



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNCE DANELİ ZEMİNLERDE TEKİL JET KOLON TASARIMI

NUR AHMET GÜRLEYİK

Temmuz 2018

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

İNCE DANELİ ZEMİNLERDE TEKİL JET KOLON TASARIMI

NUR AHMET GÜRLEYİK

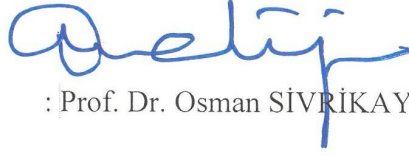
Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Temmuz 2018

Nur Ahmet GÜRLEYİK tarafından **Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA** danışmanlığında hazırlanan “**İnce daneli zeminlerde tekil jet kolon tasarımı**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Zülküf KAYA Erciyes Üniversitesi



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

ONAY:

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

...../...../2018

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Nur Ahmet GÜRLEYİK

ÖZET

İNCE DANELİ ZEMİNLERDE TEKİL JET KOLON TASARIMI

GÜRLEYİK, Nur Ahmet

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman

: Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Temmuz 2018, 115 sayfa

Jet grout yöntemi, gelişimini sürdürmekte olan teorik bilgi eksikliği olduğu için daha önceden yapıpı tecrübe edilen çalışmalar doğrultusunda uygulanmakta olmasına rağmen sıkça kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu tez çalışmasında, çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde jet grout kolonların taşıma gücü ve oturma değerlerinin, jet grout kolonun boyuna ve zeminin drenajsız kayma mukavemeti değerine bağlı değişimi incelenmiş olup teorik ve nümerik analiz yönteminden elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri karşılaştırılmıştır. Drenajsız kayma mukavemeti değeri 5 kN/m^2 , 10 kN/m^2 , 15 kN/m^2 ve 24 kN/m^2 olan çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boylarındaki jet grout kolonların taşıma gücü teorik yöntemle oturma değerleri ise yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle bulunmuştur. Ayrıca jet grout kolonları, sonlu elemanlar yöntemi kullanan PLAXIS 2D programında, Mohr Coulomb ve Pekleşen Zemin modelleriyle tanımlanıp jet grout kolonlarının oturma ve taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. Elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri karşılaştırılarak sonuçlar tez kapsamında sunulmuştur. Bu çalışma ile jet grout kolon parametrelerinin, zemin parametrelerinin ve modellemenin, taşıma gücü ve oturma değerlerini ne düzeyde etkilediği görülmüştür. Jet grout kolon tasarımı yapılırken tasarım parametrelerinin seçiminin dikkatli ve doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir.

Anahtar Sözcükler: Jet grout kolon, taşıma gücü, oturma, nümerik analizi, plaxis

SUMMARY

DESIGNING SINGULAR JET COLUMN FOR VERY SOFT AND SOFT SOIL

GÜRLEYİK, Nur Ahmet

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

July 2018, 115 pages

Jet grout method is a frequently used method of soil improvement although it is applied in the direction of previous work done and experienced because it is lack of theoretical knowledge which is continuing to develop. In this study, the variation of bearing capacity and settlement values of jet grout columns with the length of jet grouting column and the undrained shear and settlement values obtained from theoretical and numerical analysis method are compared. The bearing capacity of jet grouting columns of 10 m, 15 m, 20 m and 30 m in diameter of 80 cm in very soft and soft fine-grained dense soils with a undrain shear strength value of 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa and 24 kPa are found by semi- empirical, empirical and theoretical methods. In addition, jet grout columns are defined with Mohr Coulomb and Hardening Soil Models in the PLAXIS 2D program which uses the finite element method, and the settlement and bearing capacity values of jet grout columns are obtained. Bearing capacity and settlement values are compared and the results are presented in this study. This study show how the jet grout column parameters, soil parameters selection of the design parameters are carefully and accurately determined while the jet grout column is being designed.

Keywords: Jet grouting column, bearing capacity, settlement, numeric analysis, plaxis

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, farklı boylarda ve sabit çapta, farklı drenajsız kayma mukavemeti değerlerinde ve farklı zemin modellerindeki jet grout kolonların, çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerdeki taşıma gücü ve oturma değerleri elle hesap yöntemleri ve PLAXIS'te yapılan farklı modellemeler ile nümerik olarak elde edilmiştir. Zemin parametrelerinin, seçilen hesap yönteminin ve analiz modelinin nümerik ve elle hesap yapılarak elde edilen taşıma gücü ve oturma değerlerinde oluşturduğu farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın elle hesap yöntemi ve nümerik model analizi ile yapılacak diğer jet grout kolon tasarımı çalışmalarına kaynak olması da amaçlanmaktadır.

Tez çalışmam süresince gerek alanındaki bilimsel hakimiyetinden, gerek tecrübelerinden, gerekse insani desteğinden çokça faydalandığım kıymetli hocam Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde maddi manevi büyük emekler sarf eden anneme ve babama, sevgisini her daim hissettiğim biricik eşime teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xvi
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II JET GROUT YÖNTEMİ.....	3
2.1 Jet Grout Yönteminin Uygulanması	4
2.1.1 Saha hazırlıkları	5
2.1.2 Delgi işlemi.....	5
2.1.3 Enjeksiyon işlemi	6
2.2 Jet Grout Kolonu Oluşturma Parametreleri	7
2.2.1 Tek akışkanlı yöntem.....	7
2.2.2 Çift akışkanlı yöntem.....	8
2.2.3 Üç akışkanlı yöntem	9
2.2.4 Süper jet yöntemi	10
2.2.5 Jet grout sistemlerinin karşılaştırılması	11
2.3 Jet Grout Uygulama Ekipmanları	12
2.3.1 Delgi makinası	12
2.3.2 Enjeksiyon pompası.....	14
2.3.3 Mikser ünitesi	14
2.3.4 Çimento silosu	15
2.3.5 Monitör	16
2.4 Jet Grout Kolonlarının Temel Mühendisliğinde Kullanımı	16
2.5 Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları	18
BÖLÜM III JET GROUT KOLONU OLUŞTURMA PARAMETRELERİ.....	20
3.1 Enjeksiyon Basıncı	20
3.2 Dönme ve Çekme Hızı	23
3.3 Dozaj	24

3.4 Nozullar	26
3.5 Türkiye’de Uygulanan Jet Grout Sistemleri ve İmalat Parametreleri	27
BÖLÜM IV JET GROUT KOLONU KALİTE KONTROL DENEYLERİ.....	32
4.1 Deneme Kolonlarının İnşası ve Çap Kontrolü	32
4.2 Karot Numunelerinin Alınması, Serbest Basınç Deneyi ve Permeabilite	33
4.3 Kolon Yükleme Deneyi	35
4.3.1 Standart yükleme deneyi.....	36
4.3.2 Tekrarlı yükleme deneyi	37
4.3.3 Sabit zaman aralıklarıyla yükleme yöntemi	37
4.3.4 Sabit penetrasyon oranı deney yöntemi	37
4.3.5 Hızlı yükleme deney yöntemi	38
4.3.6 Sabit oturma artırımlarında yükleme deneyi yöntemi	38
4.4 Kolon Süreklilik Deneyi	38
4.5 Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu	40
BÖLÜM V JET GROUT KOLON TASARIMI.....	42
5.1 Jet Grout Kolonun Taşıma Gücü Kontrolü	42
5.1.1 Jet grout kolonun teorik yaklaşımla taşıma gücü hesabı	42
5.2 Jet Grout Kolonun Dayanım Kontrolü	45
5.3 Jet Grout Kolonun Oturma Kontrolü	47
5.3.1 Elastik oturma	49
5.3.1.1 Yarı ampirik oturma	49
5.3.1.2 Ampirik oturma	50
5.3.1.3 Teorik oturma	50
5.3.2 Konsolidasyon oturması	51
BÖLÜM VI JET GROUT YÖNTEMİYLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ...	52
6.1 Jet Grout ile Zemin İyileştirme, Kalite Kontrol Deneyleri ve Vaka Analizleri	52
6.2 Jet Grout Kolonlarının Serbest Basınç Dayanımları, Oturma ve Taşıma Kapasitesi Analizleri	54
6.3 Jet Grout Dayanma Yapılarının Davranışının Analizi	56
6.4 Jet Grout Uygulamasının Nümerik Analizi	56
BÖLÜM VII ÇOK YUMUŞAK VE YUMUŞAK İNCE DANELİ ALÜVYON ZEMİNLERDE TEKİL JET KOLON TASARIMI.....	59
7.1 Materyal ve Metot	59
7.1.1 Zemin parametrelerinin belirlenmesi.....	60

7.1.2 Zemin modelleri.....	60
7.1.3 Jet grout kolonu imalat parametreleri	63
7.2 Elle Hesap Yöntemleri	65
7.2.1 Jet grout kolonlarının taşıma gücü hesabı	65
7.2.2 Jet grout kolonun malzeme dayanımı hesabı	67
7.2.3 Jet grout kolonunun oturma hesabı	69
7.2.3.1 Yarı ampirik yöntem ile oturma hesabı	69
7.2.3.2 Ampirik yöntem ile oturma hesabı	71
7.2.3.3 Teorik yöntem ile oturma hesabı	72
7.2.4 Jet grout kolonun oturma hesaplarının karşılaştırılması	73
7.3 Nümerik Hesap Yöntemleri	76
7.3.1 Sonlu elemanlar yöntemi ve PLAXIS	76
7.3.2 PLAXIS foundation sonlu elemanlar programı	78
7.3.3 Geometrik model ve parametrelerinin belirlenmesi	80
7.4 Jet Grout Kolonun Modellenmesi ve Analizi	85
7.5 Analiz Sonuçları	89
BÖLÜM VIII ANALİZLERİN SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	102
8.1 Taşıma Gücü Değerlerinin Karşılaştırılması	102
8.2 Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması	104
BÖLÜM IX SONUÇLAR.....	108
KAYNAKLAR	110
ÖZ GEÇMİŞ	115

Çizelge 7.20. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil modelindeki taşıma gücü değerleri	90
Çizelge 7.21. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki taşıma gücü değerleri	90
Çizelge 7.22. Jet grout kolonun ve zeminin Mohr Coulomb modelindeki maksimum oturma değerleri	96
Çizelge 7.23. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil modelindeki maksimum oturma değerleri	96
Çizelge 7.24. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki maksimum oturma değerleri	96
Çizelge 7.25. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki maksimum oturma değerleri	96
Çizelge 7.26. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil modelindeki maksimum oturma değerleri	97
Çizelge 7.27. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki maksimum oturma değerleri	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Dane dağılımına göre enjeksiyon uygulamaları	4
Şekil 2.3. Jet grout yöntemi uygulama aşamaları	4
Şekil 2.3. Saha içerisindeki jet grout ekipmanları yerleşimi	5
Şekil 2.4. Delgi aşaması	6
Şekil 2.5. Enjeksiyon işlemi	7
Şekil 2.6. Tek akışkanlı yöntem	8
Şekil 2.7. Çift akışkanlı yöntem	9
Şekil 2.8. Üç akışkanlı yöntem	10
Şekil 2.9. Süper jet enjeksiyon	11
Şekil 2.10. Jet grout kolon oluşumu ve ekipmanları	12
Şekil 2.11. Jet grout delgi makinası ekipmanları	13
Şekil 2.12. Jet grout delgi makinası	14
Şekil 2.13. Jet grout pompa ünitesi	14
Şekil 2.14. Jet grout karışım ünitesi	15
Şekil 2.15. Jet grout çimento silosu	15
Şekil 2.16. Jet grout uygulamaları	18
Şekil 3.1. Jet grout kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki	22
Şekil 3.2. Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi	22
Şekil 3.3. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi	26
Şekil 3.4. Nozul	26
Şekil 4.1. Farklı zemin türlerindeki deneme kazıkları ve çap kontrolü	32
Şekil 4.2. Karot numunelerinin alınması	33
Şekil 4.3. Karot numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılışı	34
Şekil 4.4. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonu serbest basınç mukavemeti değerleri	34
Şekil 4.5. Kolon yükleme deney sistemi	36
Şekil 4.6. Kazık yükleme deneyi	36
Şekil 4.7. Kolon süreklilik deneyi şeması	39
Şekil 4.8. Kolon süreklilik testi cihazı	40
Şekil 4.9. Derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği	40

Şekil 4.10. Proje kriterlerinin sahada kalibrasyon ve optimizasyonu	41
Şekil 5.1. Jet grout kolon uç mukavemeti ve çevresel sürtünme mukavemeti	43
Şekil 5.2. α için ASCE önerisi	45
Şekil 5.3. Jet grout kolonun dayanım kontrolü	46
Şekil 5.4. Jet grout kolonlarıyla iyileştirilen zeminlerde oluşabilecek oturmalar	47
Şekil 5.5. Jet grout kolonların yük transfer mekanizması	48
Şekil 5.6. a_s faktörünün değişimi	49
Şekil 7.1. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemin modeli	61
Şekil 7.2. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemin modeli	61
Şekil 7.3. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zemin modeli	62
Şekil 7.4. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zemin modeli	62
Şekil 7.5. Elle hesaplanan jet grout taşıma gücü değerleri	66
Şekil 7.6. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı	67
Şekil 7.7. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı	68
Şekil 7.8. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı	68
Şekil 7.9. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı	69
Şekil 7.10. Yarı ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri	70
Şekil 7.11. Ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri	71
Şekil 7.12. Teorik yöntemle elde edilen oturma değerleri	72
Şekil 7.13. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi	73
Şekil 7.14. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi	73
Şekil 7.15. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi	74
Şekil 7.16. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi	74
Şekil 7.17. Analizlerin algoritması	80
Şekil 7.18. Sonlu elemanlar model geometrisi	81
Şekil 7.19. Jet grout kolonun kayma mukavemeti ile serbest basınç mukavemeti ilişki	84
Şekil 7.20. Genel ayarların belirlenmesi	85
Şekil 7.21. Zemin parametrelerinin girilmesi	85
Şekil 7.22. Jet grout kolonun zemin olarak tanımlandığı model	86
Şekil 7.23. Zemin olarak tanımlanan kolonların ağ sistemleri	86

Şekil.7.24. Zemin olarak tanımlanan kolonların yeraltı su seviyesi	87
Şekil 7.25. Zemin olarak tanımlanan kolonların boşluk suyu basıncı	87
Şekil 7.26. Zemin olarak tanımlanan kolonların efektif gerilmesi	87
Şekil 7.27. Hesap aşamaları	88
Şekil 7.28. Jet grout kolon modelinin oturma değerleri	88
Şekil 7.29. Jet grout kolonun göçtüğü yükün bulunması	89
Şekil 7.30. Jet grout kolonun yük-deplasman eğrisi	90
Şekil 7.31. Modelde hem zemin hem jet grout kolonun MC olarak tanımlanan jet grout kolonun taşıma gücü değerleri	92
Şekil 7.32. Jet grout kolonun MC zeminin ise SS modelindeki taşıma gücü değerleri ..	92
Şekil 7.33. Jet grout kolonun MC zeminin ise SSC modelindeki taşıma gücü değerleri	93
Şekil 7.34. Jet grout kolonun HS zeminin ise MC modelindeki taşıma gücü değerleri ..	93
Şekil 7.35. Jet grout kolonun HS zeminin ise SS modelindeki taşıma gücü değerleri ..	94
Şekil 7.36. Jet grout kolonun HS zeminin ise SSC modelindeki taşıma gücü değerleri ..	94
Şekil 7.37. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti	95
Şekil 7.38. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti	96
Şekil 7.39. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti	96
Şekil 7.40. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti	96
Şekil 7.41. Jet grout kolonun ve zeminin MC modelindeki maksimum oturma değerleri	99
Şekil 7.42. Jet grout kolonun MC zeminin ise SS modelindeki maksimum oturma değerleri	99
Şekil 7.43. Jet grout kolonun MC zeminin ise SSC modelindeki maksimum oturma değerleri	100
Şekil 7.44. Jet grout kolonun HS zeminin ise MC modelindeki maksimum oturma değerleri	100
Şekil 7.45. Jet grout kolonun HS zeminin ise SS modelindeki maksimum oturma değerleri	101

Şekil 7.46. Jet grout kolonun HS zeminin ise SSC modelindeki maksimum oturma değerleri	101
Şekil 8.1. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri	102
Şekil 8.2. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri	103
Şekil 8.3 $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri	103
Şekil 8.4. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri	104
Şekil 8.5. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri	105
Şekil 8.6. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri	105
Şekil 8.7. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri	106
Şekil 8.8. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri	106

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Ap	Jet grout kolonun kesit alanı
as	Jet grout kolon gövdesince çevre sürtünmesine bağlı katsayı
As	Jet grout kolonun zemin içerisinde kalan yüzey alanı
c	Kohezyon
c1	Jet grout kolonun ucundaki drenajsız kayma mukavemeti
c2	Jet grout kolonun çevresindeki drenajsız kayma mukavemeti
C	Dalganın yayılma hızı
Cp	Ampirik katsayı
D	Jet grout kolonun çapı
Dr	Rölatif sıklık
Df	Jet grout kolonun gömülü derinliği
EA	Eksenel rijitlik
EI	Eğilme rijitliği
Eur	Programın boşaltma anında kullandığı elastisite modülü
EJG	Jet grout kolonun elastisite modülü
E50	Programın yükleme anında kullandığı elastisite modülü
fs	Çevre yüzeyde birim alanda etkili olan sürtünme
g	Yer çekimi
Gs	Güvenlik katsayısı
h	Hidrostatik düşü
kg	Kilogram
Ks	Ortalama yatay toprak basıncı katsayısı
kx	Yatay geçirgenlik
ky	Düşey geçirgenlik
K2	Şekil katsayısı
L	Jet grout kolon boyu
mm	Milimetre

N_c, N_q, N_γ	Taşıma gücü faktörleri
Q	1sn sürede bir nozuldan çıkan enjeksiyon malzemesi miktarı
Q_{em}	Jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü
Q_{fa}	Servis yükü altında jet grout kolon gövdesince taşınan yük
Q_p	Jet grout kolon ucu tarafından taşınan toplam yük
q_p	Jet grout kolonun ucunda birim alan için uç direnci
Q_{pa}	Servis yükü altında kolon ucu tarafından taşınan yük
Q_s	Jet grout kolonun çevre sürtünmesi ile taşıyabileceği yük
Q_u	Jet grout kolonun kırılma olmadan taşıyabileceği yük
Q_{va}	Üst yapıdan gelen yük
S_p	Jet grout kolon ucunun oturması
S_{ps}	Jet grout kolonun gövdesi boyunca taşınan yükten oturması
S_s	Jet grout kolonun elastik oturması
S_t	Jet grout kolonda oluşan toplam oturma
t	Darbeden yansıma anına kadar geçen süre
W_k	Jet grout kolonun ağırlığı
V	Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı
V_h	1 m ıslah edilmiş zemin hacmi
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
γ_k	Kuru doymun birim hacim ağırlıkları
γ_d	Suya doymun birim hacim ağırlıkları
σ	Jet grout kolonun serbest basınç mukavemeti
σ_{JG}	Seçilen derinlikte etkili olan efektif jeolojik yük
ϕ	Zeminin içsel sürtünme açısı
μ	Poisson oranı
Ψ	Dilatans açısı
Δh_e	Jet grout kolonda meydana gelen düşey deplasman
δ	Kolon malzemesi ve zemin arasındaki çevre sürtünme açısı

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	American Society for Testing and Materials
HS	Pekleşen Zemin
JET 1	Tekli Jet Sistemi
JET 2	Çiftli Jet Sistemi
JET 3	Üçlü Jet Sistemi
JGK	Jet Grout Kolon
MC	Mohr Coulomb
MPA	Mega Paskal
ÖY	Ön Yıkama
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü

BÖLÜM I

GİRİŞ

Kentlerdeki nüfusun hızlı bir şekilde artması birçok mühendislik yapısının yapılmasına neden olmuştur. Mühendislik yapıları, belli alanlarda, konumu önceden belirlenmiş yerlerde tasarlanır ancak detaylı bir geoteknik modelleme sonucu gerçekleştirilebilir. Bu modelleme sonucunda, istenilen taşıma gücüne sahip değil, oturma sınır değerlerini geçen düşey deplasmanlar yapıyor ve sıvılaşma potansiyeli içeriyorsa, hedeflenen projenin uygulanabilmesi için temel zeminin iyileştirilmesi gerekebilir.

Teknoloji geliştikçe, yeni zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bunlardan son yıllarda yaygın olarak kullanılanlardan biri de jet grout kolon yöntemidir. Bu yöntem diğer zemin iyileştirme yöntemlerine kıyasla daha ekonomik olması, uygulama süresinin daha kısa olması ve kil - silt ve kum zeminler gibi çok geniş uygulama yelpazesi olduğu için tercih edilmektedir.

Jet grout kolonları, zemine yüksek basınçlı olarak çimento enjeksiyonunun belirli zaman aralıklarında belirli bir zemin profilini örselemesi ve sürüklemesi sonucu üretilmektedir. Düşey yükler altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolüne yönelik, yer altı su seviyesi altında yapılacak kazılarda sızdırmazlık perdesi olarak, sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminlerin riskinin azaltılmasına yönelik başlıca uygulamalarda jet grout elemanları tercih unsuru olmaktadır.

Günümüzde sık karşılaşılan problemlili zeminler; yumuşak killler, şişebilen killler, organik zeminler, dispersif zeminler, lös zeminler, alüvyon zeminlerdir. Alüvyon zeminler, nehir ve akarsular tarafından taşınan; lös ve alüvyon zeminlerin özelliklerine sahip olan, içerisinde az miktarda ince daneli zemin (kil, silt) bulunduran kumlu zeminlerdir. Bu zeminler çökerek fazla miktarda oturma yapabilen zeminlerdir.

Tezin amacı, farklı kıvamdaki kil, silt ve kum karışımından oluşan alüvyon ince daneli zeminlerde ($c_u = 5 \text{ kN/m}^2$, $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$, $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$, $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$) aynı çapta (80 cm), farklı boylardaki (10 m, 15 m, 20 m ve 30 m) tekil jet grout kolonun

tasarlanmasıdır. Jet grout kolonlarının taşıma gücü değerleri, kazıklarda olduğu gibi teorik yöntemlerle hesaplanmıştır. Oturma değerleri ise yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle hesaplanmıştır. Ayrıca tekil jet grout kolonlarının nümerik modellenmesi yapılarak taşıma gücü ve oturma değerleri diğer yöntemlerle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında, Bölüm 2’de jet grout yönteminin tanıtımı, jet grout metodunun uygulanması, jet grout kolonu uygulama yöntemleri, jet grout uygulama ekipmanları, jet grout yönteminin uygulama alanları, jet grout yönteminin avantajları ve dezavantajları konuları incelenmiştir. Bölüm 3’de enjeksiyon basıncı, dönme ve çekme hızları, dozaj, nozullar gibi jet grout kolonu oluşturma parametreleri incelenmiştir. Bölüm 4’de jet grout kolonu kalite kontrol deneyleri olan deneme kolonlarının yapılması ve çap kontrolü, karot numune alınması ve serbest basınç deneyi, jet grout kolonu yükleme deneyi, süreklilik deneyi, proje kriterlerinin kalibrasyonu konuları ele alınmıştır. Bölüm 5’de jet grout kolonu tasarım kriterleri olan taşıma gücü ve oturma analizleri incelenmiştir. Bölüm 6’da jet grout yöntemiyle ilgili literatür taraması yapılmıştır. Bölüm 7’de çok yumuşak ve yumuşak ince daneli alüvyon zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı, elle hesap yöntemi ve nümerik analiz yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 8’de elle hesap yöntemleri ve nümerik yöntem ile modellenen jet grout kolonların analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bölüm 9’da ise analizlerden elde edilen jet grout kolonların taşıma gücü ve oturma değerleri irdelenip ulaşılan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

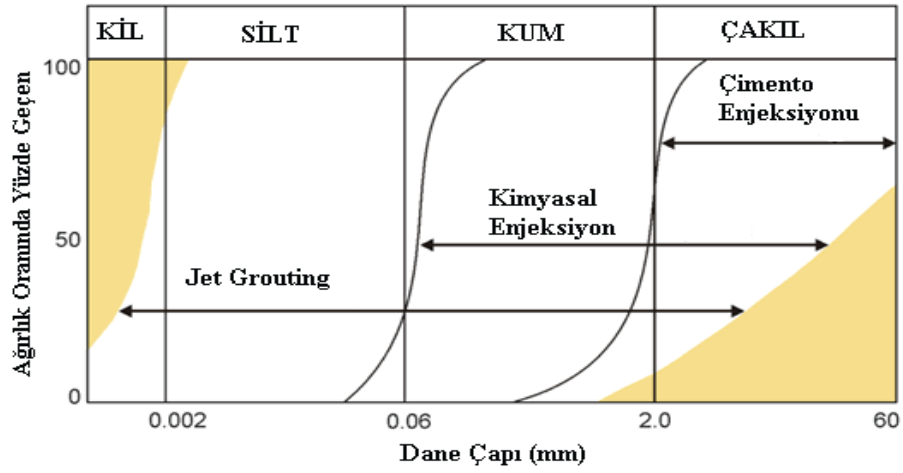
BÖLÜM II

JET GROUT YÖNTEMİ

Mevcut zeminin önce özel delgi makinesi ile delinmesi ve oldukça yüksek basınçta 400-500 bar çimento şerbetinin jetlenip, zeminin yerinde parçalanarak karıştırılması ve kullanılan özel tij ve monitörün belirli bir hızda döndürülerek yukarı çekilmesi suretiyle yerinde silindirik kolon teşkil edilmektedir. Bu inşa metodu jet grout kolon yöntemi olarak adlandırılır (Durgunoğlu, 2004).

Jet grout kolon yöntemi günümüzde birçok geoteknik mühendisliği probleminin efektif çözümünde kullanılan bir yöntem olmuştur. Çeşitli jet grout sistemlerinin bulunması, uygulamacıların tasarım kriterlerini sağlamak için farklı imalat parametrelerini uygulamalarına olanak sağlamaktadır (Burke, 2004).

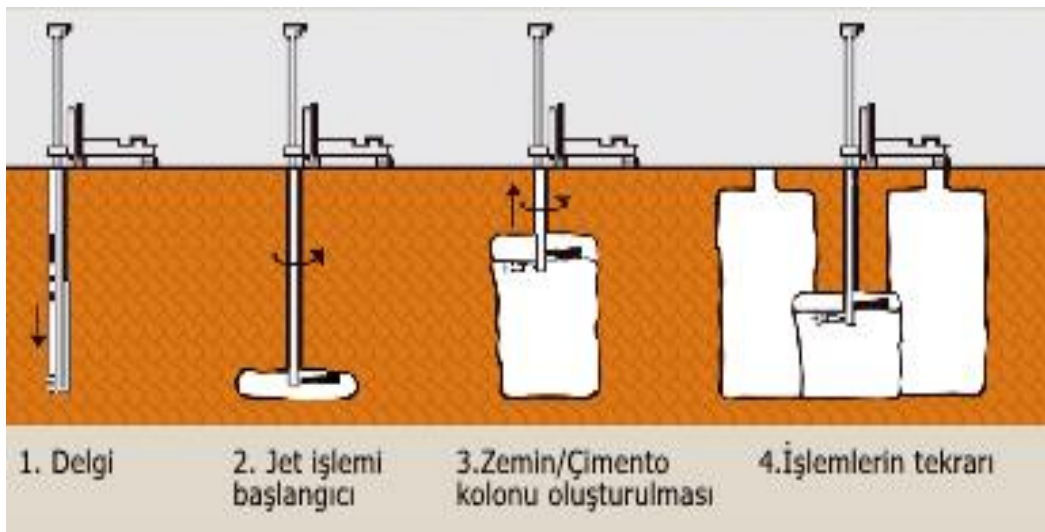
Jet grout kolon yöntemini diğer klasik enjeksiyon yöntemlerinden ayıran önemli özelliklerden biri, jet grout uygulaması sonucunda çimento şerbeti ile zeminin yer değiştirip yeni kompozit bir malzeme oluşturmasıdır. Jet grout kolon yöntemi, hemen her tür zayıf zemin tiplerinde doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda diğer iyileştirme yöntemlerinden daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifi olmakla, klasik enjeksiyon sistemlerinden en önemli farkı, uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı ile iyileştirilmiş zeminin taşıma gücü, deformasyon modülü ve geçirimsizliği gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve dolayısıyla işe başlamadan maliyetin belirlenebilmesidir. Yapım sırasında enjeksiyon hızı, açısı, tijin dönme ve geri çekiş hızı, nozul çapı ve sayısı gibi parametrelerin değiştirilmesi ile çeşitli iyileştirilmiş zemin şekilleri elde etmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.1’de dane dağılımına göre enjeksiyon tipi uygulamaları verilmiştir.



Şekil 2.1. Dane dağılımına göre enjeksiyon uygulamaları (URL-1, 2016)

2.1 Jet Grout Kolon Yönteminin Uygulanması

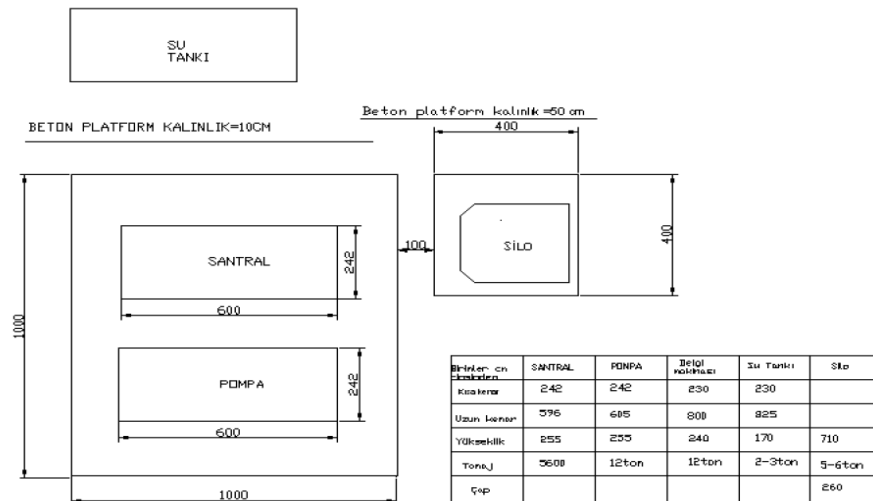
Jet grout kolon yönteminde zemin içinde 90 mm çaplı bir delik açılarak istenilen derinliğe erişilir. Sonra delgi borusu kendi etrafında dönerek yukarıya doğru çekilirken basınçlı çimento-su karışımı püskürtülerek zemin parçalanıp yanlara itilir. Bu şekilde meydana gelen boşlukta çimento-su ve zemin içeren bir kolon oluşturulur. Jet grout kolon yönteminin uygulanmasında saha hazırlıkları sonrasındaki işlemler delgi ve enjeksiyon olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir. Uygulama için Türkiye’deki mevcut yönetmelik “TS EN 12716 Özel Geoteknik Uygulamalar – Jet Enjeksiyon” yönetmeliğidir (Çınar, 2014). Şekil 2.2’de jet grout yöntemi uygulama aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.2. Jet grout yöntemi uygulama aşamaları (URL-2, 2016)

2.1.1 Saha hazırlıkları

Uygulamaya başlamadan önce inşaat sahası ve yolları, makine ve personelin verimli çalışmasına engel olmayacak şekilde düzenlenmeli bunun yanında düzgün ve kuru tutulmalıdır (Çınar, 2014). Proje kapsamındaki jet grout perdesi eksenini boyunca jet grout makine ve ekipmanlarının yerleştirilebileceği uygun alanlar oluşturulmalıdır. Her bir jet grout delgi noktası, projede belirtilen konumuna göre hassas bir şekilde tespit edilmeli ve işaretlenmelidir (Baş, 2006). Çalışma sahası; delgi makinesi, paletli vinç, beton mikseri, beton pompası ve iş makinelerinin sağlıklı çalışmalarına imkan verecek şekilde düzeltilmelidir (Baş, 2006). Şekil 2.3’de saha içerisindeki jet grout ekipmanları yerleşimi gösterilmiştir.

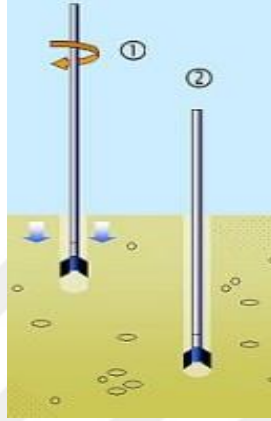


Şekil 2.3. Saha içerisindeki jet grout ekipmanları yerleşimi (Arslan, 2013)

2.1.2 Delgi işlemi

Delme işleminin yöntemi, delinecek zeminin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Delgi sırasında, sorunsuz bir şekilde çalışılabilme açısından, kuyu ağzının yer altı su seviyesinin üzerinde olması tercih edilir. Delme işleminin kolaylaştırılması ve uç takımının soğutulması amacıyla delme sırasında su, hava, bentonit şerbeti, çimento şerbeti gibi çeşitli akışkanlar kullanılmaktadır (Çınar, 2014). Yumuşak karakterli zeminlerde uç takımı olarak genellikle kil bitleri, sert karakterli zeminlerde ise "tricone" bitler kullanılmaktadır (Çınar, 2014). Alüvyonlu zeminlerde su ve hava ile delgide kullanılan kademeli matkap, yumuşak zeminlerde kullanılan kademesiz delgi matkabı

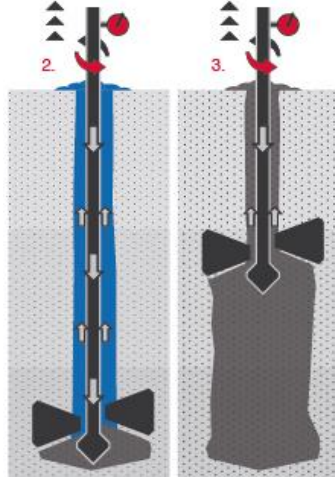
kullanılmaktadır. Delgi noktası aksi belirtilmediği takdirde proje üzerinde belirtilen konumundan 5 cm'den fazla sapmamalıdır. Delgi noktasının teorik eksenden sapması 20 m derinliğe kadar en fazla %2 olmalıdır. Ön jet enjeksiyon hazırlık aşamasında yeraltında tahmin edilemeyen engellere rastlanması durumunda enjeksiyon yapılmadan önce uygun tedbirler alınması için proje müellifi uyarılmalıdır (Baş, 2006). Şekil 2.4'de delgi işlemi verilmiştir.



Şekil 2.4. Delgi aşaması (URL-3, 2016)

2.1.3 Enjeksiyon işlemi

Jet enjeksiyon işlemi, uygun eğitim almış ve bilgili personel vasıtasıyla yapılmalı ve kontrol edilmelidir. Projede belirtilen derinliğe inildiğinde delme işlemi durdurulur. Enjeksiyon karışımı, belirli orandaki suyun ve çimentonun karıştırıcıda birleştirilmesiyle oluşur. Uygulama alanına göre, su/çimento oranı ayarlanır, fazla miktarda hacim dolacaksa, pompanın basmasının mümkün olduğu oranda (%25 kadar) kum katılır. Yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesinin pompalanmaya başlanması ile enjeksiyon fazına geçilir. Su/çimento karışımından oluşan çimento şerbeti oldukça büyük basınçla zemine verilirken delgi borusu yukarıya doğru çekilir. Böylece yüksek hızlı enjeksiyon karışımı zemini aşındırır ve yapısını bozarak çimentoya karışır ve böylece dairesel bir kolonun zeminde oluşmasını sağlar. Projede belirtilen jet grout üst kotuna kadar zemine çimento enjeksiyonu yapılmaya devam edilir. Enjeksiyon sonlandırılırken, delici takımın etrafından dışarıya belirli bir miktar zemin materyali taşması uygun görülür (Baş, 2006). Şekil 2.5'de enjeksiyon işlemi aşaması gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Enjeksiyon işlemi (URL-4, 2016)

2.2 Jet Grout Kolonu Oluşturma Yöntemleri

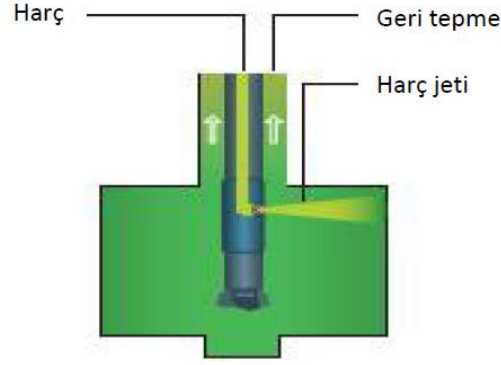
Jet grout uygulama yöntemleri, yük ve zemin koşullarına, işin hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu amaçla farklı teknikler geliştirilmiş olup bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır;

1. Tek Akışkanlı Yöntem (Jet1)
2. Çift Akışkanlı Yöntem (Jet2)
3. Üç Akışkanlı Yöntem (Jet3)
4. Süper Jet

2.2.1 Tek akışkanlı yöntem (Jet 1)

Tek akışkanlı jet grout yöntemi (Jet 1), jet sistemleri arasında en basit olanıdır. Zemindeki jet kolonu oluşumunun, genellikle çimento şerbeti ile sağlandığı ve tek bir akışkanın yüksek enerji ile uygulandığı jet enjeksiyon işlemidir (Küsin, 2009).

Bu yöntemde; uygulama hızı yaklaşık 200 m/sn olup uygulanan basınç ise 300–600 kg/cm² arasında değişmektedir. Oluşan kolon çapları zemin cinsine ve seçilen parametrelere göre değişiklik gösterir. Killi zeminlerde 600-800 mm, kumlu-çakıllı zeminlerde ise yaklaşık 1000 mm çapında jet kolonları oluşturulabilir (Çınar, 2014). Şekil 2.6’da tek akışkanlı yöntem şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.6. Tek akışkanlı yöntem (Jet 1) (Keller, 2014)

Jet 1 yönteminin uygulama alanları, aşağıdaki gibi sıralanabilir (Çınar, 2014):

- Geçirimsizlik perdesi uygulamaları
- Zeminde açılan tünellerde tavan blok bölgesinin güçlendirilmesi
- Yumuşak zeminde derin kazıların desteklenmesi
- Ankrajlar

Granüler zeminlerde mukavemeti en yüksek elemanlar, tek akışkanlı sistem ile oluşturmaktadır. Zemindeki boşluk oranları ise diğer iki sistem ile yapılanlara göre daha az olmaktadır (Melegari ve Garassino, 1997).

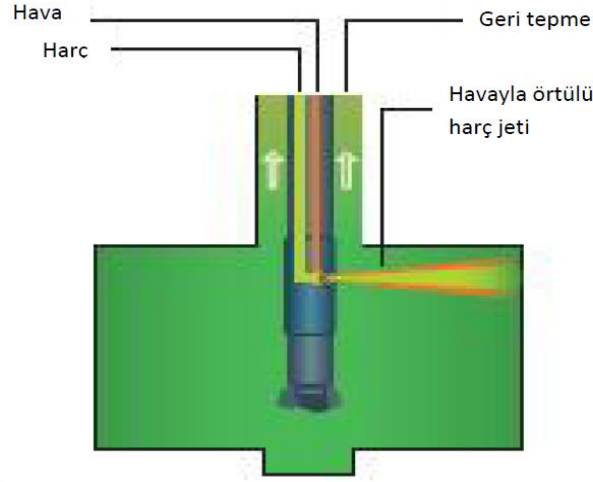
2.2.2 Çift akışkanlı yöntem (Jet 2)

Çift akışkanlı yöntemde (Jet 2), delme işlemi çift çeperli bir boru takımı ile gerçekleştirilirken, akışkan olarak hava ve çimento şerbeti kullanılır. Bu yöntemde en içteki cidardan jet enjeksiyonu geçerken, dış cidar ile iç cidar arasındaki boşluktan ise kompresörle üretilen 5-12 bar basınçlı hava sürüklenmektedir (Çınar, 2014).

Hava ve jet enjeksiyonu püskürtme uçlarından aynı anda zemin ile buluşmaktadır. Basınçlı hava, Jet 1 yöntemindeki sürtünmeden kaynaklanan kinetik enerji kayıplarını kısmen azalttığı için, bu yöntemle oluşan kolon çapları Jet 1'e kıyasla %60-%80 oranında daha büyüktür (Doğanışık, 2010).

Elde edilen zemin-çimento karışımının mukavemeti ikili sistemde diğer sistemlerden daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni ise Jet 2 sisteminin önemli bir dezavantajı olan

enjeksiyon uygulandığında zeminin hava içeriğinin artmasıdır (Çınar, 2014). Şekil 2.7’de çift akışkanlı yöntem şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.7. Çift akışkanlı yöntem (Keller, 2014)

Jet 2 yönteminin uygulama alanları, aşağıdaki gibi sıralanabilir (Çınar, 2014):

- Zemin iyileştirmesi
- Temellerin takviyesi
- Panel geçirimsizlik perdeleri
- Yumuşak zeminde derin kazıların desteklenmesi

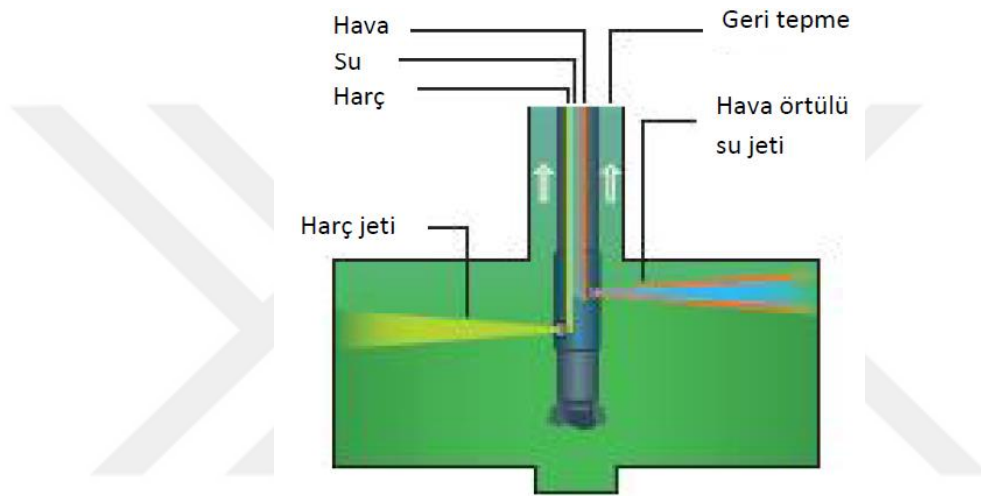
2.2.3 Üç akışkanlı yöntem (Jet 3)

Üç akışkanlı yöntemde (Jet 3), jet kolonlarının oluşmasında hava, su ve jet enjeksiyonunu birlikte kullanılır. Bu yöntemde iç içe üç borulu takım kullanılır. Ortadaki borudan 400-600 bar basınçlı su, ara borudan 8-12 bar basınçlı hava, en dış borudan ise 30-80 bar basınçlı jet enjeksiyonu, su-hava karışımı içine enjekte edilmektedir. Hava ve su aynı püskürtme ağzından, jet enjeksiyonu ise farklı bir püskürtme ağzından zemine gönderilmektedir. Jet 3 yöntemi kohezyonlu zeminlerde en etkili halini alırken, bu yöntemle oluşan kolonlar 2 metre çapa kadar ulaşmaktadır (Çınar, 2014).

Jet 3 yönteminin uygulama alanları, aşağıdaki gibi sıralanabilir (Çınar, 2014):

- Temel takviyesi ve kazı desteği
- Döşeme / yeraltı suyu kontrolü
- Panel geçirimsizlik perdeleri
- Geçirimsizlik uygulamaları
- Çoğu ince daneli zeminlerin stabilizasyonu

Şekil 2.8’de üç akışkanlı yöntem şematik olarak görülmektedir.

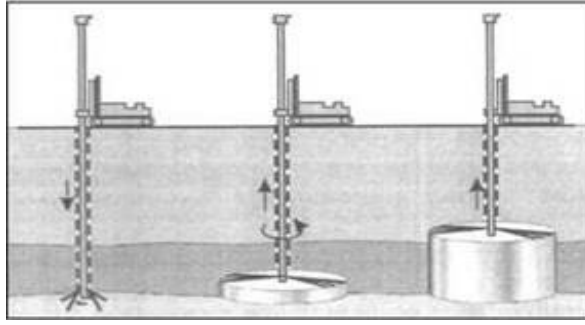


Şekil 2.8. Üç akışkanlı yöntem (Keller, 2014)

2.2.4 Süper jet yöntemi

Süper jet yöntemi, diğer yöntemlerle elde edilemeyecek büyük çaptaki kolonları oluşturma ihtiyacı ve bu ihtiyacın düşük maliyetlerle sağlanabilmesi amacıyla ortaya çıkmış bir yöntemdir (Çınar, 2014).

Bu yöntemde büyük çaplı kolonlar elde edebilmek için tijlerin dönme ve çekme hızları diğer jet yöntemlerine göre çok yavaştır. Uygun rotasyon ve kaldırma parametreleri ile 5 metre çapa kadar jet kolonlarının oluştuğu kanıtlanmıştır (Küsin, 2009). Şekil 2.9’da süper jet enjeksiyon yöntemi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.9. Süper jet enjeksiyon (Çınar, 2014)

Süper jet yöntemi;

- Kolonların birbirine bağlanmasıyla yapıların yatay ve düşey desteklenmesi,
- Yer altı suyunun izole edilmesi,
- Sıvılaşmaya uygun zeminlerin stabilizasyonu,
- Tünel inşaatları sırasında karşılaşılan yumuşak zeminlerin stabilizasyonu,
- Yenileme ve modifikasyon için derin altyapı sistemlerinin güvenliği gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Baş, 2006).

2.2.5 Jet grout sistemlerinin karşılaştırılması

Farklı jet grout sistemlerinin zemin cinsi, kolon çapı ve basınç dayanımlarının karşılaştırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir.

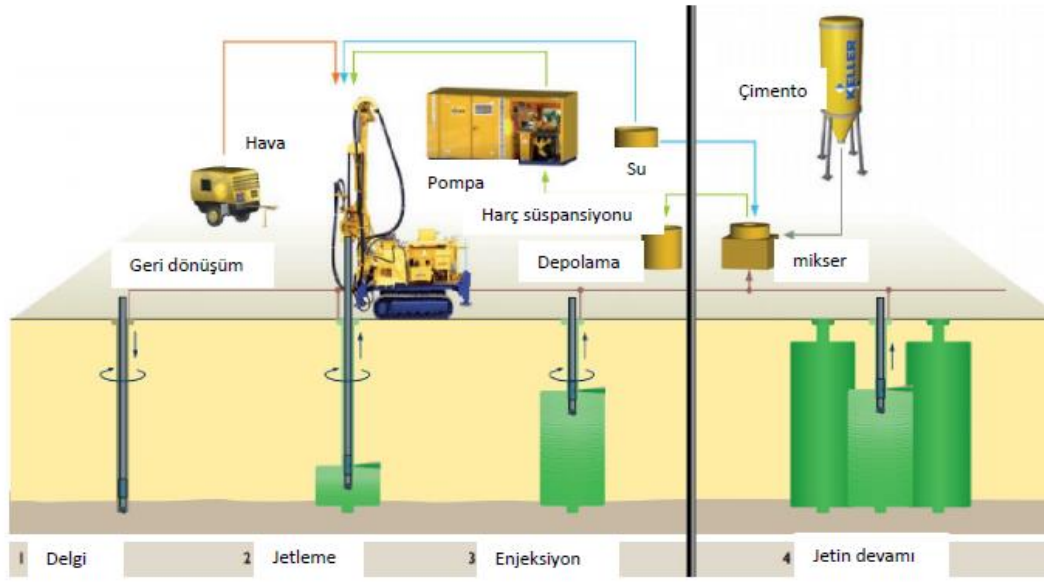
Çizelge 2.1. Jet grout sistemleri karşılaştırması (Sağlam, 2006)

Jet Türü	Zemin Cinsi	Kolon Çapı	JG Kolon Dayanımı
Jet 1	Kum ve Çakıl Kil	60 cm - 90 cm (110 cm’e kadar) 60 cm - 90 cm	70 - 250 kg/cm ² 20 - 100 kg/cm ²
Jet 2	Kum ve Çakıl Kil	60 cm - 180 cm (300 cm’e kadar) 90 cm - 150 cm	35 - 140 kg/cm ² 10 - 70 kg/cm ²
Jet 3	Kum ve Çakıl Kil	150 cm - 240 cm 90 cm - 180 cm	35 - 105 kg/cm ² 10 - 50 kg/cm ²

Jet 1 sisteminde kolon çapı, Jet 2 ve Jet 3’e göre daha küçük çapta elde edilmesine rağmen jet grout kolonun dayanımı daha yüksektir. Jet grout kolon oluşumunda Jet 2’de havanın, Jet 3’de su ve havanın çimento harç malzemesi ile karışması jet grout kolonun dayanımının düşmesine, çapların ise büyümesine sebep olmaktadır.

2.3 Jet Grout Uygulama Ekipmanları

Jet grout kolonu bir dizi makine ve yardımcı ekipmanlarının kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Jet grout kolon oluşturulması ve ekipmanlarla ilgili gösterim Şekil 2.10'da verilmiş olup, bu ekipmanlarla ilgili genel bilgiler aşağıdaki başlıklar altında kısaca ele alınmıştır.



Şekil 2.10. Jet grout kolon oluşumu ve ekipmanları (Keller, 2014)

Farklı sistemler için jet grout 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

2.3.1 Delgi makinası

Delgi makinası; jet grout kolonu oluşturulması amacıyla yapılacak delgiyi gerçekleştiren makine olup, aynı zamanda genellikle sondaj makinesi işlevi de görmektedir. Her türlü arazi koşullarında paletli yürüme takımıyla rahatlıkla hareket

edebilmektedir. Önceden belirlenen dönme ve aktarma hızlarında ilerlemek için; jet enjeksiyon tiji, monitör, su başlığı ve püskürtme ağzı ile donatılmıştır.

- Tijler; delgi esnasında içinden su, jet grout kolonu oluşturulması sırasında ise yüksek basınçlı enjeksiyon geçirir. Monitör, adaptör takımını ve delgi ucunu istenen proje kotuna kadar inmesini sağlar. Jet grout kolon oluşturma yöntemlerine göre su başlığı ve tijler tek, çift veya üç cidarlı olabilir (Doğanışık, 2010).
- Monitör adaptör takımı; delgi makinesine bağlı bulunan su başlığı ve tij sisteminin son halkasını oluşturur. Bu ekipmanın en uç noktasına da delgi ucu takılmaktadır. Monitör jet grout kolonu oluşturma yöntemlerine göre tıpkı su başlığı ve tijlerde olduğu gibi tek, çift veya üç cidardan oluşabilmektedir (Doğanışık, 2010).
- Su başlığı; bir ucu enjeksiyon pompasına bağlı yüksek basınca dayanıklı hortumların delgi makinesindeki tijler ile bağlantısını sağlayan hareketli bir başlığa sahip bir çeşit adaptördür (Doğanışık, 2010).
- Püskürtme ağzı; milimetre mertebesinde elmas cidarlı küçük bir deliktir. Monitör üzerinde bulunan yuvalara birbirleriyle 180°lik açıda ve düşeyde 4'er cm kot farkıyla monte edilirler. Bir monitör üzerinde en az iki adet püskürtme ağzı yuvası bulunmaktadır. Püskürtme ağzı çapları genellikle 1.6 mm ile 3.0 mm arasındaki çaplardan seçilerek kullanılır (Doğanışık, 2010). Şekil 2.11'de jet grout delgi makinası ekipmanları, Şekil 2.12'de jet grout delgi makinası görülmektedir.



Şekil 2.11. Jet grout delgi makinası ekipmanları (Çınar, 2014)



Şekil 2.12. Jet grout delgi makinası (Çınar, 2014)

2.3.2 Enjeksiyon pompası

Enjeksiyon karışımını istenen çapta jet grout kolonu teşkil edebilecek basınçta basabilecek yüksek basınçlı pompadan oluşan pompa ünitesidir. Jet grout kolonlarının yapımında 60 MPa'da 150–450 lt/dk. arasında çimento harcı basabilen ve 8 saate kadar sürekli çalışabilen pompalar kullanılmaktadır (Kauschinger vd., 1992). Şekil 2.13'de jet grout pompa ünitesi görülmektedir.



Şekil 2.13. Jet grout pompa ünitesi (Çınar, 2014)

2.3.3 Mikser ünitesi

Karışım ünitesi, jet grout kolon uygulamalarında kullanılan enjeksiyon karışımını istenen su/çimento oranında hazırlamayı sağlayan mikser ve dinlendiriciden oluşur.

Ayarlanan oranlara göre otomatik olarak imento ve su miksere aktarılırken karıştırma işlemi de başlatılır. Karıştırılan enjeksiyon maddesi dinlendirilmek üzere dinlendirme kazanına aktarılır. Monitörde komut verilerek enjeksiyon pompa ünitesi tarafından emilerek zemine yüksek basınçla gönderilir (ınar, 2014). Şekil 2.14’de jet grout karışım ünitesi görölmektedir.



Şekil 2.14. Jet grout karışım ünitesi (ınar, 2014)

2.3.4 Çimento silosu

Farklı kapasitelere sahip dökme imento depolayabilen ve mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek kapasitede imento silosu ve konveyörü ekipman sisteminde yer alan ünitelerdir (ınar, 2014). Şekil 2.15’de jet grout imento silosu görölmektedir.



Şekil 2.15. Jet grout imento silosu (ınar, 2014)

2.3.5 Monitör

Monitör aşağıda verilen özellikleri kapsar (TS EN 12716);

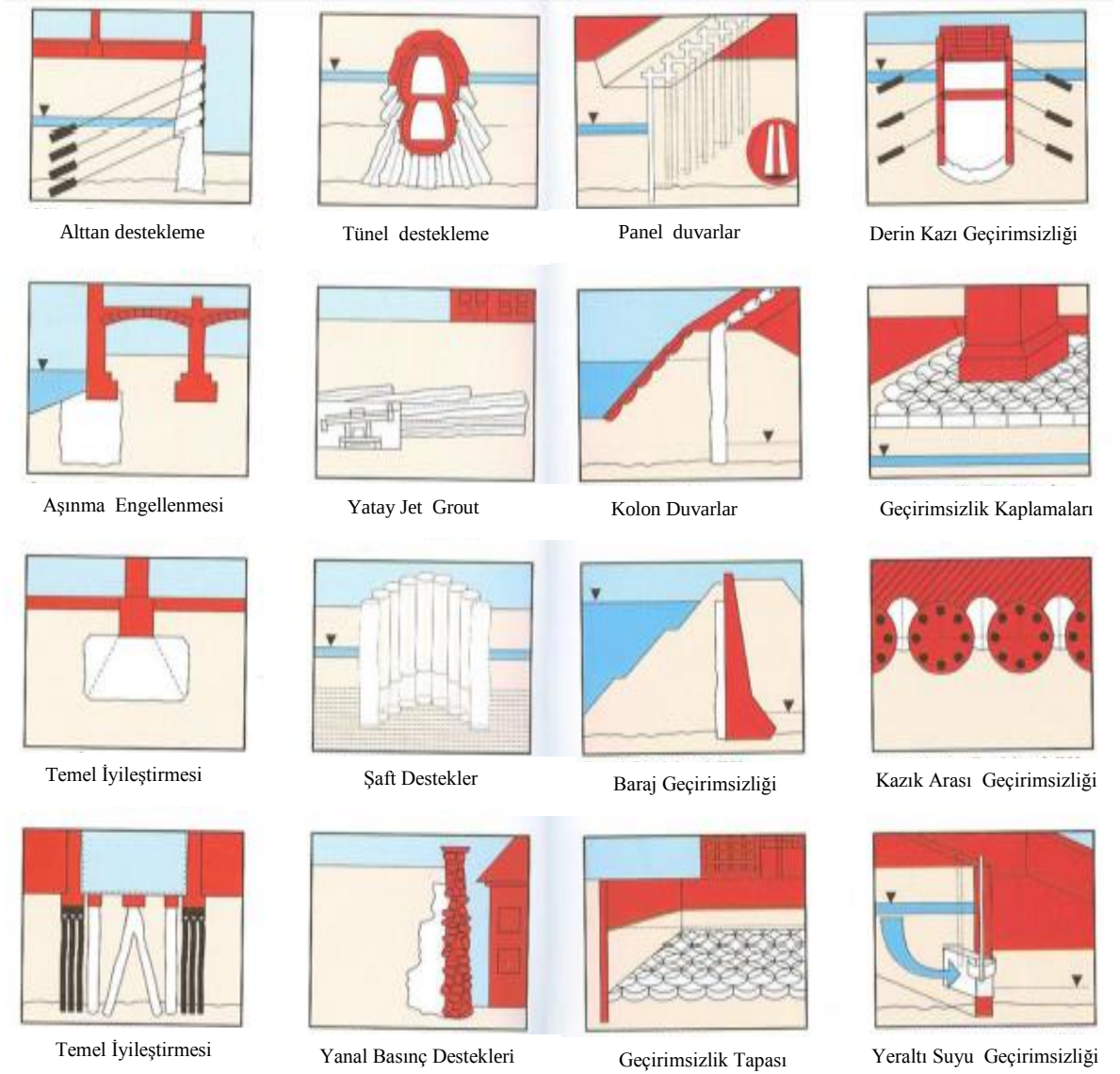
- Tekli sistem için, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren bir ya da daha fazla dairesel püskürtücüdür. Bu püskürtücüler aynı seviyede ya da değişik seviyelerde, karşılıklı çalışmaya imkân sağlayan açılarda bulunabilir.
- İkili (hava) sistem için, hava ve enjeksiyon şerbetinin eş zamanlı jet haline 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 (TS EN 12716).
- 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 püskürtücüdür (TS EN 12716).
- 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 püskürtücüdür (Küsin, 2009).

2.4 Jet Grout Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı

Jet grout kolonların çeşitli maksatlarla kullanımları aşağıda sıralanmaktadır (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,
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile teçhiz edilerek çekme elemanı olarak kullanılması,

- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması,
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak kullanılması,
- Geçirimli ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerdeki kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo kapama elemanı olarak kullanılması,
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında teşkil edilen payanda elemanı olarak kullanılması,
- Kazı tabanından kazıya gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak kullanılması,
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili ile kullanılması,
- Yumuşak zeminde açılan tünellerde tünel içinde ve ayna önünden yapılarak, kazı öncesi tünel kesiti üzerinde taşıyıcı bir şemsiye oluşturulması amacı ile kullanılması,
- Sıvılaşma sonucu oluşacak zemin yanal ve düşey deformasyonlarının sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak kullanılması,
- Sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin bir kısmının taşınarak deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deformasyonların sınırlandırılması (Küsin, 2009). Şekil 2.16’de jet grout uygulamaları verilmiştir.



Şekil 2.16. Jet grout uygulamaları (Tachir, 2015)

2.5 Jet Grout Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Jet grout yönteminin bize sağladığı avantajları ve dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Altun, 2010):

Avantajlar:

- Klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha hızlı ve ekonomiktir.
- Hemen hemen tüm zemin çeşitlerinde uygulanabilir.
- Mevcut yapılara zararlı yan etkilerinin olmayışı, basınçlı püskürtme sadece kendi yarıçapına etki ettiğinden yandaki yapılara zar vermez.

- Makinenin esnekliğinden dolayı farklı geometride enjeksiyonlar yapılabilir. Yatay eğilimli ve düşey yönde uygulaması uygundur.
- Su/çimento kullanıldığı için kimyasal enjeksiyon gibi çevreye zarar vermez.
- Ekipman boyutları sayesinde dar ve sıkışık ortamlarda rahatlıkla çalışabilmektedir.
- Enjeksiyon istenilen derinlikten başlanabilir ve istenilen derinlikte son verilebilir
- Titreşimsiz ve gürültüsüz bir yöntemdir.

Dezavantajlar:

- Yöntem hala gelişme aşamasındadır. Yöntemin yeni oluşu tasarımı yararlanılacak kurallar henüz kesinleşmemiştir. Bu nedenle daha çok tecrübe ve gözleme dayalı bir yöntemdir.
- Zemin içerisinde oluşacak kolonu belirlemek zordur. Bundan dolayı dikkatli bir şekilde yapılması gerekir ve bazı kontrol testleri yapılması gerekir.
- Zemin cinsine göre kolon çapları farklı olabilir.
- İki akışkanlı ve üç akışkanlı sistemlerde maksimum 10°-20° arasındaki değerlerde eğiklik oluşturulabilmektedir. Bu sınırlamanın oluşumundaki neden ise, zemindeki örselenen malzemenin püskürtülen hava ile dışarıya alınmasını sağlamaktır.

BÖLÜM III

JET GROUT KOLONU OLUŞTURMA PARAMETRELERİ

Jet grout kolon imalat parametreleri, genellikle benzer zeminlerde daha önceden yapılmış çalışmalar esas alınarak belirlenir (Lee, 2005). Jet grout kolon çalışma parametreleri; zemin özelliklerine, kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve uygulanacak jet grout yöntemine göre belirlenir. Jet grout kolonunun imalatına başlanmadan önce farklı çalışma parametreleri denenerek test kolonları imal edilmektedir. Test kolonlarının yapım amacı; zemin yapısına uygun hedeflenen kolon çapının elde edildiği çalışma hızlarına karar vermek, kolonda devamlılığın sağlandığını gözlemlemek ve yapım tekniği ile ilgili ekonomik olan ölçütleri belirlenmektir (Küsin, 2009). Çizelge 3.1’de jet grout yöntemi imalat parametreleri verilmiştir.

Çeşitli zemin tiplerinde uygulanan jet grout kolonlarının mukavemet değerlerinin, imalat parametreleriyle değişim aralığı aşağıdaki Çizelge 3.2’de verilmiştir (Stoel, 2001).

3.1 Enjeksiyon Basıncı

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

- 200 – 250 bar aralığında çalışma DÜŞÜK BASINÇLI
 - 300 – 400 bar aralığında çalışma ORTA BASINÇLI
 - 400 – 700 bar aralığında çalışma YÜKSEK BASINÇLI
- olarak tanımlanabilir.

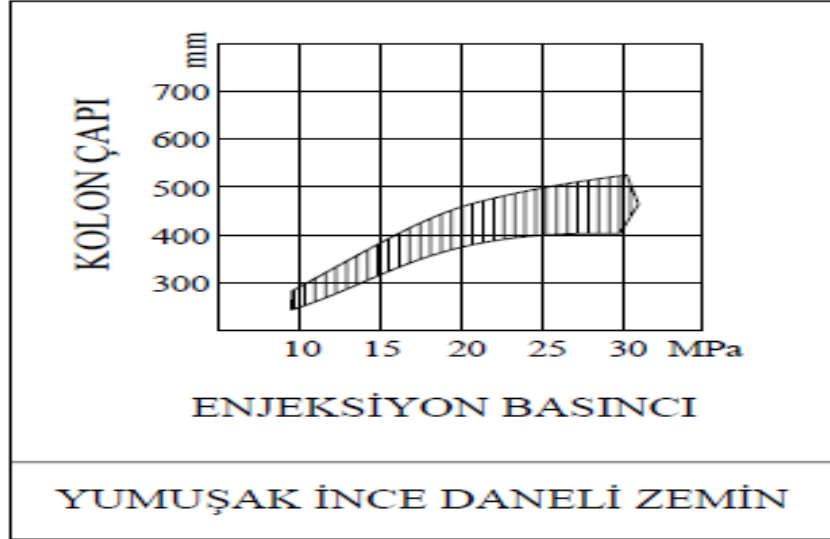
Basınç, elde edilmek istenen çapın oluşmasında en önemli parametredir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi basınç ile jet grout kolonu çapı arasında direk bir bağlantı vardır. Basınç artırıldığı zaman kolon çapı artar.

Çizelge 3.1. Jet grout yöntemi imalat parametreleri (Xanthakos, 1994)

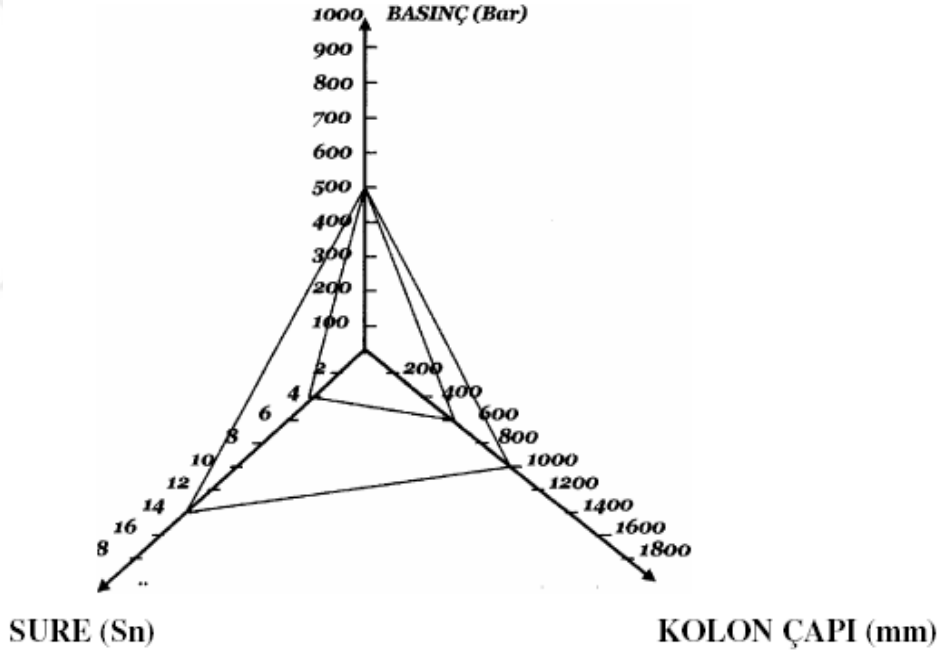
PARAMETRELER			JET GROUT SİSTEMLERİ		
			TEK AKIŞKAN	ÇİFT AKIŞKAN	ÜÇ AKIŞKAN
ENJEKSİYON BASINCI	Su	(Bar)	ÖY(200-300)	ÖY(200-300)	300-500
	Enjeksiyon Harcı	(Bar)	300-600	300-600	400-600
	Sıkıştırılmış Hava	(Bar)	Yok	8-12	8-13
AKIŞ ORANLARI	Su	(lt/dak)	ÖY	ÖY	70-100
	Enjeksiyon Harcı	(lt/dak)	60-150	100-150	150-250
	Sıkıştırılmış Hava	(lt/dak)	Yok	10-30000	10-30000
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ (NOZUL) BÜYÜKLÜĞÜ	Su	(mm)	ÖY(1.6-2.4)	ÖY(1.6-2.4)	1.8-2.5
	Enjeksiyon Harcı	(mm)	1.6-3	2-4	3.5-6
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ (NOZUL) SAYISI	Su	adet	ÖY(1)	ÖY(1)	1-2
	Enjeksiyon Harcı	adet	2-6	1-2	1
TİJİN DÖNME HIZI		(Devir/dk)	10-30	10-30	10-30
TİJİN BİR ADIM İÇİN ÇEKİLME SÜRESİ (4 cm)		sn.	8-15	10-20	15-25
KOLON ÇAPI	Çakıllı/Kumlu Zeminler	(m)	0.6-1	1-2	1.5-2.5
	Killi Zeminler	(m)	0.5-1	1-1.5	1-2
SU/ÇİMENTO ORANI		W/C	0.8:1-2:1		
ISLAH EDİLEN ZEMİNİN BİRİM HACİM AĞIRLIĞI		kg/m ³	400-800	400-800	400-800
ZEMİNİN MUKAVEMETİ	Çakıllı/Kumlu Zeminler	kg/cm ²	100-300	75-250	75-250
	Killi Zeminler	kg/cm ²	15-100	15-85	15-75
NOT:ÖY=Ön Yıkama					

Çizelge 3.2. Ortalama serbest basınç mukavemeti (Stoel, 2001)

Zemin Tipi	Serbest Basınç Mukavemeti σ_{JG} (MPa)	
	Alt Limit	Üst Limit
Organik Zemin	1	6
Kil	3	7
Silt	5	15
Kum	10	40
Çakıl	10	40



Şekil 3.1. Jet grout kolon çapı ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos, 1994)



Şekil 3.2. Basınç - bekleme süresi - kolon çapı ilişkisi (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 (Şekil 3.2). Bazı zemin şartlarında basınç arttırmak, çapın artmasını sağlayamayabilir (Küsin, 2009).

3.2 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 10–20 devir/dak. değerleri arasında değişir ve bazı özel durumlarda 30 devir/dak. 'ya kadar çıkabilir. Takım çekme işlemi, iki şekilde olabilir;

- ✓ Kademeli çekme.
- ✓ 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 4 cm. ilerleme ve her kademedede 6–10 sn. bekleme en iyi neticeyi sağlamıştır (Melegary ve Garassino, 1997).

Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacme enjekte edilecek grout miktarına bağlıdır. Bağ dokusu kuvvetli kohezyonlu zeminler, jet huzmesinin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süre gerektirirler (Küsin, 2009).

Dönme ve çekme hızı adaptasyonu (optimizasyonu), ıslah edilecek zemine ve kullanılan jet grout metoduna çok sıkı bağlıdır (Çizelge 3.3). 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 (Küsin, 2009).

Çizelge 3.3. Püskürtme gövdesinin çekme hızı ile ıslah edilen zemin arasındaki ilişki
(Karahana, 2016)

Zemin	Enjeksiyon Basıncı (MPa)	Çekme Hızı (cm/dk)	Islah Edilen Hacim(m ³ /m)	Kaynak
Yumuşak Kaya	39.3 - 48.9	2.3 - 9.4	0.1 - 0.2	Yahiro vd. (1975)
Sıkı Kum ve Çakıl	39.3 - 48.9 34.5 - 41.4	3 - 11.7 30.5	0.1 - 0.2 0.3 - 1.8	Yahiro vd. (1975)
Orta Sıkı ve Çakıl	39.3 - 48.9	13.2 - 23.1	0.2 - 0.2	Yahiro vd. (1975)
	20 - 40	9.9 - 50	0.1 - 1.8	Welsh vd. (1986)
	38.6	91.4	0.2	Aschieri vd. (1973)
	30.3	39.9	0.3	Yahiro ve Yoshida (1973)
	39.3 - 48.9 5.5 - 6.9	50 - 119.9 39.9 - 59.9	0.1 - 0.6 0.2 - 1	
Gevşek Kum	39.3 - 48.9	23.1 - 28.7	0.2 - 0.2	Yahiro vd. (1975)
Kil ve Silt	39.3 - 48.9	31 - 38.6	0.2 - 0.3	Yahiro vd. (1975)
	20 - 40	9.9 - 42.2	0.1 - 1.5	Welsh vd. (1986)
	30.3	39.9	0.3	Yahiro ve Yoshida (1973)
	5.5 - 6.9	39.9 - 59.9	0.1 - 0.4	

3.3 Dozaj

Standart su/çimento oranı 1 (s/ç = 1), özgül ağırlığı ise 1410-1570 kg/m³ '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 (Küsin, 2009).

1 m³ ıslah edilmiş zemin içindeki çimento miktarı 350-700 kg arasında değişir. Farklı zeminlerin taşıma kapasiteleri incelendiğinde, su-çimento oranı 1 ve ıslah edilmiş zemin içindeki çimento dozajı ortalama 450 kg/m³ olarak oluşturulmuş kolonların kapasiteleri Çizelge 3.4'te verilmiştir (Küsin, 2009).

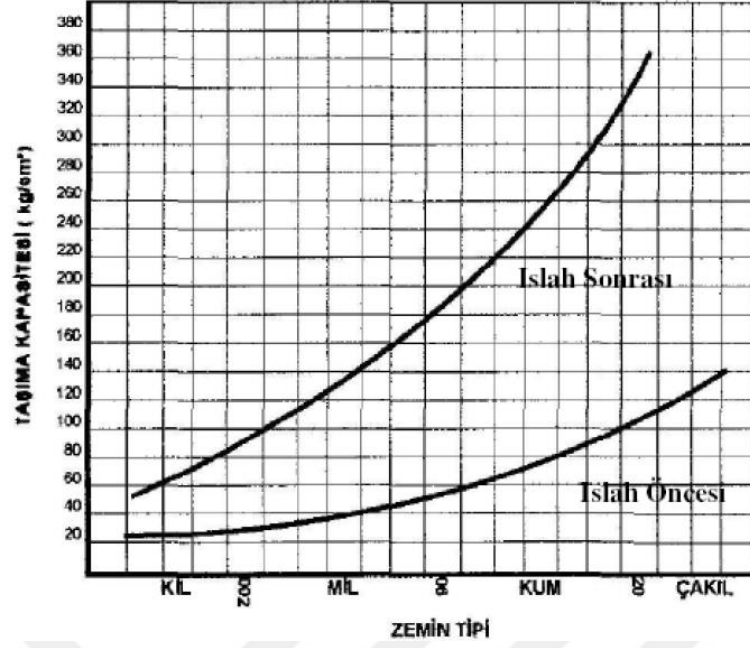
Çizelge 3.4. Zemin cinsine göre jet grout kolonun serbest basınç mukavemeti ve modül oranı (Durgunoğlu, 2004)

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

(*)%40 gerileme seviyesine tekabül eden modül

Organik içerikli zeminlerde, çimento dozajı 450 kg/m^3 den 700 kg/m^3 'e çıkartılabilmektedir. Bunun sebebi kullanılan çimentonun bir kısmının organik ortamda yer alan ve çimentonun bağlayıcılığını ortadan kaldıran asitlerin nötrleştirilmesinde harcanmasıdır. Jet grout yöntemi sayesinde ıslah edilmiş hacim, bitişiğindeki işlem görmemiş zeminin özelliklerini de iyileştirmektedir. Jet grout 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 3.3'te ıslah edilmiş zemin sınıfına göre kolon taşıma kapasitesinin değişimi gösterilmektedir. Buna göre granüler zeminlerde ıslah sonrası taşıma kapasitesindeki artışın daha fazla olduğu gözlenmektedir (Küsin, 2009).



Şekil 3.3. Farklı tip zeminlerde taşıma kapasitesinin değişimi (Melegary - Garassino, 1997)

3.4 Nozullar

Nozullar, jet enjeksiyon yönteminin verimliliğini etkileyen bir faktör olmakla birlikte, uygulanacak jet tekniğine göre sayıları değişmektedir. Jet 1 tekniğinde bir yada iki nozul kullanılabilirken Jet 2 tekniğinde bir nozul kullanılmaktadır (Çınar, 2014).

Nozul çapları 1.5-8 mm arasında değişmektedir. Şekil 3.4'te tek delikli nozul gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Nozul (Çınar, 2014)

Enjeksiyon harcının debisi ve enerjisi ile enjeksiyon basıncı arasındaki bağı nozullar sağlamaktadır. Enjeksiyon harcının yayılması, nozul çapı küçüldükçe artmaktadır (Çizelge 3.5) (Küçükali, 2008).

Çizelge 3.5. Enjeksiyon debisi / Nozul ilişkisi (Melegary and Garassino, 1997)

SU/ÇİMENTO = 1					ENJEKSİYON ÖZGÜL AĞIRLIĞI = 1.52						
Nozul Çapları (mm)	1.4	1.6	1.8	2	2.4	2.8	3	3.2	3.5	4	4.5
NOZULLARDAN ENJEKSİYONUN ÇIKIŞI											
BASINÇ	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk	lt/dk
300	18	24	30	37	53	73	83	95	114	148	188
350	20	26	32	40	58	79	90	103	123	160	203
400	21	27	35	43	62	84	96	110	131	171	217
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	182	230
500	23	31	45	48	69	94	108	123	147	192	242
550	25	32	48	50	72	98	113	129	154	201	254
600	26	34	69	52	76	103	118	134	161	210	266

3.5 Türkiye’de Uygulanan Jet Grout Sistemleri ve İmalat Parametreleri

Ülkemizde yaygın olarak uygulanan jet grout yöntemi, tekli (Jet 1) ve ikili jet (Jet 2) sistemleridir. Ancak en çok tercih edileni tekli jet (Jet 1) sistemidir ve yaygın olarak 0.6 m, 0.8 m ve 1 m çaplarında jet grout kolonlar imal edilmektedir. Zemin koşullarına, uygulama amacına ve maliyete göre tercih edilen jet sistemi ve parametreleri değişebilmektedir.

Kohezyonlu zeminlerde tekli jet (Jet 1) sisteminde yaygın olarak kullanılan imalat parametreleri şöyledir (Karahana, 2016);

- Çimento dozajı: 450 kg/m³
- Su / Çimento oranı: 1
- Nozul sayısı: 2 (Kohezyonlu zeminlerde yapılan iyileştirme işleminde zorluk çift nozul yerine tek nozul kullanılmaktadır)
- Nozul çapı: 2 mm (1.6 mm - 2 mm)
- Enjeksiyon basıncı: 400 bar(200-300 barda ön yıkama yapılması önerilmektedir)

Kohezyonsuz zeminlerde tekli jet (Jet 1) sisteminde yaygın olarak kullanılan imalat parametreleri şöyledir (Karahana, 2016):

- Çimento dozajı: 450 kg/m³
- Su / Çimento oranı: 1
- Nozul sayısı: 2
- Nozul çapı: 2.5 mm (2.5 mm-3 mm)
- Enjeksiyon basıncı: 450 bar (400 bar-500 bar)

Belirlenen başlangıç imalat parametrelerine göre, diğer imalat parametrelerin hesabı yapılır. Çimento miktarının ve hacminin, tijn çekme hızının hesabı şöyle yapılmaktadır:

- Öncelikle 1 m ıslah edilmiş zemin hacmi (V_h), Eşitlik (3.1) ile bulunabilmektedir.

$$V_h = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3.1)$$

- 1 m ıslah edilmiş zemindeki çimento miktarı (W_a); ıslah edilecek hacim ile kullanılacak çimento dozunun çarpımı ile belirlenmektedir (Eşitlik 3.2).

$$W_a = V_h \cdot \rho_{\text{çd}} \quad (3.2)$$

- Çimento özgül ağırlığı 2.93 kg/l'te denk geldiğinden dolayı grout içerisindeki çimento hacmi, çimento ağırlığının çimento özgül yoğunluğuna bölümüyle bulunmaktadır (Eşitlik 3.3).

$$V_{\text{ç}} = \frac{W_{\text{ç}}}{\rho_{\text{ç}}} \quad (3.3)$$

- Ağırlık olarak su/çimento oranı 1'e eşit olduğundan suyun ağırlığı çimentonun ağırlığı kadar olur. Ve suyun özgül yoğunluğu 1kg/l olduğundan dolayı suyun hacmi suyun ağırlığı kadardır (Eşitlik 3.4).

$$V_{\text{su}} = W_{\text{su}} \quad (3.4)$$

- Dolayısıyla 1 m jet grout kolon içerisindeki grout hacmi çimento hacmiyle suyun hacminin toplamı olarak bulunmaktadır (Eşitlik 3.5).

$$V_G = V_{\phi} + V_{su} \quad (3.5)$$

- Tij çekme hızının belirlenmesi için 1 dakikalık sürede 1m'lik uzunluktan çıkan enjeksiyon miktarının bilinmesi gerekmektedir. Jet huzmesindeki nozuldan enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı Eşitlik (3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (3.6)$$

Burada, h hidrostatik düşü, g yerçekimi ivmesidir.

- Hidrostatik düşü (h) Eşitlik (3.7) ile hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{\text{enjeksiyon basıncı}}{\text{grout özgül ağırlığı}} \quad (3.7)$$

- Grout özgül ağırlığı, grout ağırlığının grout hacmine bölümü olarak alınmaktadır (Eşitlik 3.8).

$$\gamma_G = \frac{W_G}{V_G} \quad (3.8)$$

- Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı hesaplandıktan sonra 1sn sürede bir nozuldan çıkan enjeksiyon malzemesi miktarı (Q), Eşitlik (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$Q = v * A \quad (3.9)$$

- 1m kolon teşkili için gerekli süre ise 1m kolonda bulunan enjeksiyon malzemesi hacminin 1sn sürede bir nozuldan fışkıran enjeksiyon malzemesi miktarına bölümüyle hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.10).

$$t = \frac{V_G}{Q} \quad (3.10)$$

60 cm çapında kohezyonlu zeminde tekli jet (jet 1) sistemiyle oluşturulacak jet grout kolonun imento miktarının, karışımın hacminin ve tijin çekme hızının hesabı aşağıdaki örnekteki gibi yapılmaktadır. Başlangıç parametreleri şoyledir:

- Çimento dozajı: 450 kg/m³
- Su / imento oranı: 1
- Nozul sayısı: 2 (Kohezyonlu zeminlerde yapılan iyileştirme işleminde zorluk çift nozul yerine tek nozul kullanılmaktadır)
- Nozul apı: 2 mm (1.6 mm-2 mm)
- Enjeksiyon basıncı: 400 bar

olarak alındığında 1 m ıslah edilmiş zemin hacmi Eşitlik (3.1) ile;

$$V_h = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (0.3)^2 \cdot 1 = 0.28 \text{ m}^3$$

1 m ıslah edilmiş zemindeki imento miktarı $W_$, Eşitlik (3.2) ile;

$$450 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.28 \text{ m}^3 = 126 \text{ kg} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Çimento zgöl yoğunluğu 2.93 kg/l't'e denk geldiğinden dolayı grout içerisindeki imento hacmi $V_$ Eşitlik (3.3) ile,

$$\frac{126 \text{ kg}}{2.93 \text{ kg/l}} = 43 \text{ lt} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Su/imento oranı 1 olduğundan grout içerisindeki imento hacmi imento ağırlığının imento zgöl ağırlığına bölümüyle bulunmaktadır. Çimento zgöl ağırlığı 2.93 kg/l't kabul edilmektedir.

$$\frac{126 \text{ kg}}{2.93 \text{ kg/l}} = 43 \text{ lt} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Su/imento oranı 1'e eşit ve suyun zgöl ağırlığı 1 kg/m³ olduğundan dolayı suyun hacmi,

$$\frac{126 \text{ kg}}{1 \text{ kg/l}} = 126 \text{ lt} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Grout özgül ağırlığı γ_G Eşitlik (3.8) ile,

$$\frac{126+126=252 \text{ kg}}{126+43=169 \text{ lt}} = 1.49 \text{ kg/lt} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Hidrostatik düşü (h) Eşitlik (3.7) ile;

$$h = \frac{\text{enjeksiyon basıncı}}{\text{grout özgül ağırlığı}} = \frac{400}{1.49} = 2684 \text{ m}$$

Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı v , Eşitlik (3.6) ile hesaplanmıştır.

$$v = \sqrt{2 * 9.81 * 2684} = 229 \text{ m/sn}$$

Enjeksiyon malzemesi miktarı Q , Eşitlik (3.9) ile hesaplanmıştır.

$$Q = 2290 * (2 * (\pi * 0.02^2 / 4)) = 1.43 \text{ lt/sn.}$$

1m kolon teşkili için gerekli süre (t) ise Eşitlik (3.10) ile,

$$\frac{169}{1.43} = 118.1 = 1.96 \text{ dk} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

BÖLÜM IV

JET GROUT KOLONU KALİTE KONTROL DENEYLERİ

Tasarımı gerçekleştirilmiş jet grout kolonlarının tasarım kriterlerine uygun olarak imal edilmesini sağlamak ve imal edilen kolonların kalitesini denetlemek amacıyla uygulama sahasında bir dizi deneyler yapılmaktadır. Bu deneylerin bir kısmı imalatlar öncesi, bir kısmı ise imalat süresi içerisinde belirli dönemlerde gerçekleştirilir (TS EN-12716, 2002).

4.1 Deneme Kolonlarının İnşası ve Çap Kontrolü

Kontrol ve testler kapsamında ilk aşama deneme kolonlarının yapılması ve çap kontrolüdür.

Projeyi sahaya uygulamadan önce hesaplanan değerlerdeki kolon çapının iyileştirilecek zeminde hangi parametrelerce meydana getirilebildiğini belirlemek için uygulama sahasının uygun bir yerinde deneme kolonları imal edilir. Bu kolonlar, aynı jet sisteminde enjeksiyon basıncı ve çekme süresi değiştirilerek belirlenir. Deneme kolonlarının etrafı belirli bir priz süresi sonunda açılarak çap ve kolon sürekliliği kontrolü yapılır. Hedeflenen çapa uygun parametreler bu şekilde belirlenir ve bu değerlere göre imalata geçilir (Çınar, 2014). Şekil 4.1’de farklı zemin türlerindeki deneme kazıkları ve çap kontrolü görülmektedir.



Şekil 4.1. Farklı zemin türlerindeki deneme kazıkları ve çap kontrolü (Çınar, 2014)

Farklı zemin tabakalaşmalarında, özellikle ince daneli zeminlerde seçilen parametreler altında en küçük çap oluşacağından, tasarım bu çap baz alınarak yapılabilir (Durgunoğlu, 2004).

4.2 Karot Numunelerinin Alınması, Serbest Basınç Deneyi ve Permeabilite

Kolonlardan arazide alınan silindirik numuneler üzerinde laboratuvarıda yapılan serbest basınç deneyi ile jet grout kolon 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). 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 Yönetmeliğı) uygun şekilde alınmalıdır (şekil 4.2).

Serbest basınç deneyinde tercihen deformasyonlarda ölçölerek deformasyon modölü, E_{JG} tayin edilir (şekil 4.2) (Sağlamer vd., 2002). şekil 4.4'te zemin türlerine göre jet grout kolon dayanımları verilmiştir.

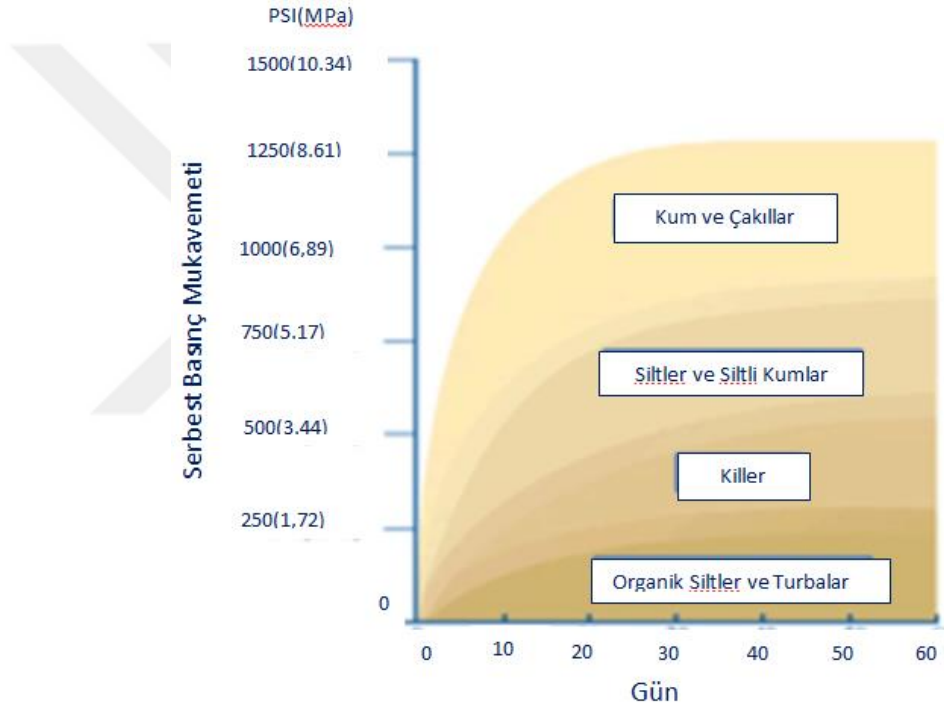
Deneylerden ölçölün mukavemet değerlerinin servis yüklerini belli bir emniyet faktörü ile taşıdıkları ispat edilmelidir.



şekil 4.2. Karot numunelerinin alınması (Çınar, 2014)



Şekil 4.3. Karot numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılışı (Çınar, 2014)



Şekil 4.4. Farklı zeminlerde oluşturulan jet grout kolonu serbest basınç mukavemeti değerleri (Burke, 2004)

Eşitlik (4.1)'de açıklandığı şekilde serbest basınç mukavemetine bağlı elastisite modülleri (E_{JG}) bulunabilmektedir (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

$$E = 4730\sqrt{\sigma_{JG}} \quad (4.1)$$

Jet grout kolonları, geçirimsizliği sağlayacak durumlarda da uygulandığı için permeabilite deneyinin de yapılması gerekmektedir.

4.3 Kolon Yükleme Deneyi

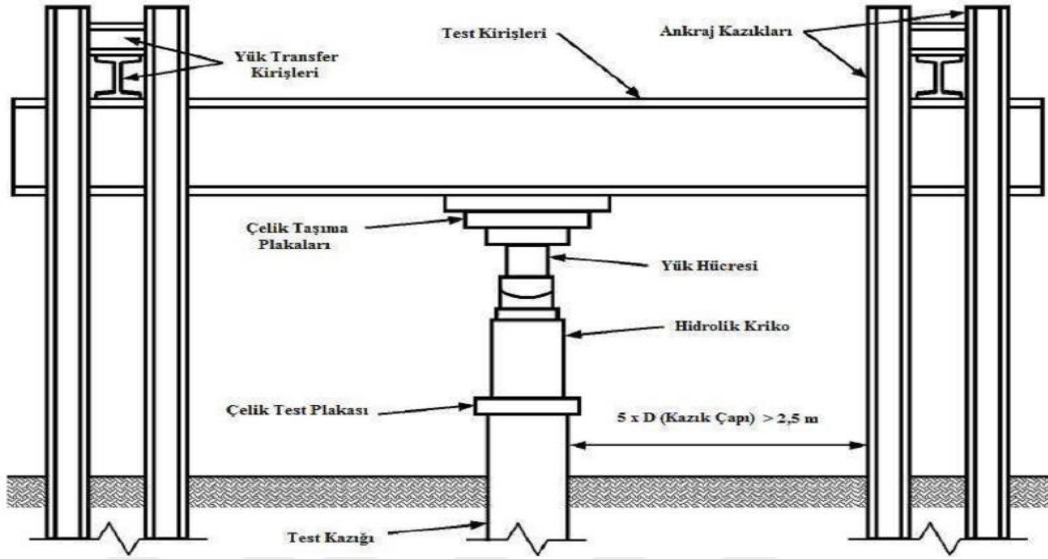
İmal edilen jet grout kolonlarının, düşey yük taşıma kapasitelerinin kontrol edilmesi ve nihai kapasitenin proje aşamasında öngörülen kapasiteyi emniyetli bir şekilde sağladığının doğrulanması amacıyla jet grout kolon yükleme deneyleri yapılmaktadır. Yükleme deneyi için bir adet basınç kolonu ile iki adet çekme olarak kullanılacak kolonlar imal edilmelidir. Deney doğrultusunda basınç kolonuna statik eksenel basınç yükü yüklenerek yük-oturma, yük-zaman ve oturma-zaman grafikleri hazırlanır (Durgunoğlu vd., 2002).

Jet grout kolonun toplam taşıma kapasitesi, kolonun çeperi ve ucu tarafından taşınan toplam taşıma 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 oturmanın 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 (Durgunoğlu vd., 2002).

Yükleme deneyinde kolonda maksimum yüklemede 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 10 mm'yi geçmemesi gerekmektedir (Düzceer, 2004).

Deney ekipmanları kolona verilecek eksenel yüke maruz reaksiyon kirişleri, hidrolik krik o 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 krik oya 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 4.5 ve Şekil 4.6’da kolon yükleme deney sistemi görülmektedir (Düzceer, 2004).



Şekil 4.5. Kolon yükleme deney sistemi (ASTM D1143/D1143M, 2007)



Şekil 4.6. Kazık yükleme deneyi (Çınar, 2014)

Yükleme deneyi düzeneğinin kurulmasının akabinde farklı yükleme yöntemleri kullanılarak deney gerçekleştirilebilir (ASTM D1143, 1994). Bu yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.1 Standart yükleme yöntemi

Tekil kolonlarda göçme olmaksızın proje yükünün 2 katı, kolon grupları için 1.5 katı olmak üzere, uygulanacak yükün %25’lik artırımları ile uygulanır. Her yük artımında

saatteki okumalar 0.25 mm'yi geçtiği durumda en fazla 2 saat beklenmelidir. Oturma değerlerinin 0.25 mm/saat değerini aşmadığında veya toplam yükte göçme meydana gelmediğinde 12 saat sonra boşaltmaya geçilir. Aksi bir durumda 244 saat beklenir. Boşaltma proje yükünün %25 oranında azaltılarak ve her kademede 1 saat beklenerek gerçekleştirilir. Bu süreçte göçme meydana gelirse, hidrolik krikolar kolondaki oturma değeri kolon çapının %15'i oluncaya kadar yükte bırakılır. Her yükleme ve boşaltma kademeleri değişiminden önce ve sonra yük, yer değiştirme ve zaman okumaları alınmalıdır (Doğanışık, 2010).

4.3.2 Tekrarlı yükleme yöntemi

Deney için hazırlanmış düzenek ilk olarak standart yükleme deneyinde olduğu gibi yüklenir. Tekil kolonlar için; proje yükünün %50, %100 ve %150 kolon grupları için %50 ve %100 değerlerinde uygulanarak toplam yükte 1 saat beklenmelidir. Aynı yükleme değerlerinde boşaltma gerçekleştirilmeli ve aralarda 20 dakika beklenmelidir. Uygulama yükü sıfır değerine ulaştıktan sonra uygulama yükünün %50'si oranında artırımlarla ve her kademede 20 dakika bekleyerek istenilen yük değerine kadar çıkılır. En sonunda da standart yükleme yönteminde olduğu gibi yük boşaltılır (Doğanışık, 2010).

4.3.3 Sabit zaman aralıklarıyla yükleme yöntemi

Kolon veya kolon gruplarına 1'er saat aralıklarla proje yükünün %20 oranında artırım ve boşaltım kademelerinde yükleme standart yükleme deney yöntemine uygun olarak gerçekleştirilir (Doğanışık, 2010).

4.3.4 Sabit penetrasyon oranı deney yöntemi

Tekil kolonlar için granüler zeminlerde dakikada 0.75-1.25 mm penetrasyon değeri sabit kalacak şekilde yük değiştirilir. Kolon batmaya devam ediyorsa, kolon çapının %15 değerine kadar yükleme sürdürülür. Kolon batması maksimum yük altında durursa, yük serbest bırakılır. Okumalar her 30 saniyede bir alınmalıdır. Boşaltma sırasında ve tüm yük boşalmasının bir saat sonrasına kadar okumalar alınmalıdır (Doğanışık, 2010).

4.3.5 Hızlı yükleme deney yöntemi

Tekil kolonlarda kullanılan bu yöntem 2.5 dakikalık zaman dilimlerinde proje yükünün %10 ile %15 yük mertebesindeki artırımlarında uygulanır. Yük artırımlarına yükleme krikosunun kapasitesi kadar devam edilir ve krikolar durdurulur. Sonrasında 5'er dakikalık zaman aralıklarıyla toplam yük boşaltılır. Her yük artırımından önce ve sonra yük, zaman ve yer değiştirme okumaları alınır. Maksimum yük uygulandıktan veya hidrolik krikolar durdurulduktan sonra okumalar alınmalı, 2.5 ve 5 dakika sonra tekrarlanmalıdır (Doğanışık, 2010).

4.3.6 Sabit oturma artırımlarında yükleme deneyi yöntemi

Deneyde gerekli olan yük artırımları kolon çapının %1'ine yaklaşık veya eşit oturma artırımları olacak şekilde uygulanır. Her oturma artırımının sabit olarak korunabilmesi için uygulanan yükler değişir ve ancak sabit oturma oranının saatte uygulanan toplam yükün %1'inden az olduğu durumda, yük değişme oranına ek olarak yüklenir. Yükleme aletinin kapasitesine veya oturma oranının kolon çapının %10'una eşit oluncaya kadar kolonun yüklenmesine devam edilir. Her oturma artırımından önce ve sonra yük, zaman ve oturma kayıtları alınır. Boşaltma boyunca, her kademe değişiminde okumalar alınır ve bu okumalar tüm yük boşaldıktan 12 saat sonra da tekrarlanır (Doğanışık, 2010).

Kolon yükleme deneyleri için kullanılan standartlar ASTM D-1143/D1143M (2007), ASTM D-3689 (2007), TS 3167 (1978), TS 3168 EN 1536 (2001) ve TS 3169 (1978) 'dir. Deneylerin yapılma prensipleri ve dikkat edilecek hususlar bu standartlar içinde ayrıntılı olarak verilmektedir.

4.4 Kolon Süreklilik Deneyi (Pile integrity test)

Uygulanan jet grout kolonların boyları, kazıklardakine benzer şekilde ülkemizde de yaygın olarak kullanılan integrity deneyi ile tespit edilebilmektedir (Durgunoğlu, 2004). Kolon çap ve boy sürekliliğinin denetlenmesi için uygulanan kolon süreklilik deneyinde kolonların üst ucundan küçük bir çekiç darbesi verilmektedir. Bu darbenin ivme sinyali A, kolon üstüne geçici olarak yapıştırılan bir akselometre ile algılanarak sayısallaştırılıp bilgisayarda kaydedilir. Kolondaki şekil/malzeme değişikliklerinden ve kolon ucundan yansıyan sinyaller de algılanarak hız sinyali olarak kaydedilir. Bu sinyal hıza bağlı bir

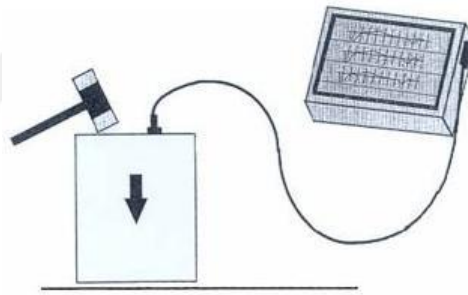
değişken olup geçen zamanın tam olarak bilinmesinden faydalanılarak, alınan yansımaların yerini tespit için sinyal, derinliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülmektedir. Bu dönüşümde bilinmesi gereken dalganın yayılma hızı olup beton / jet grout kolon için ortalama $C = 3000\text{--}4500 \text{ m/sn}$ 'dir (Rausche vd., 1988). Formüle edilirse, yansıma derinliği X , Eşitlik (4.2) ile bulunabilmektedir (Rausche vd., 1988).

$$X = (1/2 * C * t) \quad (4.2)$$

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 anlaşılabilmektedir. Şekil 4.7'de kolon süreklilik deneyi şematik olarak gösterilmiştir.



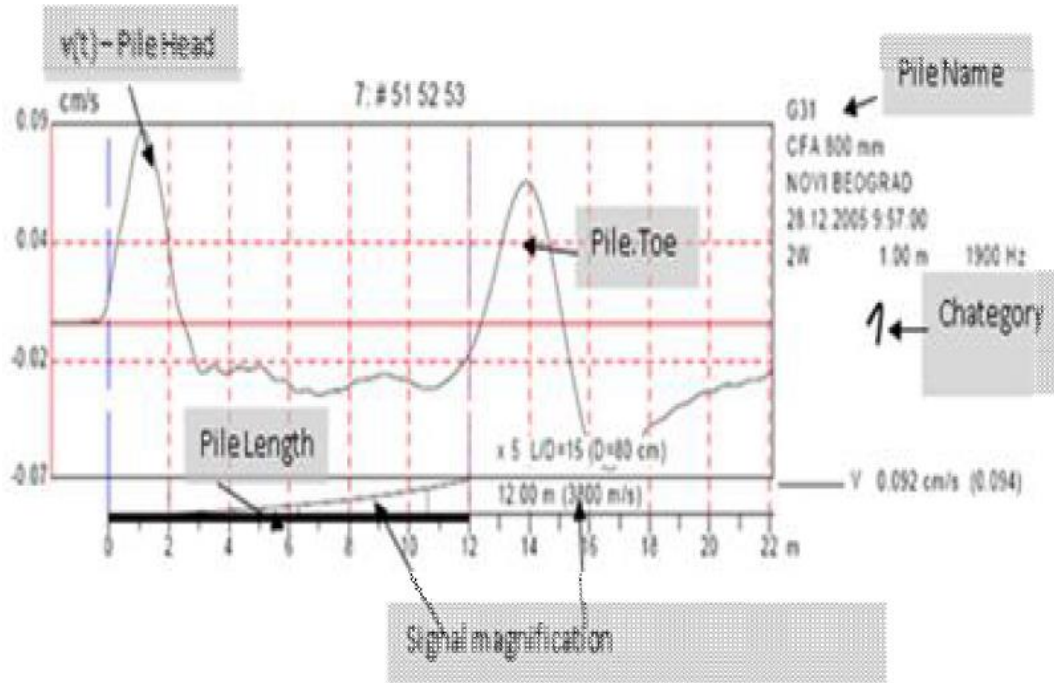
Şekil 4.7. Kolon süreklilik deneyi şeması (Küsin, 2009)

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. Kolon cevabı hemen ekranda görüntülenebilir ve yazdırılabilir veya detaylı analizler için aletin kendi belleğinde depolanabilir. 1968'den beri tüm dünyada kullanılarak yapılan milyonlarca testte birçok kolonda bozukluk ortaya çıkmıştır. Kolonların üst seviyelerinde tespit edilen bozukluklardan dolayı, kolonlar daha detaylı inceleme için kazılır veya karotlu sondaj ile numune alınır (Küsin, 2009).

Şekil 4.8'de kolon süreklilik testi cihazı, Şekil 4.9'da derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği verilmiştir.



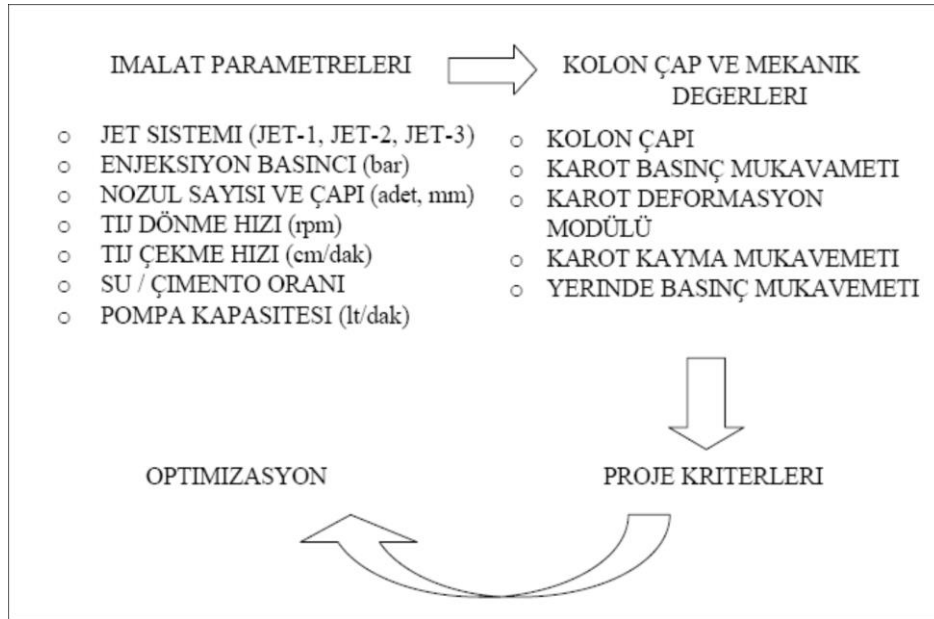
Şekil 4.8. Kolon süreklilik testi cihazı (Küsin, 2009)



Şekil 4.9. Derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği (Küsin, 2009)

4.5 Proje Kriterlerinin Kalibrasyonu

Her önemli jet grout 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 4.10'da özetlenen yöntemlerin uygulanarak, proje kriterlerini sağlayan sistem parametrelerinin optimum değerlerinin tespiti yapılabilmektedir (Durgunoğlu, 2004).



Şekil 4.10. Proje kriterlerinin sahada kalibrasyon ve optimizasyonu (Durgunoğlu, 2004)

BÖLÜM V

JET GROUT KOLON TASARIMI

Jet grout kolon tasarlanırken, jet grout kolonun üst yapıdan gelen yükleri güvenli bir şekilde taşımaları (taşırma gücü kriteri), bu yükler altında oluşın oturmalar izin verilebilir düzeyde kalmalı (oturma kriteri) ve üst yapıdan gelen yükler kolonun malzeme dayanımını aşmaması (malzeme kriteri) gerekmektedir.

5.1 Jet Grout Kolonun Taşıma Gücü Kontrolü

Jet grout kolonu kazık temel gibi düşünölerek, taşıma gücü hesabı tıpkı kazıklı temelın taşıma gücü hesabına göre yapılabilir. Bu bağlam da jet grout kolonun taşıma gücü, teorik yaklaşımlarla, ampirik-yarı ampirik yöntemlerle ve arazi yükleme deneyi ile belirlenebilir. Bu konu kapsamında teorik hesap ele alınmıştır.

5.1.1 Jet grout kolonun teorik yaklaşımla taşıma gücü hesabı

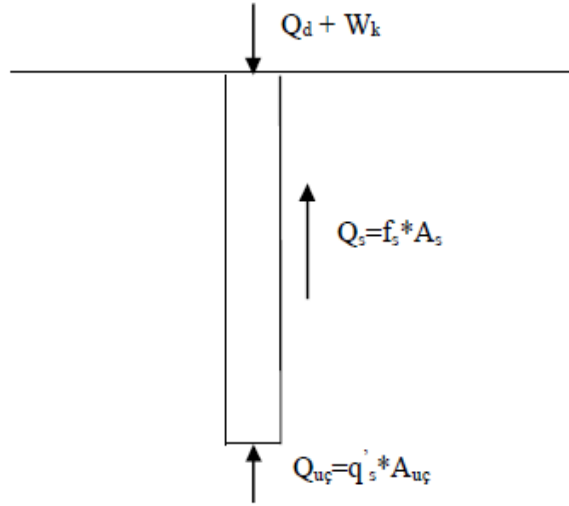
Uygulandıkları zemin ile etkileşimleri son derece yüksek olan jet grout kolonları düşey yükler altında bünyelerinin rijitlikleri sayesinde üzerlerine uygulanan yüklerin büyük bölümünü taşıyabilirler. Tek bir jet grout elemanının taşıma kapasitesi hesabı kazık elemanlarında kullanılan hesaplamalar gibidir (Grassino, 1997).

Bir jet grout kolonun göçmeden önce taşıyabileceği maksimum yük (jet grout kolonun taşıma gücü) Q_u , jet grout kolonun ağırlığı W_k ise bir jet grout kolonun kırılma olmadan taşıyabileceği yük Q_u ile W_k 'nın toplamıdır. Ancak jet grout kolonun ağırlığı taşıma gücü değerinin yanında çok küçük olacağından ihmal edilebilir. Bu yüzden kolonun taşıma gücü jet grout kolon ucu tarafından taşınan toplam yük (Q_p) ile jet grout kolon çevresinin sürtünmesi ve adhezyon ile taşıyabileceği yükün (Q_s) toplamına eşittir. Şekil 5.1'de jet grout kolon uç mukavemeti ve çevresel sürtünme mukavemeti şematik olarak verilmiştir (Karahana, 2016)

$$Q_u = Q_s + Q_p \quad (5.1)$$

Burada; Q_u kolonun nihai taşıma gücü (taşıyabileceği toplam yük), Q_s kolon şaftı ile zemin arasında sürtünmeyle taşınan yük ve Q_p kolon ucu tarafından taşınan yüküdür.

$$Q_{em} = \frac{Q_u}{G_s} \quad (5.2)$$



Şekil 5.1. Jet grout kolon uç mukavemeti ve çevresel sürtünme mukavemeti

Jet Grout Kolonun Uç Mukavemetinin İnce Daneli Zeminlerde Hesaplanması

Jet grout kolonun uç mukavemetinin hesaplanması için yüzeysel temellere ait taşıma gücü formülleri kullanılır. Çünkü jet grout kolonun ucunda oluşan göçme mekanizması yüzeysel temellerin tabanında oluşan ile hemen hemen aynıdır (Çinicioğlu, 2005).

$$Q_p = A_p * q_p = A_p * [K_1 * c * N_c + \gamma * L * N_q + K_2 * \gamma * B * N_\gamma] \quad (5.3)$$

Birim alan için;

$$q_p = K_1 * c * N_c + \gamma * L * N_q + K_2 * \gamma * B * N_\gamma \quad (5.4)$$

Burada; q_p kolon ucunda birim alan için uç direnci, A_p kolon uç kesit alanı, B taban genişliği, N_c , N_q , N_γ taşıma gücü faktörleri (yüzeysel temeller için verilen değerler kullanılabilir (Çizelge 5.1), c kohezyon ve γ zeminin birim hacim ağırlığıdır.

Kohezyonlu zeminlerde, özellikle killerde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, zemindeki kilin zamana bağlı oturma sonucu, kayma mukavemetinin zamanla artacağıdır. Bu nedenle kısa dönem bazında $\phi = 0$ ($N_\gamma=0$) durumuna göre hesap yapılır (Prakash ve Sharma, 1990).

Çizelge 5.1. Terzaghi taşıma gücü katsayıları (Terzaghi, 1943)

Taşıma gücü faktörleri			
ϕ (°)	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.0	0.0
5	6.5	1.6	0.5
10	8.3	2.5	1.2
15	11.0	3.9	2.6
20	14.8	6.4	5.4
25	20.7	10.7	10.8
30	30.1	18.4	22.4
32	35.5	23.2	30.2
34	42.2	29.4	41.1
36	50.6	37.7	56.3
38	61.4	48.9	78.0
40	75.3	64.2	109.4
42	93.7	85.4	155.6
44	118.4	115.3	224.6
46	152.1	158.5	330.4
48	199.3	222.3	496.0
50	266.9	319.1	762.9

$$Q_p = A_p \cdot q_p = ((\pi \cdot D^2)/4) \cdot [c_u \cdot N_c + \sigma_{vo}' \cdot N_q] \quad (5.5)$$

Kohezyonlu zeminlerde $\phi = 0$ ve buna göre $N_q = 1$ olduğundan, kohezyonlu zeminlerde kazık uç direncinin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$Q_p = A_p \cdot c \cdot N_c \approx A_p \cdot 9 \cdot c_u \quad (5.6)$$

Jet Grout Kolonun Çevre Sürtünmesinin İnce Daneli Zeminlerde Hesaplanması

Kolon çevre sürtünme direnci çevre yüzey alanıyla zemin-kolon arası sürtünme direncinin çarpımı olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$Q_s = A_s \cdot f_s = \pi \cdot D \cdot L \cdot f_s \quad (5.7)$$

$$f_s = c_a + \sigma_h' \cdot \tan \delta \quad (5.8)$$

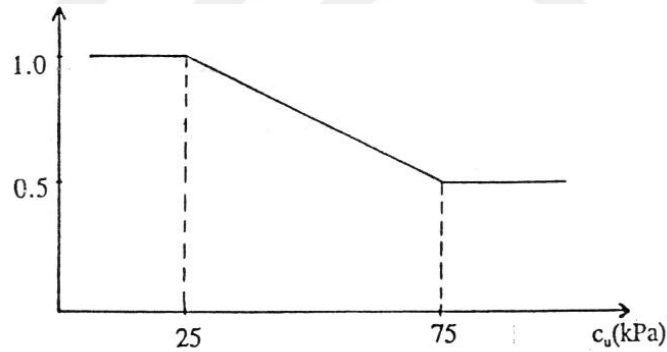
Burada; Q_s (kN) çevre sürtünmesi ile taşınan toplam yük, A_s (m²) kolon çevresinde sürtünme ile çalışan toplam alan, f_s (kN/m²) çevre yüzeyde birim alanda etkili olan sürtünme, L (m) kolon boyu, σ_h' seçilen derinlikte etkili olan efektif jeolojik yük, K_s jet grout kolon üzerinde etkili olan ortalama yatay toprak basıncı katsayısı, δ jet grout kolon malzemesi ve zemin arasındaki çevre sürtünme açısıdır.

Ancak Eşitlik (5.8) $\phi = 0$ ve dolayısıyla $\delta = 0$ koşulu için aşağıdaki şekilde yazılır.

$$f_s = c_a = \alpha \cdot c_u \quad (5.9)$$

$$Q_s = f_s \cdot A_s = \alpha \cdot c_u \cdot A_s \quad (5.10)$$

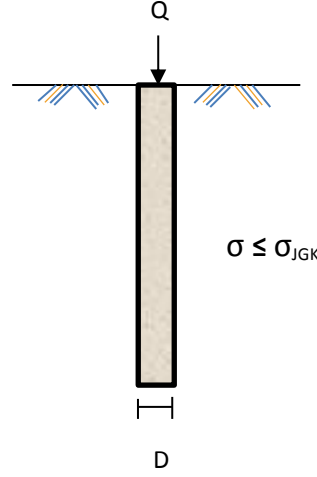
Burada; α ampirik adezyon katsayısı, c_u drenajsız kayma mukavemeti, A_s kolon çevre alanıdır.



Şekil 5.2. α için ASCE önerisi (Özaydın, 2010)

5.2 Jet Grout Kolonun Dayanım Kontrolü

Jet grout kolona üst yapıdan gelen yüklerden oluşan gerilmenin, jet grout kolonun malzeme dayanımını aşıp aşmadığı kontrolü yapılmalıdır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Jet grout kolonun dayanım kontrolü

Üst yapıdan gelen yük sonucunda jet grout kolonda meydana gelen gerilme Eşitlik (5.11) ile jet grout kolonun kesit alanı ise Eşitlik (5.12) ile bulunmaktadır.

$$\sigma = \frac{Q}{A} \quad (5.11)$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (5.12)$$

Burada, σ jet grout kolonda meydana gelen gerilme, σ_{JG} jet grout kolondaki karot numunenin dayanımı, Q üst yapıdan gelen yük, A jet grout kolonun kesit alanı, D ise jet grout kolonun çapıdır.

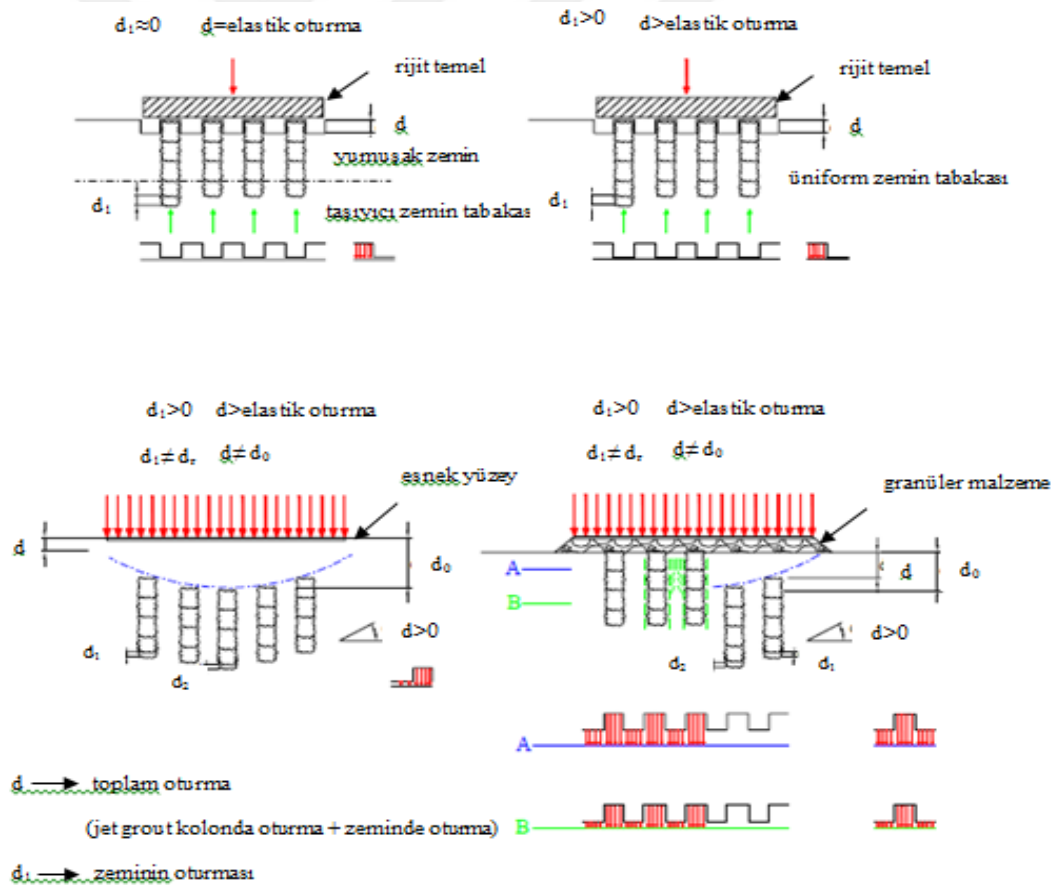
Jet grout kolonda malzeme dayanımının sağlanması için, jet grout kolonda meydana gelen gerilmenin (σ), jet grout kolondaki karot numunenin dayanımına (σ_{JGK}) eşit veya ondan küçük olması gerekmektedir (Eşitlik 5.13).

$$\sigma \leq \sigma_{JGK} \quad (5.13)$$

5.3 Jet Grout Kolonun Oturma Kontrolü

Jet grout kolonunun oturma analizi için oluşabilecek durumlar aşağıda verilmektedir:

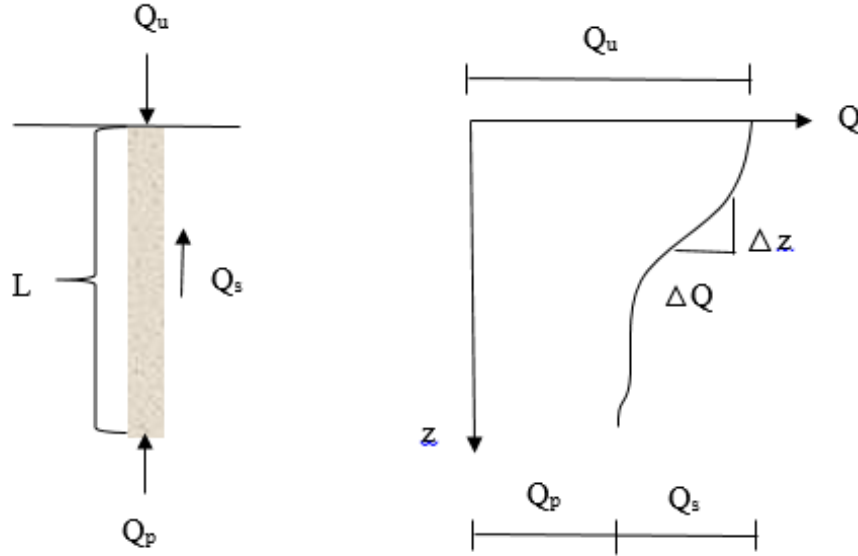
- Eğer yük, rijit bir temel tarafından, jet grout kolonlarına aktarılıyor ve jet grout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü ise, bütün yük kolonlar tarafından taşıyıcı katmana aktarılır. Bu durumda oturmalar jet grout kolonlarının elastik deformasyonu ile sınırlıdır (Şekil 5.4a).
- Eğer yük, rijit bir temel tarafından, jet grout kolonlarına aktarılıyor ve jet grout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü değil ise, kolonlar yüzen kazık şeklinde davranmakta ve yükün büyük bir kısmı jet grout kolonları tarafından taşınmakta ve küçük bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Bu durumda oturmalar jet grout kolonlarının elastik deformasyonundan yüksek olur (Şekil 5.4b).



Şekil 5.4. Jet grout kolonlarıyla iyileştirilen zeminlerde oluşabilecek oturmalar (Garassino, 1997)

- Eğer yük, üniform bir şekilde esnek bir yüzey tarafından, jet grout kolonlarına aktarılıyor ve jet grout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü değil ise, yükün büyük bir bölümü jet grout kolonlarına aktarılmakta uygun orandaki bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Oturmalar üniform değildir (Şekil 5.4c).
- Eğer yük ve temel sistemi arasında bir granüler malzeme tabakası yer alıyor ise yük genel olarak kolonlar tarafından taşınmakta uygun orandaki bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Granüler malzemenin bulunması, zemindeki kolonların reaksiyonlarının daha üniform davranmasının sağlar fakat derine gidildikçe zemin gerilmelerinin çoğunlukla kolonlara aktarıldığı görülmektedir (Şekil 5.4d).

Jet grout kolonun etrafını saran zeminde oluşan gerilme dağılımı tam olarak bilinmediğinden, jet grout kolonda meydana gelecek oturma'nın hesaplanması karmaşık bir hadisedir. Jet grout kolonların yük transfer mekanizmasını anlamak için Şekil 5.5'de gösterilen grafik incelendiğinde jet grout kolona uygulanan yük $Q = Q_u$ ise yükün derinlikle değişimi elde edilebilir.



Şekil 5.5. Jet grout kolonların yük transfer mekanizması (Yalçın, 2010)

Kohezyonlu zeminlerde inşa edilen jet grout kolonlarda, elastik ve konsolidasyon oturması beklenir. Jet grout kolonların oturmalarının belirlenmesindeki zorluklar nedeni ile jet grout kolonların elastik oturması için sadece yaklaşık çözümler (teorik, ampirik ve yarı ampirik yöntem) kullanılmaktadır.

5.3.1 Elastik oturma

5.3.1.1 Yarı ampirik yöntemler

Elastik oturma için kullanılan yarı ampirik yöntemde kazık oturması 3 bileşenden meydana gelir. Çalışma yükü altında bir kazığın oturması kazık malzemesinin elastik kısalması ile uçtaki ve çevredeki aktarılan yüklerin neden olduğu oturmaların toplamı olarak alınabilir.

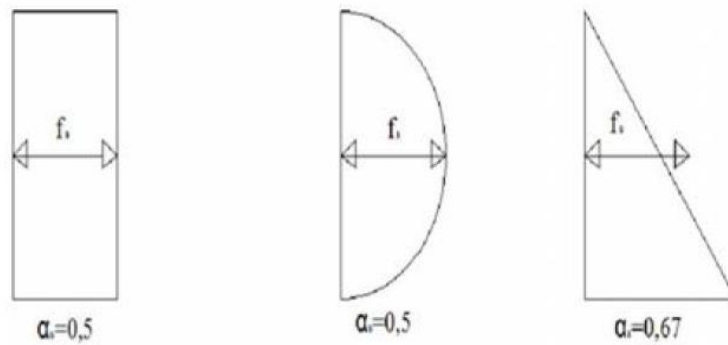
$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (5.14)$$

Formülde; S_t kazığın toplam elastik oturması, S_s kazığın kendisinin elastik oturması, S_p kazık ucunun oturması ve S_{ps} kazığın gövde boyunca taşınan yükten dolayı oturmasıdır.

S_s (kazığın elastik oturması);

$$S_s = (Q_{pa} + \alpha_s * Q_{fa}) \frac{L}{A_p * E_p} \quad (5.15)$$

Burada; Q_{pa} servis yükü altında kazık ucu tarafından taşınan yük, Q_{fa} kazık gövdesi tarafından taşınan yük, L kazık uzunluğu, A_p kesit alanı, E_p kazık elastisitesi ve α_s 'de kazık gövdesinin çevre sürtünmesinde bağlı bir katsayıdır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. α_s faktörünün değişimi (Vesic, 1977)

S_p (kazık ucunun elastik oturması);

$$S_p = \frac{C_p Q_{pa}}{B * q_p} \quad (5.16)$$

S_{ps} (kazığın gövde boyunca taşınan yükten dolayı oluşan elastik oturma);

$$S_{ps} = \frac{C_s Q_{fa}}{D_f * q_p} \quad (5.17)$$

$$C_s = 0.93 + 0.16 \sqrt{\frac{D_f}{B}} * C_p \quad (5.18)$$

Burada; D_f kazık gömülü derinliği, q_p nihai uç direnci ve C_p ampirik katsayıdır.

5.3.1.2 Ampirik yöntem

Elastik oturma için önerilen ampirik yöntem, Vesic (1970) tarafından geliştirilen Eşitlik (5.19) ile tekil jet grout kolonun yük altındaki oturmasıdır.

$$S_t = \frac{D}{100} + \frac{Q_{va} * L}{A_p * E_p} \quad (5.19)$$

Burada; S_t jet grout kolonun toplam oturması, Q_{va} uygulanan jet grout kolon yükü, L jet grout kolonun uzunluğu, D jet grout kolon çapı, A_p jet grout kolon kesitinin alanı ve E_p jet grout kolonun elastisitesini gösterir.

5.3.1.2 Teorik yöntem

Jet grout kolon oturmasının hesaplanması için kullanılabilecek diğer bir yöntem ise Hooke kuralına dayanan teorik yöntemdir. Jet grout kolon elastik oturması, Eşitlik (5.20) ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta h_e = \frac{\sigma}{E_{JG}} * L \quad (5.20)$$

$$\sigma = \frac{Q_{va}}{A} \quad (5.21)$$

Burada, Δh_e jet grout kolonda meydana gelen düşey deplasman yani oturma, σ yük altında jet grout kolonda oluşan gerilme değeri, E_{JG} jet grout kolonun elastisite modülü, L jet grout kolonun boyu, Q_{va} tekil jet grout kolon üzerine gelen düşey yük, A jet grout kolonun kesit alanıdır.

5.3.2 Konsolidasyon oturması

Kohezyonlu zeminlerde toplam oturma; elastik oturma, konsolidasyon oturması ve sekonder konsolidasyon oturmasının toplamıdır. Doygun kohezyonlu zeminler gerilme artışına maruz kaldığında, artan boşluk suyu basıncının zamana bağlı olarak sönümlenmesi sonucu zeminde oluşan deplasmanlara konsolidasyon oturması denir. Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak jet grout kolonda oluşan gerilme artışına bağlı konsolidasyon oturması hesaplanabilir.

$$\Delta H = H * \Delta \sigma * m_v \quad (5.22)$$

$$\Delta H = \frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{\Delta \sigma + \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (5.23)$$

Burada; H jet kolon boyu, $\Delta \sigma$ gerilmede oluşan artış, m_v hacimsel sıkışma katsayısı, C_c sıkışma indisi ve e boşluk oranıdır.

BÖLÜM VI

JET GROUT YÖNTEMİYLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

6.1 Jet Grout ile Zemin İyileştirme, Kalite Kontrol Deneyleri ve Vaka Analizleri

Yılmaz (2016) çalışmasında, zemin ıslah yöntemlerinden biri olan jet grout yönteminin çalışma prensibi irdelenmiş; bu sistem sonrası yapılan kalite kontrol testleri açıklanmıştır. Sistemin uygulanabilirliğinin ve performansının anlaşılması için Hampton by Hilton Bolu Otel ve Konferans Salonu projesi incelenmiştir.

Ercan (2017) çalışmasında, jet grout metodu ile zemin ıslahı üzerine bir vaka analizi incelemiştir. Erzurum Büyükşehir Belediyesi Atık Su Arıtma Tesisi projesi zemininin incelendiği bu çalışma kapsamında altı ünite binası zemininde oturma ve taşıma gücü problemleri tespit edilmiştir. Jet grout metodu ile zemin iyileştirmesinin yapıldığı bu çalışma sonucunda, mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu tespit edilen zemin bölgeleri taşıma gücü ve oturma kriterlerine uygun duruma getirilmiştir.

Durgunoğlu vd. (1998) çalışmalarında, Ankara'da Migros Hipermarket ve Alışveriş Merkezinin 25.000 m²'lik zemin alanının jet grout yöntemiyle iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri ile modellenen zeminde sığ temel tasarımında gelen yükler altında oturmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu yüzden çözüm olarak kazıklı temel veya jet grout yöntemiyle zemin iyileştirilmesi sunulmuştur. Ekonomik koşullar ve yapım süresi göze alındığında, jet grout uygulaması yapılmasına karar verilmiştir. Uygulanacak jet grout yöntemi, parametreler ve izlenecek prosedür belirlenmiştir. Jet grout kolon imalatları yapılmaya başlandığında kalite kontrol maksadıyla bazı deneyler yapılmıştır. Kolon çapları ölçülmüş, karot alınarak serbest basınç mukavemeti belirlenmiş ve yükleme deneyi yapılarak yük taşıma kapasitesi bulunmuştur.

Fidan (2015) çalışmasında, laboratuvarda yapılan model deneylerle Jet Grout kolonlarının performansını etkileyen faktörlerden çimento tane çapı ve su/çimento oranı uygun bir optimizasyon tekniği kullanılarak araştırılmıştır.

Durgunoğlu vd. (2002) çalışmalarında, İzmir / Tire Organize Sanayi Bölgesi'nde inşa edilen sigara fabrikasının yaklaşık 20000 m²'lik sahasının jet grout yöntemiyle ıslahına ilişkin bir vaka analizi incelemişlerdir. Bu bölge ana kaya üzeri kolüvyon, alüvyon formasyonları ve dolgu zeminden oluşup, 1. derece deprem bölgesi içerisinde. Fabrika temelleri kazıklı, binanın zemine oturan döşemeleri ile diğer hafif yapı temelleri altında ise jet grout kolonlar yapılması önerilmiştir. Sıvılaşma riskine karşı sistematik, kolüvyon tabakasına kadar yaklaşık 32 m jet grout kolon uygulaması yapıldığı belirtilmiştir. Çalışmada jet grout kolonlarında yapılan ön deneme testlerinin, uygulama projesinin parametrelerinin belirlenmesindeki önemi vurgulanmıştır. Ön deneme testlerinde jet 1 yöntemiyle elde edilen kolonların jet 2 yöntemiyle elde edilen kolonlarına göre daha yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olduğu ve gelen yükler altında daha az oturma yaptığı gözlenmiştir. Ancak, zemin iyileştirmenin amacı, daha çok sıvılaşmaya karşı olduğu için taşıma gücü ve oturmalar ikincil öneme sahip olduğu göz önüne alınarak daha çok alanı kapsayacak büyük çaplı kolonlar imal etmek için jet 2 yönteminin uygulanmasına karar verilmiştir.

Şeflek (2012) çalışmasında, Adana ili Ceyhan ilçesinde inşa edilen Ceyhunkent toplu konutlarına yönelik zemin ıslah çalışmasını ele almıştır. Ceyhan İlçesinin zemin özellikleri, yapılacak olan toplu konut projesini olumsuz yönde etkilemekte olduğundan, zemin iyileştirme yoluna gidilmiştir. Zemin iyileştirme yöntemleri göz önüne alınarak belirlenmiş olan ıslah yöntemi jet grout olmuştur. Çalışmanın amacı, seçilen ıslah yöntemi ile zeminde meydana gelecek farklılıkların belirlenmesidir

Erkan (2013) çalışmasında, enjeksiyon basıncı, su/çimento oranı, tij çekme hızı ve tij dönme hızının jet grout kolonların performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla laboratuvar ortamında jet grout kolonu üretilebilecek sistem tasarlanarak imal edilmiştir. Bu şekilde laboratuvar ortamında ilk kez parametrik olarak jet grout kolonların davranışı incelenmiştir. Deney tasarımı ve sonuçların değerlendirilmesi güçlü bir optimizasyon tekniği olan Taguchi Yöntemiyle yapılmıştır.

Toğrol (1998) çalışmasında, istenilen özellikte jet grout kolonları oluşturmak için gerekli parametrelerin uygun bileşimlerini araştırmıştır. Bu parametreler çimento harcı miktarı, püskürtme basıncı, püskürtücünün dönme ve çekme hızı, püskürtücünün

çapıdır. Gerek uygulama aşamasında gerek uygulamadan sonra istenilen özelliklerin sağlanıp sağlanmadığını görmek için kontrol deneyleri yapılmıştır.

Çınar (2014) tez çalışması kapsamında, zemin iyileştirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Son yıllarda taşıma gücü, oturma ve sıvılaşma problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılan jet grout yöntemi tez kapsamında detaylı olarak anlatılmıştır. Özel olarak taşıma gücü ve oturmalar açısından problemli olan turbalık ve bataklık zeminler üzerinde inşa iyileştirme yöntemi olarak jet grout seçilmiştir.

Kara vd. (2015) çalışmasında, jet grout kolonuyla sağlanan iyileştirilmede kolon merkezinden itibaren etkili alan belirlenmek istenmiştir. Bu yüzden kolon merkezinden D ve 1.5D mesafede SPT deneyleri ve jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda iyileştirilen alan ve iyileştirilmeyen alan karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda kolon merkezinden itibaren etkili iyileştirme alanının 2D olduğu saptanmıştır.

Öz (2015) tez çalışmasında, üstüne herhangi bir yapı inşaatı amaçlanan hemen her tür zemin için iyileştirme yöntemi tanıtılmış ve jet grout yöntemi üzerinde durulmuştur. Zemin için sıvılaşma riski oluşturacak birçok faktör ele alınmış, detaylı olarak SPT deneyi verileriyle özel bir yöntemle sıvılaşma analizi hesap yöntemleri açıklanmıştır. Ayrıca sıvılaşma riskine karşı yapılabilecek zemin iyileştirme yöntemlerine açıklık getirilmiş ve sıvılaşma riskinin önlenmesi için yapılacak jet grout zemin iyileştirme metodu üzerinde durulmuştur.

6.2 Jet Grout Kolonlarının Serbest Basınc Dayanımları, Oturma ve Taşıma Kapasitesi Analizleri

Aksangür (2017) çalışmasında, temel zemininde yapılacak iyileştirme için 5 farklı model oluşturup oturma miktarları hesaplandı. Farklı modellerden elde edilen oturma değerleri karşılaştırıldığında jet grout yöntemi ile zemini iyileştirmenin zeminlerde aşırı oturma problemine karşı olumlu katkısı tespit edilmiştir.

Doğanışık (2010) tez çalışmasında, kohezyonsuz birimlerde oluşturulan jet grout kolonlarındaki düşey yüklerin etkisi altında jet grout kolonunun performansı ve kolon bünyesinde oluşan gerilme dağılışı incelenmiştir. Bu araştırma ile; sonlu elemanlar

yöntemiyle tasarımı yapılacak jet grout kolonlarının gerçek hayatta yükler altındaki davranışına yakın modelin nasıl kurulabileceği ve benzer çalışmalara kaynak oluşturabilmesi hedeflenmiştir.

Akan (2013) tez çalışmasında, bir zemin iyileştirme yöntemi olan jet grouting ile oluşturulan kolonların serbest basınç dayanımlarının, bu yöntemde kullanılan parametreler ve iyileştirme öncesi zemin durumuyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi yöntemleri kullanılarak jet grout kolonların serbest basıncının tespitinde bu analizlerin başarısı incelenmiştir.

Kaymakçı (2014) tez çalışmasında, derin temel sistemlerinden biri olan kazıkların tasarım kriterleri üzerinde durulmuş, imalat aşamaları açıklanmış ve kazıklı temellerin tercih edilme nedenleri irdelenmiştir. Aynı zamanda zemin ıslah yöntemlerinden biri olan jet grout kolon yönteminin işletim parametreleri, imalat aşamaları, yöntemin avantajları ve sınırlamaları üzerinde durulmuştur.

Akan ve Keskin (2014) çalışmalarında, bir zemin iyileştirme yöntemi olan jet grout uygulaması ile oluşturulan kolonların serbest basınç dayanımlarının, bu yöntemde kullanılan parametreler ve iyileştirme öncesi zemin durumuyla olan ilişkisini incelemiştir. Bulanık mantık ve çoklu regresyon analizi yöntemleri kullanılarak jet grout kolonların serbest basıncının tespitinde bu analizlerin başarısı incelenmiş ve her iki yöntemde de belirlilik (determinasyon) katsayısı yaklaşık 0.91 hesaplanmıştır. Sonuçlar, tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur. Analizlerde girdi parametresi olarak; enjeksiyon basıncı, zemin standart penetrasyon sayısı, çekme hızı, nozul çapı ve ince dane oranı kullanılmıştır. Çıktı olarak ise jet grout kolonun serbest basınç dayanımları elde edilmiş ve gerçekte ölçülen basınç dayanım değerleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan çoklu regresyon analizinde kullanılan parametreler arasında, çekme hızının en etkili ve standart penetrasyon sayısının en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Jet grout kolon serbest basınç dayanımının; standart penetrasyon sayısı ve nozul çapının artması ile arttığı, çekme hızı ve ince dane oranının artmasıyla azaldığı görülmüştür.

6.3 Jet Grout Kolon Dayanma Yapılarının Davranışının Analizi

Tarakçı (2017) çalışmasında, derin kazı iksa sistemi olarak yaygın olarak tercih edilen çok sıra ankrajlı bir destekleme sisteminde yatay jet grout uygulaması incelenmiş; jet grout enjeksiyon tekniği ile iyileştirilen ve iyileştirilmeyen zeminlerin, çeşitli geometrik sınırlar için mevcut iksa sistemi üzerindeki etkilerin araştırılmıştır.

Racansky vd. (2008) çalışmalarında, jet grout yöntemiyle inşa edilen dayanma yapılarının diyafram duvarları ve palplanşlar gibi daha geleneksel tip dayanma yapılarına alternatif bir çözüm olduğunu belirtmişlerdir. Süreklilik arz eden silindirik elemanlardan oluşan duvarlar bu tarz yapılar için örnek model teşkil etmektedir. Gerekli duvar kalınlığı jet grout kolonunun çapından fazlaysa ikinci jet grout kolonları, duvar kalınlığını arttırmak için inşa edilebilmektedir. Çalışma göstermiştir ki bahsi geçen ikinci sıra jet grout kolonlarından bir kısmının yapılmaması yapının performansını belirgin şekilde azaltmamaktadır. Çalışmada dayanım duvarları kalınlıklarının etkileri, iki ve üç boyutlu analizler kullanılarak incelenmiştir.

Sönmez (2010) çalışmasında, jet grout desteklemenin derin dayanma yapısı stabilitesine katkısı, sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerle araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle jet grout kolonların mühendislik özellikleri araştırılmış ve yapısal kullanım türlerine değinilmiştir. Analizlerde kullanılacak problemin geometrisini belirlemek amacıyla halen inşaatı devam etmekte olan “İzmir Metrosu Karşıyaka Tünel Projesi” örnek alınmıştır. Jet grout kolon mukavemeti özellikleri, iyileştirilmiş zemin alan oranları, paternleri ve yerleşim tipleri değiştirilerek analiz kombinasyonları oluşturulmuştur. Analizler kumlu ve killi zemin profilleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Analizlerde PLAXIS 2D ve 3D sonlu elemanlar programları kullanılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen diyafram duvar deplasmanları ve momentleri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Doğal zemin yüzeyi ve kazı seviyesindeki zemin düşey deplasmanları da tez kapsamında sunulmuştur.

6.4 Jet Grout Uygulamasının Nümerik Analizi

Karahan (2016) çalışmasında, çok gevşek ve gevşek kumlu zeminlerdeki jet grout kolonların taşıma gücü ve oturma değerlerinin, jet grout kolonun boyuna ve zeminin sıkılığına bağlı değişimi araştırılmış olup elle hesap yöntemlerinden ve nümerik model analizi yönteminden elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca jet grout kolonların malzeme dayanımı kontrolü de yapılmıştır. İçsel sürtünme açısı 26° , 28° , 30° ve 32° olan çok gevşek ve gevşek kumlu zeminlerde 60 cm çapında 9 m, 12 m, 15 m ve 20 m boylarındaki jet grout kolonların oturma değerleri yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle bulunmuştur. Ayrıca jet grout kolonları, sonlu elemanlar yöntemi kullanan Plaxis programında eksenel simetri modelinde, Mohr Coulomb ve pekleşen zemin modelleriyle zemin ve plate eleman olarak tanımlanıp jet grout kolonlarının oturma ve taşıma gücü değerleri bulunmuştur. Elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri irdelenerek sonuçlar tez kapsamında sunulmuştur.

Küsin (2009) çalışmasında, jet grout kolon 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 parametreleri 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 incelenememektedir. 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.

Alkaya ve Yeşil (2011) çalışmalarında, yüksek modüllü kolonları (jet grout kolonları) tablolama programı kullanarak tasarlamıştır. Jet grout ile projelendirme yapılmasını kolaylaştırmak için Excel ile bilgisayar programı hazırlanmıştır. Excel programının kullanımı proje yapılmasını ve hazırlanan projelerin kontrolünü kolaylaştırması amaçlanmıştır.

Yağızatlı (2012) tez çalışması kapsamında, jet grout yönteminin kullanıldığı alanlar, uygulama teknikleri, uygulama aşamasında kullanılan ekipmanlar, yöntemin avantajları, uygulamadan sonraki gerekli kontroller, jet grout kolonlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri ve çalışma parametreleri incelenmiştir. PLAXIS 2D programı kullanılarak zemin içerisinde jet grout kolonları modellenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizler zemin parametrelerinin farklı değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır.

Erginağ (2015) tez çalışmasında, jet grout kolonlarının sıvılaşmaya karşı önlem olarak katkısı, parametrik olarak nümerik analizlerle irdelenmiştir.

Küçükali (2008) tez kapsamında, yerinde uygulanan bir zemin iyileştirme tekniği olan jet enjeksiyonun tarihsel, teorik ve pratik geçmişini incelemiştir. Ayrıca bu tekniğin türleri, tasarımı, uygulaması, parametreleri, uygulama alanları, avantajları ve dezavantajları bu çalışma dahilinde ele alınmıştır. Problemlili zemin koşullarından dolayı oturma yapan demiryoluna uygulanan jet grout yöntemi vaka çalışması olarak incelenmiştir.

Küsin (2009) tez çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak jet grout kolonlarının farklı uygulamalarda analizlerini göstermiştir. İlk iki örnekte jet grout kolonlarının dayanma duvarlarında kullanımına yönelik analizler yapılmıştır. Sonraki örneklerde ise, birim hücre ve homojenleştirme metodu kullanılarak jet grout kolonlarının temel altında kullanılması durumu incelenmiştir.

Tachir (2015) araştırma kapsamında, Samsun ili Terme ilçesi Akçay köyü yakınlarında yapılan Kombine Doğalgaz Çevrim Santrali inşaatındaki, binalarının temel zemini jet grout ve fore kazık yöntemleri ile ıslah edilmiştir. İyileştirilmesi yapılan zeminde, imal edilen kazıkların kontrolü amacıyla kolon süreklilik ve kolon yükleme deneyleri yapılmış, ayrıca kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde de tek eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır. Bunun sonucunda Samsun Terme Kombine Doğalgaz Çevrim Santrali inşaatında yapılan zemin iyileştirmenin başarılı olduğunu görülmüştür.

BÖLÜM VII

ÇOK YUMUŞAK VE YUMUŞAK İNCE DANELİ ALÜVYON ZEMİNLERDE TEKİL JET GROUT KOLON TASARIMI

7.1 Materyal ve Metot

Tez kapsamında yapılan çalışmanın amacı; $c_u = 5, 10, 15, 24$ kPa (Çizelge 7.1) değerlerine sahip çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde jet grout kolon çapı (D) sabit tutularak, jet grout kolon boyunun (L) değişimi ile ortaya çıkan D/L'ye bağlı jet grout kolonlarının taşıma gücü ve oturma ilişkisinin elde edilip kıyaslanmasıdır (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.1. Kıvama göre zeminlerin sınıflandırılması (Terzaghi ve Peck, 1967)

c_u (kPa)	Kıvam durumu
0-12	Çok yumuşak
12-25	Yumuşak
25-50	Orta katı
50-100	Katı
>100	Çok katı

Jet grout kolon taşıma gücü, teorik ve nümerik yöntemler ile oturma değerleri teorik, yarı ampirik, ampirik yöntemler ve nümerik yöntemlerle hesaplanmıştır. Elle hesaplanan oturma ve taşıma gücü değerleri ile sonlu elemanlar programıyla elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.2. D/L - Kıvam kombinasyonları

Zemin Cinsi	Çok yumuşak ve Yumuşak Alüvyon Zemin			
D/L (m/m)	0.8/10	0.8/15	0.8/20	0.8/30
$c_u = 5$ kPa	5	5	5	5
$c_u = 10$ kPa	10	10	10	10
$c_u = 15$ kPa	15	15	15	15
$c_u = 24$ kPa	24	24	24	24

Tez kapsamında jet grout kolon tasarımı yapabilmek için öncelikle çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zemin parametreleri belirlenerek ayrı modeller oluşturuldu (Çizelge 7.2).

7.1.1 Zemin parametrelerinin belirlenmesi

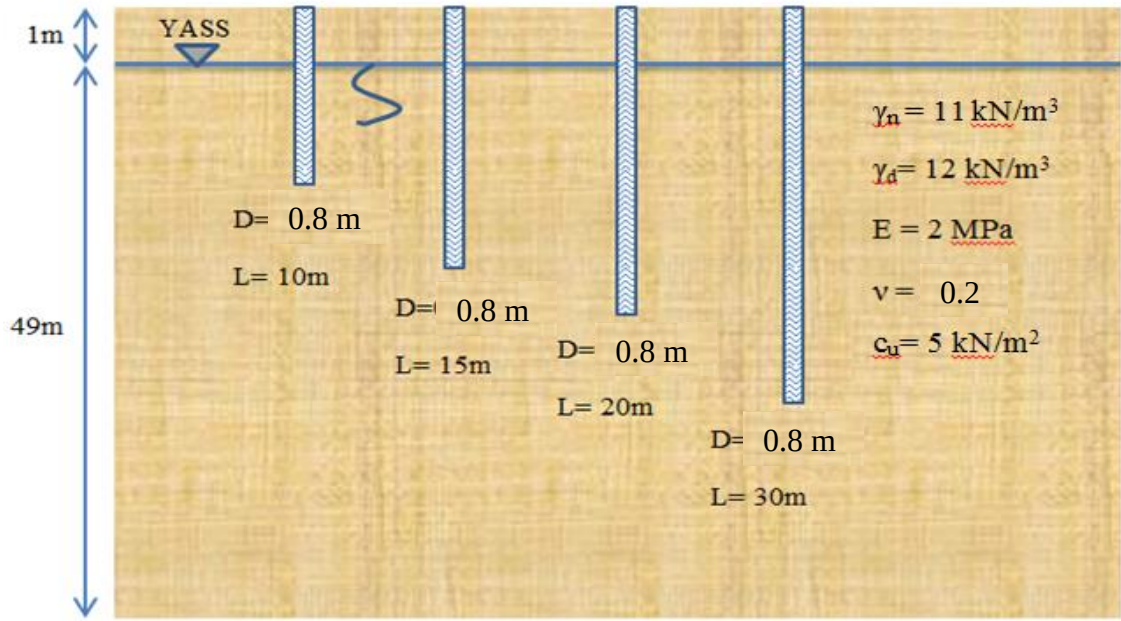
Zeminlerde farklı kıvam değerleri göz önüne alınarak çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminleri tanımlayan parametreler seçildi. Bu parametreler; elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), doğal ve suya doymun birim hacim ağırlıkları (γ_n, γ_d) olup, yapılan literatür analizi sonucunda belirlenerek Çizelge 7.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Literatür analizi sonunda belirlenen zemin parametreleri
(Peck, 1974)

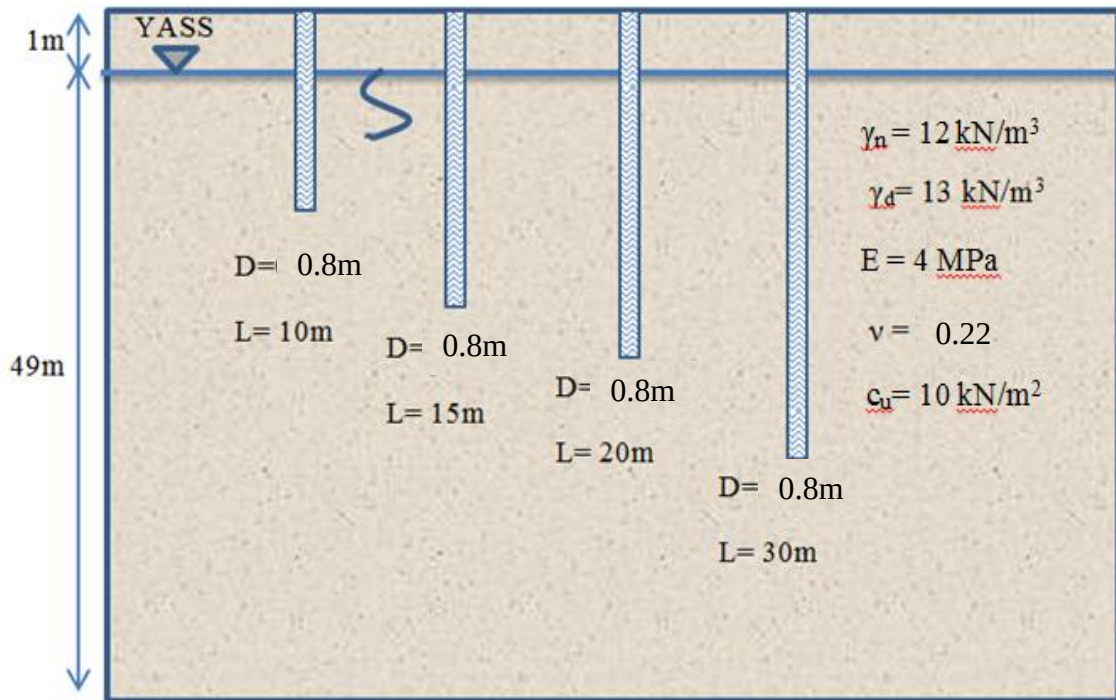
Malzeme	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ν	E (MPa)	c_u (kN/m ²)
Çok Yumuşak	11.00	12.00	0.2	2	5
	12.00	13.00	0.22	4	10
Yumuşak	13.00	14.00	0.25	6	15
	14.00	15.00	0.27	9.6	24

7.1.2 Zemin modelleri

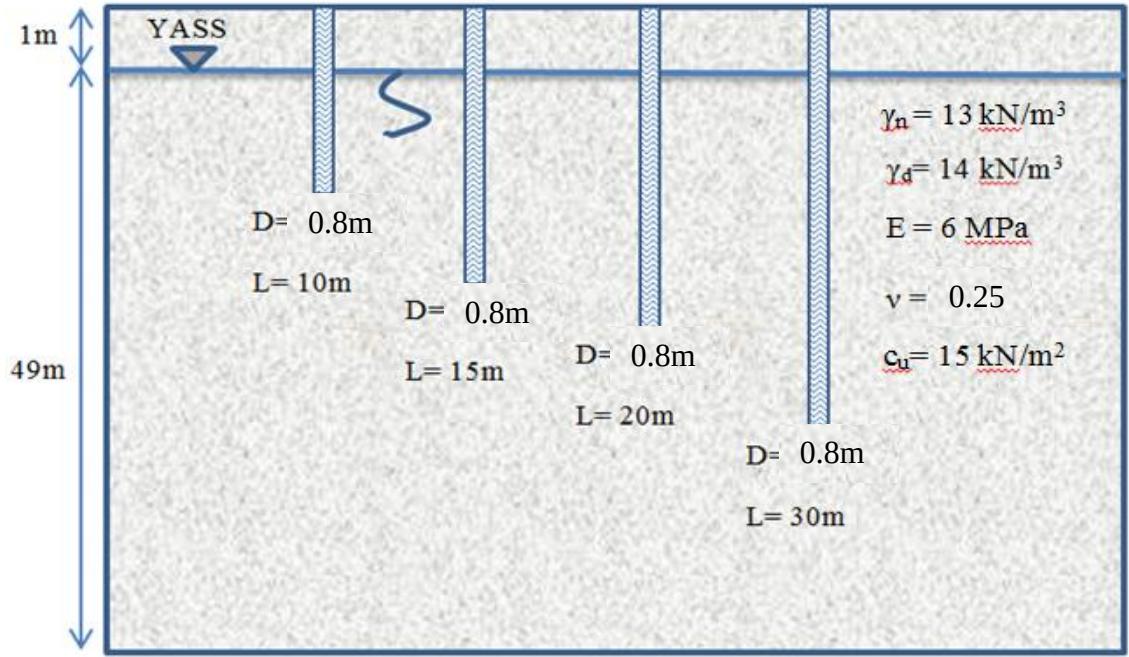
Tez çalışması kapsamında oluşturulan zemin modelleri Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Şekil 7.1'de zemin profili tek tabaka halinde 50 m boyunca $c_u = 5$ kN/m² çok yumuşak, Şekil 7.2'de zemin profili tek tabaka halinde 50 m boyunca $c_u = 10$ kN/m² olan çok yumuşak, Şekil 7.3'te zemin profili tek tabaka halinde 50 m boyunca $c_u = 15$ kN/m² olan yumuşak ve Şekil 7.4'te zemin profili tek tabaka halinde 50 m boyunca $c_u = 24$ kN/m² olan yumuşak kumlu siltli kilden oluşan alüvyon ince daneli zemin olup her modelde yer altı su seviyesi (YASS) 1 m derinliğindedir



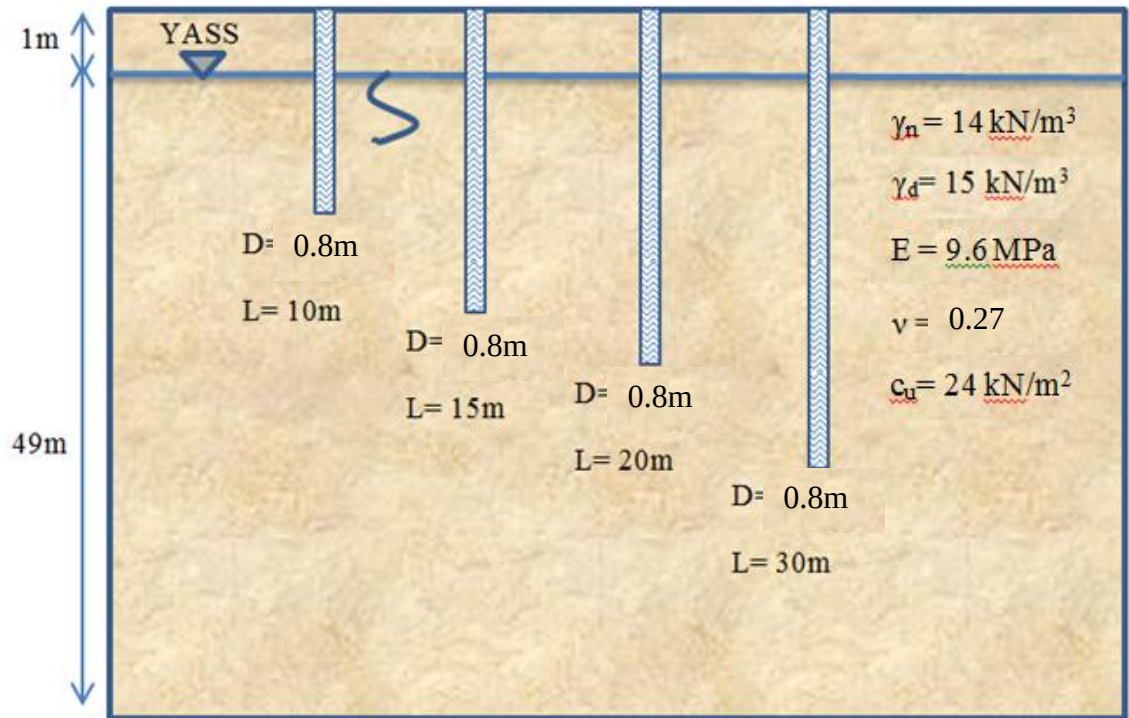
Şekil 7.1. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemin modeli



Şekil 7.2. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemin modeli



Şekil 7.3. $c_u = 15\text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zemin modeli



Şekil 7.4. $c_u = 24\text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zemin modeli

7.1.3 Jet grout kolonu imalat parametreleri

Jet grout uygulaması için Jet-1 sistemi seçilmiştir.

- Çimento dozajı: 450 kg/m³
- Su / Çimento oranı: 1
- Nozul sayısı: 2
- Nozul çapı: 2 mm (1.6 mm - 2 mm)
- Enjeksiyon basıncı: 400 bar

olarak alındığında 1 m ıslah edilmiş zemin hacmi Eşitlik (3.1) ile;

$$V_h = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (0.4)^2 \cdot 1 = 0.5 \text{ m}^3$$

1 m ıslah edilmiş zemindeki çimento miktarı $W_{\text{ç}}$, Eşitlik (3.2) ile;

$$450 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.5 \text{ m}^3 = 225 \text{ kg} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Çimento özgül yoğunluğu 2.93 kg/lt'ye denk geldiğinden dolayı grout içerisindeki çimento hacmi $V_{\text{ç}}$ Eşitlik (3.3) ile,

$$\frac{225 \text{ kg}}{2.93 \text{ kg/lt}} = 76.79 \text{ lt} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Su/çimento oranı 1 olduğundan grout içerisindeki çimento hacmi çimento ağırlığının çimento özgül ağırlığına bölümüyle bulunmaktadır. Çimento özgül ağırlığı 2.93 kg/lt kabul edilmektedir.

$$\frac{225 \text{ kg}}{2.93 \text{ kg/lt}} = 76.79 \text{ lt} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Su / çimento oranı 1'e eşit ve suyun özgül ağırlığı 1 kg/m³ olduğundan dolayı suyun hacmi,

$$\frac{225 \text{ kg}}{1 \text{ kg/lt}} = 225 \text{ lt} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Grout özgül ağırlığı γ_G Eşitlik (3.8) ile;

$$\frac{225+225=450 \text{ kg}}{225+76.79=301.79 \text{ lt}} = 1.49 \text{ kg/lt} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Hidrostatik düşü (h) Eşitlik (3.7) ile;

$$h = \frac{\text{enjeksiyon basıncı}}{\text{grout özgül ağırlığı}} = \frac{400}{1.49} = 2684 \text{ m}$$

Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı v , Eşitlik (3.9) ile hesaplanmıştır.

$$v = \sqrt{2 * 9.81 * 2684} = 229 \text{ m/sn}$$

Enjeksiyon malzemesi miktarı Q ,

$$Q = 2290 * (2 * (\pi * 0.02^2 / 4)) = 1.43 \text{ lt/sn.}$$

1m kolon teşkili için gerekli süre (t) ise Eşitlik (3.10) ile,

$$\frac{301.79}{1.43} = 211 = 3.5 \text{ dk} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Bulunan jet grout kolon imalat parametreleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Jet grout kolon imalat parametreleri

Jet grout yöntemi	Jet-1	1 m kolondaki çimento miktarı	225 kg
Jet grout kolon çapı	80 cm	1 m kolondaki su miktarı	225 lt
Çimento dozajı	450 kg/m ³	1 m kolondaki çimento hacmi	76.79 lt
Su/Çimento oranı	1	Enjeksiyon karışımın özgül ağırlığı	1.49 lt/sn
Enjeksiyon basıncı	400 Bar	Enjeksiyon malzemesinin çıkış hızı	229 m/sn
Nozul sayısı	2	Enjeksiyon malzemesinin miktarı	1.43 lt/sn
Nozul çapı	2 mm	1 m kolon oluşumu için süre	3.5 dk

Jet grout kolonun oturma hesaplarında kullanılmak üzere çok yumuşak, yumuşak zeminlerde elde edilmesi öngörülen jet grout kolonun serbest basınç mukavemetleri Çizelge 3.4'ten belirlenmiştir. Serbest Basınç Mukavemeti (σ_{JGK}), $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemin için 3 MPa, $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zemin için 6.5 MPa olarak seçilmiştir. Seçilen serbest basınç mukavemetleri kullanılarak Eşitlik (4.1) ile çok

yumuşak ve yumuşak zeminler için elastisite modülleri (E_{JGK}) hesaplanmıştır (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5. Jet grout kolonun serbest basınç mukavemetleri ve elastisite modülleri

	σ_{JGK} (MPa)	E_{JGK} (MPa)
$c_u=5$ kPa	3	8193
$c_u=10$ kPa	4	9460
$c_u=15$ kPa	5	10577
$c_u=24$ kPa	6.5	12059

7.2 Elle Hesap Yöntemleri

7.2.1 Jet grout kolonlarının taşıma gücü hesabı

Seçilen zemin parametre değerleri ile oluşturulan zemin modellerinde sabit 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m, 30 m boylarında jet grout kolonun taşıma gücü değerleri hesaplanıp, elde edilen jet grout kolon taşıma gücü ile sabit çap/uzunluk oranı değişimi belirlenmiştir (Şekil 7.5).

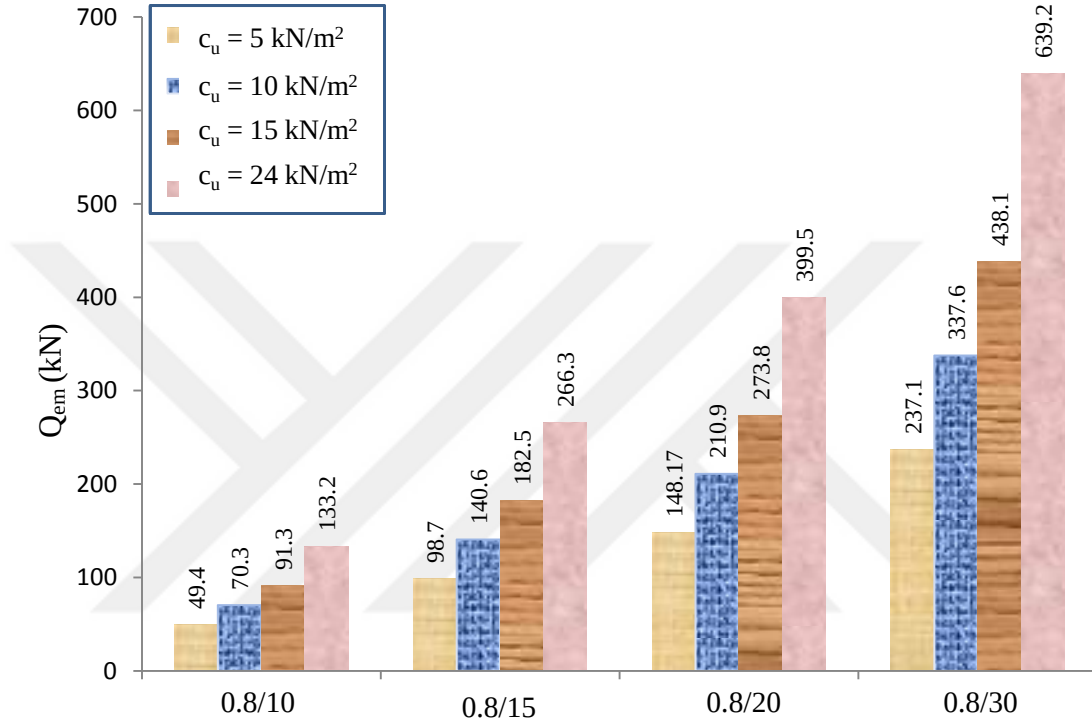
Çok yumuşak zeminde 80 cm çapında 10 m boyunda jet grout kolonun taşıma gücü, Çizelge 7.3'te verilen parametreler kullanılarak hesaplanmıştır. Jet grout kolonun uç mukavemeti Eşitlik (5.6) ile, $Q_u = 22.5$ kN olarak hesaplanmıştır. 80 cm çapındaki jet grout kolonun çevre alanı $A_s = 25.12$ m² olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.3'ten $\alpha = 1$ olarak alınıp Eşitlik (5.10) ile, jet grout kolonun çevre sürtünme mukavemeti $Q_s = 125.6$ kN olarak hesaplanmıştır.

Jet grout kolonun uç mukavemeti ve çevresel sürtünme direncinin toplamıyla taşıma gücü değeri Q_u 148.1 kN olarak hesaplanmıştır. Emniyetli jet grout kolonun taşıma gücü (Q_{em}), nihai toplam taşıma gücü değerinin güvenlik sayısına ($G_s=3$) bölümüyle Eşitlik (5.2) ile 49.39 kN olarak bulunmuştur.

Aynı hesap yöntemi ve formüllerde diğer zemin ve jet grout kolon parametreleri kullanılarak jet grout kolonların taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.6).

Çizelge 7.6. Jet grout taşıma gücü

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	49.39	70.30	91.27	133.16
0.8/15	98.77	140.60	182.55	266.30
0.8/20	148.17	210.90	273.80	399.50
0.8/30	237.10	337.60	438.10	639.19



Şekil 7.5. Elle hesaplanan jet grout taşıma gücü değerleri

Şekil 7.5'ten görüldüğü gibi, beklendiği üzere drenajsız kayma mukavemeti 5 kN/m² olan çok yumuşak zeminde elde edilen jet grout kolonun taşıma gücü değerinin en düşük olduğu, drenajsız kayma mukavemeti 24 kN/m² olan yumuşak zeminde ise taşıma gücü değerinin en yüksek olduğu görülmüştür. Sabit çaptaki jet grout kolonlarda boy arttıkça her bir zemin için (çok yumuşak, yumuşak alüvyon) taşıma gücü değerlerinin de arttığı görülmüştür (Şekil 7.5).

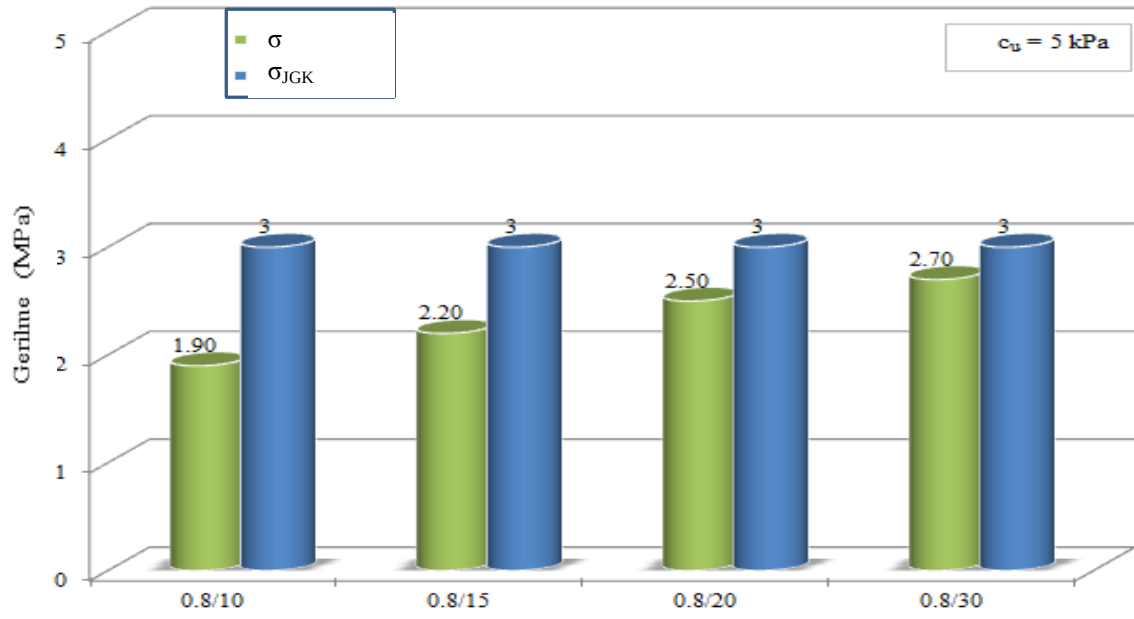
7.2.2 Jet grout kolonun malzeme dayanımı hesabı

Üst yapıdan gelen yük sonucunda çok yumuşak ve yumuşak zeminlerdeki jet grout kolonlarında meydana gelen gerilmenin, jet grout kolonun malzeme dayanımını aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. $c_u = 5$ kPa için uygulanan yük (Q), jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü değerine yakın ve Çizelge 7.6'daki emniyetli taşıma gücü değerinden küçük bir değer seçilmiştir ($Q \leq Q_{em}$). 10 m boyunda jet grout kolon için 45 kN ($45 \text{ kN} \leq 49.39 \text{ kN}$), 15 m boyunda jet grout kolon için 70 kN ($70 \text{ kN} \leq 70.30 \text{ kN}$), 20 m boyunda jet grout kolon için 90 kN ($90 \text{ kN} \leq 91.27 \text{ kN}$) ve 30 m boyunda jet grout kolon için 130 kN ($130 \text{ kN} \leq 133.16 \text{ kN}$) yük uygulanmıştır. Jet grout kolonda meydana gelen gerilme, Eşitlik (5.11) ile hesaplanmıştır (Çizelge 7.7).

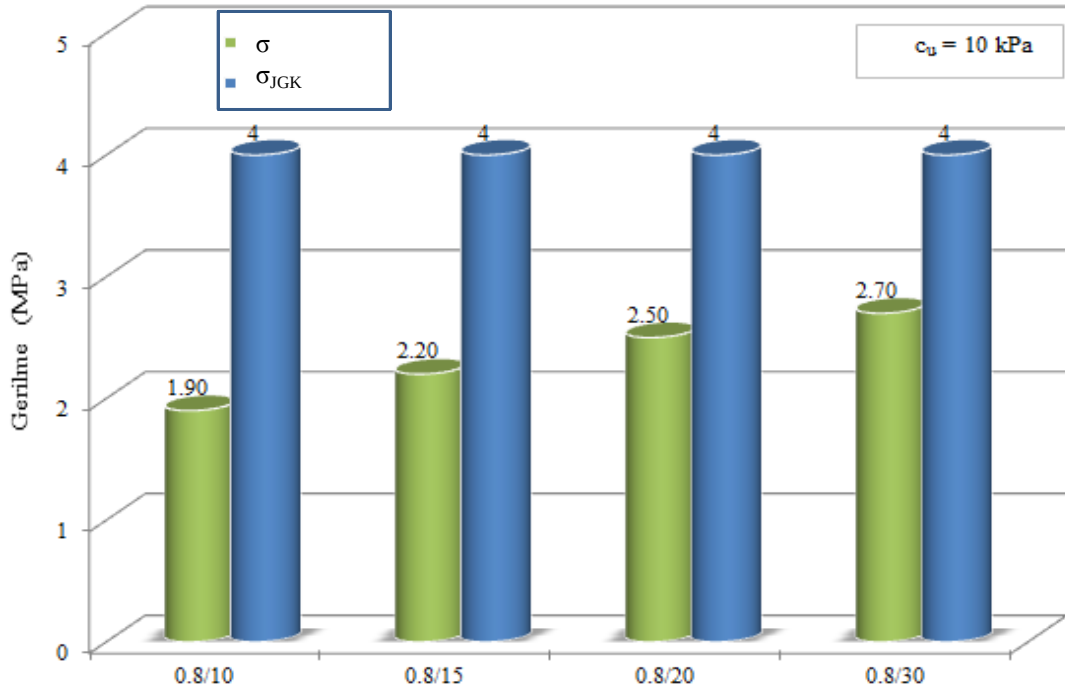
Çizelge 7.7. Jet grout kolonlarında meydana gelen gerilme

D/L (m/m)	σ (MPa)				σ_{JGK} (MPa)
	0.8/10	0.8/15	0.8/20	0.8/30	
$c_u = 5$ kPa	1.9	2.2	2.5	2.7	3
$c_u = 10$ kPa	1.9	2.2	2.5	2.7	4
$c_u = 15$ kPa	1.9	2.2	2.5	2.7	5
$c_u = 24$ kPa	1.9	2.2	2.5	2.7	6.5

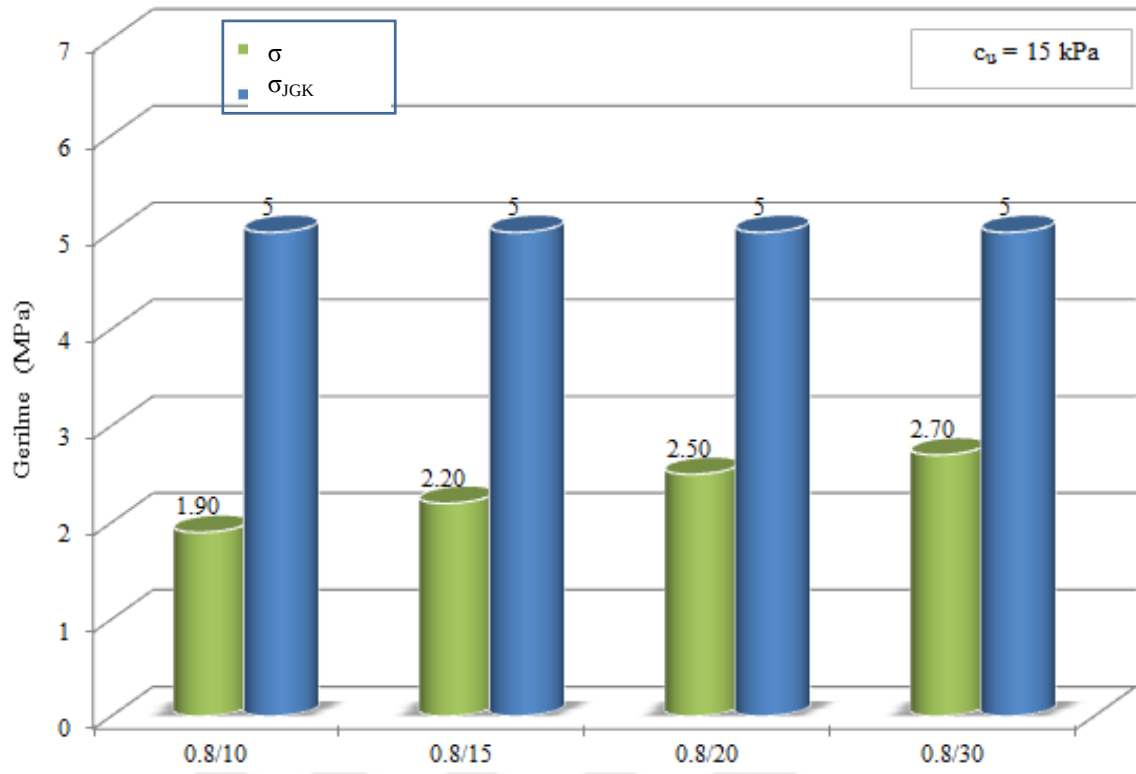
Çok yumuşak ve yumuşak zemindeki jet grout kolonda meydana gelen gerilme (σ) ile jet grout kolonun dayanımının (σ_{JGK}) karşılaştırılması Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da gösterilmiştir.



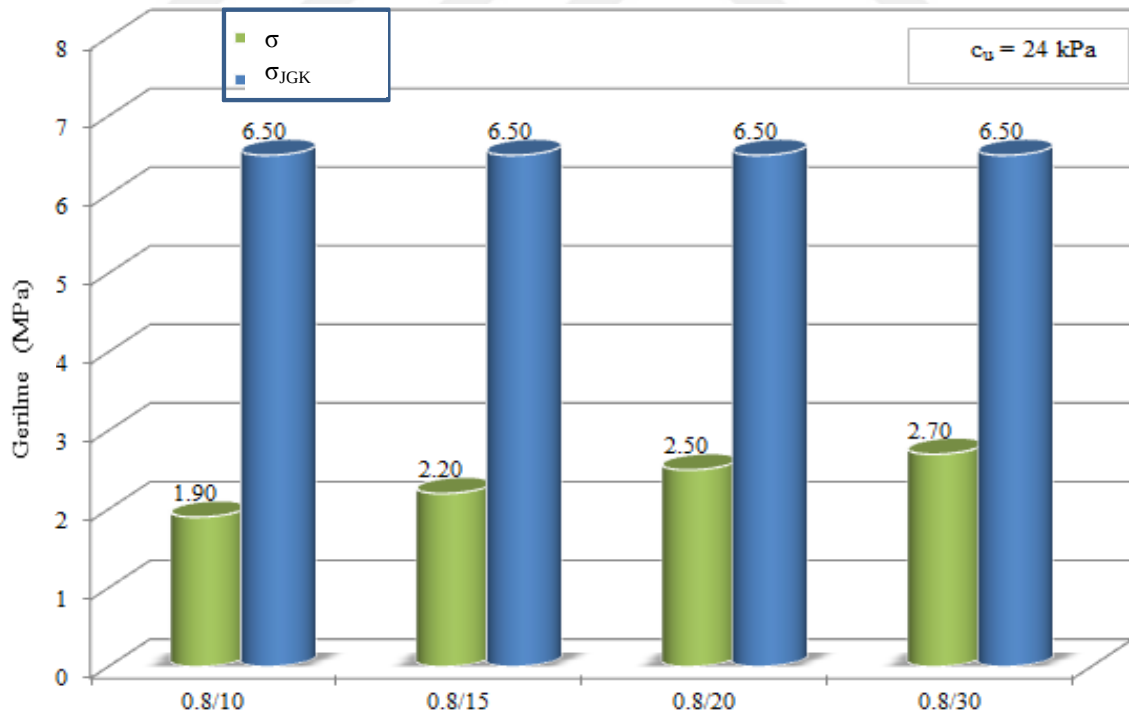
Şekil 7.6. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı



Şekil 7.7. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı



Şekil 7.8. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı



Şekil 7.9. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan zemindeki jet grout kolonda malzeme dayanımı

Jet grout kolonda meydana gelen gerilme (σ), jet grout kolondaki karot numunenin dayanımından (σ_{JGK}) küçük olduğu için jet grout kolonun malzeme dayanımı sağlanmıştır.

7.2.3 Jet grout kolonun oturma hesabı

Seçilen zemin parametreleri ile oluşturulan zemin modellerinden çok yumuşak ve yumuşak zeminlerde her biri için 80 cm çapında, 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boylarında imal edilen jet grout kolonların oturma değerleri; yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken jet grout kolonları üzerine daha önceden hesaplanmış olan kohezyon değerine bağlı olarak artan taşıma gücü değerleri yük olarak etkilmiştir. Hesaplanan oturma değerleri ile D/L oranının ilişkisi incelenmiştir.

7.2.3.1 Yarı ampirik yöntem ile oturma hesabı

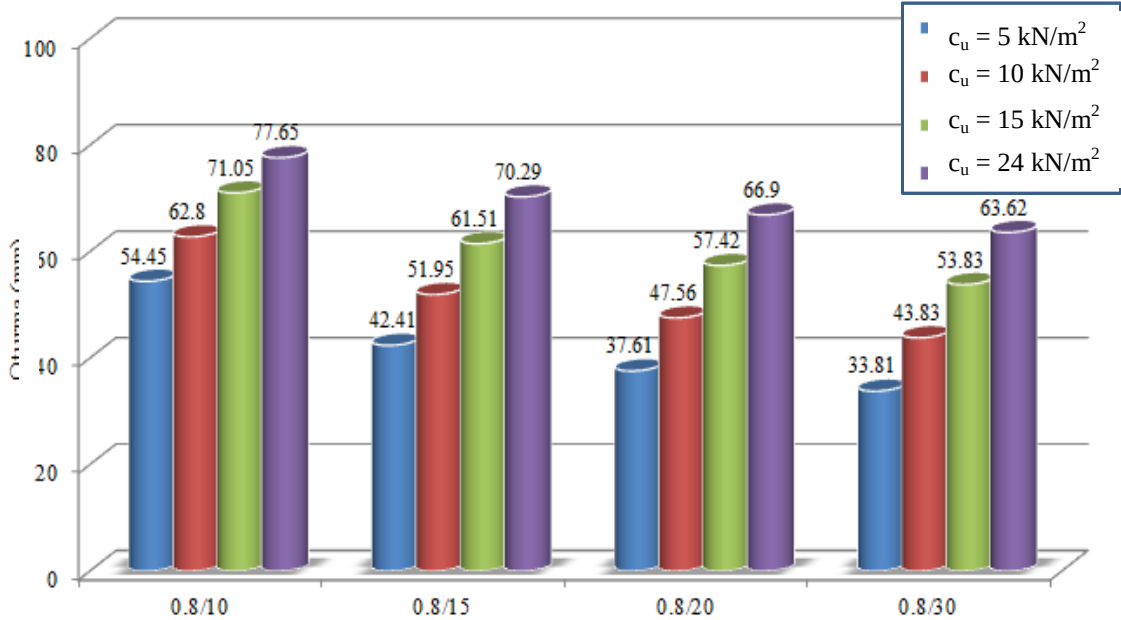
10 m boyunda çok yumuşak zemindeki tekil jet grout kolonun taşıma gücü, 10 m boyunda jet grout kolonun çok yumuşak ve yumuşak zemindeki diğer durumları için oturma hesabında yük olarak uygulanmıştır ve oturma değerleri yarı ampirik yöntemle hesaplanmıştır (Çizelge 7.8).

Jet grout kolonun elastik oturması Eşitlik (5.15) kullanılarak, 1.06 mm olarak hesaplanmıştır. Jet grout kolon shaftı boyunca oluşan birim sürtünme mukavemetinin dağılımı üçgen kabul edildiğinden $\alpha = 0.67$ olarak seçilmiştir (Vesic, 1977). Jet grout kolon ucunun oturması Eşitlik (5.16) kullanılarak, 32.91 mm hesaplanmıştır. Burada C_p değeri kil için 0.06 olarak seçilmiştir (Prakash ve Sharma, 1990). Jet grout kolonun gövde boyunca taşınan yükten dolayı oturması Eşitlik (5.17) ile, 20.48 mm olarak bulunmuştur. Jet grout kolonun yarı ampirik yöntem ile toplam oturması, 54.45 mm olarak bulunmuştur. Aynı hesap ilkelerine göre diğer durumlar için oturmalar hesaplanmıştır (Çizelge 7.8).

Çizelge 7.8. Yarı ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri

D/L (m/m)	Oturma (mm)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	54.45	42.41	37.61	33.81
0.8/15	62.8	51.95	47.56	43.83
0.8/20	71.05	61.51	57.42	53.83
0.8/30	77.65	70.29	66.9	63.62

Yarı ampirik yöntem ile elde edilen, $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zeminde oluşan oturma değerinin en yüksek olduğu, $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zeminde ise oturma değerinin en düşük olduğu görülmüştür. Sabit çaptaki jet grout kolonların boyu arttıkça kohezyon 5, 10, 15 ve 24 olan çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminlerde meydana gelen oturmanın arttığı görülmüştür (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. Yarı ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri

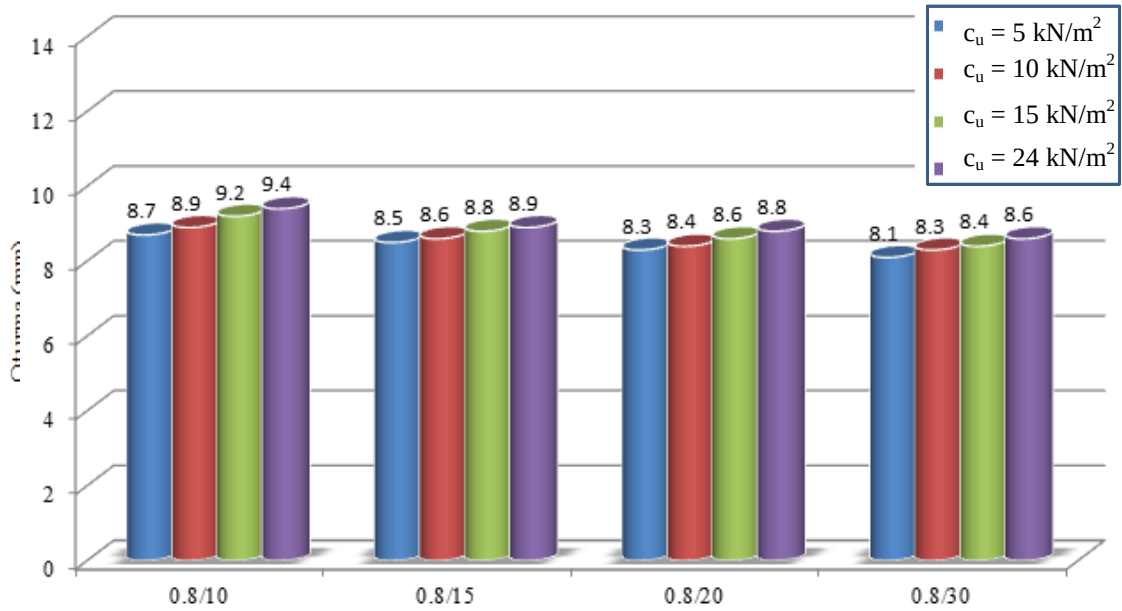
7.2.3.2 Ampirik yöntem ile oturma hesabı

$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zeminde 80 cm çapında 10 m boyunda jet grout kolonun oturma değeri ampirik yöntemle hesaplanmıştır. Jet grout kolonun toplam oturması Eşitlik (5.19) ile, 8.74 mm olarak hesaplanmıştır.

Jet grout kolonun çok yumuşak ve yumuşak zemindeki her bir farklı durumlar için oturma hesabında yük olarak uygulanmıştır ve oturma değerleri ampirik yöntemle hesaplanmıştır (Çizelge 7.8).

Çizelge 7.9. Ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri

D/L (m/m)	Oturma (mm)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	8.74	8.49	8.29	8.12
0.8/15	8.98	8.65	8.46	8.33
0.8/20	9.18	8.79	8.66	8.48
0.8/30	9.48	8.98	8.87	8.67



Şekil 7.11. Ampirik yöntemle elde edilen oturma değerleri

Ampirik yöntemle elde edilen $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zeminlerde oluşan oturma değerinin en yüksek olduğu $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zeminde ise oturma değerinin en düşük olduğu görülmüştür. Jet grout kolonlarda $c_u = 5\text{-}24 \text{ kN/m}^2$ aralığı için her bir boy oranında oturma değerlerinde ciddi değişim olmadığı gözlenmiştir (Şekil 7.11)

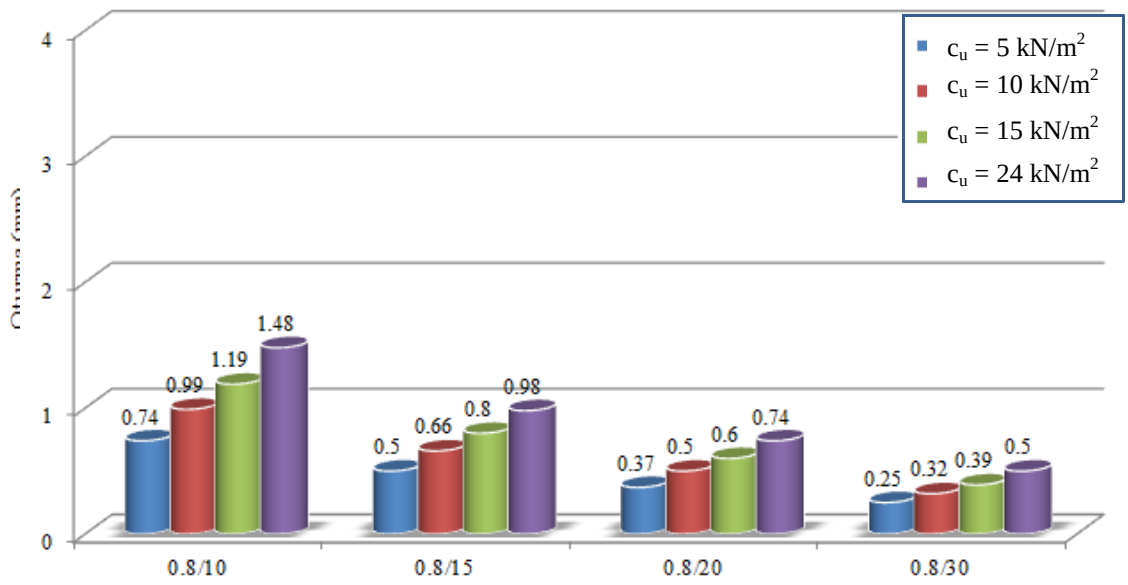
7.2.3.3 Teorik yöntem ile oturma hesabı

$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zeminde 80 cm çapında 10 m boyunda jet grout kolonun oturma değeri teorik yöntemle yük altında jet grout kolonda oluşan gerilme

değeri, Eşitlik (5.21) ile 0.74 mm olarak hesaplanmıştır. Diğer durumlarda benzer hesap yöntemiyle belirlenmiştir (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.10. Teorik yöntemle elde edilen oturma değerleri

D/L (m/m)	Oturma (mm)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	0.74	0.5	0.37	0.25
0.8/15	0.99	0.66	0.5	0.32
0.8/20	1.19	0.8	0.6	0.39
0.8/30	1.48	0.98	0.74	0.5

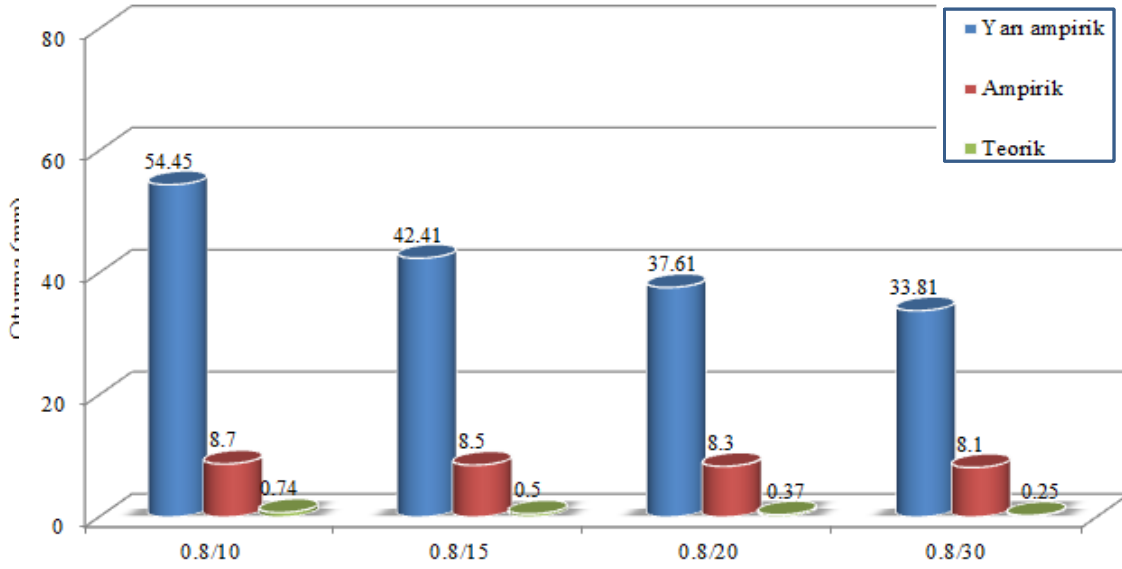


Şekil 7.12. Teorik yöntemle elde edilen oturma değerleri

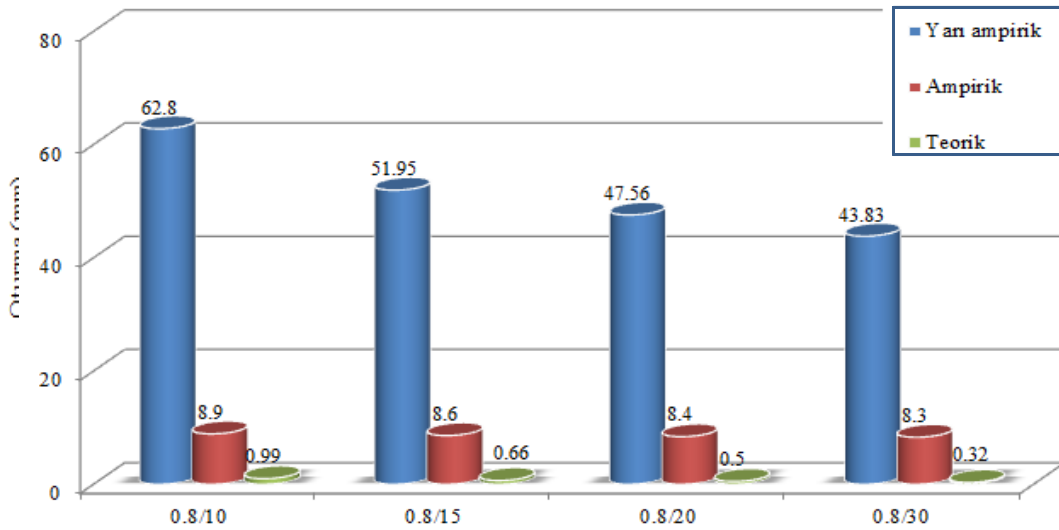
Teorik yöntem ile elde edilen oturma değerlerinden $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zeminde oluşan oturma değerinin en yüksek olduğu, $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan yumuşak zeminde ise oturma değerinin en düşük olduğu görülmüştür. Sabit çaptaki jet grout kolonlarda $c_u = 5\text{-}24 \text{ kN/m}^2$ aralığı için her bir boy oranında oturma değerlerinde ciddi değişim gözlenmemiştir. Ayrıca, L arttıkça oturmalarında arttığı görülmüştür (Şekil 7.12).

7.2.4 Jet grout kolonun oturma hesaplarının karşılaştırılması

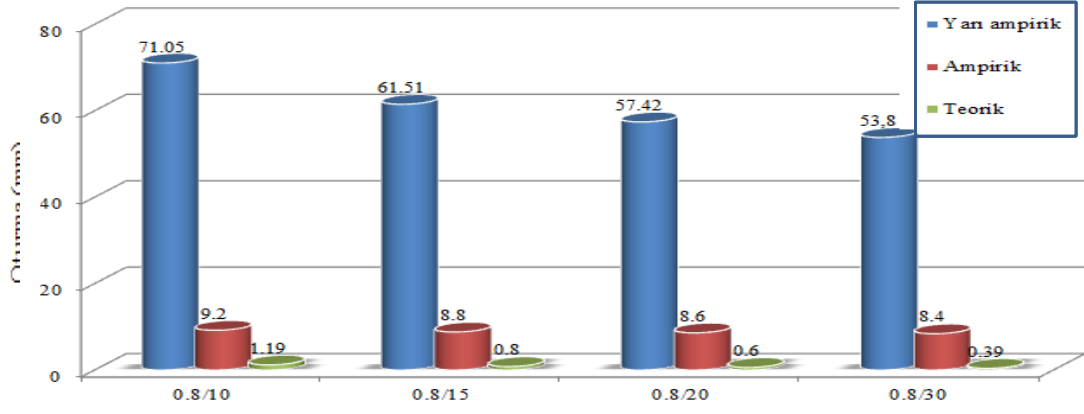
Seçilen zemin parametrelerine göre modellenen çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boylarındaki jet grout kolonların yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle hesaplanan oturma değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16).



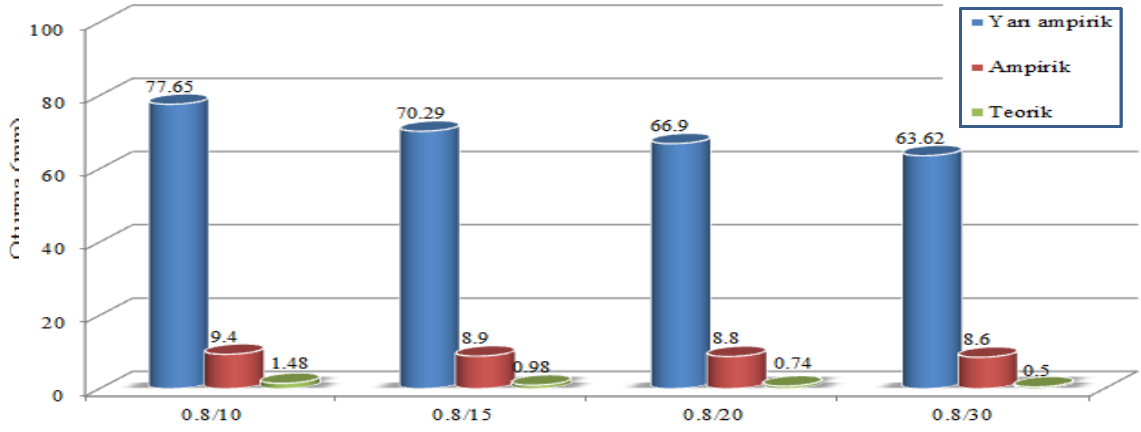
Şekil 7.13. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi



Şekil 7.14. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi



Şekil 7.15. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi



Şekil 7.16. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ olan çok yumuşak zemindeki jet grout kolon oturma değerlerinin değişimi

Jet grout kolonların oturma değerlerinde, boy arttıkça her bir kohezyon değeri için artış olmuştur. Ayrıca yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemler karşılaştırıldığında yarı ampirik yöntem ile hesaplanan jet grout kolon oturma değerleri en fazladır. Ampirik yöntem ile hesaplanan oturma değerleri de teorik yöntem ile hesaplanan oturma değerlerinden fazladır. Teorik yöntemle elde edilen değerlerin çok küçük olmasının sebebi teorik yöntem hesabının sadece jet grout kolondaki oturmaya dayalı olmasıdır. Yarı ampirik yöntemle elde edilen oturma değerlerinin en yüksek olmasının sebebi yarı ampirik yöntemde oturmanın; jet grout kolon ucunun elastik oturması, jet grout kolonun elastik oturması, jet grout kolonun gövdesi boyunca oluşan elastik oturma bileşenlerini kapsayıp detaylı bir yöntem olmasıdır. Teorik yöntem ile elde edilen oturma değerlerinin en küçük olmasının sebebi teorik yöntemde oturmanın jet grout kolonunun sadece kendisinde gerçekleştiği kabulüne dayanmasıdır.

7.3 Nümerik Hesap Yöntemleri

Çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminlerdeki tekil jet grout kolonun taşıma gücü ve oturma değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanan paket programıyla bulunmuştur. Sonlu elemanlar programında farklı zemin davranışları seçilerek yapılan modellemeler sonucunda elde edilen taşıma gücü ve oturma değerleri karşılaştırılarak değişimleri incelenmiştir.

7.3.1 Sonlu elemanlar yöntemi ve PLAXIS

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık ve elle hesaplanması oldukça zaman alan, hatta imkansız olan mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Bu yöntem esas olarak fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesine dayanır. Buna göre değişik ve karmaşık geometriye sahip sistemler, çok sayıda basit geometriye sahip parçacığa bölünerek bu parçacıkların ayrı ayrı çözülmesi suretiyle analiz edilir. Bu aşamada sistem parçalanırken esas sistemde yer alan süreksizlikler dikkate alınmalıdır. Örneğin farklı malzeme özelliklerine sahip geometriler kendi içerisinde parçalara ayrılmalıdır. Ayrılan parçalar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmak suretiyle esas geometriyi oluştururlar ve her bir parça için denge denklemleri yazılarak bilinmeyenler sınır şartları yardımıyla elde edilir. Her elemanın şekli, bu elemanı oluşturan düğüm noktalarının koordinatlarıyla belirlenir. Bu şekilde yapılan analizin bir boyutlu olması durumunda elemanlar doğrusal, iki boyutlu olması durumunda elemanlar kare, üçgen ya da dikdörtgen ve üç boyutlu olması durumunda üçgen prizma, dikdörtgen prizma vb. şekillerden oluşurlar. Her düğüm noktasının belirli bir serbestlik derecesi vardır ve bu serbestlik dereceleri elde edilmesi gereken bilinmeyenleri işaret etmektedir. Çözüm için bir asıl değişken seçilerek tek bir elemanda bu değişkenin davranışı modellenir ve matris hesap yöntemiyle tüm sisteme uygulanarak bilinmeyenler hesaplanır. Elde edilen ana değişkenler yardımıyla ikincil değişkenler elde edilir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Geoteknik mühendisliğinde sonlu elemanlar yöntemi esas olarak deplasmanların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle deplasmanlar ana değişkenleri, deplasmanlar yardımıyla hesaplanan gerilme ve zorlanmalar ikincil değişkenleri belirtmektedir. Bu doğrultuda, sonlu eleman yönteminin işleyişi modelin sonlu

elemanlara ayrılması, elemanda yükleme sonucu oluşacak deplasmanları yansıtacak deplasman modellerinin seçilmesi, elemanın geometrik ve malzeme özelliklerinden elde edilen denge denklemleri katsayılarını ve minimum potansiyel enerji ilkesinden faydalanılarak elde edilen katsayıları içeren rijitlik matrisinin oluşturulması ve oluşturulan eleman rijitlik matrislerinin ve yük vektörlerinin toplanarak sistemin bütünü için rijitlik matrisi ve yük vektörünün elde edilmesi şeklinde özetlenebilir. Tek bir eleman için rijitlik matrisi $[k]$, yük vektörü $\{Q\}$ ve düğüm deplasman vektörü $\{q\}$ arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilir (Yalçın, 2010);

$$[k] \cdot \{q\} = \{Q\} \quad (7.1)$$

Her bir elemanın rijitlik matrisinin toplanması suretiyle elde edilen sistemin rijitlik matrisi $[K]$, tüm sistem için düğüm noktaları deplasman vektörü $\{r\}$ ve toplam yük vektörü $\{R\}$ arasındaki ilişki ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla açıklanabilir;

$$[K] \cdot \{r\} = \{R\} \quad (7.2)$$

Bu iki eşitliğin çözülmesi için sınır koşullarının belirlenmesi ve bu iki eşitliğin uygun şekilde ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Eşitliklerin çözülmesi ile bilinmeyen ana değişkenler elde edilir. Lineer analizlerde doğrudan çözüm yapılırken, doğrusal olmayan zemin davranışı için analizlerde her bir yük adımında yük vektörleri ve rijitlik matrisleri tekrar oluşturularak çözümlenmektedir. Deplasmanların elde edilmesini takiben gerilme ve zorlanmalar deplasman değerlerine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Yalçın, 2010).

Sonlu elemanlar yöntemi esas olarak üç ana adımdan oluşmaktadır. Ön süreç olarak adlandırılan ilk adımda, sistemin geometrisi, malzeme özellikleri, yapısal elemanlar ve yükler tanımlanmakta, hesap aşaması olan ikinci aşamada sistem sonlu elemanlara ayrılarak her bir eleman için bilinmeyenler yukarıda bahsedilen şekilde çözülüp düğüm noktalarındaki bilinmeyenlerin toplanması suretiyle tüm sistem için birincil ve ikincil değişkenler elde edilmekte, süreç sonrası olarak adlandırılan son aşamada ise elde edilen birinci ve ikincil değişkenlerin tüm sistem üzerindeki değerleri görülüp izlenebilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

7.3.2 PLAXIS foundation sonlu elemanlar programı

PLAXIS Foundation programı, PLAXIS 2D ve 3D Foundation programı olarak 2 çeşittir. Üç boyutlu yazılımda iki boyutlu yazılıma nazaran 3. eksen (z) bulunmaktadır. Bu tezde, PLAXIS 2D Foundation yazılımı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Hollanda Delft Teknik Üniversitesi'nde geliştirilen PLAXIS yazılımı, geoteknik mühendisliğinde hem statik hem de dinamik yükler altında karmaşık geometriye sahip sistemlerin deformasyon ve stabilite analizinde sıklıkla tercih edilen ve oldukça pratik bir programdır. Tercih edilmesinin sebebi kullanım kolaylığının yanı sıra, zeminin elasto-plastik davranışını, başlangıç gerilme durumunu, yapı zemin etkileşimini dikkate alması olarak gösterilebilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan ve PLAXIS yazılımı, özellikle kıyı yapıları da dahil olmak üzere temel sistemlerinin analizinde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır (Brinkgreve ve Broere, 2006). Bu programla yapılan çalışmalarda tabakalı zemin, karmaşık geometriye sahip sistemler, farklı yönlerde yükleme gibi bir çok durum dikkate alınabilir. PLAXIS yazılımı, 3 ana bölümden oluşmaktadır.

İlk olarak, “input” Giriş bölümünde sistemin geometrisi ve sınır şartları tanımlanır, zemin ve yapı elemanlarının malzeme özellikleri belirlenir, etkiyen yük tipleri (çizgisel yük, yayılı yük vb.) ile etkidikleri noktalar seçilir. İkinci aşama olan “calculation” hesap aşamasında yapım aşamaları tanımlanır, her bir düğüm noktasındaki u_x , u_y ve u_z yer değiştirmeleri hesaplanır. Yer değiştirmelerin aksine, gerilme ve zorlamalar her bir elemanın Gauss (gerilme) noktalarında hesaplanmaktadır. Üçüncü ve son aşama olan “output” çıktı bölümünde ise yapılan hesaplamaların sonuçları görülebilmekte, önceden belirlenmiş bazı noktalarda gerilme-şekil değiştirme ve taşıma gücü davranışını gösteren diğer diyagramlar çizdirilebilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Üst yapının tipine ve zemin koşullarına bağlı olarak sistem drenajlı veya drenajsız olarak modellenabilmektedir. PLAXIS geoteknik uygulamaları için hazırlanmış zemin davranışını ifade eden zemin modelleri;

Lineer elastik model (Linear elastik model): Bu yaklaşım izotropik lineer elastik malzemelerin davranışlarının Hooke kanununa uygunluğu esasına dayanır. Zeminin davranışını belirleyen başlıca 2 parametre vardır. Bunlar elastisite modülü (E) ve poisson oranıdır (ν). Lineer elastik modelin zemin davranışının modellenmesinde kullanımı kısıtlıdır. Genellikle zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesi için kullanılır.

Mohr-Coulomb (MC) modeli: Bu yaklaşım zemin davranışının modellenmesinde en sık kullanılan zemin davranışı yaklaşımıdır. Zeminin davranışını belirleyen başlıca 5 parametre vardır. Bunlar elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), kayma mukavemeti açısı (ϕ), kohezyon (c) ve dilatans açısıdır (ψ).

Jointed Rock model (Mafsallı kaya modeli): Bu yaklaşım anizotropik elastik-plastik bir model öngörür. Bu yaklaşımda plastik kayma sadece sınırlı sayıda kayma düzleminde gerçekleşebilir. Bu model katmanlı ve mafsallı kayaların modellenmesi için uygundur.

Pekleşen/Sertleşmiş (Hardening Soil) Zemin (HS) model: Bu yaklaşım sürtünme sertleşmesi plastisitesi formülü çerçevesinde oluşturulmuş hiperbolik ve elastoplastik bir modeldir. İlave olarak bu modelde temel basınç altında kalıcı kompaksiyonun ifade edilmesi için basınç sertleşmesini de içerir. Bu ikinci dereceden model kum, çakıl davranışını yansıtabildiği gibi kil ve silt gibi daha yumuşak zeminlerinde davranışını yansıtır (Brinkgreve, 2002). Pekleşen Zemin modelinde, Mohr-Coulomb zemin modelinin tanımında detaylı olarak yer verilen Elastisite Modülü dışındaki dört parametreye ek olarak, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen üç ayrı Elastisite Modülü parametresi (E_{50} , E_{oed} , E_{ur}) ile zeminin davranışı daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir (Brinkgreve ve Broere, 2006).

Soft Soil model (Yumuşak zemin modeli): Bu model normal konsolide kil ve organik zeminler gibi yumuşak zeminlerin davranışını yansıtır. Bu yaklaşım en iyi birincil gerilme durumlarında sonuç verir.

Soft Soil Creep model (Yumuşak zemin sünme modeli): Bu model ikinci derece viskoplastisite formülüne dayanır. Bu model normal konsolide kil ve organik zeminler

gibi yumuşak zeminlerin zamana bağlı davranışlarını yansıtır. Bu modelde ayrıca logaritmik sıkışmayı da içerir.

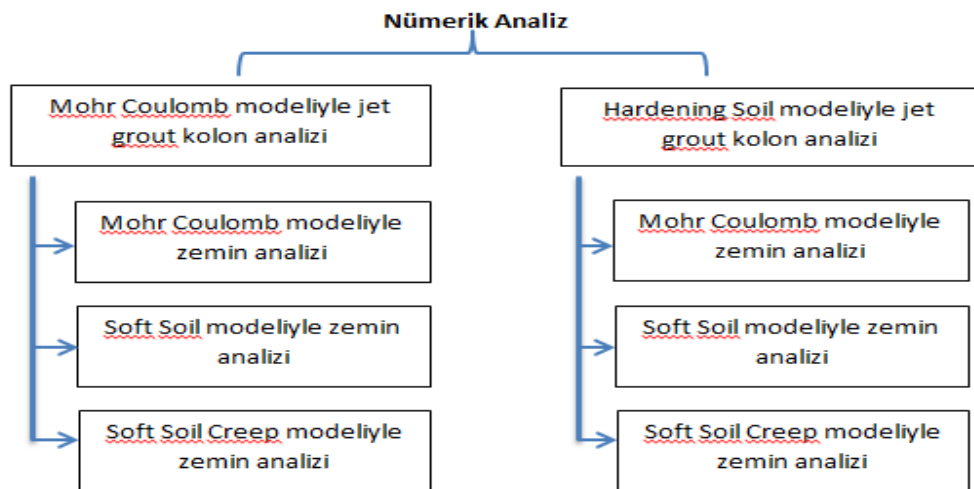
User-defined Soil model (Kullanıcı tarafından belirlenmiş zemin modeli): Bu yaklaşımda kullanıcı zemin davranışı formüllerini programa kendisi aktarır (Brinkgreve, 2002).

7.3.3 Geometrik model ve parametrelerinin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında kullanılacak model, ince daneli alüvyon zemine oturan yapıyı temsil edecek olup, düşey yük altında temel sistemin davranışı kısa periyotlu (drenajsız) analize göre iki (2D) boyutlu olarak ele alınmıştır.

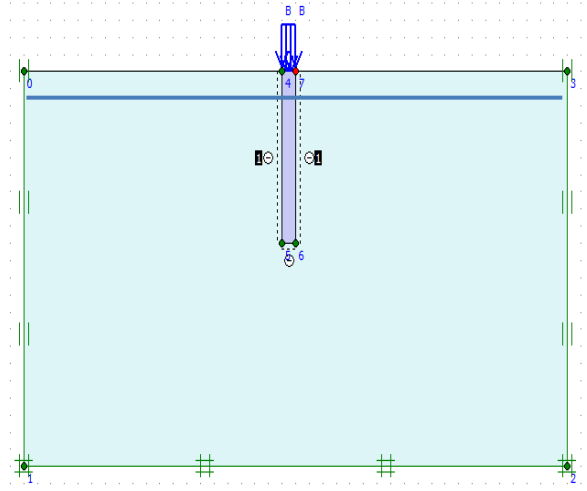
Geometrik model yeraltı su seviyesinin 1 m olduğu tek tabakalı zemin olarak belirlenmiştir. Tek tabaka için farklı drenajsız kayma mukavemeti değerlerine ($c_u=5$ kN/m², $c_u=10$ kN/m², $c_u=15$ kN/m², $c_u=24$ kN/m²) sahip çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminler seçilerek 4 farklı zemin modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zemin modellerinde 80 cm çapında, 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boylarında tekil jet grout kolonlar tasarlanmıştır (Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4).

Tez kapsamında yapılan modelleme işlemi, Şekil 7.17’de özetlenmiştir.



Şekil 7.17. Analizlerin algoritması

Analiz edilecek sistemin sınır şartlarından etkilenmemesi için sonlu eleman ağının oluşturulacağı geometrinin x ve y eksenlerinde yeterince büyük bir alanda yer alması gerekmektedir. Bu bağlamda x ve y eksenlerinde 50 m x 50 m boyutunda oluşturulacak bir geometride sınır şartları belirlenmiştir (Şekil 7.18).



Şekil 7.18. Sonlu elemanlar model geometrisi

Sistem tek tabakalı zemin olarak farklı drenajsız kayma mukavemeti ve jet kolon boylarında modellenmiştir. Modelleneyecek zemine ait parametreler Çizelge 7.11, Çizelge 7.12, Çizelge 7.13’de verilirken, jet grout kolon parametreleri Çizelge 7.14 ve Çizelge 7.15’de verilmiştir.

Çizelge 7.11. Mohr Coulomb modelin zemin parametre değerleri (Çinicioğlu, 2005)

Zemin Modeli	MC	MC	MC	MC	Birim
Zemin Davranış Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	
Kohezyon (c)	5	10	15	24	kN/m ²
Doğal birim hacim ağırlık (γ_n)	11	12	13	14	kN/m ³
Suya doymun birim hacim ağırlık (γ_d)	12	13	14	15	kN/m ³
Yatay geçirgenlik (k_x)	0	0	0	0	m/day
Düşey geçirgenlik (k_y)	0	0	0	0	m/day
Elastisite Modülü (E_{ref})	6	9	15	22	MPa
Poisson Oranı (μ)	0.2	0.22	0.25	0.27	-

Çizelge 7.12. Soft Soil zemin modelin zemin parametre değerleri (Waterman, 2004)

Zemin Modeli	SS	SS	SS	SS	Birim
Zemin Davranış Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	
Kohezyon (c)	5	10	15	24	kN/m ²
Doğal birim hacim ağırlık (γ_n)	11	12	13	14	kN/m ³
Suya doymuş birim hacim ağırlık (γ_d)	12	13	14	15	kN/m ³
Modifiye sıkışma modülü (λ^*)	0.057	0.06	0.07	0.075	-
Modifiye şişme modülü (K^*)	0.025	0.025	0.03	0.03	-

Çizelge 7.13. Soft Soil Creep zemin modelin zemin parametre değerleri
(Waterman, 2004)

Zemin Modeli	SSC	SSC	SSC	SSC	Birim
Zemin Davranış Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	
Kohezyon (c)	5	10	15	24	kN/m ²
Doğal birim hacim ağırlık (γ_n)	11	12	13	14	kN/m ³
Suya doymuş birim hacim ağırlık (γ_d)	12	13	14	15	kN/m ³
Yatay geçirgenlik (k_x)	2.12E-4	4.2E-4	3.85E-4	3.2E-4	m/day
Düşey geçirgenlik (k_y)	1.06E-4	1.6E-4	1.9E-4	1.8E-4	m/day
Modifiye sıkışma modülü (λ^*)	0.057	0.06	0.07	0.075	-
Modifiye şişme modülü (K^*)	0.025	0.025	0.03	0.03	-
Modifiye creep modülü (μ^*)	0.0005	0.0008	0.001	0.002	-

Çizelge 7.14. Jet grout kolonun Mohr Coulomb modeli parametre değerleri
(Çinicioğlu, 2005)

Malzeme	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ν	E_{ref} (MPa)	C_{ref} (kN/m ²)	(EA) (kN/m)	(EI) (kN/m ² /m)
Çok Yumuşak Alüvyon JG.	17.00	17.00	0.2	8193	2200	1.98E06	0.8E04
Çok Yumuşak Alüvyon JG.	18.00	18.00	0.2	9460	2400	2.15E06	1E04
Yumuşak Alüvyon JG.	19.00	19.00	0.2	10577	2600	2.3E06	1.1E04
Yumuşak Alüvyon JG.	20.00	20.00	0.2	12059	2800	2.5E06	1.2E04

Çizelge 7.15. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zemin modeli parametre değerleri
(Çinicioğlu, 2005)

Malzeme	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ν	c_{ref} (kN/m ²)	(E ₅₀) (kN/m ²)	(E _{ur}) (kN/m ²)
Çok Yumuşak Alüvyon JG.	17.00	17.00	0.2	2200	1.98E06	5.7E04
Çok Yumuşak Alüvyon JG.	18.00	18.00	0.2	2400	2.15E06	6.45E04
Yumuşak Alüvyon JG.	19.00	19.00	0.2	2600	2.3E06	6.6E04
Yumuşak Alüvyon JG.	20.00	20.00	0.2	2800	2.5E06	7.5E04

Mohr-Coulomb (MC) zemin hesap modeli zemin davranışının anlaşılmasında birinci derece bir yaklaşımda bulunmaktadır. Elastisite modülü (E), poisson oranı (μ), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c) parametreleri modele tanımlanarak hesap modeli kurulmaktadır.

Pekleşen zemin (HS) modeli ise zemin davranışına ikinci dereceden bir yaklaşımda bulunan bir hesap modelidir. Bu modelde, zeminde derinlikle beraber oluşan gerilme artışına bağlı olarak zeminin rijitlik parametreleri de değişim göstermektedir. Mohr-Coulomb hesap modelinde kullanılan başlangıç parametrelerine ek olarak yükleme ve boşaltma anı için ayrı elastisite modülleri tanımlanabilmektedir. Programın yükleme anında kullandığı elastisite modülü (E₅₀) ve boşaltma anında kullandığı gevşeme modülü (E_{ur}) arasında Eşitlik (7.3)'deki bağıntı mevcuttur (Brinkgreve and Broere, 2006).

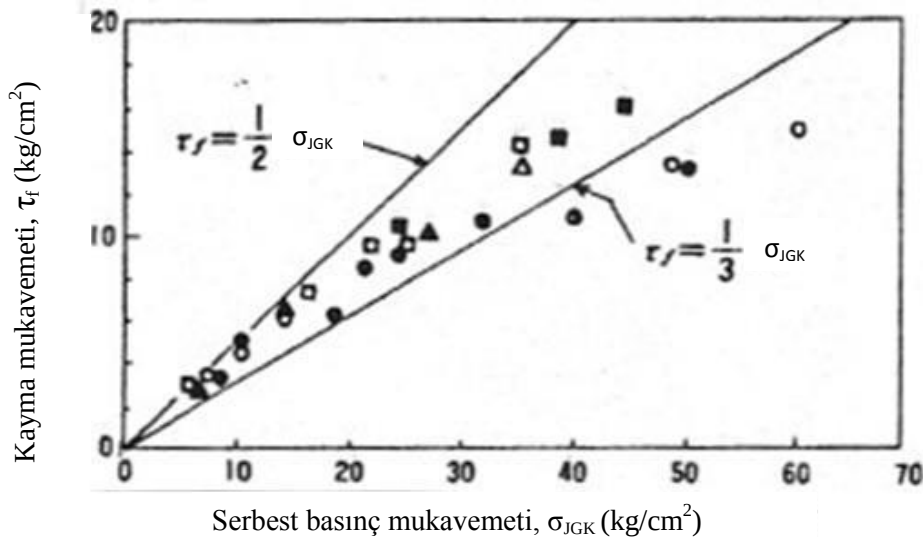
$$E_{ur} = (2 \sim 4) * E_{50} \quad (7.3)$$

PLAXIS programına atanan zemine ait yükleme anında kullanılan elastisite modülü (E₅₀) ifadesi ile idealize zemin profili çıkarılırken tespit edilen zemin elastisite modülü (E_s) değerine eşit olduğu kabul edilmiştir. Eşitlik (7.3)'deki bağıntıdan faydalanılarak gevşeme modülü değeri (E_{ur}), yükleme anında kullanılan elastisite modülü (E₅₀) değerinin 3 katı olarak seçilmiştir.

Soft Soil Creep (SSC) modeli birincil yükleme ve boşaltma / yeniden yükleme arasında ayırım yapar. Bu bakımdan Pekleşen Zemin (HS) modele benzer. Pekleşen Zemin (HS) ve Soft soil (SS) modellerinde zaman bağımlılığı yoktur. Yükteki bir artışa sebep olursa, kapak anında genişler. Gerilme durumu mevcut kapağın dışına düşer. Soft Soil Creep (SSC) modelinde bu değişim için kapağın zamana ihtiyacı vardır. Daha yüksek bir yük uygulanırsa, kapak hemen takip edilmeyecektir. SSC modeli, zamandan bağımsız bir model olarak kullanırken deplasmanlar olacağından daha fazladır. Sürtünme davranışını doğru bir şekilde modellemek için, iki ana parametre gereklidir. Bunlar, başlangıç durumunda ($t = 0$) kapağın yeri ve genişleme hızıdır.

Bu parametreler doğrudan kullanıcı tarafından girilemez, ancak bunlar μ^* (modifiye kayma indeksi) ve OCR parametreleri tarafından belirtilmelidir. Değişen sürtünme hızı, λ^* , κ^* ve μ^* parametrelerinin kombinasyonu ile tanımlanır. Modifiye sürtünme indeksi 1 gün sonra sürtünme oranını belirtir.

Yükleme deneyinde kullanılan jet grout kolonunun, yüksek mühendislik parametrelerine sahip bir zemin gibi modellenmesi ele alınmıştır. Çimento ile oluşturulan çapın yüksek kohezyon değerine sahip bir kütle gibi davranacağı öngörülmüştür (Doğanışık, 2010). Jet grout kolonun kayma mukavemeti ile kolon serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 7.19’da verilmiştir.



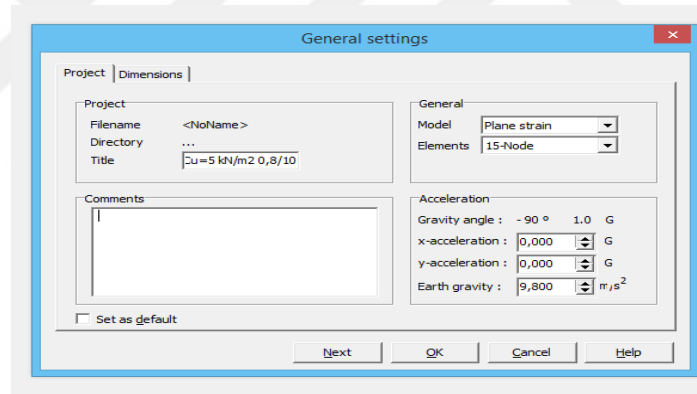
Şekil 7.19. Jet grout kolonun kayma mukavemeti ile serbest basınç mukavemeti ilişkisi
(Karahana, 2016)

Grafikten de anlaşılacağı gibi kolon serbest basınç mukavemetinin (σ_{JGK}) %30 ile %50'si mertebesinde bir değer jet grout kolonunun kayma mukavemeti (τ_f) değerine eşittir. Dolayısıyla kayma mukavemeti ifadesi yalnızca kohezyon cinsinden ifade edilecek olursa, kohezyon parametresinin kayma mukavemeti değerine eşit olduğu sonucu çıkmaktadır.

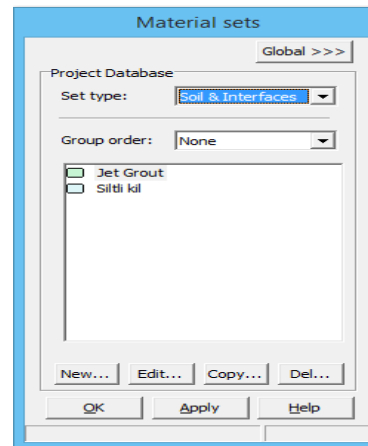
7.4 Jet Grout Kolonun Modellenmesi ve Analizi

Çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminlerde, 80 cm çapında, L=10 m, L=15 m, L=20 m, L=30 m boylarındaki tekil jet grout kolonları zemin olarak modellenmiştir. Zemin olarak tanımlanan jet grout kolona gelen yükler yayılı yük olarak etki ettirilmiştir.

Modelleme yapılmadan önce genel ayarlardan proje adı ve boyut ölçüleri belirlenmiştir (Şekil 7.20).



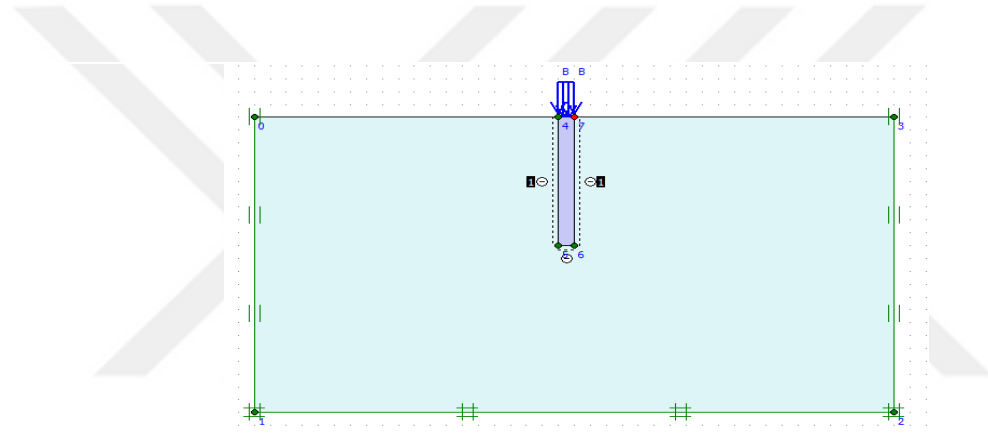
Şekil 7.20. Genel ayarların belirlenmesi



Şekil 7.21. Zemin parametrelerinin girilmesi

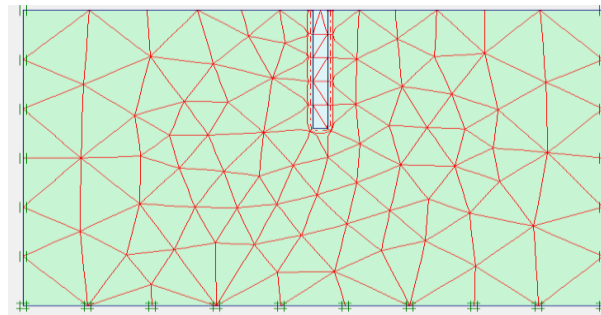
Parametrelerin girilmesiyle oluşturulan zemin ve jet grout malzemeleri çizimde temsil ettikleri yerlere atanmıştır.

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 (Küsin, 2009). Modelde ara yüzey elemanı tanımlanıp değeri 1 olarak alınmıştır (Şekil 7.22).



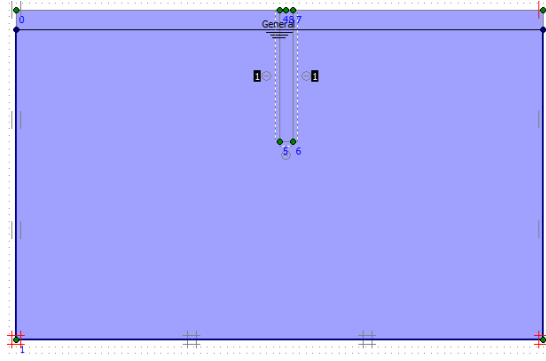
Şekil 7.22. Jet grout kolonun zemin olarak tanımlandığı model

Zemin ve jet grout kolonun değerleri atandıktan sonra iki boyutlu ağ sistemi oluşturulmuştur. Model kurulurken oluşturulan bu ağ sistemi sayesinde tanımlanan her bölge kendi içinde ayrı hesaplanmaktadır. Böylece hesap sürecinde oluşabilecek hatalar minimuma indirgenmiş olacaktır (Şekil 7.23).



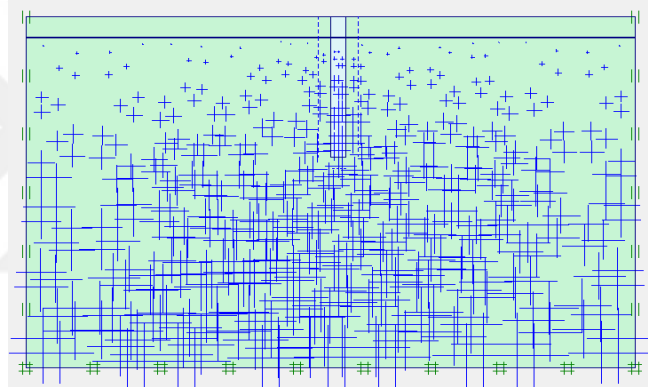
Şekil 7.23. Zemin olarak tanımlanan kolonların ağ sistemleri

Zemin yer altı su seviyesi sabit ve 1 m alınmış olup, Şekil 7.24’de gösterilmiştir.



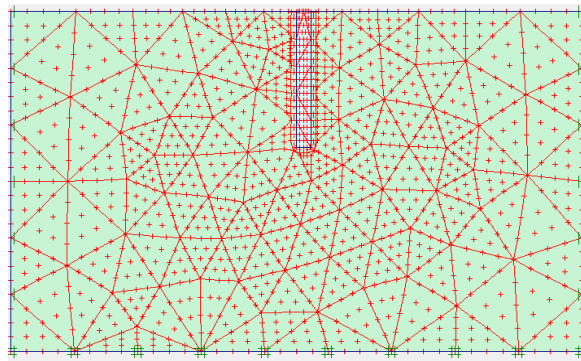
Şekil 7.24. Zemin olarak tanımlanan kolonların yeraltı su seviyesi

Yeraltı su seviyesi çizildikten sonra boşluk suyu basıncı hesaplanmıştır (Şekil 7.25).



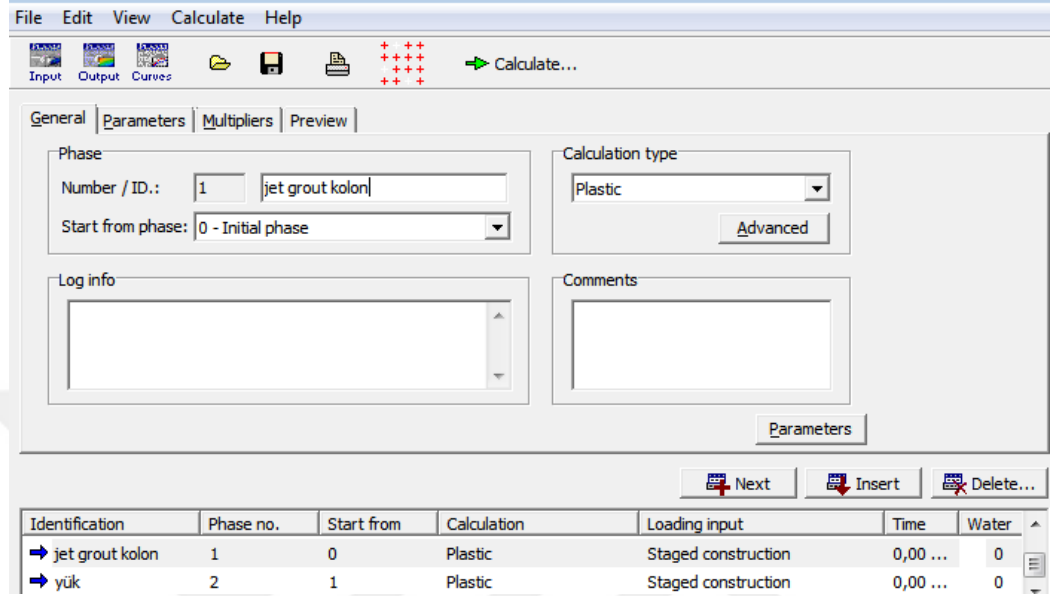
Şekil 7.25. Zemin olarak tanımlanan kolonların boşluk suyu basıncı

Boşluk suyu basıncı hesaplandıktan sonra, zemin modellerinin efektif gerilmeleri hesaplanmıştır (Şekil 7.26).

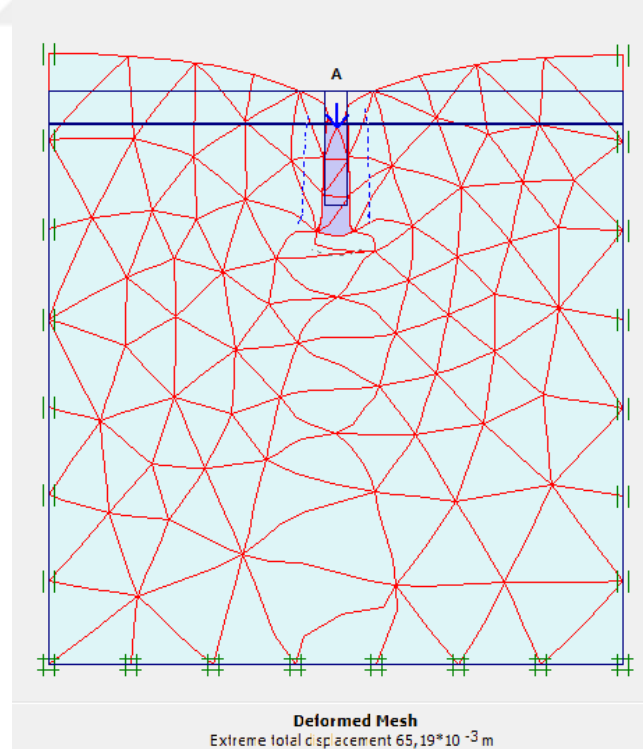


Şekil 7.26. Zemin olarak tanımlanan kolonların efektif gerilmesi

Modellerin analizi için hesap aşamaları oluşturulmuştur (Şekil 7.27). Hesap aşamasında Plaxis programının “Staged Construction” özelliği kullanılmış, jet grout kolonun imalatı ve yüklerin etkinleştirilmesi gerçeğe uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.28).



Şekil 7.27. Hesap aşamaları



Şekil 7.28. Jet grout kolon modelinin oturma değerleri

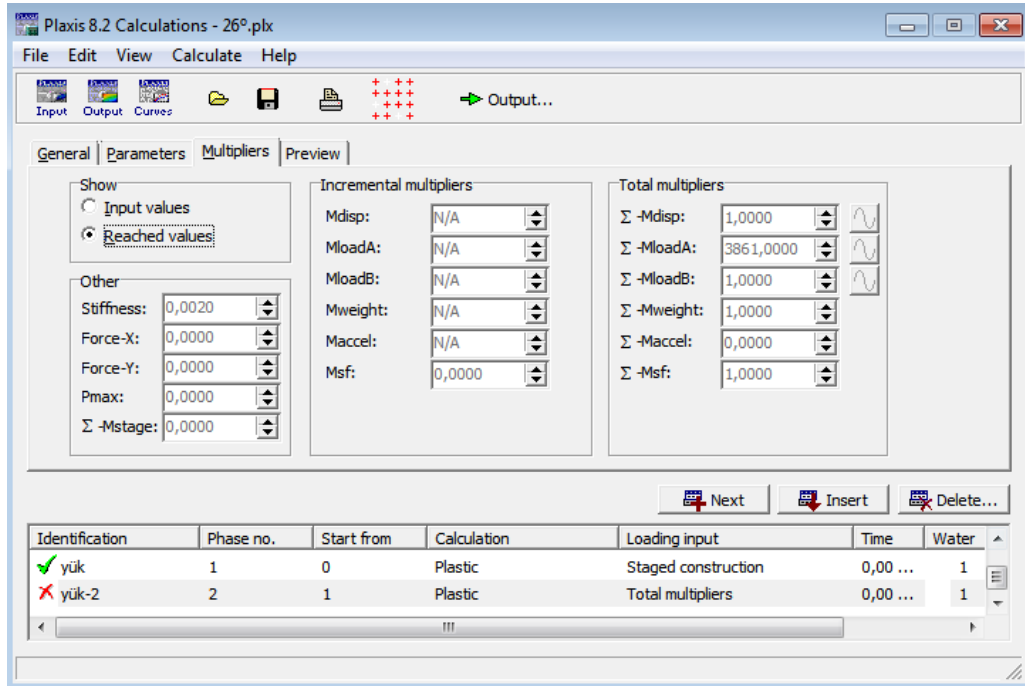
7.5 Analiz Sonuçları

Çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminlerde, 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boyunda zemin olarak tanımlanan jet grout kolonun, Mohr Coulomb ve Pekleşen Zemin modelleriyle taşıma gücü ve oturma analizleri yapılmıştır.

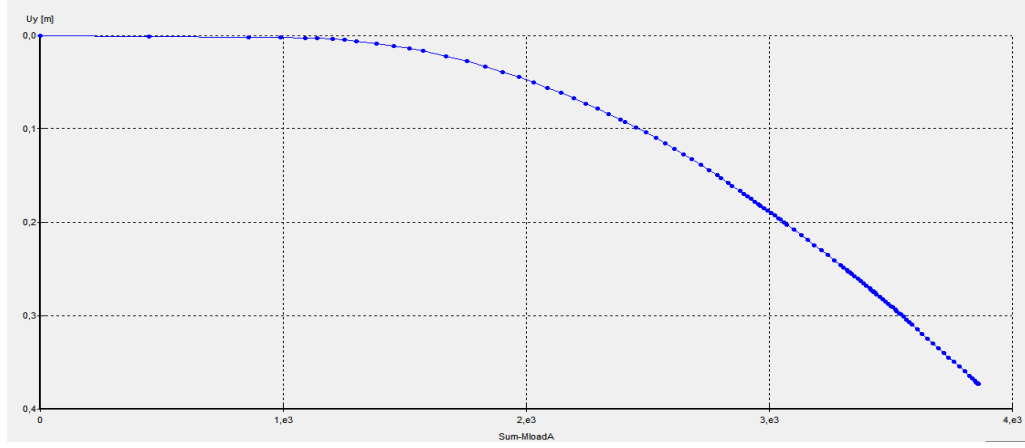
Taşıma gücü değerleri

Çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde, 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boyunda zemin olarak tanımlanan jet grout kolonun; Mohr Coulomb ve pekleşen zemin modelleriyle analizleri yapılarak PLAXIS'te taşıma gücü kapasiteleri belirlenmiştir.

PLAXIS'te taşıma gücü değerleri bulunurken jet grout kolon, göçebileceği bir yük ile yüklenmiştir. Bu yük ile analiz yapıldıktan sonra PLAXIS programındaki ulaşılan değer (reached values) seçeneğinden bakılarak, jet grout kolonun ne kadar yük altında göçtüğü bulunmuştur ve programdaki eğri (curves) seçeneğinden yük-deplasman eğrisi çizdirilmiştir (Karahan, 2016) (Şekil 7.29, Şekil 7.30).



Şekil 7.29. Jet grout kolonun göçtüğü yükün bulunması



Şekil 7.30. Jet grout kolonun yük-deplasman eğrisi

PLAXIS'ten elde edilen taşıma gücü değerleri, güvenlik katsayısı G_s değerine ($G_s=3$) bölünerek emniyetli taşıma gücü (Q_{em}) belirlenmiştir.

Modelde jet grout kolonun Mohr Coulomb (MC) ve Pekleşen Zemin (HS) modellerinden elde edilen taşıma gücü değerleri; her bir model için hesap edilmiş olup Çizelge 7.16, Çizelge 7.17 ve Çizelge 7.18, Çizelge 7.19, Çizelge 7.20 ve Çizelge 7.21'de verilmiştir.

Çizelge 7.16. Modelde hem zemin hem jet grout kolonun Mohr Coulomb olarak tanımlanan jet grout kolonun taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	83.9	120.2	156.9	230.3
0.8/15	170.8	244.6	319.4	468.6
0.8/20	259.2	371.1	487.3	719.1
0.8/30	426.7	611.1	797.2	1176.1

Çizelge 7.17. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil modelindeki taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	103.7	149.0	195.3	286.2
0.8/15	212.3	305.1	394.3	577.8
0.8/20	323.0	461.8	602.3	886.8
0.8/30	521.6	752.8	976.9	1337.7

Çizelge 7.18. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	128.4	184.1	240.9	352.8
0.8/15	261.7	375.4	485.5	711.2
0.8/20	397.1	567.4	739.2	1086.6
0.8/30	640.1	921.6	1196.1	1657.3

Çizelge 7.19. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	50.4	71.5	92.2	134.2
0.8/15	99.8	140.6	185.6	265.4
0.8/20	115.2	212.9	272.4	398.6
0.8/30	240.1	338.6	431.2	642.3

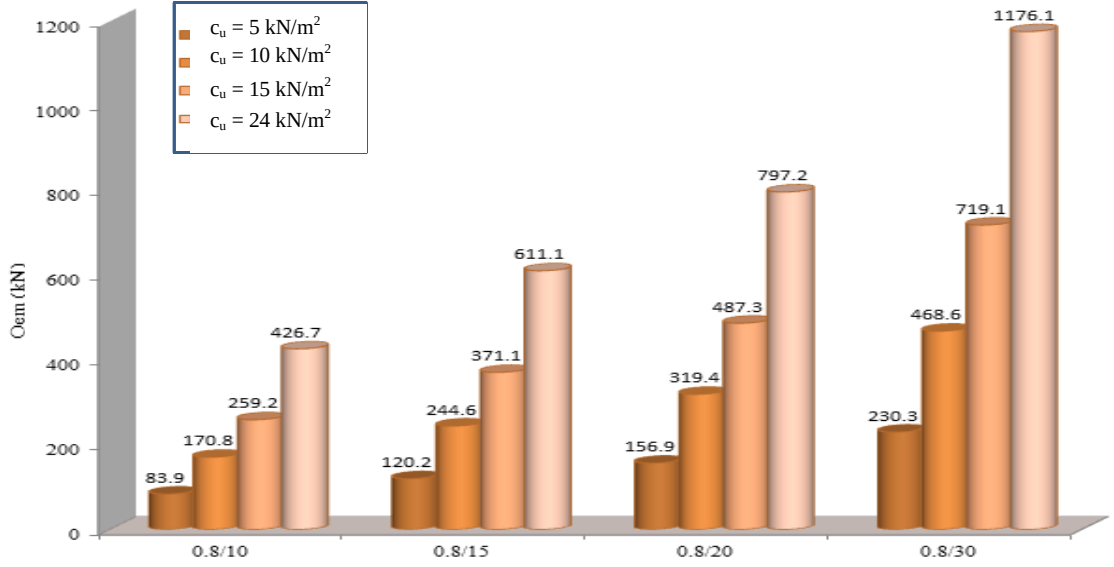
Çizelge 7.20. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil modelindeki taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	53.8	76.6	99.4	145.2
0.8/15	107.6	153.2	198.9	290.2
0.8/20	161.5	229.8	298.4	435.4
0.8/30	258.4	367.9	477.5	696.7

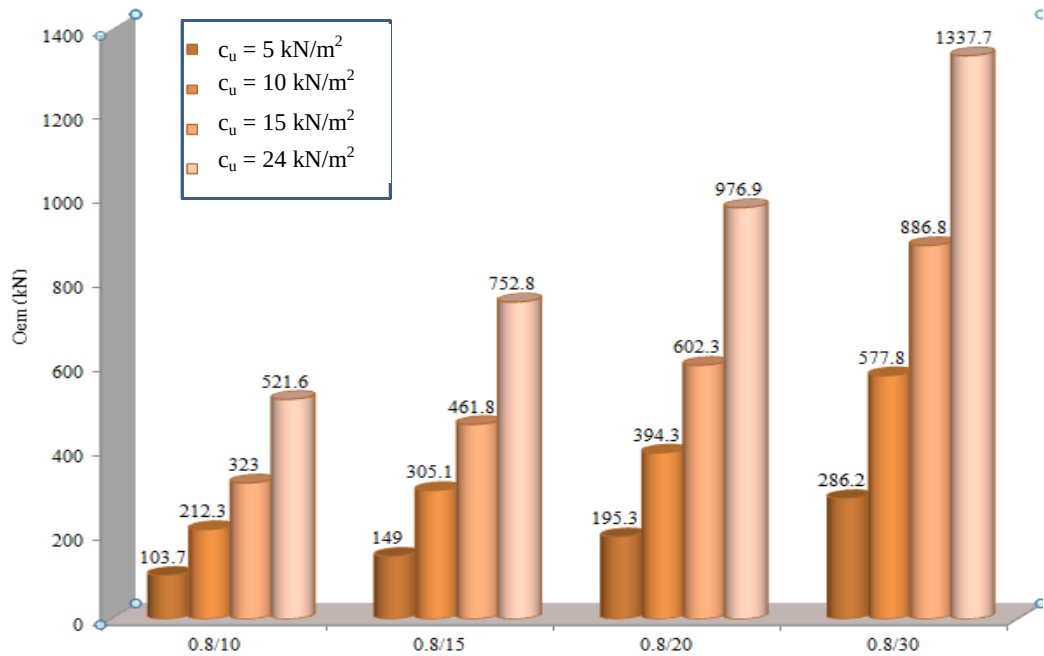
Çizelge 7.21. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki taşıma gücü değerleri

D/L (m/m)	Q_{em} (kN)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	58.2	82.9	107.6	157.1
0.8/15	116.5	165.9	215.4	314.2
0.8/20	174.4	248.8	323.1	471.4
0.8/30	279.7	398.3	516.9	754.2

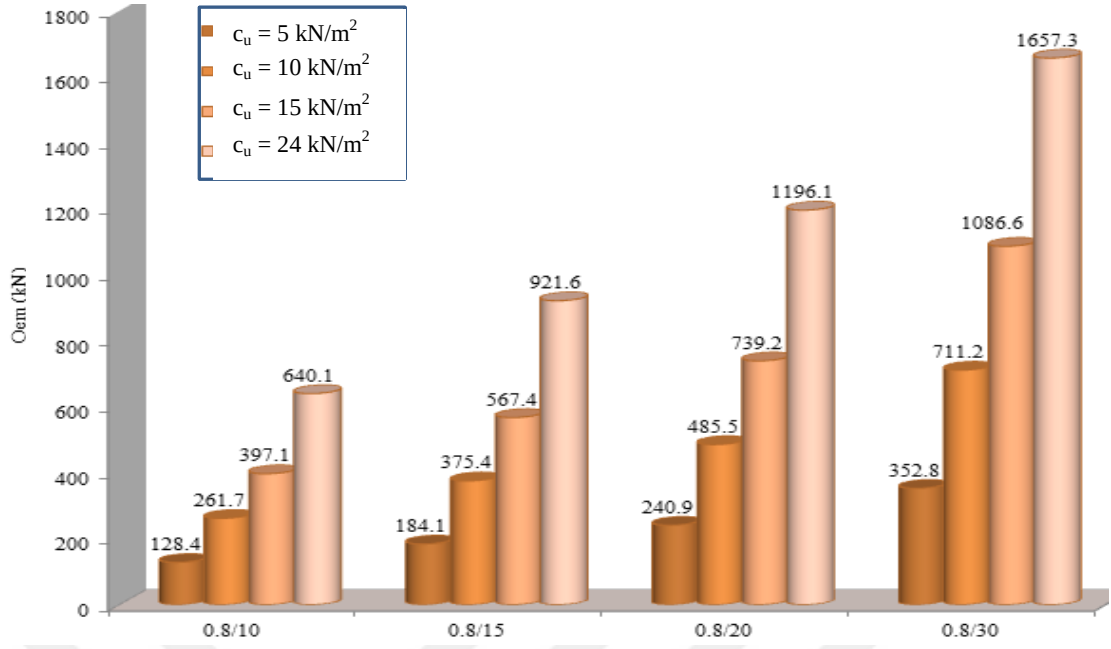
Modelde jet grout kolonun Mohr Coulomb (MC) ve Pekleşen Zemin (HS) modellerinden elde edilen emniyetli taşıma gücü değerleri ile zeminin drenajsız kayma mukavemetinin jet grout kolonun boyu ile değişimi belirlenmiştir (Şekil 7.31, Şekil 7.32, Şekil 7.33, Şekil 7.34, Şekil 7.35, Şekil 7.36).



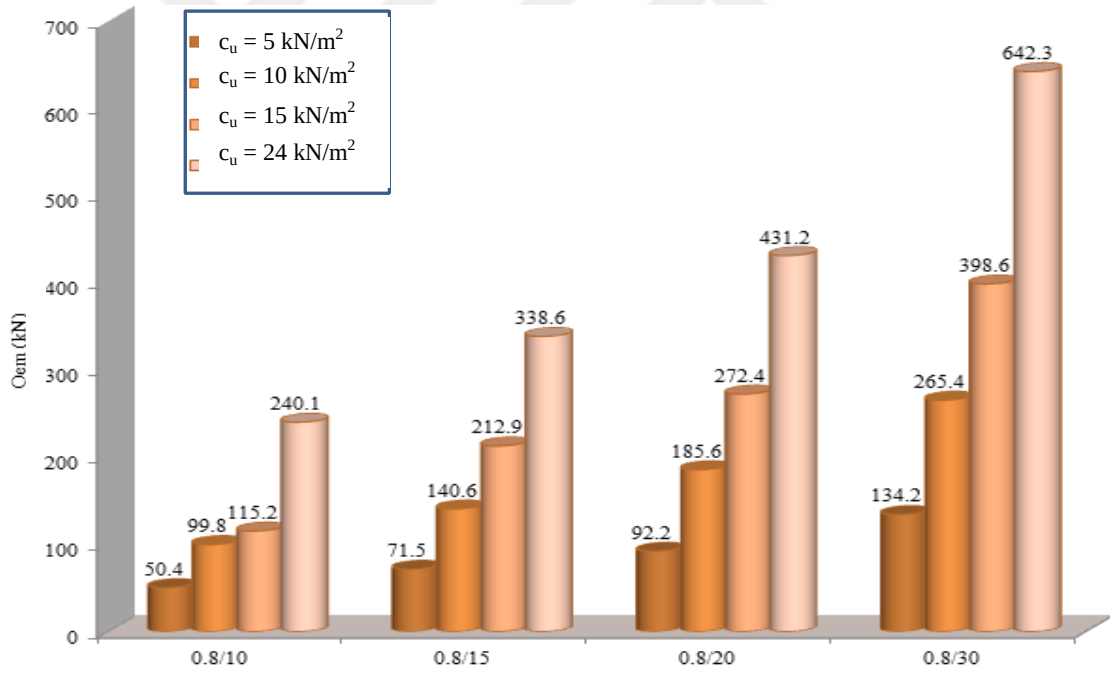
Şekil 7.31. Modelde hem zemin hem jet grout kolonun MC olarak tanımlanan jet grout kolonun taşıma gücü değerleri



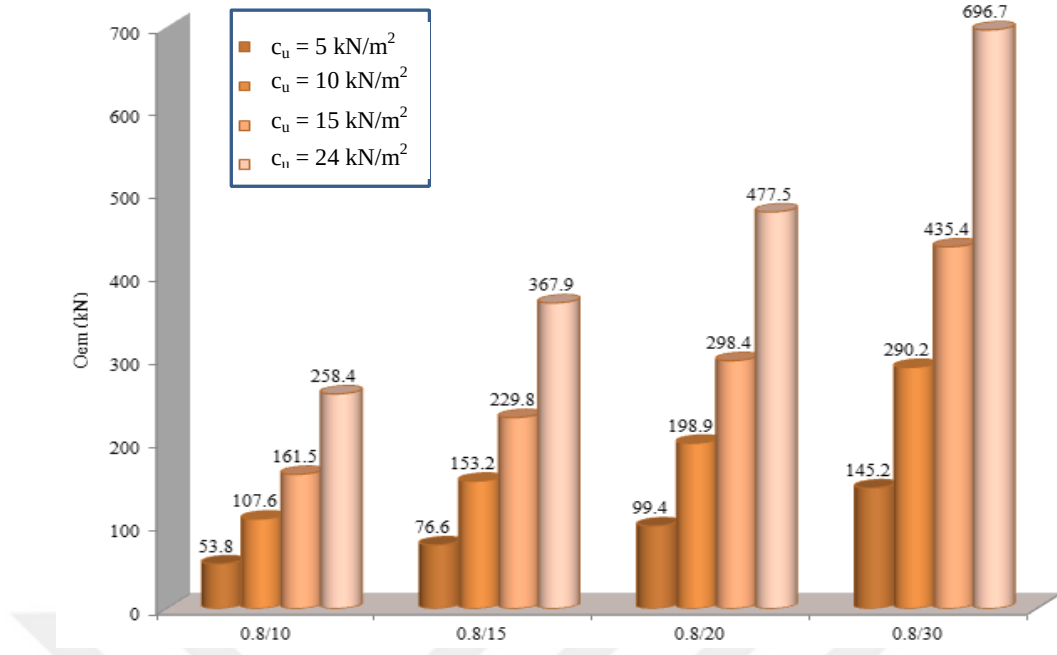
Şekil 7.32. Jet grout kolonun MC zeminin ise SS modelindeki taşıma gücü değerleri



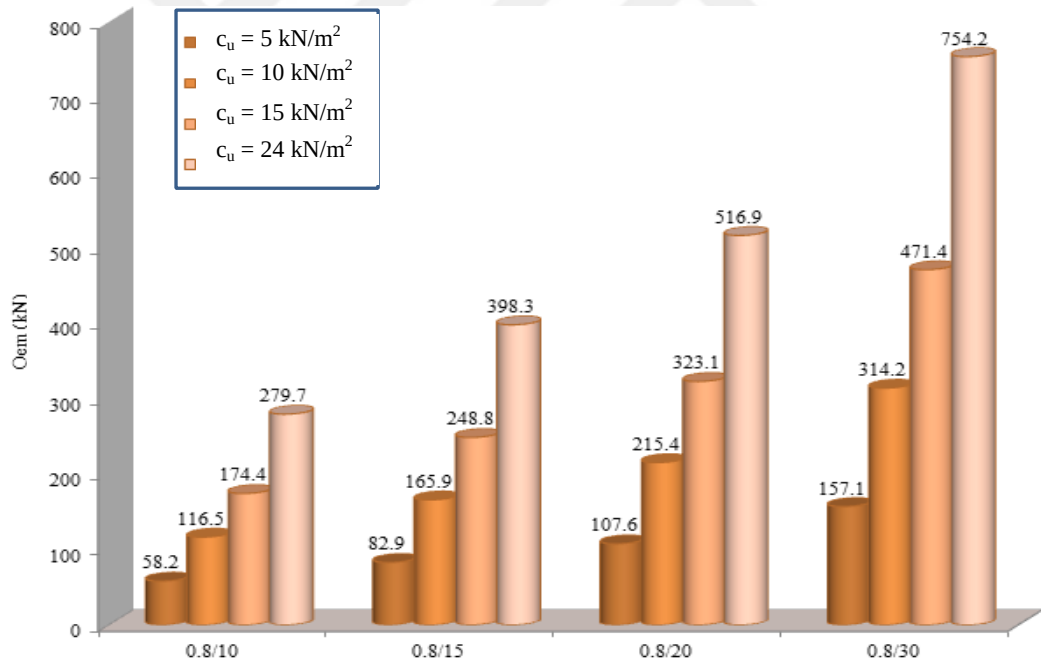
Şekil 7.33. Jet grout kolonun MC zeminin ise SSC modelindeki taşıma gücü değerleri



Şekil 7.34. Jet grout kolonun HS zeminin ise MC modelindeki taşıma gücü değerleri



Şekil 7.35. Jet grout kolonun HS zeminin ise SS modelindeki taşıma gücü değerleri



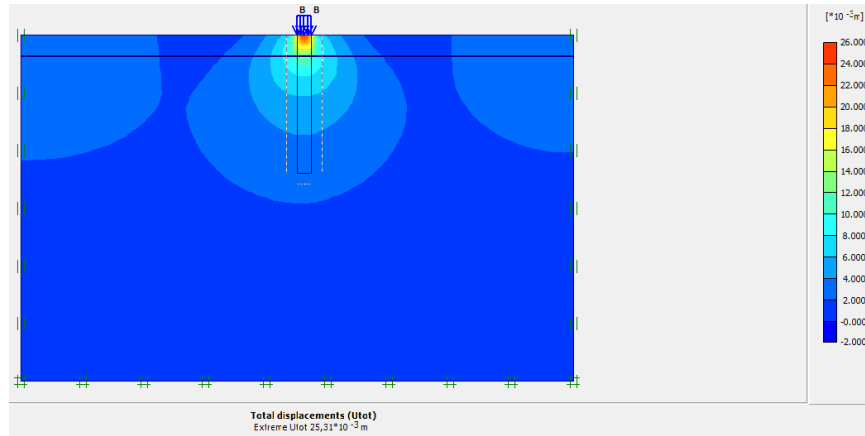
Şekil 7.36. Jet grout kolonun HS zeminin ise SSC modelindeki taşıma gücü değerleri

En büyük taşıma gücü değerinin Soft Soil Creep modelindeki 754.2 kN değeri ile D/L oranı 0.8/30 olan kolon olup, en küçük taşıma gücü değeri ise Mohr Coulomb modelindeki 49.4 kN değeri ile D/L oranı 0.8/10 olan kolondur. Jet grout kolonun nümerik hesap yöntemleri ile yapılan model analizleri sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri, kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti değeri ve jet grout

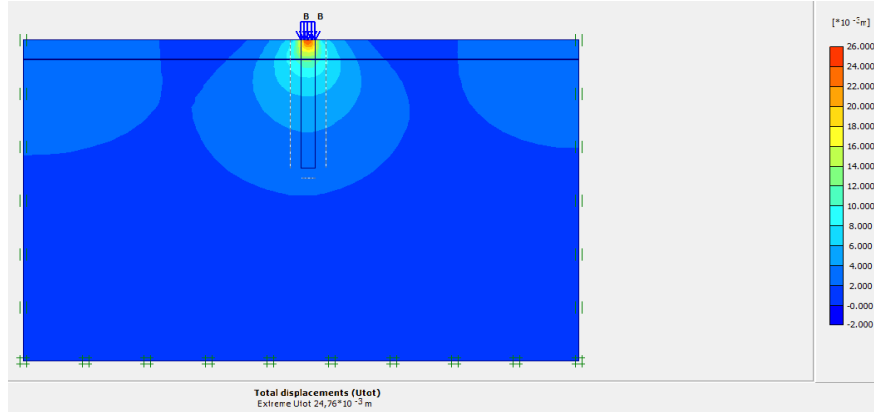
kolonların boyu arttıkça artmaktadır. Ayrıca, jet grout kolonun Pekleşen Zemin modelinden elde edilen taşıma gücü değerleri Mohr Coulomb modelinden elde edilen taşıma gücü değerlerinden daha küçüktür. Taşıma gücünün en düşük bulunan değeri, jet grout kolonun Pekleşen Zemin (HS) ve zeminin ise Mohr Coulomb (MC) modeliyle elde edilmiştir. Taşıma gücünün en yüksek değeri ise jet kolonun Mohr Coulomb ve zeminin ise Soft Soil Creep (SSC) modeliyle modellenmesinden elde edilmiştir.

Oturma değerleri

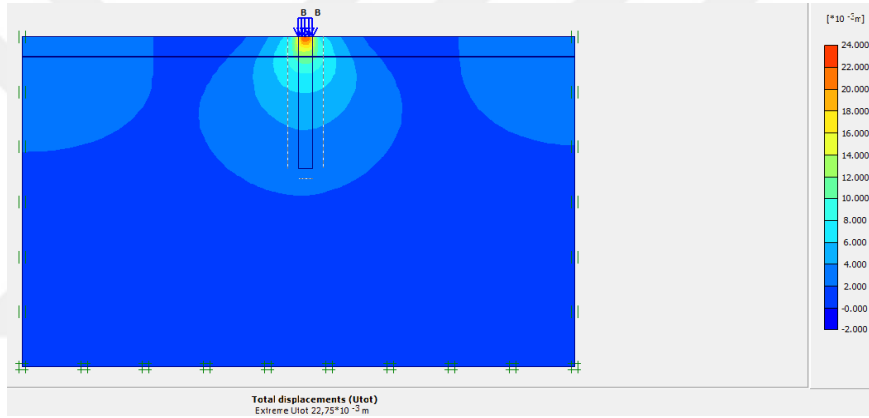
Çok yumuşak ve yumuşak alüvyon zeminlerde, 80 cm çapında 10 m, 15 m, 20 m ve 30 m boyunda zemin olarak tanımlanan jet grout kolonun, Mohr Coulomb ve Pekleşen Zemin modelleriyle analizleri yapılmıştır. x, y eksenlerinde (50 m x 50 m) boyutundaki modelden elde edilen maksimum oturma değerleri c_u 'ya ve D/L oranına bağlı olarak Çizelge 7.22, Çizelge 7.23, Çizelge 7.24, Çizelge 7.25, Çizelge 7.26, Çizelge 7.27'de verilmiştir. Ayrıca jet grout kolonun Pekleşen Zemin, zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesitleri Şekil 7.37, Şekil 7.38, Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'da verilmiştir.



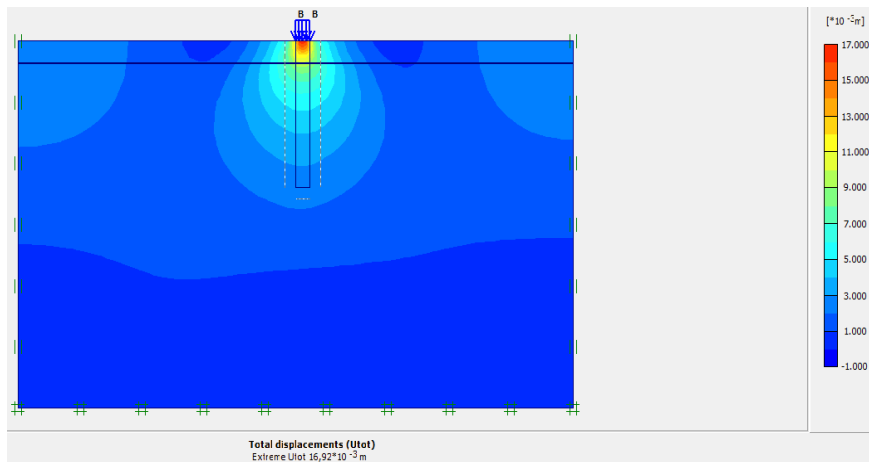
Şekil 7.37. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti



Şekil 7.38. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti



Şekil 7.39. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti



Şekil 7.40. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki toplam deplasman kesiti

Çizelge 7.22. Jet grout kolonun ve zeminin Mohr Coulomb modelindeki maksimum oturma değerleri

	Oturma (mm)			
D/L (m/m)	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	10.4	8.6	7.2	6.4
0.8/15	11.7	9.8	8.9	8.2
0.8/20	13.4	11.7	10.8	10.0
0.8/30	14.8	13.4	12.7	12.1

Çizelge 7.23. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil modelindeki maksimum oturma değerleri

	Oturma (mm)			
D/L (m/m)	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	19.0	14.2	12.4	11.0
0.8/15	20.4	16.9	18.6	14.2
0.8/20	23.5	20.3	19.1	17.4
0.8/30	25.8	23.3	22.2	21.0

Çizelge 7.24. Jet grout kolonun Mohr Coulomb zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki maksimum oturma değerleri

	Oturma (mm)			
D/L (m/m)	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	11.0	9.1	7.6	6.7
0.8/15	12.4	10.3	9.4	8.6
0.8/20	14.2	12.6	11.5	10.7
0.8/30	15.6	15.5	13.4	13.8

Çizelge 7.25. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb modelindeki maksimum oturma değerleri

	Oturma (mm)			
D/L (m/m)	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	29.8	22.9	20.4	18.2
0.8/15	33.5	27.7	25.5	23.4
0.8/20	38.4	33.5	31.2	28.7
0.8/30	42.4	38.3	36.3	34.6

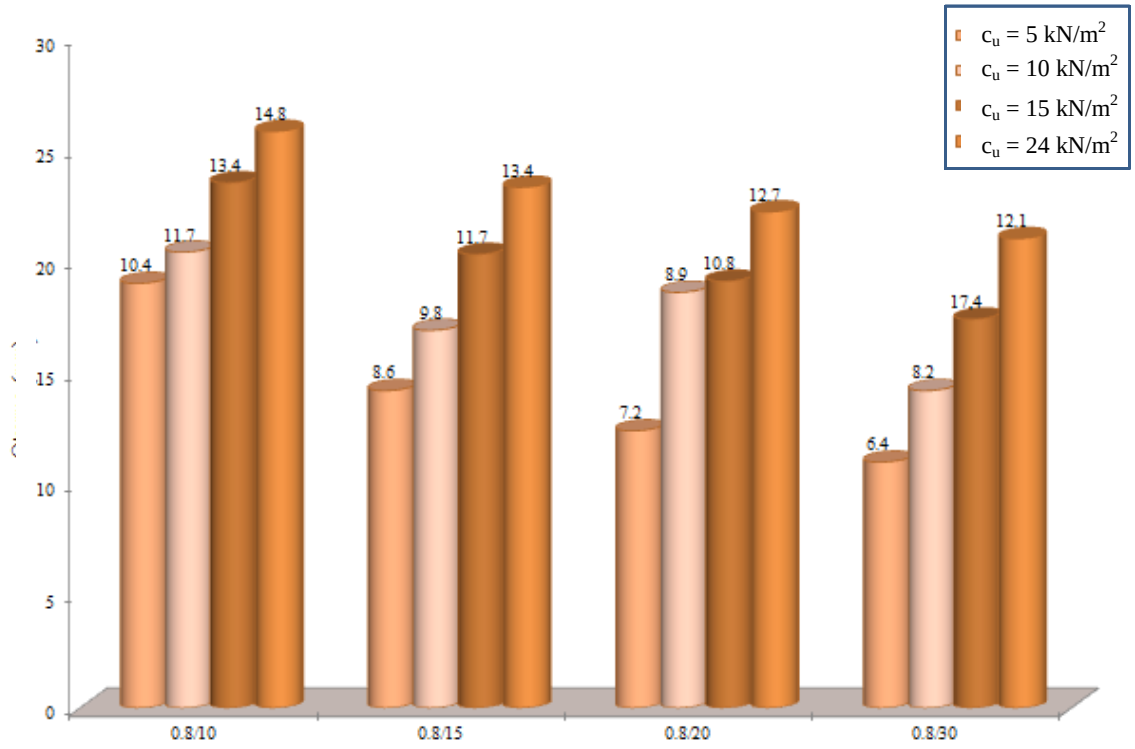
Çizelge 7.26. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil modelindeki maksimum oturma değerleri

D/L (m/m)	Oturma (mm)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	54.2	41.9	37.3	33.1
0.8/15	61.2	50.5	46.8	42.9
0.8/20	70.0	61.1	56.9	52.3
0.8/30	77.26	68.8	66.4	63.2

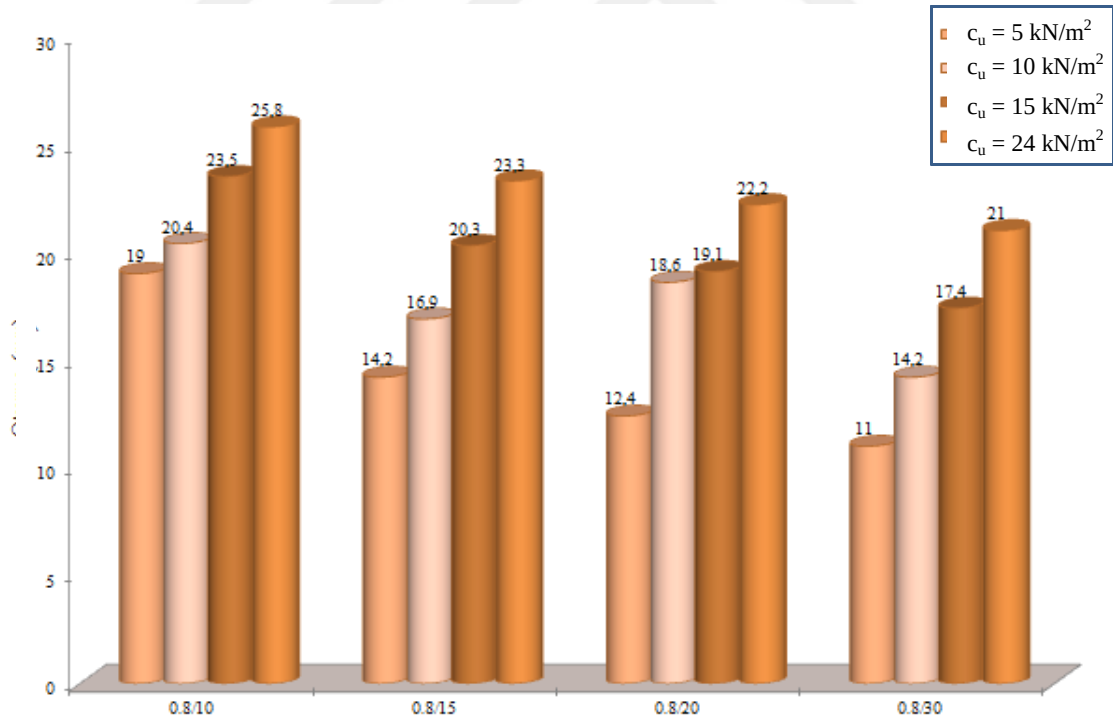
Çizelge 7.27. Jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Soft Soil Creep modelindeki maksimum oturma değerleri

D/L (m/m)	Oturma (mm)			
	$c_u = 5 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 10 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$	$c_u = 24 \text{ kN/m}^2$
0.8/10	46.2	34.0	30.3	26.9
0.8/15	49.7	41.1	38.0	34.8
0.8/20	56.9	49.6	46.2	42.5
0.8/30	62.8	56.7	53.9	51.3

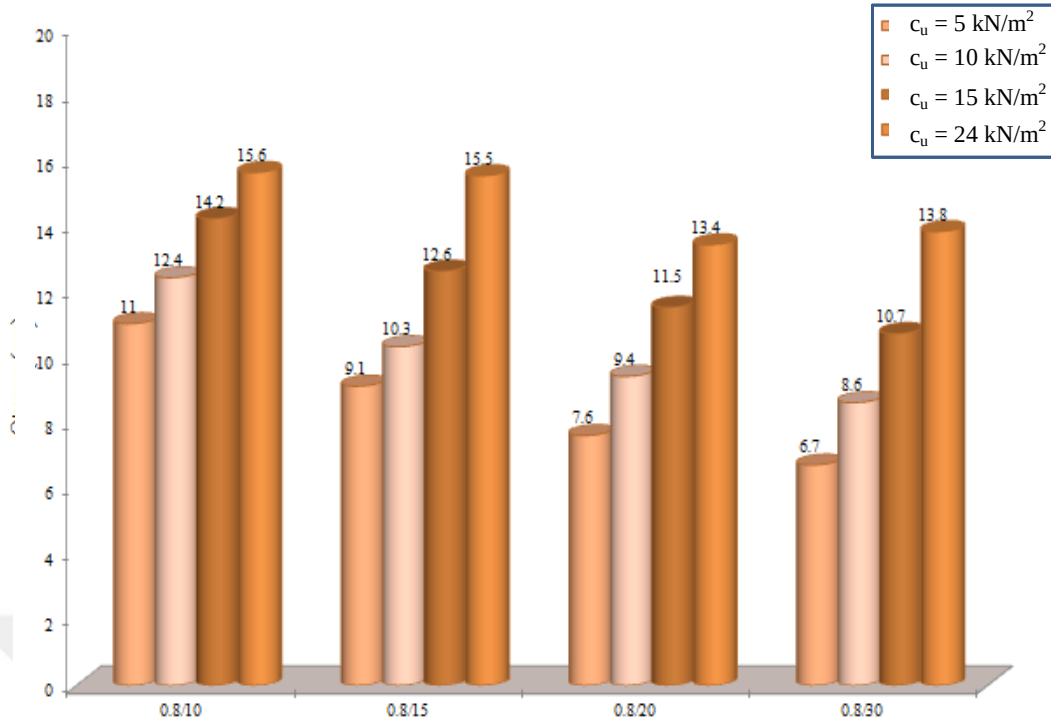
Farklı D/L oranı ve c_u ya bağlı olarak oturmanın değişimi Şekil 7.41, Şekil 7.42, Şekil 7.43, Şekil 7.44, Şekil 7.45. ve Şekil 7.46'da verilmiştir. Jet grout kolonun ve zeminin Mohr Coulomb olarak modellenen analizleri düşük oturma değeri verirken Pekleşen zemin modeliyle yapılan analizler daha büyük değerler vermektedir. Bunun sebebi pekleşen zemin modelinde jet grout kolonun rijitlik parametrelerinin zemindeki gerilme artışına bağlı değişiminin esas alınması ve Mohr Coulomb modelinden farklı olarak yükleme (E_{50}) ve boşaltma (E_{ur}) anı için ayrı elastisite modüllerinin tanımlanabilmesi olduğu düşünülmektedir.



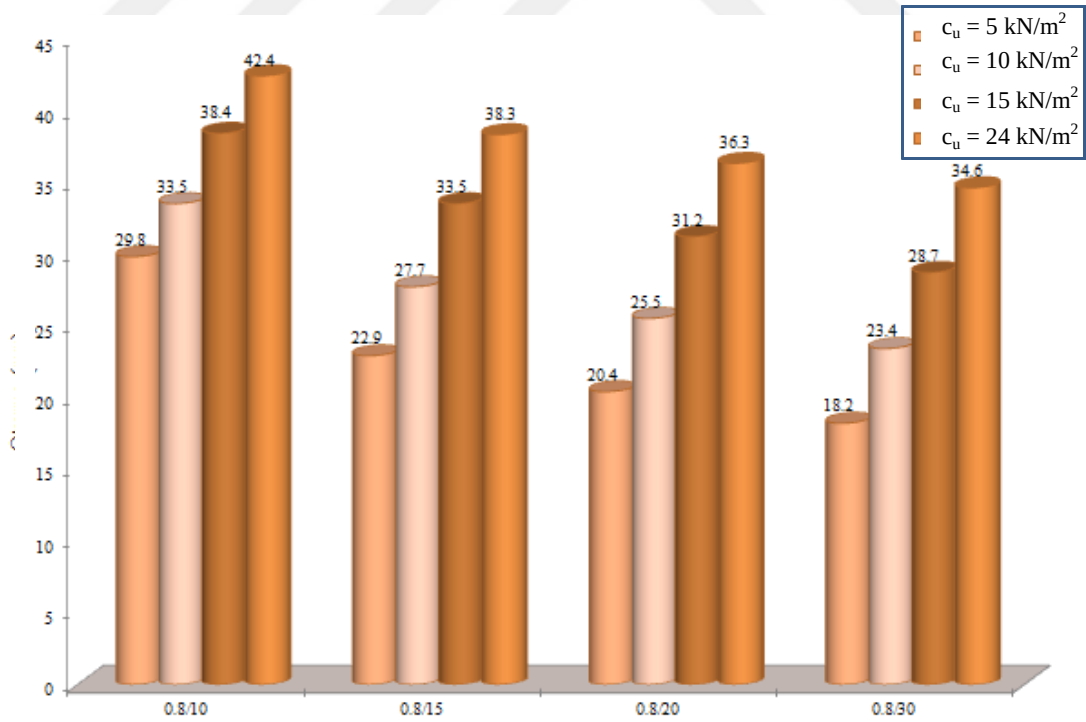
Şekil 7.41. Jet grout kolonun ve zeminin MC modelindeki maksimum oturma değerleri



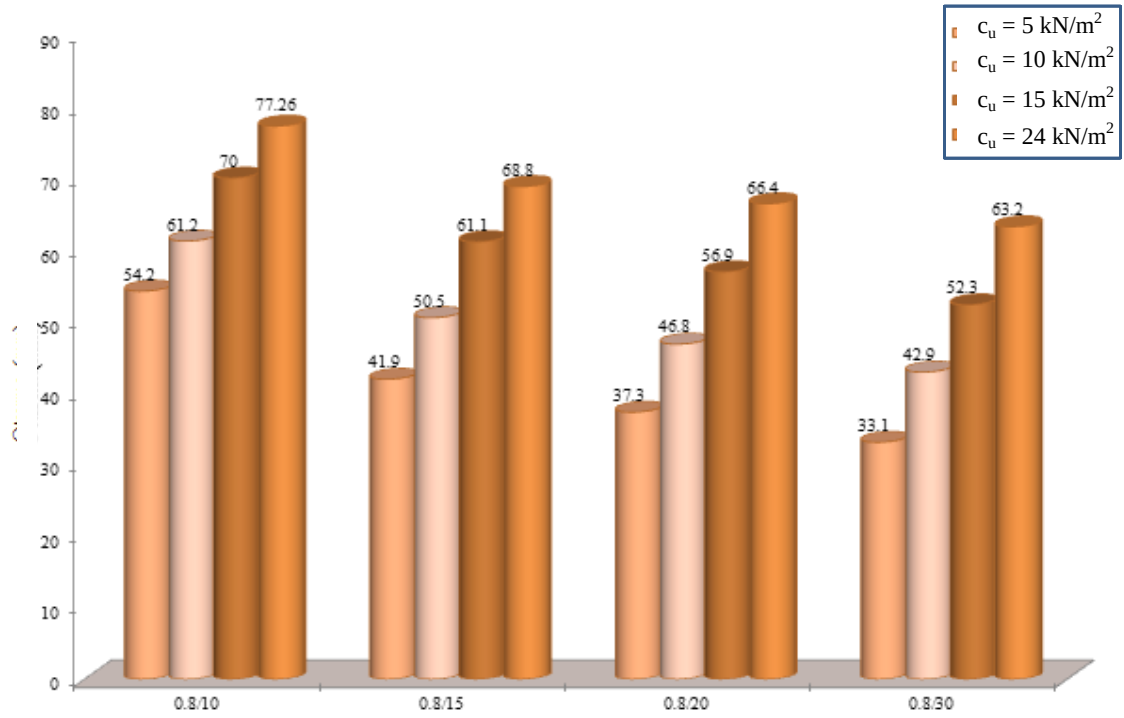
Şekil 7.42. Jet grout kolonun MC zeminin ise SS modelindeki maksimum oturma değerleri



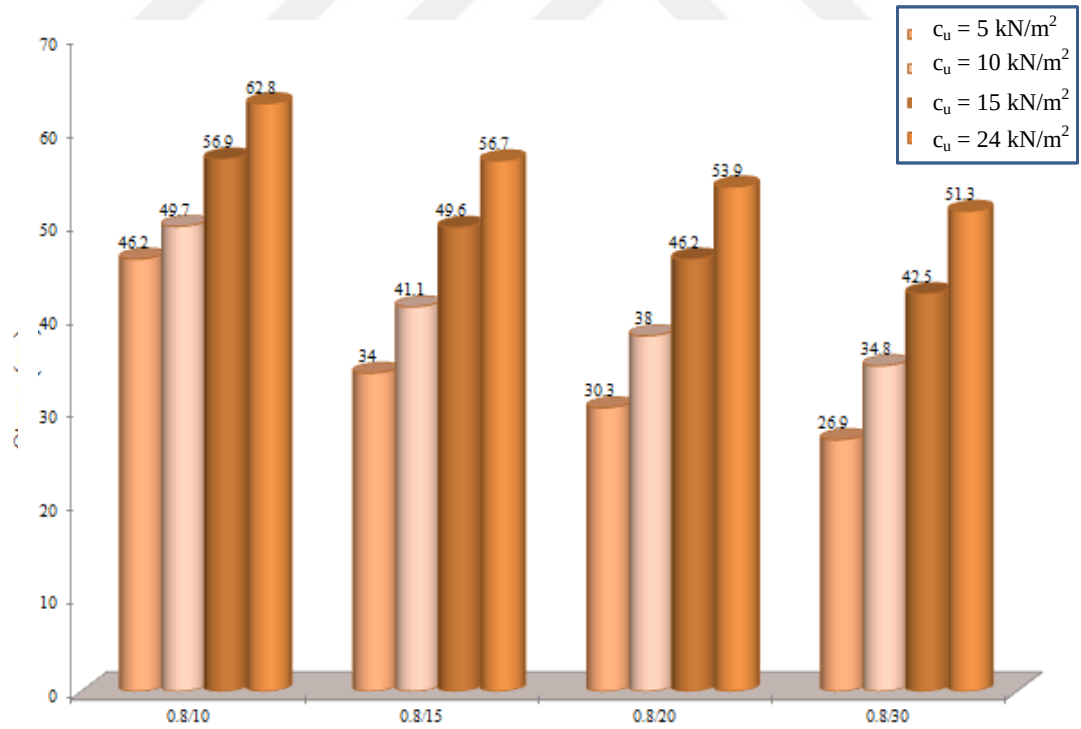
Şekil 7.43. Jet grout kolonun MC zeminin ise SSC modelindeki maksimum oturma değerleri



Çizelge 7.44. Jet grout kolonun HS zeminin ise MC modelindeki maksimum oturma değerleri



Çizelge 7.45. Jet grout kolonun HS zeminin ise SS modelindeki maksimum oturma değerleri



Çizelge 7.46. Jet grout kolonun HS zeminin ise SSC modelindeki maksimum oturma değerleri

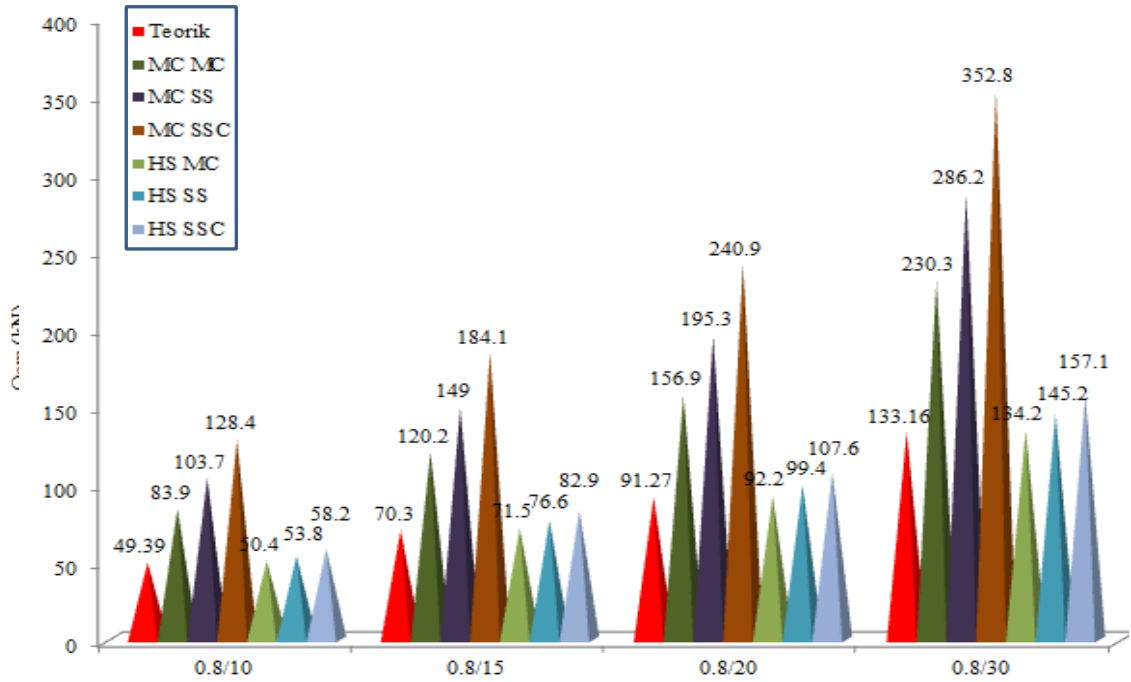
BÖLÜM VIII

ANALİZLERİN SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

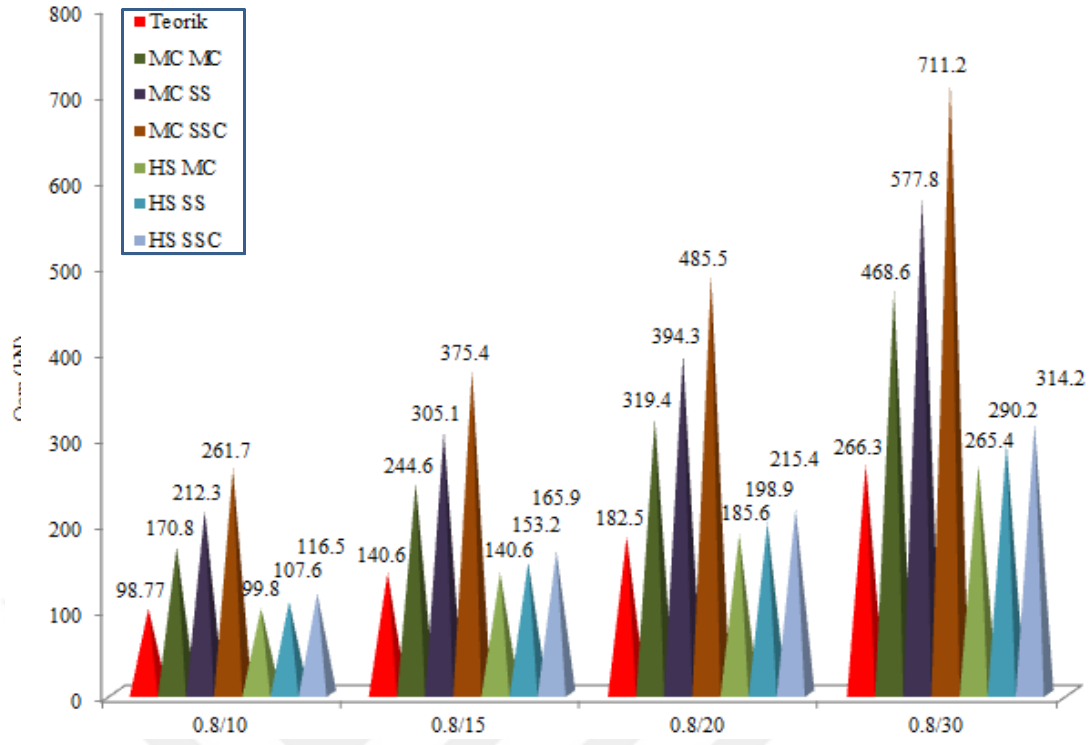
Çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde sabit çapta ve farklı boylardaki tekil jet grout kolonların emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerleri elle hesaplanan yöntemlerle ve nümerik analiz yöntemiyle hesaplanıp, bulunan değerler karşılaştırılmıştır.

8.1 Taşıma Gücü Değerlerinin Karşılaştırılması

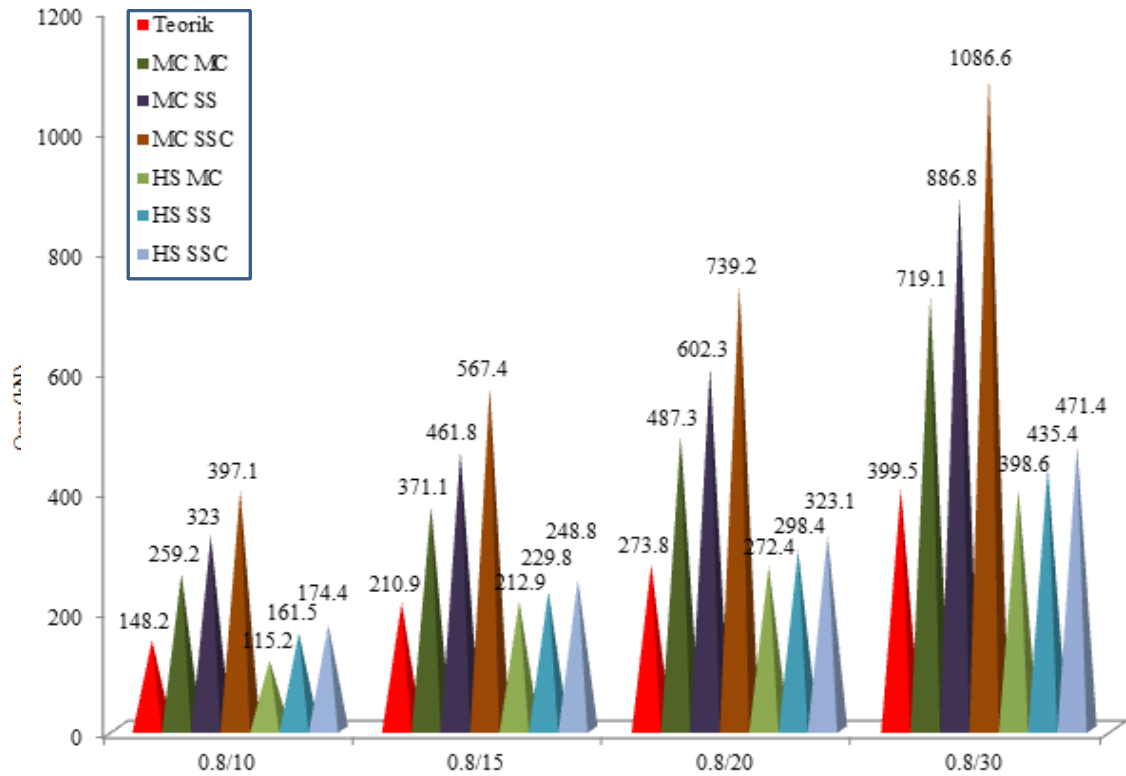
Jet grout kolonun Mohr Coulomb (MC) ve Pekleşen Zemin (HS) ile zeminin ise Mohr Coulomb (MC), Soft Soil (SS) ve Soft Soil Creep (SSC) olarak modellenen analizlerinden elde edilen emniyetli taşıma gücü değerleri ile teorik olarak hesaplanan taşıma gücü değerleri değişimi belirlenmiştir (Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3, Şekil 8.4).



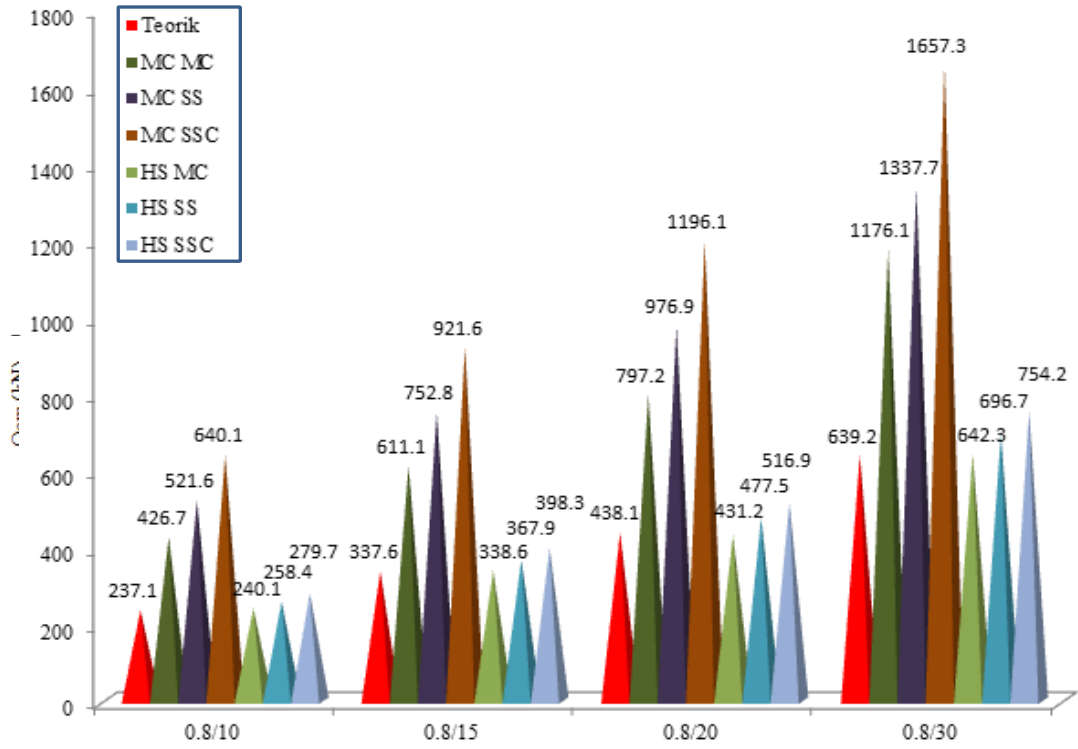
Şekil 8.1. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri



Şekil 8.2. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri



Şekil 8.3. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri

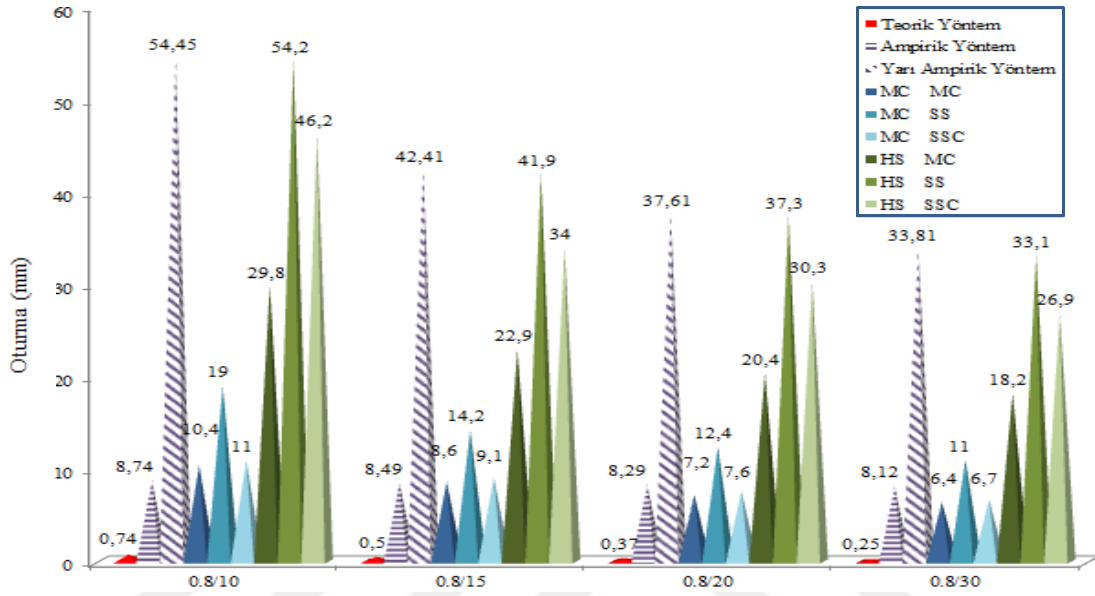


Şekil 8.4. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın emniyetli taşıma gücü değerleri

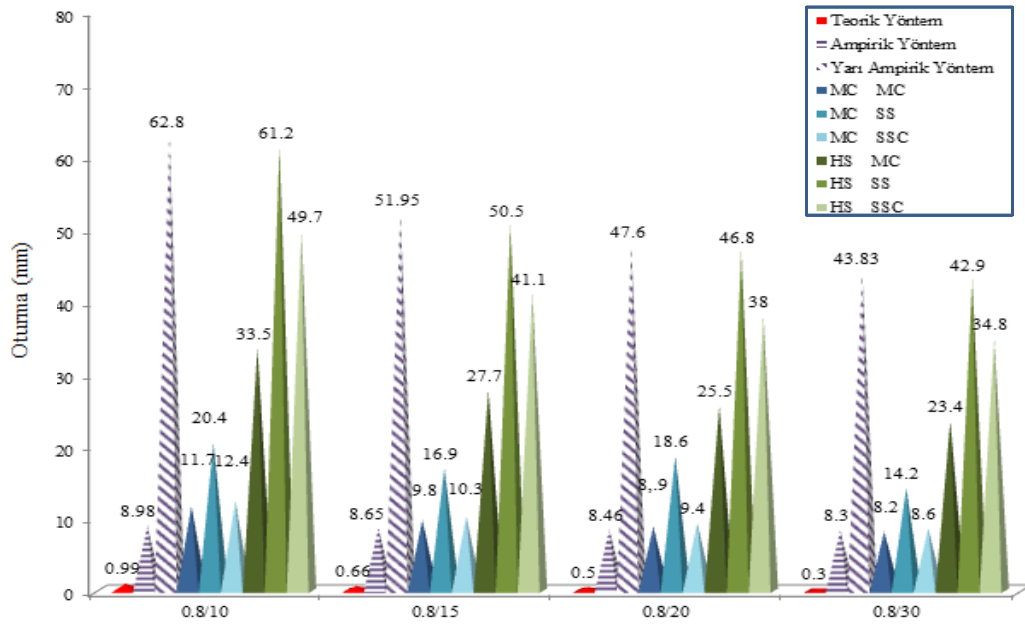
Jet grout kolonun nümerik analiz yöntemiyle yapılan modellerinden zemin olarak tanımlanan jet grout kolonun Mohr Coulomb (MC) zemin modeliyle elde edilen emniyetli taşıma gücü değerlerinin en büyük olduğu, teorik taşıma gücü değerlerinin en küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca jet grout kolonun Pekleşen Zemin (HS) modelinden elde edilen taşıma gücü değerleri Mohr Coulomb modelinden elde edilen taşıma gücü değerlerinden daha küçüktür. Zemin modellerinde ise en yüksek değer jet kolonun Mohr Coulomb, zeminin ise Soft Soil Creep modeliyle modellenmesinden elde edilmişken en düşük değer, jet grout kolonun Pekleşen zemin ve zeminin Mohr Coulomb olarak modellenmesinden elde edilmiştir. Teorik yöntemle bulunan taşıma gücü değerine en yakın sonuç, jet grout kolonun Pekleşen zemin ile zeminin ise Mohr Coulomb olarak analizinden elde edilmiştir.

8.2 Oturma Değerlerinin Karşılaştırılması

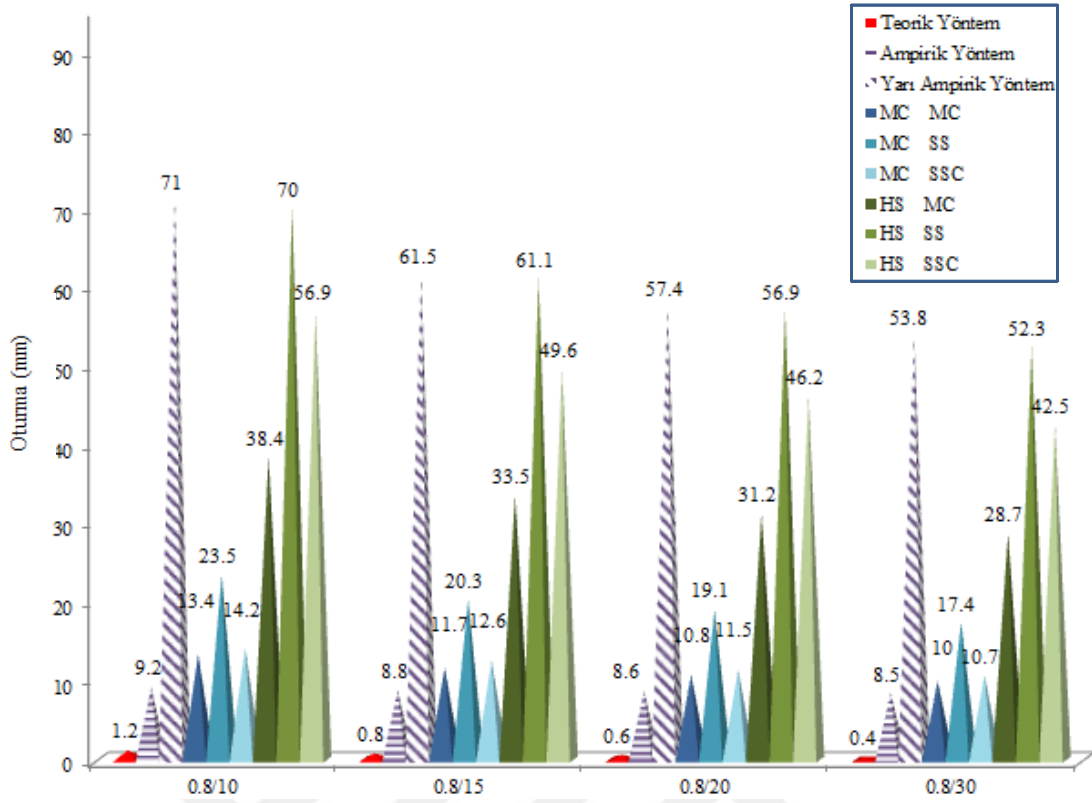
Modellemede jet grout kolonun Mohr Coulomb (MC) ve Pekleşen Zemin (HS) modellerinden elde edilen maksimum oturma değerleri ile teorik olarak hesaplanan oturma değerleri değişimi Şekil 8.5, Şekil 8.6, Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de belirlenmiştir.



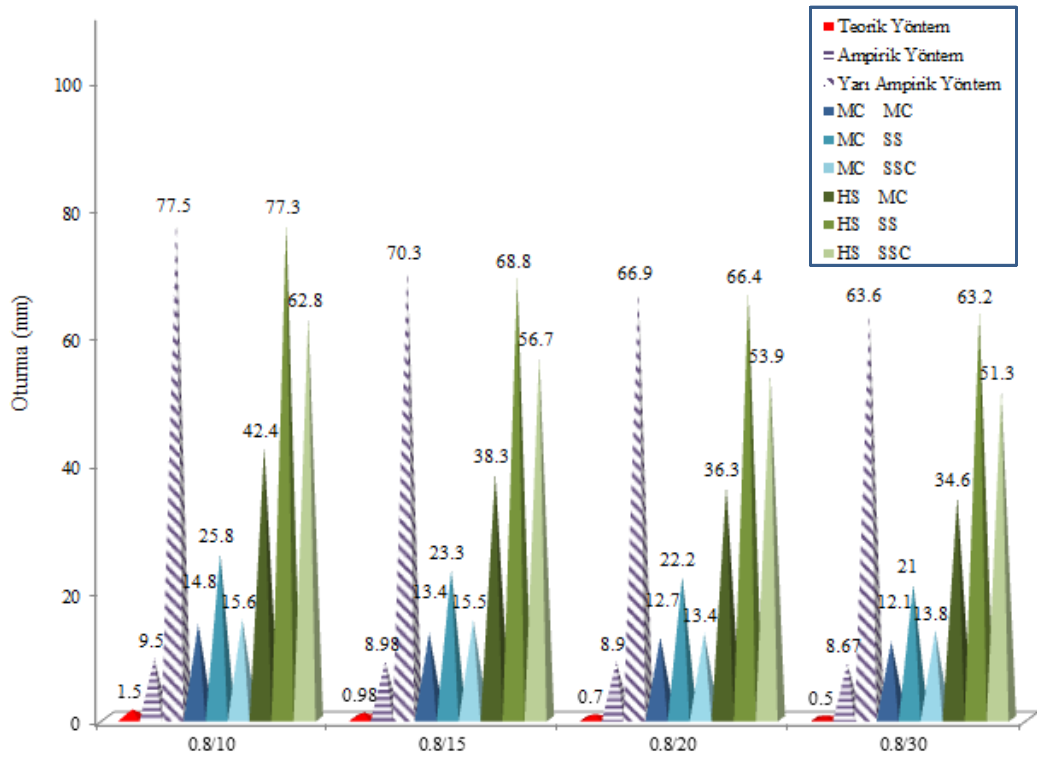
Şekil 8.5. $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri



Şekil 8.6. $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri



Şekil 8.7. $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri



Şekil 8.8. $c_u = 24 \text{ kN/m}^2$ için jet grout kolonun MC ve HS olarak tanımlandığında zeminin farklı modellerinin ve teorik hesabın maksimum oturma değerleri

Yarı ampirik yöntemden elde edilen oturma değerlerini, ampirik yöntem ve teorik yöntemden elde edilen oturma değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür.

Jet grout kolonun Pekleşen Zemin (HS) ve Mohr Coulomb (MC) modelleri karşılaştırıldığında Mohr Coulomb (MC) modelinden elde edilen maksimum oturma değerleri Pekleşen Zemin (HS) modelinden elde edilen maksimum oturma değerlerinden daha küçüktür. En yüksek oturma değeri, jet kolonun Pekleşen Zemin (HS) zeminin ise Soft Soil modeliyle modellenmesinden elde edilmiş olup yarı ampirik yöntem ile elde edilen oturma değerine çok yakındır.

Modelleme ile bulunan maksimum oturma değerleri, elle hesaplanan yöntemlerden daha büyük çıkmasının sebebi, modellemede tüm oturmalar dikkate alınırken elle hesapta sadece elastik oturmanın hesaplanmasından kaynaklanmaktadır.

BÖLÜM IX

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında çok yumuşak ve yumuşak ince daneli zeminlerde sabit çapta ve farklı boylardaki tekil jet grout kolonların emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerleri elle hesaplanan yöntemlerle ve nümerik analiz yöntemiyle hesaplanıp, bulunan değerler karşılaştırılmıştır.

Nümerik analiz yönteminde tekil jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerlerini bulmak için sonlu elemanlar programı olan PLAXIS 2D kullanılmıştır. Tekil jet grout kolonlar, Mohr Coulomb ve Pekleşen Zemin modelleriyle zemin ise Mohr Coulomb, Soft Soil ve Soft Soil Creep modelleriyle modellenmiştir. Her model için tekil jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerleri bulunmuştur.

Tekil jet grout kolonlarının elle hesap yöntemlerinden ve nümerik model analizlerinden elde edilen emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerlerinin karşılaştırılması ile şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kazık hesabı gibi yapılan teorik yaklaşımla elle hesap ve nümerik analiz yönteminde tekil jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü, beklendiği gibi, zeminin drenajsız kayma mukavemeti ve kazığın boyu arttıkça artmaktadır.
- Jet grout kolonun Mohr Coulomb olarak modellenmesinden elde edilen emniyetli taşıma gücü, Pekleşen Zemin olarak modellenen analizlerden daha büyük sonuç vermiştir. Ayrıca nümerik analiz modeliyle bulunan tekil jet grout kolonun emniyetli taşıma gücü değerleri elle hesap (teorik) yöntemiyle elde edilen teorik ve ampirik taşıma gücü değerlerinden daha büyük bulunmakla birlikte, teorik yöntem ile bulunan emniyetli taşıma gücüne jet grout kolonun Pekleşen Zemin ve zeminin ise Mohr Coulomb olarak modellenmesinden elde edilen sonuç en yakın değeri vermiştir.

- Yarı ampirik, ampirik ve teorik yöntemlerle hesaplanan tekil jet grout kolonun oturma değerleri farklı bulunmuştur. Yarı ampirik yöntemle hesaplanan oturma değeri en yüksek bulunurken teorik yöntemle hesaplanan oturma değeri en düşük bulunmuştur.
- Tekil jet grout kolonun maksimum oturma değeri, zeminin drenajsız kayma mukavemeti arttıkça azalmaktadır. Jet grout kolonun boyu arttıkça oturma değeri de bir miktar artmıştır.
- Mohr Coulomb (MC) zemin modeliyle elde edilen tekil jet grout kolonun maksimum oturma değerleri, Pekleşen Zemin (HS) modeliyle elde edilen tekil jet grout kolonun oturma değerlerine göre daha küçük bulunmuştur.
- Pekleşen Zemin (HS) modeliyle tasarlanan jet grout kolonlardan elde edilen taşıma gücü ve maksimum oturma değerleri teorik olarak hesaplanan değerlere daha yakın bulunmuştur. Güvenli tarafta kalmak adına Mohr Coulomb modeli kullanılırken dikkat edilmelidir. Teorik yaklaşımla elde edilen sonuçlara en yakın sonucu, taşıma gücü hesaplarında jet grout kolonun Pekleşen Zemin zeminin ise Mohr Coulomb ile tasarlanan model olduğu açıktır. Oturma açısından bakıldığında ise yarı ampirik yöntemden elde edilen sonuca en yakın oturma değeri, jet grout kolonun Pekleşen Zemin (HS) ve zeminin ise Soft Soil olarak modellenmesiyle ulaşılmıştır.
- Elle hesap ve nümerik model yöntemiyle hesaplanan farklı emniyetli taşıma gücü ve maksimum oturma değerlerine bakılarak seçilen hesap yönteminin, jet grout kolonun tanımlandığı malzemenin, zemin parametrelerinin ve modellenmenin bulunan değerleri çok etkilediği görülmüştür.
- Bu çalışma ile yapılan modellemelerden ve elle hesap yöntemlerinden elde edilen sonuçların, ileriki çalışmalarda fiziki modeller oluşturularak elde edilen uygulama verileriyle karşılaştırılmasının daha gerçekçi olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Akan, R., Jet grout yönteminin zemin iyileştirmesine katkısının ve bu yöntemde kullanılan parametrelerin etkilerinin irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, s. iv, 2013.

Akan, R. ve Keskin, S.N., “Jet grout yönteminin zemin iyileştirmesine katkısının ve bu yöntemde kullanılan parametrelerin etkilerinin irdelenmesi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi** 18(2), 22-25, 2014.

Alkaya, D. ve Yeşil, B., “Yüksek modüllü kolonların (jet grouting) tablolama programı kullanarak tasarımı”, **Akademik Bilişim’11 - XIII. Akademik Bilişim Konferansı**, İnönü Üniversitesi, Denizli, s. 749-755, 2-4 Şubat, 2011.

Altun S., Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri, **İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi**, İzmir, 30 Eylül, 2010.

Arslan, A., Saha içerisindeki jet grout ekipmanları yerleşim planı, **Soil Teknik A.Ş.**, [http:// www.Soil Teknik A.Ş.com.tr](http://www.SoilTeknikA.S.com.tr), 2016.

ASTM D 1143-81, Standart test methods for deep foundation under static axial compressive load, **American National Standards Institute**, USA, 1994.

Baş, K., Temel takviye yöntemleri ve uygulamadan örnekler, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 35-69, 2006.

Brinkgreve, R.B.J. and Broere, W., Plaxis 3D Foundation V1.6 Manual, **Delft University**, Netherlands, 2006.

Burke, G.K., Jet grouting systems: advantages and disadvantages, **ASCE**, Orlando, Florida, 2004.

Bzowka, J., “Computational model for jet grouting pile - soil interaction”, ***Studia Geotechnica et Mechanica***, Vol. XXVI, No. 3 – 4, 2004.

Çınar, M., Zemin iyileştirilmesinde jet grout yöntemi ve uygulamaya yönelik proje çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kayseri, s. 5-8, 2014.

Çınar, M. ve Akkaya A.B., *Ulaşımda yeraltı kazıları 1.sempozyumu*, Genişletilmiş ikinci baskı, ***TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını***, İstanbul, 317-329, 1994.

Çinicioğlu, Ö., Zeminlerde statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü anlayışı ve hesabı, ***İMO Semineri***, İstanbul, s. 19-23, 2005.

Doğanışık, S. K., Jet grout kolonundaki gerilme dağılışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ***İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, s. 36-42, 2004.

Doğanışık, S.K., Jet grout kolonundaki gerilme dağılışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ***İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, s. 7, 2010.

Durgunoğlu H. T., “Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı”, ***Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi***, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 39-52, 2004.

Durgunoğlu H. T., Kulaç H. F., Oruç K., Yıldız R., Sıckling J., Boys I. E., Altugu T. and Emrem C., “A case history of ground treatment with jet grouting against liquefaction for a cigarette factory in Turkey”, ***Grouting and Grout Treatment***, New Orleans, s. 1-10, 2003.

Durgunoğlu, H.T., Kulaç, H.F., Oruç, K., Öge, C.E. ve Eker, F.Ş., “Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme üzerine bir uygulama”, ***Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi***, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 438-449, 1998.

Düzceer R., “Sakhalin doğalgaz ve petrol işleme tesisi kazık işleri”, **Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi**, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 40-45, 2004.

Garassino, A.L., “Design procedures for jet grouting”, **Seminer on Jet Grouting**, Singapore, s. 15-48, 7 Nisan, 1997.

Kara, H.B. ve Şenlik, H.Ç., “Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesine ait bir vaka analizi”, **6. Geoteknik Sempozyumu**, Çukurova Üniversitesi, Adana, s. 26-27, 2015.

Karahan, G., Kumlu zeminlerde tekil jet grout kolon tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, s. 46-48, 2016.

Kauschinger J. L., Hankour R. and Perry E. B., “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, 1992.

Kaymakcı, S., Jet grout kolona soketli fore kazığın çalışma performansının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 17, 2014.

Keller, The soilcrete- jet grouting process, s. 6-11, [http:// www.kellerasia.com.tr](http://www.kellerasia.com.tr), 2014.

Koçbay A., Zemin iyileştirme yöntemleri, **T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü Eğitim Semineri**, Antalya, s. 12-14, 2013.

Küsin C., Jet grout yöntemi ile iyileştirilen zeminlerin sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, **Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, s. 54-57, 2009.

Lunardi P., “Ground improvement by means of jet-grouting”, Ground Improvement, Issmfe Thomas Telford, Vol 1 No:2, 65 – 86, 1997.

Melegary C. and Garassino A.L., “**Seminar on jet grouting**”, CI-Premier Pte. Ltd., Singapore, pp. 45 – 47, 1997.

Peck, R.B., Hanson, W.E. and Thornburn, T.H., **Foundation engineering**, John Wiley and Sons, New York, 37 – 38, 1974.

Prakash, S. and Sharma, H. D., Pile foundations in engineering practice, **John Wiley and Sons**, 4–6, 1990.

Racansky V., Thurner R. and Kummerer C., “Design of a deep building pit with numerical and limit equilibrium methods” Numerical Methods in Geotechnical Engineering – Schweiger (ed.) © **Taylor & Francis Group, London**, 2006.

Racansky, V., Schweiger, H.F. and Thurner, R., “FE-Analysis of the behaviour of buttressed jet grouted retaining walls”, **Proc. 12th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics**, India, pp. 3984 – 3992, 2008.

Rausche F., Goble G. and Lıkıns G., “Recent weap developments”, Proceedings of the third international seminar on the application of stress wave theory to piles, Ottawa, pp. 78-79, 1988.

Sağlamer A., Düzceer R., Gokalp A. ve Yılmaz E., “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**, Orlando, pp. 15-16, 2002.

Sağlamer A., Zemin iyileştirme yöntemleri-neyi nasıl ne kadar iyileştiriyoruz, Yüksek Lisans Tezi, **Zm Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, s. 14-16, 2006.

Tachir, C., Samsun terme kombine doğalgaz çevrim santrali zeminlerinin fore kazık ve jet grout yöntemleri ile iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, **On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Samsun, s. 51-53, 2015.

Terzaghi, K. and Peck, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., **John Wiley & Sons**, New York, 1967.

Toğrol, E., “Jet grout kolonlarının yapımında kalite denetimi”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, s. 393-402, 1998.

TS EN 12716, Özel jeoteknik uygulamalar - jet enjeksiyon, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

Öz, M.Y., Sıvılaşmaya karşı jet grouting yöntemi ile örnek bir iyileştirme uygulamasının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, s. 28, 2015.

Özaydın, K., “Temeller ve derin kazılar”, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 32, 2010

Yahiro, T. and Yoshida, H., Induction grouting method utilizing high speed water jet, *8th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Moscow, August, pp. 56-59, 1975.

Yalçın, A., Kazıklı radyejeneral temellerin düşey ve yatay yükler altında davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi *İ. T. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 35, 2010.

Yağızatlı, E., Jet grout kolonların sem analizi ve etkin parametrelerin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, s. 1, 2012.

Waterman, D., Plaxis BV, Wout Broere, *Delft University of Technology & Plaxis BV*, pp. 49, 2004.

Welsh, J.P., Rubright, R.M. and Coomber, D.B., Jet grouting – uses for soil improvement, *ASCE conference on grouting for support of structures*, Seattle, Washington, pp. 56-57, 1986.

ÖZ GEÇMİŞ

Nur Ahmet GÜRLEYİK 10.04.1992 tarihinde Karabük 'de doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Karabük 'de tamamladı. 2010 yılında girdiği Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2014'de mezun oldu. 2014 yılında yapı denetim alanında kontrol mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen aynı alanda çalışmaya devam etmektedir. 2014 – 2015 öğretim yılında Niğde Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.

