

**JETGROUT KOLONU TASARIM TAŞIMA GÜCÜ
HESABI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Burhan ERDİL
(501051303)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Eylül 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Ekim 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Oğuz TAN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Recep İYİSAN
Doç.Dr. Necmettin GÜNDÜZ**

EKİM 2008

ÖNSÖZ

Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi de jetgrout yöntemidir. Bu tez jetgrout yöntemi kullanılarak iyileştirilen zeminlerin tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan taşıma gücünün tahminini kolaylaştıracak bir yöntem olan sayısal yöntemi anlatır.

Bu tez çalışmasında bana yardımcı olan tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Oğuz TAN'a Yük. İnş. Müh. Tamer TUNCA olmak üzere bütün ENDEM İNŞAAT A.Ş. çalışanlarına, bu çalışma kapsamındaki elde edilen verilere ulaşılmasında yardımları dokunan Yük. İnş. Müh. A. Tufan DURGUNOĞLU'na, tüm eğitim hayatımda yer alan öğretmenlerime, her zaman destek olan dostlarıma ve son olarak, beni bugünlere kadar getiren aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs, 2008

Burhan

ERDİL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. YÖNTEM	3
2.1. Jetgrout Yöntemi	3
2.2. Jetgrout Tekniğinin Tarihçesi	3
2.3. Jetgrout Tekniğinin Yararları ve Sınırlamaları	5
2.3.1. Jetgrout tekniğinin yararları	5
2.3.2. Jetgrout tekniğinin sınırlamaları	5
2.4. Jetgrout Sistemleri	6
2.4.1. Tek akışkanlı (JET 1)	6
2.4.2. İki akışkanlı (JET 2)	7
2.4.3. Üç akışkanlı (JET 3)	8
2.5. Jetgrout Yönteminin Uygulama Alanları	9
2.5.1. Jetgrout yönteminin ince daneli zeminlerde kullanımı	10
2.5.2. Jetgrout yönteminin kaba daneli zeminlerde kullanımı	11
2.6. Jetgrout Kolonu İmalat Parametreleri	12
2.6.1. Enjeksiyon basıncı	12
2.6.2. Çekme hızı	14
2.6.3. Enjeksiyon akış oranı	16
2.7. Jetgrout Yöntemi İçin Gerekli Ekipmanlar	17
3. JETGROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ	20
3.1. Jetgrout Kolonları Taşıma Gücü İçin Daha Önce Önerilmiş Yöntemler	20
3.2. Zeminde Oluşturulmuş Kolonlarla Zemin İyileştirmesi	24
3.2.1. Taşıma elemanlarının grup taşıma gücü	24
3.2.2. Blok analizi	25
3.2.3. Oturma analizi	26
3.3. Motak ve Diğerleri Yöntemi	29
3.4. Jetgrout Kolonlarının Taşıma Gücünün Sayısal Yöntemlerle Hesabı	34
3.4.1. Plaxis yazılımı	34
3.4.2. Zemin koşullarının sayısal ortama akarılması	36
3.4.3. Sayısal ortamda jetgrout kolonunun modellenmesi	43
3.4.4. Sayısal yöntemlerle jetgrout kolonun yük altındaki davranışının incelenmesi	44

4. JETGROUT KOLONLARI ÜZERİNDE YAPILMIŞ YÜKLEME DENEYLERİ	65
4.1. Yükleme Deneyinin Yapılışı	67
4.2. Jetgrout Kolonlarının Yükleme Deformasyon Eğrileri	70
4.3. Yükleme Deneyi Sonuçlarının Çeşitli Hesap Yöntemleri İle Karşılaştırılması	74
5. SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	81

KISALTMALAR

CCP	: Chemical Churning Plant (Kimyasal Çalkalama Sağlama)
CJG	: Column Jet Grout (Kolon Jetgrout)
JG	: Jet Grout
JSG	: Jumbo Jet Special Grout (Özel Jumbo Jetgrout)
JSP	: Jumbo Special Pile (Özel Jumbo Kazık)
SSS-MAN	: Super Soil Stabilization Managment Method (Süper Zemin Stabilite Kontrolü Metodu)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Ortalama serbest basınç mukavemeti	12
Tablo 2.2 : Jetgrout tekniğinin temel işletim parametreleri (Xanthakos, 1994)	13
Tablo 2.3 : Püskürtme gövdesinin çekme hızı ile ıslah edilen zemin arasındaki ilişki... 16	
Tablo 3.1 : Granüler zeminlerde kolon tasarımında kullanılan limit değerler(Garassino, 1997).....	23
Tablo 3.2 : Kohezyonlu zeminlerde kolon tasarımında kullanılan limit değerler (Garassino, 1997).....	24
Tablo 3.3 : Kohezyonsuz zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının kıvam indeksi I_D 'ye göre karakteristik yanal birim sürtünme direnci t^n (kPa) değeri	32
Tablo 3.4 : Kohezyonlu zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının likit indeksi I_L 'ye göre karakteristik yanal birim sürtünme direnci t^n (kPa) değeri	32
Tablo 3.5 : Kohezyonsuz zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının kıvam indeksi I_D 'ye göre limit taban birim direnci q^n (kPa) değeri.....	33
Tablo 3.6 : Kohezyonlu zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının likitite indeksi I_L 'ye göre limit taban birim direnci q^n (kPa) değeri.....	33
Tablo 3.7 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin ve jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri	38
Tablo 3.8 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullanılan zemin ve jetgrout kolonu için öngörülen geometrik parametreler	40
Tablo 3.9 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonu üzerine etkililen yük kademeleri	45
Tablo 3.10 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin yumuşak zemin modeli parametreleri	54
Tablo 3.11 : Farklı çapta Jetgrout Kolonları için belirlenen azami ve izin verilebilir Yük Taşıma Güçleri	58
Tablo 3.12 : Zemininin ve lineer elastik jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri...	59
Tablo 3.13 : Farklı çapta lineer elastik jetgrout kolonları için belirlenen azami ve izin verilebilir yük taşıma güçleri	61
Tablo 3.14 : Plaxis standart kum zemininin ve jetgrout kolonunun parametreleri	62
Tablo 3.15 : Kum zemin için belirlenen azami ve izin verilebilir yük taşıma güçleri....	64
Tablo 4.1 : Zonguldak/Çatalağzı sahası yükleme deneyinde yükleme yüzde ve süreleri.....	69
Tablo 4.2 : Zonguldak/Çatalağzı jetgrout kolonları yük – deformasyon tablosu.....	72
Tablo 4.3 : Bzowka (2004)'nın jetgrout kolonları yük – deformasyon tablosu.....	73
Tablo 5.1 : Jetgrout Kolonu Yük Taşıma Gücü İçin Farklı Yöntemlerle Bulunan Sonuçlar	78

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Tek akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com).....	7
Şekil 2.2 : İki akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com).....	8
Şekil 2.3 : Üç akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com)	9
Şekil 2.4 : Jetgrout kolonu ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos, 1994) .	14
Şekil 2.5 : Püskürtme gövdesinin çekilme hızının ıslah edilen hacme etkisi (Xanthakos, 1994)	15
Şekil 2.6 : Tahmini çimento şerbeti akış oranını (Xanthakos, 1994)	17
Şekil 2.7 : Jetgrout pompa ünitesi, çimento silosu ve mikser ünitesi	18
Şekil 2.8 : Delgi makinesi.....	19
Şekil 3.1 : Jetgrout kolonunun taşıyıcı eleman olarak davranışı (Garassino, 1997)	21
Şekil 3.2 : Jetgrout kolonunda muhtemel kayma yüzeyi(Garassino, 1997).....	22
Şekil 3.3 : Jetgrout kolonlarıyla ıslah edilen zeminin blok taşıma gücü (Garassino, 1997)	26
Şekil 3.4 : Jetgrout kolonlarıyla iyileştirilen zeminlerde oluşabilecek oturmalar (Garassino, 1997).	27
Şekil 3.5 : Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahasında çıkartılan sondaj logu	37
Şekil 3.6 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin ve jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri	39
Şekil 3.7 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullanılan zemin ve jetgrout kolonu için öngörülen geometrik parametreler	40
Şekil 3.8 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki alüvyon tabakasının zemin genel parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi	42
Şekil 3.9 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki alüvyon tabakasının zemin geoteknik parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi	42
Şekil 3.10 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonunun genel parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi	43
Şekil 3.11 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonunun geoteknik parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi.....	44
Şekil 3.12 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonun Plaxis modeli.....	46
Şekil 3.13 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde yeraltı su seviyesi.....	46
Şekil 3.14 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde parçalama ..	47
Şekil 3.15 : Plaxis modelinde oluşturulan yükleme kademeleri.....	48
Şekil 3.16 : Plaxis modelinde oluşturulan yükleme yüzdelerin hesap adımları ile değişimi	48
Şekil 3.17 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan oturmalar	49
Şekil 3.18 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan gerilmeler	50

Şekil 3.19 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan kayma deformasyonu	50
Şekil 3.20 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme deformasyon eğrisi	51
Şekil 3.21 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme yüzdesi kümülatif deformasyon eğrisi	52
Şekil 3.22 : Genişletilmiş tanım uzayına sahip Plaxis modeli.....	53
Şekil 3.23 : Genişletilmiş tanım uzayına sahip Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde yükleme deformasyon eğrisi.....	54
Şekil 3.24 : Soft soil model yaklaşımı ile jetgrout yükleme deneyi sonucu görülebilir....	55
Şekil 3.25 : Bzowka(2004)'nın çalışmalarında kullanılan yükleme deneyinin Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme deformasyon eğrisi.....	56
Şekil 3.26 : 0.8m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki	57
Şekil 3.27 : 1.0m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki	57
Şekil 3.28 : 1.2m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki	58
Şekil 3.29 : Zemininin ve lineer elastik jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri	59
Şekil 3.30 : 0.8m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki	60
Şekil 3.31 : 1.0m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki	60
Şekil 3.32 : 1.2m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki	61
Şekil 3.34 : 0.8m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki	63
Şekil 3.35 : 1.0m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki	63
Şekil 3.36 : 1.2m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki	64
Şekil 4.1 : Jetgrout kolon yükleme deneyi için başlık kirişi hazırlanışı	67
Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin hazırlanışı ve deneye başlamaya hazır haldeki konum ..	68
Şekil 4.3 : Zonguldak/Çatalağzı yükleme deneylerinde uygulanan yükün zamanla değişimi	70
Şekil 4.4 : Zonguldak/Çatalağzı yükleme deneylerinde oluşan oturmaların ortalamasının yük ile değişimi	71
Şekil 4.5 : Bzowka (2004)'nın yükleme deneylerinde oluşan oturmaların ortalamasının yük ile değişimi	73
Şekil 4.6 : Zonguldak/Çatalağzı sahasında yapılan yükleme deneyinin sonuçları ile Plaxis yazılımı sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.7 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullandığı jetgrout yükleme deneyi ile Plaxis yazılımında elde edilen sonuçların karşılaştırılması	76

SEMBOL LİSTESİ

A	: Toplam alan
A_c	: Jetgrout kolonunun alanı
Ap, Asi	: Kazık taban alanı ve kazık yan yüzü alanı
A_s	: Zeminin alanı
a_s	: Donatı oranı
C_c	: Sıkışma indisi
C_s	: Şişme indisi
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
D	: Jetgrout kolonunun çapı
D_a	: Ortalama çap
E	: Elastisite modülü
E_c	: Kolon elastisite modülü
e_{init}	: Başlangıç boluk oranı
E_{oed}	: Ödometre modülü
E_s	: Zemin elastisite modülü
G_{ref}	: Kayma modülü
H	: İyileştirilmemiş zemin oturması
h	: Aktif derinlik
h₁	: Negatif yüzey sürtünmesinin üretilebildiği yumuşak tabakanın kalınlığı
h₂	: Kolonun iyice gömüldüğü taşıyıcı tabaka
K_o	: Sükunetteki zemin basıncı katsayısı
K_s	: Zemin basıncı katsayısı
m	: Temel altındaki kazık adedine bağlı değişen düzeltme, Gerilme dağıtım oranı, Düşey yöndeki sıra sayısı
n	: Jetgrout kolonu adedi, Yatay yöndeki sıra sayısı
N	: Toplam yük
N_c	: Kolonlar tarafından taşınan yük
N_q[*]	: Derin temeller için taşıma gücü katsayısı
N_s	: Zemin tarafından taşınan yük
N_t, N^w	: Hesaplanan kazık basınç taşıma gücü, çekme taşıma gücü
P_{ul(grup)}	: Jetgrout kolonu grubunun taşıma gücü
P_{ul(kolon)}	: Tek bir jetgrout kolonunun taşıma gücü
qⁿ	: Açık uçlu kazıklar birim taban direnci değeri
q^(r)	: Birim tasarım taban direnci
q^(r), t_i^(r)	: Zeminin tabanda veya kazık boyunca gösterdiği birim tasarım direnci.
Q_{11(ort)}	: h ₁ derinliğindeki ortalama yanal sürtünme değeri
Q_{12(ort)}	: h ₂ derinliğindeki ortalama yanal sürtünme değeri
Q_b	: H derinliğindeki uç birim taşıma gücü
q_c	: Jetgrout kolonuna gelen spesifik yük
Q_r	: Hesaplanan kazık taşıma gücü, çekme ya da basınç.

q_s	: Zemin aktarılan spesifik yük
S_c	: Kolon oturması
S_{imp}	: İyileştirilmiş zemin oturması
S_p, S_{si}, S_{si}^w	: Kazık ve zemin tipine göre değişen teknoloji katsayıları.
S_s	: Zemin oturması
V_p	: Basınç dalgası hızı
V_s	: Kayma dalgası hızı
z	: Derinlik
α	: Adezyon için azaltma faktörü
β	: Kolon aralıklarına, kolon uzunluklarına, zemin tipine vb özelliklere bağlı azaltım faktörü
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
δ	: Zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı
ζ	: Uç taşıma gücü için azaltma faktörü
ν	: Poisson oranı
ρ	: Zeminin yoğunluğu
σ_{vo}	: Düşey toprak basıncı

JETGROUT KOLONU TASARIM TAŞIMA GÜCÜ HESABI

ÖZET

Jetgrout yöntemi çok yönlü bir zemin iyileştirme yöntemidir. Hemen hemen tüm zemin çeşitlerinde uygulanabilir. Jetgrout yöntemi kısaca zeminin yüksek basınçlı su veya su-hava karışımı ile kesilmesi ve oluşan boşluğun yine yüksek basınçlı çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılması olarak açıklanabilir.

Jetgrout tekniği ile ilgili ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda yapılmıştır ve günümüze kadar zamanla geliştirilmiştir. Jetgrout yöntemi kullanılan akışkanların sayısına göre tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı olarak üçe ayrılır.

Jetgrout uygulamasının tasarım aşamasında taşıma gücünün belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir metot bulunmamaktadır. Jetgrout kolonlarının taşıma gücünün hesabı için daha önce yapılmış çalışmalarda iki farklı yol izlenmiştir. Bunlardan ilki jetgrout kolonunu kendi içinde izole bir yapısal eleman olarak ele alınıp, jetgrout kolonun taşıma gücü kazık taşıma gücü gibi hesaplanmasıdır. İkinci yaklaşım ise jetgrout uygulanmış zeminin taşıma gücü grup taşıma gücü olarak ele alınmasıdır. Böylece bir grup jetgrout kolonunun taşıma gücü blok taşıma gücü olarak da hesaplanabilir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde sayısal yöntemlerden faydalanmak yaygınlaşmıştır. Bu tezin kapsamında da jetgrout kolonunun taşıma gücünün hesaplanması için yeni ve kolay uygulanabilir bir yöntem olarak sayısal analize başvurulmuştur. Zemin mekaniği problemlerinin çözümü için yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar analiz programlarından bir tanesi de Plaxis yazılımıdır. Bu çalışmada jetgrout kolonunun taşıma gücünün tahmini için Plaxis yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal analiz kullanılarak jetgrout kolonun taşıma gücü hesaplanmasının doğruluğunu sınamak için, daha önce yapılmış çalışmalar ve Plaxis geoteknik analiz yazılımından elde edilen sonuçlar, arazideki yükleme deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Plaxis yazılımı kullanılarak hesaplanan jetgrout kolonlarının taşıma gücü ile yükleme deneyi sonuçları arasında büyük bir fark olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte daha önce yapılmış deneysel çalışmalara dayalı ampirik hesap yöntemleri ile hesaplanan jetgrout kolonlarının taşıma gücü ve yükleme deneyi sonuçları birbirlerini doğrular niteliktedir.

JETGROUT COLUMN DESIGN BEARING CAPACITY CALCULATION

SUMMARY

Jetgrout is a very versatile ground improvement technique. It can be applied almost every soil type. Jetgrout technique can shortly be explained as the cutting of soil with high pressured water or water-air mixture then filling the space with high pressured grout. The studies about jetgrout are started at 1960's and have been developed since then. Jetgrout technique is divided into three by the number of fluids used at the process by single fluid systems, double fluid systems and triple fluid systems.

There is no common calculation method for jetgrout bearing capacity for designing stage. The previous studies of jetgrout bearing capacity calculations follow two different ways. First assumption is considering the jetgrout column as an isolated structural member and calculating the bearing capacity as like the piles. The second assumption is considering the jetgrout columns as a group and calculating the bearing capacity of the soil block which is improved by jetgrout method.

Using numerical analysis method for engineering problems is becoming common nowadays. Within the context of this thesis numerical analysis methods are used for calculation of the bearing capacity of jetgrout columns. One of the most pronounced numerical analysis software for geotechnical applications is Plaxis. The Plaxis software is used for calculation of the bearing capacity of jetgrout columns within this thesis.

The previous studies of jetgrout bearing capacity calculations and the Plaxis software results are compared with the in-situ jetgrout column load tests.

The Plaxis software jetgrout column design bearing capacity calculation results and the in-situ jetgrout column load tests results do not differ from each other significantly. Furthermore the empirical calculations based on previous studies confirm the in-situ jetgrout column load tests.

1. GİRİŞ

Bütün zemin iyileştirme yöntemleri içerisinde en çok yönlü olanı jetgrout yöntemidir. Hemen hemen tüm zemin çeşitlerinde uygulanabilir. Jetgrout yöntemi zeminin yüksek basınçlı su ile kesilmesi ardından oluşan boşluğa çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılması olarak kısaca açıklanabilir. Jetgrout tekniği ile ilgili ilk çalışmalar 1965 yılında Japon uzmanlar Yamakado kardeşler tarafından yapılmıştır. Jetgrout tekniği günümüzde de gelişmeye devam etmektedir. Jet grouting tekniği, enjekte edilen akışkanın sayısına göre üçe ayrılmıştır. Bu sistemler; tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı olarak adlandırılmaktadır.

Birçok bilim adamının da belirttiği gibi jetgrout kolonun taşıma gücünün belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir metot bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda jetgrout kolonu taşıma gücünün hesabı için iki farklı yol izlenmiştir. Bunlardan ilki bir jetgrout kolonunu kendi içinde izole bir yapısal eleman olarak ele alır ve jetgrout kolonunun taşıma gücünü kazık taşıma gücü gibi hesaplar. Jetgrout kolonlarının imalat şeklinin bir sonucu olarak jetgrout kolonu ile temas halinde olan zemin sıkıştırılmış olur. Bunun yanında jetgrout kolonun kesiti üniform değildir. Bunların sonucu olarak ince daneli veya kaba daneli zeminlerde, doğal zemin ile jetgrout kolonu arasındaki temas çakma veya forekazıklardan çok daha sıkidır. Jetgrout kolonun taşıma gücünün hesabı için ikinci bir yol olarak jetgrout yöntemi bir zemin iyileştirme yöntemi olarak ele alınır. Zemin iyileştirmesi çeşitli uygulamalarla geniş bir zemin kütlelerinin davranışını değiştirmektir. Jetgrout uygulamasının zemin iyileştirmesi olarak ele alınması durumunda jetgrout kolonlarının taşıma gücü grup taşıma gücü olarak ele alınır. Böylece bir grup jetgrout kolonunun taşıma gücü blok taşıma gücü olarak da hesaplanır. Blok taşıma gücü hesaplamalarında iki yaklaşım kullanılır. Birinci yaklaşım jetgrout uygulanmış zemin kütlelerinin taşıma gücüne dayanır, ikinci yaklaşım oturmaların sınırlandırılması esasına göre yapılır.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde sayısal yöntemlerden faydalanmak yaygınlaşmıştır. Bu tezin kapsamında

da jetgrout kolonunun taşıma gücünün hesaplanması için sayısal yöntemlerin kullanılmasına başvurulmuştur. Sayısal analiz yazılımları ile jetgrout kolonlarının taşıma gücünün doğru hesaplanmasına çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında zemin mekaniği problemlerinin çözümü için yaygın olarak kullanılan sayısal analiz programlarından bir tanesi olan Plaxis yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal yöntemler kullanılarak jetgrout kolonun taşıma gücünün doğru olarak hesaplanacağını göstermek için iki farklı jetgrout kolonu yükleme deneyi Plaxis geoteknik analiz yazılımından faydalanılarak sayısal ortamda modellenmiştir ve elde edilen sonuçlar arazideki yükleme deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yapılan yükleme deneylerinden ilki Zonguldak/Çatalağzı'nda aynı zeminde yapılmış 5 adet farklı jetgrout kolonu yükleme deneyleridir. Bu deneyler birbirlerine çok yakın mesafede yapıldığı için deney yapılan zeminin geoteknik özellikleri aynıdır ve bu çalışma kapsamında tek yükleme deneyi olarak ele alınmıştır. İkinci yükleme deneyi ise **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında başvurduğu küçük ölçekli jetgrout kolonu yükleme deneyidir.

Sayısal ortamda tekrarlanan yükleme deneyleri ile arazide yapılan gerçek yükle deneylerinin sonuçları arasındaki benzerlikler vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış.

2. YÖNTEM

Jetgrout yöntemi ülkemizde de sıklıkla kullanılan bir zemin iyileştirme yöntemidir. Jetgrout yöntemi ekonomik olması, hızlı uygulanabilmesi ve birçok zemin cinsine uygunluğu ile öne çıkmıştır. Bu yöntem ayrıca iş güvenliği ve çevreye zarar vermemesi gibi özellikleri ile de diğer zemin iyileştirme yöntemlerinden farklıdır.

2.1 Jetgrout Yöntemi

Bütün zemin iyileştirme yöntemleri içerisinde en çok yönlü olanı jetgrout yöntemidir. Bu yöntemle tek bir uygulama ile güçlendirme, sızdırmazlık ve yapısal rijitlik sağlamak mümkün olmaktadır. Jetgrout yöntemi teknik olarak en çok özen gerektiren zemin iyileştirme yöntemlerinden birisidir, çünkü jetgrout kolonlarının tasarımında ya da imalatında oluşabilecek herhangi bir hata oluşan jetgrout kolonunun hatalı olmasına yol açar.

Mevcut zeminin önce özel delgi makinesi ile delinmesi ve bilahare yüksek basınçta 400 ~ 500 bar çimento şerbetinin jetlenerek, 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 jetgrout yöntemi olarak adlandırılır (**Durgunoğlu, 2004**).

2.2 Jetgrout Tekniğinin Tarihçesi

Daha önce yüksek basınçlı su ile kesme yapılması, Amerika Birleşik Devletlerindeki kömür madenlerde ve İngiltere'deki bazı araştırmalarda **Nicholson (1963)** tarafından uygulanmıştı. Zeminin yüksek basınçlı su ile kesilmesine ilave olarak çimento şerbeti ile enjeksiyon yapılması ile ilgili ilk çalışmalar 1965 yılında Japon uzmanlar Yamakado kardeşler tarafından yapılmıştır. (**Miki ve Nakanishi, 1984**)

1970'lerin başlarında iki farklı jetgrout yöntemi öne çıkmıştır. (**Xanthakos ve diğ., 1994**) "Chemical Churning Plant" (CCP) tekniği Nakanishi ve çalışma arkadaşları tarafından uygulanmıştır. Bu yöntemde enjeksiyon malzemesi olarak kimyasal

enjeksiyon kullanılmaktaydı. Enjeksiyon harcı 1.2 ila 2.0 mm çapında ve delme borusunun alt ucunda bulunan püskürtme uçlarından yatay olarak püskürtölüyordu. Enjeksiyon esnasında delme borusu eksenini etrafında döndürölerek yukarı çekiliyordu. Fakat kısa zaman sonra çevreye zarar verilmesini önlemek için imento bazlı enjeksiyon malzemesi kullanımına geçildi. 1973 yılında CCP yöntemi ilk defa ticari olarak uygulandı. Ayrıca 1970'lerin başlarında jetgrout tekniğı Avrupa'da da kullanılmaya başlanmıştır (**Moseley ve Krisch, 1993**).

1972 yılında, CCP grubu “ Jumbo Special Pile” (JSP) yöntemini ortaya atmıştır. Bu yöntemde imento jetinin hızı arttırılmış, ayrıca imento jeti bir hava kılıfı içine alınmıştır. JSP yöntemi ile 80 ila 200 cm çapında kolonlar elde edilebilmektedir. Aynı zamanlarda farklı bir grup “Jet Grout Pile” JGP yöntemini öne sürmüştür. 1980'lerde JSP ve JGP grupları birleşerek “Jumbo Jet Special Grout” (JSG) methodu adını almıştır.

Yahiro başkanlığındaki rakip grup 1970'de “Jet Grout” (JG) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde delgi esnasında su jeti kullanılarak zemin parçalanıyor daha sonra enjeksiyon malzemesi aşağıdan başlayarak yukarı doğru oluşan boşluğu dolduruyordu. 1975 yılında enjeksiyon rodu yukarı çekilmesi esnasında kendi eksenini etrafında döndürölmesi ve su jetinin hava kılıfı içerisine alarak etkisinin artırılmasıyla “Column Jet Grout” (CJG) metodu ortaya çıktı.

Kauschinder ve Welsh (1989) a göre jetgrout tekniğinin gelişimindeki son önemli adım 1980 yılında CCP grubu tarafından geçirimsizlik sağlamak için geliştirilen “Super Soil Stabilization Managment Method” (SSS-MAN) yöntemidir. Bu yöntemde ilk önce bir kılavuz delgi yapılmakta ve basınçlı hava ile zarflanmış yüksek hızlı su jeti ile zemin oyulmakta daha sonra oluşan boşluk yüksek basınçta püskürtölün imento şerbeti ile doldurulmaktadır. Böylece, özellikle kaba daneli zeminlerde büyük çaplı kolonlar oluşturulmaktadır. Su jetinin yayılma açısı büyük olduğı için etkisi çok uzağı taşınamaz. Oysa daha dar bir açi ile yayılan hava jeti kılıfı ile suyun etkisini daha uzağı taşımak mümkün olmaktadır (**Yahiro ve Yoshida, 1973**).

Günümüzde yöntem hala geliştirilmektedir. Debi, çekme hızı, pompa basıncı ve su/imento oranı gibi parametreler teknolojinin ilerlemesi ile değışmektedir. Bu gelişmeler ışığında, kullanılan araçların güvenilirliğı büyük ölçüde artmış, yapımda

insan gücünün gereksinimi azaltılmış, imalatla gerekli yan çalışma azaltılmış ve hazırlıkların daha çabuk yapılabilmesi sağlanmıştır.

2.3 Jetgrout Tekniğinin Yararları ve Sınırlamaları

2.3.1 Jetgrout tekniğinin yararları

Melegari ve Garassino'ya (1997) göre jetgrout tekniğinin yararları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Hemen hemen tüm zemin çeşitlerinde uygulanabilir.
- Küçük çaplı bir deliğin zeminde delinmesi ile (100 mm) büyük çaplı kolonlar imal edilebilmektedir (500 ~ 3000 mm)
- Çevre kirliliğine yol açmadan zeminlerin stabilizasyonuna yardımcı olur.
- Temel takviyesinde yapının deformasyonu çok az olur.
- Diğer metotlara göre daha hızlı ve güvenli imalat yapılmasını sağlar.
- Gerekli geçirimsizlik ve yapısal mukavemet tasarlanabilir.
- Hassas yapılara zarar verecek titreşim üretilmediğinden bu yapıların yakınında imalat yapılabilir.
- Çok sınırlı alanlarda çalışma imkanı verir.
- Yüksek riskli inşaatlarda can güvenliği sağlanır.
- Kolonlar istenilen derinlikten istenilen derinliğe kadar imal edilir.
- Taban kabarmasının önlenmesi veya tünel yapımında geçirimsizliğin zemin yüzünden sağlanması gibi problemlerin ekonomik çözümünde elverişlidir.
- Arazi şartlarına göre inşaat süresini %30 ~ %60 kısaltır.

2.3.2 Jetgrout tekniğinin sınırlamaları

Melegari ve Garassino'ya (1997) göre jetgrout tekniğinin sınırlamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Enjeksiyon akışı enjeksiyon noktasından yüzeye kadar izlenmelidir. Eğer enjeksiyon yolunda bir tıkanıklık var ise bu zeminde şişmeye ve neticesinde kolonların oluşmamasına neden olur.
- Zemin cinsine göre kolon çapları farklı olabilir.
- Çok yüksek basınçlar zeminin taşıma gücünü azaltıp istenmeyen oturmalara neden olabilir.

- İki akışkanlı ve üç akışkanlı sistemlerde maksimum $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ arasındaki değerlerde eğiklik oluşturulabilmektedir. Bu sınırlamanın oluşumundaki neden ise, zemindeki örselenen malzemenin püskürtülen hava ile dışarıya alınmasını sağlamaktır.
- İki akışkanlı ve üç akışkanlı yöntemlerde yataklanma oluşabilmekte, düşük geçirgenliğe sahip zeminlerde oluşturulan elemanlar düşük mukavemet değerlerine sahip olabilmektedir. Bu tarz zeminlerde su ıslah edilen zeminden tahliye edilemediğinden yüksek oranda su/çimento oranı elde edilebilmekte ve tek akışkanlı sisteme göre düşük elastisite modüllü, düşük mukavemete sahip kolonlar imal edilmektedir.
- Tam olarak basit bir tasarım yöntemi geliştirilememiştir ve bundan dolayı deneyim önem kazanmaktadır.
- Bazı zamanlar kolon çapları istenildiğinden büyük olabilmekte bu da ekonomik açıdan sorunlar yaratmaktadır.

2.4 Jetgrout Sistemleri

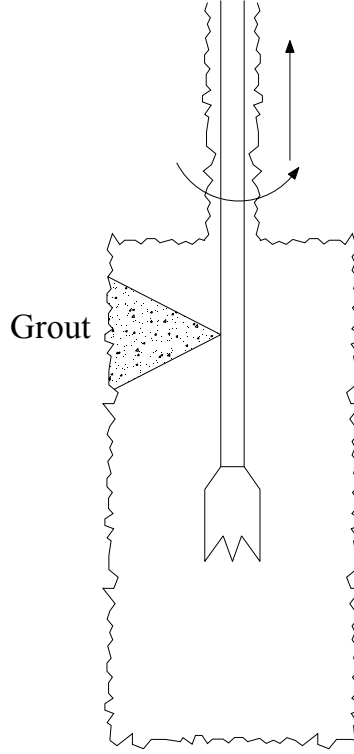
Jet grouting tekniği, enjekte edilen akışkanın sayısına göre üçe ayrılmıştır. Bu sistemler, tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı olarak adlandırılmaktadır. Bu üç sistemden herhangi birinin mühendis tarafından, zemin özellikleri, oluşturulacak kolonun mukavemeti ve ıslah edilecek zeminin hacmi göz önüne alınarak seçilmesi gerekmektedir.

2.4.1 Tek akışkanlı (JET 1)

Tek akışkanlı sistem Yahiro ve çalışma arkadaşlarının geliştirdiği ve 1970'lerin ortalarında gelişimine devam eden en yaygın sistemdir. Tek akışkanlı sistem en basit jetgrout yöntemidir. Bir veya birden fazla $2.0 \sim 2.4$ mm arasında değişen çaplardaki püskürtme ağızlığı monitörün etrafında konuşlandırılmıştır. Hazırlanan harç 400 atmosfer mertebesi kadar yüksek basınçta ağızlardan püskürtülmekte, böylece zemin kesilmekte, kesilme neticesinde oluşan boşluklar harç ile doldurulmaktadır.

Jetgrout kolonunun imalatı ise monitörün çekilmesi ve kendi etrafında belirli hızlarda döndürülmesi ile aşındırılan zemin ve enjekte edilen harç ile oluşturulmaktadır. Zeminde oluşturulan kolonların çapları zemin özelliğine ve kolon oluşturulmak için kullanılan parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntem ile killi zeminlerde

600 ~ 800 mm ve çakıllı zeminlerde 1000 mm çapında kolonlar oluşturulmaktadır. Tek akışkanlı jet grouting sisteminin şematik gsterini şekil 2.1’de verilmiştir.



şekil 2.1 : Tek akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com)

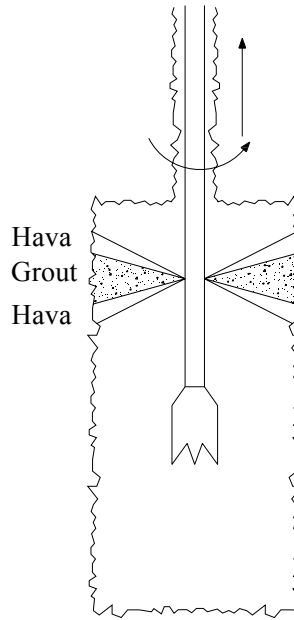
2.4.2 İki akışkanlı (JET 2)

İki akışkanlı sistem CCP grubunun “Jumbo Special Pile” yöntemidir. Bu yöntemde imento harcının bir hava jeti içerinde püskürtülmesi ile zeminin parçalanması sağlanmaktadır.

Monitör yani püskürtme gövdesi i içe geçmiş iki üniteden oluşmaktadır. En iteki ünite harç püskürtme, en dıştaki ünite hava püskürtme işlevini yerine getirmektedir. Her bir püskürtme ağızlığı takımı, harç için iç tarafta bir adet ve hava için dış tarafta bir adet olmak üzere püskürtme gövdesi üzerine yerleştirilmiştir. İki püskürtme ağızlığından biri olan hava jeti püskürtmesi dışta, iteki harı zarflayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu etki neticesinde püskürtülen harç zemin içinde daha uzak mesafelere nüfuz etmekte ve zeminin parçalanması için daha büyük enerji üretebilmektedir (şekil 2.2).

Sistemde püskürtülen harcın basıncı 400 ~ 500 bar arasında kullanılan hava basıncı ise 7 ~ 17 bar arasında değişmektedir. Bu teknik ile oluşturulan kolonların çapları ise 800 ~ 1400 mm' e kadar ulaşabilmektedir. Kolon çapının bu şekilde artmasının nedenleri şöyle özetlenebilir:

- Basınçlı hava, harç jeti ile yeraltı suyu arasında bir tampon bölge oluşturur. Böylece daha geniş bir zemin hacmini etkilemek mümkün olmaktadır.
- Kesilen zeminin doğurduğu çalkantıyı yenmek için harcanması gereken enerjiden tasarruf edilir.
- Kesilen zemin uzaklaştırılması kolaylaşır. Hava jeti hızı kesildikten sonra yüzeye doğru yükselmesi sırasında, zemin döküntüsünün de kolaylıkla zemin yüzüne ulaşması sağlanır.



Şekil 2.2 : İki akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com)

2.4.3 Üç akışkanlı (JET 3)

Jetgrout teknikleri arasında en karışık olanıdır. CCP grubunun “Super Soil Stabilization Management” (SSS-MAN) yöntemine dayanır.

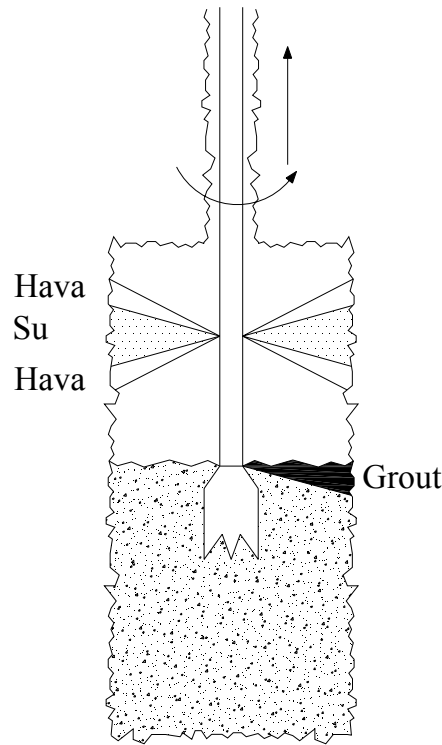
Su, hava ve harcın püskürtülerek kaba daneli zeminlerde karıştırma ve ince daneli zeminlerde paralamanın aynı anda yapılması temeline dayanan üç akışkanlı bir sistemdir. Püskürtme gövdesi birbiriyle etkileşimli üç adet borudan oluşmaktadır. İki

takım halindeki püskürtme ağızlığı (nozzle) monitör içinde iki farklı bölümde yer almaktadır.

Monitör üst kısmında birbiriyle etkileşimli takım halinde çalışan püskürtme ağızlığı, su ve havanın püskürtülmesiyle zemini paralamaktadır. Monitörün alt bölümünde ise püskürtme ağızlığından düşük basınçlarda püskürtülen harç, su/hava püskürtülmesi neticesinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.3).

Bu metodun kullanımı ile kolon çapları 1200 ~ 2000 mm arasında değişmektedir. Genel olarak su basıncı 400 ~ 600 bar arasında, hava basıncı 7 ~ 17 bar arasında, harç ise 20 ile 80 bar arasında püskürtülmelidir.

Delme işlemi püskürtme gövdesi yani monitörün döndürülmesi ile yapılmaktadır. Sert zeminlerde ise delme işlemi hem vurma hem de döndürme işlemi ile yapılabilmektedir, bu tip zeminlerde monitörle delme işlemi yapılamaz.



Şekil 2.3 : Üç akışkanlı jet grouting sistemi (www.haywardbaker.com)

2.5 Jetgrout Yönteminin Uygulama Alanları

Jetgrout yönteminin diğer enjeksiyon yöntemlerine olan en temel üstünlüklerinden biri kaba daneli zeminlerden ince daneli zeminlere kadar geniş bir zemin tipi

yelpazesinde kullanılabilmesidir. Fakat jetgrout işletim parametrelerinin zemin çeşidine göre uygun seçilmesi gerekir.

Welsh ve diğ., (1986) zeminde oluşturulacak elemanla zemin çeşidi arasındaki ilişkiyi kısaca şu şekilde özetlemiştir.

- Jetgrout ile iyileştirilen hacim en çok, enjeksiyon veya su basıncı ve çekilme hızından etkilenmektedir.
- Kil içeriğinin artması ile herhangi bir basınçta enjekte edilen harç ile püskürtme gövdesinin çekilme hızında iyileştirilen zeminin hacmi azalmaktadır.
- Çok katı ve sert killerde tipik harç basıncı ve su basıncı kullanılarak, 1.5 m çapında kolonlar elde etmek zordur.
- Jetgrout ile ıslah edilen hacim, eğer zeminin üniformalık sayısı $C_u=(D_{60}/D_{10}) \geq 8$ ise zeminin dane büyüklüğü dağılımından önemli derecede etkilenmektedir.
- Eğer üniform katsayısı $C_u=(D_{60}/D_{10}) < 8$ ise tipik işletim parametreleri kullanılarak kolon çapları 3 m'e kadar ulaşabilmektedir.
- Eğer zeminin çakıl boyutundaki içeriği %50'den fazla ise harcın zemine nüfuz etmesi azalmakta ve imal edilecek eleman düzensizleşmektedir.

2.5.1 Jetgrout yönteminin ince daneli zeminlerde kullanımı

Zeminde oluşturulacak elemanların muntazam oluşabilmesi için küçük püskürtme ağızlıkları kullanılmaktadır. Kullanılan püskürtme ağızlıklarının sayısı iki ve çapları 1.6 ~ 2.0 mm arasında değişmektedir. Kullanılacak basınç 400 ~ 600 bar arasında değişmektedir. Bu basınçlarda enjekte edilecek harcın niceliğinin, zeminin parçalanmasını ve kırılmasını engellemek için azaltmak gerekir. Kırılan zeminin aşırı malzeme yaratması, delici boru ile sondaj borusu arasında drene olamamaktadır. Normal koşullarda harç ve zemin yüzey altında basınçla sondaj kuyusunun arasından yüzeye çıkmaktadır. Bu basınç altında oluşturulan kolonların etrafındaki zeminin yoğunluğunu arttırmaktadır ki, bu zemin iyileştirme çalışmaları için avantajlıdır.

Drenajın düzensiz hale dönüşmesi ile delici borular etrafında yataklanma oluşma ihtimali ortaya çıkmaktadır. Aşırı basınç drenajın oluşmasından dolayı püskürtme ağızlıkları çevresinde toplanarak zemini kırmaya ve akışkanlaştırmaya başlar. Sonuç olarak harcın zemine etki etme ve zemin ile karışım özelliği yitirilmiş olur. Bu oluşum ile kolonlarda süreksizlik ve zeminin üst kesimlerinde basınç etkisiyle

kırılmalar veya zeminin zayıf bölgelerinde düşey veya yatay yataklanmalar oluşmaktadır.

İnce daneli zeminlerde ıslah yapılırken zorlanma ile karşılaşılıyor ise çift püskürtme ağızlığı yerine tek püskürtme ağızlığı takılması önerilmektedir. Bu şekilde yüksek basınçtaki enerji kaybı tek püskürtme ağızlığı ile kontrol edilebilir.

Bu çeşit zeminlerde 250 ~ 300 bar ön yıkama yapılarak iyileştirme çalışması için bir ön çalışma yapılabilir.

2.5.2 Jetgrout yönteminin kaba daneli zeminlerde kullanımı

Çakıllar ve granüler zeminler olarak da adlandırılabilirler. İnce daneli zeminler ile karşılaştırıldıklarında işletim parametreleri farklıdır.

Bu tarz zeminlerde enjeksiyon basıncı 400 ~ 500 bar arasında değişmektedir. Püskürtme ağızlıklarının çapları ise 2.5 ~ 3.0 mm arasındadır, böylece büyük miktarda karışım zemine enjekte edilebilmektedir.

Bu çeşit zeminlerde bütün jetgrout sistemleri uygulanabilmektedir. Aşağıda bu tarz zeminlerde uygulanacak sistemler hakkında bilgi verilmiştir.

a) Tek akışkanlı sistem : Genelde bir veya iki adet püskürtme ağızlığı kullanılmaktadır. Daha az sayıda püskürtme ağızlığı kullanıldığında enerji kaybının daha az olması sebebiyle eşit ıslah alanları oluşmaktadır. Daha küçük çaplı püskürtme ağızları kullanıldığında enerjide oluşan kayıp, enjeksiyonun püskürtme ağızlarından çıkışını ve etrafa yayılmasını etkilemektedir. Püskürtme ağızlarının çaplarının büyütülmesi ile enjeksiyonun etrafa yayılmasında azalma olur.

b) Çift akışkanlı sistem : Çoğunlukla bir püskürtme ağızlığı kullanılmaktadır. Çünkü iki adet püskürtme ağızlığı kullanıldığında, hava bu iki püskürtme ağızlığından birinden çıkabilmekte ve operatör bu durumun farkında olamamaktadır. Bu durumda zemin ıslahı gerektiği gibi yapılamayabilmektedir. Bu yöntemde kullanılan püskürtme ağızlıklarının çapları, tek akışkanlı sisteme göre daha büyüktür. Çap boyutları 2.5 mm ile 4.5 mm arasında değişmektedir.

c) Üç akışkanlı sistem : İki akışkanlı sistemde ki geçerli olan hususlar üç akışkanlı sistem içinde geçerlidir.

2.6 Jetgrout Kolonu İmalat Parametreleri

Aşağıdaki tabloda da görüleceği biri parametreler belirli bir aralıkla ifade edilmiştir ve kesin değerler uygulamadan uygulamaya farklılık gösterecektir. Jetgrout imalat parametreleri genellikle benzer zeminlerde daha önceden yapılmış çalışmalar esas alınarak belirlenir (Fook-Hou Lee, 2005).

Tek akışkanlı jetgrout uygulaması için karar verilmesi gereken 6 farklı imalat parametresi vardır, bunlar: enjeksiyon basıncı, püskürtme ağızlığının sayısı ve çapları, su/çimento oranı, çekme hızı, tijin dönme hızı. İki akışkanlı jetgrout uygulaması için tek akışkanlı jetgrout uygulamasındaki parametrelere ilave olarak hava basıncı ve hava akış oranı parametreleri belirlenmelidir. Üç akışkanlı sistemde ise iki akışkanlı sistemde kullanılan parametrelerin yanı sıra su basıncı ve su jeti püskürtme ağızlığı sayısı ve çapı parametreleri de tasarımcı tarafından belirlenmelidir (Xanthakos ve diğ., 1994).

Çeşitli zemin tiplerinde uygulanan jetgrout kolonlarının mukavemet değerlerinin imalat parametreleriyle değişim aralığı aşağıdaki tablo2.1de verilmiştir (Stoel A., 2001).

Tablo 2.1 : Ortalama serbest basınç mukavemeti

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

Jetgrout imalat parametreleri ve jetgrout ile iyileştirilmiş zeminin mukavemet detayları ile ilgili bir özetini Tablo 2.2’de sunulmuştur (Kauschinder ve Welsh, 1989).

2.6.1 Enjeksiyon basıncı

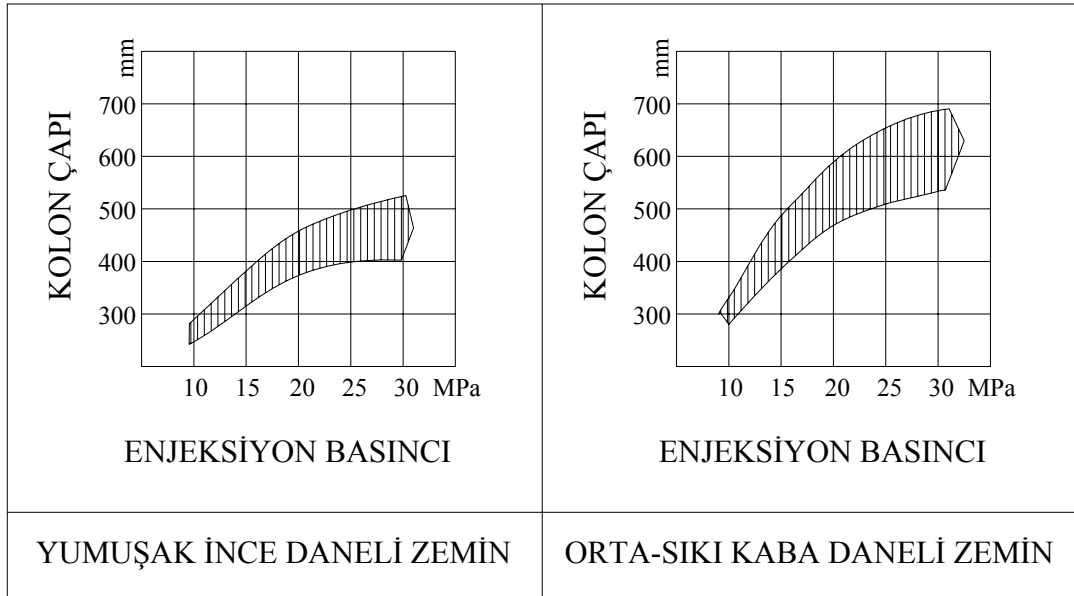
İstenilen kolon çapının elde edilmesi için gerekli olan en önemli parametre enjeksiyon basıncıdır. Enjeksiyon basıncı aşağıda gösterildiği gibi sınıflanabilir.

- Düşük : 200 ~ 250 bar
- Orta : 300 ~ 400 bar
- Yüksek : 400 ~ 700 bar arası basınç

Tablo 2.2 : Jetgrout tekniğinin temel işletim parametreleri (Xanthakos, 1994)

PARAMETRELER		JETGROUT SİSTEMİ		
		TEK AKIŞKANLI	ÇİFT AKIŞKANLI	ÜÇ AKIŞKANLI
ENJEKSİYON BASINCI				
Su	(Bar)	Ön Yıkama (200 ~ 300)	Ön Yıkama (200 ~ 300)	300 ~ 500
Enjeksiyon Harcı	(Bar)	300 ~ 600	300 ~ 600	40 ~ 60
Sıkıştırılmış Hava	(Bar)	yok	8 ~ 13	8 ~ 13
AKIŞ ORANLARI				
Su	(lt/dk)	Ön Yıkama	Ön Yıkama	70 ~ 100
Enjeksiyon Harcı	(lt/dk)	60 ~ 150	100 ~ 150	150 ~ 250
Sıkıştırılmış Hava	(m³/dk)	yok	1 ~ 3	1 ~ 3
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ BÜYÜKLÜĞÜ				
Su	(mm)	Ön Yıkama (1.6 ~ 2.4)	Ön Yıkama (1.6 ~ 2.4)	1.8 ~ 2.5
Enjeksiyon Harcı	(mm)	1.6 ~ 3.0	2.0 ~ 4.0	3.5 ~ 6.0
PÜSKÜRTME AĞIZLIĞININ SAYISI				
Su		Ön Yıkama (1)	Ön Yıkama (1)	1 ~ 2
Enjeksiyon Harcı		2 ~ 6	1 ~ 2	1
TİJİN DÖNME HIZI				
	(Devir/dk)	10 ~ 30	10 ~ 30	3 ~ 8
TİJİN ÇEKİLME HIZI				
	(sn/m)	200 ~ 375	250 ~ 500	375 ~ 625
KOLON ÇAPI				
Kaba daneli zeminler	(m)	0.6 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	1.5 ~ 2.5
İnce daneli zeminler	(m)	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.0 ~ 2.0
SU/ÇİMENTO ORANI				
	W/C	0.8:1 ~ 2:1		
TÜKETİLEN ÇİMENTO MİKTARI				
	(kg/m)	200 ~ 500	300 ~ 1000	500 ~ 2000
	(kg/m³)	400 ~ 1000	150 ~ 550	150 ~ 650
ZEMİN ELEMANININ MUKAVEMETİ				
Kaba daneli zeminler	(MPa)	10 ~ 30	7.5 ~ 15	10 ~ 20
İnce daneli zeminler	(MPa)	1.5 ~ 10	1.5 ~ 5	1.5 ~ 7.5

Kolon çapı ile enjeksiyon basıncı arasında doğrudan bir bağlantı bulunmaktadır. Genel olarak yüksek enjeksiyon basınçlarında daha yüksek kolon çapları elde edilmektedir. Fakat her zaman basınç artışı ile istenilen çapa ulaşılmamaktadır. Bunun sebebi kolon çapının zamanın da bir fonksiyonu olmasıdır. Kolonun oluşturulması için geçen zaman kolonun çapının homojen olmasını doğrudan etkilemektedir. Şekil 2.4'te oluşan kolon çapı ile enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki görülmektedir (**Langbehn, 1986**). Enjeksiyon basıncının seçilmesinde unutulmaması gereken bir diğer nokta ise enjeksiyon basıncının pompadan çıktıktan sonra hortumlarda, sürme borusu ve püskürtme ağzında basıncının %5 ~ %10 'unu kaybedeceği



Şekil 2.4 : Jetgrout kolonu ve enjeksiyon basıncı arasındaki ilişki (Xanthakos, 1994)

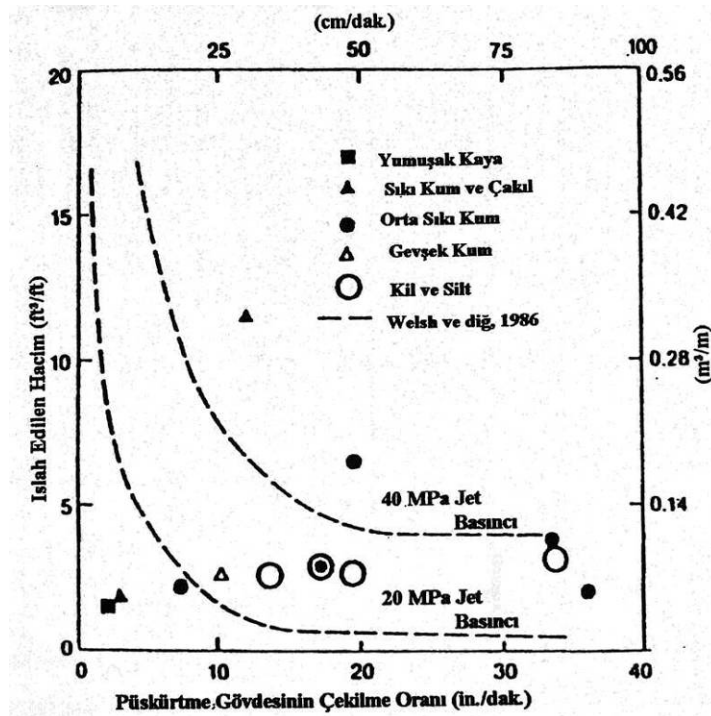
2.6.2 Çekme hızı

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 rpm değerleri arasında değişir, bazı özel durumlarda 30 rpm'e kadar çıkabilir. Takım çekme işlemi, iki şekilde olabilir;

1. Kademeli çekme.
2. Sürekli çekme.

Bu iki ayrı tip çekme metodu, genellikle delici makinenin imal yöntemine bağlı olarak seçilir. Bazı makinelerde sadece kademeli, bazılarında ise hem kademeli, hem sürekli çekme düzeneği bulunmaktadır. Kademeli çekmede, her kademede 40 mm. ilerleme ve her kademede 6 ~ 10 sn. beklemek şantiye tecrübelerinde en iyi sonucu sağlamıştır. Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacme enjekte edilecek grout miktarına bağlıdır. İnce daneli zeminler, jet huzmesinin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süreler gerektirirler. Dönme ve çekme hızı adaptasyonu (optimizasyonu) ıslah edilecek zemine ve kullanılan jet grouting metoduna çok sıkı bağlıdır. Jet 2 ve Jet 3 metotları, daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla ıslah edilen zemin hacmi daha büyük olduğu için, daha uzun sürelere ihtiyaç duyarlar.

Basıncın artması veya çekilme hızının azaltılması ile kolon çapında artış sağlanmaktadır. Şekil 2.5’de püskürtme gövdesinin çekilme hızı ile ıslah edilen hacim arasındaki ilişki görülmektedir (Welsh ve diğ., 1986). Tablo 2.3’de püskürtme gövdesinin çekme hızı ile ıslah edilen zemin arasındaki ilişki farklı kaynakların verilerine göre özetlenmiştir.



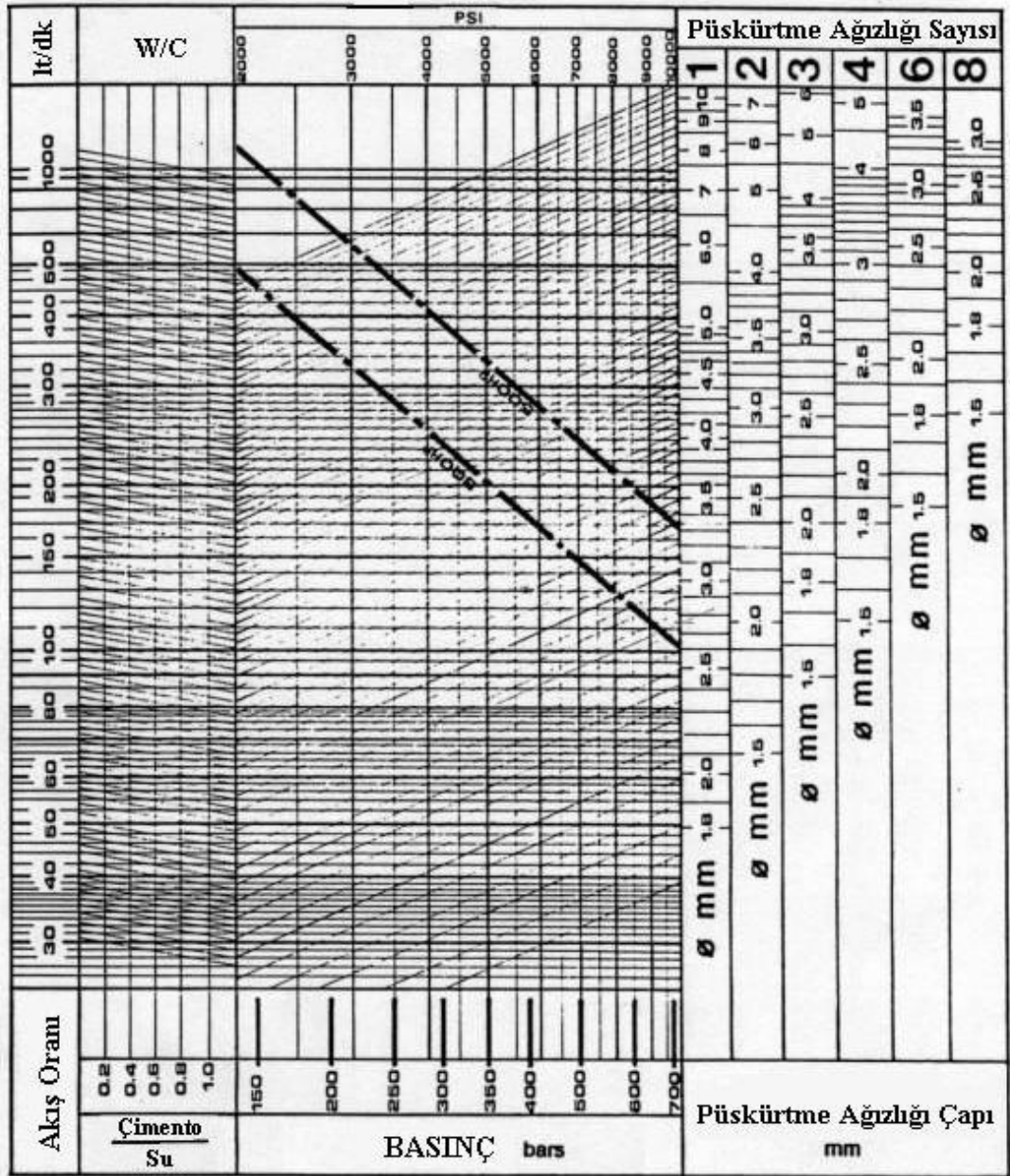
Şekil 2.5 : Püskürtme gövdesinin çekilme hızının ıslah edilen hacme etkisi (Xanthakos, 1994)

Tablo 2.3 : Püskürtme gövdesinin çekme hızı ile ıslah edilen zemin arasındaki ilişki

Zemin	Enjeksiyon Basıncı (Mpa)	Çekme Hızı (cm/dk)	Islah edilen hacim (m ³ /m)	Kaynak
Yumuşak Kaya	39.3 ~ 48.9	2.3 ~ 9.4	0.1 ~ 0.2	Yahiro ve diğ. , 1975
Sıkı Kum ve Çakıl	39.3 ~ 48.9	3 ~ 11.7	0.1 ~ 0.2	Yahiro ve diğ. , 1975
	34.5 ~ 41.4	30.5	0.3 ~ 1.8	ENR, 1986
Orta Sıkı Kum	39.3 ~ 48.9	13.2 ~ 23.1	0.2 ~ 0.2	Yahiro ve diğ. , 1975
	20 ~ 40	9.9 ~ 50	0.1 ~ 1.8	Welsh ve diğ. , 1986
	38.6	91.4	0.2	ENR, 1974
	30.3	39.9	0.3	Aschieri ve diğ. , 1973
	39.3 ~ 48.9	50 ~ 119.9	0.1 ~ 0.6	Yahiro ve Yoshida , 1973
	5.5 ~ 6.9	39.9 ~ 59.9	0.2 ~ 1	Broid ve diğ. , 1981
Gevşek Kum	39.3 ~ 48.9	23.1 ~ 28.7	0.2 ~ 0.2	Yahiro ve diğ. , 1975
Kil ve Silt	39.3 ~ 48.9	31 ~ 38.6	0.2 ~ 0.3	Yahiro ve diğ. , 1975
	20 ~ 40	9.9 ~ 42.2	0.1 ~ 1.5	Welsh ve diğ. , 1986
	30.3	39.9	0.3	Aschieri ve diğ. , 1983
	39.3 ~ 48.9	50 ~ 119.9	0.1 ~ 0.5	
	5.5 ~ 6.9	39.9 ~ 59.9	0.1 ~ 0.4	Broid ve diğ. , 1981

2.6.3 Enjeksiyon akış oranı

Jetgrout enjeksiyonu esnasında ne kadar çimento şerbetinin sarf edileceği maliyetlerin belirlenmesi açısından gereklidir. Enjeksiyon esnasında birim zamanda tüketilecek çimento şerbeti miktarı enjeksiyon basıncına, püskürtme ağzı sayısına ve çaplarına ve su çimento oranına bağlı olarak değişir. Şekil 2.6'da püskürtme ağzı sayısı ve çapı, enjeksiyon basıncı ve su/çimento oranına bağlı olarak tahmini çimento şerbeti akış oranını gösterir (www.jet-grouting.com).



Şekil 2.6 : Tahmini çimento şerbeti akış oranını (Xanthakos, 1994)

2.7 Jetgrout Yöntemi İçin Gerekli Ekipmanlar

Jetgrout ekipmanı aşağıdaki ekipmanlardan oluşacaktır (www.zetas.com.tr).

1. Delgi makinesi: Uygulama projesinde öngörülen derinliğe kadar yukarıdaki yöntemlerden biri ile delgi yapabilecek ve jetgrout kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesidir. Pompa ünitesi, mikser ünitesi ve çimento silosu Şekil 2.7’de

görülmektedir. Bir jetgrout delgi makinesi çalışma esnasında şekil 2.8’de görülebilir.

2. Pompa ünitesi: Jetgrout enjeksiyon karışımını istenen çapta jetgrout kolon teşkil edebilecek basıncı verebilecek pompadan oluşacak jetgrout ünitesidir. Yüksek basınçlı pompalar 300 ~ 500 beygir güce sahiptirler ve klasik enjeksiyonda kullanılan pompalardan oldukça farklıdır.

3. Mikser ünitesi: Jetgrout enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştıracak mikser ve dinlendiriciden oluşan, jetgrout pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede mikser ünitesidir.

4. Çimento silosu: Dökme çimento depolayabilen ve jetgrout mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek çimento silosu ve konveyörüdür.

5. Su tankı: 15 ~ 25 ton kapasiteli sağlam su tankı-havuzu ve su pompası olmalıdır.

6. Diğer ekipmanlar



Şekil 2.7 : Jetgrout pompa ünitesi, çimento silosu ve mikser ünitesi



Şekil 2.8 : Delgi makinesi

3. JETGROUT KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ

Jetgrout kolonlarının arazide ne kadar yükü güvenle zemine aktarabileceği hesaplanmalıdır. Bunun için çeşitli hesap yöntemleri kullanılmaktadır fakat yaygın olarak kullanılan ve benimsenmiş bir hesap yöntemi bulunmamaktadır.

3.1 Jetgrout Kolonları Taşıma Gücü İçin Daha Önce Önerilmiş Yöntemler

Bir jetgrout kolonu kendi içinde izole bir yapısal eleman olarak ele alınırsa, jetgrout kolonun taşıma gücü kazık taşıma gücü gibi hesaplanır (**Garassino, 1997**).

$$P_u = P_{base} + P_{lat} \quad (3.1)$$

Kohezyonsuz zeminler için

$$P_u = A_b q_b + \pi D_a \int_{l_1}^{l_2} \gamma z K_s \tan g \delta dz \quad (3.2)$$

Kohezyonlu zeminler için

$$P_u = A_b q_b + \pi D_a \int_{l_1}^{l_2} \alpha c_u dz \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ifadelerde:

P_u :Kolon taşıma gücü

P_{base} :Kolon uç taşıma gücü

P_{lat} :Kolon yanal taşıma gücü

A_b :Kolon taban alanı

Kaba daneli zeminlerde

$$q_b = \frac{1+2 K_0}{2} \sigma_{vo} N_q^* \zeta \quad (3.4)$$

İnce daneli zeminlerde

$$q_b = 9 c_u \quad (3.5)$$

D_a : Ortalama çap

N_q^* : Derin temeller için taşıma gücü katsayısı

σ_{vo} : Düşey toprak basıncı

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

K_o : Sükunetteki zemin basıncı katsayısı

K_s : Zemin basıncı katsayısı

δ : Zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı

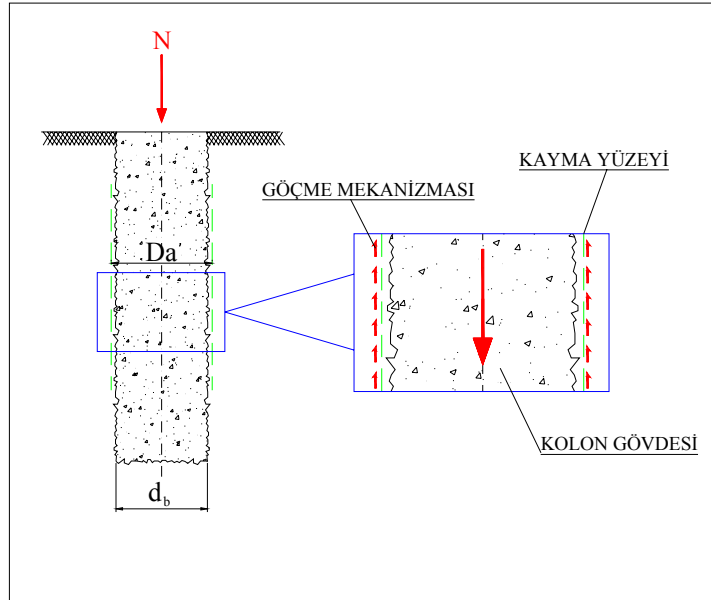
α : Adezyon için azaltma faktörü

c_u : Drenajsız kayma mukavemeti

z : Derinlik

ζ : Uç taşıma gücü için azaltma faktörü

Jetgrout kolonlarının imalat şeklinin bir sonucu olarak jetgrout kolonu ile temas halinde olan zemin sıkıştırılmış olur. Öte yandan jetgrout kolonun kesiti üniform değildir. Bunun sonucu olarak kil veya kohezyonsuz zeminlerde doğal zemin ile jetgrout kolonu arasındaki temas çakma veya forekazıklardan çok daha sıkıdır.



Şekil 3.1 : Jetgrout kolonunun taşıyıcı eleman olarak davranışı (Garassino, 1997)

Jetgrout kolonunun imali ile çevresinde oluşabilecek kayma yüzeyi Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Kayma yüzeyi ile ilgili olarak adhezyon için azaltma faktörü:

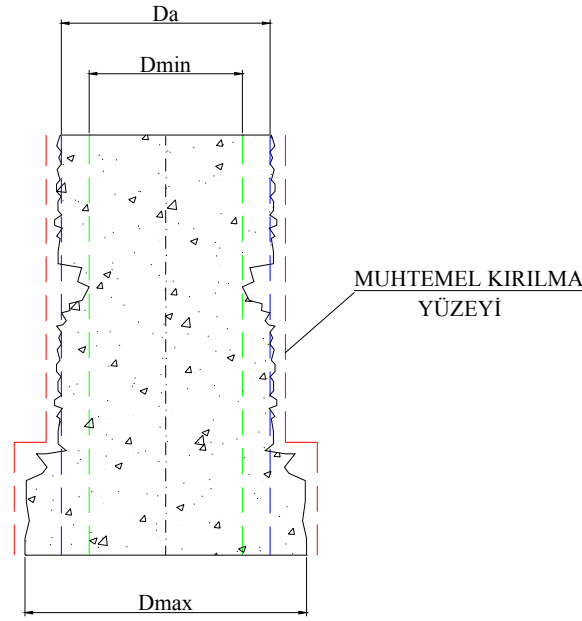
Kohezyonlu zeminlerde

$\alpha = 1$ normal konsolide olmuş zeminlerde

$\alpha = 0.45$ aşırı konsolide olmuş zeminlerde

Granüler zeminlerde $K_s > 1$

Ek olarak belirtilmesi gerekir ki kolon çapının seçimi çok dikkatli yapılmalıdır. Kesinlikle tasarım için kullanılacak ortalama kolon çapı değeri sahada oluşacak çapın güvenli tarafında olacak şekilde düşük ele alınmalıdır.



Şekil 3.2 : Jetgrout kolonunda muhtemel kayma yüzeyi(Garassino, 1997)

Kolon çapının uygun olarak belirlenmesi ve α adezyon için azaltma faktörünün 0.45 veya 1 seçilmesi ya da granüler zeminlerde K_s zemin basıncı katsayısının 1 ila 1.4 arasında seçilmesi ile jetgrout kolonun taşıma gücü belirlenir (Garassino, 1997).

Kazık taşıma gücüne benzer olarak negatif çevre sürtünmesi jetgrout kolonları için de göz önüne alınmalıdır. Derin temellerde olduğu gibi jetgrout kolonu ucu ile zemin arasındaki temas güçlüdür ve uç taşıma gücü kazıklı temellerinkine benzer şekilde yüksektir.

İyileştirilmiş zeminlerin mukavemeti düzgün bir uygulamada killerde 4 MPa ve kumlu çakıllarda 12 MPa kadar yüksek olabilir. Ön yıkama tekniği ile, özellikle killerde, daha yüksek değerler kolaylıkla elde edilebilir(Garassino, 1997).

Jetgrout kolonları için çevre sürtünmesinin tam mobilizasyonu için gerekli oturma miktarı ihmal edilebilir düzeydedir ve uç taşıma gücünün tam mobilizasyonu için gerekli olan oturma miktarıda oldukça düşüktür **(Garassino, 1997)**.

Tablo 3.1 : Granüler zeminlerde kolon tasarımında kullanılan limit değerler**(Garassino, 1997)**

Kazık Tipi	Sürtünme gücü azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç gücü azaltma faktörü
	δ/ϕ	K_s	τ (kPa)	ζ
Fore kazık	0.6	0.5 ~ 0.65	100 ~ 200	0.33 ~ 0.5
Çakma kazık (açık uç)	2 / 3	0.65 ~ 0.95	120	0.7 ~ 0.8
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75	1.0 ~ 1.5	120 ~ 180	1.0
Jetgrout kolonu	1	1.0 ~ 2	≥ 180	1.0

Tablo 3.2 : Kohezyonlu zeminlerde kolon tasarımında kullanılan limit değerler (Garassino, 1997)

Kazık Tipi	Sürtünme gücü azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç kapasitesi azaltma faktörü
	α (Normal konsolide)	α (Aşırı konsolide)	τ (kPa)	ζ
Fore kazık	0.9	0.35	275	0.66
Çakma kazık (açık uç, e: dış, i:iç)	0.95e 0.80i	0.40e 0.35i	200	0.7
Çakma kazık (kapalı uç)	0.95	0.45	200	0.8
Jetgrout kolonu	1	0.45	280	1

3.2 Zeminde Oluşturulmuş Kolonlarla Zemin İyileştirmesi

Zemin iyileştirmesi çeşitli uygulamalarla geniş bir zemin kütlelerinin davranışını değiştirmektir (Garassino, 1997). Hesaplamalar iki şekilde ele alınır birinci yaklaşım taşıma gücüne dayanır. İkinci yaklaşım oturmaların sınırlandırılması esasına göre yapılır. Taşıma gücü hesabı yaklaşımı kendi içinde taşıyıcı elemanların grup taşıma gücü ve blok analizi olarak yine ikiye ayrılır.

3.2.1 Taşıma elemanlarının grup taşıma gücü

Grubun taşıma gücü grup içindeki jetgrout kolonlarının taşıma güçlerinin toplamıdır.

$$P_{ul(grup)} = \beta n m P_{ul(kolon)} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki ifadede:

$P_{ul(grup)}$: Jetgrout kolonu grubunun taşıma gücü

β : Kolon aralıklarına, kolon uzunluklarına, zemin çeşidine, vb özelliklere bağlı azaltım faktörü

n : Yatay yöndeki sıra sayısı

m : Düşey yöndeki sıra sayısı

$P_{ul(kolon)}$: Tek bir jetgrout kolonunun taşıma gücü

3.2.2 Blok analizi

Bloğun taşıma gücü jetgrout kolonu grubunun bütün olarak ele alınmasıdır. Bu durumda grubun oluşturduğu prizmanın yan yüzeylerindeki sürtünme kuvveti ve alt yüzeyindeki taşıma gücü bloğun taşıma gücünü belirler.

$$P_{ul(grup)} = B L Q_b + 2 (B + L) (h_2 Q_{12(ort)} - h_1 Q_{11(ort)}) \quad (3.7)$$

Yukarıdaki ifadede:

B : Blok eni

L : Blok boyu

$P_{ul(grup)}$: Jetgrout kolonu grubunun taşıma gücü

Q_b : H derinliğindeki uç birim taşıma gücü

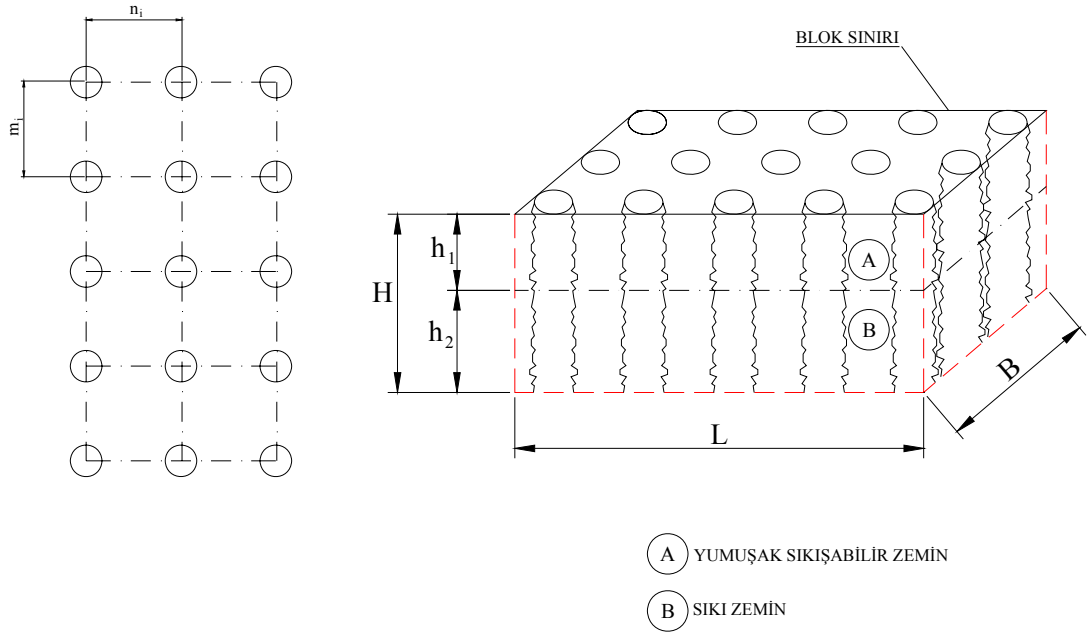
$Q_{12(ort)}$: h_2 derinliğindeki ortalama yanal sürtünme değeri

$Q_{11(ort)}$: h_1 derinliğindeki ortalama yanal sürtünme değeri

h_1 : Negatif yüzey sürtünmesinin üretilebildiği yumuşak tabakanın kalınlığı

h_2 : Kolonun iyice gömüldüğü taşıyıcı tabaka

Eğer negatif yüzey sürtünmesi bulunmuyorsa $h_1 = 0$ ve $h_2 = H$ kabul edilmelidir.

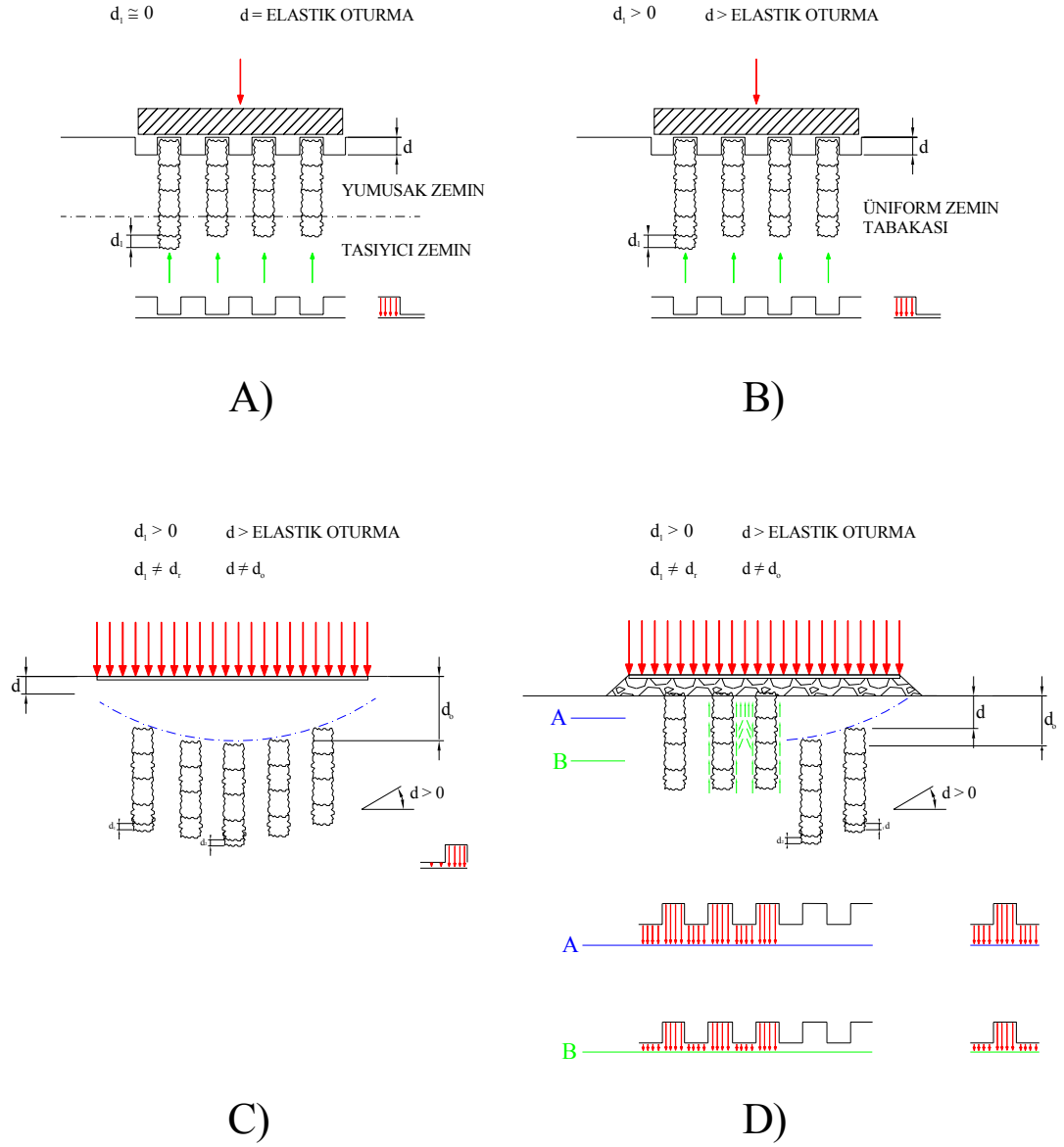


Şekil 3.3 : Jetgrout kolonlarıyla ıslah edilen zeminin blok taşıma gücü (Garassino, 1997)

3.2.3 Oturma analizi

Oturma analizi için oluşabilecek durumlar aşağıda verilmektedir.

- Eğer yük rijit bir temel tarafından jetgrout kolonlarına aktarılıyor ve jetgrout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü ise, bütün yük kolonlar tarafından taşıyıcı katmana aktarılır. Bu durumda oturmalar jetgrout kolonlarının elastik deformasyonu ile sınırlıdır (Şekil 3.4a)
- Eğer yük rijit bir temel tarafından jetgrout kolonlarına aktarılıyor ve jetgrout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü değil ise, kolonlar yüzen kazık şeklinde davranmakta ve yükün büyük bir kısmı jetgrout kolonları tarafından taşınmakta ve küçük bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Bu durumda oturmalar jetgrout kolonlarının elastik deformasyonundan yüksek olur (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4 : Jetgrout kolonlarıyla iyileştirilen zeminlerde oluşabilecek oturmalar (Garassino, 1997).

- Eğer yük üniform bir şekilde esnek bir yüzey tarafından jetgrout kolonlarına aktarılıyor ve jetgrout kolonlarının uçları taşıyıcı bir katman içine gömülü değil ise, yükün büyük bir bölümü jetgrout kolonlarına aktarılmakta uygun orandaki bir kısmı zemin tarafından taşınmaktadır. Oturmalar üniform değildir (Şekil 3.4c).

- 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 3.4d).

Şekil 3.4'e bakıldığında jetgrout kolonlarının sadece 3.4a' da taşıyıcı eleman olarak çalıştığı diğer durumlarda zemin davranışını iyileştiren bir rol oynadığı görülmektedir. Zemin davranışındaki böyle bir değişim iyileştirilmiş zeminin elastisite modülündeki değişimi ile ifade edilebilir.

$$N = n N_c + N_s \quad (3.8)$$

N: Toplam yük

N_c : Kolonlar tarafından taşınan yük

N_s : Zemin tarafından taşınan yük

n: Jetgrout kolonu adedi

$$N_c = A_c q_c = \frac{\pi D^2}{4} q_c \quad (3.9)$$

$$N_s = q_s (A - n A_c) \quad (3.10)$$

$$m = q_c / q_s \quad (3.11)$$

$$a_s = m A_c / A \quad (3.12)$$

A_c : Jetgrout kolonunun kesit alanı

D : Jetgrout kolonunun çapı

q_c : Jetgrout kolonuna gelen düşey basınç

A : Zemin bloğu kesit alan

q_s : Zemine aktarılan spesifik yük

m : Gerilme dağıtım oranı

a_s : Donatı oranı

h : Aktif derinlik

S_s : Zemin oturması

S_c : Kolon oturması

$$S_0 = \frac{N}{A E_s} \quad (3.13)$$

H : İyileştirilmemiş zeminin oturması

S_{imp} : İyileştirilmiş zeminin oturması

$$S_{imp} = \frac{1}{1 + (m-1)a_s} S_0 \quad (3.14)$$

$$\frac{S_s}{H} = \frac{q_s}{E_s} = \frac{N_s}{A_s E_s} \quad (3.15)$$

E_s : Zemin elastisite modülü

E_c : Kolon elastisite modülü

A_s : Zeminin alanı

$$\frac{S_c}{H} = \frac{q_c}{E_c} = \frac{n N_c}{A_c E_c} \quad (3.16)$$

Uyumlu bir deformasyon için zemin ve jetgrout kolonlarının oturmaları birbirine eşit kabul edilebilir.

$$S_c \approx S_s \quad (3.17)$$

$$\frac{N_s}{(A - n A_c) E_s} = \frac{n N_c}{A_c E_c} = \frac{N}{A E_{eq}} \quad (3.18)$$

E_{eq} : İyileştirilmiş zeminin elastisite modülü

$$E_{eq} = \left[(A - n A_c) E_s + n A_c E_c \right] \frac{1}{A} \quad (3.19)$$

Çözüm deneme yanılma yöntemiyle bulunur. Denklem (3.19) ilk deneme için yaklaşık bir tahmin verir.

Zemin iyileştirmesi yöntemi olarak jetgrout kolonlarının arasındaki mesafe azaltıldıkça jetgrout yönteminin verimliliği artmaktadır. Kolonlar arası mesafenin azalmasıyla kolonlara aktarılan yük artmakta ve farklı oturmalar azalmaktadır (**Garassino, 1997**).

Jetgrout kolonları üzerinde oluşan spesifik yükün kolon mukavemetinden düşük olduğu kontrol edilmelidir (**Garassino, 1997**).

3.3 Motak ve Diğerleri Yöntemi

Birçok bilim adamının da belirttiği gibi jetgrout uygulamasının taşıma gücünün belirlenmesi için tasarım aşamasında yaygın olarak kullanılan bir metot bulunmamaktadır. Kazıklı temeller standardı PN-83/B-02482 (**Kazıkların taşıma**

gücü ile ilgili Polonya Şartnamesi) jetgrout kolonlarını içermemektedir. Bu konuda 1995 yılına kadar uluslararası hiçbir yayın bulunmamaktaydı.

Jetgrout kolonlarının taşıma gücünün tahmini için hesap yöntemi Polonyalı bilim adamları **Zmudzinski ve Motak (1995a)** ve de **Gwizdala ve Motak (1996)**, tarafından incelemişlerdir. Çalışmaları şimdiye kadar yapılmış yükleme deneyleri ve kendi yaptıkları analizler üzerine dayanır ve ayrıca jetgrout kolonları ile mikro kazıkların benzerlikleri üzerine çalışmaları da bulunmaktadır.

Avrupa standardı EN 12716:1997 (**Özel geoteknik uygulamalarla ilgili Avrupa standardı**) da jetgrout yönteminin tasarımı ile ilgili çok az şey söylenmektedir.

1997-1 “Eurocode 7 : part 1” e göre tasarım varsayımları uygulama sırasında elde edilen bilgiler ışığında gerektiğinde değiştirilip geliştirilmelidir. Enjeksiyon malzemesinde beklenen gerilmelerin ve mukavemet değerlerinin değişiminin olduğu kontrol edilmelidir. Eurocode 7 ilave olarak temel zeminin takviyesinde veya şev stabilitesinde kullanılan enjeksiyon malzemesinin genel dengesinin tahkikini şart koşar.

Polonyalı bilim adamları **Zmudzinski ve Motak (1995a)** ve de **Gwizdala ve Motak (1996)** jetgrout kolonlarının taşıma gücü hesabını Polonya standardı PN-83/B-02482 (**Kazıkların taşıma gücü ile ilgili Polonya Şartnamesi**) yi kullanarak açıklamışlardır.

$$Q_r \leq m N, \quad (3.20)$$

Basınca maruz kazıklarda

$$N = N_t = S_p q^{(r)} A_p + \sum S_{si} t_i^{(r)} A_{si} \quad (3.21)$$

Çekmeye maruz kazıklarda

$$N = N^w = \sum S_{si}^w t_i^{(r)} A_{si} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki formüllerde

Q_r : Hesaplanan kazık taşıma gücü, çekme ya da basınç.

m : Temel altındaki kazık adedine bağlı değişen düzeltme

N_t, N^w : Hesaplanan kazık basınç taşıma gücü, çekme taşıma gücü

S_p, S_{si}, S_{si}^w : Kazık ve zemin tipine göre değişen teknoloji katsayıları.

$q^{(r)}, t_i^{(r)}$: Zeminin tabanda veya kazık boyunca gösterdiği birim tasarım direnci.

A_p, A_{si} : Kazık taban alanı ve kazık yan yüzü alanı.

Zmudzinski ve Motak (1995a) yapılmış pek çok Fransız kolon yükleme deneyi sonucunda aşağıdaki formülün kullanılmasını önermektedir.

Basınca çalışan jetgrout kolonlarında:

$$N_t = 1.1 \sum t_i^{(r)} A_{si} \quad (3.23)$$

Çekmeye çalışan jetgrout kolonlarında:

$$N^w = \sum t_i^{(r)} A_{si} \quad (3.24)$$

$$t_i^{(r)} = \gamma_m t_i^n \quad (3.25)$$

$t_i^{(r)} = \gamma_m \times t_i^n$ Kazık yanal tasarım birim direncinin değeridir ve m değeri basınç kazıkları için $m = 0.7$ ve çekme kazıkları için $m = 0.65$ olarak ele alınmıştır. Kazık yanal yüzünün birim sürtünme direncinin, t^n karakteristik değeri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için tablo 3.3 ve 3.4 ‘den alınabilir (**Zmudzinski ve Motak, 1997a**). Tablolardaki değerler PN-83/B-02482 (**Kazıkların taşıma gücü ile ilgili Polonya Şartnamesi**) kazık standardındaki değerlerden ortalama 1.9 kat büyüktür.

Gwizdala ve Motak (1996) basınca çalışan jetgrout kolonlarının yük taşıma gücünün tahmininde 5 yükleme deneyinden sonra aşağıdaki formülün kullanılmasını önermişlerdir.

Basınca çalışan jetgrout kolonlarının yükleme kapasitesi:

$$N_t = q^{(r)} A_p + \sum t_i^{(r)} A_{si} \quad (3.26)$$

Yukarıdaki formüllerde

$q^{(r)} = \gamma_m \cdot q^n$: Birim tarasım taban direnci, kPa,

q^n : Açık uçlu kazıklar birim taban direnci değeri, kPa ,

$\gamma_m \leq 0.9$: malzeme katsayısı, Polonya standardı PN-81/B-03020 [28]’a göre $\gamma_m = \gamma_m(I_L)$,

Düzeltilme katsayısı $m = 0.7$ ve teknoloji katsayıları $Sp = Ssi = 1.0$ almakla birlikte ŻMUDZIŃSKI ve MOTAK’a göre formül (3.26) da q^n değerini enjeksiyon olmayan kazıklar için tablo 3.5 ve 3.6’dan ve jetgrout kolonları için t^n değerini 3.3 ve 3.4 ‘den almak gerekir (**Zadroga, 2000**).

Tablo 3.3 : Kohezyonsuz zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının kıvam indeksi I_D 'ye göre karakteristik yanal birim sürtünme direnci t^n (kPa) değeri

Zemin tipi	t^n (kPa) $I_D=0.20$	t^n (kPa) $I_D=0.33$	t^n (kPa) $I_D=0.60$	t^n (kPa) $I_D=0.67$	t^n (kPa) $I_D=0.80$	t^n (kPa) $I_D=0.90$
Çakıl, Kumlu çakıl	60	83	115	140	163	180
Kaba ve orta kum	50	72	105	130	153	160
İnce ve siltli kum	45	60	82	100	114	125

Tablo 3.4 : Kohezyonlu zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının likit indeksi I_L 'ye göre karakteristik yanal birim sürtünme direnci t^n (kPa) değeri

Zemin tipi	t^n (kPa) $I_L<0$	t^n (kPa) $I_L=0$	t^n (kPa) $I_L=0.25$	t^n (kPa) $I_L=0.50$	t^n (kPa) $I_L=0.65$	t^n (kPa) $I_L=0.75$
Az killi kum, Sıkı killi kum	135	110	80	50	30	18
Az killi sıkı kum, kil	125	100	70	40	25	14
Silt, Kumlu silt	110	85	75	35	20	9

Gwizdala ve Motak (1996)'ın çalışmaları diğerlerinininkinden farklıdır çünkü sadece taşıma gücünün belirlenmesiyle sınırlandırılmamıştır. Onların çalışmaları ayrıca oturmaların tahmini de içerir. Bu fonksiyon kazık oturmasının ampirik tanımını kazık uç ve yanal direncine bağlı olarak ayrı ayrı verir. Deneysel data farklı ölçekli deneyler ve yükleme deneylerine dayanır. Betonarme fore kazıklar için çok fazla yükleme datası olmasına rağmen jetgrout kolonları için durum böyle değildir. Dolayısıyla kullanılan formüllerin kesinliği göreceli olarak daha düşük olabilir.

Tablo 3.5 : Kohezyonsuz zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının kıvam indeksi I_D 'ye göre limit taban birim direnci q^n (kPa) değeri

Zemin tipi	q^n (kPa) $I_D=1.00$	q^n (kPa) $I_D=0.67$	q^n (kPa) $I_D=0.33$	q^n (kPa) $I_D=0.20$
Çakıl, Kumlu çakıl	7750	5100	3000	1950
Kaba ve orta kum	5850	3600	2150	1450
İnce kum	4100	2700	1650	1050
Siltli kum	3350	2100	1150	700

Jetgrout kolonlarının boyutlandırılmasında bahsedilmiş olan modern yöntemler hala tam olarak yeterli olamamaktadır. Çelik donatılı betonarme kazıklarla ilgili hesaplama ilkeleri, yönetmelikler ve çalışmaların jetgrout için uyarlanması bazı şüpheleri beraberinde getirir. Çünkü ampirik formüller dayanan bu hesaplama yöntemlerinde çağımızın nümerik modelleme ve analiz imkanlarının kullanılmamaktadır. Buna ilave olarak PN-83/B-02482 (**Kazıkların taşıma gücü ile ilgili Polonya Şartnamesi**) standardı ve tablo 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6 da belirtilen değerler sadece zemin tipine ve zemin durumuna göre hesaplamalar yapılmasını sağlar. Aşırı konsolidasyon oranı gibi jeolojik geçmişi ifade eden faktörler göz ardı edilir.

Tablo 3.6 : Kohezyonlu zeminlerde yapılan jetgrout kolonlarının likitite indeksi I_L 'ye göre limit taban birim direnci q^n (kPa) değeri

Zemin tipi	q^n (kPa) $I_L<0$	q^n (kPa) $I_L=0$	q^n (kPa) $I_L=0.50$	q^n (kPa) $I_L=0.75$
Az killi kumlu çakıl, çakıl- kum- kil karışımı	4150	2750	1650	850
Az killi kum, Az killi siltli kum	2750	1950	850	450
Az killi sıkı kum, Sıkı Az killi siltli kum, kumlu kil, kil, siltli kil	2800	1950	800	400
Kumlu silt, silt	1850	1250	500	250

Jetgrout kolonlarının boyutlandırılmasının temel esasları için bir diğer sakınca da çimento-zemin malzemesinin karakteristiğinin farklılığını göz ardı etmesidir. Bu jetgrout kolonunun mukavemetini kolonu çevreleyen zeminin cinsi, durumu ve geçmiş ile olan alakasını hesaplamalarda veri olarak kullanılmasını olanaksızlaştırır.

3.4 Jetgrout Kolonlarının Taşıma Gücünün Sayısal Yöntemlerle Hesabı

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte inşaat mühendisliği problemlerinin çözümünde sayısal yöntemlerden faydalanmak yaygınlaşmıştır. Bu tezin kapsamında da jetgrout kolonunun taşıma gücünün hesaplanması için sayısal yöntemlere başvurulmuştur.

Zemin mekaniği problemlerinin çözümü için yaygın olarak kullanılan sayısal analiz programlarından bir tanesi de Plaxis yazılımıdır. Bu çalışmada jetgrout kolonunun taşıma gücünün tahmini için Plaxis yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal yöntemlerin jetgrout kolonunun taşıma gücünün hesaplanmasında kullanılabilirliğini ispatlamak için arazide yapılmış jetgrout yükleme deneyleri sayısal ortamda tekrarlanmış ve yükleme deneylerinin sonuçları ile sayısal analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.4.1 Plaxis yazılımı

Plaxis geoteknik uygulamaları için hazırlanmış zemin davranışını zemin modelleri ile çözümleyen bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Plaxis yazılımı çok dikkatli ve özenli bir çalışmanın ürünü olması ve birçok deneyin ve onaylama çalışmasının yapılmasına rağmen hatalar içermediği söylenemez. Buna ilave olarak zemin mekaniği problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak modellenmesi bazı hataları kaçınılmaz kılmaktadır. Modelleme sonuçlarının gerçek koşullara olan yakınlığı kullanıcının modelleme sürecinde zemin koşullarını ve sınırlamalarını belirlemesi, zemin parametrelerini seçimi ve sayısal hesaplama sonuçlarını inceleme yeteneğine fazlası ile bağlıdır. Bunun sonucu olarak Plaxis gibi mühendislik sayısal analiz yazılımlarının sadece konu ile ilgili tecrübe ve yeterliliği olan kişiler tarafından kullanılmalıdır. Kullanıcı oluşturduğu sayısal modelin sonuçlarını tasarım yaparken kullanırken aldığı sorumluluğun bilincinde olmalıdır (**Plaxis kullanım kılavuzu, 2002**).

Plaxis yazılımında zemin modellenmesinde kullanılan birçok zemin davranışı yaklaşımı vardır. Bu çalışmada Mohr-Coulomp zemin davranışı seçilmiştir. Plaxis programında kullanılan zemin davranışı yaklaşımları aşağıda özetlenmiştir.

Lineer elastik model (Lineer elastik model) : Bu yaklaşım izotropik lineer elastik malzemelerin davranışlarının Hooke kanununa uygunluğu esasına dayanır. Zeminin davranışını belirleyen başlıca 2 parametre vardır. Bunlar E, elastisite modülü ve ν , Poisson oranıdır.

Lineer elastik modelin zemin davranışının modellenmesinde kullanımı kısıtlıdır. Genellikle zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesi için kullanılır.

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

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.

Hardening soil model (Sertleşmiş zemin modeli) : 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.

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 (**Plaxis kullanım kılavuzu, 2002**).

3.4.2 Zemin koşullarının sayısal ortama akarılması

Sayısal ortamda zemin koşullarının doğru olarak tasarlanması için zeminin tanımlayıcı parametrelerinin Plaxis sayısal yazılımına doğru olarak girilmesi gerekir. Zemin koşullarının doğruluğu tutarlı bir tasarım için şarttır.

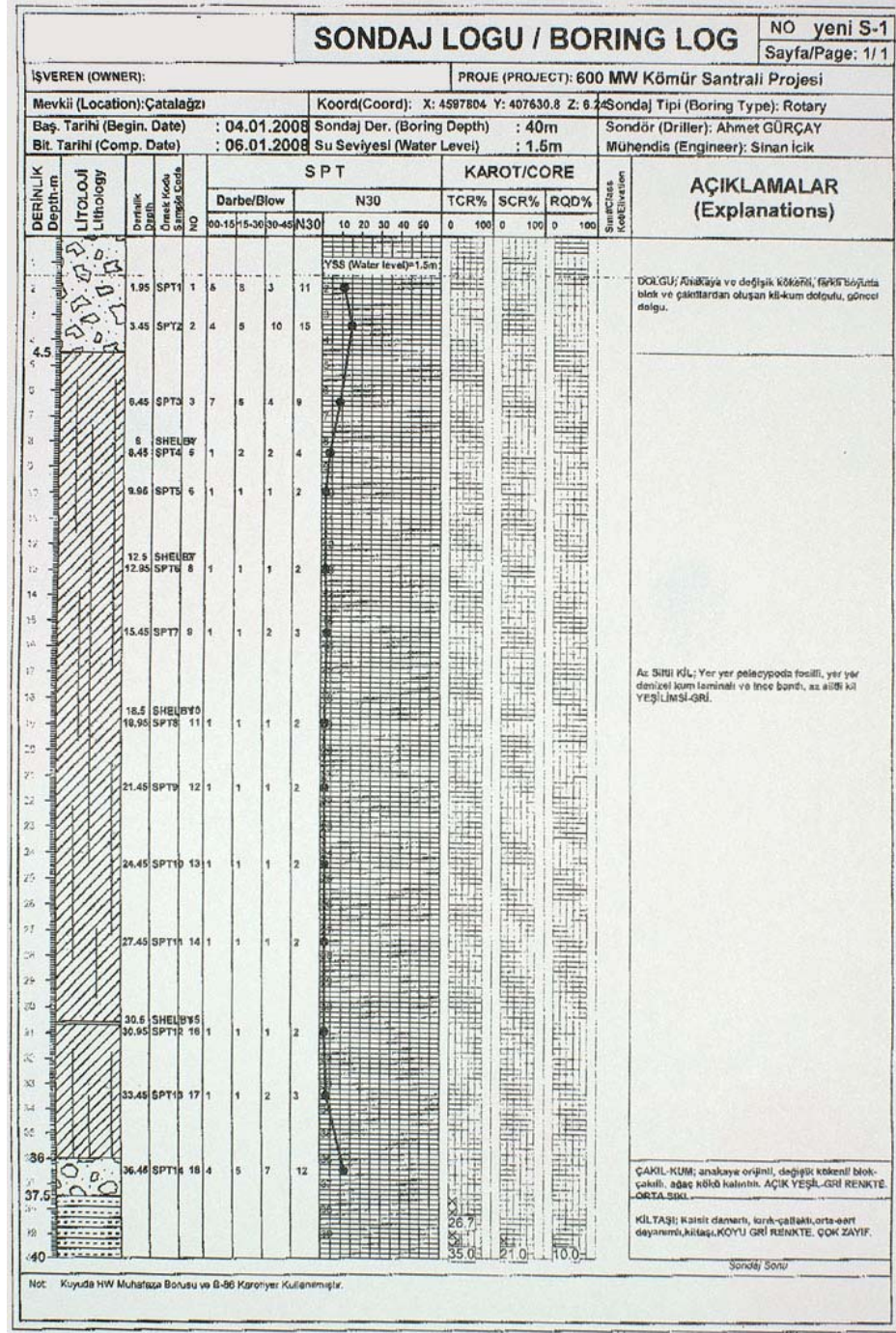
Sayısal analiz için iki farklı jetgrout yükleme deneyinden faydalanılmıştır. Bunlardan ilki Zonguldak/Çatalağzı termik sahasında uygulanan jetgrout kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyleri ikincisi **Bzowka (2004)**'nin çalışmalarında kullandığı jetgrout yükleme deneyidir. Bu deneylerden Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahasında uygulanan jetgrout kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyi ince daneli zeminde, **Bzowka (2004)**'nin çalışmalarında kullandığı jetgrout yükleme deneyi ise kaba daneli zeminde yapılmıştır.

Sayısal analiz için faydalanılan iki örnekten ilki Zonguldak/Çatalağzı termik sahasında uygulanan jetgrout kolonlarının modellenmesidir. Bu kapsamsa sahanın zemin özellikleri GEOSAN AŞ. tarafından kasım 2006 tarihinde hazırlanan geoteknik inceleme raporundan faydalanılmıştır.

İnceleme alanında yapılan 12 sondajla derlenen verilere göre zemin kesitleri belirlenmiştir. Sondajlar ilk ince ve kaba daneli bir Alüvyon içinde devam etmiş ve bölgenin ana kayasını oluşturan kumtaşı içerisinde tamamlanmıştır. Alüvyon, silt ve kum ardalaşmalarından oluşmaktadır. Silt tabakası, kumlu, seyrek ince çakıllı, seyrek bitki köklü, açık kahverengi ve yeşilimsi koyu gri renklidir. Kum tabakaları, siltli, çakıllı, killi, bitki köklüdür. Ana kayadan ayrılmış olanları sarımsı kahverengi renkleri ve yüksek SPT değerleri ile yeşilimsi gri renkli alüvyon kumlarından ayrılmaktadır. Jetgrout kolonları alüvyon tabakasında bulunduğundan zemin modellenirken alüvyon tabakasının parametrelerinden faydalanılmıştır.

Yapılan zemin incelemesi sonucunda alüvyon tabakası silt ve kum ardalaşmasından oluştuğu ve kalınlığı 5.0 ~ 18.5 m arasında değiştiği belirtilmiştir. bu tabakada yapılmış olan SPT deneylerine göre düzeltilmiş SPT-N değerleri 2 ~ 17 arasında hesaplanmıştır. Birbirine sık geçişli olan bu birimi kohezyonlu ya da kohezyonsuz olarak ayırt etmek güçtür. Bu tabaka kumlu silt ve killi kumlu silt' tir, plastisitesi

düşüktür ve USC sistemine göre ML, CL olarak isimlendirilir. Yumuşak-Orta Katı kıvamlıdır. Bu numune üzerinde üç adet üç eksenli kesme deneyi yapılmıştır. Buna göre bulunan drenajsız kayma dayanımı değerleri ise, $c_u = 18.0 \sim 21.0 \sim 30.0$ kPa ve $\phi_u = 3^\circ \sim 6^\circ \sim 7^\circ$ olarak bulunmuştur. Zonguldak/Çatalağzı termik santral yapılan sondajlar sonucu elde edilen sondaj logu şekil 3.5’ de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahasında çıkartılan sondaj logu

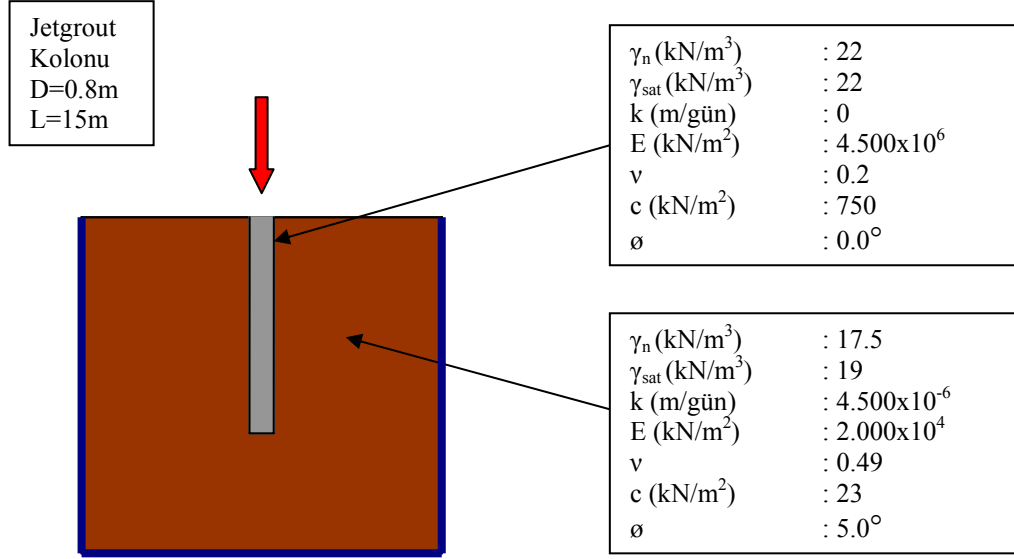
Ortalama olarak $c_u = 23.0$ kPa ve $\phi_u = 5^\circ$ kabul edilebilir.

Zeminin elastisite modülü $E_s = 20000$ kPa, ve permeabilite katsayısı $k = 3 \times 10^{-4}$ cm/dak olarak alınması tavsiye edilmiştir.

Zonguldak/Çatalağzı termik santrali sahasında yükleme deneyi yapılan zeminin ve oluşturulan jetgrout kolonlarını için kabul edilen geoteknik özellikler aşağıdaki Tablo 3.7’de özetlenmiştir. Zonguldak/Çatalağzı termik santrali sahasında yükleme deneyi yapılan zeminin ve oluşturulan jetgrout kolonlarını için kabul edilen geoteknik özellikler Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.7 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin ve jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri

	Alüvyon	Jetgrout kolonu
γ_n (Doğal birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	17.5	22
γ_{sat} (Suya doymuş birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	19	22
k (Permeabilite katsayısı) (m/gün)	4.5×10^{-6}	0
E (Elastisite modülü) (kN/m ²)	2×10^4	4.5×10^6
v (Poisson oranı)	0.49	0.2
c (Kohezyon) (kN/m ²)	23	750
ϕ (Kayma mukavemeti açısı)	5.0°	0.0°

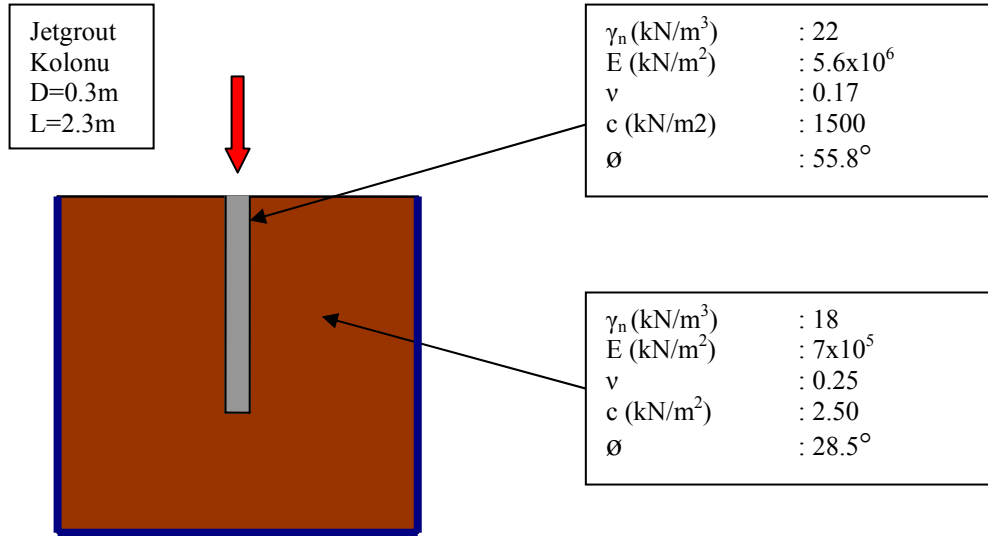


Şekil 3.6 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin ve jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri

Sayısal analiz için faydalanılan iki örnekten ikincisi olan **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında faydalandığı jetgrout yükleme deneyi ise nispeten küçük ölçekte yapılmış bir deneydir. Kolon çapı 300 mm ve kolon boyu 2.3 m mertebesinde. **Bzowka (2004)**'nın yükleme deneyini yaptığı orta sıkılıkta kum zeminin ve oluşturulan jetgrout kolonları için kabul edilen geoteknik özellikler aşağıdaki Tablo 3.8'de özetlenmiştir. **Bzowka (2004)**'nın yükleme deneylerinde zeminde su bulunmamaktadır. Böyle durumlarda permeabilite katsayısının sıfır kabul edilmesi genel bir yaklaşımdır. Kum geçirgen bir yapıya sahip olsa da zeminde su bulunmadığı için kumu geçirimsiz olarak Plaxis programında tanımlamak daha doğru olmaktadır. Şekil 3.7 de de **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında kullanılan zemin ve jetgrout kolonu için öngörülen geometrik parametreler gösterilmiştir.

Tablo 3.8 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullanılan zemin ve jetgrout kolonu için öngörülen geometrik parametreler

	Kum	Jetgrout kolonu
γ_n (Tabii birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	18	22
E (Elastisite modülü) (kN/m ²)	7×10^5	5.6×10^6
ν (Poisson oranı)	0.25	0.17
c (Kohezyon) (kN/m ²)	2.5	1500
ϕ (Kayma mukavemeti açısı)	28.5°	55.8°



Şekil 3.7 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullanılan zemin ve jetgrout kolonu için öngörülen geometrik parametreler

Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahasındaki zemin için Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 'da Plaxis sayısal analiz yazılımında girdi olarak seçilen zemin parametreleri görülebilir. Bu parametrelerin bazıları (G_{ref} , E_{oed} , V_s , V_p) Plaxis tarafından otomatik olarak aşağıdaki formüllere dayanarak belirlenmektedir.

$$G_{ref} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.27)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (3.28)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.29)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (3.30)$$

$$\rho = \gamma/g \quad (3.31)$$

Yukarıdaki ifadelerde:

G_{ref} : Kayma modülü

E_{oed} : Ödometre modülü

ν : Poisson oranı

V_s : Kayma dalgası hızı

V_p : Basınç dalgası hızı

γ : Zeminin birim hacim ağırlığı

ρ : Zeminin yoğunluğu

Mohr-Coulomb - ZonguldakAluvion

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification: ZonguldakAluvion

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 17.500 kN/m³

γ_{sat} : 19.000 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 4.500E-06 m/day

k_y : 4.500E-06 m/day

Advanced...

Next Ok Cancel Help

Şekil 3.8 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki alüvyon tabakasının zemin genel parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi

Mohr-Coulomb - ZonguldakAluvion

General | Parameters | Interfaces

Stiffness

E_{ref} : 2.000E+04 kN/m²

ν (nu): 0.490

Strength

c_{ref} : 23.000 kN/m²

ϕ (phi): 5.000 °

ψ (psi): 0.000 °

Alternatives

G_{ref} : 6711.409 kN/m²

E_{oed} : 3.423E+05 kN/m²

Velocities

V_s : 59.630 m/s

V_p : 425.800 m/s

Advanced...

Next Ok Cancel Help

Şekil 3.9 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki alüvyon tabakasının zemin geoteknik parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi

3.4.3 Sayısal ortamda jetgrout kolonunun modellenmesi

Jetgrout hemen hemen portland çimentosu betonu gibi davranır. Genellikle doğrusal olmayan elastik bir şekil değiştirmenin ardından gevrek bir kırılma ile geçer(Coulter S, 2004).

Zonguldak/Çatalağzı'nda yapılan jetgrout kolonları sayısal ortamda oluşturulurken kullanılacak parametreler aşağıda Şekil 3.10 ve 3.11 'de gösterildiği gibi alınmıştır (Chan M, 2005).

Bzowka (2004)'nın yaptığı jetgrout yükleme deneyinin modellenmesinde ise kendi önerdiği parametreler kullanılmıştır. Her iki örnekte de jetgrout kolonun geoteknik özellikleri zemin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Jetgrout kolonu betonarme kazıkların aksine çevresindeki zemini sıkıştırarak ve boşluklarını doldurarak zemini iyileştirici etki yapar. Bu etkinin jetgrout kolonu modellemesi yapılırken göz önüne almak için jetgrout kolonları malzemesi için kohezyon tanımlanmıştır.

The image shows a software interface for defining material properties. The title bar reads 'Mohr-Coulomb - JG-plug'. The interface is divided into several sections. On the left, under 'Material Set', there are three fields: 'Identification' with the value 'JG-plug', 'Material model' set to 'Mohr-Coulomb' via a dropdown, and 'Material type' set to 'Non-porous' via a dropdown. To the right, under 'General properties', there are two fields for unit weight: 'γunsat' and 'γsat', both set to '22.000' with units of 'kN/m³'. Below these, under 'Permeability', there are two fields for permeability coefficients: 'k_x' and 'k_y', both set to '0.000' with units of 'm/day'. A large empty text box labeled 'Comments' is located below the material set fields. At the bottom right of the main content area is a button labeled 'Advanced...'. At the very bottom of the dialog are four buttons: 'Next', 'Ok', 'Cancel', and 'Help'.

Şekil 3.10 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonunun genel parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi

Şekil 3.11 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonunun geoteknik parametrelerin Plaxis yazılımına girilmesi

3.4.4 Sayısal yöntemlerle jetgrout kolonun yük altındaki davranışının incelenmesi

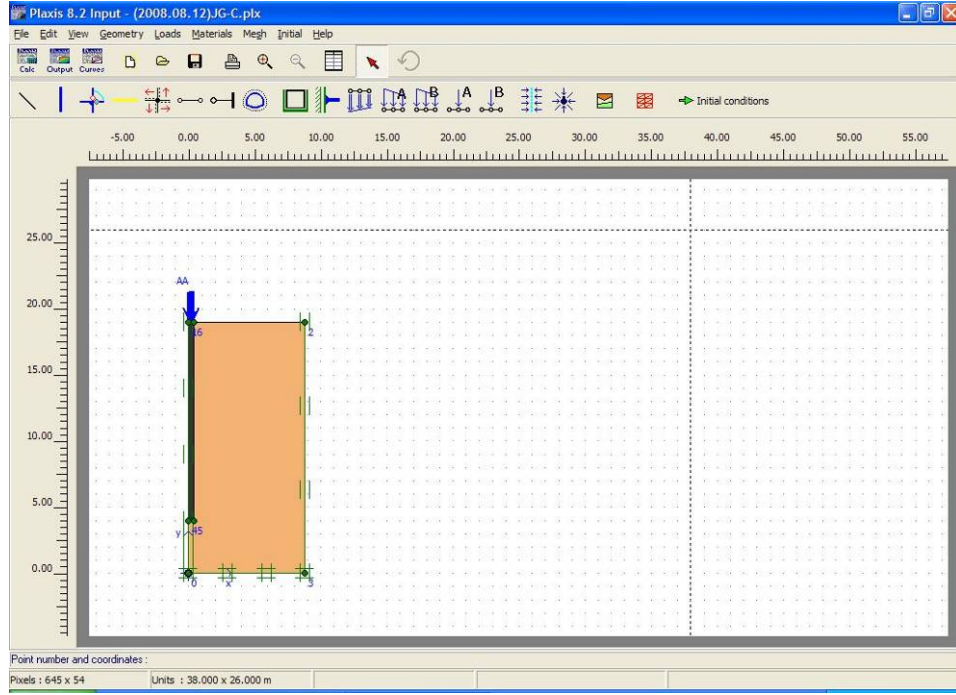
Jetgrout kolonu taşıma gücü hesabı için Plaxis yazılımında modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde temel bir yaklaşım olması açısından tek bir jetgrout kolonu oluşturulmuş ve üzerlerine düzgün yayılı yükleme yapılmıştır. Jetgrout kolonu simetrik bir eleman olduğu için modellemelerde simetri eksenini kullanılarak kolonun tek tarafı modellenerek simetrik bir sistem tasarlanmıştır. Jetgrout kolonu malzemesi ve zemin özellikleri iki deney içinde yukarıda bahsedildiği gibidir. Sayısal ortamda tanım uzayının sınırları yatay ekseninde yarıçapı kolon çapının 11 katı, düşey ekseninde kolon boyundan kolon çapının 5 katı daha fazla olarak belirlenmesi yeterlidir (Zmudzinski ve Motak, 1997a).

Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahası için hazırlanan modelde yer altı su seviyesi yüzey seviyesinin 1 m altında düşünülmüştür. Jetgrout kolonunun çapı 0.80 m ve boyu 15 m' dir. Jetgrout kolonu üzerine etkitilen yük herhangi bir yükleme deneyinde olacağı gibi kademe kademe etkilmiştir. Jetgrout kolonu üzerine her kademedeki etkitilen yükler Tablo 3.9 de gösterilmiştir. Jetgrout kolonu üzerine etkitilen azami yük servis yükünün 2 katı olan 67.5 t'dur.

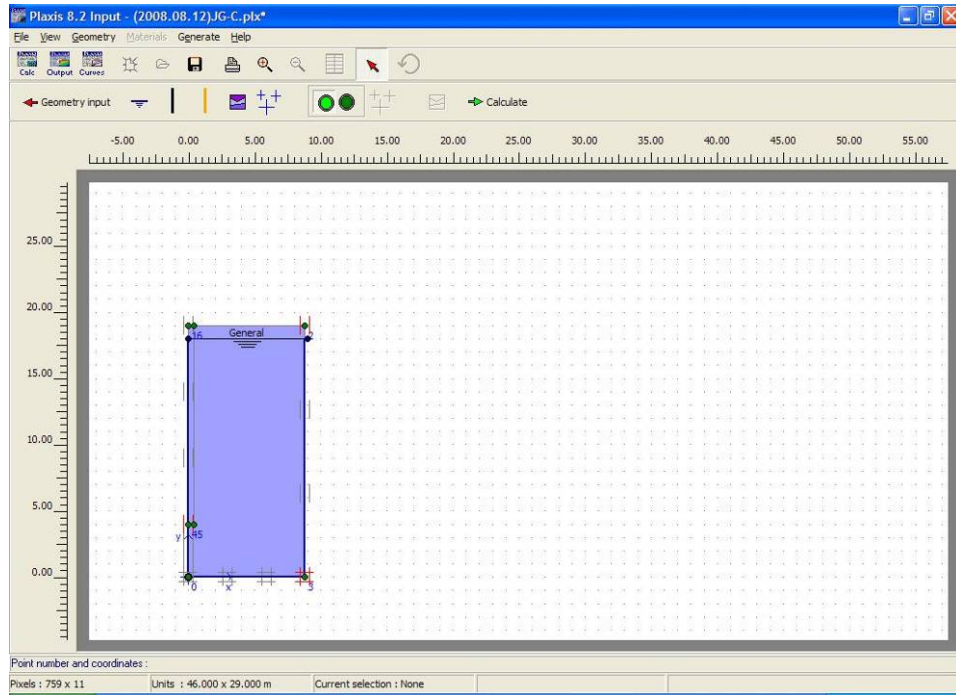
Tablo 3.9 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonu üzerine etkitilen yük kademeleri

Deney Yükü	Yük Yüzdesi (%)	Yük (ton)
	0	0.00
	25	8.44
	50	16.88
	75	25.31
$Q_{den}/2$	100	33.75
	75	25.31
	50	16.88
	25	8.44
	0	0.00
	25	8.44
	50	16.88
	75	25.31
	100	33.75
	125	42.19
	150	50.63
	175	59.06
Q_{den}	200	67.50
	175	59.06
	150	50.63
	125	42.19
	100	33.75
	75	25.31
	50	16.88
	25	8.44
	0	0.00

Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonu için Plaxis yazılımında tasarlanan model Şekil 3.12’de görülebilir. Şekil 3.13 ‘da ise Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelindeki yeraltı su seviyesi görülebilir.



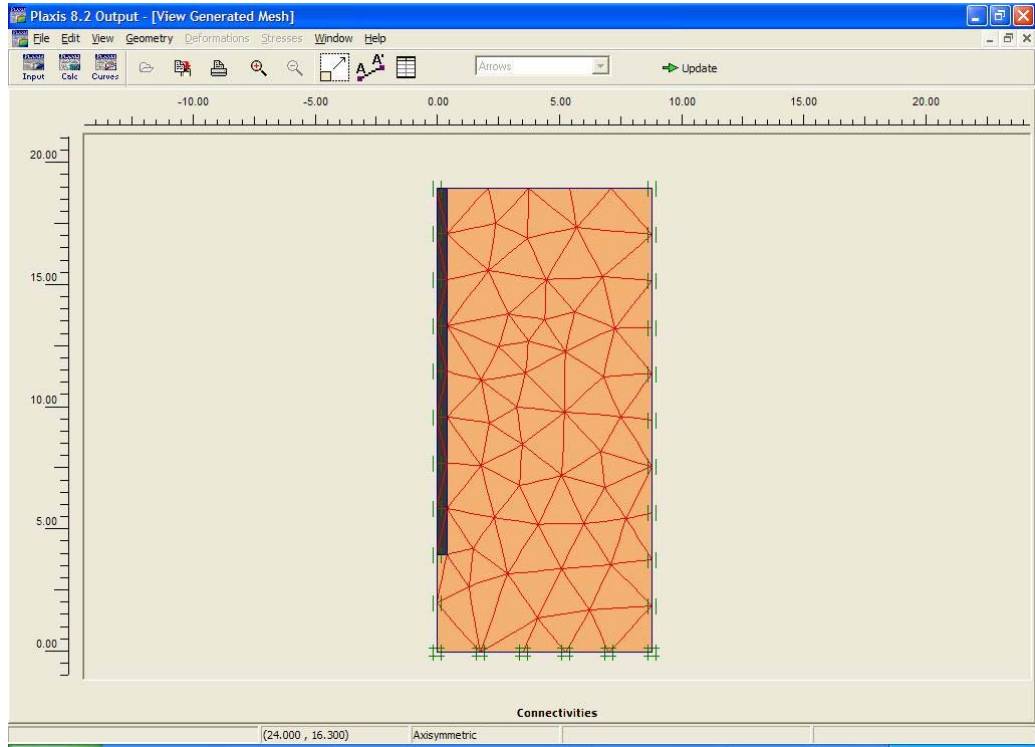
Şekil 3.12 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasındaki jetgrout kolonun Plaxis modeli



Şekil 3.13 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde yeraltı su seviyesi

Plaxis geoteknik uygulamaları için hazırlanmış zemin davranışını zemin modelleri ile taklit eden bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan

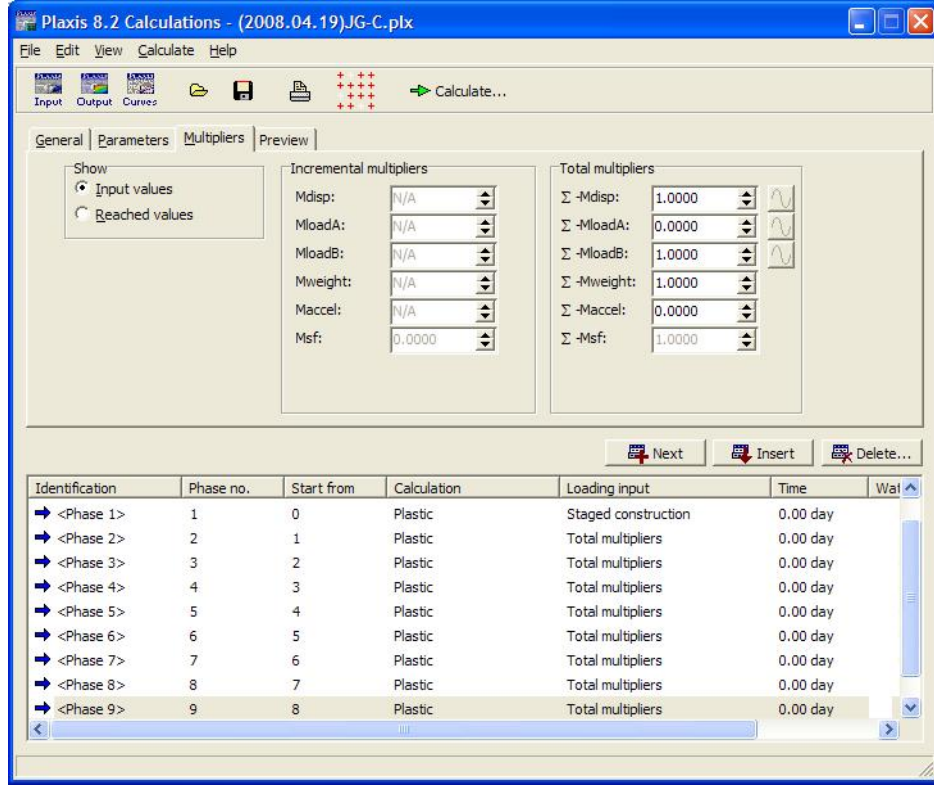
sayısal analiz yazılımları oluşturulan modelleri sonlu sayıda parçaya böler ve bu parçaların birbiri ile etkileşimini hesaplayarak ana şeklin davranışını ortaya koyar. Bu nedenle tutarlı bir modelleme için parça sayısını ve boyutunu doğru belirlemek gerekmektedir. Parça sayısını arttırmak yani parça boyutunu küçültmek daha kesin sonuçların ortaya çıkmasını sağlasa da gereğinden fazla sayıda parçanın hesaplanması analizin sonucunda elde edilen datanın yorumlanmasını güçleştirecektir. Zonguldak/Çatalağzı termik santral sahasındaki jetgrout kolonu modelinin analiz için oluşturulan parçaları Şekil 3.14’de görülebilir.



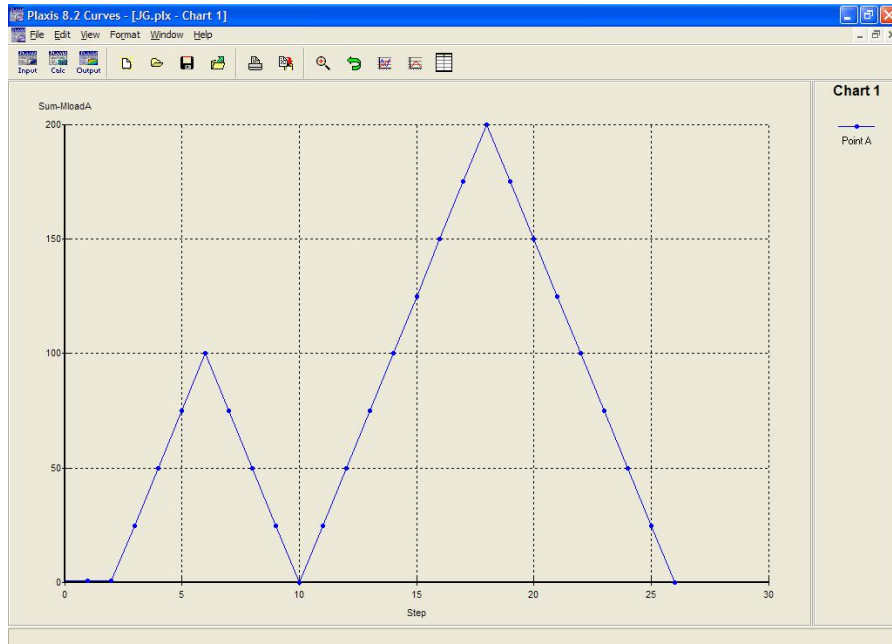
Şekil 3.14 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde parçalama

Jetgrout kolonunun taşıma gücünün tahmini için oluşturulan Plaxis yazılımı modelinde bir kolon yükleme deneyi taklit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre hedeflenen taşıma gücü yükü kademe kademe yüklenmiştir. Yükleme kademeleri Plaxis yazılımında Phase olarak adlandırılır ve her kademede yük katsayısı değiştirilerek yük değerleri değiştirilmiştir. Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde ilk önce %25’lik artımlarla taşıma gücünün %100’üne denk gelen yük değerine ulaşılmış daha sonra bu yük yine %25’lik adımlarla 4 kademede kaldırılmıştır. Daha sonra kolon tekrar yüklenmiştir ve %25’lik artımlarla taşıma gücünün %200’üne karşı gelen yük değerine ulaşılmıştır. Daha sonra bu yük yine

%25'lik adımlarla 8 kademe kaldırılmıştır. Bu yükleme adımları Şekil 3.15'de görülebilir. Şekil 3.16'da yükleme yüzdelerin hesap aşamalarına karşı gelen eğri



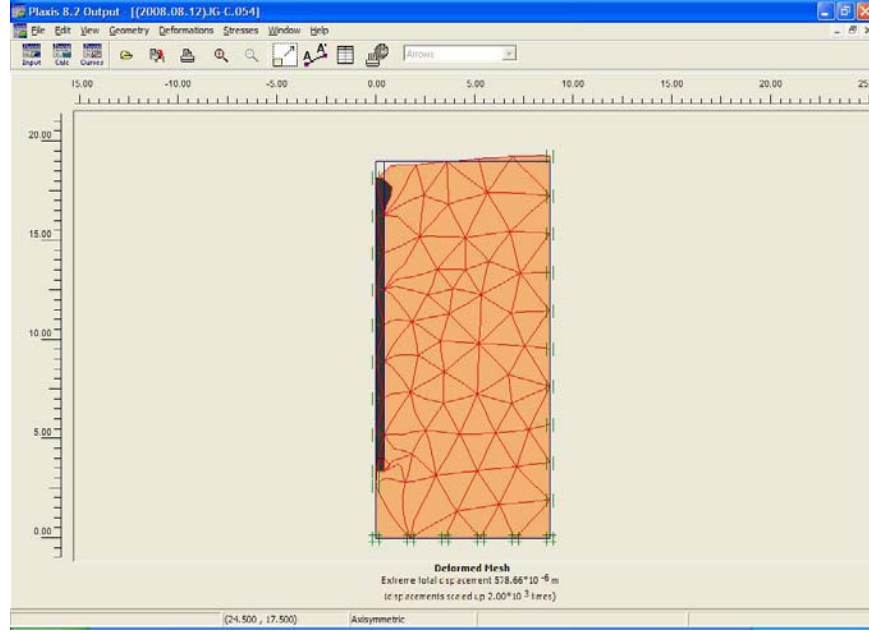
Şekil 3.15 : Plaxis modelinde oluşturulan yükleme kademeleri



Şekil 3.16 : Plaxis modelinde oluşturulan yükleme yüzdelerin hesap adımları ile değişimi

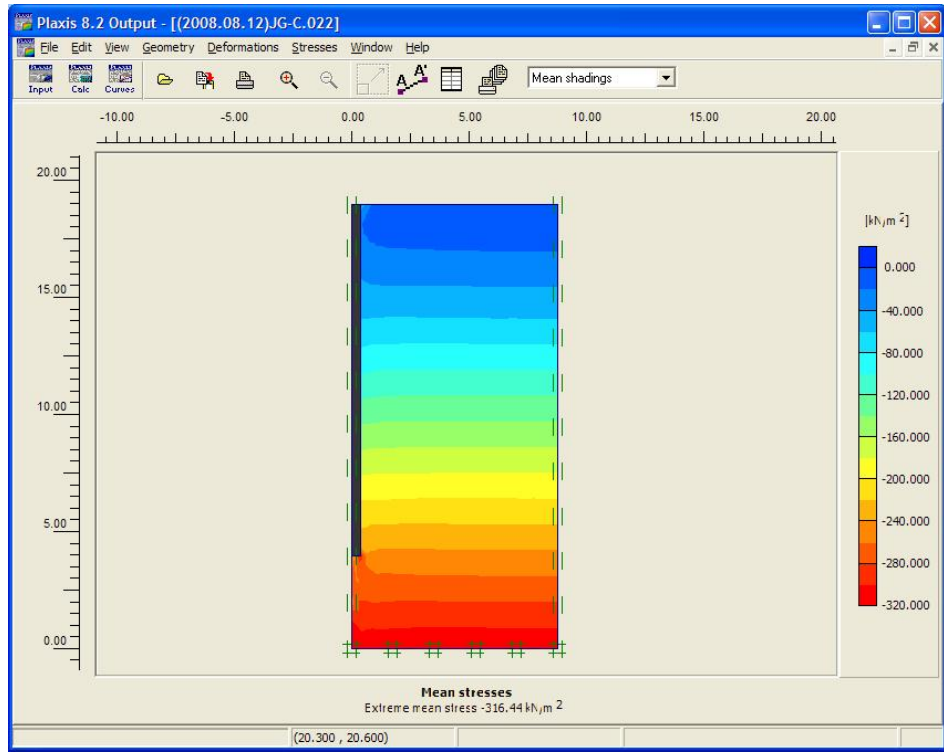
Her kademenin sonunda kolonda meydana gelen oturmalar belirlenmiş ve her yükleme kademesine oluşan oturmalara göre bir yükleme boşaltma eğrisi çizilmiştir.

Yük kademeleri sonunda oluşan oturmalar Plaxis yazılımında Şekil 3.17’de görülebildiği gibi grafik olarak görülebilmektedir.

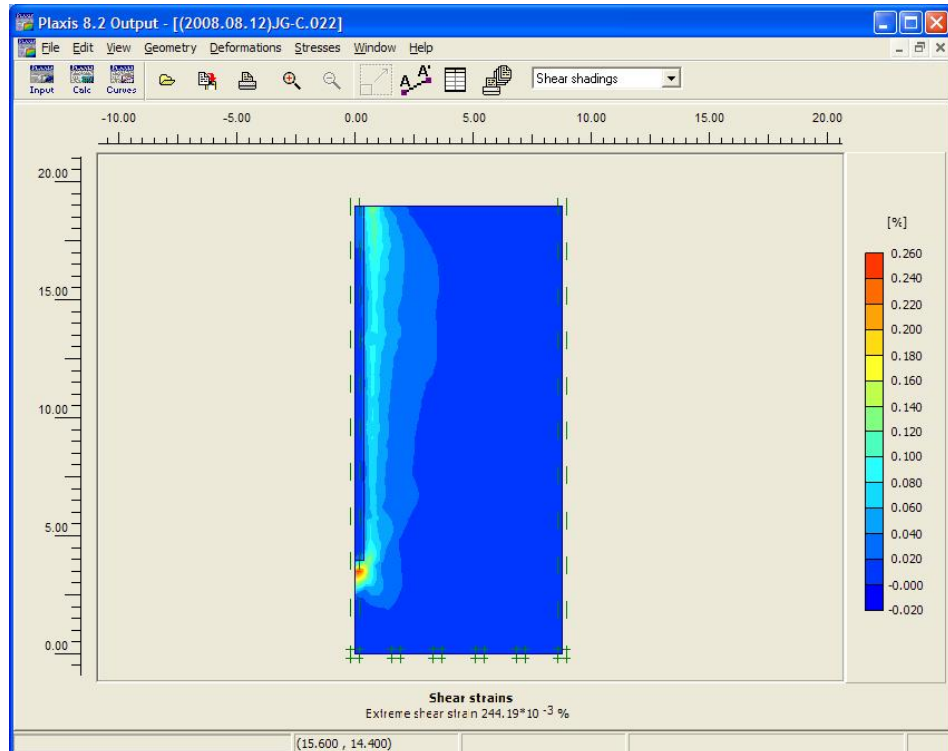


Şekil 3.17 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan oturmalar

Jetgrout kolonuna etkitilen 67.5 t yük altında zeminde oluşan gerilmeler şekil olarak Şekil 3.18’de görülebilir. Şekil 3.19’de ise yine aynı yük altında zeminde oluşan kayma deformasyonu görülebilir.

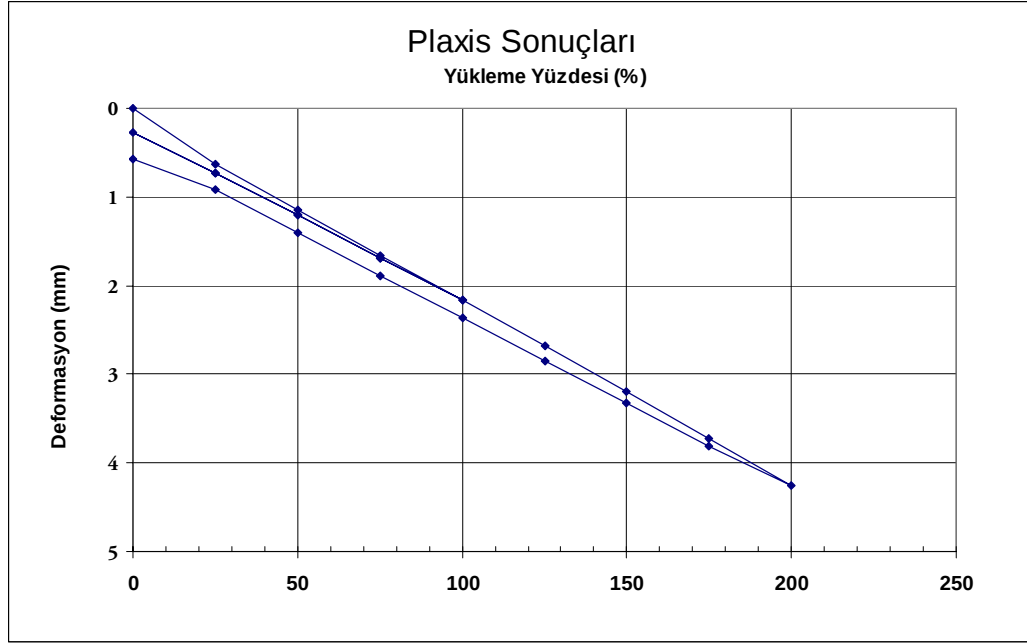


Şekil 3.18 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan gerilmeler

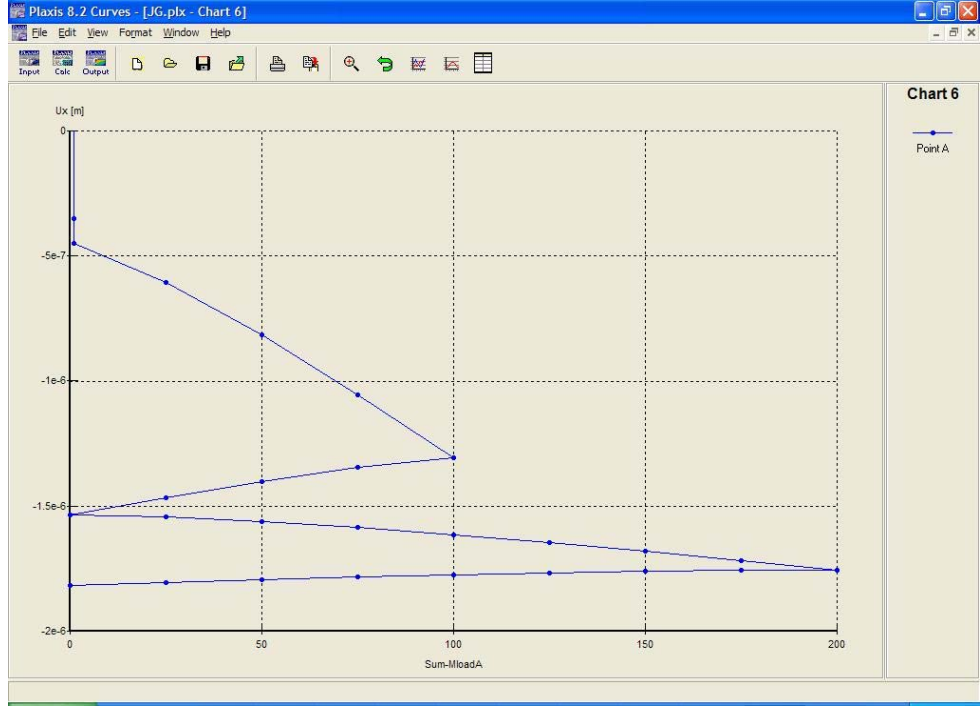


Şekil 3.19 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde oluşan kayma deformasyonu

Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde her kademede oluşan yük deformasyon eğrisi Şekil 3.20’de görülebilir. Görülebileceği gibi yük altında oluşan deformasyon beklenen seviyede oluşmaktadır. Jetgrout kolonu yük altında deformasyon yapmakta, yük azaltıldığında ise deformasyonlar azalmakta, fakat jetgrout kolonu ilk konumuna dönememektedir. Şekil 3.21’de Plaxis yazılımının otomatik eğri çizim özelliği kullanılarak elde edilmiş yükleme yüzdesi kümülatif deformasyon eğrisi görülmektedir.

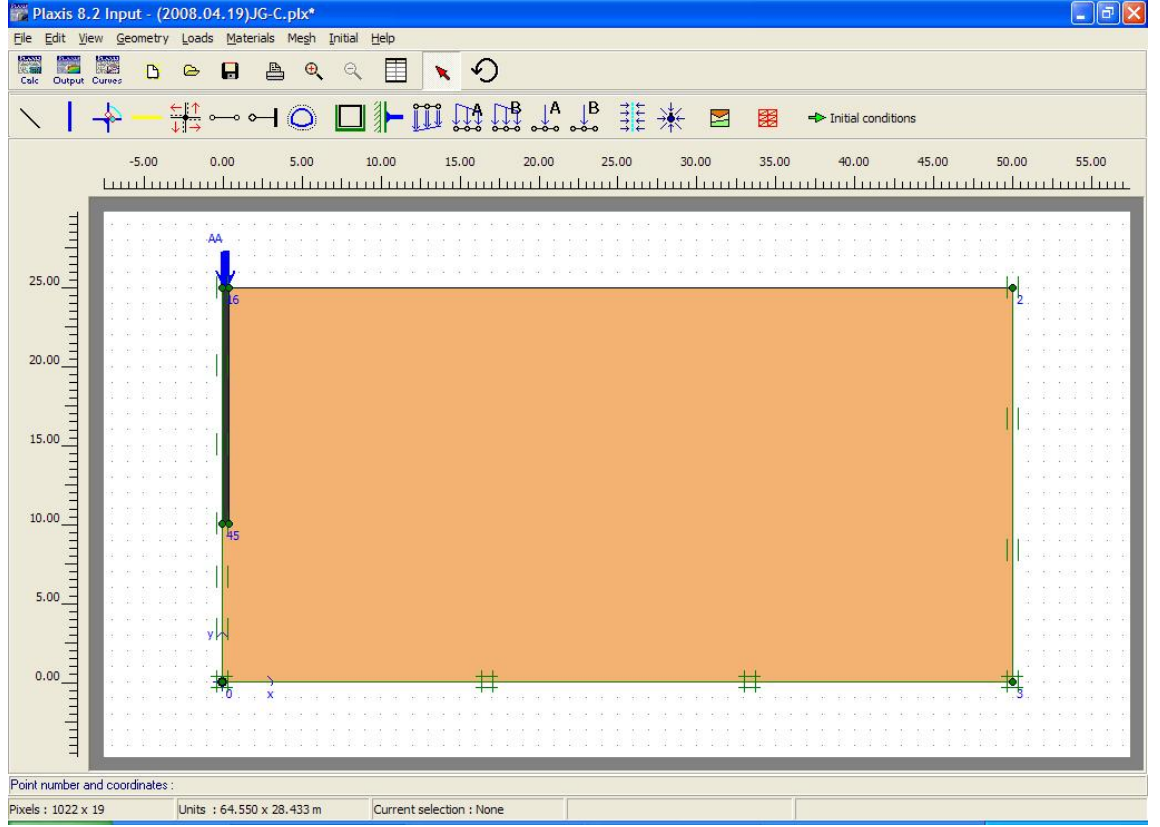


Şekil 3.20 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme deformasyon eğrisi



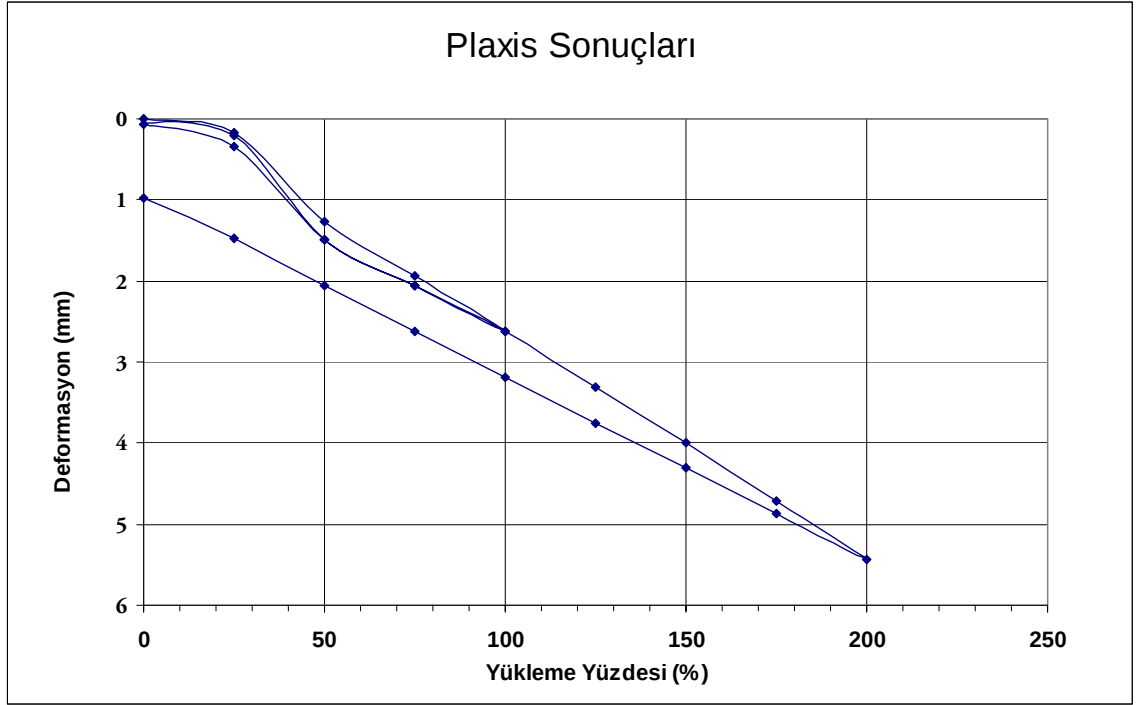
Şekil 3.21 : Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme yüzdesi kümülatif deformasyon eğrisi

Daha önce de belirtildiği gibi sayısal ortamda tanım uzayının sınırları yatay ekseninde yarıçapı kolon çapının 11 katı, düşey ekseninde kolon boyundan kolon çapının 5 katı daha fazla olarak belirlenmesi yeterlidir (**Zmudzinski ve Motak, 1997a**). Bu çalışmada da bu kurala uyulmuştur. Bu çalışmada belirtilen bu tanım uzayının sınırları genişletilirse elde edilecek sonuçlar da incelenmiştir. Tanım uzayının sınırlarının genişletilmesi halinde oluşan model Şekil 3.22’de görülebilir.



Şekil 3.22: Genişletilmiş tanım uzayına sahip Plaxis modeli

Genişletilmiş tanım uzayına sahip modelde yapılan analiz sonuçları **Zmudzinski ve Motak'ın (1997a)** önerdiği tanım uzayına sahip modelin analiz sonuçlarına yakındır. Bu da gösteriyor ki **Zmudzinski ve Motak'ın (1997a)** önerdiği tanım uzayı ile oluşturulan model yeterli hassasiğe sahip olmakta ve daha geniş tanım uzayına ve dolayısı ile daha karmaşık bir modellemeye gerek kalmamaktadır. Genişletilmiş tanım uzayına sahip Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme deformasyon eğrisi Şekil 3.23'de gösterilmiştir.



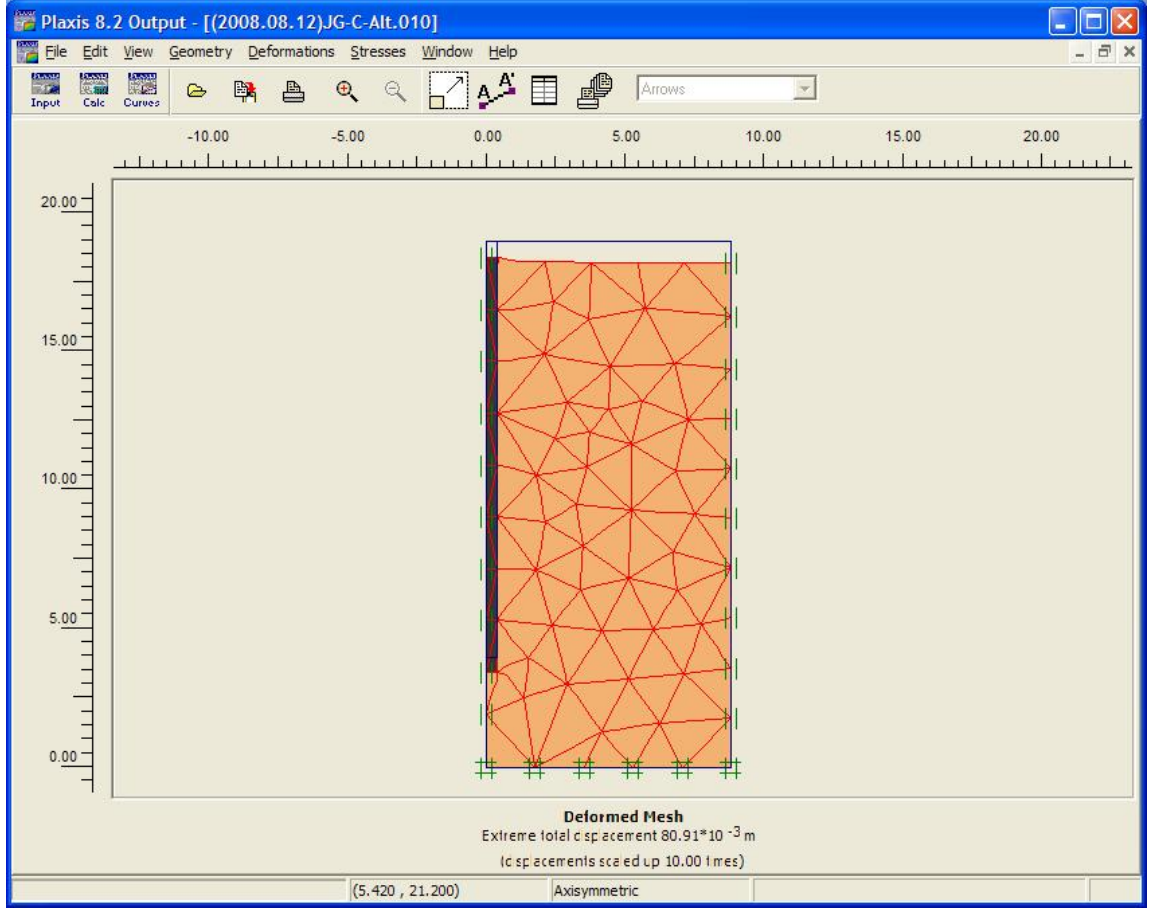
Şekil 3.23 : Genişletilmiş tanım uzayına sahip Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahası Plaxis modelinde yükleme deformasyon eğrisi

Plaxis yazılımında zemin modellenmesinde kullanılan birçok zemin davranışı yaklaşımı vardır. Bu çalışmada Mohr-Coulomp zemin davranışı seçilmiştir. Bunun dışında alüvyon zeminlerde de kullanılabilinecek bir zemin davranımı yaklaşımı olarak soft soil model (yumuşak zemin modeli) de denenmiştir. Şekil 3.24’de Soft soil model yaklaşımı ile jetgrout yükleme deneyi sonucu görülebilir.

Bu yaklaşımda jetgrout kolonu servis yükünün %50 si yani 17 t altında göçmüştür. Bu modelde kullanılan parametreler sahada yapılmış geoteknik rapordan alınmıştır ve tablo 3.10’da özetlenmiştir.

Tablo 3.10 : Zonguldak/Çatalağzı saha zemininin yumuşak zemin modeli parametreleri

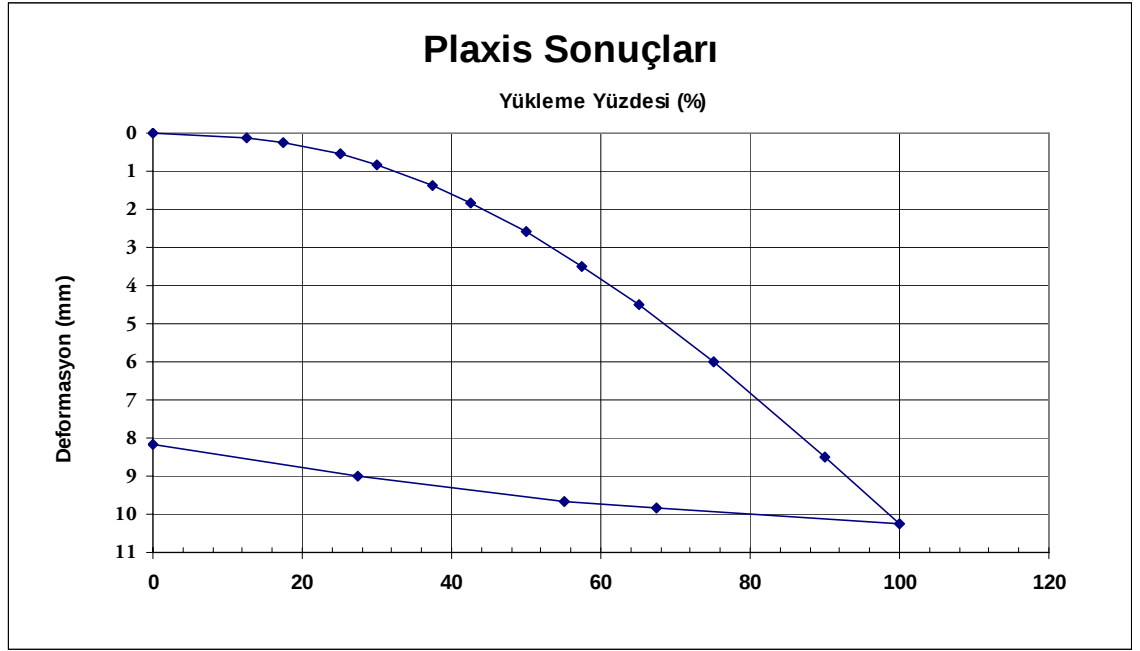
	Alüvyon
C_c (Sıkışma indisi)	0.3
C_s (Şişme indisi)	0.05
e_{init} (Başlangıç boluk oranı)	0.7



Şekil 3.24: Soft soil model yaklaşımı ile jetgrout yükleme deneyi sonucu görülebilir.

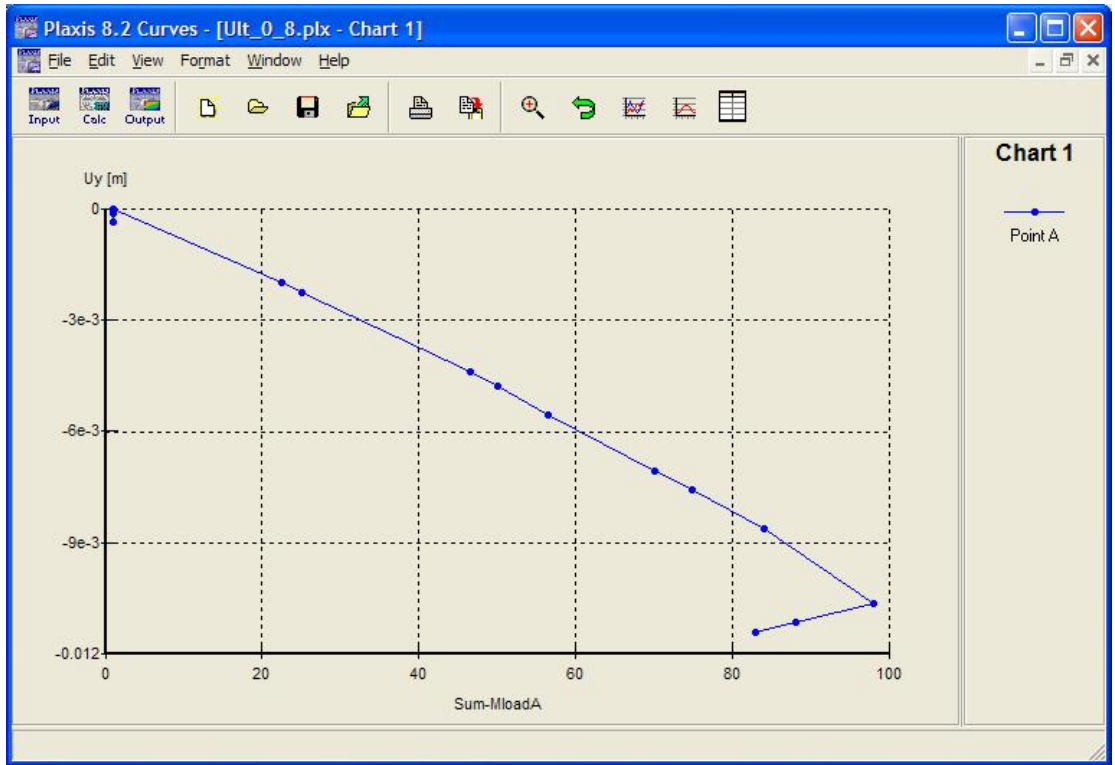
Yukarıdaki grafikte görülebileceği gibi yumuşak zemin modeli yaklaşımı altında Zonguldak/Çatalağzı alüvyon sahasında yapılan yükleme deneyinin Plaxis modeli sahadaki davranışı yansıtamamaktadır. Bu modelde jetgrout kolonu 17 t yük altında 81 mm oturma göstermiş ve zeminde göçme oluşmuştur. Bunun sonucu olarak yumuşak zemin modelinin belirtilen yükleme deneyinin modellenmesine uygun olmadığı görülmüştür.

Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullandığı jetgrout yükleme deneyinin Plaxis modelinde her kademedede oluşan yük deformasyon eğrisi ise Şekil 3.25'de görülebilir. **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında faydalandığı jetgrout yükleme deneyi ise nispeten küçük ölekte yapılmış bir deneydir. Kolon çapı 300 mm ve kolon boyu 2.3 m mertebesindedir.

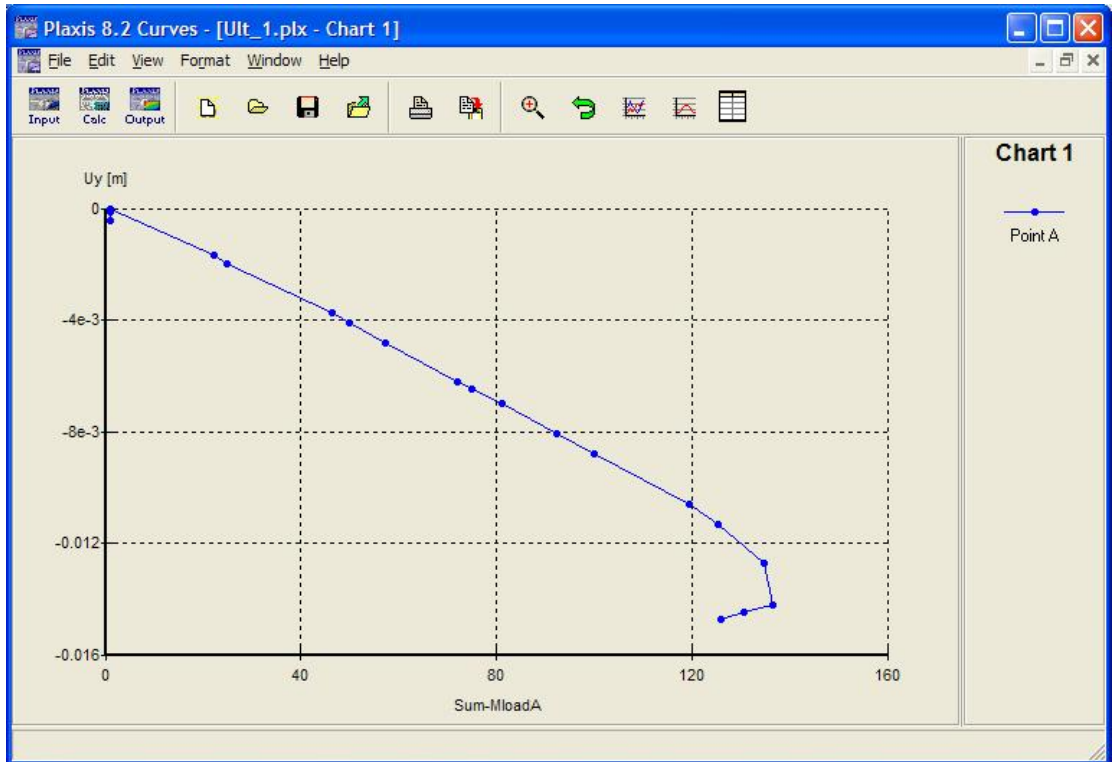


Şekil 3.25 : Bzowka(2004)'nın çalışmalarında kullanılan yükleme deneyinin Plaxis modelinde jetgrout kolonunda oluşan yükleme deformasyon eğrisi

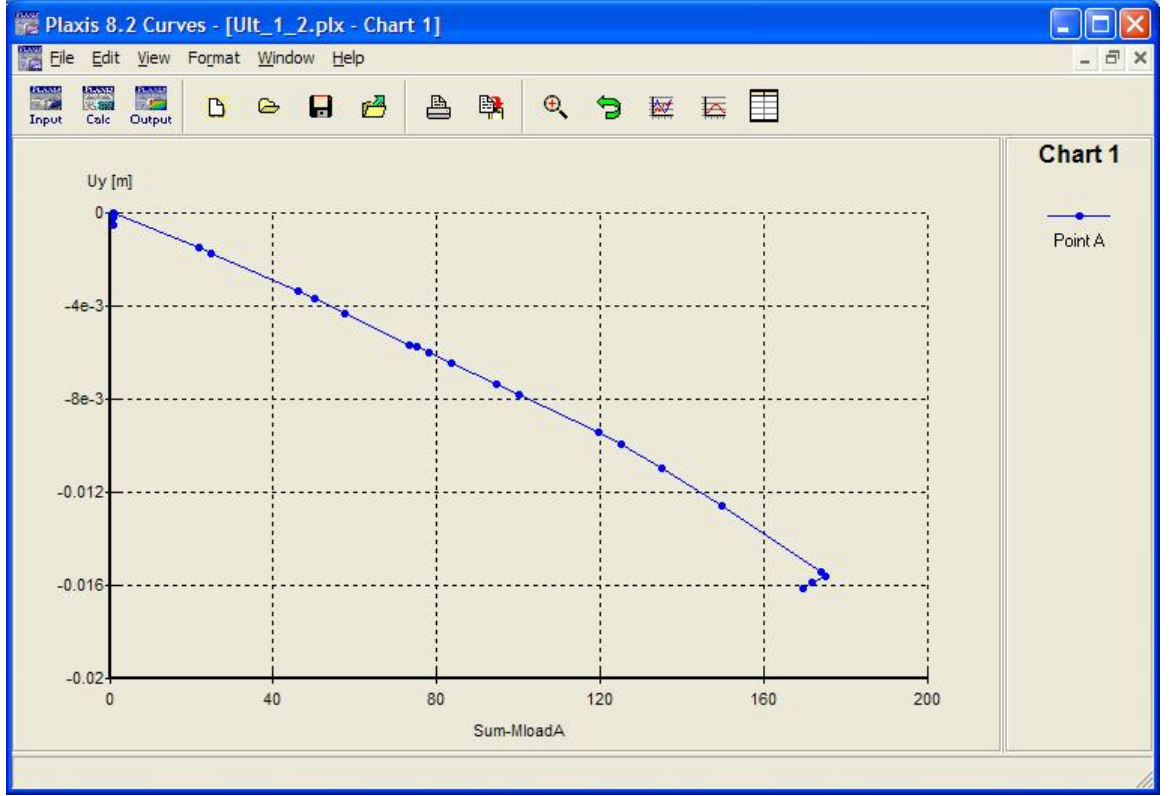
Zonguldak/Çatalağzı'nda yapılmış jetgrout kolonlarının sayısal modeli üzerinde yapılan bir başka analiz ise jetgrout kolonlarının göçme yükünün belirlenmesi için yüklemeyi göçme oluncaya kadar 25 t luk adımlarla arttırmak olmuştur. Bu analizde geri boşaltma yapılmayıp düşey yük kolon taşıma gücü aşıncaya kadar arttırılmıştır. Bu analiz 0.8m, 1m ve 1.2m çaplı jetgrout kolonu modelleri üzerinde tekrarlanmış ve göçme yükü ile kolon çapı arasındaki ilişki incelenmiştir.



Şekil 3.26 : 0.8m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki



Şekil 3.27 : 1.0m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki



Şekil 3.28 : 1.2m çaplı jetgrout kolonunun Plaxis yazılı ile göçme yükü tahkiki

Şekil 3.26, 3.27 ve 3.28 de farklı çaplarda jetgrout kolonu modelleri için elde edilen yük – deformasyon eğrileri görülebilir. Bu şekillerde de görüldüğü gibi kolon çapının artırılması ile göçme yükü de artmaktadır. Aşağıda tablo 3.11 da sayısal analiz sonucu belirlenen farklı çaplardaki jetgrout kolonlarının Zonguldak/Çatalağzı sahası zeminindeki göçme yükleri ve güvenlik katsayısı 3 olarak ele alınırsa izin verilebilir taşıma gücü özetlenmiştir.

Tablo 3.11 : Farklı çapta Jetgrout Kolonları için belirlenen azami ve izin verilebilir Yük Taşıma Güçleri

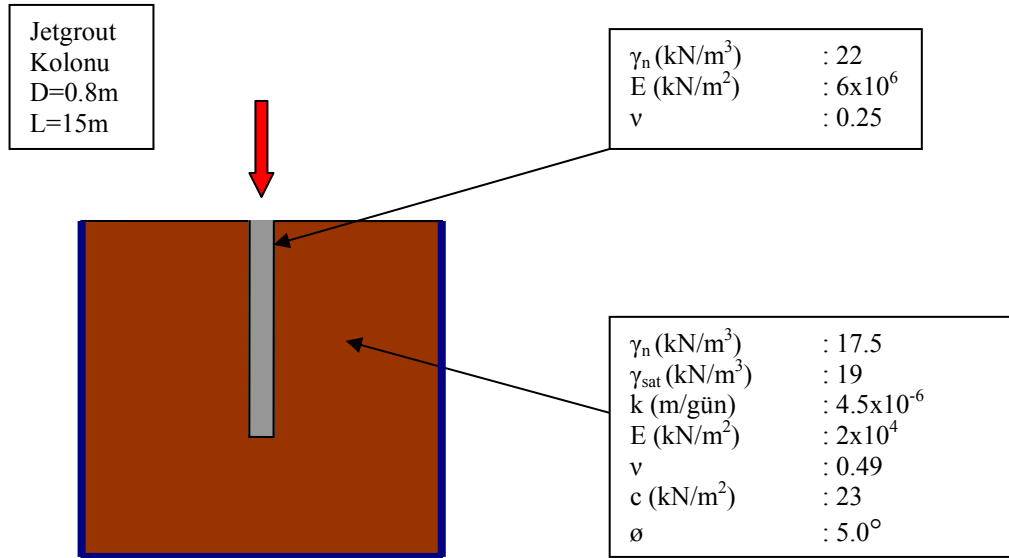
Jetgrout Kolonu Çapı (m)	Azami Taşıma Gücü (t)	İzin verilebilir Taşıma Gücü (t)
0.8	90	30
1.0	140	45
1.2	175	58

Yukarıdaki örnekte jetgrout kolonlarının zemin ile olan sürtünmesinin betonun zemin ile sürtünmesinden daha fazla olması jetgrout kolonu malzemesinde kohezyon belirtilerek ifade edilmişti. İkinci bir model olarak jetgrout kolonu malzemesi sayısal

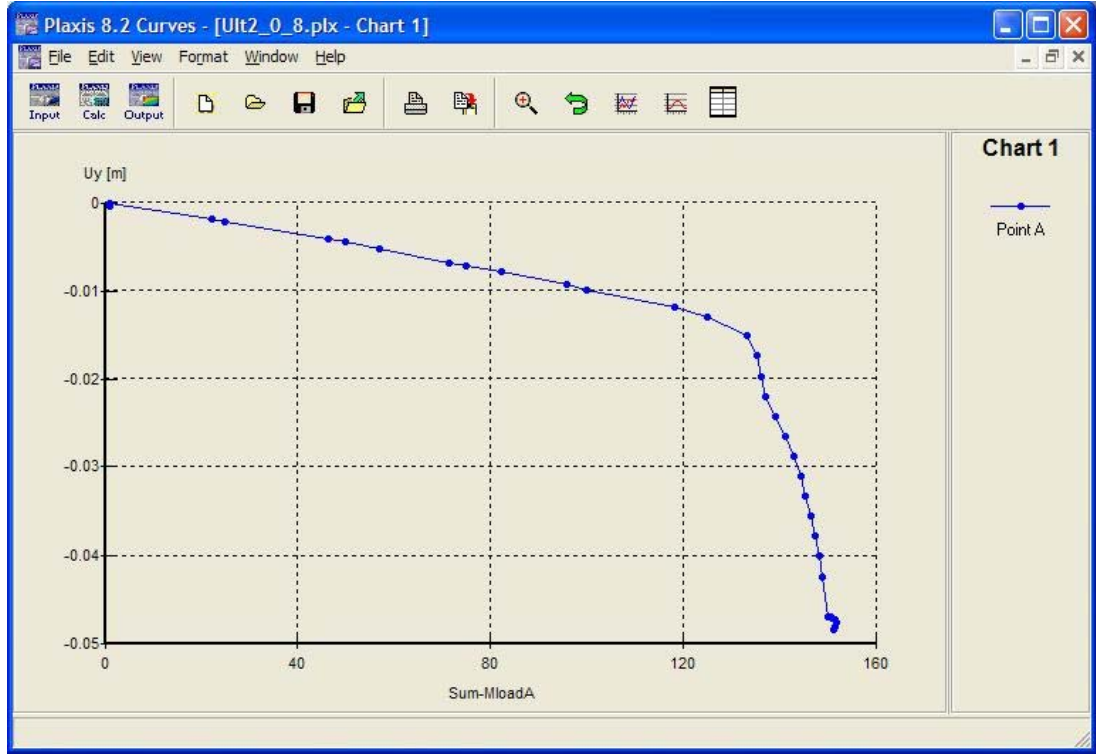
analiz için lineer elastik olarak tanımlanmış ve yine 0.8m, 1m ve 1.2m çapındaki lineer elastik jetgrout kolonları ve Zonguldak/Çatalağzı sahası zemini parametreleri kullanılarak 3 farklı model oluşturulmuştur. Şekil 3.29 de ve Tablo 3.12 de Zonguldak/Çatalağzı sahası zemin parametreleri ve lineer elastik jetgrout kolonu parametreleri görülmektedir.

Tablo 3.12 : Zemininin ve lineer elastik jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri

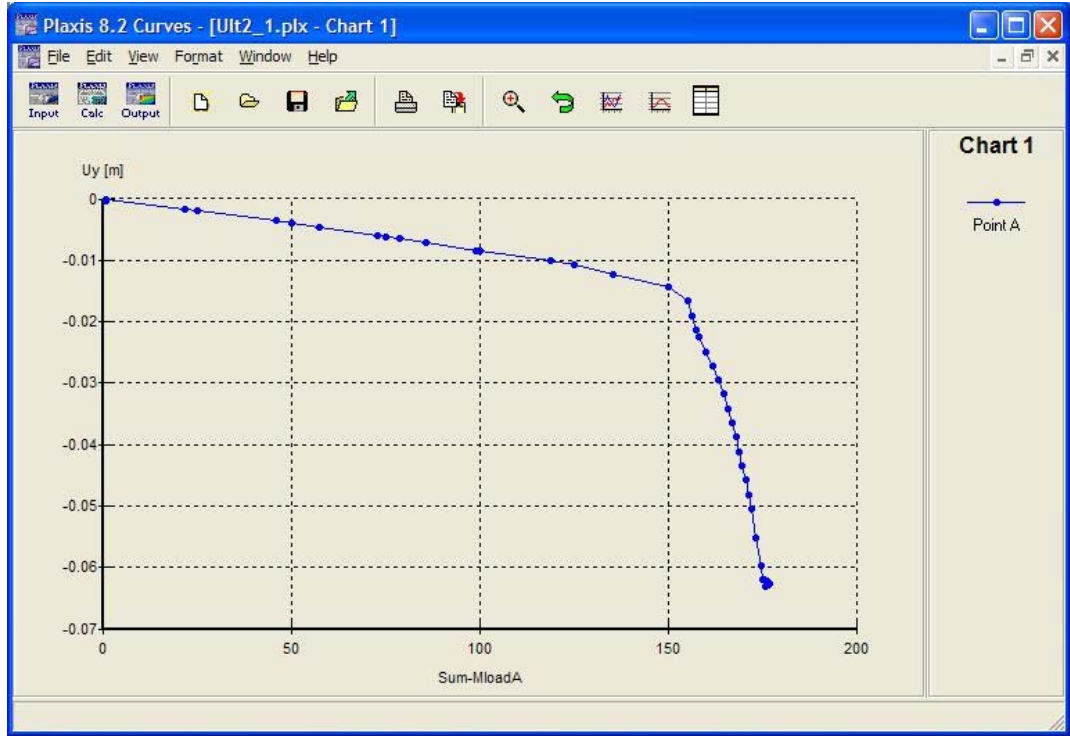
	Alüvyon	Jetgrout kolonu
γ_n (Doğal birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	17.5	22
γ_{sat} (Suya doymun birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	19	22
k (Permeabilite katsayısı) (m/gün)	4.5×10^{-6}	0
E (Elastisite modülü) (kN/m ²)	2×10^4	6×10^6
v (Poisson oranı)	0.49	0.25
c (Kohezyon) (kN/m ²)	23	0
ϕ (Kayma mukavemeti açısı)	5.0°	0.0°



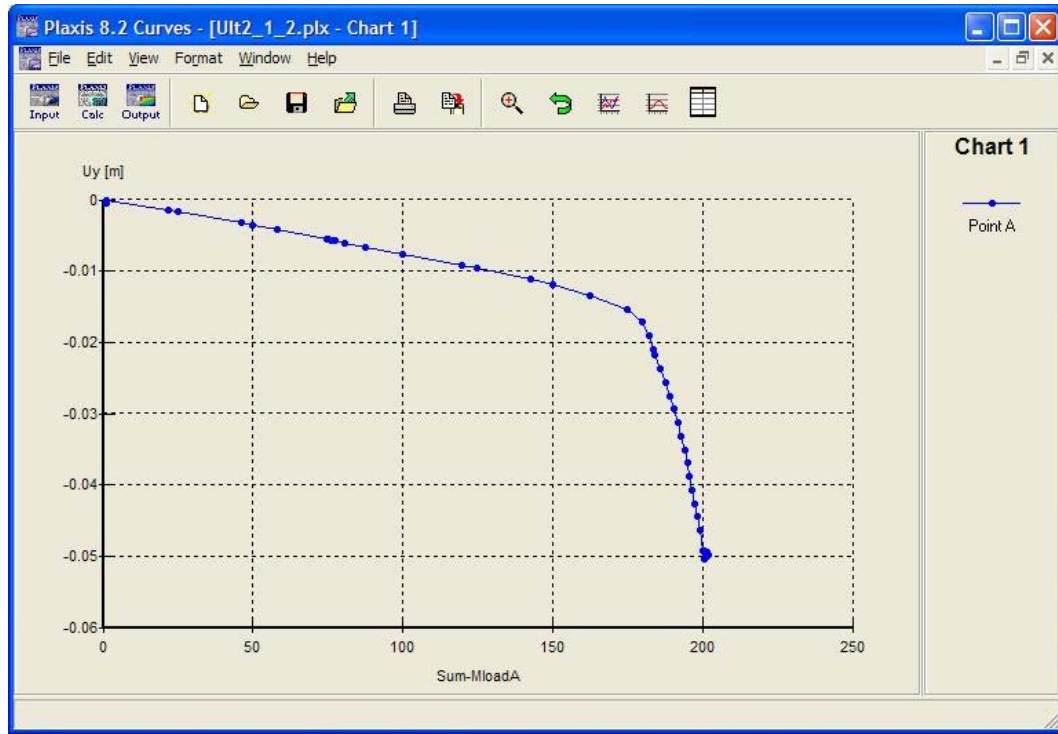
Şekil 3.29 : Zemininin ve lineer elastik jetgrout kolonunun geoteknik parametreleri



Şekil 3.30 : 0.8m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki



Şekil 3.31 : 1.0m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki



Şekil 3.32 : 1.2m çaplı lineer elastik jetgrout kolonunun göçme yükü tahkiki

Şekil 3.30, 3.31 ve 3.32 de farklı çaplarda lineer elastik jetgrout kolonu modelleri için elde edilen yük – deformasyon eğrileri görülebilir. Bu şekillerde de görüldüğü gibi kolon çapının artırılması ile göçme yükü de artmaktadır. Bu şekillerde de görüldüğü gibi jetgrout kolonlarının lineer elastik malzeme olarak tanımlanması ile elde edilen yük – deformasyon eğrileri daha alışılmış eğriler olmaktadır. Bu eğrilerde göçme kohezyonlu jetgrout kolonu yük – deformasyon eğrilerine nazaran daha rahat görülebiliyor. Aşağıda tablo 3.13 da sayısal analiz sonucu belirlenen farklı çaplardaki lineer elastik jetgrout kolonlarının Zonguldak/Çatalağzı sahası zeminindeki göçme yükleri ve güvenlik katsayısı 3 olarak ele alınırsa izin verilebilir taşıma gücü özetlenmiştir.

Tablo 3.13 : Farklı çapta lineer elastik jetgrout kolonları için belirlenen azami ve izin verilebilir yük taşıma güçleri

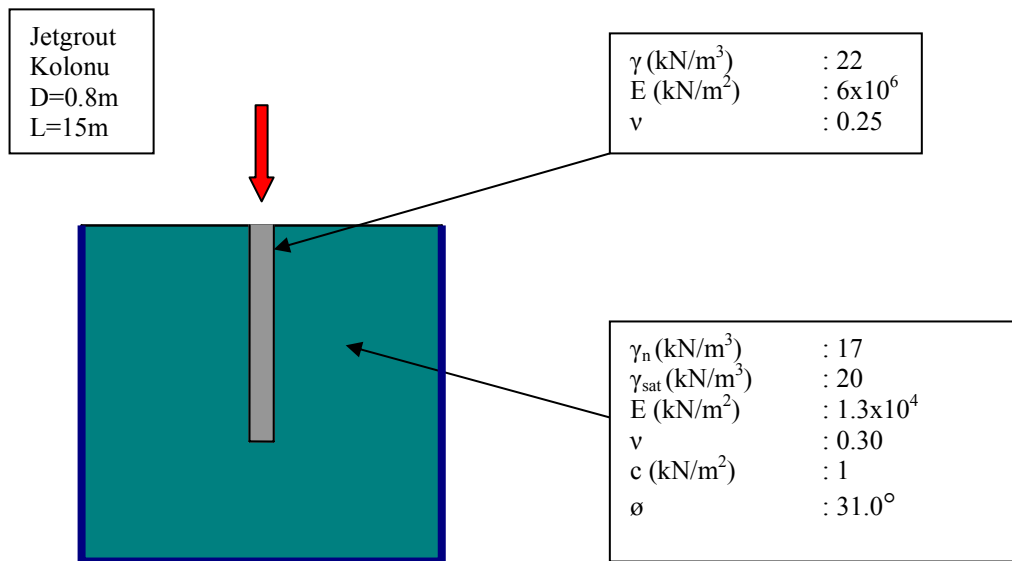
Jetgrout Kolonu Çapı (m)	Azami Taşıma Gücü (t)	İzin verilebilir Taşıma Gücü (t)
0.8	135	45
1.0	160	53
1.2	180	60

Sayısal analizde kullanılan modelin güvenilirliğini sınamak için aynı model Plaxis veritabanında daha önce tanımlanmış hazır zemin cinslerinden biri ile tekrarlanmıştır. Böylece oluşturulan modelde zemin parametrelerinin doğru olarak belirlenebildiği incelenmiştir. Plaxis veritabanında tanımlı zemin parametreleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile bu tezde belirlenen parametreler kullanılarak elde edilen sonuçlar merteye olarak birbirine yakın olmalıdır.

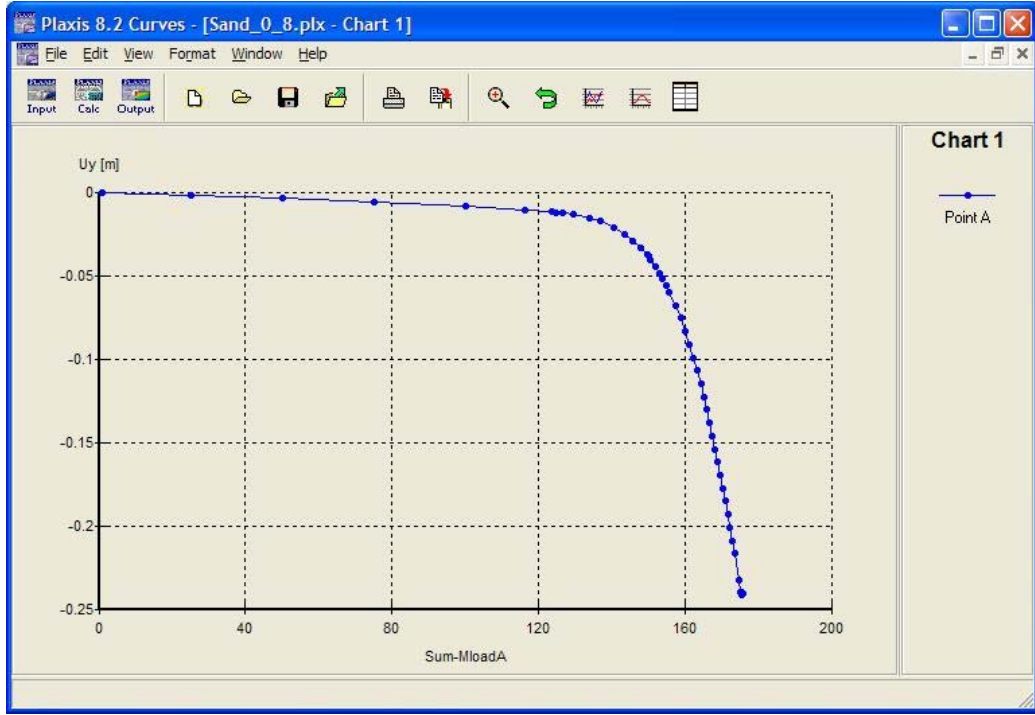
Plaxis programı veritabanında tanımlı zemin cinslerinden kum kullanılmıştır. Şekil 3.33 ve Tablo 3.14 da Plaxis veritabanında belirli kum zemin parametreleri ve lineer elastik jetgrout kolonu parametreleri görülebilmir.

Tablo 3.14 : Plaxis standart kum zemininin ve jetgrout kolonunun parametreleri

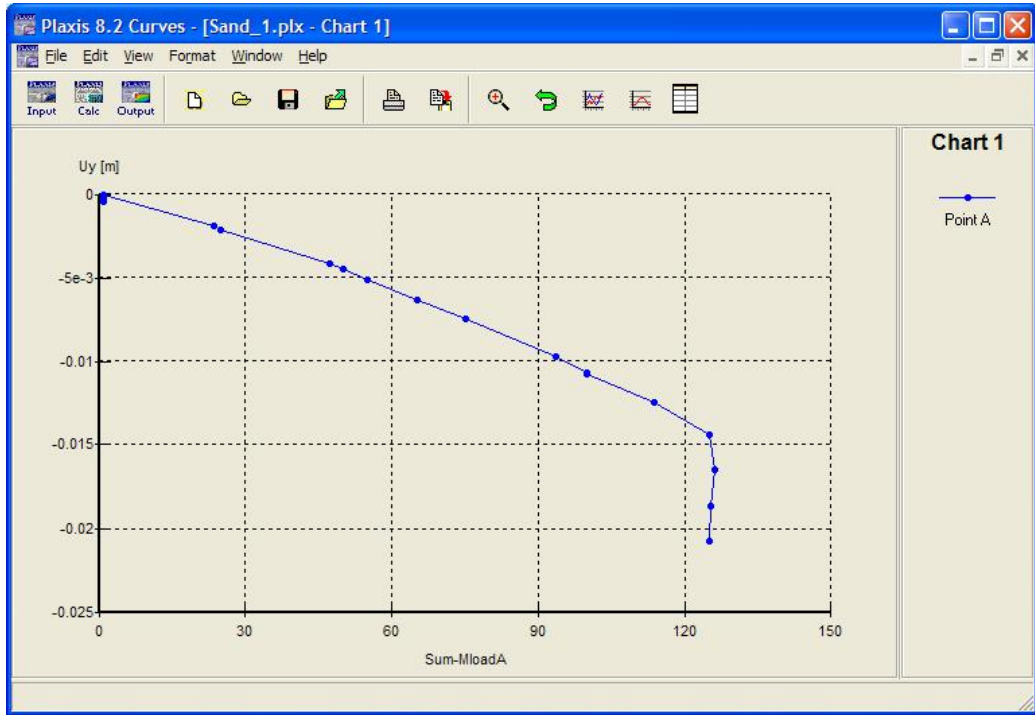
	Alüvyon	Jetgrout kolonu
γ_n (Doğal birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	17	22
γ_{sat} (Suya doymun birim hacim ağırlığı) (kN/m ³)	20	22
E (Elastisite modülü) (kN/m ²)	1.3×10^4	6×10^6
ν (Poisson oranı)	0.30	0.25
c (Kohezyon) (kN/m ²)	1	0
ϕ (Kayma mukavemeti açısı)	31.0°	0.0°



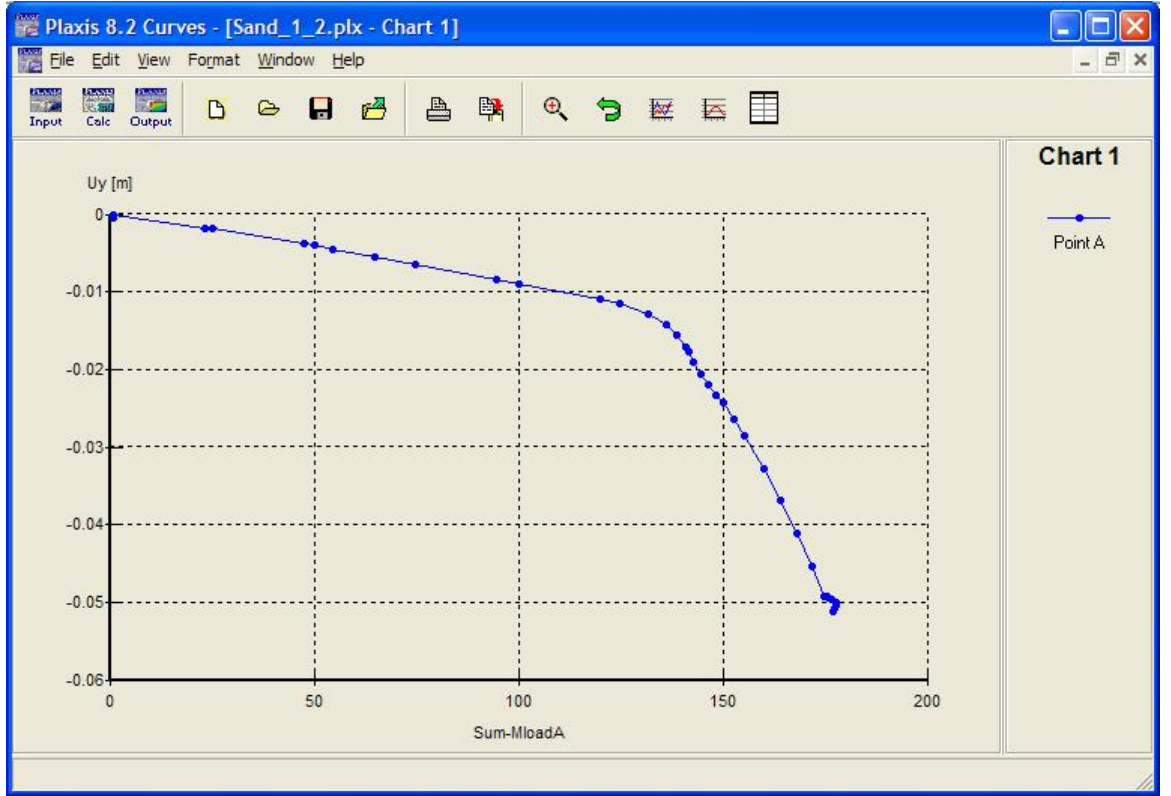
Şekil 3.33 : Plaxis standart kum zemininin ve jetgrout kolonunun parametreleri



Şekil 3.34 : 0.8m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki



Şekil 3.35 : 1.0m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki



Şekil 3.36 : 1.2m çaplı jetgrout kolonunun kum zeminde göçme yükü tahkiki

Şekil 3.34, 3.35 ve 3.36 de farklı çaplarda jetgrout kolonu modelleri için elde edilen yük – deformasyon eğrileri görülebilir. Aşağıda tablo 3.15 da sayısal analiz sonucu belirlenen farklı çaplardaki lineer elastik jetgrout kolonlarının Plaxis yazılımı veritabanında tanımlı kum zeminindeki göçme yükleri ve güvenlik katsayısı 3 olarak ele alınırsa izin verilebilir taşıma gücü özetlenmiştir.

Tablo 3.15 : Kum zemin için belirlenen azami ve izin verilebilir yük taşıma güçleri

Jetgrout Kolonu Çapı (m)	Azami Taşıma Gücü (t)	İzin verilebilir Taşıma Gücü (t)
0.8	130	43
1.0	140	46
1.2	150	50

4. JETGROUT KOLONLARI ÜZERİNDE YAPILMIŞ YÜKLEME DENEYLERİ

Jetgrout yöntemi ile yapılacak kolon inşa veya zemin ıslah işlemleri uygulamanın yapılacağı zemin ile ilgili tüm etüt ve deneylerin yapılmış ve bunlarla ilgili değerlerin elde edilmiş olmasını gerektirir. Ayrıca, her uygulama öncesi, sahada test kolonları inşası ve bunların hesaplanmış değerleri karşılayıp karşılamadığı gözlemlenmeli, parametrelerde gerekli optimizasyonlar yapılmalıdır.

İyileştirme işleminin başarısı açısından aşağıdaki deneylerin yapılması önerilir;

- Elastisite modülünün hesaplanabilmesi için, basit basınç- şekil değiştirme deneyi.

Uygulama öncesi elastisite modülünün tespiti için basınç deneyleri yapılarak

- Deformasyonların hesaplanması
- Beton çekme mukavemeti tayini (Brezilya testi)
- Drenajsız kayma dayanım deneyi, yaptırılması önerilir.

İmalat sonrası yapılması gereken deneyler ise aşağıda yazılanlardır.

- Zemin -Çimento karışımı malzemelerin kalitesi ve dayanımı
- Kolon boyu ve sürekliliği
- Zemin -Çimento karışım kolonunun geçirimsizliği
- Jetgrout kolonunun taşıma gücü
- Diğer kontroller ;

Jetgrout kolonunun kalitesini denetlemek amacıyla yapımından 28 gün geçtikten sonra kolonlardan temsili olarak karot alınarak daha sonra bu karotlar üzerinde bazı testlerin yapılması. Kolon boy ve kesitinde ki olası düzensizlikleri saptayabilmek amacıyla Pile Integrity ve Sonic Test yönteminden yararlanılabilir. Jetgrout kolonunun yapım tarihinden 1 ay sonra alınacak yükseklik/çap oranı en az 2 olacak numuneler üzerinde serbest basınç ve elastisite modülü tayini deneyleri yapılmalıdır. Geçirimsizlik amacıyla açılan Jetgrout kolonlarında zemin – çimento kolon kalitesini kontrol etmek için karot deliklerinden sabit permeabilite deneyleri yapılarak

geçirimsizlik denenebilir. Taşıma amaçlı Jetgrout kolonları üzerinde göçertmeli veya kabul edilebilir azami oturmaya kadar yükleme yapılır. Kontrol deneylerinde ise proje kazıkları üzerine proje yükünün en az bir buçuk katı yüklenmelidir (**Çınar M, Akaya A.**).

Bu tez çalışmasında ortaya atılan jetgrout kolonlarının taşıma gücü hesabının doğruluğunu sınamak için arazide yapılmış yükleme deneylerinin sonuçlarıyla kıyaslama yapılmıştır. Bu yükleme deneylerinin ilki Zonguldak/Çatalağzı'nda 5 farklı jetgrout kolonu üzerinde yapılan yükleme deneyleridir. Bu deneyler birbirlerine çok yakın mesafede yapıldığı için deney yapılan zeminin geoteknik özellikleri aynıdır ve bu çalışma kapsamında tek yükleme deneyi olarak ele alınmıştır. Yararlanılan bir diğer jetgrout yükleme deneyi ise **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında kullandığı yükleme deneyleridir.

Zonguldak/Çatalağzı 600 MW Kömür Santrali Projesi sahasında devam etmekte olan zemin ıslah işleri kapsamında yapılan jetgrout kolonlarından 5 tanesi üzerinde yükleme deneyi yapılmıştır. Bu deney proje kapsamında uygulanan jetgrout kolon yüklerinin ve kolon imalat kalitesinin kontrolü için yapılan bir arazi deneyidir.

Yükleme deneyi için gerekli ekipmanlar aşağıda listelenmiştir.

- Jetgrout kolonuna verilecek eksenel yüke karşı koyacak reaksiyon kirişleri veya buna karşılık jetgrout kolonuna uygulanacak yükten daha fazla bir kapasiteye sahip kontur yük sağlayacak araç.
- Hidrolik Kriko
- Hidrolik basınç pompası
- Uygulanan yükü ölçmek için manometre.
- Deformasyon kontrolü için komparatörler.
- Deformasyon okumalarının sağlıklı olması için U profiller.
- Başlık kirişine ve jetgrout kolonuna yükü uniform dağıtacak dayanıklı rijit bir plaka.

4.1 Yükleme Deneyinin Yapılışı

Bu deneyde deneye başlamadan önce yapılan jetgrout kolonuna uygulanacak yükü düzenli ve üniform aktarabilmek için deney yapılacak kolonun üzerine başlık kirişi betonu dökülür. Yapılan bu başlık kirişi betonu prizini aldıktan sonra deneye başlanmalıdır. Jetgrout kolon yükleme deneyi için başlık kirişi hazırlanışı Şekil 4.1’de görüle bilinir.



Şekil 4.1 : Jetgrout kolon yükleme deneyi için başlık kirişi hazırlanışı

Jetgrout kolonun başlığı yükleme işlemine hazır hale getirildikten sonraki adımlar aşağıda listelenmiştir.

- Başlık kirişinin üzerine çelik plaka yerleştirilir ve üzerine yükleme pistonu konulur.
- U profiller başlık kirişine yerleştirilir.
- Yükleme pistonu ile kontur yükü sağlayacak araç arasındaki boşluk alındıktan sonra deformasyon ölçerler (komparatörler) bir tarafı sabit olacak şekilde yerleştirilir.
- Düşey deplasman saatleri sıfırlanıp, deneye başlama saati kontrol edilir ve aşağıda belirtilen süre aralıklarında belirtilen yüklemelere karşılık deformasyon okumaları yapılır.
- Elde edilen veriler yardımıyla hesaplama ve sonuçlar sunulur.

Şekil 4.2’de deney düzeneğinin hazırlanışı ve deneye başlamaya hazır haldeki konum gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin hazırlanışı ve deneye başlamaya hazır haldeki konum

Jetgrout kolonunun taşıma gücünün tahmini için yapılan kolon yükleme deneyi için hedeflenen taşıma gücü yükü kademe kademe yüklenmiştir.

Zonguldak/Çatalağzı Termik santrali sahasında yapılan jetgrout yükleme deneyinde yükleme kademelerinde ilk önce %25'lik artımlarla taşıma gücünün %100'üne denk gelen yük (33.75 t) değerine ulaşılmış daha sonra bu yük yine %25'lik adımlarla 4 kademede kaldırılmıştır. Daha sonra kolon tekrar yüklenmiştir ve %25'lik artımlarla taşıma gücünün %200'üne denk gelen yük (67.5 t) değerine ulaşılmıştır. Daha sonra bu yük yine %25'lik adımlarla 8 kademede kaldırılmıştır. Bütün yükleme kademelerinde yükün kolon üzerinde tutulma süresi aynı değildir. Yükün %25'lik adımlarla tasarım kapasitesinin %100'üne kadar yüklendiği ilk 4 yükleme kademesinde ve yükün ikinci kaldırıldıktan sonraki ikinci yükleme kademelerinde tasarım taşıma gücü üzerindeki yükleme kademelerinde yükün tutulma süresi 60 dakikadır. Diğer yükleme kademelerinde yükün tutulma süreleri 15 dakikadır. Bu yükleme kademeleri Tablo 4.1'de görülebilir.

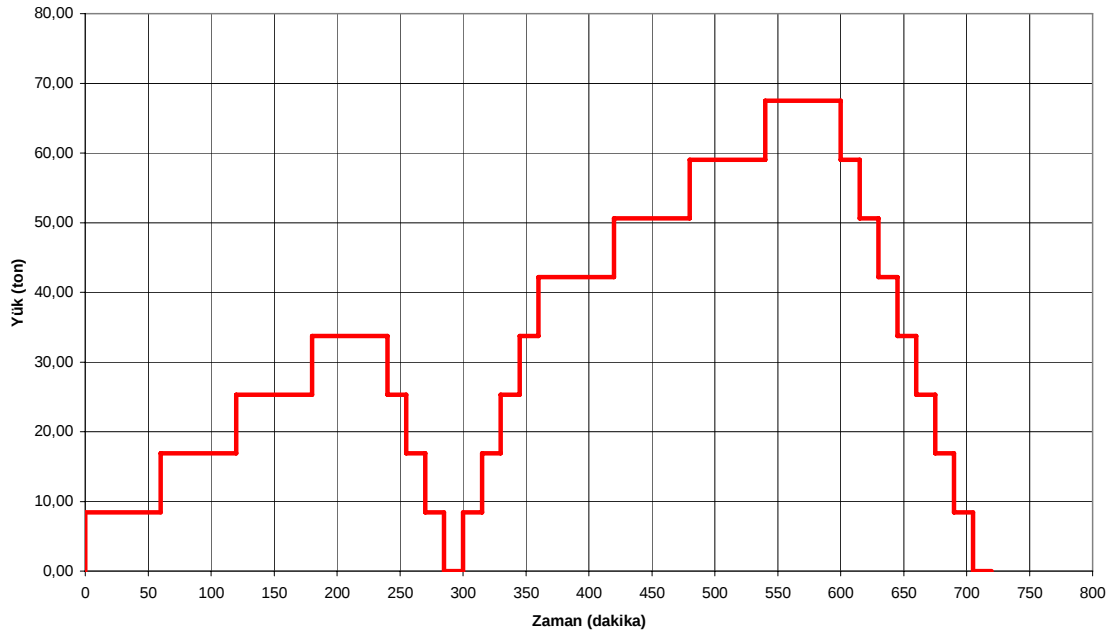
Tablo 4.1 : Zonguldak/Çatalağzı sahası yükleme deneyinde yükleme yüzde ve süreleri

Yük yüzdesi (%)	Yükün tutma süresi (dakika)
25	60
50	60
75	60
100	60
75	15
50	15
25	15
0	15
25	15
50	15
75	15
100	15
125	60
150	60
175	60
200	60
175	15
150	15
125	15
100	15
75	15
50	15
25	15
0	15

4.2 Jetgrout Kolonlarının Yükleme Deformasyon Eğrileri

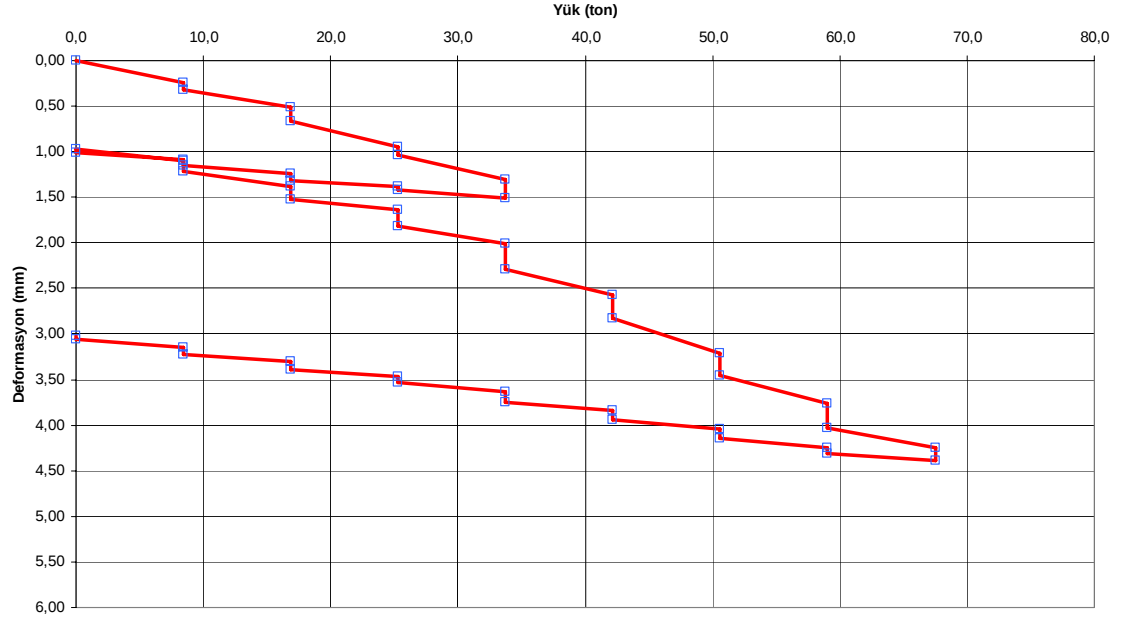
Yapılan jetgrout yükleme deneylerinde elde edilen yük-deformasyon eğrileri aşağıda açıklanmıştır.

Zonguldak/Çatalağzı 600 MW Kömür Santrali Projesi sahasında devam etmekte olan zemin iyileştirme işleri kapsamında yapılan jetgrout kolonlarından 5 tanesi üzerinde yükleme deneyi yapılmıştır. Bu yükleme deneylerinde uygulanan en yüksek yük 67.5 ton'dur. Daha önce bahsedildiği gibi yükleme deneylerinde yükler kademe kademe etkilmiştir. Şekil 4.3'de Zonguldak/Çatalağzı yükleme deneylerinde uygulanan yükün zamanla değişimi görülebilir.



Şekil 4.3 : Zonguldak/Çatalağzı yükleme deneylerinde uygulanan yükün zamanla değişimi

Zonguldak/Çatalağzı 600 MW Kömür Santrali Projesi sahasında devam etmekte olan zemin iyileştirme işleri kapsamında yapılan jetgrout kolonlarından 5 tanesi üzerinde yapılan yükleme deneylerinin sonucunda bulunan yük – deformasyon eğrileri elde edilmiştir. 5 yükleme deneyinde aynı yükler uygulanmış ve farklı ama birbirine yakın oturma değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.4'de 5 yükleme deneyinde oluşan oturmaların ortalamasının yükleme değeri ile değişimi görülebilir.



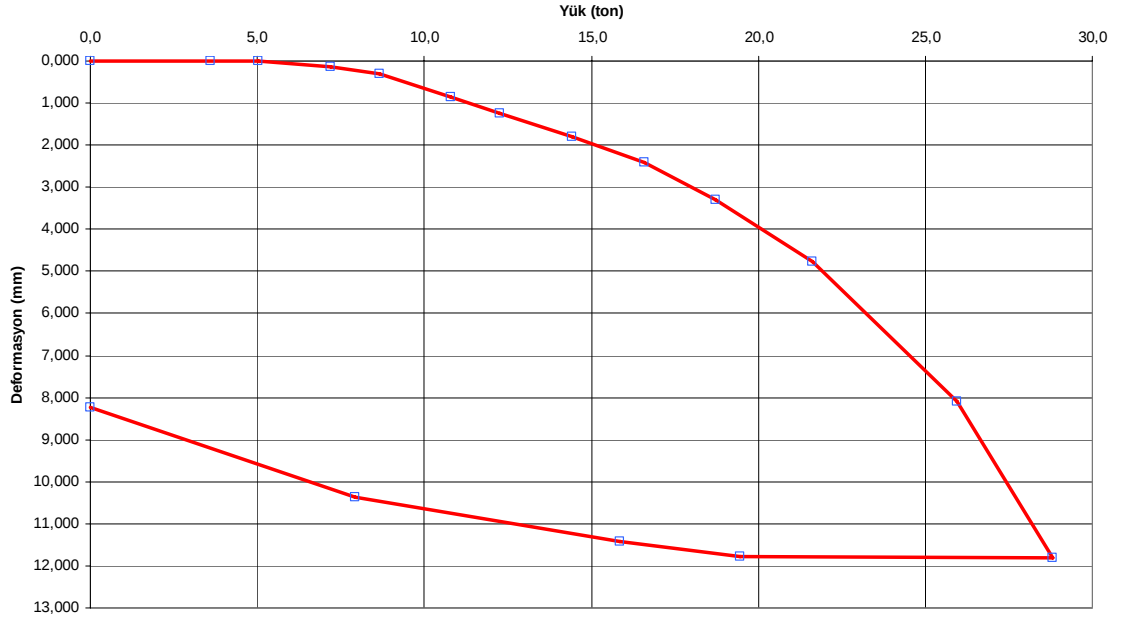
Şekil 4.4 : Zonguldak/Çatalağzı yükleme deneylerinde oluşan oturmaların ortalamasının yük ile değişimi

Zonguldak/Çatalağzı termik santrali sahasında yapılan yükleme deneylerinde, 5 farklı jetgrout kolonunda yüklenen yüke göre oluşan oturmalar Tablo 4.2’de görülebilir. Aşağıdaki tabloda görüleceği gibi farklı jetgrout kolonlarında oluşan oturma değerleri birbirine yakın olmakla birlikte oluşan en yüksek en düşük oturma arasındaki fark %100 den fazladır. Bu da jetgrout kolonunda oluşacak oturmaların tahminin zorluğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4.2 : Zonguldak/Çatalağzı jetgrout kolonları yük – deformasyon tablosu

Jetgrout Kolonu		1	2	3	4	5	Ortalama
Zaman (dakika)	Yük (ton)	Oturma (mm)	Oturma (mm)	Oturma (mm)	Oturma (mm)	Oturma (mm)	Oturma (mm)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	8.44	0.13	0.26	0.21	0.30	0.30	0.24
60	8.44	0.22	0.33	0.24	0.39	0.40	0.32
60	16.88	0.53	0.59	0.30	0.56	0.56	0.51
120	16.88	0.67	0.68	0.57	0.66	0.74	0.66
120	25.31	1.20	1.03	0.63	0.97	0.92	0.95
180	25.31	1.27	1.12	0.70	1.05	1.05	1.04
180	33.75	1.80	1.43	0.73	1.23	1.31	1.30
240	33.75	2.42	1.59	0.80	1.29	1.46	1.51
240	25.31	2.14	1.55	0.75	1.25	1.40	1.42
255	25.31	2.13	1.50	0.70	1.22	1.33	1.38
255	16.88	2.05	1.43	0.64	1.18	1.28	1.32
270	16.88	1.99	1.31	0.55	1.14	1.21	1.24
270	8.44	1.91	1.14	0.47	1.09	1.13	1.15
285	8.44	1.82	1.07	0.40	1.05	1.08	1.08
285	0.00	1.71	0.98	0.32	1.02	1.02	1.01
300	0.00	1.62	1.11	0.28	0.92	0.96	0.98
300	8.44	1.79	1.28	0.35	1.00	1.07	1.10
315	8.44	1.88	1.50	0.41	1.08	1.20	1.21
315	16.88	2.12	1.65	0.54	1.19	1.39	1.38
330	16.88	2.35	1.84	0.63	1.25	1.57	1.53
330	25.31	2.45	1.96	0.68	1.39	1.70	1.64
345	25.31	2.83	2.12	0.75	1.48	1.92	1.82
345	33.75	3.01	2.56	0.82	1.62	2.06	2.01
360	33.75	3.48	3.20	0.88	1.70	2.22	2.30
360	42.19	3.98	3.52	1.01	1.86	2.46	2.57
420	42.19	4.49	3.83	1.17	1.97	2.67	2.83
420	50.63	4.99	4.53	1.48	2.09	2.97	3.21
480	50.63	5.47	4.81	1.61	2.17	3.18	3.45
480	59.06	5.86	5.13	1.79	2.30	3.72	3.76
540	59.06	6.05	5.61	2.01	2.41	4.10	4.04
540	67.50	6.27	5.56	2.30	2.53	4.58	4.25
600	67.50	6.22	5.50	2.59	2.64	4.97	4.38
600	59.06	6.16	5.45	2.55	2.58	4.83	4.31
615	59.06	6.08	5.38	2.52	2.52	4.73	4.25
615	50.63	5.99	5.29	2.38	2.45	4.62	4.15
630	50.63	5.84	5.17	2.28	2.39	4.53	4.04
630	42.19	5.74	5.09	2.14	2.31	4.41	3.94
645	42.19	5.59	5.00	2.01	2.25	4.31	3.83
645	33.75	5.54	4.90	1.91	2.19	4.20	3.75
660	33.75	5.36	4.83	1.78	2.12	4.08	3.63
660	25.31	5.24	4.74	1.74	2.01	3.95	3.54
675	25.31	5.17	4.69	1.68	1.99	3.83	3.47
675	16.88	5.09	4.62	1.61	1.92	3.71	3.39
690	16.88	5.00	4.59	1.49	1.85	3.60	3.31
690	8.44	4.92	4.53	1.41	1.78	3.49	3.23
705	8.44	4.84	4.45	1.30	1.72	3.41	3.14
705	0.00	4.76	4.34	1.22	1.66	3.31	3.06
720	0.00	4.76	4.34	1.16	1.60	3.22	3.02

Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullandığı jetgrout kolonu yükleme deneyinin yük deformasyon eğrisi Şekil 4.5 de görülebilir.



Şekil 4.5 : Bzowka (2004)'nın yükleme deneylerinde oluşan oturmaların ortalamasının yük ile değişimi

Tablo 4.3 de **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında elde edilen jetgrout kolonu yük - deformasyon değerleri görülebilir.

Tablo 4.3 : Bzowka (2004)'nın jetgrout kolonları yük – deformasyon tablosu

Yük (ton)	Oturma (mm)
0,00	0.000
3,60	0.000
5,04	0.005
7,21	0.125
8,65	0.318
10,81	0.850
12,25	1.240
14,41	1.815
16,57	2.418
18,73	3.298
21,62	4.780
25,94	8.085
28,82	11.805
19,45	11.783
15,85	11.430
7,93	10.363
0,00	8.240

4.3 Yükleme Deneyi Sonuçlarının Çeşitli Hesap Yöntemleri İle Karşılaştırılması

Yükleme deneyi sonucunda Zonguldak/Çatalağzı 600 MW Kömür Santrali Projesi sahasında yapılan 0.8 m çaplı ve 15 m boyundaki jetgrout kolonlarının yük taşıma güçleri 33.75 ton'un güvenli olarak taşınabileceği ortaya koymuştur.

Garassino'nun önerdiği denklem 3.3 ve 3.5 kullanılarak jetgrout kolonunun yük taşıma gücü aşağıdaki gibi bulunur.

Verilenler:

$$D=0.8 \text{ m}$$

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

$$c_u = 23 \text{ kPa} = 2.3 \text{ t/m}^2$$

$$\alpha = 1 \text{ (Normal konsolide zeminler için)}$$

İstenen ; P_u

$$P_u = A_b q_b + \pi D_a \int_{l_1}^{l_2} \alpha c_u dz \quad (3.3)$$

$$q_b = 9 c_u \quad (3.5)$$

$$P_u = \pi \frac{0.8^2}{4} 9 \times 2.3 + \pi 0.8 \times 2.3 \times 15 = 97 \text{ t}$$

Bulunan yük taşıma gücü $G_s = 3$ güvenlik katsayısına bölünürse jetgrout kolonu için izin verilen yük taşıma gücü 32 ton olarak bulunur.

Garassino'nun önerdiği denklem 3.2 ve 3.4 kullanılarak **Bzowka (2004)**'nın araştırmalarında kullandığı jetgrout kolonunun yük taşıma gücü aşağıdaki gibi bulunur.

Verilenler:

$$D=0.3 \text{ m}$$

$$h=2.3 \text{ m}$$

$$\gamma_n \text{ (Doğal birim hacim ağırlığı): } 18 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} \text{ (Suya doymuş birim hacim ağırlığı): } 21 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi \text{ (Kayma açısı): } 28.5^\circ$$

$$\zeta = 1$$

$$K_s = 1$$

$$g/\phi = 1$$

İstenen ; P_u

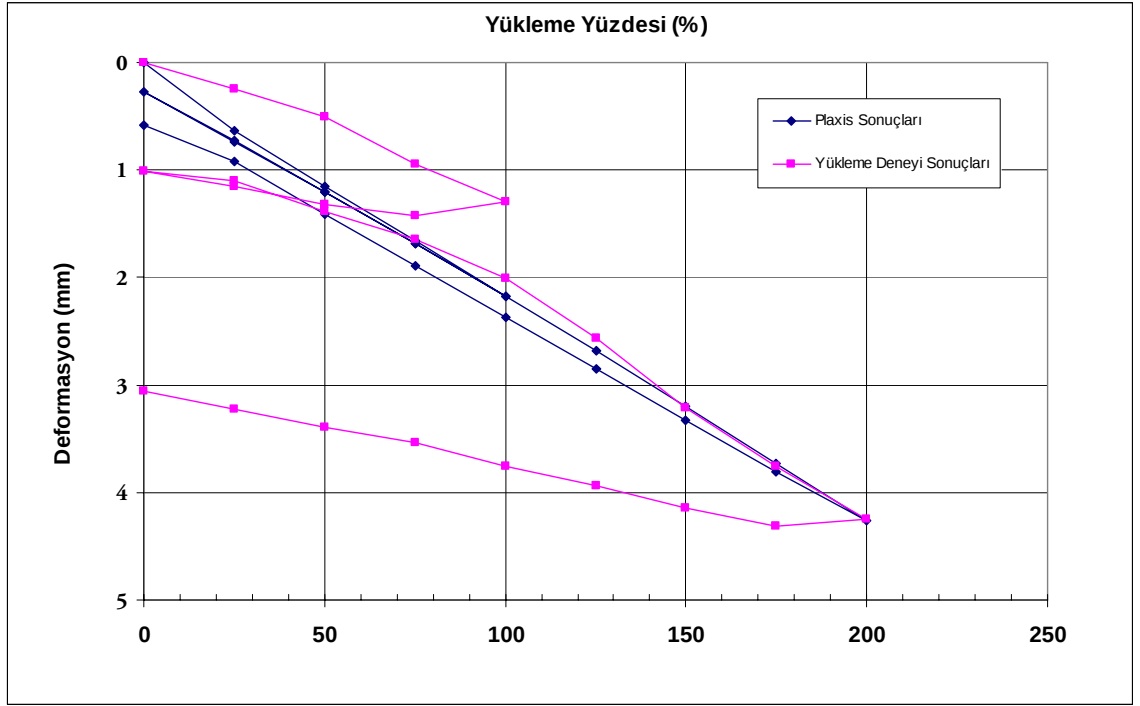
$$P_u = A_b q_b + \pi D_a \int_{l_1}^{l_2} \gamma z K_s \tan g \delta dz \quad (3.2)$$

$$q_b = \frac{1+2K_0}{2} \sigma_{vo} N_q^* \zeta \quad (3.4)$$

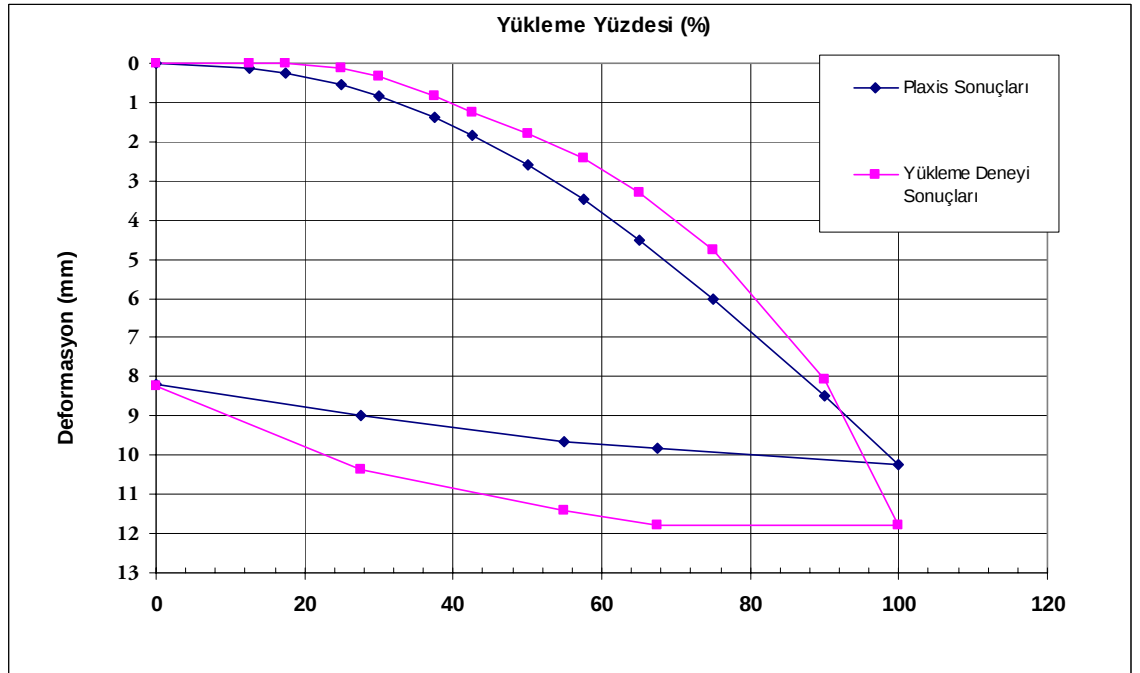
$$P_u = \pi \frac{0.3^2}{4} \times \frac{1+2(1-\sin 28.5^\circ)}{2} \times 2.3 \times 18 \times 19.76 + \pi 0.3 \times 18 \times 2.3 \times 1 \times \tan 28.5^\circ \times 1 = 80 \text{ kN}$$

Zemin mekaniği problemlerinin çözümü için yaygın olarak kullanılan sayısal analiz programlarından Plaxis yazılımı kullanılarak jetgrout kolonun yükleme deneyi sayısal ortamda tekrarlanmıştır.

Sonuç olarak sahada yapılan yükleme deneyleri ile Plaxis yazılımında oluşturulan yükleme deneylerindeki yükleme yüzdesi - deformasyon eğrileri birbirlerine yakın olmaktadır. Bu da Plaxis yazılımında yapılan analizler ile sahada yapılan yükleme deneyleri arasındaki paralelliği ve sayısal analizin güvenilirliğini ortaya koyar. Şekil 4.6 de Zonguldak/Çatalağzı sahasında yapılan yükleme deneyinin sonuçları ile Plaxis yazılımı sonuçlarının karşılaştırılması görülür. Şekil 4.7 da ise **Bzowka (2004)**'nın çalışmalarında kullandığı jetgrout yükleme deneyi ile Plaxis yazılımında elde edilen sonuçların karşılaştırılması görülür. Plaxis yazılımı kullanılarak elde edilen yükleme deformasyon eğrileri ile sahada yapılan yükleme deneyinden elde edilen yükleme deformasyon eğrileri birbirlerine yakındır. Bu da göstermektedir ki Plaxis yazılımı ile jetgrout kolonlarının taşıma gücünün tahmini mümkündür.



Şekil 4.6 : Zonguldak/Çatalağzı sahasında yapılan yüklemeye deneyinin sonuçları ile Plaxis yazılımı sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.7 : Bzowka (2004)'nın çalışmalarında kullandığı jetgrout yüklemeye deneyi ile Plaxis yazılımında elde edilen sonuçların karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Bu çalışma jetgrout kolonunun tasarım taşıma gücü hesabı için sayısal analiz yöntemlerinin de geçerliliğini göstermiştir. Sayısal çözümle yöntemi olarak sonlu elemanlar esasına dayalı bir sayısal analiz yazılımı olan Plaxis yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal yöntemlerle jetgrout kolonlarının yük taşıma gücünü belirlemek için çeşitli sayısal modeller oluşturulması gerekmektedir. Bu modellerin sayısal ortamdaki davranışlarının belirlenmesi mümkündür. Fakat sayısal ortamdaki jetgrout kolonu davranışının kesin olarak gerçeği, yani arazideki davranışı, ifade ettiğini söylemek doğru değildir. Bunu söylemek için aynı sayısal modelin arazideki davranışı tespit edilmelidir. Gerçek boyutlarda veya küçültülmüş ölçeklerde modeller üzerinde deneyler yaparak jetgrout kolonlarının arazide göstereceği davranışlar ölçüle bilinir. Sonuç olarak sayısal ortamda hazırlanmış sayısal modellerin analiz sonuçları arazide sayısal modele eş jetgrout kolonu veya kolonları üzerinde yapılan deneylerin sonuçları ile karşılaştırılmalıdır. Bunun yapılabilmesi için en uygun durum yükleme deneyleridir. Çünkü yükleme deneylerinde jetgrout kolonun arazide göstereceği davranış ölçülür ve çeşitli sonuçlara ulaşılır. Elde edilmiş yükleme deneyi verilerine dayanarak sözü edilen yükleme deneylerini sayısal ortamda tekrarlamak mümkündür. Böylece arazide gerçek yükler altında davranışı bilinen ve ulaşılması istenen sonuçların belirli olduğu modeller oluşturula bilinir. Böylece sayısal çözümde elde edilen sonuçların doğruluğunun, yükleme deneyi sonuçlarına kıyaslayarak, sorgulanması mümkün olur. Güvenilir sonuçlar elde edileceğinden emin olduğu takdirde jetgrout kolonu yükleme deneylerini sayısal ortamda gerçekleştirmek çok avantajlıdır.

Jetgrout kolonun taşıma gücü hesabı için daha önce yapılmış çalışmalar ve Plaxis geoteknik analiz yazılımı ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar arazideki yükleme deneyleri ile karşılaştırılmıştır.

Jetgrout kolonlarının taşıma gücünün hesabı için kullanılan yöntemler ve yükleme deneyi sonucunda bulunan kapasite aşağıda tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 : Jetgrout Kolonu Yük Taşıma Gücü İçin Farklı Yöntemlerle Bulunan Sonuçlar

Hesap Yöntemi	Bulunan Düşey Yük Taşıma Gücü (ton)	
	Bzowka (2004)	Zonguldak/Çatalağazı
Yükleme Deneyi	28	30
(Garassino, 1997)	8	32
Plaxis Yazılımı	28	33

Yukarıda ki tabloda görülebileceği gibi Garassino'nun önerdiği yöntemle jetgrout kolonu yük taşıma gücü oldukça yakın bir şekilde öngörülebilmektedir. Ayrıca Plaxis yazılımı jetgrout kolonlarının taşıma gücünün tahmin edilmesinde başarılı olmuştur.

Sonuç olarak sayısal yöntemler ile jetgrout kolonlarının taşıma gücünün hesaplanmasının mümkündür. Ayrıca deneye dayalı ampirik formüller ile yapılan hesaplarla da doğru sonuçlar elde edilmektedir. Bununla birlikte sayısal yöntemlerle hesaplama yapılması gelişime açıktır. Daha kapsamlı çalışmalar ile sayısal yöntemlerin geliştirileceği ve daha tutarlı tasarımların mümkün kılınması kaçınılmazdır.

Sonuç olarak;

- Sayısal yöntemler ile jetgrout kolonlarının taşıma gücünün hesaplanması mümkündür.
- Zeminin belirsizliğinden ötürü geoteknik uygulamalarında güvenlik katsayısının diğer inşaat mühendisliği dallarına göre daha yüksek olması sayısal ortamda yapılmış bir yüklemeye deneyinin de güvenilirliğini pekiştirir.
- Deneye dayalı ampirik formüller ile yapılan hesaplarla da uyumlu sonuçlar elde edilmektedir
- Daha kapsamlı çalışmalar ile sayısal yöntemlerin geliştirilmesi gerekir.

KAYNAKLAR

- Bzowka, J.**, 2004. Computational model for jet-grouting pile – soil interaction, *Studia Geotechnica et Mechanica*, **16**, 48 – 90.
- Chan, M.**, 2005. Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering, *Bachelor of Engineering (Civil)*, University of southern queensland faculty of engineering and surveying, Toowoomba, Queensland, Australia
- Coulter, S.N.P.**, 2004. Influence of tunnel jet-grouting on ground deformations at the Aeschertunnel, Switzerland. *Requirements for degree of master of science*, University of Alberta, Edmonton.
- Çınar, M. ve Akkaya, A.B.**, 2001. Jet-grouting uygulama tekniği, İstanbul
- EN 12716:1997**, 1997, European Standard: Execution of special geotechnical works – Jet-grouting, *European norms*, EU.
- Durgunoğlu, H.T.**, 2004. Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, **431**, 39-52
- Fook-Hou Lee, F., Lee, Y., Chew, S. and Yong, K.**, 2005. Strength and modulus of marine clay-cement mixes, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **February 2005**, 178 – 186
- Garassino, A.L.**, 1997. Design procedures for jet-grouting, *Seminar on jet grouting*, Singapore, 7th April
- Gwizdala K., Motak E.**, Evaluation of the settlement curve of jet-grouting piles (in Polish), *XLII conference organised by KILiW PAN and KN PZiTb*, Krynica, 1996, V. 7, 45–52.
- <http://www.haywardbaker.com/>
- <http://www.jet-grouting.com/>
- <http://www.zetas.com.tr/>
- Kauschinder, J.L. Welsh, J.P.**, 1989. Design and construction and performance of earth support systems, MIT, Cambridge

- Langbehn, W.K.**, 1986. The jet grouting method: applications is slope stabilization and landslide repair, Master of enginnering report, University of california, Berkeley, May 12.
- Melegari, C. and Garassino A. L.**, 1997. Seminar on Jet Grouting, CI-Premier Pte. Ltd., Singapore
- Miki, G. and Nakanishi, W.**, 1984. Lion city leaps ahead with MRT- Singapore mass, rapid transit, *Tunnels and tunneling*, **Oct.** Paris
- Moseley, M.P. and Krisch, K.**, 1993. Ground improvement, Spon press, London
- Nicholson, A.L.**, 1963. Discussion, ICE Conf. on Grouting and Drilling Muds in Engineering Practice. Butterworths, London
- PN-83/B-02482**, 1983. Kazıkların taşıma gücü ile ilgili Polonya Şartnamesi, *Polonya Standartlar Enstitüsü*, Varşova
- Stoel, A.**, 2001. Grouting for Pile Foundation Improvement, DUP Science, Delft.
- Waterman, D.**, 2004. Plaxis Manual, PLAXIS bv, Netherlands
- Welsh, J.P., Rubright, R.M., Coomber, D.B.**, 1986. Jet grouting – uses for soil improvement, ASCE conference on grouting for support of structures, Seattle, Washington, April 16.
- Xanthakos, P.P., Abramson L.W. and Bruce D.A.**, 1994. Ground control and improvement, John Wiley, New York
- Yahiro, T. and Yoshida, H.**, 1973. Induction grouting method utilizing high speed water jet, *8th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, Moscow, August
- Zadroga, B.**, 2000. Whether and how to modify Polish Pile Code PN-83/B-02482 (in Polish), *Marine Engineering and Geotechnics*, No. 2, 75–81.
- Zmudzinski, Z., Motak E.**, Computational assessment of bearing capacity of jet-grouting piles (in Polish), *Monograph 194*, Kraków, 1995a, 351–362.

ÖZGEÇMİŞ

Burhan Erdil 1982 yılında Antalya'da dünyaya geldi. Orta Öğrenimini Antalya Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünden 2005 yılında mezun oldu. Halen 2005 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.