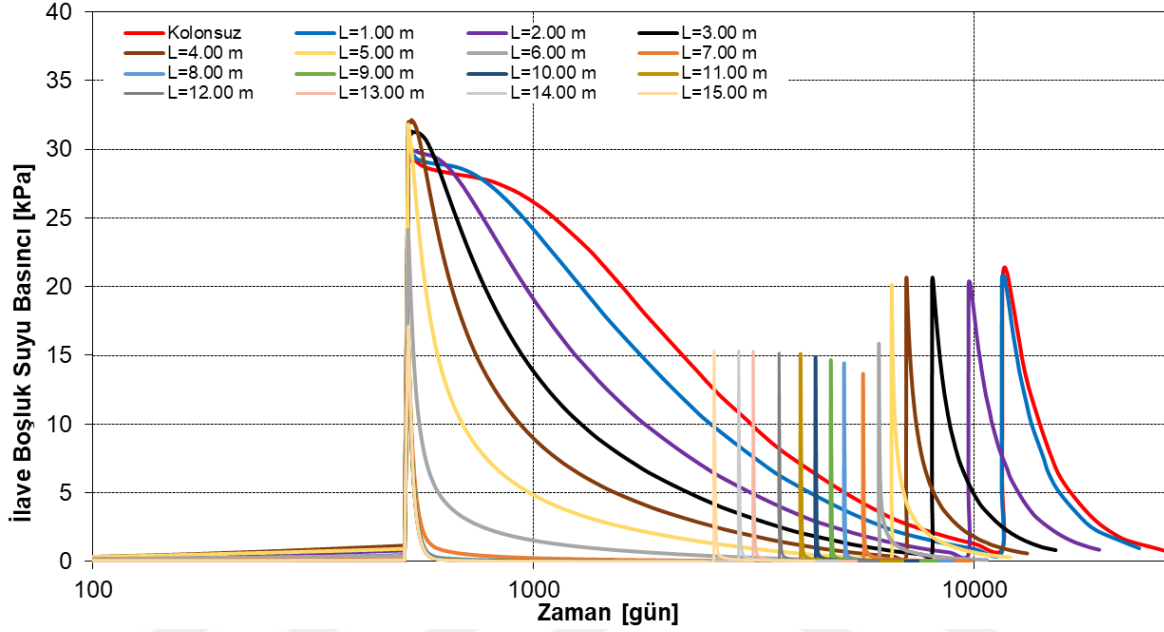
Şekil 4.66: Kolon boyuna bağlı rijit temelde hesaplanan oturma değerleri.



Şekil 4.67: Kolon boyuna bağlı oturmalarda meydana gelen iyileştirme oranı.

6,00 m derinlikte tanımlanan ilave boşluk suyu basıncı ölçüm noktasından alınan veriler Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da yer almaktadır. Elde edilen grafik incelendiğinde ilk yükleme ve akabinde tanımlanan konsolidasyon aşamaları için kolonsuz durumdan 7,00 m'ye kadar olan kolon uzunluklarında ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızının arttığı, 7,00 metreden sonraki uzunluklarda ise neredeyse değişmediği söylenebilir. Ancak ikinci dolgu kademesinin aktif edilmesi ve sonrasında tanımlanan konsolidasyon aşamaları için ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı her kolon boyu için değişiklik göstermiştir. Şekil 4.69'da verilen kolon

boyuna bağılı ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı grafiğı oturma grafiğıne benzer eğrilere sahiptir. Buna göre 3,00 m'den kısa kolonlarda her 1 metre boyundaki kolon için sönümlenme oranı %14,6 iken 3,00 metre ile 6,00 m arasında bu oran %8,9'a ve 6,00 m'den uzun kolonlar için ise %6,6'ya düşmektedir.

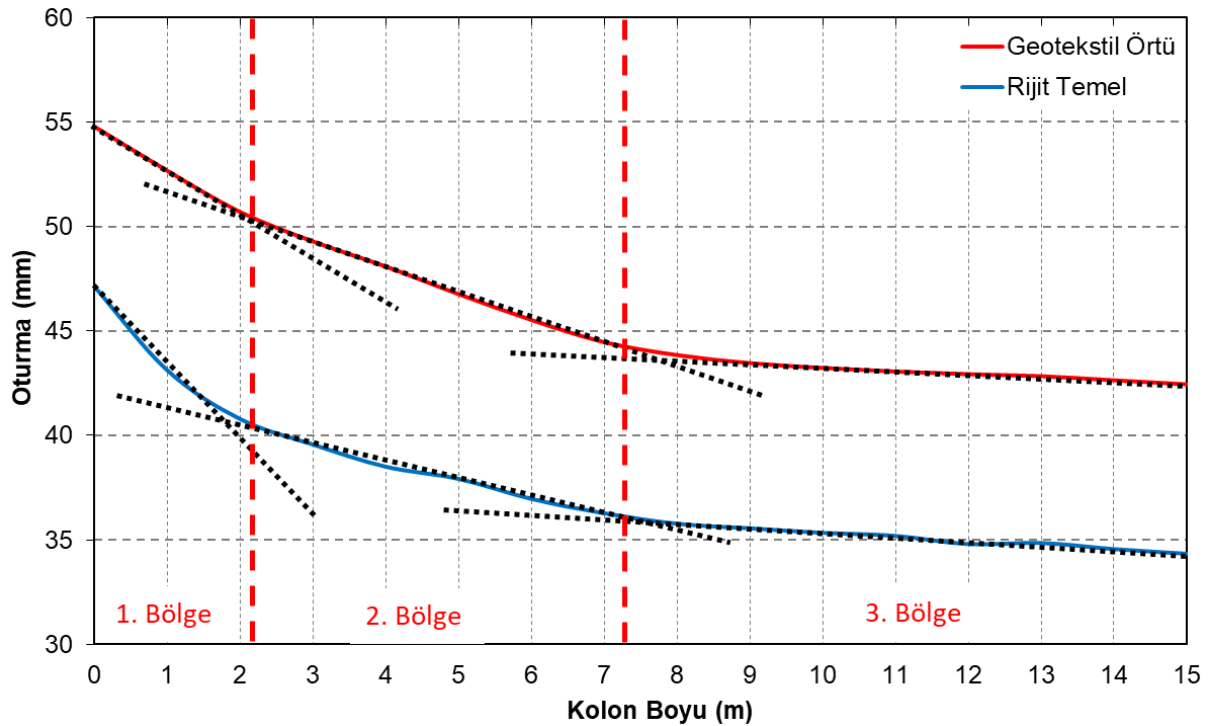


Şekil 4.68: Kolon boyuna bağılı ilave boşluk suyu basıncı grafiğı.

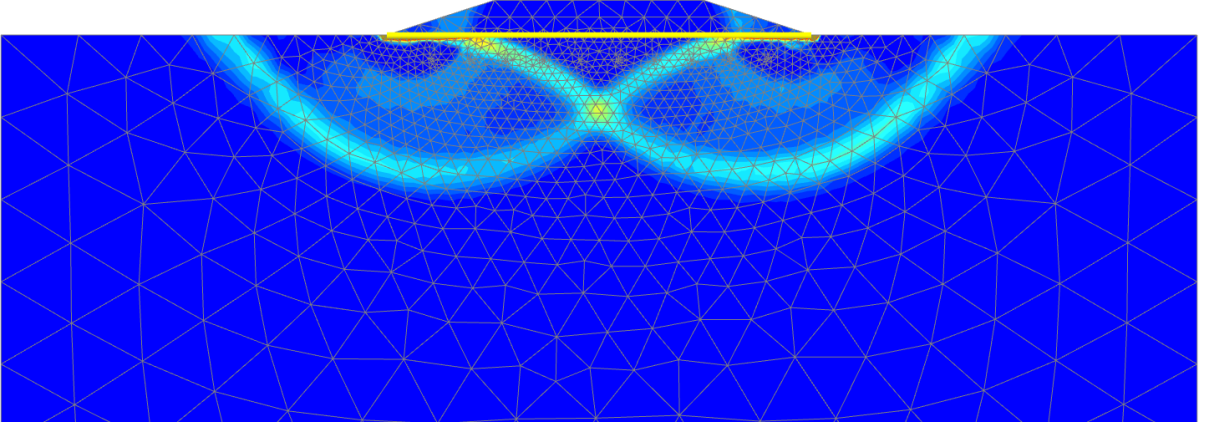


Şekil 4.69: Kolon boyuna bağılı ilave boşluk suyu basıncı sönümlenme hızı.

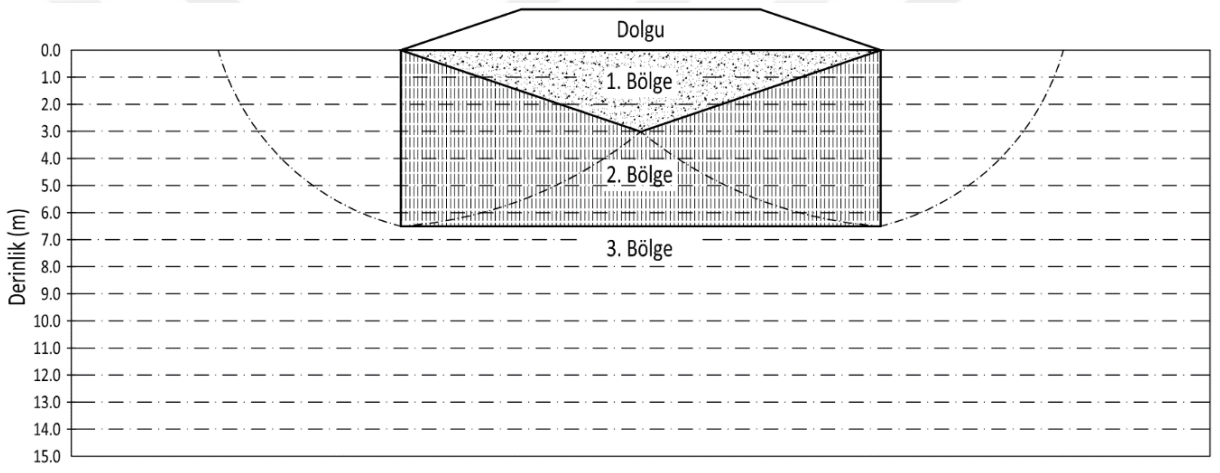
Geotekstil örtü ve rijit temel için yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, kolon boyuna bağlı olarak oturma oranlarında 3 farklı eğimin olduğu görülmüştür. Meydana gelen eğimler kayma yüzeyleri ile birlikte değerlendirildiğinde ilk eğime sahip ve 3,00 m'den kısa kolonların dolgu yükü altında meydana gelen ve üçgen geometriye sahip bölgeyi 1. bölgeyi (Şekil 4.72) kestiği görülmüştür. Bu bölgede oluşturulan kolon boyları ile düşey gerilmelerin aktarılmasının yanı sıra zemindeki yatay gerilmelere karşıda direnç göstermesinden dolayı en yüksek iyileştirme oranı elde edilmektedir. 1. uygulanan yük, temel genişliği ile zemin, kolon, örselenme bölgesi parametrelerine bağlı olarak değişebilir olmakla bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde kullanılan geometri ve parametrelere neticesinde yaklaşık 3,00 m derinlikte elde edilmiştir. 1. bölgeyi geçip 2. bölge içerisinde imal edilecek kolonlar ile düşey gerilmeler daha alt kotlara aktarılmış ve derinliğe bağlı olarak daha düşük mertebelerde oluşacak yatak gerilmeler desteklenmiştir. Bu bölgenin derinliği de kullanılan geometri ve parametrelere bağlı olarak yaklaşık 6,50 m hesaplanmıştır. 2. bölgeyi de geçerek, 7,00 m'den uzun imal edilen kolonlarda ise iyileştirme oranları sifıra yakın mertebelerde elde edilmiştir.



Şekil 4.70: Kolon boyuna oturma değerleri.



Şekil 4.71: Dolgu yükü altında elde edilen kayma yüzeyleri.



Şekil 4.72: Dolgu yükü altında meydana gelen ve iyileştirme oranlarını etkileyen bölgeler.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında dolgu yükü altında bulunan yumuşak kil zemin içerisinde imal edilen taş kolonların deformasyon davranışı incelenmiştir. Söz konusu problemin iki boyutlu düzlem deformasyona dönüşümü için farklı araştırmacılar tarafından önerilen yöntemler ve farklı zemin modelleri, literatürdeki santrifüj deney sonuçları ile karşılaştırılarak metotların uygunlukları ile en uygun malzeme modelinin seçimi tartışılmıştır. Önerilen yöntemler ve seçilen malzeme modelleri ile yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde;

Metot-1 için yapılan analiz sonuçlarında;

- Mohr-Coulomb malzeme modelinde daha az olacak şekilde diğer malzeme modelleri içinde kolonlarda daha az plastik noktalar oluşmuştur.
- Daha geniş bir alana sahip ve rijitliği yüksek taş kolonlar, uygulanan yükün önemli bir bölümünü alarak yumuşak kil birimde daha az gerilme ile buna bağlı olarak daha az ilave boşluk suyu basıncı oluşmasına neden olmuştur.
- Zeminde meydana gelen düşük gerilmelere bağlı olarak yükleme aşamalarında elde edilen ani oturmalar ile düşük değerlerde oluşan boşluk suyu basınçları nedeniyle konsolidasyon aşamalarında elde edilen konsolidasyon oturmaları santrifüj verisine kıyasla %50~60 aralığında daha az elde edilmiştir.
- Hesaplanan bu değerler Tan vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Metot-2 için yapılan analiz sonuçları Metot-1 için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında santrifüj deney verilerine daha yakın olmakla birlikte seçilen malzeme modellerine bağlı farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan analizlere göre;

- Malzeme modelinin Mohr-Coulomb (MC) kullanılması halinde, kolonlarda daha az plastik nokta oluşmuş, yüzeye yakın noktalarda daha az elde, dolgu yükünün kolonlar ile kolon uç bölgelerine aktarılması sonucunda kolon uç bölgesinde daha fazla boşluk suyu basıncının oluştuğu ve santrifüj deneyine ait oturma verileri ile yapılan karşılaştırma sonucunda %30 mertebesinde daha az oturma elde edildiği görülmüştür.
- Malzeme modelinin pekleşen zemin (HS) kullanılması halinde, 2. dolgu aşaması sonuna kadar deplasman değerleri santrifüj verileri ile uyumlu ilerler iken 2. konsolidasyon

aşamasında santrifüj verilerinden uzaklaşarak %12 oranında daha az oturma değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak kullanılan malzeme modelinde ikincil sıkışma parametrelerinin tanımlanamaması gösterilebilir.

- Malzeme modelinin yumuşak zemin akma (SSC) kullanılması halinde, ikincil sıkışma etkilerinin de tanımlanabilmesi ile santrifüj deneyi sonucunda elde edilen oturma profiline bire bir örtüşen bir deplasman profili elde edilmiştir.

Metot-3 için yapılan analiz sonuçlarına göre;

- Kolon altında bulunan sıkışabilir tabaka kalınlığının az olduğu sığ modelde elde edilen deplasmanlar santrifüj deney verilerine kıyasla %60~70 oranında az elde edilmiştir.
- Sıkışabilir tabaka kalınlığının artırıldığı derin modelde yapılan analiz sonucunda ise %15-25 arasında az oturmaların elde edildiği ve ön hesaplamalar için kullanılabilir olmasına karşın kesin hesaplar için yeterli bir yöntem olmadığı görülmüştür.
- Bu yöntemin en büyük handikabı ise kolonlar altında bulunan sıkışabilir tabaka kalınlığından önemli derecede etkilenmesi ve model derinliğine bağlı olarak oturma değerlerinin önemli ölçüde değişmesidir.

Yapılan analizler sonucunda dolgu altında taş kolonların iki boyutlu düzlem deformasyon ortamında modellenebilmesi için en uygun dönüşüm yönteminin Metot-2 olduğu ve yumuşak kil zemin davranışının tanımlanabilmesi için en uygun malzeme modelinin yumuşak zemin akma (SSC) olduğu görülmüştür.

Metot-3 için yapılan analiz sonuçlarında gözlenen kolon altında kalan sıkışabilir tabaka kalınlığının etkisinin incelenmesi ve mevcut model derinliğinden uzun kolon tasarımının yapılabilmesi amacıyla model derinliği artırılmıştır. Hem sığ model hem de derin modellerde temel sistemi ve kolon çapının etkisi ile sadece derin modelde taş kolon uzunluğuna bağlı olarak oturma profilleri ile boşluk suyu basıncında meydana gelecek değişikliklerin incelenmesi için seçilen yöntem ve malzeme modeli kullanılarak seri analizler gerçekleştirilmiştir.

Temel sisteminin incelenmesi amacıyla, dolgu yükü altında geotekstil örtü, 20 cm kalınlığında esnek temel ve 100 cm kalınlığında rijit temeller tanımlanarak her iki model derinliği için analizler yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre temelin rijitleşmesine bağlı olarak oturmalarda azalmanın ile daha üniform bir oturma profili elde edilmiştir. Geotekstil örtü

altında elde edilen oturmalar referans alındığında her iki model derinliği için esnek temelde %8,5-8,8 oranında, rijit temelde ise %20,0-21,1 oranında azalma elde edilmiştir. Otuurmalarda meydana gelen değişimin nedeni ise temelin rijitliğine bağlı olarak zeminde ve kolonlarda oluşan gerilme dağılımının etkisi görülmektedir. Rijitliğin az olduğu temel sistemlerinde gerilmeler kenar kolonlarda daha az, merkez kolonlarda daha fazla olacak şekilde dağılıma sahiptir. Buna bağlı olarak farklı oturma değerleri ile toplam oturma değerlerinde artış meydana gelmektedir. Daha rijit temellerde ise dolgu yükü bütün kolonlara eşit olarak dağıtılacağı için farklı oturmalar ile toplam oturma değerlerinde azalma oluşmaktadır. Aynı zamanda temel rijitliğinin artması ve oturmaların daha üniform bir profilde elde edilmesine bağlı olarak temel kenar noktalarında oluşacak yatay deplasmanlarda artış meydana gelecektir.

Kolon çapının etkisinin incelenmesi amacıyla, %12 alan oranına sahip 30 cm, 60 cm ve 90 cm çapta kolonlar için modeller hazırlanmıştır. Hazırlanan her modelde temel sistemi için geotekstil örtü kullanılmıştır. Yapılan analizler ile alan oranı değiştirilmeden kolon çapının değiştirilmesi sonucunda oturma profillerinde değişiklik oluşmadığı gözlenmiştir. Ancak boşluk suyu basıncı sönümlenme ve buna bağlı olarak oturma hızlarında değişikliklerin olduğu gözlenmiştir. Daha küçük çapa sahip kolonlarda suyun kat edeceği mesafenin kısılmasına bağlı olarak ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi daha çabuk olmuş ve konsolidasyon aşamalarında meydana gelen otuurmalar daha hızlı gerçekleşmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, sahada yapılacak imalatlarda oturmaların daha hızlı gerçekleşmesi istenildiği takdirde aynı alan oranına sahip daha küçük çaplı kolonların kullanılmasının daha uygun olacağı söylenebilir.

Kolon boyunun oturmalar üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, geotekstil örtü ve rijit temel sistemine sahip kolonsuz modelden başlayarak kolon boyları 1,0'er metre arttırılarak toplam 15,0 m'ye kadar farklı boyda kolonlar modellenmiş ve analizler yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde kolon boyunun artmasına bağlı olarak beklenildiği üzere deplasmanlarda azalma meydana gelmiştir. Ancak belirli bir kolon boyundan sonra kolon boyunun deplasmanları önemli ölçüde değiştirmediği ve oturmaların neredeyse aynı değerlerde seyrettiği görülmüştür. Her iki temel sisteminde de kolon boyuna bağlı iyileştirme oranlarında 3 farklı eğime sahip grafikler elde edilmiştir. 3,00 m'de kısa kolonlar ile oluşturulan modellerde elde edilen ilk eğimde iyileştirme oranları en yüksek mertebededir ve eğimleri geotekstil için %3,73, rijit temel için %6,72'dir. 3,00 m ile 7,00 m aralığında kolon boyuna sahip modeller için elde

edilen eğim ise geotekstil için %2,46 ve rijit temel için %2,21'dir. 7,00 m'den uzun kolonlarda ise en düşük iyileştirme oranı elde edilmiş olup geotekstil için %0,46 ve rijit temel için %0,57 eğimleri hesaplanmıştır.

Elde edilen farklı eğimlerin nedenleri incelendiğinde dolgu yükü altında elde edilen kayma yüzeylerinin kolon boylarına önemli etkisinin olduğu gözlenmiştir. Dolgu yükü altında meydana gelen üçgen geometriye sahip kayma yüzeyini kesen uzunluktaki kolonlar ile en fazla iyileştirme eğimi elde edilmiş, sonrasında elde edilen yarım çember geometriye sahip kayma yüzeylerini kesen uzunluktaki kolonlar ile orta derecede iyileştirme oranı elde edilmiş ve kayma yüzeylerinin altında imal edilen kolonlarda ise neredeyse herhangi bir iyileştirme sağlanamamıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizler sonucunda dolgu altında en ideal taş kolon boyunun 7,00 m olacağı, bu boydan uzun kolonların oturmaları önemli ölçüde değiştirmeyeceği söylenebilir. Ancak unutulmamalıdır ki elde edilen kayma yüzeyleri seçilen geometri, yük ve kullanılan malzemelere ait parametreler sonucunda belirlenmiştir. Farklı temel boyutu, yükleme durumu, ya da kolon-zemin parametreleri sonucunda farklı derinliklerde kayma yüzeyleri elde edilebilir. Buradan çıkan sonuç ile sahada yapılacak imalatlar için ideal kolon boyunun belirlenebilmesi amacıyla, ilk etapta güvenlik analizi yapılarak kayma yüzeylerinin elde edilmesi ve seçilecek kolon boyunun bu kayma yüzeyinin hemen altında belirlenmesinin uygun olacağı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Hughes, J.M.O., Withers, N.J. (1974). "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns." Ground Eng., 7(3), 42-49.
- [2]. Priebe, H.J. (1976). "Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes." Bautechnik, 53(H.5), 160-162 (in German).
- [3]. Balaam, N.P., Booker, J.R. (1981). "Analysis of rigid raft supported by granular piles." Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 5(4), 379-403.
- [4]. Barksdale, R.D., Bachus, R.C. (1983). "Design and construction of stone columns, Volume 1." Rep. No. FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [5]. Schweiger H.F., Pande G.N. (1986), "Numerical Analysis of Stone Column Supported Foundations", Computers and Geotechnics, 2:347-372
- [6]. Hird C.C., Pyrah I.C., Russell D. (1992) "Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground." Géotechnique. 42(3): 499-511, DOI: 10.1680/geot.1992.42.3.499.
- [7]. Poorooshasb, H.B., Meyerhof, G.G. (1997). "Analysis of behavior of stone columns and lime columns." Comput. Geotech., 20(1), 47-70.
- [8]. Muir Wood, D. Hu, W & Nash, D. F. T. (2000), "Group effects in stone column foundations: model tests", Geotechnique, 6:689-698
- [9]. Indraratna B., Redana I.W. (2000) "Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay." Canadian Geotechnical Journal, 37(1): 132–145, DOI: 10.1139/t99-115.
- [10]. Bae, W.S., Bang, W.S., Byung, C.A. (2002). "Behavior of foundation system improved with stone columns." Proc., 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Int. Society of Offshore and Polar Engineers, Cupertino, CA, 675-678.
- [11]. Murugesan, S. and Rajagopal K. (2006): "Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation". Geotextiles and Geomembranes, 24(6), 349-358.
- [12]. Tan S., Tjahyono S., Oo K. (2008), "Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 134(2): 185-194, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:2(185).
- [13]. Weber T.M. (2008), "Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen, Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik", ETH Zürich, Band 232, VDF-Verlag, ETH Zürich.
- [14]. Keleşoğlu M.K., Weber T.M., Laue J., Springman S.M. (2018). "Lessons Learned from Plane-Strain Modelling of Stone Columns: Installation Process, Group Behaviour, Pore Water Pressures and Embankment Loading Stages" (yazım aşamasında)
- [15]. Plaxis 2D, 2016, Reference Manual.

EKLER



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Caner DURMUŞ
Doğum Yeri	Malatya
Doğum Tarihi	22.02.1983
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0 505 317 83 16
E-Posta Adresi	canerdurmus44@gmail.com
Web Adresi	-

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	2006

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
[1]. Caner Durmuş, M. Kubilay Keleşoğlu (2018): <u>“Taş kolon boyunun oturmalar üzerindeki etkisi”</u> . Z. Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Konferansı, 3, 1045-1054.	