

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT KOLONLARININ ZEMİNLERDEKİ OTURMALARA
ETKİSİNİN NUMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DÜZEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT KOLONLARININ ZEMİNLERDEKİ OTURMALARA
ETKİSİNİN NUMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DÜZEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Aşkın ÖZOCAK

TEMMUZ 2023

İrem DÜZEN tarafından hazırlanan “Jet Grout Kolonlarının Zeminlerdeki Oturmalara Etkisinin Numerik Yöntemlerle İncelenmesi” adlı tez çalışması 05.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Geoteknik Bilim** Dalı’nda **Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Jet Grout Kolonlarının Zeminlerdeki Oturmalara Etkisinin Numerik Yöntemlerle İncelenmesi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(05/07/2023)

İrem DÜZEN



TEŞEKKÜR

İlk olarak yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikimini, rehberliğini ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunmak isterim. Ayrıca kıymetli yardımları ve tez sürecindeki desteklerinden dolayı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Bilim Dalı değerli hocalarından sayın Doç. Dr. Sedat SERT'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve benim bugünlere erişmemdeki en büyük destekçilerim olan aileme ve tez çalışmam boyunca yanımda olarak beni motive eden, manevi desteğiyle bana ilham veren kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Eylem ARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İrem DÜZEN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ŞİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi	3
2.1.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması	4
2.1.2. Zemin iyileştirme uygulamaları	11
2.1.2.1. Mekanik iyileştirme	11
2.1.2.2. Hidrolik iyileştirme	24
2.1.2.3. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme	31
2.1.2.4. Donatı kullanılarak zemin iyileştirme	43
2.2. Jet Grout Yöntemi	52
2.2.1. Jet grout yönteminin temel mühendisliğinde uygulama alanları	54
2.2.2. Jet grout yönteminin imalat parametreleri	56
2.2.2.1. Jet sistemi	57
2.2.2.2. Enjeksiyon basıncı	60
2.2.2.3. Meme (nozül) sayısı ve çapı	61
2.2.2.4. Tijin dönme ve çekme hızı	62
2.2.2.5. Su/çimento oranı	63
2.2.3. Jet grout yöntemi ekipmanları	63
2.2.4. Jet grout yönteminin çalışma prensibi	64
2.2.5. Jet grout kolonlarının kalite kontrol testleri	65
2.2.5.1. Jet grout deneme kolonları (kolon çapı kontrolü)	66
2.2.5.2. Jet grout kolonları basınç dayanımı kontrolü	66
2.2.5.3. Jet grout süreklilik (Pile integrity) deneyi	66
2.2.5.4. Jet grout yükleme deneyi	67
2.2.6. Jet grout kolonlarında oturma kontrolü	67
2.2.6.1. Elastik oturma	70
2.2.6.2. Konsolidasyon oturması	72
2.2.7. Jet grout yöntemiyle ilgili literatür araştırması	73
3. MALZEME VE YÖNTEM	77
3.1. Malzeme	77

3.2. Yöntem	78
3.2.1. Model parametrelerinin belirlenmesi	82
3.2.1.1. Zemin parametreleri	82
3.2.1.2. Silo parametreleri	84
3.2.1.3. Jet grout parametreleri	86
3.2.2. Geometrinin belirlenmesi	90
3.2.3. Sonlu eleman ağı	96
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	101
4.1. Tekil Jet Grout Kolonlarının Analiz Sonuçları (Plaxis 3D)	102
4.2. Kompozit Ortam Analiz Sonuçları (Plaxis 3D)	108
4.3. Kompozit Ortam Analiz Sonuçları (Plaxis 2D).....	113
4.4. Ek Analizler	123
4.5. Karşılaştırmalar	128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	133
KAYNAKLAR.....	135
EKLER	143
ÖZGEÇMİŞ.....	163

KISALTMALAR

ASCE	: Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CH	: Yüksek plastisiteli kil
CI	: Orta plastisiteli kil
CL	: Düşük plastisiteli kil
CPT	: Koni penetrasyon testi
D	: Doğal zemin (zemin iyileştirme öncesi)
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi
GC	: Killi çakıl
GM	: Siltli çakıl
GP	: Üniorm çakıl
GW	: Düzgün dane dağılımlı çakıl
HS	: Pekleşen zemin (hardening soil)
JG	: Jet grout kolonu
JR	: Çatlaklı kaya (jointed rock)
K	: Kompozit bölge ile temsil edilen zemin
LE	: Lineer elastik
LL	: Likit limit
MC	: Mohr – Coulomb
MH	: Yüksek plastisiteli silt
ML	: Düşük plastisiteli silt
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
OH	: Yüksek plastisiteli organik zemin
OL	: Düşük plastisiteli organik zemin
Pt	: Turba
RIC	: Hızlı darbeli kompaksiyon
RPM	: Dakikadaki devir sayısı
SC	: Killi kum
SM	: Siltli kum

SP	: ÜniŒorm kum
SPT	: Standart penetrasyon testi
SS	: Yumuşak zemin (soft soil)
SSC	: Yumuşak zemin sünmesi (soft soil creep)
SW	: Düzgün dane dağılımlı kum
TAM	: Tube a manchette
TS	: Türk Standartları
USCS	: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi
YASS	: Yer altı su seviyesi



SİMGELER

γ_d	: Kuru birim hacim ağırlık [kN/m ³]
$\gamma_{d,maks.}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık [kN/m ³]
w	: Su içeriği [%]
$w_{opt.}$	: Optimum su içeriği [%]
U	: Konsolidasyon yüzdesi [%]
q_u	: Tek eksenli basınç dayanımı [kPa]
E	: Elastisite modülü [kPa]
ΔH	: Konsolidasyon oturması [m]
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
$\Delta \sigma$	: Yükleme sonrası meydana gelen efektif gerilme artışı ($\sigma_1 - \sigma_0$) [kPa]
H	: Tabaka kalınlığı [m]
Δe	: Boşluk oranı değişimi ($e_0 - e_1$)
C_c	: Sıkışma indisi
ρ_n	: Doğal birim hacim ağırlık [kN/m ³]
ρ_{doygun}	: Doygun birim hacim ağırlık [kN/m ³]
c	: Kohezyon [kPa]
ϕ	: Kayma direnci açısı [°]
ψ	: Dilatasyon açısı [°]
ν	: Poisson's oranı
L_{JG}	: Jet grout kolon boyu [m]
a_r	: Alan yer değiştirme oranı
$\gamma_{komp.}$	: Kompozit malzemenin birim hacim ağırlığı [kN/m ³]
$c_{komp.}$	: Kompozit malzemenin kohezyonu [kPa]
$\phi_{komp.}$	: Kompozit malzemenin kayma direnci açısı [°]
$E_{komp.}$	: Kompozit malzemenin elastisite modülü [kPa]
γ_s	: Zeminin birim hacim ağırlığı [kN/m ³]
c_s	: Zeminin kohezyonu [kPa]
ϕ_s	: Zeminin kayma direnci açısı [°]

E_s	: Zeminin elastisite modülü [kPa]
γ_{JG}	: Jet grout kolonu malzemesinin birim hacim ağırlığı [kN/m ³]
c_{JG}	: Jet grout kolonu malzemesinin kohezyonu [kPa]
ϕ_{JG}	: Jet grout kolonu malzemesinin kayma direnci açısı [°]
E_{JG}	: Jet grout kolonu malzemesinin elastisite modülü [kPa]
2D	: İki boyutlu Plaxis analizi
3D	: Üç boyutlu Plaxis analizi
d	: Jet grout çapı [m]
s	: Jet grout aralığı [m]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Zemin türlerine göre zemin iyileştirme yöntemleri	7
Tablo 2.2. Zemin iyileştirme kategorileri ve yöntemleri	8
Tablo 2.3. Zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu	10
Tablo 2.4. Olumsuz zemin koşulları ve olası sonuçlar	23
Tablo 2.5. Farklı zemin türleri için uygun enjeksiyon yöntemleri	34
Tablo 2.6. Zemin - çimento karışımlarının özellikleri	39
Tablo 2.7. Jet grout kolonlarının zemin türlerine göre çimento katkı oranları	63
Tablo 2.8. Farklı zemin türlerinde izin verilen oturma değerleri	68
Tablo 3.1. Analizlere ait kodlar ve açıklamaları	82
Tablo 3.2. Plaxis modellerinde kullanılan zemin parametreleri	83
Tablo 3.3. Silo özellikleri	85
Tablo 3.4. Silo temel tabanı statik gerilme hesabı	85
Tablo 3.5. Modellerde kullanılan temel malzemesinin özellikleri	86
Tablo 3.6. Jet grout kolonu malzeme özellikleri	87
Tablo 3.7. Jet grout uygulanmış zeminin mekanik özellikleri	89
Tablo 3.8. Jet grout kolonları - zemin karışımı kompozit zemin parametreleri	90
Tablo 3.9. Tekil kolon geometrisindeki değişkenler	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Zemin dane boyutlarına göre uygulanabilir zemin iyileştirme yöntemleri..	6
Şekil 2.2. Zemin iyileştirme teknikleri sınıflandırılması	9
Şekil 2.3. Proctor eğrisi	12
Şekil 2.4. Yüzeysel kompaksiyon ekipmanlarının sınıflandırılması	13
Şekil 2.5. Dinamik kompaksiyon uygulaması	15
Şekil 2.6. Hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) uygulaması	16
Şekil 2.7. Vibroflot cihazı	18
Şekil 2.8. Vibro-kompaksiyon uygulaması	18
Şekil 2.9. Vibro-kompaksiyon yöntemi için uygun dane dağılım eğrisi	19
Şekil 2.10. Vibro-yer değiştirme yöntemi	20
Şekil 2.11. Islak üstten besleme yöntemi ile vibro-yer değiştirme imalatı	21
Şekil 2.12. Kuru üstten besleme yöntemi ile vibro-yer değiştirme imalatı	21
Şekil 2.13. Kuru dipten besleme yöntemi ile vibro-yer değiştirme imalatı	22
Şekil 2.14. Hidrolik iyileştirme yöntem sınıflandırması	25
Şekil 2.15. Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yönteminin yaygın kullanılan teknikleri	25
Şekil 2.16. Düşey dren uygulaması	28
Şekil 2.17. Ön yükleme için yük – oturma grafiği	29
Şekil 2.18. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme sınıflandırması	31
Şekil 2.19. Enjeksiyon yöntemlerinin şematik gösterimi	33
Şekil 2.20. Farklı zemin tiplerine göre zemin – enjeksiyon karışımlarının serbest basma dayanımları	36
Şekil 2.21. Derin karıştırma yöntemi uygulama alanları	41
Şekil 2.22. Donatı kullanarak iyileştirme sınıflandırması	44
Şekil 2.23. Donatılı şev	46
Şekil 2.24. Zemin ankrajı elemanları	47
Şekil 2.25. Zemin çivilemesi uygulaması	49
Şekil 2.26. Jet grout yönteminin bazı tipik uygulamaları	55
Şekil 2.27. Jet groutun uygulanabildiği zemin aralığı	56
Şekil 2.28. Jet grout yöntemi imalat parametreleri	56
Şekil 2.29. Jet 1 sistemi ve şematik gösterimi	58
Şekil 2.30. Jet 2 sistemi ve şematik gösterimi	59
Şekil 2.31. Jet 3 sistemi ve şematik gösterimi	60
Şekil 2.32. Jet kolonlarında çap ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki	61
Şekil 2.33. Tij çekme hızının kolon çapı ve tek eksenli basma dayanımına etkisi	62
Şekil 2.34. Jet enjeksiyon ekipmanları	64
Şekil 2.35. Jet grout yöntemi uygulama basamakları	65
Şekil 2.36. Jet grout kolonlarının kalite kontrol testleri	66

Şekil 2.37. Jet grout kolonları ile iyileştirilen zeminlerde karşılaşılan oturma çeşitleri	69
Şekil 2.38. α_s faktörünün değişimi	71
Şekil 3.1. İdealize zemin profili	78
Şekil 3.2. Zemin profili ve jet grout soket boyları gösterimi	87
Şekil 3.3. Plaxis 2D ile modellenen temsili geometrik şekillerin perspektif görünüşü	92
Şekil 3.4. Plaxis 3D ile modellenen temsili geometrik şekillerin perspektif görünüşü	92
Şekil 3.5. Plaxis 3D’de modellenen tekil kolonların değişen çap ve aralıklarının üstten görüntüleri	93
Şekil 3.6. Plaxis 3D ile kompozit ortam modellerinde değişen kolon boylarının gösterimi	94
Şekil 3.7. Plaxis 3D ile tekil kolon modellerinde değişen kolon boylarının gösterimi	94
Şekil 3.8. Özel analizlerde kullanılan zemin kesiti ve jet grout kolon boyu temsili gösterimi	95
Şekil 3.9. Özel analizlerin temsili geometrisi	96
Şekil 3.10. Plaxis 2D model parametreleri	97
Şekil 3.11. Plaxis 3D model parametreleri	97
Şekil 3.12. Plaxis modellerinin sonlu eleman ağı görüntüsü	99
Şekil 4.1. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	103
Şekil 4.2. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	103
Şekil 4.3. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	104
Şekil 4.4. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	104
Şekil 4.5. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	105
Şekil 4.6. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	105
Şekil 4.7. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	106
Şekil 4.8. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	106
Şekil 4.9. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	107
Şekil 4.10. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	109
Şekil 4.11. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	109
Şekil 4.12. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	110
Şekil 4.13. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	110
Şekil 4.14. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	111

Şekil 4.15. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	111
Şekil 4.16. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	112
Şekil 4.17. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	112
Şekil 4.18. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	113
Şekil 4.19. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	114
Şekil 4.20. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	115
Şekil 4.21. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	116
Şekil 4.22. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	117
Şekil 4.23. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	118
Şekil 4.24. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	119
Şekil 4.25. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	120
Şekil 4.26. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	121
Şekil 4.27. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları	122
Şekil 4.28. 0,6 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	125
Şekil 4.29. 0,8 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	125
Şekil 4.30. 1,0 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	126
Şekil 4.31. 0,6 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	126
Şekil 4.32. 0,8 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	127
Şekil 4.33. 1,0 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları	127
Şekil 4.34. (a) Silo boş iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (b) Silo dolu iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (c) Silo boş iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi (d) Silo dolu iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi	128
Şekil 4.35. (a) Silo boş iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (b) Silo dolu iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (c) Silo boş iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi (d) Silo dolu iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi	130
Şekil 4.36. (a) Silo boş iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (b) Silo dolu iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma-çap ilişkisi (c) Silo	

boş iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi (d) Silo dolu	
iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma-boy ilişkisi	131
Şekil 4.37. Jet grout imalatı yapılan 3D analizlerde yumuşak kil (kayma dayanım	
parametreleri zayıflatılmış) etkisini gösteren ilişkiler	
.....	132



JET GROUT KOLONLARININ ZEMİNLERDEKİ OTURMALARA ETKİSİNİN NUMERİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

ÖZET

Artan nüfus, kentleşme, yüksek yapı inşaatlarının hızlanması ve deprem riski gibi faktörler zayıf zeminlerde yapılaşmayı beraberinde getirmekte ve zemin iyileştirme uygulamalarının önem kazanmasına neden olmaktadır. Zemin iyileştirme çalışmaları, zayıf zeminin güçlendirilmesinin hedeflendiği yöntemleri kapsamaktadır. Maliyet ve teknoloji kısıtlamaları ile birlikte değerlendirilen farklı yöntemlerde; zeminin yapı yükleri altında oturmasını kontrol etmek, taşıma kapasitesini artırmak, tünel zeminini iyileştirmek, şev duraylılığını artırmak ortak amaçlardan birkaçıdır. Jet grout yöntemi ise yaygın olarak kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir ve zeminin taşıma gücünü artırma, oturmaları azaltma ve sıvılaşma riskini azaltma gibi avantajları vardır.

Bu çalışma, jet grout kolonlarının zayıf zemin tabakalarındaki oturmaları azaltmada kullanılmasını ve farklı parametrelerin oturmalar üzerindeki etkisini numerik analizlerle incelemeyi amaçlamaktadır. Bu analizler, Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde jet groutlar hem tekil kolonlar hem de kompozit ortam ile modellenmiştir. Üç boyutlu Plaxis analizlerinde tekil kolonlar ve kompozit ortam, iki boyutlu Plaxis analizlerinde ise sadece kompozit ortam modellenmiştir. Jet grout boyu, çapı ve aralığı için ise değişken parametreler seçilerek analizler tekrar edilmiştir. Son olarak yumuşak kil etkisinin belirlenebilmesi adına üç boyutlu Plaxis analizlerinde normal kil ve zayıf kile soketlenen kolonlar için iki farklı analiz yürütülmüştür.

Analizler sonucunda jet grout ile iyileştirmenin zeminlerde oturmaları azalttığı, ancak çap, boy ve aralıkların sonuçlara farklı oranlarda etki ettiği belirlenmiştir. Optimum çözümlerin elde edildiği üç boyutlu analizler sonucunda en uzun jet grout boyunun en düşük aralıklarla yerleştirildiği durumda oturmalarda %22'lere varan düşüşlerin elde edilebildiği tespit edilmiştir. Sonuçlar üzerinde ise en aktif rol oynayan parametrenin çap değil, jet grout kolonlarının aralığı olduğu belirlenmiştir. Optimum çapın 0,8 m olduğu analizlerde daha yüksek çap kullanımının grup etkileri ile performans düşüklüğüne yol açtığı gözlemlenmiştir. Zemin – jet grout kolonlarının kompozit bir bölge ile temsil edildiği durumda ise üç boyutlu ile iki boyutlu analizlerin çok yakınsandığı, dolayısıyla üç boyutlu analizlerin yürütülmesinin pratik açıdan dezavantajlı olacağı yargısına varılmıştır. Ancak kompozit bölge ve tekil kolonlar ile yürütülen analizler kıyaslandığında tekil kolon modellerinde daha yüksek oturma değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, zayıf tabakalarda yüklemenin daha yüksek oturmalara neden olabileceği, ancak jet grout imalatı ile birlikte normale oranla iyileştirmenin daha iyi performans gösterebileceği yargısına varılmıştır.



THE EVALUATION OF EFFECT OF JET GROUT COLUMNS TO THE SETTLEMENTS IN SOILS WITH NUMERICAL METHODS

SUMMARY

With the increase in population in recent years, the increase in the need for existing urbanization activities, the acceleration of high – rise construction or the high risk of earthquakes in our country, which is located within the three major fault lines brings with it the construction on unsuitable (problematic) soils. For this reason, the risk of landslide, earthquake and liquefaction, especially insufficiency of settlement and bearing capacity of the existing construction areas, makes it necessary to carry out geotechnical studies. Within the scope of geotechnical studies, in cases where the engineering properties of the soil are not sufficient for any structure, it is not always possible to change the construction area or to remove the weak soil within the project area and replace it with a more robust material, both in terms of cost and technology. For these reasons, soil improvement studies are of great importance in order to minimize the soil problems that may occur in the structure over time and to make the soil structure suitable.

Soil improvement works include many application areas such as controlling and reducing the settlement under structural loads, increasing the bearing capacity of the soil, sub-foundation improvements, improving the tunnel soil, creating an impermeable curtain, providing slope stability and reinforcement. A soil improvement method that is fast to be applied, reliable, economical and suitable for soil parameters is selected in soil improvements decided within the scope of geotechnical engineering.

With the developing technology, many soil improvement methods have emerged in geotechnical engineering. One of these methods is the jet grout method, which has been widely used in recent years. The jet grout method is preferred because it is used to increase the bearing capacity of the soil, reduce settlements and reduce the risk of liquefaction in case of earthquakes, as well as being more economical compared to other soil improvement methods, shorter application time and a wide range of applications on almost all soils.

This study aims to use jet grout columns to reduce settlements in weak soil layers and to examine the effect of different parameters on settlements by numerical analysis. The load that will cause settlement on the soil is represented by the silo load. The analyzes were repeated separately for both the empty and loaded cases of the silos and the settlements on the soil were calculated. In order to reduce the settlements to permissible levels, the construction of jet grouts has been included. However, since it is thought that the number, diameter, spacing and length of the jet grout will have different effects on settlements, the analyzes were carried out with these variable parameters.

The analyzes carried out within the scope of this thesis were carried out with Plaxis 2D and Plaxis 3D software. In the analyses, jet grouts are modeled with both single columns and composite region. Jet grouts placed under the circular silo are modeled as single columns and composite region in Plaxis 3D. On the other hand, in Plaxis 2D since it is not possible to model jet grouts individually, only the analyzes of the composite region were carried out.

While the three – dimensional analyzes were carried out to compare the effects of the variables in geometry, the two – dimensional analyzes were carried out to observe in which geometric conditions it would be helpful to converge with the three – dimensional and two – dimensional analysis. This inference shows that in some analyzes, by enabling the use of two – dimensional analysis instead of three – dimensional analysis, time and cost savings can be achieved.

The most realistic three – dimensional analysis results helped to decide how the number, spacing, diameter and length of the jet grouts affect the settlements and to choose the optimum parameters. At the same time, jet grouts are modeled as both single columns and composite region in three – dimensional analysis. Thus, in the three – dimensional analysis, a comparison was made between the analysis results of the composite region and the individual columns, and the differences in settlement values between the models were examined. In addition, the extent to which the performance of the jet grout group, which is socketed into different soil layers, will be affected by the geotechnical properties of the soil has been a separate study. For this reason, alternative three – dimensional Plaxis analyzes were performed to observe the effect of soft clay as additional analyzes. These alternative analyzes were applied to observe how settlements would be affected by the presence of a weak layer under the layers in the soil section or the presence of a softer clay layer in the existing soil profile.

As a result of the analyzes, it was determined that the improvement with jet grout reduces the settlements on the soils, but the diameter, length and spacing affect the results at different rates. The implications of all the analyzes made within the scope of the thesis are as follows:

- As a result of the analyzes in which the jet grouts are modeled as single columns as a result of the three – dimensional analyzes in which optimum solutions are obtained, it is seen that up to 22% reductions in settlements can be obtained when the longest jet grout length is placed at the lowest intervals. However, it was concluded that the same situation is not valid for diameter. The optimum diameter size was determined as 0.8 m, and it was determined that the frequent placement of columns with diameters above this would cause group effects. It has also been found that the longest jet grouts cause less settlement, and an increase of 1 unit in length can be compensated by a half unit increase in spacing.
- In the case of modeling the jet grouts as a composite region rather than a single column, it was determined that the change in the column spacing could not be reflected in the results, so it did not change the settlement values and remained ineffective. These results are inconsistent compared to single column analyzes, where the jet grout spacing seems to affect settlement more than the diameter. When the change in the amount of settlement before and after the soil improvement is compared, it is seen that the settlements are reduced from approximately 25 cm to 5 cm, thus a 20% settlement decrease after the improvement with jet grout. In

addition, when comparing the size of the Plaxis 3D models, it was determined that lower settlement values were obtained in the composite region than the single column models.

- The model parameters in the 3D analyzes in which the soil - jet grout region was modeled as composite were also applied in the 2D analyzes and it was seen that higher settlements were obtained as a result. In addition, in these 2 – dimensional analyzes, the settlement amount was 28 cm on average before soil improvement, but decreased to 5 cm after improvement. When these results are considered as a percentage, settlement amounts decreased by 19% on average after soil improvement.
- In additional analyzes, in order to observe how the jet grout columns socketed into the soft clay work, the strength parameters of the normal clay with single jet grout column ends were reduced in three – dimensional Plaxis, and it was observed that 26% more settlement occurred in this case. If the clay was softened, the change in the spacing and diameter of the jet grouts began to dominate the settlement amount more. It has been determined that the healing effect is higher in weak clay than in normal clay.
- All the analyzes show that the improvement with jet grout can be represented both with single columns and with the soil - jet grout composite region in two – dimensional and three – dimensional in numerical analysis. However, considering the parametric variables, it has been determined that the most reliable results can be obtained from models created with single columns in three – dimensional analysis. If the composite region is defined, it has been determined that two – dimensional analyzes with almost the same results will be easier instead of three – dimensional analyses. Parametric relationships, on the other hand, showed that the difference in jet grout spacing was more influential on the results than the change in diameter and length. In addition, it was judged that loading in weak layers may cause higher settlements, but with jet grout fabrication, remediation may perform better than normal.

1. GİRİŞ

Son yıllarda nüfusun fazlalaşması ile birlikte mevcut kentleşme faaliyetlerine olan ihtiyacın artması, yüksek yapı imalatlarının hız kazanması veya üç büyük fay hattı içerisinde yer alan ülkemizde deprem riskinin yüksek olması beraberinde uygun olmayan (problemlili) zeminlerde yapılaşmayı getirmektedir. Bu nedenle mevcut inşaat alanlarının oturma ve taşıma gücü yetersizliği başta olmak üzere heyelan, deprem ve sıvılaşma riski taşıması geoteknik çalışmaları yapılmasını gerekli hale getirmektedir. Geoteknik çalışmalar kapsamında, zeminin mühendislik özelliklerinin herhangi bir yapı için yeterli olmadığı durumlarda inşaat alanının değiştirilmesi ya da proje alanı dahilindeki zayıf zeminin kaldırılıp yerine daha nitelikli bir malzeme ile yer değiştirilmesi hem maliyet hem de teknolojik açıdan her zaman mümkün olmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı, zaman içerisinde yapıda meydana gelebilecek zemin kaynaklı problemlerin minimum düzeye indirebilmek ve zemin yapısını elverişli hale getirebilmek için zemin iyileştirme çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

Zemin iyileştirme çalışmaları; zeminin yapı yükleri altında oturmasını kontrol etmek ve azaltmak, zeminin kayma direncini artırmak, temel altı iyileştirmeleri, tünel zemininin iyileştirilmesi, geçirimsizlik perdesi oluşturulması, şev stabilitesinin sağlanması ve oyulmaya karşı takviye yapılması gibi birçok uygulama alanını içerisinde barındırmaktadır. Geoteknik Mühendisliği kapsamında karar verilen zemin iyileştirmelerinde; uygulaması hızlı, sonuçları güvenilir, ekonomik ve hedeflenen parametrelere uygun kriterleri sağlayacak bir zemin iyileştirme yöntemi seçilmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte Geoteknik Mühendisliğinde birçok zemin iyileştirme yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerden birisi de son yıllarda yaygın olarak kullanılan Jet Grout yöntemidir. Jet Grout yöntemi; zeminin kayma direncini artırmak, oturmasını azaltmak ve deprem durumunda oluşabilen sıvılaşma riskini azaltmak için kullanılmasının yanı sıra diğer zemin iyileştirme yöntemlerine kıyasla genellikle daha ekonomik olması, uygulama süresinin daha kısa olması ve hemen hemen tüm zeminlerde geniş bir uygulama yelpazesi olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında; zayıf zemin tabakalarında oluşan yapı yükünden kaynaklı oturmaların, zemin iyileştirme yöntemlerinden ülkemizde sıklıkla kullanılan Jet Grout kolonları yardımıyla daha düşük seviyelere indirgenmesi ve farklı parametrelerin oturmalara etkisinin numerik analizler yardımıyla irdelenmesi hedeflenmiştir. Numerik analizler, zeminlerin davranışının belirlenmesinde sık olarak kullanılan sonlu eleman yöntemini esas alan Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımları kullanılarak yürütülmüştür.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi

Son yıllarda nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte barınma ve altyapı ihtiyaçlarına olan talep artışı ortaya çıkmaktadır. Bina, yol, demiryolu, köprü, tünel, baraj, anıt gibi her mühendislik yapısı bir zemin üzerine inşa edileceğinden zemin davranışının incelenmesi İnşaat Mühendisleri için kritik önem taşımaktadır (Akbulut, 2020). İnşası planlanan proje alanlarındaki doğal zeminlerin gerekli mühendislik parametrelerini karşılayamaması, zemin problemleri doğurmaktadır. Bu nedenle taşıma gücü, oturma, şişme veya deprem durumunda ortaya çıkan sıvılaşma sorunları olan zayıf zeminler üzerine yapılar inşa edilmek zorunda kalınmaktadır. Mühendislik parametrelerini karşılayamayan zayıf zeminler, M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzanan en eski İnşaat Mühendisliği disiplinlerinden birisi olan, zemin iyileştirme uygulamalarına ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır (Selçukhan ve Ekinci, 2021).

Temel zemini yeterli kayma direncine sahipse tasarlanan yapıya uygun temel inşa etmede herhangi bir sorun yoktur. Fakat bunun aksine temel zemini üst yapıdan gelen yükü taşıyamayacak kadar gevşek veya yumuşak ise yükü derin zemin tabakalarına aktarmak gerekmektedir. Bu durumda derin temel tasarımı alternatif bir çözüm olmakla beraber maliyeti yüksek, pahalı ve ayrıca ileri teknoloji gerektiren bir uygulamadır. Bu sebeple gerek ekonomikliği gerekse uygulama kolaylığından dolayı zeminin mühendislik parametrelerini iyileştirmek için zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin en temel amaçları (Priebe, 1991):

- Kayma dayanımını artırmak,
- Kayma modülünü artırmak,
- Şişme ve büzülme potansiyelini azaltmak,
- Sıkıştırılabilirliği azaltmak,
- Geçirgenliği azaltmak,

- Çevresel etkiler sonucu oluşan fiziksel ve kimyasal değişimleri önlemektir.

Özet olarak problemlı zeminlerin; kayma direncini artırmak, oturmaların büyüklüğünü ve süresini azaltmak, sızmayı geciktirmek, drenajın oluşma hızını artırmak, şevlerin duraylılığını artırmak ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak gibi amaçlardan dolayı zemin iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bununla birlikte zemin koşullarına bağı olarak ekonomik fizibilite ve zaman çerçevesi göz önünde bulundurularak, uygulanabilir bir zemin iyileştirme yöntemi seçilmektedir. Uygulama alanı olarak bu yöntemler; endüstriyel, ticari ve konut projelerinden barajlar, tüneller, limanlar, yollar ve bentler için altyapı projelerine kadar geniş bir inşaat yelpazesinde kullanılmaktadır (Sneha ve ark, 2014).

2.1.1. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması

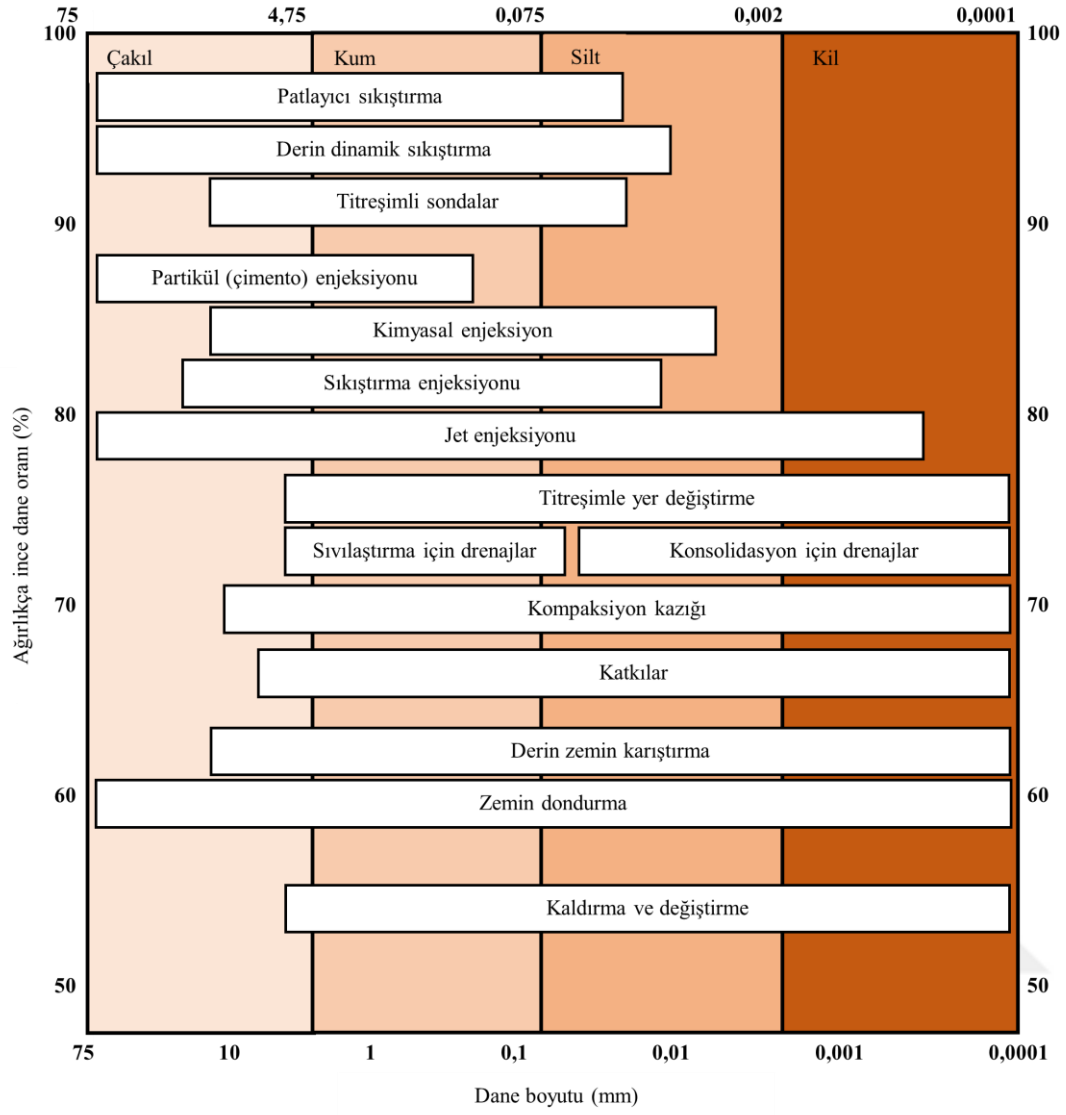
Teknolojik gelişmeler ile artan çevresel duyarlılık ve ekonomik avantajlar ile birlikte modern zemin iyileştirme yöntemleri zamanla gelişme göstermektedir. Bu gelişmeler ile beraber çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinin standartlaştırılması ve teknik önerilerin artması söz konusudur.

Zemin iyileştirme çalışmaları genellikle yapı inşaatı başlamadan önce uygulanmakta ve optimum yöntemin seçimini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Öncelikle proje alanında yapılması planlanan yapıdan kaynaklı gerilmeler, üzerine inşa edilecek olan zeminin türü ve temel sistem tipi incelenmektedir. Daha sonrasında saha koşulları, şantiye çevresinde bulunan binalar ve temelleri, yeraltı suyu koşulları, deprem riski ve izin verilen oturma değerleri gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Diğer faktörler arasında ise ekipman mevcudiyeti ve tipi, inşaat bütçesi, mevcut süre ve deneyim - iş gücü becerisi yer almaktadır (Ceylan, 2011).

Bazı durumlarda ise zemin iyileştirme çalışmaları, istenmeyen veya öngörülemeyen herhangi bir durum nedeniyle, yapının altındaki taşıyıcı zeminin yenildiği süre sonrasında da uygulanabilmektedir. Aynı zemin iyileştirme yöntemleri ile zemin güçlendirilirken, yapıyı desteklemek için de bazı değişiklikler yapılabilmektedir. Her halükarda zemin iyileştirme prosedürünün maliyeti ve uygulanabilirliği ilk olarak zemin tipine bağlıdır. Bu sebeple optimum zemin iyileştirme yönteminin seçimi hem zemine hem de yapısal koşullara dayanmaktadır.

Zemin iyileştirmenin temel ilkeleri, insanlık tarihinin başlangıcından günümüze kadar değişmiştir (Ahmed, 2015). Ancak pratikteki uygulamalar; yeni makinelerin, yeni malzemelerin ve yeni teknolojilerin gelişmesi nedeniyle zamanla değişim göstermektedir (Terashi ve Juran, 2000). Geoteknik mühendisleri bu zayıf zemin problemine yaklaşırken bir dizi değişkeni dikkate almaktadır. Mitchell (1981) tarafından, bu değişkenlerden birisi olan zemin türleri ve dane boyutlarını kapsayan, zemin dane boyutu aralıklarına uygun çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerini grafiksel olarak temsil eden klasik bir sınıflandırma sunulmuştur. Bu şeklin güncellenmiş versiyonu Nicholson (2015) tarafından şekil 2.1'deki gibi sunulmaktadır.

Holtz ve ark. (2001) ise değişen zemin türlerine göre uygulanabilir olan zemin iyileştirme yöntemlerini farklı bir sınıflandırma ile Tablo 2.1'de özetlemiştir.



Şekil 2.1. Zemin dane boyutlarına göre uygulanabilir zemin iyileştirme yöntemleri (Nicholson, 2015).

Tablo 2.1. Zemin türlerine göre zemin iyileştirme yöntemleri (Holtz ve ark, 2001).

İyileştirme yöntem ve teknikleri	İyileştirme yöntemi sınıflandırması	Uygulanabilir zeminler	Başlıca uygulama alanları	Çeşitleri ve açıklamaları
Gerilme azaltma	Gerilme azaltma	Bütün zemin türleri	Dolgular, şevler	Hafif dolgu malzemeleri
Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme	Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme	Yumuşak kohezyonlu zeminler, organik zeminler, turba	Dolgular, küçük yapılar	Kontrollü kazı veya patlatma ile tüm derinlik veya kısmi olarak yer değiştirme
Kurutma	Konsolidasyon	Killer, siltler, muhtemel turba	Temeller, kazılar	Aktif su çekme (pompalama)
Aşırı yükleme, ön yükleme	Konsolidasyon	Killer, siltler, muhtemel turba	Temeller, kazılar	Düşey drenli veya drensiz vakumlu ön yükleme
Düşey drenler	Konsolidasyon	Killer, siltler	Temeller, kazılar	Kum drenler, prefabrik geokompozit drenler
Katkı ile stabilizasyon	Kimyasal	Siltler, killer (özellikle şişen)	Karayolu alt temel, havaalanı kaldırımları ve erozyon kontrolü	Kireç, Portland çimentosu, diğer kimyasallar ve uçucu kül ile yüzeysel (sığ) iyileştirme
Kireç ve kireç-çimento kolonları	Kimyasal	Siltler, killer	Dolgular, temeller, kazılar	
Derin zemin karıştırma	Kimyasal	Bütün zemin türleri	Derin kazılar ve hendekler	Çimento ve çimento-bentonit karışımları
İçitim ve sızdırma enjeksiyonu	Kimyasal	Fissürlü kaya; tüm daneli zeminler, iri siltler dahil	Temeller, hendekler, sıvılaşmayı azaltma, çevresel iyileştirme	Portland ve mikro-ince çimentolar, kimyasallar (bitüm, silikat, akrilat vb.)

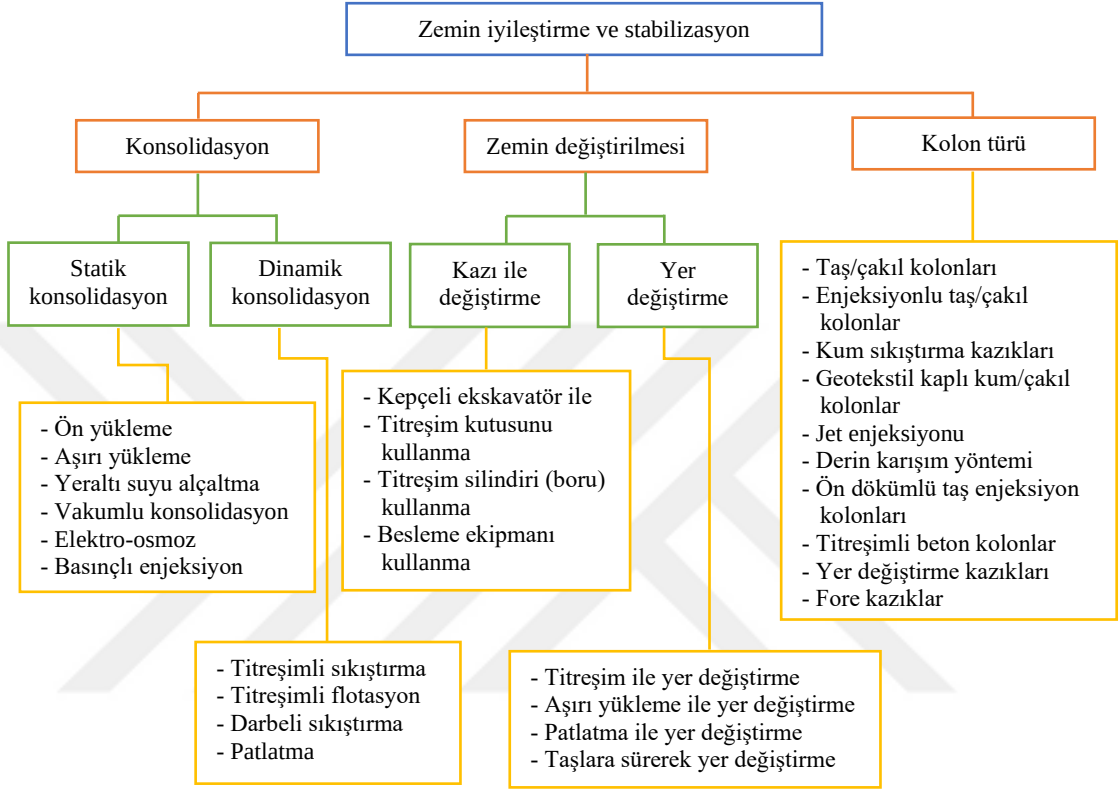
Zemin problemleri için en uygun zemin iyileştirme yöntemi seçimi, yukarıda verilen dane boyutları ve zemin türlerini kapsayan sınıflandırmalar ile özetlenmiştir. Zemin iyileştirmesi yapılırken uygulanacak yöntemin en iyi seçim olduğunun

belirlenmesinde, zeminin hangi parametrelerinin iyileştirilmesi gerektiği de etkin rol oynamaktadır. Bu sebeple, Schaefer ve ark. (2012) zemin iyileştirme yöntemlerini amaçlarına göre Tablo 2.2'deki gibi sınıflandırmıştır.

Tablo 2.2. Zemin iyileştirme kategorileri ve yöntemleri (Schaefer ve ark, 2012).

Kategori	Amaç	Yöntem
Yoğunlaştırma	Zeminin yoğunluğunu, taşıma kapasitesini ve sürtünme kuvvetini artırmak, zeminlerin sıvılaşma direncini artırmak, zeminlerin sıkıştırılabilirliği azaltmak, kohezyonlu zeminlerin mukavemetini artırmak.	Titreşimli sıkıştırma Dinamik sıkıştırma Patlatmalı sıkıştırma Sıkıştırma enjeksiyonu Yüzey sıkıştırma
Konsolidasyon	Konsolidasyonu hızlandırmak, Oturmayı azaltmak, Mukavemeti artırmak.	Drenaj olmadan ön yükleme Dikey drenler ile ön yükleme Vakumlu konsolidasyon Elektro-osmoz
Yük azaltma	Temel zeminlerindeki yükü azaltmak, Oturmayı azaltmak, Şev stabilitesini artırmak.	Köpüklü beton Hafif dolgular, lastik talaşları vb.
Güçlendirme	Mühendislik özelliklerini iyileştirmek için zemine takviye elemanlarını dahil etmek, yanal stabilite sağlamak.	Mekanik stabilize zemin Zemin çivileme/ankraj Mikro kazıklar Kolonlar (agregalı ayaklar, taş kolonlar, geotekstil kaplı kolonlar, kum sıkıştırma kazıkları, jet grouting) Lif takviyesi Yük aktarma platformları ile kolon destekli dolgular Geosentetik takviyeli dolgu
Kimyasal iyileştirme	Yoğunluğu artırmak, Basınç ve çekme mukavemetini artırmak, Boşlukları doldurmak, Sızıntı hendekleri oluşturmak.	Parçacıklı veya kimyasal enjeksiyonlarla sızdırma enjeksiyonu Kütle dolgu Jet enjeksiyonu Sıkıştırma enjeksiyonu Derin zemin karışımı Çatlak enjeksiyonu Kireç sütunları
Termal stabilizasyon	Kayma mukavemetini artırmak.	Zemin dondurma Zemin ısıtma ve sırlama
Biyoteknik stabilizasyon	Mukavemeti artırmak ve güçlendirmek.	Takviye olarak yamaçlarda bitki örtüsü Mikrobiyal yöntemler
Çok yönlüler	Zayıf (kirli) zeminleri iyileştirmek	Elektrokinetik yöntemler Kimyasal yöntemler

Das (1983) zemin iyileştirme yöntemlerini farklı açılardan sınıflandırmıştır: sıkı sıkıştırma, ön yükleme, kum drenleri, vibroflotasyon, katkı stabilizasyonu, derin karıştırma, taş kolonlar, kum kolonlar, jet grout ve kompaksiyon kazıkları kullanarak derin sıkıştırma. Bu yöntemler Kempfert ve Gebreselassie (2006) tarafından daha ayrıntılı olarak Şekil 2.2’de verildiği gibi güncellenmiştir.



Şekil 2.2. Zemin iyileştirme teknikleri sınıflandırılması (Kempfert ve Gebreselassie, 2006).

Selçukhan ve Ekinci (2021) zemin iyileştirme çalışmalarında önceliklerin belirlenmesine yardımcı olmak için zemin iyileştirme yöntemlerini özelliklerine ve kullanım koşullarına göre sınıflandırmıştır (Tablo 2.3). Tablo 2.3’te ilk kısımda yer alan iyileştirme çalışmalarının yapılacağı zemin özellikleri ve amaçları bölümünde; üç yıldız (iyi), iki yıldız (orta), bir yıldız (az) veya uygun değil olarak kabul edilmiştir. İkinci kısımda ise yöntemlerin kullanım sıklığı, uygulama süresi, maliyeti, kontrol gerekliliği ve sürdürülebilirlik faktörlerinin yer aldığı bölümde; üç yıldız (yüksek), iki yıldız (orta) ve bir yıldız (düşük) olarak ifade edilmiştir.

Tablo 2.3. Zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu (Selçukhan ve Ekinci, 2021).

Yöntemler	Zemin		Amaç					Kullanım Sıklığı	Uygulama Süresi	Maliyet	Kontrol Gerekliği	Sürdürülebilirlik
	Kohezyonlu	Kohezyonsuz	Taşınma Kapasitesi	Otuma	Sıvılaşma	Geçirimsizlik	İstinat Yapıları					
Dinamik Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	**	*	***	*
Vibro Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	*	**	***	*
Patlatma ile Kompaksiyon	**	***	**	**	**	-	-	*	*	*	***	*
Yüzey Kompaksiyon	**	**	***	**	-	**	-	***	***	**	***	*
Hafif Madde ile Yer Değiştirme	***	-	**	**	-	-	-	**	**	*	*	*
Yatay Drenler ile Önyikleme	***	-	**	***	-	-	-	*	***	**	**	**
Vakum ile Önyikleme	***	-	***	***	-	-	-	*	**	**	**	***
Taş Kolonlar	**	***	***	**	**	-	-	***	*	*	*	*
Kum Kompaksiyon Kazıkları	***	***	***	*	***	-	-	*	**	**	**	-
Geotekstil ile Güçlendirilmiş Kolonlar	***	-	***	*	-	-	-	*	**	**	**	-
Katkı Maddeleri ile (Derin) Karıştırma	***	***	***	**	**	**	-	*	*	**	**	*
Jet Harç Enjeksiyonu	**	***	***	**	***	**	-	***	*	*	**	*
Geosentetikler ile Mekaniksel İyileştirme	**	***	**	*	-	-	***	**	***	**	*	-
Zemin Ankraj ve Çivileri	**	**	*	*	-	-	***	***	***	***	**	-

2.1.2. Zemin iyileştirme uygulamaları

Zemin iyileştirme yöntemleri genellikle zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek veya stabilizasyonunu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölümde zemin iyileştirme yöntemleri Hausmann (1990) tarafından önerildiği gibi dört grup içerisinde ele alınmaktadır. Bu yöntemlerin sınıflandırılması şu şekilde özetlenmiştir:

1. Mekanik iyileştirme
 - a. Yüzeysel kompaksiyon
 - b. Dinamik kompaksiyon
 - c. Hızlı darbeli kompaksiyon (RIC)
 - d. Vibro kompaksiyon
 - e. Vibro yer değiştirme (taş kolon)
2. Hidrolik iyileştirme
 - a. Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yöntemleri
 - b. Önyükleme ve düşey dren kullanımı
3. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme
 - a. Enjeksiyon yöntemleri ile zemin iyileştirilmesi
 - b. Katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirme
4. Donatı kullanılarak iyileştirme
 - a. Mekanik stabilize toprakarme istinat yapıları
 - b. Donatılı şevler
 - c. Zemin ankrajları
 - d. Zemin çivilemesi
 - e. Donatılı olarak geosentetik kullanımı

2.1.2.1. Mekanik iyileştirme

Mekanik iyileştirme, zeminin dış yükler tarafından sıkıştırılması işlemidir. Bu yöntemler ile zeminin daha sıkı (daha az boşluklu) hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Yüzeydeki zeminler için yüzeysel sıkıştırma (kompaksiyon) yöntemleri uygulanırken, daha derindeki zeminler için derin sıkıştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin kullanımı ile yapıların stabilitesini artırmak ve zemindeki deformasyonları azaltmak hedeflenmektedir.

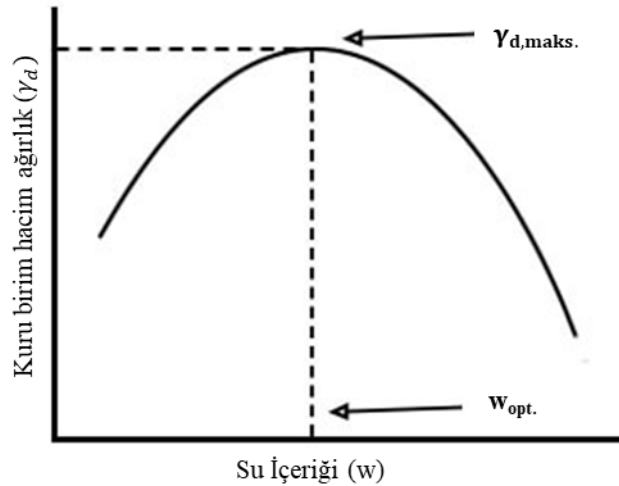
Yüzeysel kompaksiyon

Zemin iyileştirme yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan yüzeysel kompaksiyon; yol, havaalanı, su yapıları, temel zemininin hazırlanması ve istinat duvarı dolgularında sıklıkla kullanılmaktadır. Yüzey kompaksiyon işleminin işleyiş prosedürü, suya doymun olmayan zeminlerde hava hacminin azaltılması ile su geçirgenliğinin minimum düzeye indirilmesi mantığıyla sıkıştırma yapılmasıdır.

Yüzeysel kompaksiyonun temel amaçları:

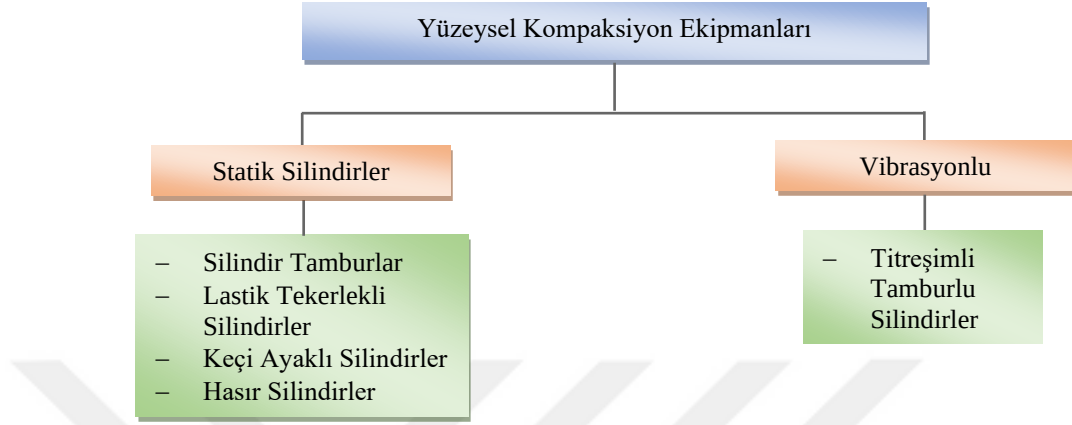
- Kayma mukavemetini artırmak,
- Sıkışabilirliği azaltmak,
- Permeabiliteyi azaltmak,
- Zeminin sıvılaşma potansiyelini azaltmak,
- Şişme ve büzülme kontrolü sağlamak,
- Zemin duraylılığını artırmaktır.

Kompaksiyon işlemi sırasında zeminin su içeriği değiştirilirken, uygulanan enerji ile kuru birim hacim ağırlık artırılmaktadır. Zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ($\gamma_{d,maks.}$) ile optimum su içeriği ilişkisi ($w_{opt.}$) Proctor (1933) tarafından geliştirilen Proctor laboratuvar deneyleri ile belirlenmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Proctor eğrisi (Proctor, 1933).

Yüzeysel kompaksiyon ekipmanlarının gelişimi eski zamanlara dayanmakta ve günümüzde geniş bir çeşitlilikte bulunmaktadır. Bu ekipmanlar, statik ve dinamik basınçlar ile gerçekleşen, vurma veya titreşimden kaynaklı, iki gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Yüzeysel kompaksiyon ekipmanlarının sınıflandırılması.

Statik silindirlerin alt başlığında yer alan keçi ayaklı silindirler, kohezyonlu zeminler için uygun bir seçenek olurken; hasır silindirler, iri daneli çakıllı veya bloklu zeminlerde kullanılmaktadır. Sıkıştırma işlemi sonrası zemin yüzeyini düzeltmek için ise silindir tamburlar veya lastik tekerlekli silindirler tercih edilmektedir.

Vibrasyonlu ekipmanların alt başlığında yer alan titreşimli tamburlu silindirler ise düşey yönde titreşim uygulayarak, iri daneli zeminlerin sıkıştırılmasında veya bozuk yüzeylerin düzeltilmesinde kullanılmaktadır.

Literatürde yüzeysel kompaksiyon yöntemi hakkında pek çok araştırma makalesi bulunmaktadır. Bu makalelerde yöntemin farklı uygulama alanları ve farklı zemin türleri hakkında çeşitli sonuçlar sunulmaktadır.

Villar ve Puppim (2011), yüzeysel kompaksiyon yönteminin kumlu zeminlerin hidrolik iletkenliği üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma yayınlamıştır. Bu araştırma, laboratuvar deneyleri ile ölçümler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, yüzeysel zemin sıkıştırmasının hidrolik iletkenliği azalttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle yüzey sıkıştırması yapılacak ise hidrolik iletkenliğin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Ghorbanalizadeh ve ark. (2014)'nın yaptığı çalışmada, yüzeysel kompaksiyonun yumuşak zeminlerde gerçekleşen dolgu oturması kontrolü değerlendirilmiştir. Araştırma, laboratuvar deneyleri ve sayısal analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, yüzeysel kompaksiyonun dolgulardaki oturma miktarını azalttığı ve dolgu kalınlığının azaltılması durumunda daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

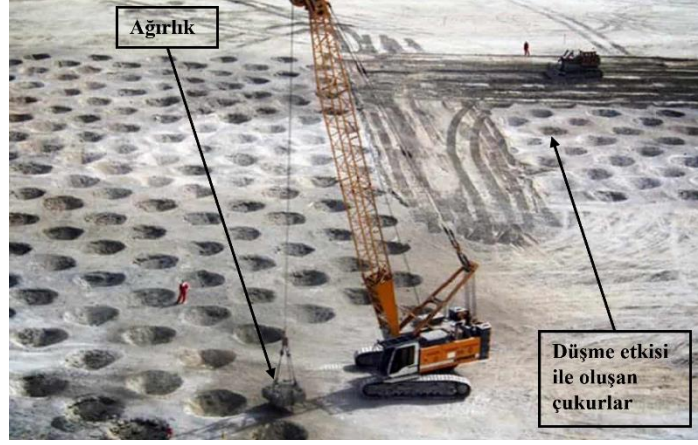
Diğer bir çalışmada Othman ve ark. (2015), yüzeysel kompaksiyon yöntemi olarak tek silindirli sıkıştırma tekniği kullanarak kumlu zeminlerdeki sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasını incelemiştir. Sonuçlarda, yüzeysel kompaksiyonun sıvılaşma potansiyelini azalttığı ve zeminin sıkıştırılabilirliğini artırdığı gösterilmiştir.

Wang ve ark. (2017) tarafından yayınlanan makalede, yüzeysel kompaksiyonun kumlu zeminlerin optimum su içeriği eğrisine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında kumlu zeminin mühendislik parametreleri laboratuvar deneyleri kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, yüzeysel kompaksiyonun kumlu zeminlerde su tutma kapasitesini azalttığı ve dolayısıyla su kaybı oranını artırdığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmaların sonuçları gibi literatürdeki birçok araştırmaların sonuçlarına dayanarak, yüzeysel kompaksiyon yönteminin uygun koşullarda etkili bir zemin iyileştirme yöntemi olduğu görülmektedir.

Dinamik kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon, zemine enerji verilerek (10 - 100 tonluk ağırlıkların 10 - 30 metre yükseklikten düşürülmesi) zeminin sıkıştırılması ve sertleştirilmesi esasına dayanan bir mekanik iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem kapsamında, ağır yükler ile zemine uygulanan enerji sonucu zeminin boşluk oranı azalmakta ve zemin daha sıkı bir yapıya sahip olmaktadır. Ayrıca suya doygun olan zeminlerin boşluk suyu basıncında artış görülmesiyle kısmi - geçici sıvılaşma meydana gelmektedir. Yöntemde birkaç metre aralıklar ile ağırlıklar belli bir kılavuz dahilinde zemine düşürülmekte ve bu şekilde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.5). İyileştirilecek zemin üzerine granüler malzeme serilerek yöntemin efektif olarak uygulanması sağlanmaktadır (Sarsılmaz, 2017).



Şekil 2.5. Dinamik kompaksiyon uygulaması.

Dinamik kompaksiyon yöntemi; zemin yüzeylerinin stabilizasyonunda, havaalanı ve limanlarda pistlerin güçlendirilmesinde, su depolarının altında zemin hazırlığında ve endüstriyel tesislerde uygulanmaktadır. Çeşitli literatür çalışmalarında bu yöntemin zemin kayma direncinde artış sağladığı ve zemin yer değiştirmelerinde azalış gösterdiğinden bahsedilmektedir.

Chang ve Huang (1995) tarafından dinamik kompaksiyonun kum zeminler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde farklı birim hacim ağırlıkları ve düşürme yükseklikleri kullanılarak zeminler dinamik olarak sıkıştırılmıştır. Sonuçlarda, dinamik kompaksiyonun zeminin kayma direncini önemli ölçüde artırdığı ve zemin yer değiştirmelerini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca zeminin kayma direncindeki artışın, düşürme yüksekliği ve birim hacim ağırlığı ile artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Mostafa ve Liang (2011) tarafından yapılan çalışmada, dinamik kompaksiyon yönteminin sayısal simülasyonu ile zemin kayma direnci, oturma ve gerilme şiddeti davranışı incelenmiştir. Sonuçlarda dinamik kompaksiyonun zemin dayanımını artırdığı, oturmaları azalttığı ve zeminin sıkıştırılması sonucunda gerilme şiddeti davranışının değiştiği gözlemlenmiştir.

Chen ve ark. (2017) yaptığı deneysel çalışmada, dinamik kompaksiyon yönteminin zemin iyileştirme performansı irdelenmiştir. Çalışmada dinamik kompaksiyonun farklı zemin tiplerindeki etkisi ve enerji seviyeleri incelenmiştir. Sonuçlarda ise dinamik kompaksiyonun zemin kayma direncini artırdığı ve zemin yer değiştirmelerini

azalttığı gözlemlenirken, enerji seviyesinin artması ile birlikte zemin iyileştirme performansının da artış gösterdiği görülmüştür.

Hızlı darbeli kompaksiyon (RIC)

Mekanik iyileştirme alt başlıklarından biri olan hızlı darbeli kompaksiyon (Rapid Impact Compaction - RIC), yüzeysel kompaksiyon ile derin kompaksiyon yöntemi arasındaki boşluğu doldurmak için kullanılan bir yöntemdir. Hızlı darbeli kompaksiyon (RIC), iyileştirme çalışmalarında yüzey kompaksiyonundan daha derin ve derin kompaksiyondan daha sıkı iyileştirme yapabilmektedir. Bu yöntem, büyük veya küçük alanlarda hedeflenen efektif derinlik 1 ila 7,5 metre arasında olan uygulamalar için uygunluk göstermektedir.

Hidrolik kazık çakıcı tokmak ile çelik ayağından oluşan RIC sisteminin temel işleyiş mantığı; tokmak yardımıyla 0,3 - 1,2 metre yükseklikten 5 - 12 tonluk ağırlık, çelik ayağa düşürülmekte ve her düşüşte zemine enerji aktarılmaktadır (Şekil 2.6). Ağırlık 40 – 60 darbe/dakika hızında uygulanırken, çelik ayağın zemin içerisindeki penetrasyon derinliği veri izleme sistemiyle kontrol edilmektedir.



Şekil 2.6. Hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) uygulaması.

Literatürdeki araştırmalara bakıldığında Jafari ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) yönteminin sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde uygulandığında sıvılaşma riskinin azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Bu

nedenle deprem tehlikesi olan bölgelerdeki yapıların güçlendirilmesi için hızlı darbeli kompaksiyonun etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır.

Başka bir çalışmada Zhou ve ark. (2020), hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) yöntemi ile zeminin deformasyon davranışının iyileşme gösterdiği ve oturma davranışının ise azaldığını kanıtlamışlardır. Ayrıca araştırmada, bu yöntemin geleneksel yöntemlere göre daha az deformasyon oluşturarak zemin parametrelerinin bütünlüğünü koruduğu sonucuna varılmıştır.

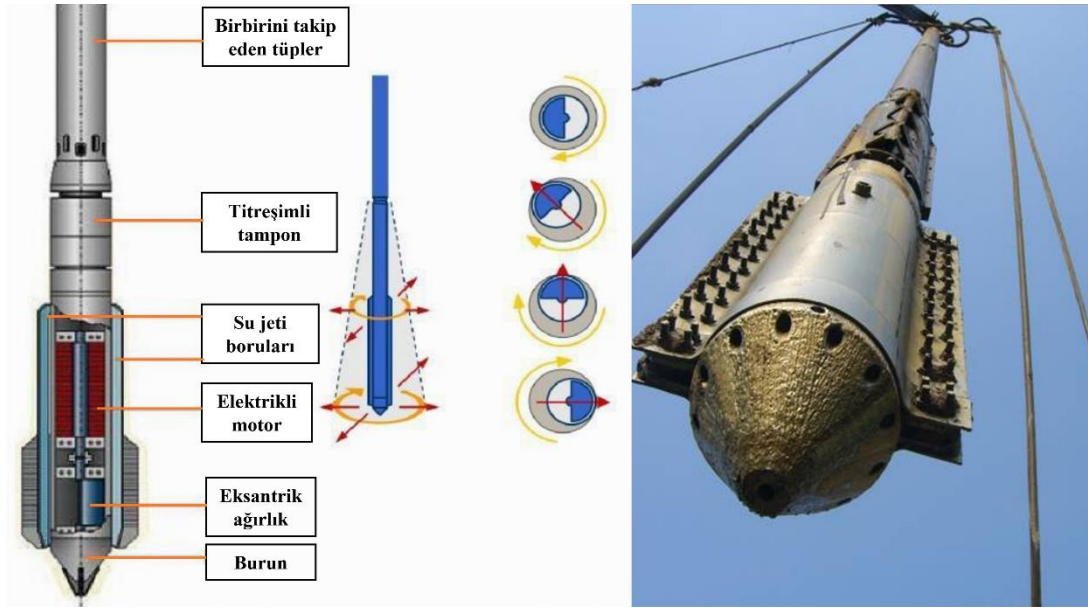
Liu ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ise hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) yönteminin, zemin kayma direncini ve elastisite modülünü artırmasının yanı sıra zeminin dinamik özelliklerini, oturma davranışını ve deformasyon davranışını da iyileştirdiği sonuçlarına varılmıştır. Ayrıca sıvılaşma riskini azaltmak ve çevresel etkileri minimize etmek için de etkili bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Bu araştırmanın sonunda hızlı darbeli kompaksiyon (RIC) yöntemi, inşaat sırasında toz oluşumunu minimum düzeyde tutmak ve çevreye daha az zarar vermek adına geleneksel yöntemlere göre daha ekolojik bir seçenek olarak uygun görülmüştür.

Vibro Kompaksiyon

Vibro - kompaksiyon yöntemi, zemine titreşim uygulanarak daneler arası boşluk oranının azaltılması esasına dayanan ve zeminin mühendislik parametrelerini iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu zemin parametreleri: birim hacim ağırlık, kayma direnci açısı ve elastisite modülüdür. Özellikleri iyileşen zemin, daha yüksek kayma direncine sahip olmakla birlikte daha az oturma değeri göstermektedir.

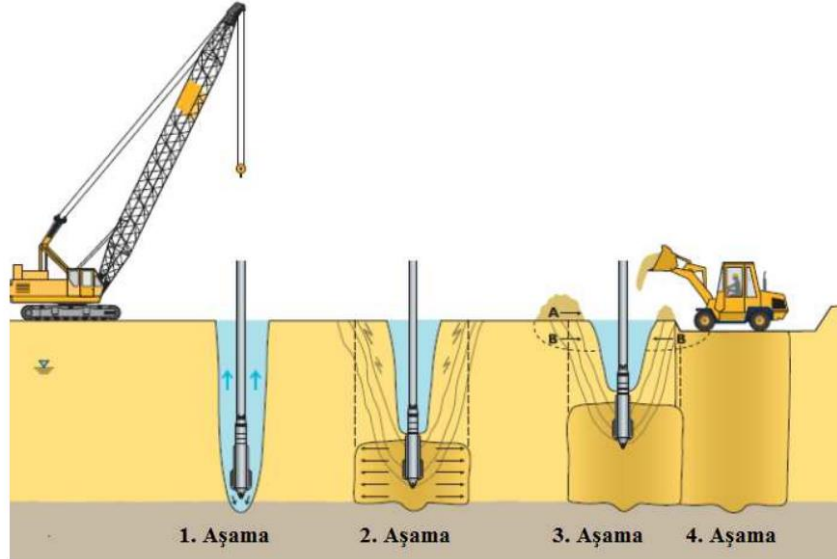
Ayrıca vibro - kompaksiyon, zemin özelliklerini iyileştirmek için arazideki zemin kullanılarak veya arazideki zemin ile aynı karakteristik özellikteki başka bir zemin araziye getirilerek uygulanan bir sıkıştırma yöntemidir. Vibro - kompaksiyon yöntemi; zemine istenilen derinlik ve yönlerde titreşim uygulama imkanı sunarken, aynı zamanda çevredeki yapılar üzerinde hissedilme oranının dinamik kompaksiyon yöntemine göre daha az olması nedeniyle daha az riskli bir uygulama olması avantajı sağlamaktadır.

Vibro - kompaksiyon ve vibro - yer değiştirme yöntemlerinde vibroflot adı verilen sonda kullanılmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Vibroflot cihazı.

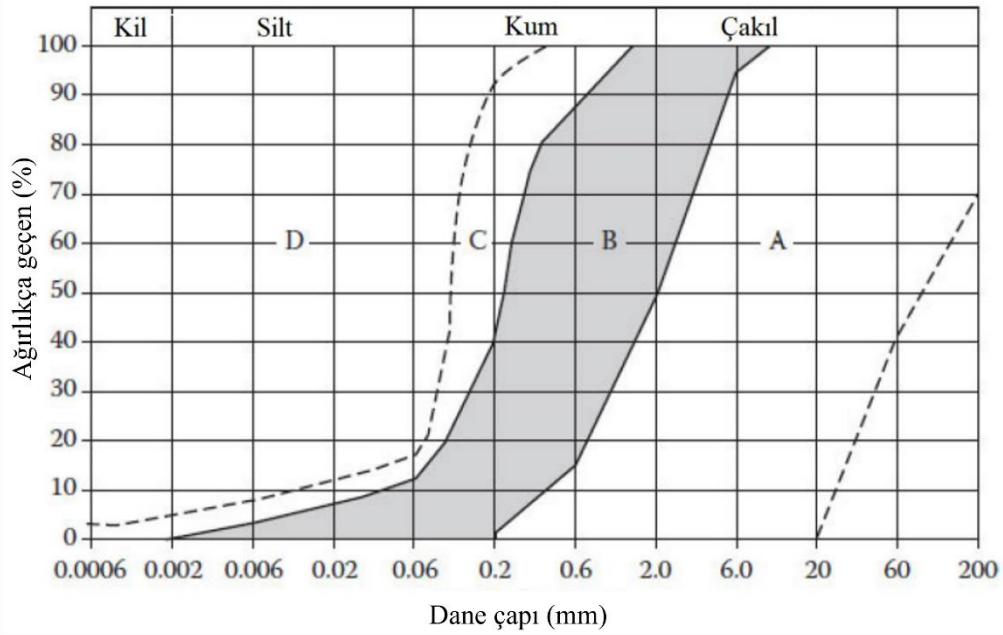
Vibroflotun alt kısmında bulunan jet aktif edilerek hava veya suyun yüksek basınçlarla zeminden dışarı çıkmasını ve bu şekilde elemanın zemine penetrasyonu sağlanmaktadır. Vibro - kompaksiyon uygulaması Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Vibro - kompaksiyon uygulaması (Sarsılmaz, 2017).

Vibro - kompaksiyon uygulaması, Standart Penetrasyon Test (SPT) değeri 5 ile 10 arasında olan yüzeye yakın kumlu zeminler için en uygun yöntem olarak bilinmektedir

(Hausman, 1990). Ayrıca bu yöntem, temiz ve kohezyonsuz zeminlerde etkili bir sıkıştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ancak zeminde %25'ten fazla ince malzeme bulunması durumunda bu yöntem etkisiz hale gelmektedir. Bu durumda ince malzemeler zeminin geçirimsizliğini azaltarak, vibro - kompaksiyon sırasında oluşan titreşimin zeminde oluşan sıvılaşmayı söndürmesini daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle, vibro - kompaksiyon uygulanacak zeminlerin granülometrik özellikleri uygun seçilmektedir (Mitchell, 1981). Vibro - kompaksiyon yöntemi için uygun dane dağılım eğrisi Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Vibro - kompaksiyon yöntemi için uygun dane dağılım eğrisi (Degen, 1977).

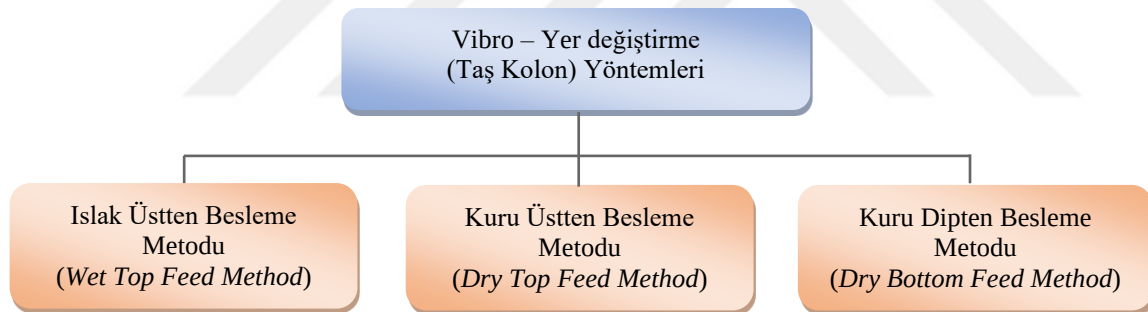
Bir araştırmada, vibro - kompaksiyon yönteminin farklı granülometrik özelliklere sahip kumlu zeminlerdeki taşıma kapasitesi artışına etkisi incelenmiştir. Araştırma sonucunda, vibro - kompaksiyon ile zeminin kayma direncinin artış gösterdiği ve sıkıştırma sonrasında artışın devam ettiği belirlenmiştir. Ayrıca vibro - kompaksiyonun dayanımdaki artışının granülometrik özelliklerle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir (Sanglerat ve ark, 2017).

Basha ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada ise vibro - kompaksiyon yönteminin, kumlu zeminlerin oturması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmadaki kumlu zemin, farklı şartlarda irdelenmiştir. Bunlar: su içerikleri, sıkıştırma yöntemleri

ve titreşim parametreleri. Araştırma sonucunda vibro - kompaksiyonun, oturma değerlerini önemli ölçüde azalttığı ve zeminin oturma değerlerinin zaman içinde kontrol altında tutulduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu yöntem ile zeminin genleşme özellikleri de etkilendiği gözlemlenmiştir.

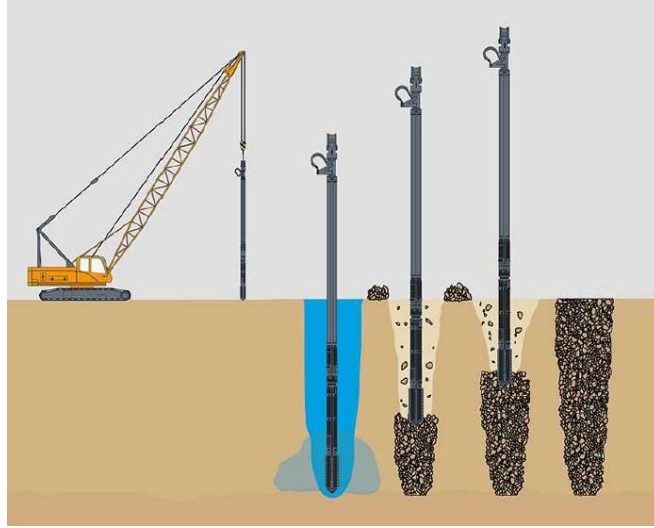
Vibro yer değiştirme (Taş kolon)

Vibro – yer değiştirme diğer bir adıyla taş kolon yöntemi, ince dane oranı %25'ten fazla olan zeminlerde yani vibro – kompaksiyonun etkisiz olduğu zeminlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemde granüler malzeme olarak çoğunlukla kullanılan kırma taş ile var olan zayıf zemin yer değiştirmektedir. İlk önce sonda ile kuyu şeklinde delik açılarak taş kolon malzemesi dökülmektedir. Ardından vibrasyonla sıkıştırma yapılmaktadır. Taş kolon imalatı sonrası üst zemin silindir ile sıkıştırılarak daha sağlam bir zemin elde edilmektedir. Vibro – yer değiştirme (taş kolon) yönteminin uygulandığı zeminler; normal konsolide killeri, ince turba tabakaları, suya doygun siltler ve alüvyal zeminlerdir. Bu yöntemin uygulaması, arazide uygulama biçimine göre üç gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.10).



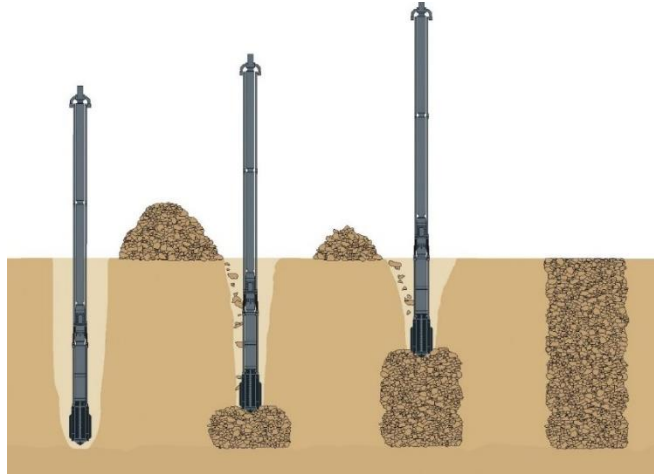
Şekil 2.10. Vibro – yer değiştirme yöntemi (Sarsılmaz, 2017).

Islak üstten besleme metodu (*wet top feed method*) uygulamasında, vibroflot zemine yıkama yaparak zemin içerisinde silindirik bir boşluk oluşturmaktadır. Bu boşluğa granüler malzeme olan taş dolgu, yüksek basınç ile birlikte zemine enjekte edilmekte ve vibroflot ile sıkıştırılmaktadır. Bunun sonucunda 0,8 ile 1,5 metre çaplı taş kolonlar elde edilmektedir (Şekil 2.11). Bu yöntem ile zeminin yer değiştirmesi daha homojen bir şekilde gerçekleşmiş olmaktadır.



Şekil 2.11. Islak üstten besleme yöntemi ile vibro – yer değiştirme imalatı.

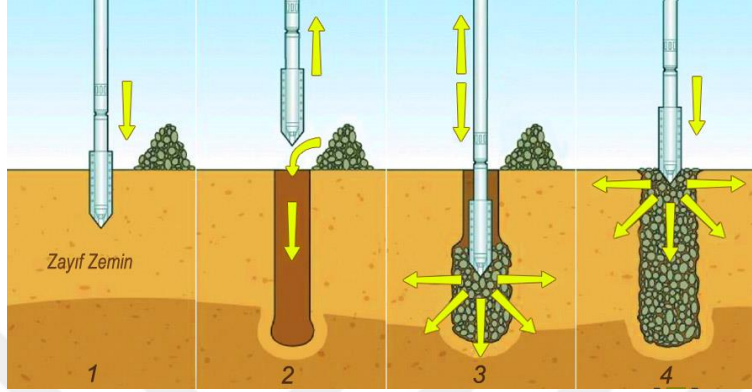
Kuru üstten besleme metodu (*dry top feed method*) ile granüler malzeme, kuru bir şekilde zemin yüzeyine serpildikten sonra vibrasyon uygulanarak zemine yerleştirilmektedir (Şekil 2.12). Bu uygulamanın işleyişinde, çamur oluşumunu engellemek için hava jeti kullanılmaktadır. Kuru üstten besleme yöntemi, yüzey seviyesindeki zeminin yer değiştirmesi için kullanılmasına rağmen kuyu çeperleri desteklenmediği için sadece belirli bir dayanıma sahip (kendini tutabilen) zeminlerde uygulanmaktadır.



Şekil 2.12. Kuru üstten besleme yöntemi ile vibro – yer değiştirme imalatı.

Kuru dipten besleme metodu (*dry bottom feed method*), vibroflot ve hava jeti ile zemine inilirken granüler malzemenin bir boru sistemi aracılığıyla dipten eklenmesi

uygulamasıdır (Şekil 2.13). Oluşan kolonların tipik çapları 0,6 – 0,8 metre arasında değişmektedir. Bu yöntem ile derinlerdeki zemin katmanlarının yer değiştirmesi amaçlanmaktadır. Taş kolon uygulaması yapılan zeminlerde %40 oranında daha az oturma görülmektedir ve kolonlar 30 metreden daha fazla derinliklerde de kullanılmaktadır (Mitchell ve Jardine, 2002).



Şekil 2.13. Kuru dipten besleme yöntemi ile vibro – yer değiştirme imalatı.

Vibro – yer değiştirme (taş kolon) yönteminin arazide uygulama biçimine göre üç gruba ayrılan uygulamalarının her biri farklı zemin koşullarına uygun olarak tercih edilmektedir. Örneğin; ıslak üstten besleme yöntemi daha fazla kumlu zeminlerde tercih edilirken, kuru üstten besleme yöntemi daha ince zeminler veya çakıl/kum karışımları için daha uygun olmaktadır. Vibro – yer değiştirme uygulamalarının dezavantajları ve uygulama esnasında karşılaşılan olumsuzlukları Mitchell ve Jardine (2002) tarafından Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.4. Olumsuz zemin koşulları ve olası sonuçlar (Mitchell ve Jardine, 2002).

Olumsuz zemin koşulları	Olası sonuçlar
Drenajsız kayma dayanımı 15 kN/m ² 'den düşük; yumuşak killler, siltler, siltli ince kumlar, 0,6 m'den kalın turba zeminler	Yanal destek sağlanamaması
Sert zemin, kontrolsüz boşluklu dolgu	Penetrasyon sağlanamaması ve büyük oturmalar oluşması
Yeraltı su seviyesi yükselmesi durumunda çökme, oturma durumu olabilecek gevşek dolgular	Dolgu otururken taş kolon üst kısmında oluşacak ani yanal destek azalması. Taş kolonların dren gibi davranıp suyun zemin içerisine girmesine izin vermesi
Kendi ağırlığı altında sıkışmaya devam eden dolgular	Kayma direncinin taş kolona transfer olması ve kolon üst kısmında yanal desteğin zamanla azalması
Kirli, metan gazı üretebilen zeminler	Taş kolonların gaz çıkışı veya sızıntı suyunun çıkışı için toplayıcı gibi çalışması
Şev topuğu yakınında yapılan uygulamalar	Şev stabilitesinde azalma olması
Ağaç yakınlarındaki zeminler	Ağaç köklerinin taş kolonun içerisine doğru büyüyerek kolonun formasyonunu bozabilmesi

Vibro – yer değiştirme yöntemi zemin iyileştirmelerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem zeminin direncini artırmak, oturma problemlerini çözmek, sıvılaşabilir zeminlerde iyileştirme sağlamak ve diğer pek çok uygulama için kullanılmaktadır. Bu nedenle, literatürde vibro – yer değiştirme yöntemi üzerine birçok araştırma yapılmış ve yayınlanmıştır.

Altun ve Aktar (2017) tarafından ortaya konulan çalışmada, yumuşak killi zeminde vibro – yer değiştirme kolonlarının davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde farklı çap ve uzunluklardaki kolonlar kullanılarak oturma, taşıma gücü ve deformasyon davranışları gözlemlenmiştir. Sonuç olarak vibro - yerdeğiştirme kolonlarının kil içerikli zeminlerde iyileştirme amacıyla kullanılabileceği ancak zemin

özelliklerinin ve kolon parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir.

El Naggat ve Lee (2017) tarafından yapılan çalışmada, vibro – yer değiştirme yönteminin aşırı konsolide kildeki etkinliği araştırılmıştır. Bu yöntem laboratuvar ölçekli ve sayısal simülasyonlar kullanılarak incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda, vibro – yer değiştirme yönteminin aşırı konsolide killerde de etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Kumar ve ark. (2019) vibro – yer değiştirme yönteminin çevresel zemine etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma içeriğinde, laboratuvar deneyleri kullanılarak taş kolonların zeminin kıvamını, özkütlesini ve diğer mühendislik parametrelerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuçlarda taş kolonların çevresel zemine iyileştirme sağladığı ve zeminin mekanik özelliklerini değiştirdiği görülmüştür.

Kuo ve ark. (2019) vibro – yer değiştirme yönteminin sıvılaştırılabilir zeminlerdeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada taş kolonların örnekleri, laboratuvar koşullarında hazırlanmış ve yük testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlarda vibro – yer değiştirme yönteminin sıvılaştırılabilir zeminlerdeki duraylılığı artırdığı gözlemlenmiştir.

2.1.2.2. Hidrolik iyileştirme

Hidrolik iyileştirme denilince akla susuzlaştırma veya drenaj gelmektedir. Susuzlaştırma veya drenaj, zeminin yeraltı su seviyesinin düşürülmesi yolu ile iyileştirme yapılması anlamına gelmektedir. İyileştirme yapılması gereken proje alanında, zeminin dane boyutuna göre uygulama yöntemleri farklılık göstermektedir. Bu yöntemlerde iri daneli zeminlerde suyun kuyu veya çukurda toplanıp pompalanması gerekmekte iken, ince daneli zeminlerde ön yükleme ve düşey dren yöntemleri kullanılmaktadır.

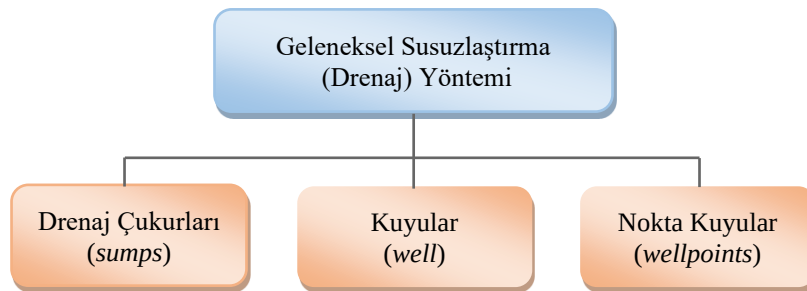
İnşaat mühendisliğinde zeminlerin susuzlaştırılması; kuru çalışma alanı sağlamak, şev duraylılığı, yanal basınç azaltımı, zemin sıkışabilirliğinin azaltılması, taşıma gücünün artırılması ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması amaçlarıyla yapılmaktadır. Hidrolik iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 2.14’te özetlenmiştir.



Şekil 2.14. Hidrolik iyileştirme yöntemi sınıflandırması.

Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yöntemleri

İnşaat alanlarındaki zemin iyileştirme çalışmalarında, suyun zeminden tahliyesi veya seviyesinin düşürülmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de hidrolik iyileştirme çalışmalarının içinde yer alan geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yöntemleridir. Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yöntemleri genellikle, zemindeki suyun basınç etkisini azaltarak toprak kaymasını ve oturma problemlerini önlemek amaçlı kullanılması ile birlikte zeminin kayma direncini artırarak temel dayanımında artış sağlamaktadır. Bu yöntemler özellikle kıyı bölgelerde, deniz dolgularında, ıslah edilmiş arazilerde, liman ve endüstriyel alanlar gibi su baskını riski yüksek bölgelerde tercih edilmektedir. Geleneksel susuzlaştırma yönteminin seçimi; zemin tipi, suyun türü, drenajın işlevi ve yapılan inşaatın özelliklerine göre değişim göstermektedir. Bu yöntem en yaygın kullanılanlara göre üç farklı teknikle sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yönteminin yaygın kullanılan teknikleri.

Drenaj çukurları; sıkı - iyi derecelenmiş granüler zeminlerde, kayalarda, geçirimsiz tabakaların üzerindeki geçirgen zeminlerde ve bir metreden daha sığ kazılarda drenaj sağlamak için açılan ukurlardır. Bu yöntem ile açılan drenaj çukurlarında yeraltı suyu toplanmakta ve ardından toplanan suyun pompalarla tahliye edilmesi sağlanmaktadır.

Kuyular (well); kum veya kumlu çakıl gibi zeminlerde drenaj çukurlarına benzer şekilde çalışmasına rağmen daha derin (10 – 20 m boy, 150 – 200 mm çap) kazılmakta ve daha büyük hacimlerde suyu tahliye etmektedir. Bu yöntemde çeşitli noktalarda kuyular açılmakta ve her bir kuyudan su tahliye edilmektedir. Genellikle suyun akışını hızlandırmak için eğimli arazilerde uygulanmaktadır.

Nokta kuyular (well points); iri daneli kumlar, çakıllar, siltli ve killi zeminlerde yeraltı suyunun tahliyesini hızlandırmak için açılan (apı 150 mm'den az, kuyu aralıkları 1 – 3 m) küçük (sığ) kuyulardır. Bu kuyular, proje alanlarındaki su seviyesini kontrol etmek ve derin kuyuların inşa edilmesinin mümkün olmadığı durumlarda uygulanmaktadır.

Geleneksel susuzlaştırma (drenaj) yöntemleri, zemin iyileştirme teknikleri arasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve bu yönteme dair birçok araştırma mevcuttur:

Fenton ve Griffiths (2000) tarafından yapılan çalışmada, zeminin mukavemet özellikleri üzerinde drenaj sistemlerinin etkisi incelenmiştir. Deneyler, farklı drenaj sistemleri (iç, dış ve vakumlu drenaj) kullanılarak laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Drenaj sistemleri, zeminin sürekli olarak susuzlaştırılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, zeminin mukavemet özelliklerinin her üç drenaj sistemi de dahil olmak üzere zaman içinde arttığı görülmüştür. Ancak i ve dış drenaj sistemleri, vakumlu drenaja göre daha az etkili olmuştur. Bu alışma, drenaj sistemlerinin zemin mukavemet özelliklerini artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Çanakçı ve evik (2015) tarafından, kumlu zeminlerde farklı drenaj sistemlerinin (yüzey, derinlik ve yatay) etkileri araştırılmıştır. Araştırmada üç farklı drenaj sistemi kullanılarak laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, yatay drenaj sisteminin diğer sistemlere göre daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca drenajın, zeminin sıkışma davranışını azalttığı ve zemin dayanıklılığını artırdığı

bulunmuştur. Ek olarak deneylerde, farklı boyutlardaki drenaj çubuklarının etkileri de incelenmiş ve daha büyük çubukların daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Araştırmanın sonuçlarında, yatay drenaj sistemi kullanılarak zemin iyileştirmesi yapmanın etkili bir yöntem olduğu ve daha büyük boyutlu drenaj çubuklarının daha iyi sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır.

Ön yükleme ve düşey dren kullanımı

Suya doymuş - kohezyonlu zeminler, düşük kayma direncine sahip oldukları için üzerilerine gelen gerilmeler altında büyük sıkışmalar yaşamaktadırlar. Bu tür problemli zeminlerde kullanılan bir iyileştirme yöntemi olan ön yükleme, zeminin oturma süresini azaltarak veya kayma direncini artırarak problemleri çözmeye yardımcı olmaktadır.

Ön yükleme yönteminde; üst yapıdan zemine aktarılabilecek yük, binanın inşasından önce verilerek zeminin önceden sıkışması sağlanmaktadır. Bu sayede zeminin su içeriği ve boşluk oranı azalarak, kayma direnci artmaktadır. Ön yükleme işlemi için normal konsolide yumuşak killi, siltli, organik zeminler ve yapay dolgular uygundur. Yüklemenin gerçekleştirildiği arazide geçirilen süre kritiktir ve zeminin istenilen oturma değerlerine ulaşabilmesi için gereken süre bazen çok uzun olabilmektedir. Böyle durumlarda, üst yapı yükünden daha fazla yük sürşarj olarak etki ettirilebilir veya drenajı hızlandırmak için drenler kullanılabilir. Ön yükleme ve düşey dren kullanımı başlığı altında üç farklı alt başlık incelenmektedir: düşey dren sağlayan yöntemler, düşey drensiz önyükleme ve düşey dren kullanılarak önyükleme.

Düşey dren sağlayan yöntemler; kalın ve homojen yumuşak kil tabakalarına veya düşük geçirgenliğe sahip zeminlere uygulanan ön yükleme, oturma hızını artırmak ve ön yükleme süresini kısaltmak için kullanılmaktadır. Bu yöntem, aniden uygulanan yüklerden kaynaklanan stabilite sorunlarını önlemeye yardımcı olmaktadır. Düşey drenler, boşluk suyu basıncının hızla sönmelerine yardımcı olarak drenaj yolu oluşturmaktadır. Şekil 2.16'da düşey dren uygulamasının örneği verilmiştir. Genellikle uygulamada iki farklı dren kullanılmaktadır: kum drenler ve yapay (geosentetik) drenler.

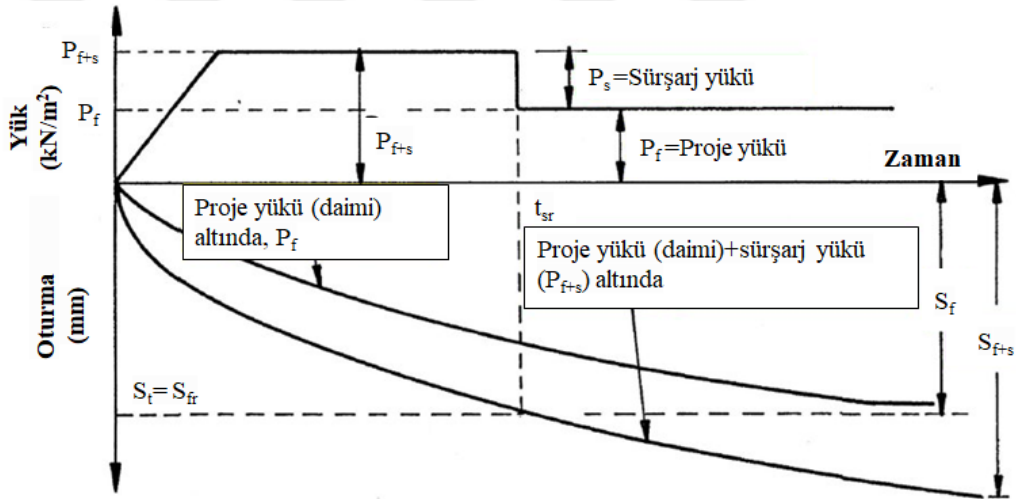


Şekil 2.16. Düşey dren uygulaması.

- Kum drenler; düşey drenlerin bir türüdür. Zeminin geçirimliliğine bağlı olarak 20 – 50 cm çapında ve 1,5 - 6 m aralığında uygulanmaktadır. Kum drenler, kumla doldurulmuş sondaj delikleri yardımıyla yapılarak kolay üretimi için fabrikasyon kılıf ile desteklenmektedir. Kum drenler, yol ve temel zeminleri üzerindeki dolgular gibi düşük ve orta derece yüklü yapıların drenajında kullanılmaktadır. Drenaj dolgusu olarak temiz kum kullanılmakta ve bazen de bir kollektör yardımı ile toplanan sular drenaj sistemine verilebilmektedir. Başarılı bir projenin temel esasları; ön konsolidasyon basıncının aşılması, birincil konsolidasyonun ikincil konsolidasyon oranına göre yüksek olması ve doğal drenaj tabakalarının bulunmamasıdır.
- Geosentetik drenler; büyük bir kısmı bant şeklinde olmaktadır. Bu drenler kolayca üretilir, saklanıp taşınabilir, düşük maliyetli ve çekme dayanımları sayesinde sürekliliği sağlanabilmektedir. Plastik drenlerin ise doğru şekilde kullanılması gereken belirli şartları vardır; örneğin geçirimlilikler zeminin geçirimliliğinden daha fazla olmalı, filtre yüksek yanal zemin basıncına dayanıklı olmalı ve suyun akışına engel olmamalıdır. Prefabrik drenler de mandrellerle zemine çakılmaktadır ve ankraj uygulamasının tıkanmaları önlemesi ve dreni istenilen derinlikte tutabilmesi amacıyla yapılmaktadır.

Düşey drensiz ön yükleme; ön yükleme işlemi, killi zeminlerde yapı inşaatı öncesinde zeminde meydana gelebilecek olumsuz etkileri azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, zemine belirli bir yük uygulayarak oturma miktarlarının yapı inşaatından önce gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu sayede, yapının inşaat sırasında karşılaşılabileceği zemin hareketleri azaltılmakta ve yapıya zarar verme riski en aza indirilmektedir.

Killi bir zemin üzerine yapı inşa edildiğinde, üst yapı yükü (P_f) altında konsolidasyon t_a süresinde gerçekleşmekte ve bu süre boyunca zeminin oturma miktarı S_f kadar artmaktadır. Sürşarj yük altında ise aynı oturma değerine t_b sürede ulaşılmaktadır. Sürşarj yük uygulanmış zeminin t_a süresi sonunda toplam oturma değeri S_{f+s} olarak ölçülmektedir. Önyükleme için yük – oturma grafiği Şekil 2.17’de verilmektedir (Bildik, 2017).



Şekil 2.17. Ön yükleme için yük – oturma grafiği (Bildik, 2017).

Bu durumda, zeminin ulaştığı konsolidasyon yüzdesi aşağıda verilen eşitlikteki gibi hesaplanarak yapıya uygun oturma değerleri belirlenmektedir (2.1).

$$U = \frac{S_f}{S_{f+s}} \quad (2.1)$$

S_f : t_a süresi sonunda zeminin oturma miktarını ve S_{f+s} : t_a süresi sonunda toplam oturma değerini göstermektedir.

Özetle ön yükleme işlemi, killi zeminlerde yapı inşaatı öncesi zemin stabilizasyonu sağlamak için kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, zemine belirli bir yük uygulanarak oturma miktarlarının yapı inşaatından önce gerçekleşmesini sağlayarak yapının olası zararlarını önlemektedir.

Düşey dren kullanılarak önyükleme: düşey dren tasarımı sırasında, drenlerin etkili çalışması için iki önemli kabul yapılmaktadır. İlk olarak, her bir drenin silindirik etki alanının bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Bu da drenlerin sadece bu alandaki zeminin drenajını yapabileceği anlamına gelmektedir (Das, 2018). İkinci olarak, homojen zeminin hızlı yüklenmesi sonucu sadece radyal su drenajı ve konsolidasyon olduğu kabul edilmektedir. Yani yatay permeabilite ve radyal konsolidasyon katsayısının sabit kaldığı varsayılmaktadır (Budhu, 2015).

Bu kabuller, düşey drenlerin etkinliğinin belirlenmesinde ve tasarımının yapılmasında büyük önem arz etmektedir. Tasarım yapılırken; drenlerin sayısı, aralığı, çapı ve uzunluğu gibi faktörler dikkate alınmaktadır. Ayrıca zeminin özellikleri ve yükleme koşulları da hesaba katılmaktadır.

Günümüzde zemin iyileştirme çalışmaları kapsamında ön yükleme ve düşey dren kullanımı oldukça yaygın yöntemlerdir. Bu yöntemlerin etkinliği ve performansı hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan birkaçı aşağıda verilmiştir:

Bir araştırmada; düşey drenler ve vakum ön yüklemesi yöntemi kullanılarak yumuşak zeminlerde nasıl bir davranış izlendiği incelenmiştir. Yazarlar bu yöntemin hızlı bir konsolidasyon elde etmek ve oturmayı azaltmak için kullanılabileceğini belirtmektedir. Makalede düşey drenler ile vakum ön yükleme tekniklerinin uygulanması için en uygun zemin özellikleri ele alınmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerin avantajları ve dezavantajları da en verimli sonuç elde etmek amacıyla tartışılmıştır. Sonuç olarak, düşey drenler ve vakum ön yüklemesi kullanılarak yumuşak zeminlerde iyileştirmenin etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır (Rahman ve Islam, 2015).

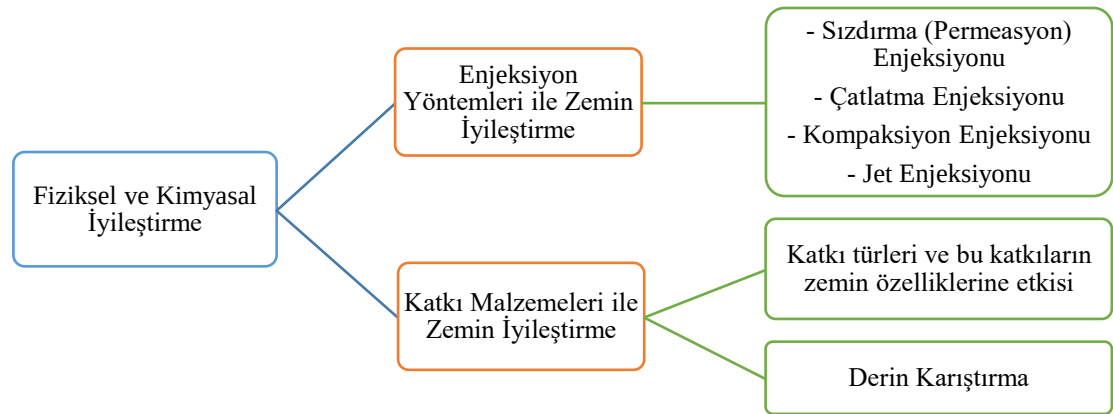
Oktavian ve ark. (2018) tarafından yapılan araştırmada, yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi için zemin iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Yazarlar yumuşak zeminlerin sıkışması, deformasyonu ve oturma miktarını azaltmak için farklı zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanılabileceğini

belirtmektedir. Bu kapsamda kum drenler, düşey drenler, kum enjeksiyonu ve vakum ön yüklemesi gibi farklı teknikler ele alınmaktadır. Ayrıca bu tekniklerin avantajları, dezavantajları ve uygulanabilirlikleri de tartışılarak çalışma hakkında ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

Narejo ve ark. (2019) tarafından, önceden imal edilmiş düşey drenlerin yumuşak zeminlerde iyileştirme uygulamalarının performansı incelenmektedir. Yazarlar düşey drenlerin oturmayı azaltmak, stabilizeyi sağlamak ve konsolidasyon süresini kısaltmak için kullanılabileceğini belirtmektedir. Makalede düşey drenlerin tasarımı, uygulama süreci, etkinliği ve örnek uygulama örnekleri ele alınmaktadır. Sonuçlarda ise düşey drenlerin yumuşak zemin iyileştirmeleri için etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır.

2.1.2.3. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme

Fiziksel iyileştirme yöntemi, enjeksiyon yöntemleri ile uygulanırken; kimyasal iyileştirme yöntemi, katkı malzemeleri kullanılarak yapılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal zemin iyileştirmesi sınıflandırması Şekil 2.18’de özetlenmiştir (Sarsılmaz, 2017).



Şekil 2.18. Fiziksel ve kimyasal iyileştirme sınıflandırması (Sarsılmaz, 2017).

Enjeksiyon yöntemleri ile zemin iyileştirme

Enjeksiyon; zemin dayanımını artırmayı, boşlukları doldurmayı, geçirgenliği azaltmayı amaçlayan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem; zemin veya zemin

- yapı arasındaki boşluklara yüksek basınç altında enjekte edilen malzeme sayesinde, boşlukların jel veya katı madde ile doldurularak zeminin mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Balkıs, 2009).

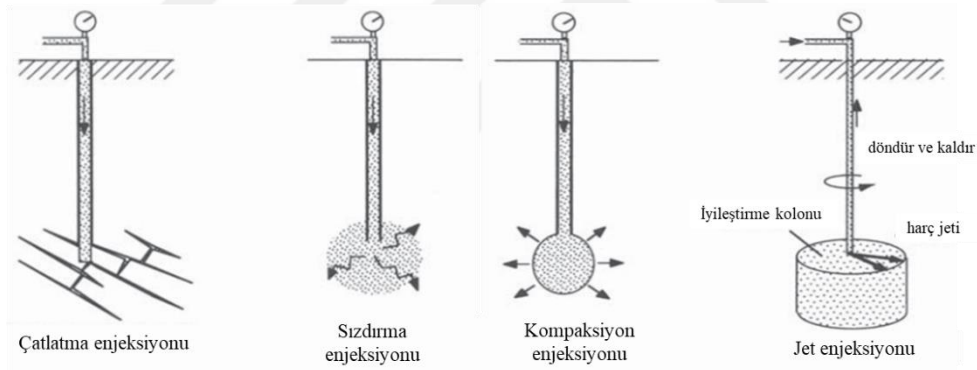
Enjeksiyon yöntemi; suyun akışını durduracak ya da azaltacak perde çekilmesi, aşırı oturmaların önlenmesi, tünel kazıları esnasında hareket kontrolü, yamaç duraylılığının sağlanması gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Fakat enjeksiyon uygulamaları için kullanılabilecek malzemeler ve parametreler her durumda aynı olmamaktadır. Enjeksiyon malzemesi ve parametreleri, zemin koşulları (dane dağılımı, bağıl birim hacim ağırlık, gerilmeler vb.) ve uygulama amacına bağlı olarak özel tasarlanmaktadır (Tunçdemir, 2004). Performans özellikleri açısından enjeksiyon malzemeleri genellikle üç farklı türde sınıflandırılmaktadır: daneli karışımlar, solüsyonlar ve emülsiyonlar.

- Daneli karışımlar; genellikle çimento, kil, bentonit ve kum gibi malzemelerin karışımından oluşmakta ve Bingham sıvısı özelliği göstermektedir. (Bingham sıvısı, harekete geçmesi için minimum bir kayma gerilimi gerektiren viskoz bir sıvıdır. Yüksek kayma gerilimi uygulandığında, sıvı plastik hale gelir ve lineer bir akış davranışı gösterir.) Killi şerbetler, zeminin geçirimsizliğini ve dayanımını artırmak için kullanılırken; çimento şerbetleri, hem zeminin boşluklarını doldurarak hem de zeminin dayanımını artırarak zemin iyileştirme işlemini sağlamaktadır. Ancak enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon parametreleri zemin koşullarına ve uygulama amacına göre uygun seçilmelidir. Su/çimento oranı da çimento şerbeti uygulamasında önemli bir parametre olmakta ve 0,5/1 ile 5/1 arasında değişebilmektedir. Düşük su/çimento oranı dayanımı artırsa da enjekte edilebilirliği azaltmaktadır (Özocak, 1994).
- Koloid solüsyonlar; zaman içinde viskozitesi artan akışkanlar iken saf solüsyonlar ise prizlenme sürecine kadar viskoziteleri artan Newton akışkanlarıdır. Organik monomerlerden yapılan kimyasal harçlar, Newton akışkanları veya organik reçineler olarak bilinirken viskoziteleri suya benzer ve priz oluşana kadar değişim göstermezler. Kimyasal enjeksiyon, genellikle kaba kumlarda veya çakıllı zeminlerde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile temel altındaki zemin istenilen seviyeye kadar blok oluşturmakta ve güvenli bir temel kazısı yapılmaktadır.

- Emülsiyonlar; gazların sıvı içindeki dispersiyonlarıdır ve pek çok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Gazın hacminin sıvının hacmine oranı olan kabarma sayısı, emülsiyonların özelliklerinin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Zeminin boşluk oranına eşdeğer olan kabarma sayısı, emülsiyonların kararlılığı ve yapısal özellikleri ile ilgili bilgiler sağlarken emülsiyonların çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılması için önemli bir özellik kabul edilmektedir.

Enjeksiyon malzemeleri, zemin ve kaya ortamlarında kullanılan yapısal elemanların güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. İdeal enjeksiyon malzemeleri; düşük viskoziteli, kontrol edilebilir priz süresine sahip, yüksek dayanım sağlayan, kalıcı ve ekonomik olmaktadır.

Enjeksiyon yöntemleri, zemin ve kaya ortamına nüfuz etme biçimlerine göre dört grupta incelenmektedir: sızdırma enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu ve jet enjeksiyonu. Zemin içerisine yerleştirilmesine göre temel enjeksiyon yöntemleri Şekil 2.19’da gösterilmektedir (Tunçdemir, 2004).



Şekil 2.19. Enjeksiyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Tunçdemir, 2004).

Her enjeksiyon yöntemi tüm zemin tiplerinde uygulanabilir değildir. Bu nedenle, Mitchell ve Jardine (2002) gibi araştırmacılar tarafından farklı zemin türleri için uygun enjeksiyon yöntemleri belirlenmiştir (Tablo 2.5).

Tablo 2.5. Farklı zemin türleri için uygun enjeksiyon yöntemleri (Mitchell ve Jardine, 2002).

Zemin Tipi	Enjeksiyon Yöntemi			
	Sızdırma	Çatlatma	Kompaksiyon	Jet
Çakıl	√	–	–	–
Kum	√	√	√	√
Silt	–	√	√	√
Kil	–	√	√	√
Ayrışmış kaya	√	√	√	√
Fisürlü kaya	√	√	√	–
Boşluklu zemin	–	–	√	–
Dolgular	–	√	√	√

Sızdırma (permeasyon) enjeksiyonu; düşük viskoziteli bir enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşluklara düşük basınçlar ile nüfuz etmesiyle gerçekleşmektedir. Bu yöntem, zeminin hacmi ve yapısında herhangi bir değişiklik oluşturmadan uygulanabilmekte ve enjekte edilen malzeme zamanla sertleşerek zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini değiştirmektedir.

Sızdırma (permeasyon) enjeksiyonu için çimento şerbeti veya saf kimyasal çözeltiler kullanılabilir. Fakat enjeksiyon malzemesi zemin içerisinde dar ve kıvrımlı boşluklardan geçebilecek düşük viskoziteye ve yeterli inceliğe sahip olmalıdır. Ayrıca, daneli enjeksiyonlarda tıkanıklık oluşma problemi yaşanabileceğinden yeterli incelik sağlanmaktadır. Bunların yanı sıra enjeksiyon malzemesinin erken dayanımı düşük olmakta, böylece sonraki enjeksiyon akışı bir öncekinin içinden geçebilmektedir. Son olarak, zeminin yapısı iyi anlaşıldığında enjeksiyon hacmi ve basıncı belirlenebilmektedir. Bu da hedeflenen zemin iyileştirme çalışmaları için gereklidir.

Çatlatma enjeksiyonu; düşük geçirimsizliğe sahip ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan bir tekniktir ve işleyiş prosedüründe zeminin çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda çatlatılması sonucu kontrollü bir şekilde sıkıştırılması sağlanmaktadır. Enjeksiyon basıncı ve mevcut gerilmelere bağlı olarak oluşan çatlakların boyu, genişliği ve hacmi değişmektedir. Normal konsolide homojen bir zeminde ilk çatlaklar düşey doğrultuda meydana gelmekte ve yatay gerilmeleri artırmaktadır.

Aynı noktada birden fazla çatlatma enjeksiyonu yapıldığında, her enjeksiyon sonrası malzemenin sertleşmesi beklenmekte ve sertleşme gerçekleşikten sonra yeni enjeksiyon yapılmaktadır. Pratikte meydana gelecek çatlakların yönü zeminin içindeki çatlaklara, zayıf bölgelere veya fisürlere bağlı olarak değişim göstermektedir.

Çoklu enjeksiyon yapılabilmesi için Tube a manchette (TAM) adı verilen sistem kullanılmaktadır. Bu sistem ile esnek enjeksiyon borusu, tıkaçlar (*packer*) yardımı ile bir TAM'dan diğerine hareket ettirilebilmektedir. Böylece bu sistem ile birçok enjeksiyon noktasından çoklu enjeksiyon yapılabilir.

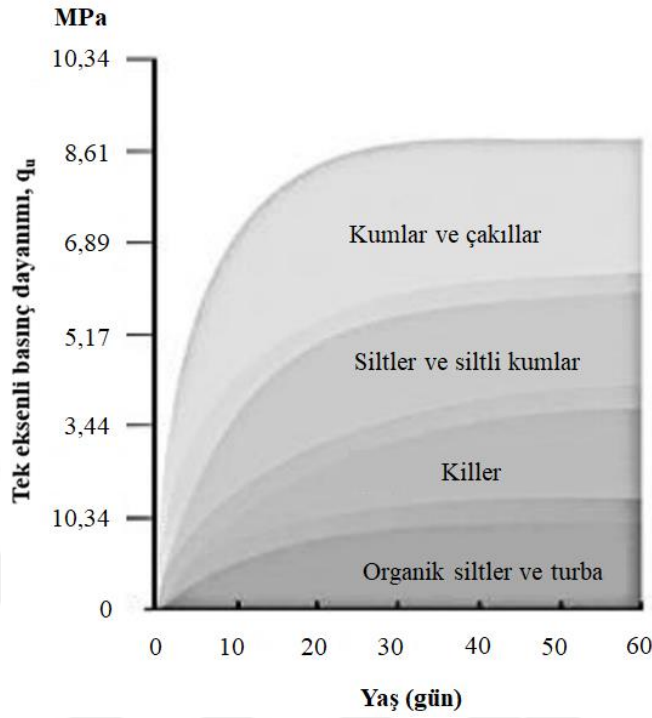
Kompaksiyon enjeksiyonu, silt ve kumdan oluşan zeminlerde kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemin amacı; yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşluklara girmeden enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle halinde kalması ve bu sayede enjekte edilen malzemeyle zeminlerin sıkıştırılması veya üzerindeki yapıların kaldırılmasıdır (ASCE, 1980).

Kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi, derin sıkıştırma yöntemleri ile benzerlik göstermektedir. Kompaksiyon enjeksiyonunun derin sıkıştırma yöntemlerine göre daha az atık ve kirlilik oluşturması, kullanılan ekipmanların dar bölgelerde bile çalışabilmesi ve mevcut yapılar üzerindeki titreşim etkilerinin az olması nedeniyle kompaksiyon enjeksiyonu giderek daha yaygın hale geldiği gözlenmektedir. Bu yöntem, özellikle bölgesel zemin tabakalarının efektif olarak sıkıştırılması için ideal bir seçenek olarak görülmektedir.

Jet enjeksiyonu; zayıf zeminlerde güçlendirme ve stabilizasyon amaçlı kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, yüksek basınçlı (400 – 500 bar) çimento şerbeti özel delgi makinesi ile delinmiş zemine jetlenerek zemin aşındırılır ve karıştırılır. Böylece yerinde silindirik kolon (*soilcrete*) oluşturulmakta ve zeminin dayanımı artırılmaktadır.

Jet enjeksiyonu yöntemi; geniş bir zemin tipleri yelpazesinde uygulanabilmektedir, ancak bu zeminlerin mühendislik parametreleri aşınabilirliği ve oluşturulan karışımın dayanımı üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Örneğin; granüler zeminler en yüksek aşınabilirliği gösterirken, plastik killer en az aşınabilirliği göstermektedir. Oluşturulan karışımın dayanımı, zeminin özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Şekil 2.20’de farklı zemin tiplerine uygulanan jet enjeksiyonu sonucunda oluşan zemin – enjeksiyon karışımlarının serbest basınç dayanımı değerleri verilmiştir.



Şekil 2.20. Farklı zemin tiplerine göre zemin – enjeksiyon karışımlarının serbest basma dayanımları (Hayward Baker, 2010).

Ülkemizde son 10 – 15 yılda geoteknik mühendisliği uygulamalarında jet enjeksiyonu yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ve bu yöntem, yapıların temelinde ve zeminde meydana gelen problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar vermektedir.

Enjeksiyon yöntemleri, zemin iyileştirme alanında sıkça kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Bu yöntemler ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazılarına aşağıda değinilmektedir.

Bajracharya ve Park (2018), sızdırma (permeasyon) enjeksiyonu yöntemiyle yapılan zemin iyileştirme çalışmalarını ve bu çalışmaların sonuçlarını incelemiştir. Bu makale kapsamında, emdirme enjeksiyonu kullanılarak zemin iyileştirmesi uygulamasının yeraltı suyu kontrolü üzerine etkileri üzerinde durulmaktadır. Emdirme enjeksiyonu için kullanılan malzemeler, enjeksiyon teknikleri ve parametreleri gibi değişkenlerin yer aldığı makalenin vardığı sonuçlara göre zeminin dayanımında ve sıkıştırılabilirliğinde iyileşme gözlemlenmiştir. Bunların yanı sıra, emdirme

enjeksiyonu ile yeraltı su seviyesinin düşürülmesi sağlanarak su kontrolü de elde edilebilmektedir. Bu çalışmanın çıkarımlarında, emdirme enjeksiyonunun zemin iyileştirme ve yeraltı suyu kontrolü gibi çeşitli alanlarda kullanılabilen etkili bir yöntem olduğu vurgulanmaktadır.

Chen ve ark. (2019) tarafından, çatlatma enjeksiyonu yöntemi ile yapılan zemin iyileştirme çalışmaları ve bu çalışmaların sonuçları ele alınmaktadır. Makalede çatlatma enjeksiyonunun ne olduğu, nasıl uygulandığı ve zemin iyileştirme çalışmalarında nasıl kullanıldığı hakkında bilgiler verilmektedir. Çatlatma enjeksiyonu uygulamasından önce zeminin özelliklerinin dikkatle incelenmesi ve uygun bir enjeksiyon programı belirlenmesi gerektiği üzerinde vurgulama yapılmıştır. Ayrıca makalede, çatlatma enjeksiyonunun etkisini ölçmek adına kullanılan laboratuvar ve saha testleri de açıklanmıştır. Bu yöntem ile yapılan çalışmaların sonuçları; zeminin sıkışması, çatlakların genişlemesi ve yüzeyin düzleştirilmesi gibi olumlu etkiler göstermektedir. Bunun yanı sıra, çatlatma enjeksiyonu uygulaması sonucunda zeminin kayma direnci artırılabilen ve yapıların daha güvenli hale getirilebilmesi sağlanabilmektedir.

Şimşek ve Korkut (2014) tarafından; zemin iyileştirme teknikleri arasında yaygın olarak kullanılan jet enjeksiyonunun ilke ve uygulama yöntemleri, uygulama alanları, parametreleri, uygulama etkileri ele alınmaktadır. Çalışmada jet enjeksiyonunun esas prensipleri, enjeksiyon malzemeleri, enjeksiyon sonrası deformasyon davranışları, güçlendirme etkisi ve maliyet analizi gibi konular yer almaktadır. Enjeksiyon parametreleri arasında; basınç, enjeksiyon malzemesi, jet grout kolon çapı ve aralığı, delik açısı, enjeksiyon süresi, zeminin su içeriği ve enjekte edilen hacim gibi faktörlerin belirleyici olduğu belirtilmektedir. Ayrıca jet enjeksiyonunun uygulanabileceği alanlar arasında; bir barajın temelindeki boşluğun kapatılması, havaalanı pistlerinin güçlendirilmesi, tünel açılmasında zemin güçlendirme işlemi ve zemindeki oturmaların azaltılması için yapılan çalışmalar yer almaktadır. Makalede yer alan uygulama örnekleri, jet enjeksiyonunun başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Jet enjeksiyonu teknolojisinin zemin iyileştirme ve güçlendirme işlemleri için etkili bir yöntem olduğu ve geniş bir uygulama alanına sahip olduğu vurgulanmaktadır.

Ayvaz ve İçöz (2016) tarafından sunulan makalede, farklı zemin tiplerinde değişken çap ve aralıklı jet grout uygulamaları yapılarak performansları ölçülmüştür. Jet grout kolon aralıkları 0,5D, D ve 2D (D: jet grout kolon çapı) kabul edilmiş ve optimum aralığın zemin tipine bağlı olduğu gösterilmiştir. Özellikle kumlu zeminlerde daha geniş jet grout kolon aralıklarının kullanılması önerilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan farklı jet grout kolon çaplarına göre daha büyük kolon çaplarının performansı yükselttiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, jet grout uygulamalarında optimum parametrelerin belirlenmesine yardımcı olacak önemli bir katkı sağlamaktadır. Araştırma sonuçlarına göre jet grout aralığı arttıkça etki alanının da artış gösterdiği ve daha geniş bir zemin bölgesinin iyileştirilebildiği görülmüştür. Ancak jet grout kolon aralığının artması jet grout çapının azalması anlamına geldiğinden; optimum jet grout kolon aralığı seçimi yapılmadan önce jet grout çapı, zemin özellikleri, uygulama koşulları gibi diğer faktörlerin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu sonuçlar, jet grout uygulamalarında kullanılan malzemelerin mühendislik parametrelerini iyileştirmek ve uygulamanın verimliliğini artırmak için önem arz etmektedir.

Katkı malzemeleri kullanılarak zemin iyileştirme

Bu bölümde, granüler malzemeler (çimento, kireç vb.) veya kimyasal bileşiklerin zemine ilave edilmesiyle gerçekleştirilen zemin iyileştirme yöntemleri ele alınmıştır. Bu yöntemler sayesinde; zeminin dayanımı artırılabilen, deformasyon direnci yükseltilebilen, hacimsel stabilite sağlanabilen, geçirgenlik azaltılabilen ve duraylılık artırılabilir.

Katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirme yöntemlerinin ilk kısmında, iyileştirme çalışmalarında kullanılan katkı malzemeleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve daha sonraki kısımda ise derin karıştırma yöntemi üzerinde durulmuştur.

Katkı tipleri ve bu katkıların zemin özelliklerine etkisi: Bu kısım, zemin iyileştirme işlemleri için kullanılan katkı malzemelerinin özelliklerini ve zeminin mühendislik parametreleri üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Zemin iyileştirme yöntemleri için kullanılan malzemelerin etkilerini anlamak ve doğru bir şekilde uygulayabilmek için çimento, kireç, çeşitli geosentetik malzemeler ve kimyasal katkıları gibi malzemelerin

zemin tiplerine uygunluğu, doğru kullanım miktarı ve zeminin hangi özelliklerini geliştirebileceği irdelenmiştir.

- Çimento stabilizasyonu: Eski zamanlarda, zemin iyileştirme için kullanılacak katkı malzemelerinin seçimi genellikle “kumlu zeminler için çimento, killi zeminler için kireç” şeklinde basit kurala dayanmaktadır. Ama gelişen teknoloji ve araştırmalar ışığında çimento stabilizasyonunun birçok farklı zemin türüne uygulanabildiği görülmektedir. Çimento katkısı ile zemin iyileştirmesi uygulamaları; zemine mukavemet kazandırmakla birlikte geçirgenliği azaltır, dayanıklılığı artırır ve şişen killerin hacim stabilitesini artırır; ancak diğer zemin türleri için de büzülme problemleri oluşturabilmektedir. Büzülme problemleri genellikle yüksek çimento oranlarına sahip zeminlerde ortaya çıkmaktadır. Zemin - çimento karışımlarının özelliklerinde meydana gelen değişimler Tablo 2.6’da karşılaştırılmıştır. Ayrıca çimento stabilizasyonu uygulanacak zeminlerde dört önemli parametreye dikkat edilmektedir: Miktar, karıştırma, sıkıştırma ve kür.

Tablo 2.6. Zemin – çimento karışımlarının özellikleri (Anon, 1990).

Zemin tipi	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü, E (Mpa)	CBR	Geçirimlilik (m/s)	Büzülme	Yorum
GW, GP, GM, GC, SW	6,5	2×10^4	>600	Düşer ($\approx 2 \times 10^{-7}$)	Göz ardı edilebilir.	Az çimento kullanılırsa iyi malzemedir.
SM, SC	2,5	1×10^4	600	Düşer	Çok az	İyi kaliteli malzemedir.
SP, ML, CL	1,2	5×10^3	200	Düşer ($\approx 1 \times 10^{-9}$)	Az	Orta kalitede malzemedir.
ML, CL, MH, VH	0,6	$2,5 \times 10^3$	< 100	Artar	Orta	Zayıf malzemedir.
CH, OL, OH, Pt	< 0,6	1×10^3	< 50	Artar ($\approx 1 \times 10^{-11}$)	Yüksek	Karıştırması zor, aşırı çimentoya ihtiyaç duyar.

Bu değerler optimum miktarda çimento karışımları için verilmiştir.

- Diğer katkılar ile stabilizasyon: Farklı türdeki katkı malzemeleri zeminin özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Örneğin; uçucu kül, bitüm, sodyum klorür, sodyum hidroksit, magnezyum klorür ve geosentetikler gibi fiziksel ve kimyasal katkılar zeminin parametrelerine iyileştirici etkiler göstermektedir. Bu katkı malzemelerinin zemin özelliklerine etkisi hakkında literatürde birçok araştırma yer almaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Dixit ve ark. (2016) tarafından yazılan makalede, yumuşak zeminlerin mühendislik parametreleri üzerinde uçucu külün etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada uçucu kül katkısının, zeminin temel özellikleri (su geçirgenliği, optimum su içeriği, basınç dayanımı ve kayma dayanımı gibi) üzerindeki etkileri incelenmektedir. Çalışmada uçucu külün farklı oranları kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, uçucu kül katkısının zeminin direncini artırdığı ve geçirgenliğini azalttığı bulunmuştur.

Li ve ark. (2017) tarafından, uçucu kül ve geosentetiklerin zemin iyileştirmelerindeki etkileri incelenmektedir. Bu etkileri gözlemlemek için çeşitli oranlarda uçucu kül ilave edilerek stabilize edilmiş zemin örnekleri, farklı geosentetikler ile kaplanarak deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, uçucu kül katkısı ve geosentetik kaplama kombinasyonunun zemin parametrelerinde önemli bir iyileştirme sağladığını göstermektedir. Buna ek olarak çalışmada, optimum uçucu kül oranının %10 olduğu tespit edilmiştir.

Bitümün farklı oranlarda kullanılarak zemin iyileştirmelerindeki etkisi Kumar ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmada bitüm oranları; %2, %4 ve %6 olarak seçilmiş ve zeminin mühendislik parametreleri üzerindeki tesiri incelenmiştir. Sonuçlarda, bitüm oranının artması ile zeminin mukavemet özelliklerinde artış görüldüğü kanıtlanmıştır.

Emmanuel ve Amadi (2019) lateritik bir zemin üzerinde kalsiyum klorürün etkisini araştırmışlardır. Deneyler farklı oranlardaki kalsiyum klorür solüsyonları ile zemin örneklerinin karşılaştırılması durumunda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ile kalsiyum klorür katkısının, zeminin optimum su içeriğini azalttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı artırdığı bulunmuştur. Ayrıca kalsiyum klorür katkısının, zeminin

dayanım özelliklerini değiştirdiği ve zeminin direncini artırdığı görölmüştür. Ancak yüksek oranlarda kalsiyum klorür katkısı, zeminin kayma direncinde azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlarda kalsiyum klorürün lateritik zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmede etkin bir katkı malzemesi olabileceği bulunmuştur.

Derin karıştırma yöntemi: Zemin iyileştirmelerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; yumuşak killeri, organik zeminler ve kumlu zeminlerde uygulanmakta ve bağlayıcı malzeme olarak kireç veya çimento kullanılmaktadır. Karıştırma işlemi, ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar kullanılarak yapılmaktadır. Bu işlem sonucunda, zemin içerisinde rijit veya yarı rijit kolonlar – duvarlar oluşturulmaktadır. Derin karıştırma yönteminin temel amaçları zeminin dayanımını ve dayanıklılığını artırmak; zeminin geçirimsizliğini, sıkışabilirliğini, su içeriğini ve sıvılaşma potansiyelini azaltarak mühendislik parametrelerini iyileştirmektir. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları şekil 2.21’de açıklanmıştır (Federal Highway Administration, 2013).

Derin karıştırma yönteminin uygulama alanları

Hidrolik sızdırmazlık perdesi: Kazı alanlarına uygulanan dayanma yapılarının iç veya alt kısımlarında yer alan yeraltı suyu seviyesinin kontrol altında tutulması amacıyla kullanılmaktadır. Bu yapı, suyun yapıya sızmasını ve yapılan için daha sağlam ve güvenli olmasını sağlamaktadır.

Kazı destek duvarları: Derin kazılar sırasında, zemin basıncının yarattığı yatay kuvvetlere karşı direnç sağlamak için çelik elemanlarla birlikte kullanılan destek duvarlarıdır.

Zemin iyileştirme: Tekil elemanlar veya sürekli paneller, donatı gibi kullanılarak, zayıf - sıkışabilirliği yüksek zemin kütleleri iyileştirilmektedir.

Sıvılaşma kontrolü: Zeminin sıvılaşma ve yanal yayılma potansiyelini azaltmak için hücresel veya birbiriyle kesişen grid şeklinde derin karıştırma kolonları oluşturulmaktadır. Bu yapılar sayesinde, zemin sismik durumlarda daha dayanıklı hale getirilerek, sıvılaşma riski azaltılmaktadır.

Çevre ışlahı: Çevresel olarak tehlikeli atıkların etraflarında bulunan zeminin kirlenmesini önlemek için özel olarak tasarlanmış malzemelerin kullanıldığı duvar veya bloklar inşa edilmektedir.

şekil 2.21. Derin karıştırma yöntemi uygulama alanları (Federal Highway Administration, 2013).

Literatürde derin karıştırma yöntemiyle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Kıvrak ve ark. (2014) tarafından sunulan çalışmada, kumlu zeminlerde sıvılaşmayı önlemek amacıyla uygulanan derin karıştırma yönteminin laboratuvar ölçeğindeki performansı değerlendirilmiştir. Bu araştırma kapsamında; karıştırma parametreleri olarak karıştırıcı başına düşen delme derinliği, karıştırıcı adedi, karıştırma süresi ve karıştırıcı hızı gibi faktörler değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, karıştırıcı başına düşen delme derinliğinin artırılmasının karıştırıcı adedinin artırılmasından daha etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Ayrıca karıştırma süresi ve karıştırıcı hızı gibi diğer parametrelerin de derin karıştırma etkinliği üzerinde bir etkisi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışmada, derin karıştırma yönteminin sıvılaşmayı önlemede etkili bir yöntem olduğu ve bu yöntemin optimize edilerek farklı zemin koşullarına uygun şekilde uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Singh ve Kumar (2017), derin karıştırma yöntemi ile uygulanan uçucu kül ve pirinç kabuğu külü katkılı kumun davranışını incelemiştir. Araştırma içeriğinde uygulanan deneylerde, farklı oranlarda uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kullanılarak karışımlar elde edilmiş ve bu karışımlar, derin karıştırma yöntemi ile birbirine homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Sonuçlarda uçucu kül ve pirinç kabuğu külü katkılı kumun, derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilebileceği vurgulanmıştır. Ancak fazla miktarda katkı kullanımı kumun yüksek sıkıştırma direncine sahip olmasına rağmen mukavemet değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu çalışma, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıkların derin karıştırma yöntemiyle kullanılabileceğini ve bu katkıların zemin iyileştirme projelerinde kullanılmasının çevresel açıdan faydalı olabileceğini göstermektedir.

Ma ve Yang (2018), zemin iyileştirmesi çalışmaları için derin karıştırma yönteminin sayısal olarak incelenmesi hakkında bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, derin karıştırma yöntemi kullanılarak iyileştirilmiş bir zemin örneği için sayısal analiz yapılmakta ve analizde zemin parametreleri, karıştırma parametreleri ve karıştırma çamuru özellikleri gibi değişkenlerin etkisi irdelenmektedir. Ayrıca zeminin mukavemeti, yer değiştirmesi ve sıkıştırılması gibi performans ölçütleri farklı

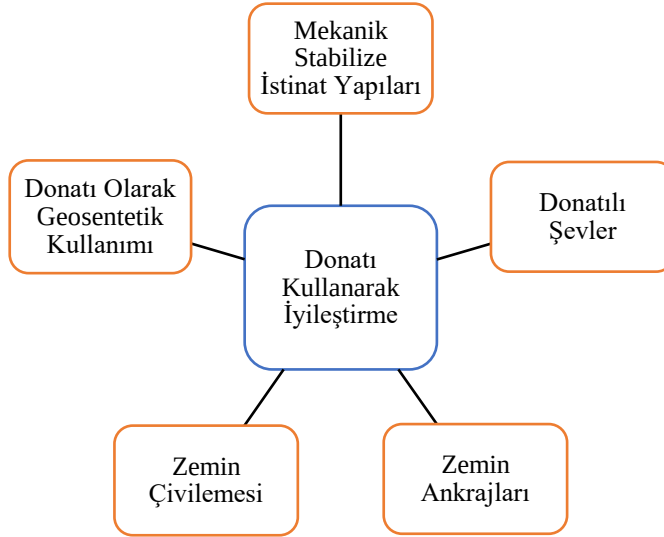
parametreler ile değiştirilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda uygun parametrelerin kullanımı ile derin karıştırma yönteminin zemin iyileştirme uygulamalarında etkin bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Ozawa ve Yasufuku (2018) tarafından, zayıf zeminlerin derin karıştırma yöntemiyle iyileştirilmesinde kullanılan su miktarının etkisini inceleyen bir araştırma sunulmuştur. Bu araştırma kapsamında yapılan deneylerde, su miktarı değiştirilerek farklı karıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarında, su miktarının artışıyla karıştırma işleminin etkinliğinde azalma görülmüş ve fazla su katkısı zeminde oluşan gözenekli yapıyı bozarak istenilen etkinliği yok etmiştir. Bunun yanı sıra, daha düşük su miktarlarıyla yapılan karışırtmalarda daha yüksek sıkışma direnci ve daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu makaleden çıkarılan sonuç, derin karıştırma yönteminde su miktarının uygun bir şekilde kontrol edilmesi ile daha etkili sonuçlar elde edilmesi olmuştur.

Kolay ve ark. (2019), derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin davranışını incelemişlerdir. Bu makalede yapılan deneyler, değişen çimento malzeme miktarları (%5, %7,5 ve %10), farklı karıştırma hızları (25, 35 ve 50 dev/dk) ve farklı karıştırma süreleri (5, 10, 15 dakika) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre çimentolu malzeme miktarındaki artışla birlikte zeminin mukavemeti de artmaktadır. Ayrıca karıştırma hızının artması ve karıştırma süresinin uzaması da zeminin mukavemetini artırmaktadır. Ek olarak deneylerde, derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilmiş zeminlerin suda çözünmüş tuzlara karşı daha dayanıklı hale geldiği gözlemlenmiştir.

2.1.2.4. Donatı kullanılarak zemin iyileştirme

Donatı kullanılarak iyileştirme, zemine çekme dayanımı kazandırmak için bir malzeme kullanarak zeminin güçlendirilmesi işlemidir. Bu güçlendirme zemin içine yerleştirilen lif, şerit, çubuk veya ağ gibi malzemelerle sağlanmaktadır. Donatılar, arazide çivileme veya ankrajlama gibi yöntemler ile uygulanabilmekte veya beton, çelik ve sentetik elemanlarla yapılan istinat yapıları şeklinde kullanılabilir. Bu bölümde donatı kullanarak iyileştirme beş ana başlık altında Şekil 2.22’de görüldüğü gibi incelenmiştir (Sarsılmaz, 2017).



Şekil 2.22. Donatı kullanarak iyileştirme sınıflandırması (Sarsılmaz, 2017).

Mekanik stabilize istinat yapıları

Mekanik stabilize toprakarme istinat duvarları, dolgu zeminlerin arkasında kullanılan ve içerisine metal şerit, geotekstil, geogrid gibi donatı malzemeleri yerleştirilerek yapılan stabilizasyon yapılarıdır. İstinat duvarı yapımında öncelikle, donatı elemanlarının kopma ve sıyrılma özellikleri ile istinat duvarı yüzey elemanlarının bütünlük analizleri gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra istinat yapısının dış stabilitesi; kayma, dönme, taşıma kapasitesi gibi faktörlerin incelenmesi ile belirlenmektedir.

Literatürde yapılan araştırmalara göre mekanik stabilize toprakarme (donatılı zemin) istinat duvarları; yüksek mukavemet, düşük deformasyon ve yerel kaymaların azaltılması gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle yapılar, özellikle zorlu zemin koşullarının olduğu alanlarda tercih edilmektedir. Ancak istinat yapısının dış stabilitesinin kontrolünün sağlanması için gerekli olan donatı malzemeleri ve yapısal özelliklerin doğru seçilmesi, tasarım ve yapım aşamasında dikkat edilmesi gereken kritik unsurlar olmaktadır. Mekanik stabilize toprakarme istinat duvarları hakkında literatürde yer alan araştırmalardan birkaçı aşağıda özetlenmiştir.

Karavaşin ve Işık (2017), çok katmanlı geogrid donatılı yumuşak toprakarme istinat duvarlarının davranışını sayısal olarak analiz etmiştir. Bu analizler için Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Çalışmada geogrid donatı malzemesinin seçimi, yerleştirme

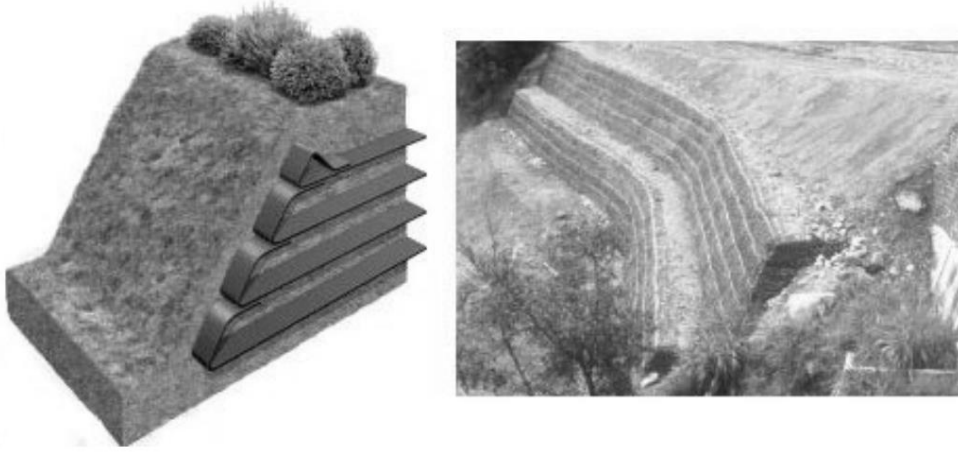
yöntemi ve yerleştirme aralığı gibi faktörlerin etkisi incelenmektedir. Ayrıca farklı duvar yükseklikleri için yapılan analizler sonucunda, duvar yüksekliğinin artması ile birlikte etkileşim derinliğinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çok katmanlı geogrid donatılı istinat duvarlarının başarılı bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi için malzeme seçiminin yanı sıra yerleştirme yöntemi ve aralığı gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Erdem ve Kaya (2019) tarafından yayınlanan çalışmada, çok katmanlı geogrid donatılı yumuşak toprakarme istinat duvarlarının davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla Abaqus yazılımı kullanılarak farklı duvar açıklıkları, zemin cinsleri, zemin su içerikleri ve geogrid donatı tipleri için analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre geogrid donatılı istinat duvarları, geotekstil donatılı olanlara göre daha iyi bir performans sergilemektedir. Bunun yanı sıra geogrid donatı tipi ve konumunun, duvar davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir.

Şahin ve Kardeş (2019) tarafından, metal şerit donatılı istinat duvarlarının tasarımı ve davranışı hakkında bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada istinat duvarının boyutları, metal şeritlerin çapları ve aralıkları gibi tasarım parametrelerinin duvar davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan sayısal analizler sonucunda, tasarım parametrelerinin duvarın stabilitesi ve taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda elde edilen veriler, metal şerit donatılı istinat duvarlarının güvenli bir şekilde tasarlanabileceğini göstermektedir.

Donatılı şevler

Bugünün endüstriyel, ticari ve altyapı alanında çalışanları kullanılabilir alanların ekonomik olarak çoğaltılmasını amaçlamaktadır. Fakat bu alanlarda yapılaşma ise zayıf zemin problemini doğurmaktadır. Donatılı şevler; donatısız durumda eğimli yapılmak zorunda kalınan şevlerin donatı kullanılarak daha dik bir şekilde yapılmasını sağlamaktadır. Bu sayede kullanılabilir alan büyük ölçüde artırılarak maliyetleri azaltmaktadır. Donatılı şev örneği Şekil 2.23'te verilmektedir (Durlanık, 2003).



Şekil 2.23. Donatılı şev (Durlanık, 2003).

Donatılı şevler; şev stabilitesinin sağlanması, toprak kaymalarının önlenmesi, şev kazılarının desteklenmesi ve şev ayaklarında sıkıştırma yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca donatılı şevler; baraj yüksekliğini artırmak, kalıcı set oluşturmak, geçici taşkın kontrol yapıları, geçici servis yollarında yolu genişletmek ve ıslak ince daneli zeminlerde oluşturulan setler gibi çok geniş bir uygulama sahasına sahiptir. Donatılı şevler ile iyileştirme uygulaması hakkında literatürden bazı örnekler aşağıda özetlenmektedir.

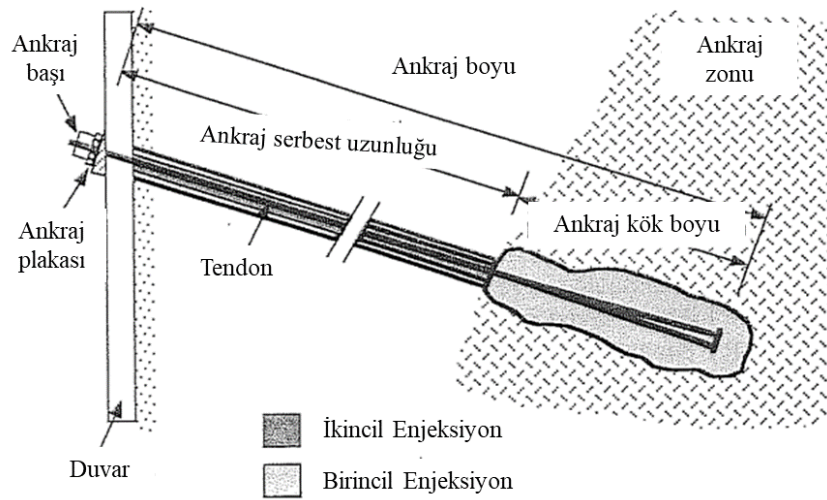
Shrestha ve Bhandari (2019) tarafından sunulan makale, toprak kayması sorunlarına karşı etkili bir çözüm olan donatılı şevlerin tasarım ve uygulama sürecini ele almaktadır. Tasarımda tel örgü kullanılmış ve mühendislik hesaplamaları sonucunda gerekli güçlendirme oranı belirlenmiştir. Ayrıca donatılı şevin dayanıklılığı ve stabilitesini doğrulamak için deneyler yapılmış ve sonuçların başarılı olduğu gösterilmiştir.

Li ve ark. (2019) farklı yüksekliklere sahip donatılı şevlerin duraylılığını belirlemek için yaptıkları deneysel çalışmalarda şevlerin duraylılığının; yükseklik, desteklenme uzunluğu ve şev açısı gibi faktörlere bağlı olduğunu incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara bakıldığında, donatılı şevlerin duraylılığının yükseklik artışı ile arttığı ve daha uzun desteklenme uzunluğuna sahip şevlerin daha yüksek kayma direncine sahip olduğu görülmektedir.

Wu ve ark. (2020) makalesinde, sayısal simülasyon yöntemi kullanılarak statik ve dinamik yük altında donatılı şev eğiminin performansı analiz edilmiştir. Farklı senaryolar oluşturularak donatılı şev incelenmiş ve sonuçlar donatılı şev eğimlerinin statik ve dinamik yük altında donatısız şeve göre yüksek duraylılığa sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca deprem gibi doğal afetlerde donatılı şev uygulamasının etkili bir çözüm olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Zemin ankrajları

Zemin ankrajları, zeminden kaynaklanan kuvvetleri daha sağlam zeminlere ileten yapısal elemanlardır. Bu yapısal elemanlar, palplanş ve diyafram duvar gibi iksa sistemlerinde duvar arkasındaki zeminden güç alarak görevini üstlenmektedir. Duvarı destekleyen ankrajlar; ankraj başı, tendon ve ankraj kökü olarak adlandırılan üç ana elemandan oluşmaktadır (Şekil 2.24). Ankraj başı, duvara bağlanarak çelik çubuğun duvara kilitlenmesini sağlarken; tendon, kuvveti ankraj başından yük taşıyan kısma iletmektedir. Ankraj kökü ise ankraj kuvvetini zemine aktarmaktadır (Hausman, 1990).



Şekil 2.24. Zemin ankrajı elemanları (Hausman, 1990).

Basit bir zemin ankrajı sisteminin çalışma prensibi şöyle açıklanmaktadır (Hausman, 1990):

- Tendon sondaj deliğine yerleştirilerek birincil enjeksiyon yapılır. Böylece yük taşıyan ankrajın kök kısmı oluşturulur.

- Stabilite tahkikleri sonrasında, ankraj serbest uzunluğu hesaplanır ve tendona öngerme işlemi uygulanır.
- Sonrasında ikincil enjeksiyon yapılır.

Tipik bir zemin ankrajının maksimum kapasitesi; tendonun yapıldığı aç, zemin tipi ve enjeksiyon basıncına göre yaklaşık 600 – 1000 kN arasında bulunmaktadır. Kaya ankrajlarında ise maksimum kapasite 10000 kN'a kadar ulaşabilmektedir.

Zemin ankrajları; baraj, tünel, köprü yapıları ve perde duvarları gibi geniş bir alanda uygulanmaktadır. Ankrajlar, kalıcı ve geçici olarak iki gruba ayrılmaktadır. Geçici zemin ankrajları, üst yapının statik tasarımı ve kazının açık kalma süresi uygunsa yapılmakta iken kalıcı zemin ankrajları, üst yapının statik tasarımı uygun değilse veya üst yapı, yapı ömrü boyunca ankrajla birlikte çalışması gerekiyorsa tasarlanmaktadır.

Zemin ankrajlarının kullanımı ve performansını değerlendirmek amacıyla Güler ve Başarır (2018) bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada değişken parametreler; ankraj uzunluğu, tendona uygulanan öngerme kuvveti, zemin özellikleri ve ankraj geometrisi kabul edilmiştir. Araştırmanın sonuçlarında, zemin ankrajlarının yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu ve çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir. Ankraj uzunluğunun ve tendona uygulanan öngerme kuvvetinin artırılması ile ankrajin taşıma kapasitesi artmakta ve ayrıca ankrajin geometrisi ve zemin özellikleri de ankrajin performansını etkileyen faktörler arasında bulunmaktadır. Sonuç olarak, zemin ankrajlarının uygun tasarım ve uygulama ile yüksek taşıma kapasitesi sağladığı ve yapısal uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

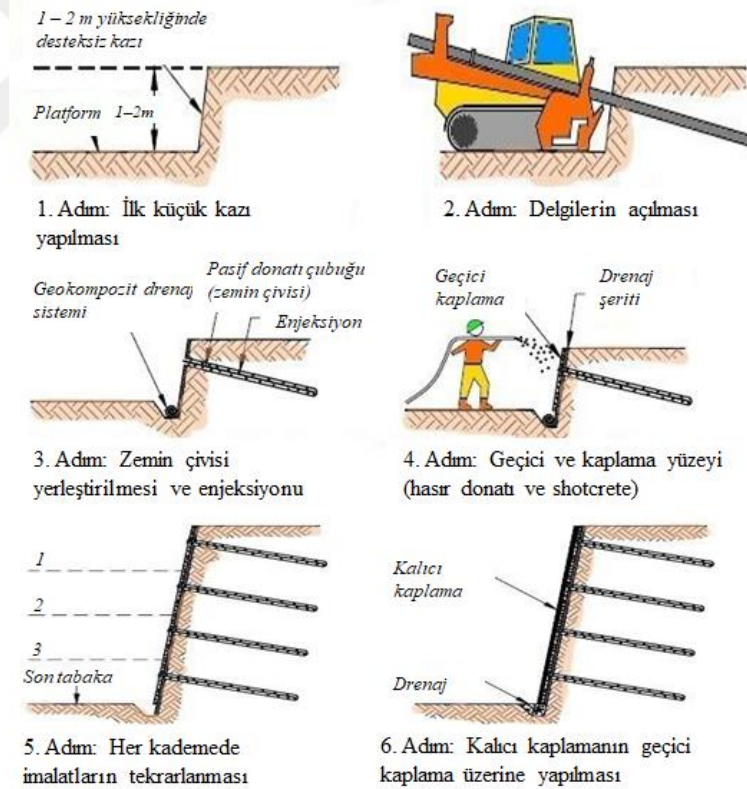
Almeida ve Vargas (2021) tarafından yapılan çalışmada, eğimli bir duvarın stabilitesinin artırılması için zemin ankraj sayısının etkisi araştırılmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda, artan ankraj sayısı ile duvarın yatay deformasyonunun azaldığı görülmüştür. Ayrıca ankraj sayısı artırıldıkça duvarın altında yer alan zeminin gerilme değerleri de azalma göstermektedir. Ancak duvarın stabilitesi artarken, ankraj sayısının artması maliyeti de artırdığı için optimum değer aralığının bulunması gerektiği belirtilmiştir. Sonuç olarak ankraj sayısının artırılması ile duvarın stabilitesinin artabileceği, ancak ekonomik faktörlerin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Zemin çivilemesi

Zemin çivilemesi, zemin dayanımını ve duraylılığını artırmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde zemin içine çiviler yerleştirilerek gerilmeye maruz bırakılmaktadır. Bu gerilmeler sayesinde zeminin dayanımı artırılmaktadır.

Zemin çivileri genellikle çelik çiviler olmakta ve çapları değişiklik göstermektedir. Bu çivilerin yerleştirilmesi, zeminin özelliklerine göre değişmektedir. Bazı durumlarda çiviler zemine doğrudan yerleştirilirken, bazen de zeminde delikler açılmakta ve çiviler deliklere yerleştirilmektedir. Çivileme işlemi tamamlandıktan sonra çivilerin çevresi enjeksiyon karışımı ile doldurulmaktadır. Bu karışım çivilere doğru basınç uygulayarak, zeminin içindeki çatlakları ve boşlukları doldurmaktadır. Bu sayede, zemin dayanımı artış göstermektedir. Zemin çivilemesi uygulama örneği Byrne ve ark. (1998) tarafından Şekil 2.25'te verildiği gibi sunulmaktadır.

Zemin çivilemesi pratik ve ekonomik bir yöntem olmakla birlikte stabil olmayan şevlerin, istinat yapıların ve yeni yapılacak dik şevlerin inşasında kullanılabilir.



Şekil 2.25. Zemin çivilemesi uygulaması (Byrne ve ark, 1998).

Singh ve Mittal (2016) tarafından yapılan araştırmada, zemin çivileme yönteminin kumlu zeminlerde uygulanması sırasında gömme uzunluğunun çekme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde farklı gömme uzunlukları (300 mm, 400 mm ve 500 mm) ve çapları (16 mm, 20 mm ve 25 mm) için değişken çekme yükleri (50 kN, 100 kN ve 150 kN) uygulanmıştır. Analizler sonucunda, gömme uzunluğunun ve çivi çapının artmasıyla birlikte çekme kapasitesinin de artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak belirli bir noktadan sonra gömme uzunluğundaki artışın, çekme kapasitesine olan etkisi azalmaktadır. Bu yüzden çalışmada, incelenen çiviler için en az gömme uzunluğu çivinin çapının 5 katı olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak bu yöntemde zemin özellikleri ve çivinin çapı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanarak, gömme uzunluğu belirlenmesinde bu parametrelerin dikkate alınması önerilmektedir.

Korkmaz ve Fener (2018) tarafından yayınlanan makalede, yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda zemin çivileme yönteminin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Deneyler sırasında değişken parametreler: zemin türleri (organik kil, siltli kil ve siltli kum), çivi uzunlukları (1,5 m ve 2 m), çivi çapları (16 mm ve 25 mm), çivi aralıkları (1 m ve 1,5 m), çivi eğimleri (0° , 10° ve 20°) ve çivi uç açılarıdır (180° ve 90°). Sayısal analizler de FLAC 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmada zemin çivileme yönteminin kullanılabilirliği ve farklı parametrelerin yöntemin etkinliği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda, çivi uzunluğunun ve çivi aralığının artmasıyla çekme kuvveti ve direnci artarken; çivi çapı artışının ise daha az etkili olduğu görülmüştür. Çivi eğimi ve uç açısının ise çivi performansı üzerinde sınırlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Sayısal analizler sonucunda ise çivi uzunluğunun artması ile zemindeki kayma gerilmesinin azaldığı ve deformasyonun kontrol altında tutulduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle makalede, zemin çivileme yönteminin yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Geosentetik donatı kullanımı

Geosentetik donatı kullanılarak zemin iyileştirme tekniğinde geosentetik malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler polimerik ve doğal elyafların örülmesi veya dokunması yoluyla üretilen dayanıklı, yüksek mukavemetli malzemeler olmaktadır.

Zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan bu geosentetikler genellikle zeminlerin dayanımlarını veya ortamın duraylılığını artırmak için kullanılmaktadır. Bu yöntemde geosentetik malzemeler, zemin içine yerleştirilmekte ve zeminlerde oluşan çekme dayanımı oluşturmaktadır.

Geosentetik donatı kullanılarak yapılan zemin iyileştirme uygulamaları arasında; çakıl ve kumlu zeminlerde temel taşıma kapasitesinin artırılması, stabilize etmek için killi zeminlerde kullanılması, zemin erozyon kontrolü ve drenaj uygulamaları yer almaktadır.

Geosentetik donatı kullanılarak yapılan zemin iyileştirme işlemleri, diğer iyileştirme tekniklerine göre maliyet açısından daha ekonomik ve hızlı bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca geleneksel zemin iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, daha az malzeme kullanımı ve daha az işçilik gerektirmektedir. Fakat bu yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şunlardır:

- Yalnızca belirli tipteki zeminlerde uygulanmaktadır: Geosentetik donatı, özellikle iri daneli ve ince oranı %8 – 10'u geçmeyen zeminlerde etkili bir şekilde kullanılabilir.
- Zeminin karakteristiklerine bağlı olarak farklı tiplerde geosentetik malzemeler kullanılması gerekebilmektedir: Geosentetik malzemelerin seçimi, zeminin özelliklerine ve kullanım amacına bağlı olmaktadır. Farklı tipte geosentetik malzemeler kullanılması gerekebileceğinden, tasarım ve uygulama aşamasında dikkatli olunması gerekmektedir.
- Uygun bir şekilde tasarlanmaz veya uygulanmaz ise zeminin davranışını olumsuz yönde etkilemektedir: Geosentetik malzemelerin uygun bir şekilde tasarlanması ve uygulanması önem arz etmektedir.

Tekrarlı yük altındaki geosentetik takviyeli ve takviyesiz zeminlerin davranışı El-Hakim ve El-Sherbiny (2007) tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar, zemin örneklerini laboratuvar ortamında çeşitli seviyelerde tekrarlı yükler altında test etmişlerdir. Testler; zemin örneklerinin deformasyonu, eğim açısı ve oturmaları gibi parametrelerin ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçları, geosentetik takviyesinin zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Takviye edilmemiş zeminlerde tekrarlı yükler altında,

deformasyon ve eğim açısı artmıştır. Bununla birlikte geosentetik takviyeli zeminlerde, deformasyon ve eğim açısı daha az olmuştur. Ayrıca geosentetik takviyesinin zeminlerin oturma davranışını da iyileştirdiği görülmüştür. Bu sonuçlar, geosentetik takviyeli zeminlerin özellikle de tekrarlı yükler altında daha iyi performans gösterdiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle, geosentetik takviyesi zemin yapılarının dayanıklılığını artırmak ve hasar riskini azaltmak için etkili bir yöntem olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Elçi ve ark. (2017) tarafından yayınlanan makalede, uzun vadeli izleme sonuçlarına dayanarak geosentetik takviyeli toprakarme duvarların performansı incelenmiştir. Araştırmacılar, bir havaalanı projesinde kullanılan geosentetik takviyeli toprakarme duvarın davranışını yaklaşık 6 yıl boyunca izlemişlerdir. Duvarın davranışını analiz etmek için çeşitli parametrelerin ölçüldüğü ve analiz edildiği bir izleme programı uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, geosentetik takviyeli toprakarme duvarların uzun vadeli performansının oldukça iyi olduğunu göstermiştir. Duvarın deformasyonu, yalıtımın geçirgenliği ve stres ölçümleri gibi parametreler izleme süresince neredeyse değişmeden kalmıştır. Bu sonuçlar, geosentetik takviyeli toprakarme duvarların uzun vadeli kullanımı için güvenilir bir çözüm olduğunu göstermektedir.

2.2. Jet Grout Yöntemi

İnşaat faaliyetlerinde üst yapıdan aktarılan yükler, temel sistemleri aracılığı ile zeminlere aktarıldığı için zeminin mühendislik parametreleri, çevre koşulları, yükleme geçmişi, yeraltı su seviyesi, yükleme koşulları ve zeminin mekanik davranışının doğru şekilde araştırılması büyük önem taşımaktadır. Günümüz koşullarında kentleşme faaliyetlerinin artması, yüksek yapı inşalarının artması nedeniyle inşaat alanları için taşıma gücü, oturma, heyelan, deprem ve sıvılaşma riskleri gibi faktörlere karşı güvenilir, uygulanabilir ve ekonomik yaklaşımın bir arada olduğu optimum çözümün tercih edilmesi gerekmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi olan jet grout adıyla bilinen teknik bu amaçlardan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Mısır, 2020).

Jet grout ile zemin iyileştirme yöntemi 1950 yıllarında Japon mühendisler tarafından geliştirilmiş bir yöntem olup, ilk olarak Tokyo ve Yokohama gibi şehirlerde temel

kazılarının yapıldığı alanlarda kullanılmıştır. Ve bu yöntemin ilk uygulaması, 1950'lerin sonlarında bir Tokyo gökdeleni inşaatında gerçekleştirilmiştir. Jet grout yöntemi 1960'lara gelindiğinde, diğer Japonya şehirlerinde de yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. 1970'lerde Avrupa'da jet grout yöntemi duyularak popüler hale gelmektedir. Özellikle İtalya ve İspanya'da jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme işlemleri yaygın olarak uygulanmaya başlanılmıştır. Avrupa'da bu yöntem, daha çok tarihi binaların restorasyonu için uygulanmıştır. 1980'lerin sonlarına doğru Amerika Birleşik Devletleri'nde de jet grout yöntemi ilgi görmüş ve inşaat sektöründe kullanılmaya başlanılmıştır. New York'ta yüksek binaların inşaatında ve Seattle'da liman alanlarının yeniden inşasında bu yöntemin kullanılması yaygın hale getirilmiştir. Böylece jet grout yöntemi günümüzde, dünya genelinde sıklıkla kullanılan bir zemin iyileştirme tekniği haline gelmektedir (Croce ve ark, 2014).

Jet grout yöntemi, zeminin sertleştirilmesi ve güçlendirilmesi amacıyla uygulanan bir geoteknik yöntemdir. Bu yöntemde zeminin yerinde iyileştirilmesi için özel bir jet grout ekipmanı kullanılmaktadır. Bu ekipman ile zeminin içine yüksek basınçlı su ve çimento karışımı enjekte edilerek zeminin parçalanması sağlanırken, kompozit kolonlar oluşturulmaktadır. Bu kolonlar sayesinde, yapıdan gelen yükler daha sağlam zemin tabakalarına aktarılır ve böylece zemin parametreleri iyileştirilmektedir.

Jet grout tekniğinin günümüzde zemin iyileştirme yöntemleri arasında yaygın olarak kullanılmasının nedenleri şunlardır:

- Küçük bir delgi çalışması sonucunda etrafındaki zemini örselemeden, zemin içerisinde büyük çaplı rijit kolonlar oluşturulmaktadır.
- Kolonların farklı yerleşim düzeni ile yüksek dayanımlı, geçirimsizlik elemanları (perdeler, duvarlar, şaftlar ve kompozit kütleler vb.) üretilebilmektedir.
- Gerekli olduğu durumlarda kolonlar donatılı olarak imal edilebilmekte ve bundan dolayı eğilme momenti kapasitesi ve çekme dayanımı oluşturulmaktadır.
- Kullanılan ekipmanlar diğer yöntemlere kıyasla hafif ve küçük hacimli olduğu için zorlu çevresel koşullarda uygulama yapılabilir.

Jet grout teknolojisinde son senelerde önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Yeni yüksek basınçlı pompalar ve modern su – çimento karışım sistemleri sayesinde daha

yüksek enjeksiyon basıncı ve akış hızı elde edilmektedir. Bu gelişmeler uygun olmayan bölge ve hava koşullarının üstesinden gelinmesine yardımcı olmakta ve makinaların güvenlik koşullarını da artırmaktadır. Bu sayede; iş gücü, hazırlık çalışmaları ve diğer işler için gereken süreler de azaltılmaktadır (Alkaya ve Yeşil, 2011).

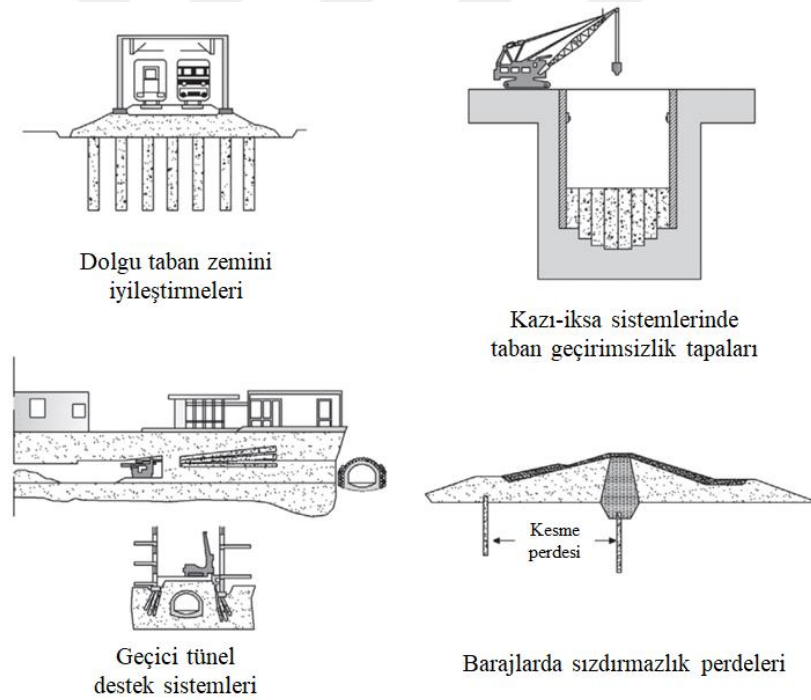
2.2.1. Jet grout yönteminin temel mühendisliğinde uygulama alanları

Jet grout yöntemi, temel mühendisliğinde birçok amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları Durgunoğlu (2004) tarafından aşağıda verildiği gibi sıralanmıştır:

- Temeller altında: taşıma gücü ve deplasman kontrolü.
- Döşemeler altında: yüksek yayılı yükler altında taşıma gücü ve deplasman kontrolü.
- Dolgular altında: taşıma gücü ve deplasman kontrolü.
- Köprülerde: yaklaşım dolguları altında düşey dolgu yüklerinin taşınması, dolgu altındaki oturma kontrolü ve kenar ayak kazıklarını etkileyen olumsuz çeper sürtünmesinin önlenmesi.
- Su yapılarında: donatı kullanılarak çekme kuvvetine dayanıklı bir eleman olarak inşa edilmesi.
- Kazılarda: ağırlık tipi dayanım yapısı oluşumu ile yanal zemin kuvvetlerinin azaltılması, donatı ile dayanıklı hale getirilen iksa elemanı olarak, özel donatı ile ankraj elemanı olarak, geçirimli zeminlerde ve yüksek yeraltı su seviyesindeki kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo dengeleme elemanı olarak, yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi taban seviyesi altında oluşturulan payanda elemanı olarak, kazı tabanından gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak kullanılması.
- Şevlerde: stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu oluşumu.
- Tünellerde: kazı yapılacak alanın üzerinde bulunan elverişsiz zeminin iyileştirilmesi.

- Kazıklı temellerde: önemli ve ağır yapıların sıvılaşma güvenlik sayısı düşük olan yerlerinde, kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deplasmanların kontrolü.
- Yapı etrafında veya altında: kumlu ve sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerde, sıvılaşma riskinin azaltılması ve zeminde oluşan kayma gerilmelerine karşı mukavemet kazandırılması.
- Depremlerde: sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deplasmanlarının bir kısmının sınırlandırılması.

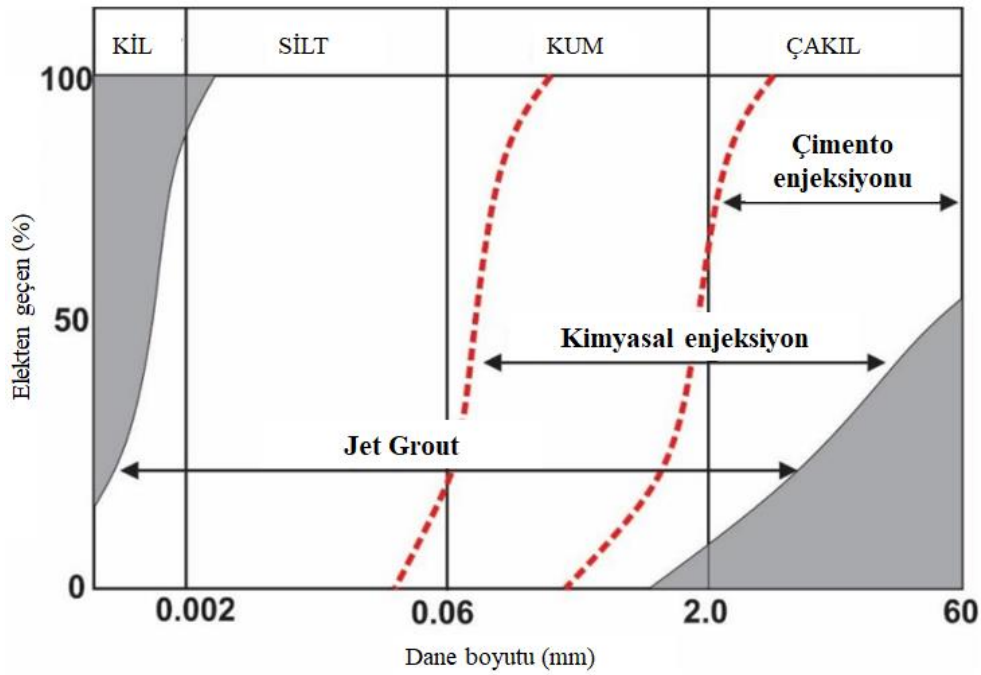
Birçok inşaat projesinde jet grout yöntemi etkili bir alternatif haline gelmektedir. En tipik jet grout uygulamaları Croce ve ark. (2014) tarafından Şekil 2.26’da verildiği gibi tasvir edilmektedir.



Şekil 2.26. Jet grout yönteminin bazı tipik uygulamaları (Croce ve ark, 2014).

Jet grout yöntemi; zemin dane boyutu dağılımı, boşluk oranı veya porozitesi gibi özelliklerine dikkat edilmeksizin neredeyse her tür zeminde uygulanabilmektedir. Bu özelliği sayesinde jet grout yöntemi, birçok farklı projede tercih edilmekte ve zemin iyileştirme çalışmalarında geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır (Akın ve ark,

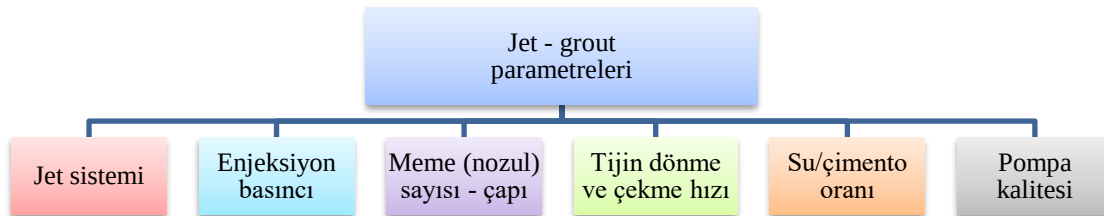
2015). Jet grout yönteminin uygulanabildiği zemin aralığı Passlick ve Doerendahl (2006) tarafından verilen grafik ile Şekil 2.27’de gösterilmektedir.



Şekil 2.27. Jet groutun uygulanabildiği zemin aralığı (Passlick ve Doerendahl, 2006).

2.2.2. Jet grout yönteminin imalat parametreleri

Jet grout yöntemi, zemin iyileştirme çalışmalarında farklı amaçlar ile kullanılan yüksek modüllü kolonların üretiminde önemli bir yere sahiptir. Bu kolonların çapı ve dayanım özellikleri, uygulama parametreleri ve jet grout tekniğine bağlı olmaktadır. Jet grout imalat parametreleri Şekil 2.28’de verilmiştir. Bu parametreler arasında optimizasyon yapılarak en etkili seçim, araştırma ve deneyler sonucunda elde edilmektedir.



Şekil 2.28. Jet grout yöntemi imalat parametreleri.

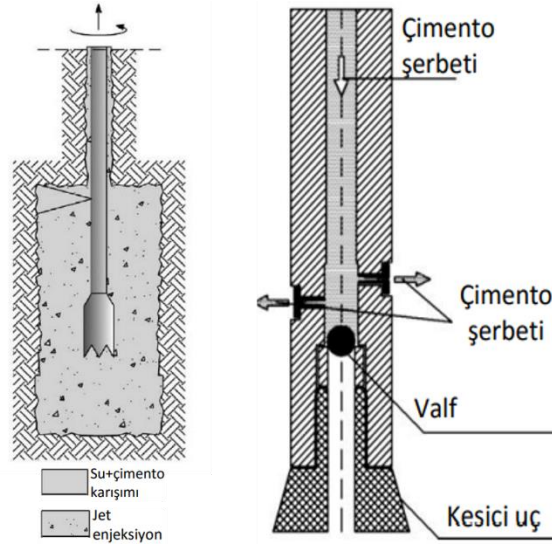
2.2.2.1. Jet sistemi

Jet grout uygulamalarında kolon çapı ile zemin cinsi uygulanacak sisteme göre farklılık göstermekte ve çimento enjekte edilirken su ve hava kullanımı ile artırılabilir. Türkiye’de sıklıkla kullanılan jet 1 ve jet 2 sistemleri, sadece çimento veya çimento + hava kullanılarak işletilmektedir. Hangi jet sisteminin kullanılacağı, zemin parametreleri ve tasarlanan yüksek modüllü kolonun özellikleri göz önünde bulundurularak seçilmektedir. Jet grout uygulamaları, enjekte edilen akışkan sayısına göre Durgunoğlu (2004) tarafından dört grupta sınıflandırılmıştır.

- Jet 1 sistemi
- Jet 2 sistemi
- Jet 3 sistemi
- Süper jet sistemi

Jet 1 (Tek akışkanlı) sistemi

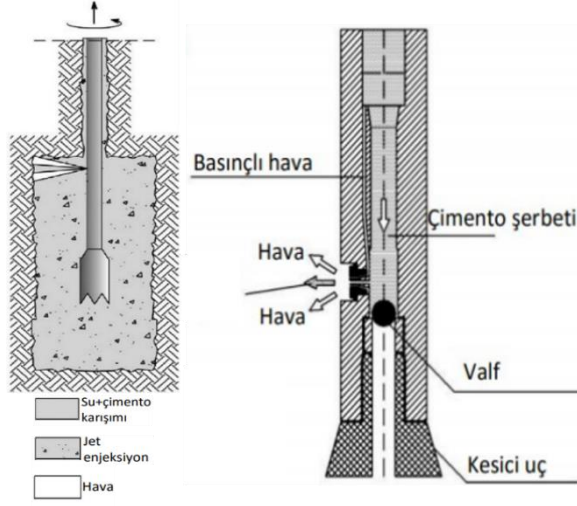
Jet 1 sistemi; tek kanallı tijle, delgi ve enjeksiyon işleminin yapıldığı en yaygın ve uygulaması kolay bir yöntemdir. Bu yöntemde zemine çimento püskürtmek için tek veya çift memenin (nozulun) kullanıldığı, monitördeki çapı 2 – 5 mm olan memelerin (nozulların) yaklaşık 400 – 550 bar basınç ile zemine uygulandığı, zeminin kesilerek delinmesi ve çimento enjeksiyonuyla doldurulması prensibine dayanmaktadır. Jet grout kolonu, tek akışkanlı jet 1 sistemiyle dakikada 15 – 100 cm çekme hızı ve 5 – 15 rpm dönme hızı ile oluşturulmaktadır. Jet 1 sistemi, killi zeminlerde 600 – 800 mm ve çakıllı zeminlerde 1000 mm çapında kolonlar üretmek için kullanılmaktadır. Ve böylece, çakıllı zeminlerde kohezyonlu zeminlere göre daha başarılı uygulandığı görülmektedir (Croce ve Flora, 2000). Tek akışkanlı sistem ve şematik görüntüsü Şekil 2.29’da verilmiştir (Croce ve ark, 2014).



Şekil 2.29. Jet 1 sistemi ve şematik gösterimi (Croce ve ark, 2014).

Jet 2 (Çift akışkanlı) sistemi

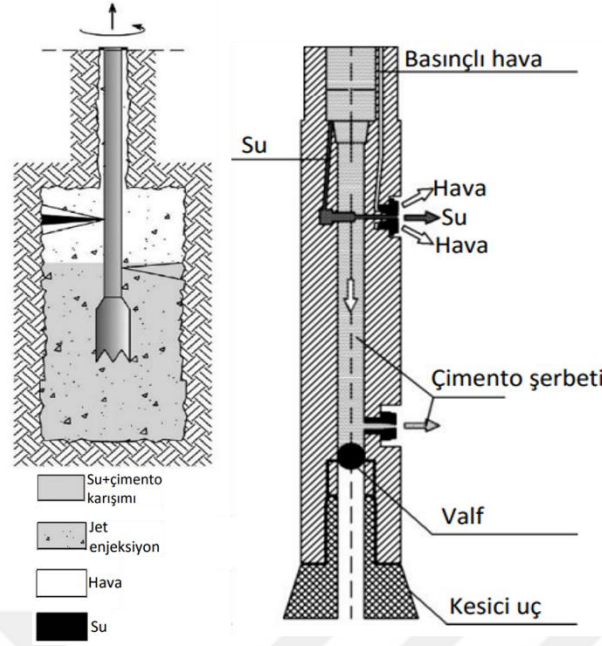
Jet 2 sistemi; iç içe geçmiş iki boru sistemi kullanılarak çalışmaktadır. Bu borulardan içte olan 400 – 550 bar basınç ile çimento püskürtürken, dışta olan borudan 10 – 12 bar basınçlı hava verilmektedir. Bu yöntemde püskürtülen harç, zeminde daha uzak yerlere gidebildiği için jet 1 sistemine göre yaklaşık %70 daha büyük çaplarda kolon oluşturulmaktadır. Croce ve Flora (2000) tarafından yapılan araştırmaya göre jet 2 sistemi sürtünme ile oluşan kayıpları kısmen azalttığı için daha uzak mesafelere harç püskürtülmektedir. Bu sistem ile tasarlanan jet grout kolonunun oluşumunda dakikada 10 – 30 cm çekme hızı ve 4 – 8 rpm dönme hızı kullanılmaktadır. Jet 2 sistemi kohezyonlu zeminlerde jet 1 sistemine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Jet 2 sistemi Şekil 2.30’da verilmiştir (Croce ve ark, 2014).



Şekil 2.30. Jet 2 sistemi ve şematik gösterimi (Croce ve ark, 2014).

Jet 3 (Üç akışkanlı) sistemi

Jet 3 sistemi iç içe geçmiş üç boru kullanılarak çalışmaktadır. Zemine su, hava ve çimento enjekte edilmektedir: iç borudan su, orta borudan hava ve en dış borudan çimento. Bu sistem ile 2 m’den büyük çaplarda kolon oluşturmak mümkün olmakla birlikte kohezyonlu zeminlerde etkili bir yöntemdir. Tasarlanan jet grout kolonu, akışkanlar ve zeminin aşındırılması ile dakikada yaklaşık 6 – 15 cm çekme hızı ve 4 – 8 rpm dönme hızı uygulanarak oluşturulmaktadır. Jet 3 sistemi Şekil 2.31’deki gibidir (Croce ve ark, 2014).



Şekil 2.31. Jet 3 sistemi ve şematik gösterimi (Croce ve ark, 2014).

Süper jet sistemi

Süper jet sisteminde, yüksek hız ve uygun maliyet ile büyük çaplı jet kolonları oluşturulmaktadır. Bu sistemde, yüksek çaplı nozullar kullanılırken tijlerin dönme ve çekme hızları düşük tercih edilmektedir. Jet grout kolonları; çimentolu harç ve hava karışımı yüksek basınçta püskürtülerek oluşturulmaktadır. Süper jet yöntemi, özellikle yatay akımlı yeraltı suları kontrolü, sıvılaşma riski bulunan zemin tabakalarının iyileştirilmesi ve geçirimsiz perde duvar inşaatları gibi durumlarda kullanılmaktadır (Dirican, 2018).

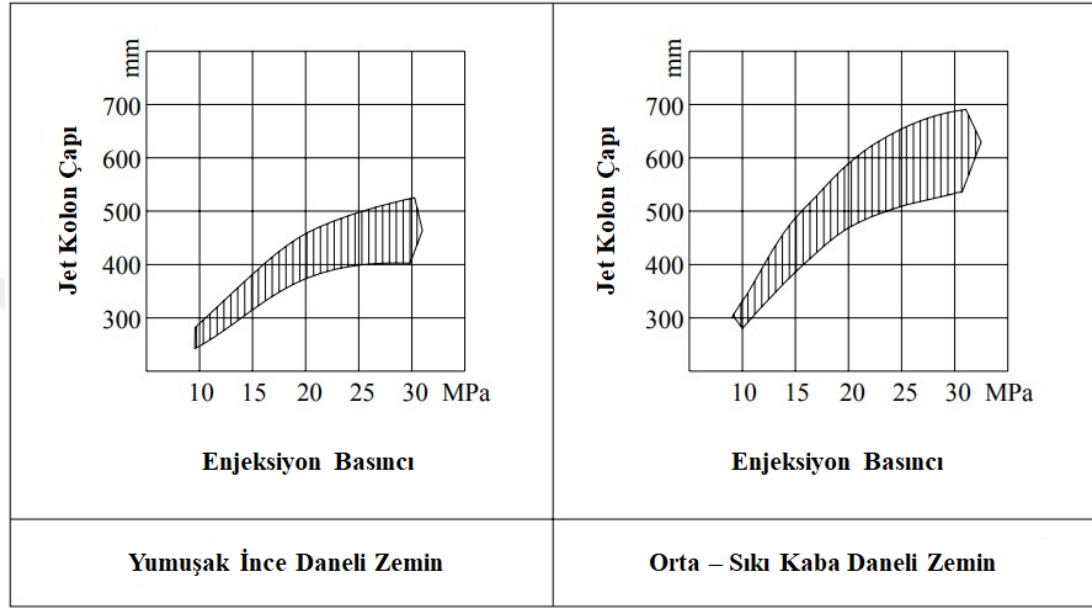
2.2.2.2. Enjeksiyon basıncı

Jet grout işlemi sırasında enjeksiyon basıncı, jet grout kolon çapı ve homojenliğinin elde edilmesinde önemli bir faktördür. Enjeksiyon basıncı Erkan (2013) tarafından üç sınıfa ayrılmaktadır.

- Düşük: 200 – 250 bar
- Orta: 300 – 400 bar
- Yüksek: 400 – 700 bar

Üç gruba ayrılan bu enjeksiyon basınçlarında kolon çapının artması, basıncın artışıyla doğru orantı göstermektedir. Jet grout kolonu ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki

Şekil 2.32’de verilmiştir (Xanthakos, 1994). Ancak bazı zemin türlerinde enjeksiyon basıncı tek başına yeterli olmadığı için basınç artışı kolonun çapını artırmayarak homojen bir kolon elde edilmemektedir. Dolayısıyla homojen bir jet grout kolonu elde etmek için enjeksiyon basıncının yanı sıra zaman faktörü de (dönme hızı, çekme hızı) önemli kılınmaktadır. Bu nedenle, jet grout işlemi sırasında hem enjeksiyon basıncı hem de zamanın doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir.



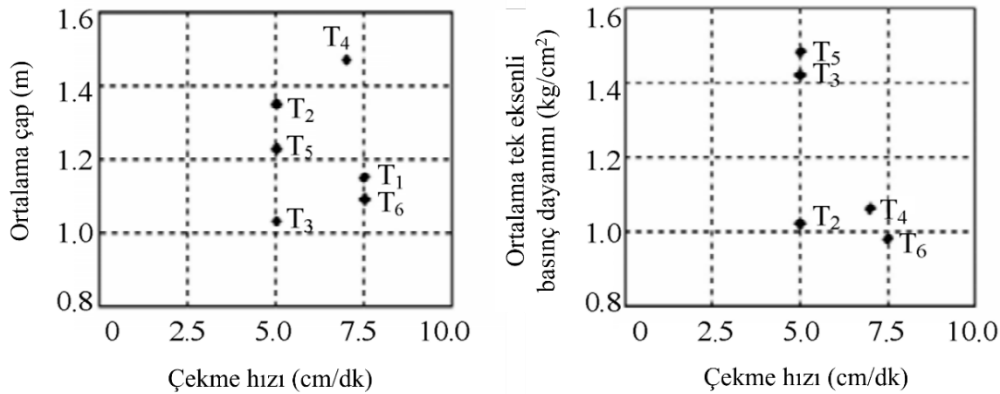
Şekil 2.32. Jet kolonlarında çap ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos, 1994).

2.2.2.3. Meme (nozül) sayısı ve çapı

Jet grout kolonlarının oluşturulabilmesi için enjeksiyon harcının zemine uygun bir şekilde püskürtülmesi gerekmektedir. Bu işlemde meme (nozül) sayısı ve çapı gibi faktörler önemli bir rol oynamaktadır. Memeler (nozullar), enjekte edilecek harcın belirli bir basınç ile zemine püskürtülmesini sağlayan ağızları içermektedir. Meme (nozül) sayısı ve çapı, enjekte edilen harcın enerjisi ve debisi ile enjeksiyon basıncı arasında bir ilişki taşımaktadır. Özellikle meme (nozül) çapı küçüldükçe, püskürtülen harcın yayılma miktarı da artış göstermektedir. Bu konu ile ilgili yapılan araştırmalar kapsamında meme (nozül) çapı ve sayısının, enjeksiyon basıncı ve debisiyle birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Dirican, 2018; Erkan, 2013).

2.2.2.4. Tijin dönme ve çekme hızı

Jet grout kolonlarının sürekliliği ve homojenliği, enjeksiyon harcının karışımı ve tijin dönme/çekme hızı gibi faktörlerin optimize edilmesine bağlı olmaktadır. Tijin dönme hızı, dakikada geçen devir sayısı; çekme hızı ise istenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra aşağıdan yukarıya doğru belirlenen hız ile gerçekleştirilmektedir. Bu faktörler zemin parametrelerine, jet sistemi türüne ve enjekte edilecek harcın hacmine göre belirlenmektedir. Jet grout kolonları oluşturmak için kullanılan çekme hızları kademeli ve sürekli olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kademeli yöntemde tij belirli aralıklarla çekilirken, sürekli yöntemde tij çekilmesi sürekli olarak gerçekleştirilmektedir. Homojen bir karışım oluşturmak için kohezyonlu zeminlerde daha fazla süre gerekmektedir ve jet grout kolonları oluşturabilmek daha uzun sürmektedir. Jet-2 ve jet-3 teknikleri kullanıldığında, amaç daha geniş çaplı jet grout kolonları oluşturmaktır, bu da iyileştirilecek zemin hacmini artırarak daha uzun süreler gerektirebilmektedir. Nikbakhtan ve ark. (2010) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, jet grout uygulamasının sonuçlarına göre tij çekme hızı - kolon çapı ve tij çekme hızı - tek eksenli basma dayanımı arasındaki ilişkiler bulunmuştur. Çekme hızının bu etkileri Şekil 2.33'te verilmektedir. Şekil 2.33'te yer alan T1 – T6 sondaj kuyularını temsil etmektedir.



Şekil 2.33. Tij çekme hızının kolon çapı ve tek eksenli basma dayanımına etkisi (Nikbakhtan ve ark, 2010).

2.2.2.5. Su/çimento oranı

Jet grout uygulamalarında su/çimento oranı; uygulanacak jet sistemi, istenen zemin dayanımı ve zemin iyileştirme türlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Lunardi (1997) tarafından, jet 1 ve jet 2 sistemleri için su/çimento oranı 1,0 – 1,5 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir. Jet 3 sistemi için de bu aralık 1,2 – 1,5 olmaktadır. Su/çimento oranının 0,7'nin altında olduğu durumlarda harca bentonit katılabilmektedir. Çünkü bentonit akışkanlığı artırarak geçirimsiz bir perde tabakası oluşturmaktadır. Bu yüzden çimento ağırlığının %0,4 ile %1 arasında olması Melegary ve Garassino (1997) tarafından önerilmektedir. Bazı durumlarda ise enjeksiyon harcına katkı malzemesi (akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, viskozite düzenleyiciler vb.) eklemek gerekebilmektedir. Bu katkı malzemesinin aralığı çimento ağırlığının %0,03 ile %0,04 arasında olmaktadır. Jet grout uygulamalarında zemin türlerine göre çimento katkı oranları Tablo 2.7'de belirtilmektedir (Burke, 2004).

Tablo 2.7. Jet grout kolonlarının zemin türlerine göre çimento katkı oranları (Burke, 2004).

Zemin tipi	Jet grout kolonunun çimento oranı (kg/m ³)
Kum	150 - 250
Silt ve siltli kum	200 – 275
Kil	250 – 350
Organik silt ve turba	300 - 400

2.2.3. Jet grout yöntemi ekipmanları

Delgi makinesi: uygulanan projede belirlenen derinliğe kadar delme yapabilmekte ve jet grout kolonları oluşturabilmektedir.

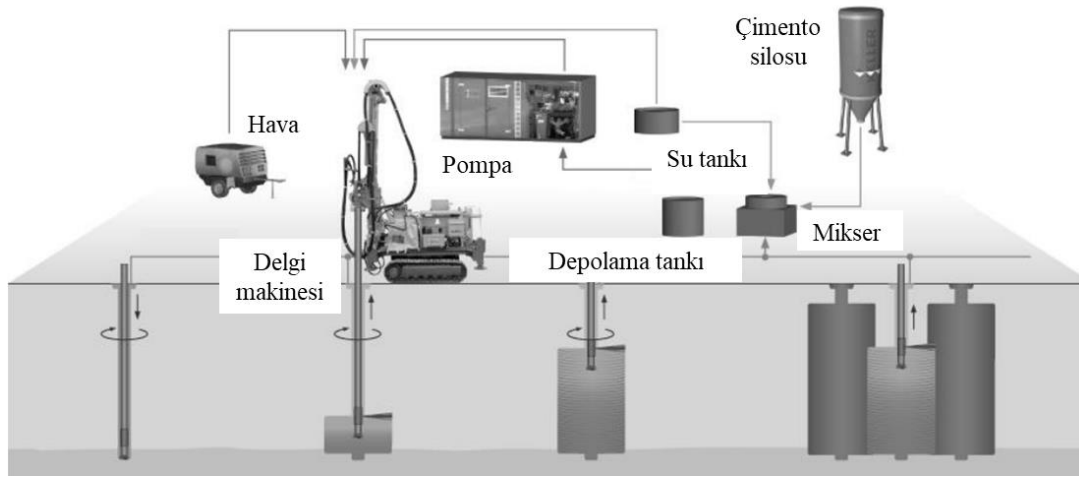
Pompa ünitesi: jet grout kolonlarını oluşturabilmek için gerekli basıncı sağlayabilen ve yüksek güce sahip bir pompa içeren jet grout ünitesidir. Klasik enjeksiyon pompalarından farklı olarak yüksek basınçlı pompalardır (300 – 500 beygir gücü).

Mikser ünitesi: jet grout karışımını belirlenen oranda dijital olarak tartarak karıştırmaktadır. Ayrıca jet grout pompa ünitesini beslemek için elverişli kapasiteye sahip olan bir mikser ve dinlendiriciden oluşmaktadır.

Çimento silosu: jet grout mikser ünitesine istenilen düzeyde çimento sağlayabilen ve dökme çimento depolama kapasitesine sahip bir yapı olmakla birlikte jet grout harcı üretimi için gerekli olan çimento taşıma bandıdır.

Su tankı: suya ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere 15 – 25 ton kapasiteli su tankı havuzudur.

Jet enjeksiyon yönteminde kullanılan ekipmanların görüntüsü Şekil 2.34’te verilmiştir.

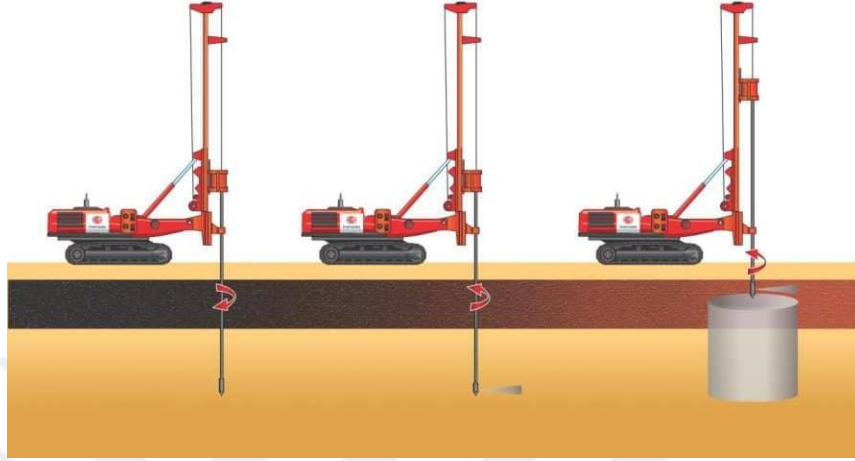


Şekil 2.34. Jet enjeksiyon ekipmanları (Orhan ve Bayram, 2018).

2.2.4. Jet grout yönteminin çalışma prensibi

Jet grout yönteminin çalışma prensibi iki aşamadan oluşmaktadır: delgi ve enjeksiyon. Delgi aşamasında, küçük çaptaki delme borusu (sondaj tiji) ile zemine yüksek basınçta su verilerek delme işlemi gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyon aşamasında ise sondaj tijindeki memeler (nozullar) kullanılarak, çimento – su karışımından oluşan jet grout harcı yüksek basınçla enjekte edilmektedir. Bu tijler, kendi etrafında döndürülerek yukarı doğru çekilmekte ve işlem önceden belirlenmiş üst kot seviyesine gelinceye kadar devam etmektedir. Yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesi zeminle karışarak daire kesitli ve farklı dayanım özelliklerine sahip jet grout kolonları oluşturulmaktadır. Bu kolonların kesitleri ve özellikleri; zeminin mühendislik özellikleri, dönme ve

çekme hızları, enjeksiyon basıncı ve bileşimi, debi, meme (nozul) çapı ve adedi gibi değişkenlere bağlı olarak belirlenmektedir. Jet grout yönteminin uygulama basamakları Şekil 2.35’te verilmektedir (Melegari ve Garassino, 1997).

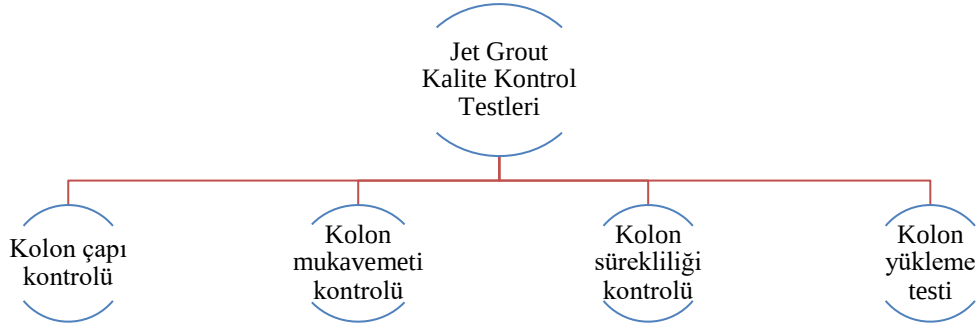


Şekil 2.35. Jet grout yöntemi uygulama basamakları (Melegari ve Garassino, 1997).

Jet grout yöntemi ile oluşturulan kolonlar temel altı kotu ile yükseklikleri arasında 30 – 60 cm kalınlığında sıkıştırılmış dolgu malzemesi ile desteklenerek zemin drenajı sağlanmaktadır. Bu uygulama ile aynı zamanda kolon başlarına zarar verilmesi önlenmektedir. Yükler üniform bir şekilde kolonlara ve kolonlar vasıtasıyla zemine aktarılmaktadır (Schlosser ve Collins, 2001).

2.2.5. Jet grout kolonlarının kalite kontrol testleri

Jet grout kolonları üretiminde; kolon çapı, boyu, su geçirimsizliği ve zemin – çimento harcının kalitesi gibi birçok kolon özelliği belirlenen değerleri karşılaması gerekmektedir. Bu özelliklerin belirlenmesi için jet grout üretiminden sonra kalite kontrol testleri yapılmaktadır. Toğrol (1998) tarafından bu testler jet grout imalatının başarısını değerlendirmek adına Şekil 2.36’da verilmektedir.



Şekil 2.36. Jet grout kolonlarının kalite kontrol testleri (Toğrol, 1998).

2.2.5.1. Jet grout deneme kolonları (kolon çapı kontrolü)

Jet grout kolonlarının kalite kontrolü için yapılan testlerden birisi de kolon çapı kontrolüdür. Bu testte jet grout deneme kolonları üretilmekte ve belirtilen özelliklerin kombinasyonlarına göre parametreleri yansıtan deneme kolonları yapılmaktadır. İmalatın bir süre sonra tamamlanmasının ardından, kolonların çevresi genişletilerek çap kontrolleri yapılmaktadır. Böylece kolonların tasarlanan çapa uygunluğu kontrol edilmiş olmaktadır. Bu yöntem, jet grout kolon çapı ve dayanımının istenilen değerleri sağlamasında önemli bir rol oynamaktadır (Düzceer ve Gökarp, 2002).

2.2.5.2. Jet grout kolonları basınç dayanımı kontrolü

Jet grout kolonlarının basınç dayanımı kontrolü, serbest basma deneyi kullanılarak yapılmaktadır. Bu deneylerde, inşa aşamasında kabul edilebilir serbest basma dayanımı sonuçlarının kolonlarda uygunluğu kontrol edilmektedir. Serbest basma dayanımı değeri, bir jet grout kolonunun rijitliği veya elastisite modülünü belirlemek için kullanılan bir parametre olarak ifade edilmektedir. Kalite kontrolü yapılacak olan jet grout kolonlarından alınan silindirik karot numuneleri, laboratuvar ortamında tek eksenli basma deneyleri ile test edilmektedir. Test için alınan numuneler, belirli bir yükleme hızında artan yükler altında kırılma yükü bulunarak tespit edilmektedir (Durgunoğlu ve ark, 2003; Sağlamer ve ark, 2002).

2.2.5.3. Jet grout süreklilik (Pile integrity) deneyi

Jet grout süreklilik deneyi, kolonların sürekliliğini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney ile kolonda meydana gelebilecek çatlaklar, kesit daralmaları ve uygulama hataları gibi sorunlar saptanmaktadır. Süreklilik deneyi

kapsamında, kolon boyutları ve süreksizliklerinin teşhis edilebilmesi için kolonların üst kısmına çekiç ile vurularak yansıma sinyalleri kaydedilmektedir. Jet grout süreklilik deneyi ayrıca, kolonun yeraltındaki konumunu ve problemlerini belirlemek, kolonun yanıtını hızlı bir şekilde gözlemlemek ve analizi kayıt altına almak için az maliyetli ve hızlı bir deney yöntemi olarak kabul edilmektedir (Erdoğan, 2018).

2.2.5.4. Jet grout yükleme deneyi

Jet grout kolonlarının taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla yapılan yükleme deneyleri, sahada oluşturulan basınç kolonuna uygulanan yüklerin kolonlar göçene kadar veya kabul edilebilir oturma seviyesine ulaşana kadar devam etmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu esnada yük - oturma, yük - zaman ve oturma - zaman grafikleri kaydedilmektedir. Ayrıca deney yükü, kolonların performansını test etmek adına proje yükünün en az 1,5 katı veya mümkünse proje yükü kadar olmaktadır (Düzceer, 2004). Bu uygulamanın arazide, özellikle ülkemizde sıklıkla yapılmasına karşın jet kolonlarının bir kazık muadili olmadığı, mevcut zemin kesiti ile kompozit bir ortam oluşturma amaçlandığı unutulmamalıdır.

2.2.6. Jet grout kolonlarında oturma kontrolü

Temeller, zemine aktardıkları ve zemin cinsine göre izin verilebilecek oturma limitlerini aşmayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle yapının kabul edilebilir deformasyon sınırlarını belirlemek ve bu sınırları etkileyen faktörleri tespit etmek, performans odaklı tasarımlarda büyük önem arz etmektedir. Bu faktörler arasında; malzeme, yerleşim yerinin coğrafi özellikleri, yüklerin niteliği ve yoğunluğu, çevresel koşullar ve diğer faktörler temel tasarımında göz önünde bulundurulmaktadır (Çimen ve ark, 2015).

Çeşitli araştırmalarda, farklı oturmaların üst yapıya zarar verebileceği tespit edilmiştir. Bu zararların nedenleri arasında; yatay ve düşey sıkışma özelliklerinde değişim, aynı zemin tabakasında tabaka kalınlığında farklılık, oturmaların meydana geldiği zemin kesitinde farklı özellikteki tabakaların bulunması, gerilmelerin artışı, temel boyutları, değişen derinlikler ve taban basınçları yer almaktadır (Uzuner, 1985).

Oturma ile oluşacak zararların önlenmesi amacıyla yapılan yapılar için uygulanabilir zemin iyileştirme yöntemleri belirlenmeden önce, temel zeminin konsolidasyonundan kaynaklı toplam ve farklı oturma büyüklüklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu bilgiye dayanarak, uygun önlemler alınarak oturma hasarları azaltılabilmekte veya tamamen önenebilmektedir.

Çamlıbel (1983) tarafından yapılan araştırmada, yük artışının oturma miktarlarıyla ilişkili olduğu ve oluşan çatlakların farklı oturmalarından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu araştırmada, yaklaşık olarak ilave yüke karşılık gelen oturmaların tahmin edilebileceği ve farklı oturmaların çatlak oluşumuna %50 ila %75 oranında etkili olduğu ortaya koyulmuştur.

Yerson (2009) tarafından farklı zemin türlerine göre izin verilebilir oturma miktarları Tablo 2.8’de verilmektedir.

Tablo 2.8. Farklı zemin türlerinde izin verilen oturma değerleri (Yerson, 2009).

Temel çeşidi	Zemin cinsi	Toplam oturma (mm)	Farklı oturma (mm)
Yüzeysel temel	Kil	60	40
	Kum	40	25
Radye temel	Kil	100	40
	Kum	60	25

Jet grout kolonları ile iyileştirilen zeminlerde karşılaşılan oturma çeşitleri Şekil 2.37’de verilmiştir. Bu oturma problemlerinde oluşabilecek durumlar ise aşağıda açıklanmıştır (Melegary ve Garassino, 1997):

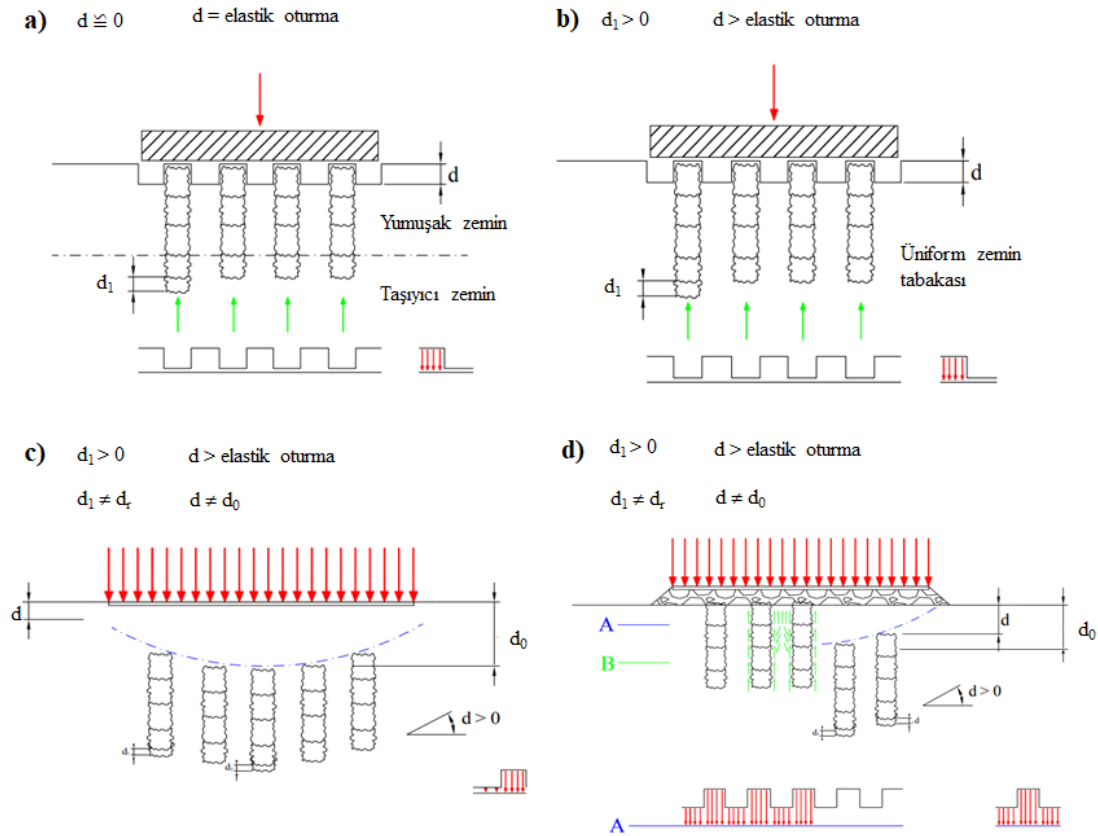
Şekil 2.37a’da görülen yük, rijit bir temel üzerinden jet grout kolonlarına iletilmektedir. Eğer bu jet grout kolonları sağlam zemine doğru soketlenir ise yapının yükü kolonlar aracılığıyla taşıyıcı zemine iletilmektedir. Böylece oturma problemleri jet grout kolonların elastik deformasyonlarıyla sınırlandırılmaktadır.

Şekil 2.37b’deki durumda yük, rijit bir temel aracılığıyla jet grout kolonlarına iletilmektedir ancak jet grout kolonlarının uç noktaları taşıyıcı zemine bağlanmamaktadır. Bu durumda kolonlar, yüzen kazık davranışını sergileyerek yükün

çoğunluğunu üstlenmekte ve kalan minimum yükü zemine aktarmaktadır. Böylece oturma problemleri jet grout kolonunun elastik deformasyonundan fazla olmaktadır.

Şekil 2.37c'deki durumda yük, rijit bir temele değil de esnek bir yüzey aracılığıyla jet grout kolonlarına iletilmektedir. Eğer kolon uç noktaları sağlam zemin içinde bulunmuyor ise yükün çoğunluğu kolonlara devredilirken, kalan yük de zemin tarafından taşınmaktadır. Böyle gerçekleşen durumlardaki oturmalar üniform olmamaktadır.

Şekil 2.37d'de görülen durumda, yük ile temel sistemi arasında granüler bir malzeme bulunmaktadır. Bu malzeme sayesinde yükün genel kısmı jet grout kolonları aracılığıyla taşınmakta ve kalan yük ise zemin tarafından desteklenmektedir. Böylece granüler malzemenin varlığı, zemindeki jet grout kolonlarının daha homojen bir şekilde davranış göstermesine yardımcı olsa da derinlik arttıkça zemin gerilmelerinin genellikle kolonlara aktarıldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 2.37. Jet grout kolonları ile iyileştirilen zeminlerde karşılaşılan oturma çeşitleri (Melegary ve Garassino, 1997).

Jet grout kolonları kohezyonlu zeminlerde uygulandığında elastik ve konsolidasyon oturmaları gerçekleşmektedir. Elastik oturma, yükün uygulanması ve kaldırılması sırasında gerçekleşen geçici deformasyonlardan oluşmaktadır. Konsolidasyon oturması ise zamanla gerçekleşen ve zeminin konsolidasyonuna bağlı olarak ortaya çıkan deformasyonlar olarak adlandırılmaktadır. Jet grout kolonlarının oturmalarını belirlemek çok kolay olmamaktadır. Jet grout kolonlarının özellikleri, zeminin mühendislik parametreleri ve diğer faktörlerin etkileşimi gibi değişkenlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle jet grout kolonlarının elastik oturması için sadece yaklaşık çözümler olan; yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemler kullanılmaktadır. Bu kısımda anlatılacak yöntemler, jet grout kolonlarının oturma davranışını modellemekte ve tasarımı sırasında kullanılmaktadır.

2.2.6.1. Elastik oturma

Yarı ampirik yöntemler

Elastik oturma için kullanılan yarı ampirik yöntemler, jet grout kolonlarının oturma davranışını tahmin edebilmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, kolon oturmasının üç bileşenini (kolon malzemesinin elastik kısılması, kolon uç noktasındaki ve yüzeyindeki malzemelerden aktarılan yüklerin neden olduğu oturmalar) hesaba katarak deformasyon davranışını tahmin etmektedir (2.2). Yöntemlerin doğruluğunu artırmak için yapılan çalışmalar ile elastik oturma davranışını kesin olarak belirleyebilecek yeni modeller geliştirilmiştir. Bunlar arasında; sonlu elemanlar, genişletilmiş Coulomb modeli, sınır elemanları ve yapay sinir ağları gibi yöntemler yer almaktadır.

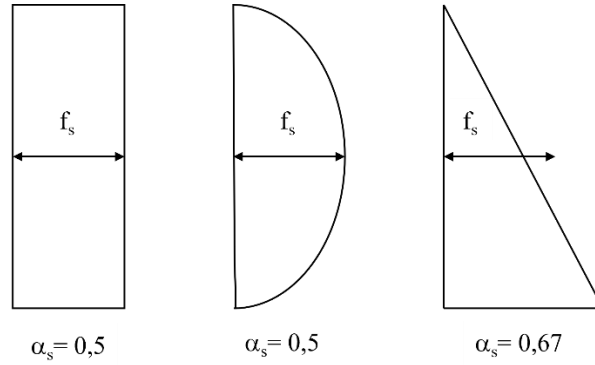
$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de; S_t kolonun toplam elastik oturması, S_s kolonun kendisinin elastik oturması, S_p kolon ucunun oturması ve S_{ps} kolonun gövde boyunca taşınan yükten dolayı gerçekleşen oturma değeridir.

$$S_s = (Q_{pa} + \alpha_s \times Q_{fa}) \frac{L}{A_p \times E_p} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’te; Q_{pa} servis yükü altında kolon ucu tarafından taşınan yük, Q_{fa} kolon gövdesi tarafından taşınan yük, L kolon boyu, A_p kesit alanı, E_p kolon elastisitesi ve

α_s kolon gövdesinin çevre sürtünmesine bağlı katsayıdır. Bu katsayı (α_s) Vesic (1977) tarafından Şekil 2.38’de gösterildiği gibi verilmektedir.



Şekil 2.38. α_s faktörünün değişimi (Vesic, 1977).

$$S_p = \frac{C_p \times Q_{pa}}{B \times q_p} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4’te q_p nihai uç direnci (jet grout kolon ucunda meydana gelen direnç) ve C_p ampirik katsayıdır.

$$S_{ps} = \frac{C_s \times Q_{fa}}{D_f \times q_p} \quad (2.5)$$

$$C_s = 0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{D_f}{B}} \times C_p \quad (2.6)$$

Denklem 2.5 ve 2.6’da verilen D_f , kolonun gömülü derinliğidir.

Ampirik yöntem

Vesic (1970) tarafından elastik oturma hesaplaması için geliştirilen ampirik yöntem, denklem 2.7’de verilmektedir. Bu denklemde tekil jet grout kolonunun yük altındaki oturması hesaplanmaktadır.

$$S_t = \frac{D}{100} + \frac{Q_{va} \times L}{A_p \times E_p} \quad (2.7)$$

Burada; S_t kolonun toplam oturması, Q_{va} uygulanan kolon yükü, L kolon boyu, D kolon çapı, A_p kolon kesit alanı ve E_p kolon elastisitesini temsil etmektedir.

Teorik yöntem

Jet grout kolonlarının elastik oturma hesabı için kullanılan diğer bir yöntem ise Hooke kuralına dayalı teorik yöntem hesaplamasıdır. Bu hesaplama denklem 2.8 ve 2.9’da görülmektedir.

$$\Delta h_e = \frac{\sigma}{E_{JG}} \times L \quad (2.8)$$

$$\sigma = \frac{Q_{va}}{A} \quad (2.9)$$

Denklem 2.8 ve 2.9’da; Δh_e kolonda meydana gelen düşey deformasyon yani oturma, σ yük altında kolonda oluşan gerilme, E_{JG} kolonun elastisite modülü, L kolon boyu, Q_{va} tekil jet grout kolon üzerine gelen düşey yük ve A kolonun kesit alanıdır.

2.2.6.2. Konsolidasyon oturması

Kohezyonlu zeminlerde toplam oturma, farklı bileşenlerin birleşmesinden oluşmaktadır. Bu bileşenler arasında elastik oturma ve konsolidasyon oturması yer almaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde yük artışı ile artan boşluk suyu basıncının, zamana bağlı olarak sönümlenmesi sonucu oluşan zemindeki hacim değişimine konsolidasyon oturması denilmektedir. Konsolidasyon oturması iki farklı şekilde hesaplanmaktadır. İlk hesaplama denklem 2.10’da verilmiştir.

$$\Delta H = m_v \times \Delta \sigma \times H \quad (2.10)$$

Bu denklemde; ΔH konsolidasyon oturmasını, m_v hacimsel sıkışma katsayısını, $\Delta \sigma$ yüklemeden dolayı tabaka ortasında meydana gelen efektif gerilme artışını ve H ise tabaka kalınlığını ifade etmektedir.

Denklem 2.10’da belirtilen hacimsel sıkışma katsayısının (m_v) hesaplanması aşağıdaki gibidir (2.11).

$$m_v = \frac{1}{1+e_0} \left(\frac{e_0 - e_1}{\sigma_1 - \sigma_0} \right) = \frac{1}{H_0} \left(\frac{H_0 - H_1}{\sigma_1 - \sigma_0} \right) \quad (2.11)$$

Burada; $H_0 - H_1$ tabaka kalınlığındaki değişimi, $\sigma_1 - \sigma_0$ yüklemenden önce ve sonra tabaka ortasında meydana gelen efektif gerilme değişimini ve $e_0 - e_1$ boşluk oranı değişimini temsil etmektedir.

Konsolidasyon oturmasının bir diğer hesaplaması ise denklem 2.12’de verilmiştir.

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log \frac{\Delta\sigma + \sigma_0}{\sigma_0} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12’de verilen C_c sıkışma indisidir ve denklem 2.13 ya da 2.14’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_0}} \quad (2.13)$$

Bu denklemde istenilen değerler, $e - \log \sigma$ grafiğinin doğrusal kesiminin eğimi ile elde edilmektedir.

2.2.7. Jet grout yöntemiyle ilgili literatür araştırması

Durgunoğlu ve ark. (1998) tarafından yapılan bir çalışmada, jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme uygulamasının bir örneği sunulmuştur. Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme uygulaması öncesinde, sahada arazi deneyleri ve sahadan alınan örnek numuneler ile laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ile modellenen zemin profilinde, sıg temel tasarımı altında yüklerin etkisiyle oturmalar gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu oturma problemine çözüm olarak uygulanacak jet grout kolonları 1,5 metre çapında ve 25 metre derinliğinde imal edilmiştir. Zemin iyileştirme için jet grout kolonları uygulanmadan önce ve uygulama sonrasında taşıma kapasitesi ve oturma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında, jet grout kolonları ile yapılan zemin iyileştirmesinin temel taşıma kapasitesi ve oturma oranlarını önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca jet grout kolonlarının inşa edilmesi için kullanılan ekipman ve yöntemler hakkında detaylı bir şekilde açıklama yapılmıştır.

Sönmez (2010) yaptığı çalışmada, jet grout kolonlarının derin dayanma yapısı stabilitesine etkisini sonlu elemanlar metodu kullanarak analiz etmiştir. Araştırmada İzmir metrosu Karşıyaka tünel projesi örnek alınarak; jet grout kolonlarının mukavemet özellikleri, iyileştirilmiş zemin alan oranları ve yerleşim tiplerine bağlı

olarak farklı analiz kombinasyonları oluşturulmuştur. Analizler kumlu ve killi zemin profilleri için ayrı ayrı yapılmış olup, Plaxis 2D ve 3D sonlu elemanlar programları kullanılmıştır. Sonuçlar; elde edilen diyafram duvar deplasmanları ve momentlerinin karşılaştırılması ile sunulmuş, ayrıca doğal zemin yüzeyi ve kazı seviyesindeki zemin düşey deplasmanları da verilmiştir.

Karahan (2016) yüksek lisans tezinde, kumlu zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı üzerine bir çalışma yürütmüştür. Araştırmada jet grout kolonunun geometrik boyutları ve enjeksiyon parametreleri belirlenerek, kolonun taşıma kapasitesi ve oturma davranışı analiz edilmiştir. Tezde farklı enjeksiyon parametreleri kullanılarak yapılan deneyler ile jet grout kolonlarının zemin üzerinde yatay ve düşey yükler altında gösterdikleri davranışlar incelenmiştir. Analiz sonuçları jet grout kolonlarının kumlu zeminlerde etkin bir şekilde kullanılabileceğini, zeminin oturma ve temel taşıma gücünü olumlu yönde etkilediğini göstermiştir.

Algın ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada; sığ temeller altında gerçekleşen aşırı oturma değerlerinin, komşu temel kazısı sonucunda oluşmasını önlemek amacıyla enjeksiyon yöntemlerinden jet grout yöntemi kullanılarak yapılan temel takviye işleminin üç boyutlu sonlu elemanlar (3B SE) analizi anlatılmaktadır. Bu araştırma kapsamında, literatürden tipik bir uygulama temel alınmış ve jet grout kolonlarıyla takviye sisteminin 3B SE modellemesi görüntü işleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Böylece oturma analizleri hem takviye sisteminden önceki durum için hem de sonraki durum için yapılarak kıyaslamalı analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, jet grout takviyesi ile oturmaların yaklaşık %80 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Tonyalı ve Özdemir (2017)'in yaptığı çalışmada, bir yapı temelinin altında beklenen taşıma gücü ve oturma problemlerinin çözümü için 80 cm çapında ve 2,20 m aralıklarla yerleştirilen 15 m uzunluğundaki jet grout kolonlarının imalatı ele alınmaktadır. Bu imalat ile zemin iyileştirmesi sonrası taşıma gücü ve oturma değişimleri Plaxis 2D programıyla analiz edilmiştir. Sayısal modelleme sonuçlarına göre benzer yükleme koşulları altında, jet grout kolonları ile zemin iyileştirme çalışmaları öncesi ve sonrası elde edilen oturma değerleri oranlarının yaklaşık olarak %25 mertebelerinde olduğu

tespit edilmiştir. Bu sonuçlar; jet grout kolonları ile yapılan zemin iyileştirmelerinin, taşıma gücü ve oturma problemlerini çözmede etkili olduğunu göstermektedir.

İnce daneli bir zemin üzerine inşa edilecek bir yapı için jet grout yöntemi ile temel zemini güçlendirmek amacıyla Mısır (2020) tarafından bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırma içeriğinde, sahadaki taşıma gücü ve oturma problemleri nedeniyle jet grout kolonları imal edilmiştir. İmalatların kalite kontrolü, sahada süreklilik ve yükleme testleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deplasman tahmini için Quasi - Newton eğitim algoritması tabanlı yapay sinir ağı önerilmiş ve sonuçlarda önerilen algoritmanın yer değiştirmeyi tahmin etmede etkili olduğu gösterilmiştir. Araştırma kapsamında, yapıdan zemine aktarılacak gerilme ve oturma problemlerinin önüne geçebilmek için 60 cm çapında ve 15 m boyunda jet grout kolonları planlanmış ve bu kolonlar ile hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre proje yükü altında elde edilen kalıcı oturma değerleri, izin verilebilir deplasman sınırı olan 2,5 cm limit değerinin altında kalmaktadır. Bu da jet grout ile yapılan zemin iyileştirme çalışmasının, hem zemin taşıma gücünü hem de oturma potansiyelini kontrol altında tutmada tasarım kriterlerini karşıladığını göstermektedir.



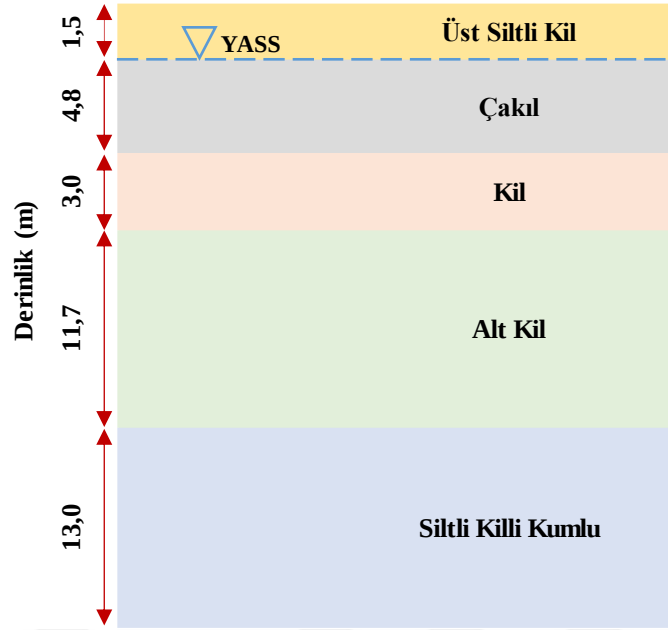
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Adapazarı zeminleri, Sakarya Nehri'nin getirdiği alüvyonlardan oluşmaktadır. Bu nehir geçmişte kent alüvyonlarının oluşmasında önemli bir role sahip olmasına rağmen, günümüzde üzerine kurulan barajlar ve taşkın önlemek amacıyla yapılan seddeler nedeniyle çökelme süreci durmuştur. Adapazarı zemininin yakın yüzeylerindeki yeraltı suyu seviyesi, 1999 depreminden sonra sınılaşma, zemin dayanımının azalması, temel taban kabarması, taşıma gücü kaybı ve oturma gibi yenilme çeşitlerinin oluşmasında ve yapısal hasarların artmasında önemli bir faktör olmaktadır (Kaya ve Erken, 2009).

Sakarya Nehri, zemin tabakalarının şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Adapazarı çevresi, Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin taşıdığı çakıllı ve siltli kumlar içeren fluviyal alüvyon birikintilerden oluşmaktadır. Bu birikintilerde çakıl, kum ve silt seriler halinde görülebilen, tek başına ya da farklı kombinasyonlar şeklinde de sıralanabilmektedir (Önalp ve ark, 2000).

Bu tez kapsamında Sakarya ili, Erenler ilçesi arazisinde gerçekleştirilen sondajlardan alınan numunelerin Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda TS 1900/1 (2006) ve TS 1900/2 (2006) uyarınca zemin mekaniği deneylerine tabi tutularak ve TS 1500 (2000) standartına göre sınıflandırılarak oluşturulan zemin kesiti kullanılmıştır. Bu tezde modellenen zemin profili Şekil 3.1'de verilmektedir.



Şekil 3.1. İdealize zemin profili.

Şekil 3.1’de verilen kesit yüzeyinde ortalama 1,5 m kalınlığında silt ve kum karışımları yer almaktadır. Bu tabakanın altında ortalama 4,80 m kalınlığında bir çakıl tabakası görülmektedir. Daha derinlerde ise kalın bir kil tabakası mevcuttur. Bu kil tabakasının yüzeye yakın kısımlarında, kil tabakası yaklaşık 3,0 m kalınlığında ve düşük - orta plastisite (CL – CI) özellikleri sergilerken; alt kısımlarında ise 11,7 m kalınlığında ve orta - yüksek plastisite (CH – CI) özellikleri göstermektedir.

3.2. Yöntem

Plaxis yazılımı ile sayısal çözümleme

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), bir kütlenin sonlu sayıda düğüm noktasında birbirine bağlı elemanların bir araya gelmesiyle temsil edildiği sayısal bir yöntemdir (Sharma ve Lewis, 1994). Geleneksel yöntemler genellikle malzemenin doğrusal elastik davranış varsayımını kullanırken, zemin doğrusal olmayan elastoplastik davranışa sahiptir. Bu nedenle zemin davranışı daha doğru bir şekilde simüle edilip, hesaplanabilmesi için sonlu elemanlar yöntemine dayalı bilgisayar yazılımı tavsiye edilmektedir. Bu yöntemin temel prensibi, karmaşık bir yapı ya da gövdenin bir dizi daha küçük parçalara bölünmesine dayanmaktadır. Bu elemanlar daha sonra düğümler

aracılığıyla birbirine bağlanmakta ve her düğümde, belirli bir fonksiyon miktarının tanımlandığı bir ya da daha fazla serbestlik derecesi bulunmaktadır. Düğümlerdeki değerlerin çözülmesiyle her elemandaki gerilmeler ve gerinimler hesaplanabilmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemleri arasında en etkili, sistemli ve analitik çözüm sunan bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Ottosen ve Petersson, 1992).

Plaxis, deformasyon ve dayanım problemlerinin sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz eden bir geoteknik mühendisliği yazılımıdır. Zemindeki deformasyonların, konsolidasyon oturmalarının ve yeraltı suyu akışının analizi ve geoteknik yapıların tasarımı için çok faydalıdır. Bu program ile gerçek durumlar, bir düzlem gerinimi veya bir aksel simetrik model ile modellenabilmektedir. Programın en önemli özelliklerinden biri, kullanıcıların eldeki durumun dikey kesitine dayalı olarak hızlı bir şekilde geometri modeli ve sonlu eleman ağı oluşturabilmesini sağlayan kullanışlı bir grafik arayüzü kullanılmasıdır (Brinkgreve ve ark, 2004). Bu sayede Plaxis kullanıcıları, karmaşık yapıların analizini daha kolay bir şekilde gerçekleştirebilmekte ve analiz sonuçlarını daha hızlı bir şekilde elde edebilmektedir.

Plaxis'in geliştirilmesi 80'lerin sonunda Hollanda'daki Delft Teknoloji Üniversitesi'nde nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmesi amacıyla başlamıştır. Plaxis esas olarak statik modellerin iki boyutlu analizi için kullanılırken, dinamik modelleri analiz edebilen ek sürümleri de bulunmaktadır. Plaxis 2D'nin piyasaya sürülmesinden birkaç yıl sonra, geoteknik mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanılabilmesi amacıyla bir 3D programı geliştirilmiş ve artık üç boyutlu bir versiyonu da kullanılmaktadır (Brinkgreve ve ark, 2004).

Plaxis 2D ve 3D programları, geoteknik mühendisliği alanında sıklıkla tercih edilen sonlu eleman yazılımlarıdır. Plaxis, iki boyutlu (Plaxis 2D) ve üç boyutlu (Plaxis 3D) analizler yapabilen iki farklı sürüme sahiptir.

Plaxis 2D programı, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak zeminin gerilme - deformasyon davranışlarını analiz etmektedir. Bu program; şev stabilitesi, temel analizi, zemin kazıları, tünel ve yeraltı yapıları gibi birçok geoteknik probleminin başarılı bir şekilde çözülmesine imkan sağlamaktadır. Plaxis 2D'nin temel

avantajlarından birisi, karmaşık üç boyutlu problemleri basitleştirebilmektedir. Ayrıca bu program, kullanıcıların malzeme özelliklerini ve yükleri kolayca tanımlamasına izin vermektedir.

Plaxis 3D programı, zemin davranışını üç boyutlu olarak analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu program, farklı malzeme özelliklerini ve zeminin gerilme – deformasyon davranışlarını üç boyutlu olarak modelleyerek çözüm sunmaktadır. Plaxis 3D programı, karmaşık zemin davranışlarının ve yapıların etkileşimlerinin hesaplanması için geliştirilmiştir. Özellikle büyük inşaat projeleri, köprüler, tüneller ve yüksek binalar gibi karmaşık yapıların analizi için kullanılmaktadır. Plaxis 3D, 2D'nin özelliklerine ek olarak, analiz sonuçlarını daha gerçekçi ve doğru hale getirmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Aşağıda Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımlarının karşılaştırması verilmiştir:

- Plaxis 2D programı, zemin davranışlarının iki boyutlu analizleri için kullanılmaktadır. Bu analizler; zemini yatay ve dikey düzlemde ele alarak, analizin iki boyutlu bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- Plaxis 3D programı, zemin davranışlarının üç boyutlu analizleri için tercih edilmektedir. Böylece Plaxis 3D ile zemin x, y ve z eksenlerinde ele alınarak, analiz üç boyutlu bir şekilde gerçekleştirilmektedir.
- Plaxis 2D programında çözüm alanı x – y koordinat düzleminde tanımlandığı için z eksenine dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle program daha basit problemler için uygundur.
- Plaxis 3D programı ise x, y ve z koordinat düzlemlerinde çözüm alanları tanımlayarak, gerçekçi bir şekilde modelleme yapmaktadır.
- Plaxis 3D'nin karmaşık problemleri daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmesi nedeniyle, Plaxis 2D'ye göre daha fazla veri ve ayrıntıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle Plaxis 3D'nin kullanımı sırasında daha fazla hesaplama süresi gerekmektedir.

Yukarıda açıklanan farklılıklar nedeniyle Plaxis 2D ve Plaxis 3D yazılımları, her birinin benzersiz avantajlarına sahip olduğu farklı analiz ihtiyaçlarını karşılamak için

tasarlanmıştır. Dolayısıyla herhangi bir projenin doğası ve analiz ihtiyaçlarına uygun olarak doğru programın seçilmesi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında; bahsi geçen zemin kesitindeki oturmalar hem iki boyutlu hem de üç boyutlu Plaxis analizleri ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Zeminde oturmaya sebep olacak yük, silo yükü ile temsil edilmiştir. Siloların hem boş hem de belirli bir malzeme ile yüklenmiş halleri için analizler ayrı ayrı tekrarlanmış ve kesitte oluşan oturmalar hesaplanmıştır. Oturmaların izin verilebilir seviyelere indirgenmesi için de jet groutların inşasına yer verilmiştir. Ancak jet grout sayısının, çapının, aralığının ve boyunun oturmalara farklı etkilerinin olacağı düşünüldüğünden analizler bu değişken parametreler ile gerçekleştirilmiştir.

Dairesel silo tabanı altına yerleştirilen jet groutlar üç boyutta (Plaxis 3D) hem tekil kolonlar olarak hem de kompozit ortam olarak modellenmiştir. İki boyutta (Plaxis 2D) ise jet groutların tekil olarak modellenmesine olanak sağlanamayacağı için sadece kompozit ortama ait analizler gerçekleştirilmiştir.

Üç boyutlu analizler, geometrideki değişkenlerin etkilerinin kıyasına yönelik yürütülmüşken, iki boyutlu analizler ise hangi geometrik koşullarda üç boyut ile iki boyutlu analizin yakınsanabileceğinin kanaatinde yardımcı olacağını gözlemlemek amacıyla yapılmıştır. Bu çıkarım ise kimi analizlerde üç boyutlu analiz yerine iki boyutlunun da kullanılabilmesine olanak sağlayarak, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir. Geometrik değişkenlerin tesirinin belirgin bir şekilde görüldüğü üç boyutlu analiz sonuçları; jet groutların sayısının, aralıklarının, çapının ve boyunun oturmalar üzerindeki etkisini değerlendirmekte ve optimum parametrelerin seçiminde yardımcı olmuştur. Aynı zamanda jet groutlar üç boyutlu analizlerde hem tekil kolonlar hem de kompozit ortam olarak modellenmiştir. Böylece üç boyutlu analizlerde kompozit ortam ile tekil kolonların analiz sonuçları arasında kıyaslama yapılarak, hangi modelde oturmaların nasıl etkilendiği irdelenmiştir. Ek olarak, farklı zemin tabakalarına soketlenen jet grout grubunu performansının zeminin geoteknik özelliklerinden hangi derecede etkileneceği de ayrı bir inceleme konusu olmuştur. Tablo 3.1’de yapılan analizlerin özellikleri ve kodları verilmiştir.

Tablo 3.1. Analizlere ait kodlar ve açıklamaları.

Analiz özellikleri						Analiz kodu
Jet durumu	Plaxis boyutu	JG çapı (m)	JG aralığı (m)	JG boyu (m)	Silo yük durumu	
Jetsiz	2D	0,6	1,5	2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3	boş - dolu	D_2D_0,6d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,0			D_2D_0,6d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,5			D_2D_0,6d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	1,5			D_2D_0,8d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,0			D_2D_0,8d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,5			D_2D_0,8d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	1,5			D_2D_1,0d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,0			D_2D_1,0d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,5			D_2D_1,0d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
Kompozit	2D	0,6	1,5	2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3	boş - dolu	K_2D_0,6d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,0			K_2D_0,6d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,5			K_2D_0,6d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	1,5			K_2D_0,8d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,0			K_2D_0,8d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,5			K_2D_0,8d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	1,5			K_2D_1,0d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,0			K_2D_1,0d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,5			K_2D_1,0d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
Kompozit	3D	0,6	1,5	2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3	boş - dolu	K_3D_0,6d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,0			K_3D_0,6d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,5			K_3D_0,6d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	1,5			K_3D_0,8d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,0			K_3D_0,8d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,5			K_3D_0,8d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	1,5			K_3D_1,0d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,0			K_3D_1,0d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,5			K_3D_1,0d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
Jetli	3D	0,6	1,5	2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3	boş - dolu	JG_3D_0,6d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,0			JG_3D_0,6d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,6	2,5			JG_3D_0,6d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	1,5			JG_3D_0,8d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,0			JG_3D_0,8d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		0,8	2,5			JG_3D_0,8d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	1,5			JG_3D_1,0d_1,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,0			JG_3D_1,0d_2,0s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo
		1,0	2,5			JG_3D_1,0d_2,5s_(2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3)L_(boş - dolu)silo

3.2.1. Model parametrelerinin belirlenmesi

3.2.1.1. Zemin parametreleri

Sakarya ili, Erenler ilçesi mevkiinde gerçekleştirilen sondaj çalışmaları ile elde edilen örselenmiş/örselenmemiş numuneler, TS 1900/1 (2006) ve TS 1900/2 (2006) standartlarına uygun olarak alınmış ve Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda TS 1500 (2000) standardına göre geoteknik parametreler belirlenmiştir. Bu tez kapsamında Sakarya ili, Erenler ilçesi çalışma alanındaki zemin kesitinden elde edilen hazır veriler alınarak, Plaxis programı ile yapılan modellerde

kullanılan malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, uzun vadedeki oturmaların tahmini amaçlandığı için tüm modellerde malzeme tipi drenajlı (drained) seçilmiştir. Tablo 3.2’de, kullanılan tüm zeminlerin Plaxis parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Plaxis modellerinde kullanılan zemin parametreleri.

Parametreler	Üst Siltli Kil	Çakıl	Kil	Alt Kil	Siltli Killi Kumlu
Malzeme Modeli	Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model - HS)				
Malzeme Tipi	Drenajlı (Drained)				
Zemin sınıfı	Orta-İnce (Medium Fine)	Kaba (Coarse)	İnce (Fine)	Kaba (Coarse)	Kaba (Coarse)
ρ_n (kN/m ³)	17,00	20,25	18,30	18,50	19,00
ρ_{doygun} (kN/m ³)	18,00	20,50	18,50	18,70	19,50
e_0	1,18	0,65	0,62	0,59	0,60
E'_{50} (kPa)	5000	20000	15000	20000	30000
E'_{oed} (kPa)	5000	20000	15000	20000	30000
E'_{ur} (kPa)	15000	60000	45000	60000	90000
Üstlük (m)	1,0	0,50	1,00	1,00	1,00
Kohezyon, c' (kPa)	5	1	20	25	10
Kayma direnci açısı, ϕ (°)	21	38	20	20	35
Dilatasyon açısı, ψ (°)	0	8	0	0	5
$R_{arayüz}$ (interface)	0,80	0,67	0,80	0,80	0,80
v_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
p^{ref} (kPa)	100	100	100	100	100
$K_{0(NC)}$	0,6416	0,3843	0,658	0,658	0,4264
R_f	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
OCR	2	2	1,8	1,8	1,8
POP (kPa)	-	-	-	-	-

Plaxis programında, zemin ve diğer ortamların davranışını modellemek için altı farklı model kullanılmaktadır. Bunlar; Lineer Elastik (LE), Mohr - Coulomb (MC), Jointed - Rock (JR), Soft Soil (SS), Soft Soil Creep (SSC) ve Hardening Soil (HS) modelleridir.

Bu tezde zeminlerin model parametreleri Tablo 3.2’de verildiği üzere, Hardening Soil (HS) modeli kullanılmıştır. HS modeli, sert ve yumuşak zeminlerin davranışını modellemek için kullanılan bir zemin modelidir. Bu modelde, gerilme bağımlı rijitlik modülünü dikkate alarak zemin rijitliğinin basınçla birlikte artması hesaba katılmaktadır. Ayrıca modelin temel karakteristik özellikleri aşağıda verilmektedir:

- Gerilme bağımlı rijitlik (m),
- Deviatorik yükleme nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (E_{50}^{ref}),
- Sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (E_{oed}^{ref}),
- Elastik boşaltma/yükleme (E_{ur}^{ref} , v_{ur}),
- Mohr - Coulomb modeline göre göçme (c , ϕ ve ψ parametreleri).

3.2.1.2. Silo parametreleri

Silolar; genellikle tarım ürünleri, gıda malzemeleri ve endüstriyel hammaddeler gibi malzemelerin depolanabilmesi amacıyla kullanılan yapılardır. Malzeme özelliklerine göre çelik veya betonarme olarak inşa edilebilir ve tekil ya da gruplar halinde kullanılabilir. Silo yapım aşamasında; dairesel, kare, dikdörtgen veya çokgen kesitli yapılabilmesine rağmen maliyet ve kullanılabilirlik açısından en uygun seçenek daire kesitli olanları kabul edilmektedir. Silo içerisinde depolanabilecek ürünler oldukça çeşitlilik göstermektedir. En sık depolanan ürünler arasında tahıllar, mısır, soya fasülyesi, buğday, arpa, ayçiçeği, çavdar ve yem bitkileri bulunmaktadır. Ayrıca bazı silolar kimyasal maddeler, plastik granüller, toz boyalar, çimento, kömür ve diğer endüstriyel hammaddeleri depolamak için de kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, zeminin üzerindeki yükü temsil etmek için silo yükü kullanılmış ve hem boş silo hem de mısır ile dolu silo için analizler yapılmıştır. Tezde kullanılan, depo malzemesi olarak kabul edilen, mısırın birim hacim ağırlığı Tablo 3.3’te belirtildiği gibi $7,2 \text{ kN/m}^3$ ’tür. Tablo 3.3’te bu çalışmada kullanılan silonun özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Silo özellikleri.

Silo		Kiriş		Malzeme (mısır)	
Dış çap (m)	20	Yükseklik (m)	2,00	$\rho_{\text{mısır}}$ (kN/m ³)	7,2
İç çap (m)	19	Çap (m)	20	Ağırlık (ton)	2450
Yükseklik (m)	12	Hacim (m ³)	50,25		
ρ (ton/m ³)	14,32	ρ_{beton} (ton/m ³)	2,5		
Ağırlık (ton)	5264	Ağırlık (ton)	126		

Tablo 3.3'te verilen bilgilerden yola çıkılarak, analizlerde kullanılan silo yükünü temsil eden yayılı yük değeri hesaplaması Tablo 3.4'te gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Silo temel tabanı statik gerilme hesabı.

Silo (boş)		Silo (dolu)	
Temel çapı (m)		20	
Silo yüksekliği (m)		12	
Toplam ağırlık (ton)	5390	Toplam ağırlık (ton)	7840
Toplam ağırlık (kN)	52876	Toplam ağırlık (kN)	76910
Net taban basıncı (kPa)	168	Net taban basıncı (kPa)	245

Analizlerde temel plakası, *plate eleman* kullanılarak modellenmiştir. Geometrik modelin genişliği Plaxis 2D analizlerinde eksenel simetri göz önünde bulundurularak 10 m, Plaxis 3D analizlerinde ise üç boyutlu tasarımdan dolayı 20 m çapında modellenmiştir. Temelin malzeme modeli olarak Lineer Elastik (LE) kullanılmıştır. LE modeli, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu ve izotropik lineer elastik bir malzeme olduğu varsayımı üzerine kurulu bir modeldir. Bu modele göre zemin davranışı elastik bir malzeme gibi kabul edilmekte ve deformasyon, uygulanan gerilmeyle doğru orantılı olmaktadır. Programda LE modeli için elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) gibi iki rijitlik parametresi girilmektedir. LE modeli, zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesi amaçlı kullanılmaktadır. Bu çalışma modellerinde kullanılan temel parametreleri Tablo 3.5'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Modellerde kullanılan temel malzemesinin özellikleri.

Temel	
Malzeme modeli	Lineer Elastik (LE)
ρ (kN/m ³)	25
E (MPa)	30000
ν	0,15
Temel çeşidi	Radye Temel
Temel çapı (m)	20
Temel kalınlığı (m)	1
Temel ağırlığı (kPa)	25
EA (kN/m)	35000000
EI (kN.m)	2917000

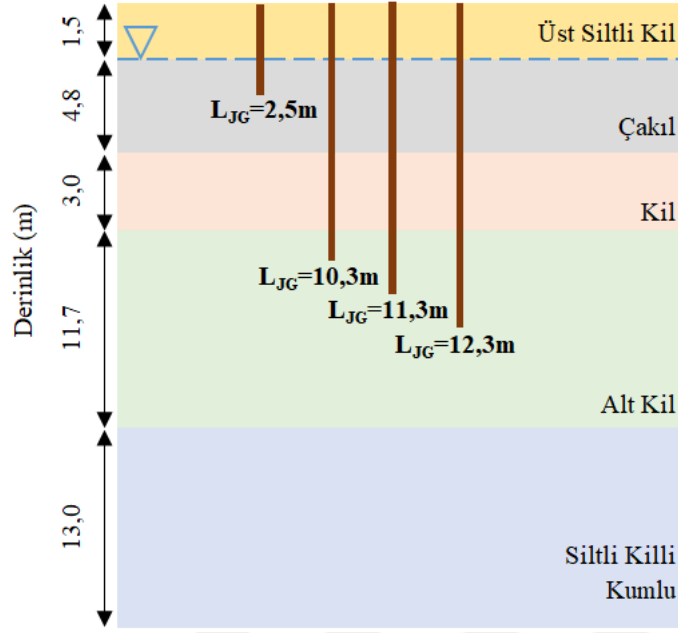
3.2.1.3. Jet grout parametreleri

Jet grout kolonları (Plaxis 3D)

Bu tez kapsamında yapılan analizler, silo tabanı altındaki jet groutların etkisini incelemek için yapılmıştır. Bu amaçla, Plaxis 3D programı kullanılarak üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerin bir kısmında, jet groutların tekil kolonlar olarak tasarlanması tercih edilmiştir. Bu yöntem sayesinde, jet grout kolonlarının geometrisindeki değişkenlerin oturma miktarına olan etkileri karşılaştırılacaktır. Kolonların geometrisindeki değişken parametreler şunlardır:

- Jet grout kolon çapı
- Jet grout kolon aralığı
- Jet grout kolon boyu
- Jet grout kolon sayısı

Şekil 3.2’de idealize zemin profili içerisindeki jet grout kolon boylarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Zemin profili ve jet grout soket boyları gösterimi.

Plaxis modellerinde kullanılan jet grout kolonu malzeme özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Jet grout kolonu malzeme özellikleri.

Jet Grout	
Malzeme Modeli	Lineer Elastik (LE)
Çap (m)	0,6 - 0,8 - 1,0
Uzunluk (m)	2,5 - 10,3 - 11,3 - 12,3
ρ (kN/m ³)	16,00
Aralık (m)	1,5 - 2,0 - 2,5
e_0	0,5
ν	0,3

Kompozit ortam (Plaxis 2D – Plaxis 3D)

Bu çalışmada, hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analizlerde kompozit ortam kullanılmıştır. Kompozit ortamın kullanım amacı; hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analizlerde hangi geometrik koşullarda üç boyutlu analiz sonuçları, iki boyutlu analiz sonuçlarına yakınsanabileceğinin belirlenmesidir. Ayrıca üç boyutlu analizler içinde,

tekil kolon ve kompozit ortam modellemesi yapılarak sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Jet grout modelini sayısal ortama aktarırken, kolonların kümелendiği bölge kompozit bölge olarak kabul edilmektedir. Kompozit bölge modeli parametreleri; zemin ile jet grout kolonu karakteristik özellikleri göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım ile jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zemin tek bir malzeme olarak temsil edilmektedir. İyileştirmenin zeminin tamamında etkili olacağı varsayımıyla, jet grout kolonlarının ve zeminin iyileştirme öncesi dayanım parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamalar, alan yer değiştirme oranına (a_r) bağlı olarak yapılmaktadır. Hesaplamalar sonucunda, kompozit malzemenin birim hacim ağırlığı ($\gamma_{komp.}$), kohezyonu ($c_{komp.}$), kayma direnci açısı ($\phi_{komp.}$) ve deformasyon modülü ($E_{komp.}$) denklem 3.1 - 3.4'e göre hesaplanmaktadır (Erol ve Bayram, 2018).

$$\gamma_{komp.} = \gamma_s(1 - a_r) + \gamma_{JG} \times a_r \quad (3.1)$$

$$c_{komp.} = c_s(1 - a_r) + c_{JG} \times a_r \quad (3.2)$$

$$\phi_{komp.} = \phi_s(1 - a_r) + \phi_{JG} \times a_r \quad (3.3)$$

$$E_{komp.} = E_s(1 - a_r) + E_{JG} \times a_r \quad (3.4)$$

Burada γ_s , c_s , ϕ_s ve E_s sırasıyla zeminin birim hacim ağırlığı, kohezyonu, kayma direnci açısı ve deformasyon modülü değerleri; γ_{JG} , c_{JG} , ϕ_{JG} ve E_{JG} sırasıyla jet grout kolon malzemesinin birim hacim ağırlığı, kohezyonu, kayma direnci açısı ve deformasyon modülü değerleridir.

Yukarıda verilen eşitlikler ile kompozit bölge parametreleri hesaplanabilmesi için jet grout uygulanmış zeminin özellikleri Racansky ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Tez çalışmasındaki zemin profili için jet grout kolonlarının kohezyonu, kayma direnci açısı ve deformasyon modülü değerleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Jet grout uygulanmış zeminin mekanik özellikleri (Racansky ve ark, 2006).

	E_{JG} (kPa)	c_{JG} (kPa)	ϕ_{JG} (°)
Üst Siltli Kil	5000000	250	25
Çakıl	20000000	1000	35
Kil	5000000	250	25
Alt Kil	5000000	250	25

Bu çalışma kapsamında; literatürden elde edilen formüller (3.1 - 3.4) ve araştırmalar sonucunda, iki boyutlu ve üç boyutlu analizler için kompozit ortam modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller için Tablo 3.8’de verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 3.8. Jet Grout kolonları - zemin karışımı kompozit zemin parametreleri.

Analiz Kodu	Zemin Türü	γ_n	γ_{doymun}	E (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
K_0,6d_1,5s	Üst siltli kil	17,63	18,50	632690	36	22
	Çakıl	20,47	20,69	2530761	127	38
	Kil	18,76	18,94	641434	49	21
	Alt kil	18,94	19,11	645805	53	21
K_0,6d_2,0s	Üst siltli kil	17,35	18,28	358076	22	21
	Çakıl	20,37	20,61	1432303	72	38
	Kil	18,56	18,75	367369	36	20
	Alt kil	18,75	18,93	372015	41	20
K_0,6d_2,5s	Üst siltli kil	17,23	18,18	230968	16	21
	Çakıl	20,33	20,57	923874	46	38
	Kil	18,47	18,66	240516	30	20
	Alt kil	18,66	18,85	245290	35	20
K_0,8d_1,5s	Üst siltli kil	18,12	18,89	1120894	60	22
	Çakıl	20,64	20,84	4483575	224	37
	Kil	19,13	19,28	1128660	71	21
	Alt kil	19,28	19,44	1132543	75	21
K_0,8d_2,0s	Üst siltli kil	17,63	18,50	632690	36	22
	Çakıl	20,47	20,69	2530761	127	38
	Kil	18,76	18,94	641434	49	21
	Alt kil	18,94	19,11	645805	53	21
K_0,8d_2,5s	Üst siltli kil	17,40	18,32	406722	25	21
	Çakıl	20,39	20,62	1626887	81	38
	Kil	18,60	18,78	415917	38	20
	Alt kil	18,78	18,97	420515	43	20
K_1,0d_1,5s	Üst siltli kil	18,75	19,40	1748584	91	22
	Çakıl	20,86	21,02	6994336	350	37
	Kil	19,59	19,72	1755093	100	22
	Alt kil	19,72	19,85	1758348	104	22
K_1,0d_2,0s	Üst siltli kil	17,98	18,79	985766	53	22
	Çakıl	20,59	20,79	3943064	197	37
	Kil	19,03	19,19	993802	65	21
	Alt kil	19,19	19,35	997821	69	21
K_1,0d_2,5s	Üst siltli kil	17,63	18,50	632690	36	22
	Çakıl	20,47	20,69	2530761	127	38
	Kil	18,76	18,94	641434	49	21
	Alt kil	18,94	19,11	645805	53	21

3.2.2. Geometrinin belirlenmesi

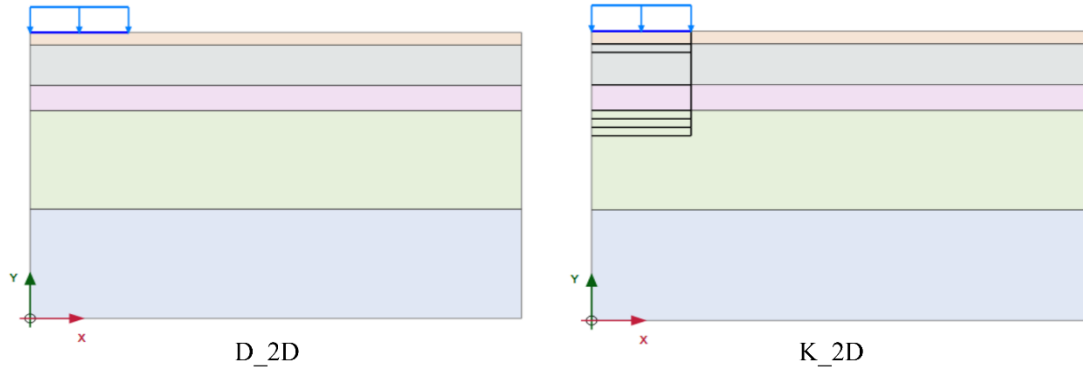
Bu tez çalışmasında, silo yükü altındaki zemin kesitinin oturma miktarı hem iki boyutlu hem de üç boyutlu Plaxis analizleri kullanılarak belirlenmiştir. Tüm

analizlerde ilk olarak doğal durumda (zemin iyileştirme yapılmadan önce) zeminde meydana gelen oturmalar hesaplanmıştır. Daha sonra jet grout ile zemin iyileştirme yapıldıktan sonra iki boyutlu Plaxis analizlerinde, tekil kolon geometrisindeki değişkenler kompozit bölge ile temsil edilmiştir. Jet grout kolonlarının değişen çapı, aralığı ve boyu dikkate alınarak hesaplamalar yapılmış ve bu parametreler, kompozit bölge modellemesi için Plaxis programına girilmiştir (3.1 - 3.4). Ayrıca iki boyutlu analiz sonuçları ile kıyaslama yapabilmek amacıyla üç boyutlu Plaxis programı ile kompozit bölge modellemesi yapılmıştır. Bu modellerde Plaxis 2D ile girilen kompozit bölge parametreleri, Plaxis 3D analizlerinde de kullanılmıştır. Son olarak jet grout kolonlarının geometrisindeki değişkenler, üç boyutlu Plaxis programı ile tekil kolonlar olarak modellenmiştir. Böylece Plaxis 3D analizi ile belirlenen oturma miktarları, hem kompozit bölge simülasyonu hem de tekil kolon modeli ile karşılaştırılmıştır ve değişen geometri etkilerine göre optimum çözüme karar verilmesinde olanak sağlanmıştır. Analizlerde kullanılan jet grout kolonu geometrisindeki değişken parametreler Tablo 3.9’da özetlenmiştir.

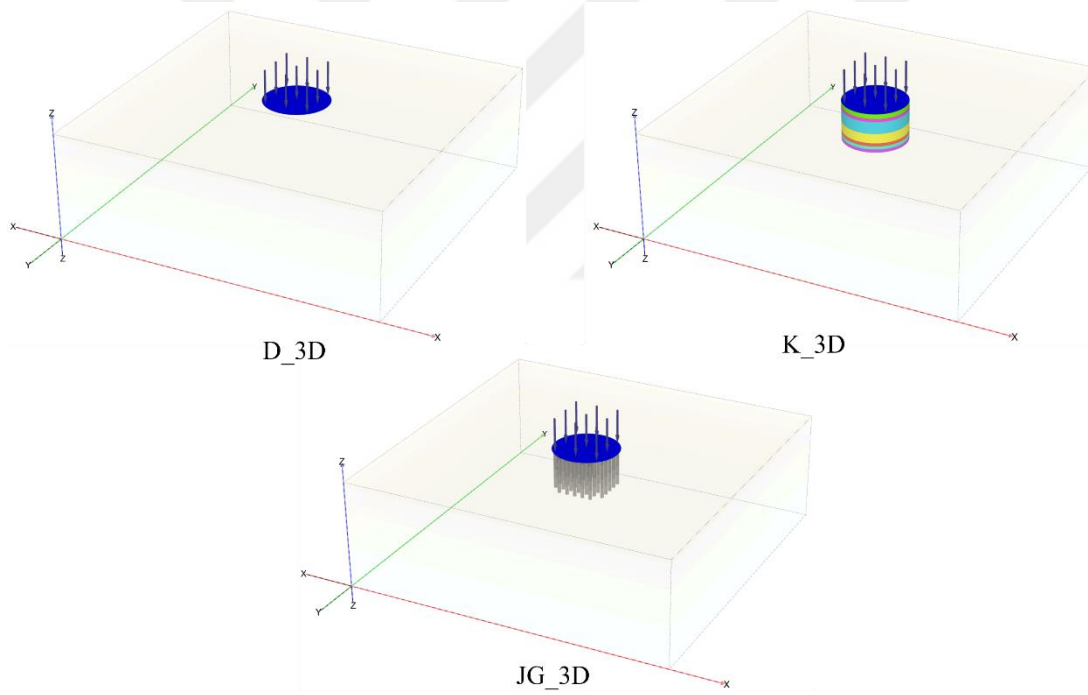
Tablo 3.9. Tekil kolon geometrisindeki değişkenler.

Jet grout çapı (m)	Jet grout aralığı (m)	Jet grout boyu (m)
0,6	1,5	2,5
0,8	2,0	10,3
1,0	2,5	11,3
		12,3

İki boyutlu ve üç boyutlu Plaxis analizlerinin temsili geometrik şekilleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te verilmektedir.

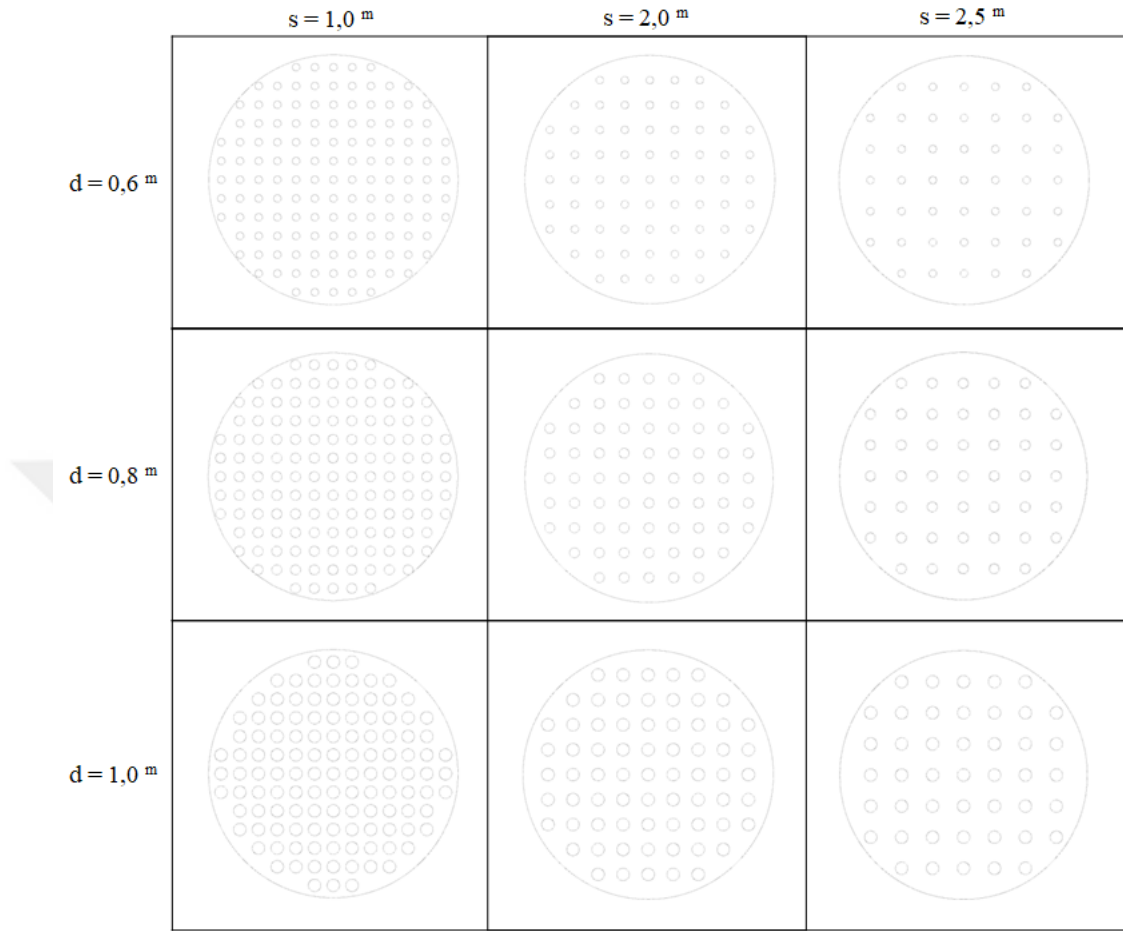


Şekil 3.3. Plaxis 2D ile modellenen temsili geometrik şekillerin perspektif görünüşü. Şekil 3.3'te verilen soldaki geometri modeli (D_2D), zemin iyileştirme öncesi iki boyutlu analizi simgelerken; sağdaki geometri (K_2D), kompozit bölgenin iki boyutlu modellemesini ifade etmektedir.



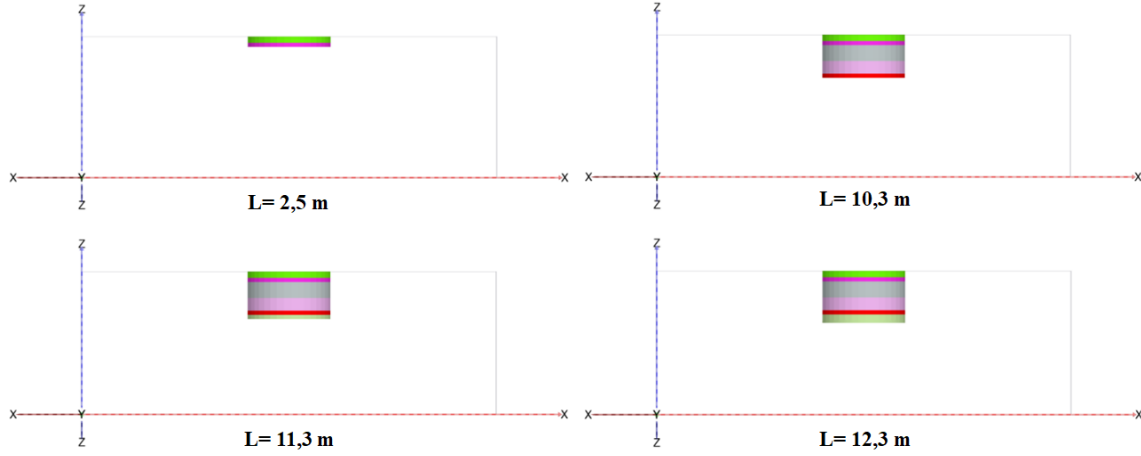
Şekil 3.4. Plaxis 3D ile modellenen temsili geometrik şekillerin perspektif görünüşü. Şekil 3.4'te yer alan üst sol geometri modeli (D_3D), zemin iyileştirme öncesi üç boyutlu analizi temsil ederken; üst sağdaki geometri (K_3D), kompozit bölgenin üç boyutlu modellemesini ifade etmektedir. En alttaki geometri (JG_3D) ise tekil kolon modeli ile yapılan üç boyutlu analizi temsil etmektedir.

Jet grout kolonlarının çapı ve aralığını temsil eden değişken parametrelerin, üç boyutlu analizlerdeki model görüntüleri Şekil 3.5'te sunulmuştur.

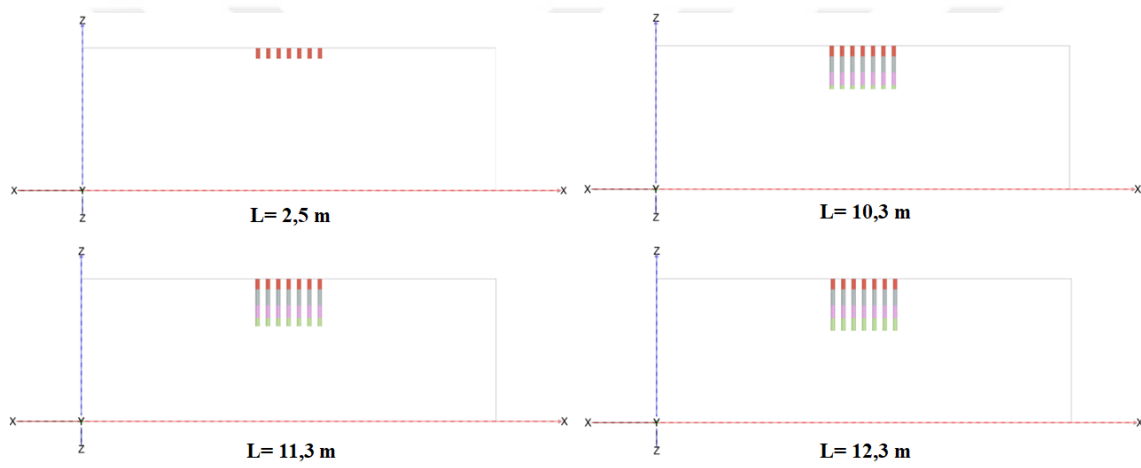


Şekil 3.5. Plaxis 3D'de modellenen tekil kolonların değişen çap ve aralıklarının üstten görüntüleri.

Üç boyutlu kompozit ortam ve tekil kolon analizlerinde, değişen kolon boylarının modellerdeki gösterimi Şekil 3.6 ile Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Plaxis 3D ile kompozit ortam modellerinde değişen kolon boylarının gösterimi.

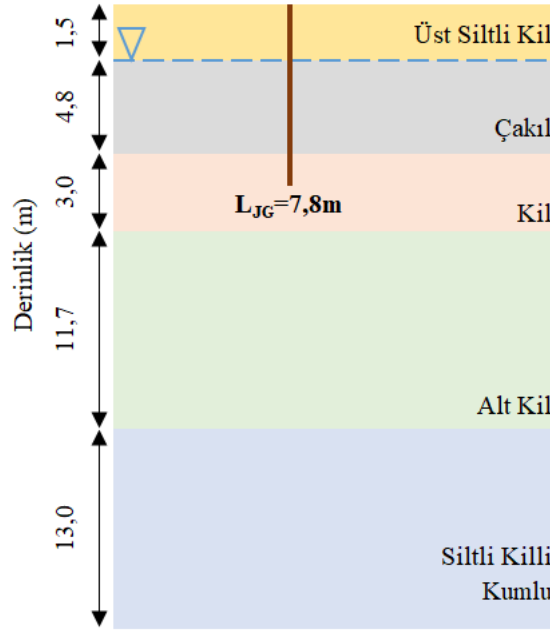


Şekil 3.7. Plaxis 3D ile tekil kolon modellerinde değişen kolon boylarının gösterimi.

Ek analizler

Bu çalışmada, iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerin yanı sıra yumuşak kilin etkisini gözlemleyebilmek için alternatif üç boyutlu Plaxis analizleri yapılmıştır. Bu alternatif analizler, zemin kesitindeki sağlam tabakaların altında zayıf bir tabakanın varlığı veya mevcut zemin profilinde daha yumuşak bir kil tabakasının bulunması durumunda oturma miktarlarının nasıl etkileneceğini gözlemlemek için uygulanmıştır.

Ek analiz modellerinde Tablo 3.2’de yer alan zemin parametreleri aynen kullanılmış ve jet grout kolonu kil tabakasına soketlenmiştir. Şekil 3.8’de idealize zemin profilinde jet grout kolon boyunun temsili gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.8. Özel analizlerde kullanılan zemin kesiti ve jet grout kolon boyu temsili gösterimi.

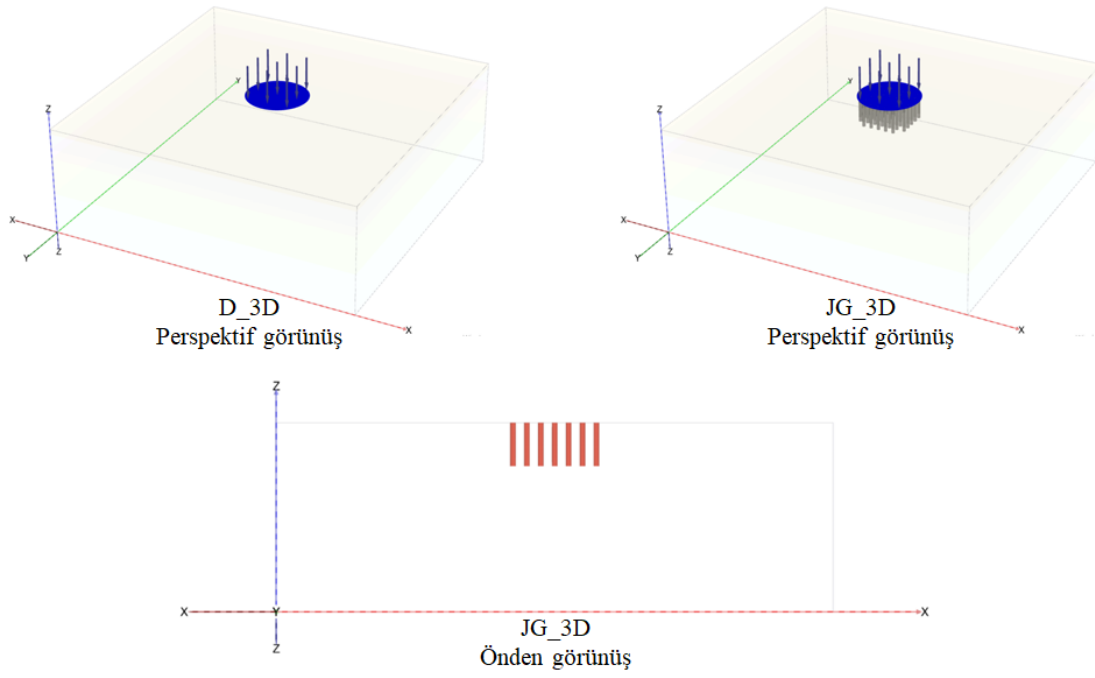
Bu analizlerde; jet grout boyu 7,8 metre olarak seçilmiş ve Plaxis 3D kullanılarak, silo yükü dolu (245 kPa) koşulları altında modelleme yapılmıştır. Daha önceki analizler gibi bu özel analizlerde de jet grout kolon geometrisindeki değişkenler aynı alınmıştır. Bu değişkenler aşağıda tekrardan hatırlatılmıştır:

- Jet grout kolon çapı (0,6 – 0,8 – 1,0 m)
- Jet grout kolon aralığı (1,5 – 2,0 – 2,5 m)

Daha sonrasında jet grout kolonunun 7,8 m soketlendiği kil tabakası zayıflatılarak (kayma dayanımı parametreleri zayıflatılmış), özel analizlerin kendi arasında kıyaslaması yapılmak istenmiştir. Bu yüzden aynı değişkenler ile yapılan analizler, zayıflatılmış kil parametreleri değiştirilerek tekrarlanmıştır. Değişen kil parametreleri aşağıda verilmiştir:

- Kohezyon (c'): 5 kPa
- Kayma direnci açısı (ϕ): 20°
- E_{50}^{ref} : 5000 kPa

Özel analizlerin temsili geometrisi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Özel analizlerin temsili geometrisi.

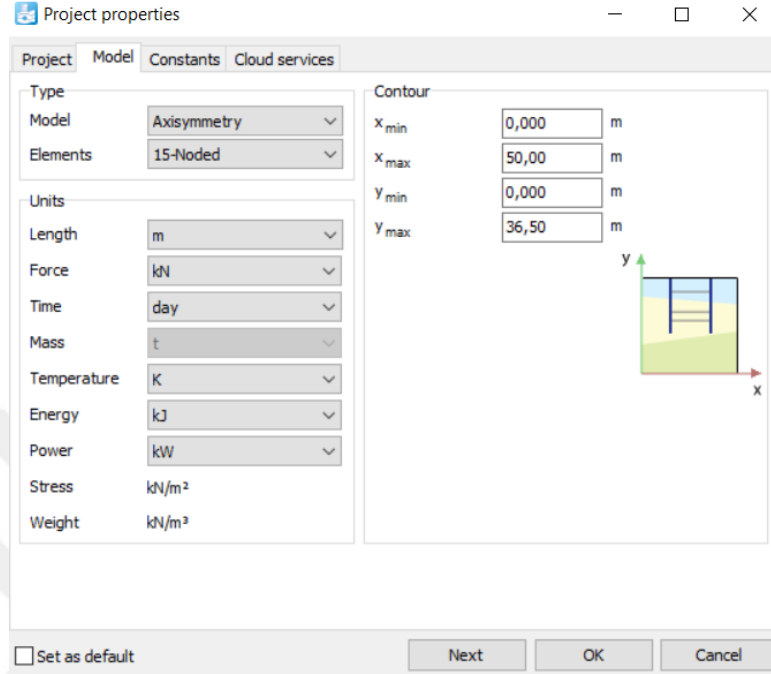
Şekil 3.9’da görülen sol üst köşedeki geometri modeli (D_3D), zemin iyileştirme öncesi üç boyutlu analizi temsil ederken; sağ üstteki geometri (JG_3D), tekil kolon modelinin üç boyutlu modellemesini göstermektedir. Alta yer alan görüntü ise tekil kolonun önden görünüşüdür.

3.2.3. Sonlu eleman ağı

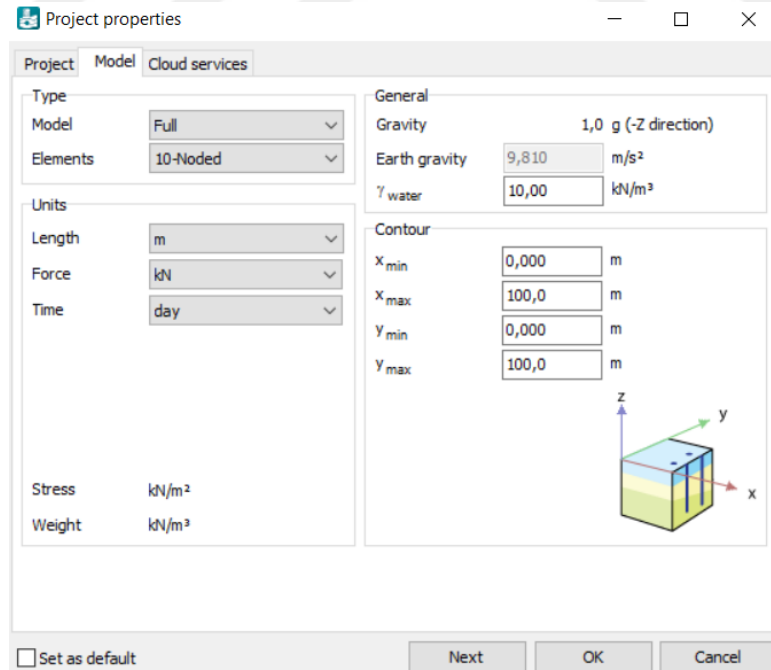
Plaxis ile yapılan analizlerde, oluşturulan modelin gerçeğe en yakın sonuçları verebilmesi için sınır şartlarının doğru bir şekilde belirlenmesi ve sonlu eleman ağıının oluşturulacağı alanın yeterince büyük olması gerekmektedir. Brinkgreve (2005) yaptığı çalışmada, yüzeysel temel veya dolgu uygulamaları için yapılan modellerde plan genişliğinin yatayda ve düşeyde minimum üç katı kadar çalışma alanı oluşturulması gerektiğini belirtmiştir.

Bu tez çalışmasında, çalışma alanının sınır koşulları iki boyutlu Plaxis analizlerinde eksenel simetriye sahip model oluşturulduğu için yatay düzlemde 50 m olarak belirlenmiştir. Üç boyutlu Plaxis analizleri için ise yatay düzlemde 100 m, düşey düzlemde de 100 m genişliğinde çalışma alanı seçilmiştir.

Çalışma kapsamında bahsedilen iki boyutlu Plaxis analizlerin model parametreleri Şekil 3.10'da, üç boyutlu Plaxis analizlerin model parametreleri ise Şekil 3.11'de verilmiştir.



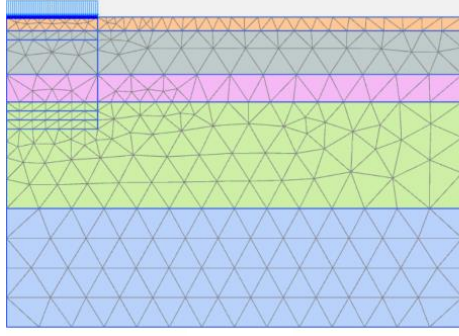
Şekil 3.10. Plaxis 2D model parametreleri.



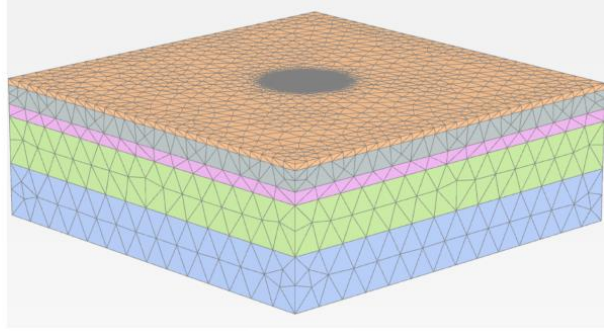
Şekil 3.11. Plaxis 3D model parametreleri.

Geometri modeli tamamlandıktan sonra sonlu eleman modeli veya ağ (mesh) oluşturulmaktadır. Plaxis programı otomatik bir ağ oluşturma prosedürüne izin vermektedir. Ağ oluşturma, geometri modelindeki noktaların ve çizgilerin konumunu tam olarak hesaplar; tabakaların, yüklerin ve yapıların tam konumlarını sonlu eleman ağında hesaba katmaktadır. Ağ oluşturma işlemi, en uygun üçgenlerin araştırıldığı ve biçimsiz bir ağı önleyen sağlam bir üçgenleme prensibine dayanmaktadır. Bu ağlar düzenli eleman kalıplarından oluşmaz, ancak düzenli eleman sıralarıyla oluşturulan düzgün biçimli ağlara göre sayısal performansı daha iyi sonuçlar vermektedir. Geometri modelinden girdi verileri (özellikler, sınır koşulları, malzeme setleri vb.) sonlu eleman ağına dönüştürülmektedir. Sonuç olarak, Plaxis programında sonlu eleman analizlerinin doğruluğu ağ yapısının sıklığına bağlıdır. Böylece model küçük öğelere bölünür ve birbirleriyle ilişkili olarak çözüme ulaştırılmaktadır (Maşalı ve Görür, 2018).

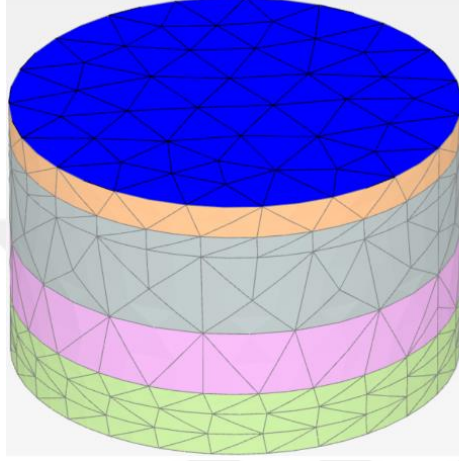
Bu tez çalışmasında kullanılan modellerin sonlu eleman ağı görüntüsü Şekil 3.12’de görülmektedir.



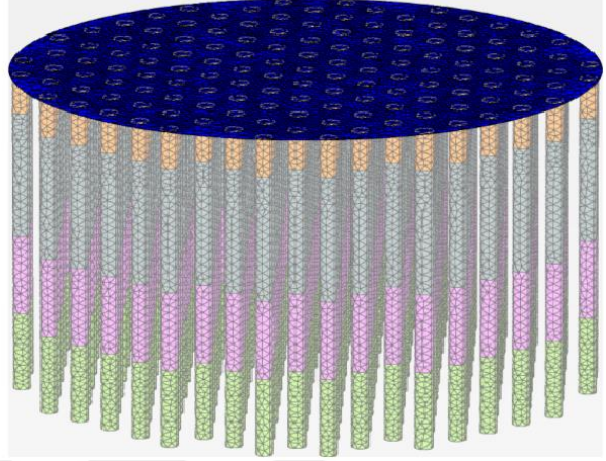
K_2D



D_3D



K_3D



JG_3D

Şekil 3.12. Plaxis modellerinin sonlu eleman ağı görüntüsü.

Şekil 3.12’de görülen K_2D kodu kompozit bölge ile temsil edilen iki boyutlu modelleri, D_3D zemin iyileştirme öncesi (doğal) üç boyutlu modelleri, K_3D kompozit bölge ile temsil edilen üç boyutlu modelleri ve JG_3D kodu ise tekil kolonların üç boyutlu modellemelerini ifade etmektedir.



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

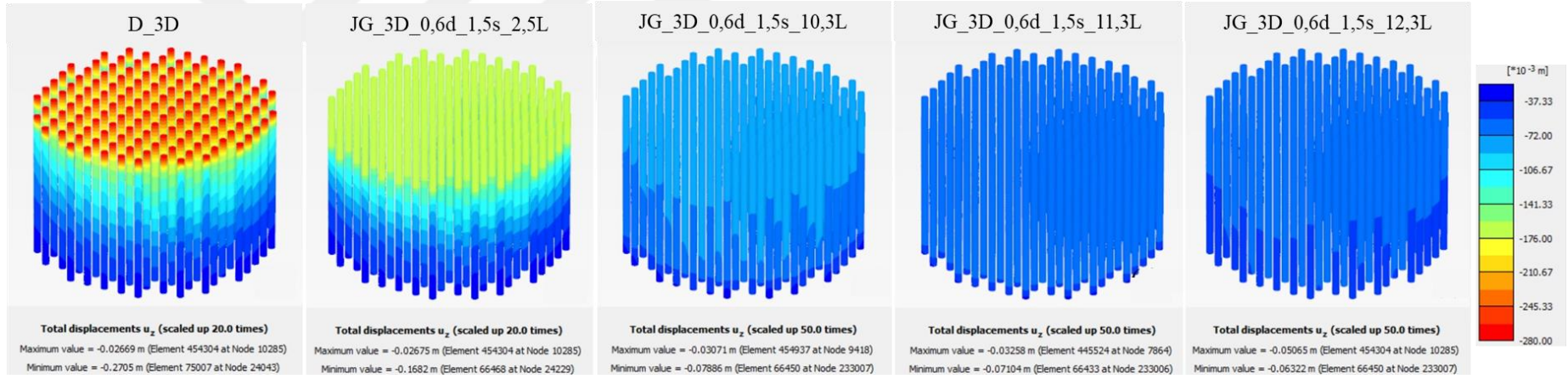
Bu tez kapsamında jet grout imalatının zeminlerde oluşabilecek oturma büyüklüklerine olan etkileri sayısal çözümleme yöntemleri ile incelenmiştir. Sayısal çözümlemeler; Plaxis 2D ve 3D yazılımı ile yürütülmüş olup, analiz çıktılarında parametrik değişkenlerin etkileri irdelenmiştir. Bu kapsamda, belirli bir zemin kesiti üzerine dairesel tabanlı silonun yüksüz ve yüklü inşası durumunda farklı çap, aralık ve boydaki jet grout grubu olmadan ve jet groutlar var iken analizler yürütülüp kıyaslanmıştır. Bu analizler ile optimum çap, aralık ve boy değerleri belirlenmiştir. Plaxis 3D’de yürütülen bu analizlere ek olarak zemin – jet grout ortamının kompozit bir ortam olarak modellenmiş analizlerine de yer verilmiştir. Böylece jet groutların tekil veya kompozit ortam olarak modellenmesindeki farklılıklar görülebilecektir. Plaxis 2D ve 3D programlarının zaman ve maliyet tasarrufu açısından kıyasının yapılabilmesi adına, kompozit ortamdan oluşan analizler 2D kullanılarak tekrarlanmıştır. Bu karşılaştırma, değişken jet grout parametrelerinin hangi koşullar altında Plaxis 3D’nin kullanımını zorunlu kılacağına veya hangi durumlarda 2D ve 3D arasında azımsanamayacak derecede farklılıklar oluşacağına cevabını vermiştir. Son olarak, jet groutların soketlendiği zemin tabakasının yumuşak olması durumunda oluşacak etkinin incelenmesi adına ek analizler yürütülmüştür. Bu bölümde analiz sonuçları verilmiş ve gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlar silonun yüklü (dolu) ve yüksüz (boş) durumlarında paralellik gösterdiği için bu bölümdeki kıyaslamalar dolu silolar için yapılmış olup, boş siloların analiz sonuçlarına Eklerde yer verilmiştir.

4.1. Tekil Jet Grout Kolonlarının Analiz Sonuçları (Plaxis 3D)

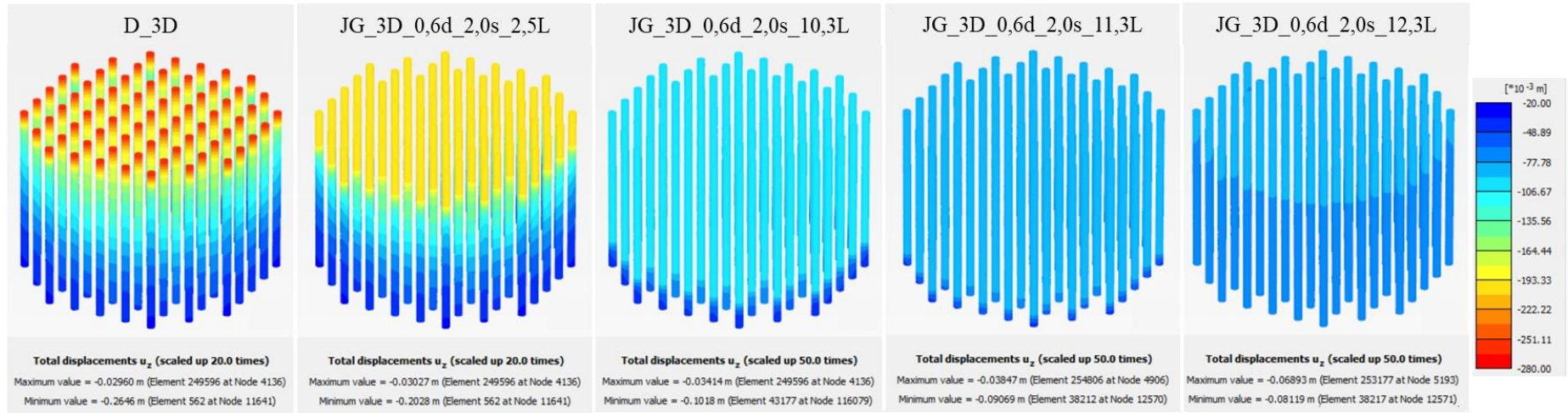
Jet grout kolonlarının tekil olarak modellendiği 3 boyutlu Plaxis analizlerinin sonuçları Şekil 4.1 ile Şekil 4.9 arasında verilmiştir. Bu sonuçlar düşey oturma değerlerinin jet grout bölgesi boyunca dağılımını renklendirme yöntemi ile göstermektedir. Şekil 4.1'den Şekil 4.3'e kadar olan analizler çapın 0,6 m olduğu; Şekil 4.4'ten Şekil 4.6'ya kadar olan analizler çapın 0,8 m olduğu; Şekil 4.7'den Şekil 4.9'a kadar olan analizler ise çapın 1,0 m olduğu analizlerdir. Her çap için ise farklı aralık değerleri için (1,5 m - 2,0 m - 2,5 m) üç farklı sonuç sunulmaktadır. Tüm bu değişkenler ilgili kodlar ile temsil edilmektedir.

Analizler kıyaslandığında, jet grout kolonlarının boyu arttıkça oturma değerlerindeki azalma göze çarpan ilk bulgu olmaktadır. Çapın sabit tutulduğu koşullarda ise beklendiği üzere aralık değeri ile oturma değerleri doğru orantılı olup, aralık yükseldikçe daha fazla oturma gerçekleştiği görülmektedir. Ancak farklı çaplardaki jet grout kolonlarının sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bu etkinin artan çap değeri için sönümlendiği belirlenmektedir. Bu durum, kolon çapındaki artışın oturmaları azaltmasından kaynaklanmaktadır. Genel tablo incelendiğinde ise çaptaki değişimin oturma miktarı üzerindeki etkisi, aralıktaki değişime göre daha pasif kaldığı gözlemlenmektedir. En ideal koşulların ise kolonların alt kile soketlenmesi sonucu olduğu, ancak alt kildeki soket boyunun birer metre uzatılmasının pek bir değişime sebep olmadığı, bu nedenle optimum boyun 10,3 metreye denk geldiği sonucuna varılmıştır.

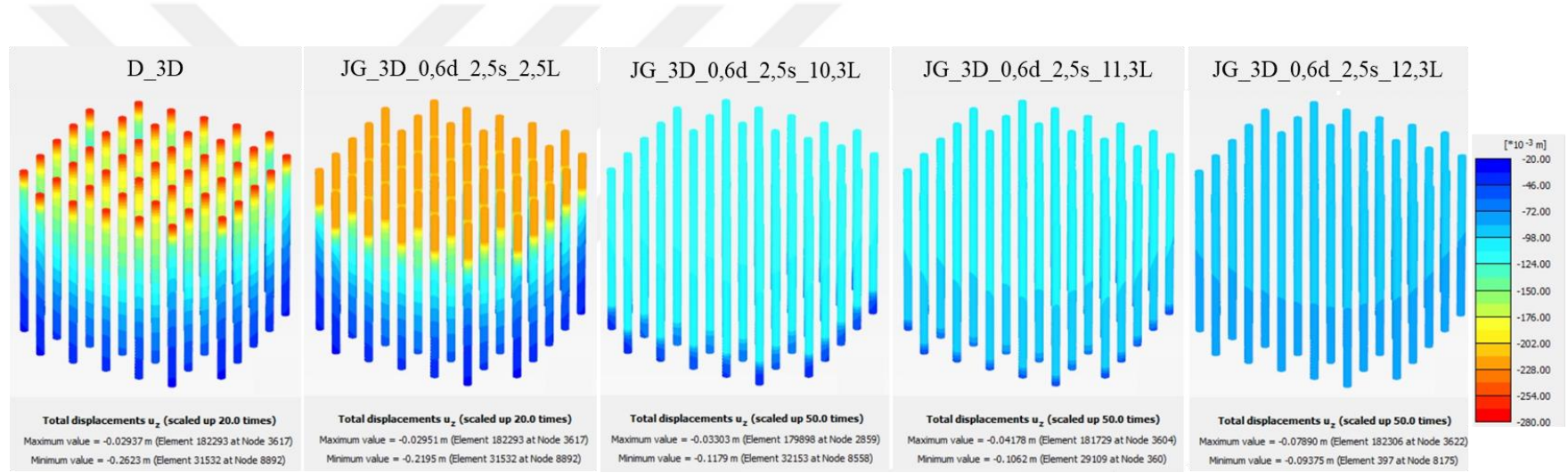
İyileştirme öncesi doğal durum ile iyileştirme sonrası jet grout kolonlarını içeren durumlar kıyaslandığında ise oturmaların ortalama 27 cm mertebelerinden 6 cm'e kadar düşürülebildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bakıldığında; %22 oranında bir oturma düşüşü gözlemlenmiş olup, jet grout ile iyileştirme sonrasında oturma miktarları izin verilebilir sınırlar içinde yer almıştır.



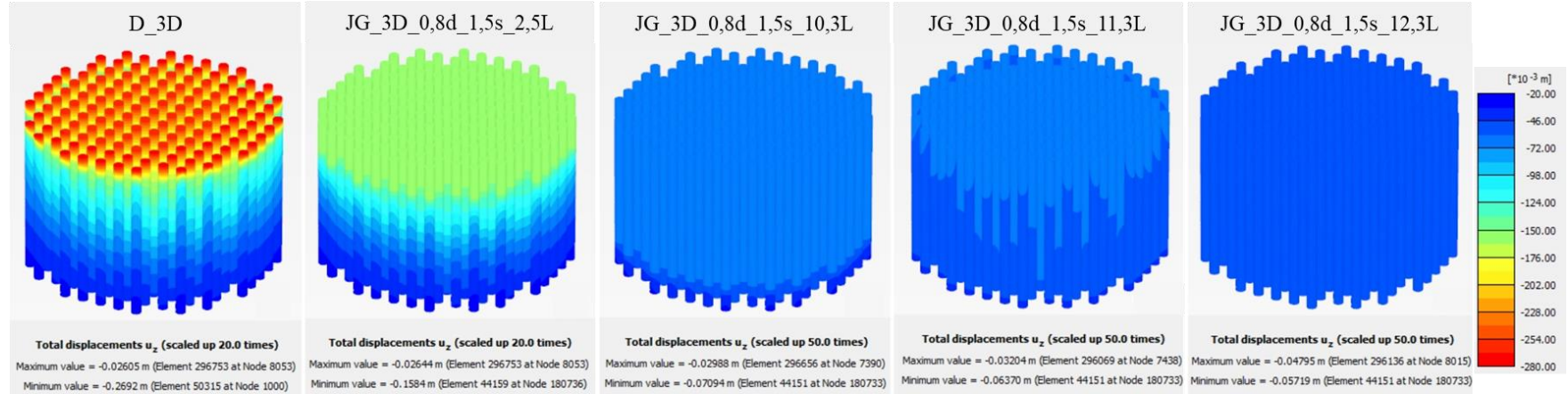
Şekil 4.1. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



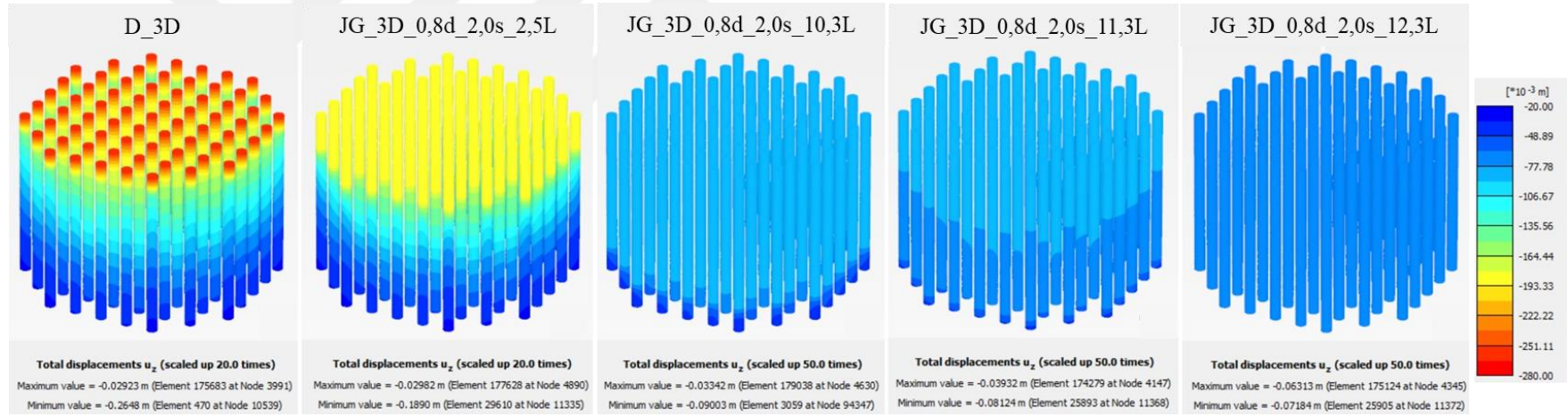
Şekil 4.2. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



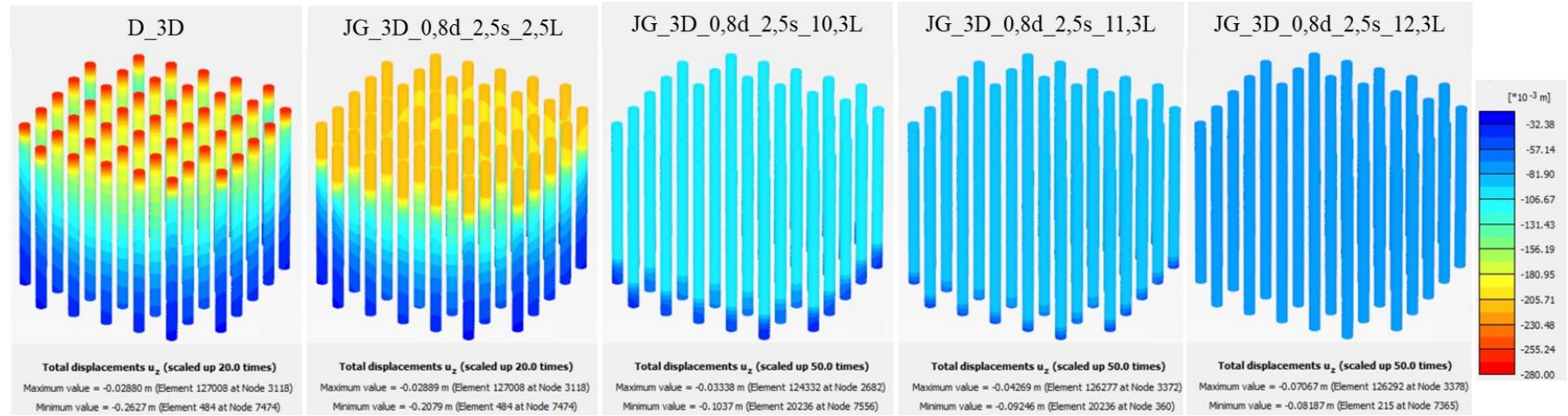
Şekil 4.3. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



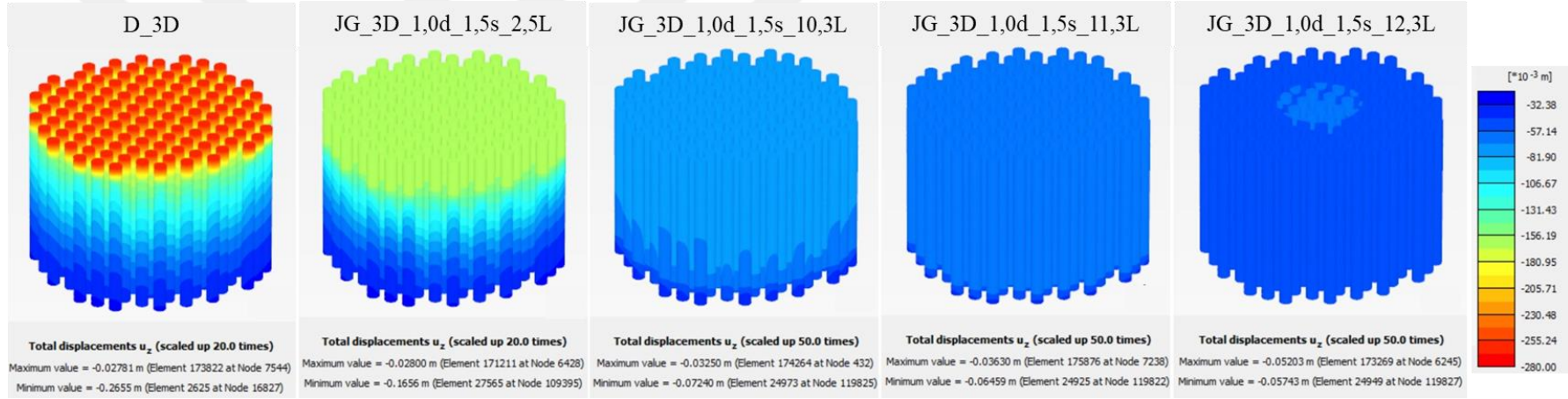
Şekil 4.4. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



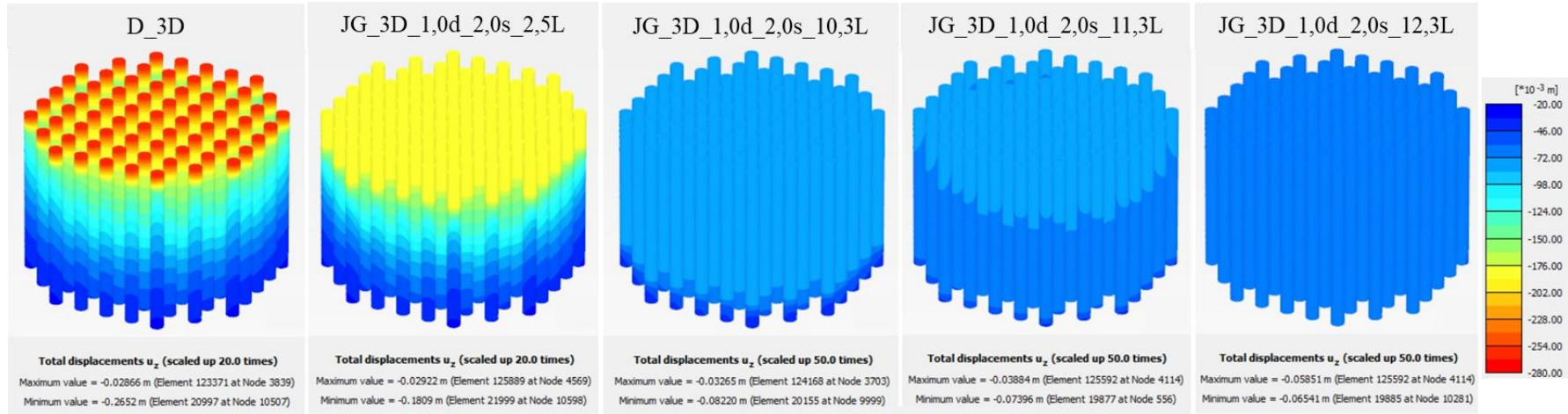
Şekil 4.5. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



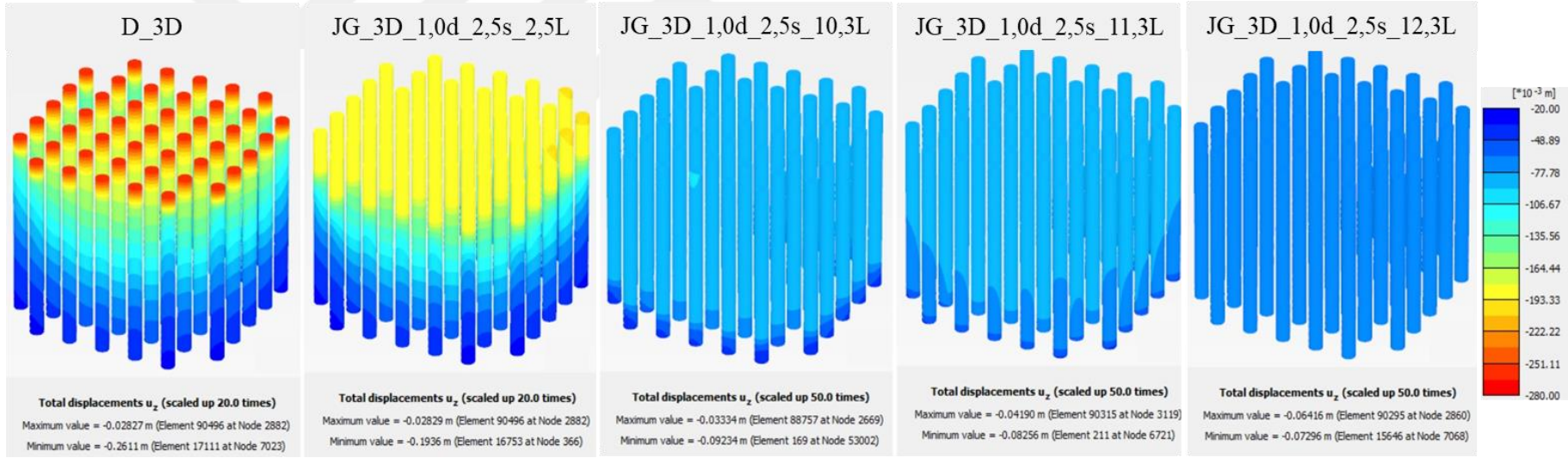
Şekil 4.6. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.7. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.8. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



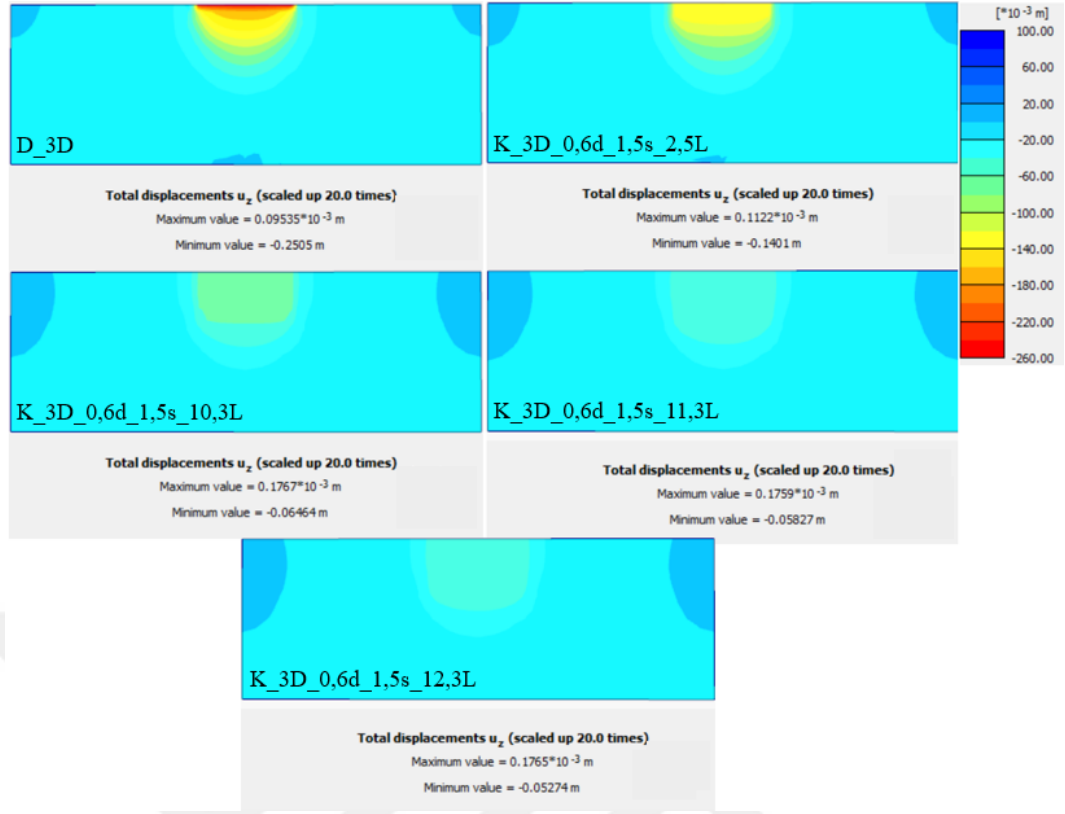
Şekil 4.9. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.

4.2. Kompozit Ortam Analiz Sonuçları (Plaxis 3D)

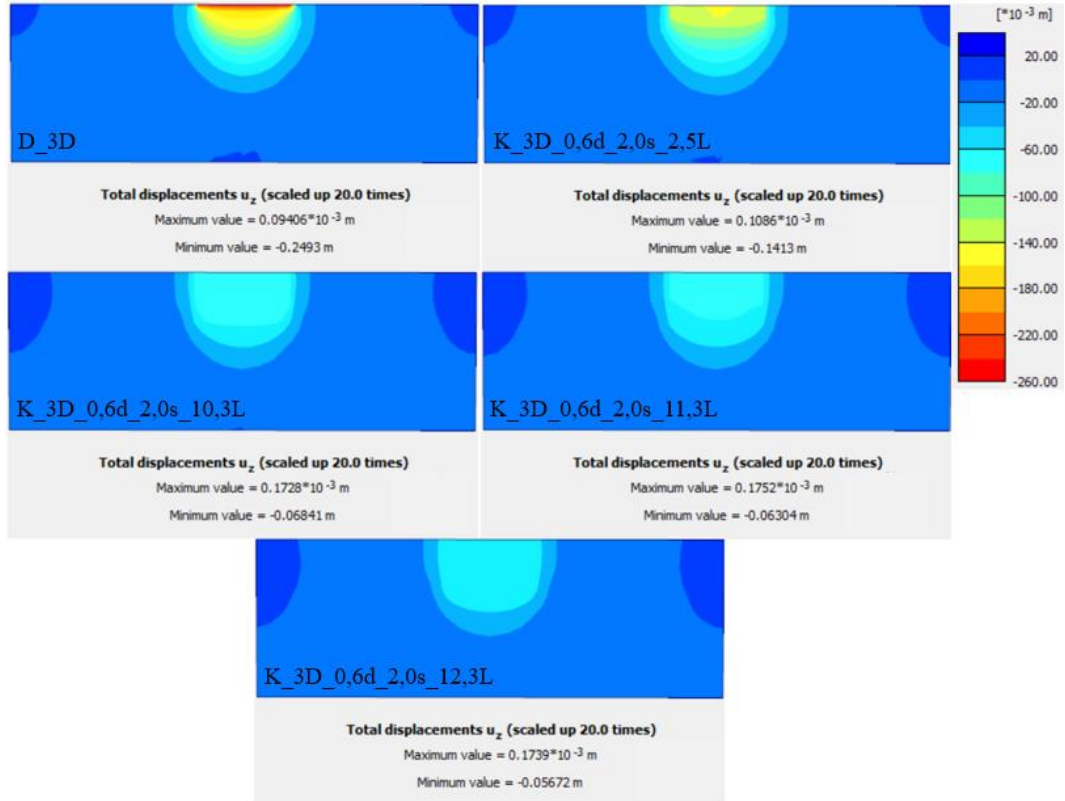
Jet grout kolonlarının ve zeminin oluşturduğu kompozit ortamın modellendiği 3 boyutlu Plaxis analizlerinin sonuçları Şekil 4.10 ile Şekil 4.18 arasında verilmiştir. Şekil 4.10'dan Şekil 4.12'ye kadar olan analizler çapın 0,6 m olduğu; Şekil 4.13'ten Şekil 4.15'e kadar olan analizler çapın 0,8 m olduğu; Şekil 4.16'dan Şekil 4.18'e kadar olan analizler ise çapın 1,0 m olduğu analizlerdir. Her çap için ise farklı aralık değerleri için (1,5 m - 2,0 m - 2,5 m) üç farklı sonuç sunulmaktadır. Tüm bu değişkenler ilgili kodlar ile temsil edilmektedir. Buradaki gösterimler, düşey oturma değerlerinin maksimum olarak beklenildiği orta kesite aittir.

Sonuçlar irdelendiğinde, jet groutların tekil kolonlar olarak modellendiği analizlerle bir paralellik olduğu bariz bir şekilde gözükmemektedir. Bu durum da kolonların tekil olarak modellenmesi veya kompozit bölge tanımı yapılması arasında önemli bir fark olmayacağını simgelemektedir. Eleman sayısının çokluğu ve analiz geometrisinin karmaşıklığı bakımından 3 boyutlu analizlerde tekil kolon yerine kompozit bölge kullanımının avantajlı olacağı yargısı öne çıkmaktadır. Düşey oturma değerlerinin orta kesitteki dağılımı renklendirildiğinde; jet grout kolonlarının olmadığı doğal durumda oturmaların daha derinlere aktarıldığı, diğer koşullarda kompozit bölge derinliğinin artışı ile oturma miktarının yüzeyde yoğunlaştığı görülmektedir. Hemen hemen her çapta 2,5 m'lik bir bölgenin jet grout ile temsilinin oturmaların azalmasına minimum katkı sağladığı, oturmaların kayda değer düşüşü için gerekli boyun en az 10,3 m olduğu, bu boydan sonrasının ise kayda değer bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

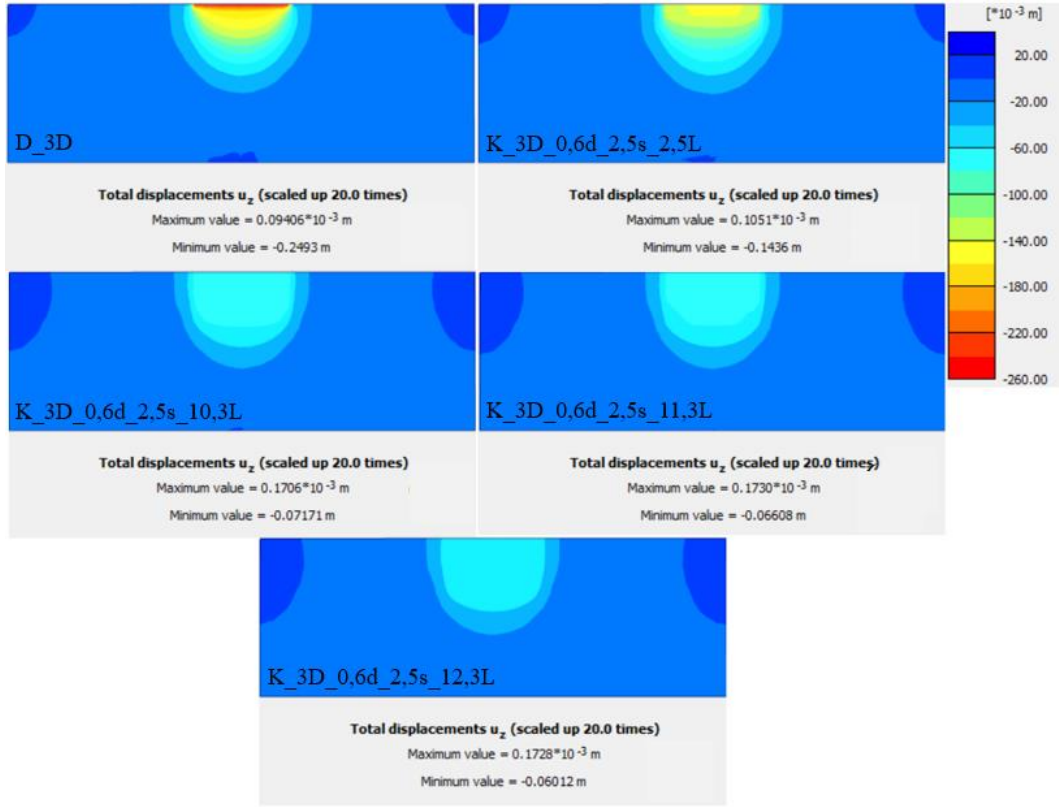
Jet grout çapı sabit iken aralıklara göre değişkenlik gösteren kesitler kıyas edildiğinde (bkz. 2,5 m boy için) jet grout aralığındaki artışın yüzeye yakın orta bölgede yoğunlaşan konveks şeklinde bir oturma kalıbına yol açtığı gözlemlenmiştir. Kompozit bölgenin, dolayısıyla jet grout kolonlarının, daha uzun olduğu analizlerde ise (bkz. 10,3 m) bu etki kendisini geniş bir oturma alanı şeklinde ortaya çıkarmıştır. Orta bölgede oluşan konveks şeklindeki oturma alanının çap büyüdükçe ortadan kaybolduğu ise etkinin sönümlendiğini göstermektedir.



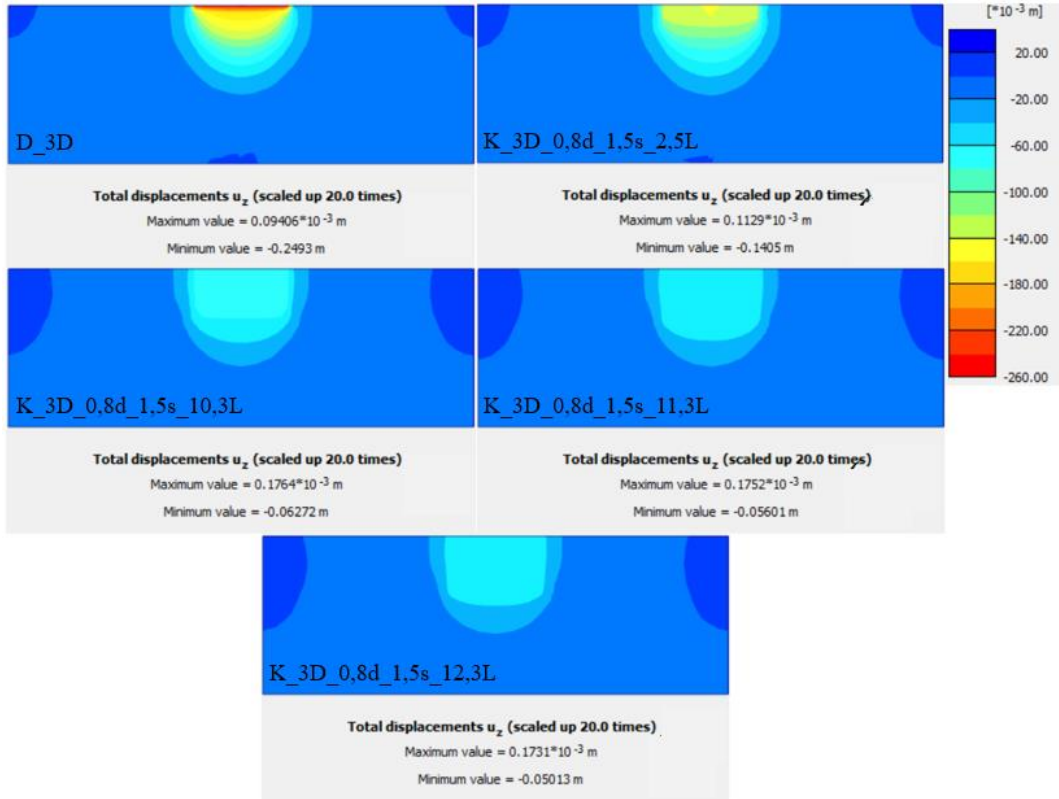
Şekil 4.10. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



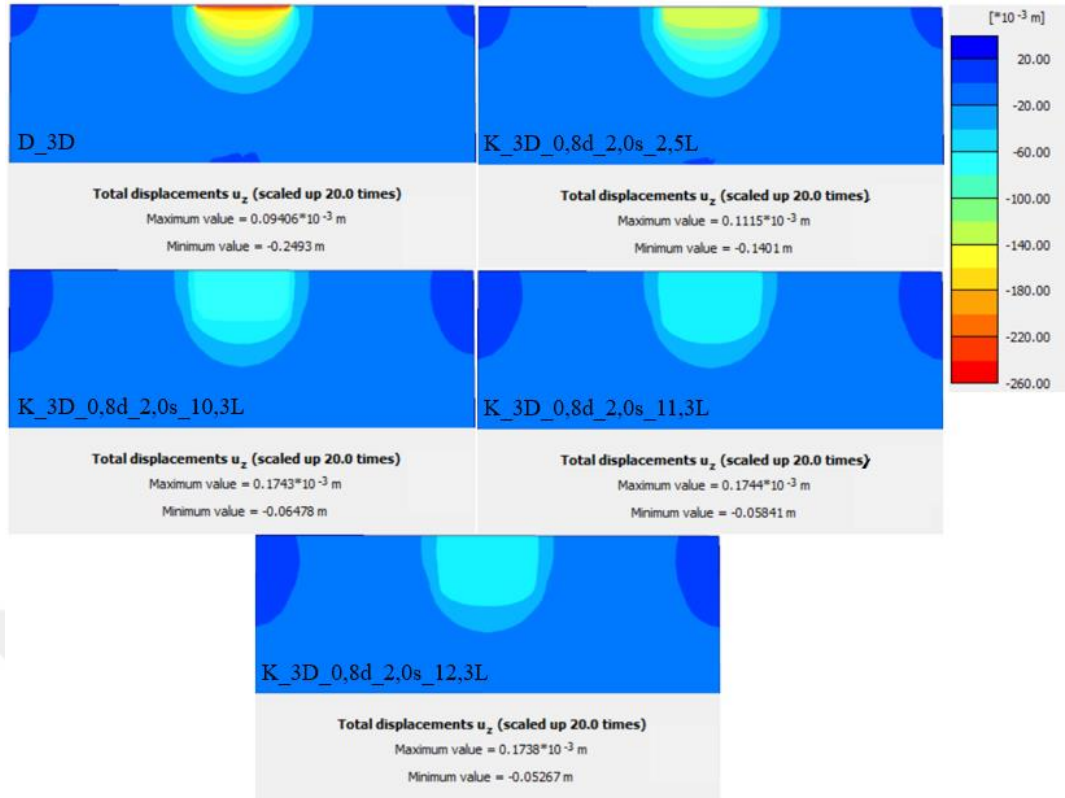
Şekil 4.11. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



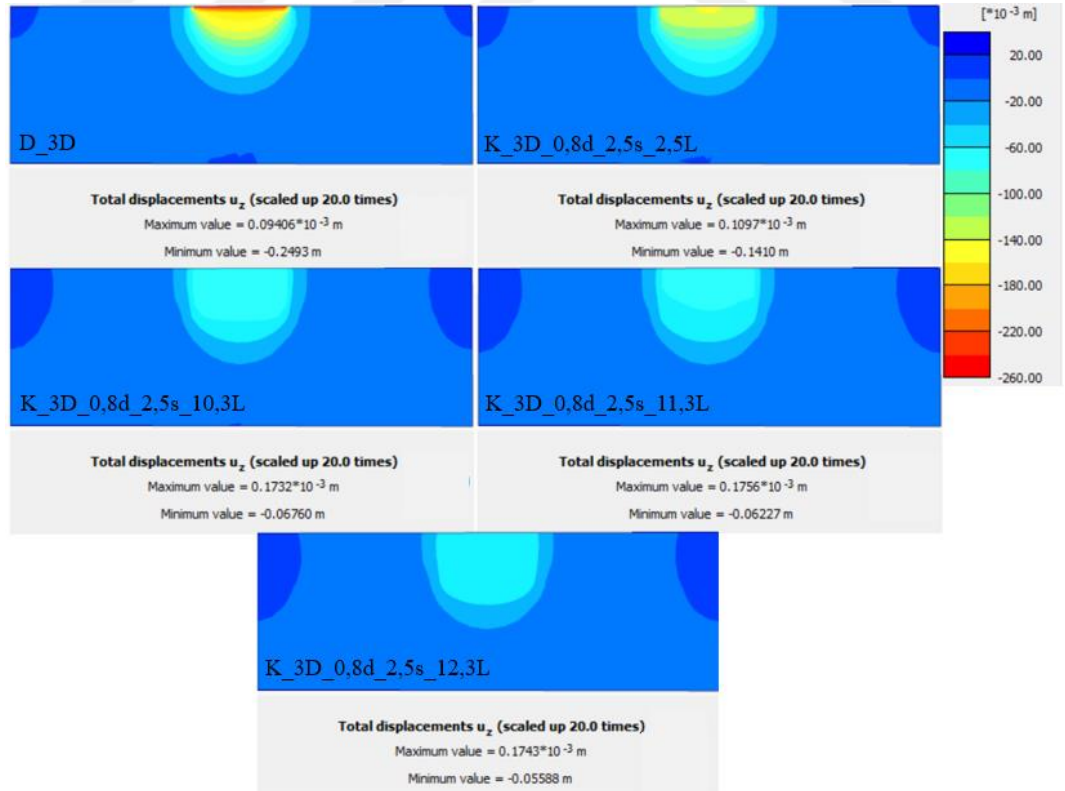
Şekil 4.12. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



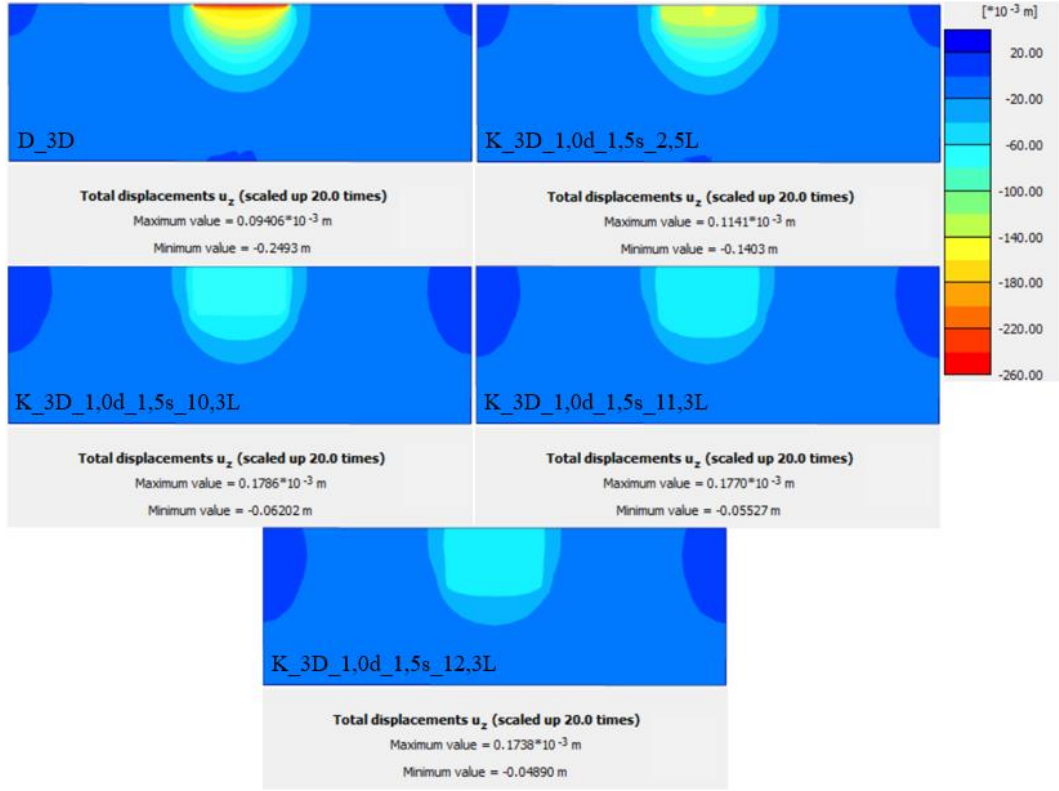
Şekil 4.13. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



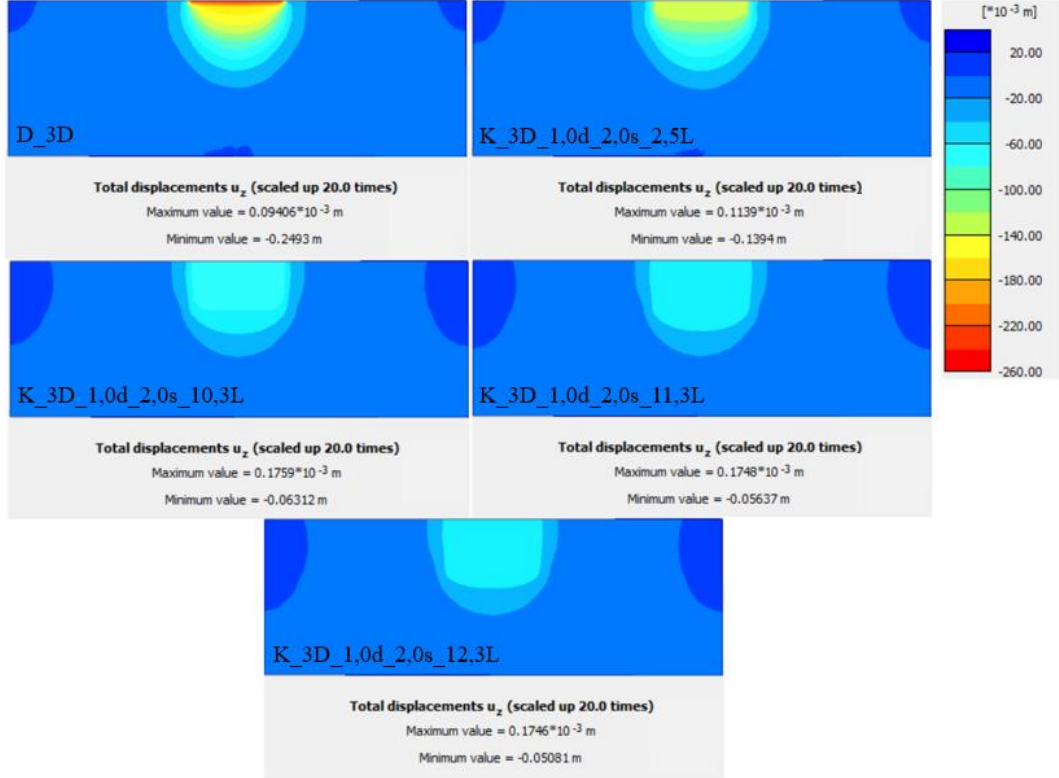
Şekil 4.14. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



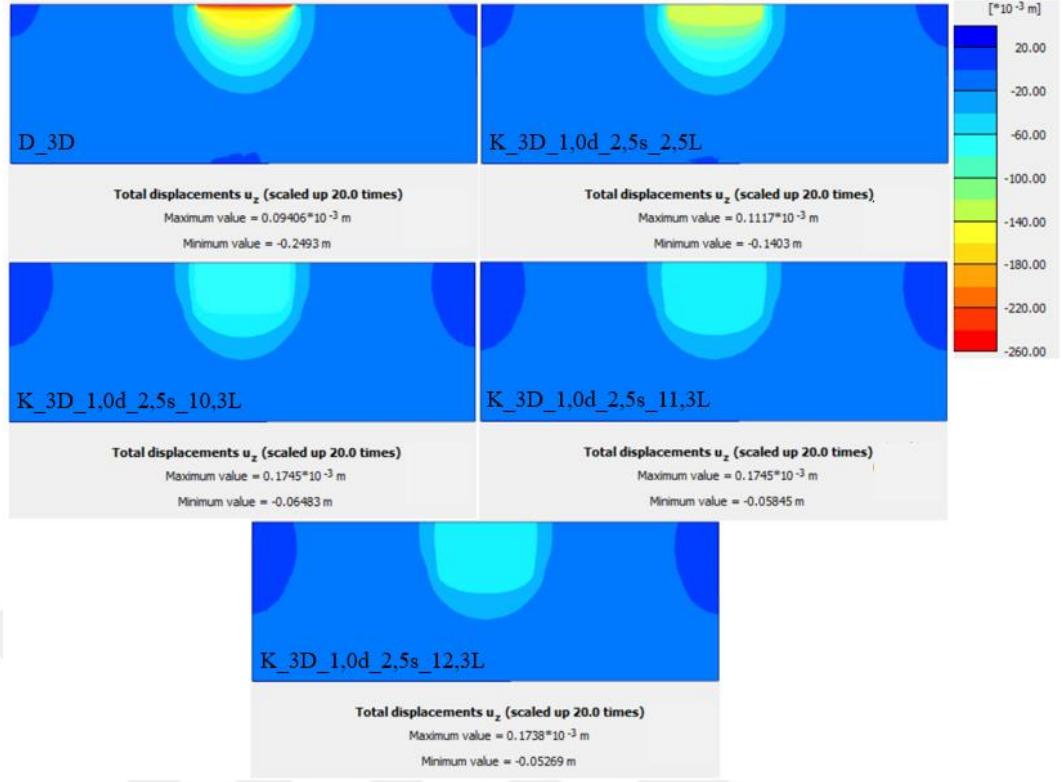
Şekil 4.15. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.16. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.17. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.

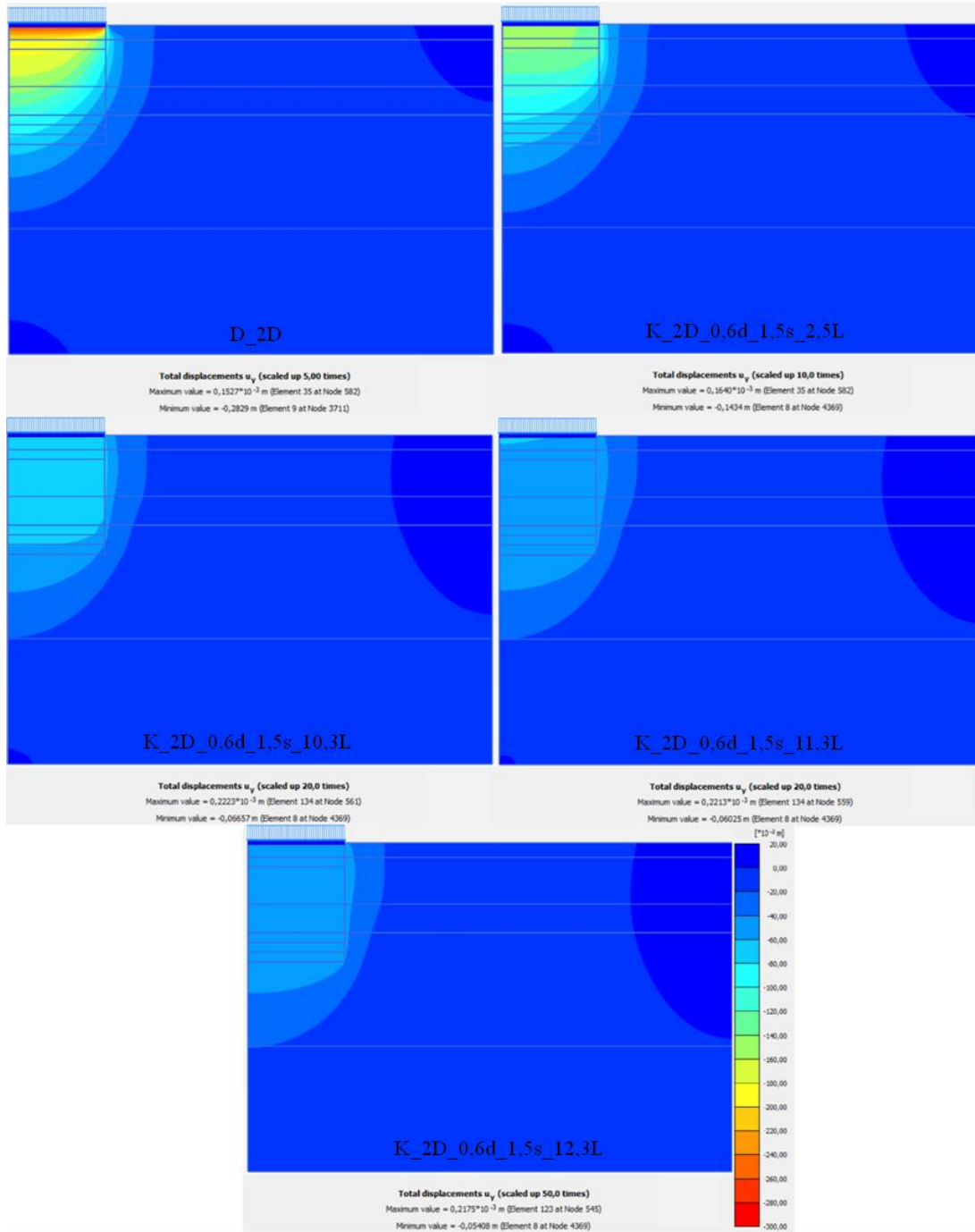


Şekil 4.18. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 3D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.

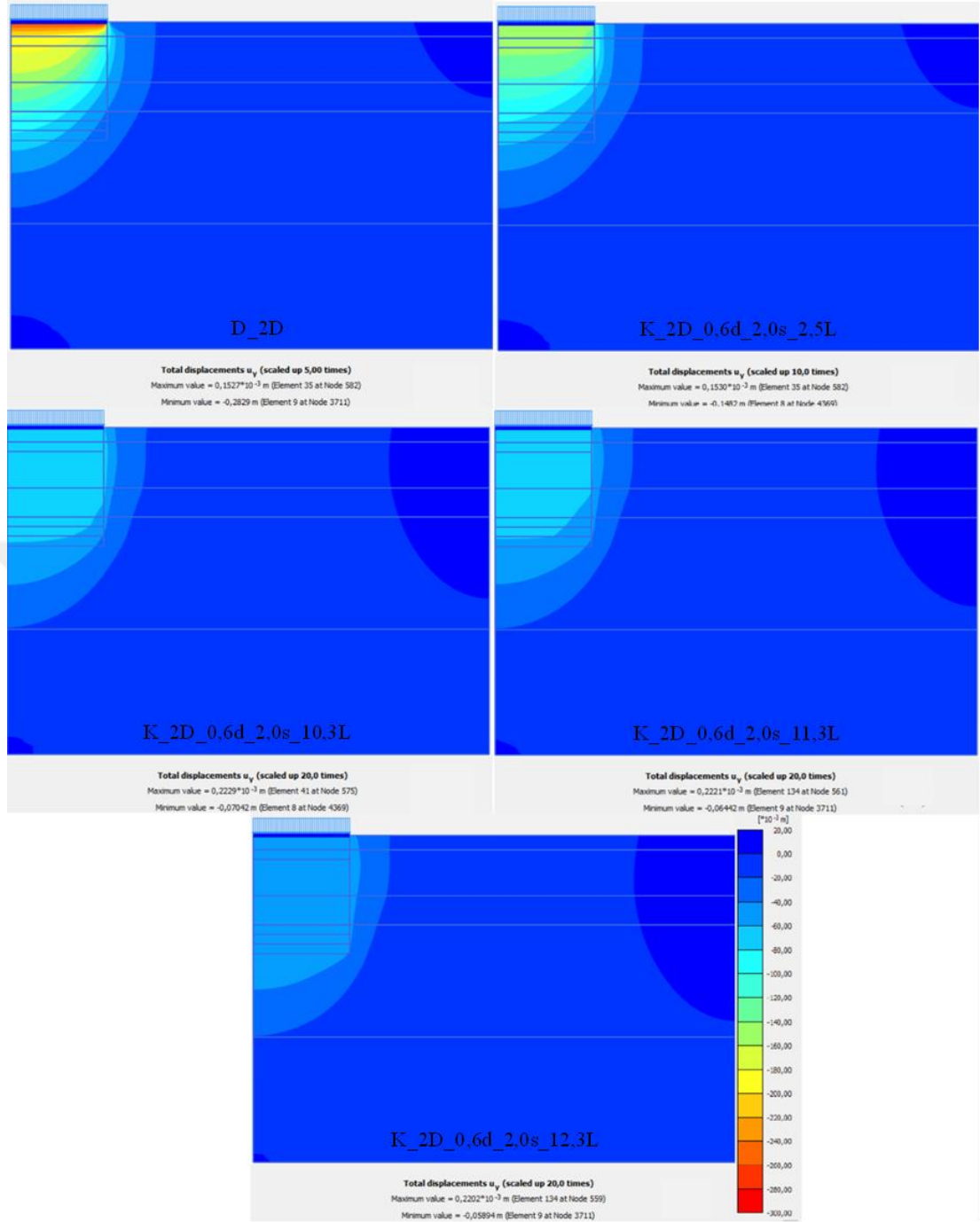
4.3. Kompozit Ortam Analiz Sonuçları (Plaxis 2D)

Plaxis 2D ve 3D programlarının zaman ve maliyet tasarrufu açısından kıyasının yapılabilmesi adına, kompozit ortamdan oluşan analizler 2D kullanılarak tekrarlanmıştır. Jet grout kolonlarının ve zeminin oluşturduğu kompozit bölgenin modellendiği 2 boyutlu Plaxis analizlerinin sonuçları Şekil 4.19 ile Şekil 4.27 arasında verilmiştir. Şekil 4.19’dan Şekil 4.21’e kadar olan analizler çapın 0,6 m olduğu; Şekil 4.22’den Şekil 4.24’e kadar olan analizler çapın 0,8 m olduğu; Şekil 4.25’ten Şekil 4.27’ye kadar olan analizler ise çapın 1,0 m olduğu çözümlemelerdir. Her çap için farklı aralık değerlerine yönelik (1,5 m - 2,0 m - 2,5 m) üç farklı sonuç sunulmaktadır. Tüm bu değişkenler ilgili kodlar ile temsil edilmektedir. Buradaki oturma değerleri kesitlerin ortasından alınan sonuçlara aittir.

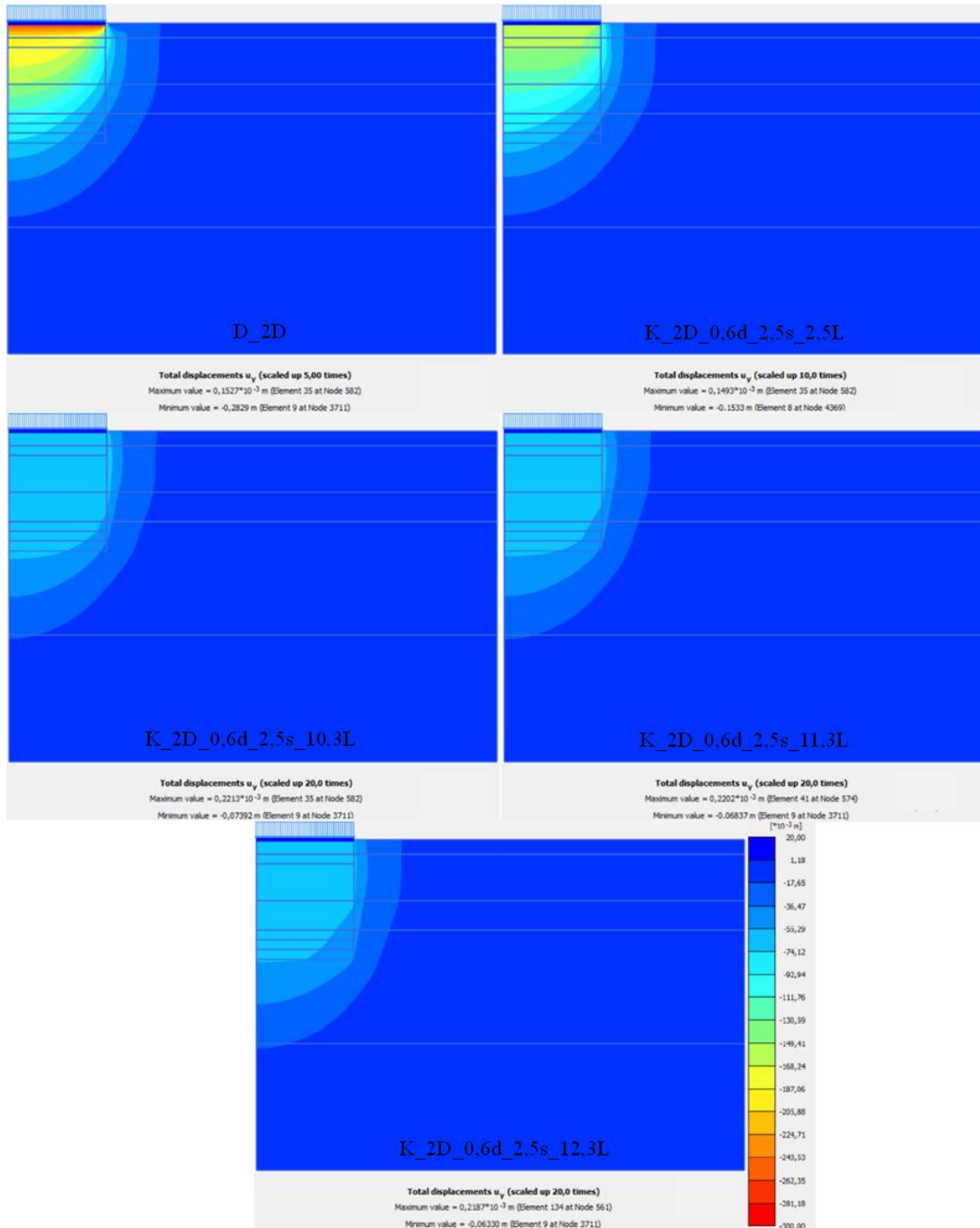
2 boyutlu analizler 3 boyutlu analizler ile kıyas edildiğinde büyüklük olarak oturmaların hemen hemen her çap, aralık ve boy için çok az mertebelerde değişmiş olduğu, daha detaylı incelemelerin ileriki bölümlerde yer verilecek olan grafikler ile belirlenebileceği anlaşılmıştır.



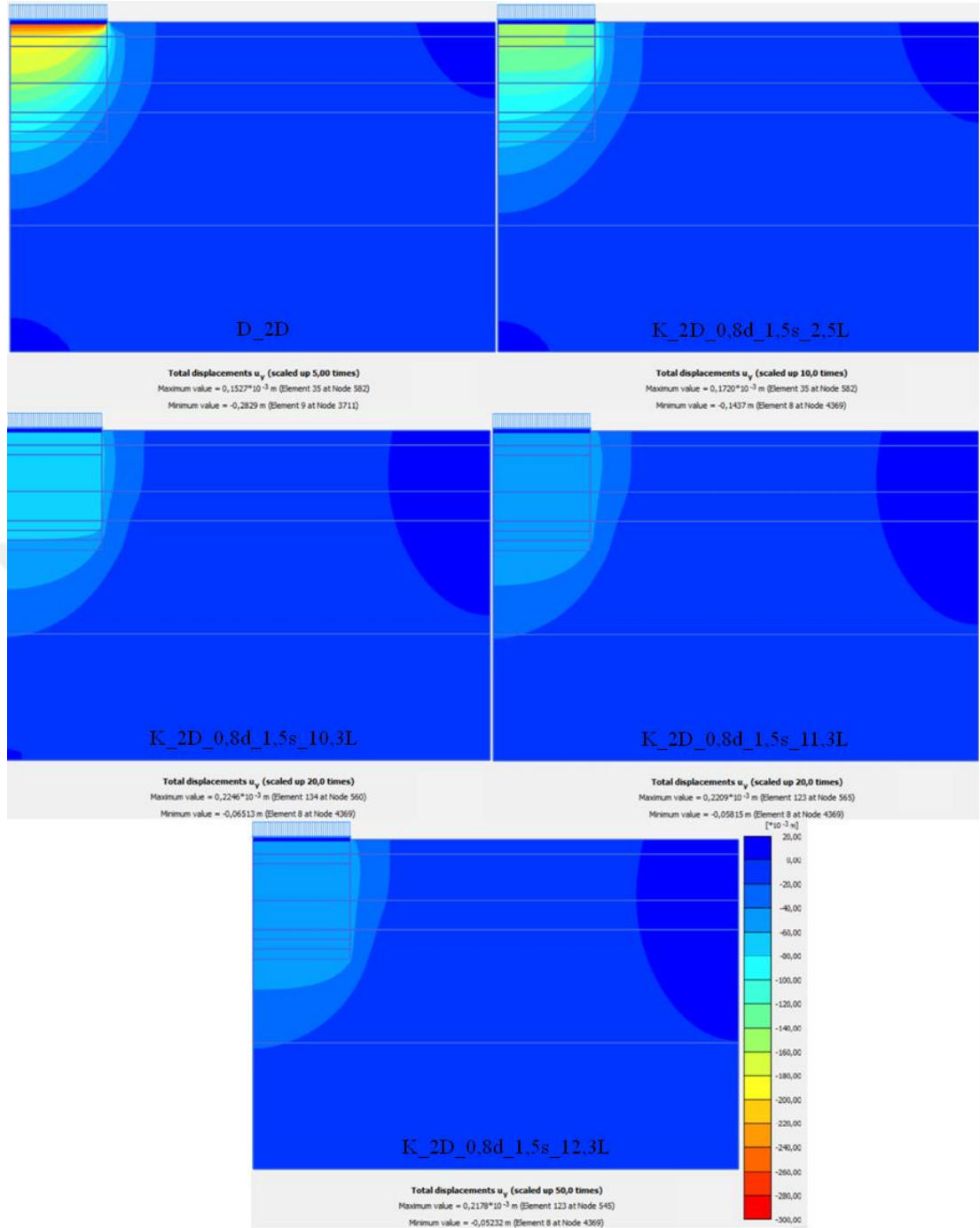
Şekil 4.19. 0,6 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



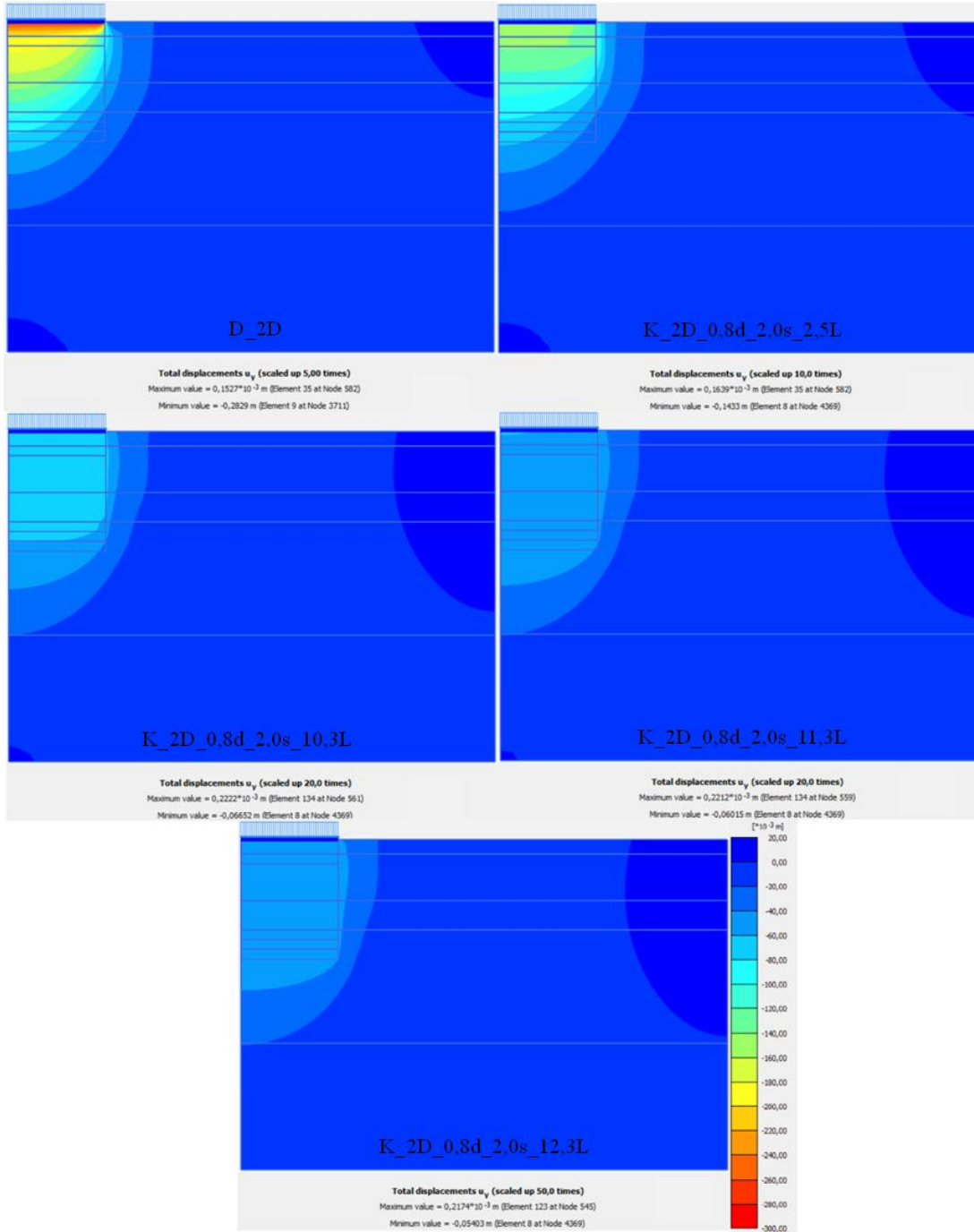
Şekil 4.20. 0,6 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



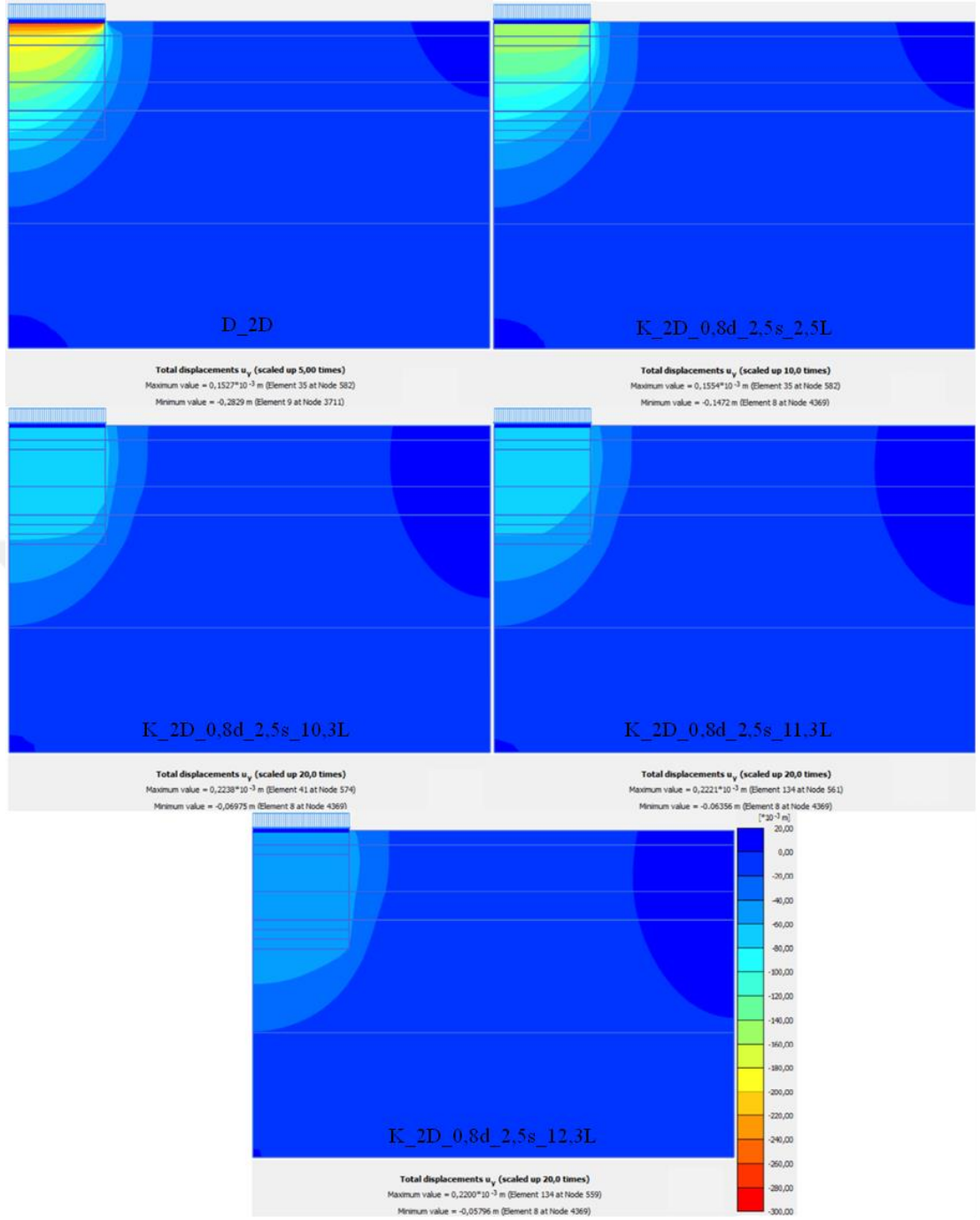
Şekil 4.21. 0,6 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



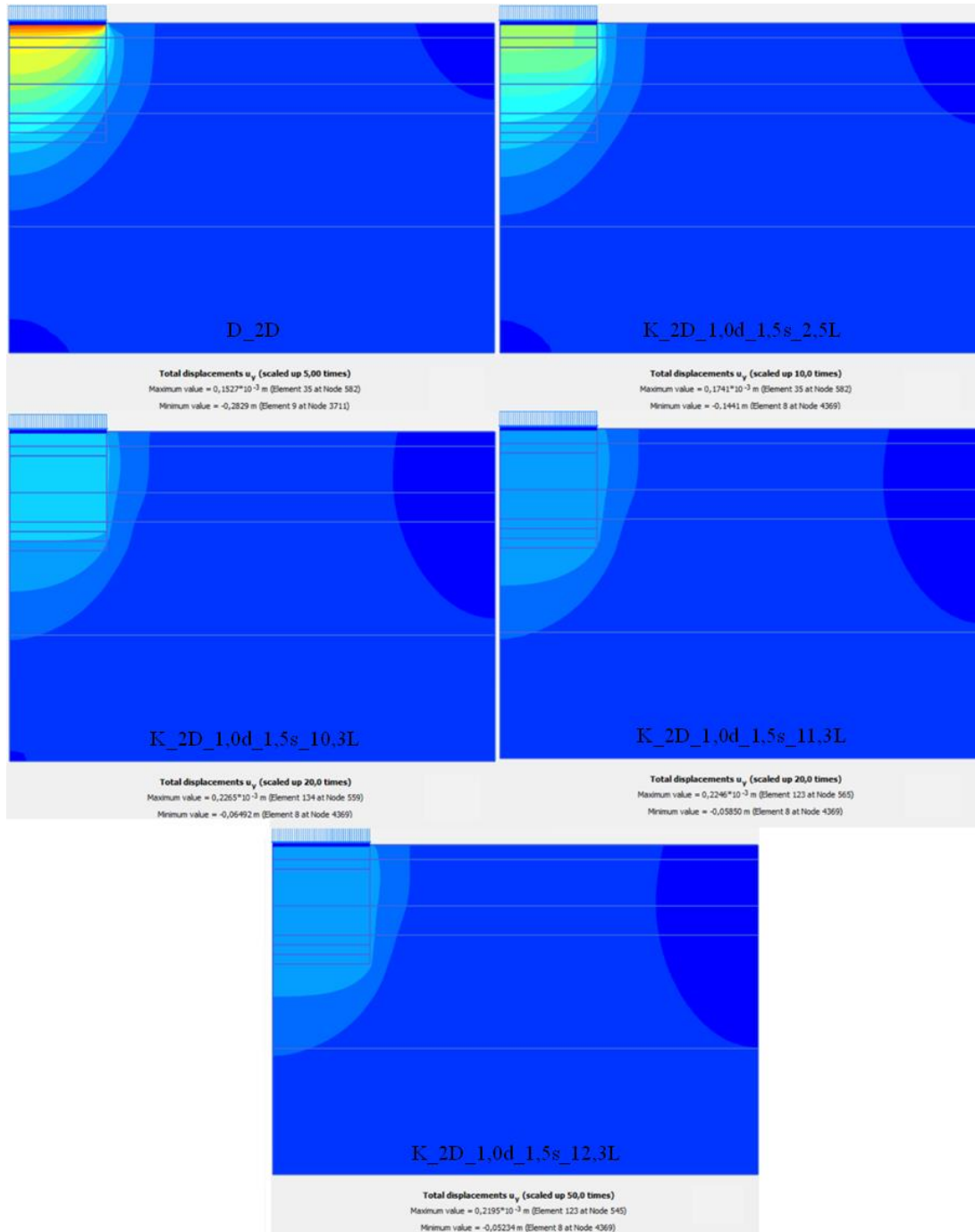
Şekil 4.22. 0,8 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



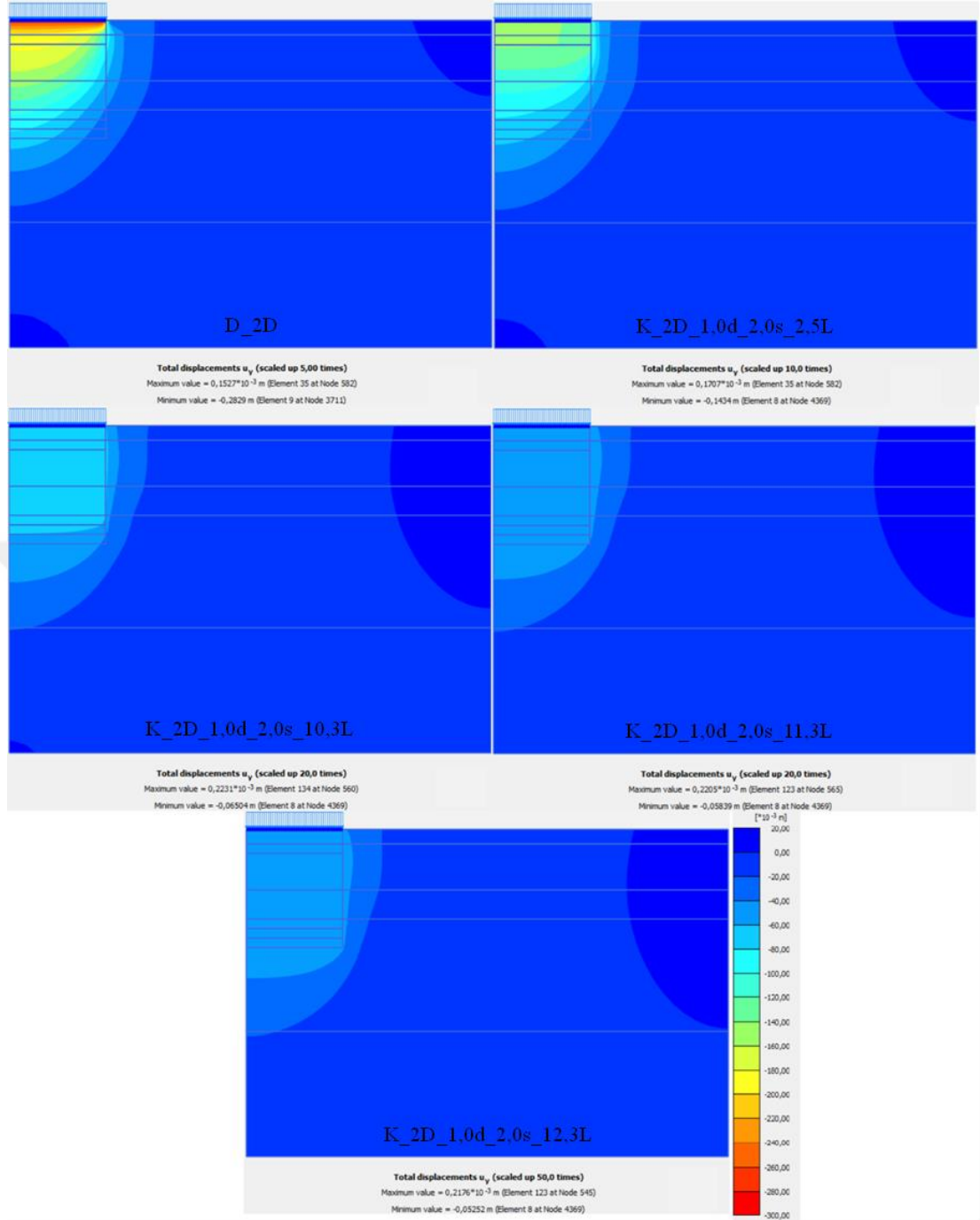
Şekil 4.23. 0,8 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



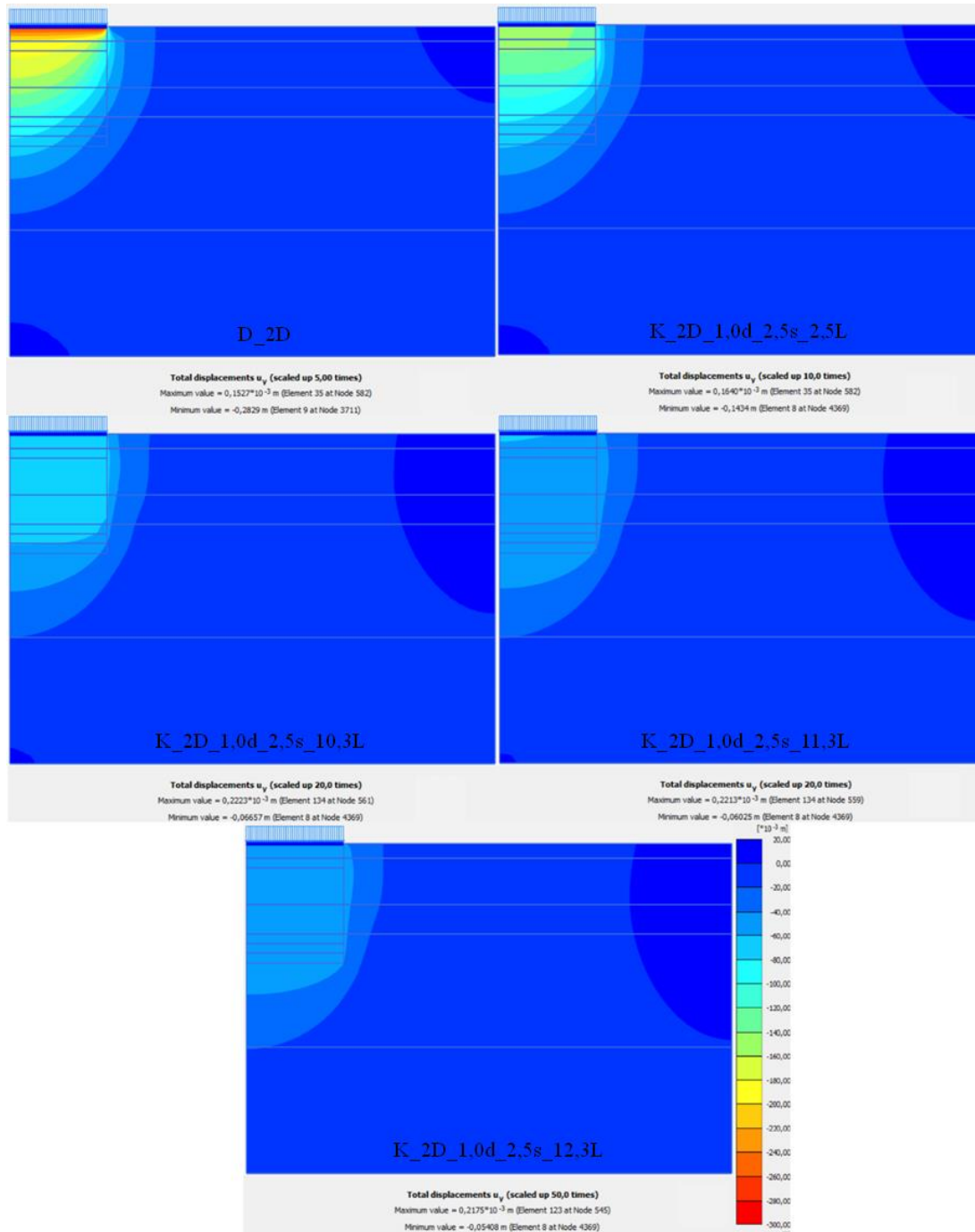
Şekil 4.24. 0,8 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.25. 1,0 m çap ve 1,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.26. 1,0 m çap ve 2,0 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.27. 1,0 m çap ve 2,5 m aralık ile 2D’de kompozit bölge olarak modellenen JG’lerin düşey oturma sonuçları.

4.4. Ek Analizler

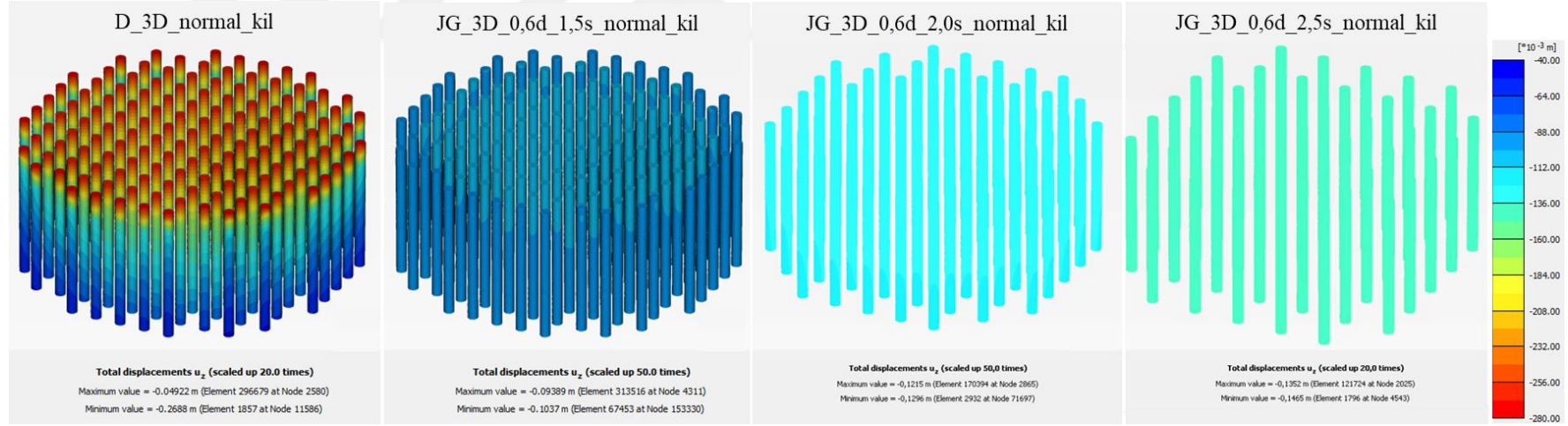
Analizlerde jet grout kolonları tekil olarak 3 boyutlu Plaxis yazılımı ile modellenmiştir. Analizler, jet grout kolonlarının soketlendiği kil tabakasının hem normal (analizlerde yer alan mevcut kil tabakası) parametreleri hem de ayrıca zayıflatılmış (kayma dayanımı azaltılmış kil tabakası) durumdaki parametreleri ile yürütülmüştür. Normal kil (mevcut kil tabakası) ve zayıf (kayma dayanımı düşürülmüş kil tabakası) kile soketlenen 7,8 m uzunluğa sahip bu jet grout kolonlarının oturmalarla etkilerinin kıyaslanması hedeflenmiştir. Normal kile (mevcut kil tabakası) ait sonuçlar Şekil 4.28 ile Şekil 4.30 arasında verilmiştir. Şekil 4.31'den Şekil 4.33'e kadar olan analizler ise yumuşak (dayanım parametreleri zayıflatılmış) kile ait sonuçları kapsamaktadır. Analizler, jet grout kolon çapının (0,6 – 0,8 – 1,0 m) ve jet grout kolon aralığının (1,5 – 2,0 – 2,5 m) değişken değerleri için ayrı ayrı yürütülmüştür. Değerlendirmeler ise jet grout kolonlarının uzunluğu boyunca oluşan düşey deformasyonların büyüklüğü ve dağılımını içeren şekiller üzerinden yapılmıştır.

Normal kile (analizlerde yer alan mevcut kil tabakası) soketlenen jet grout kolonlarının etkileri incelendiğinde iyileştirme öncesi hesaplanan 27 cm'lik düşey oturmanın, iyileştirme ile 9,5 cm'e kadar düştüğü görülmüştür. Bu düşüş 0,8 m çapında ve 1,5 m aralığında jet grout kolonlarının kullanımı ile sağlanmıştır. 1,0 m çaplık jet grout kolonlarının ise 1,5 m aralıkla yerleştirilmesinin ekstra bir avantaj sağlamadığı, aksine 9,8 cm'lik bir oturmaya sebep olduğu belirlenmiştir. 0,6 m'lik çaptaki jet grout kolonlarının ise yine 1,5 m aralıklarla yerleştirildiği durumun oturmaları 10,4 cm'e indirgediği görülmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki, büyük çaplı jet grout kolonlarının imalatı yerine daha düşük çapta jet grout kolonlarının sık aralıklarla kullanımı oturmalar açısından daha avantajlı olmaktadır.

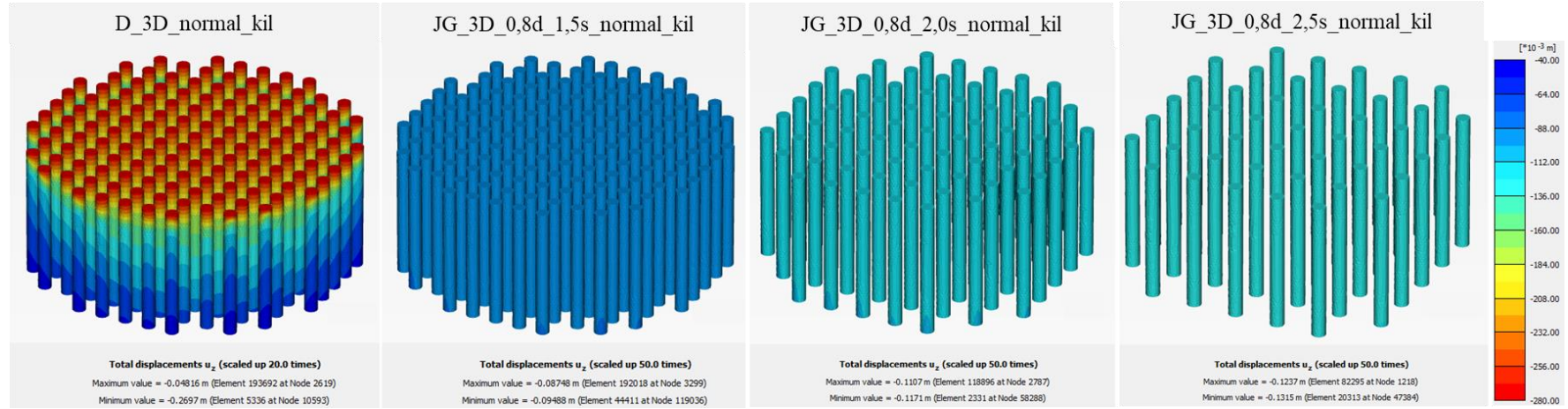
Zayıf kile (kayma dayanımı düşürülmüş kil tabakası) ait analizlerin sonuçları irdelendiğinde, jet groutların bulunmadığı ortamda yaklaşık 34 cm oturmanın belirlendiği görülmektedir. Buradan jet grout kolonlarının soketlendiği zeminin sağlam olması durumunda oturmanın daha düşük çıktığı anlaşılmaktadır. Yumuşak bir tabakanın varlığında ise iyileştirme öncesi oluşan 34 cm'lik düşey oturmanın, iyileştirme ile 13,1 cm'e düştüğü; yine en düşük oturmaların 0,8 m çaptaki jet grout kolonlarının 1,5 m aralıklarla yerleştirildiği durumda elde edildiği belirlenmiştir.

Bu analizler göstermektedir ki, kil yumuşadığında (kayma dayanımı düşürüldüğünde) oturma değerleri zemin iyileştirme yok ise artacaktır. Ancak iyileştirme sonrası oturma değerlerindeki maksimum azalış yüzdelik olarak kıyaslandığında normal kilde (analizlerde yer alan mevcut kil tabakası) %35 iken, sağlam tabaka altında yumuşak kil (kayma dayanımı zayıflatılmış kil tabakası) varlığında ise %39'a kadar yükselmektedir. Bu durum, iyileştirmenin zayıf tabakalarda daha da etkili olacağının bir göstergesidir.

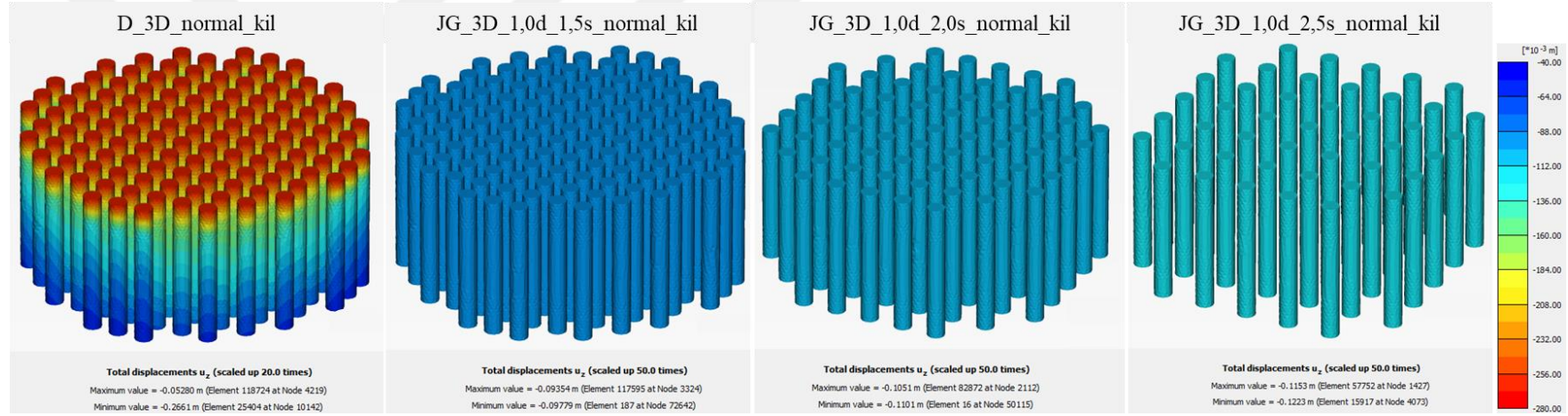




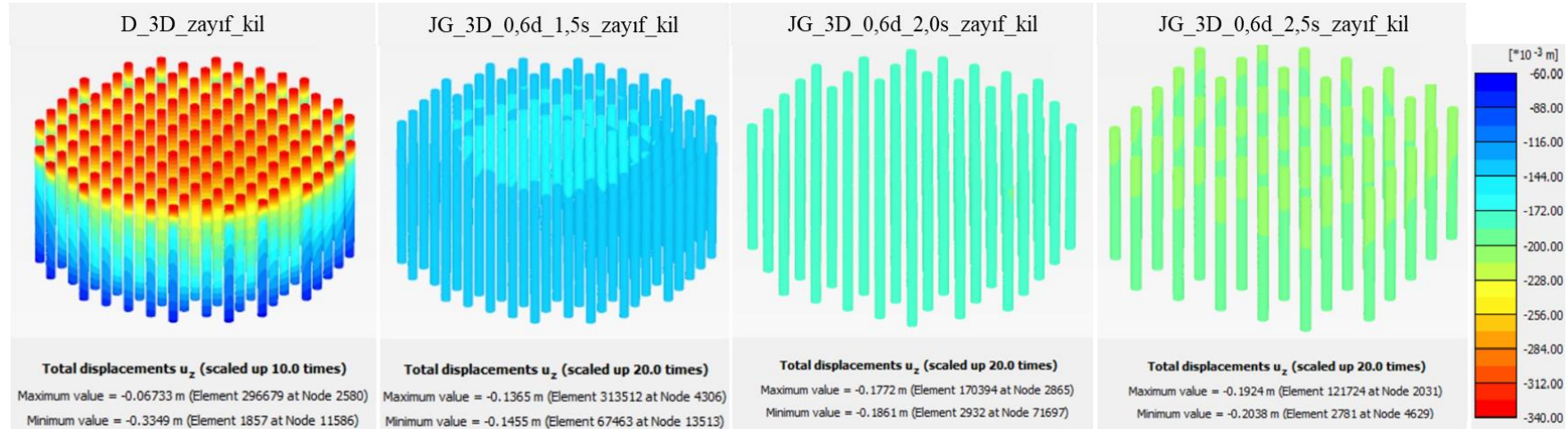
Şekil 4.28. 0,6 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.



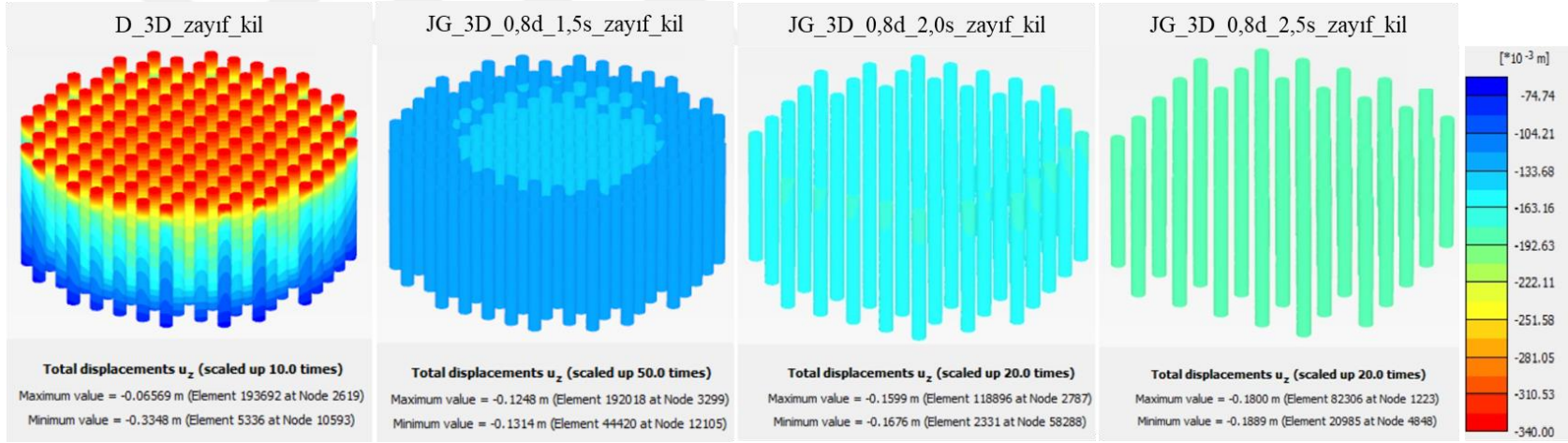
Şekil 4.29. 0,8 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.



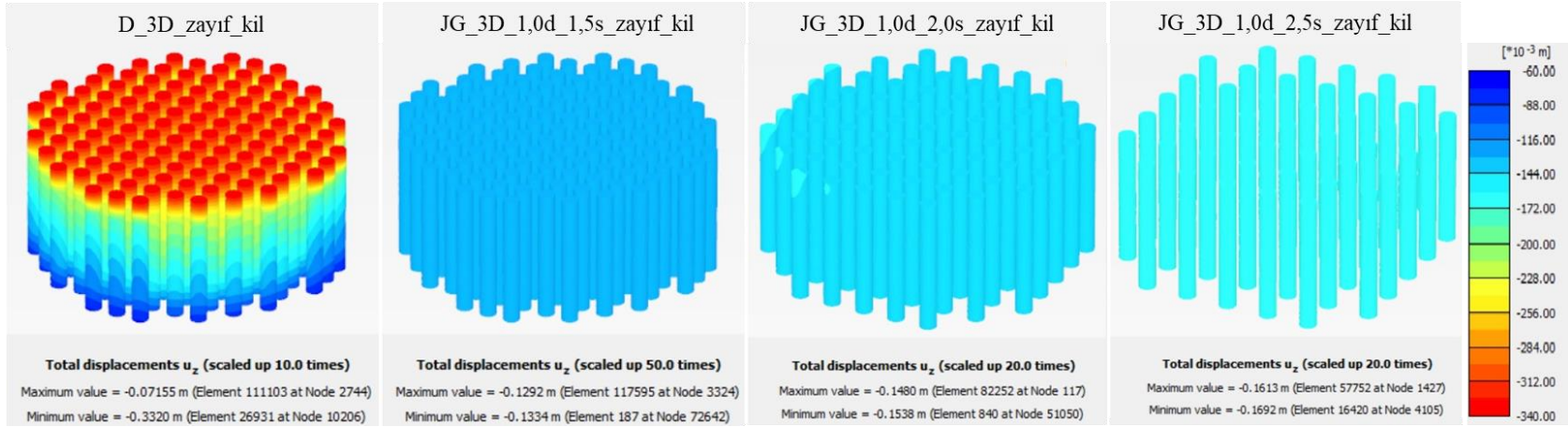
Şekil 4.30. 1,0 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin normal kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.31. 0,6 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.



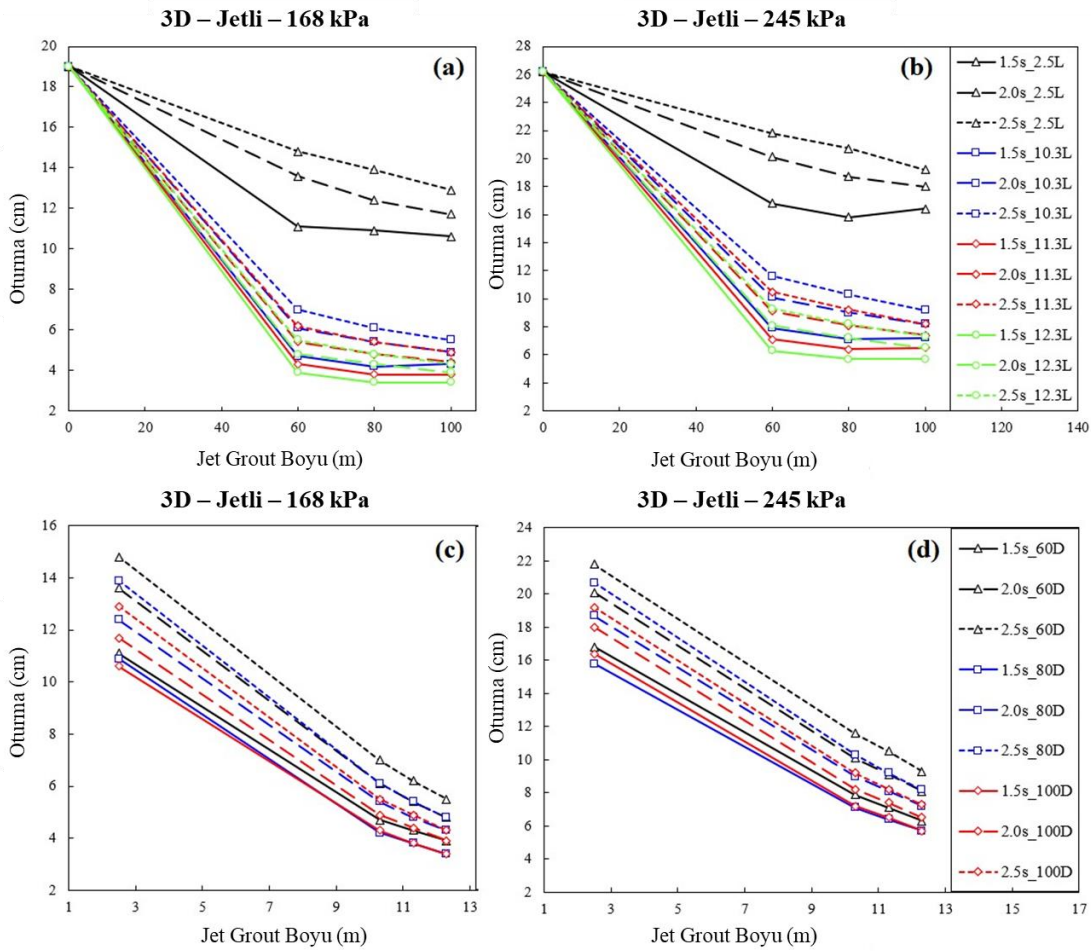
Şekil 4.32. 0,8 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.



Şekil 4.33. 1,0 m çap ve değişen aralıklar ile 3D’de tekil olarak modellenen JG’lerin zayıf kil tabakasındaki düşey oturma sonuçları.

4.5. Karşılaştırmalar

Bu bölümde tüm durumlar için oluşan düşey oturmaların jet grout çapı, aralığı ve boyu açısından karşılaştırmaların yapıldığı ve optimum değerlerin belirlendiği değerlendirmelere yer verilmiştir. Şekil 4.34'te jet grout kolonlarının tekil olarak imal edildiği durumda silonun boş veya dolu yüklenmesi halinde 3 boyutlu analizler sonucu elde edilen düşey oturma değerleri ile jet grout çapı ve boyu arasındaki ilişkiler görülmektedir.

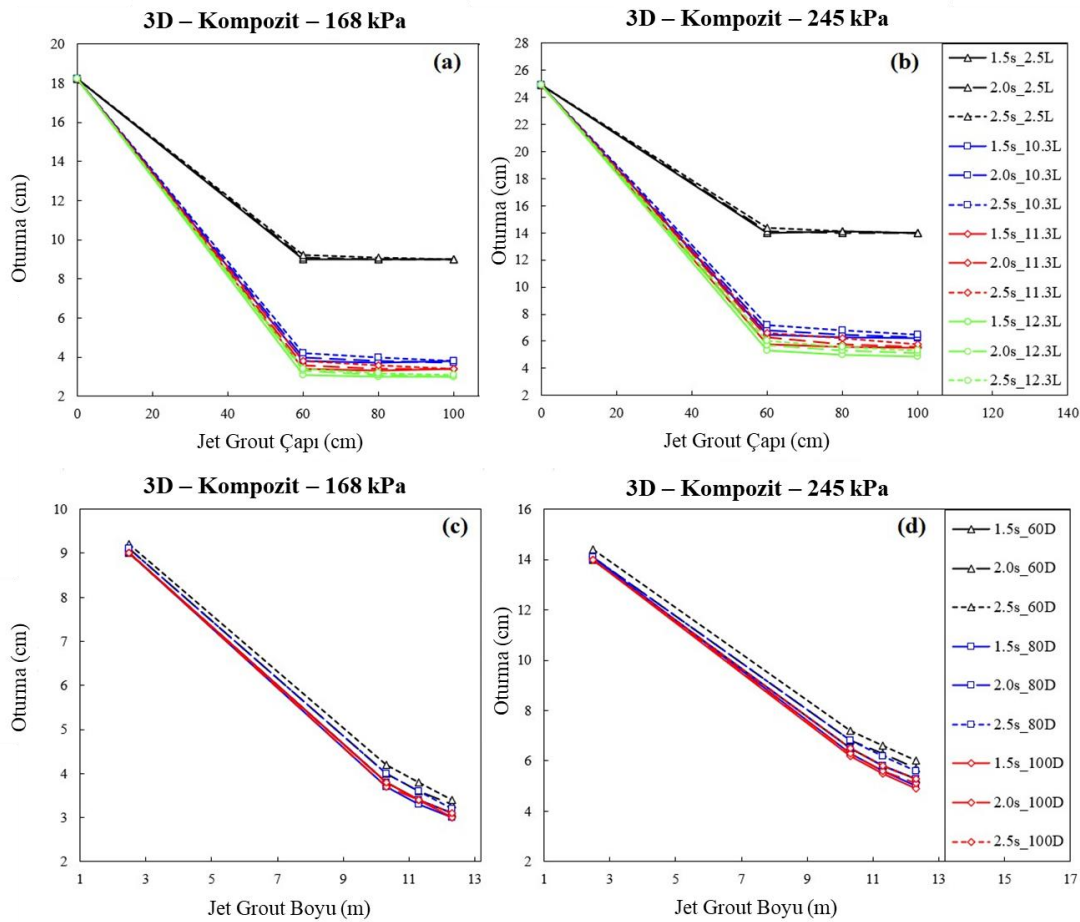


Şekil 4.34. (a) Silo boş iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (b) Silo dolu iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (c) Silo boş iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi (d) Silo dolu iken jet grout imalatı yapılmış 3D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi.

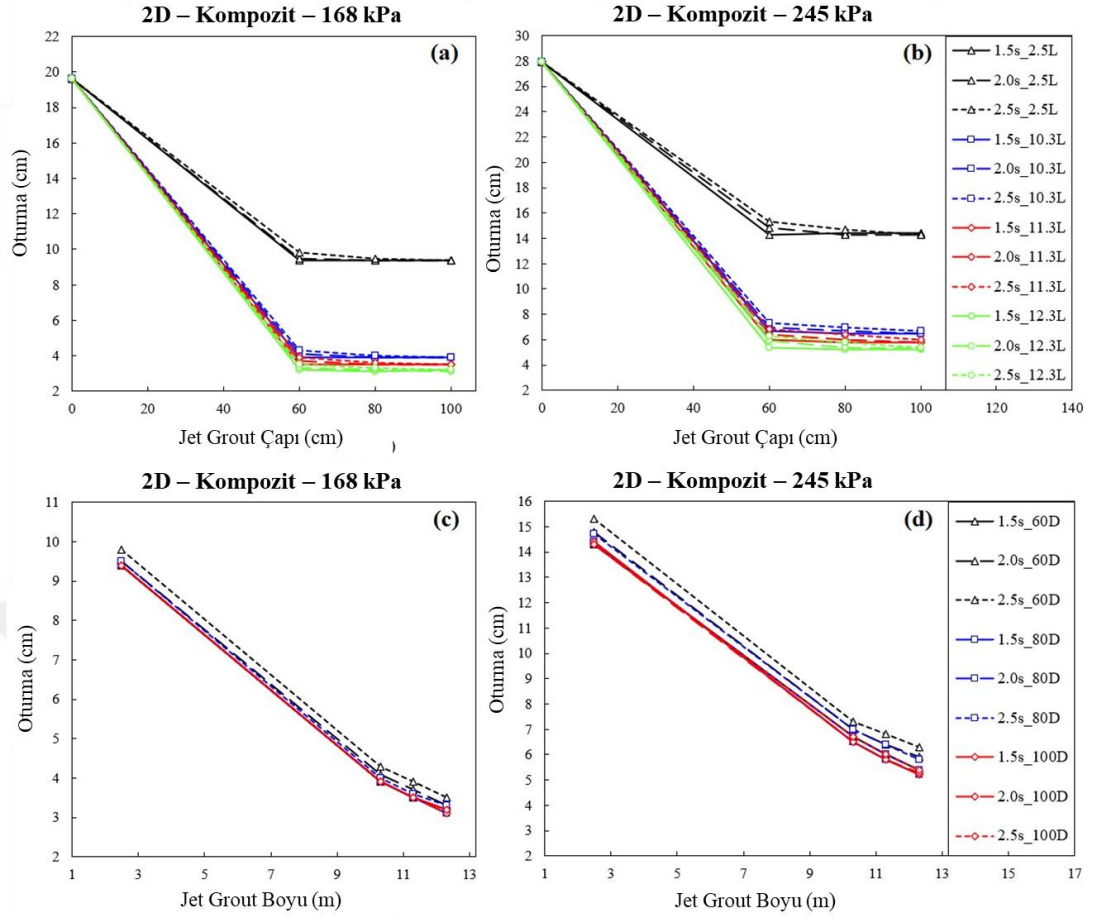
Grafiklerden anlaşılabacağı üzere, silonun yüklü veya yüksüz olması durumu ilişkilerde pek bir değişiklik oluşturmayıp, sadece toplam oturma değerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu nedenle temel çıkarımların silonun yüklü hali üzerinden yapılması yanlış olmayacaktır. Oturma ile çap ilişkisi incelendiğinde (Şekil 4.34 (b)) artan çap değerinin sonuçları az miktarda etkilediği, bu etkinin ise aralık düştükçe sönümlendiği görülmektedir. Buradan düşük aralıklı jet grout kolonlarının kullanımında çapın yükseltilmesine ihtiyaç olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, beklenildiği gibi jet grout kolon boyu arttıkça oturmalar ciddi oranda düşmekte, fakat bu düşüş alt kile soket sağlandıktan sonra azalmaktadır. 10,3 m uzunluğundaki jet groutların 2 m aralıklarla yerleştirildiği analiz sonucu ile 11,3 m uzunluğundaki kolonların 2,5 m aralıkta yerleştirildiği analiz sonucu birebir örtüşmektedir. Benzer olarak, 11,3L – 2,0s ile 12,3L – 2,5s ve 10,3L – 1,5s ile 12,3L – 2,0s eğrileri de üst üste binmektedir. Bu sonuçlar; jet grout kolon boylarındaki 1 birimlik artışın, jet grout kolon aralıklarındaki yarım birimlik artış ile oturma değerlerinin karşılanabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 4.34 (d)'de verilen ilişkiler ise artan boy ile oturmanın doğrusal ve ters orantılı ilişkisini doğrular niteliktedir. Buradan en düşük oturmaların en az aralıklı koşullarda (1,5 m) sağlandığı, ancak umulduğu gibi en yüksek çapın en ideal durum olmadığı sonucuna varılmaktadır. 1,0 m çapa sahip kolonlar yerine 0,8 m çaplık kolonların daha ideal ve uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, kolon gruplarında kazıklarda da olduğu gibi grup etkisi oluşmasından ve birbirlerine yakın imal edilen kolonlarda performansın düşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.35'te zemin – jet grout ortamının kompozit olarak modellendiği 3 boyutlu analizlerin sonuçları verilmiştir. Kompozit modeller için verilen ilişkiler, bu şekilde modellenen jet grout ortamında analiz sonuçlarının jet grout aralıklarından bağımsız bir şekilde hemen hemen aynı çıktığını göstermektedir. Bir başka deyişle, jet groutların tekil kolon olarak değil de kompozit bölge olarak modellenmesi durumunda aralıktaki değişim oturma değerini değiştirmeyip etkisiz gibi göstermiştir. Halbuki jet grout aralığının çapa oranla oturmayı daha fazla etkilediği bir önceki çıktılarda yer almaktaydı. Bu da kompozit bölgenin parametrik kıyaslarda önerilmemesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Oturma değerleri kıyaslandığında ise tekil jet grout modellerinin kompozit bölge modellerinden daha yüksek oturma değerleri verdiği görülmüştür.

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da zemin – jet grout ortamının kompozit olarak modellendiği 3 boyutlu ve 2 boyutlu analizlerin sonuçlarına ait ilişkiler kıyaslandığında, iyileştirme öncesi oluşan oturma değerlerinde bir miktar farklılık olduğu belirlenmiştir. 2 boyutlu analizlerde oturma değerinin daha yüksek çıktığı, bu durumun iyileştirme olması halinde etkisinin azalmış olduğu belirlenmektedir. Ana farklılıkların kompozit bölgenin kısa (L_{JG}) olduğu durumda oluştuğu, kompozit bölge uzadıkça (L_{JG}) analizler arasındaki farkın minimum düzeye ulaştığı belirlenmiştir. Bu nedenle zemin - jet grout bölgesinin kompozit olarak modelleneyeceği durumlarda 3 boyutlu analizler yerine daha pratik ve az maliyetli olan 2 boyutlu analizlerin kullanımı önerilmektedir.

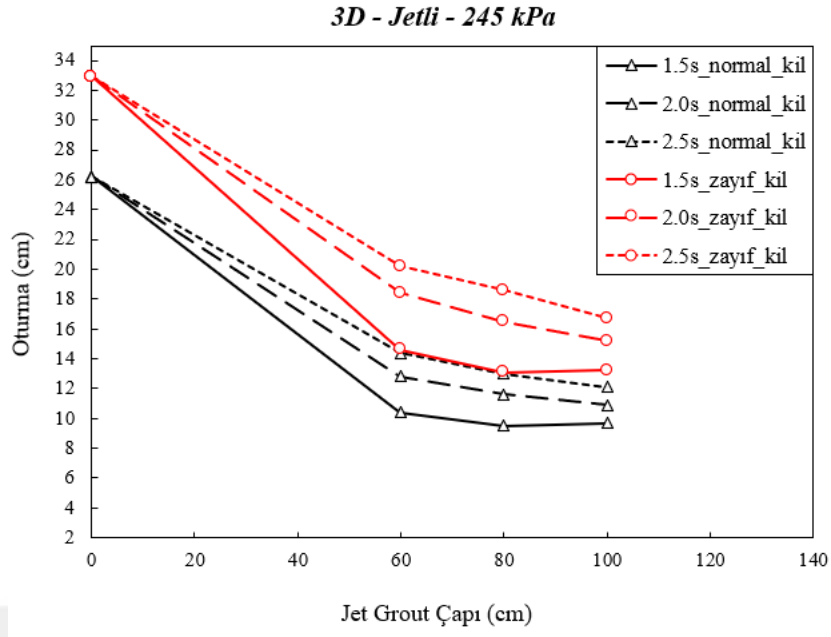


Şekil 4.35. (a) Silo boş iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (b) Silo dolu iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (c) Silo boş iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi (d) Silo dolu iken kompozit 3D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi.



Şekil 4.36. (a) Silo boş iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (b) Silo dolu iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma – çap ilişkisi (c) Silo boş iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi (d) Silo dolu iken kompozit 2D analiz sonuçları için oturma – boy ilişkisi.

Şekil 4.37’de ek analizlerin sonuçları doğrultusunda sağlam tabaka altında yer alan yumuşak kilin etkisini gösteren ilişkiler verilmiştir. Buradan kilin yumuşaması (kayma dayanımı zayıflatılmış kil tabakası) durumunda artan oturmalar dikkat çekmektedir. Ayrıca, yumuşak kilde jet grout kolon çapının ve aralığının oturmalar üzerindeki etkisi daha baskın olmuştur. Yumuşak kil tabakasındaki 1,5 m aralıklı jet grout kolonu imalatının normal kil tabakasındaki 2,5 m aralıklı kolon imalatı ile aynı sonuçlar verebileceği gözükmemektedir. Ancak bu durumun sürekliliği 1 m’lik çap için bozulmuştur. Her halükarda çapın çok büyük olması dezavantaj doğurmaktadır. Buradan 0,6 ve 0,8 m çapa sahip jet grout kolonlarının zayıf bir tabakaya soketlenmesi durumunda çap yerine aralığın artırılmasının daha avantajlı olabileceği sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 4.37. Jet grout imalatı yapılan 3D analizlerde yumuşak kil (kayma dayanım parametreleri zayıflatılmış) etkisini gösteren ilişkiler.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında; geoteknik özellikleri bilinen bir zemin kesitinin dairesel kesitli silo ile yüklenmesi sonucunda oluşacak oturmaların doğal ve iyileştirilmiş durumları için bir takım sayısal çözümler yürütülerek jet grout kolonlarının oturmaları etkileri incelenmiştir. Sayısal çözümler sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis yardımıyla yürütülmüştür. 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizlerin yürütüldüğü çalışmada jet groutlar hem tekil kolonlar hem de kompozit ortam şeklinde modellenmiştir. Plaxis 3D’de tekil kolonlar ve kompozit ortam, Plaxis 2D’de ise sadece kompozit ortam modellenmiştir. Analizlerde temel amaç değişkenlik gösterebilen parametrelerin oturma değerleri üzerindeki tesirlerinin irdelenmesidir. Bu kapsamda jet groutların çapı (0,6 – 0,8 ve 1,0 m), aralığı (1,5 – 2,0 ve 2,5 m) ve boyu (2,5 – 10,3 – 11,3 ve 12,3 m) değiştirilerek silonun boş (168 kPa) ve dolu (245 kPa) hali için analizler tekrar edilerek gerekli kıyaslamalar yapılmıştır. Ek olarak, jet groutların soketlendiği tabakanın yumuşaması durumunda iyileştirme performansının incelenmesi için Plaxis 3D’de normal kil ve zayıf kile soketlenen kolonlar için iki farklı analiz yürütülmüş ve değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen çıkarımlar aşağıdaki gibidir;

- Plaxis 3D ‘de yürütülen jet groutların tekil kolonlar halinde modellendiği analizler sonucu en uzun jet grout boyunun en düşük aralıklarla yerleştirildiği durumda oturmalarda %22’lere varan düşüşlerin elde edilebildiği görülmektedir. Ancak çap açısından aynı sonucun ortaya çıkmadığı görülmüştür. En ideal çap boyutu 0,8 m olarak belirlenmiş ve bunun üzerinde çap boyutuna sahip kolonların sık yerleşiminin grup etkilerinin oluşmasına neden olacağı belirlenmiştir. Ayrıca en uzun boylarda jet grout kolonlarının daha az oturmaya neden olduğu, boydaki 1 birimlik artışın ise aralıklarda yarım birimlik bir artış ile telafi edilebileceği tespit edilmiştir.
- Jet groutların tekil kolon olarak değil de kompozit bölge olarak modellenmesi durumunda ise kolon aralıklarındaki değişimin sonuçlara yansıyamadığı, dolayısıyla oturma değerlerini değiştirmeyip etkisiz kaldığı belirlenmiştir. Jet

grout aralığının çapa oranla oturmayı daha fazla etkilediği görülen tekil kolon analizlerine kıyasla bu sonuçlar uyuşmamaktadır. Zemin iyileştirme öncesi ve sonrası için oturma miktarlarındaki değişim karşılaştırıldığında oturmaların yaklaşık 25 cm'den 5 cm'e indirildiği, böylece jet grout ile iyileştirme sonrasında yüzdelik olarak %20'lik bir oturma düşüşü görülmüştür. Ayrıca Plaxis 3D modelleri arasında oturma miktarları olarak kıyaslama yapıldığında ise kompozit ortamda tekil kolon modellerinden daha düşük oturma değerlerinin elde edildiği saptanmıştır.

- Zemin - jet grout bölgesinin kompozit olarak modellendiği 3 boyutlu analizlerdeki model parametreleri 2 boyutlu analizlerde de uygulanmıştır ve bunun sonucunda daha yüksek oturmalar elde edilmiştir. Ayrıca 2 boyutlu bu analizlerde zemin iyileştirme öncesinde oturma miktarları ortalama 28 cm iken iyileştirme sonrası 5 cm'lere kadar düşmüştür. Bu sonuçlara yüzdelik olarak bakıldığında, zemin iyileştirme sonrasında oturma miktarları ortalama olarak %19 azalmıştır.
- Ek analizlerde ise yumuşak kile soketlenen jet grout kolonlarının nasıl çalıştığını gözlemleyebilmek için Plaxis 3D'de tekil jet grout kolon uçlarının yer aldığı normal kilin dayanım parametreleri düşürülmüş ve bu durumda %26 oranında daha fazla oturma gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Kilin yumuşatılması halinde jet groutların aralık ve çapındaki değişim, oturma miktarında daha fazla baskınlık kurmaya başlamıştır. İyileştirme etkisinin ise zayıf kilde normal kile oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Yapılan tüm analizler göstermektedir ki, jet grout ile iyileştirme numerik analizlerde hem tekil kolonlarla hem de zemin – jet grout kompozit bölgesi ile 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak temsil edilebilmektedir. Ancak parametrik değişkenlerin etkisinin gözlemlenebilmesi için en etkili analiz yöntemlerinin, Plaxis 3D kullanılarak tekil kolonlarla oluşturulan modellerin sonuçları olduğu tespit edilmiştir. Kompozit bölge tanımlanması halinde ise 3 boyutlu analizler yerine hemen hemen aynı sonuçların elde edildiği 2 boyutlu analizlerin daha kolay uygulanabileceği belirlenmiştir. Parametrik ilişkiler ise çaptaki ve boydaki değişime oranla jet grout aralıklarındaki farklılığın sonuçlar üzerinde daha etken olduğunu göstermiştir. Ek olarak, zayıf tabakalarda yüklemenin daha yüksek oturmalara neden olabileceği, ancak jet grout imalatı ile birlikte normale (mevcut kil) oranla iyileştirmenin daha iyi performans gösterebileceği yargısına varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S. F. (2015). *Investigation of Adding Organic Material Ashes to Remolded Soft Clayey Soils as a Stabilized Material* [Yüksek lisans tezi]. University of Technology-Iraq.
- Akbulut, N. (2020). *Use of sewage sludge ash for soil improvement* [Doktora tezi]. Hasan Kalyoncu Üniversitesi.
- Akın, M., Akın, M., Çiftçi, A., & Bayram, B. B. (2015). The effect of jet grouting on the cyclic stress ratio (CSR) for the mitigation of liquefaction. *Ejoir*, 1, 10-20. <https://www.researchgate.net/publication/289534049>
- Algın, H. M., Ekmen, A. B., Yenmez, L., & Saraç, İ. H. (2017, 22-23-24, Kasım). Jet grout kolonlarla takviye edilmiş sığ temellerin oturma analizleri. 7. *Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul.
- Alkaya, D., & Yeşil, B. (2011). Yüksek Modüllü Kolonların (Jet grouting) Tablolama Programı Kullanarak Tasarımı. *Akademik Bilişim'11-XIII. Akademik Bilişim Konferansı*, 749-755, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Almeida, M. S., & Vargas Jr, E. A. (2021). Influence of the number of anchors on the stability of a retaining wall on a slope. *Geomechanics and Engineering*, 24(2), 143-151.
- Altun, S., & Aktar, A. (2017). An Experimental Study on the Behaviour of Vibro-Stone Columns in Soft Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(5), 2125-2138.
- Ayvaz, T., & İçöz, M. E. (2016). Jet grouting uygulamalarında optimum jet delik aralığı araştırması. *İnşaat Mühendisleri Odası 63. Yıl Ulusal Kongresi*.
- Bajracharya, K., & Park, J. H. (2018). The effects of permeation grouting on soil improvement and groundwater control in civil engineering. *Sustainability*, 10(6), 1966.
- Balkis, A. (2009, 3-4, Aralık). Enjeksiyon yöntemleriyle zemin iyileştirilmesi. 3. *Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Barclay, R. T., Casias, T. J. E. A., David, A. C., De Graffenreid, R. L., Hess, J. R., Roof, H. C., & Dennis, W. S. (1990). State of the art report on soil cement. *American Concrete Institute Materials Journal*, 87(4), 395-417. <https://doi.org/10.14359/2140>
- Basha, B. M., Singh, D. N., & Chakraborty, S. (2013). Effect of vibro compaction on settlement and swell characteristics of sandy soil. *Geomechanics and Engineering*, 5(1), 31-44.

- Brinkgreve, R. B. J. (2005, 24-26, Ocak). Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. *Geo-Frontiers Congress in Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration* (69-98) içinde. Texas, U.S. [https://doi.org/10.1061/40771\(169\)4](https://doi.org/10.1061/40771(169)4)
- Brinkgreve, R. B. J., Broere, W., & Waterman, D. (2002). Plaxis 2D-version 8 reference manual. *Balkema*, Rotterdam, Netherlands.
- Bruce, D. A., & Grouting Committee of the Geo-Institute. (2005). Glossary of grouting terminology. *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1534-1542. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:12\(1534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1534))
- Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Filz, G. M., Terashi, M., Yang, D. S., Collin, J. G., & Geotechnica, S. (2013). *Federal highway administration design manual: Deep mixing for embankment and foundation support*. Offices of Research & Development, United States.
- Bryne, R. J. (1998). *Manual for design & construction monitoring of soil nail walls*. Federal Highway Administration.
- Budhu, M. (2015). *Soil mechanics fundamentals*. John Wiley & Sons.
- Burke, G. K. (2004, 29-31, Aralık). Jet grouting systems: advantages and disadvantages. In *GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems* (pp. 875-886) içinde. American Society of Civil Engineers. Orlando, Florida, United States. [https://doi.org/10.1061/40713\(2004\)75](https://doi.org/10.1061/40713(2004)75)
- Ceylan, G. (2011). *Deep soil improvement methods* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Chang, D. W., & Huang, M. S. (1995). Behavior of sand specimens improved by dynamic compaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(11), 770-777.
- Croce, P., & Flora, A. (2000). Analysis of single fluid jet grouting. *Géotechnique*, 50(6), 739-748. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.739>
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet grouting: technology, design and control*. CRC Press.
- Çamlıbel, N. (1983). *Yüzeyel Yapı Temelleri*. Birsan Kitapevi.
- Çanakçı, Y., & Çevik, A. (2015). The effects of different drainage systems on consolidation behavior of sandy soils. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 23(4), 239-247.
- Çimen, Ö., Türkmen, M., & Urhan, A. (2015). Az katlı bir yapıdaki farklı oturma problemlerine ait vaka analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 1-10. <https://doi.org/10.5578/fmbd.8661>
- Das, B. M. (1983). A procedure for estimation of uplift capacity of rough piles. *Soils and Foundations*, 23(3), 122-126. https://doi.org/10.3208/sandf1972.23.3_122
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering* (9. Baskı). Cengage Learning.

- Degen, W. S. (1997, 3-5, Haziran). 56 m deep Vibrocompaction at German lignite mining area. M. C. R. Davies, F. Schlosser (Ed.), *In Ground improvement geosystems Densification and Reinforcement: Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Geosystems London*, (pp. 127-133) içinde. London, U.K.
- Dirican, H. (2018). *Farklı Yapı Yükleri Altında Kazıklı Temel ve Jet Grout Uygulamasının Karşılaştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Dixit, A., Nigam, M., & Mishra, R. (2016). Effect of fly ash on geotechnical properties of soil. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 3(5), 2454-1907. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v3.i5.2016.62>
- Durgunoglu, H. T. (2006, Nisan). Utilization of high modulus columns in foundation engineering under seismic loadings. In *US 8th National Conference on Earthquake Engineering*, İstanbul, Türkiye.
- Durgunoğlu, H. T., Kulaç, H. F., Oruç, K., Öge, C. E., & Eker, F. Ş. (1998). Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme üzerine bir uygulama. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Durgunoglu, H. T., Kulac, H. F., Oruc, K., Yıldız, R., Sickling, J., Boys, I. E., Altugu, T., & Emrem, C. (2003, 10-12, Şubat). A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction, for a cigarette factory in Turkey. In *Grouting and Ground Treatment* (452-463) içinde. Louisiana, United States. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)120](https://doi.org/10.1061/40663(2003)120)
- Durlanık, S. (2003). *Hava alanı pistlerinde temel dolgusunun geosentetik ile donatılması* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Düzceer, R. (2004). Sakhalin doğalgaz ve petrol işleme tesisi kazık işleri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Düzceer, R., & Gökalp, A. (2002, 21-22, Ekim), Akaryakıt tank temellerinin taş kolonlarla iyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, 454-463, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- El Naggat, M. H., & Lee, J. S. (2017). Experimental and numerical study of vibro-replacement in overconsolidated clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4).
- Elçi, A., Saygın, B., & Akbulut, S. (2017). Geosynthetic Reinforced Soil Wall Performance: Long-Term Monitoring Results. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), 95-103.
- El-Hakim, M., & El-Sherbiny, M. (2007). Behavior of geosynthetic-reinforced and unreinforced soil under cyclic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 562-572.
- Emmanuel, O., & Amadi, A. A. (2019). Effect of Calcium Chloride on the Geotechnical Properties of Lateritic Soil. *Journal of Environmental and Applied Science Research*, 7(4), 172-180.
- Erdem, S., & Kaya, A. (2019). Çok katmanlı geogrid donatılı yumuşak toprak istinat duvarının sayısal analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 619-633.

- Erdoğan, T. (2018). *Jet grout uygulamasından sonra zemin özelliklerinde meydana gelen değişiklikler* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Erkan, İ. H. (2013). *Jet grout kolonların performansını etkileyen faktörlerin deneysel olarak araştırılması* [Doktora tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- Erol, A. O., & Bayram, Z. (2018). *Jet enjeksiyon yöntemi*. Yüksel Proje, Ankara.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2000). The performance of prefabricated vertical drains in soft soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 858-874.
- Ghorbanalizadeh, M., Ghiassian, H., & Ziaie-Moayed, R. (2014). Assessment of the Effectiveness of Shallow Compaction for Settlement Control of Embankments on Soft Ground. *International Journal of Geomechanics*, 14(2), 397-405.
- Güler, E., & Başarır, H. (2018). Evaluation of ground anchors and their applications. *Applied Sciences*, 8(8), 1345.
- Hirkane, S. P., Gore, N. G., & Salunke, P. J. (2014). Ground improvement techniques. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences*, 2(2), 11-13.
- Holtz, R. D., Shang, J. Q., & Bergado, D. T. (2001). Soil improvement. *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*, 429-462.
- Jafari, M. K., Zare, M., Khorami, M., & Pournasiri, M. (2020). The effect of rapid impact compaction on the liquefaction potential of sandy soils. *Geomechanics and Engineering*, 21(2), 83-90.
- Karahan, G. N. (2016). *Kumlu zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı* [Yüksek lisans tezi]. Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Karaşahin, M., & Işık, N. S. (2017). Geotekstil donatılı yumuşak toprak istinat duvarı tasarımı ve davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 633-639.
- Kaya, Z., & Erken, A. (2009). Adapazarı zeminlerinin dinamik davranış özellikleri. *İTÜ Dergisi*, 8(5), 157-168. http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/viewFile/336/292
- Kempfert, H. G., & Gebreselassie, B. (2006). *Excavations and foundations in soft soils*. Springer Science & Business Media.
- Kıvrak, S., Arslan, G., Tuncan, M., & Birgonul, M. T. (2014). Impact of national culture on knowledge sharing in international construction projects. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(7), 642-649. <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0408>
- Kolay, P. K., Prasad, R., & Sudheer, P. (2019). An experimental study on the behavior of improved soils by deep mixing method. *Geomechanics and Engineering*, 18(4), 299-307.
- Korkmaz, M. F., & Fener, M. (2018). Experimental and numerical investigation of soil nailing method in the stabilization of soft soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(1), 97-108.
- Kumar, J., Singh, B., Singh, V., & Kumar, S. (2018). Effect of Bitumen Stabilization on Geotechnical Properties of Soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4(1), 11.

- Kumar, S., Sivakumar Babu, G. L., & Anbazhagan, P. (2019). Laboratory study of the effects of vibrating stone column installation on surrounding soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(3), 1-11.
- Kuo, Y. H., Lin, P. S., Chen, Y. H., & Chang, D. W. (2019). Load test on vibro-replacement stone columns installed in liquefiable soils. *Geotechnical Testing Journal*, 42(5).
- Li, J., Li, X., & Zhang, Y. (2019). Experimental study on the bearing capacity of reinforced slopes with different heights. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(2), 449-464.
- Li, L., Li, W., Li, H., Zhang, Z., & Wang, X. (2017). Experimental study on soil stabilization using fly ash and geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(4), 316-322.
- Liu, J., Wu, Y., Wu, J., & Jiang, J. (2019). Stabilization of soft soil using rapid impact compaction (RIC) method. *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 435-440.
- Lunardi, P. (1997). Ground improvement by means of jet grouting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 1(2), 65-85. <https://doi.org/10.1680/gi.1997.010201>
- Ma, X., & Yang, X. (2018). Numerical investigation of deep mixing method for ground improvement. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 144(7).
- Maşalı, A., & Görür, F. K. (2018). Geotechnical applications of finite element method: Plaxis software. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(3), 252-258.
- Melegary C., & Garassino A.L. (1997). Design procedures for jet grouting. *Seminer on Jet Grouting*, 15-48.
- Melegari, M., & Garassino, A. (1997). Soil improvement by jet-grouting. *Ground Improvement*, 1(3), 105-116.
- Mısıır, G. (2020). Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirme ve deplasman tahmini: Vaka analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 290-299. <https://doi.10.31590/ejosat.688798>
- Mitchell, J. (1981). Soil improvement state of the art report. In *Proceedings 11th International Conference on International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, USA, 4, 509-565.
- Mitchell, J. M., & Jardine, F. M. (2002). *A guide to ground treatment*. 573, (pp. 13-19) içinde. London: CIRIA.
- Mostafa, K. F., & Liang, R. Y. (2011, 13-16, Mart). Numerical modeling of dynamic compaction in cohesive soils. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 738-747) içinde. Texas, U.S.
- Narejo, D. M., Chandio, I. A., Mahar, R. B., & Lakho, A. R. (2019). Performance of prefabricated vertical drains (PVDs) in soft soil improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(3), 1601-1615.
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann.

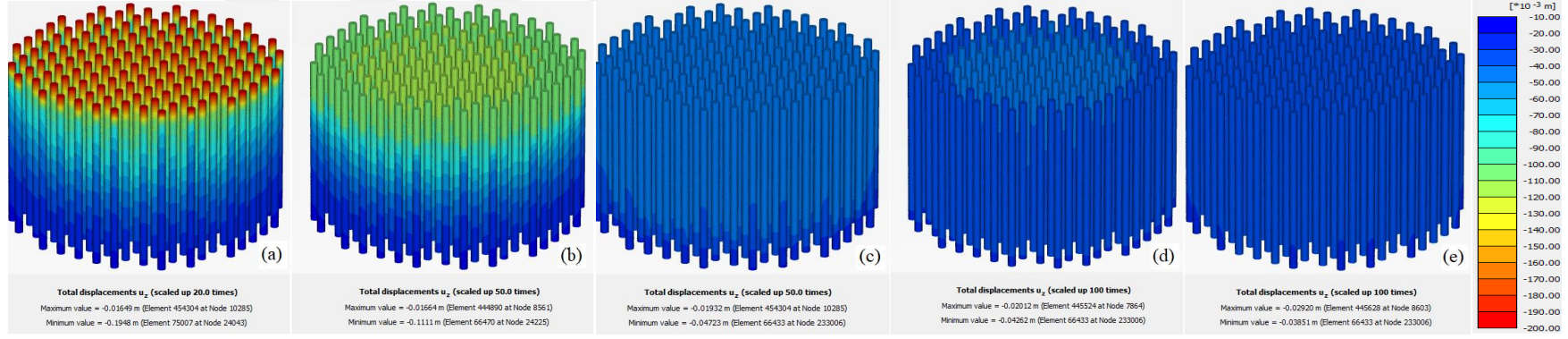
- Nikbakhtan, B., Ahangari, K., & Rahmani, N. (2010). Estimation of jet grouting parameters in Shahriar dam, Iran. *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 472-477. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60228-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60228-3)
- Oktavian, F., Farid, M., & Purwanto, H. (2018). Comparative analysis of ground improvement techniques in soft soil stabilization. *Materials Science and Engineering*, 288(1).
- Othman, A. A., Abdulla, W. H., & Al-Mosawe, A. I. (2015). Laboratory and field investigation of surface compaction for reducing liquefaction potential of sandy soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(1), 11-17.
- Ottosen, N. S., & Petersson, H. (1992). *Introduction to the finite element method*. Prentice Hall International.
- Ozawa, K., & Yasufuku, N. (2018). Effect of Mixing Water Content on the Improvement of Soft Soil by the Deep Mixing Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(3).
- Önalp, A., Sert, S., & Bol, E. (2000). Adapazarı zeminlerinin deprem performansı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi*, 373-382.
- Özocak, A. (1994). *İnce daneli çimento ile enjeksiyon model deneyleri* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Passlick, T., & Doerendahl, K. (2006). Quality assurance in jet grouting for a deep seated slab in Amsterdam. *In The 10th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Amsterdam, 852-858.
- Priebe, H. J. (1995). The design of vibro replacement. *Ground Engineering*, 28(10), 31.
- Racansky, V., Thurner, R., & Kummerer, C. (2006, 6-8, Ağustos). Design of a deep building pit with numerical and limit equilibrium methods. *In Numerical Methods in Geotechnical Engineering: Sixth European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. CRC Press.
- Rahman, M. A., & Islam, M. S. (2015). Improvement of soft soils by vertical drains and vacuum preloading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(5), 1255-1271.
- Saglamer, A., Düzceer, R., Gokalp, A., & Yılmaz, E. (2002). Ground improvement by jet grout columns for the foundations of an automobile plant in Turkey. *In Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance* (pp. 559-569).
- Sanglerat, G., Saussine, G., & Lancelot, P. (2017). Influence of grain size distribution on the bearing capacity improvement by vibro compaction. *Soils and Foundations*, 57(6), 963-974.
- Sarsılmaz, O. M. (2017). *Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi, değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma* [Yüksek lisans tezi]. Ege Üniversitesi.

- Schaefer, V. R., Mitchell, J. K., Berg, R. R., Filz, G. M., & Douglas, S. C. (2012, 25-29, Mart). Ground improvement in the 21st century: a comprehensive web-based information system. In *Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Keynote Lectures from Geo-Congress 2012* (272-293) içinde. Oakland, California. <https://doi.org/10.1061/9780784412138.0011>
- Schlosser, F., & Collins, I. F. (2001). *Jet grouting: technology, design and control*. Thomas Telford.
- Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2021). Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 481-496. <https://doi.org/10.31590/ejosat.881603>
- Sharma, H., & Lewis, S. (1994). *Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills: Design and Evaluation*. John Wiley and Sons Inc.
- Shrestha, S. K., & Bhandari, T. (2019). Design of Reinforced Slope to Resist Landslide Forces: A Case Study of Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 24(1), 57-67.
- Singh, A., & Mittal, R. (2016). Effect of embedment length on pull-out behavior of soil nails in sandy soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(2), 161-165.
- Singh, S. P., & Kumar, A. (2017). Behavior of sand mixed with fly ash and rice husk ash using deep mixing method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2).
- Sönmez, E. (2010). *An investigation on the contribution of jet grout strutting to the stability of deep retaining systems by finite element method* [Yüksek lisans tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Şahin, M., & Karaşahin, M. (2019). Metal şerit donatılı istinat duvarlarının tasarımı ve davranışı. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 6(3), 273-280.
- Şimşek, Ö., & Korkut, E. (2014). Jet enjeksiyonu ile zemin iyileştirme çalışmaları. *Ulusal Altyapı Kongresi Bildiriler Kitabı*, 973-983.
- Terashi, M., & Juran, I. (2000, Kasım). Ground improvement-state of the art. In *ISRM International Symposium*. Melbourne, Australia.
- Toğrol, E. (1998, 22-23, Ekim). Jetgrout kolonların yapımında kalite denetimi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi*, (2, 393-402) içinde. İstanbul, Türkiye.
- Tonyal, İ., & Özdemir, A. H. V. (2017). Jet grouting yöntemi ile zemin ıslahı sonrası taşıma gücü değişimlerinin değerlendirilmesi. *3rd International Soil Structure Interaction Symposium*, Izmir, Turkey.
- Tunçdemir, F. (2004). Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 430(2). <https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/186.pdf>
- Türk Standartı Enstitüsü (TSE). (2000). *TS 1500 İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması*. Ankara, Türkiye.
- Türk Standartı Enstitüsü (TSE). (2006). *TS 1900/1 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini*. Ankara, Türkiye.

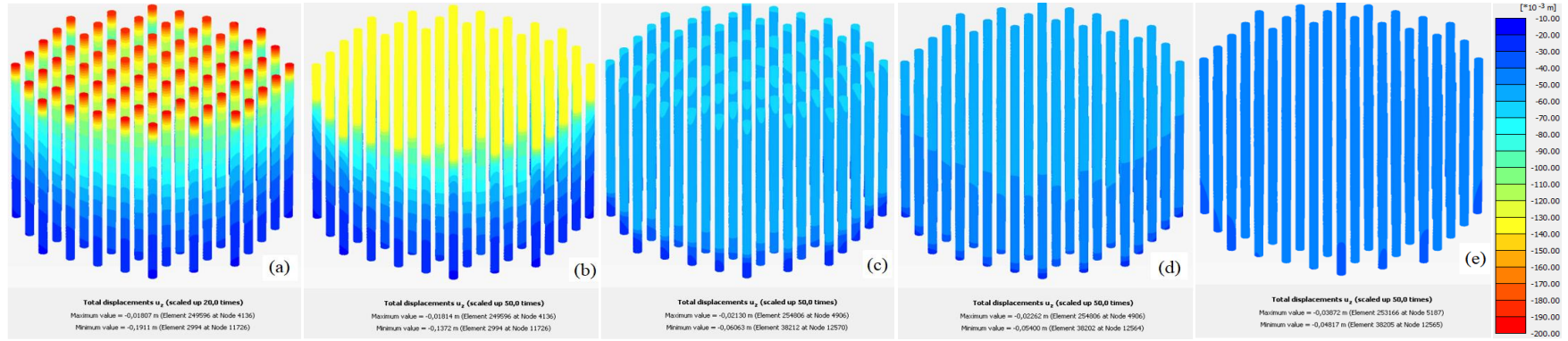
- Türk Standartı Enstitüsü (TSE). (2006). *TS 1900/2 İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini*. Ankara, Türkiye.
- Uzuner, B. A. (1985). Yapılarda oturma ve önemi. *Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi III. Mühendislik Haftası*, 4-26.
- Villar, L. V., & Puppim, A. J. (2011). Influence of surface compaction on the hydraulic conductivity of sandy soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(7), 677-685.
- Wang, J., Guo, H., & Zhang, J. (2017). Experimental study on the effects of surface compaction on soil-water characteristic curve of sandy soils. *Engineering Geology*, 216, 34-40.
- Wu, Y., Zhang, J., & Du, S. (2020). Performance analysis of reinforced soil slope based on static and dynamic numerical simulation. *Geomechanics and Engineering*, 20(2), 111-122.
- Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., & Bruce, D. A. (1994). *Ground control and improvement*, John Wiley, New York.
- Yerson Ltd.Şti. (2009). *Geotechnical Investigation Report Of Combined Cycle Power Plant Akçay-Terme*, Samsun, Türkiye.
- Zhou, W., Fan, W., Liu, Y., Yang, H., & Xu, S. (2020). Improvement of deformation behavior of soft ground by rapid impact compaction. *Geomechanics and Engineering*, 22(4), 269-276.

EKLER

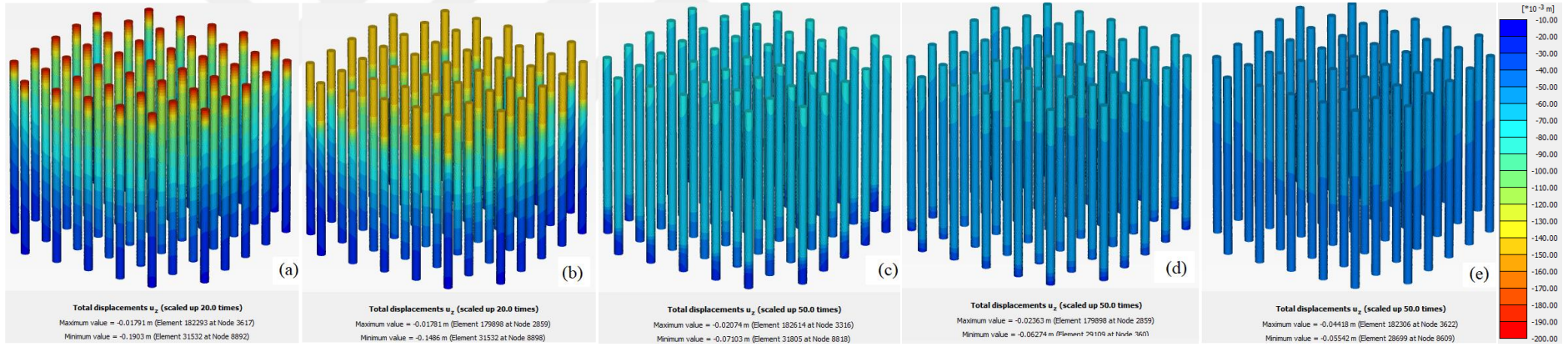
EK A. Silo boş (yüksüz) durumda iken jet grout kolonlarının tekil olarak modellendiği Plaxis 3D analiz sonuçları



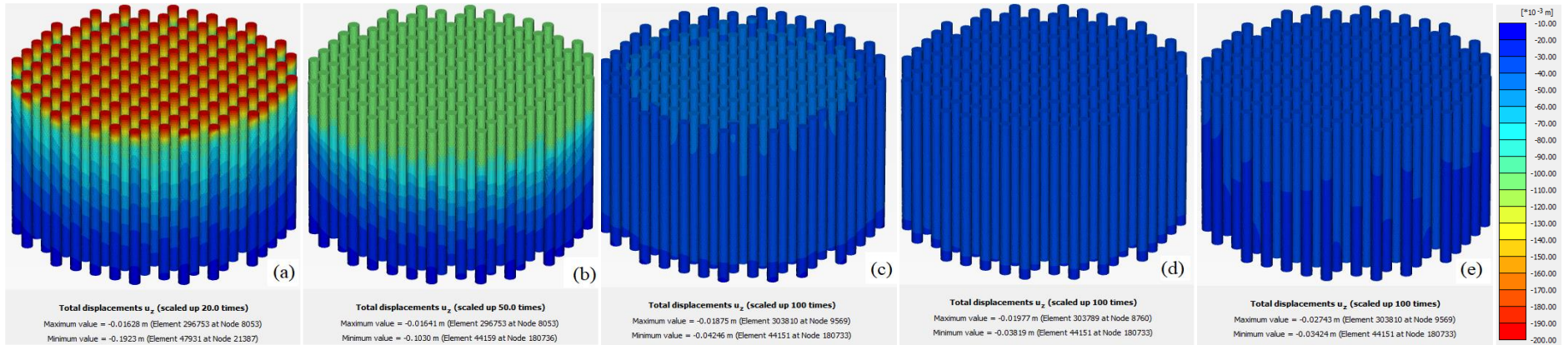
Şekil A.1. (a) D_3D (b) JG_3D_0,6d_1,5s_2,5L (c) JG_3D_0,6d_1,5s_10,3L (d) JG_3D_0,6d_1,5s_11,3L (e) JG_3D_0,6d_1,5s_12,3L.



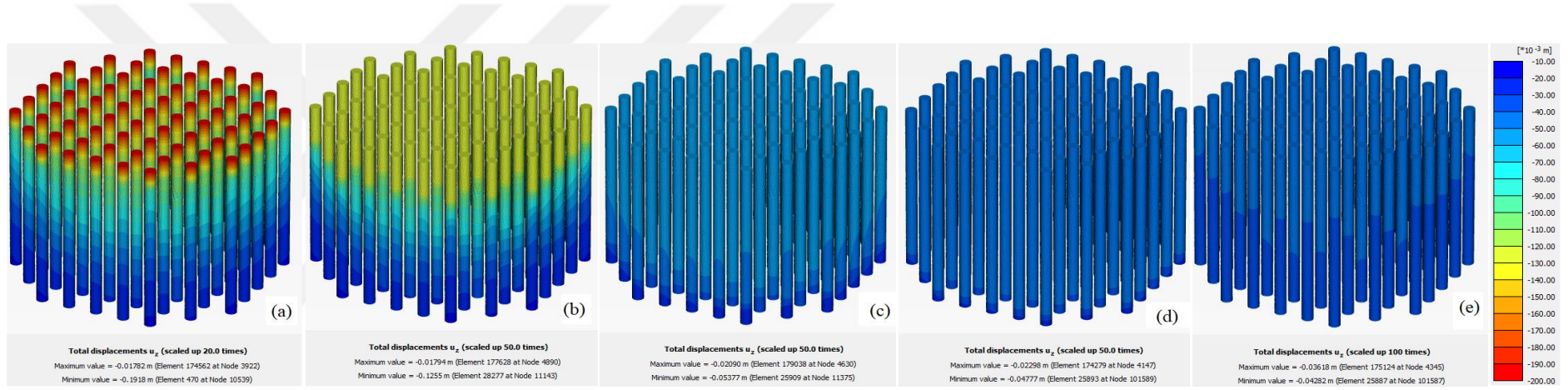
Şekil A.2. (a) D_3D (b) JG_3D_0,6d_2,0s_2,5L (c) JG_3D_0,6d_2,0s_10,3L (d) JG_3D_0,6d_2,0s_11,3L (e) JG_3D_0,6d_2,0s_12,3L.



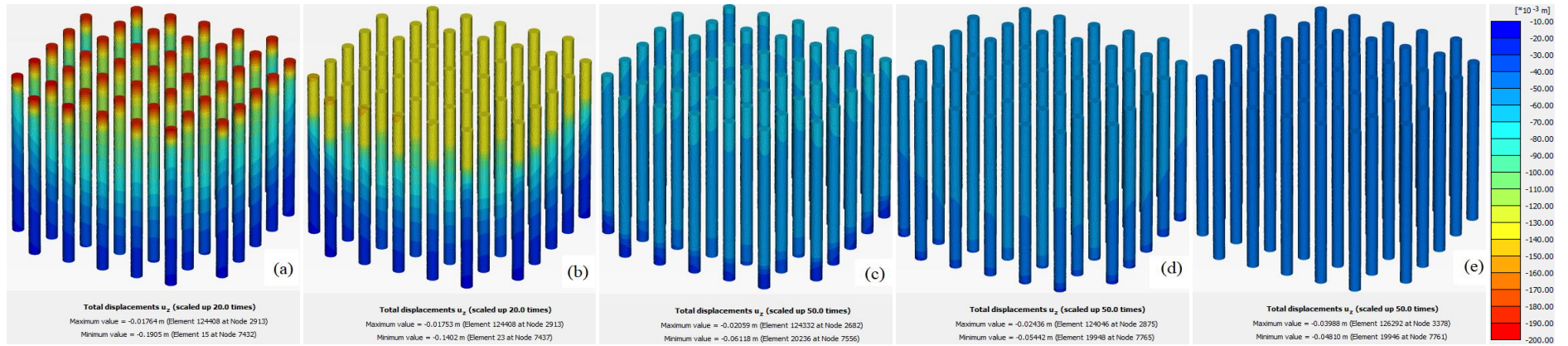
Şekil A.3. (a) D_3D (b) JG_3D_0,6d_2,5s_2,5L (c) JG_3D_0,6d_2,5s_10,3L (d) JG_3D_0,6d_2,5s_11,3L (e) JG_3D_0,6d_2,5s_12,3L.



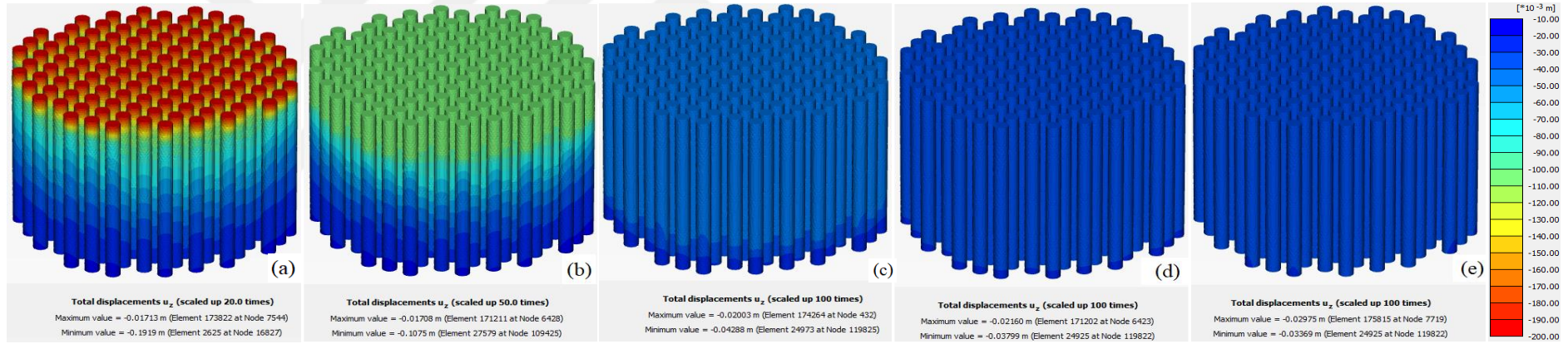
Şekil A.4. (a) D_3D (b) JG_3D_0,8d_1,5s_2,5L (c) JG_3D_0,8d_1,5s_10,3L (d) JG_3D_0,8d_1,5s_11,3L (e) JG_3D_0,8d_1,5s_12,3L.



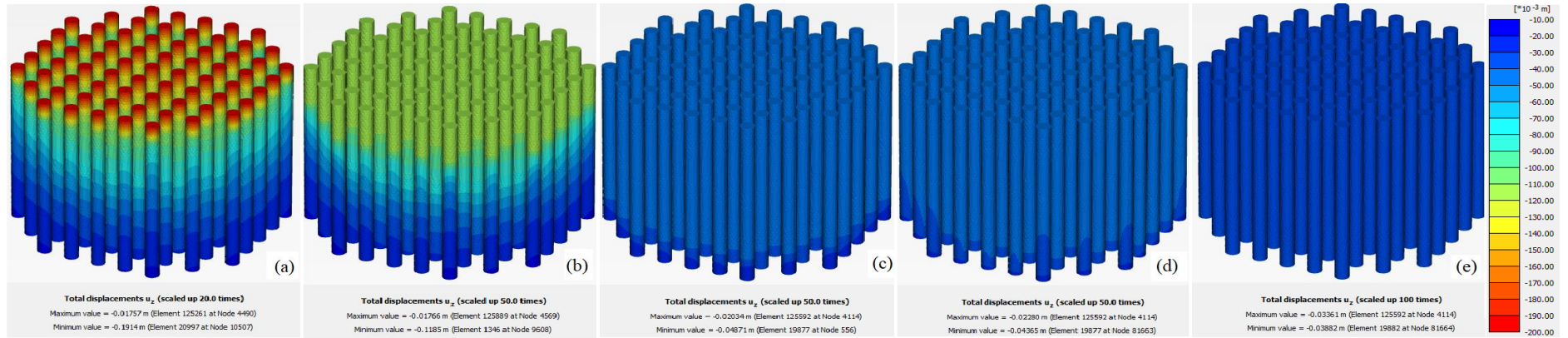
Şekil A.5. (a) D_3D (b) JG_3D_0,8d_2,0s_2,5L (c) JG_3D_0,8d_2,0s_10,3L (d) JG_3D_0,8d_2,0s_11,3L (e) JG_3D_0,8d_2,0s_12,3L.



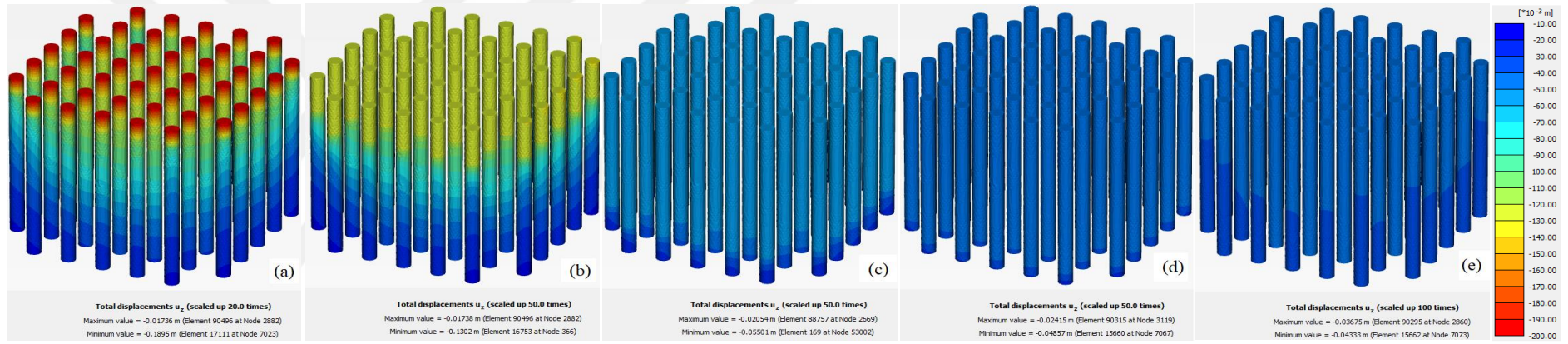
Şekil A.6. (a) D_3D (b) JG_3D_0,8d_2,5s_2,5L (c) JG_3D_0,8d_2,5s_10,3L (d) JG_3D_0,8d_2,5s_11,3L (e) JG_3D_0,8d_2,5s_12,3L.



Şekil A.7. (a) D_3D (b) JG_3D_1,0d_1,5s_2,5L (c) JG_3D_1,0d_1,5s_10,3L (d) JG_3D_1,0d_1,5s_11,3L (e) JG_3D_1,0d_1,5s_12,3L.

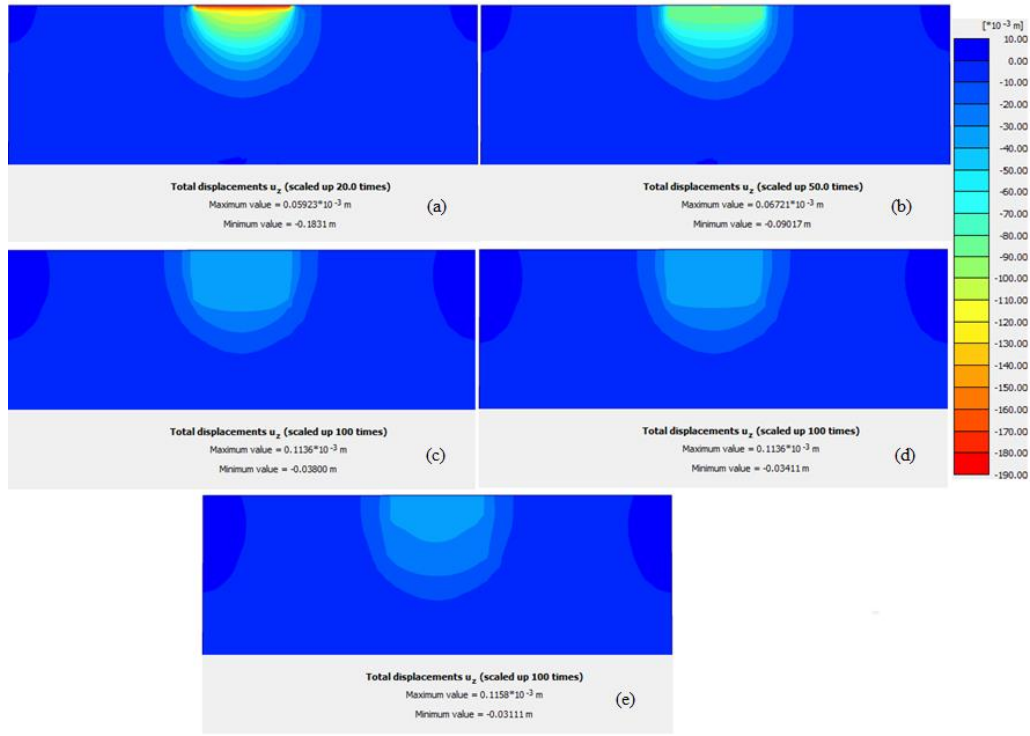


Şekil A.8. (a) D_3D (b) JG_3D_1,0d_2,0s_2,5L (c) JG_3D_1,0d_2,0s_10,3L (d) JG_3D_1,0d_2,0s_11,3L (e) JG_3D_1,0d_2,0s_12,3L.

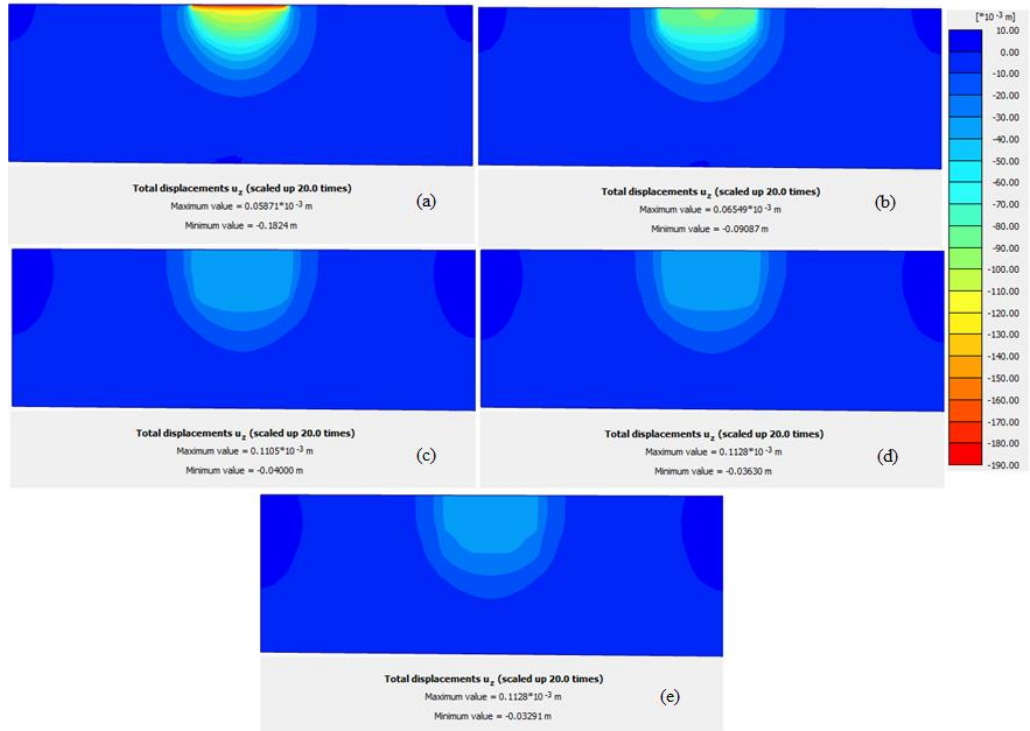


Şekil A.9. (a) D_3D (b) JG_3D_1,0d_2,5s_2,5L (c) JG_3D_1,0d_2,5s_10,3L (d) JG_3D_1,0d_2,5s_11,3L (e) JG_3D_1,0d_2,5s_12,3L.

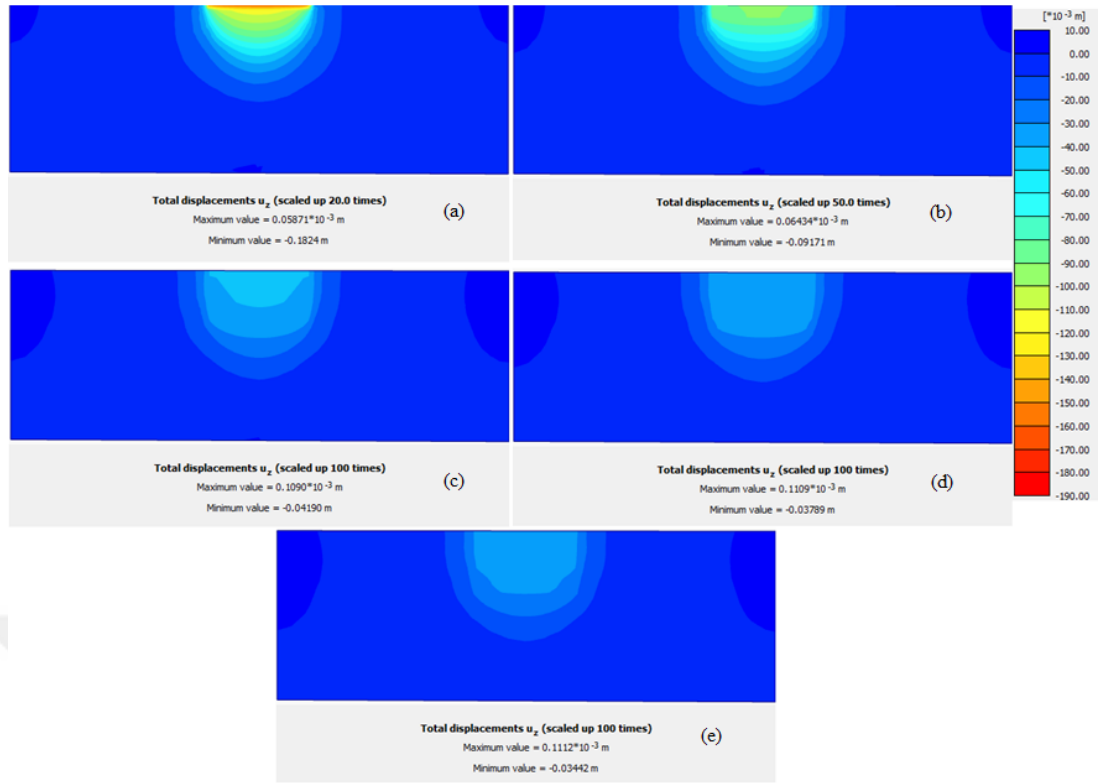
EK B. Silo boş (yüksüz) durumda iken jet grout kolonlarının kompozit bölge olarak modellendiği Plaxis 3D analiz sonuçları



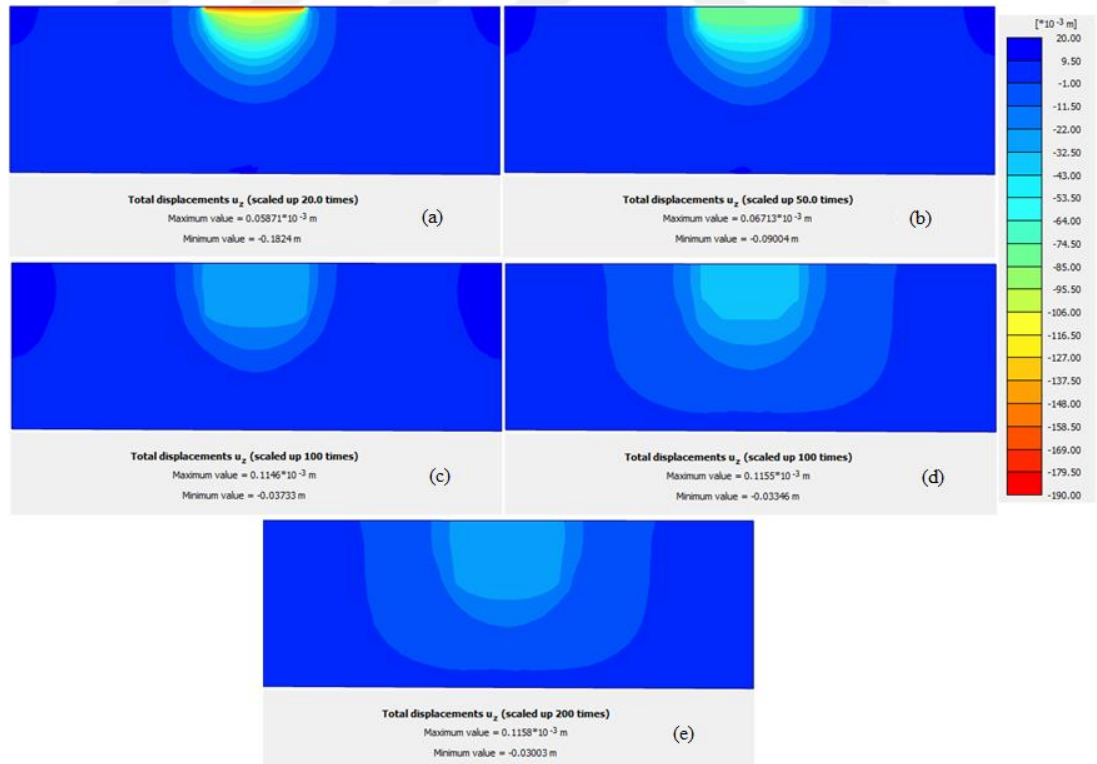
Şekil B.1. (a) D_3D (b) K_3D_0,6d_1,5s_2,5L (c) K_3D_0,6d_1,5s_10,3L (d) K_3D_0,6d_1,5s_11,3L (e) K_3D_0,6d_1,5s_12,3L.



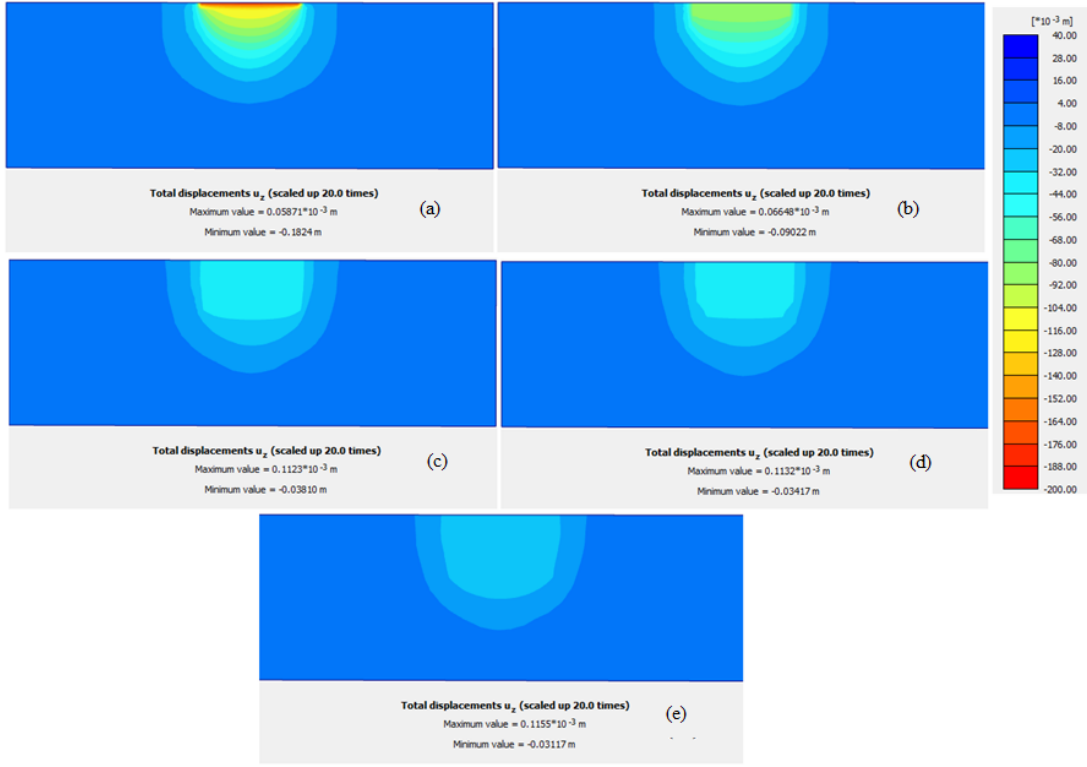
Şekil B.2. (a) D_3D (b) K_3D_0,6d_2,0s_2,5L (c) K_3D_0,6d_2,0s_10,3L (d) K_3D_0,6d_2,0s_11,3L (e) K_3D_0,6d_2,0s_12,3L.



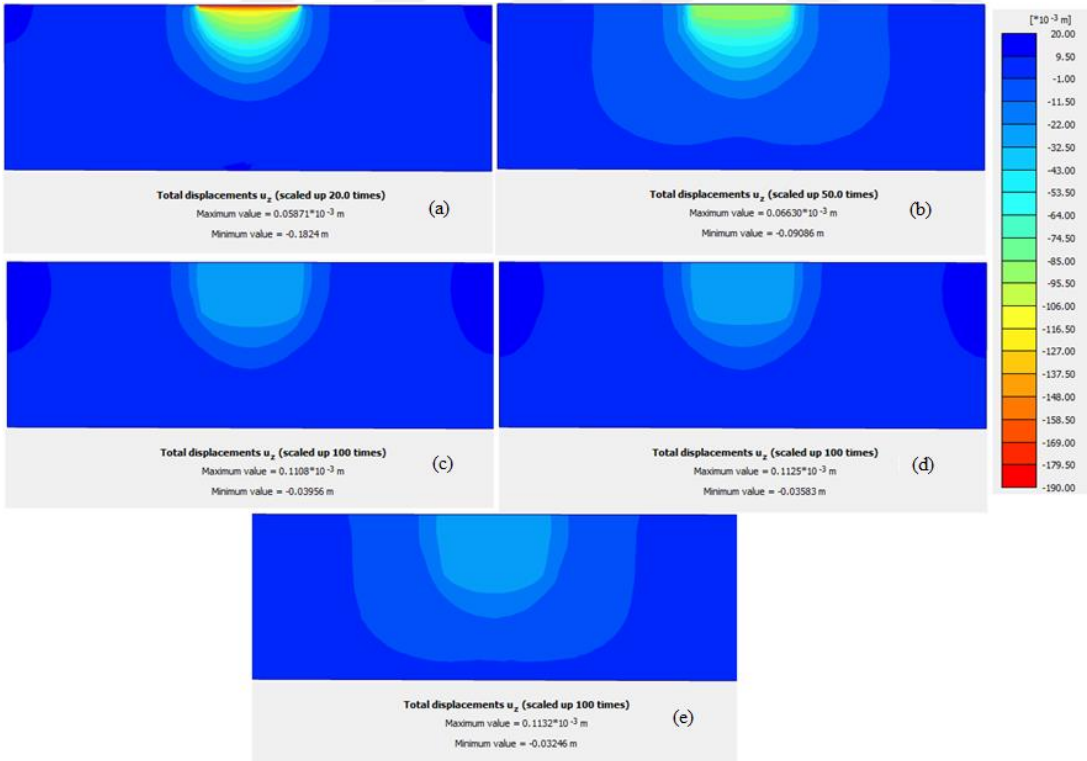
Şekil B.3. (a) D_3D (b) K_3D_0,6d_2,5s_2,5L (c) K_3D_0,6d_2,5s_10,3L (d) K_3D_0,6d_2,5s_11,3L (e) K_3D_0,6d_2,5s_12,3L.



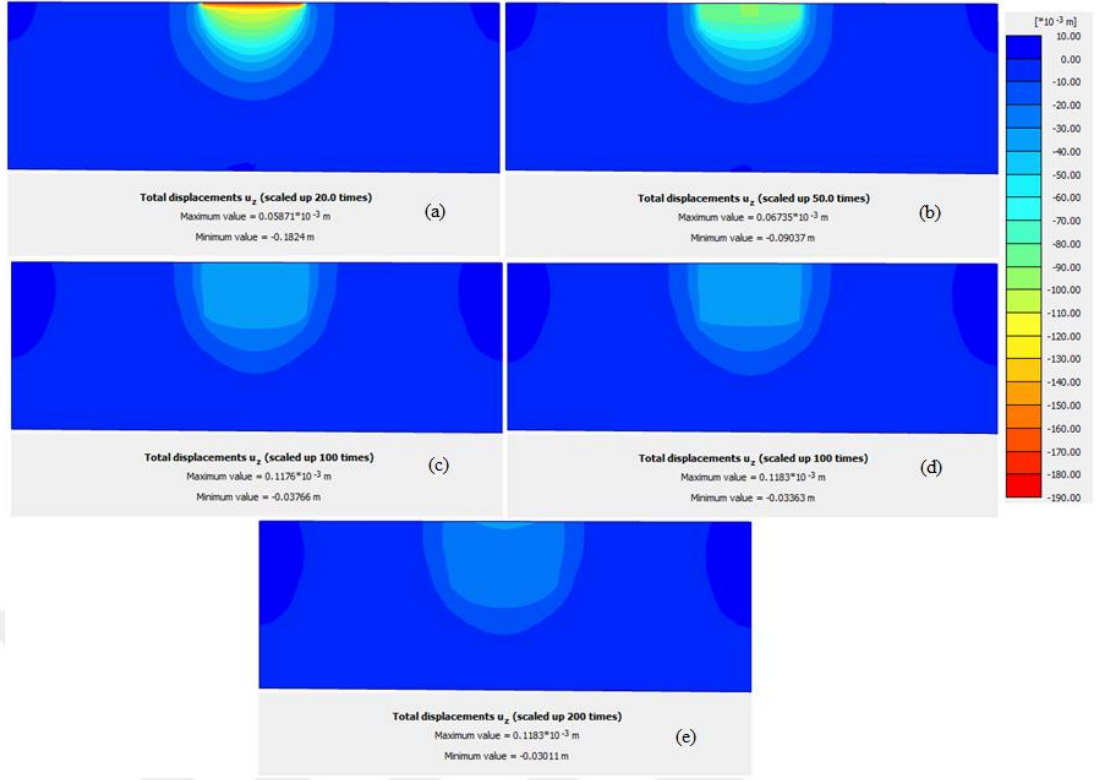
Şekil B.4. (a) D_3D (b) K_3D_0,8d_1,5s_2,5L (c) K_3D_0,8d_1,5s_10,3L (d) K_3D_0,8d_1,5s_11,3L (e) K_3D_0,8d_1,5s_12,3L.



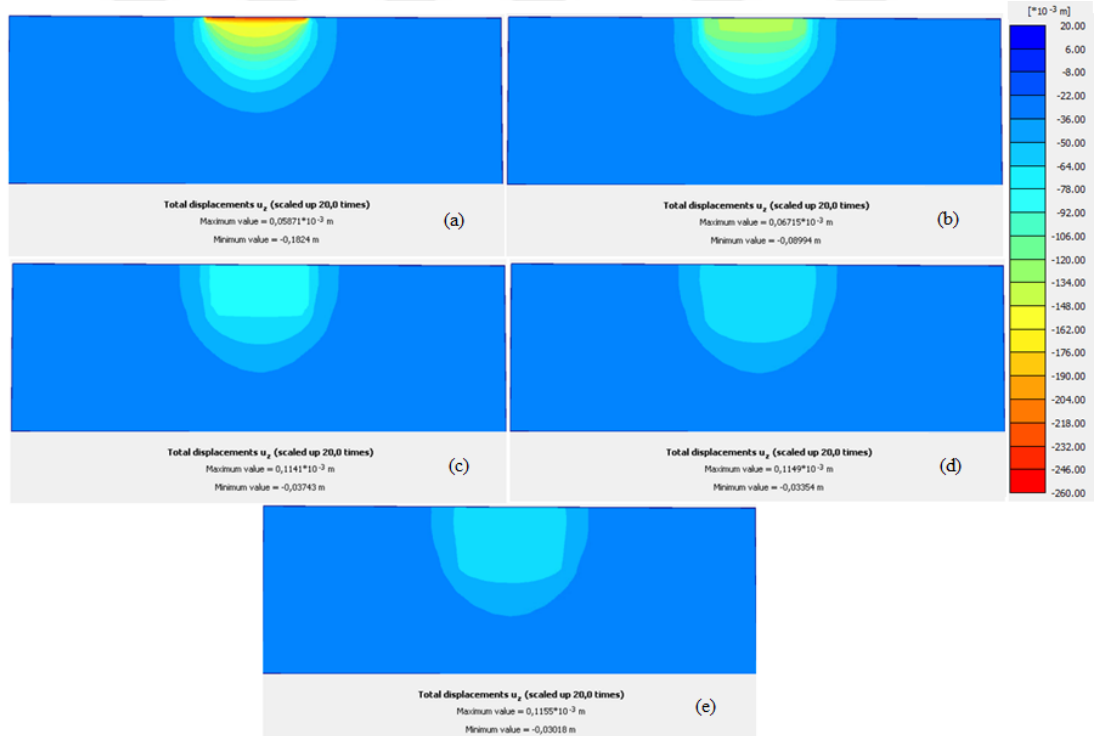
Şekil B.5. (a) D_3D (b) K_3D_0,8d_2,0s_2,5L (c) K_3D_0,8d_2,0s_10,3L (d) K_3D_0,8d_2,0s_11,3L (e) K_3D_0,8d_2,0s_12,3L.



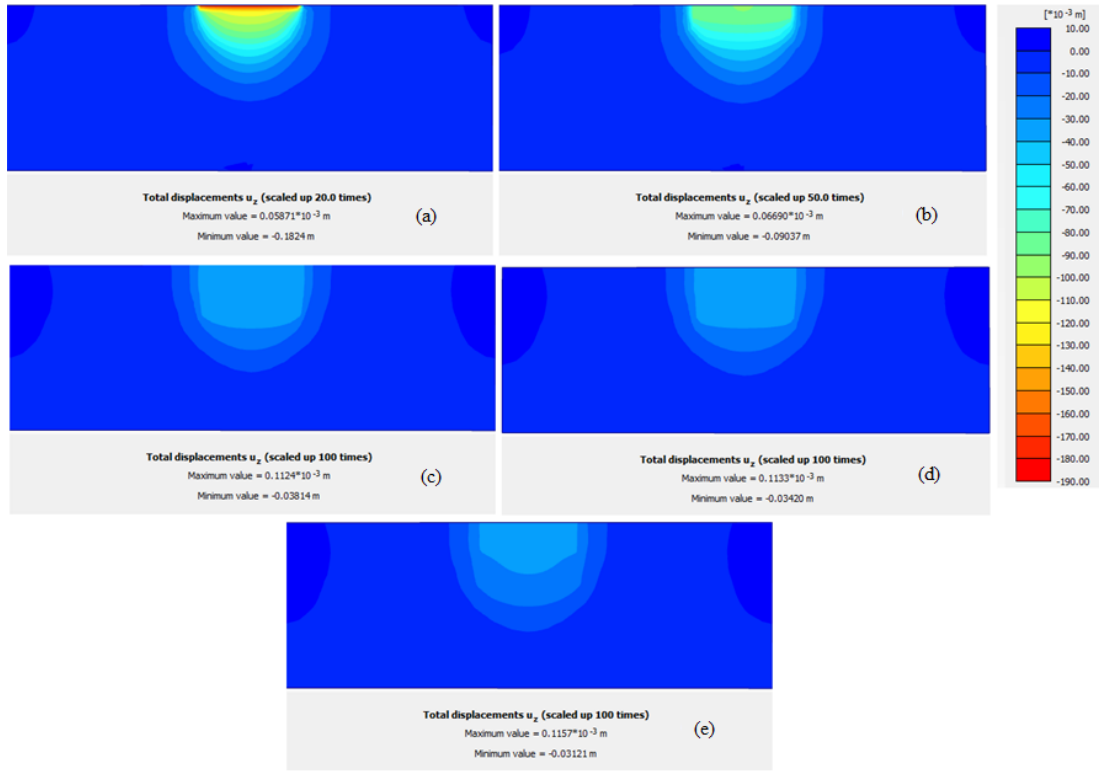
Şekil B.6. (a) D_3D (b) K_3D_0,8d_2,5s_2,5L (c) K_3D_0,8d_2,5s_10,3L (d) K_3D_0,8d_2,5s_11,3L (e) K_3D_0,8d_2,5s_12,3L.



Şekil B.7. (a) D_3D (b) K_3D_1,0d_1,5s_2,5L (c) K_3D_1,0d_1,5s_10,3L (d) K_3D_1,0d_1,5s_11,3L (e) K_3D_1,0d_1,5s_12,3L.

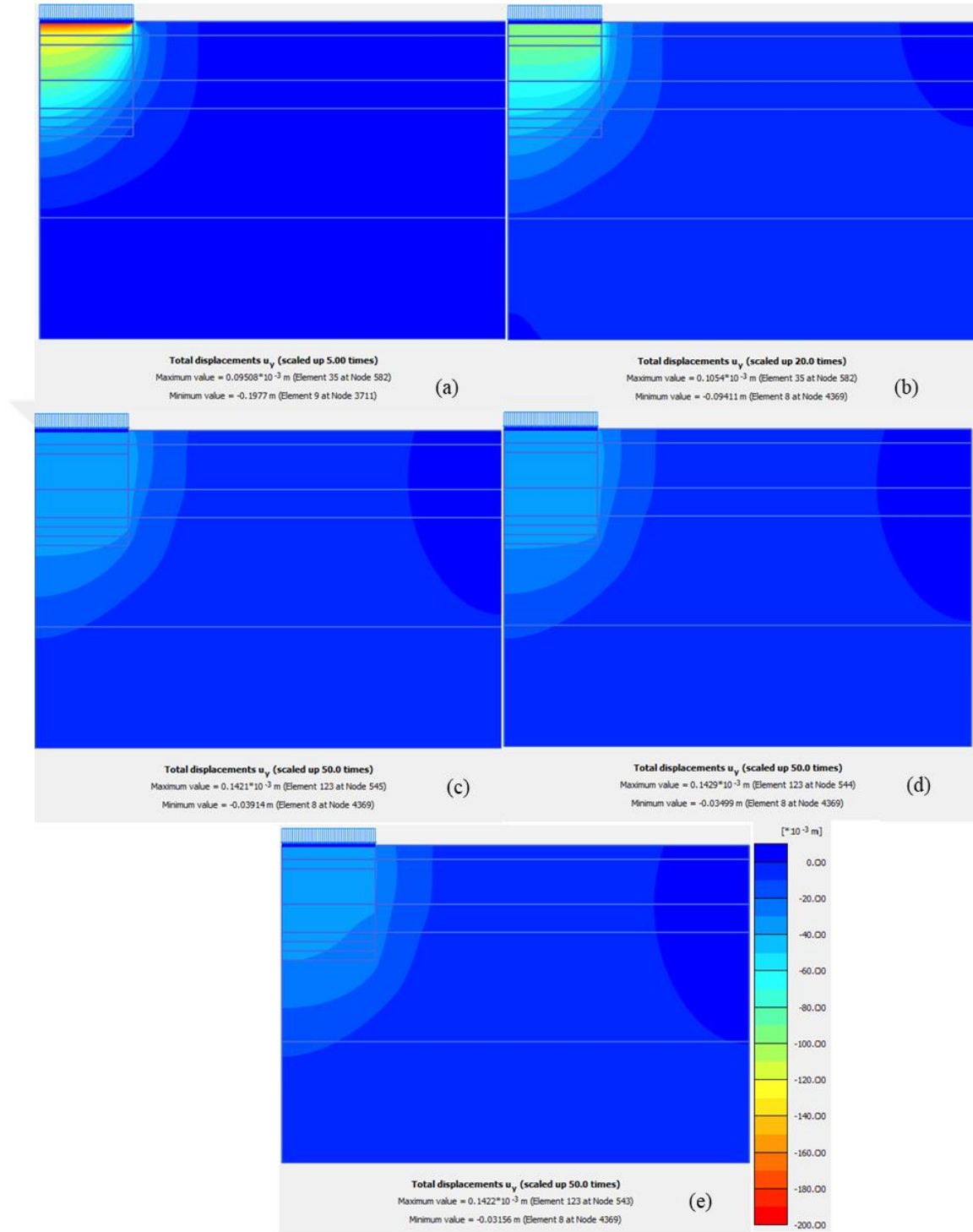


Şekil B.8. (a) D_3D (b) K_3D_1,0d_2,0s_2,5L (c) K_3D_1,0d_2,0s_10,3L (d) K_3D_1,0d_2,0s_11,3L (e) K_3D_1,0d_2,0s_12,3L.

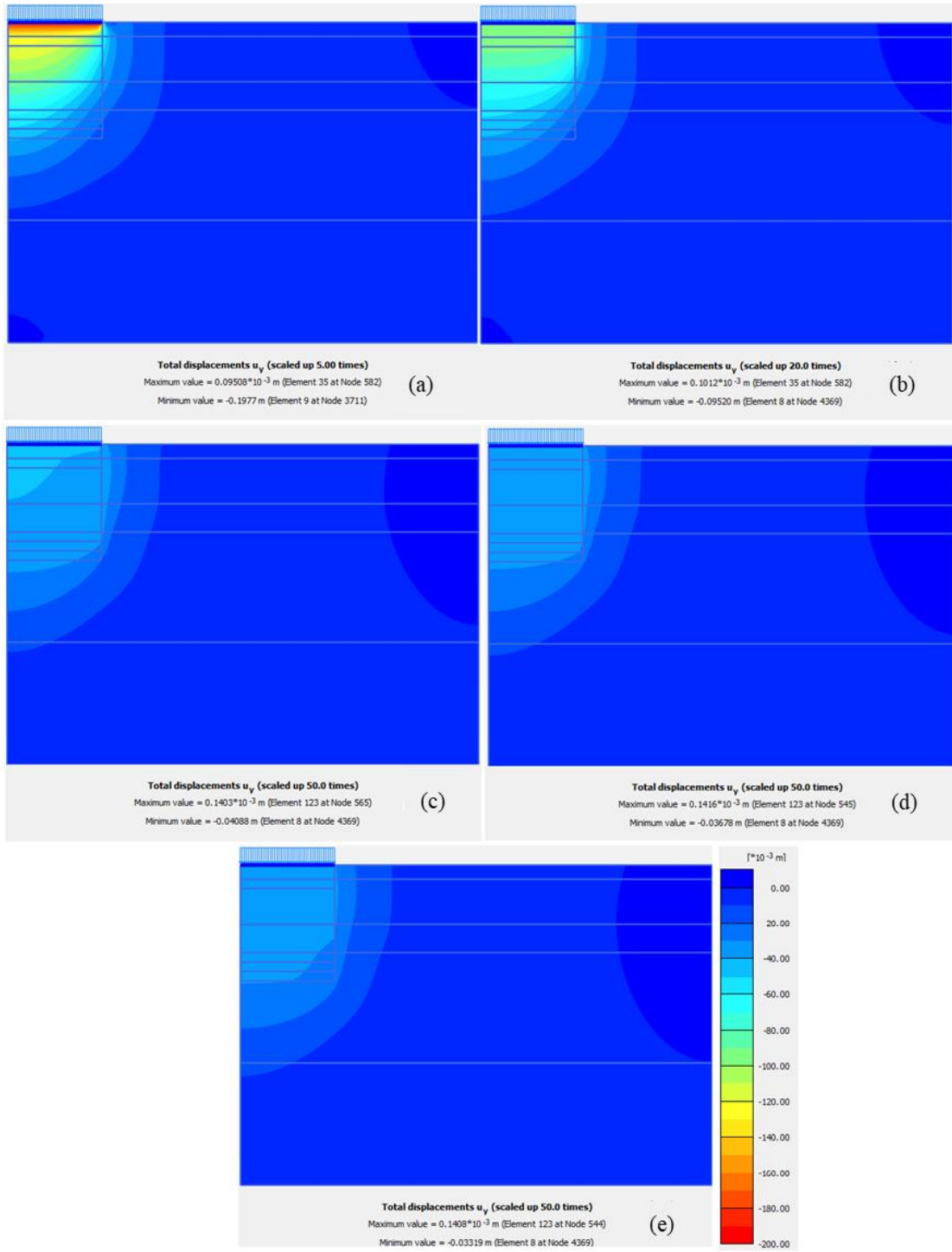


Şekil B.9. (a) D_3D (b) K_3D_1,0d_2,5s_2,5L (c) K_3D_1,0d_2,5s_10,3L (d) K_3D_1,0d_2,5s_11,3L (e) K_3D_1,0d_2,5s_12,3L.

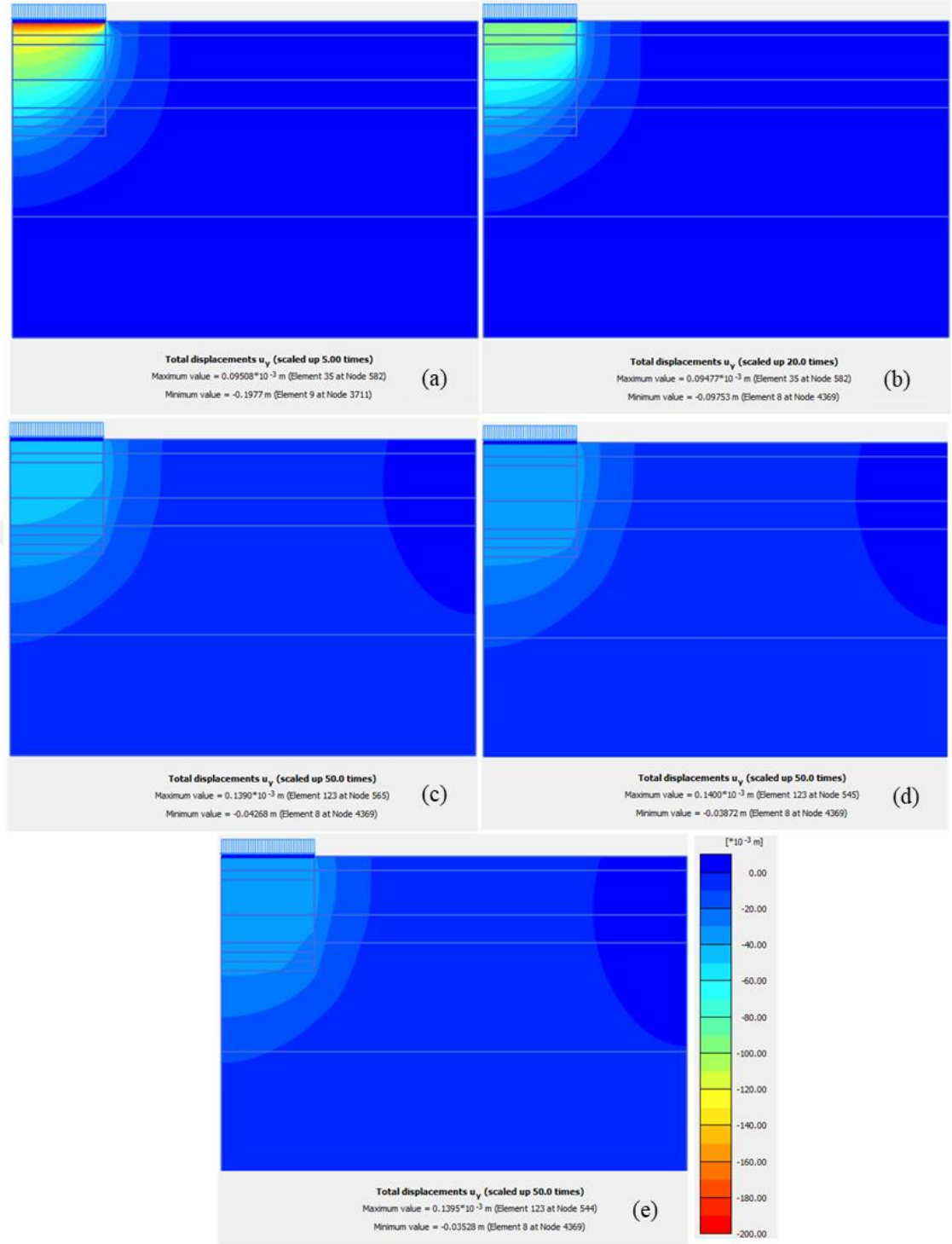
EK C. Silo boş (yüksüz) durumda iken jet grout kolonlarının kompozit bölge olarak modellendiği Plaxis 2D analiz sonuçları



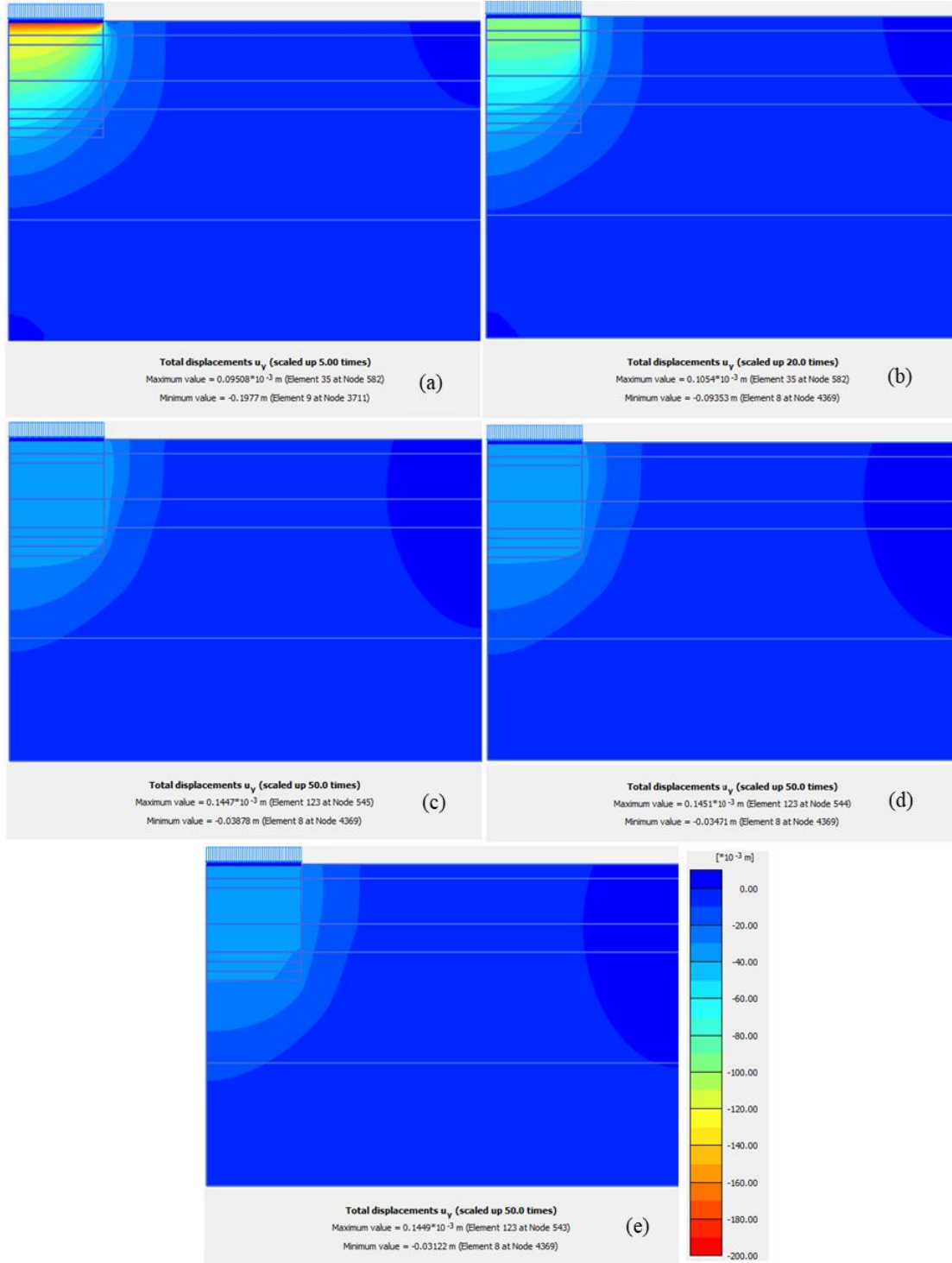
Şekil C.1. (a) D_2D (b) K_2D_0,6d_1,5s_2,5L (c) K_2D_0,6d_1,5s_10,3L (d) K_2D_0,6d_1,5s_11,3L (e) K_2D_0,6d_1,5s_12,3L.



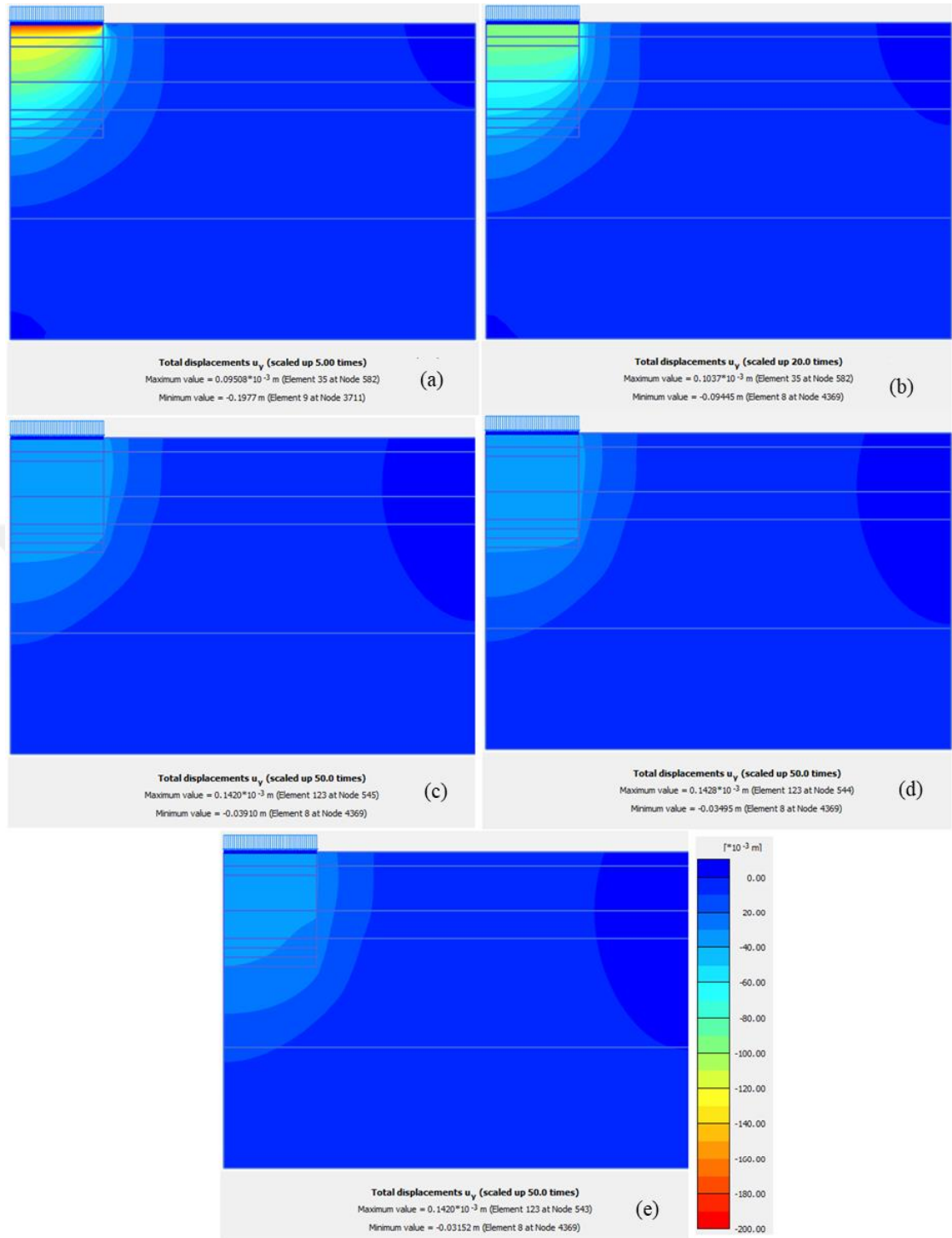
Şekil C.2. (a) D_2D (b) K_2D_0,6d_2,0s_2,5L (c) K_2D_0,6d_2,0s_10,3L (d) K_2D_0,6d_2,0s_11,3L (e) K_2D_0,6d_2,0s_12,3L.



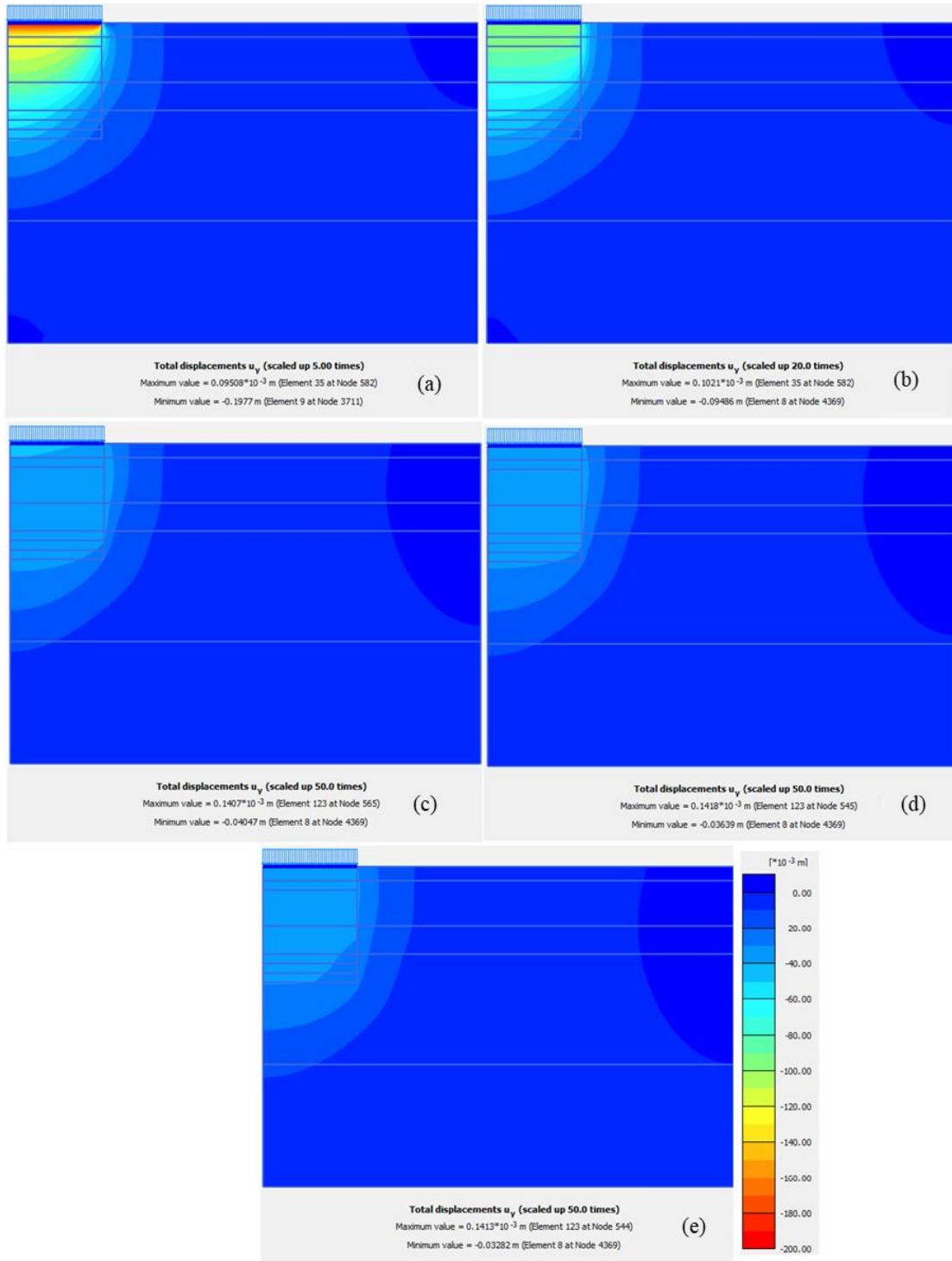
Şekil C.3. (a) D_2D (b) K_2D_0,6d_2,5s_2,5L (c) K_2D_0,6d_2,5s_10,3L (d) K_2D_0,6d_2,5s_11,3L (e) K_2D_0,6d_2,5s_12,3L.



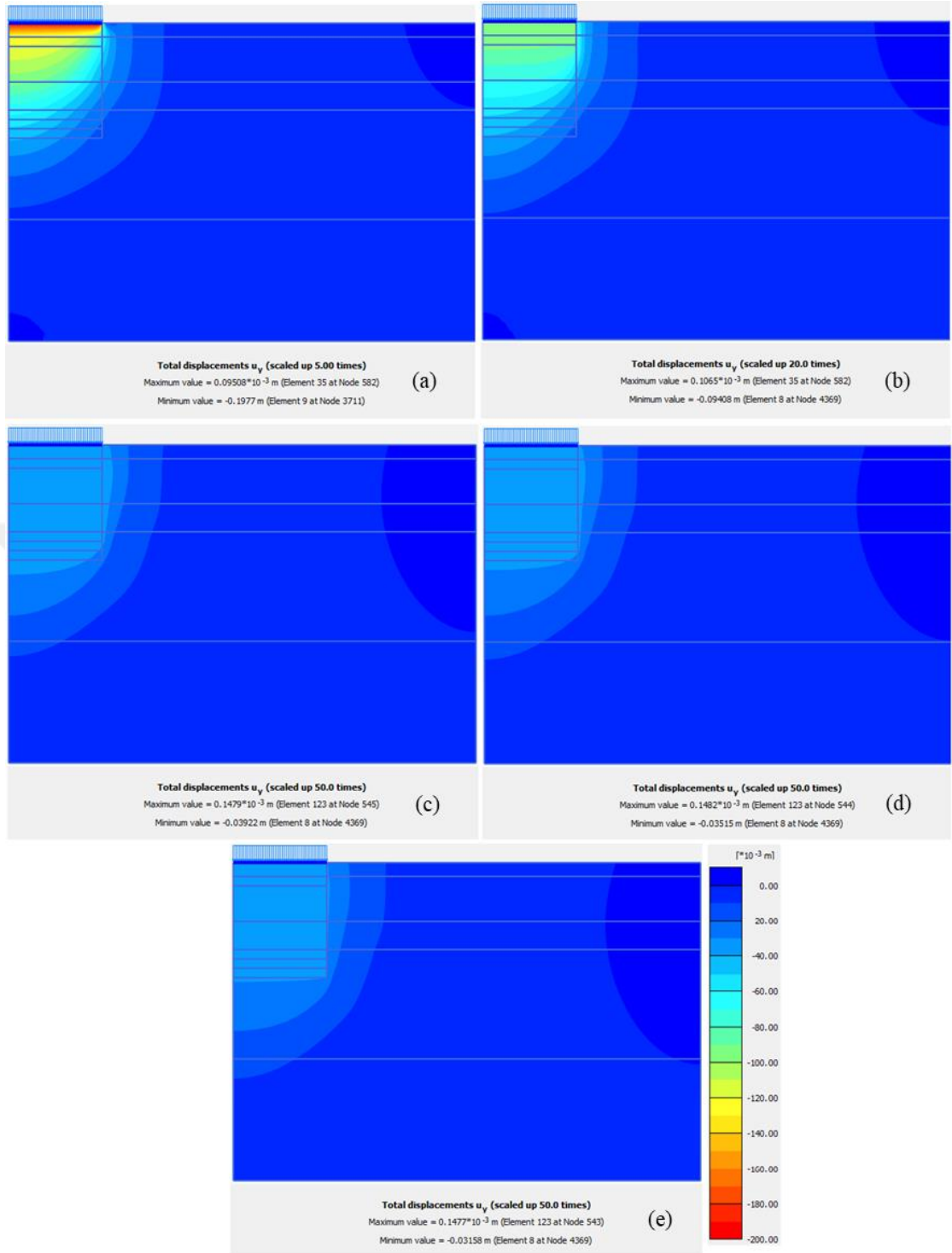
Şekil C.4. (a) D_2D (b) K_2D_0,8d_1,5s_2,5L (c) K_2D_0,8d_1,5s_10,3L (d) K_2D_0,8d_1,5s_11,3L (e) K_2D_0,8d_1,5s_12,3L.



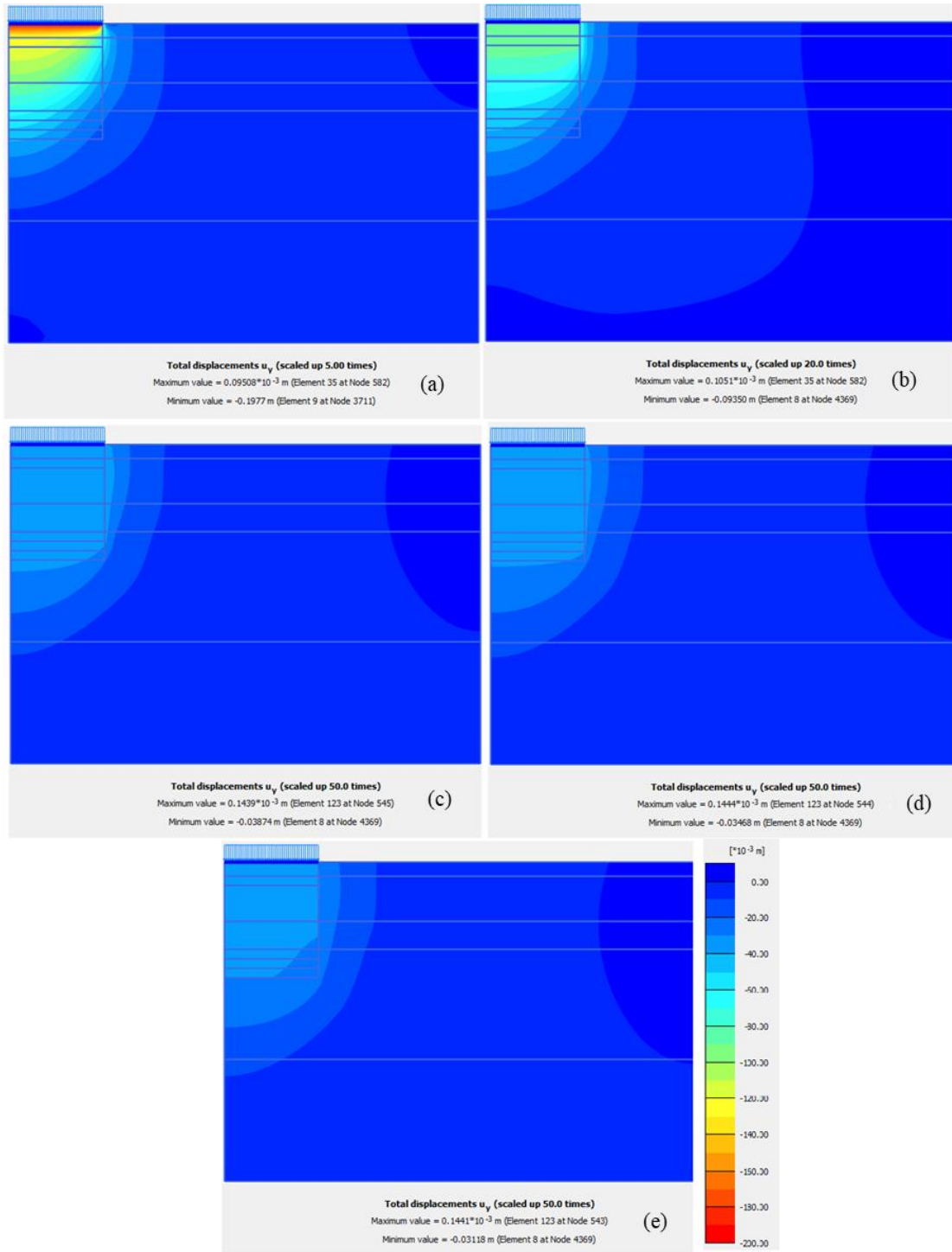
Şekil C.5. (a) D_2D (b) K_2D_0,8d_2,0s_2,5L (c) K_2D_0,8d_2,0s_10,3L (d) K_2D_0,8d_2,0s_11,3L (e) K_2D_0,8d_2,0s_12,3L.



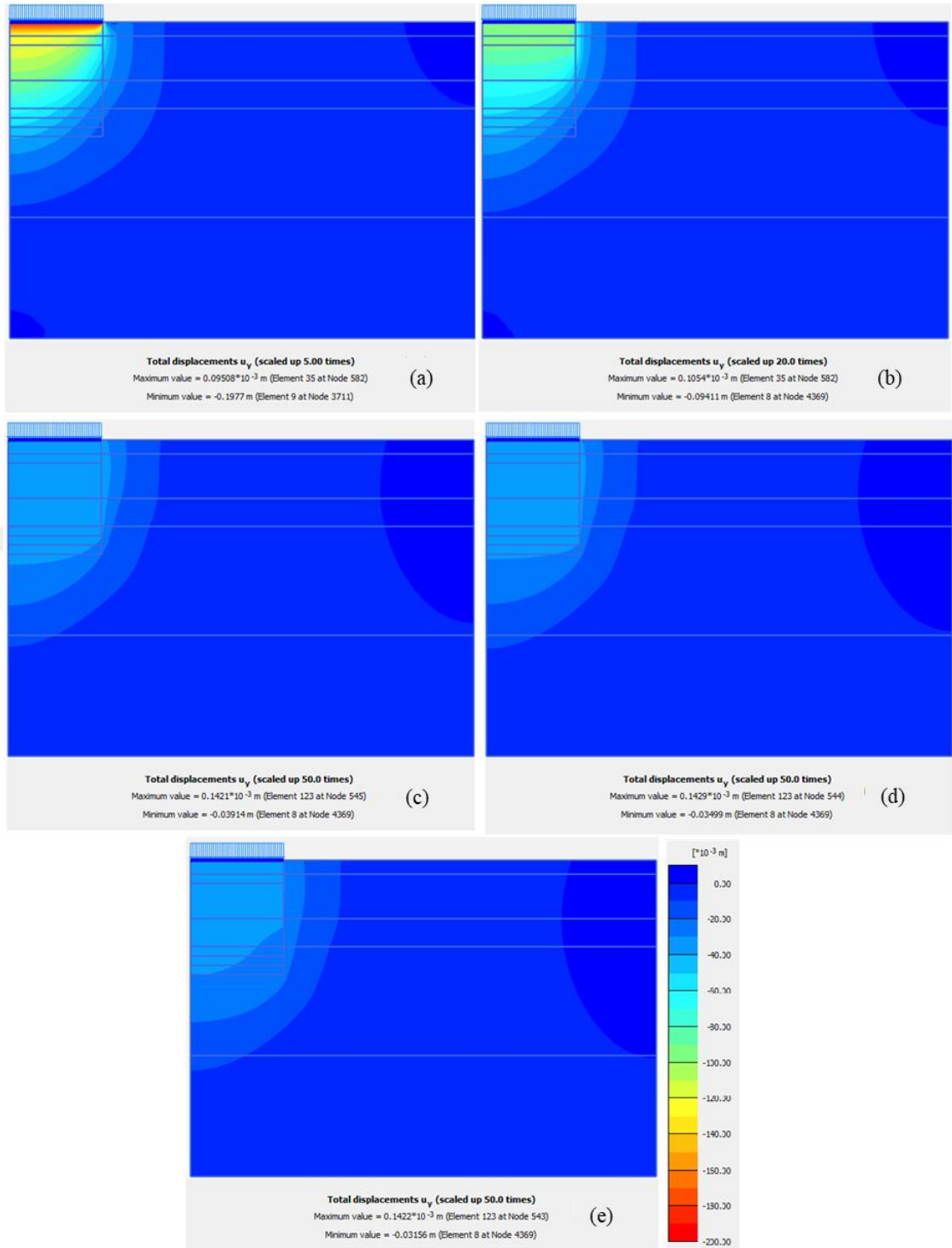
Şekil C.6. (a) D_2D (b) K_2D_0,8d_2,5s_2,5L (c) K_2D_0,8d_2,5s_10,3L (d) K_2D_0,8d_2,5s_11,3L (e) K_2D_0,8d_2,5s_12,3L.



Şekil C.7. (a) D_2D (b) K_2D_1,0d_1,5s_2,5L (c) K_2D_1,0d_1,5s_10,3L (d) K_2D_1,0d_1,5s_11,3L (e) K_2D_1,0d_1,5s_12,3L.



Şekil C.8. (a) D_2D (b) K_2D_1,0d_2,0s_2,5L (c) K_2D_1,0d_2,0s_10,3L (d) K_2D_1,0d_2,0s_11,3L (e) K_2D_1,0d_2,0s_12,3L.



Şekil C.9. (a) D_2D (b) K_2D_1,0d_2,5s_2,5L (c) K_2D_1,0d_2,5s_10,3L (d) K_2D_1,0d_2,5s_11,3L (e) K_2D_1,0d_2,5s_12,3L.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İrem DÜZEN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek lisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020 yılından itibaren Emay Uluslararası Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. firmasında çalışıyor.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Düzen, İ., Özocak, A., Sert, A., Bol, E. ve Arslan, E. (2023). The Evaluation of Effect of Jet Grout Columns to the Settlements in Soils with Numerical Methods. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.