

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cemal Caner KÜSİN**

**JET GROUT YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLEN  
ZEMİNLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
SAYISAL ANALİZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ADANA, 2009**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**JET GROUT YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLEN  
ZEMİNLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
SAYISAL ANALİZİ**

**Cemal Caner KÜSİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Bu tez ..../...../.... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.**

İmza.....

İmza.....

İmza.....

Yrd. Doç. Dr. Abdulazim YILDIZ  
DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa LAMAN  
ÜYE

Doç. Dr. Alaettin KILIÇ  
ÜYE

Bu tez Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

**Kod No:**

**Prof. Dr Aziz ERTUNÇ**  
Enstitü Müdürü  
İmza ve Mühür

**ÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**JET GROUT YÖNTEMİ İLE İYİLEŞTİRİLEN  
ZEMİNLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE  
SAYISAL ANALİZİ**

Cemal Caner KÜSİN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Abdulazim YILDIZ

Yıl : 2009 Sayfa: 157

Jüri : Yrd. Doç. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Prof. Dr. Mustafa LAMAN  
: Doç. Dr. Alaettin KILIÇ

Son yıllarda geoteknik mühendisliğinde jet grouting yöntemi ile zeminlerin iyileştirilmesi oldukça yaygınlaşmıştır. Bu tez çalışmasında jet grouting yöntemi detaylı olarak incelenmiştir. Yöntemin kullanıldığı yerler, yapım aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve gerekli parametreler incelenmiştir. Genellikle jet grout kolonları klasik kazık taşıma gücü formülasyonları ile yapılmaktadır. Bu hesaplama tek bir kolon için yapılmakta ve zemin-yapı davranışı detaylı olarak incelenmemektedir. Bu yüzden güvenlik faktörleri yüksek tutulmakta, bu da çözümün ekonomikliği açısından elverişsiz bir durum oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında özellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak jet grout kolonlarının analizleri farklı uygulamalarda gösterilmiştir. İlk iki örnekte jet grout kolonlarının dayanım duvarlarında kullanımına yönelik analizler yapılmıştır. Sonraki örneklerde ise, birim hücre ve homojenleştirme metodu kullanılarak jet grout kolonlarının temel altında kullanılması durumu incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet Grout, Sonlu Elemanlar Yöntemi, İyileştirme, Taşıma Kapasitesi, Plaxis

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# NUMERICAL ANALYSES OF SOILS IMPROVED BY JET GROUTING METHOD USING FINITE ELEMENT METHOD

Cemal Caner KÜSİN

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Advisor : Yrd. Doç. Dr. Abdulazim YILDIZ  
Year : 2009 Sayfa: 157  
Jury : Yrd. Doç. Dr. Abdulazim YILDIZ  
: Prof. Dr. Mustafa LAMAN  
: Doç. Dr. Alaettin KILIÇ

In recent years, improving soils using jet grouting method has become common in geotechnical engineering. In this study, jet grouting method was reviewed in detail. Initially, areas where jet grouting is used, necessary equipment, reasons and ways these equipment are used, post-application controls, calculation methods for jet grout columns bearing capacities and the necessary parameters were studied. Generally, jet grout columns are analysed through conventional load bearing formulations. Such calculations are done for a single column and the soil-structure behavior cannot be studied in detail. Consecutively, factor of safety is high and thus, the solutions are not economically feasible. In this study, columns are analyzed -considering different applications- using finite element method, in particular. In the first two samples, analysis for using jet grout columns in load bearing walls was done. In the latter samples, use of jet grout columns underground was reviewed by using unit cell and homogenization method.

Key Words: Jet Grout, Finite Element Method, Stabilization, Bearing Capacity, Plaxis

## **TEŞEKKÜR**

Yüksek lisans tez çalışmamda beni yönlendiren, bilgilerini paylaşan, yardımlarını esirgemeyen, danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Abdülazim YILDIZ'a, katkılarından dolayı Ahmet ARSLAN'a, ayrıca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Lunardi (1977).....	3
2.2. Baumann (1984).....	3
2.3. Omine vd. (1993) .....	4
2.4. Trevi (1994).....	6
2.5. Omine ve Ohno (1997).....	7
2.6. Omine vd. (1998).....	7
2.7. Durgunoğlu vd. (1998).....	8
2.8. Omine vd. (1999).....	8
2.9. Wong (1999).....	9
2.10. Wong ve Poh (2000).....	11
2.11. Kirsch ve Sondermann (2001).....	12
2.12. Durgunoğlu vd. (2002).....	12
2.13. Gökalp ve Düzceer (2002).....	13
2.14. Bell vd. (2003).....	13
2.15. Özsoy ve Durgunoğlu (2003).....	14
2.16. Durgunoğlu (2004).....	15
2.17. Bzowka (2004).....	16
2.18. Racansky vd. (2006).....	16
2.19. Doğu vd. (2006).....	17
2.20. Sert ve Önalp (2007).....	18

2.21. Sert vd. (2007).....	18
2.22. Ou vd. (2007).....	19
2.23. Racansky vd. (2008).....	19
2.24. Tschuchnigg ve Schweiger (2008).....	20
3. JET GROUTING UYGULAMA TEKNİĞİ.....	21
3.1. Jet Grout Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı.....	22
3.2. Jet Grouting Yönteminin Tasarım Esasları.....	23
3.3. Jet Grouting Metodunun Uygulaması.....	25
3.3.1. Delgi Aşaması.....	26
3.3.2. Enjeksiyon Aşaması.....	27
3.3.3. Ön Jet Grouting.....	29
3.4. Jet Grouting Teknikleri.....	30
3.4.1. Jet 1.....	30
3.4.2. Jet 2.....	31
3.4.3. Jet 3.....	32
3.4.4. Süper Jet.....	32
3.5. Jet Grouting Yönteminin Çalışma Parametreleri.....	34
3.5.1. Enjeksiyon Basıncı.....	35
3.5.2. Dönme ve Çekme Hızı.....	36
3.5.3. Dozaj.....	37
3.6. Jet Grouting Yöntemi Ekipmanı.....	39
3.6.1. Delgi Makinesi.....	41
3.6.2. Pompa Ünitesi.....	42
3.6.3. Mikser Ünitesi.....	42
3.6.4. Çimento Silosu.....	43
3.6.5. Monitör.....	44
3.7. Farklı Zeminlerde Jet Grouting Yöntemi Uygulama Parametreleri.....	44
3.8. Kontroller ve Testler.....	48
3.8.1. Karot Numunelerinin Alınması.....	48
3.8.2. Kazık Yükleme Deneyi.....	49

3.8.3. Kazık Süreklilik Deneyi.....	50
3.8.4. Çap Kontrolü.....	52
3.8.5. Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu.....	53
3.9. Toleranslar.....	54
3.10. Uygulama Dokümanları.....	54
3.10.1. İnşaat Alanında Mevcut Olan Dokümanlar.....	54
3.10.2. Şantiyede Hazırlanacak Dokümanlar.....	55
3.10.3. Jet Grouting İşleminin Saha Kayıtlarına İlişkin Örnekler.....	55
4. JET GROUT KOLONLARININ TAŞIMA KAPASİTESİ.....	58
4.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü.....	59
4.2. Kohezyonlu Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü.....	62
4.3. Homojenleştirme Metodu Kullanılarak Kompozit Zeminlerin Sayısal Analizinin Yapılması.....	63
5. SIVILAŞMAYA KARŞI JET GROUTING KULLANIMI.....	71
5.1. Sıvılaşmanın Tanımı ve Etkileri.....	71
5.2. Sıvılaşma Etkilerini Azaltmakta Kullanılan Zemin Islah Metotları.....	72
5.3. Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi.....	74
5.3.1. Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR).....	74
5.3.2. Çevrimsel Mukavemet Oranı (CRR).....	76
5.3.3. Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Faktörü.....	81
5.4. Chinese Kriteri.....	81
5.5. Deprem Kayma Gerilmelerinin Saha Tepki Analizleri ile Belirlenmesi..	83
5.6. Hesap Yöntemi ve Adımları.....	84
5.6.1. Zemin Maksimum Kayma Modülünün Saptanması.....	84
5.6.2. Birim Hücre Metodu ve Deprem Kayma Gerilmeleri Dağılımı.....	84
5.6.3. Çevrimsel Gerilim Azaltma Faktörü.....	88
5.6.4. Yapısal Kontroller.....	89
5.7. Analiz Örneği.....	90
6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER.....	97



6.1. Jet Grouting Yöntemi ile Yapılan Dayanım Duvarlarının Plaxis Programı ile Sayısal Analizi.....	98
6.2. Derin Kazılarda Sayısal Analizler ile Destek Yapılarının Tasarımı.....	114
6.3. Kompozit Zeminlerde Homojenleştirme Metodu Kullanılarak Yapılan Sayısal Analiz Örneği.....	129
6.4. Jet Grouting Yöntemi ile Zemin İyileştirmesinin Sayısal Analizine Dair Bir Vaka Analizi.....	136
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	149
KAYNAKLAR.....	152
ÖZGEÇMİŞ.....	157

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 2.1. Su - Çimento Oranına Bağlı Kolon Dayanımları.....	4
Çizelge 3.1. Jet Grouting Yöntemi İmalat Parametreleri.....	35
Çizelge 3.2. Zemin Cinsi - $f_{JG}$ - $E / f_{JG}$ İlişkisi.....	38
Çizelge 3.3. Farklı Nozzle Çapı ve Basınçta Nozzle'dan Geçen Grout Debisi.....	47
Çizelge 4.1. Terzaghi Taşıma Gücü Katsayıları.....	60
Çizelge 4.2. Kazık Malzemesi - $\delta$ Açısı – K Katsayısı Arasındaki İlişki.....	60
Çizelge 5.1. SPT Düzeltmeleri.....	79
Çizelge 5.2. SPT Enerji Oranı Düzeltmesi.....	80
Çizelge 5.3. SPT Sayıları ve İnce Malzeme Oranları.....	91
Çizelge 5.4. Yaklaşık Temel Boyutları ve Zemine Aktarılabilecek Basınçlar.....	92
Çizelge 5.5. Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik.....	93
Çizelge 6.1. Malzeme Özellikleri.....	101
Çizelge 6.2. Ara Yüzeysiz Modellemelerin Ağ Özellikleri (S =2,8m).....	102
Çizelge 6.3. Ara Yüzeysiz Modellemelerin Ağ Özellikleri (S =1,4m).....	102
Çizelge 6.4. Ara Yüzeyle Modellemelerin Ağ Özellikleri (S = 1,4m).....	103
Çizelge 6.5. Farklı Ağ Tiplerindeki Güvenlik Faktörü Değerleri.....	110
Çizelge 6.6. Güvenlik Faktörü ve Yatay Deformasyon Değerleri.....	110
Çizelge 6.7. Ankraj Parametreleri.....	112
Çizelge 6.8. Güvenlik Faktörü ve Yatay Deformasyon Değerleri.....	112
Çizelge 6.9. JG ve Zemin Parametreleri.....	118
Çizelge 6.10.Öngerme Kuvvetlerinin Tam Uygulandığı Analiz Sonuçları.....	120
Çizelge 6.11.Model Testi Verileri.....	130
Çizelge 6.12.Katkı ve Matris Parametreleri.....	131
Çizelge 6.13. Homojenleştirilmiş Zemin Parametreleri.....	131
Çizelge 6.14. Homojenleştirilmiş Zemin Parametreleri.....	134
Çizelge 6.15. İyileştirme Yapılmamış Zeminin Malzeme Parametreleri.....	139
Çizelge 6.16. Farklı Tabakaların Sürtünme Dirençleri.....	143
Çizelge 6.17. FEM Analizi için Malzeme Parametreleri.....	145

## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 2.1. Gerilme Dağıtım Parametresi - Eshelby Tensörü İlişkisi.....	5
Şekil 2.2. Deney Düzenegi.....	6
Şekil 2.3. Elastisite Modülü – Tek Eksenli Basınç Mukavemeti İlişkisi.....	6
Şekil 2.4. Katkı ve Matris Elemanlarından Oluşan Kompozit Zemin.....	8
Şekil 2.5. Homojenleştirme Metodu Hesap Algoritması.....	9
Şekil 2.6. Jet Grouting Uygulaması Zemin Kesiti.....	10
Şekil 2.7. Islah Öncesi ve Islah Sonrası İnklinometre Ölçümleri.....	11
Şekil 2.8. Kolon Numunelerinin Basınç Dayanımları.....	14
Şekil 2.9. Önerilen Hesap Algoritması.....	15
Şekil 2.10. Jet Kolonların Mukavemet Aralıkları.....	17
Şekil 3.1. Jet Grouting Sistemi ve Yastık Tabaka Şematik Gösterimi.....	22
Şekil 3.2. Jet Grouting Yöntemi Uygulama Aşaması.....	26
Şekil 3.3. Kademeli Delgi Matkabı.....	27
Şekil 3.4. Kademesiz Delgi Matkabı.....	27
Şekil 3.5. Enjeksiyon Aşaması.....	28
Şekil 3.6. Jet 1 Tekniği.....	30
Şekil 3.7. Jet 2 Tekniği.....	31
Şekil 3.8. Jet 3 Tekniği.....	32
Şekil 3.9. Süper Jet Tekniği.....	33
Şekil 3.10. Standart Yöntemle Oluşturulmuş Kolonlar.....	33
Şekil 3.11. Süper Jet Yöntemiyle Oluşturulmuş Kolonlar.....	34
Şekil 3.12. Basınç - Bekleme Süresi - Kolon Çapı İlişkisi.....	36
Şekil 3.13. Farklı Tip Zeminlerde Taşıma Kapasitesinin Değişimi.....	39
Şekil 3.14. Jet Grouting Ekipmanı.....	40
Şekil 3.15. Delgi Makinesi.....	41
Şekil 3.16. Pompa Ünitesi.....	42
Şekil 3.17. Mikser Ünitesi.....	43
Şekil 3.18. Çimento Silosu.....	43

Şekil 3.19. Karot Numunelerin Alınması.....	49
Şekil 3.20. Kazık Yükleme Deneyi.....	50
Şekil 3.21. Kazık Süreklilik Deneyi Şeması.....	51
Şekil 3.22. Kazık Süreklilik Testi Cihazı.....	52
Şekil 3.23. Jet Grout Kolonlarında Çap Kontrolü.....	52
Şekil 3.24. Proje Kriterlerinin Sahada Kalibrasyon ve Optimizasyonu.....	53
Şekil 3.25. Jet Tesisi Günlük Raporu Örneği.....	56
Şekil 3.26. Jet Donanımı İle İlgili Günlük Rapor Örneği.....	57
Şekil 4.1. Gerilme Dağıtım Parametresi - Eshelby Tensörü İlişkisi.....	64
Şekil 4.2. Nümerik Analiz ile Önerilen Eşitlik Sonuçlarının Karşılaştırması.....	65
Şekil 4.3. Kazık Şeklinde Kolonlar ile İyileştirilmiş Zemin.....	66
Şekil 4.4. Katkı ve Matris Gerilme - Deformasyon Eğrileri .....	68
Şekil 5.1. Niigata (1964) Depremi Sonrası.....	72
Şekil 5.2. (a) Deep Mixing – (b) Jet Grouting – (c) Taş Kolon.....	73
Şekil 5.3. Gerilme Azaltma Katsayısı – Derinlik - Deprem Şiddeti İlişkisi.....	75
Şekil 5.4. Çevrimsel Mukavemet Oranını Temsil Eden Sınır Eğrileri.....	77
Şekil 5.5. Chinese Kriteri.....	82
Şekil 5.6. Yeni Kriter.....	83
Şekil 5.7. Deprem Dalgalarının Dağılımı ve Birim Hücrenin Tanımlanması.....	87
Şekil 5.8. Birim Alan ve Kayma Modülü Oranına Bağlı CSR Azaltım Eğrileri..	89
Şekil 5.9. Tasarım Algoritması.....	90
Şekil 6.1. Klasik Dayanım Duvarı ve Destekli Duvar Şeması.....	99
Şekil 6.2. Dayanım Duvarı Geometrisi.....	100
Şekil 6.3. 2D Analiz için Düğüm ve Gerilme Noktaları Yerleşimi.....	103
Şekil 6.4. Deformasyon Değerlerinin İncelenmesi için Seçilen Nokta.....	104
Şekil 6.5. Düğüm Sayısı – Güvenlik Faktörü Grafiği (S = 1,40m).....	105
Şekil 6.6. Düğüm Sayısı – Deformasyon Grafiği (S = 1,40m).....	105
Şekil 6.7. 6 Dügümlü Ara Yüzeysiz Modellemede Deformasyon Dağılımı.....	106
Şekil 6.8. 6 Dügümlü Ara Yüzeysiz Modellemede Gerilme Dağılımı.....	106
Şekil 6.9. Destekli Duvarların Geometri Ayarlaması.....	107

Şekil 6.10. 3D Analiz için Eleman ve Gerilme Noktaları Yerleşimi.....	108
Şekil 6.11. S1 Geometrisi için Farklı Ağ Tiplerinin Şemaları.....	109
Şekil 6.12. Ankrajlı Dayanım Duvarı Geometrisi.....	111
Şekil 6.13. Düğüm Sayısı – Güvenlik Faktörü Grafiği.....	113
Şekil 6.14. Düğüm Sayısı – Deformasyon Grafiği.....	113
Şekil 6.15. Kazı Sahası Planı.....	115
Şekil 6.16. Kalın Duvar Tipi.....	116
Şekil 6.17. İnce Duvar Tipi.....	116
Şekil 6.18. Model Geometrisi.....	117
Şekil 6.19. Deformasyon Değerlerinin İncelenmesi için Seçilen Noktalar.....	119
Şekil 6.20. Kalın Duvar Tipinde Deformasyon Dağılımı.....	121
Şekil 6.21. Kalın Duvar Tipinde Gerilme Dağılımı.....	122
Şekil 6.22. Cut Off Elenmansız Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	123
Şekil 6.23. Cut Off Elenmansız Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	123
Şekil 6.24. Cut Off Elenmansız Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	124
Şekil 6.25. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	124
Şekil 6.26. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	125
Şekil 6.27. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	125
Şekil 6.28. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	126
Şekil 6.29. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	126
Şekil 6.30. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi.....	127
Şekil 6.31. Cut Off Elemansız Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi..	127
Şekil 6.32. Cut Off Perdeli Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi.....	128
Şekil 6.33. Cut Off Duvarlı Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi.....	128
Şekil 6.34. Deney Düzeneği.....	130
Şekil 6.35. Deney Düzeneğinde Kolonların Yerleşimi.....	130
Şekil 6.36. Model Geometrisi.....	132
Şekil 6.37. Gerilme - Deformasyon Grafiği için Seçilen Nokta.....	132
Şekil 6.38. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması.....	133
Şekil 6.39. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması.....	133

Şekil 6.40. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması.....	135
Şekil 6.41. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması.....	135
Şekil 6.42. İnşa edilecek Tankların Planı.....	138
Şekil 6.43. İyileştirme Yapılmamış Zeminin Modeli.....	140
Şekil 6.44. Ø15m ve Ø33m Çaplı Temellerin Gerilme Deformasyon İlişkisi.....	141
Şekil 6.45. Tank Temelleri için Jet Grout Kolon Aplikasyon Planı.....	144
Şekil 6.46. Birim Hücre Modeli Yerleşim Planı.....	145
Şekil 6.47. Model Geometrisi.....	146
Şekil 6.48. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırması.....	147

## 1. GİRİŞ

Yeni bir yapının inşası ve/veya mevcut bir yapının güçlendirilmesi için öncelikle yapının üstünde yer aldığı zeminin kuvvetlendirilmesi ve ıslahı gerekir. Proje öncesi yapılan zemin etütleri, yapının kendine ait ve diğer ekstra yüklerin taşınmasını mümkün kılmıyorsa, yapının taşınması ya kazıklı temelle ya da taşıma gücü artırılmış zeminle (bazı durumlarda her ikisi ile) mümkündür. Teknoloji ilerledikçe yeni yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan en güncel olanı da jet grouting yöntemidir.

Jet grouting yöntemi ilk olarak 70'li yılların başında Japonya'da denenmiş ve başarılı olmuştur. Yine 70'li yılların sonunda İtalya'da ve diğer Avrupa ülkelerinde uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizdeki ilk uygulaması 1986 yılında Haliç Kollektörleri Projesi kapsamında Ayvansaray tünel aynasının zemin ıslahında yapılmıştır. Bu yöntemde amaç, zeminin mekanik mukavemet değerlerini arttırmaktır. Dolayısıyla zeminin taşıma kapasitesi ve elastisite modülü artar, geçirgenliği azalır. Jet grouting yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi değişik karakterdeki çok geniş ve farklı türdeki zeminlerin ıslahı mümkün olmaktadır. İstenilen çap ve boyda ve istenilen mukavemette kolonlar imal edilebilir. Böylece bu yöntemle diğer klasik enjeksiyon sistemlerine göre farklı olarak uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı, iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesi, geçirgenlik gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla işin başında maliyetin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak jet grouting yöntemi detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bölüm 3 ve 4'te yöntemin kullanıldığı yerler, yapım aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve gerekli parametreler incelenmiştir. Bu yöntemle iyileştirilmiş zeminler, doğal zemin ve jet grout kolonlarından oluşan kompozit zemin sınıfına girdiğinden dolayı, kompozit zeminlerdeki homojenleştirme metodunun sonlu elemanlar yöntemi analizlerinde kullanımını incelenmiştir.

Bölüm 5'te zeminlerde sıvılaşma problemine karşı, jet grout kolonları ile yapılan iyileştirmede kullanılan hesap yöntemi incelenmiştir. Bölüm sonunda bu hesap yöntemi bir örnek üzerinde uygulanmıştır.

Bölüm 6'da bu yöntem ile yapılacak iyileştirme sonucunda zemin ve yapının davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Sayısal analizler, Plaxis paket programı ile iki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal analizlerle jet grout yönteminin sağlayacağı iyileşmeler irdelenmiştir. Ayrıca, tasarım aşamasında sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin sağlayacağı faydalar ortaya konulmuştur.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Lunardi (1977)

Çalışmada jet grouting yönteminin tarifinden sonra yöntemin kullanıldığı bazı mühendislik problemleri incelenmiştir. Makalede aşağıda sıralanan maddeler incelenmektedir.

Bunlar;

- Yöntemin farklı zemin çeşitlerine göre uygunluğu
- Dizayn kriterleri
- İnşaat sırasında gözetleme
- Yöntemdeki en son teknolojik gelişmeler
- İnşaat ve çevre mühendisliği çalışmalarında jet grouting yöntemi
- Vaka analizleri

Uygulamanın zemin ıslahı problemlerinde oldukça ekonomik ve etkili olduğu ancak daha etkin kullanımı için uygulama ile ilgili deneysel araştırmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

### 2.2. Baumann (1984)

Makalede jet grout kolonlarla iyileştirilmiş farklı tipteki zeminlerde, kolon bileşimindeki su - çimento oranına bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimler incelenmiştir. Yedi farklı zemin tipinde uygulanan jet grout kolonlarından alınan numunelerde, farklı su - çimento oranına göre elde edilen serbest basınç değerleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

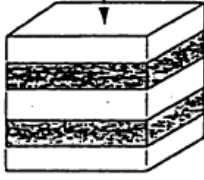
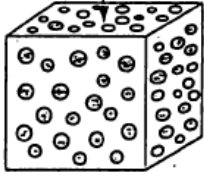
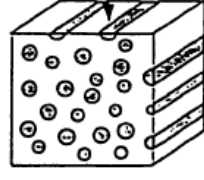
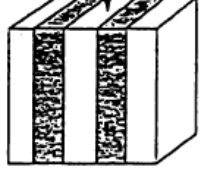
Çizelge 2.1. Su - Çimento Oranına Bağlı Kolon Dayanımları (Bauman, 1984)

Zemin Tipi	Kolon Basınç Dayanımları (MPa)						
	Çakıl	Kum	Silt, Kil	Organik Zemin	Çakıllı Kumlu	Kumlu Siltli	Siltli Killi
Kolon No	1	2	3	4	5	6	7
Su / Çimento = 0,67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12 - 18	10 - 14	6 - 10
Su / Çimento = 1	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6 - 10	5 - 7	3 - 5

Sonuçlara göre kumlu ve çakıllı zeminlerde elde edilen basınç dayanımlarının killi, siltli ve organik zeminlere göre daha yüksek olduğu, ayrıca çimento miktarının artması ile çakıllı kumlu, kumlu siltli, siltli killi zeminlerde basınç dayanımının da arttığı gözlenmiştir.

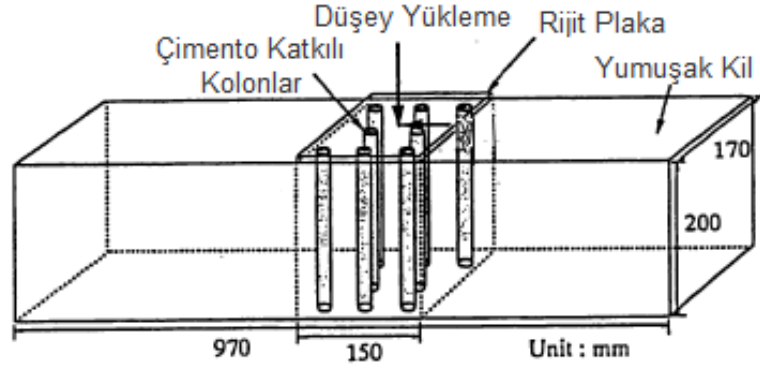
### 2.3. Omine vd. (1993)

Bu çalışmada farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen bir homojenleştirme metodu önerilmiştir. Metodun uygulanmasında gerilme dağıtımını önemi esas alınmıştır. Gerilme dağıtım katsayısı Eshelby Tensörü kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.1).

Type of mixtures	Horizontal laminate 	Mixture with spherical inclusions 	Mixture with pile shaped inclusions 	Vertical laminate 
Assumption	Constant Stress	Constant Strain energy	Approximation based on numerical analysis	Constant strain
Stress distribution parameter $b$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^0 = 1$ where, $n = 0$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{2}}$ where, $n = 1/2$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}}$ where, $n = 1/3-1/6$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^1$ where, $n = 1$
Eshelby's tensor $S_{iiii}$	1	$7/15 \sim 9/15$ (for $\nu^*=0-0.5$ )	$5/8 \sim 3/4$ (for $\nu^*=0-0.5$ )	0
$1 - S_{iiii}$	0	nearly 1/2	$3/8 \sim 1/4$	1

Şekil 2.1. Gerilme Dağıtım Parametresi - Eshelby Tensörü İlişkisi (Omine vd., 1993)

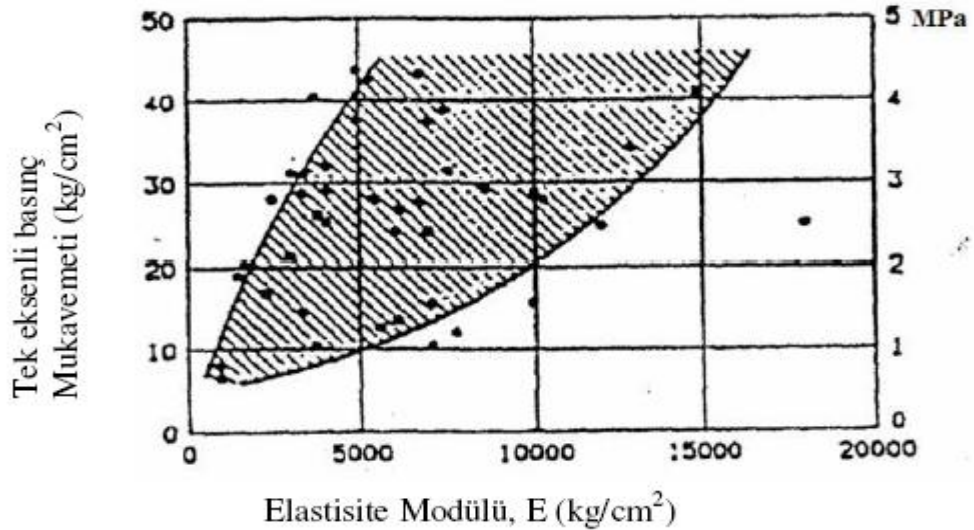
Bu metot sayesinde kompozit zeminlerin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesi elde edilmiştir. Katkı ve matristen oluşan iki fazlı karışımlarda kullanılan homojenleştirme metodu çimento katkılı taş kolonlar ile iyileştirilmiş zeminler üzerinde uygulanmıştır. Karışımların gerilme – deformasyon ilişkisi, ortalama elastik modülü ve akma kriteri de önerilen modelden türetilmiştir. Önerilen metodun geçerliliğini sağlamak amacıyla, çimento katkılı taş kolonlarla iyileştirilmiş zemine model testleri uygulanmış (Şekil 2.2), test sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.2. Deney Düzeneği (Omine vd. 1993)

#### 2.4. Trevi (1994)

Bu çalışmada elastisite modülü ile jet grout kolonların tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda siltli ve siltli kumlu zeminlerden alınan numuneler kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda Şekil 2.3'deki grafik elde edilmiş, jet grout kolon mukavemetinin elastisite modülü ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.3. Elastisite Modülü – Tek Eksenli Basınç Mukavemeti İlişkisi (Trevi, 1994)

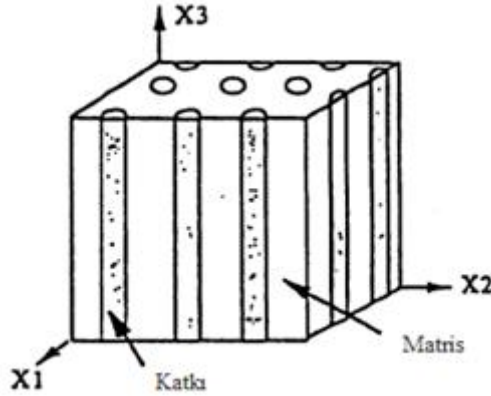
### 2.5. Omine ve Ohno (1997)

Derin karışım veya kum kompaksiyon kazığı metotlarıyla iyileştirilen kompozit zeminler heterojen yapıda bulunmaktadır. Çalışmada kompozit zeminlerin deformasyon analizi için iki fazlı karışım modeli isimli homojenleştirme metodu önerilmiştir. Karışımların elastik modülü geliştirilmiş dağıtma parametresi belirlenerek elde edilmiştir. Bu homojenleştirme metodu iyileştirilmiş kazıklı kompozit zeminler üzerinde uygulanmıştır.

Metodun geçerliliğini sağlamak amacıyla iki boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları ile üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Öte yandan kazık şeklinde katkılar için kompozit zeminin farklı türleri kullanılarak laboratuvar model testleri gerçekleştirilmiş, önerilen metodun geçerliliği model testler ile hesaplanan sonuçlar kıyaslanarak irdelenmiştir.

### 2.6. Omine vd. (1998)

Çalışmada arazide çimento katkısı ile iyileştirilme yapılmış zeminlerin taşıma gücünün değerlendirilmesi için iki fazlı karışım modeli adı verilen bir metot önerilmiştir. Arazide iyileştirme yapılmış zemin, katkı ve matris olarak tanımlanan iki farklı zeminin karışımı şeklinde ele alınmıştır (Şekil 2.4). Bu yüzden taşıma gücü, gerilme dağıtım faktörü ve karışımdaki katkının hacimsel oranı göz önünde tutularak değerlendirilmiştir. Önerilen metodun geçerliliğini doğrulamak amacıyla model ve arazi testleri yapılmıştır. Arazide iyileştirme işlemi yapılmış zeminin taşıma gücü değerlendirilmelerinde metodun etkili olduğu sonucuna varıldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Katkı ve Matris Elemanlarından Oluşan Kompozit Zemin  
(Omine vd., 1998)

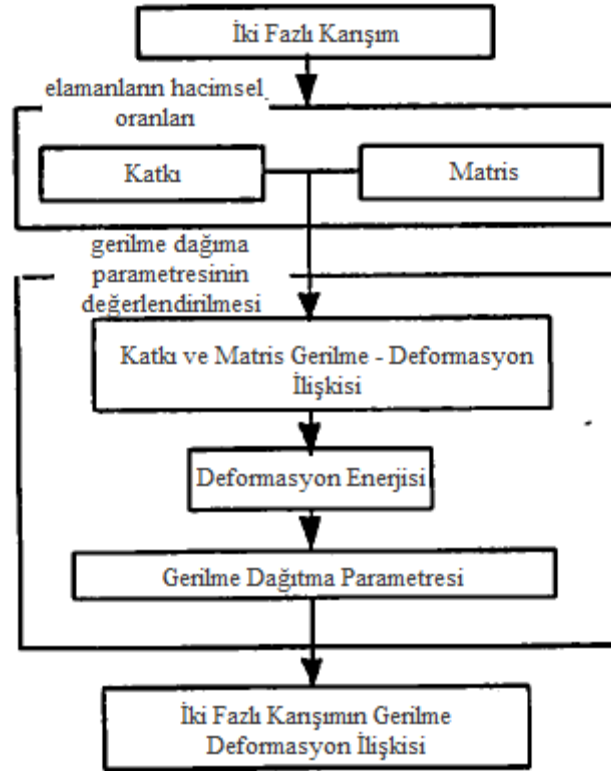
### 2.7. Durgunoğlu vd. (1998)

Bu makalede, jet grouting yöntemi ile zemin iyileştirilmesi yapılmış bir vaka analizi anlatılmıştır. 4 katlı ve yaklaşık 25.000m<sup>2</sup>'lik bir alan üzerine oturan yapının temel zemini jet grouting yöntemiyle iyileştirilmiştir. Arazi ve laboratuvar deneyleri esas alınarak yapılan hesaplamalarda sığ temellerin üst yapı yükleri altında aşırı oturma yapacağı belirlendiği belirtilmiştir. Bu durum karşısında, kazıklı temel ve jet grouting uygulaması olarak iki alternatif sistem önerilmiş, düşük maliyeti ve kısa inşaat süresi bakımından jet grout kolon uygulaması tercih edilmiştir. Jet grouting teknolojisi ile ilgili olarak, uygulama türü, prosedürü ve parametreleri ortaya konulmuştur. Uygulamanın kalite kontrolü amacıyla kolon çapları uygulamadan sonra kazı yapılarak yerinde ölçülmüş ve kolonlardan karot örnekleri alınarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Kolonların yük taşıma kapasiteleri seri yükleme deneyleri ile belirlenmiştir.

### 2.8. Omine vd. (1999)

Çalışmada, farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen metot, gerilme dağıtımını önemi esas alınarak önerilmiştir. Kompozit malzemelerin sayısal analizlerinde homojenleştirme metodu olarak adlandırılan bu yaklaşım, kazık

şeklinde kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, güçlendirilmiş zeminin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesini elde etmek amacıyla uygulanmıştır (Şekil 2.5). Çimento katkılı taş kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, birtakım model testleri uygulanmış, eğimli yüklemelerde düşey oturma ve yatay deformasyon değerleri ölçülmüştür. Sayısal analiz ve test sonuçları arasındaki karşılaştırmadan sonra, önerilen metodun iyileştirilmiş zeminin taşıma kapasitesinin önceden hesaplanmasında etkili olduğu belirlenmiştir.

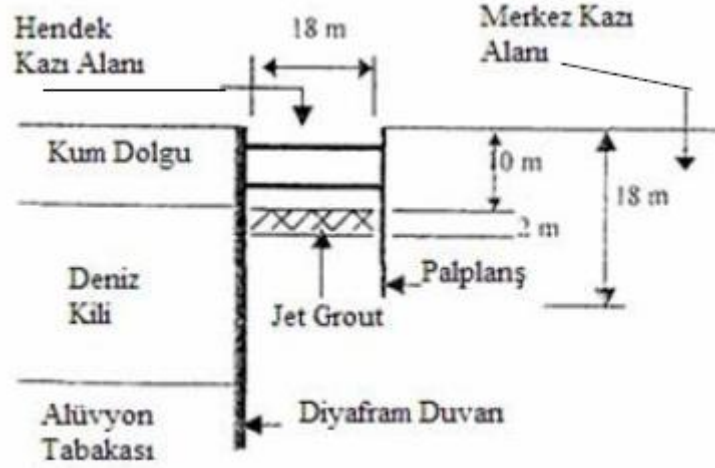


Şekil 2.5. Homojenleştirme Metodu Hesap Algoritması (Omine vd. 1999)

### 2.9. Wong vd. (1999)

Çalışmada, Singapur'da bir sanat merkezi inşaatında 18000m<sup>2</sup> alanlı bir temel kazısında palplanş duvarı ve diyafram duvarı ile desteklenmiş kazı yan yüzeylerinin jet grout kolonlar ile güçlendirilmesi ve kazı yönünde deformasyonların jet grout kolonlar ile azaltıldığı gösterilmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren 2,5 – 3,0m aşağıda

yer altı suyu bulunduğu belirtilmiştir. Deniz kili üzerinde kum dolguda yapılan jet grouting uygulamasına ait zemin kesiti Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

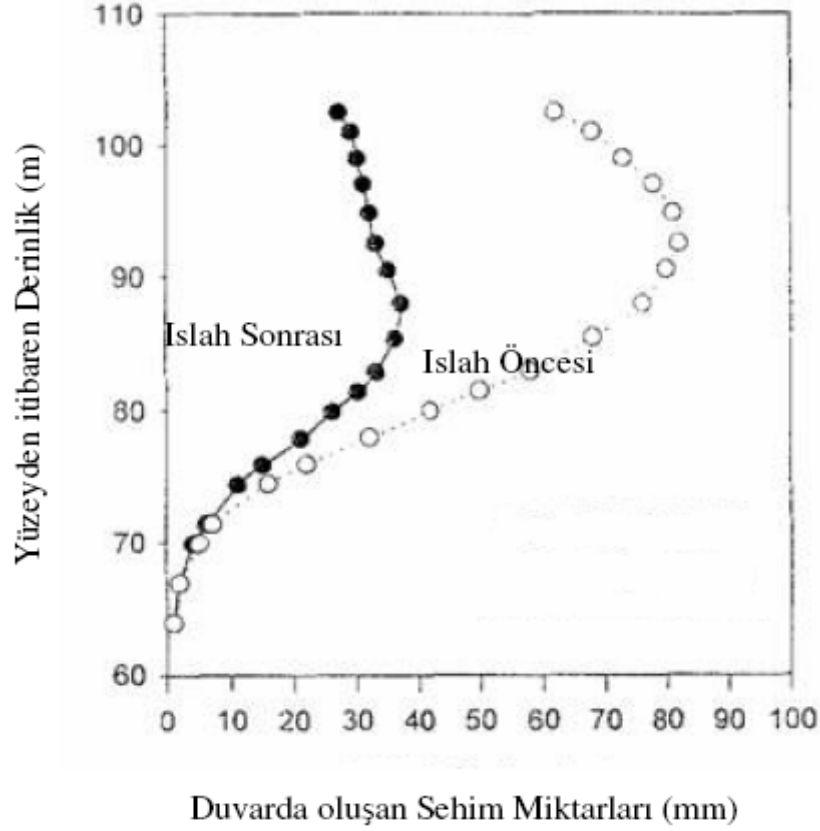


Şekil 2.6. Jet Grouting Uygulaması Zemin Kesiti (Wong vd., 1999)

Şekil 2.6'da verilen zemin kesitinde jet grout kolonlarının Jet 2 yöntemiyle elde edildiği belirtilmiştir.

Çalışmada zemine ait ıslah öncesi drenajsız kayma dayanımının 300kPa ve elastisite modülünün 150MPa iken jet grout zemin ıslahı sonrası drenajsız kayma dayanımının 1150kPa, elastisite modülünün ise, 350kPa değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Islah öncesi ve ıslah sonrası hendek kazısında yapılan inklinometre ölçümleri sonucunda Şekil 2.7'deki grafik elde edilmiştir.





Şekil 2.7. İslah Öncesi ve İslah Sonrası İnklinometre Ölçümleri (Wong vd., 1999)

Şekil 2.7’de diyafram duvarındaki sehim miktarları 2m yüksekliğindeki jet grouting uygulaması öncesi maksimum 87mm iken, ıslah sonrası 37mm’ye düştüğü görülmüştür.

### 2.10. Wong ve Poh (2000)

Bu çalışmada jet grout kolonların, bitişik nizamlı yapılarda bodrum kat kazısı sırasında kazı yan yüzeylerindeki diyafram duvarlardaki hareketi önlemek için kullanılması irdelenmiştir. İksa duvarları arkasında oluşturulan jet grout kolonların, duvar arkasındaki zemin tabakasının aksi yönde hareketine sebep olduğu ve diyafram duvarlarında da kazıya ters yönde deformasyon olduğu gözlem verileri sonucunda elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca diyafram duvarlarındaki eğilme momentlerinin de

jet grout kolonlar ile azaldığı ve bitişik yapıların kazıdan daha az etkilenmesinin sağlandığı gösterilmiştir.

### **2.11. Kirsch ve Sondermann (2001)**

Düsey iyileştirme kolonlarının analizleri için farklı teknikler tüm dünyada geniş çapta kullanılmaktadır. Yapının temeli, iyileştirmede kullanılan kolon sıklığına bağlı olarak, kazık ya da iyileştirilmiş zemin rolü oynamaktadır. Analiz ve dizayn için metotlar basit ampirik yaklaşımlardan daha sofistike analitik yaklaşımlara geçmektedir. Deformasyon davranışının sayısal simülasyonu zeminin mekanik davranışını anlamakta önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada farklı yaklaşımlarda sayısal analizler bulunmakta ve sayısal modellemenin, iyileştirmenin güvenli ve ekonomik dizaynında oldukça etkili olduğu gösterilmiştir.

### **2.12. Durgunoğlu vd. (2002)**

Bu makalede İzmir / Tire Organize Sanayi.Bölgesi'nde inşa edilen sigara fabrikası sahasının jet grouting yöntemi ile ıslahı vaka analizi olarak sunulmuştur. Bölgenin jeolojisi ana kaya üzerine kolüvyon, alüvyon formasyonları ve dolgu zeminden oluştuğu, ayrıca sahanın 1. derece deprem bölgesi içerisinde olduğu belirtilmiştir. Fabrika temelleri kazıklı, binanın zemine oturan döşemeleri ile diğer hafif yapı temelleri altında ise jet grout kolonlar önerilmiştir. Sıvılaşma riskine karşı sistematik, kolüvyon tabakasına kadar yaklaşık 32,000m jet grout kolon uygulaması yapıldığı belirtilmiştir. Zemin ıslahı esnasında jet grout kolonlardan karot alımını, kazı yapılarak çap kontrolünü, yükleme deneylerini, piston numune alıcısı ile alınan numuneler üzerinde mukavemet deneylerini içeren kapsamlı kalite kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin inşası öncesinde deneme bölgesinde yapılan kalibrasyon çalışmasında teknik parametreler sahaya özel olarak belirlendiği belirtilmiştir.

Çalışmada yapılan kapsamlı ön deneme bölgesi testlerinin, uygulama projesi parametrelerinin belirlenmesindeki ve bu parametrelerin kalibrasyonu bakımından

önemi vurgulanmaktadır. Deneme bölgesi testlerinde jet 1 yöntemiyle oluşturulan kolonların jet 2 yöntemi ile teşkil edilen kolonlara oranla daha yüksek kesit mukavemetine haiz olduğu ve benzer koşullardaki yükleme deneylerinde daha az oturmalar ölçüldüğü belirlenmiştir. Ancak sahadaki zemin ıslahının esas olarak zemin sıvılaşması riskine karşı olarak yapıldığı ve dolayısıyla statik yükleme koşullarındaki taşıma gücü ve deformasyon davranışının ikincil öneme haiz olduğu dikkate alındığında, gerekli yer değiştirme oranını sağlayacak şekilde uygulanan ve daha büyük çaplı kolon teşkilini sağlayan jet 2 yöntemi saha için uygun metot olarak tercih edilmiştir.

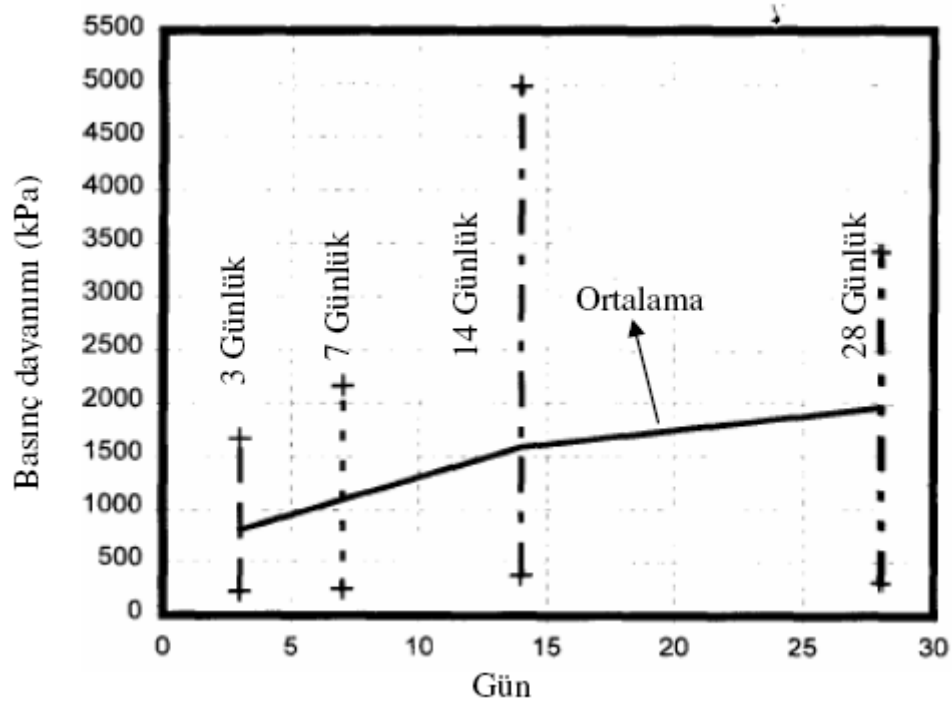
### **2.13. Gökalp ve Düzceer (2002)**

Bu makalede, Aliğa'da inşaatı devam eden doğalgaz hattının birleştiği güç dönüşüm tesisinin temelinde gerçekleştirilen jet grout uygulaması incelenmiştir. Analizlerde, zeminde beklenen toplam oturma ile farklı oturmaların çok aşırı mertebelerde olduğundan dolayı tesisin ana binalarının temellerinin altında jet grout ile iyileştirme yapılmasına karar verilmiştir. Çalışmada, jet grout tekniğinin seçimi, uygulama sistemi, enjeksiyon basıncı gibi yöntemdeki detayları, nozzle sayısı ve ebatları, oluşturulan kolonların taşıma gücü ve nozzle dönme hızı gibi tasarım parametrelerinin seçimi ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Önceden planlanmış jet grout çalışması için birçok ön parametrik test ve çekme testi uygulandıktan sonra gerekli jet grout kolonunun çapı ve bu çapa ulaşmak için gerekli uygulama basıncı belirlenmiştir. Ayrıca uygulamadan sonra yapılan karot testi, bütünlük testi, yükleme testi ile kapsamlı kalite kontrolü ve güvence araştırması ile ilgili açıklamalar yapılmıştır.

### **2.14. Bell vd. (2003)**

Bu çalışmada süper jet kolonlarından alınan karot numuneleri üzerinde laboratuarda tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 76 x 150mm'lik

silindirik numunelere ait 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirlenmiş ve Şekil 2.8'deki grafik elde edilmiştir.

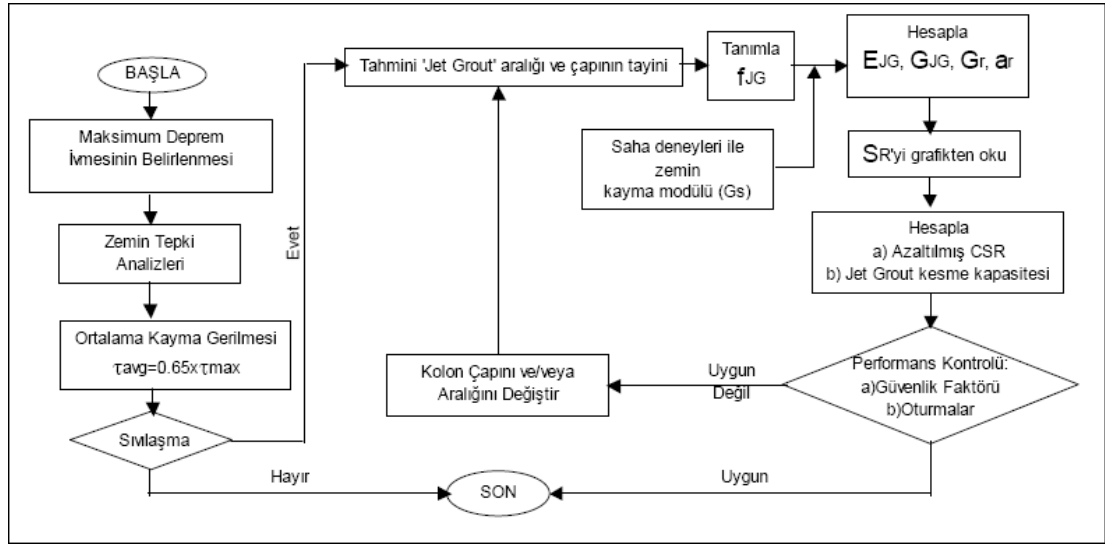


Şekil 2.8. Kolon Numunelerinin Basınç Dayanımları (Bell vd., 2003)

Şekil 2.8'e göre süper jet kolon dayanımlarının zamana bağlı olarak arttığı ve gerçek dayanıma ise 28. günde ulaşıldığı belirlenmiştir.

### 2.15. Özsoy ve Durgunoğlu (2003)

Makale kapsamında 'Jet Grouting' ve 'Deep Mixing' zemin ıslahı teknikleriyle sıvılaştırmanın etkilerinin azaltılmasına yönelik yeni bir hesap metodu önerilmiştir (Şekil 2.9). Deprem sebebiyle oluşan kayma gerilmelerinin tanımlanan birim alanlar üzerine dağılımı, zemin - çimento karışımı kolonlar ve çevrelerindeki zemin arasındaki kayma modülü farkı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen metodun etkinliği Ford – Otosan Gölcük Tesisleri sahasında yapılan zemin ıslah çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.9. Önerilen Hesap Algoritması (Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

Bu çalışmada önerilen hesap yöntemi kısaca, deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak, yüksek kayma modüllü kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında kayma modülleri oranında dağılacığı kabulüne dayanmaktadır. Bu bakımdan çalışmada, önerilen metodun uygulamada ekonomik ve güvenli sonuçların elde edilmesinde yararlı olacağı beklendiği belirtilmiştir. Çalışmada yapılan kabullerin iki veya üç boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu veya Sonlu Farklar Metodu modelleri ile kontrolünün yapılması önerilmiştir.

### 2.16. Durgunoğlu (2004)

Çeşitli inşaat mühendisliği yapılarının geoteknik ve sismik risklerinin değerlendirilmesi sonucu gerekli görülen zeminin iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için kullanılan yöntemler tartışılmıştır. Bu metotlardan ülkemizde yaygın bir kullanımı bulunan yüksek modüllü jet grout kolonların temel mühendisliğinde çeşitli kullanımları, imalat parametreleri, kalite kontrol ve proje kriterlerinin tahkik deneyleri açıklanmıştır. Deprem yükleri altında zeminlerin sınılaşmaya karşı güvenlik faktörlerinin hesap yöntemleri açıklanmış ve Chinese kriterinin ince daneli zeminler için geçerliliği tartışılarak getirilen yeni bir öneri üzerinde durulmuştur.

Yüksek modüllü jet grout kolonların sıvılaşıma riskini azaltmada kullanımı detaylı olarak konu edilmiş, bu kullanıma ait geliştirilen bir tasarım metodu özetlenmiştir. Geliştirilen bu metodun özellikle 17 Ağustos 1999 Depremi öncesi kısmen uygulandığı İzmit Carrefour - SA ticaret merkezi bir vaka analizi olarak incelenerek, metodun geçerliliği kanıtlandığı belirtilmiştir.

### **2.17. Bzowka (2004)**

Bu çalışmada, jet grouting uygulamasının sayısal analizi yapılmıştır. Nümerik modelleme; başlangıç planlaması ve matematiksel formülasyon, model parametrelerinin tanımlanması, doğrulama ve hassaslık analizi olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Nümerik analizlerde, ampirik formüllerin kullanıldığı geleneksel analizlerden farklı olarak jet kolonlara gelen yüklerin ve oturmaların hesaplanabildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, problem gerçek boyutlarında modellenmiştir. Nümerik analizlerde Mohr – Coulomb modeli kullanılarak jet kolon, onun etki bölgesi ve zemin ortamı ayrı ayrı modellenmiştir. Bu araştırma sonucunda, sayısal analiz, deneysel bulgular ve ampirik çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

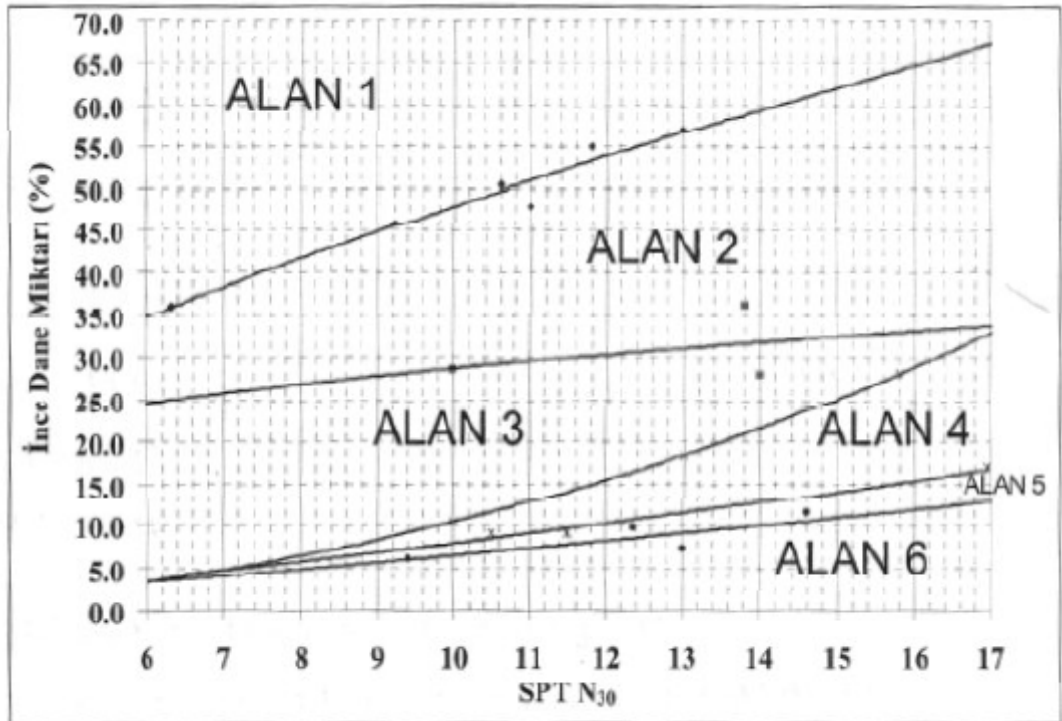
### **2.18. Racansky vd. (2006)**

Derin kazı dizaynında yapının deformasyon davranışını ve stabilitesini araştırmak amacıyla farklı metotlar uygulanmaktadır. Genellikle çakıl tabakasının altında yumuşak kil tabakası bulunması veya yer altı su seviyesinin zemin yüzeyine çok yakın olması ve kazı sırasında su seviyesinin aşağı çekilmesi gibi elverişsiz zemin koşullarında kapsamlı geoteknik analizler gerekmektedir. Bu çalışmada zemin göçme modu, limit denge ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar metodu ile kazı desteklerinin stabilitesi ve ankrajlara uygulanan ön germe kuvveti ile dayanım elemanın derinliği ve kalınlığının hesap sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

**2.19. Doğu vd. (2006)**

Bu çalışmada Taris - Aydın, Limak Lara Otel Antalya, Concorde Otel Antalya sahalarında yapılan jet grout kolonlarından alınan karot numunelerinin mukavemet özelliklerinin zeminin ince dane yüzdesi ve SPT vuruş sayısından ne derece etkilendiği araştırılmıştır. Çalışmalarda arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zeminin ince dane oranı, ortalama SPT darbe sayısı ve karotiyer ile alınan numunelerin serbest basınç dayanımlarını incelemiştir.

Çalışmalar sonucunda alınan numunelerin serbest basınç dayanımları, araştırma verileri ile karşılaştırılarak, ince dane yüzdesine ve SPT vuruş sayısına bağlı olarak kolonların serbest basınç dayanımlarının belirlenebileceği gösterilmiştir. Şekil 2.10'da zeminde teşkil edilen jet grout kolonlarının serbest basınç dayanım aralıkları gösterilmiştir. Bu grafikte, altı adet alan, SPT vuruş sayısına ve ince dane yüzdesine bağlı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.10. Jet Kolonların Mukavemet Aralıkları (Doğu vd., 2006)

Şekil 2.10'a göre

- Alan 1 :  $2,6\text{N/mm}^2$ 'den düşük dayanımlı kolonlar
- Alan 2 :  $3,5\text{N/mm}^2$ 'den düşük,  $2,6\text{N/mm}^2$ 'den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 3 :  $5,5\text{N/mm}^2$ 'den düşük,  $3,5\text{N/mm}^2$ 'den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 4 :  $7,0\text{N/mm}^2$ 'den düşük,  $5,5\text{N/mm}^2$ 'den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 5 :  $14,0\text{N/mm}^2$ 'den düşük,  $7,0\text{N/mm}^2$ 'den yüksek dayanımlı kolonlar
- Alan 6 :  $14,0\text{N/mm}^2$ 'den yüksek dayanımlı kolonlar

olarak belirtilmektedir.

Çalışma sonucunda zeminde oluşturulan kolonların mukavemetinin yüksek olmasının nedeninin malzemeleri oluşturan danelerin iyi derecelendirilmiş olmasına bağlı olduğu ve ince dane miktarının artması sonucu ise kolon mukavemetinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

### 2.20. Sert ve Önalp (2007)

Kayseri Serbest Bölgesi eski bataklık kalıntısı olan kalın turba tabakası üzerinde bulunmaktadır. Bölgede boru dilme makinesi taşıyacak bir platform 15m'lik turba ve üstüne yaptırılan 3m'lik daneli dolgu üzerine inşa ettirilmiştir. İyileştirme amacıyla yapılan dolgu sonucu aşırı oturmalar olduğu ve dilme makinesinin yerleştirilmesinin imkansız hale gediği belirtilmiştir. Bu bildiriye, oturmaların hesaplanması, gözlenmesi ve devam eden oturmaların jet grout kolonlarıyla azaltılması üzerinde durulmaktadır.

### 2.21. Sert vd. (2007)

İstanbul Beykoz Belediyesi Riva (Çayağzı) Beylik Mandıra mevkiinde yapımı öngörülen köprü için yapılan zemin değerlendirmelerinde köprü ve yaklaşım dolgularının inşaatı sırasında taşıma gücü ve oturma problemlerinin belireceği anlaşıldığı ve uygun bir çözüm arandığı belirtilmiştir. Çalışmada köprü ayağı altında oturmaların yaklaşık 50m derinlikte karşılaşılan ana kayaya indirilmiş çelik profil kazıklarla sıfırlanabileceği, yaklaşım dolgusu altında meydana gelecek uzun süreli



oturmalarında 65cm çaplı, 15m boyunda jet grout kolonları ile kabul edilebilir seviyelere çekilebileceği yapılan sayısal analizle gösterilmiştir.

### 2.22. Ou vd. (2007)

Bu çalışmada öncelikle, yumuşak kil zeminlerdeki derin kazılarda aşırı duvar sehimleri ve zemin oturmasının çok yaygın görülen bir problem olduğu ve özellikle bitişik nizam yapılarda önemli hasarlara yol açtığı vurgulanmıştır. Duvar sehimlerini veya zemin oturmalarını azaltmak için zeminin, genellikle jet grout veya derin kompaksiyon yöntemiyle iyileştirildiği belirtilmiştir. Ancak, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde bir takım sorunlar olduğu ve gerçek durumun tam olarak yansıtılmadığı ifade edilerek bu çalışmada üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen duvar deformasyonları ile analizlerden elde edilen deformasyonlar karşılaştırıldıktan sonra aralarında çok iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

### 2.23. Racansky vd. (2008)

Jet grout ile yapılan dayanım duvarları, diyafram duvarlar ve kazıklı duvarlar için alternatif bir çözüm oluşturmaktadır. Silindirik elemanlardan oluşan sürekli duvarlar birçok amaç için tipik bir model oluşturmaktadır. Projede öngörülen duvar kalınlığı, imal edilen duvar kalınlığından büyük ise duvar kalınlığını artırmak amacıyla ikinci sıra jet grout elemanları inşa edilebilmektedir. Bu çalışmada yapılan analizlerde ulaşılan sonuçlarda, ikinci sıra jet grout elemanlarının hepsinin inşa edilmemesinin, yapının stabilitesine önemli sayılabilecek etkisi olmadığı gösterilmiştir. Bu sonucun destekler arasındaki zeminin dayanım duvarı stabilitesine etkisi olduğunu gösterdiği ve bu şekilde dayanım yapılarının inşaat maliyetleri azaltılabileceği belirtilmiştir. Çalışmada dayanım duvarları kalınlıklarının etkileri iki ve üç boyutlu analizler kullanılarak incelenmiştir. Destekli ve desteksiz duvarların deformasyon ve güvenlik sayısı sonuçları hesaplanmış, ayrıca farklı destek

aralıklarında üç boyutlu analizler uygulanmıştır. Çalışmada ara yüzey elemanlarının ve farklı ağ boyutlarının sonuçlara etkisi de incelenmiştir.

#### **2.24. Tschuchnigg ve Schweiger (2008)**

Çalışmada jet grout kolonlarının klasik kazık veya kazıklı radye temellere ekonomik alternatif olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Genellikle problemi çözmek için analizi zor olan çok sayıda jet grout kolonları inşa edilmek zorunda olduğu ve bu temellerin çalışmasını hesaplamak amacıyla nümerik metotlar artarak kullanıldığı belirtilmiştir. İki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak yapılan modellenmenin, tüm elemanların arazi şartlarındaki gibi tanımlandığı üç boyutlu modellemeler kadar hassas sonuçlar vermeyeceği açıktır. Ancak üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile problemi modellemek oldukça karmaşıktır. Bu modellerin karmaşıklığını azaltmak için en uygun metodun, kazıkların sürekli ortamda sonlu elemanlar yöntemiyle net olarak modellenmediği ancak kazık çakma davranışını ele alan özel bir formülasyonla sonlu elemanlar yöntemine uyumlandırılan gömülü kazık konsepti olduğu belirtilmiştir. Bu makalede yayılı yük altındaki jet grout kolonları analizlerinde iki boyutlu düzlem deformasyon, üç boyutlu ve gömülü kazık modelleri kullanılmış, yapılan sayısal analizler sonucunda bu modellerin karşılaştırması yapılmıştır.

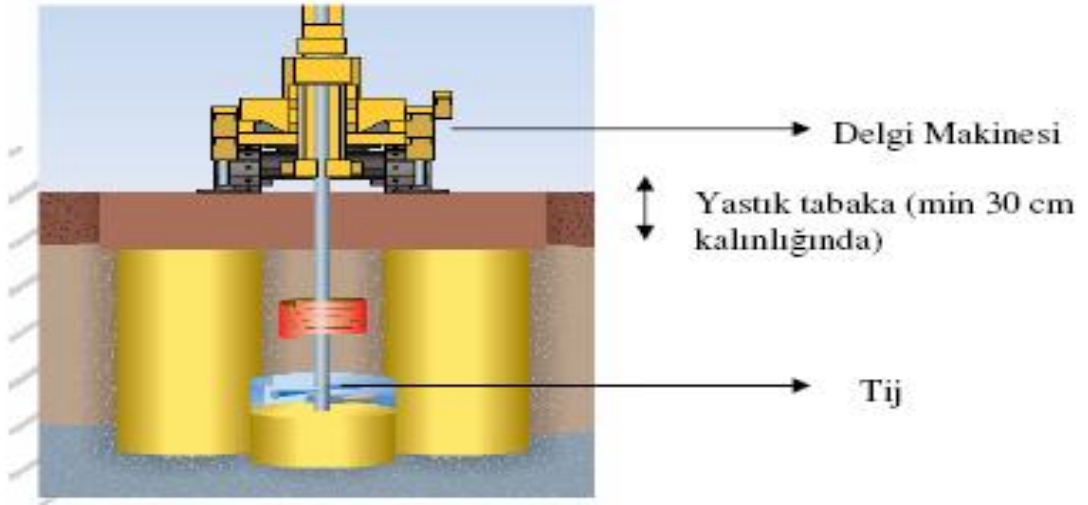
### 3. JET GROUTING UYGULAMA TEKNİĞİ

Jet grouting işlemi, zeminin veya zayıf kayacın parçalanması ve çimento şerbeti ile karışması sonucu oluşan kısmi yer değiştirme olarak tanımlanabilir. Bu metot zeminin, minimum 300bar basınçla püskürtülen bir stabilizerle karıştırılmasıdır. Stabilizerler, genellikle su - çimento karışımıdır (grout). Yüksek basınç, katkının sevk edilen nozzle(lar)dan geçerken yüksek bir kinetik enerji (hız) kazanmasını sağlar. Yüksek hızlı (200 - 250m/sn) grout, zemini "yırtarak", zeminle bir karışım sağlar (Soilcrete). Bu karışım, homojen ve sürekli bir yapı özelliğindedir.

Bu tarifiyle jet grouting yöntemi, neredeyse her tür zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda, diğer iyileştirme metotlarından daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifidir.

Geleneksel enjeksiyon metotlarına karşı ise, zemin iyileştirici groutun miktarı, delme ve sevk işleminden önce hesaplandığı için, işin birim ve toplam maliyetlerine çok hassas yaklaşımlar mümkündür.

Şekil 3.1'de jet grouting sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Zeminde oluşturulan jet grout kolonları ile temel alt kotu arasında minimum 30cm, maksimum 60cm kalınlığında yastık tabakası görevini üstlenen stabilize dolgu malzemesinin serilmesi, oluşan jet grout kolonlarında başlıkların temel altında kırılmasını engellemektedir.



Şekil 3.1. Jet Grouting Sistemi ve Yastık Tabaka Şematik Gösterimi

### 3.1. Jet Grout Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı

Jet grout kolonların çeşitli maksatlarla kullanımları aşağıda sıralanmaktadır (H.T. Durgunoğlu, 2004).

- Temel altında, düşey yükler için basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü
- Döşeme altında düşey ve özellikle yüksek yayılı yükler altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü
- Dolgu altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deformasyon kontrolü
- Köprülerde yaklaşım dolguları altında düşey dolgu yüklerinin taşınması, dolgu altında oturma kontrolü ve kenar ayak kazıklarına negatif çeper sürtünmesi intikalinin önlenmesi
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile teçhiz edilerek çekme elemanı olarak
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması
- Kazılarda donatı ile teçhiz edilerek düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak

- Geçirimli ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerdeki kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo kapama elemanı olarak
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında teşkil edilen payanda elemanı olarak
- Kazı tabanından kazıya gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili ile
- Yumuşak zeminde açılan yüzeye yakın tünellerde tünel üstündeki zeminin iyileştirmesi amacı ile
- Yumuşak zeminde açılan tünellerde tünel içinde ve ayna önünden yapılarak, kazı öncesi tünel kesiti üzerinde taşıyıcı bir semsiye oluşturulması amacı ile
- Önemli ve ağır yapılarda sıvılaşma güvenlik sayısı düşük olan yerlerde kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deformasyonların kontrolü için, kazıklarla birlikte
- Sıvılaşma sonucu oluşacak zemin yanal ve düşey deformasyonlarının sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak
- Sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin bir kısmının taşınarak deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deformasyonların sınırlandırılması

### 3.2. Jet Grouting Yönteminin Tasarım Esasları

Jet grouting uygulamalarının artmasıyla sadece granüler zeminlerde başarılı olacağı öngörülen bu uygulamanın ince daneli zeminlerde de başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Jet grout yöntemi tasarımı arazide elde edilen deneyimlerden yararlanılarak yapılmaktadır. Yöntem tasarımında esas mesele güvenli, ekonomik ve tatminkar bir çözüme ulaşmak için uygulanacak metodun iyi seçilmesi, prosedür ve detayların adım adım hesaplanmasıdır. Bilinmesi gerekenler;

- Zemin hakkında elde edilecek tüm bilgilerin toplanması
- Zeminin mekaniksel modellenmesi

- Yükleme şartlarının belirlenmesi
- Yüklerin hesaplanması
- İyileştirilmiş zeminin spesifik dayanımı dahil malzemelerin seçilmesi

Yöntemin zemin iyileştirilmesi veya yapısal taşıyıcı eleman olarak tasarlanacağı konusundaki kararın ve tasarım için önemli olan aşağıdaki özelliklerin tasarımcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir;

- Zemin cinsi ve parametreleri
- Enjeksiyon özellikleri
- Zemin - Enjeksiyon karışımları ( kısa ve uzun süreli dayanımlar )
- Çelik donatı, tip ve geometrisi
- Katkı malzemesi
- Taş tozu

Taşıyıcı olarak tasarlanacak stabilize edilmiş kolonların kapasite hesaplarında, tekil kazık taşıma gücü hesaplarındaki esaslar geçerli olup toplam güvenli taşıma kapasitesi uç ve çeper sürtünmesi ile belirlenecek olmakla beraber, zemin - çimento bileşimindeki malzeme zemin cinsi, dozaj ve işletme parametrelerine ve karot deneylerine dayanarak güvenli olarak saptanacak değerden daha büyük bir gerilme olmaması sağlanmalıdır.

Hesaplama yönteminde grup şeklindeki taşıyıcı elemanların toplam taşıma kapasitesinin (basınç cinsinden) tüm tekil kazıkların toplam taşıma kapasitelerine eşit olacağı göz önüne alınmaktadır. Yapısal yük rijit bir gövde ile taşıyıcı tabaka içine girdiği takdirde, tüm yük güvenli bir şekilde sağlam tabakalara aktarılmış olup, bu şekilde oluşacak oturma da elastik kısalma ile sınırlı kalmış olmaktadır.

Yük rijit bir gövde ile taşıyıcı olmayan bir zemin içerisinde yüzen kazıklarla taşınıyor ve kazıklar taşıyıcı tabakaya girmiyorsa yükün büyük bir kısmı kolonlara aktarılmakla beraber yükün bir kısmı zemine intikal eder ve reel oturma, kolonlarının elastik oturma değerinden daha büyük değerde gerçekleşir.

Esnek bir zeminde üniform bir yük, taşıyıcı zemin tabakasına girecek şekilde aktarılıyorsa farklı oturmalar meydana gelebilir.

Yükle temel arasında yeterli kalınlıkta granüler bir tabaka varsa, yükün bir kısmının kolonlarla taşınması gerçekleşirken, önemli bir kısmı da zemin tarafından

taşınır. Granüler dolgu malzemesi jet grout kolonların davranışını daha üniform yapar. Kolon boyu arttıkça zemin gerilmesinin önemli kısmını jet grout kazıklar taşımış olur. Yapısal yükün rijit bir gövde ile sağlam tabakalara aktarılması durumunda jet grout kolonunun davranışı kazık uygulamalarında olduğu gibidir. Diğer tüm şıklarda kolonların varlığı yükü ilgili zemin davranışına göre değişen özel bir zemin iyileştirilmesi durumundadır. Jet grouting yöntemiyle zemin iyileştirilmesi taşıma kapasitesi kazıkları çevreleyen sınırlar içindeki alanın hesaplanmasıyla belirlenir. Doğal zeminlerle bu tür iyileştirilmiş zeminler arasındaki fark kompozit zeminler tanımlamasıyla belirlenmektedir. Sonuç olarak zemin iyileştirilmesi yüklerin önemli bir bölümü jet grout kolonlarla taşıttırılmış ve oturmalarda azalma sağlanmış olmaktadır.

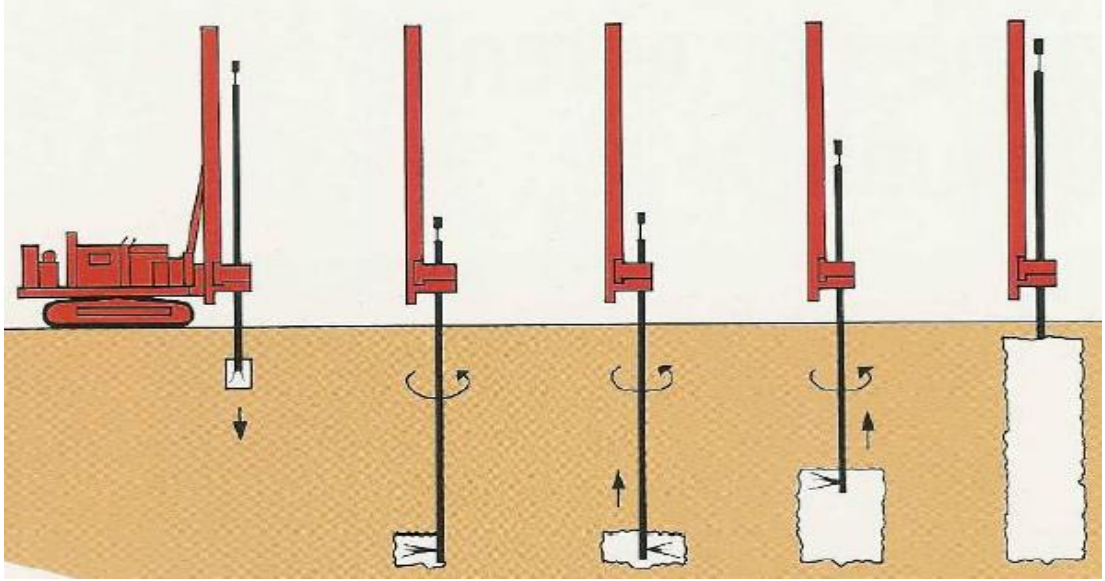
İmalat sırasında yapımla ilgili tüm bilgiler düzenlenen formlara işlenmelidir. İmalatta kullanılacak su / çimento ve katkı maddeleri önceden kontrol edilmeli, enjeksiyon esnasında çalışma koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanacak hususlar, harcın kusması gözlenmeli ve not edilmelidir. Zemin üst düzeyine kadar yükselen kolonların son kısımları 50cm kadar istenilen nitelikte olmayacağından kırılmalı ve gerekirse beton dökülerek düzenlenmelidir.

### 3.3. Jet Grouting Metodunun Uygulaması

Jet grouting metodunun uygulanmasında delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşama bulunmaktadır. Uygulama için Türkiye’de “TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon” yönetmeliği esas alınmaktadır. Öncelikle inşaat sahası ve yolları, makine ve personelin verimli çalışarak planlanan günlük imalat miktarlarının yapılabilmesi ve imalat kalitesine ulaşılabilmesi için düzgün ve kuru tutulmalıdır. Delgi makinesi, paletli vinç, beton mikseri, beton pompası ve ağır iş makinelerinin batmadan çalışmalarına imkan sağlayacak biçimde düzenlenmesi gerekir. Çalışma sahasında uygun yüzey drenaj sistemi tesis edilerek platformun kuru kalması sağlanmalıdır.

Jet grouting uygulamasının ilk aşamasında zemin küçük çapta sondaj tiji ile delinmektedir. Nozzlelar, imal edilecek jet kolonun en alt seviyesine ulaştığı zaman

delme işlemi bitirilmektedir. Sonraki aşamada tijler kendi etrafında döndürülerek yukarı çekilmekte ve bu sırada zemine nozzlerden oldukça yüksek basınçta grout enjekte edilmektedir. Kolon, önceden belirlenmiş olan en üst seviyeye ulaştırıldığında enjeksiyon işlemi sona erdirilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Jet Grouting Yöntemi Uygulama Aşaması

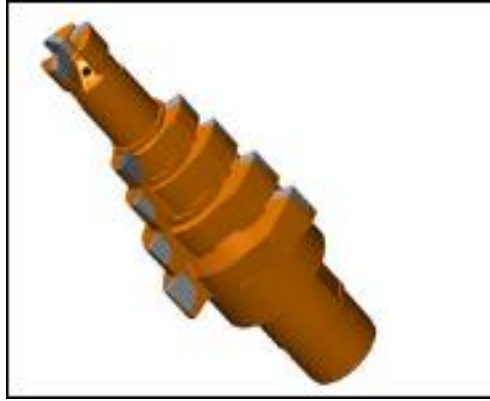
Jet grout elemanının özelliklerini belirleyen parametreler; zemin cinsi, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan basıncı, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkan debisi (nozzle çapı), enjeksiyon şerbetinin bileşimi, jet enjeksiyon tijinin çekme hızıdır.

### 3.3.1. Delgi Aşaması

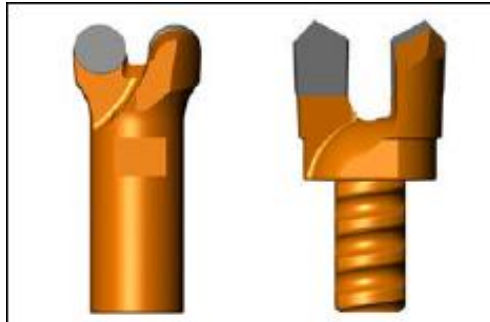
Delgi sırasında kuyu ağzının yer altı su seviyesinin üzerinde olması çalışabilme açısından tercih edilir. Delme işleminin çeşidi, delinecek zeminin özelliklerine bağlı olarak seçilir. Buna göre de bilinen tüm rotary ve darbeli - rotary metotları kullanılır. Darbeli - rotary metodunun en yaygını da harici çekiçli sistemlerdir. Delme işleminin kolaylaştırılması, uç takımının soğutulması ve zeminin enjeksiyona ön hazırlanması maksadıyla delme sırasında çok çeşitli akışkanlar



kullanılmaktadır. Bunlar su, hava, bentonit şerbeti, çimento şerbeti (grout) olabilmektedir. Uç takımı olarak, yumuşak karakterli zeminlerde genellikle kil bitleri, sert karakterlerde ise "tricone" bitler kullanılmaktadır. Delme borusu (tij) olarak da jet grout tijleri kullanılmakta, bunlar yüksek basınca dayanaklı malzeme ve imalat tekniği ile imal edilmektedir. Bağlantı (ek) manşonlarında da 500 - 600bar'a dayanımlı sızdırmazlık elemanları kullanılmaktadır. Şekil 3.3'te alüvyonlu zeminlerde su ve hava ile delgide kullanılan kademeli matkap, Şekil 3.4'te yumuşak zeminlerde kullanılan kademesiz delgi matkabı görülmektedir.



Şekil 3.3. Kademeli Delgi Matkabı



Şekil 3.4. Kademesiz Delgi Matkabı

### 3.3.2. Enjeksiyon Aşaması

Jet grouting enjeksiyon ekipmanları mikser, dinlendirici, pompa, su tankı, çimento silosu, basınç göstergeleri, vanalar vb. ekipman, su saati, gidiş - dönüş hattı,

ara hortumlar vb. ekipmanlardan oluşmaktadır. Enjeksiyon karışımı belirli orandaki suyun ve çimentonun mikserde birleştirilmesiyle oluşur. Uygulama alanına göre su / çimento oranı ayarlanır, çok miktarda hacim dolacaksa, pompanın basmasının mümkün olduğu oranda (%25 kadar) kum katılır. Geçirimsizlik ve ince çatlakların doldurulması bentonit karışımı ile sağlanır. Mikserde hazırlanan enjeksiyon karışımı, dinlendiriciye alınır ve oradan pompa vasıtasıyla hortumlar ile kuyuya verilir. Projede belirlenen derinliğe ulaşıldığında, delme ve su basma işlemi durdurulur, çelik bir bilya delme borusu içine bırakılır, uç kısmının hemen üstünde yer alan bir valf bu suretle kapatılmış olur. Valf kapanınca delme borusuna yollanacak groutun yönü boru ucunda “monitör” diye adlandırılan ve jet grout nozzle’larını taşıyan takıma çevrilmiş olur. Yüksek basınçlı grout pompalanmaya başlanır ve enjeksiyon fazı başlamış olur. Yüksek basınç grouta nozzle’lardan geçerken yüksek hız kazandırır. Yüksek hızlı grout zeminin doğal yapısını parçalayarak zeminle karıştırır. Delici takımın dönel hareketi sayesinde bu karışım daire kesitli bir kolon formunda oluşur ve zeminden çok farklı mekanik değerlere sahip jet grout kolonu elde edilmiş olur (Melegary ve Garassino, 1997) (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Enjeksiyon Aşaması (Nozzlelerden Grout Çıkışı)

Oluşacak kesitlerin ebatları, zeminin özelliklerine bağlı olduğu gibi;

- Dönüş hızı,
- Çekme hızı,
- Grout basıncı,
- Grout debisi (dakikada stroke sayısı),
- Nozzle çap ve adedi,

gibi jet grouting yönteminin ana parametrelerine de bağlıdır. Basıncı enjeksiyon esnasında, delici takımın etrafından dışarıya belirli bir miktar zemin materyali taşması uygun görülür. Bu durum groutla karıştırılan zemin içinde aşırı basınç oluşmadığına işaret eder, çünkü aşırı basınç oluşması halinde, basıncın fazlası delme borusu çapı ile delinen delik çapı farkından oluşan boşluktan dışarı kaçar. Aşırı basınç oluşmamalıdır. Çünkü aşırı basınç zeminde kırılmalara ve ayrıca zeminin kaldırılmasına sebep olur. Bu durum oluşturulan kolonlarda süreksizliğe ve mevcut yapılan konstrüksiyonlarında problemlere yol açar. Bu türden sorunların yaşanmaması için uygulamada şu türden tedbirler yararlı olur;

- Debi miktarının azaltılması,
- Enjeksiyon basıncının düşürülmesi,
- Özellikle masif kil özellikli zeminlerde, ön yıkamalı delme işlemi.

Basıncı enjeksiyon esnasında taşan materyal miktarı, zeminin geçirgenliğine ve türüne bağlıdır. Bu miktar, killi zeminlerde daha fazla, kumlu-çakıllı zeminlerde daha az olacaktır, ortalama olarak enjekte edilen miktarın %10'u alınabilir (Melegary ve Garassino, 1997).

### 3.3.3. Ön Jet Grouting

Su ve / veya diğer akışkan jetinden ibaret bir ön parçalanma safhasıyla, bir elemanın jet enjeksiyonunun yapıldığı metottur.

Not: Ön jet grouting işlemi, aynı zamanda, yaygın olarak, ön yıkama ve ön kesme olarak da bilinir.

### 3.4. Jet Grouting Teknikleri

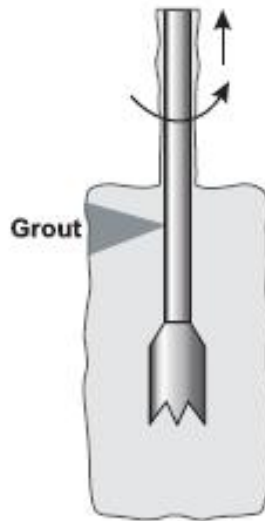
Jet grouting teknikleri zemin koşullarına, istenen jet grout kolon özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Amaçlarına ve kullanım seklene göre Jet 1, Jet 2, Jet 3 ve Süper Jet yöntemleri olmak üzere dört çeşit jet grouting tekniği bulunmaktadır.

#### 3.4.1. Jet 1

En basit ve yaygın kullanılan tekniktir. İlk olarak 70'li yılların başında Japonya'da, 70'lerin ortalarında ise İtalya'da denenmiştir. Zeminin parçalanma ve çimentolanmasının, genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın yüksek enerji jeti şeklinde uygulandığı jet enjeksiyon işlemidir.

Bu metotta delme - enjeksiyon takımı tek çeperli bir borudan ibaret olup, grout bu borudan yaklaşık 200m/sn hızla, 300 - 600kg/cm<sup>2</sup> (bar) basınçla basılır.

Bu metotla oluşan kolonlar, zemin türlerine ve parametre aralıklarına göre, çakıllı zeminlerde 0,6m'den 1,2m çapına kadar ulaşılabilir. Bu yöntem kohezyonlu zeminlerde çakıllı zeminlerdeki kadar etkin değildir. Şekil 3.6'da Jet 1 yöntemi şeması gösterilmiştir.



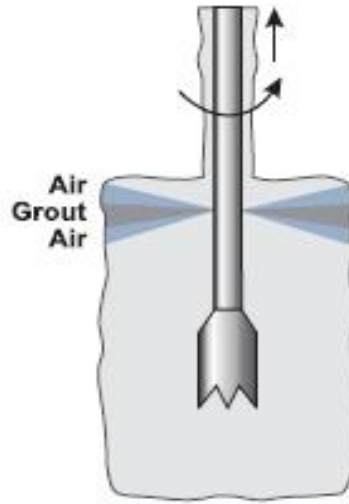
Şekil 3.6. Jet 1 Tekniği

### 3.4.2. Jet 2

Zeminin parçalanması ve çimentolanmasının ikinci bir akışkan olarak hava jeti, yüksek enerjili bir sıvıyla (genellikle bir çimento şerbeti) gerçekleştirildiği jet enjeksiyon sistemidir. Grout orta borudan, basınçlı hava (8 - 12bar) ise dış borudan geçer. Basınçlı hava, kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığı için, bu metotta oluşan kolon çapları jet 1'e kıyasla %60 - 80 daha büyük olur.

Bu yöntemle kolon çapları orta sıkı zeminlerde 1,0m'den, gevşek zeminlerde ise 1,8m'den fazla kalınlığa ulaşabilmektedir. Jet 2 yöntemi kohezyonlu zeminlerde Jet 1 yöntemine göre daha etkili sonuçlar vermektedir. Şekil 3.7'de Jet 2 yöntemi şeması gösterilmiştir.

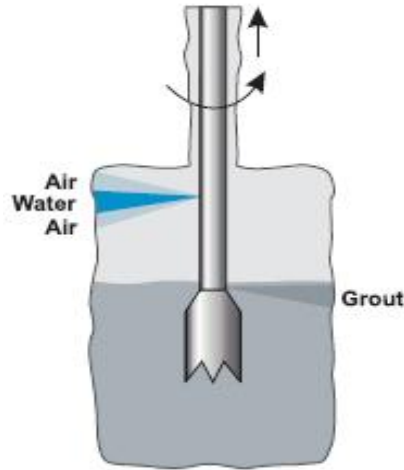
Kum içindeki bir uygulamada, ikili sistemle jet grout kolonu yapılırken zeminin örselenmesi için 45MPa basınç uygulanmış; delgi borusunun dönme hızı 8 - 10devir/dk, harcanan çimento 930kg/m, , harç debisi 130lt/dk, harcın birim hacim ağırlığı 16 - 17kN/m<sup>3</sup>, iken kolon çapı 1,4m ye ulaşmıştır. (Ichihashi vd., 1992).



Şekil 3.7. Jet 2 Tekniği

### 3.4.3. Jet 3

Zeminin parçalanmasının yüksek enerjili su jeti ile sağlandığı, çimentolanmasının ise eş zamanlı olarak ayrı bir enjeksiyon karışımı jeti ile elde edildiği jet enjeksiyon işlemidir. İç içe üç borulu takım kullanılan bu metotta, 400 - 600bar basınçlı su ortadaki borudan, 8 - 12bar basınçlı hava ara borudan, tıpkı jet 2'deki gibi, nozzlelerden basılmaktadır. 30 - 80 bar basınçlı grout ise en dış borudan ayrı bir nozzleden, su - hava karışımı içine enjekte edilmektedir. Jet grout kolonları bu metotla 2m'den fazla boyuta kadar ulaşabilmektedir. Jet 3 yöntemi kohezyonlu zeminlerde en etkili yöntemdir. Şekil 3.8'de Jet 3 yöntemi şeması gösterilmiştir.

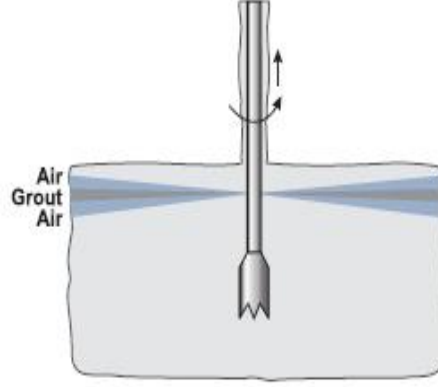


Şekil 3.8. Jet 3 Tekniği

### 3.4.4. Süper Jet

Son dönemlerde büyük kolon çaplarını yüksek hızda ve düşük maliyetlerle elde edebilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi de Süper Jet olarak adlandırılan yöntemdir. Bu metot ile 3 - 5m çapa kadar zemin - çimento karışımı içeren kolonlar elde edilmektedir. Kolon yapım aşaması ilk olarak 15cm çapa sahip tijin istenilen noktaya indirilmesi ile başlamaktadır. Tijlerin ucundaki yüksek çaplı nozzlelerden çimentolu harç ile hava karışımı yüksek basınçta

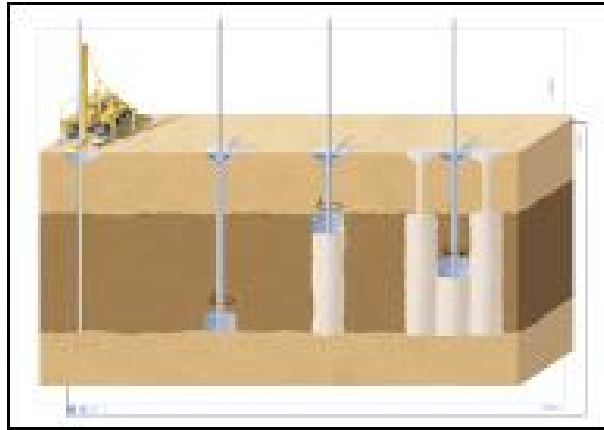
püskürtülür ve zemin ilk önce parçalanarak zemin - çimento karışımı kolonlar oluşur. (Şekil 3.9)



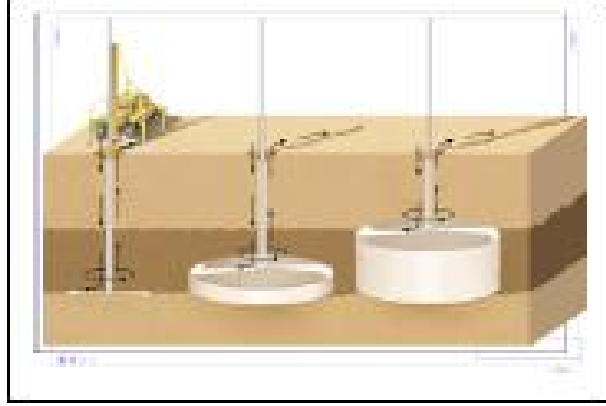
Şekil 3.9. Süper Jet Tekniği

Şekil 3.10'da standart yöntemle oluşturulmuş jet grout kolonlar, Şekil 3.11'de süper jet yöntemiyle oluşturulmuş kolonlar gösterilmiştir.

Özel durumlarda, su yerine diğer uygun sıvılar veya süspansiyonlar kullanılabilir.



Şekil 3.10. Standart Yöntemle Oluşturulmuş Kolonlar



Şekil 3.11. Süper Jet Yöntemiyle Oluşturulmuş Kolonlar

Bu yöntemde tijlerin dönme ve çekme hızları standart jet grouting yöntemine göre çok daha azdır. Bell vd. (2003) süper jet kolonları imalatında işletim parametreleri olarak 3 – 4 devir / dakika dönüş hızı, 7mm/dakika çekme hızı, 40MPa enjeksiyon basıncı ile 4m çapa kadar ulaşılabildiği görülmektedir. Süper jet yöntemiyle oluşturulan kolonlarda kolon kesitlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bu yöntem yatay zemin suyu kontrolünde, sıvılaşabilir tabaka stabilizasyonunda, geçirimsiz perde duvar imalatında, kazı yan yüzleri desteklenmesinde kullanılmaktadır.

### 3.5. Jet Grouting Yönteminin Çalışma Parametreleri

Çalışma parametreleri zemin özelliklerine, elde edilmek istenen kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve seçilen jet grouting metoduna göre seçilir. Jet grout kolonunun imalatına başlanmadan önce farklı işletim parametreleri kullanarak test kolonları imal edilmektedir. Zemin yapısına uygun, istenen kolon çapının elde edildiği, kolonda sürekliliğin sağlandığı ve ekonomik olan parametreler tercih edilmektedir. Değişik çalışma parametreleri ve bunların elde edilecek sonuca etkileri aşağıda görülebilir.

Jet grouting yönteminde kullanılan imalat parametreleri;

- Enjeksiyon Sistemi (Jet 1, Jet 2, Jet 3)
- Enjeksiyon Basıncı (Bar)



- Nozzle Sayısı ve Çapı
- Tij Dönme Hızı (rpm)
- Tij Çekme Hızı (cm / dak)
- Su / Çimento Oranı
- Pompa Kapasitesi (lt / dak)

olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin tipik değerleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Jet grouting uygulaması sonucu seçilen sisteme ve zemin cinsine bağlı olarak oluşan kolon çapı değişken olmaktadır. Kolon çapı enjeksiyon esnasında çimento yanında, hava ve su kullanmak suretiyle artırılmaktadır. Ülkemizde genellikle yaygın olarak Jet 1 ve Jet 2 sistemleri kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Jet Grouting Yöntemi İmalat Parametreleri (Lunardi, 1977)

SİSTEM	ENJEKSİYON TİPİ	BASINÇ	NOZZLE ADEDİ ve ÇAPI	ÇEKME HIZI	DÖNME HIZI	SU / ÇİMENTO ORANI	POMPA KAPASİTESİ
		(bar)	(adet, mm)	(cm/dak)	(rpm)	-	(lt / dak)
JET 1	Çimento	400 - 550	1 - 2 x 2 - 5	15 - 100	5 - 15	1,0 - 1,5	70 - 600
JET 2	Çimento	400 - 550	1 - 2 x 2 - 5	10 - 30	4 - 8	1,0 - 1,5	70 - 600
	Hava	10 - 12	-	10 - 30	-	-	4000 - 10000
JET3	Çimento	50 - 100	1 - 2 x 4 - 5	6 - 15	4 - 8	1,2 - 1,5	80 - 200
	Hava	10 - 12	-	6 - 15	-	-	4000 - 10000
	Su			6 - 15	-	-	40 - 100

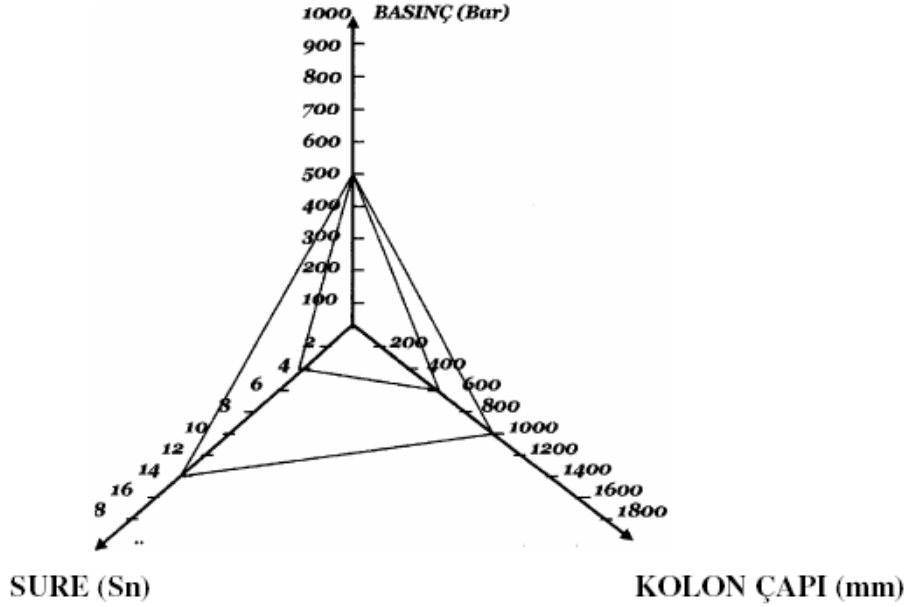
### 3.5.1. Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncının çalışma aralıklarına göre, jet grouting işlerini genel olarak sınıflandırmak daha kolay olur;

- 200 - 250bar aralığında çalışma DÜŞÜK BASINÇLI
- 300 - 400bar aralığında çalışma ORTA BASINÇLI
- 400 - 700bar aralığında çalışma YÜKSEK BASINÇLI

olarak tanımlanabilir.

Basınç, elde edilmek istenen çapın oluşmasında en önemli parametredir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi basınç ile jet grout kolonu çapı arasında direk bir bağlantı vardır. Basınç arttırıldığı zaman kolon çapı artar.



Şekil 3.12. Basınç - Bekleme Süresi - Kolon Çapı İlişkisi (Melegary ve Garassino, 1997)

Bununla beraber ulaşılmak istenen çapta homojen bir kolon elde etmek için basınç değeri gerekli fakat yeterli değildir. Aynı çap ve homojenlikte kolon oluşması zaman faktörü ile de ilişkilidir. Bazı zemin şartlarında, basınç arttırmak, çapın artmasını sağlayamayabilir.

### 3.5.2. Dönme ve Çekme Hızı

Dönme işlemi delgi makinesinde bulunan tijlerin belli bir hızla kendi eksenleri etrafında dönmesidir. Zemin ile bağlayıcı malzemenin (grout) homojen bir karışım oluşturabilmesi için, takım dönüş hızı belirli bir değerden fazla olmamalı, takım çekme hızı da ıslah edilen bölgenin tamamında sürekliliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Dönüş hızı genellikle 10 - 20devir / dak. değerleri arasında değişir, bazı özel durumlarda 30devir/dak.'ya kadar çıkabilir. Takım çekme işlemi, iki şekilde olabilir;

1. Kademeli çekme.
2. Sürekli çekme.

Bu iki ayrı tip çekme metodu, genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlı olarak seçilir. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli, hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, her kademedede 4cm. ilerleme ve her kademedede 6 - 10sn. bekleme en iyi neticeyi sağlamıştır (Melegary ve Garassino, 1997).

Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacme enjekte edilecek grout miktarına bağlıdır. Bağ dokusu kuvvetli (cohesive) zeminler, jet huzmesinin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süre gerektirirler.

Dönme ve çekme hızı adaptasyonu (optimizasyonu) ıslah edilecek zemine ve kullanılan jet grouting metoduna çok sıkı bağlıdır. Jet 2 ve jet 3 metotları, daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla ıslah edilen zemin hacmi daha büyük olduğu için, daha uzun süreye ihtiyaç duyarlar.

### 3.5.3. Dozaj

Standart su - çimento oranı 1 (s / ç = 1), özgül ağırlığı ise 1410 - 1570kg/m<sup>3</sup>'dür. Bu oran seçilen metot, uygulanan ıslah yöntemi ve kolonların final mukavemetlerine göre değişebilir. Su / çimento oranının, su geçirmez plastik grout perde teşkili için karışımında bentonit kullanımı hali hariç 0,7'nin altına inmesi uygun görülmez.

1m<sup>3</sup> ıslah edilmiş zemin içindeki çimento miktarı 350 - 700kg arasında değişir. Farklı zeminlerin taşıma kapasiteleri incelendiğinde, su - çimento oranı 1 ve ıslah edilmiş zemin içindeki çimento dozajı ortalama 450kg/m<sup>3</sup> olarak oluşturulmuş kolonların kapasiteleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Zemin Cinsi -  $f_{JG}$  -  $E / f_{JG}$  İlişkisi (Durgunoğlu, 2004)

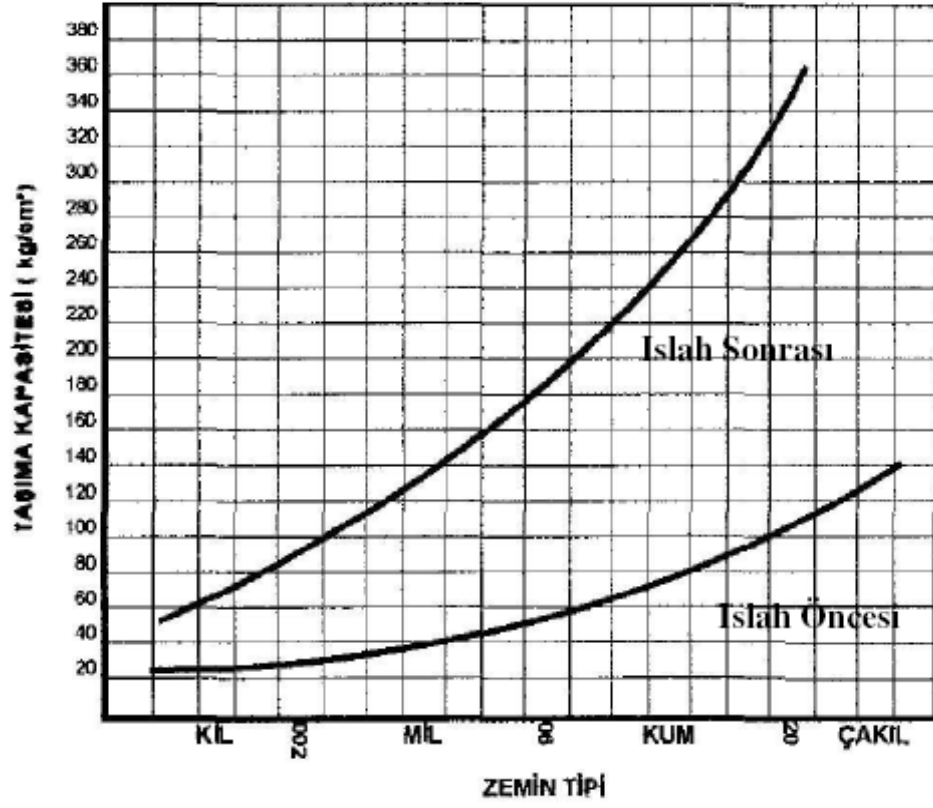
Zemin Cinsi	Serbest Basınç Mukavemeti	Modül Oranı (*)
	$f_{JG}$ MPa	$E / f_{JG}$ -
Kil	2 – 5	150
Silt	3 – 7	200
Kum	7 – 14	600
Çakıl	12 – 18	900

(\*) %40 Gerileme Seviyesine Tekabül Eden Modül

Grout karışımı içerisine bazı katkıları ilave etmek de mümkündür. Örneğin yüksek debili zemin suyu bulunan durumlarda (high substratum water flow), 1 - 3 oranlarında sodyum silikat ilavesi tavsiye edilebilir.

Organik içerikli zeminlerde çimento dozajı  $450\text{kg/m}^3$  den  $700\text{ kg/m}^3$ 'e çıkartılabilmektedir. Bunun sebebi kullanılan çimentonun bir kısmının organik ortamda yer alan ve çimentonun bağlayıcılığını ortadan kaldıran asitlerin nötrleştirilmesinde harcanmasıdır. Jet grouting yöntemi sayesinde ıslah edilmiş hacim, bitişindeki işlem görmemiş zeminin özelliklerini de iyileştirmektedir. Jet grouting yönteminin bu ikinci etkisi sayesinde, ıslah edilmiş zeminin SPT değerleri doğal zemininkine (ve diğer ıslah metotlarının neticesinde oluşan sonuca) göre %20 - 25 civarında daha yükselmektedir (Melegary ve Garassino, 1997).

Aynı su / çimento oranı ve çimento dozajlı Jet 2 kolonunun mukavemeti, Jet 1 kolonuna göre %10 - 15 civarında daha düşüktür. Bunun sebebi, Jet 2 kolonunun içindeki hava içeriğidir. Yine aynı su / çimento oranlı ve çimento dozajlı Jet 3 kolonunun mukavemeti Jet 1 ve Jet 2 kolonunun mukavemetinden daha düşüktür. Bu da Jet 3 metodunun içerdiği çok miktardaki sudan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.13'te ıslah edilmiş zemin sınıfına göre kolon taşıma kapasitesinin değişimi gösterilmektedir. Buna göre granüler zeminlerde ıslah sonrası taşıma kapasitesindeki artışın daha fazla olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3.13. Farklı Tip Zeminlerde Taşıma Kapasitesinin Değişimi (Melegary - Garassino, 1997)

### 3.6. Jet Grouting Yöntemi Ekipmanı

İnşaat aşamasında jet grouting uygulaması için uyarlanmış bir delgi makinesi, basınçlı püskürtme için gerekli enjeksiyon pompası, çimento silosu, su deposu, enjeksiyon işlemi için mikser ve dinlendirici kazanlar ile santralin bulunduğu bir düzen kullanılır. Bu sistem Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Jet Grouting Ekipmanı

Jet grouting donanımı genellikle aşağıdakileri içermektedir;

- Sondaj makinesi
- Jet grouting makinesi (Genellikle aynı zamanda sondaj makinesi işlevi de görür. Önceden belirlenen dönme ve aktarma hızlarında ilerlemek için jet enjeksiyon tiji, monitör ve diğer gereçlerle donatılmıştır.)
- Jet grouting akışkanını (veya akışkanlarını) temin eden karışım ve pompa tesisi
- Jet grouting pompasını jet enjeksiyon makinesine birleştiren yüksek basınç hatları
- Basınçları, akışkan debi ve hacimlerini, dönme ve aktarma hızlarını ve derinliği denetlemeyi sağlayan donanım

Jet grouting donanımları, seçilen işlem için aşağıda belirtilenlerin gerçekleşmesini sağlayarak jet enjeksiyon işleminin yapılmasını temin eder.

- Jet grouting takımının tasarım hızında ilerlemesi ve döndürülmesi
- Gerekli basınç ve akışkan debisinde, tesisten gelen akışkanın jet grouting takımına aktarımı

Farklı sistemler için jet grouting hazırlama ve enjeksiyon tesisi, aşağıdakileri kapsar;

- Tekli sistem için: Çimento ve diğer malzemeler için depo, koloidal karışım tesisi, karıştırıcı tank, yüksek basınçlı enjeksiyon pompası.
- Çiftli (hava) sistem: Tekli sistemdekilere ek olarak bir hava kompresörü
- Çiftli (su) sistem: Tekli sisteme ek olarak bir yüksek basınçlı su pompası ve bir enjeksiyon şerbeti pompası
- Üçlü sistem: İkili sisteme (su) ek olarak bir hava kompresörü

### 3.6.1. Delgi Makinesi

Uygulama projesinde öngörülen derinliğe kadar jet grout kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesidir. (Şekil 3.15)



Şekil 3.15. Delgi Makinesi

### 3.6.2. Pompa Ünitesi

Enjeksiyon karışımını istenen çapta jet grout kolonu teşkil edebilecek basınçta basabilecek yüksek basınçlı pompadan oluşan pompa ünitesidir. Jet grout kolonlarının yapımında 60MPa da 150 - 450lt/dk. arasında çimento harcı basabilen ve 8 saate kadar sürekli çalışabilen pompalar kullanılmaktadır (Kauschinger vd., 1992) (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Pompa Ünitesi

### 3.6.3. Mikser Ünitesi

Enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştırarak mikser ve dinlendiriciden oluşan, pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitedeki ünedir. Şekil 3.17’de jet grouting mikser ünitesi gösterilmektedir.





Şekil 3.17. Mikser Ünitesi

#### 3.6.4. Çimento Silosu

En az 50 ton kapasiteli dökme çimento depolayabilen ve mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek çimento silosu ve konveyörüdür. (Şekil 3.18)



Şekil 3.18. Çimento Silosu

### 3.6.5. Monitör

Monitör aşağıda verilen özellikleri kapsar (TS EN 12716);

- Tekli sistem için, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücü. Bu püskürtücüler aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir.
- İkili (hava) sistem için, hava ve enjeksiyon şerbetinin eş zamanlı jet haline getirilme işlemi için bir ya da daha çok çift püskürtücü (aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkan sağlayan açılarda). Hava püskürtücüsü, dairesel şerbet püskürtücüsünün çevresini bir halka şeklinde sarar.
- İkili (su) sistem için, suyun jet haline getirilmesi için bir ya da daha fazla püskürtücü ve çimento karışımını yollamak için bir ya da daha fazla daha derine yerleştirilen püskürtücü.
- Üçlü sistem için, su ve havanın eş zamanlı jetlenmesi işleminde bir ya da daha fazla çift püskürtücü ve enjeksiyon şerbetinin gönderilmesini sağlayan daha derine yerleştirilmiş bir ya da daha fazla normal püskürtücü.

### 3.7. Farklı Zeminlerde Jet Grouting Yöntemi Uygulama Parametreleri

Jet grouting metodu ile yapılacak zemin ıslahının başarısı, uygulama parametrelerinin çok dikkatli seçimine bağlıdır. Basınç değeri ve enjeksiyon süresi, ıslah edilecek tabii zeminin mukavemet değerine göre belirlenmektedir. Jet grouting tekniğinin uygulanabilmesi ve en uygun tekniğinin seçilebilmesi için bazı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bunlar; arazideki SPT, CPT deneylerinden elde edilen veriler ve rölatif sıklığın tayini, kohezyonsuz zemin numunelerinin dane dağılımı, su muhtevası, doygun birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi, kohezyonlu zeminlerinin kıvam limitlerinin tayini olarak sayılabilir. Bu veriler doğrultusunda en uygun jet grouting tekniği ortaya koyulmaktadır. Killi zeminlerde, düzgün bir kolon elde etmek için, küçük çaplı nozzle kullanılmalıdır. Genellikle kullanılan nozzle adedi iki, çapları ise 1,6 - 2.0mm'dir. Basınç 500 - 600bar değerlerde ve yüksek,

grout debisi ise, sıkça rastlanılan zemin kırılmalarını engellemek amacıyla düşük tutulmalıdır (Melegary ve Garassino, 1997). Eğer zeminde konsolide killerdeki gibi karışım oluşturulması zor ise, nozzle adedi bire düşürülmelidir. Bu yolla, yüksek basınçla elde edilen kinetik enerjinin sürtünme kayıpları kontrol altına alınabilir. Bu halde enjekte edilen grout miktarı düşük ve kademedeki bekleme süresi uzun olmalıdır.

Jet grouting metodunu diğer enjeksiyon metodlarından ayıran en önemli fark, zeminin cinsine ve elde edilmek istenen taşıma kapasitesine göre kullanılacak çimento miktarının önceden hesaplanabilmesidir. Kullanılacak çimento miktarının hesabı aşağıda başlangıç parametreleri verilen örnekteki gibi yapılmaktadır.

- Uygulanacak metot : Jet 1
- Killi zeminde istenen kolon çapı : 60cm
- Çimento dozajı : 450kg/m<sup>3</sup>
- Su / Çimento oranı : 1
- Nozzle sayısı : 2
- Nozzle çapı : 2mm
- Enjeksiyon basıncı : 400bar

olarak alındığında 1m ıslah edilmiş zemin hacmi (V) Eşitlik 3.1 ile bulunabilir.

$$V = \pi \times r^2 \times h = 3,14 \times 0,3^2 \times 1 = 0,28\text{m}^3 \quad (3.1)$$

1 m ıslah edilmiş zemindeki çimento miktarı; ıslah edilecek hacim ile kullanılacak çimento dozunun çarpımı ile belirlenmektedir.

$$450\text{kg/m}^3 \times 0,28\text{m}^3 = 126\text{kg}$$

olarak hesaplanmaktadır. Çimento özgül ağırlığı 2,93kg/lt'e denk geldiğinden dolayı grout içerisindeki çimento hacmi

$$\frac{126\text{kg}}{2,93\text{kg/lt}} = 43\text{lt}$$

Ağırlık olarak su / çimento = 1 olduğu ve suyun özgül ağırlığı  $1\text{kg/m}^3$  olduğundan dolayı;

$$126\text{kg} / 1\text{kg/m}^3 = 126\text{m}^3$$

Dolayısıyla 1m jet grout kolon içerisindeki grout hacmi,

$$126 + 43 = 169\text{lt}$$

olarak hesaplanmaktadır. Tij çekme hızının belirlenmesi için 1 dakikalık sürede 1m'lik uzunluktan çıkan enjeksiyon miktarının bilinmesi gerekmektedir. Jet huzmesindeki 2mm çaplı bir nozzledan enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı Eşitlik (3.2) ile hesaplanmaktadır.

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

h : hidrostatik düşü

g : yerçekimi ivmesidir.

Hidrostatik düşü (h) Eşitlik 3.3'deki formülle hesaplanmaktadır.

$$h = \text{Enjeksiyon basıncı} / \text{karişım özgül ağırlığı} \quad (3.3)$$

Karişımın özgül ağırlığı, grout ağırlığının grout hacmine olarak alınabilir;

$$252\text{kg} / 169\text{lt} = 1,49\text{kg/lt}$$

olarak alınırsa, hidrostatik düşü (h) = Enjeksiyon Basıncı / Grout Özgül Ağırlığı

$$h = 4000 / 1,49 = 2685\text{m}$$

olarak hesaplanmaktadır. Buna göre enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı;

$$V = \sqrt{2 \times 9,81 \times 2685} = 230\text{m/sn}$$

olarak hesaplanmaktadır. 1sn sürede bir nozzledan çıkan enjeksiyon malzemesi miktarı (Q) Eşitlik 3.4 ile hesaplanmaktadır.

$$Q = V \times A \quad (3.4)$$

$$2300\text{dm/sn} \times (2 \times (\pi \times 0,02\text{dm}^2 / 4)) = 1,44\text{lt/sn}$$

1m kolon teşkili için gerekli süre ise 1m kolonda bulunan enjeksiyon malzemesi hacminin 1sn sürede bir nozzledan fişkıran enjeksiyon malzemesi miktarı Eşitlik 3.4'deki değerleri yerleştirildiğinde;

$$169 / 1,44 = 117\text{sn} = 1,95\text{dk.}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.3. Farklı Nozzle Çapı ve Basınçta Nozzle'dan Geçen Grout Debişi (Melegary - Garassino, 1997)

	Nozzle Çapı (mm)														
	1,4	1,6	1,8	2	2,4	2,8	3	3,2	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
BASINÇ (bar)	Bir Nozzledan Geçen Grout Miktarı (Debi)														
	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn	lt/sn
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	160	203	250	303	380	423
400	21	27	35	43	62	75	94	110	131	171	217	268	324	385	452
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	182	230	284	343	409	450
500	23	31	39	48	69	94	108	123	147	191	242	289	352	430	506
550	25	32	41	50	72	98	113	129	154	201	254	314	380	452	530
600	26	34	42	52	75	103	118	134	161	210	255	326	397	472	554

Çizelge 3.3’de farklı nozzle çaplarında, 300 - 600bar basınçlarda bir nozzleden geçen grout miktarının lt/sn cinsinden değerleri yer almaktadır. Çizelge 3.3’e göre aynı basınçta nozzle çapının artmasıyla bir nozzleden geçen grout miktarı artmaktadır.

Jet grouting uygulanmasında üzerinde en çok durulan özellik, jet kolonlarının çapı olmaktadır. Püskürtme enerjisi (E) Eşitlik (3.5) deki gibi ifade edilebilir.

$$E = (P \times Q) / V_{\text{çekme}} \quad (3.5)$$

- P : Püskürtülen harcın basıncı (MPa)  
Q : Harç debisi (m<sup>3</sup>/sn)  
V<sub>çekme</sub> : Yukarıya çekilme hızı (m/sn)

### 3.8. Kontroller ve Testler

#### 3.8.1. Karot Numunelerinin Alınması

Kolonlardan arazide alınan silindirik numuneler üzerinde laboratuarda yapılan serbest basınç deneyi ile jet grout elemanının basınç dayanımı elde edilir. Numuneler, uygulama esnasında kolon yaş iken piston numune alıcı ile alınır. Prizini almış kolon üzerinde ise karot numune alınır (Durgunoğlu vd., 2003). Serbest basınç deneyinde tercihan deformasyonlarda ölçülerek deformasyon modülü, E<sub>JG</sub> tayin edilir (Sağlamer vd., 2002).

Şekil 3.19’da jet grout kolonundan karot numune alımı gösterilmektedir. Deneylerden ölçülen mukavemet değerlerinin servis yüklerini belli bir emniyet faktörü ile taşıdıkları ispat edilmelidir. Karot numuneleri imal edilen kolondan imal tarihinden 28 gün sonra, TS 10465’e (Beton Deney Metotları - Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini Yönetmeliği) uygun şekilde alınmalıdır.



Şekil 3.19. Karot Numunelerin Alınması

### 3.8.2. Kazık Yükleme Deneyi

Projede jet grout kolon yüklerinin ve jet grout kolon imalatı kalitesinin tahkik edilmesi amacıyla tüm proje kapsamında imal edilen kolonlardan seçilecek bir adedi üzerinde kolon yükleme deneyi yapılır. Yükleme deneyi için bir adet basınç kolonu ile iki adet çekme kolonu olarak kullanılacak kolonlar imal edilmelidir. Deney doğrultusunda basınç kolonuna statik eksenel basınç yükü yüklenerek yük - oturma, yük - zaman ve oturma - zaman grafikleri hazırlanır.

Jet grout kolonun toplam taşıma kapasitesi, kolonun çeperi ve ucu tarafından taşınan toplam kapasitesidir. Deney yükü için ise jet grout kolonun toplam kapasitesinin 1,5 katı dikkate alınmalıdır. Deneme kolonları, göçene kadar veya maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar yüklenir. Göçme yükü;

1. Yük daha fazla artmadığı halde oturma devam etmesi halindeki yük
2. Kolon çapının % 10'u kadar bir toplam oturmaya yol açan yük

tanımlamalarından birisine göre seçilir. Yükleme deneylerinde “ASTM D 1143 – 81” standart yükleme için uygun maddeleri kullanılabilir.

Yükleme deneyinde kolonda maksimum yüklemeye meydana gelen deformasyon servis yükünde meydana gelen deformasyonun 1,5 katını geçmemesi, deney yükü kaldırıldıktan sonra meydana gelen kalıcı deformasyonun ise toplam deformasyonun %50'sini geçmemesi ve kazık başlığında ölçülen toplam oturma değerinin 10mm'yi geçmemesi gerekmektedir (Düzceer, 2004).

Deney ekipmanları kazığa verilecek eksenel yüke maruz reaksiyon kirişleri, hidrolik krika ve hidrolik basınç pompası, yükü ölçmek için manometre, ölçüm düzenekleri olmak üzere dört ana gruptan oluşmaktadır.

Hidrolik pompa vasıtasıyla belli kademelerde statik yük, kolon başlığı ve reaksiyon kirişleri üzerine yerleştirilmiş olan hidrolik krikoya iletilir. Rijit sistemden dolayı yük altında kolon eksenel olarak hareket eder. Deney kolonunda oluşan deformasyonlar, kolondan ve basınç elemanlarından bağımsız bir ölçüm sistemiyle kayıt altına alınmalıdır.



Şekil 3.20. Kazık Yükleme Deneyi

### 3.8.3. Kazık Süreklilik Deneyi

Uygulanan jet grout kolonların boyları, kazıklardakine benzer şekilde ülkemizde de yaygın olarak kullanılan integrity deneyi ile tespit edilebilmektedir.

Kazık çap ve boy sürekliliğinin denetlenmesi için uygulanan kazık süreklilik deneyinde kazıkların üst ucundan küçük bir çekiç darbesi verilmektedir. Bu darbenin ivme sinyali A, kazık üstüne geçici olarak yapıştırılan bir akselometre ile algılanarak sayısallaştırılıp bilgisayarda kaydedilir. Kazıktaki şekil / malzeme değişikliklerinden ve kazık ucundan yansıyan sinyaller de algılanarak hız sinyali olarak kaydedilir. Bu sinyal hıza bağlı bir değişken olup geçen zamanın tam olarak bilinmesinden faydalanılarak, alınan yansımaların yerini tespit için sinyal, derinliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülmektedir. Bu dönüşümde bilinmesi gereken dalganın yayılma



hızı olup beton / jet grout kolon için ortalama  $C = 3000 - 4500 \text{ m/sn}$ 'dir (Rausche vd., 1988).

Formüle edilirse, yansıma derinliği  $X$ , (3.6) eşitliği ile bulunabilmektedir. ((Rausche vd., 1988)

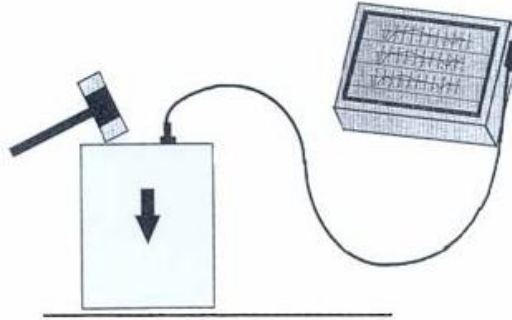
$$X = \left(\frac{1}{2} \times C \times t\right) \quad (3.6)$$

$t$  : Darbeden yansıma anına kadar geçen süre

$C$  : Dalganın yayılma hızı

Bu şekilde derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği yorumlanarak kazıkta olası boy ve uç şekli değişiklikleri anlaşılabilir.

Şekil 3.21'de kazık süreklilik deneyi şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Kazık Süreklilik Deneyi Şeması

Ancak bu deney taşıma kapasitesini tahmin etmek için kullanılmamalıdır. Bu deney karotlu sondaj, kazı araştırması, yükleme testleri gibi zaman alıcı ve masraflı yöntemlerle karşılaştırıldığında çabuk ve ucuz sonuçlar sunar. Kazık cevabı hemen ekranda görüntülenebilir ve yazdırılabilir veya detaylı analizler için aletin kendi belleğinde depolanabilir. 1968'den beri tüm dünyada kullanılarak yapılan milyonlarca testte birçok kazıkta bozukluk ortaya çıkmıştır. Kazıkların üst seviyelerinde tespit edilen bozukluklardan dolayı, kazıklar daha detaylı inceleme için kazılır veya karotlu sondaj ile numune alınır.

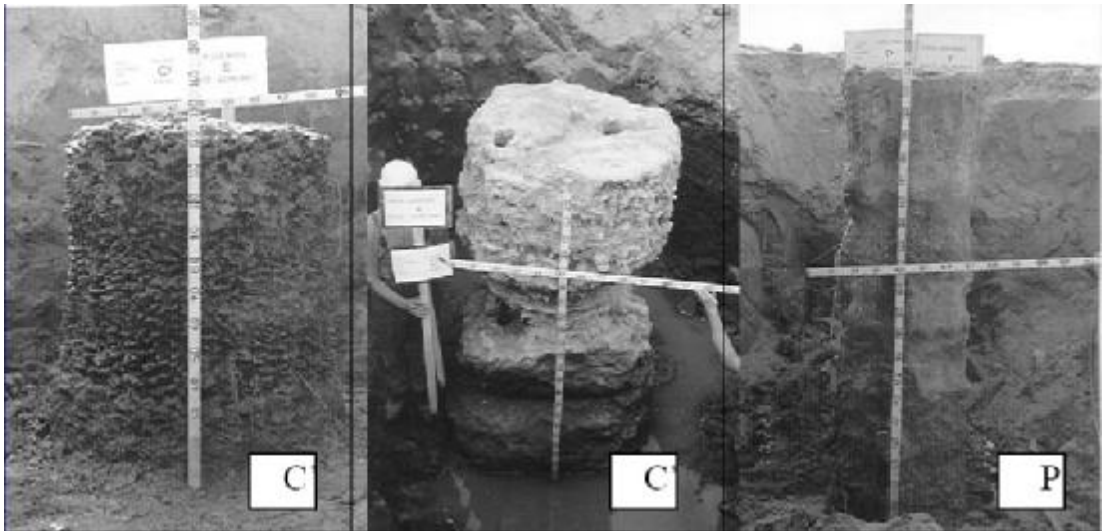
Şekil 3.22'de kazık süreklilik testi cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Kazık Süreklilik Testi Cihazı

#### 3.8.4. Çap Kontrolü

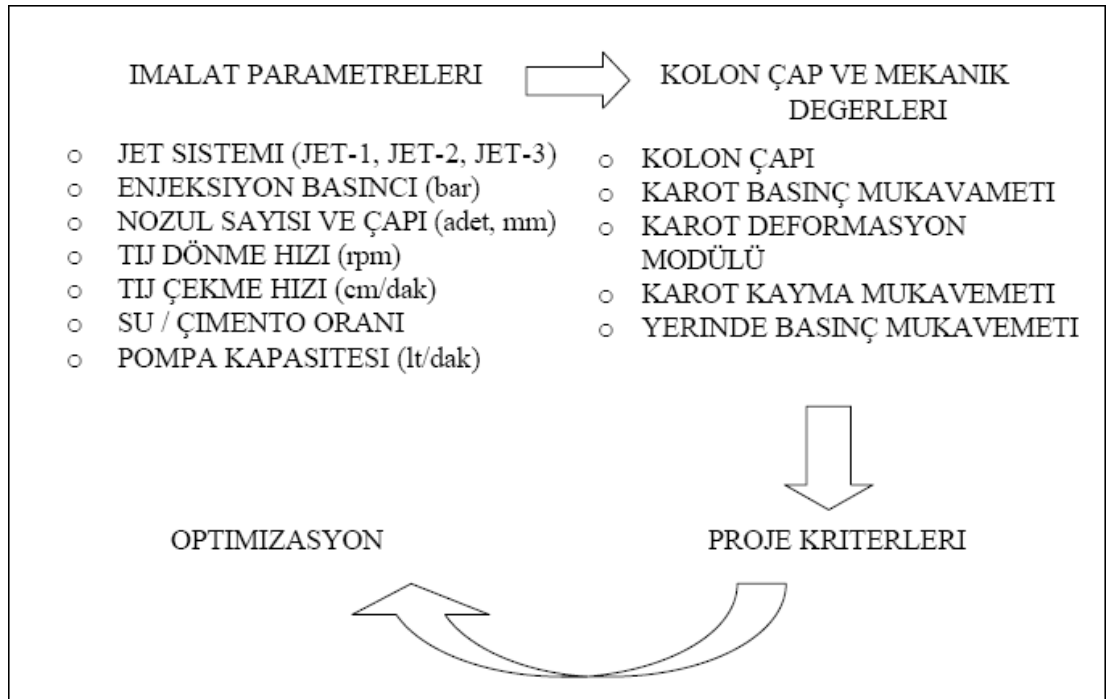
Çalışma platformundan seçilecek imalatı tamamlanan kolonlardan bazıları kazılarak kolon meydana çıkartılır ve kolon boyutları tahkik edilerek istenen çapın sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Şekil 3.23'te jet grout kolonlarında imalat sonrası çap kontrolü gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Jet Grout Kolonlarında Çap Kontrolü

### 3.8.5. Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu

Her önemli jet grouting uygulamasında seçilen proje kriterlerinin, özellikle kolon çap ve mukavemet değerlerinin arazide yapılacak ön kalibrasyonu çalışmaları sonucu değerlendirilmesi önerilmektedir. İmalat parametrelerindeki değişiklikler, sonuç kolon özelliklerini belirleyeceğinden Şekil 3.24'te özetlenen yöntemlerin uygulanarak proje kriterlerini sağlayan sistem parametrelerinin optimum değerlerinin tespiti yapılabilmektedir (Durgunoğlu, 2004).



Şekil 3.24. Proje Kriterlerinin Sahada Kalibrasyonu ve Optimizasyonu (Durgunoğlu, 2004)

### 3.9. Toleranslar

- Tüm jet grout kolonlar, uygulama projelerinde gösterilen konumlarından en fazla 75mm mesafe içinde kalacak şekilde oluşturulmalıdır.
- Jet grout kolon deliğinin oluşturulması esnasında, delgi ucu mümkün olduğunca düşey bir konumda tutulmalı ve düşeyden sapma 1/50'den daha fazla olmamalıdır.
- Su/çimento karışımında, su çimento oranı kütlece 0,5 ila 1,5 arasında olmalıdır.
- Bir jet grout kolonu bitiminden en az 24 saat geçmeden 2 çap çevresinde delgi yapılmayacak, imalat atlamalı olarak sürdürülmelidir.

### 3.10. Uygulama Dokümanları

#### 3.10.1. İnşaat Alanında Mevcut Olan Dokümanlar

Aşağıdaki dokümanlar jet grouting işlemleri başlamadan önce inşaat alanında bulunmalıdır (TS EN 12716);

- Teknik şartnameler,
- Uygulama çizimleri,
- Varsa metot raporu,
- Zemin şartlarını belirten bir geoteknik rapor,
- Jet grouting tesisinin teknik şartnamesi,
- Kullanılan malzemelerin karakteristiklerinin tanımları,
- Yapılmışsa ön deneyler hakkında bir rapor.

Jet grouting uygulama çizimlerinde aşağıdaki bilgiler bulunmalıdır:

- Zemin profili,
- Elemanların şekilleri,
- Eleman numaraları,
- Her elemanın yeri, yönü ve konum toleransları,

- Muhtemel yer altı engellerinin konumları, drenaj ve diğer altyapı tesislerinin yerleri,
- Gerekli olduğu yerlerde uygulama sırası.

### 3.10.2. Şantiyede Hazırlanacak Dokümanlar

İleride referans olarak kullanılmak üzere jet grouting uygulaması kaydedilir. Her eleman aşağıdakileri kapsamalıdır (TS EN 12716);

- Jet grout parametreleri
- Kirlenmiş akışkan hakkında yorum ve açıklamalar
- Beklenilmeyen durumlar
- Uygulamanın tarihi ve zamanı

### 3.10.3. Jet Grouting İşleminin Saha Kayıtlarına İlişkin Örnekler

Aşağıda gösterilen günlük raporlar, jet grout sütunlarının oluşturulması için hazırlanan teknik saha dokümanlarına örnek teşkil etmekte olup, saha organizasyonu ve jet grouting tijinin çalışma tarzına ait muhtemel tercihlerden birini sunmaktadır. Genellikle bir karıştırma ve pompalama tesisi alternatif olarak bir sondaj takımını beslerken, bir veya daha fazla sayıdaki sondaj takımları aynı sahada sondaj yaptığından, iki rapor hazırlanır.

Jet groutu tiji sürekli ya da kademeli olarak geri çekilebilir. İkinci tarz ekte bulunan jet donanımı tarafından yansıtılmakta olup, bir kademe uzunluğu (genellikle birkaç santimetre) ve bir zaman aralığı (sütun çapı, zemin tipi veya jet grouting sistemine bağlı olarak genellikle birkaç saniyeden 40 saniyeye kadar değişen aralıkta) kaydedilmiştir (TS EN 12716).

ŞANTIYE:		BÖLGE			Pompa Tipi:					
TARİH:					Kontrolör:					
VARDİYA					İmza:					
<b>Kontrolör Talimatları</b>										
			<b>Değer</b>		<b>Enjeksiyoncu</b>			<b>Enjeksiyon kontrolu</b>		
Su Basıncı (bar)								<b>Zaman</b>		<b>Yoğunluk (kg/L)</b>
Su Debisi (L/min)										
Enjeksiyon Basıncı (bar)										
Enjeksiyon debisi (L/min)										
			<b>Enjeksiyon A</b>		<b>Enjeksiyon B</b>					
Çimento/harman (kg)										
Su/ harman (kg)										
Harman kütlesi (kg)										
Harman hacmi (L)										
Enjeksiyon yoğunluğu (kg/L)										
<b>Enjeksiyoncu Denetimi</b>										
Sütun No	Sondaja başlama	Sondaj bitişi	On jet enjeksiyona başlama	On jet enjeksiyon bitişi	Jet enjeksiyona başlama	Jet enjeksiyon bitişi	Jet enjeksiyonu başlama zamanı	Jet enjeksiyonu bitiş zamanı	Su basıncı	Enjeksiyon basıncı
<b>Duraklamalar</b>						<b>Hazırlanan karışım (harman) sayısı</b>				
<b>Başlangıç Zamanı</b>		<b>Bitiş Zamanı</b>			<b>Kesinti türü</b>			<b>Diğer Gözlemler</b>		
								Enjeksiyoncu:		
								İmza:		

Şekil 3.25. Jet Tesisi Günlük Raporu Örneği (TS EN 12716)



#### 4. JET GROUT KOLONLARININ TAŞIMA KAPASİTESİ

Zeminde düşey olarak oluşturulan jet grout kolonları, kazık elemanlarına benzer bir şekilde hesaplanmaktadır. Jet grout kolonunun çevre zemini açısından toplam taşıma gücü iki bileşenden oluşur. Bunlar uç direnci ve çevre sürtünmesi bileşenleridir.

Bir jet grout kolonunun göçmeden önce taşıyabileceği maksimum yük (kolon taşıma gücü)  $Q_d$ , kolon ağırlığı  $W_k$  ile gösterilirse, bir jet grout kolonunun kırılma olmadan taşıyabileceği yük  $Q_d + W_k$ 'dir. Bu yük kolon ucunun maksimum taşıyabileceği yük ( $Q_u$ ) ile kolon çevresinin sürtünmesi ve adhezyon ile taşıyabileceği yükün ( $Q_f$ ) toplamı kabul edilir. Bu durumda Eşitlik 4.1 elde edilir.

$$Q_d = Q_u + Q_f - W_k \quad (4.1)$$

**Jet grout kolon uç taşıma gücü eşitliği aşağıda gösterilmektedir.**

$$Q_u = A q_d \quad (4.2)$$

A : Kolon uç alanı

$q_d$  : Kolon ucundaki zeminin taşıma gücü

Jet grout kolon sürtünme taşıma gücü formülasyonu Eşitlik 4.3'te gösterilmektedir.

$$Q_f = A_s f_s \quad (4.3)$$

$A_s$  : Kolonu zemin içerisinde kalan yüzey alanı

$f_s$  : Kolonun birim alanına etkileyen ortalama sürtünme gerilmesi

Kolon birim yüzey alanı  $P$  ile ifade edilecek olursa  $A_s = P \times D_f$  olacaktır. Birim alana etkileyen sürtünme kuvveti Eşitlik 4.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.



$$f_s = c_u + p_h \tan \delta \quad (4.4)$$

$c_u$  :  $D_f$  boyunca ortalama adhezyon

$p_h$  :  $D_f$  boyunca ortalama yatay basınç

Bu durumda kolon taşıma gücü, Eşitlik 4.5'teki gibi yazılabilir.

$$Q_d = A q_d + A_s f_s - W_k \quad (4.5)$$

#### 4.1. Kohezyonsuz Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü

Kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun taşıma gücü Eşitlik 4.6 ve 4.7 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_d = A q_d \quad (4.6)$$

$$q_d = p_o N_q + K_2 \gamma_2 N_\gamma B \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7'deki  $p_o$  parametresi kolon uç efektif basınç gerilmesi olup Eşitlik 4.8 ile ifade edilmektedir.

$$p_o = \gamma_1 D_f \quad (4.8)$$

$K_2$  parametresi şekil katsayısı olup kare kesitli kazıklarda 0,4, dairesel kesitli kazıklarda ise 0,3'tür. Jet grout kolonu dairesel kesitli kazık sınıfında olduğundan dolayı Eşitlik 4.7'de bulunan  $K_2$  değeri 0,3 olarak alınacaktır. Eşitlik 4.7'de bulunan kolon çapı veya kenarının içeren terim ( $B$ ), kolon çapının küçük olduğu düşünülecek olursa ihmal edilebilmektedir.  $N_q$  değeri tarafından verilen tablodan Çizelge 4.1'den alınacaktır (Kumbasar – Kip, 1987).

Çizelge 4.1. Terazhi Taşıma Gücü Katsayıları

Ø	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
N <sub>c</sub>	5,7	7,3	9,6	12,9	17,7	25,1	37,2	58,0	96,0	172,0	348,0
N <sub>q</sub>	1,0	1,6	2,7	4,4	7,4	12,7	22,5	41,0	81,0	173,0	415,0
N <sub>γ</sub>	0,0	0,5	1,2	2,5	5,0	9,7	19,7	42,0	100,0	298,0	1153,0

Jet grout kolon boyu (L) ile kolonun zemin içinde kalan uzunluğu (D<sub>f</sub>) birbirine eşittir. Kolon en kesiti ile uç alanı aynıdır.

$$W_k = A L \gamma_{kazık} = A D_f \gamma \quad (4.9)$$

$$Q_u - W_k = A_\gamma D_f N_q - W_k = A_\gamma D_f (N_q - 1) \quad (4.10)$$

Kohezyonsuz zeminlerde c<sub>u</sub> = 0 olduğundan birim çevre sürtünmesi Eşitlik 4.11 ve 4.12 ile hesaplanabilmektedir.

$$f_s = p_h \tan \delta \quad (4.12)$$

$$p_h = K p_v \quad (4.13)$$

p<sub>h</sub> : Çevre sürtünmesinin hesaplanacağı seviyede kazık çevresine etkiyen yatay basınç

K : Yatay toprak basıncı katsayısı

p<sub>v</sub> : Düşey basınç

K ve δ değerleri Çizelge 4.2'den alınmaktadır (Kumbasar – Kip, 1987).

Çizelge 4.2. Kazık Malzemesi - δ Açısı – K Katsayısı Arasındaki İlişki

Kazık Malzemesi	δ	K Değerleri	
		Küçük Relatif Sıklık	Yüksek Relatif Sıklık
Çelik	20°	0,5	1,0
Beton	3/4 Ø	1,0	2,0
Ahşap	2/3 Ø	1,5	3,0

Jet grout kolonları beton kazık sınıfına girdiğinden dolayı Eşitliklerde, beton kazıklar için kullanılan  $K$  ve  $\delta$  değerleri kullanılacaktır. Bu durumda birim çevre sürtünmesi değerini elde etmek için Eşitlik 4.14 kullanılmaktadır.

$$f_s = K p_v \tan \delta \quad (4.14)$$

Düşey basınç gerilmesi  $p_v = \gamma D_f$  olup birim çevre sürtünmesi Eşitlik 3.8'den de görüleceği derinlikle arttıkça lineer olarak artacaktır.  $D_f$  boyunca lineer dağılım halinde çevre sürtünmesi Eşitlik 4.15, dairesel kolonlarda ise (jet grout kolonu) Eşitlik 4.16 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Q_f = P D_f f_s \quad (4.15)$$

$P$  : Kazık çevre uzunluğu

$$Q_f = \frac{\pi}{2} K \gamma D_f^2 D \tan \delta \quad (4.16)$$

Jet grout kolonunun tek tabaka içinden geçmesi durumunda Eşitlik 4.17 kullanılacaktır.

$$Q_d = Q_u Q_f - W_k = A \gamma D_f (N_q - 1) + \frac{\pi}{2} K \gamma D_f^2 D \tan \delta \quad (4.17)$$

Kolonun farklı tabakalardan geçmesi halinde çevre sürtünmesi her tabaka için kolon yüzey alanı, ortalama düşey basınç, toprak basıncı katsayısı ve sürtünme açısı ayrı değerlerin toplamı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik 4.18).

$$Q_f = \sum A_{si} K_i p_{vi} \tan \delta \quad (4.18)$$

Bu durumda kohezyonsuz zeminlerde jet grout kolonunun taşıma gücü Eşitlik 4.19 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$Q_d = Q_u - W_k = A \gamma D_f (N_q - 1) + \sum A_{si} K_i p_{vi} \tan \delta \quad (4.19)$$

#### 4.2. Kohezyonlu Zeminlerde Kolon Taşıma Gücü

Killi zeminlerde Skempton formülüne göre  $D_f / B > 2,5$ , kolon en kesitleri daire, kare veya bunlara yakın şekillere sahip olduğundan Eşitlik 4.20 kullanılacaktır. (Jet grout kolonu dairesel kazık sınıfına girmektedir.)

$$N_c = 9 c \quad (4.20)$$

Katsayı olarak 9 değerinin alınabilmesi için kolonun taşıyıcı zemine 5B kadar girmesi gerekmektedir.

$$q_d = 9 c_1 + \gamma D_f \quad (4.21)$$

$f_s = c_u$  olduğundan dolayı

$$Q_u = (9 c_1 + \gamma D_f) A \quad (4.22)$$

$$Q_f = A_s c_u \quad (4.23)$$

$$Q_d = A (9 c_1 + \gamma D_f) + A_s c_u - W_k \quad (4.24)$$

olarak tanımlanabilmektedir. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde yapılan kabule göre  $W_k = A \gamma D_f$  olarak alınabileceğinden killi zeminlerdeki kolon taşıma kapasitesi Eşitlik 4.25'te gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$Q_d = 9 c_1 A + A_s a c_2 \quad (4.25)$$

$c_1$  : Kazık ucundaki drenajsız kayma mukavemeti

$c_2$  : Kazık çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti

### 4.3. Homojenleştirme Metodu Kullanılarak Kompozit Zeminlerin Sayısal Analizinin Yapılması

Farklı elastik malzemelerden oluşan karışımların gerilme – deformasyon ilişkisini değerlendirmek amacıyla iki fazlı karışım metodu adı verilen metot, Omine vd. (1999) tarafından gerilme dağıtımını önemi esas alınarak önerilmektedir. Kompozit malzemelerin nümerik analizlerinde homojenleştirme metodu olarak tanımlanan bu yaklaşım, kazık şeklinde kolonlar ile güçlendirilmiş zemine, güçlendirilmiş zeminin ortalama elastik modülü ve akma gerilmesini elde etme amacıyla uygulanmaktadır.

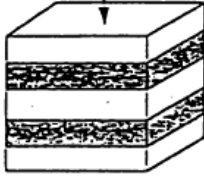
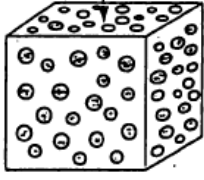
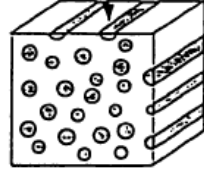
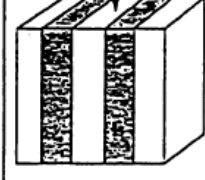
Farklı karışımlarda gerilme dağıtım parametresinin belirlenmesi için Şekil 4.1’de gerilme dağıtım faktörü ile Eshelby tensörü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Tabakalar veya küresel katkı karışımlar için gerilme dağıtım parametresi, katkı ve matrisin elastisite modülü oranının  $E_s / E^*$  kuvvet fonksiyonu olarak temsil edilmektedir. Nümerik analiz sonuçlarından kazık şeklinde katkılar için yeterli  $n$  değerinin  $1/3 \sim 1/6$  aralığında olduğu elde edilmektedir. (Adams - Doner, 1967, Omine vd., 1997).

$$\begin{aligned}
 S_{1111} &= 1 && ; \text{Yatay tabakalar} \\
 S_{1111} &= 0 && ; \text{Düşey tabakalar} \\
 S_{1111} &= \frac{7 - 5 v^*}{15 (1 - v^*)} && ; \text{Küre şeklinde katkı} \\
 S_{1111} &= \frac{5 - 4 v^*}{8 (1 - v^*)} && ; \text{Kazık şeklinde katkı}
 \end{aligned}$$

$S_{1111}$  : Eshelby Tensörü

$v^*$  : Matris poisson oranı

Not: Bu bölümdeki tüm formülasyonlarda alt indis “s” ve üst indis “\*” sırasıyla katkı ve matris anlamını taşımaktadır.

Type of mixtures	Horizontal laminate 	Mixture with spherical inclusions 	Mixture with pile shaped inclusions 	Vertical laminate 
Assumption	Constant Stress	Constant Strain energy	Approximation based on numerical analysis	Constant strain
Stress distribution parameter $b$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^0 = 1$ where, $n = 0$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{2}}$ where, $n = 1/2$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{\frac{1}{3}-\frac{1}{6}}$ where, $n = 1/3-1/6$	$\left(\frac{E_s}{E^*}\right)^1$ where, $n = 1$
Eshelby's tensor $S_{iiii}$	1	$7/15 \sim 9/15$ (for $\nu^*=0-0.5$ )	$5/8 \sim 3/4$ (for $\nu^*=0-0.5$ )	0
$1 - S_{iiii}$	0	nearly 1/2	$3/8 \sim 1/4$	1

Şekil 4.1. Gerilme Dağıtım Parametresi - Eshelby Tensörü İlişkisi (Omine vd., 1999)

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere gerilme dağıtım parametresi kuvveti ( $n$ ) (Uygulanan kuvvet doğrultusunda) Eshelby tensörüyle ilişkilidir.

$$n = 1 - S_{iiii} \quad (4.26)$$

İki fazlı karışımların gerilme dağıtım parametresi Eşitlik 4.26 ile elde edilen  $n$  değerinin Eşitlik 4.27’de kullanılması ile elde edilmektedir.

$$b = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^n = \left(\frac{E_s}{E^*}\right)^{1 - S_{iiii}} \quad (4.27)$$

$b$  : Gerilme dağıtım parametresi

$E^*$  : Matris elastik modülü

$E_s$  : Katkı elastik modülü

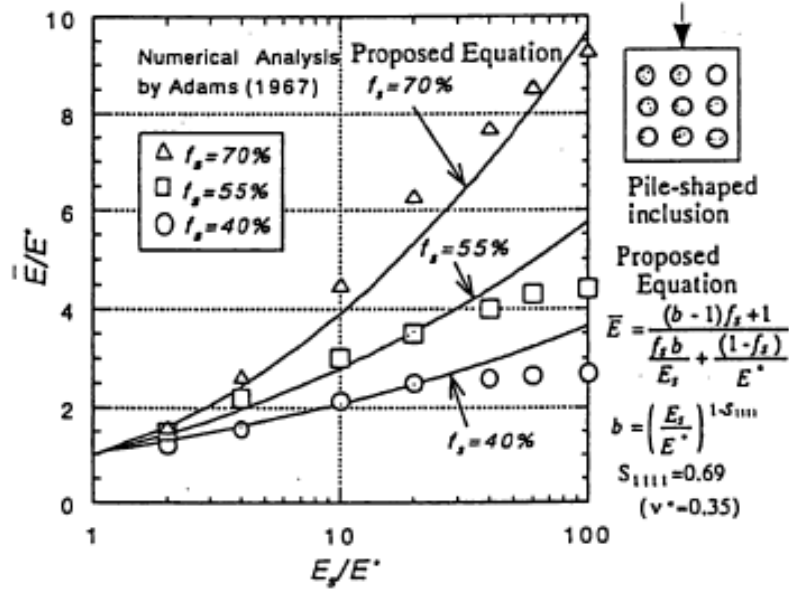
Karışımın elastik modülü Eşitlik 4.27 ile elde edilen gerilme dağıtım parametresinin değerinin Eşitlik 4.28’de kullanılması ile elde edilmektedir (Adams - Doner, 1967).

$$E = \frac{(b - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (4.28)$$

E : Homojenleştirilmiş malzeme elastik modülü

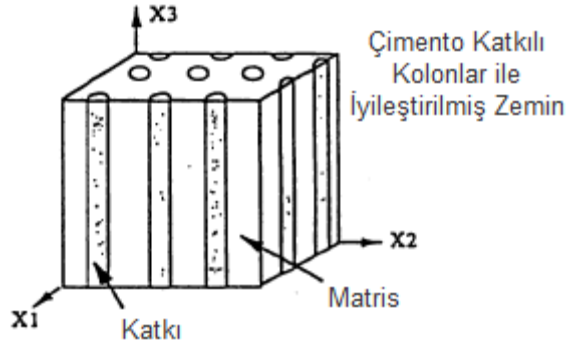
$f_s$  : Katkı hacimsel oranı

Şekil 4.2’de kazık şeklinde katkılar için Adams - Doner (1967)’in iki farklı malzeme ile yaptıkları nümerik analiz sonuçları ile Eşitlik 4.28 kullanılarak hesaplanan sonuçlarının karşılaştırması gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Nümerik Analiz ile Önerilen Eşitlik Sonuçlarının Karşılaştırması (Adams – Doner, 1967)

Derin karışım metoduyla iyileştirilmiş zemin, kazık şeklinde kolonlu kompozit zemin olarak Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kazık Şeklinde Kolonlar ile İyileştirilmiş Zemin

Çoğu iyileştirilmiş zemin yatay ve düşey doğrultularda farklı elastik modüllerine sahip unizotropik malzeme olarak kabul edilmektedir. İyileştirilmiş zeminin elastik modülü davranışı Eşitlik 4.29’da gösterilen gerilme – deformasyon ilişkisi ile temsil edilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_h} & \frac{-v_{hh}}{E_h} & \frac{-v_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & \frac{-v_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{hv}}{E_h} & \frac{-v_{hv}}{E_h} & \frac{1}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{E_{hv}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (4.29)$$

$$E_h = E_1 = E_2,$$

$$E_1 = E_2,$$

$$G_{hh} = G_{12},$$

$$G_{hv} = G_{13} = G_{23},$$

$$v_{vh} = v_{31} = v_{32},$$

$$v_{hh} = v_{12},$$

“v” ve “h” alt indisleri düşey ve yatay

bileşenleri temsil etmektedir. Önerilen iki fazlı karışım modelinde iyileştirilmiş zeminin ortalama elastik modülü, poisson oranı ve kayma modülü formülleri Eşitlik 4.30, 4.31 ve 4.32’de verilmektedir (Omine vd., 1999).



$$E_i = \frac{(b_i - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b_i}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (4.30)$$

$$v_{ij} = \frac{f_s b_i \frac{v_s}{E_s} + (1 - f_s) \frac{v^*}{E^*}}{\frac{f_s b_i}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (4.31)$$

$v_{ij}$  : Homojenleştirilmiş malzeme poisson oranı

$v_s$  : Katkı poisson oranı

$$G_{ij} = \frac{(b_{ij} - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b_{ij}}{G_s} + \frac{(1 - f_s)}{G^*}} \quad (4.32)$$

$G_{ij}$  : Homojenleştirilmiş malzeme kayma modülü

$G_s$  : Katkı kayma modülü

$G^*$  : Matris kayma modülü

$v_{ij}$  : Homojenleştirilmiş malzeme poisson oranı

$v_s$  : Katkı poisson oranı

$v^*$  : Matris poisson oranı

İyileştirilmiş zeminin ortalama elastik modülü katkı ve doğal zemin parametrelerinden elde edilmektedir. Gerilme dağıtma parametresi Eşitlik 4.33 ve 4.34 kullanılarak elde edilmektedir. (Omine vd., 1999).

$$b_i = \left( \frac{E_s}{E^*} \right)^{1 - S_{iii}} \quad (4.33)$$

$$b_{ij} = \left( \frac{G_s}{G^*} \right)^{1 - S_{iii}} \quad (4.34)$$

$b_i = b_{iiii}$ ,  $b_{ij} = b_{ijij}$  ve kazık şeklinde katkılarla karışımlar için Eshelby faktörü

$$S_{1111} = S_{2222} = 3/4$$

$$S_{3333} = 0$$

$$S_{1212} = S_{1313} = S_{2323} = 1/4 \text{ olarak alınmaktadır. (Mura, 1982)}$$

Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi matris ve katkı malzemelerinin kırılana kadar lineer elastik, kırıldıktan sonra ise tam plastik davranış gösterdikleri kabul edilmektedir. Eğer katkı ve doğal zeminin drenajsız durumda sürtünme açılıarı sıfır ise bu zeminlerin akma gerilmeleri aşağıdaki Eşitlik 4.35 ve 4.36'da gösterilmektedir.

$$\sigma_{ys} = 2 c_{us} \quad (4.35)$$

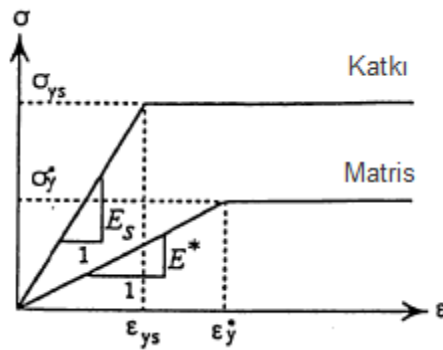
$$\sigma^* = 2 c^* \quad (4.36)$$

$c_{us}$  : Katkı kohezyonu

$c^*$  : Matris kohezyonu

Doğal zeminin ortalama gerilmesi Eşitlik 4.37'de gösterilmektedir.

$$\sigma_{y11}^* = \sigma_y^* = 2c_u^* \quad (4.37)$$



Şekil 4.4. Katkı ve Matris Gerilme - Deformasyon Eğrileri (Omine vd., 1999)

Gerilme dağıtım tensörü  $b_h$  ( $= b_{1111}$ ) kullanılarak elde edilen homojenleştirilmiş zeminlerin ortalama gerilmesi Eşitlik 4.38'de gösterilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{s11} = b_h \sigma_{y11}^* = 2 b_h c_u^* \quad (4.38)$$

Homojenleştirilmiş zeminin yatay doğrultudaki akma gerilmesi  $\sigma_{yh}$  ( $\sigma_{y11}$ ) katkı ve doğal zeminin ortalama gerilmesi olarak Eşitlik 4.39'da gösterilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{yh} = 2 (f_s b_h + 1 - f_s) c_u^* \quad (4.39)$$

Aynı şekilde homojenleştirilmiş zeminin düşey doğrultudaki akma gerilmesi Eşitlik 4.40 ile elde edilmektedir (Omine vd., 1999).

$$\sigma_{yv} = 2 \{f_s + (1 - f_s) / b_v\} c_{us} \quad (4.40)$$

Omine vd. 1993 yılında yayımlanan çalışmasında yine homojenleştirme metodu üzerinde durmaktadır. Bu çalışmada da homojenleştirme metodu gerilme dağıtım parametresi esas alınarak yapılmaktadır. Zeminin ortalama elastik modülü yine aynı formülasyon kullanılarak elde edilmektedir.

Omine vd. (1999) çalışmalarında eshelby tensörü kullanarak düşey ve yatay doğrultular için farklı gerilme dağıtım parametresi elde etmektedirler. Omine vd. (1993) ise çalışmalarında homojenleştirme metodunu, tek gerilme dağıtım parametresi kullanarak uygulamaktadırlar. Omine vd.'nin (1993) çalışmalarında zeminlerin kohezyon değerlerinin homojenleştirilmesi herhangi bir formülasyon önerilmemektedir. Buna karşın çalışmada elastik modülü ve kesme modülünün dışında, hacimsel esneklik modülü homojenleştirilmesi için de formülasyon önerilmektedir.

Elastik modülü, hacimsel esneklik modülü ve kesme modülü için önerilen formülasyonlar Eşitlik 4.41, 4.42 ve 4.43'te gösterilmektedir.

$$E = \frac{(b - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{E_s} + \frac{(1 - f_s)}{E^*}} \quad (4.41)$$

$$G = \frac{(b - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{G_s} + \frac{(1 - f_s)}{G^*}} \quad (4.42)$$

$$K = \frac{(b - 1) f_s + 1}{\frac{f_s b}{K_s} + \frac{(1 - f_s)}{K^*}} \quad (4.43)$$

$K$  : Homojenleştirilmiş malzeme hacimsel esneklik modülü

$K_s$  : Katkı hacimsel esneklik modülü

$K^*$  : Matris hacimsel esneklik modülü

Gerilme dağıtım parametresi farklı doğrultulardaki karışımlar ayırt etmeksizin tek bir formülasyon ile elde edilmektedir. Gerilme dağıtım parametresi Eşitlik 4.44'ten elde edilmektedir (Omine vd., 1993).

$$b = \left( \frac{E_s}{E^*} \right)^{1/2} \quad (4.44)$$

Omine vd. (1993) tarafından hazırlanan çalışmada poisson oranı için ayrı bir homojenleştirme formülasyonu önerilmediğinden dolayı poisson oranı, kesme modülü – poisson oranı ilişkisi (Eşitlik 4.45) veya hacimsel esneklik modülü – poisson oranı ilişkisini (Eşitlik 4.46) gösteren formülasyonlardan biri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4.45)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.46)$$

## 5. SIVILAŞMAYA KARŞI JET GROUTING KULLANIMI

### 5.1. Sıvılaştırmanın Tanımı ve Etkileri

Suya doymuş gevşek granüler zeminlerin deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncı sonucu, efektif gerilmelerin küçülerek kayma direncini yitirmesi sonucu zeminin bir sıvı gibi hareket etmesi halinin genel tanımı sıvılaştırma olarak verilmektedir. Orta sıkı veya sıkı zeminler, kayma gerilmeleri altında hacim artırmaya yönelik davranış gösterdiğinden gerilme seviyesinin belirli bir seviyeye ulaşması ile boşluk suyundaki artış bu tür zeminlerde gerçekleşmediği için, genellikle sıvılaştırmaya en hassas zeminler gevşek, diğer bir deyişle düşük izafi sıklıktaki granüler zemin katmanları olarak belirlenmektedir (Durgunoğlu, 2004).

Sıvılaştırma kısaca deprem durumunda geçici ve tekrarlı yüklerle yeraltı su seviyesi altındaki kumlu ve siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak mukavemet kaybı olarak adlandırılmaktadır (Seed ve Idriss, 1971). Sıvılaştırmanın belli başlı etkileri arasında deprem esnasında ve sonrasında oluşan zemin taşıma gücü kayıpları, oturmalar, şevli arazilerde yanal zemin ötelenmeleri, istinat duvarları arkasındaki toprak itkilerinde artış ve zemine gömülü boru ve servis hatlarının deformasyonları sayılabilmektedir.

Son yıllarda dünyanın çeşitli bölgelerinde oluşan depremlerde (Alaska 1964, Niigata 1964, Loma Prieta 1989, Kobe 1995, Gölcük 1999, Taiwan 1999) zeminlerin sıvılaştığı ve buna bağlı olarak önemli inşaat mühendisliği yapı ve alt yapılarında çok boyutlu hasar meydana geldiği görülmektedir. (Şekil 5.1)



Şekil 5.1. Niigata (1964) Depremi Sonrası

Sıvılaşma sonucunda oluşan düşey deformasyon ve yanal yayılmalar sonucu her türlü üst ve alt yapıya oldukça önemli ve onarılması güç hasarlar meydana gelmektedir. Kobe (1995) depreminde olduğu gibi, sıvılaşma sonucu oluşan büyük deformasyonlar altında ve zeminin mukavemetini kaybetmesi sonucunda, zeminde yer alan kazıklı temeller dahi gelen özellikle yanal ilave yükleri taşıyamaz duruma gelebilmektedir (Cubrinovski - Ishihara, 2001).

Yukarıda açıklanan büyük boyutlu deformasyonlar sıvılaşma sonucu olduğundan, yeni yapılacak veya mevcut bir yapıya ait taban zemininin olası bir deprem halinde sıvılaşmaya karşı güvenliğinin hesaplanması büyük önem taşımaktadır.

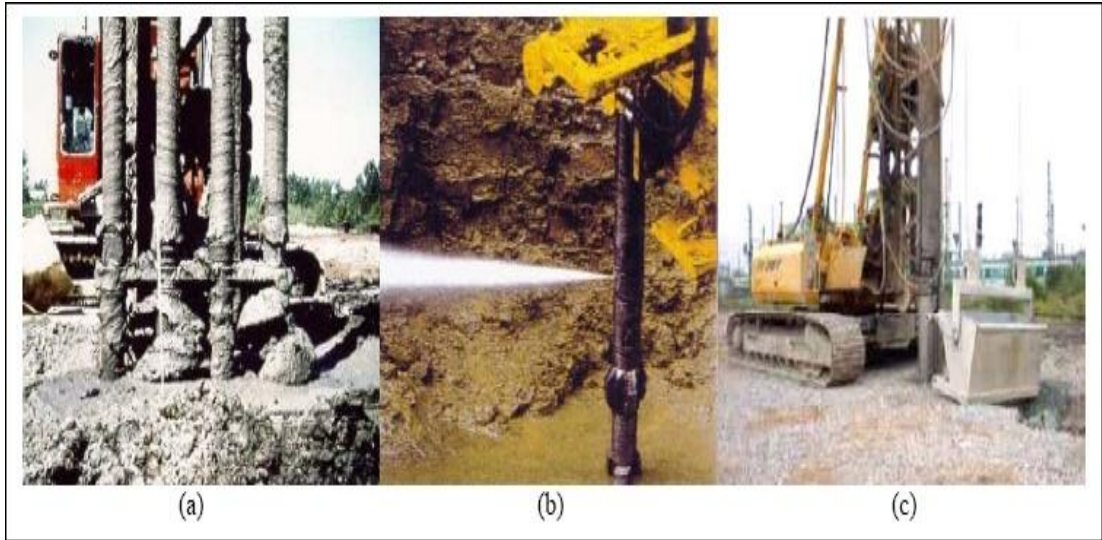
## 5.2. Sıvılaşma Etkilerini Azaltmakta Kullanılan Zemin Islah Metotları

Idriss (2002) sıvılaşma riski olduğu açığa çıkarılan sahalarda alınabilecek kararları; öngörülen riskin kabul edilerek bir önleme gidilmemesi, tasarımın sıvılaşmanın getirebileceği negatif tesirleri azaltacak yönde değiştirilmesi ve zemin ıslah çalışmaları ile sıvılaşmanın önlenmesi ve / veya etkilerinin azaltılması olarak üç ana gruba ayırmaktadır.

Sıvılaştırma etkilerinin azaltılmasına yönelik metotlar;

1. Sıvılaştırma potansiyeli olan zeminin kazılması ve / veya yer değiştirilmesi
2. Zemin sıkılaştırmasıyla mukavemet parametrelerinin artırılması (vibrokompaksiyon, taş kolon, dinamik kompaksiyon, patlatma vs.)
3. Aşırı boşluk suyu basınçlarının taş kolon veya şerit drenler ile drenajı
4. Çimento ve diğer bağlayıcılarla zeminde mukavim kolonlar oluşturulması (Jet Grouting, Deep Mixing vs.)
5. Çakma veya fore kazıklı temeller (kesme kuvvetlerini karşılayacak şekilde donatılarak)
6. Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi
7. Diyafram duvar
8. Radye temel uygulamaları olarak sıralanabilecektir.

Şekil 5.2’de sıvılaştırmaya riskine karşı yapılabilecek iyileştirme yöntemlerinden bazıları gösterilmektedir.



Şekil 5.2. (a) Deep Mixing – (b) Jet Grouting – (c) Taş Kolon (Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

Esas olarak bir ıslah metodunun seçiminde önemli etkenler metodun aplikasyon kolaylığı, tanımlanan sismik problemin çözümüne etkinliği, maliyeti ve çevresel etkilere duyarlılığı olarak sıralanabilir. Çimento ve diğer bağlayıcıların

zemin içine yüksek veya düşük basınçlar altında enjekte edilmesine yönelik ‘Jet Grouting’ ve ‘Deep Mixing’ yöntemleri özellikle yüksek taşıma gücünün gerektiği, saha jeolojisi sebebiyle değişken zemin tiplerinde çalışma ihtiyacı duyulduğu ve inşaat süresinin kısıtlı olduğu durumlarda diğer yöntemlere göre daha avantajlı olmaktadır (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

Laboratuar analizlerine ve indeks özelliklerine dayanan kriterler haricinde Seed ve Idriss (1971) tarafından detayları verilen hesap yönteminin ilkeleri aşağıda tanımlanmaktadır.

### 5.3. Sıvılaştırma Potansiyelinin Belirlenmesi

#### 5.6.1. Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR)

Seed ve Idriss (1971) çalışmalarında yaklaşık 40ft (12m) derinliğe kadar deprem durumunda oluşabilecek maksimum kayma gerilmelerini ( $\tau_{max}$ ) aşağıdaki Eşitlik 5.1 ile ifade etmişlerdir.

$$\tau_{max} = \frac{\gamma z}{g} a_{max} r_d \quad (5.1)$$

- $a_{max}$  : Zemin yüzeyindeki maksimum yer ivmesi  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi  
 $\gamma$  : Zeminin birim hacim ağırlığı  
 $z$  : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik  
 $r_d$  : Derinliğe bağlı gerilme azaltma katsayısı

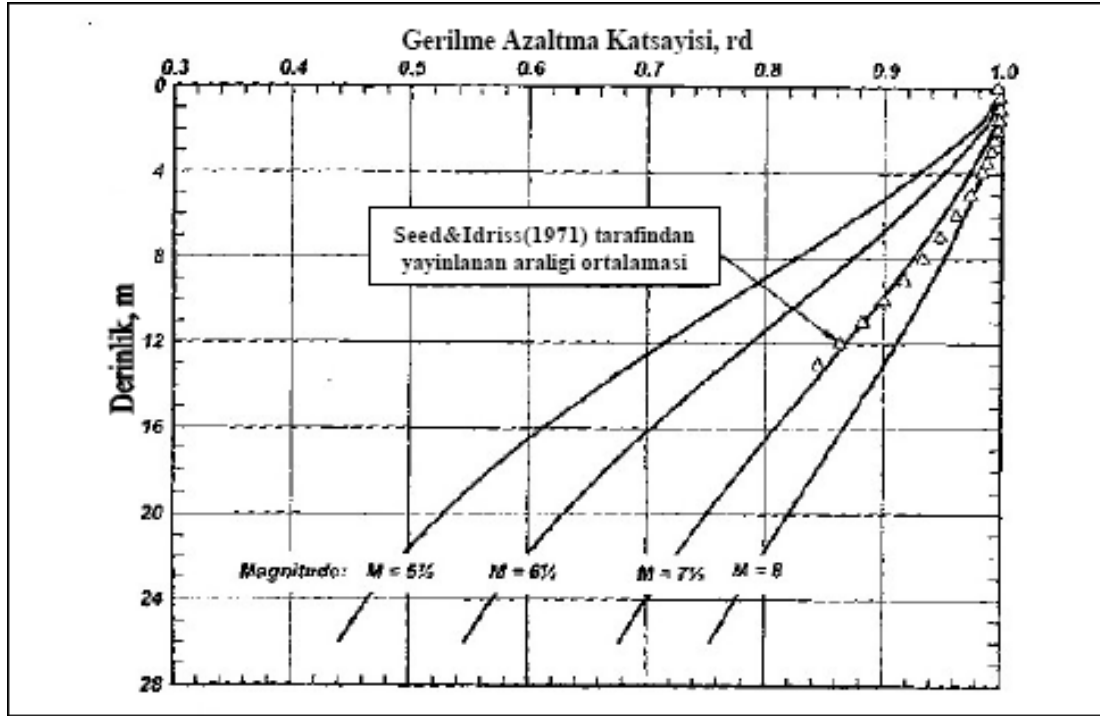
Derinliğe bağlı azaltma katsayısı Eşitlik 5.2 ve 5.3 kullanılarak hesaplanmaktadır (Liao ve Whitman, 1986).

$$z < 9,15m \quad \Rightarrow \quad r_d = 1,0 - 0,00765 z \quad (5.2)$$

$$9,15m < z < 23m \quad \Rightarrow \quad r_d = 1,174 - 0,0267 z \quad (5.3)$$



Ancak Idriss ve Boulanger (2004),  $r_d$  değerinin depremin büyüklüğüne de bağlı olduğunu belirterek Şekil 5.3'te verilen  $r_d(z, M)$  bağıntılarını vermiştir.



Şekil 5.3. Gerilme Azaltma Katsayısı – Derinlik - Deprem Şiddeti İlişkisi (IdrissBoulanger, 2004)

Bazı araştırmacılar daha derin bölgelerde  $r_d$ 'yi hesaplayabilmek için yeni denklemler geliştirmişlerdir (Robertson - Wride, 1998). Fakat 15m'nin altındaki derinlikler yaklaşık yöntemin dışına çıktığından bu seviyeden daha derin bölgelerde  $r_d$ 'nin hesaplanması anlamsızdır. Arazi koşullarında zemin esnekliği, dolayısıyla  $r_d$  değeri değişiklik gösterdiği için Eşitlik 5.2 ve Eşitlik 5.3 ile hesaplanan  $r_d$  değeri, değişik  $r_d$  değerlerinin ortalamasıdır (Youd vd., 2001).

Hesap kolaylığı açısından Şekil 5.3'te ortalama değer eğrisinden alınan  $r_d$  değerleri aşağıdaki Eşitlik 5.4'te ifade edilmiştir (Youd vd., 2001).

$$r_d = \frac{(1,000 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5})}{(1,000 - 0,4117z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2)} \quad (5.4)$$

Ortalama eşdeğer kayma gerilmelerinin, ( $\tau_{avg}$ ) maksimum gerilmenin %65'inde oluştuğundan yola çıkılarak ve bu değer efektif düşey gerilmeler ( $\sigma_{vo}$ ) ile normalize edilerek, aşağıdaki (Eşitlik 5.5) çevrimsel gerilme oranı (CSR) tanımlanmaktadır.

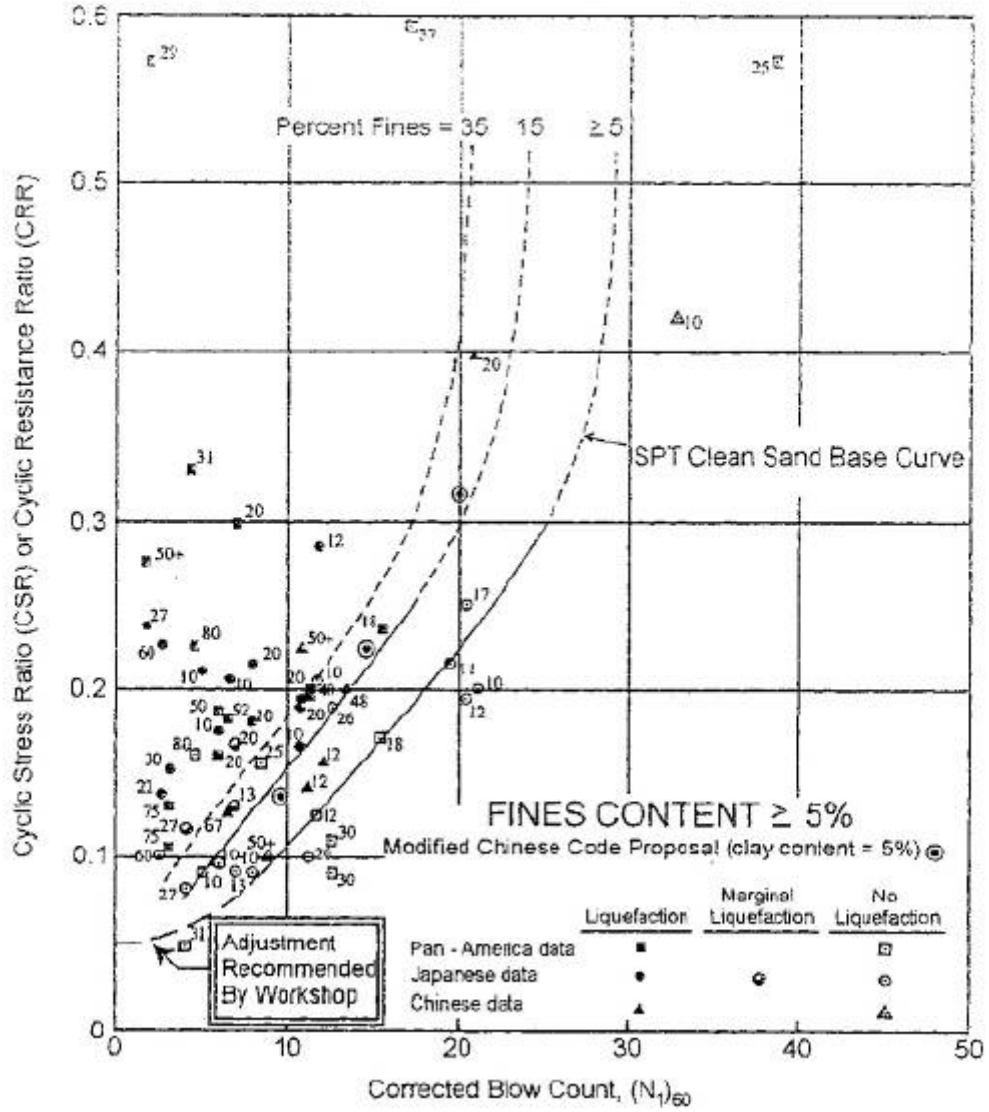
$$CSR = \frac{\tau_{ort}}{\sigma_{vo}^1} = 0,65 \times \frac{\tau_{max}}{\sigma_{vo}^1} = 0,65 \times \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{vo}^1} r_d \quad (5.5)$$

$\sigma_{vo}$  : Toplam düşey gerilme

$z$  : Zemin yüzeyinden itibaren metre cinsinden derinlik.

### 5.6.2. Çevrimsel Mukavemet Oranı (CRR)

SPT, CPT ve kayma dalgası hızı (SWV) ölçümlerine dayanarak günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından sıvılaşıma görülen ve görülmeyen sahalar incelenmiştir. Farklı ince malzeme oranlarına (No.200 eleği geçen malzeme yüzdesi) ve  $M_w = 7,5$  deprem büyüklüğü seviyesine bağlı olarak Şekil 5.4'te gösterildiği şekilde çevrimsel mukavemet oranını temsil eden çeşitli sınır eğrileri tanımlanmaktadır. Eğrilerde ifade edilen SPT darbe sayılarının, kayma dalgası hızlarının ve CPT uç dirençlerinin efektif gerilme, kullanılan ekipman tipi ve ince daneli malzeme yüzdesi gibi çeşitli kriterlere göre düzeltilmiş değerler alınarak verilmektedir. Bu çalışmada sadece yöntem olarak SPT darbe sayısına bağlı düzeltme yöntemi açıklanmaktadır. SWV ve CPT deneylerine bağlı olarak önerilen düzeltme faktörleri ile ilgili ayrıntılı bilgi Youd vd. (1997) tarafından verilmiştir ve günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 5.4. Çevrimsel Mukavemet Oranını Temsil Eden Sınır Eğrileri (Youd vd., 1997)

Yapılan araştırmalarda standart penetrasyon deneyinin aşağıdaki faktörlerden etkilendiği ortaya çıkmaktadır. (Palacios, 1977; Schmertmann, 1976, 1977)

- Çamurlu delme kullanıldığı zaman sondaj duvarlarını korumak için gömlek kullanılması
- Sondaj kuyusu çapı
- Deney düzeneği (makaralı veya otomatik olması)
- Şahmerdan tipi

- Tij boyu
- Standart olmayan numune tüplerinin kullanılması
- Üst tabaka yükü düzeltmesi

Standart penetrasyon deneyi sonucu elde edilen değerlerde bir standardın yakalanabilmesi için SPT sonucunu etkileyen faktörlerin ortak kabul gören bir düzeltmeden geçirilmesi gerekmektedir. Böylelikle farklı deney aletleri kullanılarak farklı derinliklerden elde edilen darbe sayısı değerlerinin, zeminin penetrasyon direnci hakkında aynı bilgileri vermesi sağlanmaktadır. SPT sonuçlarını etkileyen faktörler Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de, bu faktörler göz önüne alınarak yapılan düzeltmeler ise Eşitlik 5.6’da gösterilmiştir.

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S \quad (5.6)$$

$(N_1)_{60}$  : % 60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT sayısı

N : Ölçülen SPT sayısı

$C_N$  : Üst tabaka yükü düzeltme katsayısı

$C_E$  : Enerji oranı düzeltme katsayısı

$C_B$  : Kuyu çapı düzeltme katsayısı

$C_R$  : Tij boyu düzeltme katsayısı

$C_S$  : Numune alma metodu düzeltme katsayısı

Çizelge 5.1. SPT Düzeltmeleri (Youd vd., 2001)

Faktör (1)	Alet Değişkeni (2)	Terim (3)	Düzeltilme (4)
Üst Tabaka Yüğü	-	$C_N$	$(P_a / \sigma'_{vo})^{0,5}$
Üst Tabaka Yüğü	-	$C_N$	$C_N \leq 1,7$
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 - 115mm	$C_B$	1,0
Kuyu Çapı	150mm	$C_B$	1,1
Kuyu Çapı	200mm	$C_B$	1,2
Tij Boyu	< 3m	$C_R$	0,8
Tij Boyu	3 - 4m	$C_R$	0,8
Tij Boyu	4 - 6m	$C_R$	0,9
Tij Boyu	6 - 10m	$C_R$	1,0
Tij Boyu	10 - 30m	$C_R$	1,0
Numune Alma Yöntemi	Standart numune alıcı (kılıflı)	$C_S$	1,0
Numune Alma Yöntemi	Kılıfsız numune alıcı	$C_S$	1,1 - 1,3

SPT N değerleri üst tabaka yüküyle birlikte artış göstermektedir. Bu nedenle, darbe sayısına üst tabaka düzeltme yükü uygulanır (Seed ve Idriss, 1982). Bu düzeltme faktörü genellikle aşağıdaki Eşitlikle 5.7 ile hesaplanır (Liao ve Whitman, 1986).

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0,5} \quad (5.7)$$

$P_a$  : Yaklaşık 100kPa değerindeki referans gerilmesi

$\sigma_{vo}^l$  :  $P_a$  ile aynı birime sahip düşey efektif gerilme

Burada  $C_N$  değeri 1,7'yi aşmamalıdır.

Bir başka önemli faktör, şahmerdandan zemine iletilen enerji veriminin düzeltilmesidir. Zemine iletilen enerji verimi şahmerdan tipine, örs, kaldırma mekanizmasına ve şahmerdanın serbest bırakılma yöntemine bağlıdır. Değişik şahmerdan tipi ve örslerine göre SPT sonuçlarının %60 enerji oranına göre düzeltme faktörleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Sondaj ve deney aletlerindeki farklılıktan dolayı  $C_E$  geniş bir aralıkta değişmektedir.

Çizelge 5.2. SPT Enerji Oranı Düzeltmesi (Seed vd., 1985)

Ülke	Şahmerdan Tipi	Şahmerdan Bırakma Yöntemi	Tahmin Edilen Enerji Oranı	%60 Enerji Oranına Göre Düzeltme Katsayısı
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	50	$50 / 60 = 0,83$

Ülkemizde de genellikle Amerika'da kullanılan Donut Şahmerdan tipi aletler kullanılmaktadır. Dolayısıyla %60 enerji oranına göre düzeltme katsayısı genellikle 0,75'dir.

### 5.6.3. Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Faktörü

Deney tipine ilave olarak  $M_w = 7,5$ 'den farklı deprem büyüklükleri de göz önünde bulundurularak sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü (FS) Eşitlik 5.8 ile hesaplanabilmektedir (Youd vd., 1997).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \times MSF \quad (5.8)$$

$$MSF = 10^{2,24} / M_w^{2,56} \quad (5.9)$$

MSF : Deprem büyüklüğü düzeltme faktörü

$M_w$  : Moment cinsinden deprem büyüklüğü

### 5.7. Chinese Kriteri

Seed ve Idriss (1971) ince daneli zeminlerin sıvılaşma riskine ait üç şartı içeren ve literatürde 'Chinese Criteria' olarak bilinen aşağıda tanımlanan kriteri belirtmiştir.

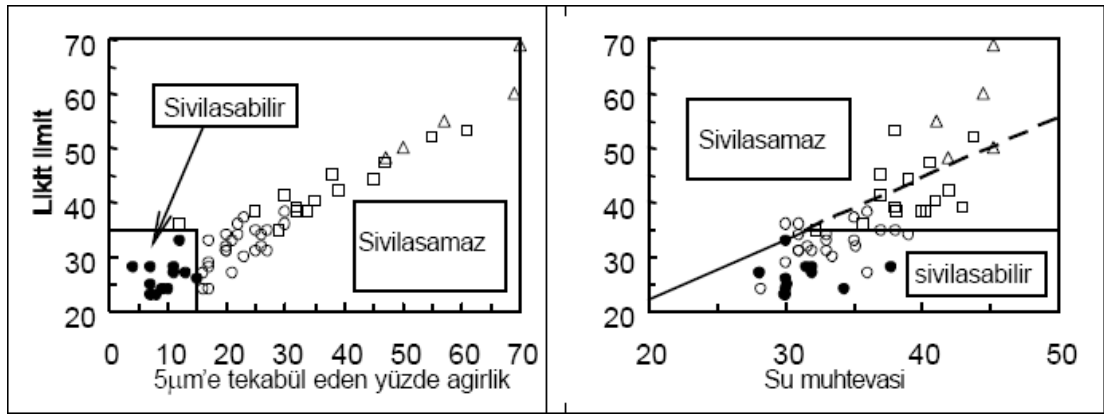
$$\left. \begin{array}{l} \% \text{ Geçen } (5\mu\text{m (mikrometre)}) \leq \% 15 \\ \text{Likit limit } (L_L) \leq \% 35 \\ w_n \geq 0,90 L_L \end{array} \right\} \text{SIVILAŞABİLİR}$$

Ancak, özellikle 17 Ağustos 1999 depreminde Adapazarı'ndaki silt ve düşük plastisiteli killerin yukarıda kriteri sağlamadığı halde sıvılaştığı görülmüştür. Bunun üzerine UC Berkeley'den Prof. Bray, tebliğ sahibinin de yer aldığı ülkemiz araştırmacıları ile müşterek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda Sancio ve dig. (2003) gösterildiği ve Şekil 5.5'te özetlendiği gibi Adapazarı silt ve killerin Chinese Kriterini sağlamadığı belirlenmiştir (Durgunoğlu, 2004). Yapılan

detaylı çalışmalar sonucu Şekil 5.6’da gösterilen yeni bir kriter önerilmektedir (Bray vd., 2004). Bu kriter göre

$I_p < 12$	ve	$w_n / L_L > 0,9$	⇒	Sıvılaştırılabilir
$12 < I_p < 20$	ve	$0,8 < w_n / L_L < 0,9$	⇒	Ara durum, deney yapılmalı
$I_p > 20$	ve	$w_n / L_L < 0,8$	⇒	Sıvılaştırılmaz

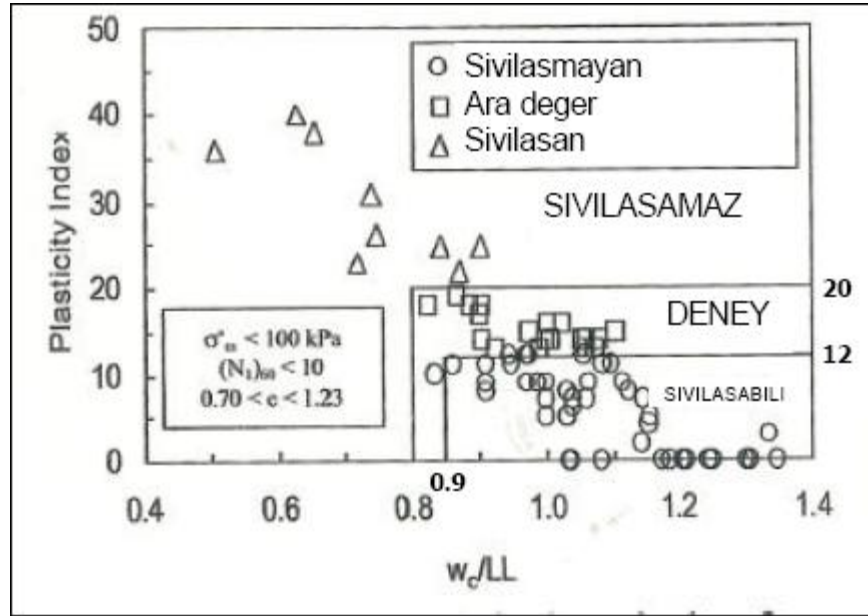
olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.5. Chinese Kriteri (Bray vd., 2004)

Şekil 5.5’te ki  $PI < 12$  olan numuneler daire ile  $12 < PI < 20$  olan numuneler kare ile ve  $PI > 20$  olan numuneler üçgen ile gösterilmiştir. Dolu daireler “Chinese Criteria”nın her üç kriterini de sağlayan numunelerdir (Sancio vd., 2003).





Şekil 5.6. Yeni Kriter (Bray vd., 2004)

### 5.7. Deprem Kayma Gerilmelerinin Saha Tepki Analizleri İle Belirlenmesi

Yukarıdaki Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen prosedüre bir alternatif olarak, zeminde oluşacak maksimum deprem kayma gerilmeleri, zemin – deprem tepki analizleri ile de (site response analysis) doğrudan hesaplanabilecektir. Bu durumda uygun zemin maksimum kayma modülü profilinin hesaplanması ( $G_s$ ), bu kayma modüllerinin farklı şekil değiştirme yüzdelerinde azalım eğrilerinin tayini ve sahanın zemin profiline uygun deprem kaydının seçimi gerekmektedir.

$$G_s = \gamma \times V_s^2 \quad (5.10)$$

SHAKE (1992) veya benzeri bir analiz programı ve Eşitlik 5.10 yardımıyla, bu tip bir hesabın yapımı mümkündür. Maksimum deprem ivmesinin seçiminde deprem şartnamelerinden yararlanabileceği gibi sahaya yönelik özel inceleme yapıp olumsuz duruma göre analiz de yapılabilecektir. Deprem kaydının seçiminde önemli olan mümkünse sahaya yakın bir lokasyondan veya benzer sismik özelliklere sahip bir sahadan alınan verilerin kullanılmasıdır. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli

Rasathanesi Deprem Araştırma Merkezi Internet adresi ([www.koeri.boun.edu.tr](http://www.koeri.boun.edu.tr)) bu bakımdan zengin bir içerik sunmakta ve faydalı bağlantılar içermektedir. Bu şekilde derinliğe bağlı azalım faktörlerinin ( $r_d$ ) hesaplanmasındaki belirsizlikten kurtulmak ve uygun deprem ivmesinin seçimiyle gerçek davranışa daha yakın değerleri bulmak mümkündür (Özsoy, 2002).

## 5.7. Hesap Yöntemi ve Adımları

### 5.6.1. Zemin Maksimum Kayma Modülünün Saptanması

Çimento – zemin karışımı ile elde edilen yüksek kayma mukavemetine sahip kolonlarla hesap için öncelikli adım zemin maksimum kayma modülünün tayini ve uygun giriş deprem büyüklüklerinin tespitidir. Bu amaçla aşağı kuyu (Down- Hole) veya ‘Suspension PS Logging’ yöntemleri kullanarak doğrudan; veya SPT, CPT, PMT gibi arazi deneyleri sonuçlarından yola çıkarak dolaylı olarak zemin kayma hızı ( $V_s$ ) profilinin tayini gerekir. Bu amaçla Eşitlik 5.11 kullanılabilir (Ohta - Goto, 1978).

$$V_s = 62,14 \times N^{0,219} \times H^{0,230} \times F \quad (5.11)$$

N : Düzeltilmemiş SPT darbe sayısı

H : Tabaka derinliğini

F : Zemin tipine bağlı bir düzeltme faktörü

F düzeltme faktörü killi zeminlerde 1.000, ince kumlarda 1.091, orta daneli kumlarda 1.029, kalın daneli kumlarda 1.073, kum ve çakıllılarda 1.151 ve çakıllı zeminlerde 1.485 alınabilecektir (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

### 5.6.2. Birim Hücre Metodu ve Deprem Kayma Gerilmeleri Dağılımı

Yukarıdaki hesap adımlarının gerçekleştirilmesi sonrasında sivilaşma riskinin olduğunun anlaşılması durumunda tasarımcı ve işveren tarafından bu riskin

gerçekleşmesi durumunda oluşabilecek muhtemel durumları (Temel ve döşeme oturmaları, üst yapıda hasar, tesisin operasyonelliğinin kesintiye uğraması vs.) içeren bir risk analizi yapılmalıdır. Bu analiz sonucunda sivilaşma etkilerinin önlenmesi veya kısmen azaltılması durumuna gidilmesi yönünde bir karar çıkması durumunda saha için en uygun zemin ıslah metodunun seçimine gidilecektir. Hayden ve Baez (1994) burada açıklandığına benzer bir yöntemle taş kolon uygulamaları için hesap yöntemlerini sunmaktadırlar. Yüksek kayma modüllü zemin – çimento karışımı kolonlar ile yapılan uygulamalarda ikinci adım olarak tasarımcının tecrübesine de bağlı olarak uygun bir kolon çapı ve aralığı seçilerek iterasyona başlanacaktır. Kolonların kayma modülleri tercihen arazide yapılacak aplikasyon deneyleri veya başlangıç olarak müteahhit firmaların benzer sahalarda elde ettiği tek eksenli silindirik basınç deneyi mukavemetlerinin ( $f_{JG}$ ) yorumlanması ile elde edilebilecektir. Her durumda bu verilerin inşaat aşamasında deneylerle doğrulanması zorunludur. Tercihen jet grout kolon karot numunelerinden alınacak örnekler tek eksenli basınç deneyine tabi tutulacak ve geçici yükleme durumlarında Poisson oranı ( $\nu$ ) 0,5 kabul edilerek, Eşitlik 5.12 ve Eşitlik 5.13'te açıklandığı şekilde elastisite ( $E_{JG}$ ) ve kayma ( $G_{JG}$ ) modülleri bulunabilecektir (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

$$E_{JG} = 4730 \sqrt{f_{JG}} \quad (5.12)$$

$$G_{JG} = \frac{E_{JG}}{2 \times (1 + \nu)} \quad (5.13)$$

Deep mixing tekniğinde elde edilen numunelerin basınç mukavemeti değerleri jet grouting yöntemiyle elde edilen kolonlardan alınan numunelere kıyasla genelde daha düşük çıkabilmekte ve bu değerlere karşılık gelen elastisite modülleri numunenin tek eksenli basınç mukavemetinin 200 ila 1000 katı arasında değişmektedir. Tek eksenli basınç deneyi sonuçlarına uygulanacak 2,0 mertebesinde bir güvenlik faktörü ile kayma modülünün alabileceği değer aralığının, daha önce elde edilen tecrübelerin ışığında, 1,000MPa ila 4,000MPa mertebesinde olabileceği görülmektedir. Uygulamada gerçekleştirilen zemin değiştirme miktarını tanımlamak üzere yüksek modüllü kolon alanının ( $A_{JG}$ ) Şekil 5.7'de gösterilen birim

hücre alanına (A) oranı olan, “Alan Yer Değiştirme Oranı” ( $a_r$ ) Eşitlik 5.14 ve Eşitlik 5.15 ile tanımlanmaktadır (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

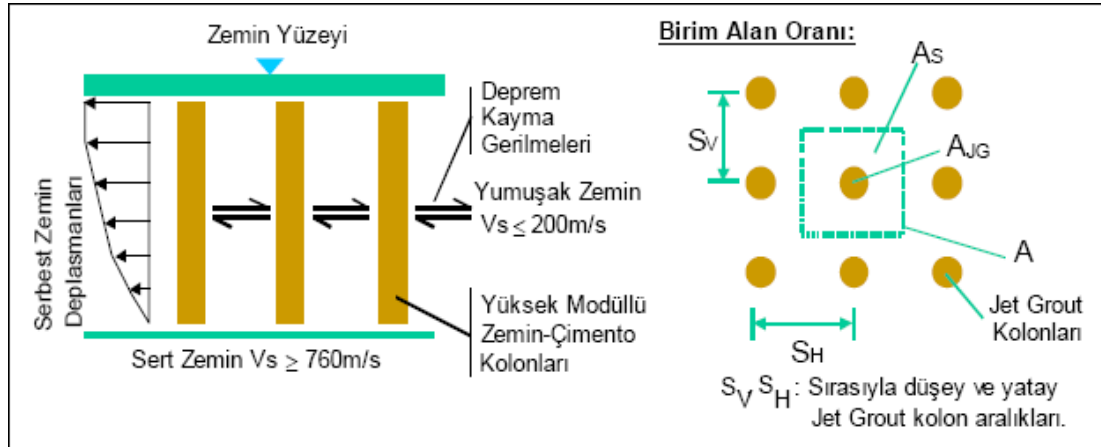
$$a_r = \frac{A_{JG}}{A} \quad (5.14)$$

$$a_s = \frac{A_s}{A} = 1 - a_r \quad (5.15)$$

Hesabın bundan sonraki adımları; deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak oluşturulan kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında, kayma modülleri oranında dağılacığı kabulüne dayanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli gösteren alüvyonal zeminlerde kayma dalgası hızının genelde 200m/s’den az olacağı düşünülürse buradan elde edilecek çimento karışımı kolonların kayma modülünün zemin kayma modülüne oranının ( $G_r$ ) 15 ila 160 kat farklı olabileceği hesaplanmıştır (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

$$G_r = \frac{G_{JG}}{G_s} \quad (5.16)$$

Bu durumda oluşacak kayma gerilmeleri uygun bir uygulama çapı ve aralığının seçimi ile kolonlar arası kalan zeminden ziyade kolonlar üzerinde yoğunlaşacaktır.



Şekil 5.7. Deprem Kayma Dalgalarının Dağılım Modeli ve Birim Hücrenin Tanımlanması (Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

Yukarıda yapılan tanımların ışığında birim alan içerisindeki gerilme konsantrasyonu ( $n$ ) Eşitlik 5.17 ile tanımlanabilecektir (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

$$n = \frac{\tau_{JG}}{\tau_s} \quad (5.17)$$

Yukarıdaki ifadede,  $\tau_{JG}$ ; çimento - zemin karışımı kolonlara ve  $\tau_s$ ; kolonlar arasındaki zemine etkiyen kayma gerilmesini temsil etmektedir. Bu durumda birim alan üzerine etki eden gerilme ( $\tau$ ), herhangi bir derinlikte birim alan içerisindeki kayma gerilmesinin dengesinden yola çıkarak ve alan değişim oranı ( $a_r$ )'ye bağlı olarak Eşitlik 5.18 ve Eşitlik 5.19 ile hesaplanacaktır (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

$$\tau_s = \frac{\tau}{[1 + (n - 1) a_r]} \Rightarrow \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{[1 + (n - 1) a_r]} \quad (5.18)$$

$$\tau_{JG} = \frac{n \tau}{[1 + (n - 1) a_r]} \Rightarrow \frac{\tau_{JG}}{\tau} = \frac{1}{[1 + (n - 1) a_r]} \quad (5.19)$$

### 5.6.3. Çevrimsel Gerilim Azaltma Faktörü

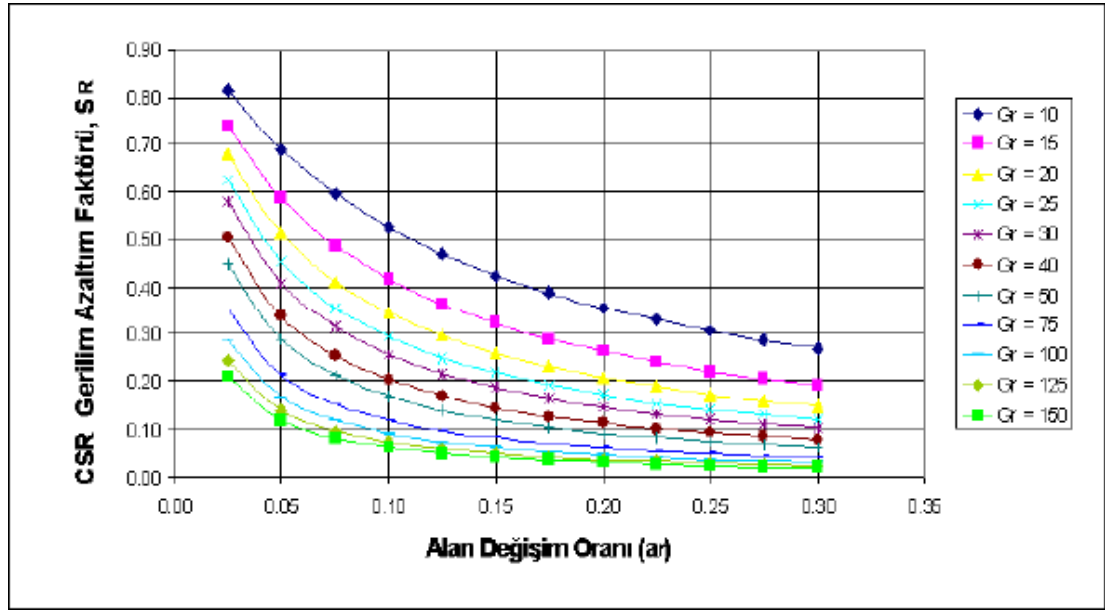
Zeminde çimento - zemin karışımı kolonların veya herhangi başka bir donatılı elemanın olmaması durumunda ortalama kayma gerilmeleri Seed ve Idriss (1971) çalışmasında bulunabilecektir. Ortalama kayma gerilmesinin ( $\tau_{avg}$ ) yukarıdaki formüllerdeki birim alan üzerine etki eden gerilme ( $\tau$ ) yerine kullanılmasının sebebi, oluşacak şekil değiştirmelerin depremde genelde bu gerilme seviyesinde ortaya çıkmasından ileri gelmektedir. Bu durumda kolonlar ve onları çevreleyen zemin arasındaki gerilme paylaşımı kolon çapı ve aralığının bir fonksiyonu haline gelecektir. Çevrimsel gerilme oranı (CSR) üzerine etkiyecek azaltma faktörü ( $S_R$ ), birim alan içerisindeki kolonlar ve bunları çevreleyen zemin arasında şekil değiştirme uyumu olduğu kabulüyle Eşitlik 5.20'deki gibi tanımlanabilecektir (Özsoy – Durgunoğlu, 2003).

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\tau_s}{\tau_{avg}} = \frac{1}{[1 + (G_r - 1) \times a_r]} = \frac{1}{G_r} \times \frac{1}{\left[ a_r + \frac{1}{G_r} (1 - a_r) \right]} \quad (5.20)$$

Bu formülde verilen  $S_R$  değeri, Seed ve Idriss'in 1971 tarihli çalışmasından bulunan çevrimsel gerilme oranını (CSR) azaltmakta ve dolayısıyla Eşitlik 5.8'teki güvenlik faktörünün artırımında kullanılacaktır.

$$CSR_{tasarım} = CSR \times S_R \quad (5.21)$$

Zemin sivilaşma kontrolü Eşitlik 5.8'e göre, fakat bu sefer CSR tasarım değerleri kullanılarak, uygun güvenlik faktörü elde edilene kadar tekrarlanacaktır. Yukarıdaki formülasyonların daha önceki tecrübeler ışığında uygun tasarım aralıklarında çözümü durumda, Şekil 5.8'de ifade edilen tasarım eğrileri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.8. Birim Alan ve Kayma Modülü Oranına Bağlı CSR Azaltım Eğrileri (S<sub>R</sub>)  
(Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

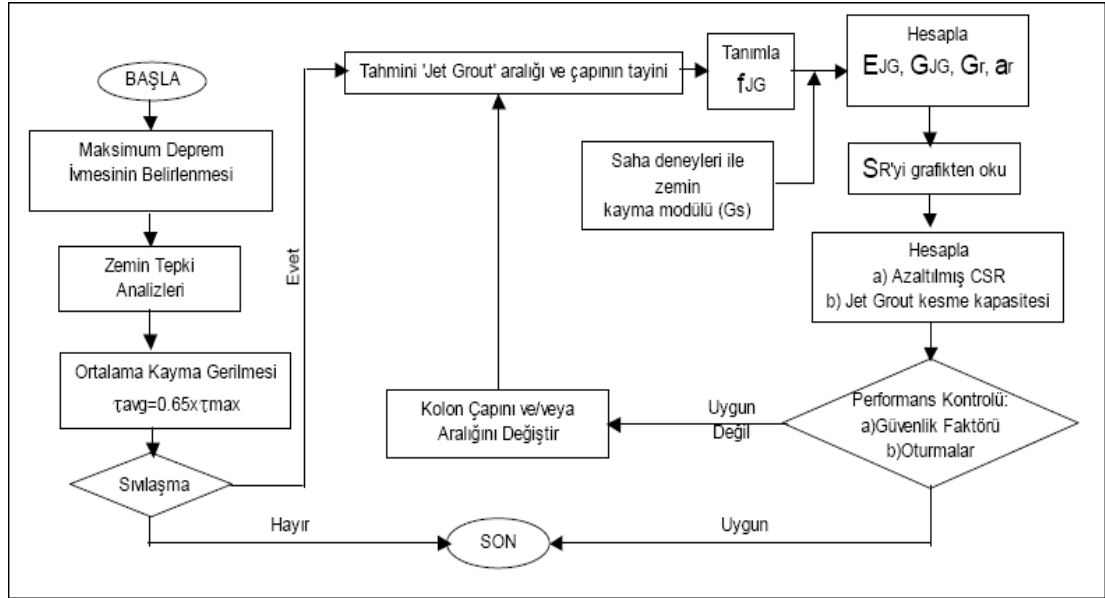
#### 5.6.4. Yapısal Kontroller

Kolonlar arasında kalan zeminin sıvılaşma riskinin azaltılması için yüksek kayma modüllü kolonların kendilerine gelecek kayma kuvvetini karşılayacak mukavemete sahip olması gerekmektedir. Kullanılan kolon kesitinin kayma kuvvetlerine ( $V_{JG}$ ) karşı yeterli olup olmadığının kontrolü için, çimento karışımı kolonların donatısız olarak düşük duktiliteli elemanlar olduğu düşünülerek, Eşitlik 5.22) kullanılabilir (International Navigation Association, 2001).

$$V_{JG} = 0,3 \sqrt{f_{JG}} A_{JG} \quad (5.22)$$

Burada kullanılan basınç mukavemetinin ilke tasarımı aşamasında daha önce yapılmış benzer araştırma sonuçlarından yola çıkılarak bulunması durumunda minimum 2,0 güvenlik faktörü basınç mukavemeti değerine ( $f_{JG}$ ) uygulanmalıdır. Her durumda sonuçların uygulama sırasında elde edilen yerinde karot numuneleri ile kontrolü gereklidir.

Bu yöntem kullanılmak suretiyle yapılacak tasarım algoritması Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9. Tasarım Algoritması (Özsoy - Durgunoğlu, 2003)

### 5.7. Analiz Örneği

İnşaat yapılacak alanında 10m derinlikli altı adet araştırma amaçlı sondaj kuyusu açılmaktadır. Sonrasında bunlara ilave olarak 20m derinlikli iki adet, 25m derinlikli bir adet sondaj kuyusu daha açılmaktadır. Arazi deneyi olarak SPT deneyi uygulanmakta olup deneyler 1,5m aralıklarla tekrarlanmaktadır. Yeraltı suyu zemin yüzeyinden 2,0 – 3,0m aşağıda bulunmaktadır. SPT sayıları ve ince malzeme oranları Çizelge 5.3'te verilmektedir.



Çizelge 5.3. SPT Sayıları ve İnce Malzeme Oranları

Derinlik	1. Sondaj Çalışması						2. Sondaj Çalışması					
	N (SPT Sayıları)						SK1		SK2		SK3	
	SK1	SK2	SK3	SK4	SK5	SK6	N	P <sub>200</sub>	N	P <sub>200</sub>	N	P <sub>200</sub>
2	23	25	7	28	12	13		16	18	19		54
3,5	32	18	11	12	14	12	32	9	41	41	37	57
5	36	13	7	11	13	36	26	40	R	36	46	
6,5	R	34	31	39	46	R	43		40		R	36
8	46	R	R	34	47	R	R		R	36	27	
9,5	49	R	R	48	R	R	13	28	21	33	16	32
11							22	31	R		13	30
12,5							49		17		31	33
14							R		26		27	
15,5							R		40		R	
17							R		R		R	37
18,5							R		R	35	R	
20							R		R		R	
21,5									R	16		
23									R			
24,5									R	20		

Sondaj logları, SPT sayıları ve laboratuvar deney sonuçlarına göre inşaat alanı için homojen aynı sıklıkta tek bir zemin profili çıkarmanın mümkün olmadığı görülmektedir. USCS sistemine göre zemin sınıfı SM (Siltli kumlar, fena derecelenmiş kum silt karışımları) olup SPT sayıları ve sıklık durumları farklılıklar göstermektedir. 0 - 5m ve 9 - 13m derinlikler arasında gevşek - orta sıklıkta kumlu tabakaların olduğu anlaşılmaktadır.

İnşaat alanında radye temel sistemli planlanmaktadır. Toplam 14 Bloktan oluşacak sitenin sayıları ve yaklaşık temel taban boyutları ve temel zeminine aktarılacak ortalama taban basınçları Çizelge 5.4'te verilmektedir. Yapılacak inşaatın temel tabanı yüzeyden yaklaşık 5,5m derinlikte bulunmaktadır.

Çizelge 4.4. Yaklaşık Temel Boyutları ve Zemine Aktarılabak Basınçlar

Blok No	Kat Sayısı	Taban Boyutları (BxL) (m)	Taban Alanı (m <sup>2</sup> )	Toplam Yük (ton)	Ortalama Taban Basıncı (t/m <sup>2</sup> )
1. BLOK	B + Z + 2	17 x 51	867	5793	6,68
2. BLOK	B + Z + 3	11 x 19	209	1400	6,70
3. BLOK	B + Z + 3	15 x 52	780	5800	7,44
4. BLOK	B + Z + 3	11 x 25	275		0,00
5. BLOK	B + Z + 3	20 x 65	1300	12900	9,92
6. BLOK	B + Z + 3	12 x 26	312	3550	11,38
7. BLOK	B + Z + 3	21 x 65	1365	11700	8,57
8. BLOK		15 x 19	285	1130	3,96
9. BLOK	B + Z + 1	24 x 56	1344	7300	5,43
10. BLOK	B + Z + 1	11 x 16	176	1130	6,42
11. BLOK	B + Z + 1	23 x 57	1311	7450	5,68
12. BLOK	B + Z + 1	22 x 27	594	4120	6,94
13. BLOK	B + Z + 1	15 x 22	330	2500	7,58
14. BLOK	B + Z + 1	6 x 60	360	1250	3,47

Zemin etüt raporunda emniyetli taşıma gücü  $q_a = 75\text{kPa}$  olarak verilmekte ve alanda sıvılaşıma potansiyelinin olduğu belirtilmektedir.

Kum üzerine oturan radye temellerin emniyetli taşıma gücü, SPT sayısına dayalı (Mayerhof, 1956)

$$q_{\text{net}} = 7,99 N \left( \frac{3,28 B + 1}{3,28 B} \right) \quad (5.23)$$

eşitliği ile belirlenebilmektedir. SPT darbe sayısı gevsek - orta sıkı bölgelerdeki SPT sayıları dikkate alınarak  $N = 10$  ve  $B = 25\text{m}$  olarak alınması durumunda emniyetli taşıma gücü;

$$q_a = 81,86 \text{ kPa} = 0,82 \text{ kg/cm}^2$$

olarak belirlenmektedir. Temel zeminine aktarılacak ortalama taban basınçlarına göre taşıma gücü için yeterli güvenliğin sağlanamadığı görülmektedir. Sıvılaştırma riskinin önlenmesinin yanı sıra taşıma gücü ve oturma kriterlerindeki iyileştirilmesi için jet grout kolonlu zemin iyileştirmenin yapılması uygun olacaktır.

İnşaat alanı, Deprem Bölgesi Haritasında 1. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik uyarınca alınması önerilen parametreler aşağıdaki Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

Deprem Bölgesi	1
Zemin Grubu (Afet Yönetmeliği)	C
Yerel Zemin Sınıfı	Z3
Etkin İvme Katsayısı	$A_0 = 0,40$
Spektrum Karakteristik Peryotları	$T_A = 0,15, T_B = 0,60$
Bina Önem Katsayısı	1,5

Jet grout (JG) kolonlu zemin iyileştirme yönteminde önce kolon alt kotuna kadar hidrolik su basıncı uygulanarak enjeksiyon tijleri indirilmektedir. Daha sonra zemin ortamına yüksek basınç altında su – çimento karışımı enjekte edilerek tijler döndürülerek zemin yüzeyine doğru çekilmektedir. Bu sayede zeminde yaklaşık daire kesitli kolonlar oluşturulmakta, kohezyon ve yüksek basınç mukavemeti kazandırılmaktadır. Zemin iyileştirme öncesi durumuna göre daha rijit olmakta, taşıma gücü artmakta muhtemel oturmalar azalmaktadır. Deprem esnasında oluşacak kayma gerilmelerinin bir kısmı JG kolonlar tarafından karşılanacağı için zemini sıvılaştırıran veya yumuşatan tekrarlı kayma gerilmesi oranı düşmektedir.

İnceleme alanında temel zemininin siltli kum olması göz önüne alınarak inşası planlanan tüm bloklar alan için aynı zemin ve jet grout parametrelerinin kullanılmasına karar verilmektedir. Zeminin ortalama birim hacim ağırlığı  $1,85 \text{ t/m}^3$  alınabilmektedir. Uygulama için seçilen JG kolonun özellikleri aşağıda verilmektedir.

**Kolon Özellikleri:**

İmalat Yöntemi	: Jet I
Kolon Çapı	: 80cm
Kolon Boyu	: 13m
Eksenler arası mesafe	: 2,5m
Hedeflenen basınç dayanımı	: 2Mpa

Temel tabanının doğal zemin kotundan yaklaşık 2m aşağıda olduğu göz önüne alındığında temel zemininde 15 - 16m derinliğe kadar bir iyileştirme yapılacak, JG kolon alt uçları SPT sayısı + 50 olan kumlu tabakaya oturacaktır.

Analizlerde tahkik edilecek JG yerleşim düzeni 80cm çapında ve 2,5m x 2,5m aralıklarla tekil kolon uygulamaları şeklindedir. JG kolonun hedeflenen basınç dayanımı 2MPa (200t/m<sup>2</sup>) olarak belirlenmiştir. Bu basınç dayanımına karşı JG kolonun elastisite (E<sub>JG</sub>) ve kayma (G<sub>JG</sub>) modülleri;

$$E_{JG} = 4730 \times \sqrt{2} = 6689,23\text{MPa}$$
$$G_{JG} = \frac{6689,23}{2 \times (1 + 0,5)} = 2229,74\text{MPa}$$

SPT sayına (N=10) bağlı olarak zeminin kayma hızı (Ohta ve Goto, 1978);

$$V_s = 62,14 \times 10^{0,219} \times 13^{0,23} \times 1,091 = 202,49\text{m/s}$$

Bu durumda zeminin maksimum kayma modülü;

$$G_s = 1,85 \times 202,49^2 = 75854\text{MPa}$$

olarak alınabilmektedir. Kayma modülü ve birim alan oranları;

$$G_r = 2229,74 / 75,85 = 29,39 \cong 29,00$$
$$a_r = 0,50 / (2,5 \times 2,5) = 0,08$$

Buradan Şekil 5.8 yardımıyla %8 alan değişim oranı ve kayma modülü oranı 29'e karşılık gelen çevrimsel gerilim azalım oranı ( $S_R$ ) 0,30 mertebesinde beklenmektedir. Bu durumda özet olarak depremden doğan zemin kayma gerilmelerinin %70'inin 'Jet Grout' kolonlarda yoğunlaşacağı ve ancak %30'unun kolonlar arası zemine aktarılacağı sonucu çıkmaktadır.

Deprem durumunda sıvılaşmanın görülebileceği 11m derinlikte düzeltilmiş SPT sayısı  $N_{160} = 18$ , ortalama ince malzeme oranı %15 olarak belirlenmiştir. Bu durumda çevrimsel gerilme oranının;

$$CSR = 0,39$$

Şekil 5.4 yardımıyla çevrimsel mukavemet oranının ise;

$$CRR = 0,25$$

mertebesinde olması beklenilmektedir. Bu durumda JG kolon uygulaması öncesi sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı;

$$F_s = 0,25 / 0,390 = 0,65 < 1,00$$

(Sıvılaşma riski var) olarak belirlenmiştir. JG kolon uygulaması sonucunda deprem esnasında zeminde oluşacak çevrimsel kayma gerilmesi oranı;

$$CSR^* = 0,30 \times 0,390 = 0,117$$

değerine düşecektir. JG kolonlu uygulama sonrası sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı;

$$F_s = 0,250 / 0,117 = 2,140 > 1,0$$

olduğundan sıvılaşma riskinin bulunmadığı anlaşılmaktadır. Sıvılaşma riski olan 5m derinlikte ise;

$$N_{160} = 14$$

$$CSR^* = 0,35 \times 0,30 = 0,105$$

$$CRR = 0,150$$

$$F_s = 1,43$$

olarak belirlenmiştir. Genel olarak JG kolonlu zemin iyileştirmesinin sivilaşmaya karşı güvenliği sağladığı belirlenmektedir.

JG kolonlu zemin iyileştirme projesi ile temel zeminindeki sivilaşma, taşıma gücü ve oturma yönünden iyileştirmeler sağlandığı belirlenmiştir. Zemin özelliklerinin değişmemesi nedeniyle kolonlar için 80cm çapında ve 13m boyunda JG kolonların 2,5 x 2,5m karelajla oluşturulması önerilmektedir. Yapı temelleri ile JG kolonları arasında 30cm kalınlıklı kontrollü stabilize dolgu tabakasının oluşturulması ve %95 modifiye rölatif kompaksiyonu sağlaması önerilmektedir.

## 6. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZLER

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, kuramsal incelemelerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, sayısal çözüm yöntemlerinden en efektif ve sistematik olanıdır. Bu yöntemde, sürekli ortamlardan oluşan sistemler üzerinde, sonlu eleman ağı ile hayali düğümler oluşturulur. Düğümlerde denge, süreklilik ve uygunluk şartları ile eleman rijitlik ve kütle matrisleri ve yük vektörleri ile oluşturulur. Kodlama tekniği ile sistem kütle ve rijitlik matrisleri oluşturularak, sistem hareket denklemleri elde edilir. Sistem hareket denklemleri ise, uygun bir yöntemle çözülerek deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanır. Sonlu elemanlar yönteminde, ağ modelindeki her eleman komşusu olan diğer elemanlara gerçekte sonsuz sayıda nokta ile bağlı olmasına rağmen bu yöntemde sadece düğüm noktaları vasıtasıyla bağlanır. Böylece deplasmanların uygunluğunun sadece bu noktalarda sağlanması yeterli olacaktır. Yöntemin sistematikliği ve her türlü yapıya aynı işlemlerle uygulanması en önemli avantajlarındanır.

İşlem hacminin büyümesi dezavantaj olarak görünse de bu olumsuzluk bilgisayar yardımı ile aşılmaktadır. Son yıllarda, yeterli hassasiyette sonuçlar veren ve bu tez kapsamında da kullanılan Plaxis gibi sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir çok hazır paket program mevcuttur.

Plaxis (Finite Element for Soil and Rock Analysis) geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve stabilite problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. İlk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknik Üniversitesi tarafından yumuşak zemin üzerindeki nehir dolgularının sonlu elemanlar yöntemi ile kolay bir şekilde analiz edilebilmesi için tasarlanmıştır. Sonraki yıllarda ise, geoteknik mühendisliğinin diğer uygulama alanlarını da kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

Bu bölümde jet grouting uygulamalarının sonlu elemanlar yöntemi (Plaxis) ile sayısal analizi çeşitli örnekler ile incelenmiştir.

İlk iki örnekte, kullanılan yapısal elemanların, bu elemanların boyutlarının, doğrultularının ve öngerme kuvvetlerinin sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Ayrıca

Plaxis programındaki ağ ve ara yüzey elemanının analiz sonuçlarına etkisi irdelenmiştir.

Üç boyutlu Plaxis (Plaxis 3D) programında geniş bir alandaki kolonların her birininin ayrı ayrı modellenmesi oldukça uzun ve zahmetli bir çalışma gerektirdiği için bu programın pratikte kullanılması çok güçtür. Bu yüzden doğal zemin ve kolonlardan oluşan yapıyı tek bir malzeme haline getirip iki boyutlu Plaxis (Plaxis 2D) programında tanımlamak, bu problemlerin çözümünü oldukça kolaylaştırır. Üçüncü örnekte çimento katkılı kolonlar ile iyileştirilmiş, kompozit yapıdaki zeminlerde homojenleştirme metodu incelenmiştir.

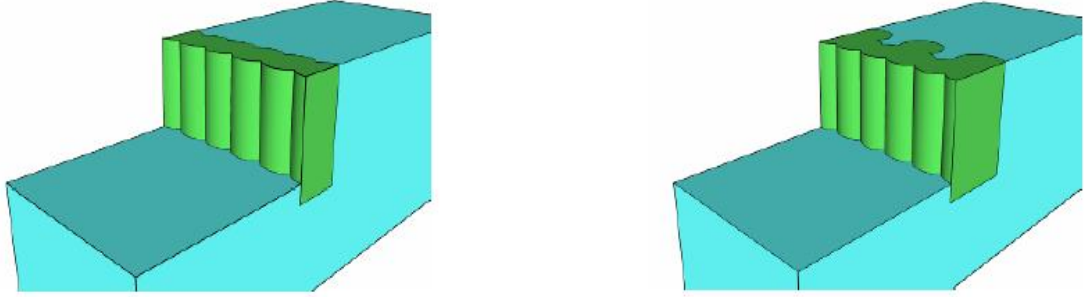
Dördüncü örnekte inşaatı planlanan 33m ve 15m çapında tank temelleri altındaki temel zemininin jet grouting yöntemi ile iyileştirme analizleri yapılmıştır. Öncelikle mevcut zeminin taşıma gücü ve oturma bakımından yetersiz olduğu klasik taşıma gücü ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda ispatlanmıştır. Sonrasında jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zeminlerin taşıma gücü ve oturma değerleri klasik taşıma gücü yöntemi ve FEM analizleri kullanılarak hesaplanmıştır. FEM analizinde, taşıma gücü ve oturma hesaplarında tek bir kolon ve çevresinin esas alındığı birim hücre metodu kullanılmıştır. Hesaplama sonucunda jet grouting yöntemi kullanılması sonucunda temel zemininin taşıma gücü ve oturma bakımından istenilen seviyeye ulaştığı görülmüştür.

### **6.1. Jet Grouting Yöntemi ile Yapılan Dayanım Duvarlarının Sayısal Analizi**

Jet grouting yöntemi ile yapılan dayanım duvarları diyafram duvarlar ve palplanşlar için bir alternatif bir çözüm oluşturmaktadır. Bu imalat dairesel kolonların sürekli biçimde birbirini keserek yapılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Eğer ilk sırada oluşturulan elemanların kalınlığı ihtiyaç duyulan duvar kalınlığından düşük ise duvar kalınlığını artırmak için ikinci sıra jet grout kolonu imal edilebilmektedir. İkinci sıra jet grouting imalatı yapılırken aradaki bazı kolonlar atlanabilmektedir. Bu geometride yapılan duvarlardaki ikinci sırada inşa edilen kolonlar destek görevi görmekte ve bu duvarlara destekli duvar adı verilmektedir. Tek sıra jet grout



elemanlarıyla yapılan ve ikinci sırada destek kullanılan duvar geometrileri duvarlar Şekil 6.1’de gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Klasik Dayanım Duvarı (Solda) ve Destekli Duvar (Sağda) Şeması

Jet grout elemanlarıyla yapılan dayanım duvarları ankrajsız imal edildiğinde ağırlık duvarı, ankrajlı imal edildiğinde ise kompozit dayanım duvarları olarak sınıflandırılabilir.

Bu bölümde, jet grout kolonlarının dayanım duvarı olarak kullanılması incelenmiştir. Analizlerde sürekli birbirini kesen, klasik geometrilerdeki jet grouting yöntemi ile imal edilmiş dayanım duvarı ele alınmıştır (Racansky vd., 2008).

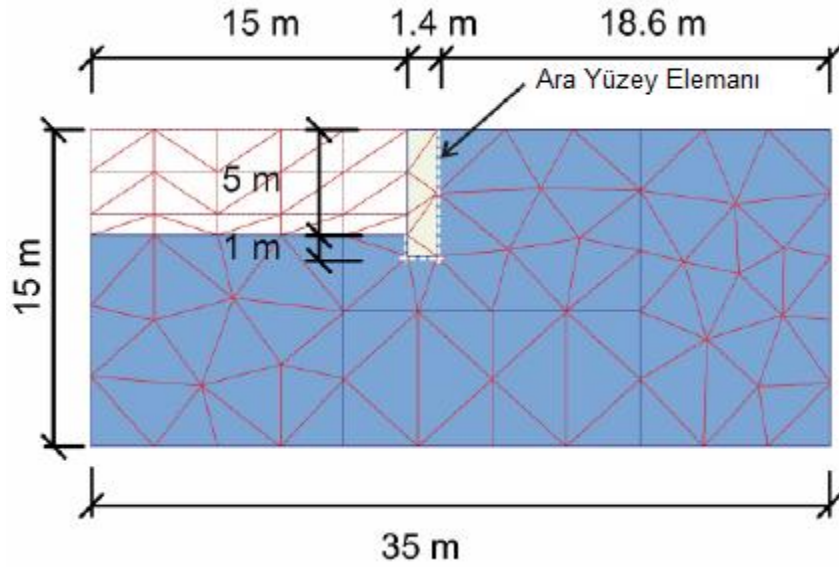
Çalışmanın ilk bölümde analizler iki boyutlu olarak düzlem deformasyon koşullarda Plaxis programı ile yapılmıştır. Ara yüzey elemanı ve ağ boyutunun sonuçlar üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

İkinci bölümde, yine farklı ağ boyutlarında, destekli ve desteksiz duvarların analizleri Plaxis 3D programı kullanılarak yapılmıştır. Ağ boyutu ve duvar kalınlığı etkisinin dışında, destekler arasındaki mesafelerin de sonuçlar üstündeki etkisi araştırılmıştır. Üç boyutlu analizlerin yapılmasının sebebi ikinci sıra jet grout elemanları ile farklı aralık mesafelerinde yapılan desteklerin Plaxis 2D programı ile modellenememesidir. Ayrıca desteksiz duvarlar üzerinde yapılan üç boyutlu analizlerden elde edilen sonuçlar birinci bölümde yapılan iki boyutlu analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Üçüncü bölümde ise daha küçük ebatlarda fakat ankraj takviyeli dayanım duvarları için iki boyutlu analizler yapılmıştır. Elde edilen deformasyon ve güvenlik

sayısı sonuçları, büyük ebatlarda fakat ankrajsız modellenen duvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Dayanım duvarı geometrisi Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Dayanım Duvarı Geometrisi (Racansky vd., 2008)

Dayanım duvarının tutacağı zemin yüksekliği 5m, duvar gömülme derinliği 1m'dir. Duvar kalınlığı ise 1,4m olarak alınmaktadır. Modelde yer altı suyu bulunmamaktadır. Doğal zemin ve jet groutlu zemin için malzeme parametreleri Çizelge 6.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Malzeme Özellikleri (Racansky vd., 2008)

Malzeme	Tip	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_{50}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	power (m) [-]	$C_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\emptyset$ [°]
Silt	(HS) <sup>1</sup> drenajlı	18,5	20000	20000	0,75	5	27,5
Jet Grout	(MC) <sup>2</sup> drenajlı	19,5	-	-	-	910	27,5
Malzeme	$\psi$ [°]	$E_{ur}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$v_{ur}^{(nu)}$ [-]	$p^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$R_f$ [-]	$T_{cut-off}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	
Silt	0	60000	0,2	100	0,9	-	
Jet Grout	0	1500000	0,15	-	-	300	

<sup>1</sup> Hardening Soil Model (Brinkgreve, 2002)

<sup>2</sup> Mohr - Coulomb Model (Brinkgreve, 2002)

İki boyutlu düzlem deformasyon koşullarda gerçekleştirilen analizlerde ilk olarak ağ boyutunun sonuçlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Ayrıca ara yüzeylerin ve farklı eleman tiplerinin (6 düğümlü – 15 düğümlü) etkileri değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda farklı ağ tipleri oluşturulmuştur. Her ağ tipi için aşağıda sıralanan dört farklı hesaplama uygulanmıştır.

- Duvar çevresinde ara yüzeysiz 6 düğümlü eleman,
- Duvar çevresinde ara yüzeyli 6 düğümlü eleman,
- Duvar çevresinde ara yüzeysiz 15 düğümlü eleman,
- Duvar çevresinde ara yüzeyli 15 düğümlü eleman.

Kalınlığı 1,4m olan duvarda farklı ağ ve eleman tiplerinde ara yüzeyli ve ara yüzeysiz, 2,8m olan duvarda ise sadece farklı ağ ve eleman tiplerinde ara yüzeysiz analizler yapılmıştır.

Hesaplamalar üç aşamada yapılmıştır. İlk aşama jet grout elemanının imalatı, ikinci aşama kazı ve üçüncü aşama ise güvenlik faktörünün belirlenmesi olarak tanımlanabilmektedir.

Uygulanan yirmi dört farklı modelin karakteristikleri Çizelge 6.2, 6.3 ve 6.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. Ara Yüzeysiz Modellemelerin Ağ Özellikleri (S =2,8m)

Ağ Tipi	Ara Yüzeysiz Analiz (S = 2,8m)				
	Duvar Kalınlığı (m)	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	
				6 Düğüm	15 Düğüm
1	2,8	1,780	165	366	1391
2	2,8	1,380	275	598	2295
3	2,8	0,991	535	1134	4407
4	2,8	0,726	997	2084	8155

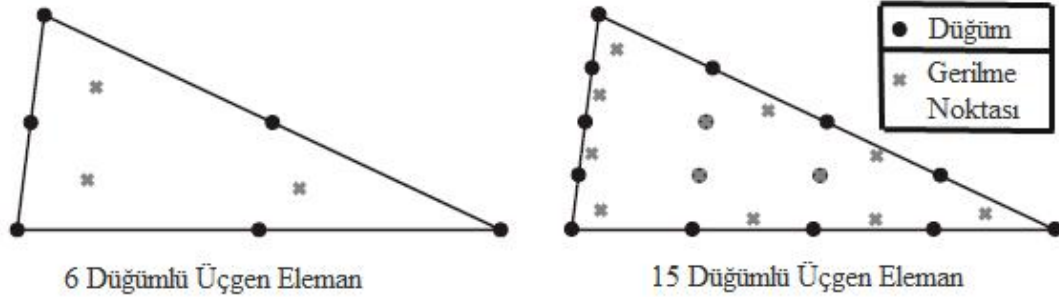
Çizelge 6.3. Ara Yüzeysiz Modellemelerin Ağ Özellikleri (S =1,4m)

Ağ Tipi	Ara Yüzeysiz Analiz (S = 1,4m)				
	Duvar Kalınlığı (m)	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	
				6 Düğüm	15 Düğüm
1	1,4	1,780	165	366	1391
2	1,4	1,380	275	598	2295
3	1,4	0,991	535	1134	4407
4	1,4	0,726	997	2084	8155

Çizelge 6.4. Ara Yüzeyle Modellemelerin Ağ Özellikleri (S = 1,4m)

Ağ Tipi	Ara Yüzeyle Analiz (S = 1,4m)				
	Duvar Kalınlığı (m)	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	
				6 Düğüm	15 Düğüm
1	1,4	1,780	165	387	1432
2	1,4	1,350	286	648	2438
3	1,4	0,915	627	1357	5220
4	1,4	0,625	1345	2837	11052

Toplam gerilme noktası ve düğüm sayısı eşit olduğu takdirde 15 düğümlü eleman, dört 6 düğümlü elemanın bileşimi olarak düşünülebilmektedir (Şekil 6.3). Buna rağmen 15 düğümlü elemanlı analizler, 6 düğümlü analizlere göre daha hassas sonuçlar vermektedir (Brinkgreve, 2002).

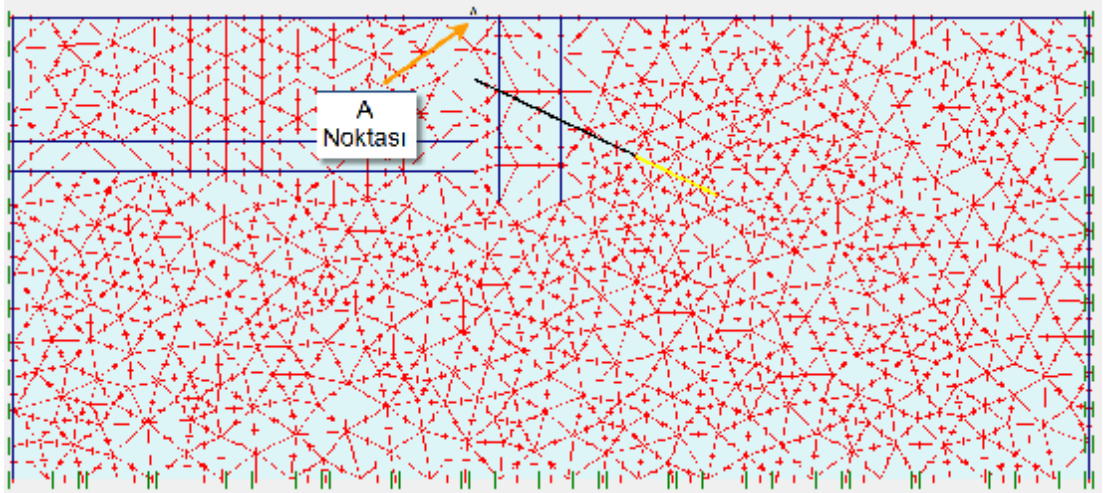


Şekil 6.3. 2D Analiz için Düğüm ve Gerilme Noktaları Yerleşimi (Racansky vd., 2008)

Ara yüzey elemanları zemin – yapı etkileşimini modellemek amacıyla kullanılmaktadır. Ara yüzey elemanları kullanıldığında zemin – yapı ara yüzeyindeki izafi hareketlere izin verilmektedir. Zemin – yapı ara yüzeyinde kuvvet azalmasının meydana gelmesi dikkate alınması gereken bir faktördür. Azalma faktörleri yapı yüzeyindeki pürüzlülüğe göre değişmektedir. Plaxis programında pürüzlülük,  $R_{inter}$  parametresi ile tanımlanmaktadır ve değeri 0,01 ile 1,0 arasında değişmektedir. Bu değer 1,0 olarak alınması ara yüzeyin tüm kuvvetinin modellendiği anlamına

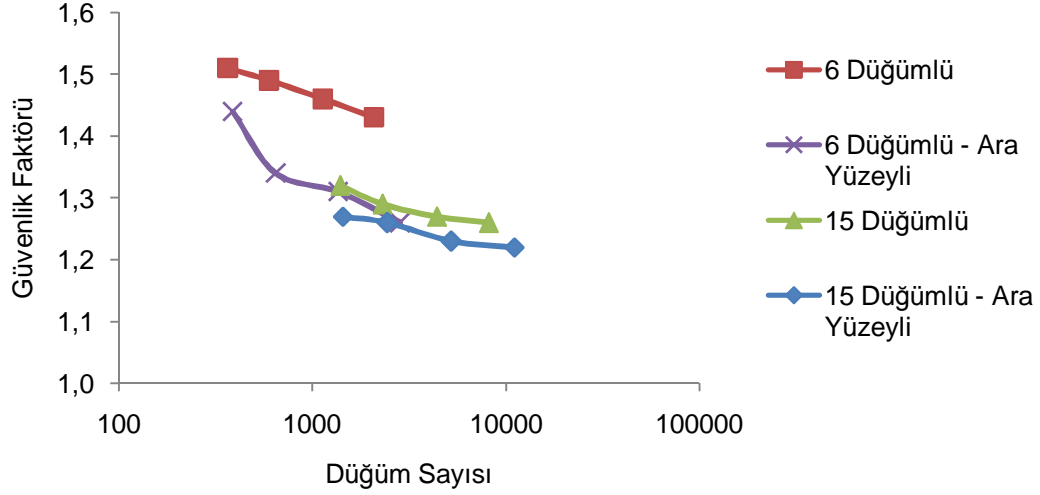
gelmektedir. Jet grouting ile yapılan duvarların yüzeyleri üretim esnasındaki jetting işleminden dolayı pürüzlü olmaktadır. Bu yüzden zemin – yapı etkileşim kuvvetini azaltmak için ara yüzey elemanı kullanımına gerek duyulmamaktadır veya ara yüzey elemanının kullanıldığı hesaplamaların tamamında  $R_{inter}$  değeri 1,0 olarak alınmaktadır. Bazı makale yazarları (Day & Potts (1994,1998), Langen & Vermeer (1991)) ara yüzey elemanları kullanılması halinde aynı isabetli sonuçların daha kaba ağ tipleri ile elde edilebildiğini vurguladıklarından dolayı çalışmada ara yüzey elemanları ile de analizler yapılmıştır.

Hesaplama duvarın en tepe noktasındaki yatay deformasyonlar incelenmek üzere A noktası seçilmiştir (Şekil 6.4). Karşılaştırmalardaki yatay deformasyon değerleri A noktasına ait değerlerdir.



Şekil 6.4. Deformasyon Değerlerinin İncelenmesi için Seçilen Nokta

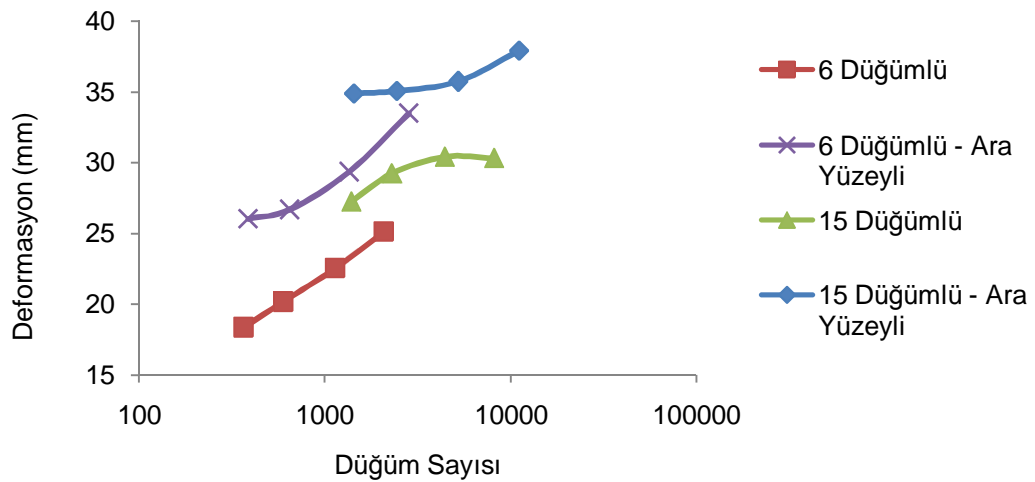
Şekil 6.5'te düğüm sayısının hesaplanan güvenlik faktörü üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Grafikten, ara yüzey elemanının kullanılmasının hesaplanan güvenlik faktörleri incelendiğinde ağ etkisini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu yüzden ara yüzey elemanlarının kullanımı önerilmektedir. Güvenlik faktörü hesaplamalarında yeterince sıkı ağ tipleri kullanıldığında benzer değerlere ulaşılmaktadır.



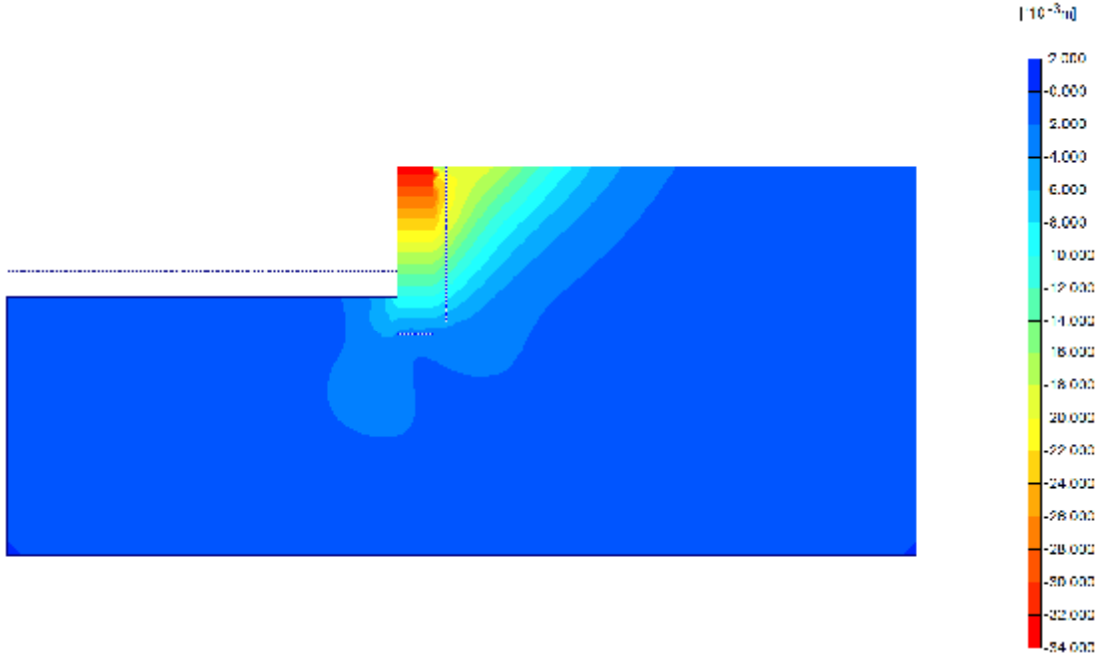
Şekil 6.5. Düğüm Sayısı - Güvenlik Faktörü Grafiği (Duvar Kalınlığı = S = 1,40m)

Kazı sonrası A noktasında hesaplanan yatay deformasyon sonuçları Şekil 6.6'da gösterilmekte ve sonuçlardan hesaplamada ağ etkisi olduğu görülmektedir. 15 düğümlü ve ara yüzeyle modeller, ağ etkisinin en az olduğu, yani en isabetli sonuçları vermektedir.

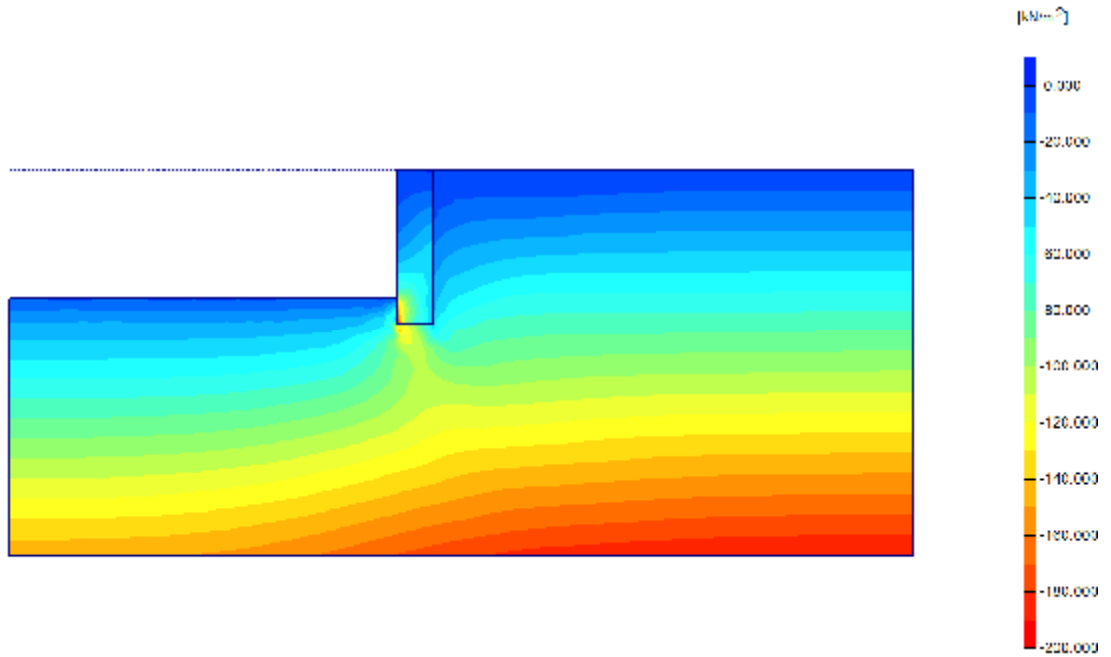
Sıkı ağ limitlerine yaklaşıldıkça ağ etkisi daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 6.6. Düğüm Sayısı - Yatay Deformasyon Grafiği (Duvar Kalınlığı = S = 1,40m)



Şekil 6.7. 6 Düğümlü Ara Yüzeysiz (Ankrajsız) Modellemede Deformasyon Dağılımı (Ağ Tipi 4)



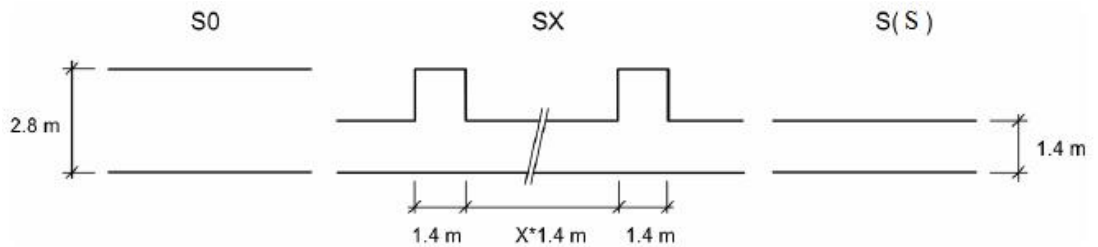
Şekil 6.8. 6 Düğümlü Ara Yüzeysiz (Ankrajsız) Modellemede Gerilme Dağılımı (Ağ Tipi 4)



Şekil 6.7’de duvardaki yatay deformasyon dağılımı görülmektedir. Şekilden, en yüksek deformasyonlar değerlerinin olduğu bölgenin duvarın tepe noktası olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi devrilme tahkiklerinde moment alınan noktaya en uzak noktanın duvarın tepe noktası olması ve duvarın rijit bir yapıda olmasından dolayı devrilme yönüne doğru yekpare bir biçimde hareket etmesidir.

Şekil 6.8’e bakıldığında ise duvarda en fazla gerilmeye maruz kalan bölgenin, duvarın kazı yapılan taraftaki dip köşesi olduğu görülmektedir. Bunun sebebi devrilmenin bu noktadan gerçekleşecek olmasıdır. Ağırılık duvarlarında devrilme tahkiki, deviren ve karşı koyan kuvvetler ile bu noktaya moment alınması ile hesaplanmaktadır.

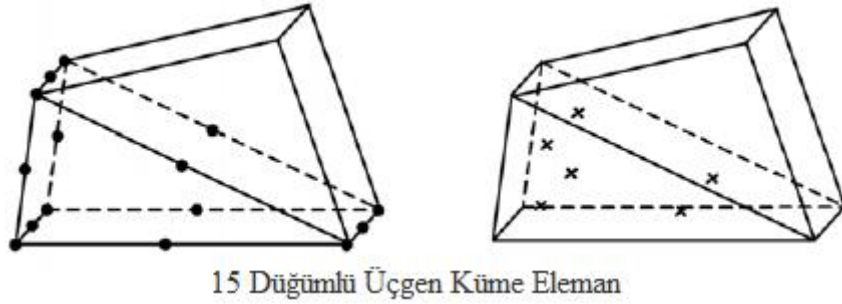
Üç boyutlu analizler Plaxis 3D Foundation programı ile yapılmıştır. Duvar kalınlığı destekler arasında kalan bölgede 1,4m, desteklerde ise 2,8m’dir. Destekler arasındaki mesafe değişkendir. Üç boyutlu analizlerde duvardan sınıra olan mesafe, iki boyutlu analizlerdeki mesafelerin aynıdır. Destekler arası farklı mesafelerin olduğu farklı geometrideki SX geometrisi olarak adlandırılan duvar planı Şekil 6.9’da gösterilmektedir. SX ifadesindeki S parametresi destekler arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. X parametresi ise destekler arasındaki mesafenin değişken hale gelmesini sağlayan çarpan olarak tanımlanmaktadır. S0 ifadesinde  $X = 0$  olduğu için duvar desteksiz ve kalınlığı 2,8m’dir. S(S) ifadesi destekler arası mesafenin sonsuz mesafe tanımının kısaltmasıdır. Bunun anlamı ise X parametresi sonsuz olduğundan dolayı, duvarın desteksiz ve kalınlığının 1,4m olmasıdır.



Şekil 6.9. Destekli Duvarların Geometri Ayarlaması

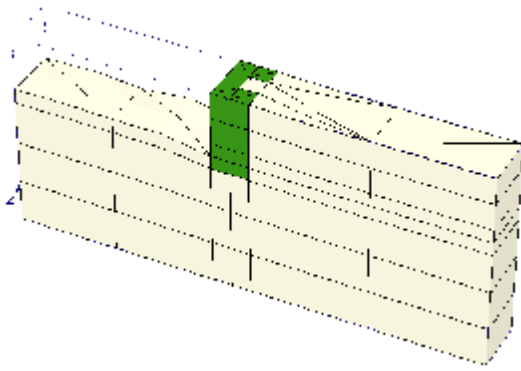
S(S) geometrisinin ebatları iki boyutlu analizdeki 1,4m kalınlığındaki duvar ebatları ile aynıdır. S0 geometrisinin ebatları ise iki boyutlu analizdeki kalınlığı 2,8m olan duvar ebatları ile aynıdır.

Üç boyutlu analizlerde 15 düğümlü üçgen küme elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 6.10). Bu elemanlar 6 düğümlü üçgen elemanlardan oluşmaktadır. Bu yüzden üç boyutlu analizler, 6 düğümlü iki boyutlu analizler ile karşılaştırılacaktır. Plaxis 3D programında ara yüzey elemanları, Plaxis 2D programındaki gibi analog yol ile tanımlanamamaktadır. Üç boyutlu analizlerde ara yüzey elemanını tanımlamak için plak elemanının kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden karşılaştırma için en uygun iki boyutlu analiz modeli 6 düğümlü ve duvar etrafında ara yüzey elemansız modeldir.

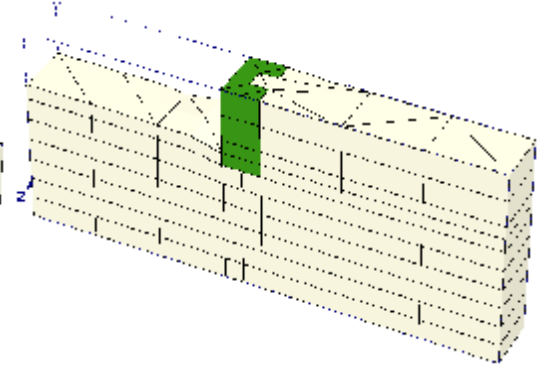


Şekil 6.10. 3D Analiz için Eleman (Solda) ve Gerilme Noktaları (Sağda) (Racansky vd., 2008)

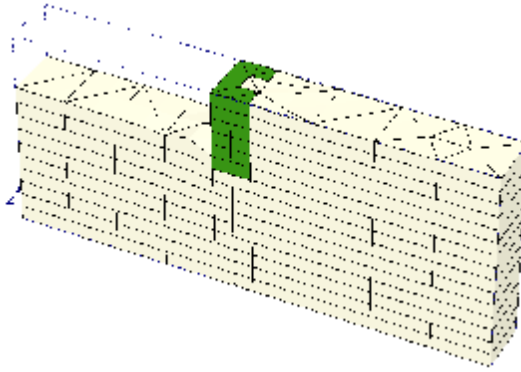
S1 geometrisi kullanılarak farklı ağ boyutlarındaki güvenlik faktörü belirlenmiştir. Farklı ağ tiplerindeki güvenlik faktörü sonuçları Çizelge 6.4'te, S1 geometrisi için beş farklı ağ tipi Plaxis 3D programı ile oluşturulan şemaları Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



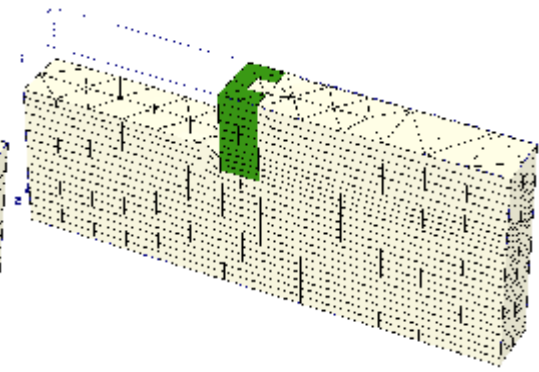
Ağ Tipi 1  
 Düğüm Sayısı :  
 Eleman Sayısı :  
 Ortalama Eleman Boyutu : 3,970m



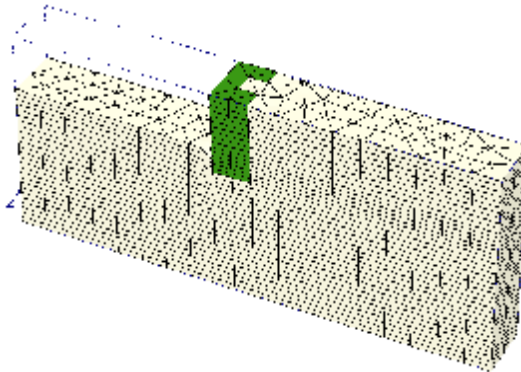
Ağ Tipi 2  
 Düğüm Sayısı :  
 Eleman Sayısı :  
 Ortalama Eleman Boyutu : 3,030m



Ağ Tipi 3  
 Düğüm Sayısı :  
 Eleman Sayısı :  
 Ortalama Eleman Boyutu : 2,140m



Ağ Tipi 4  
 Düğüm Sayısı :  
 Eleman Sayısı :  
 Ortalama Eleman Boyutu : 1,300m



Ağ Tipi 5  
 Düğüm Sayısı :  
 Eleman Sayısı :  
 Ortalama Eleman Boyutu : 0,692m

Şekil 6.11. S1 Geometrisi için Farklı Ağ Tiplerinin Şemaları (Plaxis 3D)

Çizelge 6.5. Farklı Ağ Tiplerindeki Güvenlik Faktörü Değerleri

Hesaplama No	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Ağ Tipi	Güvenlik Faktörü		
			S(S)	S1	S0
1	3,970	1	2,13	2,66	2,71
2	3,030	2	1,70	2,19	2,21
3	2,140	3	1,53	2,00	2,01
4	1,300	4	1,43	1,81	1,81
5	0,692	5	1,38	1,73	1,74
ref. 2D	0,726		1,43		1,75

SX geometrisinin farklı destek aralıklarında, S(S) ve S0 geometrilerindeki duvarların ise farklı uzunlukları için yapılan analizlerde hesaplanan güvenlik katsayısı ve yatay deformasyon değerleri Çizelge 6.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.6. Güvenlik Faktörü ve Yatay Deformasyon Değerleri

Duvar Tipi	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Güvenlik Faktörü			Yatay Deformasyon (mm)		
		S(S) <sup>1</sup>	SX <sup>2</sup>	S0 <sup>3</sup>	S(S) <sup>1</sup>	SX <sup>2</sup>	S0 <sup>3</sup>
S1	0,692	1,38	1,73	1,74	20,03	7,91	7,68
S2	0,723	1,37	1,71	1,74	17,18	8,63	7,90
S3	0,731	1,41	1,71	1,74	19,72	9,18	7,56
S10	0,780	1,41	1,56	1,74	19,25	13,37	7,33
S15	0,849	1,42	1,55	1,76	18,64	14,21	7,22
ref. 2D <sup>4</sup>	0,726	1,43		1,75	25,12		7,50

<sup>1</sup> S(S) geometrisi iki boyutlu analizde kalınlığı 1,4m olan duvar geometrisi ile aynıdır.

<sup>2</sup> S0 geometrisi iki boyutlu analizde kalınlığı 2,8m olan duvar geometrisi ile aynıdır.

<sup>3</sup> SX ile farklı destek mesafelerinde modellenen geometriyi temsil etmektedir.

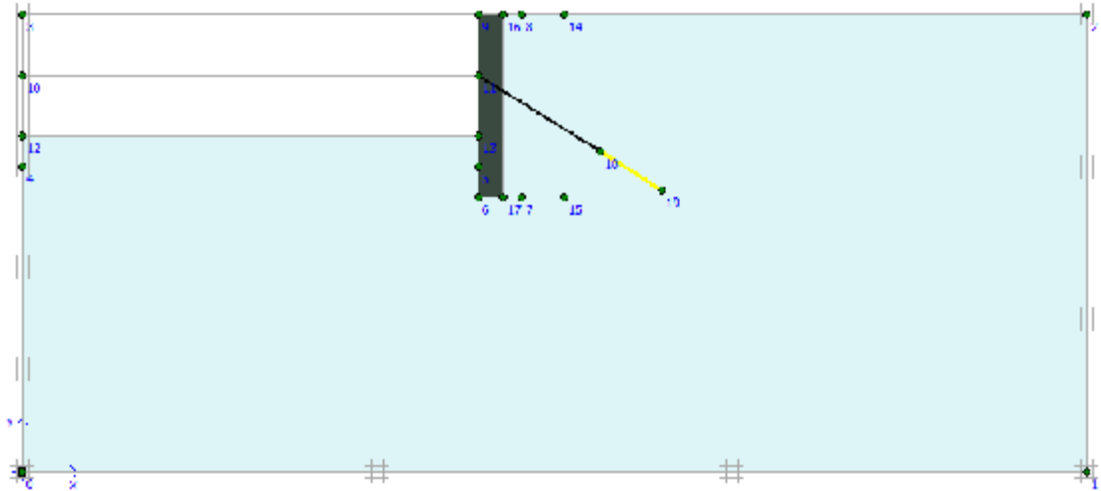
<sup>4</sup> 6 düğümlü, duvar etrafında ara yüzeyli model (ağ tipi 4) (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.6'da görüldüğü gibi destekler arası mesafe arttıkça hesaplanan güvenlik faktörü azalmaktadır. Aynı geometrik düzenlemede hesaplanan güvenlik faktörleri (S(S) ve S0) tüm analizlerde benzer sonuçlar elde edilmektedir.

Sonuçlardaki küçük ve önemsiz farklılıklar hesaplamalardaki ağ farklılıklarından meydana gelmektedir.

Beklendiği gibi destekler arası mesafe artıkça yatay deformasyon değerleri de artmıştır. Sonuçlarda dikkat edilmesi gereken diğer nokta ise, S0 duvarının uzunluğu artsa da yanal deformasyonunun değişmemesine rağmen, SX duvarındaki deformasyonların daha değişken olmasıdır. Bu değişkenliğin sebebi S(S) duvarının nihai sınıra daha yakın olması olarak açıklanabilmektedir. Bu yüzden duvar boyu değişimlerinde yanal deformasyonlar farklı sonuçlar verebilmektedir.

Şekil 6.12’de ankrajlı dayanım duvarı geometrisi gösterilmektedir. Modeldeki sınır mesafeleri diğer iki ve üç boyutlu model geometrileri ile aynıdır. Modelde ara yüzey elemanı kullanılmamaktadır. Bu hesaplamada ankraj kullanıldığından dolayı duvar kalınlığının 0,8m olarak alınması yeterli olmaktadır. Ankraj çakma derinliği 2m, uzunluğu 4,50m, çakma açısı ise  $32^\circ$ ’dir. Ankraj çubuğuna 150kN/m öngörme uygulanmaktadır. Ankrajın ucunda bulunan geogridin uzunluğu 2,5m’dir. Ankraj ve geogrid parametreleri Çizelge 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.12. Ankrajlı Dayanım Duvarı Geometrisi

Çizelge 6.7. Ankraj Parametreleri (Brinkgreve, 2002)

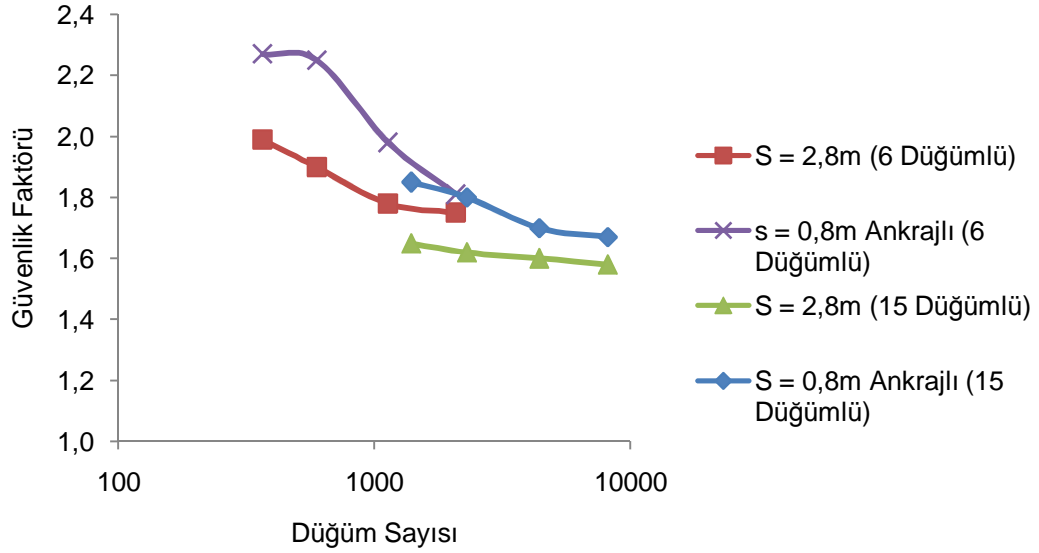
Malzeme	Tip	EA	$L_{spacing}$
		[kN/m <sup>2</sup> ]	[m]
Ankraj Çubuğu	Elastik	200000	2,5
Geogrid	Elastik	100000	-

Çalışmanın birinci bölümünde olduğu gibi ankrajlı duvar analizleri de farklı düğüm ve ağ tiplerinde uygulanmaktadır. Farklı ağ seçeneklerinde 6 düğümlü ve 15 düğümlü modellemelerin eleman ve düğüm sayıları ile birlikte bu sayılara göre hesaplanan yatay deformasyon ve güvenlik faktörü değerleri Çizelge 6.8'de gösterilmektedir.

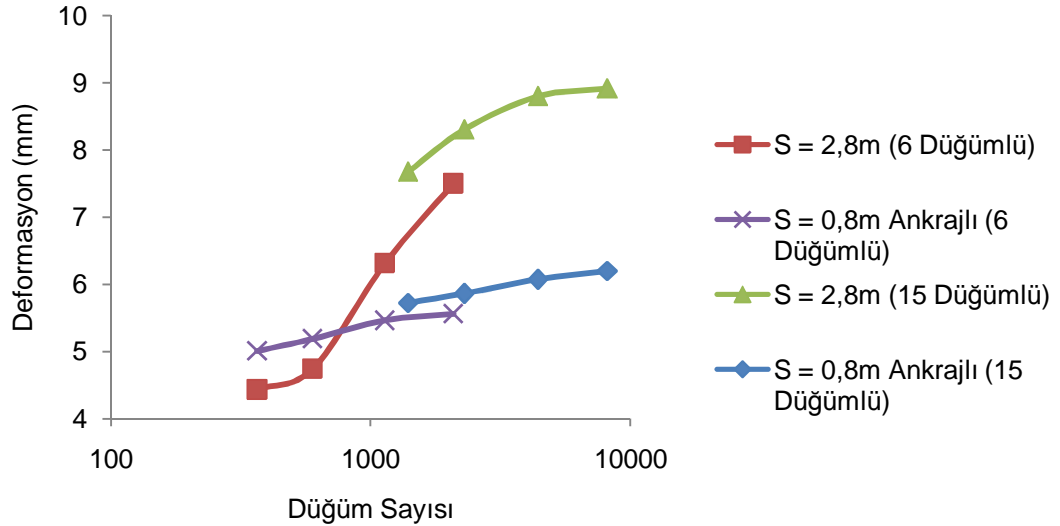
Çizelge 6.8. Güvenlik Faktörü ve Yatay Deformasyon Değerleri

Ankrajlı ve Ara Yüzeysiz Modelleme (S = 0,8m)					
Ağ Tipi	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Yatay Deformasyon	Güvenlik Faktörü
			[6]	[mm]	-
2	1,780	165	366	5,01	2,27
3	1,380	275	598	5,19	2,25
4	0,991	535	1134	5,46	1,98
5	0,726	997	2084	5,56	1,81
Ağ Tipi	Ortalama Eleman Boyutu (m)	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı	Yatay Deformasyon	Güvenlik Faktörü
			[15]	[mm]	-
2	1,780	165	1391	5,72	1,85
3	1,380	275	2295	5,86	1,80
4	0,991	535	4407	6,07	1,70
5	0,726	997	8155	6,20	1,67

0,8m kalınlığında ankrajlı dayanım duvarı için hesaplanan yatay deformasyonlar ve güvenlik faktörleri ile 2,8m kalınlığında ankrajsız dayanım duvarı yatay deformasyon ve güvenlik faktörleri Şekil 6.13 ve 6.14'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13. Düğüm Sayısı – Güvenlik Faktörü Grafiği



Şekil 6.14. Düğüm Sayısı – Deformasyon Grafiği

Grafiklerden de anlaşıldığı gibi dayanım duvarında ankraj kullanılması durumunda duvar boyutu önemli ölçüde küçültülebilmektedir. Yapılacak inşaat için

fizibilite çalışması aşamasında bu iki modelin irdelenmesi ve maliyet analizinin yapılması, ekonomi açısından oldukça büyük önem taşımaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta çalışmanın ilk bölümünde olduğu gibi hesaplamalardaki hassasiyetin sonuçlara yansımalarıdır. Hesaplamalardaki düğüm ve eleman sayısı arttıkça daha isabetli sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde ankrajsız dayanım duvarında iki boyutlu analizler uygulanarak farklı varsayımlar irdelenmiştir. Bunların sonucunda, ara yüzey elemanı kullanımının ağ etkisini azalttığı sonucuna varılmıştır. Yeterince hassas ağ tipleri kullanıldığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kaba ağ tiplerinde ise güvenlik faktörü ve yatay deformasyon sonuçlarında önemli farklılıklar meydana gelmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde destekli duvar analizleri yapılmıştır. Nümerik analiz sonuçları destek olarak adlandırılan aralıklı ikinci sıra jet grout elemanlarının efektif bir çözüm olabileceğini göstermiştir. Yine sonuçlardan görüleceği gibi destek aralıkları büyük olduğu takdirde bile (S10, S15) destekli duvarlar oldukça etkili sonuçlar vermiştir.

Üçüncü bölümde dayanım duvarına ankraj takviyesi yapılarak duvar kalınlığının azaltılması durumu diğer bölümlerde olduğu gibi farklı ağ seçeneklerinde irdelenmiştir. Analiz sonuçları 2,8m kalınlığında ankrajsız duvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Duvar kalınlığı 2m azaltılmasına rağmen ankraj kullanıldığı takdirde sonuçlarda aşırı bir farklılık gözlenmemiştir.

## 6.2. Derin Kazılarda Sayısal Analizler ile Destek Yapılarının Tasarımı

Bu çalışma, yer altına yapılacak otopark için temel çukuru temel kazısı ve mevcut bina temellerinin destek analizlerini içermektedir. Kazı sahasının uzunluğu 70m, genişliği 20m ve derinliği 7m'dir (Şekil 6.15). Analizler kazı alanının bir kenarında bulunan elemanlar için yapılmıştır. Hesap için gerekli parametreler zemin araştırması ile bulunmaktadır (Racansky vd., 2006).

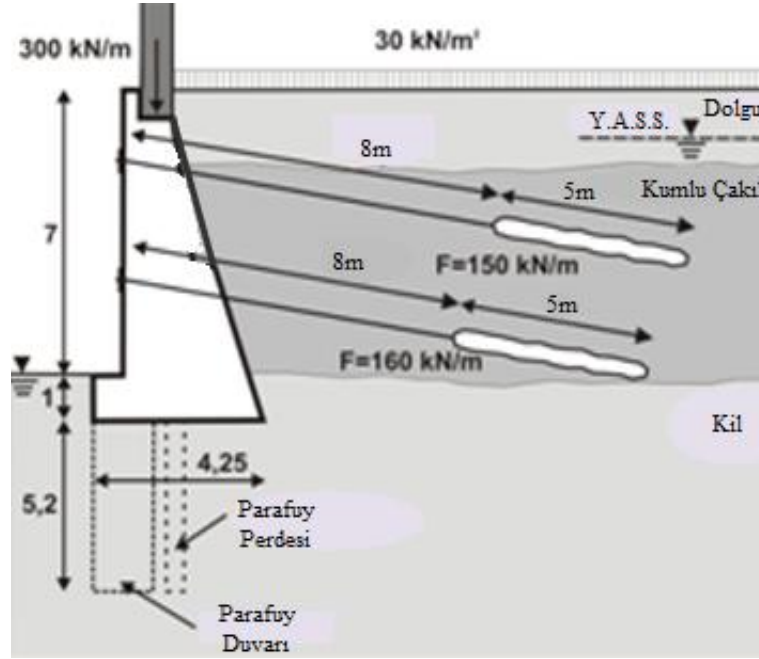




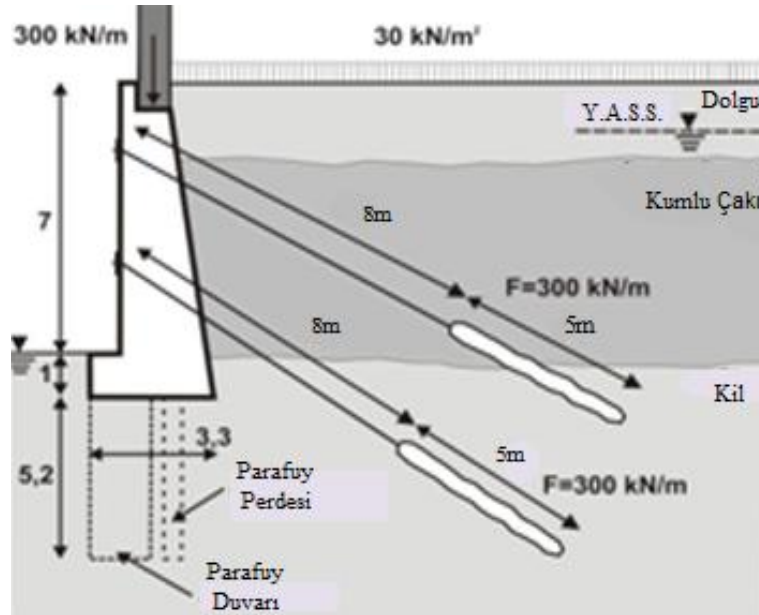
Şekil 6.15 Kazı Sahası Planı

Çalışmada kalın ve ince olmak üzere iki farklı geometride dayanım duvarı tasarlanmıştır. Geometrileri dışında duvarlardaki bir diğer fark ise ince duvarda kullanılan ankrajların açıları daha dik olarak ve daha fazla öngerme uygulanarak yerleştirilmesidir.

İlk bölümde iki farklı geometrideki duvar modeli için de, cut off duvarı veya cut off perdesinden biri kullanılarak ve her ikisi de kullanılmadan analizler yapılmıştır (Şekil 6.16 ve Şekil 6.17). Dayanım duvarlarına ilave olarak yapılacak cut off duvarı ya da perdesinin hesaplanan deformasyon ve güvenlik faktörüne etkisi incelenmiştir. İkinci bölümde ise kullanılan ankraj elemanları öngerme kuvvetlerinin yine hesaplanan deformasyon ve güvenlik faktörü değerlerine etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.16. Kalın Duvar Tipi

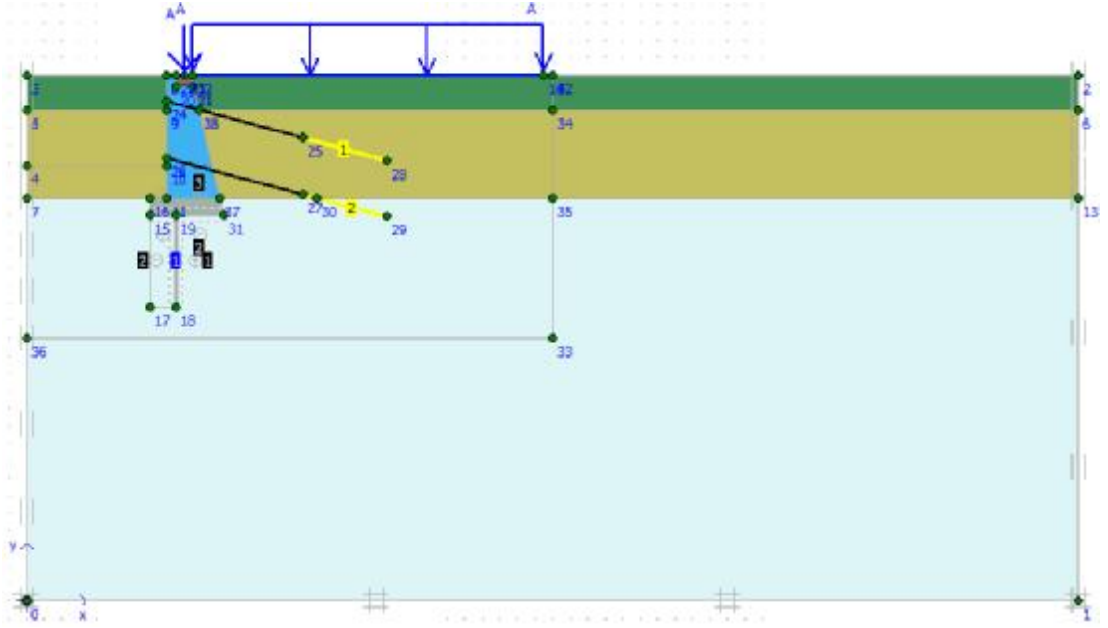


Şekil 6.17. İnce Duvar Tipi

Jet grouting yöntemiyle yapılacak olan dayanım duvarı, özellikleri kilde yapılan jet grout (JG) elemanı ile aynı ve 0,7 x 1,0m ebatlarında bulunan mevcut bina sürekli temelini altına inşa edilecektir. Analizlerde mevcut sürekli temel için lineer

elastik model tipi kullanılmıştır. Sürekli temelin dayanım duvarına uyguladığı kuvvet  $300\text{kN/m}$ , çevre binaların duvara uyguladığı sürşarj gerilmesi  $30\text{kN/m}^2$ 'dir. Yer altı su seviyesi zemin yüzeyinin  $2\text{m}$  aşağısında bulunmaktadır (Racansky vd., 2006).

Farklı geometriler ve farklı elemanların kullanıldığı yapının analizleri Plaxis programı ile yapılmıştır (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Model Geometrisi

Problemde farklı elastisite modülüne sahip iki tip jet grout elemanı tanımlanmıştır. Bunun sebebi JG elemanları özelliklerinin zemin tipinden oldukça fazla etkilenmesidir. JG ve zemin parametreleri Çizelge 6.9'da verilmektedir.

Çizelge 6.9. JG ve Zemin Parametreleri (Racansky vd., 2006)

Malzeme	Model	Zemin Tipi	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$k_x$	$k_y$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	
	-	-	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[m/gün]	[m/gün]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	
Kil	(HS) <sup>1</sup>	Drenajlı	21	21	0,007	0,007	7,50E+03	7,50E+03	
Dolgu	(HS) <sup>1</sup>	Drenajlı	18	20	1,000	1,000	1,50E+04	1,50E+04	
Kumlu Çakıl	(HS) <sup>1</sup>	Drenajlı	18	21	1,420	1,420	4,00E+04	3,99E+04	
Temel	(LE) <sup>2</sup>	Drenajlı	22	22	0,000	0,000	-	-	
JG (kumlu çakıl)	(MC) <sup>3</sup>	Drenajlı	22	22	0,000	0,000	-	-	
JG (kil)	(MC) <sup>3</sup>	Drenajlı	22	22	0,000	0,000	-	-	
Malzeme	power	$c_{ref}$	$\phi$	$\psi$	$E_{ur}^{ref}$	$v_{ur}^{(nu)}$	$p^{ref}$	$R_f$	$T_{cut-off}$
	[m]	[kN/m <sup>2</sup> ]	°	°	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	[kN/m <sup>2</sup> ]
Kil	0,9	15	25	0	3,00E+04	0,2	100	9,00E-01	-
Dolgu	0,7	3	30	0	6,00E+04	0,2	100	9,00E-01	-
Kumlu Çakıl	0,5	0,5	35	3	1,60E+05	0,2	100	9,00E-01	-
Temel	-	-	-	-	5,00E+06	0,2	-	-	-
JG (kumlu çakıl)	-	1000	35	0	2,00E+07	0,2	-	-	250
JG (kil)	-	250	25	0	5,00E+06	0,2	-	-	62,5

<sup>1</sup> Hardening Soil Model, reference Brinkgreve (2002)

<sup>2</sup> Mohr Coulomb Model, reference Brinkgreve (2002)

<sup>3</sup> Linear Elastic Model, reference Brinkgreve (2002)

Plaxis programı, elemanların maksimum çekme dayanımları manuel olarak girilmesine izin vermektedir. Bu çalışmada JG elemanlarının maksimum çekme dayanımları serbest basınç dayanımlarının 1/8'i olarak tanımlanmıştır.

Plaxis programında cut off perdesi plak elemanı olarak tanımlanmıştır. Cut off perdesinin özellikleri aşağıda verilmektedir (Racansky vd., 2006).

### Cut Off Perdesi

EA	: $1 \times 10^6$ kN/m
EI	: 3333,30 kNm <sup>2</sup> /m
d	: 0,20m
w	: 4,4 kN/m/m
v	: 0,20

Modellemede her iki duvar tipindeki ankraj uzunlukları 8m, geogrid uzunlukları ise 5m'dir. Kalın duvar tipindeki ankraj saplanma açıları  $15^\circ$ , ince duvar tipinde ise  $30^\circ$ 'dir. Hesaplamalarda kullanılan ankraj ve geogrid özellikleri aşağıda gösterilmektedir.

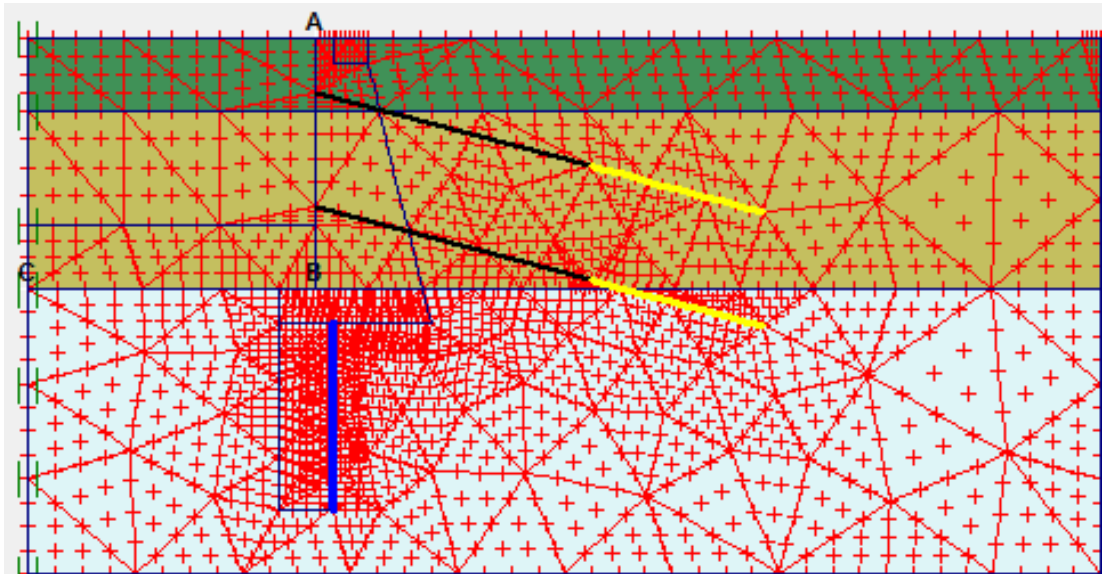
### Ankraj

EA	: $3 \times 10^4$ kN/m
----	------------------------

### Geogrid

EA	: $3 \times 10^5$ kN/m
----	------------------------

Modellerde üç farklı nokta seçilmiştir. A noktası duvarın en üst noktasını, B noktası kazı tabanı ile duvarın kesiştiği noktayı, C noktası ise kazı tabanının orta noktasını temsil etmektedir. Her bir analizde bu noktalarındaki düşey - yatay deformasyonlar ve güvenlik faktörleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. Deformasyon Değerlerinin İncelenmesi için Seçilen Noktalar

Plaxis programı ile hesaplama sekiz aşamada yapılmıştır. Bu aşamalar aşağıda gösterilmiştir.

1. Aşama : Mevcut yüklerin ve temelin aktivasyonu
2. Aşama : Jet grout elemanların aktivasyonu
3. Aşama : Birinci kademe kazı yapılması (- 2m)
4. Aşama : Birinci ankrajın yüklenme ve öngermesi
5. Aşama : İkinci kademe kazı yapılması ve YASS'nin kazı seviyesine indirilmesi (- 5,2m)
6. Aşama : İkinci ankrajın yüklenme ve öngermesi
7. Aşama : Üçüncü kademe kazı yapılması ve YASS'nin kazı seviyesine indirilmesi (- 7m)
8. Aşama : Güvenlik faktörünün hesaplanması

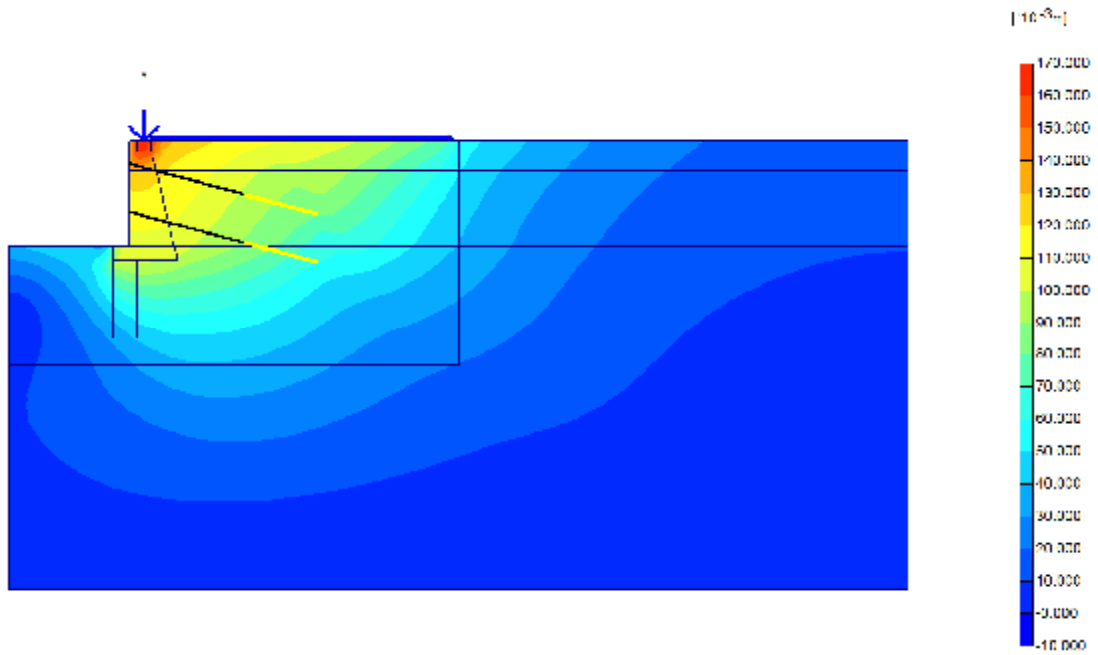
Çalışmanın ilk bölümünde cut off perdesi ve duvarının, deformasyonlar ve güvenlik faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken ankraj öngörme kuvvetleri kalın duvar tipinde 150kN/m ve 160kN/m, ince duvar tipinde ise 300kN/m değerlerinde uygulanmıştır. Ankraj öngörme kuvvetlerinin tam uygulandığı analiz sonuçları Çizelge 6.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.10. Öngörme Kuvvetlerinin Tam Uygulandığı Analiz Sonuçları

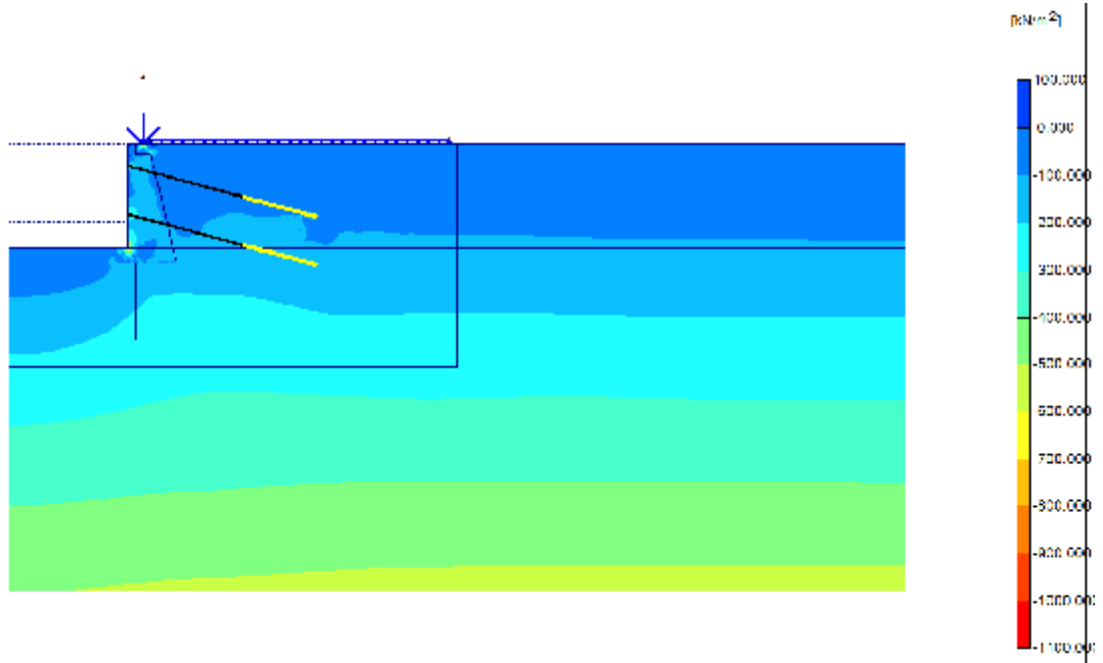
Öngermeli Duvar Tipi Karşılaştırması		A Noktası		B Noktası		C Noktası		Güvenlik Faktörü
		Ux (mm)	Uy (mm)	Ux (mm)	Uy (mm)	Ux (mm)	Uy (mm)	
Cut Off Elemansız Dayanım Duvarı	Kalın Duvar	57	115	51	95	0	41	1,52
	İnce Duvar	47	115	48	94	0	39	1,44
Cut Off Perdeli Dayanım Duvarı	Kalın Duvar	50	106	53	85	0	37	1,56
	İnce Duvar	39	105	47	84	0	34	1,54
Cut Off Duvarlı Dayanım Duvarı	Kalın Duvar	27	80	38	60	0	32	1,58
	İnce Duvar	20	80	32	59	0	27	1,66

Hesaplanan değerler incelendiğinde cut off perdesinin kullanılması durumunda dayanım duvarındaki düşey ve yatay deformasyonların azaldığı güvenlik

faktörünün ise arttığı görülmektedir. Bunun bir sebebi suyun itki kuvvetinin bir kısmının cut off perdesi tarafından karşılanması, diğeri ise cut off perdesinin dayanım duvarına destek olması olarak yorumlanabilmektedir. Cut off duvarı kullanıldığı takdirde ise hem yatay hem de düşey deformasyon değerleri azalmakta güvenlik faktörü artmaktadır. Cut off duvarı kullanıldığında düşey deformasyonların cut off perdesine göre belirgin bir şekilde azalmasının sebebi cut off duvarı kalınlığının 1,5m olmasından dolayı taşıyıcı özelliğinin olmasıdır.



Şekil 6.20. Kalın Duvar Tipinde Deformasyon Dağılımı (Cut off Elemanı)



Şekil 6.21. Kalın Duvar Tipinde Gerilme Dağılımı (Cut Off Elemansız)

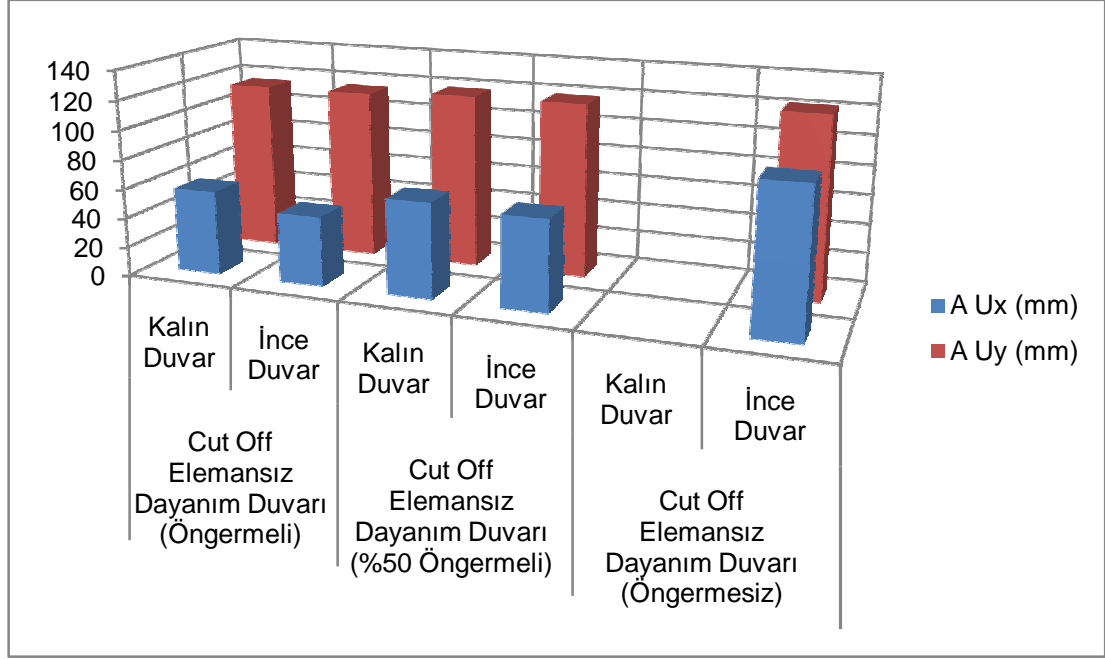
Şekil 6.20’de maksimum deformasyonun dayanım duvarının tepe noktasında oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebi devrilme tahkiklerinde moment alınan noktaya en uzak noktanın duvarın tepe noktası olması ve duvarın rijit bir yapıda olmasından dolayı devrilme yönüne doğru yekpare bir biçimde hareket etmesidir.

Şekil 6.21’ye bakıldığında ise duvarda en fazla gerilmeye maruz kalan bölgenin Şekil 6.19’da gösterilen B noktasının bulunduğu (Dayanım duvarı topuk bölgesi) bölge olduğu görülmektedir. En fazla gerilmeye maruz kalan bölgenin duvarın sol alt köşesinin olmamasının sebebi, duvarın ambuatmanlı olarak tasarlanmasıdır. B noktasının en fazla gerilmeye maruz kalan bölge olmasına rağmen devrilme tahkiki, deviren ve karşı koyan kuvvetlerin duvarın sol alt köşesine moment alınması ile hesaplanmaktadır. Bunun sebebi devrilmenin bu noktadan gerçekleşmesidir.

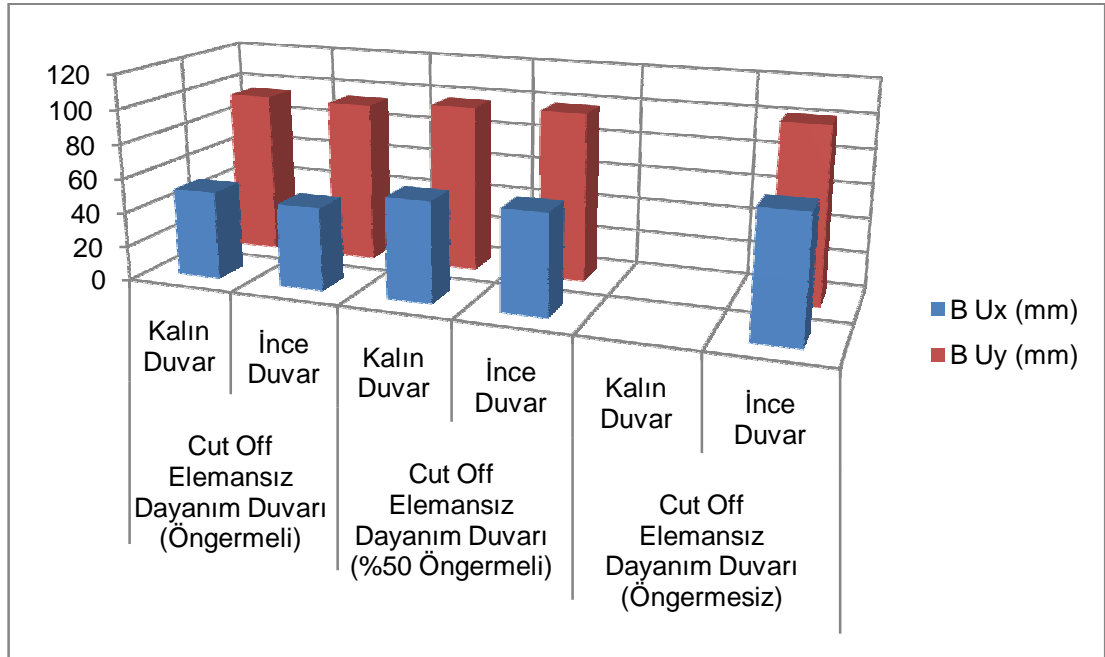
Çalışmanın ikinci aşamasında, her bir duvar tipindeki ankraj öngerme kuvvetleri önce yarıya indirilip, daha sonrasında ise hiç kullanılmadan analizler yürütülmüştür. Bu şekilde, dayanım duvarlarına uygulanan ankraj öngerme kuvvetlerin deformasyon ve güvenlik faktörü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ankraj



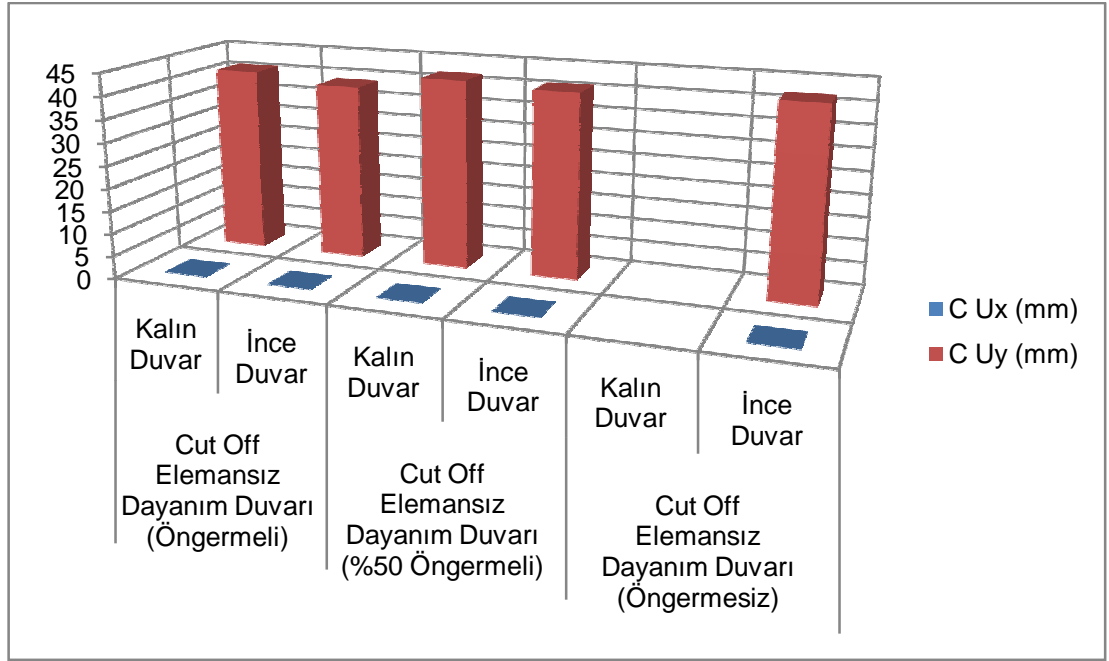
öngerme kuvvetinin duvar deformasyonları ve güvenlik faktörü üzerindeki etkisi aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir.



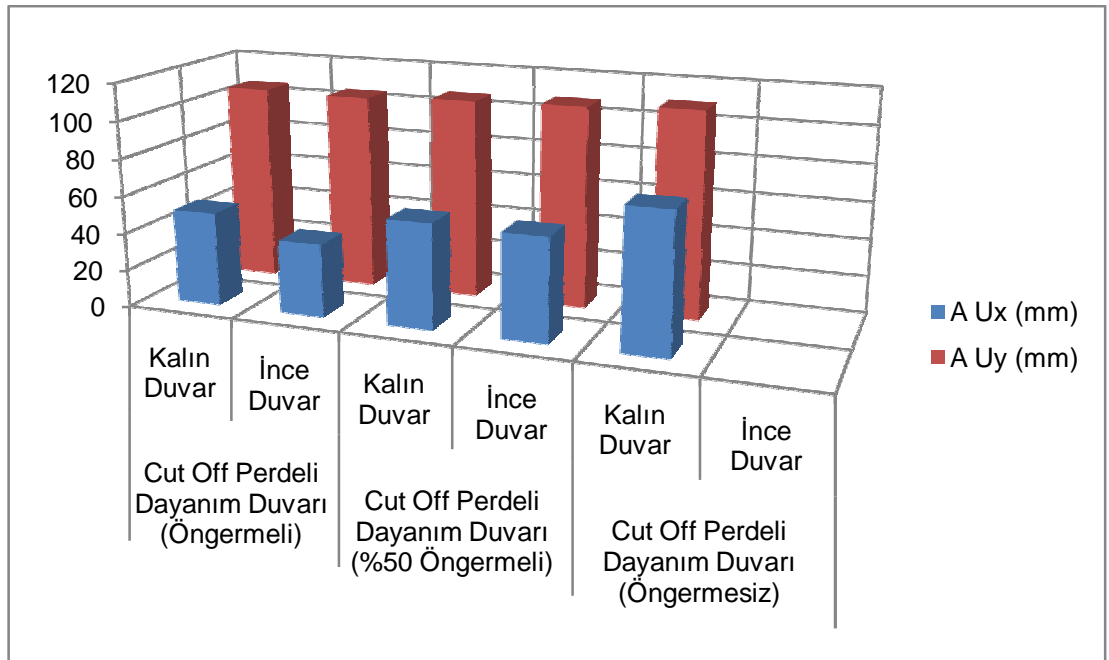
Şekil 6.22. Cut Off Elemanlı Duvar Deformasyonlarına Öngerminin Etkisi (A Noktası)



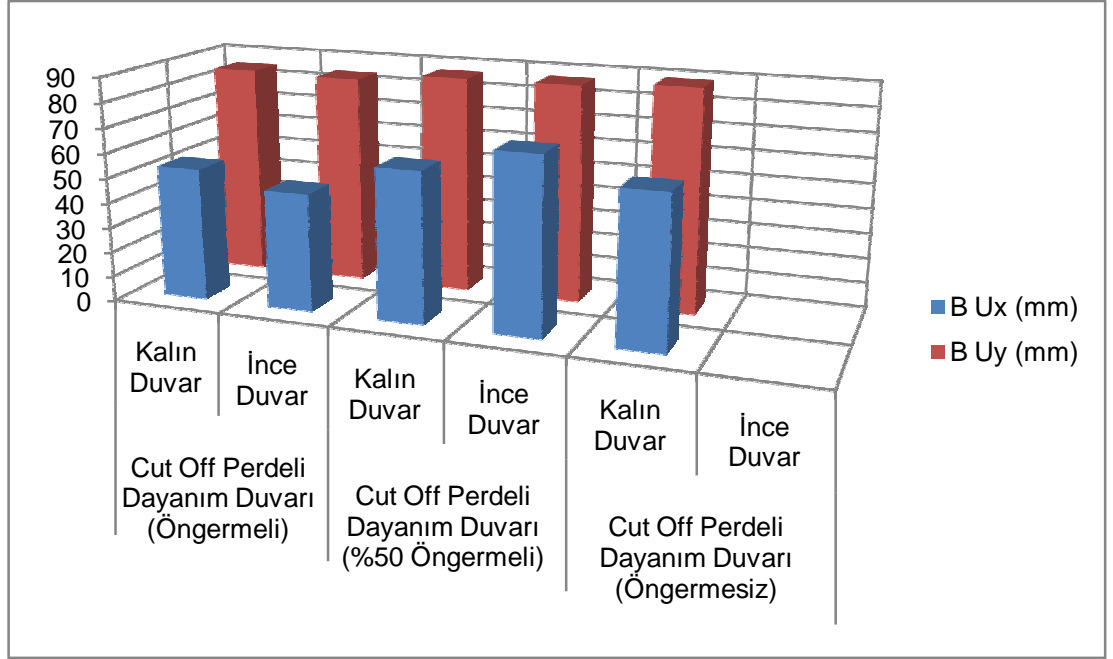
Şekil 6.23. Cut Off Elemanlı Duvar Deformasyonlarına Öngerminin Etkisi (B Noktası)



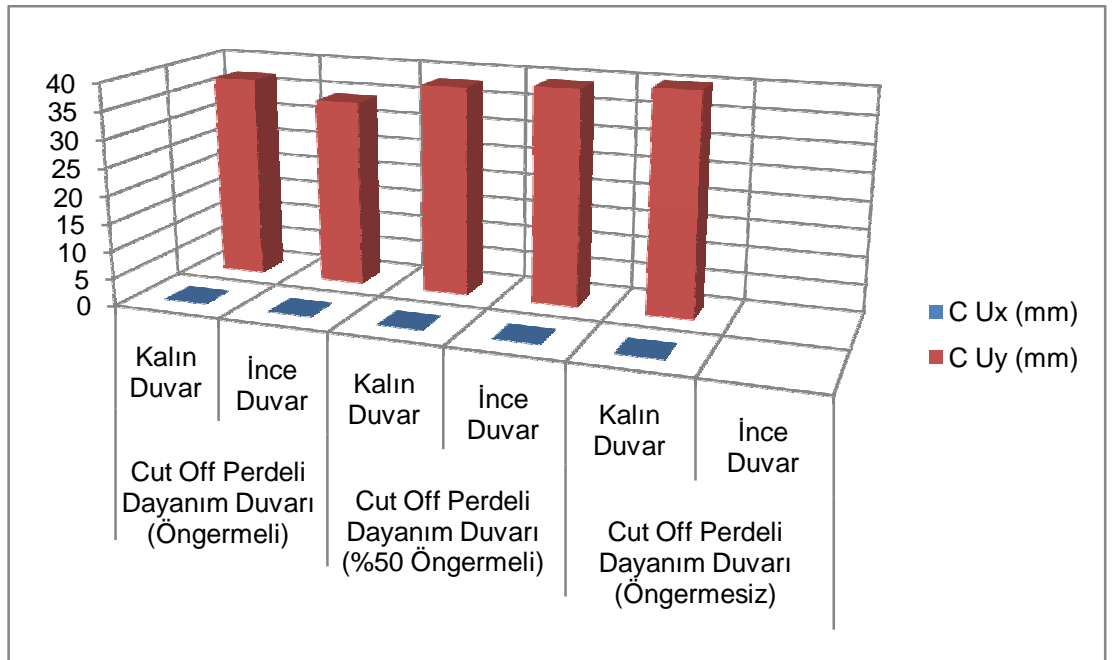
Şekil 6.24. Cut Off Elenmansız Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (C Noktası)



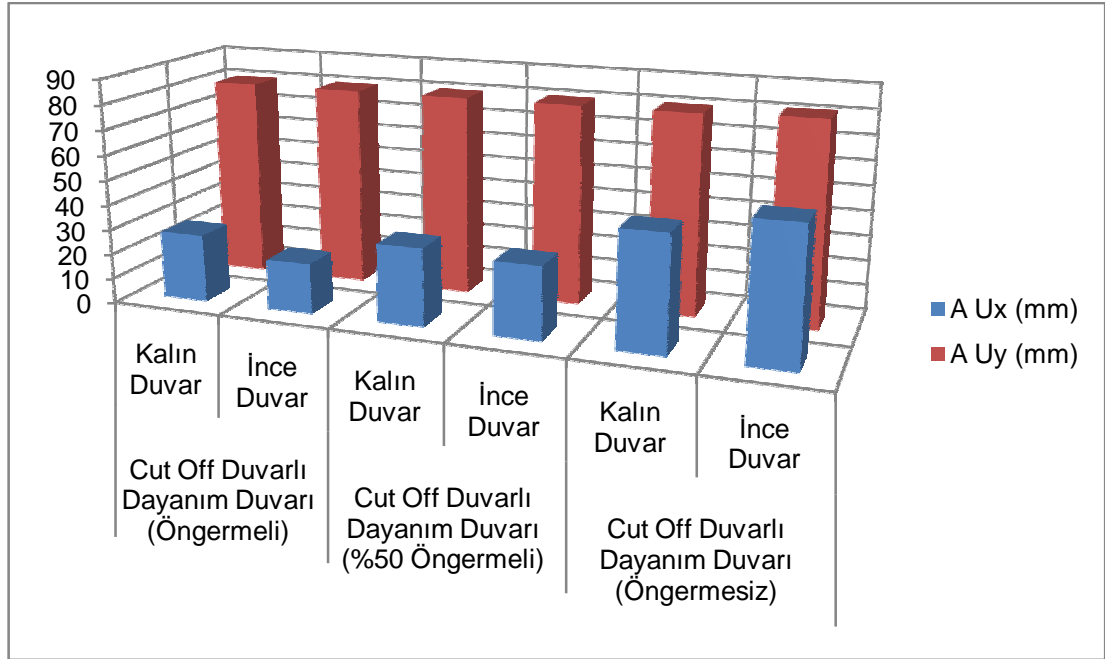
Şekil 6.25. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (A Noktası)



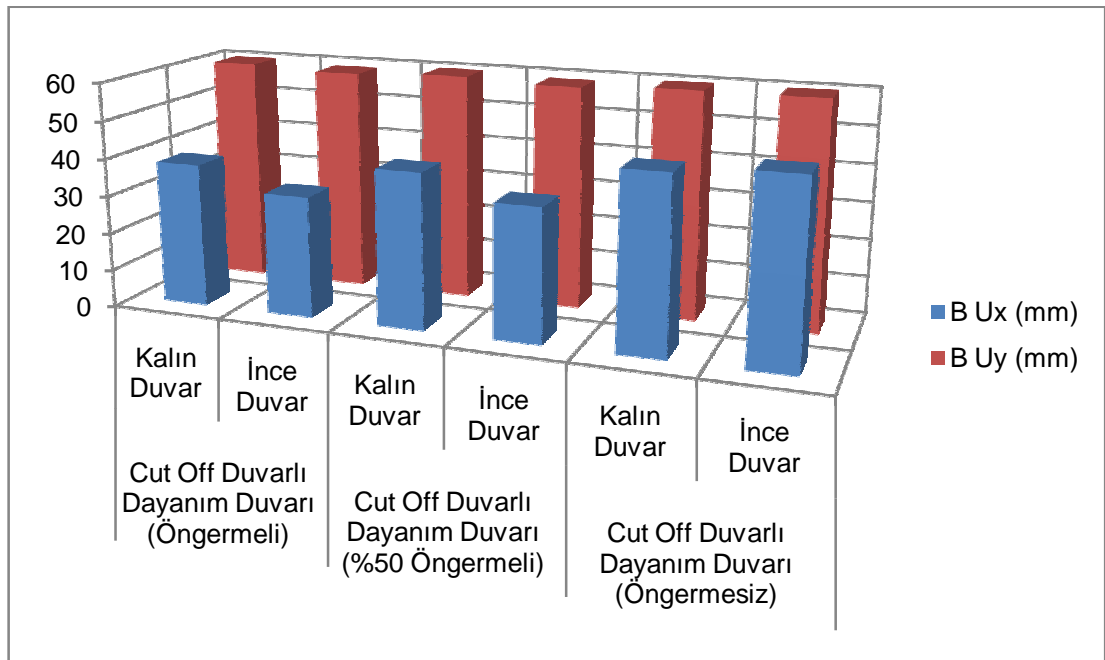
Şekil 6.26. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (B Noktası)



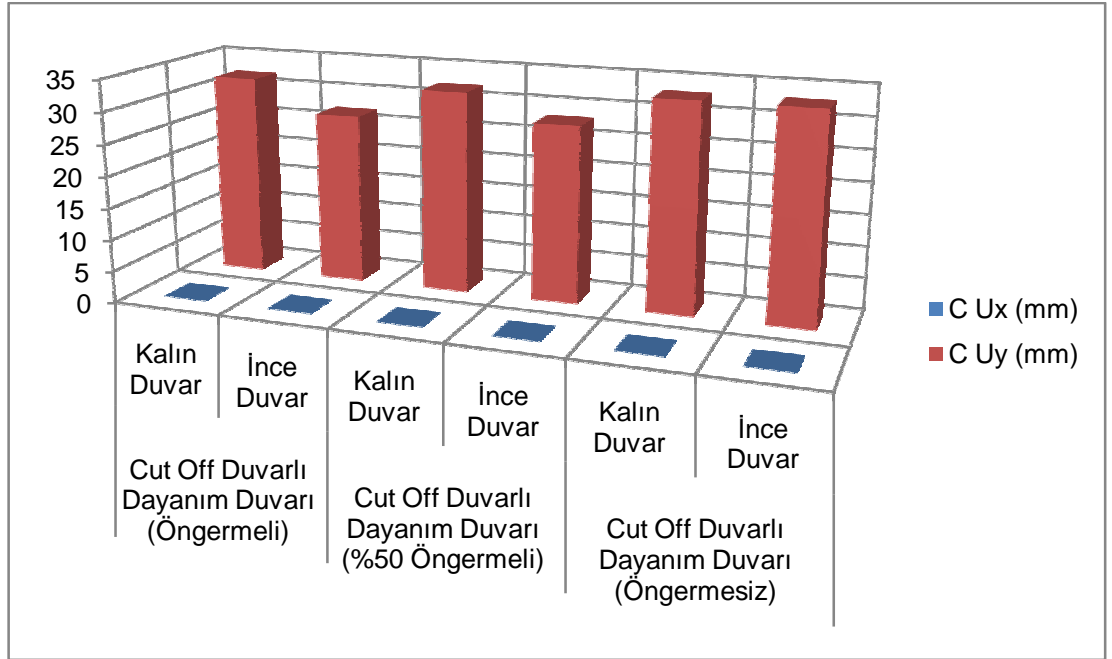
Şekil 6.27. Cut Off Perdeli Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (C Noktası)



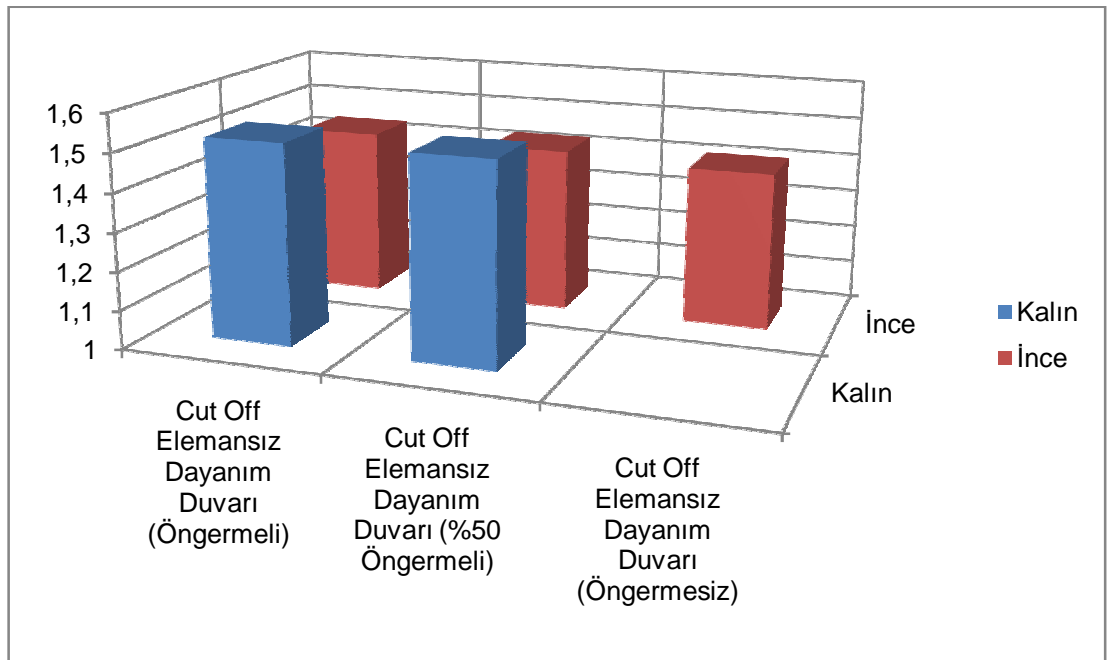
Şekil 6.28. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (A Noktası)



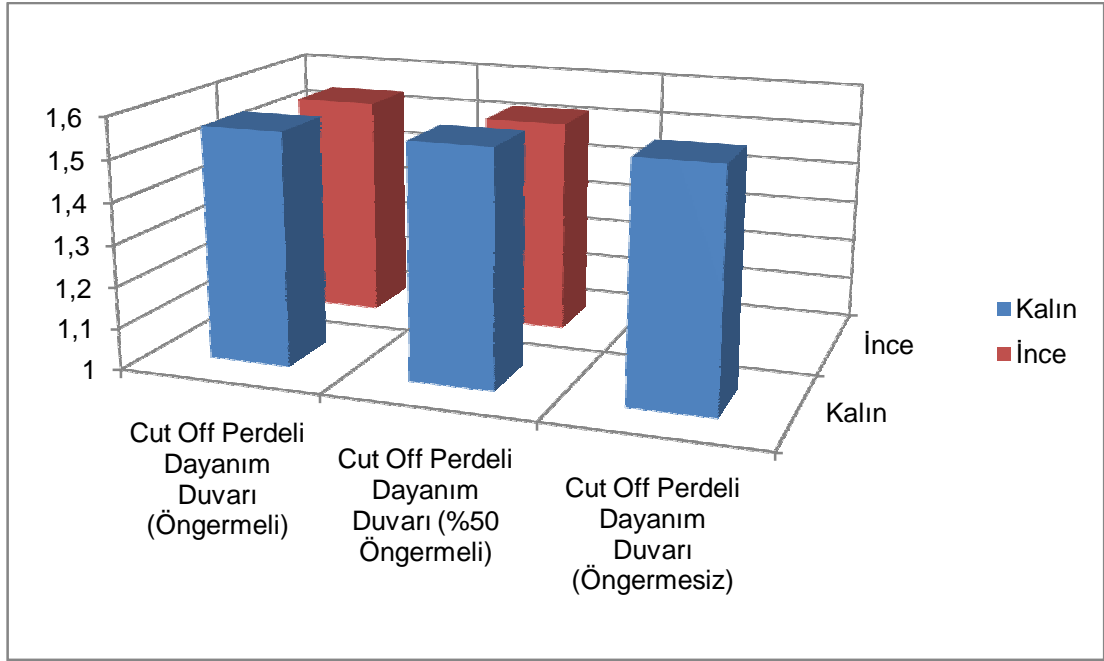
Şekil 6.29. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (B Noktası)



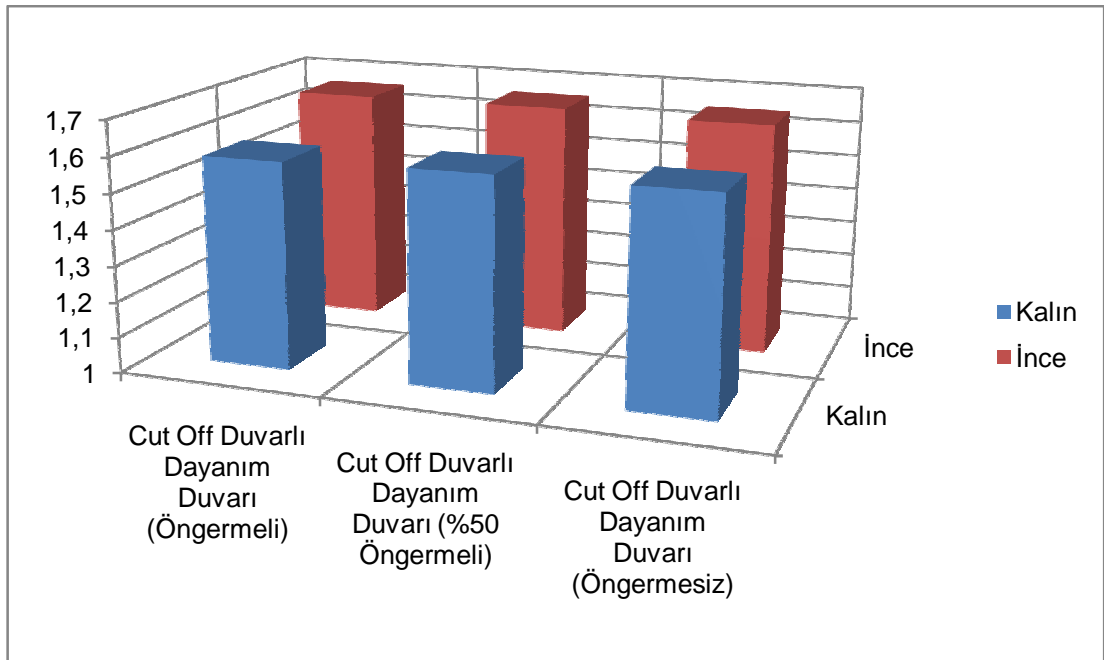
Şekil 6.30. Cut Off Duvarlı Duvar Deformasyonlarına Öngermenin Etkisi (C Noktası)



Şekil 6.31. Cut Off Elemansız Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi



Şekil 6.32. Cut Off Perdeli Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi



Şekil 6.33. Cut Off Duvarlı Duvarın Güvenlik Faktörüne Öngermenin Etkisi

Grafiklerden de görüldüğü gibi öngörme kuvvetlerinin uygulanması hem kalın hem de ince duvar tiplerinde A, B ve C noktalarındaki deformasyonları

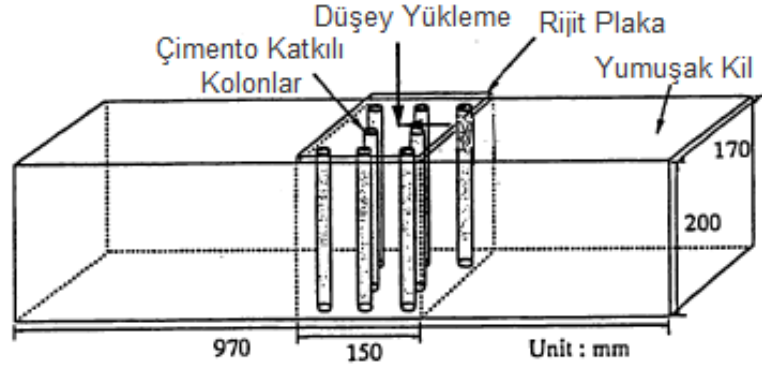
azaltmaktadır. En küçük deformasyon değerlerine dayanım duvarlarına ilave olarak cut off duvarı kullanıldığında ulaşılmaktadır. Analiz sonuçlarında bir diğer göze çarpan nokta ise, öngerme kuvveti değişiminin güvenlik faktörüne etkisinin olmamasıdır. Ankrajlara uygulanan öngerme kuvveti azaltılsa bile duvarların güvenlik faktöründe bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum öngerme kuvvetinin, gelen basınçlar karşısında dayanım duvarının yatay ve düşey hareketlerini bir miktar engellemekte olduğu fakat duvarın sınır göçme değeri üzerinde bir etkisi olmadığı şeklinde yorumlanabilmektedir.

### **6.3. Kompozit Zeminlerde Homojenleştirme Metodu Kullanılarak Yapılan Sayısal Analiz Örneği**

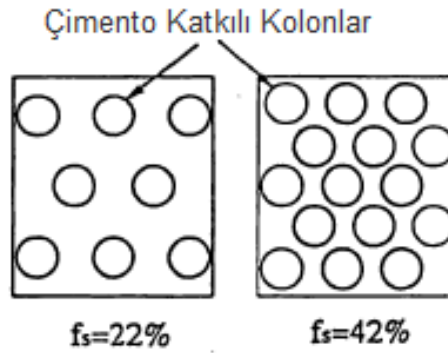
Plaxis 3D programında geniş bir alandaki kolonların her birinin ayrı ayrı modellenmesi oldukça zahmetli bir çalışma olduğundan dolayı bu programın pratikte kullanılması çok güçtür. Bu yüzden doğal zemin ve kolonlardan oluşan yapıyı tek bir malzeme haline getirip Plaxis 2D programında tanımlamak bu problemlerin çözümünü oldukça kolaylaştıracaktır.

Omene vd. (1993) ve Omene vd. (1999) tarafından önerilen metot Bölüm 4.3'te (Homojenleştirme Metodu Kullanılarak Kompozit Zeminlerin Nümerik Analizinin Yapılması) detaylı olarak anlatılmıştır. Bu örnekte çimento katkıli kolonlar ile iyileştirilmiş zeminlerde homojenleştirme metodunun uygulanması incelenmiştir.

Omene vd. (1999), önerdikleri metodun geçerliliğini sağlamak amacıyla çimento katkıli kolonlarla iyileştirilmiş zemine model deneyleri uygulamaktadır. Deney düzeneğinin genel görüntüsü ve kolonların yerleşimi Şekil 6.34 ve 6.35'te gösterilmektedir. Deney kasası içerisine yerleştirilen kaolin kili, çapı 30mm, yüksekliği 200mm olan çimento katkıli kolonlarla güçlendirilmiştir (Şekil 6.34).



Şekil 6.34. Deney Düzenegi (Omine vd., 1999)



Şekil 6.35. Deney Düzeneginde Kolonların Yerleşimi (Omine vd., 1999)

Model deneyi verileri ve malzeme parametreleri Çizelge 6.11 ve 6.12’de gösterilmektedir. Homojenleştirilmiş zemin parametreleri ise Çizelge 6.13’te gösterilmektedir.

Çizelge 6.11 Model Deney Verileri (Omine vd., 1999)

	Çimento İçeriği [kg/m <sup>3</sup> ]	Kolon Sayısı	İyileştirme Oranı f <sub>s</sub> [%]
Örnek 1	90	8	22
Örnek 2	90	15	42



Çizelge 6.13'te homojenleştirilmiş zemin için verilen değerler Omine vd. (1999) tarafından önerilen ve Bölüm 4.3'te detaylı olarak anlatılan homojenleştirme metodu formülasyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Homojenleştirilmiş ve doğal zemin için poisson oranı sırasıyla 0,40 ve 0,49 olarak kabul edilmektedir. Şekil 6.34'te verilen model deney düzeneği Plaxis paket programında düzlem deformasyon koşullarda iki boyutlu olarak modellenmiştir.

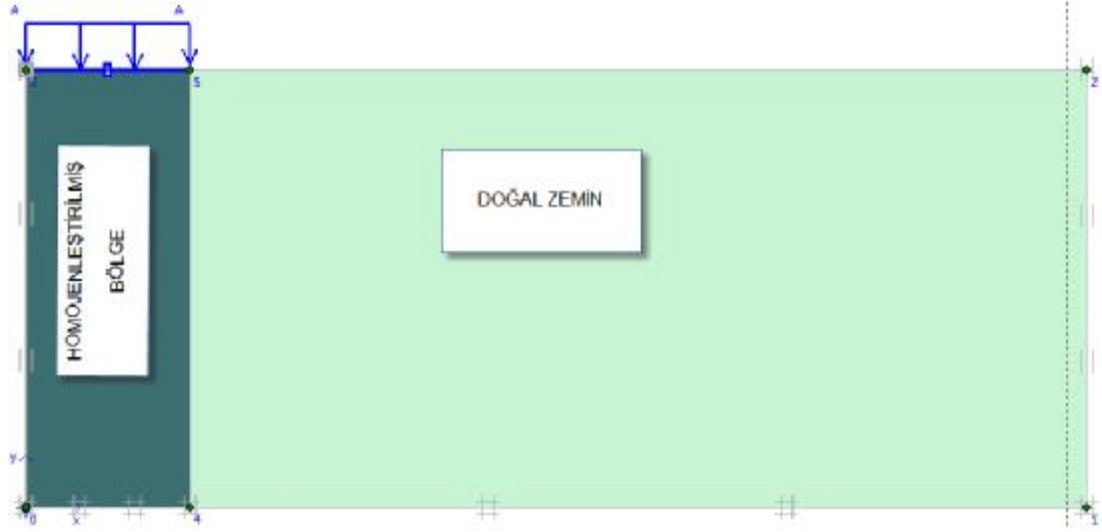
Çizelge 6.12. Katkı ve Matris Parametreleri (Omine vd., 1999)

	Elastik Modülü		Poisson Oranı		Kesme Kuvveti	
	[kPa]		[-]		[kPa]	
	$E_s$	$E^*$	$\nu_s$	$\nu^*$	$c_{us}$	$c_u^*$
Uygulama 1	17262	4171	0,40	0,49	29,96	2,66
Uygulama 2	17262	4171	0,40	0,49	29,96	2,66

Çizelge 6.13. Homojenleştirilmiş Zemin Parametreleri (Omine vd., 1999)

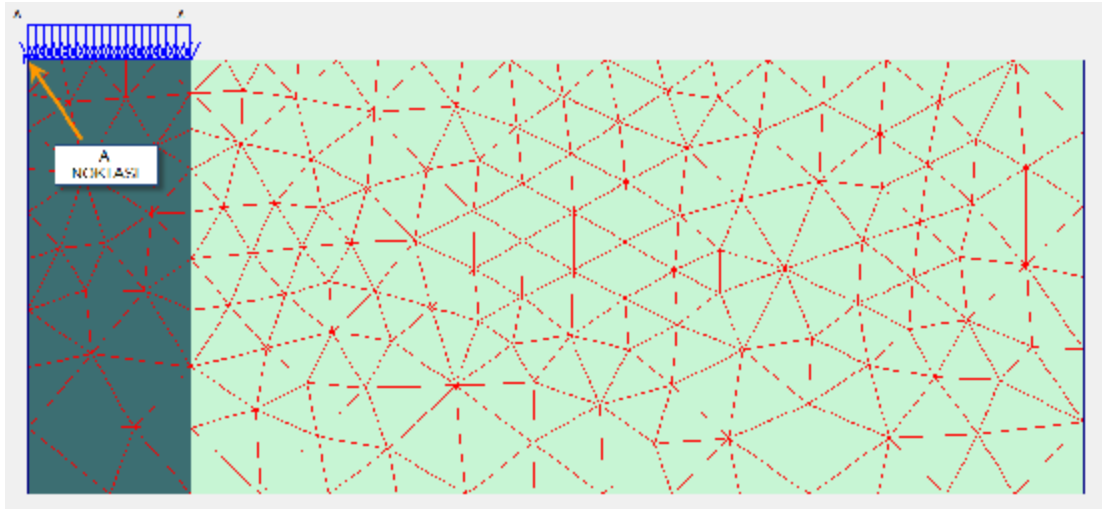
	Elastik Modülü		Poisson Oranı		Akma Gerilmesi	
	[kPa]		[-]		[kPa]	
	$E_v$	$E_h$	$\nu_{vh}$	$\nu_{hh}$	$\sigma_{yv}$	$\sigma_{yh}$
Uygulama 1	7051	5331	0,47	0,48	17,32	5,8
Uygulama 2	9669	6786	0,45	0,47	28,24	6,26

Deney düzeneğindeki katkılı kolonlar ile iyileştirilmiş zemin, Omine vd. (1999) tarafından önerilen formülasyonlar ile homojenleştirilmiş zemine dönüştürülmüştür. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan model geometrisi Şekil 6.36'da gösterilmektedir.



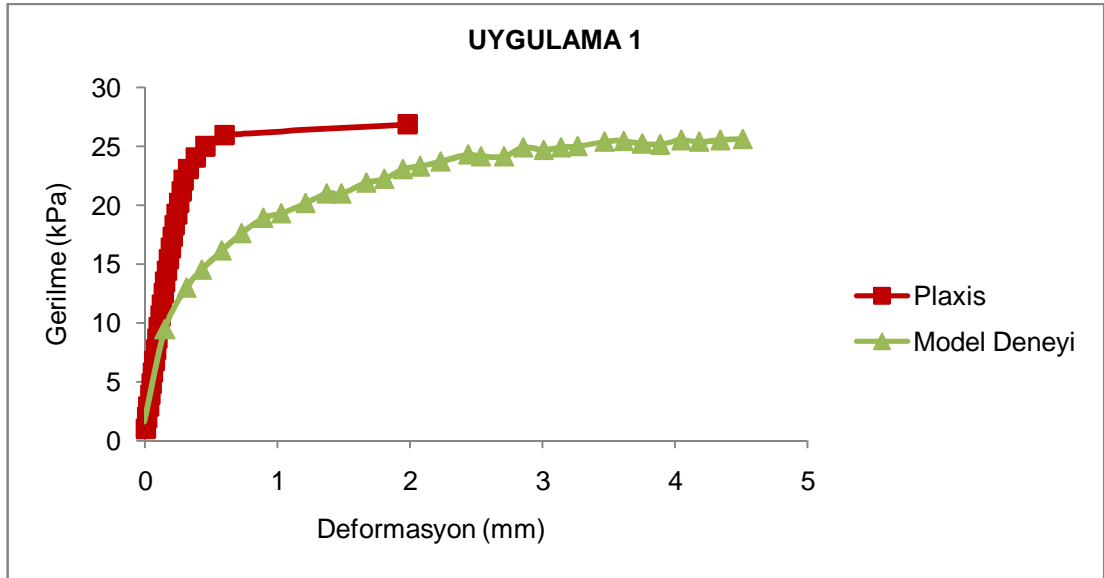
Şekil 6.36. Model Geometrisi

Plaxis programı ile yapılan analizlerde Şekil 6.34'te gösterilen deney düzeneğinin yarısı modellenmiş, 15 düğümlü üçgen eleman kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı Şekil 6.37'de görülmektedir. Doğal zemin ve homojenleştirilmiş bölge, Mohr – Coulomb zemin modeli ile modellenmiştir. Hesaplamalar, zemin göçme değerine ulaşana kadar 0,96kPa arttırılarak devam etmiştir.

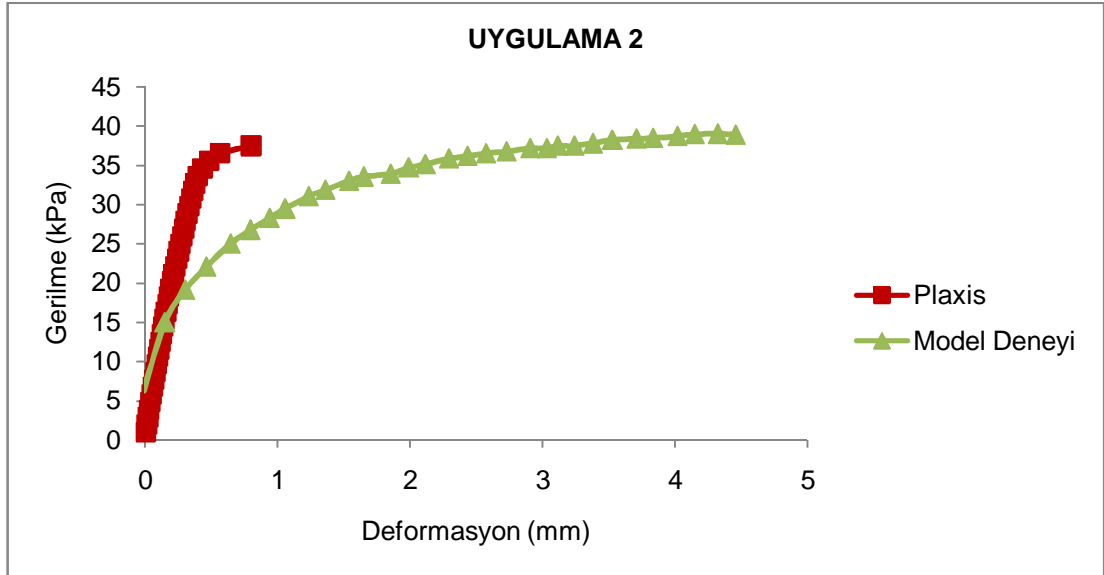


Şekil 6.37. Gerilme - Deformasyon Grafiği için Seçilen Nokta

Omine vd. (1999) tarafından önerilen metot ile homojenleştirilmiş malzeme üzerinde, Plaxis programı ile yapılan analiz sonuçlarının model deneyi sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 6.38 ve 6.39’da gösterilmektedir.



Şekil 6.38. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması



Şekil 6.39. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması

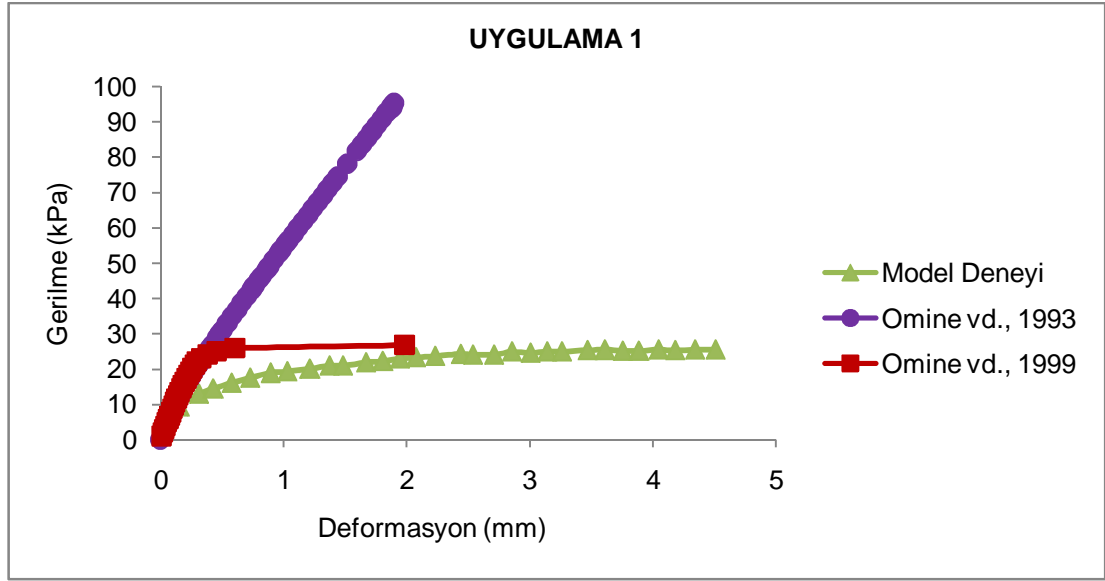
Grafiklerden görüldüğü gibi Plaxis ile yapılan analiz sonuçları, model deneyi sonuçlarına yaklaşmakta ama tam olarak aynı değeri vermemektedir. Göçme yükü değerleri benzer hesaplanmasına rağmen deformasyonlarda farklılık görülmektedir. Aynı yük derecesinde model deneyinde daha büyük deformasyonların meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 6.12’de verilen parametrelerin ayrıca Omine vd. (1993) tarafından önerilen formülasyonlarla da homojenleştirilmesi yapılmış ve Çizelge 6.14’teki değerler elde edilmiştir. İki boyutlu Plaxis analizleri bu parametreler kullanılarak tekrarlanmıştır. Omine vd. (1993) tarafından önerilen metotta kohezyon için homojenleştirme formülasyonu bulunmadığından dolayı zeminin lineer elastik malzeme olduğu kabul edilmiştir.

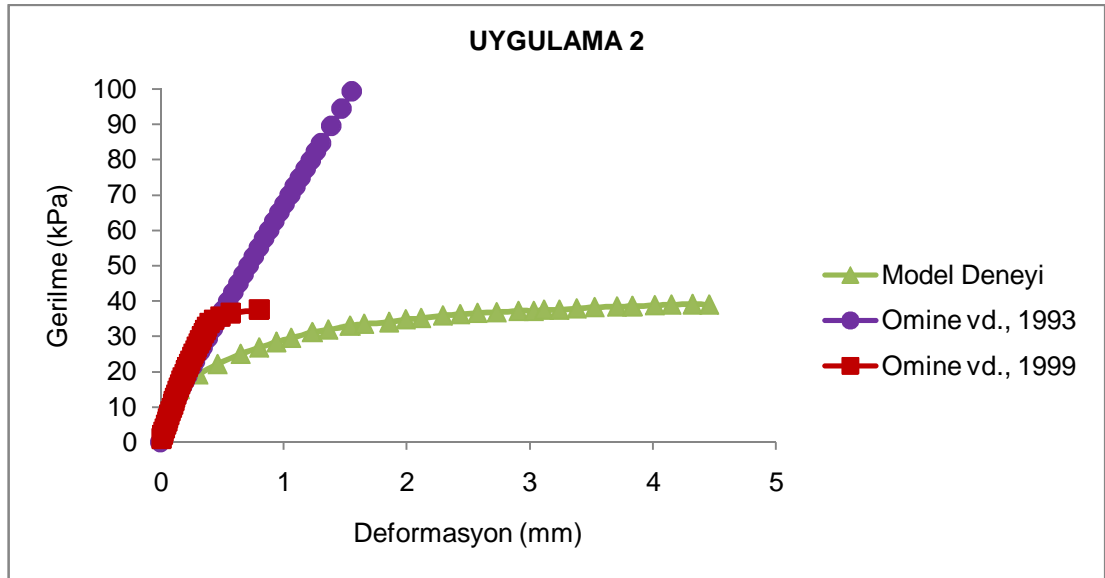
Çizelge 6.14. Homojenleştirilmiş Zemin Parametreleri

	Gerilme Dağıtım Parametresi	Karışım Elastik Modülü	Karışım Kesme Modülü	Karışım Hacimsel Esneklik Modülü	Karışım Poisson Oranı
	B	E	G	K	$\nu$
	-	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]
Uygulama 1	2,03	5765	1949	4584	0,48
Uygulama 2	2,03	7608	2594	3771	0,47

Şekil 6.40 ve 6.41’de Omine vd. (1993) ve Omine vd. (1999) tarafından önerilen homojenleştirme metotları kullanılarak elde edilen malzemelerin Plaxis programı ile hesaplanan gerilme – deformasyon ilişkileri ile model deneyi sonuçları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6.40. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması



Şekil 6.41. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırılması

Grafiklerde görüldüğü gibi iki farklı homojenleştirme metodu ile elde edilen değerler üzerinde yapılan analizlerde, homojenleştirilmiş malzemelerin elastik modülleri farklı olmasına rağmen aynı gerilme - deformasyon eğimine ulaşılmaktadır. Omine vd. (1993) tarafından önerilen metotta kohezyon parametresi değeri homojenleştirilemediği için homojenleştirilmiş malzeme lineer elastik olarak

kabul edilmektedir. Bunun sonucunda gerilme – deformasyon grafiği doğrusal olarak elde edilmektedir.

#### 6.4. Jet Grouting Yöntemi ile Zemin İyileştirmesinin Sayısal Analizine Dair Bir Vaka Analizi

Bu çalışma, Romanya - Köstence Şehri Liman sahasında inşaatı planlanan Sıvı Kimyasal Ürünleri Terminaline ait Ø33m ve Ø15m çaplarında tank temelleri altındaki zeminin ıslah edilmesi amacıyla yapılmıştır.

Temel zemini verileri incelendiğinde zemin ıslahı için uygulanabilir en ekonomik çözümün jet grouting yöntemi ile iyileştirilme olacağına karar verilmektedir. Zemin etüt raporunda verilen bilgilere göre Ø33m çapındaki tanklarda ikişer adet, Ø15 metrelik tanklarda ise birer adet sondaj kuyusu açılmıştır. Laboratuvar sonuçları ve sondaj sonuçlarına göre zemin profili, ilk 10m ve 10m'den sonrası şeklinde ayrılarak analiz edilmiştir. Geoteknik hesaplamalarda bu derinliklerdeki parametreler dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

Mevcut zemin etüt raporuna göre ilk 10 metrelik zeminin parametreleri;

Ø Su muhtevası ( $\omega$ )	: 11 - 25%
Ø Boşluk oranı (e)	: 0,65 – 0,76
Ø Kıvam indeksi ( $I_c$ )	: 0,45 – 0,70
Ø Birim ağırlık ( $\gamma$ )	: 17,2 – 19,4kN/m <sup>3</sup>
Ø Orta sıkıştırılabilirlik ( $M_{2-3}$ )	: 80 - 158daN/cm <sup>2</sup>
Ø İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ )	: 11 - 34°
Ø Kohezyon değeri (c)	: 4 - 24kPa

10 metreden sonrası için zemin parametreleri;

Ø Su muhtevası ( $\omega$ )	: 18 - 23%
Ø Boşluk oranı (e)	: 0,60 – 0,70
Ø Kıvam indeksi ( $I_c$ )	: 0,60 – 0,72
Ø Birim ağırlık ( $\gamma$ )	: 18,3 – 18,9kN/m <sup>3</sup>
Ø Orta sıkıştırılabilirlik ( $M_{2-3}$ )	: 128 - 196daN/cm <sup>2</sup>
Ø İçsel sürtünme açısı ( $\phi$ )	: 13 - 19°

Ø Kohezyon değeri (c) : 14 - 30kPa

Yer altı suyu seviyesi derinliği ortalama 2,0 metre olarak alınmıştır. Zeminin taşıma gücü değerinin sadece  $c_u$  değerinden aldığı kabul edilmiştir. Bu duruma göre hem mevcut durum hem de ıslah sonrası taşıma gücü ve oturma değerleri hesaplanmıştır. Zemin elastisite modülü hesabı için Eşitlik 6.1 kullanılmıştır.

$$E_u = 300 c_u \quad (6.1)$$

FEM hesaplamalarında  $E_u$  değeri ilk 10m için;

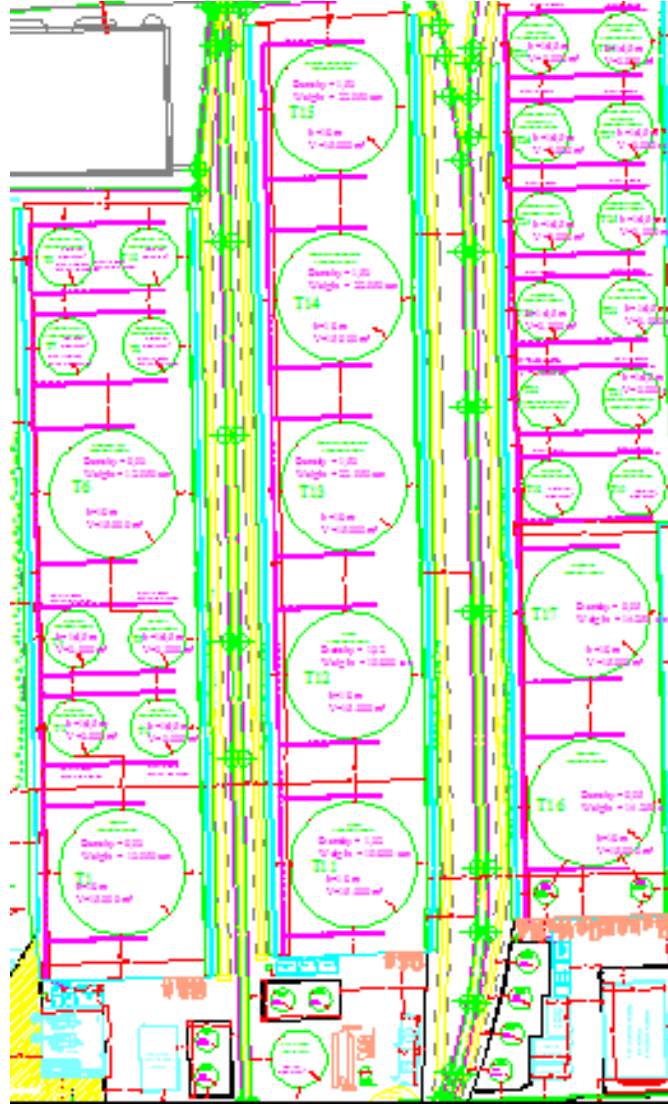
$$c_u = 14\text{kPa}, \quad E_u = 300 * 14 = 4200\text{kPa}$$

10m'den sonrası için;

$$c_u = 22\text{kPa}, \quad E_u = 300 * 22 = 6600\text{kPa}$$

olarak alınmıştır.

İnşaat sahasında 9 adet Ø33m, 21 adet Ø15m çaplarında tank yapılması planlanmaktadır. İmal edilecek tankların planı Şekil 6.42'de gösterilmektedir.



Şekil 6.42. İnşa edilecek Tankların Planı

33m Çaplı Tank

Alan	:	855,30m <sup>2</sup>	
Maksimum Ağırlık	:	17950ton	
q <sub>o</sub>	:	17950 / 855,30	= 20,99t/m <sup>2</sup>

15m Çaplı Tank

Alan	:	176,71m <sup>2</sup>	
Maksimum Ağırlık	:	3300ton	
q <sub>o</sub>	:	3300 / 176,71	= 18,67t/m <sup>2</sup>



Temel derinliği ( $D_f$ ) 2,0m olarak alınmıştır. Zemin ortamının özellikleri dikkate alınarak iyileştirilmemiş zemin üzerinde killi durum için klasik yöntem ile hesaplama yapılmıştır. Hesaplama da dairesel temel özellikleri dikkate alınmıştır.

İyileştirilmemiş zeminin taşıma gücü Eşitlik 6.2 kullanılarak hesaplanmaktadır (Terzaghi – Peck, 1967).

$$q_d = 1,3 c N_c + \gamma D_f N_q + 0,3 B N_\gamma \quad (6.2)$$

$\emptyset = 0$  için taşıma gücü faktörleri Çizelge 4.1'den alınmaktadır.

$$N_c = 5,7 \quad N_q = 1.0 \quad N_\gamma = 0$$

Parametreler Eşitlik 6.2'ye göre yerleştirildiğinde ve  $GS = 3$  olarak alındığında;

$$q_d = 13,97t/m^2$$

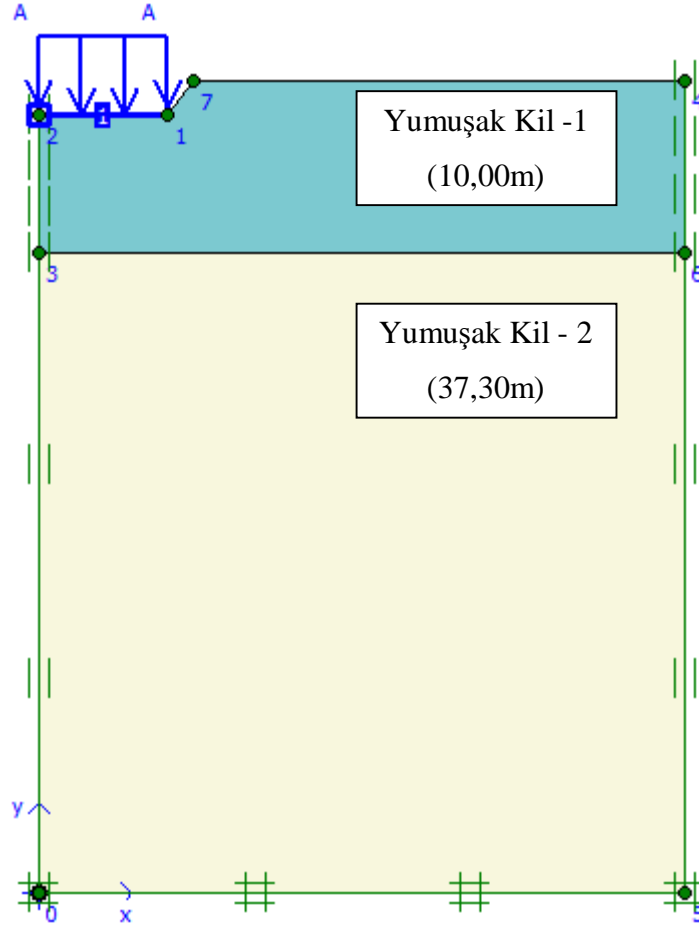
$$q_{emin} = 13,97 / 3 = 4,66t/m^2$$

olarak hesaplanmaktadır.

Klasik yöntem ile yapılan hesaplamaları teyit etmek amacı ile  $\emptyset 15m$  ve  $\emptyset 33m$  çaplarındaki tank temelleri üzerinde FEM analizleri yapılmıştır. FEM analizlerinde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.15'te gösterilmektedir.  $\emptyset 15m$  ve  $\emptyset 33m$  çaplarındaki temellerin model geometrisi Şekil 6.43'te gösterilmektedir.

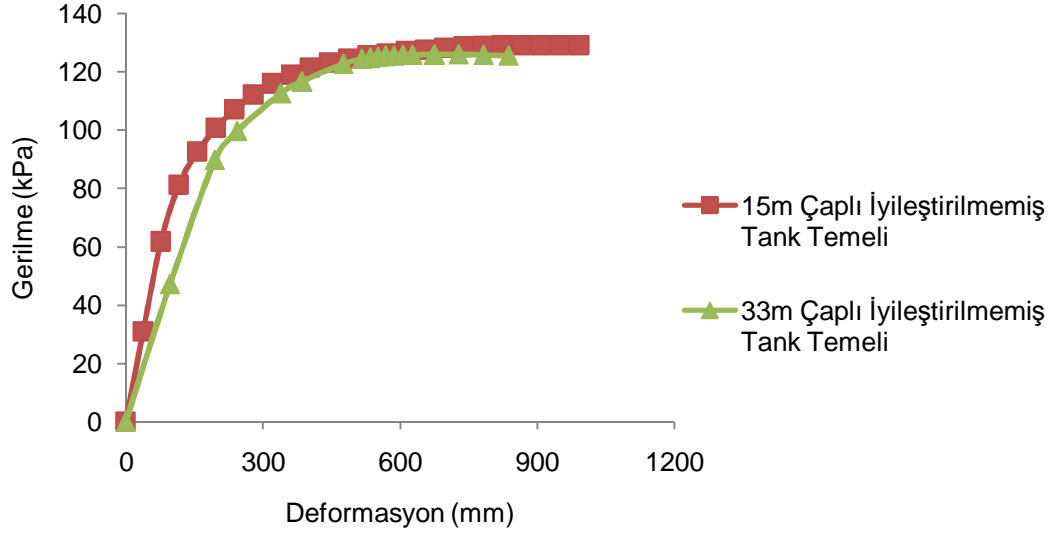
Çizelge 6.15. İyileştirme Yapılmamış Zeminin Malzeme Parametreleri

Malzeme	Model Tipi	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\emptyset$ [°]	$\psi$ [°]	$T_{cut-off}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Yumuşak Kil - 1	Drenajsız	18	18	0,35	4,20E+03	14	0	0	0
Yumuşak Kil - 2	Drenajsız	19	19	0,35	6,60E+03	22	0	0	0



Şekil 6.43. İyileştirme Yapılmamış Zeminin Modeli (Ø15m)

İyileştirilmemiş zemin üzerine, inşa edilecek tank yükleri uygulanarak yapılan Plaxis analizleri sonucunda Şekil 6.44'te gösterilen grafikler elde edilmektedir.



Şekil 6.44. Ø15m ve Ø33m Çaplı Temellerin Gerilme Deformasyon İlişkisi

Grafiklerden görüldüğü gibi yapılar zemine uygulayacakları maksimum gerilmelere ulaşmadan izin verilen oturma değerlerini aşmaktadır. Radye temellerde kabul edilebilir sınır olan 5cm oturma değeri baz alınır ise, bu oturma değerine Ø15m çaplı tankta 39,92kPa, Ø33m çaplı tankta ise 24,32kPa basınç değerinde ulaşılmaktadır.

Tankların zemine uyguladığı üniform basınçlar ve zeminde gerçekleşen oturmalar dikkate alındığında mevcut taşıma gücü değerinin yetersiz olduğu görülmekte ve temel zemininin güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

$$q_{emin} = 4,66t/m^2 < q_{o15} = 18,67t/m^2 < q_{o33} = 20,99t/m^2$$

Yukarıdaki veriler değerlendirildiğinde ve yapılan zemin etüdü göre, temel taban kotu altında doygun ve oldukça zayıf özellikte az kumlu zemin katmanı yer almaktadır. Taşıma gücü  $q_{emin} = 4,66t/m^2$ ,  $q_d \leq q_{emin}$  şartını sağlayamamaktadır. Bu tespit doğrultusunda, yapının yapılacağı problemlili zemin ortamın, yapı emniyetini sağlayacak zemin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu tür problemlili ortamlarda, aşağıda bahsedilen önlemlerden biri veya bir kaçını birlikte değerlendirilerek çözüme gidilebilir. Bu önlemler, kısa başlıklar halinde belirtilecek olursa;

- Yapının, zayıf zeminler içinden daha sağlam zemin ortamlara geçen elamanlarla desteklenmesi
- Yapının yüzeysel temeller ile desteklenmesi ve zayıf zeminleri dikkate alacak şekilde tasarlanması
- Derin ve yüzeysel olmak üzere, yüzen bir temel kullanılması
- Zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi

Yukarıda önerilen yöntemler üzerinde yapılan analizler sonucu uygulama kolaylığı, ekonomikliği vb. şartlar değerlendirildiğinde, “Zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi” amacıyla jet grouting yönteminin uygulanmasına karar verilmektedir. Bu projede, Ø80cm çap mertebesinde oluşturulacak jet kolonlar, “Yapısal Taşıyıcı Elemanlar” ve “zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi”ne yönelik olarak tasarlanmaktadır.

Jet kolonların, yük taşıma hesabında, zemin ortamın özellikleri dikkate alınarak, fiziksel sürtünme ve uç taşıma değerlerinin alındığı, “Sürtünme Elemanı” yaklaşımı kullanılmaktadır.

Kohezyonlu zeminlerde jet grout kolonu taşıma kapasitesi 4.25 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$A = (0,80)^2 \times 3,14 / 4 = 0,503\text{m}^2$$

$$c_u = 22 \text{ kPa (Uç Bölgesi Değeri)}$$

$$A_s = P \times \Delta L$$

$$P = 3,14 \times 0,80 = 2,51\text{m}$$

$$L = 15\text{m}$$

$$\alpha = 1 - 0,00615 (c_u - 25)$$

Zemin etüt raporuna göre 0 - 5m, 5 - 15 tabakalarının  $c_u$  değerleri farklı olduğundan dolayı 15m’lik bölgede her iki tabakanın sürtünme direnci farklı olacaktır. Toplam sürtünme direnci ise bunların toplam değeri olarak alınacaktır (Çizelge 6.16).

Çizelge 6.16. Farklı Tabakaların Sürtünme Dirençleri

	P [m]	$\Delta L$ [m]	c (kPa)	$\alpha$	$Q_f$ (kN)
1	2,51	5	14	1,07	188
2	2,51	10	22	1,02	563

Toplam Sürtünme Direnci 751kN

Buradan; Tek jet kolon taşıma kapasitesi;

$$Q_d = 9 c_u A + A_{s1} \alpha_1 c_1 + A_{s2} \alpha_2 c_2$$

$$\Rightarrow 100 + 751 = 851\text{kN} = 85,1\text{ton (Jet kolon sınır taşıma kapasitesi)}$$

Buradan, jet kolonların oluşturulmasında uygulanacak aplikasyon planı, yapı boyutları ve kısmi flotasyon şartları göz önüne alınarak (Mevcut zemin ortamının yük alma kapasitesi ihmal edilerek);

Ø33m Tank;

$$Q_{\text{net}} \cong 17950\text{t alınarak}$$

$$17950 / 85,1 \cong 211 \text{ adet jet kolon bulunmuştur.}$$

Klasik çözümde 211 adet jet grout kolonu bulunmuştur. Verilen boyutlara göre yapı sınırı dışında işletme aşamasında yanal kaymaların önlenmesi için 1 er sıra jet grout kolonları ilave edilmiştir. Toplamda 264 adet kolon yapılması önerilmiştir.

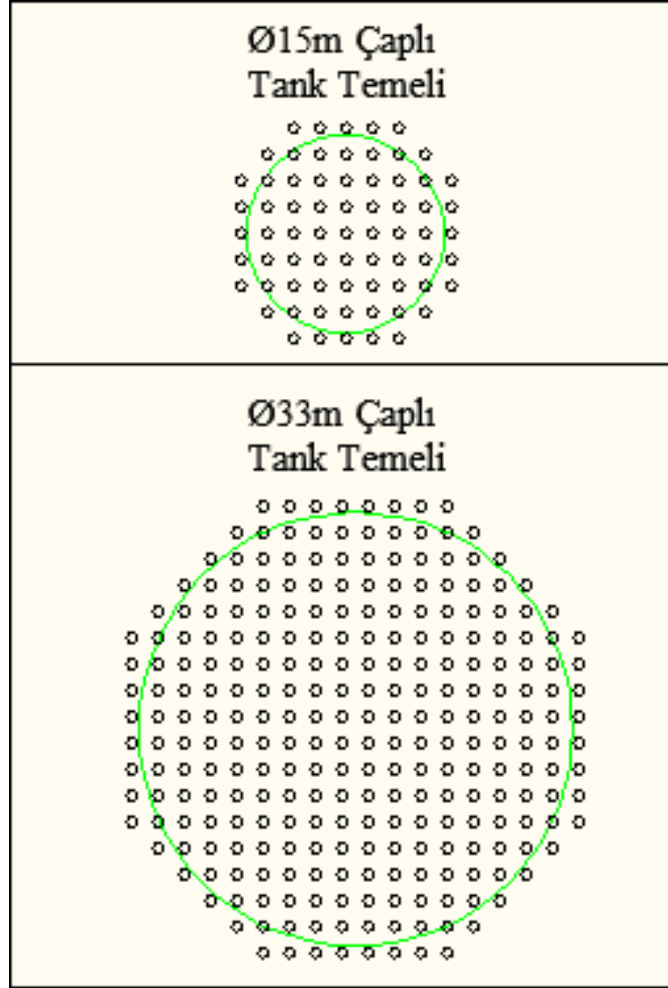
Ø15m Tank;

$$Q_{\text{net}} \cong 3300 \text{ ton alınarak,}$$

$$3300 / 85,1 \cong 39 \text{ adet jet kolon bulunmuştur.}$$

Klasik çözümde 39 adet jet grout kolonu bulunmuştur. Verilen boyutlara göre yapı sınırı dışında işletme aşamasında yanal kaymaların önlenmesi için 1 er sıra jet grout kolonları ilave edilmiştir. Toplamda 69 adet kolon yapılması önerilmiştir.

Her iki kenar boyunca  $S_H = 200\text{cm}$  ve  $S_V = 200\text{cm}$  aralıklarla uygulanmak üzere, Şekil 6.45'te gösterildiği gibi,  $\varnothing 80$  çapında,  $L = 15\text{m}$  boyunda jet kolonlar oluşturulacaktır.



Şekil 6.45. Tank Temelleri için Jet Grout Kolon Aplikasyon Planı

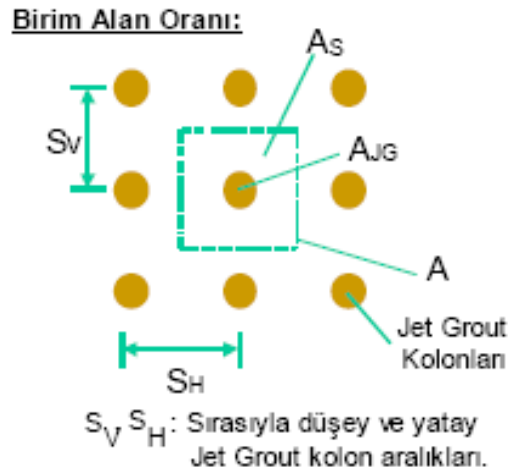
Zemin ortamda uygulanacak jet grouting yöntemi, mevcut yapı sahasındaki taşıma ve oturma kontrollerinin yanı sıra, sismik bir hareketlenme durumunda muhtemel sıvılaşma riskine karşı önlem almak üzere tasarlanmış olup, zeminde yüzeyden itibaren oluşacak iyileştirme çalışması sonucu jet kolonlar vasıtasıyla yapı yüklerinin doğal zeminden yaklaşık 17 metre derinliğe aktarılmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, jet grout kolunu için ilgili derinliklerdeki zemin parametreleri

kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu analizler yapılmıştır. Plaxis programı ile yapılan iki boyutlu analizler için malzeme parametreleri Çizelge 6.17’de gösterilmektedir.

Çizelge 6.17. FEM Analizi için Malzeme Parametreleri

Malzeme	Model Tipi	$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	E [kN/m <sup>2</sup> ]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi$ [°]	$\psi$ [°]	$T_{cut-off}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Yumuşak Kil - 1	Drenajsız	18	18	0,35	4,20E+03	14	0	0	0,0
Dolgu	Drenajlı	21	21	0,30	6,60E+04	1	35	5	0,0
Yumuşak Kil - 2	Drenajsız	19	19	0,35	6,60E+03	22	0	0	0,0
Jet Grout	Drenajlı	22	22	0,20	5,00E+06	250	0	0	62,5

Hesaplamalarda birim hücre modeli esas alınarak tek bir kazık ve bu kazığın etki alanı bölgesi dikkate alınarak analizler yapılmıştır (Özsoy – Durgunoğlu, 2003) (Şekil 6.46).



Şekil 6.46. Birim Hücre Modeli Yerleşim Planı (Özsoy – Durgunoğlu, 2003)

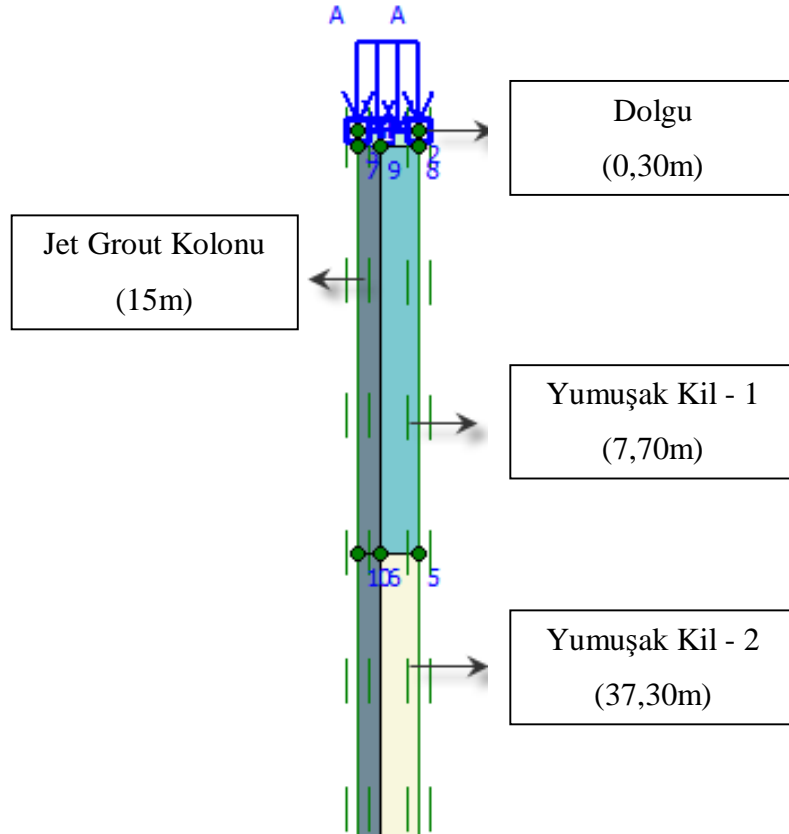
Plaxiste 2D programında hesaplama yapabilmek için  $S_V$  ve  $S_H$  aralıkları 2m olan kare şeklinde birim hücrenin, hücre alanı sabit tutularak daire şekline çevrilmesi gerekmektedir (Eşitlik 6.3).

$$r = \sqrt{\frac{a^2}{\pi}} = 1,13\text{m} \quad (6.3)$$

r : Oluşturulacak daire şeklindeki birim hücrenin yarıçapı

a : Kare şeklindeki birim hücrenin bir kenarının uzunluğu

Birim hücre metodu ile analizi yapılacak olan modelin geometrisi Şekil 6.47’de gösterilmektedir. 15m uzunluğunda tasarlanan jet grout kolonu altında 30m boyunca devam eden yumuşak kil tabakası bulunmaktadır.

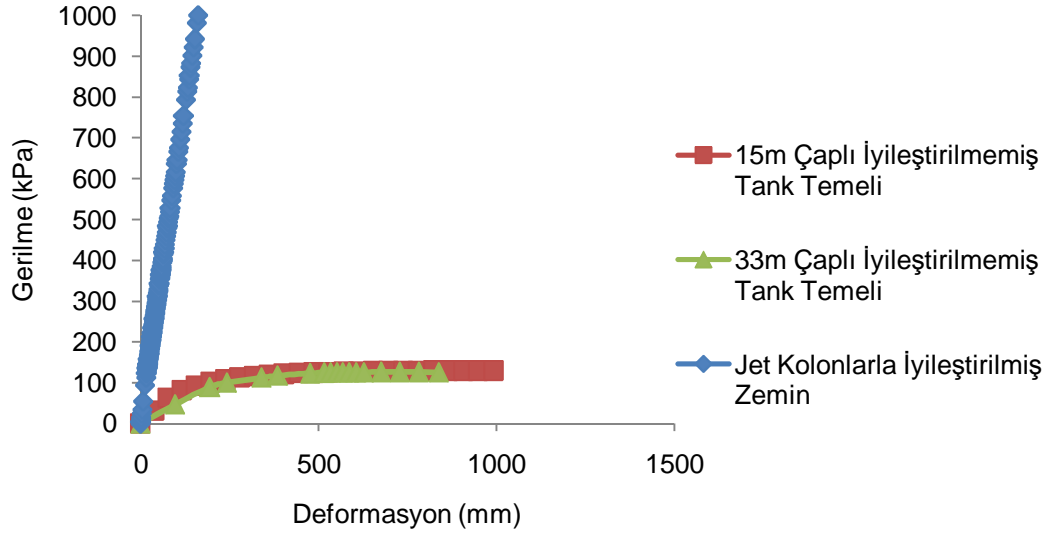


Şekil 6.47. Model Geometrisi

Birim hücre alanı oluşturulurken 15 düğümlü aksenal simetri modeli kullanılmış ve birim hücrenin yarısı modellenmiştir. Şekil 6.48’de iyileştirilmiş ve



iyileştirilmemiş zeminlerin gerilme – deformasyon ilişkisi karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 6.48. Gerilme – Deformasyon İlişkisi Karşılaştırması

Klasik çözüm yöntemi ve Plaxis programı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre jet grouting uygulaması sonrasında zeminin taşıma gücü oldukça artmış ve oturmalar kontrol altına alınmıştır. Mevcut şartlarda müsaade edilebilecek 5cm değerindeki oturma, Ø15m çapındaki temelde 39,92kPa, Ø33m çapındaki temelde 24,32kPa basınç değerinde meydana gelmektedir. Jet grout kolonları ile iyileştirme yapıldıktan sonra Ø15m çapındaki tankın temele uyguladığı 186,70kPa basınçta 2,71cm, Ø33m çapındaki tankın temele uyguladığı 209,90kPa basınçta 3,09cm oturma gerçekleşmektedir. Bu değerler radye temeller için kabul edilebilir oturma sınırı olan 5cm'den küçük oldukları için kabul edilebilmektedir.

Jet kolonların inşası sonrası, kolon başları ve radye temel tabanı altında en az 30cm kalınlıkta oluşturulacak granüler dolgu tabakası (Balast malzeme kullanılarak) yüklerin, jet kolonlara üniform dağıtılmasında ve zemindeki suyun temel tabanı altında kontrolü ve olası boşluk suyu basınçlarının sönmülmesine katkı sağlayabilecektir.

Hesaplamalardan görüleceği üzere, zemin ıslahı sonucunda proje yüklerine göre her iki tip tank içinde istenilen taşıma gücü ve oturma değerleri kabul edilebilir sınırlarda kalmaktadır. Kullanılan parametreler de göz önüne alındığında inşa edilecek yapı için ortaya konulan hesaplama sonuçları, jet kolonlarla yapılan iyileştirmenin uygun ve yeterli olduğunu göstermektedir.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında jet grouting yönteminin kullanıldığı yerler, yapım aşamasında kullanılan ekipmanlar, bu ekipmanların kullanım amaçları ve şekilleri, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının taşıma gücü hesap yöntemleri ve gerekli parametreler incelenmiştir.

Zeminlerde sıvılaşmaya problemine karşı, jet grout kolonları ile yapılan iyileştirmede kullanılan hesap yöntemi incelenmiştir. Birim hücre kullanılarak yapılan bu hesap yöntemi bir örnek üzerinde uygulanmıştır. Örnek sonucunda bu yöntemin sıvılaşma sorununa karşı bir çözüm oluşturabileceği görülmektedir.

Çalışmanın 6. bölümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan jet grouting yönteminin sayısal analizleri, çeşitli örnekler üzerinde incelenmiştir. Analizler, Plaxis paket programı ile iki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

▼ İlk örnekte jet grouting yöntemi ile yapılan dayanım duvarlarının sayısal analizleri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle ara yüzey elemanı, ağ boyutu ve duvar kalınlığının sonuçlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonrasında destekli ve desteksiz duvarların analizleri yapılmış ve destekler arasındaki mesafelerin sonuçlar üstündeki etkisi araştırılmıştır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Ü Analizlerde eleman ve düğüm sayısının artırılması ve zemin ile yapı arasında ara yüzey elemanının kullanılması durumunda daha hassas modellemeler yapılarak daha isabetli sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir.
- Ü Plaxis 3D ile yapılan analizlerde ikinci sıra destek elemanları arasındaki mesafelerin artması ile duvar güvenlik faktörünün azaldığı, duvardaki yatay deformasyon değerlerinin ise arttığı görülmektedir.
- Ü Analiz sonuçlarından, dayanım duvarlarında ankraj kullanılması durumunda duvar boyutlarının önemli ölçüde küçültülebildiği görülmektedir. Yapılacak inşaat için fizibilite çalışması aşamasında bu durumun irdelenip duvar maliyet analizinin yapılması, inşaat ekonomisi açısından oldukça büyük önem taşımaktadır.

▼ İkinci örnek, yer altına yapılacak otopark için temel çukuru temel kazısı ve mevcut bina temelleri için destek yapısı analizlerini içermektedir. Çalışmada iki farklı geometrideki duvar modelinde cut off duvarı ve perdesi kullanımının deformasyon ve güvenlik faktörü değerlerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca ankraj elemanlarına uygulanan öngerme kuvvetlerinin hesaplanan deformasyon ve güvenlik faktörü değerlerine etkisi incelenmiştir.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Ü Cut off perdesinin kullanılması durumunda dayanım duvarındaki düşey ve yatay deformasyonların azaldığı güvenlik faktörünün ise arttığı görülmektedir. Bunun bir sebebi suyun itki kuvvetinin bir kısmının cut off perdesi tarafından karşılanması, diğer sebebi ise cut off perdesinin dayanım duvarına destek olması olarak yorumlanabilmektedir.
- Ü Cut off duvarı kullanıldığı takdirde hem yatay hem de düşey deformasyon değerleri azalmakta güvenlik faktörü artmaktadır. Cut off duvarı kullanıldığında oluşan düşey deformasyonların, cut off perdesi kullanılması durumunda oluşan düşey deformasyonlara göre belirgin bir şekilde azalmasının sebebi cut off duvarı kalınlığının fazla olmasından dolayı taşıyıcı özelliğinin olması olarak yorumlanabilmektedir.
- Ü Ankraj öngerme kuvvetlerinin uygulanması hem kalın hem de ince duvar tiplerinde deformasyonları azaltmaktadır. En küçük deformasyon değerlerine dayanım duvarlarına ilave olarak cut off duvarı kullanıldığında ulaşılmaktadır.
- Ü Analiz sonuçlarından dayanım duvarlarında ankraj öngerme kuvveti değişiminin güvenlik faktörüne etkisi olmadığı görülmektedir. Ankrajlara uygulanan öngerme kuvveti azaltılsa bile duvarların güvenlik faktöründe bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum öngerme kuvvetinin, gelen basınçlar karşısında dayanım duvarının yatay ve düşey hareketlerini bir miktar engellemekte olduğu fakat duvarın sınır göçme değeri üzerinde bir etkisi olmadığı şeklinde yorumlanabilmektedir.

▼ Üçüncü örnekte çimento katkılı kolonlar ile iyileştirilmiş, kompozit yapıdaki zeminlerde homojenleştirme metodu incelenmiştir. Bu bölümde Omine vd. (1999)

tarafından yapılan model deneyi sonuçları, Omine vd. (1993) ve Omine vd. (1999) tarafından önerilen homojenleştirme metodu ile homojenleştirilmiş zemin üzerinde Plaxis 2D programı ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Ü Model deneyi sonuçları, Plaxis 2D ile yapılan analiz sonuçlarına yaklaşmakta ama tam olarak aynı değeri vermemektedir. Göçme yükü değerleri benzer hesaplanmasına rağmen deformasyonlarda farklılık görülmektedir. Aynı yük derecesinde model deneyinde daha büyük deformasyonların meydana geldiği görülmektedir.

Ü İki farklı homojenleştirme metodu ile elde edilen parametreler kullanılarak yapılan analizlerde, homojenleştirilmiş malzemelerin elastik modülleri farklı olmasına rağmen aynı gerilme - deformasyon eğimi elde edilmektedir. Omine vd. (1993) tarafından önerilen metotta lineer elastik ilişki esas alındığından dolayı göçme değeri elde edilememektedir.

▼ Son örnekte, Ø33m ve Ø15m çaplarında tank temelleri altındaki zemininin jet grouting yöntemi ile ıslah analizleri yapılmıştır. Çalışmada mevcut zeminin taşıma gücü ve oturma hesapları klasik yöntem ve Plaxis 2D programı ile yapılmıştır.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Ü Birim hücre analizleri sonucunda jet grout kolonları ile iyileştirilmiş zeminde temel yükleri karşısında gerçekleşen oturma miktarının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.

Ü Klasik yöntemde güvenlik sayısına bağlı olarak ekonomik olmayan çözümler elde edilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde ise zemin ve yapı daha detaylı modellendiği için daha ekonomik çözümler elde edilebilmektedir.

Gelecekteki çalışmalar için sonlu elemanlar yöntemi ile daha pratik analizlerin yapılabilmesi için homojenleştirme metotlarının veya daha farklı yöntemlerin geliştirilmesine ve geçerliliğinin irdelenmesine ihtiyaç vardır.

## KAYNAKLAR

- BAUMANN V., 1984. "Das Soilcrete - Verfahren in der Baupraxis", Vortrage der Baugrundtagung , Duesseldorf: 49 - 83. DGEG.
- 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 Mexicalli, Mexico, New Orleans, pp. 354 - 364, USA.
- BOULANGER R.W., HAYDEN R.F., 1995. "Aspects of Compaction Grouting of Liquefiable Soil", Journal of Geotechnical Engineering , ASCE, Cilt 121, No.12.
- BRAY J. D., SANCIO R. B., RIEMER M., DURGUNOGLU H. T. (2004), "Liquefaction Susceptibility of Fine Grained Soils" Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, UC Berkeley, California, U.S.A
- BRINKGREVE R.B.J. 2002. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (User manuals), Balkema.
- BZOWKA J., 2004. "Computational Model for Jet Grouting Pile - Soil Interaction", Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXVI, No. 3 – 4.
- CUBRINOVSKI M., ISHOHARA K., 2001. "Analysis of the Performance of an Oil-tank Pile Foundation in Liquefied Deposits", Proceedings of Satellite Conference Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, Istanbul.
- DOĞU O., YILDIRIM H., DURGUNOĞLU A. T., 2006. "Zeminin İnce Dane Oranı ve SPT Vuruş Sayısının Jet Grout Kolonların Mukavemetine Etkisi", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği On birinci Ulusal Kongresi, K.T.Ü., Trabzon.
- DURGUNOĞLU H. T., 2004. "Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- DURGUNOĞLU H. T., KULAÇ H. F., ORUÇ K., ÖGE C.E., EKER F.Ş., 1998. "Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme Üzerine Bir Uygulama", Zemin Mekaniği

ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız teknik Üniversitesi, İstanbul.

DURGUNOĞLU H.T., KULAÇ H.F., ORUÇ K., YILDIZ R., ALTUGU T., EMREM C.A., 2002. “Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin Islahına Ait Bir Vaka Analizi”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

DURGUNOĞLU H. T., KULAÇ H. F., ORUÇ K., YILDIZ R., SICKLING J., BOYS I. E., ALTUGU T, EMREM C., 2003. “A Case History of Ground Treatment with Jet Grouting Against Liquefaction for a Cigarette Factory in Turkey”, Grouting and Grout Treatment, New Orleans, USA.

DÜZCEER R., 2004. “Sakhalin Doğalgaz ve Petrol İşleme Tesisi Kazık İşleri”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

GÖKALP A., DÜZCEER R., (2002). “Ground Improvement by jet grouting technique for foundations of a natural gas combined cycle power plant in Turkey” Ninth International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, DFI, October 2002, Nice, France.

ICHIHASHI Y., SHIBAZAKI M., KUBO H., LJI M., MORI A., 1992. “Jet Grouting at Airport Construction” Proc. ASCE Conf., Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. New Orleans, Vol. 1, pp. 182 - 193.

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.

INTERNATIONAL NAVIGATION ASSOCIATION, (2001). “Seismic Guidelines for Port Structures”, Working Group No. 34 of the Maritime Navigation Commission, A.A. Balkema Publishers, Netherlands.

KAUSCHINGER J. L., HANKOUR R., PERRY E. B., 1992. “Methods to Estimate Composition of Jet Grout Bodies”, Proceedings of the conference of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. New Orleans, 2 vols., pp. 194 - 205, ASCE.

- KIRSCH F., SONDERMANN W., 2001. "Ground improvement and its numerical analysis". Proc. 15th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engg., Istanbul 2001, A.A. Balkema, S. 1775 - 1778
- KUMBASAR V., KİP F., 1985. "Zemin Mekaniği Problemleri", Çağlayan Kitabevi, 520 s.
- LIAO S.S.C., WHITMAN R.V., 1986. "Overburden Correction Factor for SPT in Sand". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No 3, pp. 373 - 377.
- LUNARDI P., 1977. "Ground Improvement by Means of Jet-Grouting", Ground Improvement, ISSMFE Thomas Telford, Vol 1 No:2, pp. 65 - 86.
- MELEGARY C., GARASSINO A.L., 1997. "Seminar on Jet Grouting", CI-Premier Pte. Ltd., Singapore.
- OHTA. Y., GOTO N. (1978). "Emprical Shear Wave Velocity Equations in terms of Characteristic Soil Indices",. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.6, p. 167 - 187.
- 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.
- OMINE K., OCHIAI H., YOSHIDA N., 1998. "Estimation of In – Situ Strenght of Cement – Treated Soils Based on a Two – Phase Mixture Model", Soils & Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 17 – 29.
- OMINE K., OHNO S., 1997. "Deformation Analysis of Composite Ground by Homogenization Method", Proc. of 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, pp. 719 – 722.
- 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.
- OU C.Y., TENG F.C., WANG I. W. 2007. "Analysis and Design of Partial Ground Improvement in Deep Excavations", Computers and Geotechnics 35 576 – 584.



- ÖZSOY M.B., 2002. “The Mitigation of Liquefaction by means of Soil Improvement Techniques”, Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, Istanbul, Türkiye.
- ÖZSOY B., DURGUNOĞLU H. T., 2003. “Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması”, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- PALACIOS A., 1977. “The Theory and Measurement of Energy Transfer during Standard Penetration Test Sampling” Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville, Fla
- RACANSKY V., SCHWEIGER H.F., THURNER R., 2008. “FE-Analysis of the Behaviour of Buttressed Jet Grouted Retaining Walls” Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics., 3984 - 3992
- RACANSKY V., THURNER R., KUMMERER C., 2006. “Design of a deep building pit with numerical and limit equilibrium methods” Numerical Methods in Geotechnical Engineering – Schweiger (ed.) © Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 – 415 – 40822 - 9
- RAUSCHE F.,GOBLE G., LIKINS G., 1988. “Recent WEAP Developments”, Proceedings of the Third International Seminar on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa.
- ROBERTSON P. K., WRIDE C. E., 1998. “Evaluating Cyclic Mobility Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test.” Can. Geotechnical Journal. Ottawa, Vol. 35, No.3, pp. 442 – 459.
- SAGLAMER A., DÜZCEER R., GOKALP A., YILMAZ 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.
- SANCIO R. B., BRAY J. D., REIMER M. F., DURGUNOĞLU H. T., 2003. “An Assesment of the Liquefaction Susceptibility of Adapazari Silt”, Pasific Conference on Earthquake Engineering, paper no.172
- SCHMERTMANN, 1976. “The Shear Behavior of Soil at Constant Structure”. Bjerrum Memorial Volume. Norvegian Geotecnical Institute, Oslo, Norway, p, 87.

- SCHMERTMANN, 1977. "Guides for CPT Performance and Design". Report prepared for Federal Highway Administration, Washington D.C.
- SEED H. B., IDRIS I. M., 1971. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.105 (GT2), pp. 201 - 255, 1979
- SEED H. B. IDRIS I. M., 1982. "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- SEED H.B., TOKIMATSU K., HARDER L. F., CHUNG, R., 1985. "Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111(12), pp.1425-1445, 1985.
- SERT S., ÖNALP A., 2007. "Turba Üzerine Yapılmış Rijit Platformun Oturmaları ve Kontrolü", ZMTM 1. Özel Konulu Sempozyumu: Teori ve Uygulamada Zemin - Yapı Etkileşimi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, sayfa: 181 - 185, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- TREVI K., 1994. "Columnar Treatment", Illustrative Report, Cesena.
- TS EN 12716, 2002. "Özel Jeoteknik Uygulamalar - Jet Enjeksiyon"
- TSCHUCHNIGG F., SCHWEIGER H.F., 2008. "Comparison Of Different Models For Analysing Foundations On Jet Grout Columns" Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, 3149 - 3157
- YOUD L. T. v.d., (21 farklı yazar) 2001. "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER-NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.127(10), pp. 817 – 833.
- YOUD L. T., IDRIS I. M., eds 1997. Proc. NCEER Workshop on Evaluation Liquefaction Resistance of Soils, NCEER, Buffalo, Newyork.
- 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-FMGM99, Singapore, 279 - 284.
- WONG J.G., POH T.Y., 2000. " Effects of Jet Grouting on Adjacent Ground and Structures", J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 247 - 256.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 yılında Adana'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Adana'da tamamladım. 2002 yılında Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim görmeye hak kazandım. 2006 yılında bu bölümden mezun oldum. Aynı yıl hem mesleki faaliyetlerime hem de Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimime başladım.