

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

**YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLARIN (JET GROUT)
ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANILMASI VE
HESAP YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep AKSANGÜR

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan BOL

Aralık 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK MODÜLLÜ KOLONLARIN (JET GROUT) ZEMİN
İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANILMASI VE HESAP
YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep AKSANGÜR

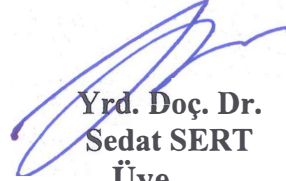
Enstitü Anabilim Dalı

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 07/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği /  ile kabul edilmiştir.


**Doç. Dr.
Ertan BOL
Jüri Başkanı**


**Yrd. Doç. Dr.
Ayşe Bengü SÜNBÜL
Üye**


**Yrd. Doç. Dr.
Sedat SERT
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Zeynep AKSANGÜR

07.12.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Geoteknik Anabilimdalı değerli hocalarından sayın Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkür ederim.

Tezin oluşturulmasında emeği geçen çok değerli mesai arkadaşlarıma ve desteğini ilk günden beri hiç esirgemeyen başta kardeşim İpek AKSANGÜR olmak üzere sevgili aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi	2
2.1.1. Zayıf (Yetersiz) zemin ve problemleri	4
2.1.2. Zemin iyileştirme yöntemi seçimi	9
2.2. Mevcut Zemin İyileştirme Yöntemleri	12
2.2.1. Kompaksiyon	15
2.2.2. Patlatma	16
2.2.3. Enjeksiyon	17
2.2.3.1. Katlı malzemleri ile enjeksiyon	21
2.2.3.2. Permeasyon enjeksiyonu	23
2.2.3.3. Çatlatma enjeksiyonu	23
2.2.3.4. Kompaksiyon enjeksiyonu	23
2.2.3.5. Derin karıştırma	24
2.2.4. Isıtma / Dondurma	24

2.2.5. Ön yükleme ve drenaj	26
2.2.6. Jet enjeksiyonu (Jet Grout)	27
2.3. Sıvılaşma	27
2.3.1. Sıvılaşan zeminler	28
2.3.2. Sıvılaşmada temel mühendisliği uygulama yöntemleri	28

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Jet Grout Yöntemin Tarihçesi	29
3.2. Jet Grout İle İlgili Örnek Çalışmalar ve Literatür Araştırması	32
3.2.1. Jet grout kolonu - zemin - su/çimento oranı ilişkisi	32
3.2.2. Jet Grout Kolon uygulamasında hesap algoritması oluşturma ..	33
3.2.3. Jet Grout Kolon numunesi basınç dayanımı hesabı	33
3.2.4. Jet Grout ve Deep Mixing yöntemleri ile sıvılaşmanın etkilerinin azaltılması	34
3.2.5. Jet Grout yöntemi ile mukavemet özelliklerinin değişimi ve zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısı arasındaki ilişkinin araştırılması	34
3.2.6. Jet Grout yönteminin kullanımı ile sıvılaşmanın önlenmesi	35
3.2.7. Jet Grout yöntem ile oturma limit aşımının önlenmesi	35
3.2.8. Jet Grout yöntemi ile taşıma gücü ve deformasyon kontrolü	35
3.2.9. Jet Grout yöntemi ile permeabilitenin azaltılmasının incelenmesi	36
3.3. Jet Grout Kullanımı ve Yöntemin Uygulanması	36
3.4. Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları	38
3.5. Jet Grout Kolonların Kullanım Alanları	39
3.6. Jet Grout Yönteminin Tasarım Esasları	40
3.7. Jet Grout Yönteminin Uygulanması	41
3.7.1. Ön Jet Grout (Prewashing)	42
3.7.2. Delgi aşaması	42
3.7.3. Enjeksiyon aşaması	43
3.8. Jet Grout Teknikleri	43

3.8.1. Jet 1 (tek akışkanlı sistem) tekniği	44
3.8.2. Jet 2 (çift akışkanlı sistem) tekniği	44
3.8.3. Jet 3 (üç akışkanlı sistem) tekniği	45
3.8.4. Süper jet tekniği	45
3.9. Jet Grout Yönteminin Çalışma Parametreleri	47
3.9.1. Zemin özellikleri	48
3.9.2. Enjeksiyon basıncı	48
3.9.3. Dönme ve çekme hızı	50
3.9.4. Nozzle çap ve adedi	51
3.9.5. Su/çimento oranı	51
3.10. Jet Grout Yöntemi Ekipmanları	52
3.10.1. Delgi makinesi	53
3.10.2. Pompa ünitesi	54
3.10.3. Mikser ünitesi	55
3.10.4. Çimento silosu	55
3.10.5. İlave ekipmanlar	56
3.11. İlgili Parametrelerin Hesaplanması	56
3.11.1. Çimento miktarının hesabı	56
3.11.2. Tij çekme hızı hesabı	58
3.11.3. Nozzle'dan enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı hesabı	58
3.11.4. Enjeksiyon malzemesi miktarı (Q) hesabı	58
3.11.5. Püskürtme enerjisi (E) hesabı	59
3.12. Kontroller ve Testler	60
3.12.1. Deneme kolonları yapılması ve çap kontrolü	62
3.12.2. Karot numune alınması ve serbest basınç deneyi	63
3.12.3. Jet Grout kolonu yükleme deneyi	64
3.12.4. Süreklilik deneyi	66
3.13. Toleranslar	68
3.14. Uygulama Dokümanları	68
3.15. Geleneksel Yöntemle Jet Grout Hesabı	71
3.15.1. Jet Grout kolonlarının taşıma kapasitesi	71
3.15.2. Jet Grout ile iyileşen zemin taşıma gücü hesabı	77

3.15.3. Jet Grout ile iyileşen zemin oturma hesabı	78
3.15.4. Jet Grout ile iyileşen zemin yatak katsayısı-elastiste modülü hesabı	80
3.16. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Kullanımı	82
3.16.1. Sıvılaşma potansiyelinin hesaplanması	85
3.16.2. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü hesabı	85
3.16.3. Çevrimsel gerilme oranı (CSR)	86
3.16.4. Çevrimsel mukavemet oranı (CRR)	88
3.16.5. Zemin maksimum kayma modülünün hesaplanması	93
3.16.6. Deprem sonucu zemin kayma gerilmelerinin dağılımı	94
3.16.7. Çevrimsel gerilim azaltma faktörü	97

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Jet Grout Kolonlarının Sayısal Analizi	99
4.2. PLAXIS Programı ile Modelleme	100
4.2.1. Lineer elastik model	100
4.2.2. Mohr-Coulomb modeli	102
4.2.3. Hardening Soil model (Sertleşmiş zemin modeli)	103
4.2.4. Soft Soil model (Yumuşak zemin modeli)	105
4.2.5. PLAXIS Programı kabul formülasyonu	106
4.3. PLAXIS Programında Yapısal Elemanların Modellenmesi	107
4.3.1. Plate eleman ile modelleme	107
4.3.2. Goegrid eleman ile modelleme	108
4.3.3. Embedded BeamRow eleman ile modelleme	109
4.3.4. Anchors eleman ile modelleme	110
4.3.5. Ara yüzey elemaların tanımlanması	111
4.3.6. Modelleme alanının belirlenmesi	113
4.4. Sayısal Analize Örnek Çalışmalar	113
4.5. Tez Kapsamında PLAXIS Programı Kullanılarak Yapılan Örnek Vaka	117
4.5.1. Çalışma alanının tanımlanması	117

4.5.2. Çalışma kapsamında yapılan kabuller	120
4.5.3. Jet Grout kolon özelliklerinin sayısal ortama aktarımı	122
4.5.3.1. Elastite modülü kabulü	122
4.5.3.2. Birim hacim ağırlık kabulü	123
4.5.3.3. Kohezyon ve kayma açısı kabulü	123
4.5.3.4. Jet Grout kolonu poisson oranı	124
4.5.3.5. Jet Grout kolonu uç-çevre taşıma kapasitesi kabulü	125
4.5.3.6. Interface tanımını yapılması	126
4.5.4. Zemin koşullarının sayısal ortama aktarılması	126
4.5.4.1. Elastite modülü kabulü	127
4.5.4.2. Birim hacim ağırlık kabulü	128
4.5.4.3. Kohezyon -kayma direnci - kabarma açısı kabulü	128
4.5.5. Kompozit bölge kabulünde parametrelerinin hesaplanması	130
4.5.6. Yayılı temel özelliklerinin sayısal ortama aktarılması	132
4.6. Analiz Adımları	132
4.6.1. Geometrinin oluşturulması	132
4.6.2. Yapısal elemanların oluşturulması	134
4.6.3. Yük tanımı	136
4.6.4. Ağ tanımı	137
4.7. Analiz sonuçları	138
4.7.1. PLAXIS model sonuçları	138
4.7.2. Geleneksel yöntem analiz sonuçları	140

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE SONUÇ	147
-------------------------	-----

KAYNAKLAR	150
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	151
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A_c	: Aktivite (kil yüzdesi)
A	: Toplam alan
A_{jg}	: Jet grout kolonunun taban alanı
A_p, A_{si}	: Kazık taban alanı ve kazık yan yüzü alanı
A_{zem}	: Zeminin alan
$A_{s1,2}$	: Kolon yanıl çevre alanı
A_{jet}	: Jet Grout alanı
$A_{ıslah}$	: İyileşme alanı
A_p	: Jet Grout kolonu uç enkesit alanı
A_s	: Jet Grout kolonu sürtünme alanı
c	: Kohezyon
C_u	: Drenajsız kohezyon - kayma mukavemeti
C_c	: Kompresibilite - Sıkışma indisi
C_v	: Düşey konsolidasyon katsayısı
C_h	: Yatay Konsolidasyon katsayısı
C'	: Drenajlı kohezyon değeri
C_{REZ}	: Residüel kohezyon değeri
C_s	: Şişme indisi
CCP	: Chemical Churning Plant (Kimyasal Çalkalama Sağlama)
CJG	: Column Jet Grout (Kolon Jet Grout)
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
$C_{increment}$	: Kohezyon artışı
C_{inter}	: Interface uygulanmış kohezyon değeri
C_{komp}	: Kompozit zemin kohezyon değeri
C_n	: Derinlik düzeltme faktörü
CL	: Düşük plastisiteli kil

CH	: Yüksek plastisiteli kil
Ç	: Çimento
D _f	: Temel gömme derinliği
D	: Jet Grout kolonunun çapı
D ₁₅ zemin	: %15'i zemin
D ₈₅ enj.	: %85'i enjeksiyon malzemesi
D ₁₀ zemin	: %10'i zemin
D ₉₅ enj.	: %95'i enjeksiyon malzemesi
d	: Eleman eşdeğer kalınlığı
DKK	: Darbeli kırmataş kolonlar
E	: Elastisite modülü
E _{jg}	: Kolon elastisite modülü
E _{komp}	: Kompozit bölgenin elastisite modülü
E _{zem}	: Zemin elastisite modülü
E _u	: Drenajsız elastisite modülü
E _{ur}	: Yükleme – boşaltma modülü
E _{oed}	: Ödometre modülü
E ₅₀	: Kiriş modülü
e _{init}	: Başlangıç boluk oranı
EA	: Normal rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
e*	: Çatlak genişliği
e	: Boşluk oranı
e ₀	: İlk boşluk oranı
FC	: Zemin ince dane yüzdesi
f _{jg}	: Jet Grout kolonu serbest basınç mukavemeti
f _s	: Birim sürtünme direnci
G	: Kayma modülü
GS	: Güvenlik kat sayısı
GW	: Düzgün dane dağılımlı çakıl
GP	: Üniform çakıl
GM	: Siltli çakıl

GC	: Killi akıl
h	: Aktif derinlik
JG	: Jet Grout
JSG	: Jumbo Jet Special Grout (Özel Jumbo Jet Grout)
JSP	: Jumbo Special Pile (Özel Jumbo Kazık)
JET 1	: Tek akışkanlı Jet Grout yöntemi
JET 2	: Çift akışkanlı Jet Grout yöntemi
JET 3	: Ü akışkanlı Jet Grout yöntemi
k_v	: Yatay hidrolik geçirgenlik,
k_h	: Düşey hidrolik geçirgenlik,
K	: Geçirgenlik katsayısına
K^*	: Kireç
K_o^{NC}	: Tek eksenli basınç değeri
K^*	: Şişme indisi
LL	: Likit limit
M	: Sürtünme
m	: Enerji - Gerilme seviyesine bağlı rijitlik için üs değeri
ML	: Düşük plastisiteli Silt
MH	: Yüksek plastisiteli Silt
N_c	: Kolonlar tarafından taşınan yük
N_q^*	: Derin temeller için taşıma gücü katsayısı
N_s	: Zemin tarafından taşınan yük
$(N_1)_{60}$	: Düzeltilmiş SPT darbe sayısı
N_{ort}	: Ortalama SPT darbe sayısı
N_k	: Değişken katsayı, Bowles (1996)
NP	: Normal plastiste
ÖY	: Ön yıkama
PL	: Plastik limit
p^{ref}	: Referans basınç değeri
q_{ilk}	: Geoteknik rapora göre iyileştirme öncesi taşıma gücü
q_u	: Serbest basma direnci,
q_f	: Jet Grout kolonu uc zeminin nihai taşıma kapasitesi

Q_f	: Jet Grout kolonu nihai taşıma gücü
Q_u	: Jet Grout kolonu uç taşıma kapasitesi
Q_c	: Jet Grout kolonu sürtünme direnci
Q_{net}	: Kolon emniyetli taşıma kapasitesi
R_f	: Göçme Oranı
R_{inter}	: Pürüzlülük
R_a	: Alan oranı
SSS-MAN	: Süper zemin stabilite kontrolü metodu
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SPT-N	: Standart penetrasyon deneyi darbe sayısı
SV	: Düşey Jet Grout kolon aralıkları
SH	: Yatay Jet Grout kolon aralıkları
S_R	: Çevrimsel gerilim azalım faktörü
S	: Jet Grout kolonları arasındaki mesafe
S_u	: Drenajsız kayma dayanımı
SW	: Düzgün dane dağılımlı kum
SP	: Uniform kum
SM	: Siltli kum
UK	: Uçucu kül
V_p	: Basınç dalgası hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
V	: Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı
X	: Yansıma derinliği
w	: Elemanın ağırlığı
W_k	: Kolon ağırlığı
YASS	: Yeraltı su seviyesi
z	: Derinlik
$\emptyset$	: İçsel sürtünme açısı
$\emptyset'$	: Drenajlı içsel sürtünme açısı
$\emptyset'_r$	: Rezidüel içsel sürtünme açısı
ϕ_{inter}	: Interface uygulanmış kayma açısı değeri
$\emptyset_{komp}$	: Kompozit zemin içsel sürtünme açısı

α	: Adezyon için azaltma faktörü
β	: Kolon özelliklerine bağlı azaltım faktörü
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_{jet}	: Jet Grout birim hacim ağırlığı
δ	: Zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı
ν	: Poisson oranı
ν_{ur}	: Boşaltma tekrar yükleme poisson oranı
ρ	: Zeminin yoğunluğu
$\rho_{yaş}$	: Zeminin ıslak yoğunluğu
σ_{vo}	: Düşey toprak basıncı
ψ	: Dilantansi (kabarma) açısı
λ^*	: İzotropik sıkışma indisi
μ^*	: Vizkozite
$\Delta\sigma$	: Gerilme artışı
τ	: Kayma gerilmesi
τ_s	: Zemin kayma gerilmesi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Şev duraysızlığı örnekleri	8
Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir dane dağılım oranları	10
Şekil 2.3. Zemin iyileştirme yöntemleri	13
Şekil 2.4. Yöntemin kalıcı - geçici olmasına göre zemin iyileştirme yöntemleri ..	14
Şekil 2.5. Zemin iyileştirme yöntemleri	14
Şekil 2.6. Patlatma yöntemi ile zemin iyileşmesi aşamaları	17
Şekil 2.7. Basit zemin enjeksiyon deneyi	18
Şekil 2.8. Temel enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi	19
Şekil 2.9. Enjeksiyon türleri	21
Şekil 2.10. Derin temel uygulamaları	24
Şekil 2.11. Termal işlemin mukavemete etkisi	25
Şekil 2.12. Isıtma işleminin şematik gösterimi	25
Şekil 2.13. Hareketli yeraltısuyunun donmaya etkisi	26
Şekil 3.1. Jet Grout kolon numunelerinin basınç dayanımları	33
Şekil 3.2. Önerilen hesap algoritması	34
Şekil 3.3. Jet Grout uygulamasında yastık tabaka gösterimi	37
Şekil 3.4. Jet Grout yönteminin uygulama aşamaları	41
Şekil 3.5. Süper Jet Grout tekniği	45
Şekil 3.6. Tipik Jet Grout teknikleri: (a) tek akışkanlı , (b) çift akışkanlı , (c) üç akışkanlı	46
Şekil 3.7. Standart yöntemle oluşturulmuş kolonlar	46
Şekil 3.8. Kolon çapı-Enjeksiyon basınç-Bekleme süresi ilişkisi	49
Şekil 3.9. Jet Grout kolonu - enjeksiyon basıncı arasındaki bağlantı	49
Şekil 3.10. Çimento miktarı - zemin grubuna bağlı basınç mukavemet değişimi..	51
Şekil 3.11. Tipik Jet Grout yöntemi ekipman şeması	53
Şekil 3.12. Delgi makinesi	54
Şekil 3.13. Pompa ünitesi görseli	54

Şekil 3.14. Mikser ünitesi görseli	55
Şekil 3.15. Çimento silosu görseli	56
Şekil 3.16. Jet Grout deneme kolonu çap kontrolü	62
Şekil 3.17. Jet Grout kolonlarından alınmış karot numune alma	63
Şekil 3.18. Jet kolonlarından alınmış karot numunenin deneye hazırlanması	64
Şekil 3.19. Basit kolon yükleme deney	65
Şekil 3.20. Süreklilik deneyi sonuç örnek grafik	67
Şekil 3.21. TS EN12716 Standardı Jet Grout tesisi günlük rapor	69
Şekil 3.22. TS EN12716 Standardı Jet Grout donanımı ile ilgili günlük rapor	71
Şekil 3.23. Jet Grout kolonları ile tasarlanmış zeminler oturma koşulları	79
Şekil 3.24. SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği	80
Şekil 3.25. SPT değerlerine bağlı çevrimsel mukavemet oranı eğrisi grafiği	94
Şekil 3.26. Tasarım algoritması	95
Şekil 3.27. Birim hücre tanımı ve kayma dalgasının dağılım modeli	98
Şekil 3.28. Birim alan ve kayma modülü oranına CSR azaltım eğrileri	98
Şekil 4.1a. Lineer elastik model geniş data girişi	101
Şekil 4.1b. Lineer elastik model parametre girişi	101
Şekil 4.2a. Mohr-Coulomb model genel data girişi	102
Şekil 4.2b. Mohr-Coulomb model parametre girişi	103
Şekil 4.3a. Hardening Soil model genel data girişi	104
Şekil 4.3b. Hardening Soil model parametre girişi	104
Şekil 4.4a. Solf Soil model genel data girişi	105
Şekil 4.4b. Sort Soil model parametre girişi	106
Şekil 4.5. Plate eleman ile perde çubuk ve kabuk elemanların modellenmesi	108
Şekil 4.6. Geogrid eleman ile yapısal elemanların modellenmesi	109
Şekil 4.7. Embedded Beam Row eleman ile perde çubuk ve kazık elemanların modellenmesi	110
Şekil 4.8. Anchor elemanla yatay destek elemanlar - ankraj modellemesi	111
Şekil 4.9. Arayüzey elemanlarının ait data girişi ekranı	112
Şekil 4.10. Yapıya ait 3 boyutlu görsel	117
Şekil 4.11. Yapı yerleşim planı	118

Şekil 4.12. Yük kombinasyonlarına göre maksimum oluşması beklenen zemin emniyet gerilmesi diyagramı	118
Şekil 4.13. IDECAD yazılımı maksimum taban basıncı değerleri diyagramı	119
Şekil 4.14. Zemin profili ve Jet Grout kolon yerleşimi	120
Şekil 4.15. Drenajsız kohezyon değeri α katsayısı ilişkisi grafiği	125
Şekil 4.16. Jet Grout kolon yerleşim planı	132
Şekil 4.17. Çalışma alanı sınır değerleri	133
Şekil 4.18. Model parametreleri	133
Şekil 4.19. PLAXIS'te Jet Grout kolonlarının Çubuk Eleman kabulü ile modellenmesi	134
Şekil 4.20. PLAXIS'te Jet Grout kolonlarının Çubuk Eleman - Interface kabulü ile modellenmesi	135
Şekil 4.21. PLAXIS'te Jet Grout kolonlarının Kompozit bölge kabulü ile modellenmesi	135
Şekil 4.22. Yük tanım geometrisi	136
Şekil 4.23. Ağ modeli - Model 1	137
Şekil 4.24. Model 1 Jet Grout kolonları deformasyon görseli	138
Şekil 4.25. Model 1 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı	138
Şekil 4.26. Model 2 Jet Grout kolonları deformasyon görseli	139
Şekil 4.27. Model 2 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı	139
Şekil 4.28. Model 3 kompozit bölge deformasyon görseli	139
Şekil 4.29. Model 3 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı	140
Şekil 4.30. SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği	143
Şekil 4.31. Model tiplerine göre sayısal analiz oturma değerleri	145

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Geoteknik risk/sorunlar ve zemin ilişkisi	6
Tablo 2.2. Siltli- kumlu kil birim için taşıma gücü değerleri	7
Tablo 2.3. Siltli- kumlu kil birim için oturma değerleri	7
Tablo 2.4. Zeminin cinsine göre zemin iyileştirme yöntemleri	11
Tablo 2.5. Amacına göre zemin iyileştirme yöntemleri	12
Tablo 2.6. Zemin iyileştirme yöntemleri ve yapım amaçları	13
Tablo 2.7. Enjeksiyon teknikleri ile ilgili zemin türleri	20
Tablo 2.8. Farklı zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı	22
Tablo 2.9. Sıvılaşmaya karşı temel mühendisliği uygulamaları	29
Tablo 3.1. Farklı zeminler için deformasyon modülü serbest basınç mukavemeti oranları	40
Tablo 3.2. Jet Grout teknikleri imalat parametrelerine ait sınır değerler	47
Tablo 3.3. Jet Grout tekniğinin temel işletim parametreleri	48
Tablo 3.4. Püskürtme gövdesinin çekme hızı - zemin arasındaki ilişki	50
Tablo 3.5. Zemin tipine göre çimento miktarları	52
Tablo 3.6. Farklı zeminlerde imal edilen Jet Grout kolonlarında kullanılan çimento miktarı	57
Tablo 3.7. Sülfat miktarına göre çimento kullanımı	57
Tablo 3.8. Farklı nozzel çapları ve basınçta nozzeldan çıkan grout debisi	60
Tablo 3.9. Jet Grout imalatında uygulanan deneyler ve kontrol parametreleri	61
Tablo 3.10. Numune serbest basınç dayanımları	63
Tablo 3.11. Teknik şartnamede belirtilen standart yükleme/boşaltma süreleri ve yük yüzdeleri	66
Tablo 3.12. Terzaghi taşıma gücü katsayıları	75
Tablo 3.13. Kazık malzemesi - δ Açısı – K katsayısı ilişkisi	76
Tablo 3.14. Farklı zemin türlerinde izin verilen oturmalar	83
Tablo 3.15. Sıvılaşan zemin kabul kriterleri araştırmacılara ait değerler	84
Tablo 3.16. Düzeltme faktörleri kabul değerleri	90

Tablo 3.17. Enerji oranı düzeltme katsayısı C_E	90
Tablo 3.18. Zemin türlerine göre F düzeltme faktörleri	93
Tablo 4.1. PLAXIS eğitim dokümanında tavsiye edilen Rinter değerleri	112
Tablo 4.2. Sondaj kuyuları ve YASS'nin tespit edildiği derinlikler	119
Tablo 4.3. Model parametrelerine göre veri toplama yöntemleri	121
Tablo 4.4. Modelleme kabulleri	122
Tablo 4.5. Zemin-elastiste modülü arasındaki ampirik formüller	123
Tablo 4.6. Jet 1 ile farklı zeminlerde imal edilmiş Jet Grout kolon kuru birim hacim ağırlıkları	123
Tablo 4.7. Killi zeminde Jet Grout kolonu özellikleri	124
Tablo 4.8. Kumlu zeminde Jet Grout kolonu özellikleri	124
Tablo 4.9. Zemin türlerine göre farklı poisson oranları	124
Tablo 4.10. Sondaj kuyusu tabakaları ve N_{ort} değerleri	127
Tablo 4.11. SPT deney sonuçların Elastiste Modülü bağlantıları	127
Tablo 4.12. Derinlik bağlı $(N_1)_{60}$ değer değişimi	128
Tablo 4.13. Kompozit bölge için alan oranı ve jet parametreleri tablosu	131
Tablo 4.14. Jet Grout kolonları - zemin karışımı kompozit zemin parametreleri ..	131
Tablo 4.15. Yayılı temel parametreleri	131
Tablo 4.16. İyileşmiş zemin oturma hesabı	144
Tablo 4.17. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması	145
Tablo 4.18. Çevrimsel gerilim azaltım faktörü hesap tablosu	146

ÖZET

Anahtar kelimeler: Zemin iyileştirilmesi, Yüksek modüllü kolon, Jet Grout, Plaxis

Bu çalışmada, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmanın konusu yüksek modüllü kolonların (Jet Grout) zemin iyileştirmesinde kullanılması ve hesap yöntemlerinin değerlendirilmesidir.

Bu çalışmada, Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak, zemin, yapısal elemanlar ve zemin iyileştirme bölgesi farklı yöntemler kullanılarak modellenmiştir. Zemin iyileştirme öncesi ve sonrası oturma miktarları karşılaştırılarak sonuçlar incelenmiştir.

Bu tez kapsamında temel ve zemin ortamı 5 farklı biçimde ele alınmıştır. İlkinde doğal zeminin üzerine hiçbir iyileştirme yapılmadan bina yükü konulmuş ve bu durumda oturmaların 17,15 cm gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Diğer hesaplamalarda zeminin jet grout kolonları ile iyileştirilmesi söz konusudur. Ancak söz konusu kolonlar kullanılan yazılımda farklı biçimlerde sisteme eklenebilmektedir. İlk olarak kolonlar bir çubuk eleman olarak tasarlanmış (Model 1) ve bu durumda oturma miktarı 11,26 cm olarak bulunmuştur. Diğer modelde yukarıda bahsedilen çubuk elemanların etrafına arayüz (interface) elemanı yerleştirilmiştir (Model 2). Bu şekilde yapılan hesaplarda ise bina yükü altında oturma miktarı 11,58 cm çıkmıştır. Daha sonraki modelde ise jet grout uygulaması yapılan alan kompozit bir bölge olarak ele alınmıştır (Model 3). Güçlendirilmiş zeminin yeni parametreleri kullanılarak aynı yük altında oturma hesapları yapılmış ve bu modelde 10,77 cm' lik bir oturma oluşacağı anlaşılmıştır. Geleneksel kabuller ve klasik yöntemler yardımıyla oturma hesaplandığında ise oturmanın 11,53 cm değerinde olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Bu analizlerin sonucunda Jet Grout yöntemi ile zemini iyileştirmenin zeminlerde aşırı oturma problemine karşı olumlu katkısı tespit edilmiştir.

IMPLEMENTATION OF HIGH MODULED COLUMNS (JET GROUT) ON THE SOIL IMPROVEMENT AND CALCULATION METHODS

SUMMARY

Keywords: Soil Impremant, High Module Column, Jet Grout, Plaxis

The aim of this study is to evaluate the use of high modulus columns (Jet Grout) in soil improvement and calculation methods, which is prepared as a graduate thesis in Sakarya University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Geotechnical Program. In this study, soil, structural elements, and soil improvement area are modeled using different methods using the Plaxis finite element program. The results were investigated by comparing the settlement amounts before and after soil improvement.

In this thesis, the basic and the ground environment are considered in 5 different ways. At first, the building load was placed on the natural ground without any improvement, and it was calculated that the seating would be 17,15 cm. In other calculations, the soil is being treated with jet grouting columns. However, the corresponding columns can be added to the system in different ways in the software used. Firstly, the columns were designed as a rod element (Model 1) and in this case the sitting amount was found to be 11,26 cm. In the other model, an interface element is placed around the above-mentioned rod elements (Model 2). In the calculations made in this way, the amount of sitting under the building load was 11,58 cm. In the later model, the area where the jet grout application is made is considered as a composite zone (Model 3). Using the new parameters of the reinforced soils, settlement calculations were made under the same load and it was understood that there would be 10,77 cm settlement in this model. With traditional assumptions and classical methods, it is concluded that seating is calculated to be 11,53 cm.

As a result of these analyzes, it was determined that the improvement of the soil by Jet Grout method has a positive contribution to the problem of excessive seating on the ground.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve buna paralel olarak kentleşmenin plan bazında yayılarak artması, barınma alanlarına yönelik talebi arttırmaktadır. Bununla birlikte yapıların, dere yataklarına, döküm sahalarına, yapay dolgu alanlarına ve problemli ortamlara yapılma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca üst yapıdan zemine aktarılan gerilmelerde artış meydana gelmektedir. Bu durum yapıların boyutlarında büyüme ve yapı yüklerinde de artışı getirmektedir. Böylece, inşası planlanan yapının oturacağı zemin çoğu zaman yapıyı güvenli bir şekilde taşıyabilecek özellikte olmayabilir. Zayıf zeminden söz edildiğinde; sıvılaşma problemi, taşıma gücünün aşılması, yapım sırasında veya sonrasında oluşabilecek toplam oturma, yapıda zarara neden olabilecek farklı oturmalar, temel kazı problemleri, şev duraysızlığı, kazı sonrası kabarmalar, çökebilen, şişebilen veya organik zemin varlığından akla gelmektedir. Farklı zemin türlerinin aynı yöntemle aynı verimde iyileştirilemeyeceği bilinmektedir. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemi seçiminde zemin türü için en kullanışlı yöntemin seçilmesine dikkat edilmelidir.

Yapıların inşa aşamasında ve/veya yapı ömrü boyunca karşılaşılabileceği problemleri ön görmek amacıyla İnşaat Mühendisliği çalışma alanları dâhilinde birçok çalışma yapılmaktadır. Günümüzde Geoteknik Mühendisliğinin kapsamı alanında da özellikle zemin kaynaklı problemlerin çözümüne yönelik çalışmalara odaklanılmıştır. Söz konusu problemlerin olumsuz sonuçlarından sakınmak ve zemini uygun temel ortamı niteliğine getirebilmek için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Geoteknik Mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan; taşıma gücü, oturma ve sıvılaşma problemlerinin üstesinden gelmeye yönelik yapılan çalışmalarda Jet Grout yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan Yüksek Modüllü Kolonların (Jet Grout) kullanımı ile aşırı oturmaların görüldüğü ortamlarda, oturma miktarında azaltma sağlanması hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Zeminlerin İyileştirilmesi

Nüfus artışı ve buna paralel olarak kentleşmenin plan bazında yayılarak artması, barınma alanlarına yönelik talebin artışı, yapıların boyutlarında büyüme ve yapı yüklerinde artışı beraberinde getirmekte ve bu sebeplerden dolayı üst yapıdan zemine aktarılan gerilmelerde de artışlar meydana gelmektedir. Bununla birlikte; yapıların dere yataklarına, döküm sahalarına, yapay dolgu alanlarına ve problemli ortamlara yapılma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda, inşası planlanan yapının oturacağı zemin çoğu zaman yapıyı güvenli bir şekilde taşıyabilecek özellikte olmayabilir. Tüm bunların sonucu olarak da geoteknik alanında yapılan çalışmaların büyük bir kısmını zemin kaynaklı problemlere çözüm bulma araştırmaları oluşturmaktadır.

Yüzeysel temel sistemleri seçilirken; yapı temelinden zemine aktarılacak yükün; taşıma gücü yetersizliği, izin verilen oturmanın aşılması ve/veya deprem gibi dinamik etki altında ortaya çıkan sıvılaşma/çevrimsel yumuşama problemleri olmadan taşıyabilecek olan zeminler tercih edilmelidir. Derin temel sistemlerinde ise, zayıf zemin olarak tabir ettiğimiz problemli zeminlerde, problemin cinsine göre seçilen zemin iyileştirme yöntemlerinin de kullanımı ile uygulanabilmektedir.

Taşıma gücünün aşılması, geçirimsizliğin yüksek olması, şişme ve büzülme potansiyelinde artış, kayma direnci yetersizliği, konsolidasyonun devam etmesi ve stabilite yetersizliği gibi statik bakımdan sorun gösterebilecek ortamlar ile zemin büyütmesi, sıvılaşma ve çevrimsel yumuşama sonucu zemin yenilmesi gibi dinamik etkilerden dolayı problem sunabilecek olan zeminlerde zemin iyileştirilmesi yöntemlerine başvurulmaktadır. Farklı zemin türlerinin aynı yöntemle aynı verimde

iyileştirilemeyeceği bilinmektedir. Bu nedenle zemin iyileştirme yöntemi seçiminde; her zemin türü için en kullanışlı yöntemin seçilmesine dikkat edilmelidir.

Zemin iyileştirme tekniklerinden bahsedilirken, öncelikle geçmişteki uygulamalardan söz edilmelidir. Geçmiş araştırmalarda; Çin’de (M.Ö.600) sönmemiş kireçle zeminde açılan kuyuların doldurulduğu, eski Roma’ da ise killi zeminlerde karayolları uygulamalarında puzzolan–kireç karışımı ile iyileştirilebildiği görülmüştür (Tachir, 2015).

Son yapılan araştırmalarda bundan yaklaşık üç bin yıl önce yapıldığı bilinen Babil Tapınaklarında, zemin iyileştirme yöntemlerinden yararlanıldığına dair birçok bulguya rastlanmıştır. Günümüzde yapılan çalışmalarda ise; Venedik kanal yapılarının ve Yeni Cami ile Haydarpaşa Tren İstasyonu gibi tarihi yapıların bulunduğu zemin özelliklerinin yetersizlikleri nedeniyle ahşap kazıklar üzerinde imalatların gerçekleştirilmiş olduğu görülmüştür.

Zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanımı ile zeminin kayma direncinde artış, permeabilitesinde azalma, iri daneli zeminlerde sıkılık ve ince daneli zeminlerde kıvam artışı sağlanması amaçlanmaktadır. İnce daneli zeminlerde kıvamın artması, iri daneli zeminlerde sıklığın artması, tüm zemin gruplarında kayma direncinin artması ve geçirimsizliğin azalması zemin iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sağlam, 1985).

Zemin iyileştirilmesi yöntemlerinin kullanımı ile zeminin;

- Kayma direnci artar,
- Kayma modülü yükselir,
- Şişme ve büzülme potansiyeli azalır,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Çevresel etkiler sonucu oluşan fiziksel ve kimyasal değişimi önlenir,
- Geçirimsizliği azalır,
- Sıvılaşmaya karşı direnci artmaktadır (Priebe, 1991).

Zemin boşluklarının çeşitli bileşenlerin karışımıyla doldurulması işlemi ve/veya zeminin mekanik, dinamik ve hidrolik araçlar ile boşluk oranının azaltılması işlemi zemin iyileştirme yöntemlerinin temel amacını oluşturmaktadır (Sağlam, 2006). Zemin iyileştirme yöntemleri; iri daneli zemin, killi, kumlar ve siltlerden oluşan her türlü zemin profilinde ve boşluk oranından bağımsız olarak uygulanabilmektedir.

Bir başka bakış açısından, geoteknik uygulamalar göz önüne alınarak, zemin iyileştirme yöntemleri;

- Zayıf (yetersiz) zeminin taşıma kapasitesini arttırmak,
- İstinat duvarlarının dayanımını arttırmak,
- Zeminin sıvılaşma riskini azaltmak,
- Dolgu ve şevlerin duraylılığını sağlamak,
- Toplam oturmayı azaltıp, konsolidasyonu hızlandırmak,
- Yeraltı su seviyesi (YASS)'ni düşürmek ya da geçirimsizliği azaltmak amacıyla tercih edilir (Hausmann, 1990).

Genel olarak zemin iyileştirme yöntemleri kullanımı ile zeminin kayma mukavemetinde artış, kumlu zeminlerin sıkılığında, killi zeminlerin ise kıvamında iyileşme sağlanır. Aynı zamanda zeminin sıkışabilirliğinde ve permeabilitesinde azalma, şişme ve büzülme potansiyelinde düşme, borulanmaya karşı mukavemetinde artma ve sıvılaşma potansiyelinde azalma beklenir.

2.1.1. Zayıf (Yetersiz) zemin ve problemleri

Zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasında en önemli etken zeminin zayıf zemin özelliğine sahip olmasıdır. Zayıf zeminden söz edildiğinde sıvılaşma problemi, yetersiz taşıma gücü, yapım sırasında veya sonrasında oluşabilecek aşırı toplam oturma, yapıda zarara neden olabilecek farklı oturmalar, temel kazı problemleri, şev duraysızlığı, kazı sonrası kabarmalar, çökebilene, şişebilen veya organik zemin varlığından akla gelmektedir.

Zayıf zeminler kısaca, YASS'ın yüksek olduğu killi, siltli, organik madde içeren zeminler, gevşek ince kumlu alüvyonlu zeminler ve kontrolsüz şekilde oluşturulmuş yapay dolgular olarak sınıflandırılmaktadır.

Zayıf zemin problemleri zemin türüne bağlı olarak;

- Yüksek sıkışabilirlik,
- Sıvılaşma,
- Aşırı konsollide killer,
- YASS'nin yüksek olduğu, yumuşak killer,
- Taşıma gücünün yetersizliği,
- Plastik olmayan (NP) siltler,
- Uzun vadeli beklenen stabilite problemleri,
- Yarı doygun yüksek plastisiteli killer,
- Su kaynaklı aşırı deplasman,
- Suyu doygun gevşek kumlar ve NP siltler,
- Turba türü organik zeminler,
- Uzun vadede beklenen oturmalar,
- Kazı tabanının göçme potansiyeli,
- Yıkanma ve borulanma,
- Yüksek hacim değiştirme (Don kaynaklı),
- Silt ve killer (NP dispersif) ve
- Stabilite problemleri olarak sıralanabilir.

Uygulama alanları açısından bakıldığında; Geoteknik Mühendisliğinin zayıf zemin problemlerine çözüm arama çalışmalarının geniş yer tuttuğunu söyleyebiliriz. Tablo 2.1.'de zemin yapısına bağlı olarak karşılaşılabilecek geoteknik sorunlar verilmiştir.

Tablo 2.1. Geoteknik risk/sorunlar ve zemin ilişkisi (Durgunoğlu, 2008).

Zemin	Geoteknik parametre	Karşılaşılan sorun
Yumuşak	Drenajsız kayma mukavemeti (S_u)	Taşıma gücü
Normal	Kompresibilite (C_c)	Oturma
Konsolide Kil	Konsolidasyon katsayısı (C_v, C_h)	Stabilite
	Hidrolik geçirgenlik, (k_v, k_h)	Taban göçmesi
		Plastik deformasyonlar
		Kazıklar üzerinde negatif sürtünme
Yüksek	Atterberg limitleri (LL, PL)	Yüksek hacim değiştirme potansiyeli
Plastisiteli Killer	Aktivite, A_c (kil yüzdesi)	Şişme ve büzülme
		Hafif yapılar
Aşırı Konsolide Killer	Drenajlı kayma mukavemeti, (C'_d, ϕ'_d)	Uzun vadeli şev stabilitesi
	Residüel kayma mukavemeti, (C'_r, ϕ'_r)	
Löss Zemin	Birim hacim ağırlığı	Islanmadan doğan oturma ve farklı oturmalar
	Boşluk oranı	
	Özel odometre deneyinde suya boğulma halindeki düşey deplasman	Kazıklar üzerinde negatif çeper sürtünmesi
Gevşek Siltli ve Kumlu Zeminler	SPT darbe sayısı, $N_{1.60}$ -SPT	Sıvılaşma
Kalın Alüvyon	Jeofizik ölçümler, (V_p, V_s, V_R) dalga hızları derinlikle değişimi	Zemin büyütmesi

Ayrıca, zemine bağlı sıklıkla karşılaşılan zayıf zemin problemleri ve sonuçları aşağıda tanımlanmıştır.

Sıvılaşma: Özyaydın (2007) sıvılaşmayı; iri daneli zeminlerde boşluk suyu basıncında artış ve efektif gerilmenin azalması sonucu katı halden sıvı hale dönüşmesi olarak tanımlamaktadır. Deprem veya yapay titreşimler gibi dinamik etki altında zemin taşıma gücünün azalması, eğimli arazilerde yanal zemin ötelenmeleri, oturmalar, istinat duvarlarında yanal toprak basınçlarındaki artış ve zemin içinde yer alan boru ve servis hatlarında deformasyonlar sıvılaşma sonucu gözlemlenebilecek etkiler olarak sayılabilir.

Şişen kabaran zemin: Özellikle montmorillonit kökenli kil zemin üzerinde yapılan mühendislik yapıları, zeminlerin şişme özelliğinden kaynaklanan kaldırma kuvvetine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler temel yapılarını ve elemanlarını yukarı doğru kaldırmakta, çatlatmakta ve kırabilmektedirler. Bu etki ile meydana gelen deformasyonlar zayıf zemin problemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya üzerinde Amerika Birleşik Devletleri, Güney Amerika, Afrika, Avustralya ve Hindistan'da şişebilen killer geniş alanlar kaplamaktadır. Şişen killer genellikle likit

limit değeri %40'dan büyük ve plastisite indeksi değeri %15'ten büyük zemin gruplarıdır (Das, 1995). Çeşitli zeminlere ait şişme yüzdesi ve şişme basınç değerleri zeminin farklı mineralojik, dokusal, kimyasal bileşim ve konsolidasyon özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Çökebilen zemin: Bu tip zeminler yüksek boşluk oranına nedeniyle düşük doğal birim hacim ağırlığa sahip, kohezyonsuz ya da az kohezyonlu olabilirler. Bu tip zeminlerde yükleme olduğunda veya ıslanma sonucu içyapı çökebilmekte ve aşırı deformasyonlar oluşabilmektedir. Bazen mekanizma hem yükleme hem de ıslanma aynı anda oluştuğunda da çalışabilmektedir.

Yetersiz taşıma gücü: Her zeminin taşıyabileceği maksimum bir gerilme bulunmaktadır. Bu gerilmenin üzerinde zemin iskeleti taşıyıcı özelliğini yitirmekte ve göçme meydana gelebilmektedir.

Farklı araştırmacıların yapmış olduğu araştırmalardan yola çıkılarak hazırlanmış olan siltli-kumlu kil ortam için ortalama taşıma gücü değerleri Tablo 2.2.'de verilmiştir (Kaymakçı, 2014).

Tablo 2.2. Siltli- kumlu kil birim için taşıma gücü değerleri (Kaymakçı, 2014).

	Araştırmacılar	Terzaghi	Skempton	Hansen-Vesic
σ_{emn}	kg/cm ²	0,50	0,45	0,45
	KPa	50	45	45

Tablo 2.3.'te ise sınır değeri aşan taşıma gücü problemlerinde farklı derinliklere göre sınır oturma değerleri verilmiştir (Kaymakçı, 2014).

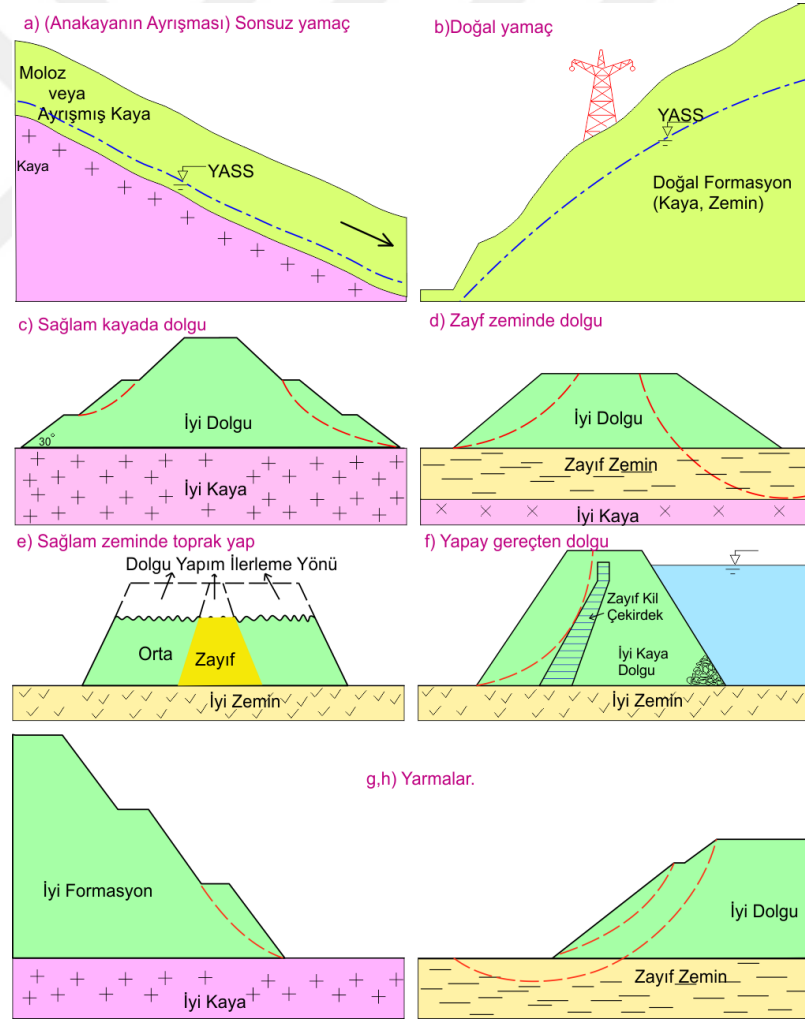
Tablo 2.3. Siltli- kumlu kil birim için oturma değerleri (Kaymakçı, 2014).

B(m)	Konsolidasyon oturması (cm)	
	D _f = 1,5 m	D _f = 4 m
1	1,1	1,5
2	3	3,5
3	4,5	4,8

Organik Zemin: İçerisinde dane, su ve hava yanında esas itibarıyla bitkilerden oluşan bol miktarda organik madde içeren zeminlerdir. Organik madde miktarı tayini için zemin numunesi Sodyum Hegzametafosfat (NaPO₃) çözeltisi ile yakılarak zemin

içinde organik madde tayini yapılır. Bu tip zeminlerde temel inşasına başlamadan önce bitkisel toprak sıyrılarak temel sağlam zemine oturtulmalıdır (Abi, 2012).

Şev Duraysızlığı: Kayan kütlelerin sınırları boyunca gelişen bir makaslama yenilmesine bağlı olarak şevi oluşturan malzemenin aşağı yöndeki hareketi olarak tanımlanır (WEB-1). Sismik aktivite gibi dış etkenlerin yanı sıra, gözenek suyu basıncındaki artış, makaslama dayanımındaki azalma, şevdeki gerilim durumunun değişmesi ve aşınma-ayrışma gibi birçok neden şev duraysızlığına neden olabilir. Zayıf zemin problemlerinin giderilmesine yönelik teknolojinin de desteği ile farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Şekil 2.1.'de şev duraysızlığına neden olabilecek durumlar gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Şev duraysızlığı örnekleri (Önlap, 2004).

Özetle zemin problemlerine çözüm önerileri;

- Yapının sorunlu parselden vazgeçip, yeni bir parselde inşası,
- Zayıf zemin kaldırılarak yerine kontrollü bir şekilde daha iyi bir malzeme yerleştirilerek kuvvetlendirme,
- Zemin loglarından elde edilen sonuçların paralelinde sağlam zemin profiline ulaşmak için derin temel tasarımı yapılması,
- Üst yapının olumsuz zemin koşulları nedeniyle tekrar tasarlanması,
- Zayıf zemine uygun zemine özgü iyileştirme yönteminin uygulanması olarak sıralanabilir.

2.1.2. Zemin iyileştirme yöntemi seçimi

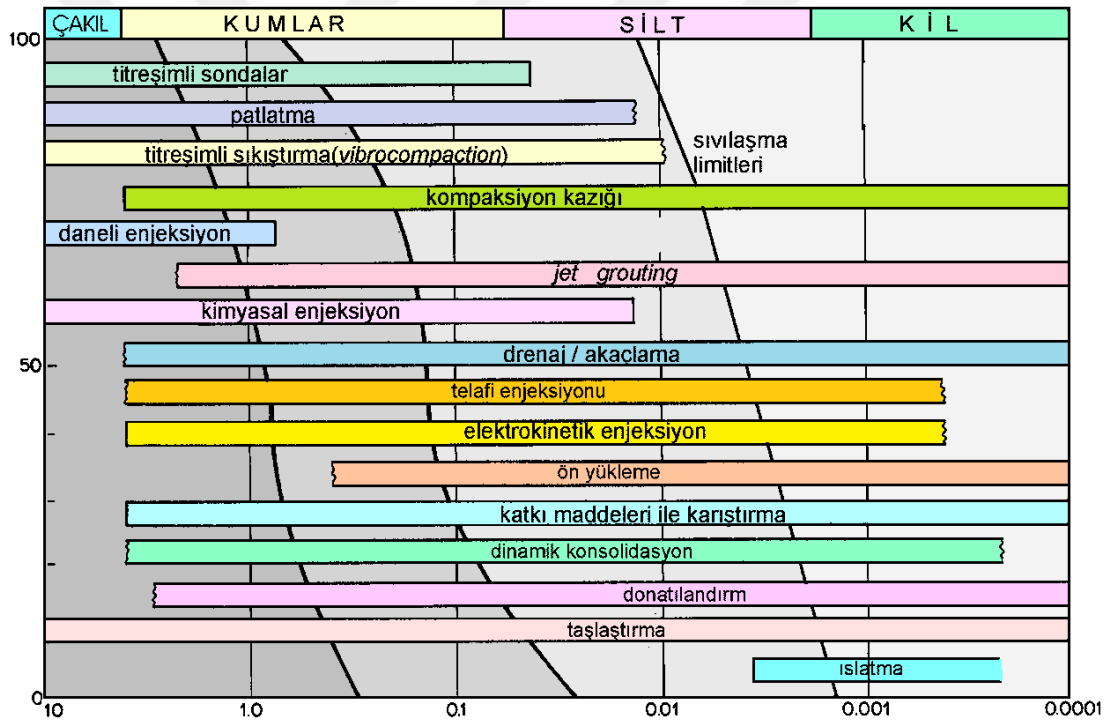
Zemin iyileştirme yönteminin doğru seçilmesi imalat aşaması ve sonrasında yaşanabilecek aksaklıkların önüne geçilebilmesi için oldukça önem taşımaktadır. Uygun yöntemin seçiminde izlenmesi gereken bazı adımlar;

- Zemin profili genel özelliklerinin önceden belirlenmesi,
- Zeminin mekanik özelliklerinin (kayma direnci, geçirimsizlik) tayini,
- Yeraltı su seviyesinin (YASS) tespiti,
- İyileştirme bölgesi ve derinliğinin tespiti,
- Yapının türü, geometrik özellikleri ve yük dağılımının incelenmesi,
- İmalatta kullanılacak malzemelerin (taş, kum, su, katkı maddeleri sahaya ulaşımı) tayini,
- İzin verilebilir toplam ve farklı oturmaların değerlendirilmesi,
- Diğer metodlar ile karşılaştırma,
- Çevre koşullarının (atıkların kullanımı, erozyon, su kirlenme kısıtlamaları) önceden tespiti,
- Maliyet analizinin yapılması,
- Teknik personel ve ekipmanın temini (Teknisyen, vasıflı işçi, özel aletlerin varlığının tespiti),
- Yerel referans uygulamalarının araştırılması, deneyimlerin incelenmesi,

- İmalat sonrası bakım, dayanıklılık ve işletme gereksinimlerinin önceden analizi,
- Yasal zorumlulukların (sözleşme v.b.) belirlenmesidir.

Zemin iyileştirme yönteminin seçiminde yukarıda detaylandırılan yollar izlenerek çalışma alanına özgü bir zemin iyileştirme yöntemi belirlenmektedir. Bu noktada farklı zemin kriterleri göz önüne alınabilir.

Zemini oluşturan danelerin dağılımı zemin iyileştirme yöntemi seçiminde oldukça etkilidir. Şekil 2.2.'de dane dağılımına bağlı olarak farklı zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemleri uygulanabilir dane dağılım oranları (USACE, 1999).

Zemin iyileştirme yönteminde ekili olan bir diğer kriter ise iyileşecek zeminin derinliğidir. Tablo 2.4.'te farklı zemin türlerine bağlı olarak geliştirilmiş zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir (Holtz ve ark., 2001).

Tablo 2.4. Zeminin cinsine göre zemin iyileştirme yöntemleri (Holtz ve ark., 2001).

İyileştirme yöntemi ve tekniği	İyileştirme yöntemi sınıfı	Uygulanabilecek zemin türleri	Yaygın uygulama alanları	Çeşitlilik ve açıklamalar
Gerilme azaltma	Gerilme azaltma	Tüm zemin türleri	Dolgu, şevler	Hafif dolgu materyalleri
Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme	Zemini kaldırma ve yeniden yerleştirme	Kohezyonlu yumuşak zeminler, turba	Dolgular, küçük (basit) yapılar	Kontrollü kazı veya patlatma ile tüm derinlik veya kısmi olarak yer değiştirme
Kurutma	Konsolidasyon	Killer, siltler muhtemelen turba	Yapı temelleri ve kazılar	Aktif su çekme (pompalama)
Ön yükleme, aşırı yükleme	Konsolidasyon	Killer, siltler muhtemelen turba	Dolgular, yapı temelleri	Düşey drenli veya drensiz vakumlu ön yükleme
Düşey drenler	Konsolidasyon	Killer, siltler	Dolgular, yapı temelleri	Kum drenleri, Prefabrik geo-kompozit drenler
Katkı ile stabilizasyon	Kimyasal	Siltler, killer (özellikle şişen)	Yol alt temeli, havaalanı kaplamaları ve erozyon kontrolü	Kireç, portland çimentosu, uçucu kül ve diğer kimyasal katkıları ile yüzey (sığ) iyileştirme
Kireç ve kireç çimento kolonları	Kimyasal	Siltler, killer	Dolgular, yapı temelleri, Kazılar	
Derin (zemin) karıştırma	Kimyasal	Tüm zemin türleri	Derin kazı, sızıntı ve çevresel etki kesicileri (<i>cut-off</i>)	Çimento ve çimento-bentonit karışımı
İçitme ve sızdırma enjeksiyonu	Kimyasal	Fissürlü kaya, tüm daneli zeminler, iri siltler dâhil	Yapı temelleri, sızıntı kesiciler (<i>cut-off</i>), Sıvılaşmayı azaltma, çevresel iyileştirme	Portland ve mikro-ince daneli çimentolar, kimyasallar (Bitüm, silikat, akrilat ... vb.)

Zemin iyileştirme yöntemi seçimi izlenen bir diğer yöntem ise iyileştirme yaparken zeminin hangi parametrelerinin iyileştirileceğinin irdelenmesidir. Böylece zeminde karşılaşılan probleme en etkili yöntem tercihi yapılmış olarak çözüm bulunmuş olunur. Bu amaçla Tablo 2.5.'te amacına bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir (Koçbay, 2013).

Tablo 2.5. Amacına göre zemin iyileştirme yöntemleri (Koçbay, 2013).

Amaç	Yöntem
Sıvılaşmaya karşı direnci artırmak, zemin hareketini azaltmak.	Titreşimli sondalama, Taş kolon, Derin Dinamik Kompaksiyon, Kum dren, Penetrasyon ve Kompaksiyon enjeksiyonu, <i>Jet Grouting</i>
Farklı oturmaya maruz kalacak binayı stabi hale getirmek. Ani oturmaya azaltmak	Penetrasyon ve Kompaksiyon enjeksiyonu, <i>Jet Grouting</i> , Mini Kazık <i>Jet Grouting</i> , Dinamik kompaksiyon, Titreşimli sondalama, Kompaksiyon enjeksiyonu, Derin karıştırma
Konsolidasyon oturması azaltması	Ön konsolidasyon, <i>Jet Grouting</i> , Taş kolon, Kompaksiyon enjeksiyonu, Derin karıştırma
Yamaç stabilitesi	Kum dren, <i>Jet Grouting</i> , Penetrasyon ve Kompaksiyon enjeksiyonu
Şişen zeminlerin iyileştirilmesi	Kireç ve Çimento ile stabilizasyon, Şişen zeminin kaldırılması
Çöken zeminlerin iyileştirilmesi	Derin dinamik kompaksiyon, Vibro kompaksiyon, enjeksiyon

2.2. Mevcut Zemin İyileştirme Yöntemleri

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte birçok zemin iyileştirme (ıslah) yöntemi geliştirilmiş ve saha uygulamalarında kullanılmaktadır. Yıllar boyunca araştırmacılar bu yöntemleri farklı kriterlere göre sınıflamıştır. Zemin iyileştirme yöntemleri; iyileşecek zeminin profiline, derinliğine, problemin türüne, arazi koşullarına ve yöntemin uygulanabilirliği gibi birçok farklı kritere göre sınıflandırılmaktadır. Genel olarak Tablo 2.6.'da zemin türü ve amaca bağlı olarak zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir.

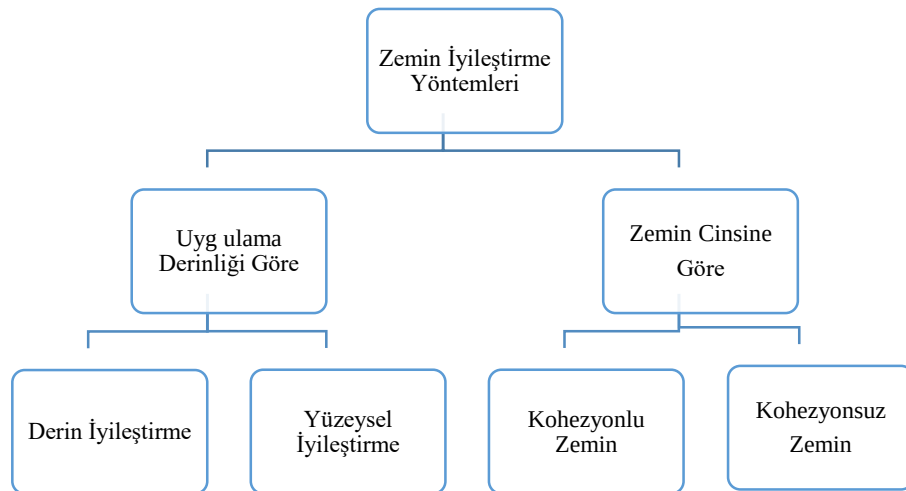
Tablo 2.6. Zemin iyileştirme yöntemleri ve yapım amaçları (Anonim, 2007a).

Ana Yöntemler	Yöntemler	Zemin İyileştirme Amacı		Zemin Türü	Daneli	Kohezyonlu	Taşıma Gücü	Oturma Kontrolü	Stabilite	Çevresel Etkiler	Sıvılaşma	Su Akımının Azaltılması
SIKIŞTIRMA	Titreşimli sıkıştırma işlemleri	Vibro sondalar	**	*	*						**	
		Kum sıkıştırma kazıkları	**	*	*						**	
		Vibroflotasyon	**	*	*						**	
		Sıkıştırma kazıkları	**	**	**	**					**	
	Statik veya Dinamik şok	Dinamik kompaksiyon	**	*	**	**			*	*		
		Patlatma	**	*	*	*					**	
Yapay drenler kullanarak/kullanılmadan ön yükleme ile konsolidasyon	Aşırı dolgu ile önyikleme	Yass. düşürülmesi ile	*	*	*	*						
		Önyikleme	*	*	*	*						
Zemin güçlendirme	Taş kolonlar	Kireç kolonlar	*	**	**	**	**	*	*	*	**	
		Derin karıştırma	*	*	**	**	**	*	*	*	**	*
		Permeasyon (Emdirme-sızdırma)Enj.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Zemin enjeksiyon teknikleri (Zemin güçlendirme II)	Çatlatma Enj.	KompaksiyonEnj.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		Jet Enj.	**	*	**	**	*	*	*	*	**	*
			**	*	**	**	*	*	*	*	**	*

* Daha az sıklıkla uygulanan zemin tipi veya daha az yaygın amaç

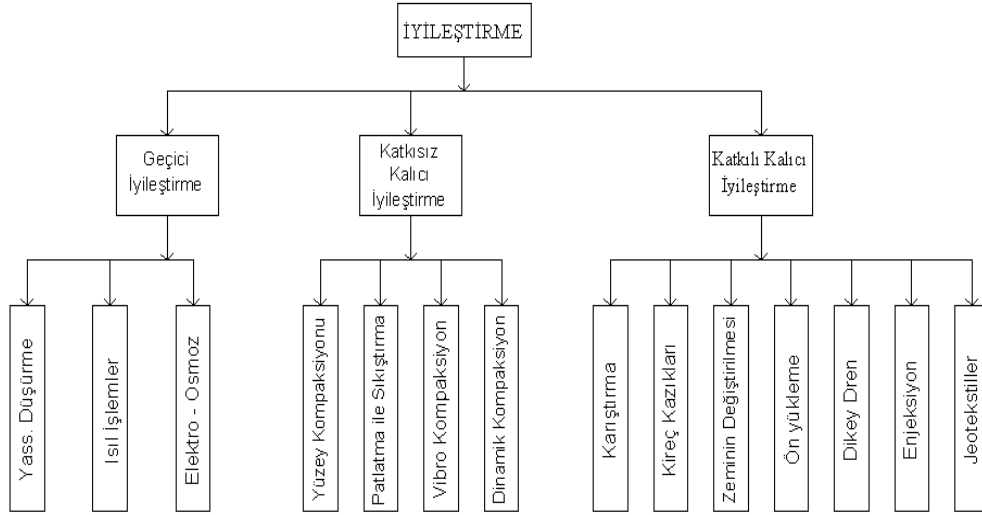
** Daha sıklıkla uygulanan zemin tipi veya ana ve daha yaygın amaç

Zemin iyileştirme yöntemlerini seçiminde uygulama derinliği ve zemin cinsine bağlı olarak Şekil 2.3.'te verilmiştir (Sağlam, 1996).



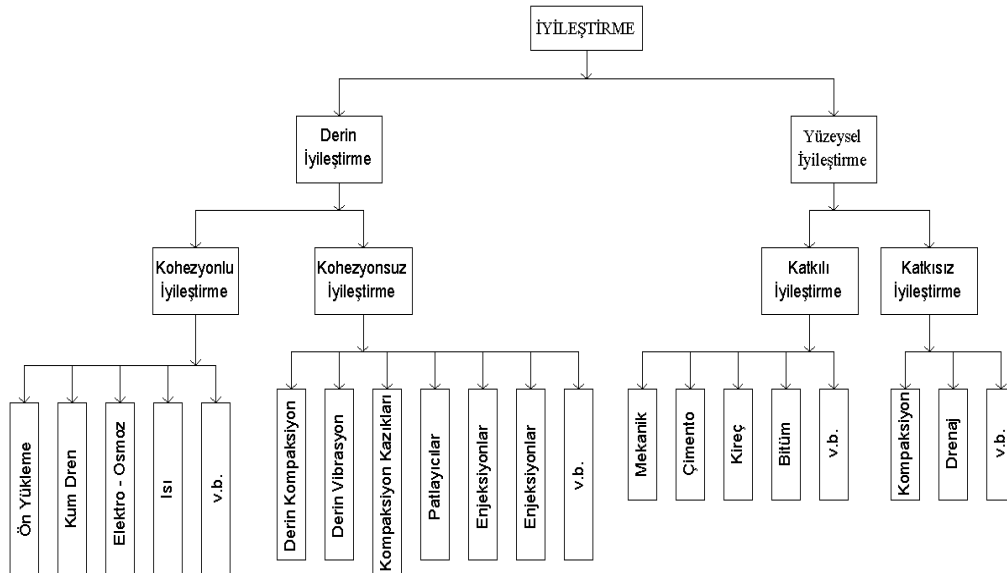
Şekil 2.3. Zemin iyileştirme yöntemleri (Sağlam, 1996).

Şekil 2.4.'te uygulanan yöntemin kalıcı yada geçici olmasına göre zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir (Rixner ve ark., 1986).



Şekil 2.4. Yöntemin kalıcı - geçici olmasına göre zemin iyileştirme yöntemleri (Rixner ve ark.,1986).

Şekil 2.5.'te uygulama derinliğine göre zemin iyileştirme yöntemleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Zemin iyileştirme yöntemleri

2.2.1. Kompaksiyon

Zeminin mekanik ve fiziksel iyileştirmesinde kullanılan kompaksiyon yöntemi kısaca, mekanik özelliğe sahip çeşitli araçlar kullanılarak zeminde yeralan su ve dane hacmi değiştirilmeden, havanın dışarı taşınması olarak tanımlayabiliriz. Kompaksiyon çeşitlerini *Vibro Kompaksiyon* (Titreşimli), *Dinamik Kompaksiyon* (Dinamik etki düşürme), *Kompaksiyon Kazığı* ve *Taş Kolon (Vibroflotasyo)* olarak sıralayabiliriz.

Vibro kompaksiyon yönteminde; zemine itilen vibratör sondasının yatay titreşim hareketi ve düşey eksen çevresinde dairesel hareket sonucu meydana gelen enerji zemine sadece vibratörün ucundan veya sondanın tüm uzunluğu boyunca zemine aktarılmış olur (Sondermann ve Wehr, 1993). Doğal zeminler ve dolgu kum zeminlerde yöntemin kullanımı ile 70 m derine kadar sıkıştırma sağlanabilmektedir. Bu yöntem; kil + silt oranı %12'den az olan granüler zeminler, ince dane oranı %20'den ve kilin de %3'den az olduğu granüle zeminlerde etkili olarak uygulanır (Bell, 1993).

Dinamik kompaksiyon yönteminde; 10-200 kg ağırlığındaki çekiç birkaç kere tekrarlanacak şekilde yaklaşık 40 m yükseklikten zemine düşürülerek zemin su muhtevası değişmeden hava boşlukları azaltılarak, zemin daha sıkı bir duruma getirilir. Böylece zeminin boşluk oranının azaltılması ile zeminin iyileştirilmiş olur. İşlem sonrası meydana gelen kraterler işlem tekrarlanmadan önce granüler malzeme yardımıyla doldurulur (Lukas, 1995). Yöntem granüler ve dolgu zemin ve YASS altında kaba daneli zeminlerin sıkıştırılmasında sıklıkla kullanılır. Yöntemin uygulanabilirliğinin ekonomik olabilmesi için iyileştirilecek zemin alanının ince daneli zeminlerde 15.000 m² kaba danelerde 5.000 m²'den fazla olması tavsiye edilir. (Leonards ve ark., 1980).

Kompaksiyon kazığı yönteminde, kazık çakma çekiçleri veya üst vibratör yardımıyla muhafaza borusunun zemine iletilmesi ve içi taneli malzeme ile doldurulup geri çekilmesi prensibine dayanır. Zeminin sıkıştırılması dinamik etki yardımıyla borunun

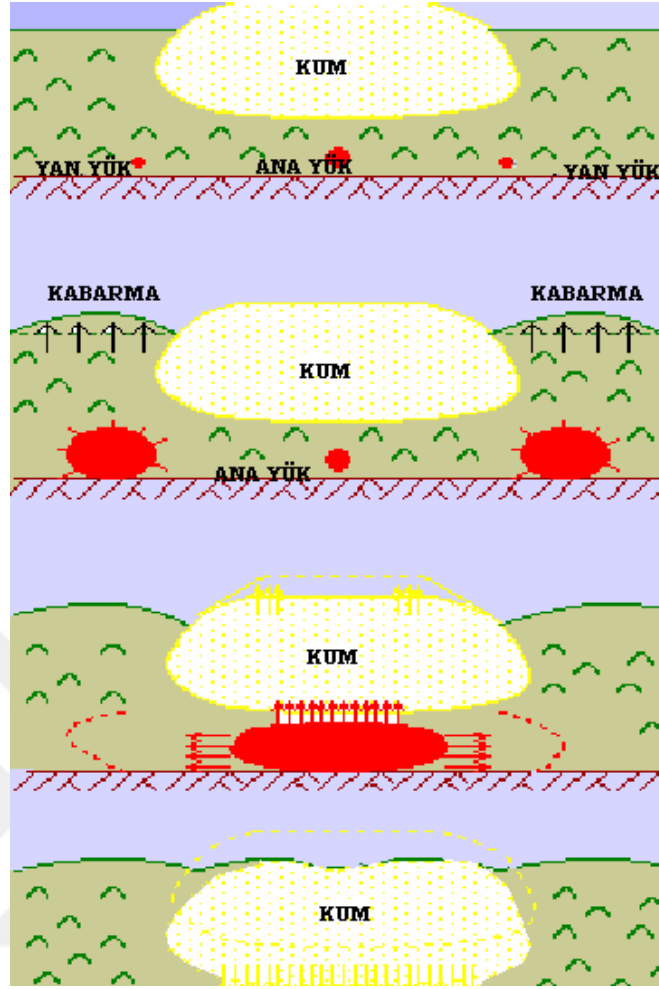
çakılması sırasında meydana gelir. Kompaksiyon kazıkları yöntemi, killi, siltli gibi daha çok suya doygun zeminlerde uygulanması tercih edilir.

Taş kolon yönteminde (Vibroflotasyon); kalın ve gevşek kum depoziti içine sokulan özel bir sondanın hızla sürülmesi ile gerçekleşir. Yöntem genellikle 0,6-1 m çapında oluşturulmuş zemin içi kolonlardan meydana gelir. Kolonları oluşturan taşın özelliklerinin sırasıyla; temiz, ince dane oranı %5-10 arasında, boyutları ise 10-50 cm olacak şekilde olması istenir. İmalat sırasında zemin koşullarına, doygunluk derecesine ve görelî yoğunluğa dikkat etmek gerekir. Yöntem sıklıkla, orta ve yumuşak killi zeminlerde kullanımı tercih edilir.

2.2.2. Patlatma

Bu yöntemde bağlayıcı ve yapışkan özelliği az olan zemin gruplarında patlatma etkisi ile ayrılan zemin bileşenleri meydana gelen toz ile sıkışabilir hale gelir (Court ve Mitchell, 1994).

Patlayıcı madde taşıma gücü düşük ve şekil değiştirme miktarı fazla olan zemin içerisine yerleştirildikten sonra iyileştirilecek olan alanın üzerine dolgu malzemeleri (kum, çakıl, kırmataş ... vb.) serilir. Patlama olayı meydana geldikten sonra, zayıf zemin ile dolgu malzemesi yerleşir (Kara, 2013). Şekil 2.6.'da bir patlatma yöntemi ile zeminin nasıl iyileştiği anlatan şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.6. Patlatma yöntemi ile zemin iyileşmesi aşamaları.

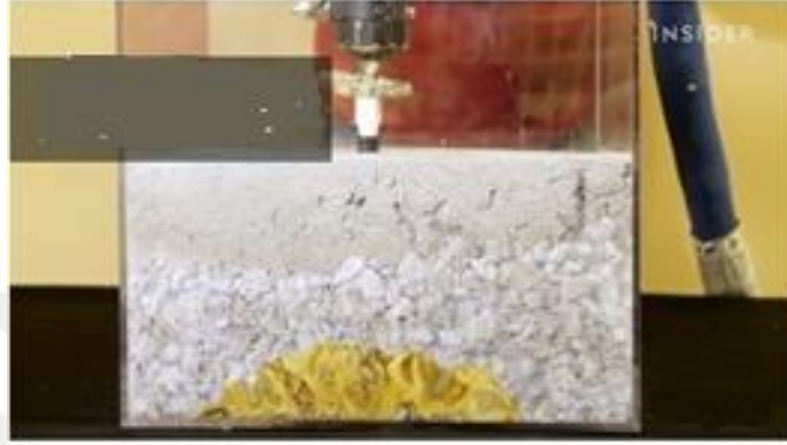
Patlatma yöntemi suya doygun, gevşek, kohezyonsuz zeminlerinde yaygın olarak kullanılır. Derinliği 40 m'ye varan uygulamalarda da başarılı sonuçlar alındığı bildirilmiştir (WEB-2).

2.2.3. Enjeksiyon

Enjeksiyon yöntemi, temelin yerleştiği zeminin veya ana kayanın permeabilitesini azaltmak ya da kayma mukavemetini arttırmak amacı ile zemin içerisinde bulunan çatlak ve boşluklara basınç yardımıyla çeşitli nitelikteki karışım bileşimlerinin iletilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sağlam, 1996).

Yöntem uygulanması esnasında önceden belirlenen noktada delici makine ile kuyu açılır, daha sonra matkap ucundan zemine enjeksiyon karışımı püskürtülür.

Püskürtme zemin doyana kadar kademeler halinde devam eder. Su-çimento oranı genelde 1/1 olarak kabul edilmesine rağmen değişik zemin türlerine göre bu oran 1/3, 3/1 gibi de uygulanmaktadır. Zeminin malzemeye doymasına *enjeksiyon refüsü* denir (Öntürk, 2011). Basitçe zeminde enjeksiyon uygulaması Şekil 2.7.'de verilmiştir.

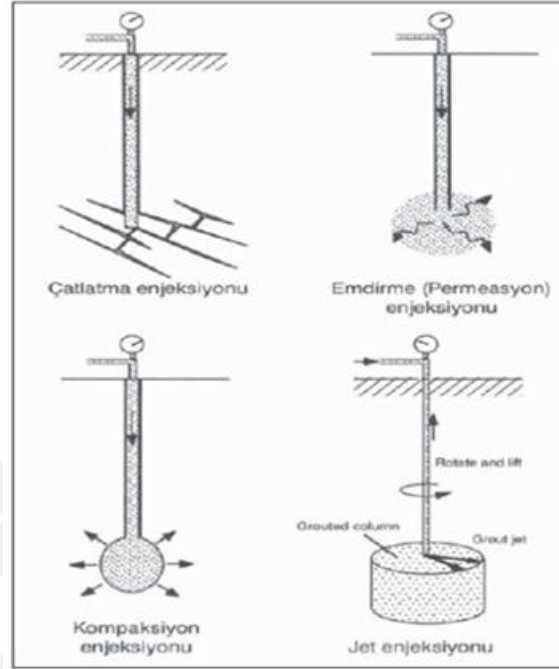


Şekil 2.7. Basit zemin enjeksiyon deneyi (WEB-3).

Özetle enjeksiyon yöntemlerinin kullanımı ile;

- Yapı temelleri altındaki zeminin permeabilitesini azaltmak,
- Geçirimsizlik perdeleri teşkil etmek,
- Su kaçaklarının önlenmesi,
- Aşırı oturmaların önlenmesi,
- Gevşek kumlarda sıvılaşmanın önlenmesi,
- Şişme ve büzülme potansiyelinin azaltılması,
- Komşu temellerin takviyesi veya oturmuş temellerin zemininin ıslahı,
- Yapı ile sert ana kaya arasında oluşması beklenen boşlukların doldurulması,
- Temel çukuru duvarlarının stabilitesinin sağlanması,
- Tünel aynasının stabilitesinin sağlanması,
- Yapı temelleri altındaki zeminin mukavemetini arttırmak,
- Yamaç stabilitesini sağlamak mümkündür (Glossop, 1960).

Enjeksiyon yöntemi temelinde uygulanan iyileştirmeler kullanılan tekniği göre farklı olarak isimlendirilmektedir. Temel enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi Şekil 2.8.'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Temel enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi (Tunçdemir, 2004).

Enjeksiyon malzemesinin zemin ile kompozit bir yapı oluşturabilmesi için enjeksiyon yapılacak zeminin mevcut boşluklardan daha küçük dane çapına sahip olmaları gerekmektedir (Fırat, 2001). Enjeksiyon malzemesi seçiminde sondaj loglarından elde edilen zemin profilinden yola çıkılır. Zeminde geçirgenlik katsayısına (k) kayada ise çatlak genişliği (e) dikkate alınarak zemin enjeksiyon türü belirlenir. Unutmamalıdırki enjeksiyon gibi tüm zemin iyileştirme yöntemlerinde istenilen sonucun elde edilebilmesi için uygulama zeminin türü göz önünde bulundurularak uygulama yapılmalıdır. Tablo 2.7.'de enjeksiyon teknikleri ve tekniklerin verimli bir şekilde uygulanabileceği zemin türleri verilmiştir.

Tablo 2.7. Enjeksiyon teknikleri ile ilgili zemin türleri.

Zemin türü	Permeasyon enjeksiyonu	Kaya enjeksiyonu	Kompaksiyon/Çatlatma/Jet enjeksiyonu
Çakıl, iri daneli kum, Kumlu çakıl $k = 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	Saf çimento süspansiyonu, çimento tabanlı süspansiyon		Harç, çimento tabanlı Süspansiyon
Kum, orta daneli kum $k = 5 \times 10^{-3} < k < 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	Mikro süspansiyon, çözelti		Çimento tabanlı Süspansiyon
İnce daneli kum, silt (siltli kil) $5 \times 10^{-4} < k < 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	Belirli kimyasallar (phenolic, arcylic)		Çimento tabanlı harç, Çimento tabanlı süspansiyon
Çatlamış kaya			
Kırıklar, çatlaklar, karstik aşınma $e > 100 \text{ mm}$		Çimento tabanlı harç, çimento tabanlı süspansiyon (dolgu malzemesi kil)	Çimento tabanlı süspansiyon
Çatlakalar, yarıkları $0.1 \text{ mm} < e < 100 \text{ mm}$		Çimento tabanlı süspansiyon, Mikro süspansiyon	Çimento tabanlı süspansiyon
Kırıklar, çatlaklar, Karstik aşınma $0.05 \text{ mm} < e < 0.1 \text{ mm}$		Mikro ve aşırı ince çimento tabanlı süspansiyon Silikat Jel	Çimento tabanlı süspansiyon
$e^* < 0.05 \text{ mm}$		Belirli Kimyasal (Epoxy, Phenolic, Arcylic)	Çimento tabanlı süspansiyon

k : Geçirgenlik katsayısı , e^* : Çatlak genişliği

Uygulama öncesi enjeksiyon türünü seçiminde ilk olarak gerekli zemin verilerine ulaşılması gerekmektedir. Doğru enjeksiyon türünün seçiminde zeminden elde edilebilen veriler doğrultusunda karar verilir. Enjeksiyon türünün seçiminde dikkat edilecek diğer husus ise uygulama sonunda zemin özelliklerinde olması beklenen muhtemel iyileşme göz önüne alınarak karar verilmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemi olarak enjeksiyon yöntemi seçildiğinde iyileştirici malzeme seçimi belirlenmelidir. Enjeksiyon malzemesi seçimi Şekil 2.9.'da gösterilmektedir (Önalp, 1983). Enjeksiyon çözeltisinin hazırlanmasında bentonit, çimento, kireç, kil, uçucu kül, bitüm ve bazı kimyasal maddeler kullanılmaktadır (Önalp, 1983).

ÇAKIL	KUM	SİLT	KİL
ÇİMENTO	Katkı yüzdesi/viskozite/serbest basınç /fy: 10/70 - 80 / 20 - 90 / 100 - 600		
KIREÇ			
BENTONİT			
REÇİNELER	10 - 50 / 1, 4 - 30 / > 30		
LİGNİN	10 - 30 / 1, 4 - 11 / < 3		
AKRİLAMİDLER		10 - 50 / 1, 3 - 2, 5 / 3 - 30	
SİLİKATLAR	10 - 30 / 1, 5 - 30 / 3 - 30		

Şekil 2.9. Enjeksiyon türleri (Önalp, 1983).

2.2.3.1. Katkı malzemeleri ile enjeksiyon

Katkı malzemeleri ile enjeksiyon tekniği kullanılarak yapılan zemin iyileştirme çalışmaları, zemine kolay uyum sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Kireç, uçucu kül, çimento, bitüm ve bentonit gibi malzemelerin katkısı ile enjeksiyon işlemi yapılabilmektedir.

Kireç katkılı enjeksiyon yöntemi (ortalama %3-8 sönmüş kireç uygulayarak); özellikle kil mineralleri içeren zeminlerde etkili olmaktadır. Bazı kil mineralleri (hidratlı silis içerikli) ve ince daneli malzemeler, kalsiyum silikat jeli (sert ve suda erimez özellikli) oluşturabilir. Kireç ilavesi ile kil içeriğindeki silisi söker ve reaksiyona girer. Oluşan silisli yapı kil tabakası ile birleşerek zemin boşluklarını dolar ve zamanla kristalleşerek hidratlı silise (tobermorit – hillebrandit) dönüşür (Özaydın, 1970).

Uçucu kül katkısı ile enjeksiyon yöntemi; çoğunlukla karayolu mühendisliğinde kullanılmaktadır. Uçucu küller, kömür hammadeli termik santrallerin bacalarından birikmiş malzemelerdir. Bu malzeme silt boyutundadır. Kireç katkılı enjeksiyon genellikle ince daneli zeminlerde uygulanırken, uçucu kül ilavesi ile iri daneli zeminlerde, kullanılmasını sağlamaktadır (Özaydın, 1970).

Çimento katkısı ile enjeksiyon yöntemi; granüllü zeminlere (toz halinde) çimentonun ilave edilmesi yöntemidir. Çimento katkısı ile enjeksiyon, gevşek ve akışkan olmayan, farklı yoğunluk ve su içerikli tüm zeminlerde etkin bir şekilde uygulanabilmektedir (Bell 1993). Enjeksiyon yönteminin uygulanması için ihtiyaç duyulan çimento miktarı zemin sınıfına göre farklılık göstermektedir. Tablo 2.8.'de zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı miktarları verilmiştir (Tunç, 2002).

Tablo 2.8. Farklı zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı (Tunç 2002).

AASHTO (Zemin sınıfı)	Birleştirilmiş zemin sınıfı	Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça)	Çimento % hacimce	İht. Sınırları % a ağırlıkça
A-1-a	GW,GP,GM,SW,SP,SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM,GP,SM,SP	6	7-9	5-8
A-2	GM,GP,SM,SP	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL,ML,	10	8-12	7-12
A-5	ML,MH,CH	10	8-12	8-13
A-6	CL, CH	12	10-14	9-15
A-7	MH,CH	13	10-14	10-16

Bitüm katkısı ile enjeksiyon yöntemi; petrolün buharlaşması ya da damıtılması sonucu elde edilen atık malzeme kullanılmaktadır. Bitüm pahalı bir malzeme olduğu için malzeme miktarı zemin cinsine ve iklim şartlarına göre seçilmelidir. %10-15 ince daneye sahip ve plastisite indisi değeri 18'den düşük olan zeminlerde sıklıkla kullanılır (Uzuner, 1995).

Bentolit katkısı ile enjeksiyon yöntemi; montmorillonit ailesinin bir parçası ve %500 ya da daha yüksek likit limit değerine sahip kil mineralinin enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmasıdır. Bentolit katkı malzemeleri volkanik kül, tuf ve lavların (zengin alüminyum ve magnezyum içerikli) kimyasal ayrışması ya da bozulması sonucunda oluşurlar (Çimen ve Dereli, 2014). Zeminde bentonit katkısı enjekte edildiğinde çökme önlenir ve vizkozitede artış gözlemlenir (İnce, 1994). Aynı zamanda pekleşmiş zemin permabilitesinde azalma ve gevreklikte artış gözlemlenir (Jefferis, 1982).

2.2.3.2. Permeasyon enjeksiyonu

Yöntem; düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesinin zeminin içindeki boşluklara düşük basınçta enjekte edilmesi ile zeminin yapısının ve hacminde değişmeyi takiben malzemenin zamanla sertleşmesi böylece zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerindeki değişmesi olarak tanımlanmıştır (Xanthakos ve ark., 1994). Yöntem ince malzeme oranının %20'den olan zemin gruplarında verimli bir şekilde kullanılabilir. kullanılabilmektedir.

2.2.3.3. Çatlatma enjeksiyonu

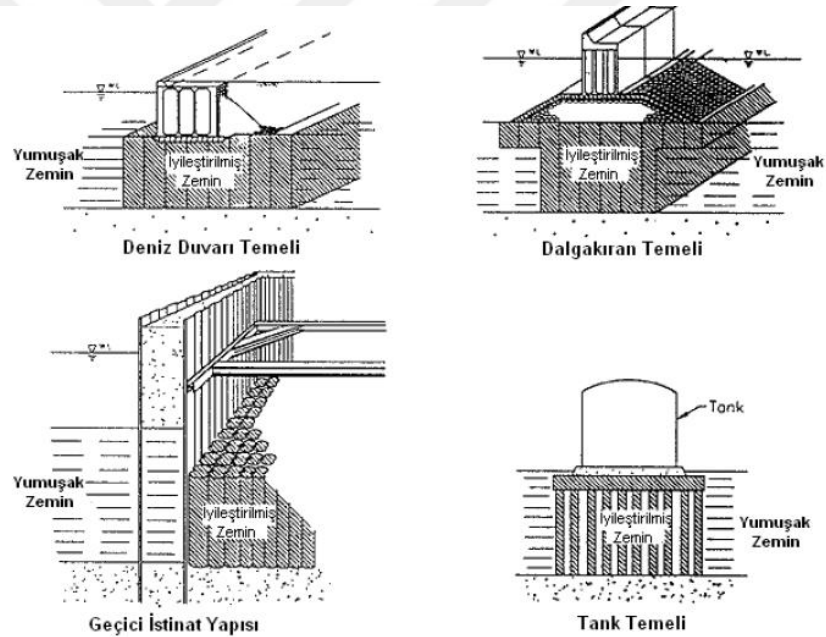
Yöntem çimento şerbetinin yüksek basınç yardımıyla zemine enjektesi sonucu zeminin çatlaması ve böylece çatlakların çimento ile doldurulması olarak tanımlanır. Oluşması beklenen çatlakların hacmi, boyu ve genişliği enjeksiyon basıncına ve mevcut jeostatik gerilmelere bağlıdır (Gallevresi, 1992). Yöntem yaygın olarak alüvyon zeminlerde uygulanmaktadır. Çatlama olayının başladığı, enjeksiyon basıncındaki düşüşün tespiti ile olur (Toğrol, 1994).

2.2.3.4. Kompaksiyon enjeksiyonu

Yöntemde zayıf veya yumuşak zeminin yer değiştirmesi veya sıkıştırılması için, çok yüksek basınçta (3,5 MPa) enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir alan oluşturulur. Daha sonra etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştırarak şekilde yüksek basınçlarda siltve kum içeren katı ve yüksek vizkoziteli enjeksiyon malzemesi enjekte edilir (Tunçdemir, 2007). Yöntem temellerin desteklenmesinde, oturmalarının sınırlandırılmasında, farklı oturan temellerinin iyileştirilmesinde ve tekrar eski konumuna getirilmesinde, tünellerin veya açık kazı çalışmalarında tercih edilmektedir. Ayrıca yöntem ekipmanın bina bodrum katı ve dar alanlarda kullanılabilirliği, az atık meydana getirmesi ve mevcut yapıya etkisinin azlığı sebebi ile (asgari titreşim) sıklıkla tercih edilir (Byle ve Borden, 1995).

2.2.3.5. Derin karıştırma

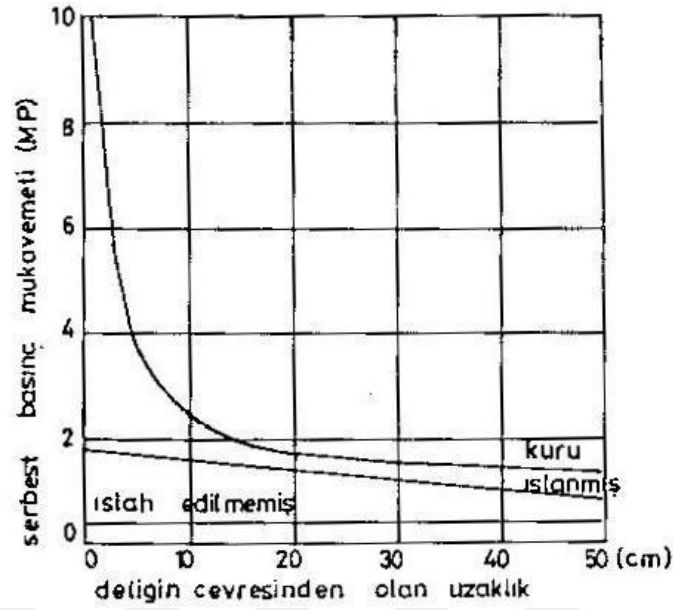
Yöntemde özel karıştırma ekipmaları (ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar) kullanılarak yumuşak ve ince daneli zeminlerde kireç (CaO-Ca(OH)_2) veya portland çimentosu ile zemin içerisinde kolon veya duvarlar oluşturulur (Özaydın, 2012). Burgu borusu istenilen derinliğine indirilir ve karışım zemine pompalanır. Boru ucundaki paletler yardımı ile karışım zemin ile karıştırılarak boru yavaşça yukarı çekilmektedir. Derin karıştırma yöntemi; kazı çukurlarının desteklenmesi, tünel yapılarının desteklenmesi, rıhtım yapıları, geçirimsizlik perdelerinin imalatı, temel takviyesi yapımında ve sıvılaşmanın önlenmesinde sıklıkla kullanılabilir (Altun, 2010). Yöntem genellikle 30 m derinliğe kadar uygulanabilir. Şekil 2.10.'da derin karıştırma yöntemi uygulanan yapı modelleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Derin temel uygulamaları (Altun, 2010).

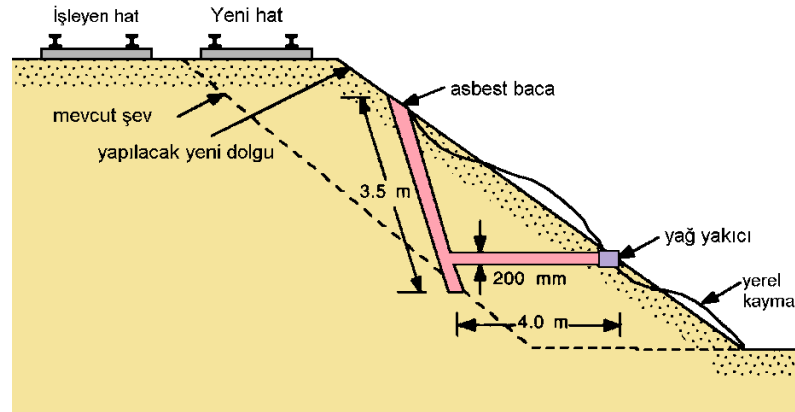
2.2.4. Isıtma / Dondurma

İnce daneli zeminlerde ısıtma ile YASS'ın altındaki zemin ve kayalarda ise dondurma yöntemleri ile zeminlerin, mekanik ve mukavemet özelliklerinde önemli artışlar sağlanabilir. Şekil 2.11.'de termal etkinin mukavemet ile olan ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.11. Termal işlemin mukavemete etkisi (Önalp, 1983).

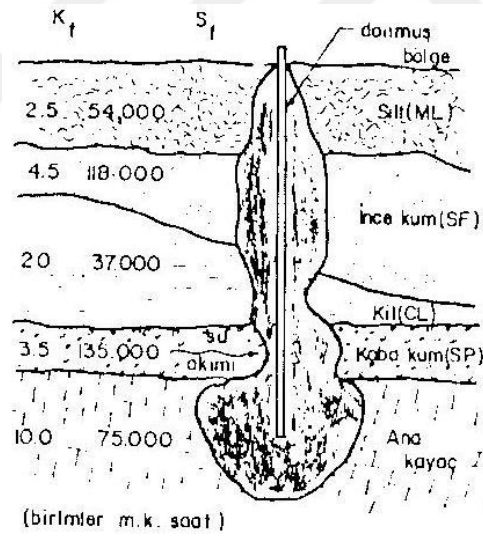
Yapılan çalışmalarda, ısıtma yönteminin kullanımı ile 300-1000 °C arasında bir sıcaklıkta (elektrik akım kullanılarak) ısıtılan zeminde fiziksel yapıda değişimler gözlemlenmiştir (Terashi ve Juran 2000). Kil yapısı 400-600 °C mertebelerinde ısıtıldığında silikatlaşmaktadır. Isı 900 °C'e çıktığında ise klinkere yapısına dönüşerek faz değiştirmektedirler. Suya doymun killer yöntemin kullanımı ile nem almayacak hale gelirler. Geçici olarak kesme kuvveti ve elastite modülü artar. Bu yöntemin kullanımı ile mukavemette artma, şişme, sıkışma ve hassaslık derecesinde azalma gibi önemli ve sürekli olarak zemin özelliklerinin iyileşmesini sağlayabilir. Şekil 2.12.'de ısıtma işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.12. Isıtma işleminin şematik gösterimi (Önalp ders notları).

Isıtılan killerde, zeminlerin ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) yapısında barındırdığı suyun buharlaşması ve kilin yapısındaki değişim nedeniyle geri dönüşülmeyen değişimler meydana gelmektedir. Zemine yatay veya düşey/eğimli kuyular açılarak açık veya kapalı sistemlerle bu kuyuların içinde sıcaklık $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üstüne çıkartılır (Önalp ve Arel, 2004).

Dondurulma yönteminde ise zemin içine yerleştirilen borulardan soğuk taşıyıcı akışkan (Amonyak, sirke ve tuzlu su sirkülasyonu, basit CO_2 sirkülasyonu, donmayan benzer sıvı nitrojen) dolaştırılarak zemin suyunun dondurulması esasına dayanır. Böylece zeminin kayma direncinde artış gözlemlenir. Yöntem ile madencilikte galerilerinin yapımında ve shaftların oluşturulmasında, derin kazılarda, tünellerde geçici olarak güvenliğin sağlanabilmesinde sıklıkla kullanılır. Şekil 2.13.'de YASS'ın donmaya etkisi verilmiştir.



Şekil 2.13. Hareketli yeraltı suyunun donmaya etkisi (Önalp, 1983).

2.2.5. Ön yükleme ve drenaj

Su içeren yüksek sıkışabilirlikli normal konsalide killerde, imalat sonra meydana gelebilecek oturmaların önüne geçmek adına sürşarj yükü yardımıyla kil zeminin yapının inşasından önce yüklenmesine ön yükleme yöntemi denilmektedir. Yöntem

ekipman temininin kolaylığı ve düşük maliyetleri nedeniyle ülkemizde sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2.6. Jet enjeksiyonu (Jet Grout)

Jet enjeksiyonu diğer adıyla yüksek modüllü kolon (Jet Grout), zayıf zemin yapısının iyileştirilmesi veya yapı yüklerinin sağlam tabakalara aktarılabilmesi için kullanılmaktadır. Kolonların diğer bir imalat yöntemi Jet Grouttur. Bu yöntem; zeminde kolonların imalatı öncesi zeminin delgi makinesi yardımıyla delinmesi ve bu boşlukların yüksek basınçta (300-600 bar mertebesinde) çimento şerbetinin zemine enjekte edilerek zemini yerinde parçalayarak karışması ve bu sırada ekipmanın (özel tij-monitör) sabit hızla döndürülerek yukarı çekilmesiyle kolon imalatının son ermesi olarak tanımlanır (Durgunoglu, 2004).

Jet enjeksiyon yöntemi bu tez çalışmasının ana konusu olduğundan Bölüm 3'te detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

2.3. Sıvılaşma

1964 yılında yaşanan Niigata ve Alaska depremlerinin ardından sıvılaşma mühendislik problemlerinde çözülmesi gereken bir sorun olarak görülmeye başlanmıştır. Sıvılaşma üzerindeki çalışmalar ilk olarak temiz kum tabakalarının sıvılaşma potansiyelinin araştırılması üzerine yapılmıştır.

Gevşek suya doymuş bir kum zemin, titreşim etkisi altında, sıkışır ve böylece hacimce küçülme meydana getirir. Hacimsel küçülme, su drene olamadığı için, boşluk suyu basıncında artışa neden olur. Düşey efektif gerilme bu artışa paralel olarak düşer, ardından toplam gerilmenin su basıncına eşit olması durumunda da efektif gerilme sıfır olur. Bu duruma gelen kum zemin kayma direncini tamamen kaybeder ve sıvılaşma olayı meydana gelmiş olur (Seed ve Idriss, 1982).

2.3.1. Sıvılaştan zeminler

Suya doymuş, gevşek yapıda kum ya da kum içerikli zeminlerde, tekrarlı (dinamik) etki altında, sıkışma ve hacimde azalma gözlemlenebilir. Bu durum suyun drene edilemediği durumlarda, boşluk suyu basıncında artış meydana getirir. Tekrarlı yüklerin etkisi altında kum tabakası içinde yeralan boşluk suyu basıncındaki artış devam ettiğinde, normal gerilmelerin toplamı, boşluk suyu basıncına eşit mertebelere ulaşabilir. Böylece, kohezyonsuz zemin kayma dayanımını kaybeder ve sıvı faz hal davranışı gösterir. Bu fazda zemin büyük yer değiştirmeler meydana gelir. Zemin yapı böylece sıvılaşma evresine geçmiş olur (Das, 1983).

Sıvılaşma analizi yapılırken,

- Yapının temel boyutu, ağırlığı ve oturuş biçimi
- Stratigrafik kesit ve zemin tabakalarının türü
- Tabakaların doğal birim hacim ağırlıkları (γ_n)
- Tabaka kayma dalgası hızı (V_s) - Standart Penetrasyon değerleri (N_{30})
- Boşluk suyu basıncı (u_w)
- Düşey toplam gerilme (σ_v)
- Düşey efektif gerilme (σ'_v) değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir.

Dinamik etki sonucu oluşan hasarların bir kısmı sıvılaşma kaynaklıdır. Sıvılaşma kaynaklı hasar türleri; kum kaynaması, akma göçmesi, yanal yayılma, istinat yapısı yenilmesi, taşıma gücü kaybı ve gömülü yapı yüzeyleşmesi olarak sıralanabilir.

2.3.2. Sıvılaşma problemlerinde temel mühendisliği uygulama yöntemleri

Zemin sıvılaşmasının olası etkilerini azaltmak amacıyla prefabrik (yapay) dren, taş kolon, vibro kompaksiyon, kompaksiyon kazıkları, dinamik kompaksiyon, derin karıştırma ve Jet Grout gibi zemin iyileştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu yöntemlerin tümü zeminleri daha fazla sıkıştırarak, inşaa edilecek yapılarda sıvılaşmaya bağlı hasarları önlemek için kullanılır. Tablo 2.9.'da sıvılaşmaya karşı temel mühendislik uygulamaları verilmiştir.

Tablo 2.9. Sıvılaşmaya karşı temel mühendisliği uygulamaları (Durgunoğlu 2004).

Metodoloji	Prefabrik Dren	VibroFlotasyon Vibro Kompaksiyon	Kompaksiyon Kazıkları	Taş Kolon (5)	Dinamik Kompaksiyon (4)	DeepMixing (Derin karıştırma)	Jet Grouting
Aşırı Boşluk Suyu Basıncı Oluşumuna Mani Olunması	√	-	-	-	-	-	-
Zeminin Yerinde Sıkıştırılması – İzafi Sıkılığının Arttırılması	-	√(2)	√	√(3)	√	-	-
Zemin İçinde Rijit Kolon Oluşturulması Sureti İle Kayma Gerilmelerinin Alınması	-	-	√	-(1)	-	√	√
Zeminin Yanal Hareketine Mani Olmak Üzere Zemin İçinde Zemini Hapsedecek Elemanların Teşkili	-	-	-	-	-	√	√

Üst yapının daha rijit ve farklı oturma ve yatay deplasmanlardan daha az etkilenecek tarzda teşkili ve takviye edilmesi

1) İhmal edilebilir

(2) Yalnız kumlarda $FC < \%5$

(3) İnce daneli zeminlerde $\% 5 < FC < \% 35$

(4) Enerjinin daha derine iletilmesi için taş keson/ Stone pillar uygulaması

(5) Ucu kapalı tapa ile boru çakılarak veya vibro_replacement metodu ile

Zemin iyileştirme yöntemlerinin yanı sıra kazık temek kullanımı, yapı etrafında parplaş perde ve diyafram duvar teşkili, rijit yapı ve bodrum temel tasarımı da sıvılaşmaya karşı alınan önlemler arasındadır.

BÖLÜM 3. METARYAL VE YÖNTEM

Yukarıdaki bölümden anlaşılacağı üzere literatürde uygulama alanı bulmuş birçok zemin iyileştirme yöntemi mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında söz konusu yöntemlerden Jet Grouut metodu detaylı olarak incelenmiş ve örnek vaka üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Aynı zamanda bu örnek sonlu elemanlar yöntemi ile hesap yapan PLAXIS yazılımı ile modellenmiştir.

Bu bölümde Jet Grout yöntemi literatür eşliğinde anlatılırken imalat ve kontrol aşamalarındaki süreçler yazar tarafından yerinde gerçekleştirilen incelemeler ve görsel veriler ile desteklenmiştir.

3.1. Jet Grout Yöntemin Tarihçesi

Jet Grout çalışmaları ilk olarak *Yamakado Kardeşler* (Japonya, 1965) tarafından karışımın yüksek hızla zemine enjektisi ile uygulanmıştır. Daha sonra 70’li yıllarda Nakanishi tarafından farklı teknikler geliştirilmiştir (Miki ve Nakanishi, 1984). Yöntemin çeşitli araştırmacılar tarafından zamanla gelişimi sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- Kimyasal Karıştırma Kazığı - Chemical Churning Pile (CCP)

1970’li yıllarda iki farklı Jet Grout yöntemi kullanımı öne çıkmıştır (Xanthakos ve ark., 1994). Bunlardan biri olan “Chemical Churning Pile” (CCP) yöntemi Nakanishi ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin uygulamasında enjeksiyon malzemesi tercihinde kimyasal enjeksiyon malzemeleri kullanılmaktadır. Enjeksiyon malzemesi delme borusunun altında bulunan püskürtme uçlarından (1,2 ila 2,0 mm çapında) yatay olarak püskürtülmektedir. Enjeksiyon işlemi sırasında delme borusu eksenini etrafında döndürülerek yukarı çekilir. Kısa süre sonra yöntemin

çevreye verdiği zarar değerlendirilmiş ve bu zararın önlenmesi için çimento bazlı enjeksiyon malzemesi kullanımına tercih edilmiştir. CCP yöntemi ilk olarak 1973 yılında ticari olarak uygulanmıştır. 1970'lerin başlarında Jet Grout tekniği Avrupa' da sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır (Moseley ve Krisch, 1993; Erdil, 2008).

- Özel Jumbo Jet Kazık (Jumbo Jet Special Grout-JSG)

CCP grubu çalışmalarına devam ederek yöntemi geliştirip 1972 yılında “Jumbo Special Pile” (JSP) yöntemini ortaya atmıştır. Geliştirilen yeni yöntemde çimento jetinin hızı arttırılmış ve çimento jeti bir hava kılıfı içine alınıp daha büyük çapta kolon (80 ila 200 cm çapında) elde edilemesi hedeflenmiştir. Aynı zamanlarda farklı bir grup “Jet Grout Pile” JGP yöntemini öne sürmüştür. 1980'lerde JSP ve JGP grupları birleşerek “Jumbo Jet Special Grout” (JSG) methodu adını almıştır (Erdil, 2008).

- Jet Grout (JG)

Yahiro ve ekibinin oluşturduğu bir grup 1970 yılında “Jet Grout” (JG) yöntemini geliştirmiştir (Yahiro ve Yoshida, 1973). Bu yöntemin kullanımında delgi işlemi sırasında su jeti kullanılarak zemin parçalanmış ve daha sonra enjeksiyon malzemesi püskürtülerek boşluklar doldurmaktadır (Erdil, 2008).

- Kolon Jet Grout (Column Jet Grout-CJG)

1975 yılında yöntem geliştirme çalışmalarına devam edilmiş ve enjeksiyon çekilmesi esnasında su jetine ilave olarak jete hava kılıfı eklenmiştir. Böylece etki alanı arttırılarak daha büyük çapta kolonlar elde edilmek istenmiştir. Yöntem “Column Jet Grout” (CJG) metodu olarak ortaya çıkmıştır (Erdil, 2008).

- Süper zemin stabilite kontrolü metodu (Super Soil Stabilization Managment Method-SSS/MAN)

Jet Grout yönteminin gelişim sürecinde 1980 yılında CCP grubu tarafından geçirimsizlik sağlamak amacıyla “Super Soil Stabilization Managment Method (SSS-MAN)” yöntemi geliştirilmiştir (Kauschinder ve Welsh, 1989). Bu yöntemin ilk aşaması bir kılavuz delgi ile delme işlemi yapılmakta ve ardından basınçlı hava ile çevrili su jeti ile zemin delinmektedir. Ardından delme işlemi sonucu oluşan zemin boşlukları yüksek basınçta püskürtülen çimento şerbeti ile doldurulmaktadır. Yöntemin kullanımı ile kaba daneli zeminlerde büyük çaplı kolonlar imal edilebilmiştir. Su jetinin yayılma açısının büyüklük olması ve etki mesafesinin az olması hava jeti kılıfı uygulanması ile aşılmış ve böylece daha geniş çapta elemanlar üretilenmiştir (Yahiro ve Yoshida, 1973; Erdil, 2008).

Jet Grout yöntemi günümüzde sıklıkla olarak; tünel mühendisliği, şev stabilitesi, geçirimsizlik perdeleri, temel takviyesi, kazı çukurları, temel zeminini iyileştirilmesi projelerinin uygulanması aşamalarında kullanılmaktadır.

3.2. Jet Grout İle İlgili Örnek Çalışmalar ve Literatür Araştırması

3.2.1. Jet grout kolonu - zemin - su/çimento oranı ilişkisi

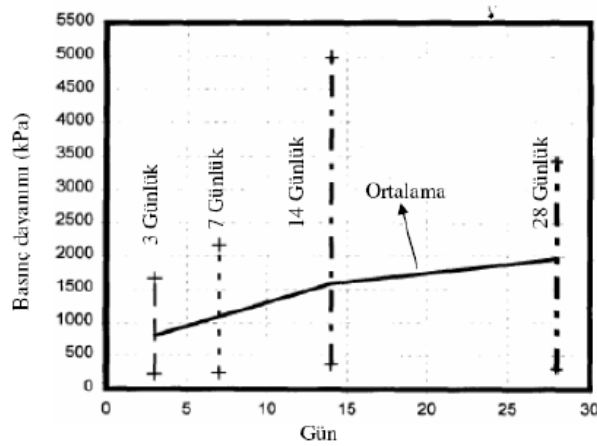
Bauman (1984)'ün yapmış olduğu çalışma kapsamında; Jet Grout kolonlarının dayanımı ile farklı zemin tipinde ve farklı su-çimento oranına göre oluşturulmuş Jet Grout kolonlarından alınan numunler ile kolonların serbest basınç değerlerini incelenmiştir. Çalışma sonunda Jet Grout imalatında kullanılan çimento miktarındaki artış ile basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca kumlu ve çakıllı zeminlerde, killi, siltli ve organik zeminlere nazaran daha yüksek basınç dayanımlarıyla karşılaşmıştır.

3.2.2. Jet Grout Kolon uygulamasında hesap algoritması oluşturma

Omine ve ark. (1999)'nın yapmış olduğu çalışma kapsamında; kompozit çift fazlı yapı modeli ile gerime dağılımı ve deformasyon ilişkisi incelenmişlerdir. Çalışma sırasında kompozit malzemenin sayısal analizinde homojenleştirme metodu olarak adlandırılan bir hesap algoritması kullanılmıştır. Çimento katkısı ile iyileştirme yapılan bu zemin modelinde eğimli yüklemeler ile düşey oturma ve yatay deformasyon incelenmiştir. Yapılan sayısal analiz model incelemesi ve testler sonucunda yöntemin kompozit zeminin taşıma kapasitesinin hesabında kullanımında etkili olduğu belirlenmiştir.

3.2.3. Jet Grout Kolon numunelerinin basınç dayanımlarının hesaplanması

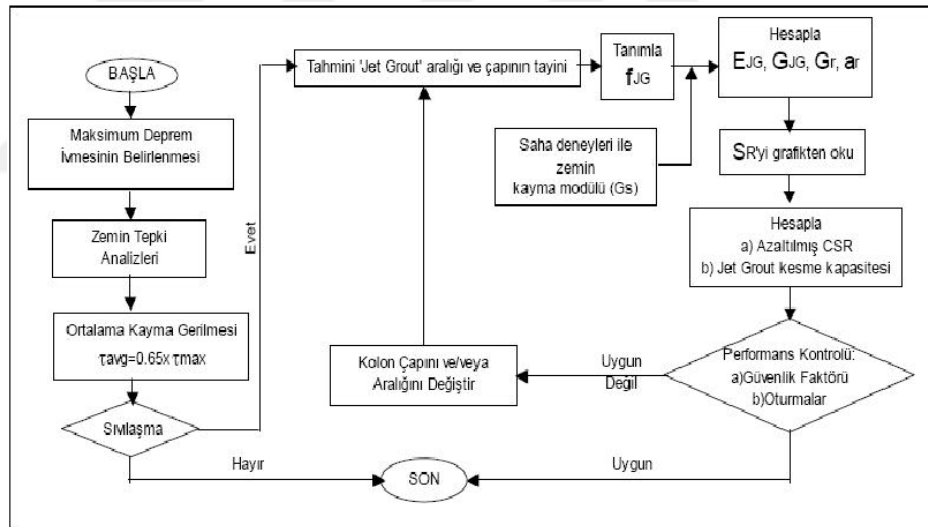
Bell ve ark. (2003)'nin çalışması kapsamında; süper jet kolonlardan alınan numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Gün arttıkça basınç dayanım değerinin de arttığı belirlenmiştir. Şekil 3.1.'de çalışmada elde edilen Jet Grout numune basınç dayanımlarına ait grafik verilmiştir.



Şekil 3.1. Jet Grout kolon numunelerinin basınç dayanımları (Bell ve ark., 2003).

3.2.4. Jet Grout ve Deep Mixing yöntemleri ile sıvılaşmanın etkilerinin azaltılması

Özsoy ve Durgunoğlu (2003)'nın yapmış olduğu çalışma kapsamında; deprem sebebiyle oluşması beklenen kayma gerilmelerinin tasarlanan birim alanlarda dağılımı, zemin - çimento karışımı kolonlar ve çevrelerindeki zemin arasındaki kayma modülünü farklı modellerle incelenmiştir. Önerilen metod Ford - Otsan Gölcük Tesislerine ait sahada yapılan zemin ıslah çalışmaları ile desteklenmiştir. Ayrıca çalışmada yapılan kabullerin desteklenebilmesi için Sonlu Elemanlar Metodu (2D - 3D) veya Sonlu Farklar Metodu kullanılarak oluşturulan modeller ile kontrol edilmesi gerekliliği belirtilmiştir (Yağızatlı, 2012). Şekil 3.2.'de yapılan çalışmalarda Jet Grout ve Deep Mixing zemin iyileştirme yöntemlerini sıvılaşmaya etkisini irdelenebileceği hesap algoritması önerilmiştir.



Şekil 3.2. Önerilen hesap algoritması (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

3.2.5. Jet Grout yöntemi ile mukavemet özelliklerinin değişimi ve zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısı arasındaki ilişkinin araştırılması

Doğu ve ark. (2006)'nın yapmış olduğu çalışma kapsamında; Antalya bulunan otel inşa sahalarında imal edilen Jet Grout kolonlarına ait karot numunelerinin mukavemet değerlerinin zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısından hangi oranda etkilendiğini araştırmışlardır. Bu çalışmada arazide yapılan incelemeler ve

laboratuar deneylerinden elde edilen verileri (zeminin ince dane oranı-SPT darbe sayısı ve numunelerin serbest basınç dayanımlarını) karşılaştırmışlardır.

3.2.6. Jet Grout yönteminin kullanımı ile sıvılaşmanın önlenmesi

Ayan (2009)'ın yapmış olduğu çalışmada kapsamında; araştırmaya konu olan Mabeyinci Arif Paşa Yalısı'nın, bodrum imalatı için 7 m derinliğinde kazı yapılması gerekliliği ön görülmüştür. Çalışma alanınada YASS'nin deniz ile aynı kotta olması, tabandan suyunun kontrolü, sıvılaşma kontrolü ve temel zemininin iyileştirilmesi istenmesi nedeniyle Jet Grout yönteminin tercih edilmiştir. Kayma dalgası hızlarının iyileştirme öncesi ve sonrası değerleri ile yapılan sıvılaşma analizlerinde, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının istenilen değerlere ulaştırıldığı belirlenmiştir.

3.2.7. Jet Grout yöntem ile oturma limit aşımının önlenmesi

Ayan (2009)'ın yapmış olduğu çalışma kapsamında; Migros / Gimat Hipermarket ve Alışveriş Merkezi 4 katlı yapının inşası için planlanan radye temel uygulamasında 22,50 cm'lik bir oturma hesaplanmıştır. Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde Jet Grout kolonlarında beklenen oturma miktarının proje yükünün %62,50 katına çıkarıldığında 4,00 mm olacağı hesaplanmıştır. Jet Grout kolonlarının 100 t' luk yük altında güvenle çalışabileceği ve böylece zemin iyileştirmesinin istenilen derecede uygulanabileceği belirlenmiştir.

3.2.8. Jet Grout yöntemi ile taşıma gücü ve deformasyon kontrolü

Çınar (2014)'ın yapmış olduğu çalışma kapsamında; turba silt, kil ve kum zeminde Jet Grout yönteminin kullanımı ile taşıma gücü ve deformasyon kontrolünü araştırmıştır. SPT deney sonuçları incelendiğinde; çok yumuşak zemintabakalarında hissedilir bir artış gözlenmezken kumlu tabakalarda merkezden D uzaklıkta %50'ye varan SPT artışları gözlemlendiği belirtilmektedir.

3.2.9. Jet Grout yöntemi ile permeabilitenin azaltılmasının incelenmesi

Jaritngam (2003)'ın yapmış olduğu çalışma kapsamında; Tayland da bulunan Pak Phanang barajının kayma güvenliğinin artırılması üzerine araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada Jet Grout kolonlarının çaplarını, kolonlardan alınan karotların serbest basınç dayanımlarını ve Bishop yöntemiyle sonlu elemanlar analizinden elde edilen kayma güvenliği sonuçlarını incelenmiş ve geleneksel kazıklara göre avantajlarını göstermiştir. Çalışmada Jet Grout yöntemi ile iyileştirmenin toplam oturmaları, sıkışabilirliği ve permeabiliteyi azalttığı gözlenmiştir.

3.3. Jet Grout Kullanımı ve Yöntemin Uygulanması

Jet Enjeksiyonu diğer adıyla Yüksek Modüllü Kolon, yapı yüklerinin sağlam zemin tabakalarına aktarılması veya zeminin iyileştirilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Hassas ve çok yumuşak killerde, kireç veya belirli oranlarda kireç içeren çimento karışımı imalatı kullanılır. Kolonların imalatında mevcut zemin çimento ile mekanik karıştırıcılar yardımıyla karıştırılır ise derin karıştırma (*Deep Mixing*) olarak adlandırılır. Kolonların diğer bir imalat yöntemi Jet Grouuttur. Bu yöntemde kolon imalatına başlamadan önce özel imal edilmiş delgi makineleri ile delme işlemi gerçekleştirilir. Delgi işlemi sonrası yüksek basınçta (300-600 bar) çimento içeren şerbetin zemine enjekte edilir ve bu esnada zeminin yerinde parçalanması ve karışması sağlanır. Ardından jet tiji ve monitörü sabit hızla döndürülerek yukarı çekilir (Durgunoglu, 2004).

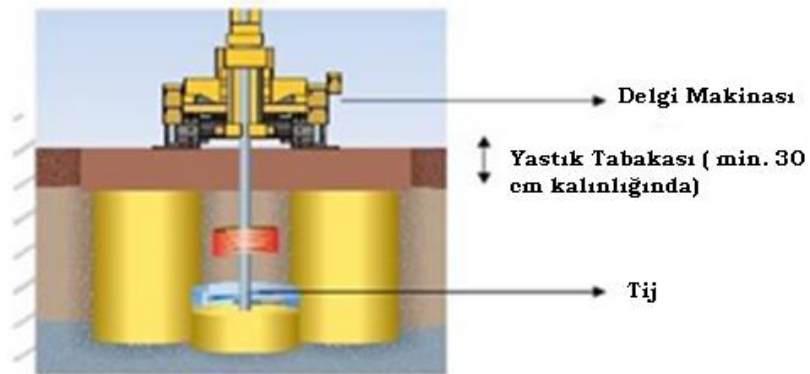
Her iki durumda da zemin ve çimento karışımı prizini alarak belirli bir mekanik özelliği olan '*soilcrete*' olarak adlandırılan kolon meydana gelir. Yöntemin temel amacı diğer zemin iyileştirme yöntemlerinde de olduğu gibi zeminin taşıma kapasitesi ve elastisite modülünün artması ve permeabilitenin azalmasıdır.

Jet Grout uygulamasına ilk olarak 12 cm çapında sondaj delgisi yapılarak başlanır. Delgi, projede belirlenen kota kadar yapılır. Bu aşamadan sonra monitör üzerinde bulunan, yatay enjeksiyon püskürtme uçlarından yüksek basınçlı (600 bar

mertebelerinde) çimento enjeksiyonu püskürtülmeye başlanır. Aynı esnada tijler ve tijlere bağlı olan monitör, rotasyona tabii tutularak eşit zaman aralıklarında kademeli olarak üst kotlara doğru çekilir. Püskürtme uçlarından çıkan yüksek basınç ve hızdaki enjeksiyon zemini parçalar ve tij monitör sisteminin rotasyonu sayesinde zemin ile karışarak çimentolu zemin kütlelerinin oluşmasını sağlar. Bu mekanizmanın eşit zaman aralıklarında kademeli olarak üst kotlara doğru çekilerek devam etmesi neticesinde de zeminde silindirik Jet Grout kolonları oluşturulmuş olunur (Lawton ve Warner, 2004).

Şekil 3.3.'te Jet Grout sisteminde yastık tabakası gösterilmiştir. Jet Grout kolonları ile temel alt kotu arasında 30-60 cm arası kalınlıkta yastık tabakası olarak adlandırılan stabilize dolgu malzemesinin (%95 sıkışma sağlanacak şekilde) serilir. Yastık tabakası teşkili ile Jet Grout kolonlarının başlıklarının temel altında kırılmasını önlenmektedir. Dolgu malzemesi ile Jet Grout kolonların davranışını daha üniform hale gelir (Küsin, 2009).

Jet Grout yönteminde yastık tabakasını oluşturan dolgu malzemesi seçilirken organik madde ve zararlı madde içermeyen, plastik olmayan ve maksimum 3 inç'ten düşük malzemeden olmalıdır. Genel olarak iyi derece karıştırılmış çakıl, kum, plastik olmayan silt ve küçük miktarda blok ve kaya parçaları dolgu için kabul edilebilir malzemelerdir (Bakım, 2007).



Şekil 3.3. Jet Grout uygulamasında yastık tabaka gösterimi (Küsin, 2009).

3.4. Jet Grout yönteminin avantajları ve dezavantajları

Jet Grout yönteminde ;

- Kullanılacak stabilize malzemesi miktarı, elde edilecek mukavemet ve geçirgenlik gibi zemin parametreleriyle maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilir olması (Melegari ve Garassino, 1997).
- Kimyasal enjeksiyona nazaran çimento-su karışımı kullanılması nedeniyle çevre kirliliği yaratmaması,
- Her türlü zemin cinsine uygulanabilir olması,
- Temelin desteklenmesinde deformasyonu kontrol edilebilmesi,
- Dar sahalarda enjeksiyon işinin başarıyla gerçekleştirilebilmesi,
- Arzu edilen derinlikte kolon imalatının başlatılıp bitirilmesi diğer yöntemlere göre avantajlı taraflarıdır.

Jet Grout yönteminin ;

- Hala gelişme aşamasında olması,
- Tecrübe ve gözleme dayalı olması (geliştirilebilir olması nedeniyle tasarımda kullanılan sınır değerler ve aralıklar henüz kesinleşmemiştir),
- Zemin içerisinde imal edilecek kolonun niteliğini belirlenmesinin zor olması,
- İmalat esnasında ve sonrasında testler ile kontrol edilme ihtiyacı, diğer yöntemlere göre dezavantajlı taraflarıdır (Tachir, 2015).

3.5. Jet Grout kolonların kullanım alanları

Yöntemin günümüzde kullanım alanı oldukça geniştir. Hızla gelişen teknoloji ve yöntem üzerindeki tecrübelerin artmasıyla kullanım alanının gün geçtikçe artacağı düşünülmektedir. Jet Grout yönteminin kısaca kullanım alanları;

- Temel, döşeme ve dolgu altında basınç elemanı şeklinde çalışarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolünde,
- Köprülerde düşey yüklerin taşınması, oturma kontrolü ve negatif yönde çeper sürtünmesinin önlenmesi,
- Kazılarda yanıl zemin itkilerinin kontrolünde,
- Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu geçirimli zeminlerde yapılan kazılarda batardo kapama elemanı olarak,
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında payanda elemanı olarak,
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında çekme elemanı olarak,
- Kazı yüzeyinde yeraltı suyunun kontrolünde,
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili için,
- Kazılarda ankraj elemanı olarak,
- Yüzeye yakın ve yumuşak zeminde yapılması planlanan tünellerde üst zeminin iyileştirmesinde,
- Kazılarda iksa elemanı olarak,
- Yüzeye yakın ve yumuşak zeminde yapılması planlanan tünellerde tünelde ve ayna önünden imalat öncesi tünel kesitinde taşıyıcı bir semsiye oluşturulması amacı ile,
- Önem arzeden ve yüksek ağırlıkta yapılarda ve sıvılaşma potansiyeli yüksek olan alanlarda kazıklı temel teşkili söz konusu ise oluşabilecek yatay yüklerin ve deformasyonların kontrolü için kazık elemanlar ile birlikte,
- Sıvılaşmayla oluşması muhtemel yanıl ve düşey deformasyonların sınırlandırılmasında,

- Sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu zeminlerde, zeminde oluşması muhtemel kayma gerilmelerinin kısmen taşınımı ve dinamik etki sonucu oluşabilecek her türlü deformasyonların sınırlandırılması olarak sıralanabilir (Durgunoğlu, 2004).

3.6. Jet Grout Yönteminin Tasarım Esasları

Jet Grout kolonlarının mini kazık, fore kazık ve çakma kazık gibi diğer rijit yapısal elemanlardan ayıran en temel özellik, zemin ile etkileşimlerinin çok daha fazla olmasıdır (Doğanışık, 2010).

Yöntemin uygulandığı zeminin özellikleri, Jet Grout su/çimento oranı ve zemine gönderilen çimento miktarına bağlı olarak oluşturulan kolonların serbest basınç mukavemeti (f_{jg}) ve deformasyon modülü (E_{jg}) gibi mekanik özellikleri kontrol edilmelidir. Farklı zemin türleri için Jet Grout deformasyon modülü (E_{jg}) 500-12500 MPa olarak seçilebilmektedir. Genellikle zemine göre Jet Grout - zemin deformasyon modülü oranı (E_{jg}/E_s) 10-250 olarak kabul edilmektedir. Üst yapı veya deprem kayma dalgalarından zemine aktarılan yükler Jet Grout kolonları ile zemin arasında birlikte olarak taşınmaktadır (Durgunoğlu, 2004). Tablo 3.1.'de zemin cinsine bağlı deformasyon modülünün serbest basınç mukavemetine oranı verilmiştir.

Tablo 3.1. Farklı zeminler için deformasyon modülü serbest basınç mukavemeti oranları (Durgunoğlu, 2004).

Zemin Cinsi	Modül Oranı, E_{jg}/f_{jg}
Kil	150
Silt	200
Kum	600
Çakıl	900

Jet Grout kolonları taşıyıcı olarak tasarlanacak ise kolon kapasitesi hesabı tekil kazık taşıma gücü hesabı kriterleri göz önünde bulundurularak yapılacak ve toplam güvenli taşıma kapasitesi hesabı uç ve çevre sürtünmesi dikkate alınacaktır.

Kolonu oluşturan çimento-zemin homojen karışımında (*soilcrete*) malzeme zeminin cinsi, malzeme dozaj ve işletme parametrelerine dikkate alınarak hesaplanmalı ve karot deney sonuçları ile hesap değerleri güvenli taşıma kapasitesini aşıp aşmadığı

kontrol edilmelidir. Ayrıca grup şeklinde tasarlanan Jet Grout kolonları toplam taşıma kapasitesi tüm tekil Jet Grout kolon taşıma kapasitesine eşit olmalıdır.

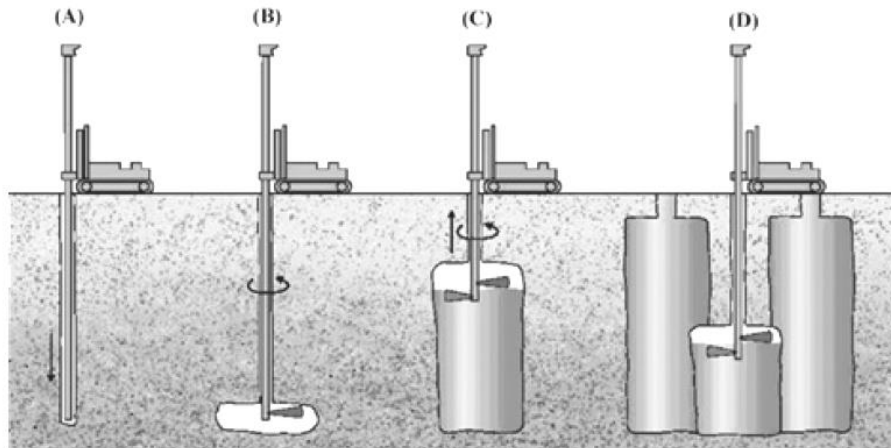
Jet Grout yönteminin tasarımını etkileyen parametreler;

- Kullanılacak harcın parametreleri,
- Zemin cinsi ve değişkenleri,
- Zemin ve harç karışımlarının kısa ve uzun vadeli dayanımı,
- Kullanılacak katkı malzemelerinin nitelikleri,
- Kullanılacak jet sistemleri olarak sıralanabilir (Bell ve Burke, 1994).

3.7. Jet Grout yönteminin uygulanması

Jet Grout ile iyileştirme yöntemi ülkemizde “TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar-Jet Enjeksiyon” standartı esas alınarak delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

Şekil 3.4.’te Jet Grout imalat aşamalarını 4 ana grubu ayırmış ve bunları delme (A), püskürtme (B), kolon şeklinin oluşturulması (C) ve kolon imalatının tamamlanması (D) olarak sıralanmıştır (Nikhbaktan ve Osanloo, 2009).



Şekil 3.4. Jet Grout yönteminin uygulama aşamaları (Nikhbaktan ve Osanloo, 2009).

Jet Grout uygulamalarında zeminden ayrılan parçacıkların (Spoil) bentonit bulamacı ile birlikte gövde ile delik çeperi arasında kalan alandan yukarıya çıkabilmesi için kesici ucun, gövdeden daha kalın olması gerekmektedir. Bu şart uygulandığında artık maddenin dışarı atılması enjeksiyonun zemine penetrasyonunun verimli şekilde sürdürülebilmesi sağlar. Diğer taraftan ayrılan zemin parçacıklarının yukarı taşınması, zeminin ayrışmasına neden olan basınçların kontrol altında tutulması ve harcanan hidrolik enerjinin boşa harcanmasının önlemektir (Akan, 2013; Stoel, 2001).

3.7.1. Ön Jet Grout (Prewashing)

Ön yıkama ve kesme olarak da adlandırılan Ön Jet Grout işlemi; su ve benzeri akışkan ve jet ile ön parçalanma yapılarak uygulamanın verimliliğini arttıran bir işlemdir.

3.7.2. Delgi aşaması

Delme aşamasında zemin cinsine bağlı olarak seçilen rotary veya darbeli yöntemleri kullanılır. Zemin enjeksiyona hazırlanmadan önce jet tekniğinin seçimine göre delme aşaması ile zemin iyileştirilmeye hazır hale getirilir. Delme aşamasının kolaylaştırılması, zeminin enjeksiyona hazırlanması ve sistemin uç kısmının soğutulması amacıyla işlem sırasında çok çeşitli akışkanlar kullanılmaktadır. Kullanılan akışkanlar su, bentonit karışımı, hava ve çimento karışımı (grout) olarak sıralanabilir. Sistemin uç ilave kısmında, zemin cinsine göre yumuşak zeminlerde *kil bitleri*, sert zeminlerde ise *tricone* bitler kullanılmaktadır. Genellikle tij seçiminde yüksek basınca çalışabilen malzeme özelliğinde ve yapıda imal edilmiş Jet Grout sistemlere özel üretilmiş tijler tercih edilir. Sistemin bağlantı yerlerinde (manşonlarda) 500-600 bar basınca dayanabilen ve sızdırmayan özellikli elemanları tercih edilir (Kusin, 2009).

3.7.3. Enjeksiyon aşaması

Enjeksiyon aşaması, delgi tamamlandıktan sonra 1/1 oranında hazırlanmış çimento şerbeti karışımından yüksek basınç (300-500 bar) ile zemine iletilen, delici ekipmanın zamanlayıcılar (timer) yardımı ile etrafında dönerek yerçekimine karşı çekilmesi işlemidir. Bu aşamada yüksek basınç ve hızla püskürtülen enjeksiyon karışımı zemini yarararak, dairesel formda oluşan Jet Grout kolonlarının zeminde oluşmasını sağlar. Çimento ile zeminin karışmasıyla meydana gelen bu kolonlar (*soilcrete*) aynı zamanda zeminin sıkıştırılarak konsolide olmasını da sağlar (Öntürk, 2011).

Jet Grout yönteminin enjeksiyon aşamasında kullanılan karışımlarının uygunluğunun belirlenmesi için bazı deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu deneyler;

- Ön deneyler,
- Yoğunluk,
- Terleme (1000 cm^3 , 60 mm çapında silindir üzerinde 3 saat),
- Marsh viskozite,
- Priz zamanı,
- Silindir numuneler üzerinde (yükseklik/çap oranı 2,0) 3., 7., 14., 28., günlerde ve geç priz alan karışım kullanılmış ise 56. günde serbest basınç deneyleri,
- Çalışma sırasındaki deneyler,
- Günlük yoğunluk (en az vardiya başına 2 adet; Marsh viskozitesi),
- Günlük terleme miktarıdır (TS EN 12716).

3.8. Jet Grout Teknikleri

Jet Grout yöntemi tekli, çiftli ve üçlü sistem olarak adlandırılan 3 teknikte uygulanır. Bir Jet Grout uygulamasında tek bir borudan çimento ve su karışımı geçirilerek enjeksiyon işlemi gerçekleştirilirken, başka bir Jet Grout uygulamasında ise birbirine geçmeli borulardan hava-su-çimento karışımı farklı basınçlarla zemine enjekte işlemi uygulanabilmektedir. Özellikle sert zeminlerde su ve havanın bir arada kullanıldığı

sistemlerde gevşeme sağlanarak delme işlemi daha rahat gerçekleştirilmektedir. İşlem esnasında enjeksiyon ise aynı sistemde daha düşük basınç ile verilebilmektedir. Tüm sistemlerde enjeksiyonun sırasında oluşan kinetik enerji nedeniyle, Jet Grout kolonlarının üst kotu her zaman saha kotunda 30 cm kalacak şekilde imal edilmelidir.

Jet Grout yönteminin verimli uygulanabilmesi ve doğru tekniğinin seçilebilmesi için ön araştırmaların yapılması gerekmektedir. Araştırma çalışmaları sırasında, arazide yapılan SPT ve CPT deneylerinden elde edilen veriler ile laboratuvar deneyleri ile elde edilen rölatif sıklığın tayini, kohezyonsuz zeminlerde dane dağılımı eğrileri, su muhtevası tayini, doymuş birim hacim ağırlıkların tayini ve kohezyonsuz zeminlerin kıvam limitlerinin belirlenmesi olarak sayılabilir (Kusin, 2009).

3.8.1. Jet 1 (tek akışkanlı sistem) tekniği

Bu teknik en geleneksel ve sık kullanılan bir tekniktir. Enjeksiyon malzemesinin 5-10 mm çapındaki bir veya birkaç nozzleden yüksek basınçla (yaklaşık 200 m/sn hızla, 300-900 kg/cm² (bar) basınçla zemine enjekte edilmesidir. Enjeksiyon jeti püskürttüğü harç ile zemini aşındırarak zemin - çimento karışımı meydana getirir. Bu tekniğin kullanımı ile kolonlar zeminin yapısına ve parametrelerine göre kil içerikli zeminlerde 60-80 cm, kumlu-çakıl içerikli zeminlerde 100-120 cm çaplarında imal edilebilmektedirler (Bakım, 2007).

3.8.2. Jet 2 (çift akışkanlı sistem) tekniği

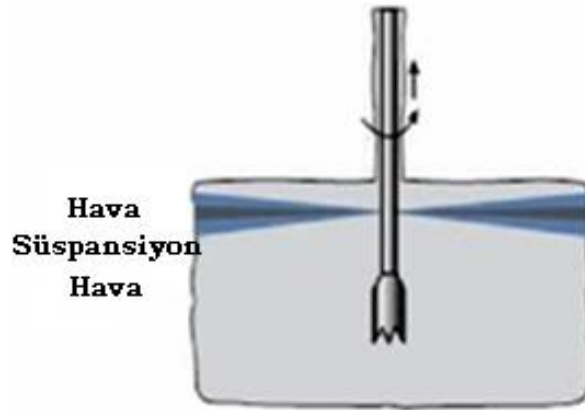
Bu teknikte Jet 1 tekniğine ilave olarak, ikinci bir akışkan olarak hava jeti kullanılır. Teknik kullanımında basınçlı hava (ortalama 8-12 bar) sistemin dış borusundan, enjeksiyon malzemesi ise orta borudan geçerek uygulanır. Basınçlı hava yardımıyla, sistemde oluşan kinetik enerji sürtünme nedeniyle oluşan kayıplarını azaltır ve tekniğin kullanımı ile kolon çapları tek akışkanlı sisteme göre %60-80 daha büyümüş olur. Bu tekniği kullanımı ile hedeflenen kolon çapları orta sıkı zemin yapısında 100 cm, gevşek yapılı zeminlerde ise 180 cm mertebelerinde elde edilebilmektedir (Yağızatlı, 2012).

3.8.3. Jet 3 (üç akışkanlı sistem) tekniği

Bu teknik yüksek enerjili su jeti ile zeminin parçalandığı, aynı zamanda enjeksiyon karışımının ayrı bir noktadan püskürtülerek kolonun imaledildiği jet enjeksiyon işlemidir. Ayrıca teknikte üç borunun iç içe kullanılması ile 400-600 bar mertebelerinde basınçlı su sistemde yeralan ortadaki borudan, 8-12 bar mertebelerinde basınçlı hava araboru hattında bulunan nozzlelerden çıkış yapmaktadır. Grout malzemesi ise 30-80 bar mertebelerinde basınç ile en dış boru hattından ayrı bir nozzleden, su-hava karışımı arasından çıkış yapmaktadır. Jet Grout kolonları bu teknik ile imal edildiğinde 200 cm çapa kadar imal edilebilmektedir. Jet 3 tekniği kohezyon içerikli zeminlerde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Yağızatlı, 2012).

3.8.4. Süper jet tekniği

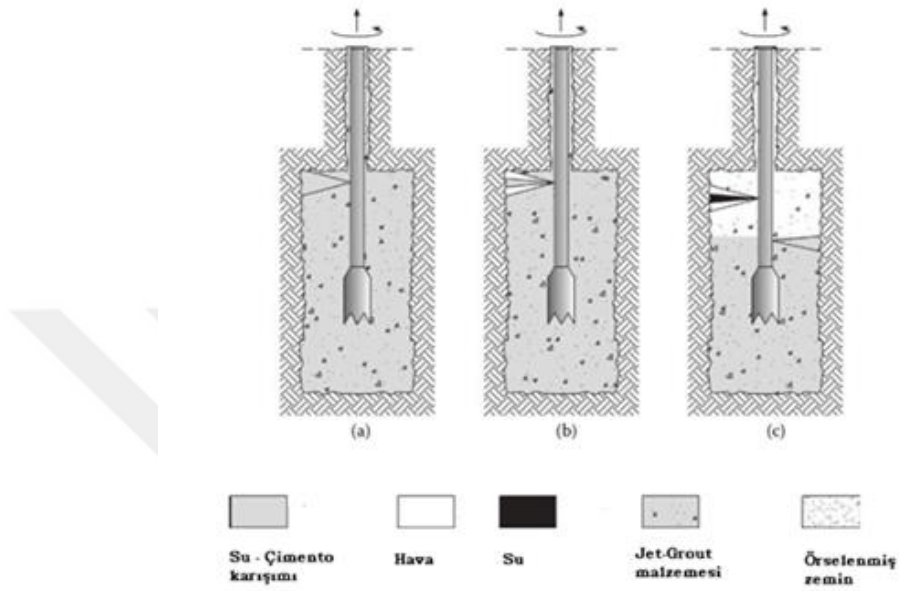
Bu teknik yüksek kolon çaplarını daha kısa sürede ve daha ekonomik olarak elde edebilmek için geliştirilen bir tekniktir. Jet Grout kolon imalatında tijler (15 cm çapta) projede belirlenen noktaya indirilir ve tijlerin ucunda yeralan büyük çaplı nozullardan yüksek basınçta Jet Grout harç ile hava karışımı püskürtülür. Şekil 3.5'te basit Süper Jet Grout tekniği şematik gösterimi verilmiştir (Küsin, 2009).



Şekil 3.5. Süper Jet Grout tekniği (Küsin, 2009).

Süper Jet Enjeksiyonu tekniğinde tij dönme ve çekme hızları diğer Jet Grout yöntemlerine kıyasla oldukça düşüktür. Süper Jet Grout kolonlarının imalatında

ortalama dönüş hızı 3-4 devir/dakika, çekme hızı ise 7 mm/dakika olarak uygulanır. Jet Grout harcı 40 MPa basıncı ile 400 cm çapa ulaşılabilinmektedir (Bell ve ark. 2003). Yöntemlerin şematik çalışma prensiplerinin gösteren şema Şekil 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.7’de standart yöntemler ile oluşturulmuş Jet Grout kolonlarına ait görseller bulunmaktadır.



Jet Grout imalatında seçilecek tekniğe göre kullanılacak malzemelerin parametreleri de farklılık arz etmektedir. Jet Grout imalatı esnasında kullanılacak parametrelere ait sınır değerler Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Jet Grout teknikleri imalat parametrelerine ait sınır değerleri (Lunardi, 1977).

Kullanılacak teknik	Enjeksiyon tipi	Enjeksiyon basıncı (bar)	Nozzule adeti ve çapı (adet-mm)	Tij çekme hızı (cm/dak)	Tij dönme hızı (rpm)	Su/çimento oranı	Pompa kapasitesi (lt/dak)
Jet 1	Çimento	400-500	1-2x2-5	50-100	5-15	1,0-1,5	70-600
	Çimento	400-500	1-2x2-5	10-30	4-8	1,0-1,5	70-600
Jet 2	Hava	10-12	-	10-30	-	-	4000-10000
	Çimento	50-100	1-2x2-5	6-15	4-8	1,2-1,5	80-200
Jet 3	Hava	10-12	-	6-15	-	-	4000-10000
	Su			6-15	-	-	40-100

3.9. Jet Grout Yönteminin Çalışma Parametreleri

Jet Grout yönteminde; oluşacak kolon kesitlerin ebatları, zeminin özelliklerine bağlı olduğu gibi; enjeksiyon sisteminin türüne, enjeksiyon basıncına, nozzle çap ve adetine, tij dönüş ve çekme hızına, su/çimento oranına, pompa kapasitesi gibi Jet Grout sistem parametrelerinde bağlıdır. Jet Grout tekniğinin en temel işletim parametreleri Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Jet Grout tekniğinin temel işletim parametreleri (Xanthakos, 1994).

Jet Grout sistemleri				
Parametreler	Birim	Tek akışkanlı (Jet1)	Çift akışkanlı (Jet 2)	Üç akışkanlı (Jet 3)
<u>Enjeksiyon Basıncı</u>				
Su	(Bar)	ÖY (200-300)	ÖY (200-300)	300-500
Enjeksiyon Harcı	(Bar)	300-600	300-600	400-600
Sıkıştırılmış Hava	(Bar)	Yok	8-12	8-13
<u>Akış Oranları</u>				
Su	(lt/dk)	ÖY	ÖY	70-100
Enjeksiyon Harcı	(lt/dk)	60-150	100-150	150-250
Sıkıştırılmış Hava	(lt/dk)	Yok	10-30000	10-30000
<u>Püskürtme Ağzının Büyüklüğü</u>				
Su	(mm)	ÖY(1,2-2,4)	ÖY(1,6-2,4)	1,8-2,5
Enjeksiyon Harcı	(mm)	1,6-3,0	2,0-4,3	3,5-6,0
<u>Püskürtme Ağzının Sayısı</u>				
Su		ÖY (1)	ÖY (1)	1-2
Enjeksiyon Harcı		2-6	1-2	1
<u>Tijin Dönme Hızı</u>				
	(Devir/dk)	10-30	10-30	10-30
<u>Tijin Bir Adım İçin Çekilme Süresi (4 cm)</u>				
	sn.	8-15	10-20	15-25
<u>Kolon Çapı</u>				
Çakıllı/kumlu zemin	(m)	0,6-1,0	1,0-2,0	1,5-2,5
Killi zeminler	(m)	0,5-1,0	1,0-1,5	1,0-2,0
<u>Su/Çimento Oranı</u>				
	W/C	0,8:1-2:1		
<u>Tüketilen Çimento Miktarı</u>				
İslah edilen zemin birim hacim ağırlığı	kg/cm ³	400-800	400-800	400-800
<u>Zemin Elemanının Mukavemeti</u>				
Çakıllı/kumlu zemin	kg/cm ²	100-300	75-250	75-250
Killi zeminler	kg/cm ³	15-100	15-85	15-75

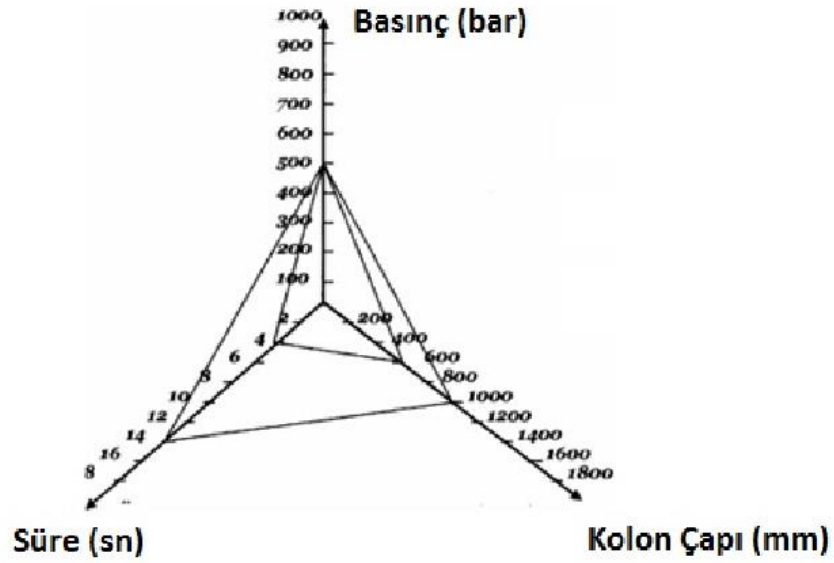
Not: ÖY- Ön yıkama

3.9.1. Zemin özellikleri

Jet Grout yöntemi zemin iyileştirme çalışmaları arasında birçok zemin grubunda uygulanabilirliği nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir.

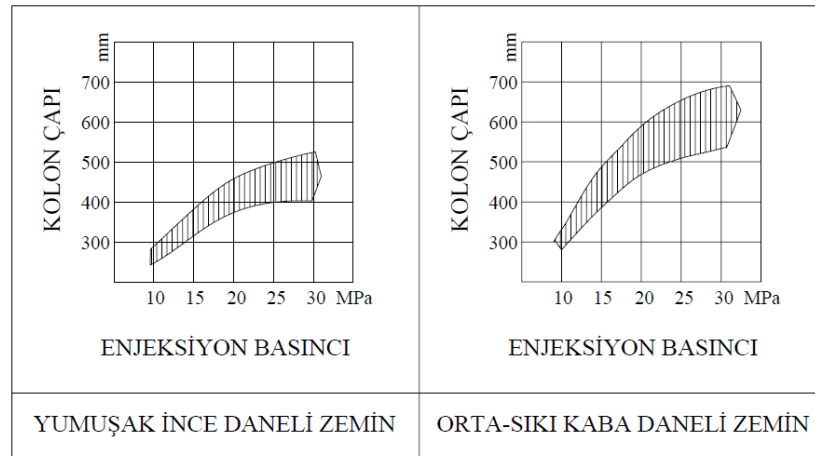
3.9.2. Enjeksiyon basıncı

Enjeksiyon basıncı imal edilmek istenilen kolon çapının elde edilmesi için uygulanması gereken basınçtır. Şekil 3.8.'deki basınç, bekleme süresi ve kolon çapı arasındaki grafiksel bağlantıdan yola çıkılarak kolon enjeksiyon basıncı arttıkça kolon çapının da arttığı söylenebilir.



Şekil 3.8. Kolon çapı-Enjeksiyon basınç-Bekleme süresi ilişkisi (Melegary ve Garassino, 1997)

Yapılan çalışmalarda enjeksiyon basıncı ile kolon çapı arasında birbirini etkileyen bir bağlantı olduğu belirlenmiştir. Jet Grout kolonun oluşturulması için geçen süre kolonun homojen çapta imal edilebilmesini etkilemektedir. Şekil 3.9'da imal edilen kolon çapı-enjeksiyon basıncı arasındaki bağlantı verilmiştir (Langbehn, 1986; Erdil, 2008).



Şekil 3.9. Jet Grout kolonu - enjeksiyon basıncı arasındaki bağlantı (Langbehn, 1986).

Unutulmaması gereken bir diğer nokta ise; enjeksiyon basıncının seçilmesinde enjeksiyon basıncının pompadan çıktıktan sonra hortumlarda, sürme borusu ve püskürtme ağzında basıncının %5~10'una yakın mertebede basınç kaybına neden olacaktır.

3.9.3. Dönme ve çekme hızı

Jet Grout imalatında dönme hızı; delgi makinesinde yer alan tijlerin dönme hızıdır. Genellikle 10-20 devir/dakika değerleri arasında değişir. Zemin parametreleri ve birim hacime enjekte edilecek grout miktarına göre Jet Grout çekme hızı hesaplanır. Çekme işlemi delici makinenin imal yöntemine göre kademeli ya da sürekli olarak gerçekleştirilebilir. Kademeli çekmede işleminde; 4 cm çekme ve 6-10 sn bekleme süresi ile en verimli sonuçlar elde edilir (Melegary ve Garassino, 1997).

Tablo 3.4'te iyileşen zemin grubuna bağlı olarak enjeksiyon basıncı ve çekme hızı farklı araştırmacılar tarafından kabul gören değer verilmiştir.

Tablo 3.4. Püskürtme gövdesinin çekme hızı - zemin arasındaki ilişki (Erdil, 2008).

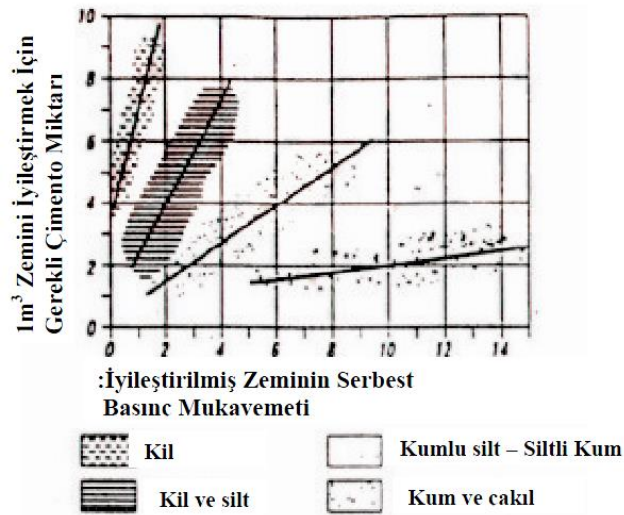
Zemin	Enjeksiyon Basıncı (Mpa)	Çekme Hızı (cm/dk)	Islah edilen hacim (m ³ /m)	Kaynak
Yumuşak Kaya	39,3-48,9	2,3-9,4	0,1-0,2	Yahiro ve ark. 1975
Sıkı Kum ve Çakıl	39,3-48,9	3-11,7	0,1-0,2	Yahiro ve ark. 1975
	34,5-41,4	30,5	0,3-1,8	ENR. 1986
	39-48,9	13,2-23,1	0,2-0,2	Yahiro ve ark. 1975
	20-40	9,9-50	0,1-1,8	Welsh ve ark. 1986
Orta Sıkı Kum	38,6	91,4	0,2	ENR. 1974
	30,3	39,9	0,3	Aschierive ark.1973
	39,3-48,9	50-119,9	0,1-0,6	Yahiro ve ark. 1973
	5,5-6,9	39,9-59,9	0,2-1	Broid ve ark. 1981
	39,3-48,9	23,1-28,7	0,2-0,2	Yahiro ve ark. 1975
	39,3-48,9	31-38,6	0,2-0,3	Yahiro ve ark. 1975
Gevşek Kum	20-40	9,9-42,2	0,1-1,5	Welsh ve ark. 1986
Kil ve Silt	30,3	39,9	0,3	Aschierive ark.1986
	39,3-48,9	50-119,9	0,1-0,5	Broid ve ark. 1981
	5,5-6,9	39,9-59,9	0,1-0,4	

3.9.4. Nozzle ap ve adedi

Püskürtme memeleri (nozzle) sayısı kullanılan jet enjeksiyonu tekniğine göre değişmektedir. Örneğin tek akışkanlı jet tekniği uygulandığında bir ya da iki nozzle varken, iki akışkanlı jet uygulamasında genel olarak tek nozzle kullanılır. Nozzle apı küçüldükçe enjeksiyon harcının yayılma miktarı artmaktadır. Nozzle sayısı oranında enerji kaybı oluşacağından sayı azaldıkça enerji kaybı da azalır (Kkli, 2008).

3.9.5. Su/imento oranı

Uygulamalarda genel olarak Jet Grout yönteminde enjeksiyonun hazırlanması için gerekli su-imento oranı 1 ve özgül ağırlığı 1410-1570 kg/m³ olması yeterlidir. Bu oran seçilen Jet Grout tekniğine ve hedeflenen kolon mukavemetlerine göre değişiklik gösterir. Fakat su/imento oranının 0,7' nin altına düşmesine izin verilmez (Kusin, 2009). şekil 3.10.'da verildiği gibi kil zeminde çakıl zemine göre kullanılan imento miktarı fazla olmakta ama kil zeminde meydana gelen mukavemet çakıl zeminden az olmaktadır.



şekil 3.10. Çimento miktarı - zemin grubuna bağlı basınç mukavemet değişimi (Kkli, 2008).

Ayrıca Tablo 3.5.'te zemin tipine göre imento yüzde oranları verilmiştir. Jet Grout karışımına ihtiyaa göre katkı malzemesi ilave edilebilmektedir. Büyük debide zemin

suyu bulunan ortamlarda 1-3 oranında sodyum silikat katkısı ilavesi kullanılabilir (Kusin, 2009).

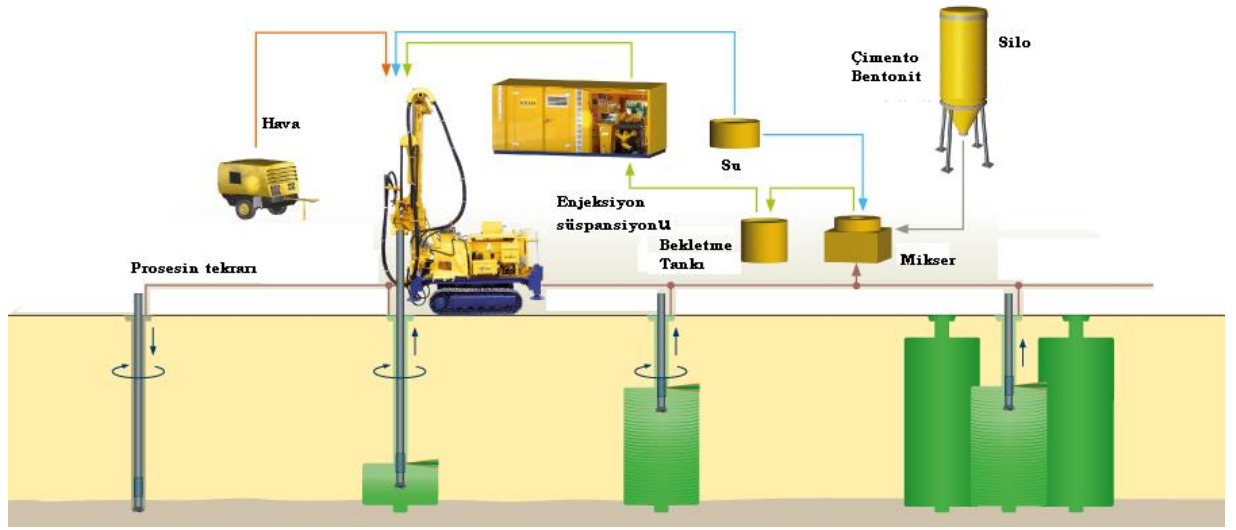
Tablo 3.5. Zemin tipine göre çimento miktarları (Özaydın, 1970).

Zemin Tipi	Ağırlıklı olarak çimento yüzdesi
İnce kırılmış kaya	0,50-1,00
İyi derecelenmiş Kumlu kil çakılları	2,00-4,00
İyi derecelenmiş kum	2,00-4,00
Kötü derecelenmiş kum	4,00-6,00
Kumlu kil	4,00-6,00
Siltli kil	6,00-8,00
Ağır kil	8,00-12,00
Organik zeminler	10,00-15,00

Enjeksiyon harcında en iyi sonuçların alındığı su-çimento oranı 0,7-0,8 limitleri arasındadır. Enjeksiyonda su-çimento karışımına akışkanlığını ve işlenebilirliğini artırmak için %2-3 oranında bentonit ilave edilir. Böylelikle su-çimento karışımı yükseltilmiş olur. Su-çimento oranındaki artış serbest basınç mukavemetinde büyük bir değişikliğe neden olmaz. Bu katkı maddelerin enjeksiyon harcına katılımı çimento ağırlığının %0,03-%0,04 arasında olması gerekmektedir (Küçükali, 2008; Okyay, 1987).

3.10. Jet Grout Yöntemi Ekipmanları

Jet Grout imalatında kullanılacak tekniğe göre Jet Grout hazırlanışı ve tesisin kurulumu farklılık göstermektedir. Şekil 3.11.'de şematik olarak tipik Jet Grout uygulama ekipmanları verilmiştir.



Şekil 3.11. Tipik Jet Grout yöntemi ekipman şeması (WEB-4).

Sistem türlerine göre Jet Grout tesisi kurulum aşamaları;

- *Tekli akışkanlı sistemlerde:* Tesiste malzeme deposu, karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası bulunmalıdır.
- *Çiftli (hava) akışkanlı sistemlerde:* Tesiste malzeme deposu, karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası ve hava kompresörü bulunmalıdır.
- *Çifli (su) akışkanlı sistemlerde:* Tesiste malzeme deposu, karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası, yüksek basınçlı su pompası ve enjeksiyon şerbeti pompası bulunmalıdır.
- *Üçlü akışkanlı sistemlerde:* Tesiste malzeme deposu, karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası ve hava kompresörü bulunmalıdır (Kusin, 2009; TS EN 12716).

3.10.1. Delgi makinesi

Projede belirlenmiş olan derinliğe kadar Jet Grout kolonun imal edebileceği nitelikte delgi makinesidir. Şekil 3.12.'de tez çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş delgi makinesi görseli verilmiştir.



Şekil 3.12. Delgi makinesi

3.10.2. Pompa ünitesi

Projede belirlenmiş olan çapta kolon oluşturmak için gerekli olan basınçta malzemeyi basabilecek yüksek basınçlı pompa bulunduran ünedir. Pompalar genellikle 300~500 beygir güce sahip klasik enjeksiyon sistemlerinde kullanılan pompalardan olmamalıdır. Gelişen teknoloji ile su pompalamak için 60 MPa, çimento harcının pompalanması için 80 MPa mertebelerinde pompalar imal edilmektedir. Şekil 3.13.'te tez çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş pompa ünitesi görseli verilmiştir.



Şekil 3.13. Pompa ünitesi görseli

3.10.3. Mikser ünitesi

Projede belirlenmiş olan Jet Grout enjeksiyon karışımını istenen reçete oranında dijital olarak ölçecek ve karıştıracak mikserin yanısıra dinlendirici denilen ekipmandan oluşan bir sistemdir. Şekil 3.14'te tez çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş mikser ünitesi görseli verilmiştir.



Şekil 3.14. Mikser ünitesi görseli

3.10.4. Çimento silosu

Projede belirlenmiş olan çimento miktarında depolama kapasitesine sahip ve Jet Grout mikser ünitesini istenilen miktarda çimento temin edebilecek nitelikte bir eleman olmalıdır. Silo istenir ise önyıkama "*prewashing*" gerçekleştirilebilecek nitelikte olmalıdır. Şekil 3.15.'de tez çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş çimento silosu görseli verilmiştir.



Şekil 3.15. Çimento silosu görseli

3.10.5. İlave ekipmanlar

String: Enjeksiyon malzemelerinin istenen derinliğe indirebilmesini sağlayan ekipmandır.

Rig: Enjeksiyon ve delme takımının taşınmasına ve takımın hareketini sağlamayan ekipmandır.

Monitör: Delgi ucunu ve nozulu içinde barındıran ekipmandır. Enjeksiyon malzemesini Jet Grout haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücüdür.

Nozzule: Projede belirlenen çapın sağlanabilmesi ve jetin etkinliğinin azalmaması için jet akışkanın dağılmadan mümkün olduğunca uzun mesafeye ilerleyebilmesini sağlayan ekipmanlara nozzule denilmektedir.

Tij: Yüksek basınçlı çimento karışımını monitöre ileten bir kanaldan ibarettir.

3.11. İlgili Parametrelerin Hesaplanması

3.11.1. Çimento miktarının hesabı

Derinliği 1 m olan örnek alanınıslah edilmiş zemin hacmi (V) aşağıdaki eşitlikte (Denklem 3.1) verildiği gibi basit hacim hesabı ile bulunur.

$$V = \pi . r^2 . h \quad (3.1)$$

Bir metre derinlikte iyileşmiş zeminde kullanılan çimento miktarı; iyileşecek zemin hacim ile kullanılacak çimento miktarının çarpımı ile belirlenmektedir. Organik madde içeren zeminlerde çimento miktarı 450 kg/m³-700 kg/m³ arasında olabilir. Grout içindeki çimento hacmi ise çimento özgül ağırlığı 2,93 kg/lt kabul edilirse, çimento hacmi ile özgül ağırlık çarpımı ile elde edilir. Su çimento oranı bölümünde yer alan Tablo 3.5.'ten yola çıkarak su çimento oranı belirlenir. Genel olarak su/çimento oranı 1 kabul edilirse, suyun özgül ağırlığında 1 kg/lt kabul edilirse, su hacmi basit olarak ağırlık/özgül ağırlık prensibi ile hesaplanır. Grout malzemesini oluşturan su ve çimento hacmi hesaplandığına göre, iki değer toplanarak grout hacmi elde edilmiş olur. Çimento miktarının belirlenmesi, projede gerek duyulan mukavemet değerine göre hesaplanırsa da farklı zemin profilleri için kullanılan çimento miktarı aralıkları Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Farklı zeminlerde imal edilen Jet Grout kolonlarında kullanılan çimento miktarı (Burke, 2004).

Zemin Türü	Kolondaki Çimento Miktarı (kg/m ³)
Kumlar	150-250
Siltler ve Siltli Kumlar	200-275
Killer	250-350
Organik Siltler ve Turbalar	300-400

Yapılan bazı çalışmalarda suda çözünür klorür içeriği 500 ppm' den az ise genellikle beton için aşındırıcı kabul edilir. Sülfat miktarına göre çimento türü kullanımı Tablo 3.7.'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Sülfat miktarına göre çimento kullanımı (Yerson, 2009).

Su içindeki sülfat mg/lt	Sülfat riski	Kullanılacak çimento türü	Maksimum su/çimento oranı
0-150	İhmal edilebilir	--	---
150-1500	Orta	II	0,50
1500-10.000	Ciddi	V	0,45
>10.000	Çok Ciddi	V+Puzzolan	0,45

3.11.2. Tij çekme hızı hesabı

Tij çekme hızı hesaplanmasında genel prensip olarak 1m' lik uzunluktan 1 dk süre içerisinde çıkan enjeksiyon miktarının bilinmelidir. Jet Grout ekipmanında yer alan nozzleden (2 mm) Jet Gout enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.2) ile hesaplanmaktadır.

$$V = \sqrt{2.g.h} \quad (3.2)$$

Bu denklemde;

h : Hidrostatik yükseklik,

g : Yerçekimi ivmesi olarak tanımlanmıştır.

Hidrostatik yükseklik (h) enjeksiyon basıncının Jet Grout malzemesi özgül ağırlığına oranı şeklinde hesaplanabilir (Denklem 3.3).

$$h = \frac{\text{Enjeksiyon Basıncı}}{\text{Grout Özgül Ağırlığı}} \quad (3.3)$$

3.11.3. Nozzle'dan enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı hesabı

Nozzle'dan çıkan malzeme çıkış hızı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.4) yardımı ile hesaplanır.

$$V = \sqrt{2.g.h} \quad (3.4)$$

3.11.4. Enjeksiyon malzemesi miktarı (Q) hesabı

1 sn sürede bir nozzle'dan çıkan enjeksiyon malzemesi miktarı (Q) aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$Q = V.A \quad (3.5)$$

Bir metre Jet Grout kolonu imalatı için gerekli zaman; bir metre kolon içeriğindeki enjeksiyon malzemesi hacminin 1sn içinde tek nozzle'dan püskürtülen enjeksiyon malzemesi miktarına oranı olarak hesaplanmaktadır. Bu süre aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{\text{Enjeksiyon Hacmi}}{\text{1sn'de Nozzleden Çıkan Enjeksiyon Miktarı}} \quad (3.6)$$

3.11.5. Püskürtme enerjisi (E) hesabı

Püskürtme enerjisi (E) aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.7) ile hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{(PQ)}{V_{\text{çekme}}} \quad (3.7)$$

Bu denklemde;

P : Püskürtülen Jet Grout basıncı,

Q : Jet Grout malzeme debisi,

$V_{\text{çekme}}$: Çekim hızı (m/sn) olarak tanımlanmıştır.

Genel olarak Tablo 3.8.'de farklı nozzel çapları ve farklı basınçta çalışıldığında nozzeldan geçen grout debisi belirlenmiştir (Melegary-Garassino, 1997).

Tablo 3.8. Farklı nozzel çapları ve basınçta nozzeldan çıkan grout debisi (Melegary-Garassino, 1997).

	Nozzle apı (mm)														
	1,4	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Bası	Bir Nozzlu’dan geen Grout miktarı (Debi)														
-	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s	lt/s
(Bar)	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
300	18	24	30	37	63	73	83	96	114	148	188	232	280	334	392
350	20	26	32	40	58	78	90	103	123	123	203	250	303	380	423
400	21	27	35	43	62	75	94	110	131	131	217	268	324	385	452
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	139	230	284	343	409	450
500	23	31	39	48	69	94	108	123	147	147	242	289	352	430	506
550	25	32	41	50	72	98	113	129	154	154	254	314	380	452	530
600	26	34	42	52	75	103	118	134	161	161	255	326	397	472	554

3.12. Kontroller ve Testler

Jet Grout yönteminin kullanımında imalatın öncesi ve bitiminde yöntemin doğru kullanıldığında ve sonucunda proje değerlerine sahip kolonlar elde edilip edilmediğini bir dizi testler ile denetlenmesi gerekmektedir. Tablo 3.10.’da imalat öncesi ve sonrasında yapılması gereken deneyler ve kontrol edilmesi gereken parametreler verilmiştir. Ayrıca TS EN 12716’da ek c’de dolaylı deneyler ile kazık kontrolü desteklenebileceği belirtilmiştir. Tablo 3.9.’da verilen bilgiler TS EN 12716’ dan yazar tarafından derlenmiştir.

deneme kolonları imal edilecektir. Ardından deneme kolonunun çevresi kazılarak projede hesaplanan değrede imal edilen kolon çapı kontrol edilecektir. Kontrol sonrası imalat parametreleri (nozzle çapı ve sayısı çalışma basınç aralıkları, takım çekme hızları, ... vb.) değiştirilerek projede istenen kolon çapları için gerekli olan imalat parametreleri tespit edilir ve daha sonra imalata geçilecektir. Şekil 3.16.'da Jet Grout deneme kolon çapı kontrolü verilmiştir.



Şekil 3.16. Jet Grout deneme kolonu çap kontrolü (Çınar, 2014).

3.12.2. Karot numune alınması ve serbest basınç deneyi

Jet Grout imalatından 28 gün sonra kolon uç noktasından 0,5 m kalana kadar karot numunelerin alınır. Karot numuneleri TS 10465'te belirtilen şekilde alınmalıdır. Alınan numuneler yükseklik/çap oranı 2 olacak şekilde deneye hazırlanmalıdır. Numune üzerinde serbset basınç ve elastiste modülü tayini yapılır. Şekil 3.17'de tez

çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş arazide Jet Grout kolonundan numune alma işlemi görseli verilmiştir.



Şekil 3.17. Jet Grout kolonlarından alınmış karot numune alma

Numune, imalat esnasında kolon ıslakken alınmış ise piston, prizini almış ise karot numune olarak alınır (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003). Daha sonra serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme deformasyon grafiğinden yola çıkılarak, E_{JG} tayin edilebilir (Sağlam ve ark., 2002).

Görseli verilmiş olan numuneler daha sonra akredite laboratuvar ortamında serbest basınç mukavemetleri ölçülmesi için başlık oluşturularak deney düzeneğine yerleştirilmiş ve Tablo 3.10.'da verilen değerler elde edilmiştir.

Tablo 3.10. Numune serbest basınç dayanımları

Numüne No	Karot çapı	Karot yükü	Boy/Çap oranı	Kırılma Yükü	Basınç mukavemeti (N/mm ²)	Küp Basınç mukavemeti (kgf/cm ²)
1	98	98	1,00	31,6	4,19	42,78
2	98	98	1,00	32,3	4,28	43,69
3	98	98	1,00	47,0	6,23	63,59
4	98	98	1,00	33,7	4,47	45,59
5	98	98	1,00	52,8	7,00	71,44
6	98	98	1,00	50,8	6,74	68,73

Şekil 3.18.'de tez çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında çekilmiş serbest basınç deneyi öncesi numaralandırma ve başlık oluşturma aşamalarının görseli verilmiştir.



Şekil 3.18. Jet kolonlarından alınmış karot numunenin deneye hazırlanması

Karot numunesi alımında oluşabilecek kayıplar (erime) gözlemlenmiştir. Yapılan bir araştırma sonucu numune kayıp nedenleri;

- Yeraltı su seviyesinin (YASS) altında Jet Grout kolonların mukavemet kazanma hızı, atmosfer koşullarına göre daha yavaş olacağından karot alımı esnasında numunelerdeki aşınma,
- Devir daim suyunun kullanımı ile su basıncının numune üzerinde ciddi kayıplara yol açması,
- Numune alımı esnasında kullanılan delgi takımlarında oluşan eksantrik kuvvet ile (yalpalama etkisi) numunelerde örselenme oluşması olarak sıralanmıştır (Öz, 2015).

3.12.3. Jet Grout kolonu yükleme deneyi

Jet enjeksiyonlu elemanlar üzerinde kazıkların kontrolü amacıyla yapılan yükleme deneyleri uygulanabilir. Jet enjeksiyon kolonları taşıyıcı eleman olarak tasarlanmış ise üzerinde çekme ve yükleme deneyleri yapmamız gerekir. Yükleme deneyine test kolonlarında deformasyon gözlemlenene kadar ya da maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar devam edilir. Uygulanacak deney yükü en az proje yükü kadar olmalı uygulamada ise genel olarak proje yükünün 1,5 katı alınmaktadır (Durgunoğlu, 2008). Deney sırasında yük-oturma yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri elemana statik eksenel basınç yükü yüklenerek hazırlanır. Şekil 3.19.'da basit kolon yükleme deneyi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.19. Basit kolon yükleme deneyi (Tachir, 2015).

Deneyin sahada uygulamasında kullanılan ekipmanlar;

- Hidrolik krik,
- Hidrolik basınç pompası,
- Kazığa verilecek eksenel yüke maruz reaksiyon kirişleri,
- Manometre (yük tayini için),
- Deformasyon ölçme sistemleri olmak üzere dört elemandan oluşmaktadır.

Deney uygulanması esnasında;

- Servis yükünün yüklenmesi ile meydana gelen deformasyonun 1,5 katını,
- Yük boşaltıldıktan sonra oluşan kalıcı deformasyon toplam deformasyonun %50'sini,
- Kolonun başı toplam oturmanında 1 cm'i geçmemesi istenir (Düzceer, 2004).

Deneyde uygulanan statik yük, kolon başlığı ve reaksiyon kirişleri yardımıyla hidrolik krikoya iletilir. Deneyin hassasiyeti için kolon deformasyonlar, kolondan ve basınç elemanlarından etkilenmeyecek şekilde bir hazırlanmış ölçüm sistemiyle

ölçülmelidir (Kusin, 2009). Deney uygulanırken “ASTM D 1143-81” standardında belirtilen yükleme için uygun maddeler kullanılabilir.

Tablo 3.11.’de Örnek bir proje için yapılmış olan kolon yükleme deney tutanağı verilmiştir. Deney esnasında yükleme, kademeli olarak bekleme süreleri dikkate alınarak yapılmıştır. Tasarım yükünün %25 kademeli olarak ilk yüklemesi yapılmış daha sonra tasarım yükünün 1,5 katı olarak hesaplanan deney yükü yine kademeli olarak yüklenmiştir.

Tablo 3.11. Teknik şartnamede belirtilen standart yükleme/boşaltma süreleri ve yük yüzdeleri (Kaymaçı, 2014).

Yük Yüzdesi (%)	Minimum Bekleme Süresi
0,25	1 saat
0,50	1 saat
0,75	1 saat
0,50	1 saat
0,25	1 saat
0,00	1 saat
0,25	1 saat
0,50	1 saat
0,75	1 saat
1,00	1 saat
1,25	1 saat
1,50	12 saat
1,25	1 saat
1,00	1 saat
0,75	1 saat
0,50	1 saat
0,25	1 saat
0,00	1 saat

3.12.4. Süreklilik deneyi

Kolonun boy ve kesitindeki sürekliliği kontrol etmek amacıyla kolon süreklilik (*Pile Integrity*) deneyi uygulanır. Kazık-kolon süreklilik deneyinde kolon başlarından küçük bir çekiş ile darbe etkisi verilmektedir. Oluşan darbenin ivme değeri, kolonda teşkil edilen bir akselometre ile tanımlanır ve sayısallaştırılıp bilgisayarlarda depolanır. Kolonda oluşan deformasyon-malzeme miktarı ve kolon ucundan alınan sinyaller algılanarak hız sinyali şeklinde depolanır. Depolanan sinyal hıza bağlı bir değişken olmasından geçen zamanın tahmininde kullanılır. Daha sonra sinyal, derinliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülür ve alınan yansımaların derinliği tespit

edilir, Yansıma derinliği (X), aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.8) ile hesaplanmaktadır (Rausche vd., 1988).

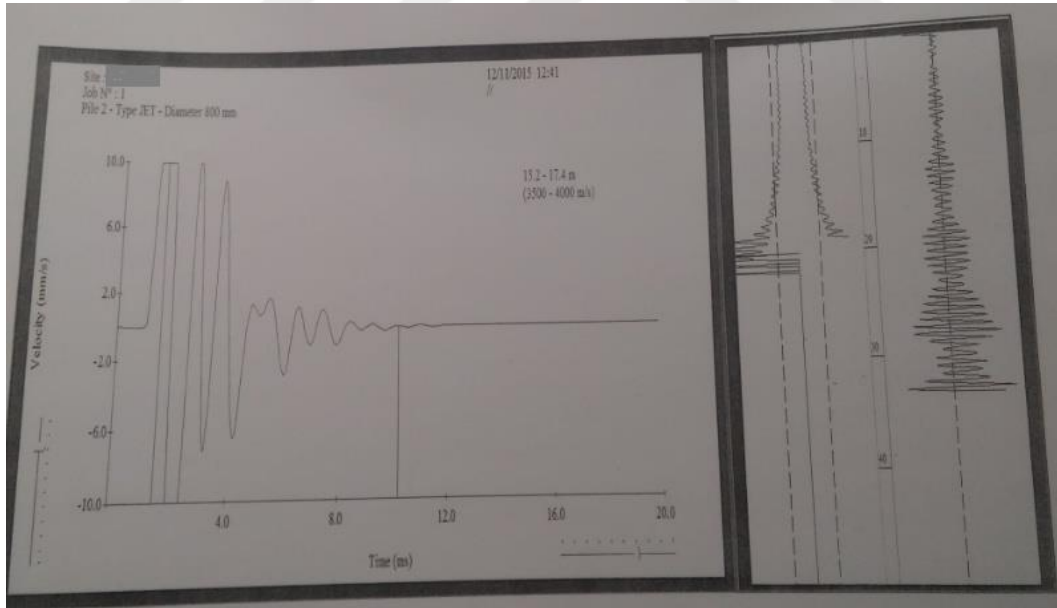
$$X = \left(\frac{1}{2} \cdot C \cdot t \right) \quad (3.8)$$

Bu denklemde;

t : Sinyal-darbe arası geçen süre

C : Yayılma hızı olarak tanımlanmıştır.

Yayılma hızı beton içerikli Jet Grout kolon için ortalama $C=3000-4500$ m/sn olarak kabul edilir (Rausche vd., 1988). Deney sonucunda derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği elde edilir. Şekil 3.20’de bu çalışması kapsamında saha çalışmaları esnasında elde edilmiş süreklilik deney sonuç grafiği örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.20. Süreklilik deneyi sonuç örnek grafik

3.13. Toleranslar

Jet imalatı esnasında dikkat edilmesi gereken sınır koşullar ve tolerans noktaları bulunmaktadır. Bunlar;

- Jet Grout imalatında kullanılan sondajın sapma miktarı ilk 20 m derinliğe kadar %2'den az olmalıdır. Derinlik arttıkça ve jetin yönü değiştikçe farklı toleranslar kullanılabilir.
- Jet Grout kolonlar, projede belirtilen konumlarından en fazla 75 mm mesafe içinde kalacak şekilde imal edilmelidir.
- Grouta ait su/çimento, oranı ağırlıkça 0,5 ila 1,5 arasında olmalıdır.
- Jet Grout kolonu imalatı sonrası minimum 24 saat geçmeden 2 çap genişlikte delgi işlemi yapılmamalıdır.
- Projeye zait şartnamelerde belirtilmediği sürece, sondaj başlangıç noktası proje konumundan 5 cm'den fazla şaşmamalıdır.
- Zeminde mevcut çatlamlara engel olmak için, jet enjeksiyonun üst püskürtücü ve arazi yüzeyi arasında düşey sondaj deliklerinde 0,5 m yatayda 2,0 m'ye kadar bir mesafe bırakılmalıdır.
- Jet Grout kolonlarının projeye uygun zemine işaretlenmesi harita mühendisleri tarafından yapılmalıdır.

3.14. Uygulama Dokümanları

Jet Grout imalatına başlamadan önce TS EN 12716 standartları çerçevesinde şantiyede belirli dokümanların bulundurulması gerekmektedir. Bu dokümanlar;

- Teknik şartnameler, proje uygulama çizimleri (kolonları çizimi, zemin profili, her kolonun yeri, kolon numaraları, yönü ve konum toleransları bulunan),
- Mevcut ise metot raporu-geoteknik rapor,
- Jet Grout tesisinin teknik şartnamesi,
- İmalat esnasında kullanılacak olan malzemelerin karakteristiklerinin tanımları,
- İmalat öncesi yapılan ön deneyler hakkında bir rapor,

- Yer altı engellerinin (drenaj ve diğer altyapı) konumları, boyutları ve yerlerinin belirlendiği projelerdir.

TS EN 12716 standardı referans alınarak, jet tesisi ve her bir Jet Grout kolonu için günlük imalat raporları düzenlenerek yetkili kişinin imzası ile hazırlanmalıdır. Raporlar Şekil 3.21. ve 3.22.'de verilen rapor örneklerinde verildiği gibi hazırlanmaktadır.



ŞANTIYE: BÖLGE TARİH: Pompa Tipi: VARDİYA: Kontrolör: İmza:																							
Kontrolör Talimatları																							
	Değer	Enjeksiyoncu																					
Su Basıncı (bar)			Enjeksiyon kontrolü <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 50%;">Zaman</th> <th style="width: 50%;">Yoğunluk (kg/L)</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </table>	Zaman	Yoğunluk (kg/L)																		
Zaman	Yoğunluk (kg/L)																						
Su Debisi (L/min)																							
Enjeksiyon Basıncı (bar)																							
Enjeksiyon debisi (L/min)																							
	Enjeksiyon A	Enjeksiyon B																					
Çimento/harman (kg)																							
Su/ harman (kg)																							
Harman kütlesi (kg)																							
Harman hacmi (L)																							
Enjeksiyon yoğunluğu (kg/L)																							
Enjeksiyoncu Denetimi																							
Sütun No	Sondaja başlama	Sondaj bitişi	Ön jet enjeksiyona başlama	Ön jet enjeksiyon bitişi	Jet enjeksiyona başlama	Jet enjeksiyon bitişi	Jet enjeksiyonu başlama zamanı	Jet enjeksiyonu bitiş zamanı	Su basıncı	Enjeksiyon basıncı													
Duraklamalar										Hazırlanan karışım (harman) sayısı													
Başlangıç Zamanı	Bitiş Zamanı	Kesinti türü						Diğer Gözlemler															
								Enjeksiyoncu:															
								İmza:															

Şekil 3.21.TS EN 12716 Standardı Jet Grout tesisi günlük rapor

ŞANTİYE:	BÖLGE:	Tesis Türü:
TARİH:		Kontrolör:
Vardiya:		İmza:

Kontrolör Talimatları										Sütunların Oluşturulma Sırası				
	Ön Jet enjeksiyonu		Jet enjeksiyon		Sondaj									
Sütün topuğu derinliği (m)														
Sütün başı derinliği (m)														
Püskürtücü çapı(mm)														
Kademe Uzunluğu (cm)														
Kademe zamanı (s)														
Dönme Hızı (rpm)														
Su Basıncı (bar)														
Su Debisi (L/ min)														
Enjeksiyon Basıncı (bar)														
Enjeksiyon Debisi (L/min)														
Hava Basıncı (bar)														

Sütün No.	Sütün eğimi	Sondaj başlangıç zamanı	Sondaj bitiş zamanı	Sondaj sonu derinliği	Önjet enjeksiyon başlangıç zamanı	Önjet Bitiş Zamanı	Jet Başlangıç Zamanı	Jet Bitiş Zamanı	Jet Bitiş Derinliği	Su Basıncı	Enjeksiyon Basıncı	Kademe Uzunluğu	Kademe Süresi	Hava Basıncı

Sütün No	Derinlik	Kirlenmiş Akışkan Yoğunluğu	Atık Numunesi Sayısı	Diğer Gözlemler

Sondör:

İmza:

Şekil 3.22. TS EN 12716 Standardı Jet Grout donanımı ile ilgili günlük rapor

3.15. Geleneksel Yöntemle Jet Grout Hesabı

Analiz sonuçları geleneksel yöntemler ile de mukayese edilmesi için ilk durum taşıma gücü, oturma hesabı, iyileşen zemin taşıma gücü ve oturma miktarı hesabı yapılmalıdır. Geleneksel yöntemde Jet Grout kolonlarına ait taşıma kapasitesi belirlendikten sonra oluşan yeni zemin grubunda beklenen yeni taşıma gücü ve oturma miktarı hesaplanmalıdır.

3.15.1. Jet Grout kolonlarının taşıma kapasitesi

Jet Grout kolonu tasarımı yapılırken sıklıkla kazık eleman olarak kabul görülür ve tasarım gerçekleştirilir. Kazık elemanlardan farklı olarak Jet Grout kolonları imal edildikleri bölgede zeminin mukavemet ve karakteristik özelliklerinde değişime neden olmaktadır. Yani zemin Jet Grout kolon imalatı sonrası özelliğinin değiştirilerek yeni bir zemin tanımına gidilmesi gerekmektedir. Ayrıca kazık elemanlar üst yapı yüklerini direk taşıyarak zemine aktarırken Jet Grout kolonları taşıyıcı görevi görmez yük yeni tanımlı zemine direkt aktarılır. Tasarımda kazık eleman yaklaşımından ziyade yeni zemin özellikleriyle tasarım yapılması gerekmektedir.

Jet Grout kolonları, derin temel kabulü yapıp, kazık gibi çalıştırılacak ise aşağıda verilen adımlar izlenerek taşıma gücü hesabı yapılır. Jet Grout kolonuna ait taşıma gücü hesabı yapılırken öncelikli olarak çevre sürtünmesi ve uç direnci hesaplanır.

Öncelikle bir kolonunun göçme sınırına erişmeden taşıyabileceği en yüksek yük miktarı hesaplanmalıdır. Aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.9) yardımıyla Jet Grout kolonlarının göçmeden taşıyabileceği maksimum yük miktarı hesaplanabilir.

$$Q_d = Q_U + Q_f - W_k \quad (3.9)$$

Bu denklemde;

- Q_d : Göçme olmadan Jet Grout kolonunun taşıyabileceği yük
 W_k : Jet Grout kolon ağırlığı
 $Q_d + W_k$: Jet Grout kolonunun kırılma olmadan taşıyabileceği yük
 $Q_u + Q_f$: Jet Grout kolonu ucu en fazla taşıyabileceği yük
 Q_u : Jet Grout kolonu çevre sürtünmesi
 Q_f : Jet Grout kolonu adhezyon yükü olarak tanımlanmıştır.

Daha sonra Jet Grout kolon ucu taşıma kapasitesi hesaplanmalıdır. Jet Grout kolon uç taşıma yükü hesabı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.10)'te verilmiştir.

$$Q_u = A.q_d \quad (3.10)$$

Bu denklemde;

- A : Jet Grout kolonu uç kesit alanı
 q_d : Jet Grout kolonu oturduğu zeminin taşıma kapasitesi olarak tanımlanmıştır.

Ardından Jet Grout kolon sürtünme taşıma kapasitesi hesaplanmalıdır. Jet Grout kolonuna ait çevre sürtünmesi taşıma kapasitesi hesabı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.11)'te verilmiştir.

$$Q_f = A_s.f_s \quad (3.11)$$

Bu denklemde;

- A_s : Jet Grout kolonu zeminine gömülü yüzey alanı
 f_s : Jet Grout kolonu birim alanı ortalama sürtünme gerilmesi olarak tanımlanmıştır.

Jet Grout kolonu birim alanı P olarak kabul edilir ise $A_s = P \times D_f$ olacaktır.

Bu birim alana sürtünme kuvveti aşağıda verilmiştir (Denklem 3.12).

$$f_s = c_u + p_h \cdot \tan \delta \quad (3.12)$$

Bu denklemde;

c_u : D_f boyunca ortalama adhezyon

p_h : D_f boyunca ortalama yatay basınç olarak tanımlanmıştır.

Jet Grout kolonlarının göçmeden taşıyabileceği maksimum yük miktarını veren genel denkleme yeni denklemler yardımıyla yazarsak aşağıda verilen eşitliği (Denklem 3.13) elde etmiş oluruz.

$$Q_d = A \cdot q_d + A_s \cdot f_s - W_k \quad (3.13)$$

Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda zemin kohezyonsuz zemin olarak tanımlandıysa Jet Grout kolonunun taşıma gücü aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.14, 3.15 ve 3.16) ile hesaplanmaktadır.

$$Q_d = A \cdot q_d \quad (3.14)$$

$$q_d = P_0 N_q + K_2 \gamma 2 N \gamma B \quad (3.15)$$

$$P_0 = \gamma \cdot D_f \quad (3.16)$$

Bu denklemlerde;

P_0 : Kolon uç efektif basınç gerilmesi

K_2 : Geometri katsayısı (kare: 0,4-dairesel: 0,3)

B : Kolon çapı veya kenarı

N_q : Taşıma gücü katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Jet Grout kolonu kazık kabulü yapıldığında kesit dairesel formda kabul edilir. Hesapta K_2 değeri 0,3 olarak kullanılacaktır. Kolon çapı genellikle ihmal edilebilir derecede küçüktür. N_q değeri Tablo 3.12.'de verilen değerlerden seçilebilmektedir (Kumbasar ve Kip, 1985).

Tablo 3.12. Terzaghi taşıma gücü katsayıları (Bowles, 1996).

$\emptyset$	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
Nc	5,7	7,3	9,6	12,9	17,7	25,1	37,2	58,0	96,0	172,0	348,0
Nq	1,0	1,6	2,7	4,4	7,4	12,7	22,5	41,0	81,0	173,0	415,0
N_γ	0,0	0,5	1,2	2,5	5,0	9,7	19,7	42,0	100,0	298,0	1153,0

Kazık ağırlığı hesaplanırken, Jet Grout kolon boyu ve zemin içinde kalan uzunluğu eşit olacağından kolon en kesiti ile uç alanı aynıdır. Aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.17) yardımı ile hesaplanan W_k kazık ağırlığı genel formüle yerleştirildiğinde eşitlik (Denklem 3.18) elde edilebilmektedir.

$$W_k = A.L.\gamma_{kazık} = A.D_f\gamma \quad (3.17)$$

$$Q_u = W_k = A.D_f.N_q - W_k = A.D_f(N_q - 1) \quad (3.18)$$

Kohezyon içeriği olmayan zeminlerde $c_u = 0$ kabul edildiğinden birim alan çevre sürtünmesi aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.19 ve 3.20) ile hesaplanabilmektedir.

$$f_s = P_h \tan \delta \quad (3.19)$$

$$P_h = K.P_v \quad (3.20)$$

Bu denklemlerde;

P_h : Çevre sürtünmesi boyunca etkili kazık çevresine yatay basınç

K : Toprak basıncı katsayısı (yatay)

P_v : Eksenel basınç olarak tanımlanmıştır.

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılacak K ve d değerleri Tablo 3.13' ten seçilebilmektedir (Kumbasar ve Kip, 1985).

Tablo 3.13. Kazık malzemesi- δ Açısı-K katsayısı ilişkisi (Kumbasar ve Kip, 1985).

Kazık malzemesi	δ	K değerleri	
		Küçük relatif sıkılık	Yüksek relatif sıkılık
Çelik	20°	0,5	1,0
Beton	$\frac{3}{4} \emptyset$	1,0	2,0
Ahşap	$\frac{2}{3} \emptyset$	1,5	3,0

Jet Grout kolonları kazık kabulünde beton kazık olarak sınıflandırıldığından, hesaplarda beton kazıklar için kullanılan K ve d değerleri kullanılacaktır. Bu durumda birim alan çevre sürtünmesi hesaplanırken aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.21) kullanılmaktadır.

$$f_s = K \cdot P_v \tan \delta \quad (3.21)$$

Birim alan çevre sürtünmesi aşağıda verilen eşitlikte (Denklem 3.22) görüleceği gibi kolon boyu arttıkça doğrusal olarak eksel basınçta artacaktır. Kolona ait çevre sürtünmesi (Denklem 3.22 ve 3.23) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_f = P \cdot D_f \cdot f_s \quad (3.22)$$

$$Q_f = K \cdot \gamma \cdot D_f^2 \cdot D \cdot \tan \delta \quad (3.23)$$

Bu denklemde;

P : Kazık çevre uzunluğu olarak tanımlanmıştır.

Jet Grout kolonunun tek katmanlı zeminde uygulanması durumunda aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.24) kullanılacaktır.

$$Q_d = A \cdot \gamma \cdot (N_q - 1) + K \cdot \gamma \cdot D_f^2 \cdot D \cdot \tan \delta \quad (3.24)$$

Kolonun birden fazla katman bulunduran zemin profilinde yerleşmesi halinde çevre sürtünmesi her katmanda ayrı ayrı kolon yüzey alanı, ortalama eksenel basınç, toprak basıncı ve sürtünme açısı değerleri kullanılarak aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.25) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_f = \sum A_{sf} \cdot K_f \cdot P_{vf} \cdot \tan \delta \quad (3.25)$$

Kohezyon içermeyen zeminlerde Jet Grout kolonu taşıma gücü aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.26) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_d = Q_u \cdot Q_f - W_k = A \cdot \gamma \cdot D_f \cdot (N_q - 1) + \sum A_{sf} \cdot K_f \cdot P_{vf} \cdot \tan \delta \quad (3.26)$$

Kil içerikli zeminlerde Skempton kabulüne göre $D_f/B > 2,5$ şartı ve kolon en kesitleri daire, kare veya bunlara yakın formda olduğundan aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.27) kullanılarak hesaplanmaktadır. Jet Grout kolonu hesapta dairesel formda kazık olarak kabul edilmektedir.

$$N_c = 9 \cdot c \quad (3.27)$$

Katsayı olarak 9 değerinin alınabilmesi için kolonun taşıyıcı zemine $5B$ kadar girmesi gerekmektedir. Yukarıdaki eşitlikten (Denklem 3.28) yararlanılarak aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.28, 3.29, 3.30 ve 3.31) elde edilmektedir.

$$q_d = 9 \cdot c_1 + \gamma \cdot D_f \quad (3.28)$$

$f_s = c_u$ kabul edildiğinde;

$$Q_u = (9c_1 + \gamma D_f) \cdot A \quad (3.29)$$

$$Q_f = A_s \cdot c_u \quad (3.30)$$

$$Q_d = (9c_1 + \gamma D_f) \cdot A + A_s \cdot c_u - W_k \quad (3.31)$$

Kohezyon içeriği olan ya da olmayan zemin gruplarında $W_k = A \cdot \gamma \cdot D_f$ kabul edilebileceğinden kil içerikli zeminlerde kolon taşıma kapasitesi aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.32) ile hesaplanabilmektedir.

$$Q_d = 9 \cdot c_1 \cdot A + A_s \cdot \alpha \cdot c_2 \quad (3.32)$$

Bu denklemde,

c_1 : Jet Grout kolonu ucunda zeminin drenajsız kayma dayanımı

c_2 : Jet Grout kolonu çevresindeki zeminin drenajsız kayma dayanımı olarak tanımlanmıştır.

3.15.2. Jet Grout ile iyileşen zemin taşıma gücü hesabı

Jet Grout yöntemi ile iyileştirilmiş zemin son taşıma gücü hesabı yapılmak istendiğinde öncelikli olarak kolonlara ait çevre sürtünmesi ve uç direnci hesaplanır ve sonra net kolon taşıma (Q_{net}) miktarı eşitlik (Denklem 3.33) yardımıyla hesaplanabilir.

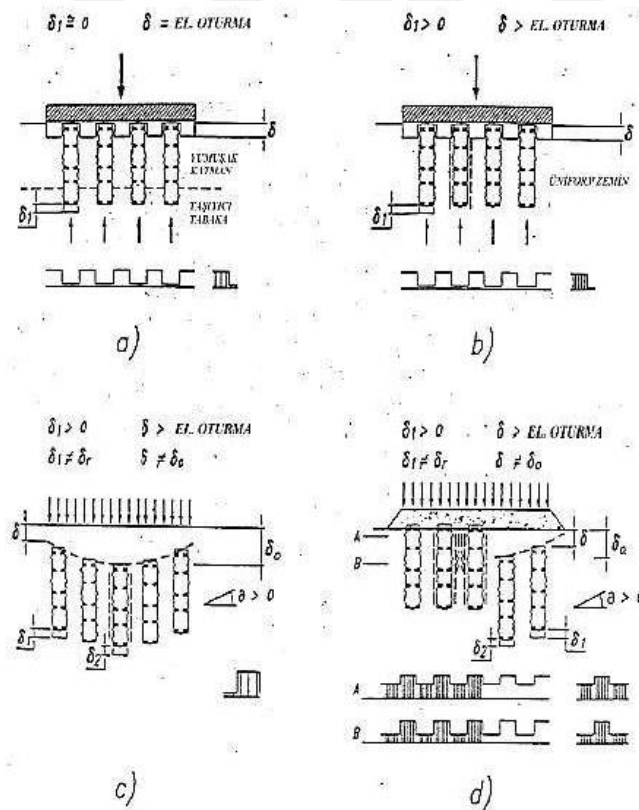
$$Q_{net} = \frac{Q_u}{3} + \frac{Q_\phi}{2} \quad (3.33)$$

İyileşen zemin taşıma gücü; ilk durum taşıma gücü (q_{ilk}), net kolonların taşıma gücü, iyileşen alan ve Jet Grout kolonları dikkate alınarak elde edilen eşitlik (Denklem 3.34) yardımıyla hesaplanabilir.

$$Q = \frac{(q_{ilk} \cdot (A_{slak} - A_{jet}) + Q_{net})}{A_{slak}} \quad (3.34)$$

3.15.3. Jet Grout ile iyileşen zemin oturma hesabı

Üst yapıdan aktarılan yük, rijit bir eleman ile Jet Grout kolonlarına iletiliyorsa ve kolonun ucu sağlam tabaka içerisinde yerleşmişse, yük direkt kolonlara aktarılır ve böylece kolonlarda elastik oturma olduğu kabul edilir. Yapıdan aktarılan yük, rijit bir eleman ile taşıyıcı özelliği olmayan bir zemin tabakasına yerleşmiş ise yükün yüzen elemanlar ile taşındığı kabul edilir. Böylece yükün bir kısmı kolonlara aktarılmakla beraber bir kısımda zemine tarafından taşınmış olur. Gerçek oturmanın, kolonların elastik oturma miktarından daha fazla olması beklenir. Yapı ile temel arasında gerekli kalınlıkta granüler malzeme içerikli bir tabaka oluşturulursa, yapıdan aktarılan yükün bir miktarı kolonlarla taşınırken; bir miktarı da zemin ile taşınmış olur. Granüler malzeme içerikli dolgu tabakası kolonların davranışını düzenli kılar (Kaymakcı, 2014; Doğu, 2005). Jet Grout kolonları ile tasarlanmış zeminler beklenen oturma koşulları Şekil 3.23.'te verilmiştir.

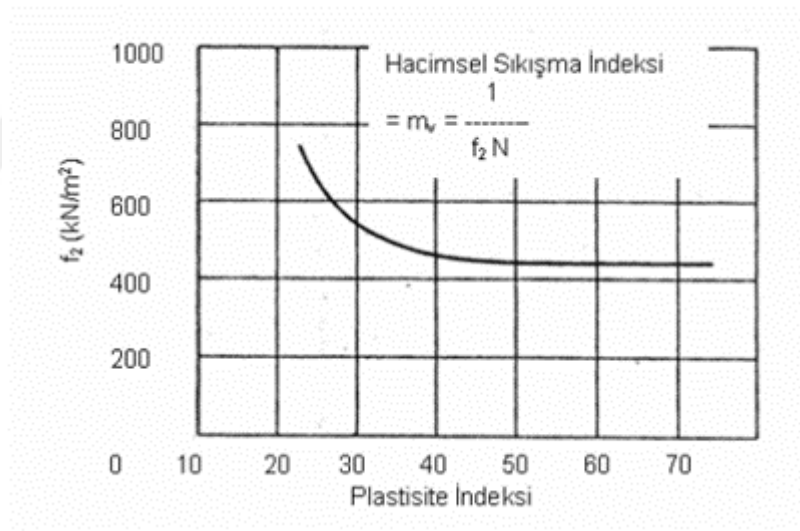


Şekil 3.23. Jet Grout kolonları ile tasarlanmış zeminler oturma koşulları

Oturma hesabında temelden B/3 derinliğinde sanal radye kabulü yapılır. Sanal radyenin gerilmelerinin ilk jeolojik basıncın %20'sine isabet ettiği derinlikte sanal radye arasında kalan sıkışabilir tabaka kalınlığına göre hesap yapılır (Tomlinson, M. 2001) Çalışma alanında elde edilen SPT N değeri ile Hacimsel sıkışma indisi (m_v) eşitlik (Denklem 3.35) yardımıyla hesaplanır. Stroud, 1975 tarafından I_p (plastisite indisi) için önerilen korelasyonla tespit edilmiştir (Tomlinson ve ark. 2008).

$$m_v = \frac{1}{(f_2 \cdot N_{30})} \quad (3.35)$$

Yapılan çalışmalar incelendiğinde oturma hesabı için Şekil 3.24.'te verilen SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği yardımıyla hesaplanmıştır (Stroud, 1975)



Şekil 3.24. SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği

3.15.4. Jet Grout ile iyileşen zemin yatak katsayısı-elastisite modülü hesabı

İyileşmiş zeminlerde elastisite modülünün, beklenen oturma miktarı hesaplanan elastisite modülünden büyük olması istenir (Doğu, 2005; Kaymacı, 2014). Aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.36) yardımıyla oturmaya bağlı yatak katsayısı hesaplanabilmektedir (Uzuner, 2000).

$$k = \frac{q}{y} \quad (3.36)$$

Bu denklemde;

k : Zeminde ait yatak katsayısı

q : Oluşması muhtemel gerilme

y : Zeminde oluşması beklenen oturma miktarı olarak tanımlanmıştır.

Kabul edilen sınır oturma miktarı için gerekli derinlikte elastisite modülü hesaplanabilir. B genişliğinde temelin $B/2$ derinliğinde gerilme değeri $q_0/2$ olarak kabul edilir. Kabullerden yola çıkılarak herhangi bir derinlikte yatak katsayısı-elastisite modülü bağlantısı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.37) yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$E_s = \frac{q_{ort} / 2}{y / B} \quad (3.37)$$

Aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.38) yardımıyla herhangi bir D derinliği için elastisite modülü hesaplanabilmektedir.

$$E_s = C \left(D + \frac{B}{2} \right) = \frac{CB}{2} \left(\frac{2D}{B} + 1 \right) \quad (3.38)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan C sabiti aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.39, 3.40) yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$C = \frac{ks'}{\left(\frac{2D}{B} + 1 \right)} \quad (3.39)$$

Yüzeyde yatak katsayısına k_s' kabul edilirse,

$$E_s = \frac{Bks'}{2} \quad (3.40)$$

Zemine ait elastisite modülü-C ilişkisi eşitlik (Denklem 3.41)'te verildiği şekilde hesaplanır.

$$E_s = C.Z \quad (3.41)$$

Bu denklemede;

E_s : İlgili derinlikte zemine ait elastisite modülü

q_{ort} : Zemin ortalama gerilme değeri

B : Temel genişliği

k_s : İlgili derinlikte yatak katsayısı

C : Sabit

z : Derinlik olarak tanımlanmıştır.

Jet Grout kolonları ile iyileşecek zemine ait elastisite modülü, istenilen derinlikteki oturma durumuna bağlı hesaplanan elastisite modülü ile aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.42) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$E_{ort} = \frac{A_{jet}}{A} E_{jet} + \frac{A_{iyileşen} + A_{jet}}{A} E_s \quad (3.42)$$

Bu denklemde,

$A_{iyileşen}$: İyileşen alan

A_{jet} : İyileşecek alan Jet Grout kolon alanları

E_s : İyileşecek zemin elastisite modülü

E_{jet} : Jet Grout kolonuna ait elastisite modülü olarak tanımlanmıştır (Kaymacı, 2014).

Daha önce yapılan çalışmalardan yola çıkılarak yüzeysel ve radye temellerin kum ve killi zeminlerde oturma değerleri Tablo 3.14.'te verilmiştir.

Tablo 3.14. Farklı zemin türlerinde izin verilen oturmalar (Yerson, 2009).

		Toplam oturma	Farklı oturma
Yüzeysel Temel	Kil	60 mm	40 mm
	Kum	40 mm	25 mm
Radye Temel	Kil	100 mm	40 mm
	Kum	60 mm	25 mm

3.16. Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Kullanımı

Potansiyel olarak sıvılaşma riski taşıyan bir zeminde yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri ile oluşturulacak granülometri eğrisi, ince dane oranı, rölatif sıklık, kıvam, yoğunluk, su muhtevası, YASS, içsel sürtünme açısı, maksimum yer ivmesi, hesaplanacak düzeltme katsayıları gibi sismik ve statik ölçütlere göre birçok açıdan değerlendirilip sismik hareketler sonucu oluşan periyodik kayma gerilmeleri, zeminin çevrimsel gerilme mukavemeti ile karşılaştırılır. Böylece zeminin sıvılaşma potansiyeli hakkında bilgi sahibi olmuş oluruz. Ardından zemin iyileştirme yöntemlerinden uygun olanı seçilerek elde edilecek yeni değerler doğrultusunda tekrar zeminin sıvılaşma potansiyeli hesaplanıp seçilen yöntemin doğruluğu kanıtlanır. Jet Grout yöntemi de sıvılaşma problemlerinde sıklıkla kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir.

Sıvılaşma olayını gerçekleşmesi için; sıvılaşabilir nitelikteki zeminlerin kuvvetli bir dinamik etki altında olması gerekmektedir. Tekrarlı yüklemeler altında zeminde oluşması muhtemel efektif gerilme izi ile akma sıvılaşması çizgisi arasındaki ilişki sıvılaşmanın başladığı yer olarak tanımlanır. Bu sebeple deprem gibi dinamik bir etkinin yol açtığı tekrarlı kayma gerilmeleri oluşması ve boşluk suyu basıncı artışlarının bilinmesi halinde sıvılaşma olayının başladığı kabul edilir (Özaydın, 2007; Öz, 2015). Suyun drene edilemediği gevşek granuler zeminlerin bulunduğu durumlarda deprem esnasında oluşması muhtemel yüksek boşluk suyu basınçları, efektif gerilmelerin azalması ve kayma direnciniyitirilmesi nedeniyle zeminin artık sıvı bir yapıda davranış göstermesi haline genel olarak sıvılaşmadenedilmektedir (Durgunoğlu, 2004). Sıvılaşmada, tekrarlı yüklemelere maruz kalmış ve boşluk suyu basınçlarının yükseldiği durumlarda zeminde beklenen hacim değişim, dane boyutu ve dağılımı özellikleri ne bağlı su geçirgenliği, sıvılaşabilirliğin değerlendirilmesinde incelenen kriterlerdir. Yapılan çalışmalarda sıklıkla sıvılaşmanın yalnız kohezyon

içermeyen kumlu zeminlerde olduğu savunulsa da, son yapılan çalışmalar ve gözlemler düşük miktarda kohezyon içeren siltli ve çakıllı zeminlerde de sıvılaşmanın olabileceğinden söz edilmiştir (Özaydın 2007; Öz, 2015). Yapılan birçok çalışmada plastisitesi düşük, ince daneli zeminlerde sıvılaşma tayini için Çin kriterlerinden bahsedilmiştir. Tablo 3.15.'te farklı araştırmacılar sıvılaşma potansiyeli kabulü üzerinde yapmış oldukları çalışmalar sonucu belirledikleri sınır değerler verilmiştir.

Tablo 3.15. Sıvılaşan zemin kabul kriterlerinin farklı araştırmacılara ait değerler

Araştırmacı	Kriter
Seed ve Idriss (1971)	1964 Nigata depreminde rölatif sıklığı %50 olan kumlu zeminlerde sıvılaşma oluşmuş fakat rölatif sıklığı yaklaşık %70 olan bölgelerde sıvılaşma oluşmamıştır.
Wang (1979)	zeminin kil yüzdesi ($< 0,005\text{mm}$) ve likit limiti değeri dikkate alınır.
Youd ve Idriss (1997)	Alüvyonlu doymuş kumlu depozit için; - Mevcut zemin yüzeyinden 20 m derinlik içinde doymuş kumlu tabaka ile mevcut zemin yüzeyinden 10 m derinlikte YASS, - İnce tane içeriği (FC) %35' den az olan toprak tabakası, ya da FC %35' ten fazla olsa da plastisite indeksi %15' ten az toprak tabakası, - Ortalama parçacık boyutu (D_{50}) 10 mm' den az olan ve efektif tane boyu 1mm' den az olan toprak tabakası sıvılaşma potansiyeli hesaplanması düşük N değerine sahip ya da diyajenezsiz Dilüvyonlu depozit için sıvılaşma potansiyeli analizi gerekmektedir.
Seed ve Idriss (1982), Marcuson ve ark. (1990), Youd (2001)	$LL < \%35$, $Kil\ Oranı < \%15$, $W_n > 0.9LL$ ve $LI \leq 0.75$
Wang ve Law (1994)	- Ortalama dane boyutu $D_{50} = 0,02 - 1,00\text{ mm}$ - Üniformluk katsayısı (D_{60}/D_{10}) < 10 - Plastisite indisi $PI < 10$
Ishiharave Yoshimine (1998)	Dane içeriği (200 nolu eleği geçme miktarı) $\leq \%35$ Ortalama parça çapı (D_{50}) ; $0,02\text{ mm} \leq D_{50} \leq 2\text{ mm}$ Doygun tabakanın derinliği ≤ 15 ile 20 m $SPT-N$ değeri ≤ 20 ile 30
Andrew ve Martin (2000)	$0,002\text{ mm}$ ' den küçük ince malzeme oranı $< \%10$, Likit Limit (LL) $< \%32$
Önalp ve Arel (2002)	$LL < \%30$, $Kil\ oranı < \%10$, $W_n > LL$ ve $LI < \%1$
Bray ve ark. (2004)	$I_p < 12$ ve $w_n/LL > 0,9$ sıvılaşabilir $12 < I_p < 20$ ve $0,8 < w_n/LL < 0,9$ deney yapılmalı $I_p > 20$ ve $w_n/LL < 0,8$ sıvılaşmaz
Bol ve ark. (2006)	$LL < \%33$, $Kil\ Oranı < \%10$, $LI < 0,90$ ve $D_{50} < 0,02\text{ mm}$
Bakım (2007)	Dane boyu $0,005\text{ mm}$ den küçük olma $\leq \%15$ Zeminin Likit Limiti (LL) $\leq \%35$ Su Muhtevası (w) $\geq 0,9LL$

Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirmenin projelendirilmesinde deprem yüklerine karşı sıvılaşma kontrolü hesap yöntemi açıklanmalıdır. Piyasadaki projeler incelendiğinde Jet Grout hesaplarında düşey yüklere karşı projelendirme yapılırken deprem yüklerine karşı kontrol yapılmadığı gözlemlenmiştir.

Basitleştirilmiş Yöntem Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya atılmış ve zamanla geliştirilerek bugün sıklıkla kullanılan halini almıştır. Jet Grout yöntemi ile iyileştirme ile sıvılaşan zemin tayini ve kolonun mekanik ve fiziksel yapısının tayin için izlenmesi gereken adımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

3.16.1. Sıvılaşma potansiyelinin hesaplanması

Zemin sıvılaşma potansiyelinin hesaplanmasında kullanılan analiz yöntemleri sırasıyla,

- Devirsel (çevrimsel) gerilme oranı yaklaşımı
- Devirsel deformasyon yaklaşımı
- Sönümlenmiş enerji yaklaşımı
- Efektif gerilmeye dayalı tepki analizidir.

Bu tez kapsamında pratikte sıklıkla kullanılan *Devrimsel (çevrimsel) Gerilme Oranı* yaklaşımı kullanılmıştır.

3.16.2. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü hesabı

Seed ve Idriss (1971) tarafından Basitleştirilmiş Yöntem olarak adlandırılan yöntem zaman içerisinde geliştirilerek bugünkü halini almıştır. Sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü (*FS*) aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.43) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} MSF \quad (3.43)$$

Bu denklemde;

FS : Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı

CRR : Çevrimsel mukavemet oranı

CSR : Çevrimsel gerilme oranı

MSF : Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü olarak verilmiştir.

Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü (MSF) $M_w=7,5$ 'den daha farklı bir deprem büyüklüğünde hesaplanmak istenirse aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.44) kullanılarak hesaplama yapılmaktadır (Youd ve ark., 1997).

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (3.44)$$

Deprem büyütme faktörü üzerinde çalışan başka bir grup yine bu faktörü hesaplanmak için aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.45) kullanmıştır (Idriss ve Boulanger, 2004).

$$MSF = 6,9 \exp\left(\frac{M}{4}\right) - 0,058 \quad (3.45)$$

Deprem büyüklüğü düzeltme faktörünün (MSF) yanı sıra araştırmacılar arazinin eğimli ve jeolojik yükü dikkate alan düzeltme katsayıları geliştirmiştir. Bu düzeltme faktörleri ile sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısını hesaplanmak için aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.46) kullanmıştır.

$$FSI = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} MSF \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (3.46)$$

Bu denklemde;

K_σ ve K_α : Jeolojik yük ve arazinin eğimli ile ilgili düzeltme faktörleri olarak verilmiştir.

3.16.3. Çevrimsel gerilme oranı (CSR)

CSR deprem esnasında zemine uygulanan sismik etkiyi ifade etmektedir. Seed ve Idriss (1971) yapmış olduğu çalışmalardan yola çıkılarak yaklaşık 12 m derinlik sınırında deprem sırasında oluşması muhtemel maksimum kayma gerilmeleri aşağıdaki verilen eşitlik (Denklem 3.47) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tau_{\max} = \frac{\gamma h}{g} a_{\max} r_d \quad (3.47)$$

Bu denklemde;

- γ : Zemine ait birim hacim ağırlığı değeri,
- h ; Derinlik,
- g : Yerçekimi ivmesi,
- $a_{\max}$: Maksimum yüzey ivmesi,
- r_d : Derinlikle değişen azalma faktörü olarak verilmiştir.

Kayma gerilmelerinin (τ_{ort}) maksimum gerilmenin %65'i mertebesinde olduğu kabulü ile bu değerleri efektif düşey gerilmeler (σ_{vo}) ile yeniden yorumlayarak elde edilen eşitlik (Denklem 3.48) kullanılarak çevrimsel gerilme oranı (CSR) hesaplanabilir.

$$CSR = \frac{\tau_{org}}{\sigma_{vo'}} = 0,65 \frac{\tau_{org}}{\sigma_{vo'}} = 0,65 \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo'}} r_d \quad (3.48)$$

Bu denklemde;

- σ_{vo} : Toplam düşey gerilme,
- σ'_{vo} : Efektif düşey gerilme olarak verilmiştir.

Yine denklemde derinliğe bağlı olarak değişen azalma faktörü aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.49) kullanılarak hesaplanabilir (Youd ve ark., 1997).

$$rd = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4117z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad (3.49)$$

Yapılan araştırmalarda CSR oranının sığ çökeller ve düz serbest saha koşullarında geçerli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ağır yapılarda ve eğimli imalat sahalarında ilk durum (statik) kayma gerilmelerinin sıvılaşma potansiyelini etkileyeceği düşünülerek CSR oranı belirlenirken aşağıdaki denklemde yeralan düzeltmenin uygulanması önerilmiştir (Özaydın, 2007). CSR'nin düzeltilmesi aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.50) kullanılarak hesaplanabilir.

$$(CSR_{arazi})_{\alpha, \sigma} = (CSR_{arazi})_{\alpha=0, \sigma < 100 \text{ Kpa}} K_{\alpha} K_{\sigma} \quad (3.50)$$

Bu denklemde K_{α} ve K_{σ} düzeltme faktörleridir. Ayrıca α değeri aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.51) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha = \frac{\tau_{h,statik}}{\sigma_{\nu o'}} \quad (3.51)$$

Yapılan çalışmalar incelendiğinde K_{α} gevşek ve sığ çökellerde en fazla 1,0, sıkı zeminlerde ise en az 1,0 alınması önerilmektedir (Seed ve Harder, 1990). K_{σ} düzeltme faktörü aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.52 ve 3.53) kullanılarak hesaplanabilir (Idriss ve Boulanger, 2006).

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \text{Int} \left(\frac{\sigma'_{\nu o}}{p_a} \right) \quad (3.52)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{N_{1,60}}} \quad (3.53)$$

3.16.4. Çevrimsel mukavemet oranı (CRR)

Çevrimsel direnci oranı hesaplanırken arazide elde edilen kayma dalgası hızı, SPT, CPT ölçümleri referans alınarak farklı sınır eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.24.'te SPT darbe sayıları referans alınarak hazırlanmış çevrimsel mukavemet oranı (CRR) eğrisi grafiği verilmiştir. CRR sınıvlaşmaya karşı direnci ifade etmektedir.

- SPT deneyi ile CRR tayini

SPT değerleri yardımıyla CRR değerinin bulunabilmesi için ilk olarak SPT-N darbe sayılarında bazı düzeltmeler yapılması önerilmektedir. Düzeltmiş SPT darbe sayısı aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.54) kullanılarak hesaplanabilir.

$$N_{1.60} = N \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (3.54)$$

Bu denklemde,

$N_{1.60}$: %60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT sayısı

N : SPT darbe sayısı

C_N : Örtü yükü düzeltme katsayısı

C_E : Enerji oranına bağlı düzeltme katsayısı

C_B : Sondaj kuyusu çapı düzeltme katsayısı

C_R : Tij uzunluğu düzeltme katsayısı

C_S : Numune alıcı düzeltme katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.16.'da Denklem 3.54'de yer alan düzeltme faktörlerinin yapılan araştırmalar sonucunda kabul edilen değerleri verilmiştir (Youd ve ark., 2001).

Tablo 3.16. Düzeltme faktörleri kabul değerleri (Youd ve ark., 2001).

Faktör	Alet Değişkeni	Terim	Düzeltilme
Üst tabaka yükü	-	C_N	$(P_a / \sigma'_{vc})^{1/2}$
Üst tabaka yükü	-	C_N	$C_N \leq 1,7$
Şahmerdan enerji oranı	Donut (makaralı) tipi şahmerdan	C_E	0,5-1
Şahmerdan enerji oranı	Güvenli şahmerdan	C_E	0,7-1,2
Şahmerdan enerji oranı	Otomatik düşülü-Donut (makara) tipi şahmerdan	C_E	0,8-1,3
Kuyu çapı	65-115 mm	C_E	1,0
Kuyu çapı	150 mm	C_B	1,1
Kuyu çapı	200 mm	C_B	1,2
Tip boyu	<3 m	C_B	0,8
Tip boyu	3-4 m	C_R	0,8
Tip boyu	4-6 m	C_R	0,9
Tip boyu	6-10 m	C_R	1,0
Tip boyu	10-30 m	C_R	1,0
Numune alma yöntemi	Standart numune alıcı (kılıf)	C_0	1,0
Numune alma yöntemi	Kılıfsız numune alıcı	C_0	1,1-1,3

Tablo 3.16.'da yeralan üst tabaka düzeltme faktörü denklemsel olarak ifade edilmektedir (Liao ve Whitman,1986). Denklemden yeralan değerler;

P_a : 100 kPa mertebesinde referans gerilme

σ'_{vo} : Düşey efektif gerilme olarak tanımlanmıştır.

Denklemin sonucu elde edilen C_N değeri 1,7'yi aşmamalıdır. Tablo 3.17'de ise enerji oranı düzeltme katsayısı C_E , SPT deneyinde kullanılan şahmerdanın özellikleri ve yöntem baz alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 3.17. Enerji oranı düzeltme katsayısı C_E (Seed ve ark. 1985).

Ülke	Şahmerdan tipi	Şahmerdan bırakma yöntemi	Tahmin edilen enerji oranı	% 60 Enerji oranına göre C_E
Japonya	Donut	Serbest düşülü	78	78/60=1,30
	Donut	Özel bırakma sistemine bağlı halat ve makara	67	67/60=1,12
ABD	Güvenlikli	Halat ve makara	60	60/60=1,00
	Donut	Halat ve makara	45	45/60=0,75
Arjantin	Donut	Halat ve makara	45	45/60=0,75
Çin	Donut	Serbest düşülü	60	60/60=1,00
	Donut	Halat ve makara	45	50/60=0,83

Zemin ince dane oranına (FC) göre aşağıda verilen eşitlik (Denklemler 3.55, 3.56, 3.57, 3.58) yardımıyla düzeltmenin yapılması önerilmektedir.

$$N_{1,60C_s} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad (3.55)$$

Burada;

$$(FC) \leq \%5 \text{ için} \quad \alpha = 0 \text{ ve } \beta = 1,0 \quad (3.56)$$

$$\%5 < (FC) < \%35 \text{ için} \quad \alpha = \exp\left(1,76 - \frac{190}{FC^2}\right) \beta = \left(0,99 + \left(\frac{FC}{1000}\right)^{1,5}\right) \quad (3.57)$$

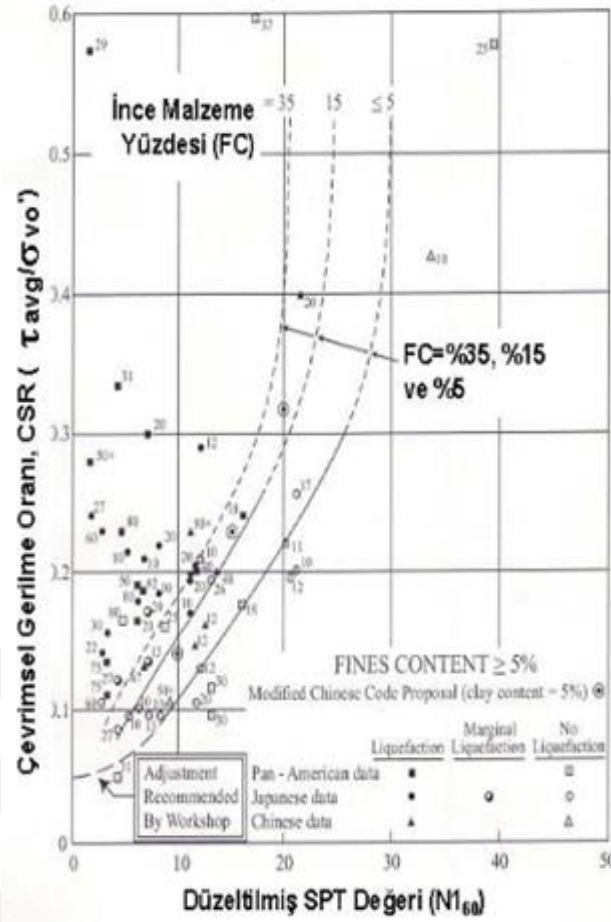
$$(FC) \geq \%35 \text{ için} \quad \alpha = 5,0 \text{ ve } \beta = 1,2 \quad (3.58)$$

tanımları kullanılarak hesaplanabilmektedir (Youd ve ark., 2001).

Elde edilen veriler ve yapılan düzeltmeler yardımıyla CRR değeri $M:7,5$ için aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.59) kullanılarak hesaplanabilir.

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60}} + \frac{N_{1,60}}{135} + \frac{50}{(10N_{1,60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.59)$$

Yapılan çalışmalar sonucunda SPT deneyi verilerinden yola çıkılarak CRR tayinide kullanılmak için Şekil 3.25.'te verilen grafik kullanılmaktadır (Youd ve ark., 1997).



Şekil 3.25. SPT değerlerine bağlı çevrimsel mukavemet oranı eğrisi grafiği (Youd ve ark., 1997).

N darbe sayısı değerlerinde değişikliğe neden olduğundan bunun standart hale getirilebilmesi için *ER* (*enerji oranı*) kavramı geliştirilmiştir. *ER* dikkate alınarak *N* değerleri, Türkiye’de kullanılan donut tipi şahmerdan için 45 olmak üzere aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.60) kullanılarak hesaplanabilir (Ulusay ve ark. 2001).

$$N_{60} = N \frac{ER}{60} \quad (3.60)$$

Enerji oranı düzeltme katsayısı (C_E) abakların $(N_1)_{60}$ referans alınarak hazırlanmasından nedeniyle SPT sonuçlarını düzeltme yerine %60 *ER*’de yapılabilir. Bu nedenle SPT aletine accelometre sensörü yerleştirilir ve enerji değeri hesaplanabilir (Durgunoğlu ve ark., 2000).

3.16.5. Zemin maksimum kayma modülünün hesaplanması

Jet Grout kolonlarının tasarımında kullanmak amacıyla öncelikle zeminin maksimum kayma modülü hesaplanmalıdır. Kayma modülü hesabı doğrudan (aşağı kuyu, suspension PS logging...) ya da dolaylı (SPT, CPT gibi arazi deneyleri) deneyler yardımıyla hesaplanmaktadır. Zemin kayma hızı arazi deneylerinde SPT deneyi ile elde edilen veriler ve aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.61) kullanılarak hesaplanabilir (Ohta ve Goto, 1978).

$$V_s = 62,14 N^{0,219} \cdot H^{0,230} \cdot F \quad (3.61)$$

Bu denklemde;

N : Düzeltilmiş SPT darbe aysısı

H : Derinlik

F : Zemin türüne göre seçilen düzeltme faktörü olarak verilmiştir.

Denklemde yeralan F faktörü seçiminde aşağıda verilen Tablo 3.18.'den yararlanılmaktadır.

Tablo 3.18. Zemin türlerine göre F düzeltme faktörleri (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

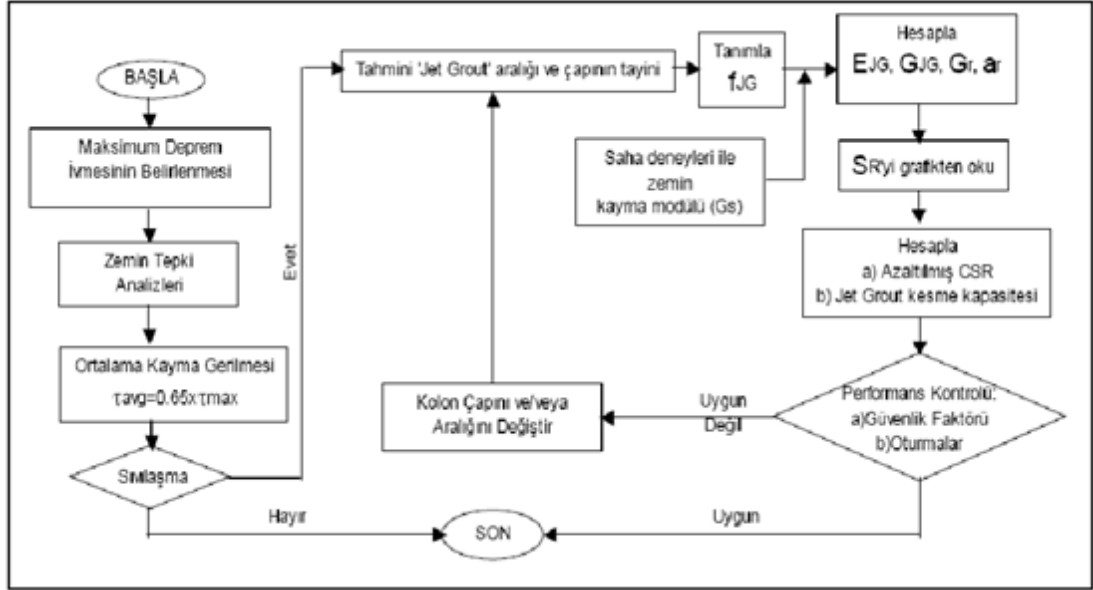
Zemin türü	F düzeltme faktörü
Killi zeminler	1,000
İnce kumlar	1,091
Orta daneli kumlar	1,029
Kalın daneli kumlar	1,073
Kum ve Çakıllılar	1,151
Çakılızeminler	1,485

SPT deneyi verileri kullanılarak elde edilen kayma hızı (V_s) daha sonra G_s kayma modülü hesabında kullanılır. Kayma modülü hesabında ise aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.62) kullanılarak hesaplanabilir.

$$G_s = \gamma \cdot V_s^2 \quad (3.62)$$

3.16.6. Deprem sonucu zemin kayma gerilmelerinin dağılımı

Deprem gibi dinamik bir etki altında zeminde oluşacak sıvılaşma oranı hesabının ardından sıvılaşan zeminler ile ilgili iyileşme kararı verildi ise Şekil 3.26.'da da verilen algoritmayı takiben kolon, çap ve aralık seçimine geçilir.



Şekil 3.26. Tasarım algoritması (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

Kolonların kayma modülleri genellikle arazide yapılacak aplikasyon deneyleri ya da laboratuvar tek eksenli silindirik basınç deneyi sonucu belirlenen mukavemetleri (f_{JG}) yorumlanarak belirlenir. Pratikte genellikle jet grout kolonundan alınan karot numuneleri tek eksenli basınç deneyine tabi tutulabilir. Ardından aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.63, 3.64) kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_{Jg} = 4730 \sqrt{f_{Jg}} \quad (3.63)$$

$$G_{Jg} = \frac{E_{Jg}}{2(1+\nu)} \quad (3.64)$$

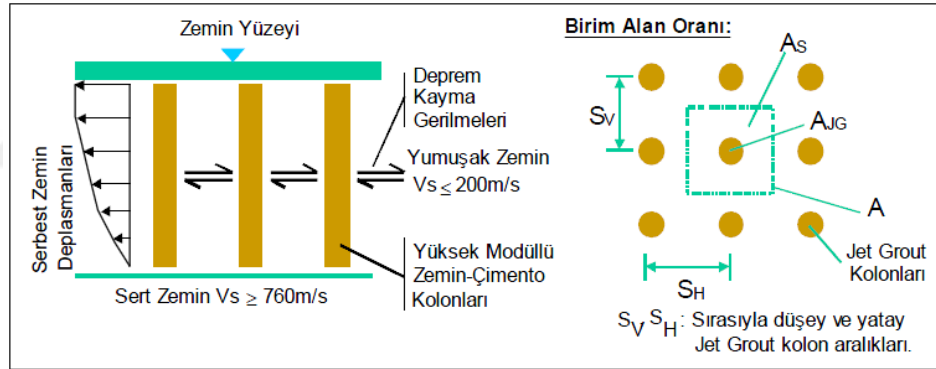
Bu denklemlerde,

ν : Poisson oranı (0,5 kabul edilecek)

E_{jg} : Elastisite modülü

G_{jg} : Kayma modülü olarak ifade edilmiştir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

Deprem kayma gerilmeleri dağılımında birim hücre kavramı geliştirilmiştir (Özsoy ve Durgunoğlu 2003). Bu yöntemde gerilme kolon ve zemin arasında dağıtılarak hesaplanır. Deprem durumunda kolonlar ve etrafındaki zeminde meydana gelmesi beklenen deplasmanların aynı olacağı kabulü yapılır. Depremde oluşması muhtemel kayma gerilmelerinden, kolon ve zeminin farklı rijitlikte olmasından dolayı, rijitliği yüksek olan kolon elemanlar daha fazla etkilenir. Kabule göre birim hücrenin tanımı ve kayma dalgalarının dağılım modeli ve Şekil 3.27.'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.27. Birim hücre tanımı ve kayma dalgasının dağılım modeli (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

Hesap yönteminde yapılan zemin değiştirmesini tanımlamak a_r alan oranı terimi kullanılmaktadır. Değer a_r aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.65, 3.66) kullanılarak hesaplanabilir.

$$a_r = \frac{A_{jg}}{A} \quad (3.65)$$

$$a_s = 1 - a_r \quad (3.66)$$

Bu denklemde,

- A_{jg} : Jet Grout kolonu kesit alanı
 A : Birim hücre alanı olarak verilmiştir.
 a_r : Alan oranı

Değer a_r ' nin hesaplanmasının ardından deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin kayma modülleri oranında dağılacağı kabulü yapılır. A birim hücre alanı Jet Grout kolonlar arasındaki ara mesafelerin X ve Y yönünde (S_H ve S_V) çarpımı ile elde edilir. Birim alan içerisinde yeralan gerilme miktarı ise n değişkeninin tanımlanmasıyla hesaplanmaktadır. Birim alan gerilim miktarı (n) aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.67) kullanılarak hesaplanabilir.

$$n = \frac{\tau_{jg}}{\tau_s} \quad (3.67)$$

Bu denklemde,

- τ_{jg} : Jet Grout kolonlarına etkiyen kayma gerilmesi
 τ_s : Zemine etkiyen kayma gerilmesi olarak tanımlanmıştır.

Elde edilen veriler ile birim alan etki eden kayma gerilmesi (τ), kayma dengesi prensibinden yararlanılarak aşağıda verilen eşitlikler (Denklem 3.68, 3.69) kullanılarak hesaplanabilir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

$$\tau = \tau_s a_s + \tau_{jg} a_r \quad (3.68)$$

$$\tau = r_s (1 - a_r) + \tau_{jg} a_r \quad (3.69)$$

3.16.7. Çevrimsel gerilim azaltma faktörü

Çevrimsel gerilim azaltma faktörü (S_R) çevrimsel gerilim oranı üzerine etkilidir. Birim alanda yeralan kolonlar ve kolonları çevreleyen zemin arasında şekil değiştirme kabulü yapılır. Çevrimsel gerilim azaltma faktörü (S_R) aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.70) kullanılarak hesaplanabilir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_{avg}} = \frac{\tau_s}{(1 + (G_r - 1)a_r)} = \frac{1}{G_r} \frac{1}{\left(a_r + \frac{1}{G_r}(1 - a_r)\right)} \quad (3.70)$$

Bu denklemde,

G_r : Modül oranı olarak tanımlanmış ve aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.71) kullanılarak hesaplanabilir.

$$G_r = \frac{G_{jg}}{G_s} \quad (3.71)$$

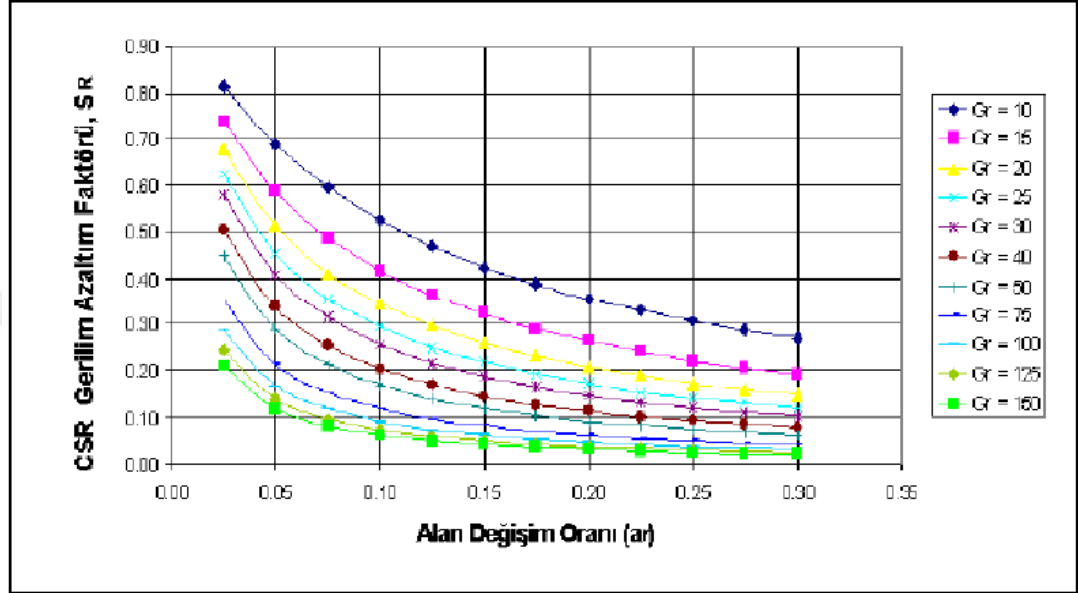
Deprem esnasında oluşması muhtemel kayma gerilmelerinin büyük bir kısmı kolonlar tarafından taşındığından, kolonları çevreleyen zemin tarafından taşınan kayma gerilmeleri aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.72) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tau_s = S_R \cdot \tau \quad (3.72)$$

Elde edilen Çevrimsel Gerilim Azalım Faktörü (S_R) Seed ve Idriss'in 1971 tarihli çalışmasından yeralan Çevrimsel Gerilme Oranını (CSR) düşürmekte ve daha güvenli tasarım değeri vermektedir. $CSR_{tasarım}$ aşağıda verilen eşitlik (Denklem 3.73) kullanılarak hesaplanabilir.

$$CSR_{tasarım} = CSR \cdot S_R \quad (3.73)$$

Yapılan çalışmalar sonucunda uygun tasarım parametrelerinde yaralımlarak kayma modül oranına ve birim alana bağlı CSR azaltım eğrileri (S_R) elde edilmiştir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003). Şekil 3.28.'de kayma modülü oranına ve birim alan bağlı CSR azaltım eğrileri (S_R) verilmiştir.



Şekil 3.28. Birim alan ve kayma modülü oranına CSR azaltım eğrileri (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tezin bu bölümünde sonlu elemanlar yöntemi ile hesap yapan PLAXIS yazılımı ile seçilmiş bir vaka üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaya başlarken seçilen arazi uygulamalarında geoteknik verilerin toplanması jet grout hesabı ve imalatı ve son olarak iyileştirme gerçekleştirilen arazide gerekli deformasyon ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak idare tarafından alınan kararlar gereği seçilen uygulama bölgelerinde yerinde ölçümler yapılamadığı için gerçek durum karşılaştırmaları yapılamamıştır. Bununla birlikte, PLAXIS yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçlar önceki bölümde önerilen yöntemlerle hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Jet Grout Kolonlarının Sayısal Analizi

Modelleme sonuçlarının gerçekçiliği; modelin oluşumu sırasında zemin koşullarının ve sınırlamalarının tayini, zemin parametrelerinin seçimi ve hesaplama sonuçlarının doğru incelenmesine bağlıdır.

Sayısal ortamda modellemede sıklıkla “*Sonlu Elemanlar Yöntemi*” tercih edilmektedir. Geoteknik Mühendisliğinde problem modellenip sayısal ortama geçirilirken, zeminin başlangıç gerilme durumuna karar verilmelidir. Kullanılacak malzemenin davranış özelliği (elastik, elasto-plastik veya plastik malzeme davranışı) analiz verilerinin drenajlı ya da drenajsız ortamdan elde edilmesine (efektif gerilme analiz ve boşluk suyu basıncı), malzemelerin anizotropik (farklı yönde farklı özellik gösterme) olup olmayışına ve karmaşık sınır-başlangıç koşullarının doğru belirlenmesine dikkat edilmelidir.

4.2. PLAXIS Programı ile Modelleme

Bu yazılımda geoteknik problemin modellenmesinde; noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşan elemanlar kullanılır. Tasarlanan modelin farklı zemin tabakalarının belirlenmesi, yapısal elemanlarının modellenmesi, inşa aşamalarının belirlenmesi, yüklerin ve modelin sınırlarının yeterince geniş olması arzu edilir.

PLAXIS yazılımında zemin modellenmesinde; Lineer Elastik Model, Mohr-Coulomb Model, Jointed Rock Model (çatlaklı kaya modeli), Hardening Soil Model (pekleşen zemin modeli), Soft Soil Model (yumuşak zemin modeli), Soft Soil Creep model (yumuşak zemin sünme modeli) ve User-Defined Soil Model (kullanıcı tanımlı zemin modeli) olarak adlandırılan farklı zemin modelleri kullanılabilmektedir.

4.2.1. Lineer elastik model

Lineer Elastik model zemin modellemesinin dışında rijit yapıların modellenmesinde de kullanılmaktadır. Rijit yapı modeli izotropik lineer elastik malzemelerin davranışlarının Hooke kanunu (E , ν) referans alınarak hazırlanır. Şekil 4.1a. ve Şekil 4.1b.'de PLAXIS programında lineer elastik model yaklaşımı ile rijit elemanın modellenmesinde data giriş ekranı ve parametre girişi görseli verilmiştir.

Soil - Linear elastic - TEMEL

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		TEMEL
Material model		Linear elastic
Drainage type		Non-porous
Colour		RGB 245, 10, 22
Comments		
General properties		
V_{unsat}	kN/m ³	24.00
V_{sat}	kN/m ³	24.00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e_{init}		0.5000
e_{min}		0.000
e_{max}		999.0
Damping		
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.1a. Lineer Elastik model genel data girişi

Soil - Linear elastic - TEMEL

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E	kN/m ²	30.00E6
ν (nu)		0.2000
Alternatives		
G	kN/m ²	12.50E6
E_{oed}	kN/m ²	33.33E6
Velocities		
V_s	m/s	2260
V_p	m/s	3691
Advanced		
Set to default values		☒
Stiffness		
E_{inc}	kN/m ² /m	0.000
γ_{ref}	m	0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.1b. Lineer Elastik model parametre girişi

4.2.2. Mohr-Coulomb modeli

Mohr-Coulomb model zemin modellemesinde sıklıkla kullanılan zemin davranışı yaklaşımıdır. Zemin davranışını tanımlanmasında kullanılan 5 parametre vardır. Kullanılan parametreler elastik modülü (E), kohezyon (c), poisson oranı (ν), kayma mukavemeti açısı (ϕ) ve dilantasyon açısı (ψ)'dır. Drenajlı durumda göçme davranışı izlenebilmekte ve dilantasyon (kabarma açısı) tanımlanabilmektedir. Ön yükleme ve boşaltma veya yeniden yükleme arasında farklılık dikkate alınmaz. Drenajsız davranışın modellenmesinde gerçekçi sonuçlar elde edilemeyebilir. Şekil 4.2a. ve Şekil 4.2b.'de PLAXIS programında Mohr-Coulomb model yaklaşımı ile zeminin modellenmesi data giriş ekranı ve parametre girişi görseli verilmiştir.

Soil - Mohr-Coulomb - ZEMIN

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		ZEMIN
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 161, 226, 232
Comments		
General properties		
V_{unsat}	kN/m ³	18.00
V_{sat}	kN/m ³	18.00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e_{init}		0.5000
e_{min}		0.000
e_{max}		999.0
Damping		
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.2a. Mohr-Coulomb model genel data girişi

Soil - Mohr-Coulomb - ZEMIN

General Parameters Groundwater * Thermal Interfaces Initial *

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	3.000E6
ν' (nu)		0.2000
Alternatives		
G	kN/m ²	1.250E6
E _{oed}	kN/m ²	3.333E6
Strength		
c' _{ref}	kN/m ²	0.000
ϕ' (phi)	°	30.00
ψ (psi)	°	0.4500
Velocities		
V _s	m/s	825.4
V _p	m/s	1348
Advanced		

Şekil 4.2b. Mohr-Coulomb model parametre girişi

4.2.3. Hardening Soil model (Sertleşmiş zemin modeli)

Hardening Soil modeli kullanımı ile kum, çakıl zemin davranışı tanımlanabildiği gibi kil ve silt gibi zeminlerinde davranışı tanımlanabilir. Modelde zeminin davranışını belirleyen Mohr-Coulomb model parametreleri (ϕ , c , ψ), rijitlik parametreleri (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} ve m) ve ileri düzey parametreler (ν , p^{ref} , K_o^{NC} , R_f , σ_t , $C_{increment}$) referans alınarak hazırlanır. Şekil 4.3a. ve Şekil 4.3b.'de PLAXIS programında Hardening Soil Model yaklaşımı ile zemin modeli data giriş ekranı ve parametre girişi görseli verilmiştir.

Soil - Hardening soil - KILLI KUM

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		KILLI KUM
Material model		Hardening soil
Drainage type		Drained
Colour		RGB 112, 26, 29
Comments		
General properties		
V_{unsat}	kN/m ³	19.50
V_{sat}	kN/m ³	21.00
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e_{init}		0.5000
e_{min}		0.000
e_{max}		999.0
Damping		
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.3a.Hardening Soil model genel data girişi

Soil - Hardening soil - KILLI KUM

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	16.80E3
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	16.80E3
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	50.40E3
power (m)		0.5000
Alternatives		
Use alternatives		☐
C_c		0.02054
C_s		6.161E-3
e_{init}		0.5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	5.000
$\phi' (phi)$	°	35.00
$\psi (psi)$	°	5.000
Advanced		
Set to default values		☒
Stiffness		
v'_{ur}		0.2000
p_{ref}	kN/m ²	100.0
K_0^{nc}		0.4264
Strength		
c'_{inc}	kN/m ² /m	0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.3b. Hardening Soil model parametre girişi

4.2.4. Soft Soil model (Yumuşak zemin modeli)

Soft Soil model kullanımı ile aşırı konsolidasyon oranı (OCR) 2' den küçük olan killer ve organik içerikli zeminler gibi yumuşak zeminlerin davranışları yansıtılır. Model yaklaşımı ile zemin izotropik, elastoplastik olarak tanımlanır. Modelde zeminin davranışını belirleyen Mohr-Coulomb model parametreleri (ϕ , c , ψ), izotropik sıkışma indisi (λ^*), şişme indisi (K^*), enerji (m) ve boşaltma tekrar yükleme poisson oranı (ν_{ur}) referans alınarak hazırlanır. Bu parametreler yardımıyla sıkışma indisi (Cc), şişme indisi (Cs), boşluk oranı (e) kullanılarak hesaplanır. Şekil 4.4a. ve Şekil 4.4b.'de PLAXIS programında Soft Soil model yaklaşımı ile zeminin modeli data giriş ekranı ve parametre girişi görseli verilmiştir.

Soil - Soft soil - ZEMIN

General Parameters Groundwater * Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		ZEMIN
Material model		Soft soil
Drainage type		Drained
Colour		RGB 161, 226, 232
Comments		
General properties		
Y _{unsat}	kN/m³	0.000
Y _{sat}	kN/m³	0.000
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off		☐
e _{init}		0.5000
e _{min}		0.000
e _{max}		999.0
Damping		
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

Next OK Cancel

Şekil 4.4a. Soft Soil model genel data girişi

Soil - Soft soil - ZEMIN

General Parameters Groundwater * Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
λ^* (lambda*)		1.000E-9
κ^* (kappa*)		0.1000E-9
Alternatives		
Use alternatives		☐
C_c		3.450E-9
C_s		0.1725E-9
e_{init}		0.5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	0.000
ϕ' (phi)	°	0.000
ψ (psi)	°	0.000
Advanced		
Set to default values		☒
Stiffness		
v'_{ur}		0.1500
K_0^{nc}		1.000
M		0.000
Undrained behaviour		
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0.9890
v_u		0.4950
K_{ref}/n	kN/m ²	90.00E12

Next OK Cancel

Şekil 4.4b. Sort Soil model parametre girişi

4.2.5. PLAXIS Programı kabul formülasyonu

PLAXIS programı veri girişinin ardından programın kendisi otomatik olarak parametreleri belirlemektedir. Bu parametrelerin bazıları (G_{ref} , E_{oed} , V_s , V_p) program tarafından otomatik olarak aşağıda verilen eşitliklere (Denklem 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5) dayanarak belirlenmektedir.

$$G_{ref} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.1.)$$

$$E_{ref} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (4.2.)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (4.4)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (4.5)$$

4.3. PLAXIS Programında Yapısal Elemanların Modellenmesi

Programın yardımıyla yapısal eleman modellenirken Plates, Geogrid, Embedded Beam Row, Anchors modülerinden yararlanılmaktadır.

4.3.1. Plate eleman ile modelleme

Plate eleman özellikleri kullanılarak perde çubuk ve kabuk elemanlar modellenebilir. Modülün kullanımında eğilme ve normal rijitlik değerleri elle hesaplanarak programa giriş yapılmalıdır. Program, rijitlik değerleri hesaplandığında elde edilen sonuçlar ile program verisi olarak hesaplanmış olan eleman kalınlığı (d) kontrol amaçlı olarak tekrar karşılaştırma imkanı sağlar. Rijitlik hesaplanırken birim boy kabulü ($b=1m$) yapılmalıdır. Elemanın ağırlığı (w); elemanın zemine yerleşimi göz önünde bulundurularak, batma oranı ile doğru orantılı bir şekilde zeminin birim hacim ağırlığı çıkarılarak hesaplanmalıdır. Şekil 4.5.'te PLAXIS programında Plate eleman ile perde çubuk ve kabuk elemanlarına ait data giriş ekranı görseli verilmiştir.

Plate - TEMEL2

Mechanical Thermal

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		TEMEL2
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		☒
End bearing		☒
EA ₁	kN/m	18.00E6
EA ₂	kN/m	18.00E6
EI	kN m ² /m	540.0E3
d	m	0.6000
w	kN/m/m	2.700
ν (nu)		0.2000
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000

OK Cancel

Şekil 4.5. Plate eleman ile perde çubuk ve kabuk elemanların modellenmesi

4.3.2. Geogrid eleman ile modelleme

Geogrid elemanlar, elastik veya elasto-plastik özellik gösteren elemanlar olarak modellenir. Eğilme rijitliği ihmal edilip sadece normal rijitlik var olarak kabul yapılır. Elemanlar çekmeye çalışan, basınca çalışmayan yapısal elemanlardır. Şekil 4.6'da PLAXIS programında Geogrid eleman ile yapısal elemanlara ait data giriş ekranı görseli verilmiştir.

Geogrid - <NoName>

Mechanical Thermal

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		<NoName>
Comments		
Colour		RGB 255, 255, 0
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		☒
EA ₁	kN/m	0.000
EA ₂	kN/m	0.000

OK Cancel

Şekil 4.6. Geogrid eleman ile yapısal elemanların modellenmesi

4.3.3. Embedded BeamRow eleman ile modelleme

Embedded BeamRow eleman kullanımı ile elemanlar arasında yüzey oluşturulur. Ayrıca çevre sürtünmesi ve yay kabulü ile uç mukavemeti hesaplanır. Genellikle kazık elemanların modellenmesinde zemin arasındaki etkileşim modellenemediği için tercih edilir. Kazık geometrisi de modele yansıtılabilir. Kazığı oluşturan malzemeyi tanımlamak için E ve ν bilgileri ile giriş yapılır. Kazık geometrisi dairesel ya da kare olarak girilebilir. Kazık üstünde ve altında farklı çevre sürtünmesi ile daha gerçekçi modelleme yapılır. Şekil 4.7’de PLAXIS programında Embedded Beam Row eleman model yaklaşımı ile yapısal elemanlara ait data giriş ekranı görseli verilmiştir.

Embedded beam row - JET

Property	Unit	Value
Identification		JET
Comments		
Colour		RGB 249, 205, 4
Material type		Elastic
Properties		
E	kN/m ²	3.200E6
γ	kN/m ³	0.2000
Pile type		Predefined
Predefined pile type		Massive circular pile
Diameter	m	0.6000
A	m ²	0.2827
I	m ⁴	6.362E-3
L _{spacing}	m	2.000
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
Axial skin resistance		
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	737.0
T _{skin, end, max}	kN/m	737.0
Lateral skin resistance		
Lateral skin resistance		Unlimited
Base resistance		
F _{max}	kN	280.0

OK Cancel

Şekil 4.7. Embedded Beam Row eleman ile perde çubuk ve kazık elemanların modellenmesi

4.3.4. Anchors eleman ile modelleme

Anchor eleman ile yatay destek elemanları ve ankrajlar modellenebilir. Teorik olarak elasto-plastik yay elemanları kabulü yapılmıştır. İstenilen açıda ve öngermeli eleman modellenebilir. Eleman bir ucu sınırlı ya da iki ucuda bağlı olacak şekilde tanımlanabilir. Normal rijitlik, elemanlar arası mesafe, basınç ve çekme için maksimum ankraj kuvveti değerleri girilebilmektedir. Ayrıca, ankrajın göçmesi incelendiği durumlarda rezidüel mukavemet sıfırlanmalıdır. Şekil 4.8.'de PLAXIS programında Anchor eleman ile yapısal elemanlara ait data giriş ekranı görseli verilmiştir.

Anchor - <NoName>

Mechanical Thermal

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		<NoName>
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 0
Material type		Elastic
Properties		
EA	kN	0.000
L spacing	m	1.000

OK Cancel

Şekil 4.8. Anchor elemanla yatay destek elemanlar-ankraj modellemesi

4.3.5. Ara yüzey elemaların tanımlanması

Modellemede, yapı ile zemin arasında etkileşimin daha gerçekçi yansıtılabilmesi için arayüzey elemanı tanımlanabilmektedir. Program normal ve kayma kuvvetine çalışan yaylar yardımıyla yapı zemin etkileşimini yansıtır. Kullanılan azaltma faktörleri eleman yüzeyindeki pürüzlülüğe göre değişmektedir. Programda pürüzlülük, R_{inter} parametresi kullanılarak tanımlanır. Bu değerin 0,00 ile 1,00 arasında değişmesi istenir. Değerin 1,00 olarak tanımlanması ara yüzeyde meydana gelmesi muhtemel kuvvetinin tümünün modellendiğini gösterir (KUSİN, C.C 2009). Şekil 4.9.'da PLAXIS programında arayüzey elemanı tanımlama ekranı görseli verilmiştir.

Soil - Hardening soil - KILLI KUM

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Strength		
Strength		Rigid
R_{inter}		1.000
Consider gap closure		☒
Real interface thickness		
δ_{inter}		0.000
Heat transfer		
R	m ² K/kW	0.6700

Next OK Cancel

Şekil 4.9. Ara yüzey elemanlarına ait data girişi ekranı

Tablo 4.1.'de PLAXIS programında eğitim dokümanlarında tavsiye edilen R_{inter} değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. PLAXIS eğitim dokümanında tavsiye edilen R_{inter} değerleri (PLAXIS Programı Eğitim Dökümanları; Berilgen , M., 2016).

Eleman Etkileşimi	Tavsiye edilen değer aralığı
Kum zemin - Çelik	$R_{inter} = 0,6-0,7$
Kil zemin - Çelik	$R_{inter} = 0,5$
Kum zemin - Beton	$R_{inter} = 1,0-0,8$
Kil zemin - Beton:	$R_{inter} = 1,0-0,7$
Zemin - Geogrid	$R_{inter} = 1,0$
Zemin - Geotekstil	$R_{inter} = 0,9-0,5$

PLAXIS programı analiz esnasında interface özelliğini zeminin kayma açısı ve kohezyon değerinde aşağıda verilen eşitlik (Denklem 4.6 ve 4.7) yardımıyla yeniden hesaplamaktadır (PLAXIS 2D 2016 Tutorial). Ara yüzey eleman tanımı ile rijitlik değil mukavemet özelliklerinde etki gösterir.

$$\tan \phi_{\text{interface}} = R_{\text{inter}} \cdot \tan \phi_{\text{zemin}} \quad (4.6)$$

$$c_{\text{inter}} = R_{\text{inter}} \cdot c_{\text{zemin}} \quad (4.7)$$

Denklemlerde;

C_{inter} : Interface uygulanmış kohezyon değeri

ϕ_{inter} : Interface uygulanmış kayma açısı değeri

4.3.6. Modelleme alanının belirlenmesi

Yüzeysel temel ya da dolgu bölgesi çalışmalarında model tasarımı yapılacak ise yatayda temel-dolgu plan genişliğinin min. 3 katı kadar her iki yönde, düşeyde ise yine seçilen temel-dolgu plan genişliğinin minimum 3 katı kadar çalışma alanı oluşturulmalıdır (Dr. R. Brinkgreve, 2005).

4.4. Sayısal Analize Örnek Çalışmalar

Erdil (2008) çalışmasında; Jet Grout kolonun taşıma gücü hesabı üzerine daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Çalışmada PLAXIS sayısal analiz programı ile analiz edilmiş modeller ve elde edilen sonuçlar arazideki yükleme deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda yükleme deneyi, Garassino'un 1997'de yapmış olduğu kabuller sonucu elde edilen değerler ve PLAXIS modeli (Mohr-Coulomb zemin davranışı - Soft Soil zemin davranışı) sonucu elde edilen değerler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Fakat PLAXIS modeli sahadaki davranışı yansıtamamış, sonuç olarak yumuşak zemin modelinin yükleme deneyinin sayısal ortamda modellenmesinde kullanımının sağlıklı sonuç vermediği görülmüştür. Jet Grout kolonu modellenirken (lineer elastik) ise Jet Grout kolonları simetrik eleman kabul edildiğinden modellemeye simetri eksenini özelliği kullanılarak simetrik bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmada Garassino'nun önerdiği metod ile Jet Grout kolonu yük taşıma kapasitesi sonuçlarının kabul edilebilir yakınlıkta olduğu görülmüştür. Ayrıca zeminin belirsizliğinden dolayı geoteknik uygulamalarında kullanılan güvenlik katsayılarının diğer inşaat mühendisliği hesap kabullerine göre yüksek

olması gerekliliği sayısal ortam modeli ile yapılmış yükleme deneyi ile ortaya konmuştur.

Kusin (2009) çalışmasında Jet Grout yöntemi kullanımı ile tasarlanan destek yapılarının PLAXIS programı ile sayısal ortama aktarmış ve analiz sonuçlarını yorumlamıştır. Çalışma 4 farklı durum incelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında; Jet Grout kolonları ile imal edilmiş dayanma duvarlarının sayısal analizleri incelenmiştir. Modelde etkili duvar kalınlığı, ara yüzey elemanı ve ağ boyutu araştırılmıştır. Model daha sonra geliştirilerek destekli ve desteksiz duvarların sayısal analizleri yapılmıştır. Destekli duvarlarda destek arasındaki mesafelerin sonuçları nasıl etkilediği araştırılmıştır. Analizde eleman sayısında artış, düğüm sayısında artış ve ara yüzey elemanının kullanımı ile daha iyi sonuçların elde edildiği belirtilmiştir. İkinci sıra destek elemanları ile oluşturulan 3D modelde destekler arası mesafe arttıkça güvenlik faktörünün azaldığı, beklenen yatay deformasyonunda arttığı belirtilmiştir. Analizde ankrajlı duvarların kullanılması halinde duvar boyutlarının ufalabildiği belirtilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında; iki ayrı modelde cutoff duvarı ve perdesi kullanımının deformasyon miktarına ve güvenlik faktörüne etkisi irdelenmiştir. Ayrıca ankrajlı elemanlarda öngerme kuvvetlerinin deformasyon miktarına ve güvenlik faktörüne etkisi irdelenmiştir. Analiz sonucunda cutoff perdesinin kullanımının duvarın düşey ve yatay deformasyonların azalttığı, güvenlik faktöründe artışa neden olduğu belirtilmiştir. Ankraj öngerme kuvvetlerinin uygulanması ile duvarlarda deformasyonları azaltmakta ve en küçük deformasyon değerlerine dayanım duvarlarına ile cutoff duvarı kullanılmasıyla ulaşılabileceği fakat güvenlik faktörüne etkisi olmadığı belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında; zemin Jet Grout kolonları ile iyileştirilmiş ve meydana gelen kompozit yapı homojenleştirme metodu kullanılarak modellenmiştir. Ardından, Omine ve ark. (1999) tarafından elde edilen model deneyi sonuçları, Omine ve ark. 1993-1999 yıllarında yapmış olduğu çalışmalarda önerilen homojenleştirme metodu kullanımı ile modellenen kompozit zeminyapısı PLAXIS 2D programında aktarılmış elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda karşılaştırıldığında, sonuçlarına yakın fakat birebir karşılamadığı belirtilmiştir. Birim hücre analizleri sonucunda kompozit zemin yapısının yapıdan aktarılan yükler karşısında beklenen

oturma miktarının kabuledilebilir sınır değerlerde olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın son kısmında; farklı çaplarda tank temelleri altındaki zeminin Jet Grout yöntemi ile iyileştirilmesini PLAXIS 2D programı yardımıyla modellenmiş elde edilen sonuçlar klasik yöntem ile karşılaştırıldığında sonlu elemanlar yöntemi kullanımı ile zemin ve yapının daha detaylı modellenbildiği böylece daha hassas sonuçlar elde edilebildiği belirlenmiştir.

Doğanışık (2010) çalışmasında Jet Grout kolonları ile zeminin sayısal ortamada modellemesi için izlenecek yollara değinilmiştir. Jet Grout yükleme deneyinin bilgisayar programında simülasyonunda hesap modeli olarak Mohr-Coulomb modeli ve Hardening Soil modeli denenerek elde edilen sonuçlar saha deneyinde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında; modelde zemin ve Jet Grout kolonu Mohr-Coulomb hesap modeli, çalışmanın ikinci kısmında zemin Mohr-Coulomb-Jet Grout kolonu ise pekleşen zemin, çalışmanın üçüncü kısmında zemin ve Jet Grout kolonu pekleşen zemin modelleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın dördüncü kısmında ise deney modeli Jet Grout imalatı esnasında oluşan kolon çevresinde belli bir bölgenin yüksek basınçlı enjeksiyondan etkilendiği öngörüsünden yola çıkarak pekleşen zemin modeline göre Jet Grout kolonu, zemin ve geçiş bölgesi modelde tanımlanarak analiz yapılmıştır. Jet Grout ile zemin pekleşen zemin modeli kullanılarak çözüldüğünde, modelin sahadan elde edilen sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın dördüncü kısmında elde edilen grafikler incelendiğinde ise oldukça tutarsız sonuçlarla karşılaşmıştır.

Ejder (2010) çalışmasında ortalama yoğunlukta kum ve orta plastisitede kil kullanılarak farklı zemin profili üzerinde çalışılmıştır. Dayanma yapısı, diyafram duvar ve iki kademede yer alan çelik elemanlardan oluşturulmuştur. Kum ve kil zemin gruplarında Mohr-Coulomb modeli tercih edilmiştir. Çubuk eleman analizinde Hardening-Soil model kurulmuştur. Duvar deplasmanları ve momentleri Jet Grout uygulamasıyla önemli ölçüde azaldığı ve kazı seviyesi ve duvarın arkasındaki düşey deplasmanların Jet Grout uygulaması ile azaldığı belirtilmiştir.

Yağızatlı (2012) çalışmasında killi zeminlerin ve kumlu zeminlerin Jet Grout uygulamasından sonraki deplasmanları incelenmiş ve deplasmanların tüm değişken faktörlerden nasıl ve hangi oranda etkilendiğini araştırılmıştır. Sayısal modelin oluşturulmasında zemin ve Jet Grout kolonları Mohr-Coulomb modeli ile modellenmiştir. Değişkenlerin etkisi belirlenirken %95 güven aralığında geriye doğru elemeli regresyonla (*Backward Elimination Regression*) indirgenmiş lineer model üzerinde varyans analizi yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda 0,05 güven düzeyinde çift yönlü test kritik değerleri, analiz sonucu çıkan test değerlerinden büyük çıkmıştır. Analiz sonucunda dolgu kalınlıkları, Jet Grout ara mesafeleri, zemin kohezyon değerleri, yük değerleri gibi parametreler ile bu parametrelerin farklı kombinasyonları birbirilerini ve oturma değerlerini etkilediği görülmüştür.

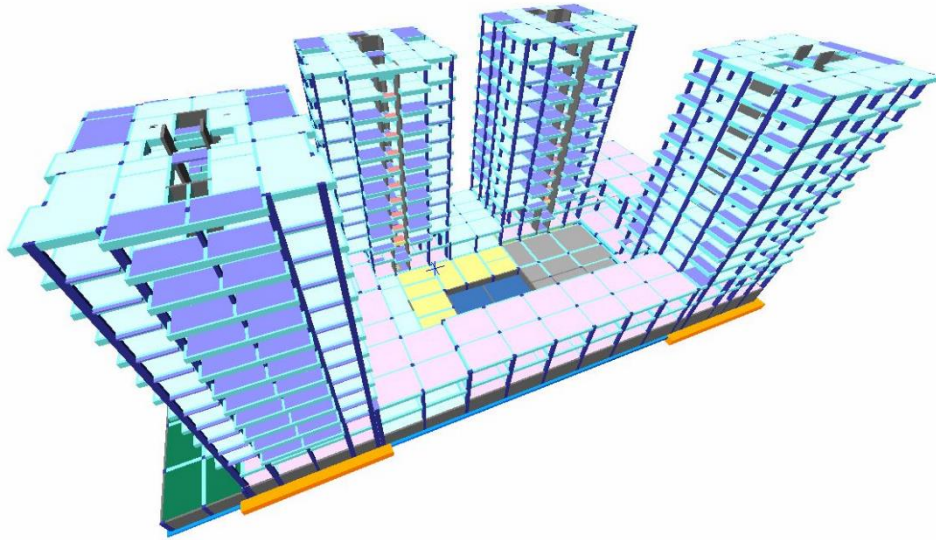
Mungan (2016) çalışmasında; sayısal modeli oluşturulan Darbeli Kırmataş Kolonların (*DKK*) analizleri yapılırken 3 farklı yöntemden (*DKK*'sız ortamda temeldeki oturmalar, *DKK* ile oluşan kompozit zemin modeline göre temeldeki oturmalar, *DKK*'lı ortamda temeldeki oturmalar) yola çıkılarak üç farklı analiz sonuçları irdelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında; yayılı temelin *DKK*'sız ortamda drenajlı durumda (uzun vadede) yapacağı toplam oturma analiz yapılmış ve oturma açısından zemin ortamının çok elverişsiz olduğunu belirtilmiş. Çalışmanın ikinci kısmında; zemin *DKK*'ların temel altında etkilediği bölge sınırları içerisinde kompozit olarak tasarlanmıştır. Analiz sonucunda ilk modele göre toplam oturmalar %68 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından nedeniyle konsolidasyon oturmalarının %73'ü üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %76 oranında azalmıştır. Çalışmanın üçüncü kısmında *DKK*'lar temel altında tanımlanmıştır. İlk modele göre toplam oturmalar %50 oranında azalmıştır. Ortam rijitliğinin artmasından ötürü konsolidasyon oturmalarının %55'i üst yapı inşaatı yapılırken gerçekleşmiş ve konsolidasyon süresi %32 oranında azalmıştır.

4.5. Tez Kapsamında PLAXIS Programı Kullanılarak Yapılan Örnek Vaka

Tez konusu kapsamında incelenen yapı - zemin modeli PLAXIS 2D (v. 2016-01) programına giriş yapılmadan önce tasarlanan Jet Grout kolonları ile zeminin karakteristik özelliklerinin tanımlayan değerler belirlenmiştir.

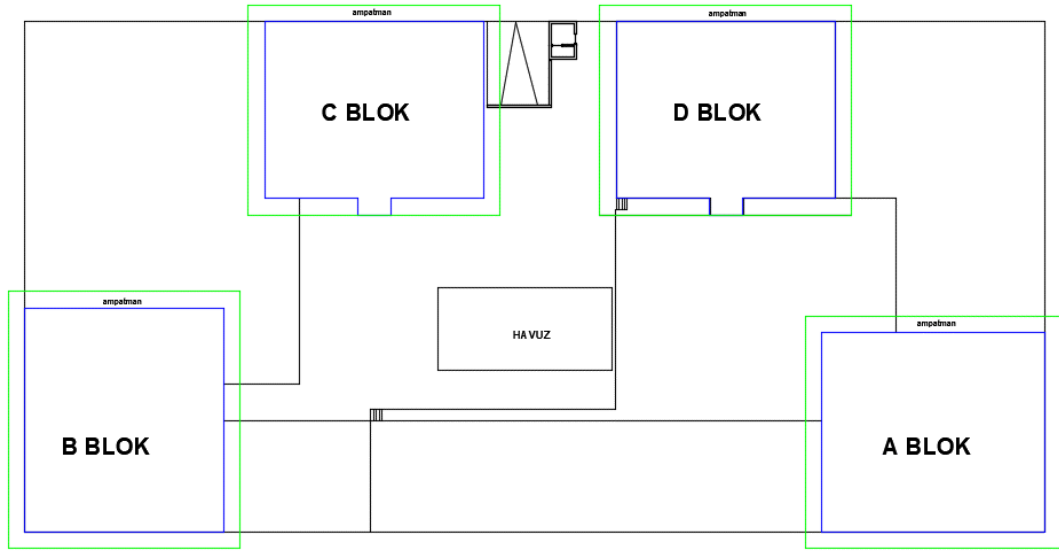
4.5.1 Çalışma alanının tanımlanması

Öncelikle çalışmaya konu olan problemlili alan tanımlama çalışmaları yapılmıştır. Bodrum kat dahil 14 kattan oluşması planlanan yapı, konut kullanımlı kuleler ve etrafını saran ticari alan olarak planlanan 2 katlı yapılardan oluşan kompleks yapı niteliğindedir. Şekil 4.10.'da yapıya ait 3 boyutlu görsel verilmiştir.



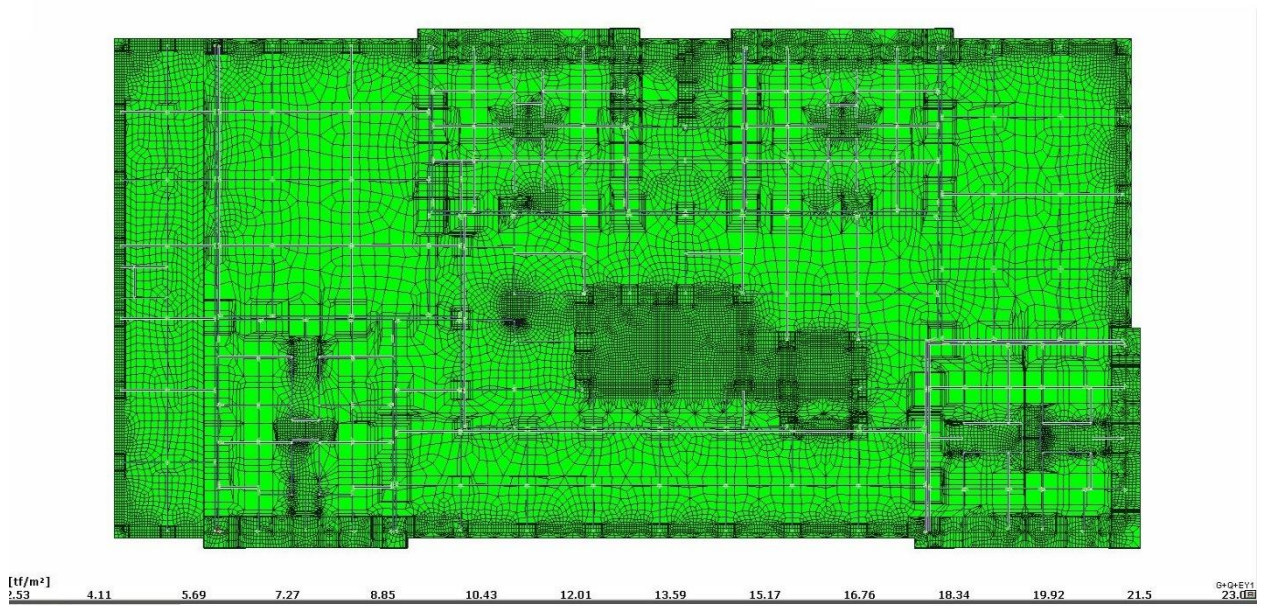
Şekil 4.10. Yapıya ait 3 boyutlu görsel

İlgili yapının oturacağı planlanan zeminin; C3 zemin grubu, Z3 zemin sınıfı, 1,50 kg/cm² taşıma gücüne ve 2000 t/m³ zemin yatak katsayısına sahip olduğu yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenmiştir. Görsel verilerden yola çıkılarak Jet Grout kolonların Şekil 4.11.'de verildiği gibi A-B blok ve C-D tip blokları altında yerleştirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca üst yapı çalışmalarından elde edilen verilere göre kulelerin oturduğu bölgelerde yapıdan 240 KPa'lık gerilmenin zemine aktarıldığı belirlenmiştir.



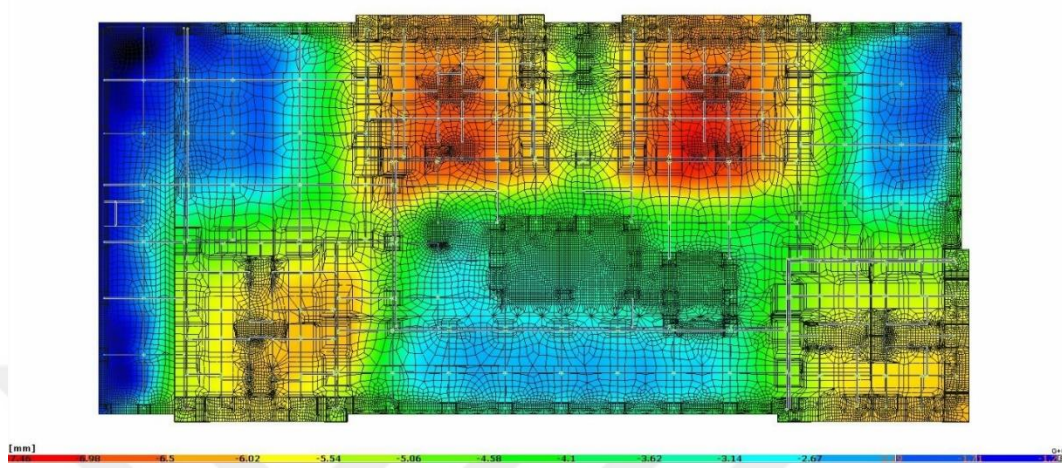
Şekil 4.11. Yapı yerleşim planı

Yapıya ait önceden yapılan üst yapı çalışmalarında Şekil 4.12.'de verilmiş olan grafikten yola çıkılarak çok katlı yapıların bulunduğu alanda emniyetli taşıma gücünün 24 t/m^2 'ye çıkarılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Yük kombinasyonlarına göre max. oluşması beklenen zemin emniyet gerilmesi diyagramı

Üst yapı analizleri sonucunda yapıdan temele aktarılan yükler doğrultusunda temel tabliyesinde beklenen maksimum oturma miktarı ve zorlanan bölgeler Şekil 4.13.'te verilmiştir.



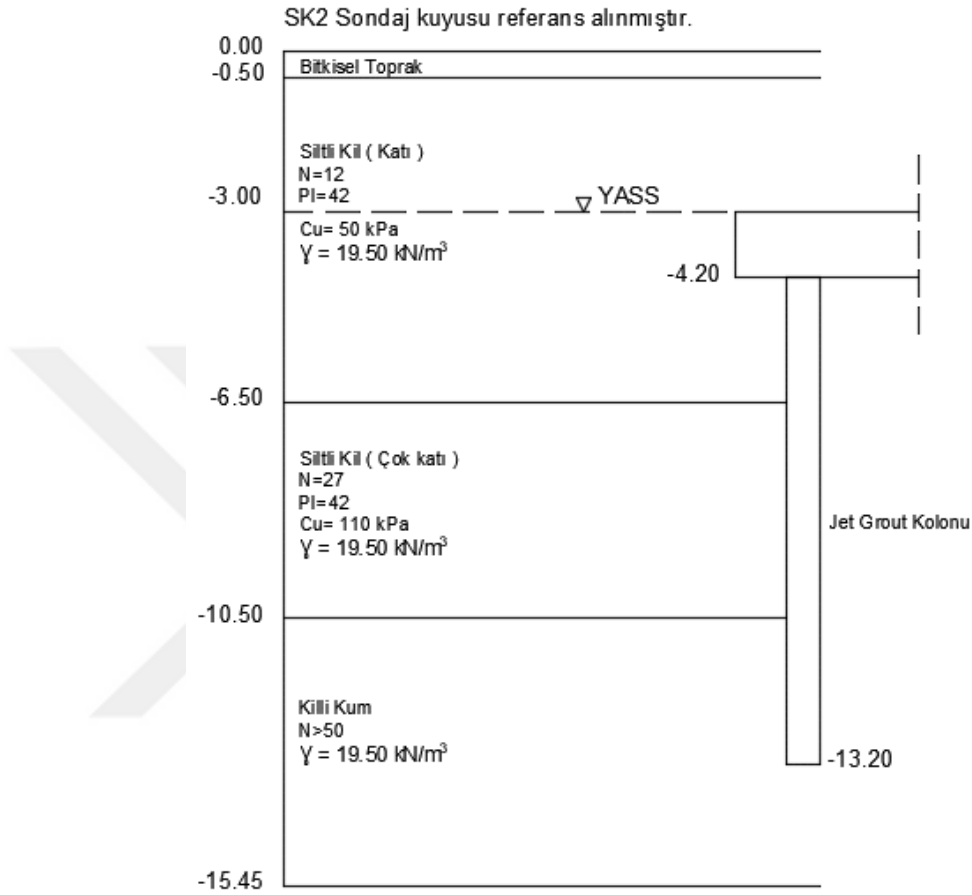
Şekil 4.13. IDECAD yazılımı maksimum taban basıncı değerleri diyagramı

Zemin etüdünden elde edilen verilere göre 3 adet 15,45 m ve 3 adet 12,45 m ve 1 adet 10m lik toplamda 7 adet sondaj kuyusu açılarak numune alınmıştır. Sondaj sırasında her 1,5m'de 1 adet standart penetasyon testi yapılmış ve kohezyonlu zeminde kıvam, kohezyonsuz zeminde ise sıklık kontrol edilmiş ve örselenmiş zemin numuneleri alınmıştır. Tablo 4.2.'de sondaj kuyularında elde edilen çalışılan derinlik ve YASS'nin karşılaştığı derinlik verilmiştir. YASS'ne 3,50 ve 4,50 m derinliklerinde ulaşılmıştır. Böylece model hazırlanırken ortamın aşırı yağış alabileceği düşüncesiyle, güvenli tarafta kalınarak YASS -3,00 kotunda kabul edilmiştir.

Tablo 4.2 Sondaj kuyuları ve YASS'nin tespit edildiği derinlikler

Sondaj No	Derinlik (m)	Y.A.S.S. (m)
SK1	15,00	4,00
SK2	12,00	4,00
SK3	10,00	4,00
SK4	12,00	3,50
SK5	15,00	4,50
SK6	12,00	4,50
SK7	15,00	4,00

PLAXIS modeline geçmeden önce elde edilen veriler doğrultusunda zemine ait profil ve tahmini Jet Grout kolon yerleşimi Şekil 4.14.'te verildiği gibi hazırlanmıştır. Bu kesit hazırlanırken alanda yapılmış sondaj çalışmalarının logları dikkate alınmıştır.



Şekil 4.14. Zemin profili ve Jet Grout kolon yerleşimi

4.5.2. Çalışma kapsamında yapılan kabuller

PLAXIS programı ile model oluşturulurken zemin ve yapısal elemanı tanımlayan parametreler seçmeden önce hangi parametre, hangi metod kullanılarak seçilecek araştırılmalıdır. Tablo 4.3.'te direkt olarak verilerin kullanılabileceği (*d*) düzeltme yapılarak tekrar hesaplanıp kullanılabilen (*i*) ve kontrollü kullanılabilen (*c*) veri toplama yöntemleri verilmiştir (Brinkgreve R.B.J., 2002).

Tablo 4.3. Model parametrelerine göre veri toplama yöntemleri (Brinkgreve R.B.J. 2002).

Parametreler	Modeller	ödeyometri	CRS	CD	CU	UU	DSS	Torvane (sertlik)	SPT	CPT	PM	DMT	Vane	Sınıflandırma	Tablo ve kurallar
C'	MC, DP, DC, SS(C), HS			D	D		D		C					C	C
Θ'	MC, DC, SS(C), HS			D	D		D		C					C	C
M (Sürtünme)	DP, CC			I	I		I		I					I	I
S _U	MC, DP, DC, HS					D		D	C	C			D	C	C
Ψ	MC, HS			D											C
E	LE, MC, DP	I	I	I	I	I	I		C	C		C		C	C
E ₅₀ ^{ref}	DC, HS	I	C	D	I	D	I		I	I				C	C
E _{ur} ^{ref}	DC, HS	(D)		(D)	(I)	(D)				I					C
E _{oed} ^{ref}	HS	D	D				I		I	I	I	C		C	C
λ (*)	CC, SS (C)	D	I							C	I	I		C	C
K (*)	CC, SS (C)	(D)	I							C				I	C
μ^*	SSC	(D)	D												C
N	LE, MC, DP, DC	I		D											C
v _{ur}	CC,SS(C),HS	(I)													C
m (enerji)	DC, HS	D	I	D	D									C	C
K _o ^{NC}	SS(C), HH	(D)												C	C
R _f	DC, HS														C

Çalışmanın yapıldığı ilgili alan ait PLAXIS programına veri girişinden önce Tablo 4.3.'te verilen model parametreleri ve toplama yöntemi göz önünde bulundurularak belirlenmiş kabuller Tablo 4.4.'te verilmiştir. Zemin 3 farklı kademede sınıflandırılmıştır. Değerler gerek yapılan deney sonuçları gerekse daha önceki kabuller dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. Modelleme kabulleri

Parametreler	Siltli Kil	Siltli Kil (Kati)	Killi Kum	Temel	Jet Grout (Tek Eleman)	Jet Grout (Kompozit)
Modellemede Kullanılan Eleman Türü	Undrained B	Undrained B	Undrained A	Non-porous	Embedded BeamRow	Soil
Eleman Davranış	MC	MC	MC	LE	MC	MC
Kabulü						
$\rho(\text{kN/m}^3)$	18,50	18,50	19,50	24,00	22,00	*
$\rho_{\text{yas}}(\text{kN/m}^3)$	19,50	19,50	21,00	24,00	22,00	*
$E_{50}(\text{kPa})$	2785	4930	19840	30,00E6	3,2E6	*
$E_{0ed}(\text{kPa})$	-	-	-	-	-	*
$E_{ur}(\text{kPa})$	-	-	-	-	-	*
ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	0,15	0,25	*
$C(\text{kPa})S_u$	23	10	5	-	-	*
$\phi(^{\circ})$	31	34	42	-	-	*
$\Psi(^{\circ})$	-	-	-	-	-	-
e_{int}	0,50	0,50	0,50	-	-	-
$f_s(\text{kN/m})$	-	-	-	-	737	-
$Q_g(\text{kN})$	-	-	-	-	280	-
$EA(\text{kN})$	-	-	-	-	-	-
$EI(\text{kN/m}^2)$	-	-	-	-	-	-
$d(\text{m})$	-	-	-	-	-	-
$W(\text{Kn/m})$	-	-	-	-	-	-
$M(\text{Enerji})$	1,00	0,50	0,50	-	-	-

*Tablo 4.9 da verilmiştir.

4.5.3. Jet Grout kolon özelliklerinin sayısal ortama aktarımı

Çalışma kapsamında Jet Grout kolonları ve zemin modellenirken 3 farklı model denenmiştir. Jet Grout kolonları yapısal model tasarımında Model 1 ve Model 2’de Embedded Beam Row olarak tasarlanmıştır. Model 3’te ise zemin ve Jet Grout elemanların birleşimiyle oluşmuş yeni bir zemin tabakası oluşturulmuştur.

4.5.3.1. Elastiste modülü kabulü

Jet Grout kolonları su/çimento oranı 1 kabul edilerek hazırlandığı varsayımı ile elastiste modülü hesabı Tablo 4.5.’te verilmiş olan bağlantılardan seçilerek denklemler (Denklem 4.8, 4.9a, 4.9b) yardımıyla hesaplanmıştır.

Tablo 4.5. Zemin ve elastite modülü arasındaki ampirik formüller (Stoel, 2001; Donmez, 2010).

Bağlantı	Kum zeminde Jet Grout	Kil zeminde Jet Grout
Çekme dayanımı ($f_{ct, sp}$) ve tek eksenli basınç dayanımı (f_c)	$f_{ct, sp} = 0,3 (f_c)^{3/5}$	$f_{ct, sp} = 0,4 (f_c)^{3/10}$
Elastite Modülü ve tek eksenli basınç dayanımı (f_c)	$E = 800 (f_c)^{1/2}$	$E = 500 (f_c)^{2/3}$
tek eksenli basınç dayanımı (f_c) ve su çimento oranı ($s/ç$)	$f_c = 7 + 8,1(s/ç)^2$	$f_c = 2 + 3,6(s/ç)^2$

$S/Ç = 1$ için;

$$f_c = 7 + 8,1 \left(\frac{s}{ç} \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

$$E_{kum} = 800 (f_c)^{1/2} \quad (4.9a)$$

$$E_{kil} = 500 (f_c)^{2/3} \quad (4.9b)$$

$E_{jgkum} = 310800 \text{ kPa} \sim 320000 \text{ kPa}$ kabul edilmiştir.

$E_{jgkil} = 305400 \text{ kPa} \sim 310000 \text{ kPa}$ kabul edilmiştir.

4.5.3.2. Birim hacim ağırlık kabulü

Jet Grout kolonun birim hacim ağırlığı seçilirken daha önceki çalışmalardan referans alınarak hairlanmış olan Tablo 4.6.'da verilmiş olan datalar göz önünde bulundurularak killi ve kumlu zeminde $22,00 \text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir.

Tablo 4.6. Jet 1ile farklı zeminlerde imal edilmiş Jet Grout kolon kuru birim hacim ağırlıkları (Croce P. ve ark.).

Zemin türü	Kuru birim hacim ağırlık (KN/m^3)	Çalışma
Kil	16,25	Botto ve Capolupo (1989)
Siltli kil	16,81	Xanthakos ve ark. (1994)
Siltli kum	18,32	Xanthakos ve ark. (1994)
Kumlu kil	17,89	Croce ve ark. (2004a)
Volkanik kum	13,89	Croce ve Flora (1998)
Çakıl	22,80	Mongiovi ve ark.(1991)

4.5.3.3. Kohezyon ve kayma açısı kabulü

Jet Grout kolonları portland çimentolu beton özelliğinde davranış gösterir. Beton malzeme özelliğinde doğrusal olmayan elastik şekil değiştirme yaparak gevrek kırılma sonucu göçer (Coulter, 2004). Jet Grout kolonu etrafındaki zemini

boşluklarını sıkıştırarak doldurur. Böylece zemini parametreleri üzerinde iyileştirme meydana getirmiş olur. İyileşmenin Jet Grout kolonu modellenmesine yansıtılabilmesi için model Mohr-Coulumb model ile modellendiğinde Jet Grout kolonları malzemesi için yüksek kohezyon özelliği tanımlanabilir. Tablo 4.7. ve Tablo 4.8.'de daha önceki çalışmalardan yola çıkılarak hazırlanmış farklı zemin türlerine göre Jet Grout kolon özellikleri verilmiştir (Dönmez, 2010).

Tablo 4.7. Killi zeminde Jet Grout kolonu özellikleri

q_u	q_t	c	ϕ	E
KN/m ²	KN/m ²	KN/m ²	Derece	KN/m ²
3000	420	737	38	300000
6000	840	1474	38	600000
9000	1260	2211	38	900000

Tablo 4.8. Kumlu zeminde Jet Grout kolonu özellikleri

q_u	q_t	c	ϕ	E
KN/m ²	KN/m ²	KN/m ²	Derece	KN/m ²
5000	700	1229	38	750000
10000	1400	2457	38	1500000
15000	2100	3685	38	2250000

4.5.3.4. Jet Grout kolonu poisson oranı

Kil ve kumlu zeminlerde üretilen püskürtmeli toprak betonunun poisson oranı (ν) 0,25 olarak seçilmiştir (Fang ve ark, 1994). Ayrıca daha önce yapılmış çalışmalardan yola çıkılarak hazırlanmış olan Tablo 4.9.'da seçilmiş olan zemin türlerine göre farklı poisson oranı değerleri verilmiştir. Bu tablo dikkate alınarak Jet Grout poisson oranı belirlenmiştir (Doganışık, 2010).

Tablo 4.9. Zemin türlerine göre farklı poisson oranları (Doganışık, 2010).

Zemin Türü	Poisson Oranı
Kumlu Kil	0,2-0,3
Silt	0,3-0,35
Kum	0,2-0,4
Kaya	0,1-0,4
Buz	0,36
Beton	0,15

Güvenli tarafta kalınması için kolonun Siltli Kil (Çok Katı) birimde sonlandığı kabul edilmiştir. Kolon uç taşıma kapasitesi aşağıda verilen eşitliklere (Denklem 4.12., 4.13.) dayanarak belirlenmektedir.

$$Q_U = A_p \cdot C_u \cdot N_c \quad (4.12)$$

$$A_p = \pi \cdot r^2 \quad (4.13)$$

$$A_p = \pi(0,3)^2 = 0,2826 \text{ m}^2$$

$$C_u = 110 \text{ kPa (Uç Bölgesi Değeri)}$$

$$\phi = 0 \text{ ve Derinlik / Çap} = 15 \text{ için } N_q = 0,32 \text{ ve } N_c = 9,00 \text{ (Berezantsev ve ark.)}$$

$$Q_U = 0,2826 \times 110 \times 9$$

$$Q_U = 280 \text{ kN olarak hesaplanmıştır.}$$

4.5.3.6. Interface tanımını yapılması

Jet Grout yöntemi ile imal edilen duvarların yüzeyleri imalat sırasında uygulanan jetting işleminden nedeniyle pürüzlü olmaktadır. Bu nedenle zemin ve yapı arasında oluşması muhtemel etkileşim kuvvetini azaltmak için arayüzey elemanı tanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Arayüzey elemanının tanımlandığı durumlarda R_{inter} değeri 1,0 olarak alınmaktadır (Kusin, 2009). Tez çalışmasında Model 3'te R_{inter} değeri 0,5 olarak alınmıştır.

4.5.4. Zemin koşullarının sayısal ortama aktarılması

Zemin modeli oluşturulurken Poligon eleman türü ile modelleme yapılmış ve elemanlar Mohr-Coulomb model yaklaşımı ile modellenmiştir. Zemin raporunda yeralan arazi ve laboratuvar deney sonuçları göz önünde bulundurularak zemin profili oluşturulmuş ve sondaj kuyularına ait tabaka ve N_{ort} değerleri Tablo 4.10.'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Sondaj kuyusu tabakaları ve N_{ort} değerleri

Derinlik (m)	Tabaka	Nort	Derinlik (m)	Tabaka	Nort
SK1			SK4		
0,00-0,50	Bitkisel toprak		0,00-0,50	Bitkisel toprak	
0,50-9,80	Az çakıllı kumlu kil	16	0,50-7,90	Az çakıllı kumlu kil	19
9,80-11,20	Az çakıllı killi kum	40	7,90-12,45	Az çakıllı killi kum	>50
11,20-15,45	Az çakıllı kumlu kil	30	SK5		
SK2			0,00-0,50	Bitkisel toprak	
0,00-0,50	Bitkisel toprak		0,50-7,00	Az çakıllı kumlu kil	17
0,50-9,90	Az çakıllı kumlu kil	12	7,00-10,00	Az çakıllı killi kum	40
9,90-12,45	Az çakıllı killi kum	>50	10,00-15,45	Az çakıllı kumlu kil	30
SK3			SK6		
0,00-0,50	Bitkisel toprak		0,00-0,50	Bitkisel toprak	
0,50-5,00	Az çakıllı kumlu kil	15	0,50-12,45	Az çakıllı kumlu kil	18
5,00-6,90	Az çakıllı killi kum	20	SK7		
6,90-10,00	Az çakıllı kumlu kil	>50	0,00-0,50	Bitkisel toprak	
			0,50-15,45	Az çakıllı kumlu kil	17

4.5.4.1. Elastiste modülü kabulü

Killi zemin için E_{50} değeri aşağıda verilen eşitliğe (Denklem 4.14) dayanarak belirlenmektedir.

$$E_{50} = \frac{15000Cu}{Ip} \quad (\text{Termaat ve ark, 1985}) \quad (4.14)$$

Siltli kil

$$E_{50} = 15000 \times 78 / 0,42 = 2785,7 \text{ kPa} \sim 2785 \text{ kPa}$$

Siltli kil (katı)

$$E_{50} = 15000 \times 138 / 0,42 = 4928,6 \text{ kPa} \sim 4930 \text{ kPa}$$

Kum zemin için E_{50} değeri SPT deney sonuçları ile Tablo 4.11’de yeralan aşağıda verilen eşitliğe (Denklem 4.15) dayanarak belirlenmektedir (Bowles, 1996). Kum için N_{ort} 47 seçilmiştir.

Tablo 4.11. SPT deney sonuçlarının Elastiste Modülü bağlantıları

Kum (Normal Konsolide)	$E_s = 500 (N+15)$
Killi Kum	$E_s = 320 (N+15)$
Siltli, Kumlu silt	$E_s = 300 (N+6)$
Çakıllı kum	$E_s = 1200 (N+6)$

$$E = 320 \times (47 + 15) = 19840 \text{ kPa}$$

4.5.4.2. Birim hacim ağırlık kabulü

SK1 ve SK7 kuyularından 4,00-4,50 m ve 5,50-6,00 m derinliklerinden alınan UD tüp numune üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre Siltli Kil, Siltli Kil (Katı) ve Killi Kum tabakaları zemin birim hacim ağırlıkları $19,50 \text{ kN/m}^3$ olarak seçilmiştir.

4.5.4.3. Kohezyon-kayma direnci-kabarma açısı kabulü

Çalışma alanında daha önceden herhangi bir geoteknik problem rapor edilmemiştir. SPT deneylerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınmış ve kohezyon-kayma direnci-kabarma açısı hesapları SPT deney sonuçlarıyla hesaplanmıştır. SK 2 kuyusu en elverişsiz durum olarak kabul edilmiştir. Hesaplarda kullanılması için $(N_1)_{60}$ değeri eşitlikleri (Denklem 4.16) yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 4.12’de verilen veriler elde edilmiştir.

$$(N_1)_{60} = Cn.Er.N_{ort} \quad (4.16)$$

Tablo 4.12. Derinlik bağlı $(N_1)_{60}$ değer değişimi

SK2						
DERİNLİK	N ort	YASS	σ	Cn	ER	$(N_1)_{60}$
1,5	12	0	29,25	1,8490	0,75	16,641
3	13	9,81	48,69	1,4331	0,75	13,973
4,5	10	9,81	68,13	1,2115	0,75	9,0865
6	13	9,81	87,57	1,0686	0,75	10,420
7,5	26	9,81	107,01	0,9667	0,75	18,851
9	28	9,81	126,45	0,8893	0,75	18,675
10,5	50	9,81	145,89	0,8280	0,75	31,047
12	50	9,81	165,33	0,7777	0,75	29,165

$(N_1)_{60}$ ortalama hesaplanıp Siltli kilde 13 Siltli kil (katı) 23 ve Killi kumda 31 kabul edilmiştir.

Kohezyon (c)

Kohezyonlu zeminlerde Peck ve ark. (1974) N değerleri ile suya doymun killi zeminlerin kıvamı arasında bir korelasyon önermişlerdir. Güncel uygulamada q_u ile N arasındaki ilişki eşitlik (Denklem 4.17) yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$q_u = N_k \cdot (N_1)_{60} \quad (4.17)$$

Denklemde;

q_u : Serbest basma direnci,

N_k : Katsayı, Bowles (1996) $N_k=12$ olarak önermektedir.

Siltli Kil zeminde; kohezyon güvenli tarafta kalmak için 5 alınmıştır.

Siltli Kil (Katı) zeminde; kohezyon güvenli tarafta kalmak için 23 alınmıştır.

Kayma direnci açısı (ϕ)

Kohezyonlu zeminde Peck ve ark. (1974)'nın yapmış olduğu çalışmada yeralan eşitlik (Denklem 4. 18) kullanılmıştır.

$$\phi' = 27,10 + (N_1)_{60} \cdot 0,3 - 0,00054(N_1)_{60}^2 \quad (4.18)$$

Kil Silt zeminde;

$$\phi' = 27,10 + 13 \times 0,3 - 0,00054 \times 13^2 = 31^\circ$$

Kil Silt (Katı) zeminde;

$$\phi' = 27,10 + 23 \times 0,3 - 0,00054 \times 23^2 = 34^\circ \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Kohezyonsuz zeminlerde örselenmemiş zemin örneklerinin alınarak kayma direnci açısının laboratuvarında belirlenmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu durumda

arazi deneyleri ile kayma direnci açısı ϕ' arasında verilen ampirik korelasyonlar kullanılmaktadır. Kohezyonsuz zeminlerde Hatanaka, M. ve Uchida, A. (1996) yapmış olduğu çalışmadan yola çıkılarak hesap yapılmıştır. Yaklaşımında dondurularak alınmış yüksek kalitedeki örselenmemiş doğal kum numuneleri üzerinde direkt üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen ϕ değerleri ile $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişkidir yola çıkılarak aşağıda verilen eşiklik (Denklem 4.19) kullanılmıştır.

$$\phi' = \sqrt{15,4(N_1)_{60}} + 20 \quad (4.19)$$

Kumlu zeminde;

$$\phi' = \sqrt{15,4 \times 31} + 20 = 41,5^\circ \sim 42^\circ \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Kabarma Açısı (ψ)

Kohezyonsuz zeminlerde kabarma açısı eşitlik (Denklem 4.20) yardımıyla hesaplanmıştır (Brinkgreve ve ark., 2005).

$$\psi = \phi - 30 \quad (4.20)$$

$$\psi = 42 - 30 = 12^\circ \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

4.5.5. Kompozit bölge kabulünde parametrelerinin hesaplanması

Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi uygulamalarında model sayısal ortama aktarılırken, Jet Grout kolonlarının kümелendiği bölge kompozit iyileşme bölgesi olarak adlandırılarak modellenenbilmektedir. Tasarlanan iyileşmiş zemin bölgesi karakteristik özellikleri alan oranı göz önünde bulundurularak tekrar hesaplanmalıdır. Alan oranı aşağıda verilen eşitlik (Denklem 4.21) dayanarak belirlenmektedir.

$$Ra = \frac{A_{Jg}}{S^2} \quad (4.21)$$

Denklemden:

A_{jg} : Jet Grout kolonu taban alanı,

S : Jet Grout kolonları arasındaki mesafe, Tez konusu proje için alan oranı
Tablo 4.13.' te verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.13. Kompozit bölge için alan oranı ve jet parametreleri tablosu

D	S	A_{jg}	Ra	$E_{jg(Kil)}$	$E_{jg(Kum)}$	$C_{jg(Kil)}$	$C_{jg(Kum)}$	$\phi_{jg(Kil)}$	$\phi_{jg(Kum)}$
0,6	2	0,2826	0,07065	3,1E5	3,2E5	750	1230	38	38

Tez konusu çalışmada, elastite modülü (E), kohezyon (c) ve kayma direnci açısı (ϕ) kompozite zeminde aşağıda verilen eşitlikler (Denklemler 4.21, 4.22, 4.23) dayanarak belirlenmektedir. Tablo 4.14'te iyileşmiş zemine bölgesine ait kompozit zemin parametreleri verilmiştir.

$$E_{komp} = (1 - Ra) E_{zem} + Ra \cdot E_{jg} \quad (4.21)$$

$$C_{komp} = (1 - Ra) C_{zem} + Ra \cdot C_{jg} \quad (4.22)$$

$$\phi_{komp} = (1 - Ra) \phi_{zem} + Ra \cdot \phi_{jg} \quad (4.23)$$

Tablo 4.14. Jet Grout kolonları - zemin karışımı kompozit zemin parametreleri

Parametre	$E_{50}(kPa)$	$E_{50}(kPa)_{komp}$	C	ϕ	C_{komp}	ϕ_{komp}
Silt Kil	2785	24490	78	-	125,47	-
Silt Kil (Katı)	4930	26483	138	-	181,24	-
Killi Kum	19840	41046	5	42	91,55	41,7

4.5.6. Yayılı temel özelliklerinin sayısal ortama aktarılması

Yayılı temel sayısal ortama aktarımında eleman, lineer elastik eleman olarak tanımlanmış ve betonarme malzeme özellikleri atanmıştır. Tablo 4.15.'te ilgili yayılı temel parametreleri verilmiştir.

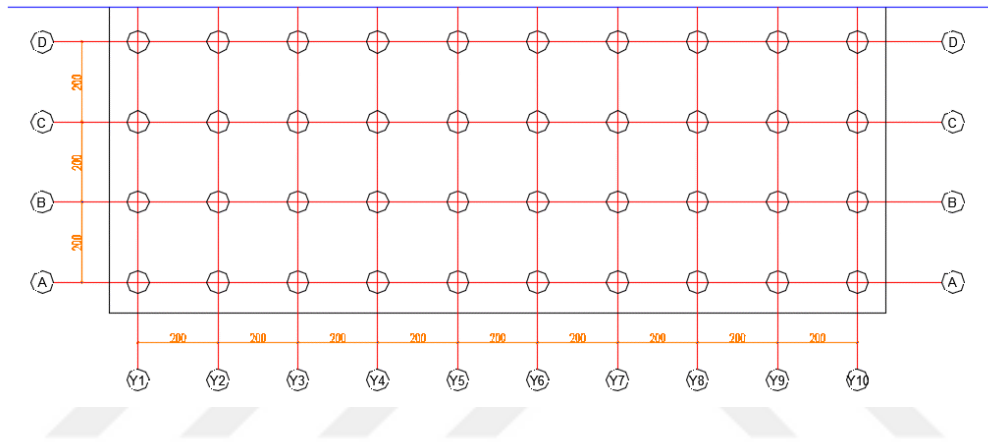
Tablo 4.15. Yayılı temel parametreleri

Malzeme	Malzeme Modeli	Drenaj Durumu	ρ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
Yayılı Temel	Lineer Elastik	Geçirimsiz	24,00	30000	0,2

4.6. Analiz adımları

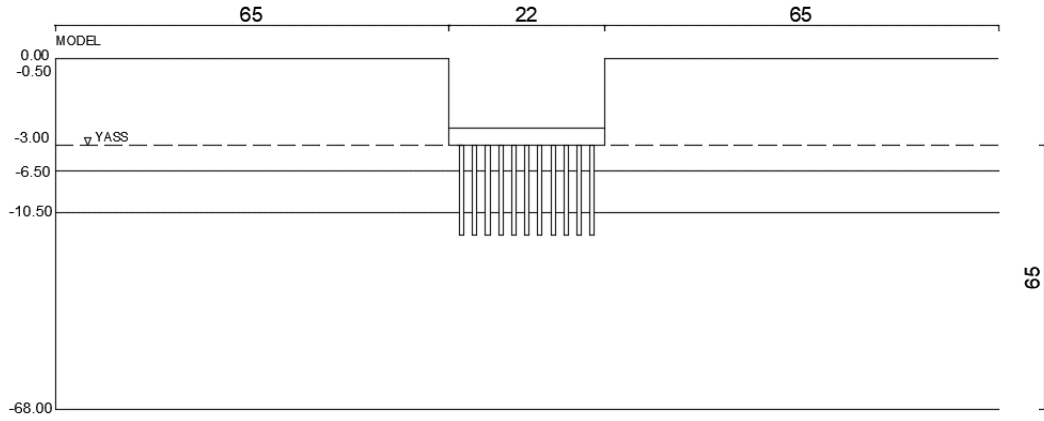
4.6.1. Geometrinin oluşturulması

Jet Grout kolonları çubuk eleman ve kompozit bölge tanımı yapılarak 2 durum içinde incelenmiştir. Kolonlar modellenirken çubuk eleman Mohr-Coulomb model özellikte seçilmiştir. Jet Grout kolonları 9,00 m boyunda, 60 cm çapında ve 2,00 m aralıklarda seçilmiştir. Şekil 4.16.'da Jet Grout kolon yerleşim planı verilmiştir.



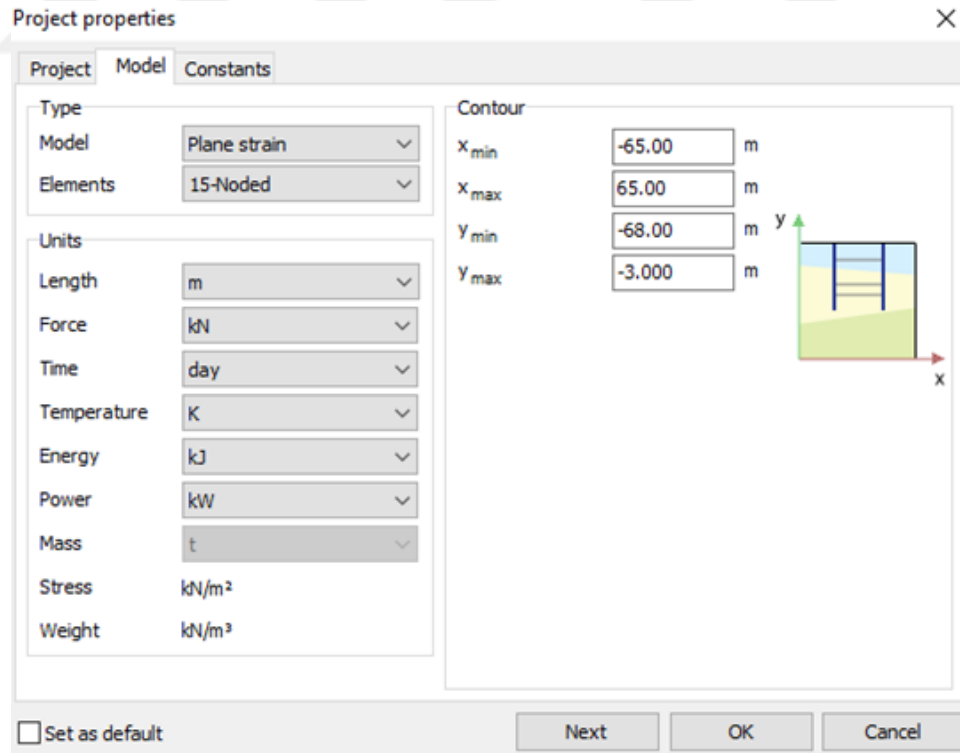
Şekil 4.16. Jet Grout kolon yerleşim planı

Model sayısal ortama aktarılırken çalışma alanı minimum temel genişliğinin 3 katı yatayda ve düşeyde olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.17.'de tüm modellerde ortak kullanılan çalışma alanı verilmiştir. Şekil 4.17.'de görüldüğü üzere çalışma alanının sınır koşulları yatay düzlemde, minimum (x_{min}) -76,00 m ve maksimum (x_{max}) +76,00 m düşey düzlemde ise minimum (y_{min}) -3,00 m ve maksimum (y_{max}) -68,00 m alınmıştır.

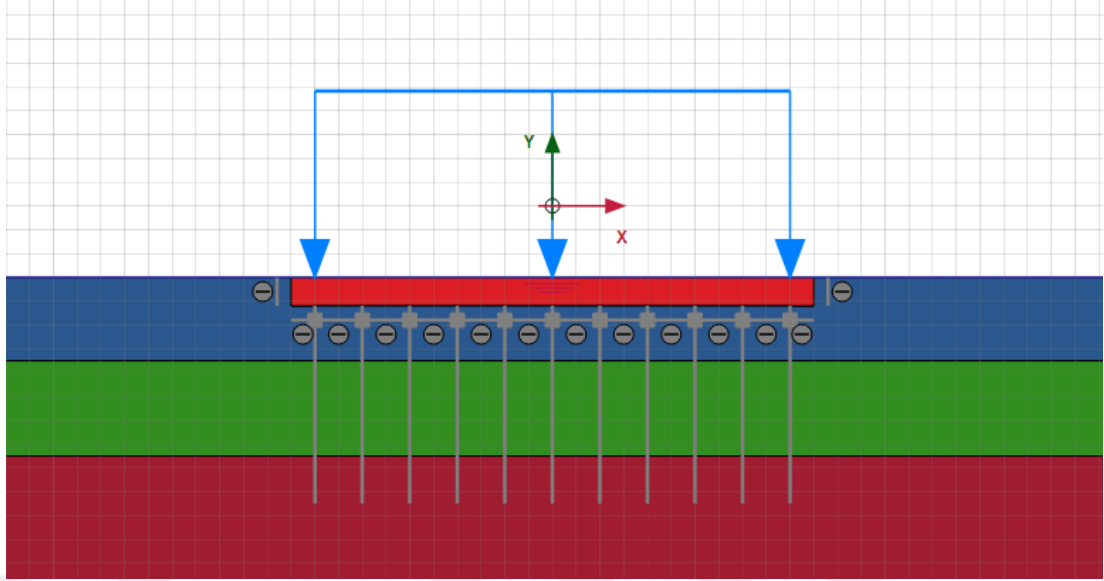


Şekil 4.17. Çalışma alanı sınır değerleri

15-düğüm noktalı üçgen elemanlar göçme yüklerinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılmakta ve 15 düğümlü eleman kullanılan modellerde analiz sonuçları 6 düğümlü eleman kullanılan modellere nazaran daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Brinkgreve, 2002). Çalışmada Şekil 4.18.'de verildiği gibi daha gerçekçi sonuç elde etmek adına 15 düğümlü eksenel simetri modeli kullanılmıştır.

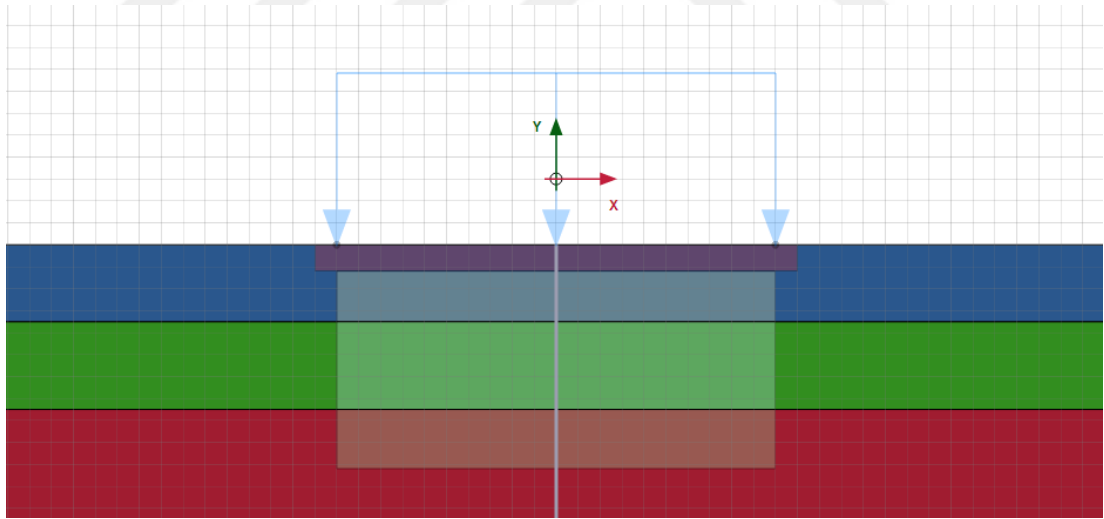


Şekil 4.18. Model parametreleri



Şekil 4.20. PLAXIS'te Jet Grout kolonlarının Çubuk Eleman - Interface kabulü ile modellenmesi

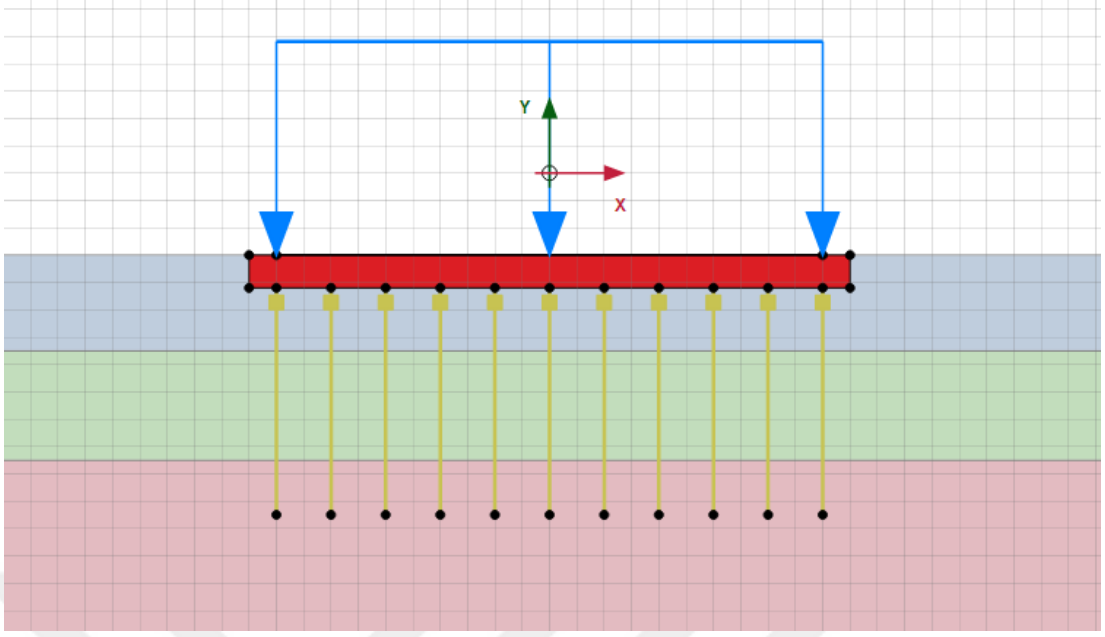
Model 3'te ise Jet Grout kolonları ve zeminin ortak oluşturduğu yeni bir yüzey elemanı her tabaka için ayrı ayrı Şekil 4.21.'de verildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 4.21. PLAXIS'te Jet Grout kolonlarının Kompozit bölge kabulü ile modellenmesi

4.6.3. Yük tanımı

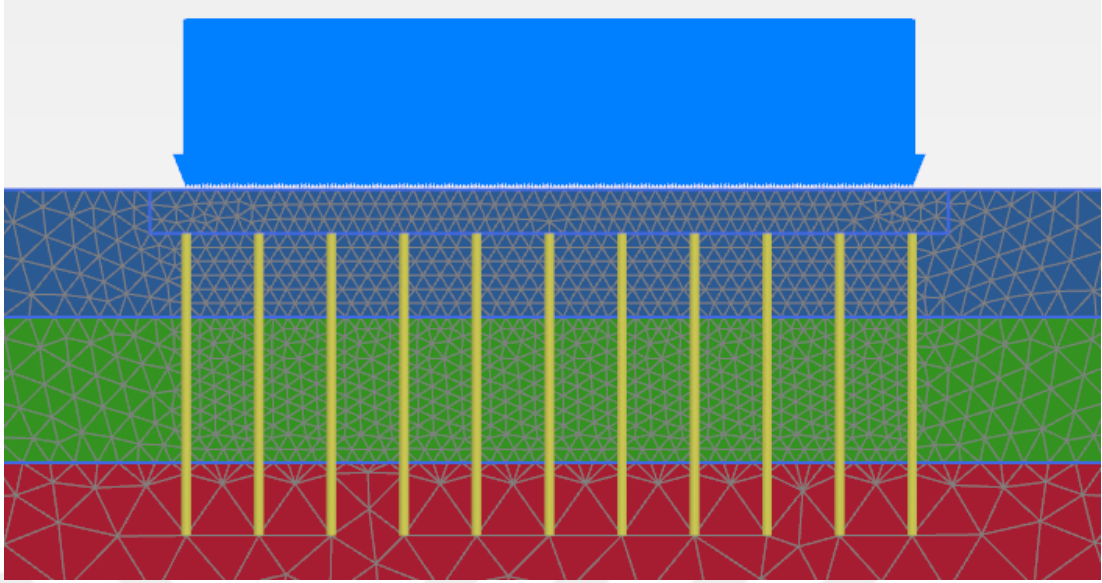
Temelden zemine yapıdan yaklaşık olarak 240 kPa'lık bir gerilme aktarılacağı kabul edilmiş ve 240 kN/m/m'lik yük tanımı yapılmıştır. Şekil 4.22.'de çalışmaya ait yük tanım geometrisi verilmiştir.



Şekil 4.22. Yük tanım geometrisi

4.6.4. Ağ tanımı

Daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş ve modellerde düğüm sayısı ve ağ sıklığı arttıkça daha sağlıklı sonuçların elde edileceği kanısına varılarak yapısal elemanların bulunduğu bölgelerde ağlar sıklaştırılmıştır. Şekil 4.23.'te Model 1'e ait ağ modeli verilmiştir.



Şekil 4.23. Ağ modeli-Model 1

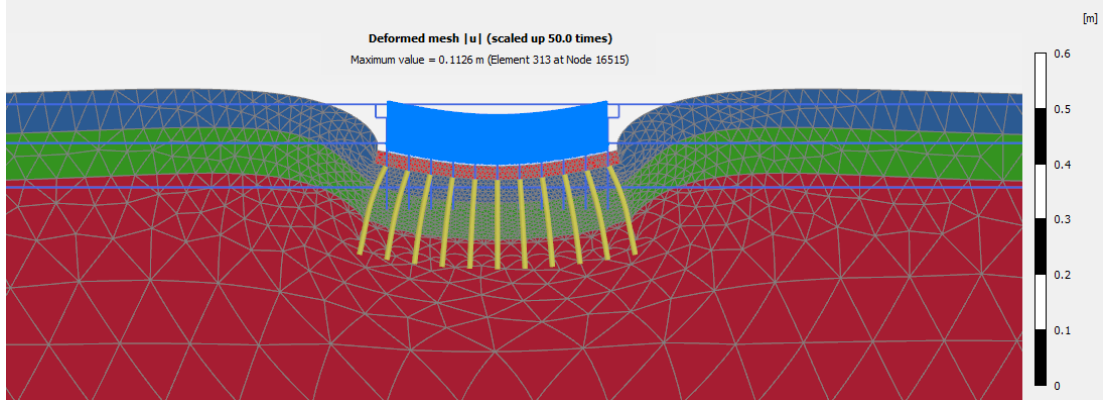
Analize geçilmeden önce kademeli inşaat modunda yapı zemin etkileşim seneryosu hazırlanmıştır. Çalışmada sırasıyla model;

- Serbest zemin durumu (aşama 1)
- Temel imalatı (aşama 2)
- Üst yapı imalatı (aşama 3)
- Jet imalatı (aşama 4)
- Jet+Temel imalatı (aşama 5)
- Jet+Temel imalatı+Üst yapı imalatı (aşama 6) olmak üzere 6 farklı durum için iyilştirme öncesi ve sonrası için incelenmiştir.

4.7. Analiz sonuçları

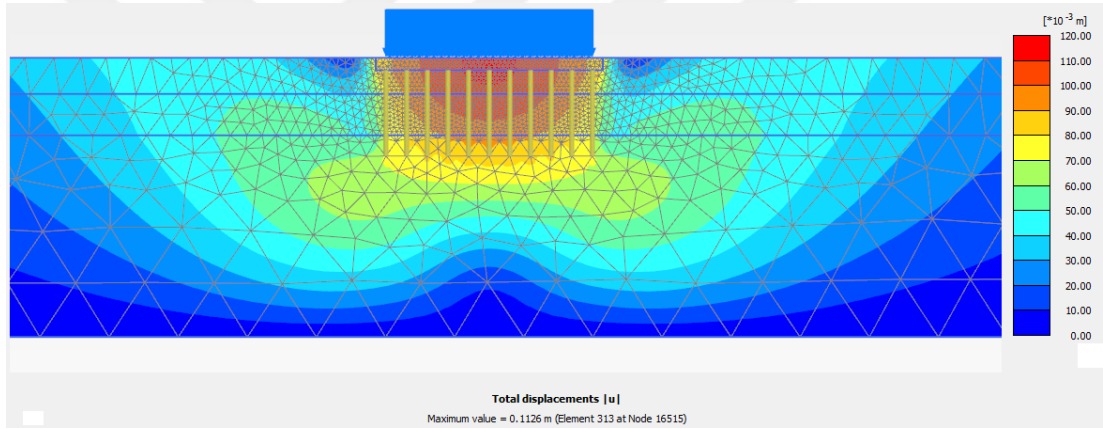
4.7.1. PLAXIS model sonuçları

PLAXIS programında model oluşturulması ve veri aktarımının ardından analiz sonuçları elde edilmiştir. Öncelikli olarak Jet Grout kolonları cubuk eleman olarak modellenmiş ve analiz yapılmıştır. Şekil 4.24.'te Model 1'e ait analiz sonucunda elde edilmiş Jet Grout kolonları deformasyon görseli verilmiştir.



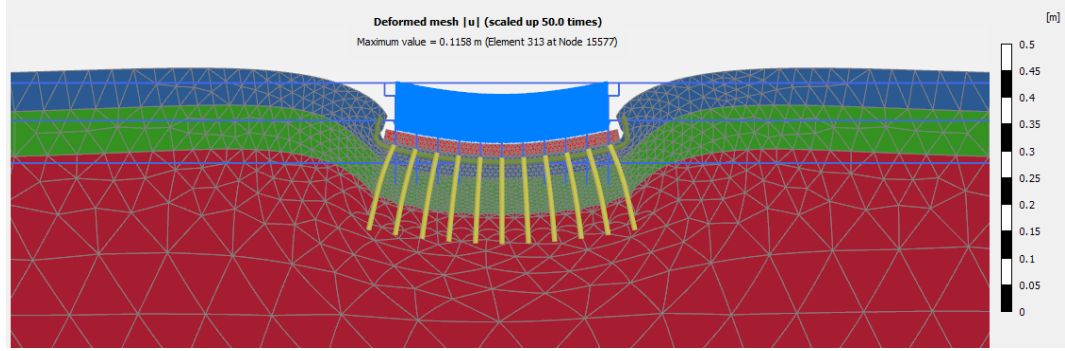
Şekil 4.24. Model 1 Jet Grout kolonları deformasyon görseli

Şekil 4.25.'te ise Model 1'e ait analiz sonucunda elde edilmiş iyileşme sonrası zeminde meydana gelmesi beklenen deformasyon dağılımı görseli verilmiştir.



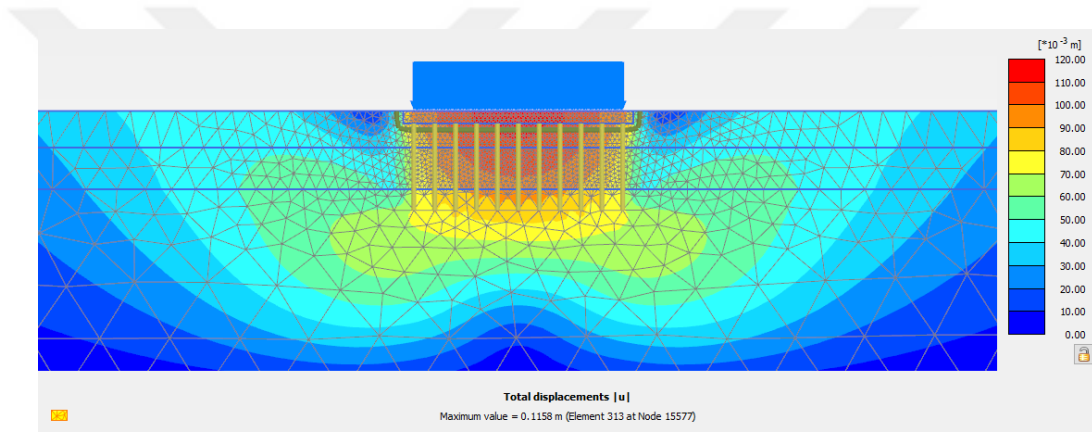
Şekil 4.25. Model 1 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı

Model 2'de ise Jet Grout kolonları yine çubuk eleman olarak modellenmiş ve temel ile zemin arasında interface bölgesi oluşturularak analiz yapılmıştır. Şekil 4.26.'da Model 2'ye ait analiz sonucunda elde edilmiş Jet Grout kolonları deformasyon görseli verilmiştir.



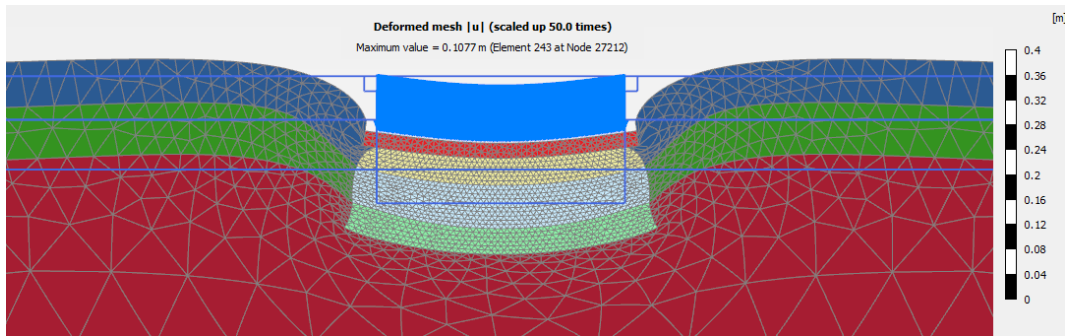
Şekil 4.26. Model 2 Jet Grout kolonları deformasyon görseli

Şekil 4.27.'de ise Model 2'ye ait analiz sonucunda elde edilmiş iyileşme sonrası zeminde meydana gelmesi beklenen deformasyon dağılımı görseli verilmiştir.



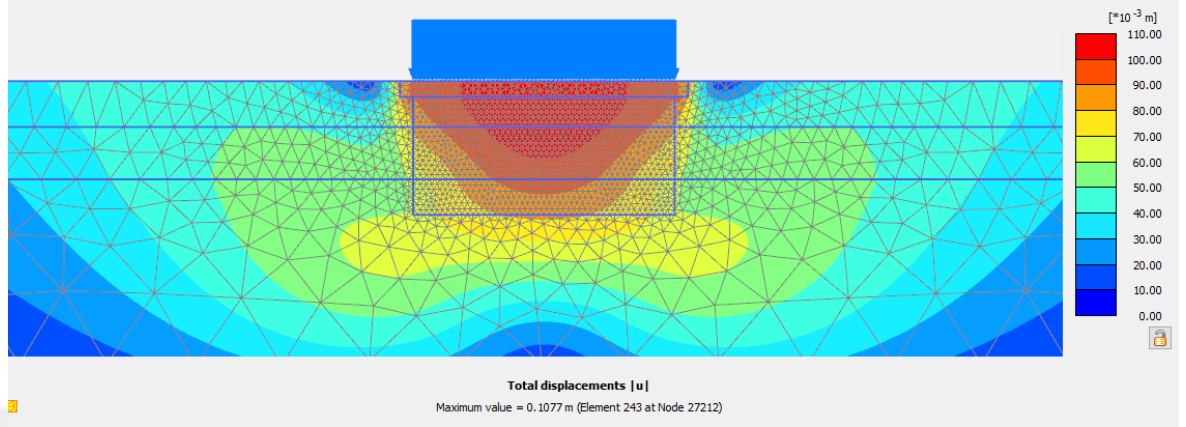
Şekil 4.27. Model 2 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı

Model 3'te ise Jet Grout kolonları zemin ile birlikte kompozit iyileşme bölgesi oluşturularak analiz yapılmıştır. Şekil 4.28.'de Model 3'e ait analiz sonucunda elde edilmiş kompozite bölge deformasyon görseli verilmiştir.



Şekil 4.28. Model 3 Kompozit bölge deformasyon görseli

Şekil 4.29.'da ise Model 3'e ait analiz sonucunda elde edilmiş iyileşme sonrası zeminde meydana gelmesi beklenen deformasyon dağılımı görseli verilmiştir.



Şekil 4.29. Model 3 iyileşme sonrası zemin deformasyon dağılımı

4.7.2. Geleneksel yöntem analiz sonuçları

Analiz sonuçları geleneksel yöntemler ile de mukayese edilmesi için ilk durum taşıma gücü, oturma hesabı ve iyileşen zemin taşıma gücü ve oturma hesabı yapılmıştır. Arazi kotları ve temel derinliği dikkate alınarak kumlu az çakıllı, kil birime oturacak temelde, uygulanabilecek taşıma gücü ve emniyet gerilmesi eşitlik (Denklem 4.24) yardımıyla hesaplanmıştır.

İyileşme öncesi taşıma gücü:

$$q_u = N_c.C_u + \gamma.D_f \quad (4.24)$$

Güvenli tarafta kalmak adına $C_u = 70$ kPa seçilmiştir.

$$N_c = 5.14 \text{ (Terazghi)}, \quad \gamma = 1.95 \text{ t/m}^3, \quad D_f = 4.00 \text{ m}$$

$$q_u = 5,14 \times 70 + 19,5 \times 4$$

$$q_u = 437,8 \text{ kPa}$$

GS = 3 seçilir ise,

$$q_{emn} = \frac{437,8}{3} = 146kPa \sim 1,50kg / cm^2 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

İyileşme öncesi oturma hesabı:

Yapıdan zemine aktarılan yükler doğrultusunda temelde otuşacak muhtemel oturma eşitlikler (Denklem 4.25, 4.26) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Q_{net} = Q - \gamma \cdot Df \quad (4.25)$$

$$S = mv \cdot Q_{net} \cdot H \quad (4.26)$$

$$Q_{net} = 240 - 19,50 \times 4,00 = 162kPa$$

$$S = 0,016 \times 1,62 \times 650 = 16,84cm \quad 16,84 \text{ cm} > 10,00 \text{ cm} \text{ olarak zemin iyileştirmesi uygulaması öncesi durum için belirlenmiştir.}$$

Yapı yükleri doğrultusunda temel altında oluşması beklenen gerilmelerin neden olacağı oturma değerinin limiti değerleri aşaması nedeniyle zeminde iyileştirme yöntemlerinin kullanılması gerekliliği idareye bildirilmiştir. Daha sonra iyileşme sonrası muhtemel oturma miktarı hesaplanmıştır. Jet Grout kolonları taşıma kapasitesi çevre ve uç taşıma kapasitesi bölüm 4.5. ve 3.5.'de elde edilen değerler olarak alınmıştır. Kolon emniyetli taşıma kapasitesi eşitlik (Denklem 4.27) yardımıyla hesaplanmıştır.

İyileşme sonrası zemin taşıma gücü:

$$Q_{net} = \frac{Q_u}{3} + \frac{Q_c}{2} \quad (4.27)$$

$$Q_{net} = \frac{280}{3} + \frac{737}{2} = 461,83kN$$

$Q_{net} = 46 \text{ ton}$ olarak hesaplanmıştır.

İyileştirilmiş zeminin taşıma gücü eşitlik (Denklem 4.28) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$q_{ilk} = 1,50 \text{ kg/cm}^2 = 15 \text{ t/m}^2$$

$$A_{jet} = 0,2827m^2$$

$$A_{islah} = 4,62 m^2$$

$$Q = \frac{(q_{ilk} \cdot (A_{islah} - A_{jet}) + Q_{kolon})}{A_{islah}} \quad (4.28)$$

$$Q = \frac{(15 \cdot (4,62 - 0,2827) + 46)}{4,62}$$

$$Q \approx 24,00 t/m^2 = 2,40 kg/cm^2$$

Zemin iyileştirme önce 15 t/m²'lik taşıma gücüne sahipken Jet Grout yönteminin uygulanması ile 24 t/m²'lik taşıma gücüne ulaşmıştır.

İyileşme sonrası oturma hesabı:

Qnet hesaplanırken 3 m temelin gömüldüğü kabul edilerek hesap yapılmıştır.

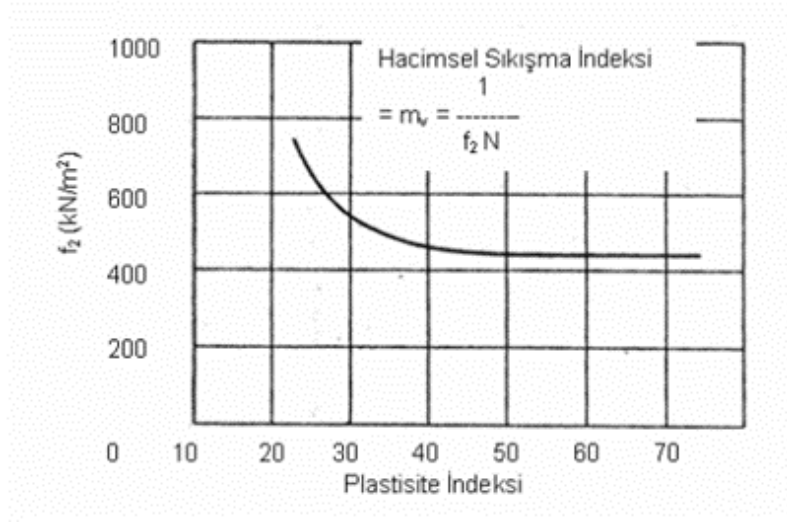
$$Q_{net} = 240 - (3 \times 19,50) = 181,50 kN/m^2$$

Oturma hesabında temelden 21/3 derinliğinde sanal radye kabul edilmiş ve sanal radye derinliği 9,50 m sanal radye ebatları ise 19,95 m x 22,10 m olarak belirlenmiştir. Sanal radyenin gerilmelerinin ilk jeolojik basıncın %20'sine isabet ettiği derinlik olan 30,50 m ile sanal radye arasında kalansıkışabilir tabaka kalınlığı 21 m olarak hesaplanmıştır (Tomlinson, M. 2001).

Hacimsel sıkışma indisi (m_v) eşitlik (Denklem 4.29) yardımıyla hesaplanmıştır. Stroud, 1975 tarafından I_P (plastisite indisi) için önerilen korelasyonla tespit edilmiştir (Tomlinson ve ark. 2008).

$$m_v = \frac{1}{(f_2 \cdot N_{30})} \quad (4.29)$$

Yapılan çalışmalar incelendiğinde oturma hesabı için Şekil 4.30.'a verilen SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği yardımıyla hesaplanmıştır (Stroud, 1975)



Şekil 4.30. SPT deney N değeri ve hacimsel sıkışma indisi grafiği

Siltli Kil (Çok Katı) tabakası için:

$$f_2 = 420 \text{ (PI = 42 için)}$$

$N = 23$ (İlgili derinlikte ortalama SPT)

$$mv = \frac{1}{(420 \times 23)} = 0,0001035 m^2 / kN$$

Killi Kum tabakası için:

$$f_2 = 550 \text{ (PI = 21 için)}$$

$N = 47$ (İlgili derinlikte ortalama SPT)

$$mv = \frac{1}{(550 \times 47)} = 0,0000387 m^2 / kN \text{ zemin tabakaları olarak hesaplanmıştır.}$$

Gerekli katsayılar elde edildikten sonra eşitlik (Denklem 4.26) kullanılarak farklı zemin tabakalarında ve derinliğe karşı artan gerilmeler dikkate alınarak Tablo 4.16.'da yer alan toplam oturma miktarı hesabı yapılmıştır.

Tablo 4.16. İyileşmiş zemin oturma hesabı

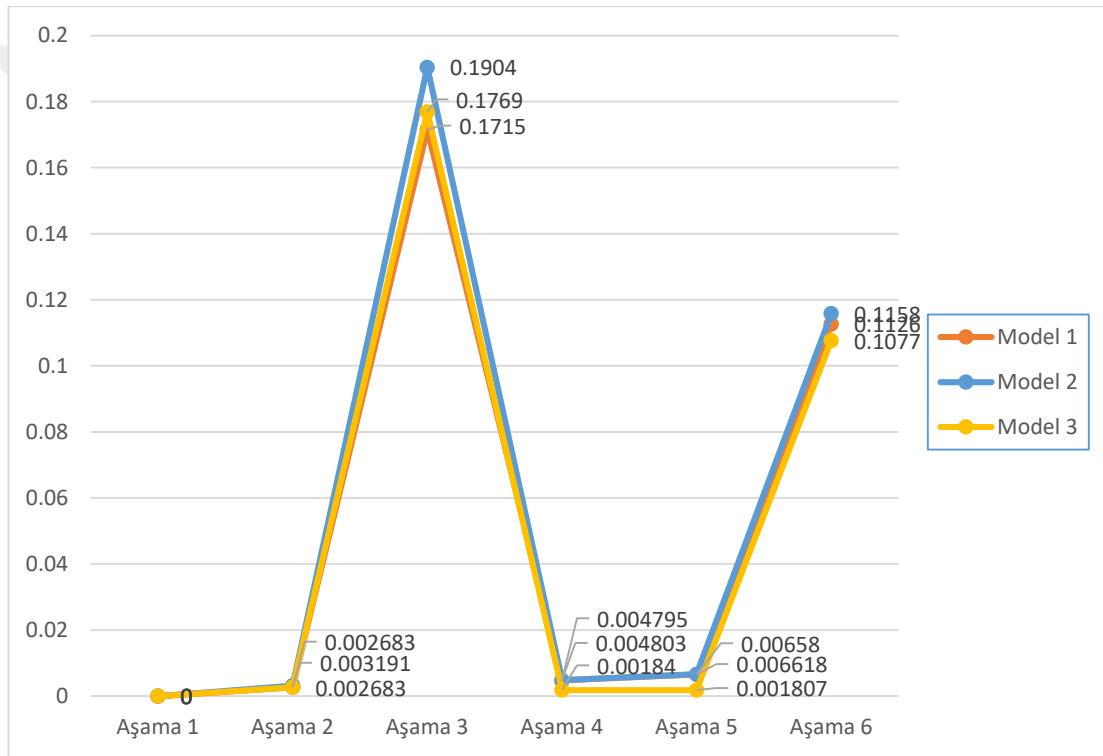
$h_{üst}$	h_{alt}	B/Z	L/Z	Iz	γ	zf	σ_o'	$\Delta\sigma$	σ_{zf}	mv	S
0	9,5										
9,5	10	39,90	44,20	1	19,5	0,25	124	181,50	305,5	0,0001035	0,0094
10	10,5	26,60	29,47	1	19,5	0,75	129	181,45	310,45	0,0001035	0,0094
10,5	11	15,96	17,68	1	19,5	1,25	134	181,27	315,27	0,0000387	0,0035
11	11,5	11,40	12,63	1	19,5	1,75	139	180,88	319,88	0,0000387	0,0035
11,5	12	8,87	9,82	0,99	19,5	2,25	143	180,22	323,22	0,0000387	0,0035
12	12,5	7,25	8,04	0,99	19,5	2,75	148	179,23	327,23	0,0000387	0,0035
12,5	13	6,14	6,80	0,98	19,5	3,25	153	177,87	330,87	0,0000387	0,0034
13	13,5	5,32	5,89	0,97	19,5	3,75	158	176,13	334,13	0,0000387	0,0034
13,5	14	4,69	5,20	0,96	19,5	4,25	163	174,01	337,01	0,0000387	0,0034
14	14,5	4,20	4,65	0,94	19,5	4,75	168	171,50	339,5	0,0000387	0,0033
14,5	15	3,80	4,21	0,93	19,5	5,25	172	168,65	340,65	0,0000387	0,0033
15	15,5	3,47	3,84	0,91	19,5	5,75	177	165,48	342,48	0,0000387	0,0032
15,5	16	3,19	3,54	0,89	19,5	6,25	182	162,02	344,02	0,0000387	0,0031
16	16,5	2,96	3,27	0,87	19,5	6,75	187	158,32	345,32	0,0000387	0,0031
16,5	17	2,75	3,05	0,85	19,5	7,25	192	154,43	346,43	0,0000387	0,0030
17	17,5	2,57	2,85	0,83	19,5	7,75	197	150,37	347,37	0,0000387	0,0029
17,5	18	2,42	2,68	0,81	19,5	8,25	202	146,21	348,21	0,0000387	0,0028
18	18,5	2,28	2,53	0,78	19,5	8,75	206	141,97	347,97	0,0000387	0,0027
18,5	19	2,16	2,39	0,76	19,5	9,25	211	137,69	348,69	0,0000387	0,0027
19	19,5	2,05	2,27	0,73	19,5	9,75	226	133,39	359,39	0,0000387	0,0026
19,5	20	1,95	2,16	0,71	19,5	10,25	221	129,12	350,12	0,0000387	0,0025
20	20,5	1,86	2,06	0,69	19,5	10,75	226	124,89	350,89	0,0000387	0,0024
20,5	21	1,77	1,96	0,67	19,5	11,25	231	120,72	351,72	0,0000387	0,0023
21	21,5	1,70	1,88	0,64	19,5	11,75	236	116,62	352,62	0,0000387	0,0023
21,5	22	1,63	1,80	0,62	19,5	12,25	240	112,62	352,62	0,0000387	0,0022
22	22,5	1,56	1,73	0,6	19,5	12,75	245	108,72	353,72	0,0000387	0,0021
22,5	23	1,51	1,67	0,58	19,5	13,25	250	104,92	354,92	0,0000387	0,0020
23	23,5	1,45	1,61	0,56	19,5	13,75	255	101,24	356,24	0,0000387	0,0020
23,5	24	1,40	1,55	0,54	19,5	14,25	260	97,68	357,68	0,0000387	0,0019
24	24,5	1,35	1,50	0,52	19,5	14,75	265	94,24	359,24	0,0000387	0,0018
24,5	25	1,31	1,45	0,5	19,5	15,25	269	90,92	359,92	0,0000387	0,0018
25	25,5	1,27	1,40	0,48	19,5	15,75	274	87,73	361,73	0,0000387	0,0017
25,5	26	1,23	1,36	0,47	19,5	16,25	279	84,65	363,65	0,0000387	0,0016
26	26,5	1,19	1,32	0,45	19,5	16,75	284	81,69	365,69	0,0000387	0,0016
26,5	27	1,16	1,28	0,43	19,5	17,25	289	78,85	367,85	0,0000387	0,0015
27	27,5	1,12	1,25	0,42	19,5	17,75	294	76,12	370,12	0,0000387	0,0015
27,5	28	1,09	1,21	0,4	19,5	18,25	299	73,51	372,51	0,0000387	0,0014
28	28,5	1,06	1,18	0,39	19,5	18,75	303	70,99	373,99	0,0000387	0,0014
28,5	29	1,04	1,15	0,38	19,5	19,25	308	68,59	376,59	0,0000387	0,0013
29	29,5	1,01	1,12	0,37	19,5	19,75	313	66,28	379,28	0,0000387	0,0013
29,5	30	0,99	1,09	0,35	19,5	20,25	318	64,07	382,07	0,0000387	0,0012
30	30,5	0,96	1,07	0,34	19,5	20,75	323	61,94	384,94	0,0000387	0,0018
Toplam											0,1153

Yapılan çalışmalar sonucunda geleneksel yöntem ile elde edilen veriler ile sayısal analiz sonuçları kıyaslanarak Tablo 4.17. elde edilmiştir.

Tablo 4.17. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Parametre	Deplasman (m)
İyileşme öncesi	0.1715
Çubuk eleman	0.1126
Çubuk eleman (Interface)	0.1158
Kompozit bölge	0.1077
Geleneksel Yöntem	0.1153

Sayısal analiz verileri incelendiğinde ise modellemede kullanılan varsayımlar arasında büyük farklar gözlemlenmemiş ve Şekil 4.31.'de verilmiş olan grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.31. Model tiplerine göre sayısal analiz oturma değerleri

Grafik değerlendirildiğinde farklı model tiplerinde çok yakın oturma değerleri hesaplandığı belirlenmiştir.

Deprem sonrası temelin oturduğu zemin ile Jet grout kolonları arasında kayma gerilmelerinin dağılımı ise eşitlik (Denklem 3.68, 3.69) yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemde yeralan G_r değeri ise eşitlikler (Denklem 3.71) yardımıyla hesaplanmış ve aşağıdaki yol izlenmiştir.

Jet Grout kolon çapı	: 0,60
Kolon yüzey alanı	: 0,2826
Kolon aralığı	: 2,00x2,00
Ara zemin alanı	: $(2,00 \times 2,00) - 0,2826 = 3,7174$
Alan değişim oranı	: $A_{jg}/(A_{jg} + A_s) = 0,2826/4$
Alan değişim oranı	: $0,07065 = \%7,1$
Tasarım deprem büyüklüğü	: 7,5

Jet Grout hedef kolon mukavemeti 2,5 MPa (25kg/cm^2) olarak belirlenmiş ve bu basınç dayanımına karşı Jet Grout kolonlarına ait elastite modülü (E_{jg}) ve Kayma modülleri (G_{jg}) eşitlikler (Denklem 3.63, 3.64) yardımıyla belirlenmiştir. Daha sonra SPT ($N=22$) darbe sayısına bağlı olarak kayma hızı eşitlik (Denklem 3.61) ve tablo 3.18 yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen hız değeri ile eşitlik (Denklem 3.62) ile zemine ait kayma gerilmes miktarı hesaplanmıştır. Daha sonra zeminin ve kolonlarının hangi oranda gerilmeleri karşılayacağını belirlemek için eşitlik (Denklem 3.70) kullanılmış ve Tablo 4.18. elde edilmiştir.

Tablo 4.18. Çevrimsel gerilim azaltım faktörü hesap tablosu

G_{jg}	G_s	a_r	G_r	S_R
2991,52	101,08	0,07065	33,74	0,30

Veriler yardımıyla %7,1 alan değişim oranına sahip ve kayma modülü oranı 33,74'e denk gelen çevrimsel gerilim azaltım oranı (S_R) 0,30 olarak hesaplanmıştır. Böylece deprem gibi dinamik etki altında doğal zeminde meydana gelmesi beklenen kayma gerilmelerinin %70 oranında Jet Grout kolonları tarafından karşılanacağı %30 mertebesinde ise zemine aktarılacağı şeklinde yorumlanmıştır.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmaya başlarken seçilen arazi uygulamalarında geoteknik verilerin toplanması Jet Grout hesabı, imalatı ve son olarak da iyileştirme gerçekleştirilen arazide gerekli deformasyon ölçümlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak idare tarafından alınan kararlar gereği seçilen uygulama bölgelerinde yerinde ölçümler yapılamadığı için gerçek durum ile karşılaştırmalar yapılamamıştır. Kıyaslama esnasında sayısal modelde iyileşen zemin tanımlanırken; Çubuk Eleman (Jet Grout Kolonları) ve Kompozit İyileşme Bölgesi varsayımlarının yapılması tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinin seçimi, zemin iyileştirme yöntemlerinden Jet Grout yönteminin uygulanışı, uygulama alanları, uygulamada kullanılan ekipmanlar, uygulama teknikleri, yöntemin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Daha sonra vaka çalışması olarak konut amacıyla kullanılması planlanan yapının temel zeminini iyileştirmeye yönelik gerçekleştirilen Jet Grout uygulaması geleneksel kabuller ve sayısal analiz sonuçları ile irdelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Zemin raporunda yeralan deney sonuçları incelendiğinde; ince malzeme oranının %85'ler mertebesinde olduğu ve deprem esnasında sıvılaşma görülmeyeceği belirlenmiştir. Bu nedenle sıvılaşma analizi yapılmasına gerek duyulmamıştır.
- Zemin taşıma gücünün (15 t/m^2) yapıdan akatarılan yükü (24 t/m^2) taşıyamayacağı düşünüldüğü durumlarda Jet Grout yönteminin uygulanması ile zemin taşıma gücü istenilen değerlere çıkarılabileceği ve yöntemin uygunluğu ortaya konulmuştur.
- Jet Grout kolonları tasarımında, taşıma gücünün hesaplanmasında geleneksel yöntemlerin yanı sıra sayısal analiz programları (PLAXIS yazılımı)

yardımla sonlu elemanlar yaklaşımı esas alınarak elde edilen sonuçların uygunluğu ortaya konmuştur.

- Tez çalışmasında iyileşme öncesi zeminin taşıma gücü ve oturma miktarı hesapları geleneksel yöntem ve sayısal yöntem (PLAXIS 2D programı) ile yapılmıştır. Çalışmada Model 1, Model 2 ve Model 3 olarak adlandırılan 3 farklı sayısal analiz modeli oluşturulmuştur.
- Analizler sonucunda Jet Grout kolonları ile iyileştirilmiş zeminde yapıdan gelen temele aktarılmış yükler karşısında gerçekleşmesi muhtemel oturma miktarının kabul edilebilir miktarda olduğu (Tablo 4.17.) sonucuna varılmıştır.
- Tez çalışması sonunda geoteknik probleme yönelik oluşturulan modeller incelendiğinde, iyileşme öncesi durumda 17,15 cm'lik oturma hesaplanmıştır. Model 1'de Jet Grout kolonları Çubuk eleman olarak tasarlanmış ve analiz sonunda 11,26 cm'lik oturma hesaplanmıştır. Daha sonra Model 2'de Model 1' de temel ve zemin arasında Interface özelliği atanmış ve oturmalar için 11,58 cm gibi çok yakın bir değer elde edilmiştir. Ardından Jet Grout kolonlarının iyileştirdiği bölge kompozit zemin olarak adlandırılmış ve yeni zemin mukavemet değerleri hesaplanmıştır. Yeni verilerin yardımıyla oluşturulan Model 3'te oturma miktarının aynı yük altında 10,77 cm olduğu hesaplanmıştır.
- Geleneksel kabuller ve klasik yöntemler yardımıyla oturma hesaplandığında ise oturmanın 11,53 cm değerinde olduğu sonuçlarına varılmıştır. Zeminlerde oturma problemine karşı Jet Grout yönteminin uygunluğu tespit edilmiştir.
- Oluşturulan modellerin sayısal ortamda davranışlarının, doğru kabuller çerçevesinde, gerçeğe yakın modellenebilir ve sonuçların kabul görür nitelikte olduğu tespit edilmiştir.

Unutulmamalıdırki, modeller ve seneryonun arazideki davranışı birebir ifade ettiğinin kabul edilebilmesi için, sonucu arazide yerinde yapılan tespit ile desteklenmek gerekmektedir.

Jet Grout kolonların zeminle uyumluluğunu ve kolon taşıma gücünün belirlenebilmesi için sayısal analizlerin yanı sıra arazide yerinde yükleme

deneylerinin de yapılması gerekmektedir. Bu şekilde daha net ve güvenilir sonuçlara ulaşılabilecektir.

Gelecekteki çalışmalarda, zemin iyileştirme yöntemi olarak yüksek modüllü kolonların (Jet Grout) kullanımının ve hesap yöntemlerinin incelenmesinde farklı zemin parametrelerinin, bu parametrelerin nasıl elde edileceği, zemin parametrelerinden oluşan çeşitli kombinasyonların birbirileri ile olan ilişkileri, sayısal ortama aktarımında izlenecek yolların belirlenmesi ve bu irdellemelerin sonucu olarak zemin gerilmeleri ve oturma değerleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Akçelik, N. Mısırlı, E. Etkesen, Z. Timur, İ. Karayollarımda Zayıf Zemin Problemleri ve Önlemler, T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Abi, E. 2012. Zemin Mekaniği -1 Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Anonim, 2007a. DLH Genel Müdürlüğü, Geoteknik Tasarım Esasları, T.C. Ulaştırma Bakanlığı Demiryolları, Limanlar, Hava meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, Yüksel Proje, Ankara.
- Altun, S. 2010. Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri. Ege Üniveristesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisleri Odası, Yüksek Lisans Tezi.
- Ayan E. 2009. Derin zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulamadan örnekler, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tezi.
- Akan R. 2013. Jet Grout yönteminin zemin iyileştirmesine katkısının ve bu yöntemde kullanılan parametrelerin etkilerinin irdelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Bakım M.U. 2007. Enjeksiyon yöntemleriyle zemin iyileştirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Baumann V. 1984. Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis, Vortrage der Baugrundtagung, Duesseldorf: 49 - 83. DGEG.
- Bell, F.G. 1993. Engineering Treatment of Soils. Eastbourne: Taylor & Francis. E&FN SPON, London.
- Bell, A. L. ve Burke, G. K. 1994. The Compressive Strength of Ground Treated Using Triple System Jet Grouting, pp. 525-538, Grouting in the Ground, Thomas Telford, London
- Berilgen, M. 2016. Plastisitenin temel kavramları ve malzeme bünye bağlantıları, PLAXIS ile hesaplamalı geoteknik kursu, The Green park Hotel Bostancı, İstanbul, 8-10 Aralık
- Bowles, J. E. 1996. Foundation Analysis and Design, 5th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Brinkgreve, Ronald B. J. 2005. American Society of Civil Engineers Geo-Frontiers Congress- Austin, Texas, United States (January 24-26, 2005) Soil Con

- Brinkgreve R.B.J. 2002. PLAXIS: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (User manuals), Balkema.
- Brown, R.E. 1977. Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils. Proc. American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division, 103 (12),
- Burke, G. K. 2004. Jet Grouting Systems: Advantages and Disadvantages, ASCE, Geosupport 2004. Bell, Kenneth R. Clemente, Jose L. M. Gularte, Francis B. Lopez, Roberto A. 2003. SuperJet Grouting Reduces Foundation Settlement for La Rosita Power Plant in Mexicali, Mexico, New Orleans, pp. 354 - 364, USA,
- Byle, M. J. Borden, R. H. 1995. Verification of Geotechnical Grouting, New York, Geotechnical special publication, 57.
- Court, W. A. and Mitchell, J. K. 1994. Soil improvement by blasting: part II, Journal of Explosive Engineering, 12.
- Croce P. Flora a. 2014. Jet Grouting, Giuseppe Modoni Technology, Design and Control, 14
- Çınar H. 2014. Zemin iyileştirilmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 76
- Çimen Ö. Dereli, B. 2014. Bentonitin mühendislik özelliklerine mikronize kolemanitin etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Dergisi, 4/29:13-17.
- Das, B. M, 1995. Principles of Foundation. Engineering. PWS Publishing' Company, a division of International Thomson Publishing Inc. Boston, USA.
- Das, B. M, 198. Fundamentals of soil Dynamics, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands.
- Degen, W. 1977. 56 m Deep Vibro - Compaction at German Lignite Mining Area, Proc. 3rd Intl. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Londra.
- Durgunoğlu H.T. 2008 Zeminlerde Karşılaşılan Problemler ve Zemin İyileştirmesi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Deprem ve Yapı Bilimleri Ana Bilim Dalı Bahar Sempozyumu, Mayıs
- Durgunoğlu H. T. 2004a. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Durgunoğlu H.T. 2004b. Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı Türkiye Mühendislik Haberleri.
- Durgunoğlu, H. T. Karadayılar, T. Bray, D. J. Sancio, R. B, Önalp, A. 2000, Sıvılaşmış zeminlerde zemin davranışı modellemesinde kullanılan zemin araştırma yöntemleri- Adapazarı Örneği, ZMTM 8. Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim, İstanbul.
- Doğu, O. Yıldırım H. Durgunoğlu A. T. 2006. Zeminin ince dane oranı ve spt vuruş sayısının jet grout kolonların mukavemetine etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On birinci Ulusal Kongresi, K.T.Ü.Trabzon.

- Doğu, O.2005. Jet Grouting tekniği ile zemin ıslahı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Doğanışık K. S. 2010. Jet Grout kolonundaki gerilme dağılımının incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Düzceer R. 2004. Sakhalin doğalgaz ve petrol işleme tesisi kazık işleri, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erol, A.O, Bayram, Ç. Z, Kuruoğlu, Ö, 2016. Vibro Sıkıştırma ve Taş Kolonlar. Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.
- Elias, V. Welsh, J, Warren, J, Lukas, R, Collin, J.G, Berg, R.R, 2006. Ground Improvement Methods, Volumes I and II, Publication No.s FHWA NHI-06-019 ve FHWA NHI-06-020, US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.
- Erdil B, 2008. Jetgrout kolonu tasarım taşıma gücü hesabı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 3.
- Fırat, A. T, 2001. Jet Grouting yöntemi ile temel takviyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Glossop, R, 1960. The Invention and Development of the Injection Processes Geotechnique, 10.
- Gallevresi, F, 1992. Grouting improvement of foundation soils, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, New York,
- Graf, R. and Case R, 1992. Abundance and distribution of moose in the North Slave River Lowlands, NWT November 1987 and 1988, 17.
- Gökalp, A, Düzceer, R, 2002. Ground Improvement by Jet Grout technique for foundations of a natural gas combined cycle power plant in Turkey. Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, October, Nice, France.
- Hatanaka, M. ve Uchida, A. (1996). Empirical correlation between penetration resistance and effective friction angle of sand soil, Soil and Foundation.
- Hausmann, M. R, 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, Singapore.
- Holtz, R.D, Shang, J.Q, Bergado, D.T, 2001. Soil Improvement, Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, R.K. ROWE (Ed.)
- Inanov, P. L, 1972. Compaction of Non Cohesive Soils by Explosion, Translated From Russian, Published for U. S. Dept of the Interior, Bureau of Reclamation and National Science Foundation, Washington.
- Idriss, I. M, Boulanger, R. W. 2004. Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes, Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, 7- 9 January 2004, UC Berkeley, California, U.S.A.

- Idriss I.M, Boulanger R.W. 2006. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.26.
- Jefferis, S.A, 1982. Effect of mixing on Bentonite Slurries and Grouts. Grouting in Geotechnical Engineering, İngiltere.
- Jaritngam S, 2003. Design Concept of the Soil Improvement for Road Construction on Soft Clay. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 4, October, 313-322.
- Koçbay A, 2013. Zemin iyileştirme yöntemleri, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim Semineri, Antalya, 12-14 Mart.
- Kaymakcı, S, 2014. Jet Grout kolona soketli fore kazığın çalışma performansının araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı, Yüksek Lisans Tez
- Kara, H.B, 2013. Temel Zemin İyileştirme Yöntemleri Ders Notu. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Küçükali, N. 2008. Demiryolu altyapısının jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ağustos, Trabzon
- Kauschinder, J.L. Welsh, J.P, 1989. Design and construction and performance of earth support systems, MIT, Cambridge.
- Küsin C. C, 2009, Jet Grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Kumbasar V.Kip F. 1985. “Zemin Mekaniği Problemleri”, Çağlayan Kitabevi,
- Lukas, R. G. 1995. Dynamic Compaction. Illinois: Geotechnical Engineering Circular No:1, Publication No. FHWA-SA-95-037, Federal Highway Administration, Office of Engineering.
- Leonards, G. A, Gutter, W. A, and Holts, R. D, 1980. Dynamic Compaction of Granuler Soils. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106.
- Lawton, E.C. ve Warner B.J, 2004, Performance of a group of geopier elements loaded in compression compared to single geopier elements and unreinforced soil, final report, University Of Utah, Salt Lake City, Ut, Usa., Report No. Uucveen, 04-12.
- Lunardi, P. 1977. Ground Improvement by Means of Jet-Grouting, Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, Vol 1 No:2, pp. 65 - 86.
- Langbehn, W.K. 1986. The Jet Grout method: applications is slope stabilization and landslide repair, Master of engineering report, University of california, Berkeley, May 12.
- Liao, S.S. C, Whitman R.V. 1986. Overburden Correction Factor for SPT in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No 3,

- Melegari C. Garassino A.L. 1997. Seminar on Jet Grouting, C1-Premier Pte. Ltd. Singapore.
- Menard, L. and Boise, Y. 1975. Theoretical and Practical Aspects of Dynamics Consolidation. Geot, Vol. 25, No: 1, London.
- Miki, G. and Nakanishi, W. 1984. Lion city leaps ahead with MRT - Singapore mass, rapid transit, Tunnels and tunneling, Oct. Paris
- Moseley, M.P. and Krisch, K. 1993. Ground improvement, Spon press, London.
- Öz. M. Y. 2015. Sıvılaşmaya karşı jet grouting yöntemi ile örnek bir iyileştirme uygulamasının incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Nikbakhtan B., Osanloo M., 2009. Effect of Grout Pressure and Grout Flow on Soil Physical and Mechanical Properties in Jet Grouting Operations. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46, 498-505.
- Okyay, S. 1987. Yüksek Basıncılı Enjeksiyon, Dahili Rapor, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul,
- Omine K. Ochiai H. Yoshida N. 1998. "Estimation of In – Situ Strength of Cement - Treated Soils Based on a Two – Phase Mixture Model", Soils & Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 17 – 29.
- Omine K. Yoshida N. Ochiai H. 1993. "Stress - Strain Behavior of Mixtures with Two Different Elastic Materials", Fukuoka University Review of Technological Sciences. 51: 83 - 93.
- Omine K. Ochiai H. Bolton M.D. 1999. "Homogenization Method for Numerical Analysis of Improved Ground with Cement - Treated Soil Columns", Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Bredenberg, Holm & Broms (eds) © Balkema, Rotterdam ISBN 90 5809 108 2.
- Osmanoğlu, D. 2007. Tünellerde zemin iyileştirilmesi ve stabilitenin sonlu elemanlar yöntemi ile plaxis programında analiz edilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, 137s.
- Ohta. Y. Goto N. 1978. Empirical Shear Wave Velocity Equations in terms of Characteristic Soil Indices. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.6.
- Önalp, A. 1983. Geoteknik Bilgisi. Cilt 2, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Önalp, A. Arel, E. 2004. Geoteknik Bilgisi 2 Yamaç ve Şev'lerin Mühendisliği. Birsan yayınevi, İstanbul
- Öntürk, K. 2011. Zemin iyileştirmesinde polisaj, kireç ve uçucu külün kullanımı Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Özkeskin, Ç.A. 2016. Zemin İyileştirme Yöntemleri, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

- Özsoy, B. Durgunoğlu, H. T. 2003. Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması. 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Özaydın K. 2007. Zeminlerde sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Özaydın K.2007. Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul Sixth National Conference on Earthquake Engineering, 16-20 October 2007, Istanbul, Turkey.
- Özaydın K. 2012, Zemin iyileştirmesi, Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi, Isparta 4-5 Ekim.
- Plaxis Tutorial 2016. Program kullanım klavuzu
- Priebe, H. J. 1991. Vibro Replacement- Design Criteria and Quality Control', Deep Foundation Improvements: Design, Contruction and Testing. ASTM STP 1089, American Society for Testing and Materyals, Philadelphia.
- Peck , R.B. Hanson W.E. Thornburn T.H, 1974 Foundation Engineering, 2nd ed., John Wiley and Sons, NY.
- Rausche, F. Goble, G. Lıkıns, G. 1988. Recent Weap Developments. Proceedings of the Third International Seminar on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa.
- Rixner, J. J. Kraemer, S. R. Smith, A. D. 1986. Prefabricadet Vertical Drains: Vol. 1 Engineering Guidelines, FHWA/RD-86/168,FHWA, Springfield, Vierginia.
- Sağlam, A. 1985. Zemin Islah Metotları, Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri. DSİ Genel Müdürlüğü, Adana.
- Sağlam, A. 1996. Temel İnşaatı II Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul (yayımlanmamış).
- Sağlam A. Düzceer R. Gokalp A., Yılmaz E. 2002. Ground Improvement by Jet Grout Columns for the Foundations of an Automobile Plant in Turkey, Deep Foundations 2002, Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002, Orlando, Florida, GSP No. 116.
- Sağlam A. 2006. Zemin iyileştirme yöntemleri-neyi nasıl ne kadar iyileştiriyoruz, Zm Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Seed, H. B. Idriss, I. M.1982, Ground motions and soil liquefaction duringearthquakes. Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series.
- Seed, H.B. and Idriss,1971, I.M. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, ASCE Journal of the SoilMechanics and Foundations Division,
- Seed H.B. Tokımatsu K. Harder L. F. Chung, R. 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111.

- Seed R.B. Harder L.F. 1990. SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength in J.M Duncan ed. Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, Vol.2.
- Sondermann, W. Wehr, W. (1993). Deep vibro techniques. M.P. Moseley, & K. Kirsch (Eds.). Ground improvement (2nd ed.). NY: Spon Press.
- Stoel, A.V.D. 2001. Grouting for Pile Foundation Improvement, PhD Thesis, Deif University, Amsterdam, Netherlands.
- Tachir, C. 2015. Samsun terme kombine doğalgaz çevrim santrali zeminlerinin fore kazık ve jet grout yöntemleri ile iyileştirilmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Terashi, M. and Juran, I. 2000. Ground improvement-state of the art, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 461s-519s.
- Toğrol E. 1994. Jet grout kolonlarının yapımında kalite denetimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Beşinci Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 20-21Ekim.
- Tomlinson M. and Woodward J. 2008. Pile Design and Construction Practice, Fifth Edition. London and New York.
- Tomlinson, M. 2001. Foundation Design and Construction Paperback, 7. Ed., ISBN 0130-31180-4.
- Trevi K. 1994. Columnar Treatment, Illustrative Report, Cesena.
- TSE, EN 12716, 2002. TSE Maden Hazırlık Grubu, Türk Standartları Enstitüsü.
- Tumluer, G. 2006. Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemet. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Tunçdemir F. 2004. Türkiye Mühendislik Haberleri, İnşaat Mühendisleri Odası, 430-2, Ankara.
- Tunçdemir, F. 2007. Kompaksiyon Enjeksiyonuna Teorik ve Pratik Yaklaşımlar, İMO Teknik Dergi, 269 4069-4080.
- Tunç, A. 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Tunç, A. 2002. Yol Mühendisliğinde Jeoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- USACE, 1999. Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities. Technical Letter No. 1110-1-185, Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.109 pp.
- Ulusay, R. Gökçeoglu, C. Sönmez, H. ve Tuncay. E. 2001. “Jeoteknik Etütler İçin Veri Toplama ve Değerlendirme Teknikleri Ek Notlar”, Jeoteknik Etütler İçin Veri Toplama ve Değerlendirme Teknikleri, Ankara, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Vakfı.

- Uzuner, B. A. 1995. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Uzuner, B.A., 2000. Temel Mühendisliğine Giriş: Derya Kitabevi, Trabzon
- Wong K. S. Li J.C. Goh A.T.C., Poh K.B., Oishi E., 1999. Effect of Jet Grouting on Performance of Deep Excavation in Soft Clay. Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Singapore, 279 - 284.
- WEB-1:http://yunus.hacettepe.edu.tr/~adil/11_SEV_DURAYLILIGI.pdf,
Erişim Tarihi: 08.01.2017
- WEB-2:<http://www.geoengineer.org/education/web-based-classprojects/select-topics-in-ground-improvement/vibroflotation?start=2>, Erişim Tarihi: 02.02.2017
- WEB-3:<https://www.facebook.com/thisisinsiderdesign/videos/256111458063824/>,
Erişim Tarihi: 10.01.2017
- WEB-4:<http://www.keller.com.au/techniques/ground-improvement-and-grouting/soilcrete-jet-grouting/>, Erişim Tarihi: 12.02.17
- Xanthakos, P.P. Abramson L.W. and Bruce D.A. 1994. Ground control and improvement, John Wiley, New York.
- Yahiro, T. and Yoshida, H. 1973. Induction grouting method utilizing high speed water jet, 8th International conference on soil mechanics and foundation engineering, Moscow.
- Yağızatlı E. 2012. Jet Grout kolonların sem analizi ve etkin parametrelerin optimizasyonu, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Yerson Ltd.Şti, 2009, Geotechnical Investigation Report Of Combined Cycle PowerPlant Akçay -Terme, Samsun-Turkey, Temmuz.
- Yılmaz, Y. Enjeksiyon Tekniğiyle Zemin İyileştirme – Jet Enjeksiyonu Sunumu, Gazi Üniversitesi, İnşaat Anabilim Dalı, Ankara.
- Youd, T.L. Idriss, I.M. Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F.Jr, Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F.III., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H.II. (1997). Summary Report, Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Buffalo, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep AKSANGÜR 1986 yılında Bursa'da dünyaya geldi. Ortaöğrenimini Bursa Kız Lisesi' nde tamamladı. 2005 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden 2009 yılında mezun oldu. Halen Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Geoteknik programında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.