

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JET GROUTING YÖNTEMİ İLE TEMEL TAKVİYESİ

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Jeoloji. Müh. Abdullah Turgay FIRAT
(501961275)**

101486

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Haziran 2001**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Ergün TOĞROL

Diğer Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Bülent ÖZÜER (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Erol GÜLER (B.Ü.)

HAZİRAN 2001

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	VI
ŞEKİL LİSTESİ	VII
SEMBOL LİSTESİ	X
ÖZET	XII
SUMMARY	XV
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	3
3. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ	6
3.1. Enjeksiyon Yöntemlerinin Uygulama Alanları	7
3.2. Enjeksiyon Yöntemleri	8
4. JETGROUTING	9
4.1. Jetgrouting Yöntemi	9
4.2. Jetgrouting Yönteminin Tarihsel Gelişimi	10
4.3. Tanımlar ve Temel Özellikler	12
4.4. Jetgrouting Sistemleri	13
4.4.1. Tek Akışkanlı Sistem	13
4.4.2. Çift Akışkanlı Sistem	15
4.4.3. Üç Akışkanlı Sistem	16
4.5. Jetgrouting Yönteminin Avantajları ve Sınırları	19
4.6. Jetgrouting İmalatı ve Temel Jetgrouting Parametreleri	25
4.6.1. Temel Faktörler	25
4.6.2. Jetgrouting Yönteminin Uygulanışı	29
4.6.2.1. Delme Aşaması	29
4.6.2.2. Püskürtme Aşaması	29
4.6.3. Basınç ve Etkili Yarıçap	37
4.6.4. Geri Çekme ve Dönme Hızları (Jetgrout Üretim Hızı)	40
4.6.5. Gerekli Kesici Jet Akım Miktarının Saptanması	45
4.6.6. Gerekli Çimento Enjeksiyonu Miktarının Saptanması	47
4.6.7. Tüm Jetgrout Parametrelerinin İyileştirilmiş Hacim Üzerindeki Etkisi	50
4.7. Jetgrouting Ekipmanı	56
4.7.1. Genel	56
4.7.2. Jetgrout Aracı	58
4.7.3. Monitör ve Püskürtme Ağızları	61
4.7.4. Karışım Tesisi	64

4.7.5. Yüksek Basınç Pompaları	65
4.8. Jetgrout Elemanlarının Özellikleri	66
4.8.1. Çeşitli Zeminlerde Jetgrout Elemanlarının Yapılışı	66
4.8.1.1. Kil	66
4.8.1.2. Çakıl	67
4.8.2. Enjeksiyon Karışımının Özellikleri	68
4.8.3. Jetgrout Elemanlarının Birleşimi	71
4.8.4. Jetgrouting Yönteminin Tasarım Esasları	78
4.8.5. Jetgrout Kolon Hesabı	79
4.9. İyileştirilmiş Zeminin Fiziksel Özellikleri	85
4.9.1. Jetgrout Elemanlarının Basınç Mukavemeti	88
4.9.2. Jetgrout Elemanların Permeabilitesi	94
4.10. Uygulamada Jetgrouting	96
4.10.1. Jetgrouting Yönteminin Uygulandığı Ortamlar	96
4.10.2. Delgi Noktalarının Düzenlenmesi	99
4.11. Uygulamanın Başarısını Belirleyen Değişkenler	100
4.11.1. Zemin-Çimento Karışımının Kalitesi	101
4.11.2. Yapılmış Kolonların Bütünlüğü ve Boyu	101
4.11.3. Kolonun Çapı	103
4.11.4. Kolon Geçirimsizliği	104
4.11.5. Zemin-Çimento Karışımının Mukavemeti	105
4.11.6. Kolonun Taşıma Gücü	107
4.12. Jetgrouting Yönteminin Uygulama Alanları	115
4.13. Maliyet	128
4.14. Kalite Kontrol	129
5. TEMEL TAKVİYESİ VE ESKİ ESERLERİN KORUNMASI	133
5.1. Takviye yöntemleri	133
5.1.1. Sığ Takviye	134
5.1.2. Alttan Destekleme veya Takviye Kazıkları	134
5.1.3. Enjeksiyon Yöntemleri	135
6. TEMEL TAKVİYESİ YÖNTEMLERİNE YENİ BİR BAKIŞ	138
6.1. Giriş	138
6.2. Geleneksel Yöntemler	140
6.3. Temel Zemininin İyileştirilmesi	141
6.3.1. Enjeksiyon	141
6.3.2. Enjeksiyon Harcı Türleri	142
6.4. Temel Yüklerinin Daha Derindeki Taşıyıcı Tabakalara Aktarılması	144
6.4.1. Ayaklar ve Kazıklar	144
6.4.2. "Jetgrout" yöntemi	146
6.4.3. Bir örnek: Küçüküsu Kasrı Temel Takviyesi	148
6.4.4. Hoca Ahmet Yesevi Türbesi Temel Takviyesi	154
7. JETGROUT YÖNTEMİ KULLANILARAK KAZI ÇUKURU VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNE BİR ÖRNEK: YÜKSEL ERİMTAN YALISI	157
7.1. İnşaat Sahası Yeri ve Jeolojisi	157
7.2. Yapılan Araştırma Çalışmaları	157
7.2.1. Sondajlar	157
7.2.2. Numune Alma Yöntemleri	158

7.2.3. Arazi Deneyleri	158
7.2.3.1. Standart Penetrasyon Deneyi	158
7.2.4. Yer altı Suyu Gözlemleri	158
7.3. Zemin Profili	160
7.4. Sonuç ve Tavsiyeler	160
7.5. Yüksel Erimtan Yalısı-Jetgrout ile Kazı Çukuru Yapılmasının Statik Hesapları	167
7.5.1. Hesap Kabulleri	167
7.5.2. Kuvvetler	167
7.5.2.1. Koruyucu Kuvvetler	167
7.5.2.2. Devirici Kuvvetler	168
7.5.3. A noktasına göre momentler	168
7.5.3.1. Devirici Momentler	168
7.5.3.2. Koruyucu Momentler	168
7.5.4. Tahkikler	170
7.5.4.1. Devrilme Tahkiki	170
7.5.4.2. Kayma Tahkiki	170
7.6. İşin Yapılması	170
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	174
KAYNAKLAR	177
EKLER	183

TABLO LİSTESİ**Sayfa No**

Tablo 4.1.	Jetgrouting yöntemleri ve spesifik parametreler	26
Tablo 4.2.	Basınçlar, zemin tipi ve bunlara bağlı oluşan kolon çapları	40
Tablo 4.3.	Jetgrouting parametrelerine bağlı olarak iyileştirilmiş hacim	44
Tablo 4.4.	Enjeksiyon akış hızı ve miktarı	48
Tablo 4.5.	Enjeksiyon debisi / püskürtme ağzı ilişkisi	49
Tablo 4.6.	Çalışmada kullanılan parametreler	53
Tablo 4.7.	Araştırma sonuçları	53
Tablo 4.8.	Zemin tipi ve geri çekme hızının iyileştirme üzerindeki etkisi	55
Tablo 4.9.	Ana ekipman için data	57
Tablo 4.10.	Jetgrouting çalışma parametreleri	60
Tablo 4.11.	Jetgrout kolon tasarımında granüler zeminde kullanılan limit değerler	83
Tablo 4.12.	Jetgrout kolon tasarımında kohezyonlu zeminlerde kullanılan limit değerler	83
Tablo 4.13.	Zemin türleri ve beklenen permeabilite katsayısı değerleri	85
Tablo 4.14.	Çeşitli uygulamalarda elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değerleri	87
Tablo 4.15.	Jetgrout uygulanmış zeminlerin basınç mukavemeti (Mpa)	88
Tablo 4.16.	Doğal ve iyileştirilmiş zemin özellikleri	95
Tablo 4.17.	Jetgrouting yönteminde uygulanabilirlik	97
Tablo 4.18.	Çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri için karşılaştırmalı maliyet analizi	129
Tablo 4.19.	Jetgrout elemanlarda numune alma ve test teknikleri	131
Tablo 7.1.	Sondaj numaraları ve derinlikleri	158
Tablo 7.2.	Zemin deneyleri özet tablosu	166
Tablo 7.3.	Uygulama öncesi yapılan jetgrouting test sonuçları	166
Tablo A.1.	Zemin iyileştirme yöntemleri özet tablosu	184

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 :	Çeşitli zeminlerde uygulanabilen değişik ıslah yöntemleri [7]	5
Şekil 3.1:	Değişik enjeksiyon malzemelerinin kullanılabilme sınırları [7]	7
Şekil 3.2:	Klasik enjeksiyon yöntemleri ve jetgrouting [1]	8
Şekil 4.1:	Yüksek basınçlı enjeksiyon [1]	11
Şekil 4.2:	Tek akışkanlı jetgrouting sistemi	14
Şekil 4.3:	Çift akışkanlı jetgrouting sistemi	17
Şekil 4.4:	Üç akışkanlı jetgrouting sistemi	18
Şekil 4.5:	Jetgrouting sistemleri [15]	18
Şekil 4.6:	Muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki [1]	19
Şekil 4.7:	Artık malzeme hacminin enjeksiyon hacmine oranı [25]	21
Şekil 4.8:	Artık malzeme / kolon hacmi oranı ile enjeksiyon hacmi arasındaki ilişki [25]	21
Şekil 4.9:	Su jetinin (~30atm) püskürtme ağzından çıkışı [29]	30
Şekil 4.10:	Jetgrouting yöntemi ile kolon tip elemanların yapım sırası [14]	32
Şekil 4.11:	Jetgrouting yöntemi ile panel tip elemanların yapım yöntemi [14] ...	33
Şekil 4.12:	Jetgrouting yöntemi ile imal edilen kolon, panel ve duvar tipi elemanlar [22]	35
Şekil 4.13:	Çeşitli jetgrout elemanlar [9]	36
Şekil 4.14:	Havaya püskürtülen bir su jetinin karakteristik özellikleri [31]	38
Şekil 4.15:	Su jeti basıncında jet eksenî boyunca olan azalma [32]	38
Şekil 4.16:	Geri çekme hızı / kolon çapına bağlı tasarım eğrisi [33]	42
Şekil 4.17:	Geri çekme hızının iyileştirilmiş hacme etkisi [34]	43
Şekil 4.18:	Deneysel Kanematsu faktörü [31]	47
Şekil 4.19:	Kolon çapı ile zeminin SPT-N değerleri arasındaki ilişki [32]	52
Şekil 4.20:	Tek akışkanlı sistemi için jet grouting ekipmanı [9]	56
Şekil 4.21:	Jetgrouting uygulamasında delgi ve enjeksiyon için kullanılan makine	59
Şekil 4.22:	Monitör, püskürtme ağzı ve rock bit	61
Şekil 4.23:	Üç akışkanlı jetgrout monitörünün şematik görünümü [23]	62
Şekil 4.24:	Tek tüplü jet püskürtme ağzı [36]	64
Şekil 4.25:	Jetgrouting tesisi karıştırma ünitesi	64
Şekil 4.26:	Jetgrouting tesisi pompa ünitesi	65
Şekil 4.27:	Kum ve siltli zeminlerde imal edilmiş jetgrout kolonundan bir görünüş [38]	69
Şekil 4.28:	Varallo Pompia'da jetgrout kolonlarının ölçülen ve hesaplanan çapları [40]	77
Şekil 4.29:	Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonunun davranışı [16]	81
Şekil 4.30:	Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen zemin kolonu çevresinde oluşabilecek olası kayma yüzeyi [16]	82
Şekil 4.31:	Jetgrouting uygulamasının mekanizması [16]	84

Şekil 4.32:	Zemin, püskürtme enerjisi ve tesir mesafesi arasındaki bağıntı [1] ..	86
Şekil 4.33:	Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi [16] ..	87
Şekil 4.34:	Jetgrout elemanların basınç mukavemetlerinin zamanla değişimi[9]	90
Şekil 4.35:	Üç jet grout yöntemi ile oluşturulan elemanların mukavemet ilişkisi [18]	93
Şekil 4.36:	Dane çapına bağlı olarak enjeksiyon uygulanabilirliği	96
Şekil 4.37:	Permeabiliteye bağlı enjeksiyon uygulanabilirliği [21]	97
Şekil 4.38:	Farklı jetgrout yapılar için delgi noktalarının düzenlenmesi [9]	99
Şekil 4.39:	Jetgrout kolonundan karot alınması	102
Şekil 4.40:	Deneme kolonunun kazılarak ortaya çıkarılması	105
Şekil 4.41:	Jetgrout kolon çapı tahkiki [38]	106
Şekil 4.42:	Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzeneği planı	109
Şekil 4.43:	Jetgrout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzeneği kesiti	110
Şekil 4.44:	Jetgrout kolon üzerinde yapılan basınç deneyi düzeneği planı	111
Şekil 4.45:	Jetgrout kolon üzerinde yapılan basınç deneyi düzeneği kesiti	112
Şekil 4.46:	Tipik kolon, panel ve kanat şekilleri [43]	116
Şekil 4.47:	Jetgrout geçirimsizlik perdesi ve taban geçirimsizliği uygulaması [44]	117
Şekil 4.48:	Jetgrouting ile temel takviyesi uygulamaları [43]	119
Şekil 4.49:	Mevcut yapıya bitişik kazılarda jetgrout uygulaması	120
Şekil 4.50:	Tünellerin ve tünel kazılarının desteklenmesi amacı ile jetgrout uygulaması [45]	122
Şekil 4.51:	Tünel giriş çıkış bloklarının ve şaftların stabilizasyonu [27]	123
Şekil 4.52:	Baraj gövdesi altında geçirimsizlik perdesi [38]	123
Şekil 4.53:	Bina, viyadük ve köprü ayakları için temel takviyesi [38]	124
Şekil 4.54:	Tünel kazısının jetgrout ile desteklenmesi [38]	125
Şekil 4.55:	Jetgrouting ile şev korunması [38]	126
Şekil 4.56:	Deforme olmuş kaplamaların rehabilitasyonu [38]	127
Şekil 4.57:	Zayıf zeminlerde derin temel sistemi [38]	127
Şekil 4.58:	Kazı çukurunun iksası, temel altında zemin iyileştirmesi ve su sızıntısının minimize edilmesi amacı ile jet grout imali [38]	128
Şekil 6.1:	Bir “palice radice” uygulaması [47]	146
Şekil 6.2:	Kriko kullanılarak binaların kaldırılması [38]	147
Şekil 6.3:	Küçük su kasrında ana kaya derinlikleri [47]	149
Şekil 6.4:	a-“Jetgrout” kolonları, b-Eğik “jetgrout” kolonları, c-Donatı, d-Yanak kirişleri, e-Enine kirişler [47]	152
Şekil 6.5:	a-Kasrın mevcut bodrum duvarları, b-“Jetgrout” kolonları, c-Yanak kirişleri [47]	153
Şekil 6.6:	Hoca Ahmet Yesevi Türbesi temel takviyesi [47]	155
Şekil 6.7:	Hoca Ahmet Yesevi Türbesi temel iyileştirmesi [47]	156
Şekil 7.1:	Yüksel Erimtan yalısı-sondaj vaziyet planı (Ölçek:1/200)	159
Şekil 7.2:	Jetgrout aplikasyon planı (Ölçek:1/50)	161
Şekil 7.3:	Jetgrout ile bohçalama tekniği-AA kesiti (Ölçek:1/50)	163
Şekil 7.4:	Jetgrout ile bohçalama tekniği-BB kesiti (Ölçek:1/50)	165
Şekil 7.5:	Jetgrouting ile oluşturulan elemanların kuvvet ve moment diyagramı	169
Şekil 7.6:	Jet grout işlemi biter bitmez donatının indirilmesi	171
Şekil 7.7:	Başlık kırşının yapılabilmesi için mevcut jet grout elemanların yaklaşık 50 cm. kadar kırılması	172
Şekil 7.8:	Jet grout yönteminde .elik borular kullanılarak rıhtım yapılması	173

Şekil B.1:	Yüksel Erimtan yalısı-S1 no'lu sondaj logları (1/1)	190
Şekil B.2:	Yüksel Erimtan yalısı-S1 no'lu sondaj logları (1/2)	191
Şekil B.3:	Yüksel Erimtan yalısı-S2 no'lu sondaj logları (1/1)	192
Şekil B.4:	Yüksel Erimtan yalısı-S3 no'lu sondaj logları (1/1)	193
Şekil B.5:	Yüksel Erimtan yalısı-S3 no'lu sondaj logları (1/2)	194
Şekil C.1:	S1 no'lu / D1(1,50-1,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	196
Şekil C.2:	S1 no'lu / D2(3,00-3,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	197
Şekil C.3:	S1 no'lu / D3(4,50-4,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	197
Şekil C.4:	S1 no'lu / D4(6,00-6,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	198
Şekil C.5:	S1 no'lu / D5(7,50-7,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	198
Şekil C.6:	S1 no'lu / D6(9,00-9,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	199
Şekil C.7:	S1 no'lu / D7(10,50-10,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	199
Şekil C.8:	S1 no'lu / D8(12,00-12,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	200
Şekil C.9:	S1 no'lu / D9(13,50-13,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	200
Şekil C.10:	S1 no'lu / D10(15,00-15,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	201
Şekil C.11:	S1 no'lu / D11(16,50-16,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	201
Şekil C.12:	S1 no'lu / D12(18,00-18,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	202
Şekil C.13:	S1 no'lu / D13(19,50-19,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	202
Şekil C.14:	S3 no'lu / D1(4,50-4,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	203
Şekil C.15:	S3 no'lu / D2(6,00-6,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	203
Şekil C.16:	S3 no'lu / D3(7,50-7,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	204
Şekil C.17:	S3 no'lu / D4(9,00-9,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	204
Şekil C.18:	S3 no'lu / D5(10,50-10,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	205
Şekil C.19:	S3no'lu / D6(12,00-12,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	205
Şekil C.20:	S3 no'lu / D7(13,50-13,95m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	206
Şekil C.21:	S3 no'lu / D8(15,00-15,45m)derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi	206

SEMBOL LİSTESİ

k	:Permeabilite katsayısı
L_s	:Geri çekme hızı
R_a	:Oluşan kolon çapı
V_e	:Sökülen zemin hacmi
Q	:Gerekli jet akım miktarı
D	:Jetgrout kolon çapı
H	:Kolon yüksekliği
λ	:Deneysel Kanematsu faktörü
β	:Azaltma faktörü
h	:Eşit yükseklik
P_i	:Enjeksiyon basıncı
γ	:Zeminin birim hacim ağırlığı
γ'	:Su altındaki zeminin birim hacim ağırlığı
V	:Enjeksiyon çıkış hızı
A	:Püskürtme ağzı çapına bağlı olarak değişen enjeksiyon çıkış alanı
W_t^c	:Jetgrout kolonunun toplam ağırlığı
$W_{\text{çim}}^c$	:Jetgrout kolonundaki çimento ağırlığı
W_{su}^c	:Jetgrout kolonundaki su ağırlığı
W_{zemin}^c	:Jetgrout kolonundaki zemin ağırlığı
W_{hava}^c	:Jetgrout kolonundaki hava ağırlığı
γ_t^c	:Jetgrout kolonunun birim hacim ağırlığı
γ_t^c	:Su altındaki jetgrout kolonunun birim hacim ağırlığı
V_t^c	:Jetgrout kolonun hacmi
ΔZ	:Jetgrout kolonunun yüksekliği
γ_t^o	:Artık malzeme yoğunluğu
G_s	:Zemin danelerinin özgül ağırlığı
$(C/W)^a$	:Artık malzemedeki su/çimento oranı
$W_{\text{enj}}^{\text{çim}}$	:Enjeksiyondaki çimento miktarı
$W_{\text{artık}}^{\text{çim}}$	:Artık malzemedeki çimento miktarı
$W_{\text{artık}}^{\text{su}}$	:Artık malzemedeki su miktarı
$W_{\text{etkilenen}}^{\text{zemin}}$	:Jetgrout işleminden etkilenen zemin miktarı
w_{arazi}	:Zeminin doğal su muhtevası
$\gamma_t^{\text{yapılan enj}}$	:Kolonun yerindeki birim hacim ağırlığı
L	:Yapılan enjeksiyondaki çimento ağırlığı
$Q_{\text{yapılan enj}}$	: ΔZ boyunca monitörün geri çekilme hızı
G_c	:Enjeksiyonun miktarı
$W_{\text{yapılan}}^{\text{çim}}$	:Enjekte edilen çimentonun özgül ağırlığı
$(W/C)^{\text{enj su}}$	:Yapılan enjeksiyondaki çimento ağırlığı
$W_{\text{alınan}}^{\text{zemin}}$	:Enjeksiyondaki su/çimento oranı
$W_{\text{alınan}}^{\text{su}}$	:Jetgrout sırasında delikten dışarı alınan zemin miktarı
$W_{\text{alınan}}^{\text{çim}}$	:Jetgrout sırasında delikten dışarı alınan su miktarı
	:Jetgrout sırasında delikten dışarı alınan çimento miktarı

$Q_{\text{alınan}}$	:Dışarı alınan artığın akım hızı
$(C/W)_{\text{alınan}}$	:Yüzeye çıkan artık malzemedeki çimento miktarının tahmini
q_u	:Jetgrout kolonunun azami taşıma kapasitesi
A_b	:Kolon kesit alanı
Q_b	:(Kumlarda= $(1+2K_o)/3 \cdot \sigma_{vo} \cdot N_q^* \cdot \xi$, kohezyonlu zeminlerde= $9 \cdot c_u$)
D_a	:Ortalama çap
N_q^*	:Derin temeller için taşıma gücü faktörü
σ_{vo}	:Düşey basınç
K_o	:Sukunetteki yatay toprak basıncı katsayısı
K_p	:Pasif toprak basıncı katsayısı
K_s	:Yatay yatak katsayısı
δ	:Zemin-kolon sürtünme açısı
α	:Adezyon için azaltma faktörü
c_u	:Drenajsız kayma mukavemeti
z	:Zemin yüzeyinden itibaren derinlik
ξ	:Kolon uç mukavemeti azaltma faktörü
N	:Standart penetrasyon deneyindeki darbe sayısı
S	:Zeminin dane birim hacim ağırlığı
σ_b	:Jetgrout kolonundaki basınç gerilmesi
ϕ	:İçsel sürtünme açısı
γ_c	:Beton başlık kirişi için birim hacim ağırlık

JET GROUTING YÖNTEMİ İLE TEMEL TAKVİYESİ

ÖZET

Bu yüksek lisans tezi; zeminlerin jet grouting yöntemi ile iyileştirilmesini, temel takviyesi olarak jet grouting yönteminin kullanılmasını ve uygulanmadan örnekler içermektedir.

Jet grouting “yatay ve düşey su jetleri yardımıyla alüvyonel zemini delen, kesen ve yıkayan özel bir delici uç kullanıp ucun geri çekilmesi sırasında yüksek basınçla yatay püskürtme ağızlarından enjeksiyon pompalayıp zeminle karışmasını sağlayan, böylece sağlam ve geçirimsiz kolonlar oluşturan bir teknik” dir [22]. Klasik enjeksiyon yöntemlerinden farklı olarak jet grouting yönteminin uygulanabilirliği imalat yapılacak zeminin dane çapı dağılımına bağlı değildir ve her tür zeminde uygulanabilir. Akışkan jeti olarak sadece enjeksiyonun püskürtüldüğü sistem olan tek akışkanlı sistem ile düşük boşluk oranı, düşük permeabilite ve yüksek mukavemete sahip jet grout elemanlar imal edilebilir. Sırasıyla hava+enjeksiyon ve hava+su+enjeksiyon püskürtülen çift akışkanlı ve üç akışkanlı sistemlerle boşluk oranı ve permeabilitesi daha yüksek, mukavemeti ise nispeten daha düşük jet grout elemanlar imal edilir. Çift ve üç akışkanlı sistemlerle imal edilen elemanların çapları (yüksek kesme enerjisi sebebiyle) daha büyük olur. Jet grouting yönteminin diğer bazı geleneksel iyileştirme yöntemlerine karşı avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek kesme enerjisi sayesinde jet grouting yöntemi klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha verimli ve ekonomiktir.
- Tasarım ve ekipman seçimindeki serbestlik sebebiyle farklı geometri ve özellikte jet grout elemanlar oluşturulabilir.

- Jet grout elemanların kalite kontrolü ve performanslarının değerlendirilmesi, klasik enjeksiyona nazaran çok daha verimli olarak gerçekleştirilebilmektedir.
- Yöntemde kullanılan enjeksiyon karışımının basit su-çimento karışımı olması sebebiyle, jet grouting yönteminin herhangi bir kirletici etkisi yoktur.
- Sadece ~13 cm çapında bir delik açarak büyük geometride zeminin ($8\sim9\text{ m}^3/\text{m}$) iyileştirilebilmesi mümkün olmaktadır.
- Yöntem hemen her tür zeminde (çok yumuşak zeminlerden kırıklı kaya ortamlarına kadar) uygulanabilmektedir.
- Jet grout imalatına istenilen derinlikten başlanılabilir ve istenilen derinlikte bitirilebilir.

Jet grout elemanların mukavemet ve geçirimsizlik özellikleri, kesici jet enerjisi, imalat tekniği, enjeksiyon karışımının nihai mukavemeti, enjeksiyon karışım oranı, doğal zemin özellikleri ve jet grout elemanın homojenliği şeklinde sıralanabilecek faktörlere bağlıdır. Jet grout elemanların etkili yarıçapları zeminin kohezyonunun artması ile azalır, kohezyonun azalması ile de artar.

Jet grouting yönteminde imalat hızı, monitörün geri çekme hızına ve monitörün dönme hızına bağlıdır. Tek akışkanlı sistemde monitörün geri çekme hızı 25~30cm/dak, üç akışkanlı sistemde ise 4~7cm/dak arasında değerler almaktadır. Bunun yanında monitör dönme hızı tek akışkanlı sistemde 6~10 devir/dak, üç akışkanlı sistemde ise 3~6 devir/dak arasında yer almaktadır. Monitör geri çekme hızı ve monitör dönme hızının fonksiyonu olan jet grout imalat hızı, klasik enjeksiyonun yaklaşık 10 katı, çimento tüketimi ise klasik enjeksiyonun yaklaşık iki katıdır. Jet grouting yönteminde kullanılan enjeksiyon karışımının su/çimento oranı genellikle 0.80~1.50 arasında olmaktadır. Jet grout elemanların permeabilitesi ise genellikle 10^{-8} m/s'den küçük değerler almaktadır. Kil katkılı enjeksiyon karışımlarının kullanılması durumunda ise permeabilite $10^{-11}\sim10^{-9}$ m/s mertebelerinde değerlere düşmektedir.

Jet grouting yönteminin temel uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

- Temel takviyesi
- Kazı desteklenmesi ve stabilizasyonu

- Zemin iyileştirilmesi
- Tünel ve şaft inşaatlarında kazı desteklenmesi
- Kazı sahalarına gelen sızıntı sularının kontrolü
- Şev ve heyelan stabilizasyonu
- Yeraltısularının kontrolü
- Kirli atık sahalarında geçirimsizlik uygulaması
- Geçirimsiz perdeler

Jet grouting imalatının maliyeti birçok farklı değişkene bağlıdır ve bu nedenle imalata başlanmadan önce tam olarak tahmin edilmesi oldukça zordur. Ancak benzer koşullarda yapılmış olan uygulamalar bu konuda yol gösterici olabilir.



UNDERPINNING BY JET GROUTING METHODS

SUMMARY

This M.Sc. Thesis studies is included the improvement soils using jet grouting, jet grouting for underpinning and applications.

Jet grouting is defines “ technique utilising a special drill bit with horizontal and vertical high speed water jets to excavate alluvial soils and produce hard impervious columns by pumping grout through the horizontal nozzles that jets and mixes with foundation materials and the drill bit is withdrawn [22]. Unlikely to conventional grouting techniques, jet grouting technique is not dependent on the grain size distribution and can be employed in any soil. With the single fluid system in which only grout is jetted to the soil, jet grout columns with less void, lower permeability, higher strength and smaller diameter can be formed than the double or triple fluid systems in which grout+compressed air and grout, water+compressed air are jetted respectively. By double or triple fluid systems, elements with bigger diameter (because of the high erosive energy), lower strength, higher permeability and void ratio are formed. The advantages of jet grouting technique beside the similar conventional improvement techniques can be listed as follows:

- Jet grouting is more efficient and economic than the conventional grouting because of its high erosive energy.
- Because of the flexibility in design and equipment selection, jet grout elements of different geometry and characteristic can be formed.
- Quality control and performance evaluation of jet grout elements is much more effective than conventional grouting.

- Since the grout used is a simple mixture of cement and water, the technique doesn't have any contamination effect.
- A big volume of soil (up to 8-9 m³/m) can be improved with this technique by drilling a small hole of 13 cm. diameter.
- Technique can be employed in every kind of soils ranging from very soft deposits to fractured rocks.
- Installation can be started from any depth and can be stopped in any depth.

Strength and permeability properties of a jet grout elements depends on factors such as erosive jet energy, installation technique, ultimate strength of cement mixture, composition of grout, natural soil properties and jet grout elements homogeneity. The effective radius of a jet grout column decreases as the cohesion of the soil increases and the effective radius increases as the cohesion decreases and coarse material percent increases.

In jet grout technique, installation speed depends on monitor withdrawal rate and monitor rotation speed. In single fluid system withdrawal rates are usually between 25~50 cm/min, in triple fluid system withdrawal rates are usually between 4~7 cm/min. On the other hand, monitor, rotation speeds are usually between 6~10 rpm in single fluid systems and 3~6 rpm in triple fluid systems. Jet grout installation speed which is a function of withdrawal rate and rotation speed is generally 10 times of the conventional grouting but the cement consumption is 2 times of the conventional grouting cement consumption. In grouting technique the water/cement ratio of the grout mixtures is generally between 0.80~1.50. Permeability of jet grout elements are generally smaller than 10⁻⁸ m/s ($k \leq 10^{-8}$ m/s). If grout mixtures with clay additives are used, the permeability goes down to 10⁻¹¹~10⁻⁹ m/s.

The main areas of jet grout application can be listed as follows:

- Underpinning,
- Excavation support,
- Soil improvement,
- Excavation support in tunnel and shaft constructions,
- Control of water seepage to excavation pits,

- Landslide stabilization,
- Control of underground water,
- Sealing of contaminated fill deposits,
- Impervious curtains.

The cost of jet grouting is dependent on many parameters and for this reason it is very difficult to estimate it before the installation. But previous applications performed under similar conditions may guide.



1. GİRİŞ

Üzerinde inşaat yapılması uygun olmayan zeminlerin iyileştirilmesi, özellikle 1950'li yıllardan sonra geoteknik mühendisliğinin en önemli uygulama alanlarından birisi haline gelmiştir. Arazide zemin özelliklerinin proje kriterlerini sağlamadığı hallerde zemin mühendisinin yapacağı ilk çalışma, değişik yöntemler ile zemini ıslah ederek öngörülen kriterlere ulaşabilmektir [1]. Ülkemizde de bu konunun önemi kavranmaya başlanmış ve özellikle son yıllarda bu konuda bazı önemli projeler gerçekleştirilmiştir.

Zemin stabilizasyon yöntemleri girdi (malzeme, ekipman, iş gücü, sermaye, kapasite vs.), işlem (sığ ve derin zemin iyileştirme yöntemlerinden birinin veya birkaçının seçimi) ve çıktı (elde edilen menfaat) aşamalarından oluşmaktadır. Nerede, ne zaman, niçin, ne amaçla gibi sorular ilgili mühendis tarafından cevaplandırılması gerekir. Bunun için yapılması gereken ilk iş; uygun standartlara göre sondaj (gerekirse jeofizik yöntemler de kullanılarak), arazi ve laboratuvar çalışması esasına dayanan bir geoteknik raporun yapılması ve yorumlanmasıdır. Mühendis bu raporu baz alarak, gerekli zemin iyileştirme yöntemlerini seçer. Ancak karar verme işlemi; bütün zemin iyileştirme yöntemleri için projede yapılabilirliğinin ve arazide uygulanabilirliğinin, mukayese edilmesi ile gerçekleştirilmelidir.

Yüzeyden, istenilen derinliğe kadar yapılabilen çok değişik zemin stabilizasyon yöntemleri vardır. Klasik bir zemin iyileştirme yöntemi olan enjeksiyon (grouting), doğal zemin ve kayaların geçirimsizlik, mukavemet ve sıklıklarının iyileştirilmesi amacı ile uygulanan bir yöntemdir. Yöntemde anahtar rol oynayan faktör, enjeksiyonun zemine istenilen iyileştirmeyi gerçekleştirecek şekilde nüfuz edebilmesidir. Deneyimler göstermiştir ki; kohezyonsuz zeminlerde en küçük dane çapının orta kumdan küçük olmaması halinde, basit çimento şerbeti ile düşük basınçlı klasik enjeksiyonu yapılabilir.

Enjeksiyon yapılacak zemin içersinde silt ve kilin tabakalar halinde bulunması, silt oranının %15-20'yi aşması ve kil oranının yüksek olması gibi hallerde genel olarak klasik metotlardaki enjeksiyon teknikleri uygulanamamaktadır [1].

Daha ince daneli zeminlerde enjeksiyonun zemine nüfuz edebilmesi için kimyasal enjeksiyonlar kullanılmalıdır. Ancak Kimyasal enjeksiyon ile iyileştirilen zeminlerin mukavemet, katılık ve sağlamlık özellikleri, çimento enjeksiyonu ile iyileştirilen zeminlere göre daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha yüksek maliyetlidir ve toksik özellikleri dolayısıyla zemini kirletici etkiye sahiptir.

Günümüzde siltli ve hatta killi zeminlerde bile enjeksiyonu başarı ile uygulamak “Jet grouting” yöntemi ile mümkündür [1]. Jet grouting, arazide çimentolu zemin geometrisinde oluşturulan zemin iyileştirme tekniği olarak tanımlanabilir [2]. Jet grouting yöntemi, çakıldan kile kadar her türlü zeminin yüksek basınçlı enjeksiyon ile ıslahını mümkün kılmakta ve klasik enjeksiyon teknikleri ile diğer zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif olmaktadır [3].

Jet grouting, ilk olarak 1965 yılında Japonya’da Yamakado kardeşler tarafından ortaya konulmuş ve sonrasında sırasıyla Batı Avrupa, İtalya, Brezilya ve A.B.D.’de uygulanmaya başlanmış ve günümüzde ise tüm dünyada giderek yaygınlaşan miktarda kullanılır olmuştur. Klasik enjeksiyon yöntemine göre çok daha yüksek basınçlarla çalışan bu yöntem ile zemin kesilmekte ve ardından kesilen zemine enjeksiyon püskürtülmekte, böylece büyük geometride zemin etkilenecek özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Jet grouting yöntemi klasik enjeksiyondan farklı olarak zemini kesmekte ve böylece zeminin boyutlarına bağlı kalmaksızın çok geniş bir zemin cinsi spektrumunda iyileştirme yapılabilir. Jet grouting yöntemi ile yapılan zemin iyileştirmesinden beklenen sonuçlar esas olarak iyileştirilen zeminin mukavemetinde artış ve permeabilitesinde azalmadır.

2. ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

İnşaat Mühendisliği çalışmalarının bir kısmı zemin içersinde gerçekleştirilmekte olup bu çalışmalar esnasında kötü zemin koşulları ile karşılaşılabilir [4]. Bu durumda uygulanacak çözüm söz konusu arazilerden kaçınmak, kötü zemin tabakasını uygun özellikteki zemin tabakası ile değiştirmek yada mevcut zemini iyileştirmektir. Şehir içersinde ve gelişmekte olan endüstriyel bölgelerde inşaat çalışmaları esnasında karşılaşılabilir kötü zemini iyileştirmek, teknik ve ekonomik olarak en uygun ve en çok kullanılan çözümdür [5].

Zemin iyileştirmesi, zemini mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Zeminin iyileştirilmesi ile mevcut zeminin [5]:

- Kayma mukavemeti artar,
- Gerilme-deformasyon modülü artar,
- Sıkışabilirliği azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli kontrol altına alınır,
- Permeabilitesi azalır,
- Çevre koşullarına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal değişimleri önlenir,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

Günümüzde, yeni yapılacak yapılar ile mevcut olan yapıların zemininde karşılaşılan problemlerin çözümünde uygulanan zemin iyileştirme tekniklerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [6].

Zeminin iyileştirilmesinde temel ilke, zemin içersindeki mevcut boşlukların mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması, yeraltı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması yada çeşitli elemanların kullanılması suretiyle mevcut zeminin güçlendirilmesidir [5,7].

Çok değişik zemin ıslah yöntemleri mevcuttur. İlk olarak zemin ıslah yöntemleri:

- Kohezyonlu zeminlerde uygulanabilen yöntemler
- Kohezyonsuz zeminlerde uygulanabilen yöntemler

olarak ikiye ayrılabilir. Çeşitli zeminlerde uygulanabilen çeşitli ıslah yöntemleri Şekil 2.1’de verilmektedir [7].

Diğer bir sınıflandırmaya göre zemin iyileştirme yöntemleri üç ana gruba ayrılmaktadır [8]:

- Zemin geçici olarak iyileştirme teknikleri,
- Herhangi bir madde katmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri,
- Çeşitli maddeler katarak zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri.

Yeraltı su seviyesinin düşürülmesi, ısıtma işlemleri (zeminin dondurulması) ve elektro-osmoz zemini geçici olarak iyileştirme teknikleri içersinde yer almaktadır. Yüzey kompaksiyonu, patlatma ile sıkıştırma, vibro-kompaksiyon ve dinamik konsolidasyon; ikinci grupta sözü edilen ve herhangi bir madde katmadan zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri içersinde yer almaktadır. Kireç, çimento, bitüm gibi katkı maddeleri ile zeminin üniform bir şekilde karıştırılması, kireç kazıkları, zeminin değiştirilmesi, ön yükleme ile birlikte dikey drenlerin kullanılması, enjeksiyon ve geotekstiller ile stabilizasyon ise çeşitli maddeler katarak zemini kalıcı olarak iyileştirme teknikleri içersinde yer almaktadır [7,8].

ÇAKIL	KUM	SILT	KİL
Vibro-Kompaksiyon			
Patlamayla sıkıştırma			
Kompaksiyon kazıkları			
Bitümle stabilizasyon			
Daneli enjeksiyon			
Çimento stabilizasyonu			
Kimyasal enjeksiyon			
	Kompaksiyon enjeksiyonu		
		Kireçle stabilizasyon	
	Ön yükleme		
Dinamik konsolidasyon			
		Elektro-osmoz	
Donatılı zemin			
		Isıl işlemler	
		Zemin yerdeğiştirmesi	
			Islatma

Şekil 2.1 Çeşitli Zeminlerde Uygulanabilen Değişik İslah Yöntemleri [7].

3.ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

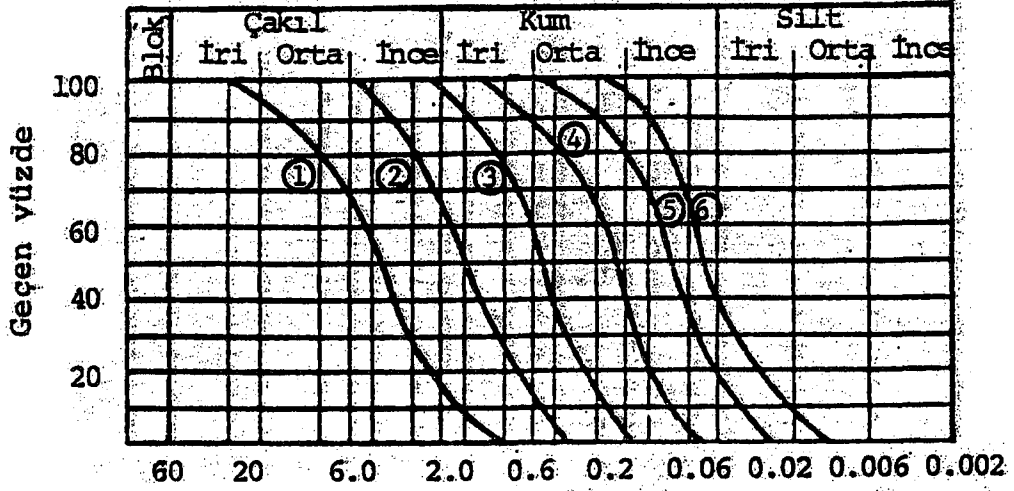
Enjeksiyon ile zemin iyileştirilmesi genellikle zemin içersinde teşkil edilecek inşaat mühendisliği yapıları ve maden projeleri için kullanılmaktadır [9].

Temel zemininin veya ana kayanın kayma mukavemetini arttırmak ve permeabilitesini azaltmak amacıyla kaya veya zemin içersine basınç altında çeşitli bileşimdeki karışımların basılmasına “Enjeksiyon” adı verilmektedir [7,10].

Enjeksiyon karışımının cinsi, enjeksiyonun amacı ve ıslah edilecek zeminin dane çapı ile ilgilidir. Çimento, kireç ve bentonit gibi daneli karışımlar çakıl dane boyutundan orta kum boyutuna kadar olan zeminlerde kullanılabilir. İnce kum ve siltlerin enjeksiyonunda kimyasal eriyikler kullanılmaktadır. En çok kullanılan kimyasal maddeler silikatlar, krom-lignin, reçine, akrilamid ve poliüretandır. Kil zeminlerin ise klasik enjeksiyon teknikleri ile ıslahı mümkün değildir. Sadece, kil içersindeki belli başlı fissürler ve kuruma çatlakları doldurulabilir [7]. Zemin cinsine göre enjeksiyon sınırları Şekil 3.1’de verilmiştir [1].

Kimyasal maddeler ile zemine enjeksiyon yapılabilmesi zeminin permeabilite katsayısına bağlı olarak aşağıda verilmiştir [11]:

Enjeksiyon malzemesinin zemin formasyonuna penetre olabilmesi için enjeksiyon karışımında kullanılan malzemenin dane çapının, enjeksiyon yapılacak zemin içersindeki mevcut boşluklardan daha küçük olması gerekmektedir [11].



$k < 10^{-6}$ cm/sn : enjeksiyon yapılamaz.

$10^{-5} < k < 10^{-6}$ cm/sn : az miktarda enjeksiyon yapılabilir.

$10^{-3} < k < 10^{-5}$ cm/sn : orta derecede enjeksiyon yapılabilir.

$10^{-1} < k < 10^{-3}$ cm/sn : kolaylıkla enjeksiyon yapılabilir.

1.Çimento

2.Kil Çimento

3.Bentonit

4.Silikat (İki komponentli)

5.Silikat (bir komponentli)

6.Suni reçine

Şekil 3.1 Değişik enjeksiyon malzemelerinin kullanılabilme sınırları [7]

3.1. Enjeksiyon Yöntemlerinin Uygulama Alanları

Enjeksiyonun, inşaat mühendisliğinde geniş uygulama alanları mevcuttur [7,10]:

- Yapı temelleri altındaki zeminin permeabilitesini azaltmak,
- Geçirimsizlik perdeleri teşkil etmek (perde enjeksiyonu),
- Aşırı oturmaların ve su kaçaklarının önlenmesi,
- Yapı ile ana kaya arasında kalması muhtemel boşlukların doldurulması (kontak enjeksiyonu),
- Gevşek kumlarda sıvılaşmanın önlenmesi,
- Hacim değişimi gösteren zeminlerde şişme ve büzülme potansiyelinin azaltılması,
- Komşu temellerin takviyesi veya oturmuş temellerin zemininin ıslahı,

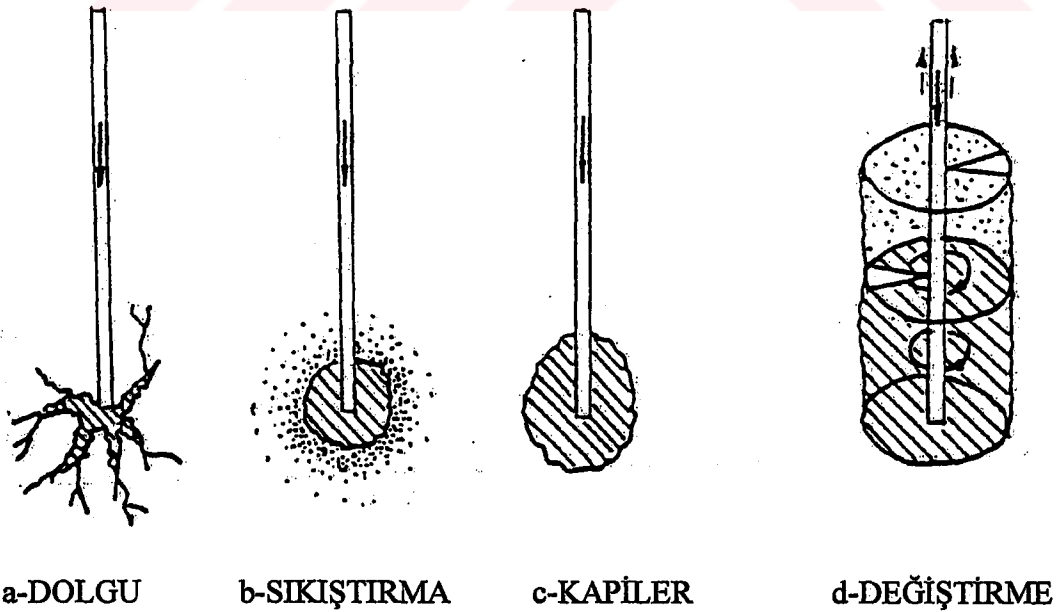
- Temel çukuru duvarlarının stabilitesinin sağlanması,
- Tünel inşaatlarında, tünel aynasının stabilitesinin sağlanması,
- Yapı temelleri altındaki zeminin mukavemetini arttırmak.

3.2 Enjeksiyon Yöntemleri

Enjeksiyon yöntemleri aşağıda verilmektedir [1,5,12]:

- Zemin tabakaları arasında veya masif kayalar içersinde bulunan kırık, çatlak ve boşluklara doldurmak üzere yapılan enjeksiyon (dolgu enjeksiyonu),
- Gevşek zeminlere kum veya çimento harcı ile yapılan enjeksiyon (sıkıştırma enjeksiyonu),
- İnce daneli zeminlere yapılan kimyasal enjeksiyon,
- Yüksek basınçlı enjeksiyon (jet grouting).

Yüksek basınçlı enjeksiyon yöntemi dışındaki diğer enjeksiyon yöntemleri zemin özelliğini büyük çapta değiştiremezler. Enjeksiyon yöntemleri Şekil 3.2’de verilmektedir [1].



Şekil 3.2 Klasik enjeksiyon yöntemleri ve Jet Grouting [1].

4 JET GROUTING

4.1. Jet Grouting Yöntemi

Jet grouting yöntemi, zeminin iyileştirilmesi veya yapı yüklerinin daha derindeki tabakalara aktarılması amacı ile kullanılmaktadır [13,14]. Bu teknik çok farklı zemin koşullarında ve çok geniş uygulama alanlarında büyük bir tasarım serbestisi getirmektedir. Bunlara her türlü güvenliğin önemli olduğu hassas yapıların civarında yapılan çalışmalar da dahildir [15].

Bu yöntemle zemin, doğrudan doğruya çok yüksek basınçla (en az 300 barlık) zemine enjekte edilen stabilite malzeme ile (genellikle su-çimento karışımı) karıştırılır [16]. Yöntemin yüksek basınçla uygulanması, basit çimento enjeksiyonu ile her türlü zeminin ıslah edilebilmesini sağlamaktadır [1,14]. Jet grouting yöntemi birçok inşaat ve çevre mühendisliği problemlerine uygun çözüm olmakla birlikte klasik enjeksiyon teknikleri ile diğer zemin iyileştirme yöntemlerine de alternatif olmaktadır [2,3,.6].

Bu yöntemde, enjeksiyon memelerinden yüksek hızla gelen enjeksiyon karışımı zeminin doğal yapısını bozmakta ve zemin ile stabilize malzemenin karışımından doğan yeni bir oluşum yaratmaktadır. Böylece zeminin taşıma gücü ve elastisite modülü artarken, permeabilitesi azalmaktadır [14]. Homojen ve sürekli yapıda olan bu yeni malzemenin karakteristik özellikleri önceden belirlenebilmektedir [16].

Jet grouting yönteminin belirgin karakteri bu yöntemi diğer klasik yöntemler ile karşılaştırdığımızda ortaya çıkmaktadır. Klasik enjeksiyon yöntemleri zemin özelliğini büyük çapta değiştirememekte; bunlara karşılık, jet grouting yöntemi zemini çimento şerbeti ile karıştırmak suretiyle uygulanmaktadır. Böylece zeminin bir kısmı çimento şerbeti ile karıştırmak şeklinde uygulanmaktadır.

Bu durumda zeminin bir kısmı çimento şerbeti ile yer değiştirmektedir (değiştirme enjeksiyonu-replacement) (Şekil 3.2)

Diğer enjeksiyon yöntemlerine nazaran jet grouting yöntemi ile kil veya kum-çakıl gibi çeşitli karakter ve farklı türlerdeki zeminlerin (sınırlı alanlarda dahi) ıslahı mümkün olabilmektedir (Şekil 4.1) [1,13].

Ayrıca jet grouting yöntemi ile diğer klasik enjeksiyon yöntemleri arasındaki en büyük ve önemli fark: bu yöntemde kullanılacak stabilize malzemesi miktarı, elde edilecek mukavemet ve geçirgenlik gibi zemin parametreleri ile maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilmesidir[16].

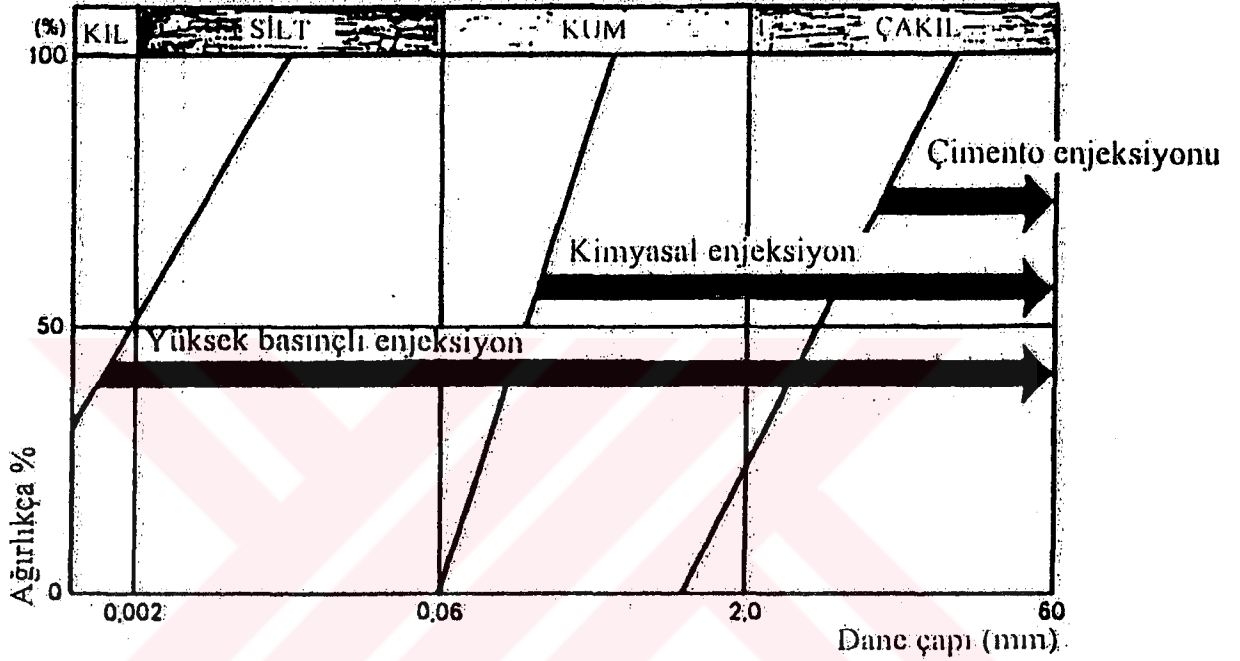
4.2. Jet Grouting Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Yüksek hızla zemine basılan karışımla zemini kesme, koparma ve sıkıştırma işlemleri ile iyileştirme düşüncesi ve bu konudaki çalışmalar ilk olarak 1965'te Yamakado kardeşler tarafından Japonya'da uygulanmaya başlanış olup 1970'li yılların başlarında iki farklı jet grouting tekniği geliştirilmiştir.

Nakanishi ve şirketi (N.I.T) tarafından geliştirilen jet grouting tekniğinde, kimyasal ve çimento karışımları kullanılmakta olup, bir delgi tijinin en altında bulunan 1.2-2.0 mm. çaplı enjeksiyon memelerinden çok yüksek basınçla enjekte edilmektedirler. Karışımın enjeksiyonu sırasında, tijin kendi etrafında döndürülmesi ve yukarı çekilmesi ile kazık gibi zemin-çimento kolonları oluşturulmaktadır. Bu sebeple, bu tip jet grouting tekniği "CCP jet grouting" (chemical churning pile) olarak adlandırılmaktadır.

Bir başka jet grouting tekniği ise 1970 yılında Japonya'da diyafram duvar teşkil etmek amacı ile Teuro Yahiro tarafından geliştirilmiş ve "jet grouting" olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemin en belirgin özelliği zemini kesme, koparma ve sıkıştırma işlemleri için üç farklı akışkanın (su,hava,çimento şerbeti) kullanıldığı üçlü jet sisteminin uygulanmasıdır.

Jet grouting yönteminin diğer uygulama teknikleri 1970'li yılların ortalarında Japonya'da kullanılmıştır. Nakanishi ve arkadaşları tarafından CCP jet grouting sistemi, çimento karışımı ve havanın birlikte kullanılması ile geliştirilmiş ve "jumbo jet special grout (JSG)" olarak adlandırılmıştır. Sadece sıkıştırılmış hava kullanılarak teşkil edilen JSG kolonları aynı çalışma parametreleri kullanılarak teşkil edilen CCP kolonlarından 1.5-2.0 kat daha büyüktür [17].



Şekil 4.1 Yüksek basınçlı enjeksiyon [1]

Bundan sonra, Yahiro ve arkadaşları jet grout kolonlar teşkil etmişlerdir. Benzer prensip kullanılarak, hava jeti ile sarılmış bir su jeti sisteme eklenmiştir. Örselenmiş zemin, hava jetiyle kopar ve oluşan boşluk enjeksiyonla doldurulup karıştırılır.

1980 yılında, CCP grubu tarafından süper zemin stabilizasyon yönetimi "super soil stabilization management (SSS-MAN)" geliştirilmiştir. Bu sistemde amaçlanan, çok geniş çaplı kolonlar teşkil edilmesidir. Bu yöntemde, pilot bir derinlik açılır ve yüksek basınçlı dönen su jeti ile zemin örselenir. Açılan boşluk süpersonik dalga tekniği ile ölçülür ve enjeksiyonla doldurulur. SSS-MAN tekniği ile büyük hacimler ve 4.0 m. çapa kadar katılmış yapılar özellikle kohezyonsuz zeminlerde oluşturulabilmektedir.

Jet grouting yönteminin Japonya’da ortaya çıkmasından sonra bu teknoloji hızla batı Avrupa’ya, özellikle İtalya, Almanya ve Brezilya’ya yayılmıştır. Kuzey Amerika’da ise 1980’li yıllarda uygulanmaya başlanmıştır [18,19].

Son dört yılda jet grouting teknolojisi önemli ölçüde geliştirilmiştir. Çok yüksek basınçlı pompalar üretilmiş ve bunun sonucu olarak yüksek enjeksiyon basıncına ve akış hızına ulaşılmıştır. Su-çimento karışım tesisleri modernleştirilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde uygun olmayan bölge ve hava koşulları sorununun üstesinden gelinmiş, makinaların güvenlik koşulları önemli ölçüde geliştirilmiş olup işlem için gereken iş gücü, hazırlık çalışmaları ve diğer işler için gereken süre azalmıştır [20].

4.3.Tanımlar ve Temel Özellikler

Jet grouting yönteminde kullanılan ve hemen hemen her tür zemini kesebilecek kapasitedeki jet püskürtücülerinin sayesinde zemin cinsi, klasik enjeksiyon yöntemlerine çok daha az önem taşımaktadır. Ayrıca zeminin kısmi veya tamamen aşındırılması sebebi ile enjeksiyonun yayılması, zeminin permeabilitesine bağımlı olmaktan çıkmakta ve bu yüzden maliyetlerde oldukça gerçekçi bir şekilde öngörülebilmektedir. Bu sebeple jet grouting, altıvyonel zeminlerden kumlu çakıllı zeminlere, kohezyonlu zeminlerden karışık suni dolgu ve turba zeminlere kadar hemen her tür zeminde uygulanabilmektedir.

Jet grouting yönteminin sadece yüksek basınçlı bir enjeksiyon yöntemi olduğunu söylemek tam olarak doğru değildir. Yöntemde zeminin kesilmesi, yüksek hıza sahip olan akışkan akım(lar)ının enerjisi ile olmaktadır. Bu hız, akışkanı küçük püskürtme ağızlarından (nozzle) dışarı doğru zorlayan pompalama basıncı ile elde edilir.

Welsh, Rubright ve Coomber tarafından yapılan genel bir tanımlamaya göre jet grouting ; “yüksek basınçlı su jetleri ile kesilmiş zeminin yerine kontrollü ve eşzamanlı olarak çimento enjeksiyonu verilmesi” dir [21].

A.S.C.E. Geoteknik Mühendisliği Grubu, Enjeksiyon Komitesine göre ise jet grouting ; “Yatay ve düşey su jetleri yardımı ile alüvyonel zemini delen, kesen ve yıkayan özel bir delici uç kullanıp ucun geri çekilmesi sırasında yüksek basınçla yatay püskürtme ağızlarından enjeksiyon pompalayıp zeminle karışmasını sağlayan ve böylece sağlam ve geçirimsiz kolonlar oluşturan bir tekniktir.” şeklinde tanımlanmaktadır [22].

Jet grouting yönteminde önemli bir nokta, yapılan jet enjeksiyonu sonucu kesilen zemin parçacıklarının bentonit bulamacı ile beraber yukarı çıkıp gövde ile delik çeperi arasından dışarı çıkabilmesini sağlamak için kesici ucun, gövdeden daha kalın olması gereğidir. Bu sayede delici gövde ile delik çeperi arasında halka geometride bir boşluk oluşmakta ve oluşan artık malzeme buradan yüzeye taşınmaktadır. Artık malzemenin dışarı atılabilmesi enjeksiyonun zemine penetrasyonu açısından da önemlidir. Eğer basınçlı jetlerden birisi durursa, yenisi delik ağzından aşağı verilir. Kesilmiş olan zemin parçacıklarının uzaklaştırılıp yukarı çıkartılması, zeminin akışkan akımları ile aşındırılması sırasında basınçların kontrol edilebilmesini ve hidrolik enerjinin boşa harcanmamasını sağlamaktadır.

4.4. Jet grouting Sistemleri

Günümüzde jet grouting, püskürtme ağızlarının yerleşimi ile etkili yarıçapları üzerinde yapılabilecek değişiklikler ile üç farklı sistemde uygulanmaktadır. Uygulanacak sistemin seçimi, uygulama yapılacak zeminin cinsine, imalat sonucunda iyileştirilmiş zeminden beklenen geometrik ve mekanik özelliklere ve çevre koşullarına bağlı olmaktadır. Bu üç jet grouting sistemi; tek akışkanlı sistem, iki akışkanlı sistem ve üç akışkanlı sistem olarak isimlendirilirler.

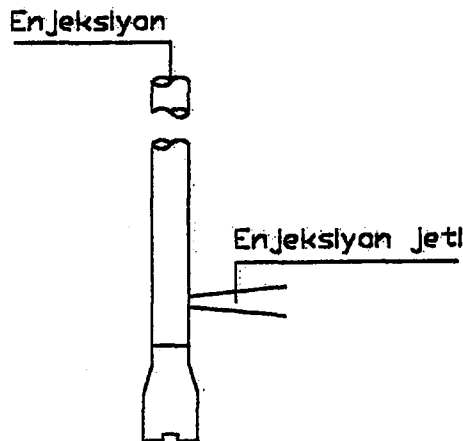
4.4.1. Tek Akışkanlı Sistem

Tek akışkanlı jet grouting yöntemi, üç sistem arasında en basit olanıdır. Bu basitliğin sebebi zemini kesme, aşındırıp uzaklaştırma ve zemin ile enjeksiyonu karıştırma işlevlerini yerine getiren tek bir jet akımı olmasıdır. Sistemde enjeksiyonun iletildiği ve üzerinde alt uca yakın, 2.0~4.0 mm. Çapında bir veya birkaç püskürtme ağızı bulunmaktadır.

Çimento enjeksiyonu sistem ile 90°'lik açı yapacak şekilde püskürtülür ve böylece zemin bir taraftan sökülürken, aynı anda sökülün zemin ile çimento enjeksiyonu yer değıştirmiş olur. Prosesin devamında püskürtme ağızlarının bulunduğı monitör, zemin tabakalarına bağılı olarak sabit hızlarla (gerekirse döndürölerek) geri çekilir ve böylece sökülmiş zemin ile çimento enjeksiyonu karışımından (döndürölerek geri çekilmesi durumunda silindirik geometride) jet grout elemanı oluşmuş olur. Çimento enjeksiyonu ile zemin danelerinden oluşan bu karışımın özellikleri, iyileştirilmiş zemin özelliklerini belirler.

Tek akışkanlı sistemde en önemli kısıtlayıcı faktör kullanılan yüksek kapasiteli pompaların gücü ve pompalayabildikleri enjeksiyon akımı miktarlarıdır. Bu yöntemde kullanılan pompalar yaklaşık 600 bar (60 MPa) güçte, 150-475 lt/dak. enjeksiyon akımı basabilecek ve 1~8 saat aralıksız çalışabilecek kapasitede olmalıdır. Tek akışkanlı jet grouting sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tek akışkanlı sistemden farklı olarak diğeri iki yöntem yalnızca jet akımına dayanmamakta, buna ek olarak sıkıştırılmış havanın kaldırma etkisinden de yararlanmakta, ancak bu etki düşeyden yataya gidildikçe azalmaktadır. Bu sebeple tek akışkanlı yöntem, yatay imalat yapılacak uygulamalarda (örneğin tüneller, inşaatlarındaki uygulamalarda) çoğunlukla tercih edilmektedir.



Şekil 4.2 Tek akışkanlı jet grouting sistemi

Tek akışkanlı yöntemde, halka şeklindeki boşluktan yüzeye alınan artık malzeme, diğer jet grouting sistemlerine göre daha az olmaktadır. Araştırmalar göstermektedir ki jet grouting uygulaması sonucunda (özellikle tek akışkanlı sistem ile), oluşturan elemanın çevresindeki zeminde (yaklaşık yarıçap mesafeye kadar), belirgin bir kompaksiyon (sıkışma) oluşmaktadır. Bu etki, tünellerdeki uygulamalarda ve sıvılaşma potansiyeli olan zemin koşullarında faydalı olmaktadır. Tek akışkanlı sistem ile oluşturulan elemanlar diğer iki sisteme göre daha küçük boyutlu olmaktadır. Kolon tip elemanlar tek akışkanlı sistem ile, kohezyonlu zeminlerde 40~80 cm., kohezyonsuz zeminlerde 50~120 cm. çapa kadar oluşturulabilmektedir. Diğer taraftan püskürtülen enjeksiyon miktarının aynı olması durumunda granüler zeminlerde mukavemeti en yüksek elemanlar tek akışkanlı sistem ile oluşturulmaktadır. Ayrıca, yine tek akışkanlı sistem ile imal edilen jet grout elemanların boşluk oranları, diğer iki sistem ile yapılanlara göre daha az olmaktadır [9,14,18,23].

4.4.2. Çift Akışkanlı Sistem

Çift akışkanlı jet grouting sistemi tek akışkanlı sisteme göre daha karmaşık ve ileri bir sistemdir. Çift akışkanlı jet grouting sisteminin en belirleyici özelliği, yüksek hızla sahip enjeksiyon jetinin, 2~15 barlık sıkıştırılmış ve enjeksiyonu çevreleyen hava konisi ile beraber püskürtülmesidir. İçerik olarak bu sistem, tek akışkanlı sistemin modifiye edilmiş şekli olarak değerlendirilebilir. Sisteme eklenmiş olan bu sıkıştırılmış hava jeti çimento enjeksiyonunun sahip olduğu aşındırıcı etkiyi oldukça artırır ve oluşturulan kolon tipi jet grout elemanlarının çaplarında tek akışkanlı sisteme göre neredeyse 2 kat artış olur. Oluşturulan elemanların boyutlarındaki bu artışın başlıca sebepleri şu şekilde sıralanabilir.

- Bu hava konisi sayesinde kesilen zeminin jet akımının içine düşmesi engellenmiş olur ki böylece türbülanslı jet akımında enerji kaybı minimuma indirilmiş olur.
- Kesilen zemin parçacıkları kabarcık etkisi ile kesme alanından daha verimli şekilde uzaklaştırılıp zemin yüzeyine kaldırılması, hava konisi sayesinde mümkün olmaktadır.

- Sıkıştırılmış hava, jet akımı ile mevcut yeraltı suyu arasında tampon işlevi görmektedir. Dolayısıyla jet akımı, sıkıştırılmış havanın kullanılmadığı sisteme göre, iki kat daha uzun mesafede kesme ve aşındırma gerçekleştirebilmektedir.

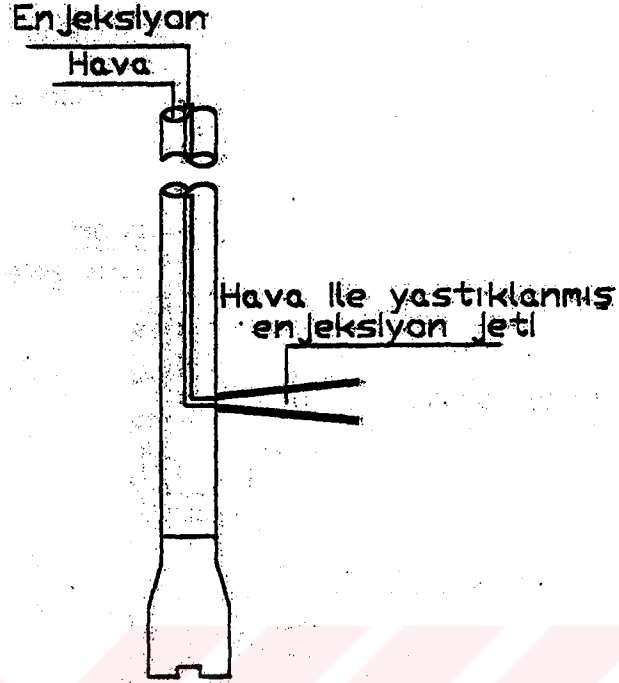
Çift akışkanlı sistemde, enjeksiyon püskürtme ağızları ile sıkıştırılmış hava jetinin çıkış ağzı aynı eksenli olacak şekilde düzenlenmiştir. Çift akışkanlı jet grouting sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çift akışkanlı jet grouting sisteminin en büyük zaafı ise oluşturulan elemandaki hava(boşluk) oranının yüksek olmasıdır. Bu da üç sistem içinde en düşük mukavemetli elemanların çift akışkanlı jet grouting sistemi ile oluşturulan elemanlar olması sonucunu doğurmaktadır. Bu şekilde sıkıştırılmış hava jeti kullanılması daha karmaşık bir donanım gerektirmektedir. Basıncı havanın iletilebilmesi için bir iç ve bir dış kabuk kullanılmakta, hava jetinin çıkışı ise 5 mm. çaplı, halka biçimli bir ağızdan olmaktadır. Bu iletim yolunun sürekli açık ve işlev görür durumda olması gerekmektedir. Aksi halde sistem, tek akışkanlı sisteme dönüşmektedir. Çift akışkanlı jet grouting sisteminde en çok karşılaşılan sorun halka çıkış ağzında oluşabilen tıkanmadır [9,14,18,23].

Bu sistem genellikle sızdırmazlık için cut-off veya perde inşasında ve çöp alanları ile sıvılaşma potansiyeline sahip alanların ıslahında kullanılmaktadır [6,18].

4.4.3 Üç Akışkanlı Sistem

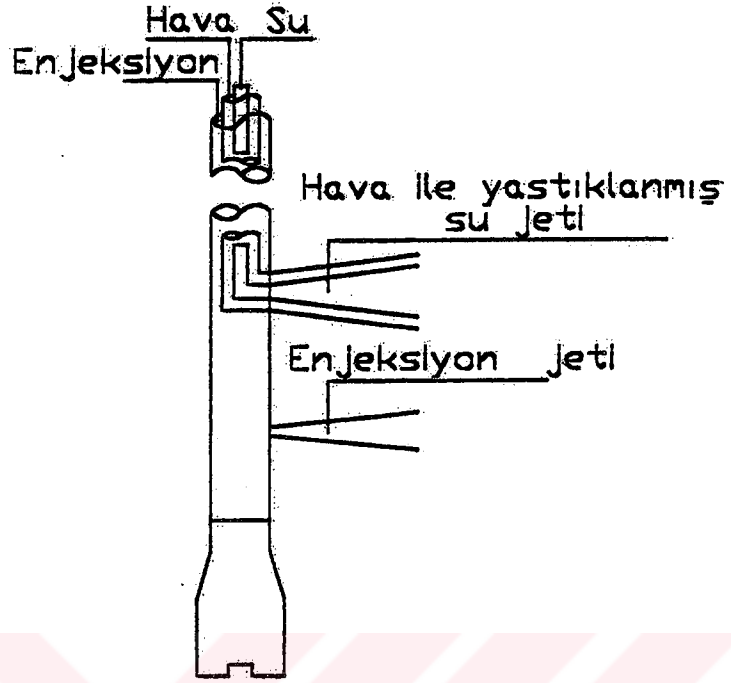
Üç akışkanlı sistem, üç jet grouting sistemi içinde en ileri ve karmaşık sistemdir. Sistemde zeminin sökülmesi, sıkıştırılmış hava konisi tarafından çevrelenmiş su jeti ile yapılmakta ve bu jetten bir miktar aşağıya (birkaç desimetre) aynı eksenli olacak şekilde yerleştirilmiş olan püskürtme ağzında çimento enjeksiyonu tek başına püskürtülmektedir. Üç akışkanlı jet grouting sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



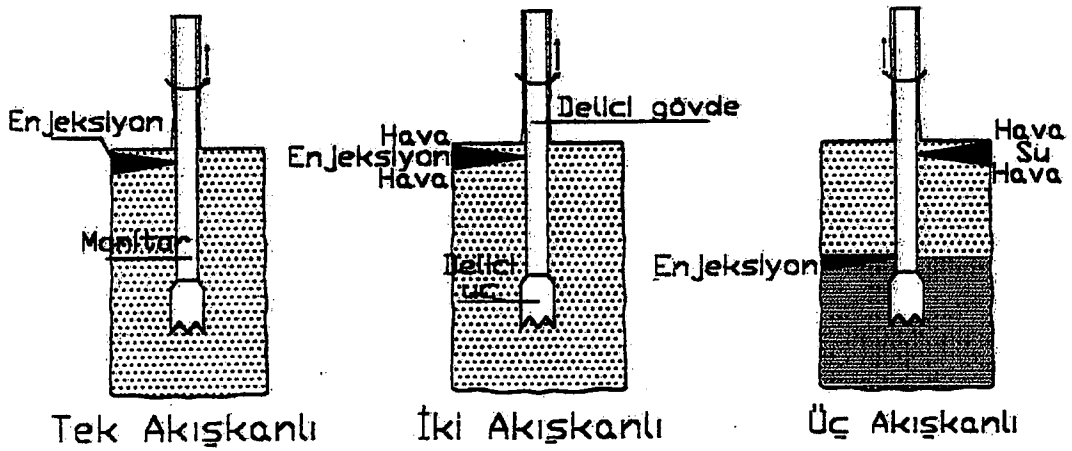
Şekil 4.3 Çift akışkanlı jet grouting sistemi

Bu tasarım sayesinde, sistemin aşındırma enerjisi ve verimi önemli ölçüde artmaktadır. Üç akışkanın (hava, su ve çimento karışımı) ayrı ayrı iletilip püskürtülmesi daha fazla zeminin sökülüp uzaklaştırılmasına, zemin ile enjeksiyonun da tam anlamıyla yer değiştirmesine yol açmaktadır. Jet grout elemanına istenen geometriyi vermek, oluşan elemandaki çimento karışımının ve zeminin miktarlarını belirlemek amacı ile çimento karışımının, suyun ve sıkıştırılmış havanın basınçları ve akım miktarları(debileri) ayrı ayrı ayarlanabilir. Sistemdeki su jetinin basıncı 500 bara kadar çıkabilmekte, hava basıncı 5~12 bar ve çimento karışımının basıncı ise 5~30 bar değerinde olmaktadır. Üç akışkanlı sistem genellikle en büyük boyutlu elemanların oluşturulduğu sistemdir. Bu sistem ile kohezyonsuz zeminlerde 300 cm. çapa kadar kolon tipi jet grout elemanlar, kohezyonlu zeminlerde ise 150 cm. çapa kadar kolon tipi jet grout elemanlar oluşturulabilmektedir.

Zemini paralamada kullanılan su jetinin debisi 1 lt/sn, basıncı 40 MPa'dır. Su jetinin hava kılıfının basıncı 0.8 MPa'dır. Borunun dönme hızı 5 devir/dak., yukarı çekilme hızı 50 mm/dak.'dır [24].

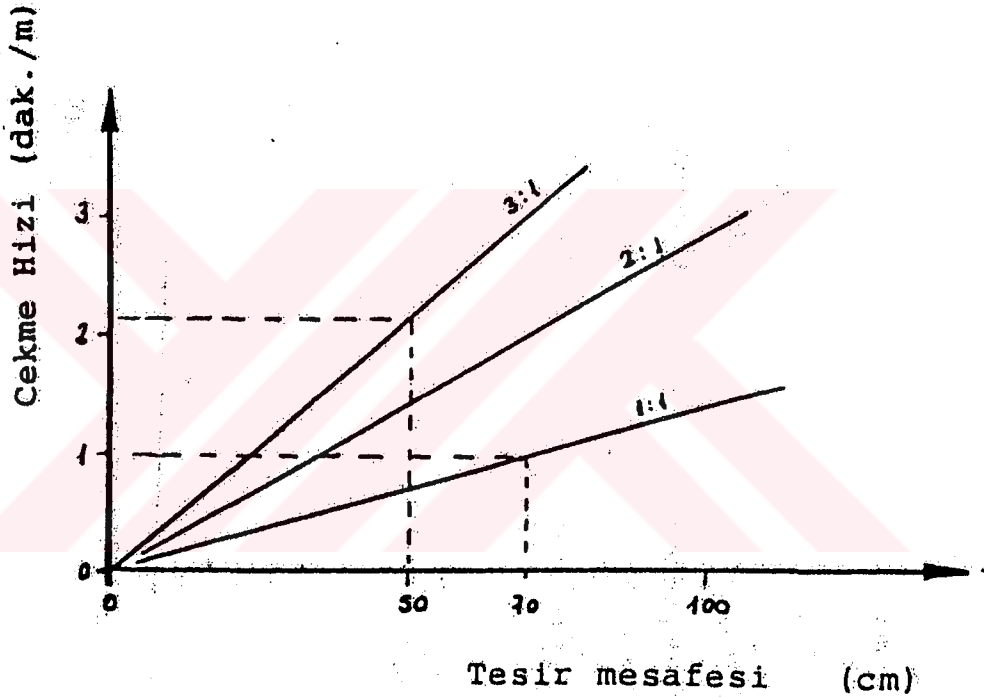


Şekil 4.4 Üç akışkanlı jet grouting sistemi



Şekil 4.5 Jet grouting sistemleri [15]

Şekil 4.5’de jet grouting sistemlerinde kullanılan akışkanlar görülmektedir. Çimento karışımı bir enjeksiyon jetinin kesici unsur olarak kullanılması halinde zemin içindeki bulamacın özgül ağırlığı $16 \text{ kN/m}^3 \sim 20 \text{ kN/m}^3$ mertebelerine ulaşmaktadır. Buna karşılık kesici unsur olarak sadece su jeti kullanıldığı halde zemin içindeki bulamacın özgül ağırlığı daha az yoğun olmak üzere 13 kN/m^3 civarında olmaktadır. Tecrübeler göstermiştir ki; kesim sırasında su jetini kullanmakla, tesir çapları büyümektedir. Şekil 4.6’da muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki verilmektedir



Şekil 4.6 Muhtelif yoğunluklu ortamlarda çekme hızı ile tesir mesafesi arasındaki ilişki [1].

4.5. Jet Grouting Yönteminin Avantajları ve Sınırları

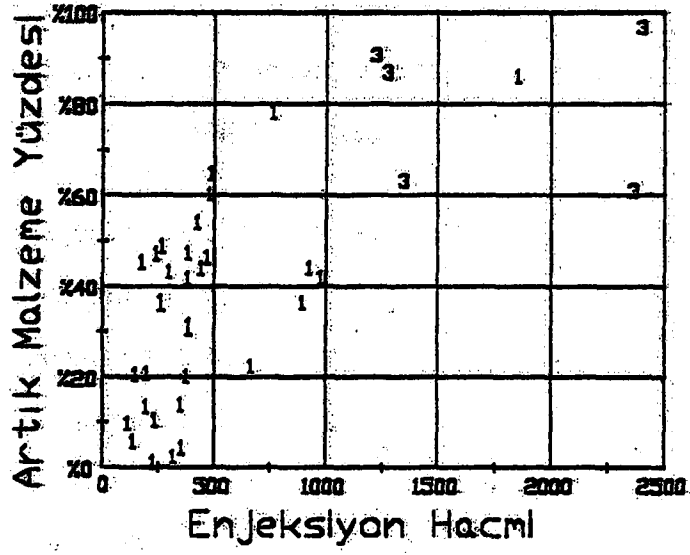
Farklı bir malzemenin zemine sızdırılması ve nüfuz ettirilmesi prensibine dayanan yöntemler arasında jet grouting yönteminin en büyük avantajı çakıl, kum, silt ve kil gibi hemen hemen her tür zeminde kirletici etkisi olmayan su-çimento karışımları kullanılarak stabilize edilmesidir. Bu yöntem ile oldukça küçük çaplı (9~13 cm.) enjeksiyon delikleri etrafında, geniş çaplı (300 cm. 'ye kadar) kolon tipi elemanlar oluşturulabilir. Jet grouting imalatı istenilen derinlikte başlatılabilir ve istenen

derinlikte sonlandırılabilir. Bu da çok geniş bir tasarım serbestliği oluşturmaktadır. Bilinen en geniş jet grouting uygulaması (70 m.), 1992'de Alpler'deki bir demiryolu tüneli yanındaki heyelan bölgesinin konsolide edilmesi amacı ile Trevi tarafından yapılmıştır [5].

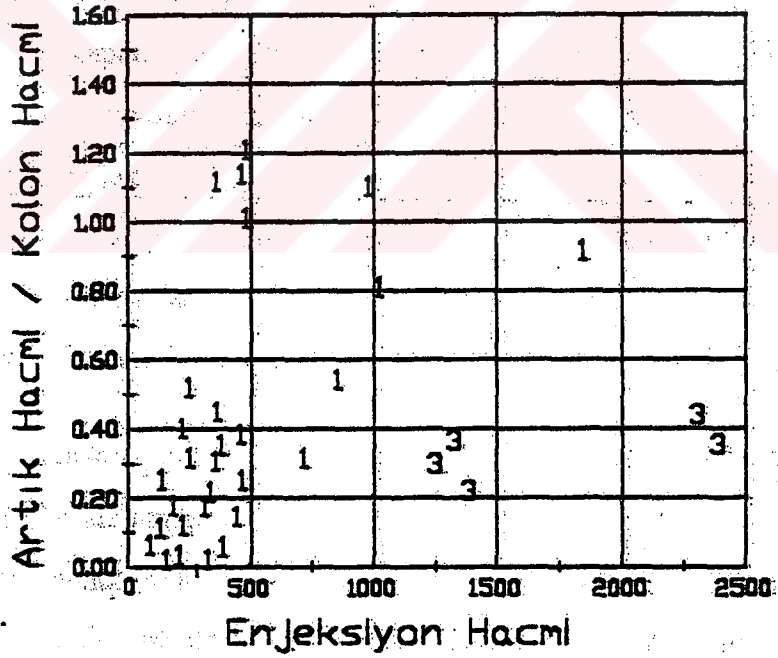
Akışkanlar mekaniğinin bir gereği olarak, kesilen zemin parçacıkları püskürtme ağzından zemin yüzeyine kadar kesintisiz bir akım ile çıkmalıdır. Bu, her üç yöntemde de her zaman mümkün olmamaktadır. Bu da jet grouting yönteminin zayıf bir noktasıdır. Eğer jet grouting yöntemi ile yapılan iyileştirme sırasında zemin iskeletinde bir kırılma ve göçme oluşursa istenen geometride bir eleman oluşturulması mümkün olamaz.

Jet grouting yönteminde, delikten yüzeye çıkan artık miktarı üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Yüzeye çıkan artık malzeme hacminin yapılan enjeksiyon hacmine oranının incelendiği bir araştırma Rodio (1987) tarafından yapılmıştır. Tek akışkanlı sistem ile 31, üç akışkanlı sistem ile de 5 adet jet grout kolonunun oluşturduğu bu çalışmada ortaya çıkan oranlar Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi artık hacmi ile enjeksiyon hacmi arasındaki oran tek akışkanlı sistemde %50'nin altında olmakta iken üç akışkanlı sistemde %60'ın üzerinde olmaktadır. Bu da tek akışkanlı sistemde, üç akışkanlı sisteme göre daha az artık oluştuğunu göstermektedir. Projede istenen ve tasarlanan jet grout elemanları, tek akışkanlı sistem ile oluşturulabilecek boyutlarda (çap 1~1.2 m.'ye kadar ise) yüksek mukavemetli elemanlar ise, tek akışkanlı sistemde yapılacak bir uygulama ile istenilen mekanik ve geometrik özellikler elde edilmiş olur. Aynı zamanda imalatla enjeksiyon verimliliği yüksek (artık/enjeksiyon oranı) düşük olur ve artık madde sorunu (toplanıp uzaklaştırılması) en aza indirilmiş olur.

Eğer geniş bir alanda sürekli bir iyileştirme isteniyorsa birkaç delgi yapıp geniş çaplı kolonlar oluşturmak faydalı olmaktadır. Bu tip geniş alanlı iyileştirmelerde, yüzeye çıkan artık hacminin oluşan kolon hacmine oranı ile yapılan enjeksiyon hacmi arasındaki ilişkiye bakılmalıdır. Yine aynı çalışmada bu tip bir araştırmanın sonuçları da verilmiş ve sonuçlar aşağıdaki Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekilden de gösterebileceği gibi oluşan her 1m³ kolona karşılık 0.20~0.40 m³ civarında artık oluşmaktadır.



Şekil 4.7 Artık malzeme hacminin enjeksiyon hacmine oranı [25]



Şekil 4.8 Artık malzeme/kolon hacmi oranı ile enjeksiyon hacmi arasındaki ilişki[25]

Enjeksiyon miktarı arttıkça oluşan kolon çapı da artmaktadır. 500 lt / dak. civarında enjeksiyon miktarında üç akışkanlı sistem ile geniş çaplı ve tek akışkanlı sisteme göre daha az artık oluşturan imalat yapılabilmektedir.

Tüm bunların ışığında jet grouting yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir [1,14,18].

1. Yaklaşık olarak her tür zeminde uygulanabilen enjeksiyon metodudur.
2. Diğer inşaat yöntemlerine kıyasla daha hafif ve küçük ekipmanla gerçekleştirilebilir.
3. En yumuşak zemin ortamlardan kaya ortamlara kadar tüm uygulamalarda ve zemin koşullarında aynı ekipman kullanılmaktadır.
4. Kullanılan su jetinin aşındırma etkisi sayesinde metot klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha verimli ve ekonomik olmaktadır.
5. Küçük boyutlu makineler kullanılarak, mevcut binaların bodrum katından veya iki bitişik bina arasındaki dar sahadan enjeksiyon işi gerçekleştirilebilir.
6. Yöntemin uygulanışı sırasında herhangi bir gürültü, titreşim ve kirlilik problemi olmaz. Çimento, bentonit ve su karışımı kullanıldığı için; kimyevi enjeksiyonlar gibi çevre kirlenmesi söz konusu olmaz. Zararlı vibrasyon etkisi yaratmadığı için hassas ve tarihi yapılar yakınında uygulanabilir. Temel takviyesi sırasında yapının deformasyonu çok az olur veya hiç olmaz.
7. Önceden belirlenebilecek geometrik ölçüler çerçevesinde uygulanacağından ötürü malzeme sarfiyatı, büyük yaklaşımla önceden hesaplanabilir.
8. Yöntem ile, yalnızca 13 cm.'lik bir enjeksiyon deliğinden bir seferde 3 m²'lik (uygun parametre ve zemin koşulları ile 7~8 m²'ye kadar) temel zemininin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Yani delinen küçük çaplı(~10 cm.) delgi deliğinden başlayarak geniş çaplı (50~300 cm.) kolonlar elde etmek mümkündür.

9. İstenilen derinlikten başlatılıp, zemin yüzeyi altında istenilen derinlikte bitirilebilir. Bu yüzden, taban kabarmasının önlenmesi veya tünel yapımında geçirimsizliğin zemin yüzünden sağlanması gibi problemlerin ekonomik çözümüne elverişlidir.
10. Klasik enjeksiyona göre kontrolü çok daha kolaydır. İstenilen mukavemet ve permeabilite tasarlanabilir.
11. Yöntemde kullanılan enjeksiyon malzemeleri çok basit çimento karışımlarıdır. Ancak karışımların basitliğinin yanında minimum birim maliyetteki sarfiyat yüksektir.
12. Monitör ve püskürtme ağızlarının tasarımındaki serbestlik, yükleniciye, yapılan uygulamanın amacına uygun olacak şekilde farklı geometride elemanlar imal etme şansını verir. Yöntem ile düşey duvarlar yapılabildiği gibi, yatay, eğimli ve dik duvarlarda yapılabilmektedir.
13. Yüksek riskli inşaatlarda can güvenliği sağlanır.
14. Arazi şartlarına bağlı olarak inşaat süresini %30 ile %60 kısaltır.

Bu avantajların yanı sıra yöntemin bazı dezavantajları ve zayıf noktaları da mevcuttur ve bunlar aşağıda sıralanmıştır [14,18].

1. En önemli güçlük, zemin koşulları nedeni ile geometri ve mukavemette ortaya çıkan değişkenliktir. Yük taşıyan kolonların çapının mümkün olduğu kadar aynı olması istenir. Bu yüzden iyileştirmeye daha az cevap veren tabakalar geçilirken dikkatli olunmalıdır. Kolonlar genellikle üniform zeminlerde çok başarılıdır. Bütün uygulamalarda, çap ve mukavemette meydana gelebilecek değişiklikler göz önünde tutulmalıdır.

2. Yöntem henüz gelişme aşamasındadır ve ekipmanların geliştirilmesi ile ilgili bazı sorunlar henüz çözüme kavuşmamıştır ve bu durum da imalatın maliyetini etkilemektedir. İşe başlanmadan önce maliyet tam olarak belirlenmeyebilir. Zemin cinsine göre aşırı çimento tüketimi gözlenebilir. Çift ve üç akışkanlı sistem için daha kompleks parçalar gerekli olup sıklıkla yenilenmesinin gerekli olması halinde, beklenenden daha pahalı olabilir.
3. Tasarımda yararlanabilecek kesin kurallar mevcut değildir ve tecrübeler ile yapılmış olan uygulamalardan elde edilen sonuç ve gözlemler kullanılmaktadır. Teknolojinin nispeten yeni oluşu ve teorik bilgi eksikliği sebebi ile esas olarak geçerli olan kriter “ilerledikçe tasarla” (design-as-you-go) şeklinde özetlenebilir.
4. Zemin içinde enjeksiyonun dağılımının ve oluşan geometrinin bilinmesi zordur. Çok yüksek basınç zeminde çatlak ve kırıklara sebep olabilir. Bunun sonucunda da zeminin taşıma gücünde düşüş olabilmekte ve komşu yapılarda bazı oturmalar gözlenebilir.

Jet grouting yönteminin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir [1].

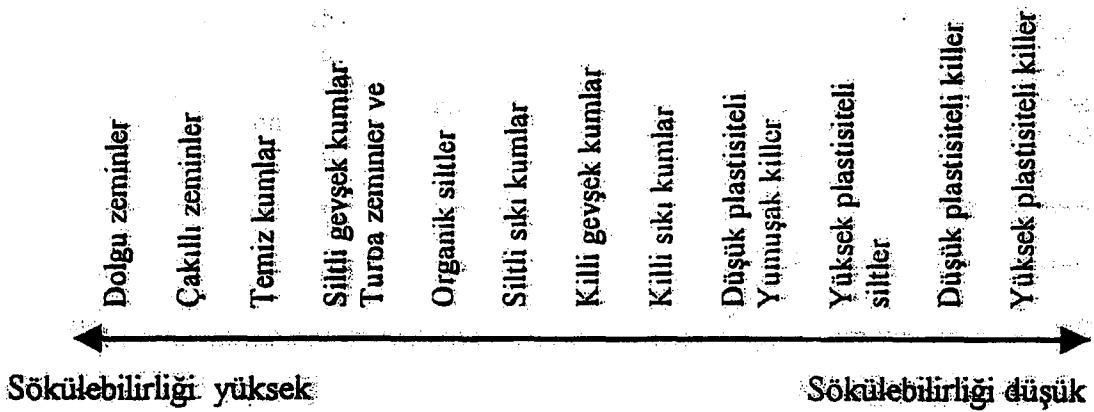
1. Bu konuda özenli ve dikkatli gözlem ve testler yapılmalı, iş konusunda tecrübe ve bilgi sahibi Mühendislerce kontrol ve idare edilmelidir. Geniş emniyet tedbirleri alınmalıdır.
2. Yüksek basınçla çalışırken püskürtme ağızlarının tıkanmalarını önleyici tedbirler alınarak, enjeksiyon hortumlarının patlamasının önüne geçilmelidir.
3. Aşınmanın yüksek oluşundan dolayı tamir ve bakım süresi mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.
4. Enjeksiyon sırasında uygulanan basıncın kontrollü olarak ortadan kaldırılabilmesi sağlanarak zeminde arzu edilmeyen kabarma, çatlama ve kırılmaların önüne geçilmelidir.

5. Mutlak suretle yapılması gereken periyodik bakım (bilhassa pompanın temizliği ile) ve yedek parça sarfiyatının minimum tutulması gereklidir.

4.6 Jet grouting İmalatı ve Temel Jet Grouting Parametreleri

4.6.1. Temel Faktörler

Jet grouting yöntemi, tüm zemin tipleri ve dane çaplarında uygulanabilen ve çimento bazlı enjeksiyon karışımlarının kullanıldığı bir yöntemdir. Kohezyonsuz zeminler bağlayıcı olmamaları sebebi ile daha kolay kesilebilmekte ve bu şekilde türbülanslı bir ortamda kaldıklarında kendi kendilerine yıkanıp aşınabilmektedirler. Diğer taraftan killeri bir kohezyon kuvveti ile bağlanmış zeminlerdir. Plastik killeri delgi sırasında topaklanarak parçalar halinde koparlar. Bu da delik ağzının tıkanması ve geri dönmesi gereken artık malzemede kayıplar olmasına yol açar. Böyle bir durumda oluşturulacak jet grout kolonunun kalitesinin ve geometrisinin istendiği gibi kontrol edilmesi mümkün olmamaktadır. Kesilen zeminin dışarı alınması, delicinin kaplanması, birden çok püskürtme ağzı kullanılması, püskürtme ağızlarının farklı doğrultulara yönlendirilmesi ve hava kılıfı oluşturulması gibi uygulamalar ile desteklenebilir. Jet grouting yönteminin uygulanabileceği zeminler sökülebilirliği en yüksek olan zeminden en düşük olana kadar aşağıda gösterilmiştir [15].



Tablo 4.1’de çeşitli jet grouting yöntemleri ve uygulanan en temel parametreler gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Jet grouting yöntemleri ve spesifik parametreler [26]

Yöntemin Orijinal Adı	Operasyon Prensibi	Jet Basıncı (Mpa)	Püskürtme Ağzı Çapı (mm)	Monitör Dönme Hızı (rpm)	Kolon Çapı	Notlar
Jet Grout (JG)	Üstte su jeti Altta enjeksiyon jeti	20	1	-	-	*Sadece panel *0.8-1.5 m. ara ile enjeksiyon deliği önceden açılır
Kimyasal Karıştırma Kazığı (CCP)	Yalnız enjeksiyon jeti	20~40	1.2~3.0	20	0.3~0.6	*Genelde çimento kullanılır *Tek akışkanlı sistem gibi
Jumbo Özel Grout (JSG)	Basıncı hava konisi içinde enjeksiyon jeti	20	3.0~3.2	6~10	0.6~2.0	*Çift akışkanlı sistem gibi
Kolon Jet Grout (CJG)	Üstte basıncı hava konisi içinde su, altta enjeksiyon jeti	40~50	Üst 1.8~3.0 Alt 3.0~5.0	5~15	0.8~3.0	*Üç akışkanlı sistem gibi
Mini Max (MM)	CCP gibi ancak kimyasal çimento kullanılıyor	20	1.2	20	0.8~1.6	*Yeraltı suyu altında yumuşak zeminler için (killi turba)
Jumbo Mini Max (JMM)	MM gibi 20~40 cm.'lik kanat var	20	1.2	20	0.2	*Yeraltı suyu altında yumuşak zeminler için
Süper Zemin Stabilizasyon (SSS)	Hava-su jeti ile aşındırma yapılıp ultrasonik gözlem yapılıyor	20~60	2.0~2.8	3~7	2.0~4.0	*Kolon karışımı ve geometride tam kontrol *Maliyet yüksek

Uzun yıllar boyunca yapılan arazi deneyleri ve edinilen tecrübeler derlenerek, uygulanan yöntem ve kullanılan parametreler, zemin tipi ve sonuçta oluşan kolon çapı arasındaki ilişkileri ortaya koyan çalışmalar yapılmıştır. Bu konuda yapılan çalışmaların ve araştırmaların ışığında jet grouting yönteminde sonucu etkileyen en önemli değişken ve parametrelerin; su jeti basıncı (aşındırma gücü) ile monitörün geri çekilme ve dönme hızları olduğu Coomber [27] tarafından ileri sürülmüştür.

İmalatı tamamlanmış bir jet grout elemanının değerlendirilmesindeki en önemli kriterler şu şekilde sıralanabilir [9]:

- Rotasyonlu şekilde imal edilen kolon tipi elemanların çapları
- Rotasyonsuz şekilde imal edilen panel tipi elemanların genişlikleri
- Elemanların basınç mukavemetleri
- Elemanların permeabiliteleri

Jet grouting yönteminin fizibilitesini ve parametrelerini etkileyen faktörler Cippo ve Tornaghi tarafından şu şekilde özetlenmiştir [28]:

- Detaylı zemin profili ve genel hidrojeolojik bilgiler
- Zeminin kohezyonu ve yoğunluğu, bunların belirlenmesi amacı ile yapılan koni penetrasyon, SPT testlerinin sonuçları.
- Kohezyonsuz zeminlerde dane çapı dağılımı, su muhtevası, kohezyonlu zeminlerde Atterberg limitleri.
- Enjeksiyon karışımı ve zemin enjeksiyon karışımı üzerinde permeabilite, mukavemet, dayanıklılık gibi özelliklerin belirlenmesi amacı ile yapılan deneylerin sonuçları.
- Jet grouting parametrelerinin kontrolü amacı ile yapılan arazi deneyleri ve kontrollerinin sonuçları.

Jet grouting imalatında istenen mukavemet ve permeabilite değerlerine ulaşılabilmesi çeşitli ve birbirine bağlı faktörlere dayanmaktadır. Sonucu etkileyen bu faktörler şunlardır [9]:

- Zeminin sökülmesi için kullanılan jetin spesifik enerji, sökülecek zeminin mukavemetinin artmasına bağlı olarak artar. Bu spesifik enerji, jet hızına ve dolayısıyla uygulanan basınca ve püskürtme ağzı çapına bağlıdır.
- Kullanılan jetin basınçlı hava ile çevrelenerek kılıflaşması, kesme enerjisini ve verimliliğini artırır.
- Belirli zemin mukavemetinde imal edilen elemanların çapı, uygulanan spesifik enerjinin ve / veya etkili kesme süresinin artması ile artar. Bu ise dönme ve geri çekme hızları ile kontrol edilir.
- Sabit boyutlarda elemanların imal edilebilmesi için, derinlik arttıkça spesifik enerjinin ve / veya etkili sürenin artırılması gerekir. Zemin mukavemetinin derinlik ile birlikte artması bunun sebebidir.
- Gereksinilen pompaj kapasitesi spesifik enerjiye ve pompalanacak malzemenin miktarına bağlıdır.
- İmal edilen elemanların mukavemeti, çimento karışımının nihai mukavemetine, çimento karışımı ile zeminin karışım oranlarına, imalat öncesi doğal zemin özelliklerine ve oluşturulan elemanın homojenliğine bağlıdır.
- Genel olarak, imal edilen elemanın mukavemeti ve homojenliği arttıkça permeabilitesi azalır. Mukavemeti düşük kohezyonlu zeminlerde oldukça düşük permeabilite değerlerine ulaşılabilir. Ancak imalatta karışım oranının düşüklüğü ve elemanın homojen olmaması istenmeyen şekilde aşınabilirliğe yol açmaktadır.

Tüm bu faktörler göz önüne alındığında, sonucun başarılı olması için dikkatli bir tasarım ve işçilik gerekmektedir ve başarının kanıtlanmasında en geçerli yol arazi deneylerinin yapılmasıdır.

Bunlara ek olarak jet grouting yönteminde çalışma programı da ayrıca önem taşımaktadır. Bu konuda önemli birkaç nokta şu şekilde belirtilebilir [15] :

- Düşeyle 30°'den daha fazla açı yapan uygulamalarda, zeminde kırılma ve kabarmalara yol açabileceği gibi hava ayrı bir akışkan olarak kullanılmamalıdır.
- Genel olarak düşük gerilme altındaki bölgelerden, yüksek gerilme altındaki bölgelere doğru ilerlenmelidir. Yani temel takviyesi yapılırken temelin köşe ve kenarlarından ortasına doğru ilerlenmelidir. Böylece zeminde kemerlenme oluşur ve iyileştirilen zemin yük taşıyacak duruma gelinceye kadar yapıdaki deformasyonlar ve oturmalar minimize edilmiş olur.

4.6.2 Jet Grouting Yönteminin Uygulanışı

Prensip olarak dışarıda hazırlanmış çimento şerbetinin, yüksek basınç altında ince püskürtme memelerinden, zemin içine püskürtülerek çevrede bulunan zeminin bu şerbetle karıştırılması suretiyle zeminin ıslah edilmesidir. [1,13].

4.6.2.1. Delme Aşaması

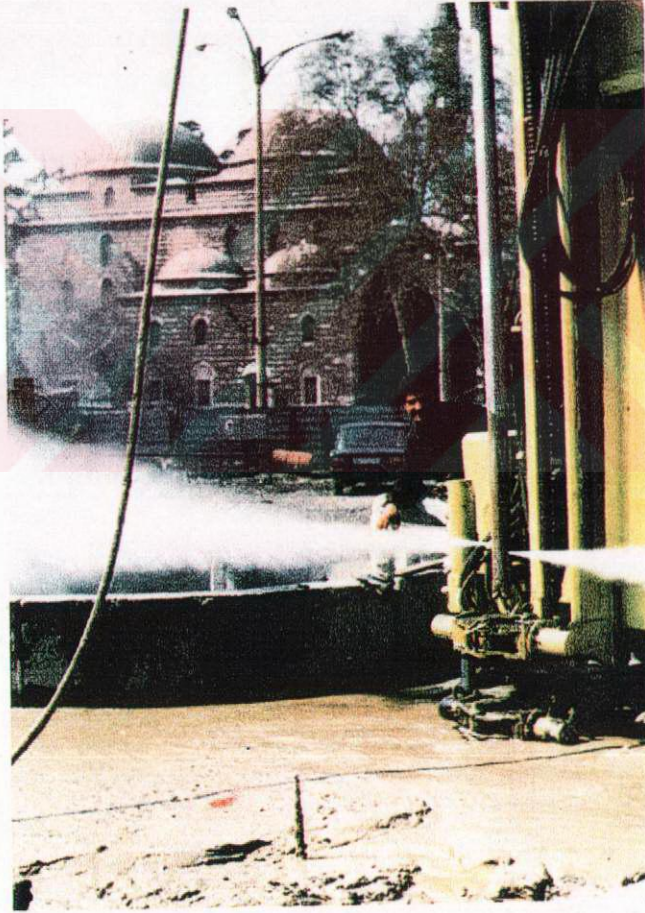
Genellikle 100-150 mm. çaplı enjeksiyon forajının öngörülen derinliğe kadar açılabilmesi için genelde rotari usulü ile çalışan delici bir makine ve delmede kolaylık için de sirkülasyon suyu kullanılmaktadır. Delgi klasik yöntemlerdeki gibi delinen zemin özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirir. Dolayısıyla klasik sistemlerdeki tüm rotari delgi yöntemleri kullanılır. Delgi sırasında kullanılan akışkanlar su, hava, bentonit süspansiyonu veya çimento-su karışımıdır. Yüksek basınçlı enjeksiyon yapımında aynı delgi tijleri kullanılmaktadır; bu delgi tijleri yüksek basınçlı enjeksiyon için özellikle basınca dayanıklı olarak imal edilmiştir. Birleşim yerleri 500~600 bar basınca dayanabilmektedir [16].

4.6.2.2 Püskürtme Aşaması

Delme tijinin üzerindeki püskürtme memelerinden 700 bara kadar ulaşan basınçla enjeksiyon malzemesi püskürtülür.

Yüksek basınç altında kontrollü olarak verilen bu enjeksiyon malzemesi ince püskürtme memelerinden büyük bir enerji ile çıkar, karşılaştığı zemini keser, koparır ve karıştırır.

Önceden planlanan derinliğe erişildikten sonra delgi tiji ucundaki delik, çelik küre veya otomatik valf ile kapatılır. Böylece enjeksiyonunun Şekil 4.9'da görüldüğü gibi monitör denilen özel parçaya yatay olarak tespit edilen püskürtme ağzı veya ağızlarından çıkması sağlanır [20]. Elde edilen yüksek kinetik enerji etrafındaki zemini parçalar; parçalanan zemin ve enjeksiyon karışarak zemin-çimento kolonlarını oluşturur. Böylece doğal zeminin mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur [16].



Şekil 4.9 Su jetinin (~30 atm) püskürtme ağızlarından çıkışı [29]

Elde edilen kolonların boyutları zeminin yapısı ile ilgili tijin dönme hızı, yukarı çekilme hızı, enjeksiyon basıncı ve akışkanlığı, püskürtme ağızlarının çap ve sayısı gibi çalışma parametrelerinin seçimine bağlıdır [16].

Püskürtme aşaması sonucunda, enjeksiyon malzemesinin zemine aktarıldığı tijin belirli devir ile döndürülmesinden kalınlıkları zemin cinsine bağlı olarak 2 cm. ile 7 cm. arasında değişen daire biçimli tabakalar, tijin yavaşça yukarı doğru çekilmesi ile de Şekil 4.10'da görüldüğü gibi enjeksiyon kolonları oluşturulur.

Enjeksiyon hızı, açısı, tijin dönme hızı ve tijin geri çekiliş süresi değiştirilerek çeşitli iyileştirilmiş zemin-çimento kolonları elde etmek mümkün olur. Kolon şeklindeki silindirik form, tijin sürekli 360° döndürülmesi ve geri çekiliş sırasında da aynı işlemin yapılması ile sağlanmaktadır. Tijin döndürülmeden geri çekilmesi veya kısmi rotasyonla çekilmesi ile ince perde duvarlar elde edilmektedir (Şekil 4.11) [16,30].

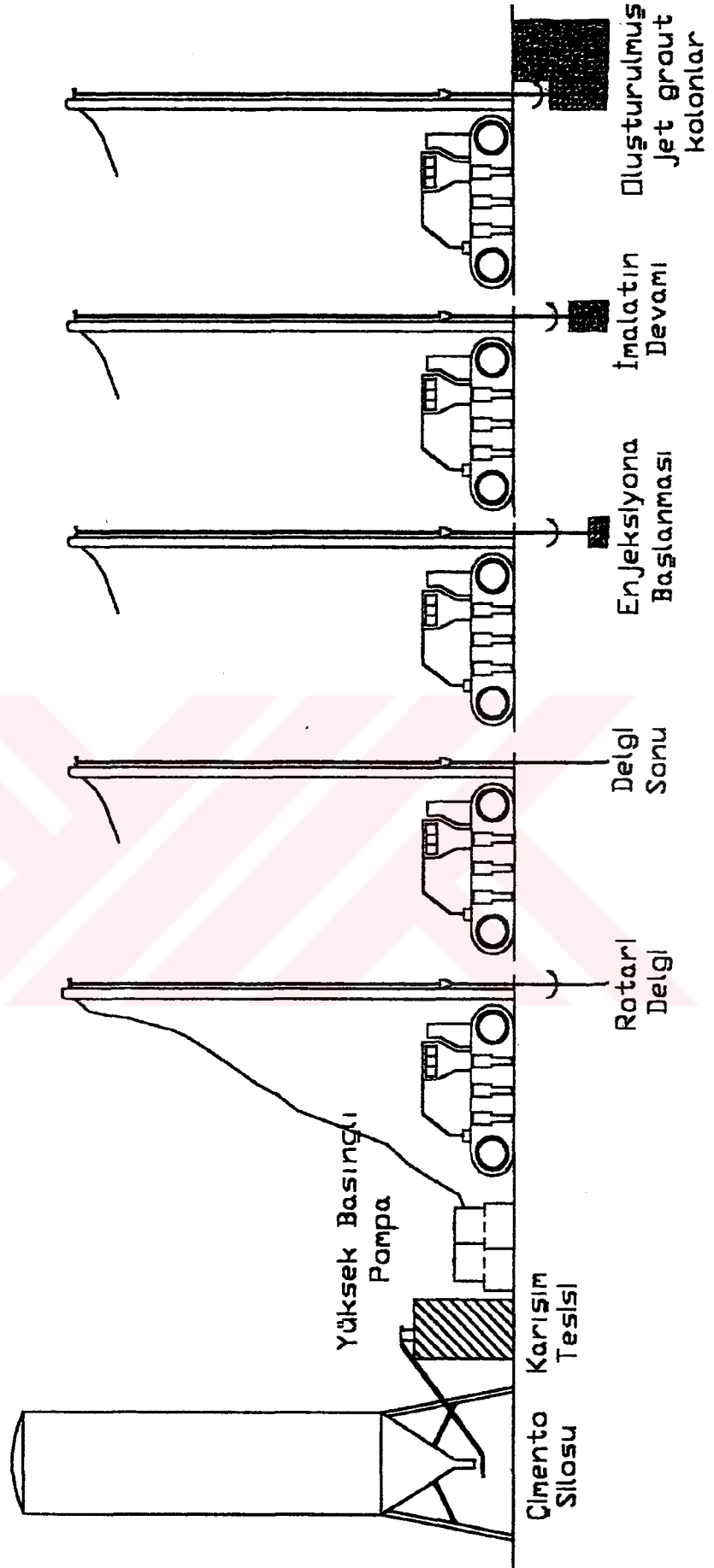
Enjeksiyon işlemi devam ederken kesilip karıştırılan zeminin bir kısmı oluşan basınç altında Şekil 4.11'de görüleceği gibi enjeksiyon foraj deliğinden yüzeye transfer olur [1,30]. Bir kısım zeminin enjeksiyon deliğinden yüzeye çıkması, enjeksiyonun zemine penetrasyonu için önemlidir[15]. Ağızdan geri gelen madde hacmi, zemin porozitesi ve iyileştirilen zemin cinsine bağlı olarak killerde daha fazla, kum ve çakıllarda daha az olmak üzere ortalama olarak enjeksiyon hacminin %10'u mertebesinde [16]. Kalan zemin çimento şerbeti ile karışır, özellikleri tamamen değişik yeni bir malzeme ortaya çıkar. Bu yeni malzeme orijinal zemin ile hiç benzerliği olmayan kendine özgü bir malzemedir. Kısacası bu bölgede malzemenin karakteri değiştirilmiş olur [1].

Genel olarak tüm jet grouting sistemleri, benzer temel imalat programına sahiptirler. Bu imalat programının temel aşamaları ;

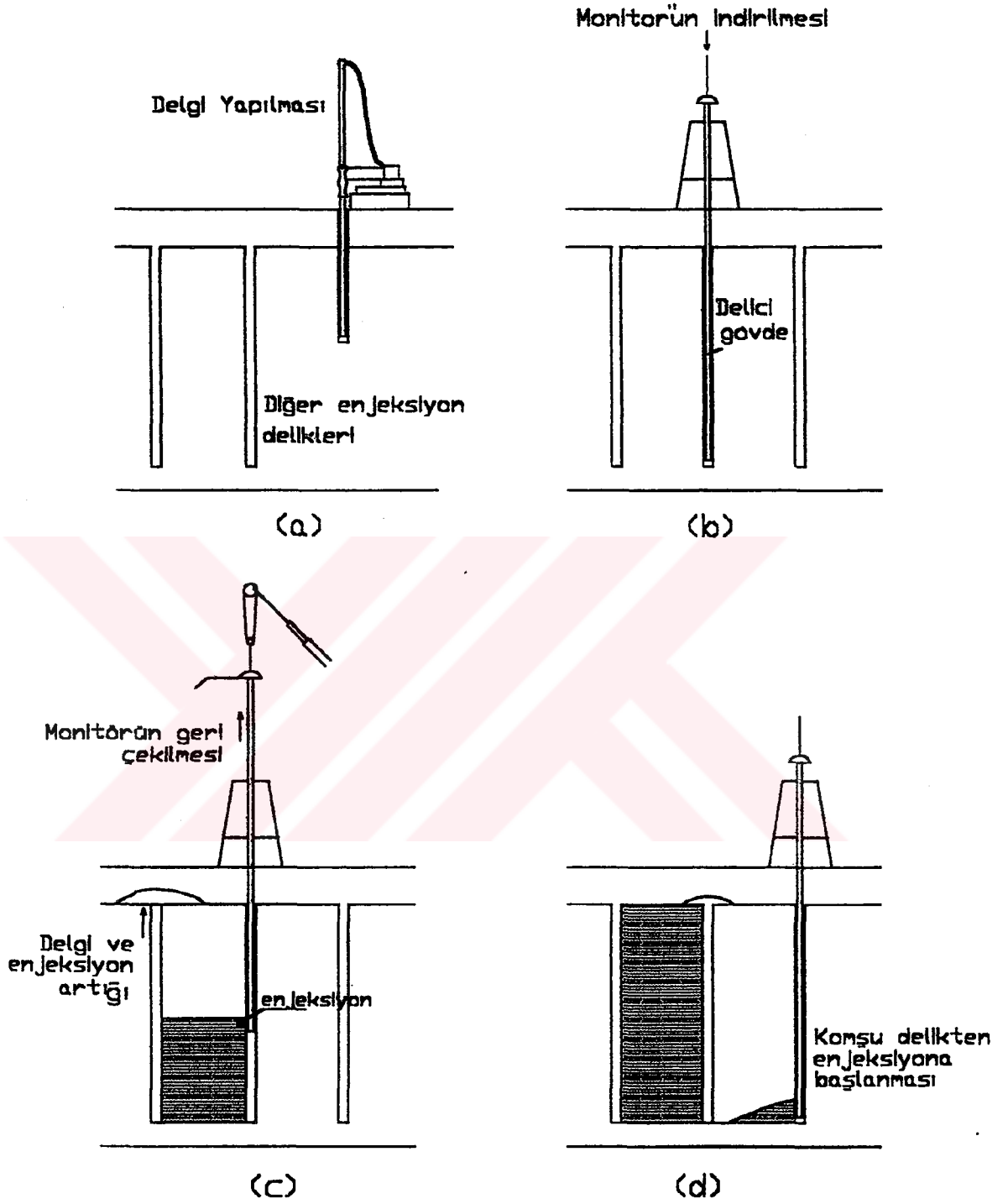
I. İstenilen delme açısı ile jet grout ekipmanının kurulması

II. İstenilen derinliğe kadar hidrolik rotary (dönel) metodla delgi yapılması

III. Dizayn derinliğinin en alt noktasından jet grouting işlemine başlanması ve üniform şekilde oluşturulacak jet grout kolonunun en üst noktasına kadar (gerekirse döndürülerek) yukarı doğru çıkılması, şeklinde sıralanabilir.



Şekil 4.10 Jet grouting yöntemi ile kolon tip elemanların yapım sırası [14]



Şekil 4.11 Jet grouting yöntemi ile panel tip elemanların yapım yöntemi [14]

Delgi sırasında karşılaşılan güçlüklerin üstesinden gelinebilmesi ve kesilen zeminin dışarı atılabilmesinin kolaylaştırılması amacı ile bu işlem birçok eklemeler ve modifikasyonlar yapılarak geliştirilmiştir. Bu değişiklikler ise ;

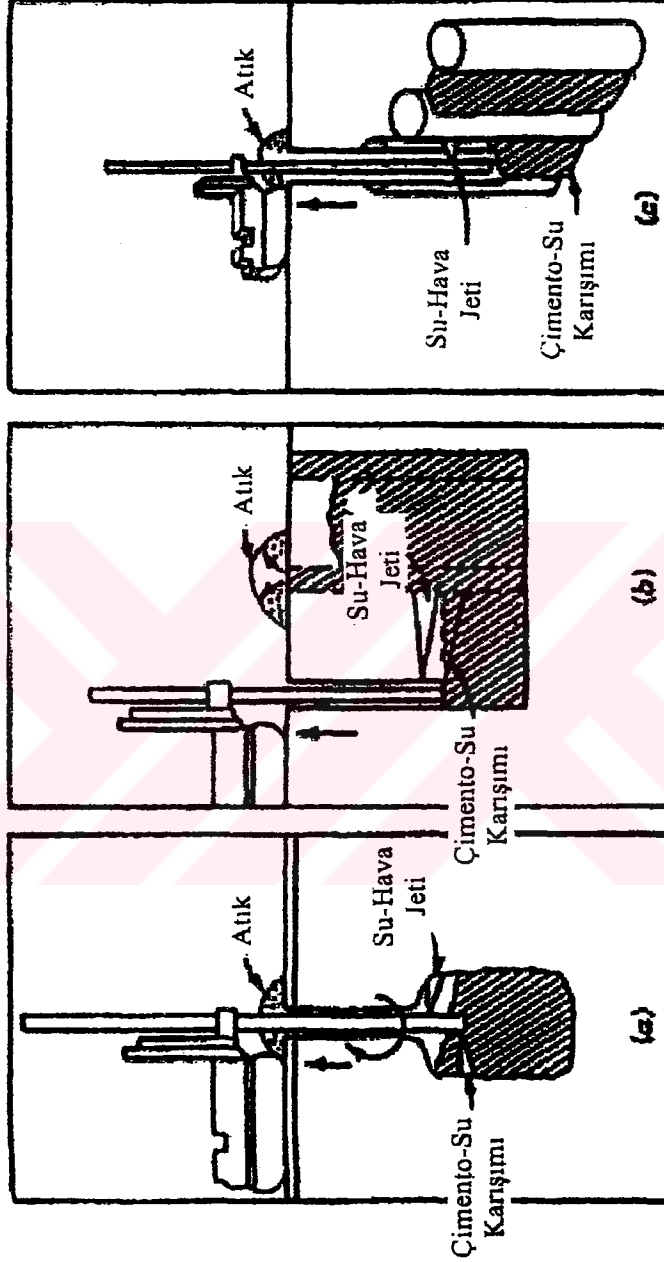
Delgide: Öndelgi, muhafazalı delgi, yüksek hız ve basınçta delgi sıvısı püskürtülmesi
Sökmeye (Kesmeye): Önkesme, çift kesme, çoklu püskürtme ağızları, açılı püskürtme ağızları, yüksek basınçlı hava ve çok yüksek basınçlı enjeksiyon ; olarak özetlenebilir.

Jet grouting yönteminin, kolon tip elemanların yanyana imal edilmesi ile duvar şeklinde bir yapı oluşturulmasının uygulaması Şekil 4.10'da adım adım gösterilmiştir. Yöntemde ilk adım olarak bölgedeki zemin koşullarına adapte edilen klasik delgi yöntemleri kullanılarak (rotari yöntemi) istenilen derinliğe kadar sondaj deliği şeklinde 10~13 cm. çapında bir delik açılmalıdır. Delici gövdenin alt kısmında monitör adı verilen ve alt kısmında delici uç, bunun üst kısmında ise bir veya birkaç püskürtme ağızı yerleştirilmiş olan bölüm bulunmaktadır. Bu püskürtme ağızları, yüksek basınç enerjisini zemine doğru (monitöre dik) yüksek hızlı bir jet akımına dönüştürürler.

Delme işlemi sonunda (istenilen derinliğe ulaşıldığında) zeminin parçalanarak kesilmesi ve yerinde karıştırma işlemi (zemin ile enjeksiyon karışımının karıştırılması), delici gövdenin dolayısıyla monitörün belirli bir hızla döndürülerek geri çekilmesi ile birlikte başlar. Zemini kesen akışkan jeti, çimento karışımı (tek akışkanlı sistem) veya buna ek olarak su ve hava jeti (iki ve üç akışkanlı sistem)'dir. Böylece kesilen zemin kısmi olarak enjeksiyon karışımı ile karıştırılmış ve zemin içinde kolon şeklinde bir eleman oluşmuş olur. İşlem sırasında oluşan karışım artığı açılan delik çeperi ile delici gövde arasında oluşan halka biçimli boşluktan dışarı çıkar. Bu işlemler oluşturulan elemanlar birbirlerine kenetlenerek şekilde tekrarlanarak duvar şeklinde bir yapı oluşturulur.

Anlatılan bu yapım yöntemi, sadece geri çekme sırasında gövdenin döndürülmemesi farkı ile uygulanması durumunda, daha ince panel biçimli elemanlar oluşturulabilir. Panel duvar şeklinde bir uygulama Şekil 4.11'de görülmektedir.

Jet grouting yöntemi ile oluşturulan kolon, panel ve duvar tipinde elemanlar toplu olarak Şekil 4.12 'de görülmektedir. Şekil 4.13 'de ise kum zeminde imal edilmiş olan tekil kolon elemanlar bir arada görülmektedir.



Şekil 4.12 Jet grouting yöntemi ile imal edilen kolon, panel ve duvar tipi elemanlar [22]



Şekil 4.13 Çeşitli jet grout elemanlar [9]

4.6.3 Basınç ve Etkili Yarıçap

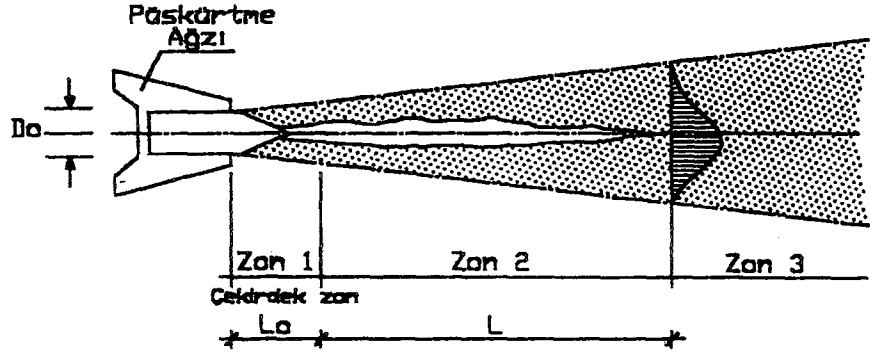
Jet grouting yönteminde kesme, uygulanan basınç ile etkili olmaktadır. Etkili yarıçap uygulanan basınca bağlıdır. Her üç jet grouting sisteminde de kesmeyi gerçekleştiren jetin basıncı maksimum olmalıdır.

Zeminin küçük püskürtme ağzlarından çıkan aşındırıcı jet akımları ile sökülmesi aşağıda sıralanan hidrodinamik etkiler ile sağlanır [26].

- Yüksek hidrodinamik basınç (su jetinin kinetik enerjisi),
- Döner jetin oluşturduğu çekiç etkisi,
- Su kütlelerinin darbe kuvveti,
- Zemin kavitasyonu (gerilme etkisi).

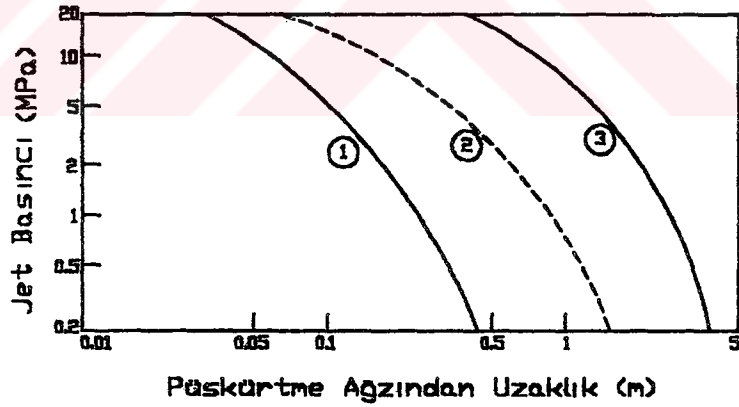
Su jetinin yüksek hız ve yüksek hidrodinamik basınç ile zemin üzerinde oluşturduğu tekrarlı darbeler sonucunda zeminin doğal yapısı bozulmuş olur. Aynı zamanda bu su akımının oluşturduğu negatif basınç, aşındırılan zemin parçacıklarının orijinal pozisyonlarından uzaklaştırılmasını sağlar. Ardından ise tek veya iki akışkanlı sistemlerde çimento enjeksiyonu zemin ile karışır yada üç akışkanlı sistemde çimento enjeksiyonu büyük ölçüde aşındırılan zemin ile yer değiştirir.

Şekil 4.14’de yüksek hızda havaya püskürtülen bir su jetinin karakteristik yapısı gösterilmiştir. Burada gösterilen “Zon 1”, hidrodinamik basıncın sabit olduğu çekirdek zonudur. “Zon 2” orta zon olarak adlandırılır ve boyu püskürtme ağız çapının yaklaşık olarak 300 katıdır. “Zon 3”te ise süreklilik ve kavitasyon etkileri oluşur. Zon 3 boyunca hidrodinamik basınç azalır. Su jetinin su içinde veya suya doymun bir ortamda yapılması durumunda Zon 3 gözlenmez.



Şekil 4.14 Havaya püskürtülen bir su jetinin karakteristik özellikleri [31]

Kesici jetler genellikle 30~50 Mpa'lık basınç değerlerinde çalışır ve püskürtme ağzı çaplarına bağlı 150~350 m/s'lik çıkış hızları oluşur. Araştırmalar göstermektedir ki kesici jetin sıkıştırılmış hava ile yastıklanması (bunching), kesme işleminin verimliliğini arttırmaktadır. Aşağıda bu konu ile ilgili olarak Miki&Nakanishi tarafından yapılmış bir çalışmanın sonucu grafiksel olarak Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



1. Su jeti $\Rightarrow$ suya
2. Hava ile yastıklanmış su jeti $\Rightarrow$ suya
3. Su jeti $\Rightarrow$ havaya

Şekil 4.15 Su jeti basıncında jet eksen boyunca olan azalma [32]

Kesici jeti yastıklayan bu hava jeti en az 0.5~0.6 Mpa'lık basınçta çalıştırılmalıdır. Çimento karışımının (enjeksiyonunun) pompalanması için gereken basınç ise en az 5 Mpa'dır.

Çimento karışımının enjeksiyon basınçları [16]:

Düşük : 20~25 MPa

Orta : 30~40 Mpa

Yüksek : 40~70 MPa

Çimento jeti hem kesici unsur olarak hem de dolgu maddesi olarak kullanılıyorsa basınç, 40~45 MPa arasında değişmektedir [1].

Etkili yarıçap (kolon tipi elemanlarda kolon çapı, panel tipi elemanlarda ise genişlik), her basınç-zemin tipi ikilisi için farklı değerdedir. Aşağıdaki Tablo 4.2'de arazi deneyleri ve çeşitli uygulamaların sonuçlarına dayanılarak, değişken basınçlar, zemin tipleri ve uygulanan sisteme karşılık oluşturulmuş olan kolon tipi elemanların çapları verilmiştir.

Buradan varılabilecek sonuçlar ise şu şekilde özetlenebilir:

- Kohezyon etkili yarıçapı kısıtlamaktadır
- Kohezyon azaldıkça ve iri dane oranı arttıkça etkili yarıçapda artmaktadır.

Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, kesilen zeminin ve enjeksiyon fazlasının delik üstündeki halka biçimli boşluktan veya komşu deliklerden dışarı alınması gerektiğidir. Ancak bu artık malzeme zemin yüzeyine sıfıra yakın basınçla ulaşmalıdır ve uygulanan basınçlar da buna göre ayarlanmalıdır. Bazı temel takviyesi uygulamalarında, basınçların uygun şekilde ayarlanmaması sebebi ile yapılarda 10 cm. 'ye kadar yükselmeler kaydedilmiştir. Oluşturulan jet grout elemanında zemin-enjeksiyon karışım oranlarının ve elemanın nihai özelliklerin belirlenmesinde, imalat sırasında oluşan artığın birim hacim ağırlığı oldukça önemli bir yol gösterici olmaktadır.

Tablo 4.2 Basınçlar, zemin tipi ve bunlara bağlı oluşan kolon çapları

İşlem	Basınç (MPa)			Kolon Çapı (m.)				
	Enjeks.	Hava	Su	Orta Katı kil	Orta Sıkı kum	Killi silt	Siltli kum	Kumlu çakıl
Tek Akışkanlı Sistem	25~40				-	0.4~0.5	0.8~0.9	0.9~1.0
	40~60				0.85			
Çift Akışkanlı Sistem	25~40	0.5~0.6				0.6~0.8	1.1~1.3	1.3~1.5
	40~60	0.5~0.6			1.7			
Üç Akışkanlı Sistem	1.5~4.0	0.5~0.6	30~40			0.8~1.0	1.4~1.6	2.0~2.4
	1.5~4.0	0.5~0.6	40~60	1.4		1.5~1.7	2.0~2.3	2.5~2.8

Ön yıkama 20~50 MPa'lık su enjeksiyonu olup çimento enjeksiyonundan önce uygulanmaktadır. Bu suretle daha büyük çaplı kolonlar elde edilebilmektedir.

4.6.4 Geri Çekme ve Dönme Hızları (Jet Grout Üretim Hızı)

Jet grouting yöntemi ile yapılan iyileştirme sonucunda oluşan iyileştirilmiş zeminin hacmi, geometrisi ve kalitesinin(fiziksel özellikleri) zemin tipi, enjeksiyon karışımının özellikleri, püskürtme ağız seçimi ve monitör tasarımı gibi faktörlere bağlı olduğu açıktır. Ancak tüm bu faktörlerin yanında oluşturulan jet grout elemanının geometrisi, boyutları ve imalatın hızı için en belirleyici olan üç unsur; aşındırıcı jetin enerjisi ile monitörün geri çekilme ve dönme hızlarıdır. Geri çekme ve dönme hızları çok geniş değer aralıklarında değişebilmektedir ve sağlıklı bir seçime yapılan denemeler ve edinilmiş olan tecrübeler ışığında ulaşılabilir.

Çekme işlemi kullanılan delici makinenin özelliğine bağlı olarak ya sürekli yada kademeli olarak yapılabilir. Kil oranı yüksek olan zeminlerde sürekli bir çekme yerine ancak kademeli çekme yapılabilirse, kademe yükseklikleri 4 cm. 'den fazla olmamalıdır. Aksi takdirde jet grout kolonlarında doğal zemin ile enjeksiyon malzemesi yeterince karıştırılmadığından istenmeyen tabakalaşmalar oluşur [1].

Bilinen uygulama ve araştırmalarda karşılaşılan değerler kullanılarak bir genelleme yapılmak istenirse geri çekme hızının genel olarak, tek akışkanlı sistemlerde 25~50 cm/dak, üç akışkanlı sistemlerde ise 4~7 cm/dak aralıklarında seçilmesi uygun olmaktadır [9].

Dönme ve çekme hızları uygulanan yöntem ve ıslah edilen zemin hacmine bağlıdır. İki ve üç akışkanlı sistemlerde yapım süresi, tek akışkanlı sisteme göre daha uzundur. Çünkü daha büyük çap elde edebilmek için daha fazla hacimdeki zeminin iyileştirilmesi gerekmektedir [16].

Geri çekme hızının “ L_s (cm/dak)” ve oluşan kolon çapının “ R_a (m.)” ile ifade edilmesi durumunda sökülen zeminin hacmi ;

$$V_e = 40 \times \pi \times R_a^2 \times L_s \text{ (lt/dak)} \quad (4.1)$$

yada

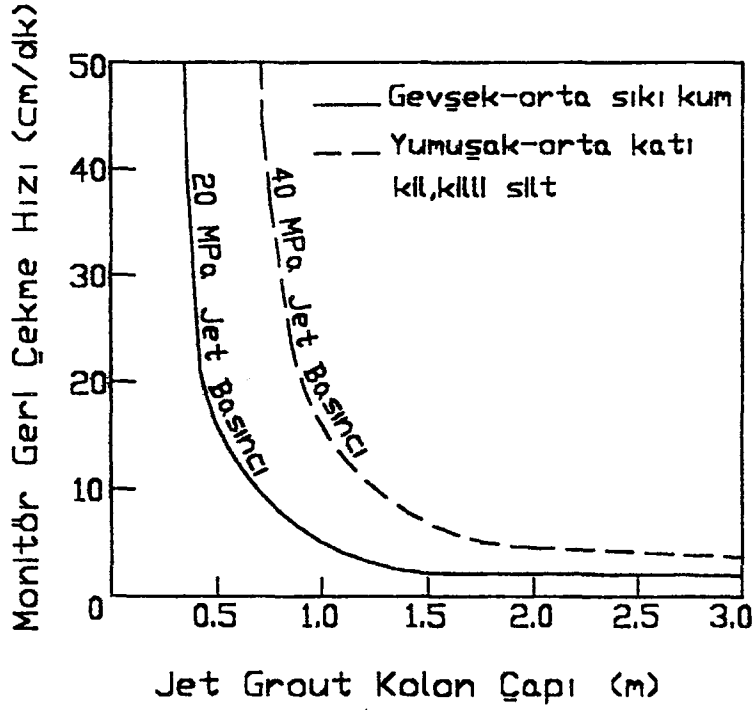
$$V_e = 0.04 \times \pi \times R_a^2 \times L_s \text{ (m}^3\text{/dak)} \quad (4.2)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Belirli bir zeminde kesilebilecek zemin (V_e) sabit ise (birim zamanda kesilmesi gereken zemin hacmi belirlenmiş ise) bu durumda geri çekme hızı ;

$$L_s = \text{sabit} \times (1 / R_a^2) \quad (4.3)$$

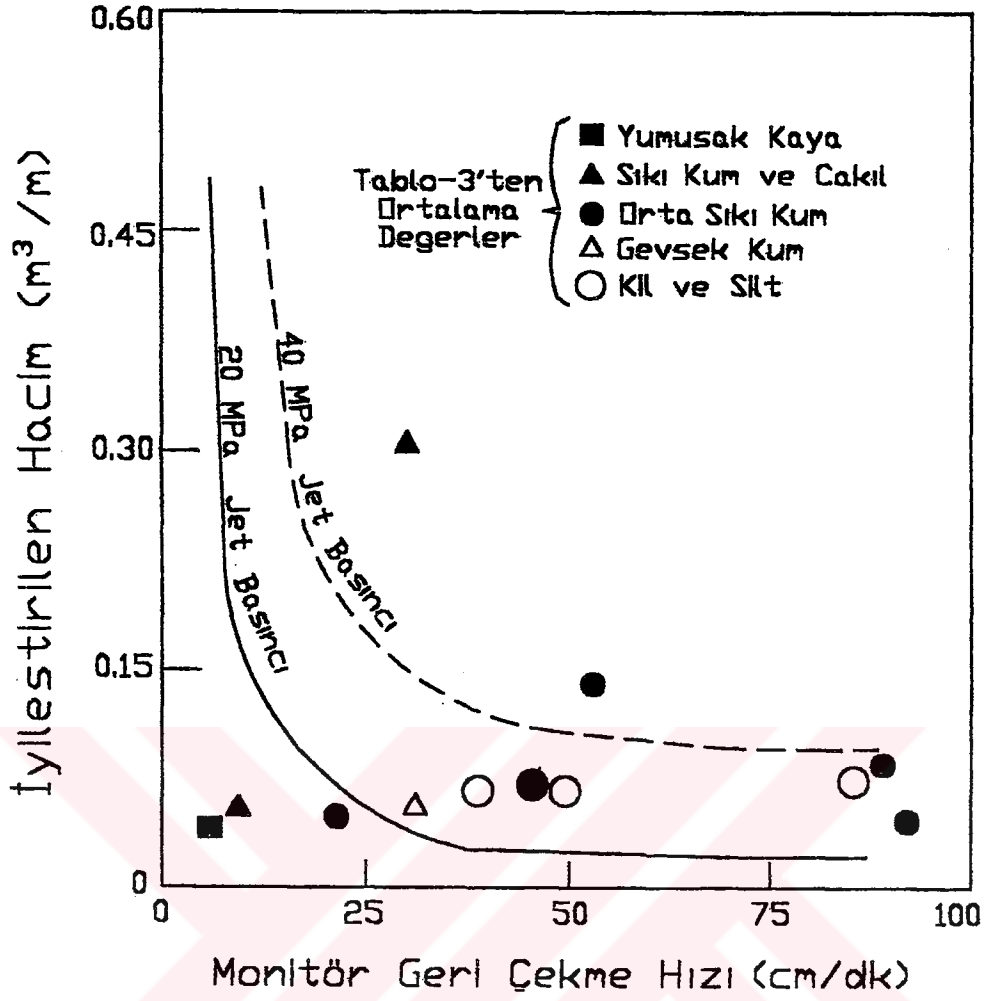
ifadesi ile hesaplanabilir.

Yapılmış olan uygulamalarla ilgili kayıtların, arazi deneylerinin ve edinilmiş tecrübelerin derlenmesi ile oluşturulmuş bir çalışma Welsh (1986) tarafından yapılmış ve bu çalışma ile aşındırıcı jet basıncı ve geri çekme hızına bağlı olarak oluşturulabilecek kolonun çapını gösteren bir ampirik tasarım eğrisi ortaya konmuştur. Söz konusu çalışma Şekil 4.16’da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Geri çekme hızı / kolon çapına bağlı tasarım eğrisi [33].

Covil (1991) tarafından yapılan bir çalışma ile de yapılmış olan çeşitli uygulamalardaki kesici jet basıncı, geri çekme hızı ve iyileştirilmiş hacim değerleri derlenmiş ve ampirik bir tasarım kartı oluşturulmuştur. Basınç, geri çekme hızı, dönme hızı, püskürtme ağzı çapı, uygulanan jet grouting sistemi, zemin tipi ve bunlara karşılık oluşan iyileştirilmiş hacim ve oluşan kolon çapı değerleri Tablo 4.3'te ve bu değerlerle oluşturulan tasarım kartı ise Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17 Geri çekme hızının iyileştirilmiş hacme etkisi [34]

Eğer geri çekme hızı çok fazla arttırılırsa imal edilmiş olan kolonda bir burgu (tirbüşon) etkisi oluşur. Bu olgu aktif ankraj boyunun ve dolayısıyla sürtünme yüzeyinin maksimize edilmesi gereken jet groutlu zemin çivisi uygulamalarında avantaja dönüşmektedir. Diğer taraftan, aynı durum geçirimsiz yapısal jet grout uygulamasında olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Tablo 4.3 Jet grouting parametrelerine bağılı olarak iyileştirilmiş hacim [34]

Zemin Tipi	Su/Enj. Basıncı	Püskürtme Ağzı Çapı (mm.)	Jet Grout Yöntemi Tek A.(I) Çift A.(II) Üç A.(III)	Geri Çekme Hızı (cm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	İyileşt. Hacim (m ³ /m)	Kolon Çapı (m)
Yumuşak Kaya	25~30					0.17~0.21	0.47~0.50
Sıkı	30	2.4~2.6	(II)				
Çakıl	30		(I)	10~16		0.79~1.24	1.00~1.40
Sıkı Kum	30~40			3~11		0.15~0.18	0.42~0.48
Ve Çakıl	34~41			20		0.25~1.81	0.57~1.52
Çakıl	41	2.4		15	10		
	41	2.4~2.6	(II)	13		1.77	1.50
Siltli Kum Çakıl Kr.	30~43	2.4	(III)	10~20	2.5	1.13	1.20
Orta Sıkı Kum-Ç.	33~40		(III)	8	6	0.79	1.00
	34~41			13~23		0.17~0.24	0.46~0.55
Orta	20~40			9~10		0.13~1.54	0.41~1.40
Sıkı	36			11		0.19	0.45
Kum	30			21		0.28	0.60
	31~41			30~110		0.35~0.40	0.68~0.72
	3~4			30~50		0.20~1.00	0.51~1.13
İnce	20	3.0	(I)	8	10		
Orta	30	2.2	(I)	34	10	0.44~0.30	0.75~0.80
Kum	30	2.2	(I)	17	10	0.57~0.64	0.85~0.94
	40	2.4	(III)	16~17	10	1.13	1.20
Gevşek	30~40			23~26		0.22~0.25	0.53~0.56
Kum	20			30	22.5	0.45	0.75
Siltli	30		(I)	34	10	0.33~0.36	0.65~0.70
Kil	30		(I)	17	10	0.44~0.50	0.75~0.80
Kil	30~40			31~36		0.24~0.27	0.55~0.59
ve	30~40			9~10		0.15~1.24	0.41~1.40
Silt	30			27		0.20	0.60
Kil ve	30~40			30~110		0.04~0.30	0.22~0.63
Silt	5~6			30~50		0.08~0.12	0.31~0.41
Kil	20	2.2	(III)	34	10	0.24~0.26	0.55~0.60
	30	2.2	(III)	17	10	0.33~0.38	0.65~0.70
Siltli Kil	20		(III)	12		1.54	1.40
Turba	20		(III)			3.14	2.00
Gevşek K.Ç.	20~30	2.4~3.0		8	8~12		

Monitör dönme hızı ve dolayısıyla püskürtme ağzı darbe süresi, zeminin dane çapına ve kohezyonuna bağlıdır. 30kN/m^2 'den yüksek kayma mukavemeti değerlerinde ekonomi ve verimliliğin hızlı bir şekilde düşmesi sebebi ile zeminin kil yüzdesi ve bakir zemin mukavemeti önem taşımaktadır. Bu tip durumlarda monitör dönme hızı azaltılmalıdır. Çakıllı, kumlu ve siltli zeminlerde yapılan uygulamalarda karşılaşılan monitör dönme hızları, tek akışkanlı sistem için 6~10 dev/dak, üç akışkanlı sistem için 3~6 dev/dak değerlerindedir. Dönme hızının bu değerlerde seçilmesi, küçük çaplı elemanlar üretilmesine, kısa aralıklar ile delgi yapılmasına ve bunun yanında homojenliği çok yüksek kaliteli imalat yapılmasına yol açarken maliyetlerinde yükselmesi sonucunu doğurur. Genel olarak dönme hızının tek akışkanlı sistemlerde 10~30 dev/dak, üç akışkanlı sistemlerde ise 3~10 dev/dak seçilmesi uygun olmaktadır.

İmalatın hızı (geri çekme ve dönme hızları) ile ilgili olarak unutulmaması gereken bazı noktalar ise;

- imalatın hızını belirleyen faktörler sadece geri çekme ve dönme hızlarıdır,
- zemin özellikleri ve uygulanan basınçlar ile birlikte geri çekme ve dönme hızları, oluşturulan elemanın geometrisini belirleyen faktörlerdir,
- zemin özellikleri, bu iki hız ve çimento enjeksiyonunun özellikleri, imal edilen elemanın özellikleri ve homojenliği için temel oluşturur,

şeklinde sıralanabilir [9].

4.6.5 Gerekli Kesici Jet Akımı Miktarının Saptanması

Jet akım miktarı, imalatın maliyetini kontrol eden faktörlerin en önemlilerindendir. Bu miktar, dışarı alınacak artık malzemedeki miktar ile zeminde kalacak miktarın toplamıdır ve gerçekçi tahmini zordur. Yerinde karıştırma yönteminin (tek yada iki akışkanlı sistem) uygulanması durumunda jet akışkanın miktarı ;

$$Q = 1/4 \pi x D^2 x H x \lambda x (1 + \beta) \quad (4.4)$$

ifadesi ile hesaplanabilir.[26]

Burada ; Q: gerekli jet akım miktarı (m³)

D: istenilen kolon çapı (m)

H: kolonun yüksekliği (m)

λ : deneysel bir parametre (Şekil 4.18'deki abaktan bulunur)

β : azaltma faktörü ($\beta < 0.1$)

Bu formül kullanılarak bulunacak hacim ile uygulanacak geri çekme ve dönme hızları dikkate alınarak gerekli jet akım miktarı belirlenir. Bir örnek verilmek istenirse ;

D=1.50 m. için dairesel çevre hızı $\Rightarrow \Omega = 50 \text{ cm/sn} = 30 \text{ m/dak}$ (kabul edilirse) ;

$\Rightarrow$ dönme hızı $= \varphi = 30 / (1.50 \times \pi) = 6 \text{ dev/dak}$

$\Rightarrow$ geri çekme hızı ile dönme hızı arasındaki ilişki ; 1 cm/1 dev olarak verilirse

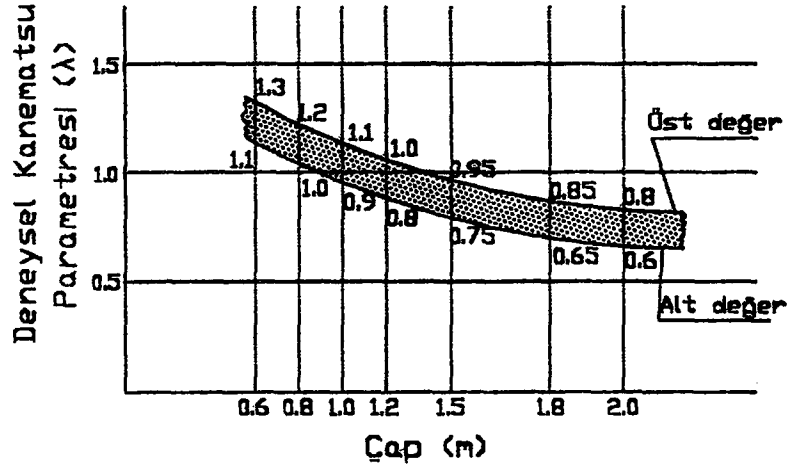
$\Rightarrow$ gerekli geri çekme hızı $= L_s = 6 \text{ cm/dak} = 16.7 \text{ dak/m}$ (birim boy)

$\Rightarrow$ pompa kapasitesinin 80 lt/dak olması durumunda gerekli jet akım miktarı ;

$Q = 80 \times 16.7 = 1336 \text{ lt/m}$ (birim boy)

Bu değer tüm kolon hacminin (birim boyda) %75'idir. Kumlu çakıllı zeminlerde gerekli jet akımı miktarı kolon hacminin %50~60'ı mertebelerinde olmakta, kohezyonu yüksek killi zeminlerde ise bu oran %120'lere kadar çıkabilmektedir.

Verilmiş olan bu formülde yer alan ve deneysel bir parametre olan $-\lambda-$ katsayısı, Kanematsu tarafından ortaya konan ve grafiksel olarak Şekil 4.18'de gösterilen abaktan bulunur.



Şekil 4.18 Deneysel Kanematsu faktörü [31]

4.6.6 Gerekli Çimento Enjeksiyonu Miktarının Saptanması

Jet grouting yönteminin bir avantajı da kullanılacak sistem ve istenilen mukavemete bağlı olarak kullanılacak çimento miktarının işe başlamadan önce tahmin edilebilmesidir. Bu sonuçtan hareketle, çimento dozajı belirlenerek ve jet grout püskürtme ağızlarından akış oranı değerlendirilerek bu iki değer birleştirilmesiyle tiji yukarıya çekme hızı bulunabilir. Enjeksiyonun su/çimento oranı ve birim hacim ağırlığı (γ) bilinmesi koşuluyla, uygulanan enjeksiyon basıncı (P_i) altında eşit yükseklik (h) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [16]:

$$h = P_i / \gamma \quad (4.5)$$

Enjeksiyonun çıkış hızı :

$$V = (2 \cdot g \cdot h)^{1/2} \quad (4.6)$$

Enjeksiyon miktarı (Q):

$$Q = V \cdot A \quad (4.7)$$

A: Püskürtme ağızı çapına bağlı olarak değişen enjeksiyonun çıkış alanıdır.

Basit bir örnek olarak, birim hacim ağırlığı 1.5 kg/dm^3 olan enjeksiyon malzemesi 500 barlık basınç altında ve 2.4 mm. çaplı püskürtme ağzından zemine enjekte edilmektedir. Bu durumda enjeksiyonun akış hızı ve enjeksiyon miktarı Tablo 4.4’de verilmektedir [16].

Tablo 4.4 Enjeksiyonun Akış Hızı ve Miktarı

Çimento birim hacim ağırlığı (kg / dm^3)	2.56
Enjeksiyon karışımının birim hacim ağırlığı (kg / dm^3)	1.50
Basınç (bar)	500
h (m)	3333.33
V(m/sn)	255.73
Püskürtme ağzı çapı (mm.)	2.4
Enjeksiyon miktarı (lt/dak)	69.38

Farklı basınç ve farklı püskürtme ağzı çapları için belirlenmiş enjeksiyon miktarları Tablo 4.5’de verilmektedir [16].

İmalatın hızlı olması, geri çekme ve dönme hızlarının yüksek olması ve ekipman sayısının çok olması, birim zamandaki enjeksiyon (çimento karışımı) ihtiyacını artıran faktörlerdir ve yüksek pompa kapasitesi ihtiyacını doğururlar. Gerçekleştirilmiş bir uygulamaya ait bazı değerler şu şekildedir ; Çakıl ortamda zemin/enjeksiyon oranı 60/40 olacak şekilde 1.50 m. çapında kolon imalatının her 1 m. boyu için 700 lt. enjeksiyon gerekmiştir. İmalat tek akışkanlı sistem ile yapılmış ve geri çekme hızı 20~40 cm/dak seçilmiştir. Bu durumda püskürtülen enjeksiyon akımı miktarı 140~280 lt/dak olmuş, aşındırılan zemin ve yüzeye çıkan enjeksiyon artığı ile birlikte yaklaşık 1000 lt. enjeksiyon harcanmıştır. Bu 1 m. boyundaki kolon imalatı, geri çekme hızına bağlı olarak 2.5~5dak.’lık sürede olmuştur.

Tablo 4.5 Enjeksiyon debisi / Püskürtme ağız ilişkisi [16].

SU/ÇİMENTO =1

ENJEKSİYON ÖZGÜL AĞIRLIĞI =1.52

PÜSKÜRTME AĞZI ÇAPLARI (mm.)											
	1.4	1.6	1.8	2.0	2.4	2.8	3.0	3.2	3.5	4.0	4.5
PÜSKÜRTME AĞILARINDAN ENJEKSİYONUN ÇIKIŞI											
BASINÇ	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak	lt/dak
300	18	24	30	37	53	73	83	95	114	148	188
350	20	26	32	40	58	79	90	103	123	160	203
400	21	27	35	43	62	84	96	110	131	171	217
450	22	29	37	45	65	89	102	116	139	182	230
500	23	31	39	48	69	94	108	123	147	192	242
550	25	32	41	50	72	98	113	129	154	201	254
600	26	34	42	52	76	103	118	134	161	210	266

Aynı zeminde ve aynı boyutlarda bir bölgenin klasik enjeksiyon ile stabilizasyonu için ise 10~15 lt/dak'lık bir enjeksiyon miktarı yeterli olmuş ve 1m. boyundaki imalat için 500 lt. enjeksiyon harcanmıştır. Bunun yanı sıra işlemin tamamlanması 40 dakika sürmüştür.

Sonuç olarak jet grouting yöntemindeki çimento enjeksiyonu tüketiminin klasik enjeksiyon yöntemindekine yaklaşık iki katı olduğu görülmektedir. Ancak diğer taraftan imalat süresi 10 kat daha kısadır. Her iki yönteminde uygulanabilir olduğu durumlarda, maliyet araştırması ve fizibilite çalışmasında bu iki faktör göz önünde bulundurulmalıdır.

Tabakalı ortamlarda çimento enjeksiyonunun sabit miktarda verilmesi ise değişken boyutta eleman imal edilmesine sebep olur. Zayıf tabakada enjeksiyon oranı ve mukavemeti düşük, geniş çaplı kolonlar oluşur. Diğer taraftan sert tabakada ise enjeksiyon oranı ve mukavemeti yüksek, küçük çaplı kolonlar oluşur. Bu yüzden, özellikle derinlikle zemin koşulları (mukavemet, dane çapı, sıklık ve boşluk oranı) değişen ortamlarda, gerekirse test enjeksiyonları yapılarak uygulanacak basınçların, dönme ve geri çekme hızlarının belirlenmesi, kaliteli imalat yapılması açısından önemlidir. Bunun da sağlıklı şekilde yapılabilmesi için detaylı bir zemin araştırması ve sondaj çalışması yapılmalıdır.

4.6.7 Tüm Jet Grout Parametrelerinin İyileştirilmiş Hacim Üzerindeki Etkisi

Jet grouting uygulanmış kütlenin hacmi, geometrisi ve kalitesinde; zemin cinsi, enjeksiyon karışımının özellikleri, püskürtme ağzı tipi ve basıncın yanı sıra enjeksiyon sondasının (monitörün) geri çekilme ve dönme hızları da belirleyici olmaktadır. Belli bir zemin cinsinde farklı hacimlerde iyileştirilmiş (jet grouting uygulanmış) zemin elde edilebilmesi için, iki önemli tasarım parametresi olan geri çekme hızı ve jet basıncında bazı değişiklikler ve ayarlamalar yapılabilir. Farklı jet basıncı ve geri çekme hızı kullanılarak aynı iyileştirilmiş hacim değerleri elde edilebilir.

Uygulama yapılacak olan zeminde iyileştirilebilmesi mümkün olan hacmin tahmini için bazı çalışmalar yapılmıştır. Welsh ve diğerleri tarafından yapılan bu tip bir çalışma sonucunda ortaya konmuş olan bir dizi öneri aşağıda sıralanmıştır [21].

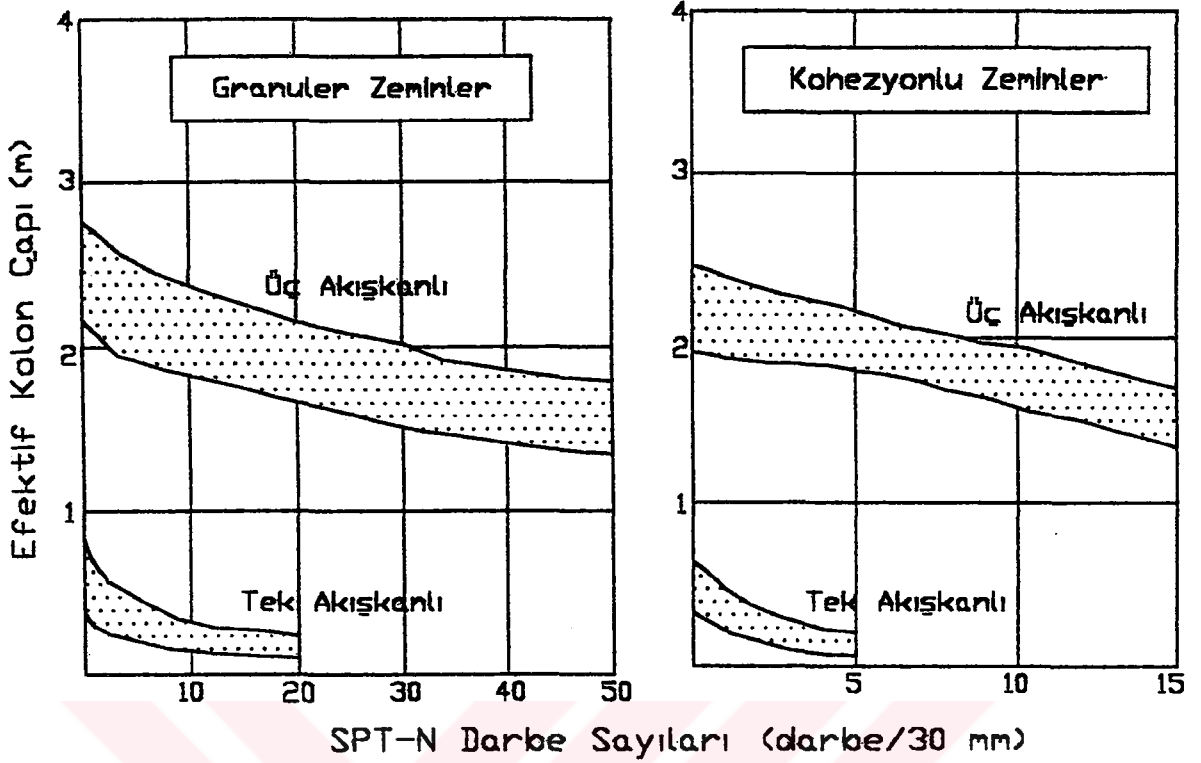
- Sabit enjeksiyon basıncı ve geri çekme hızında zemindeki kil yüzdesinin artması, iyileştirilen hacmin (jet grout çapının) azaltılmasına yol açar.
- Herhangi bir zemin cinsinde elde edilecek jet grout kolonunun hacminde belirleyici olan en önemli faktörler; uygulanan jet basınçları, monitör geri çekme hızı ve verilen enjeksiyon miktarıdır.
- Katı ve katıdan sert kil zeminlerde tipik (standart) enjeksiyon ve su basınçları ile 1.50 m.'den büyük çapta kolon oluşturulması mümkün değildir.
- Uygulama yapılacak zeminin üniformluk katsayısı $c_u = (D_{60}/D_{10})$, 8'e eşit ve daha büyük ise, iyileştirilen hacmin zeminin dane çapı dağılımından pratikte etkilenmez.
- Uygulama yapılacak zeminde çakıl yüzdesi (2 mm. çaptan büyük dane oranı) %50'den büyük ise, büyük danelerin jet akımını saptırması sebebi ile enjeksiyon penetrasyonu azalır ve düzensizleşir. Böylece beklenen sonuçlar alınamaz.
- Belirli bir iyileştirilmiş hacim (kolon çapı) değerinin korunması isteniyor ve zeminin kil yüzdesinde bir artış gözleniyor ise bu durumda ya enjeksiyon basıncı arttırılmalı yada monitör geri çekme hızı azaltılmalıdır.

- Uygulama yapılacak zeminde iri çakıllar ve bloklar bulunması durumunda söz konusu bloğun arkasında bir gölgelenme etkisi oluşacak ve böylece jet grout elemanında bölgesel boşluklar ve zayıflıklar meydana gelecektir.
- Granüler zeminlerde üniformluk katsayısının 8'den küçük olması durumunda 3.0 m. çapa kadar jet grout kolon imal edilmesi mümkündür.
- Çakıl ağırlıklı zeminler, turba zeminler, aşırı fissürlü veya ayrıışmış katı kil zeminler ve çok iri dane içeren dolgu zeminlerde jet grouting özel dikkat ve önlemler ile uygulanmalıdır. Aynı şekilde kirlenmiş zeminlerde de özel dikkat gerekmektedir.
- Aşırı lifli turba zeminlerde, uygulanan jetin etkisi zayıflar. Amorf (biçimsiz) turba zeminlerde ise bu etki azalır ancak bu tip zeminlerde asitik özellikler belirleyicidir.

Şekil 4.19'da, hem granüler hem de kohezyonlu zeminlerde, diğer tüm jet grouting parametrelerinin eşdeğer olması durumunda SPT-N değerleri ile etkili kolon çapı arasındaki ilişki hem tek akışkanlı sistem, hem de üç akışkanlı sistem için gösterilmiştir.

Jet grouting yönteminin en önemli zayıflık ya da belirsizliklerinden birisi, oluşan jet grout çapının, derinlik yada tabakalanmaya bağlı olarak değişiminin tam olarak bilinmemesi, kontrol edilememesi ve gerekli şekilde basınç ayarlaması yapılamamasıdır. Bu durumda uygulanabilecek yöntem yine deneme enjeksiyonları yapmaktır.

Jet grouting parametrelerinin iyileştirilmiş hacim ve dolayısıyla elde edilen sonuç üzerindeki etkisini konu alan birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırma çalışmalarından birisi de, Güney Amerika'da (Sao Paulo) yapılan ve bazı imalat parametrelerindeki değişikliklerin farklı zemin tiplerindeki etkisini konu alan bir çalışmadır. Çalışma ile ilgili rapor ise Guatteri tarafından yayınlanan bir makalede yer almıştır [35].



Şekil 4.19 Kolon çapı ile zeminin SPT-N değerleri arasındaki ilişki [32]

İmalat tek akışkanlı sistem ile yapılmıştır. Çalışmada yapılan enjeksiyonlar, elde edilecek sonuç üzerinde zemin tipi dışında en önemli parametrenin jet enerjisi olduğu düşünülmektedir. Üç ayrı deneme sahası, 10x10x5 m. boyutlarında kazılarak kum, siltli kil ve organik kil zeminlerle doldurulmuş ve bu zeminler ıslak tarafta kompaksiyona tabi tutulmuştur. Her üç sahada da 20'şer jet grout kolon oluşturulmuştur. Bu altmış kolonda da püskürtme ağzı basınçları, püskürtme ağzı sayıları ve boyutları, monitör dönme hızı, enjeksiyon karışımlarının su/çimento oranları ve enjeksiyon miktarları aşağıdaki Tablo 4.6'da verilmiştir. Her üç sahada da 10'ar adet kolon 34.5 cm/dak.'lık geri çekme hızı ile, kalan 10'ar adet kolon ise yarısı kadar (17.3 cm / dak) geri çekme hızı ve iki katı enjeksiyon miktarı ile imal edilmiştir.

Tablo 4.6 Çalışmada kullanılan parametreler [35]

A-Sabit Parametreler	
Basınç (MPa)	28.95
Monitör dönme hızı (ϕ)(dev/dak)	18
Püskürtme ağzları çapı (mm.)	2.2
Püskürtme ağzları sayısı	2
Enjeksiyon su/çimento oranı	1/1
Enjeksiyon miktarı (lt/dak)	91
B-Değişken Parametreler	
Geri çekme hızı (L_1) (cm/dak)	35
Monitör dönüşü/adım (dev.dak./adım)	2
Jet darbe süresi/adım (sn/adım)	14
Çimento tüketimi (kg/m)	200
Geri çekme hızı (L_1) (cm/dak)	17.3
Monitör dönüşü/adım (dev.dak./adım)	4
Jet darbe süresi/adım (sn/adım)	26
Çimento tüketimi (kg/m)	400

Elde edilen sonuçlar ise (kolon çapı ve ortalama basınç mukavemeti) Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7 Araştırma sonuçları [35]

Zemin Tipi	Geri Çekme Hızı (cm/dak)	Kolon çapı (m.)	Ortalama Basınç Mukavemeti (kN/m ²)
Kil	34.5	0.55~0.60	20
Kil	17.3	0.65~0.70	40
Siltli Kil	34.5	0.65~0.70	50
Siltli Kil	17.3	0.75~0.80	70
Kum	34.5	0.75~0.80	80
Kum	17.3	0.85~0.90	120

Bu çalışma ışığında şunlar söylenebilir [35]:

- Jet darbe süresinin yaklaşık iki katına çıkartılmasının (14'den 26'ya) oluşan kolon çapında önemli bir etkisi yoktur. Bu artışın kolon çapında oluşturduğu büyüme %15~%25 civarındadır ve bu da aşındırmanın büyük kısmının monitörün ilk iki dönüşünde tamamlandığını göstermektedir.
- Jet darbe süresinin iki katına çıkartılıp, birim boyda iki kat fazla çimento harcanmasına izin verilmesi durumunda kolonun basınç mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Bu artışın kilde iki kat, siltli kil ve kumda ise %50 dolayında olduğu görülmektedir.
- Oluşan kolon çapının zemin cinsinden de önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Zeminde kil oranı arttıkça oluşan kolon çapında azalma (en küçük çaplı kolon organik kil zeminde oluşturulmuştur) gözlenmektedir.
- Enjeksiyondaki su/çimento oranının 1/1 olması durumunda kum zeminde 80 kN/m²'lik basınç mukavemeti değerine (kil zemindekinin 4 katı) ulaşılmıştır.

Zemin cinsi ve en önemli parametrelerden birisi olan monitör geri çekme hızının yapılan iyileştirme üzerindeki etkisi, diğer parametrelerin değişmemesi ve ekipman sayısının sabit tutulması durumunda bir günde yapılabilecek iyileştirmeyi gösteren, Miki ve Nakanishi tarafından yapılan bir çalışma aşağıdaki Tablo 4.8'de özetlenmiştir

Tablo 4.8 Zemin tipi ve geri çekme hızının iyileştirme üzerindeki etkisi [32]

Zemin Tipi	Monitör Geri Çekme Hızı (cm/dak)	Delgi Aralığı (m.)	İyileştirme (m ² /gün)
Kum ve Çakıl	50~120	1.0~1.7	15~45
Kum	100~200	1.5~2.0	35~40
Silt	70~120	1.3~1.8	50~70
Kil	50~80	1.0~1.5	50~70

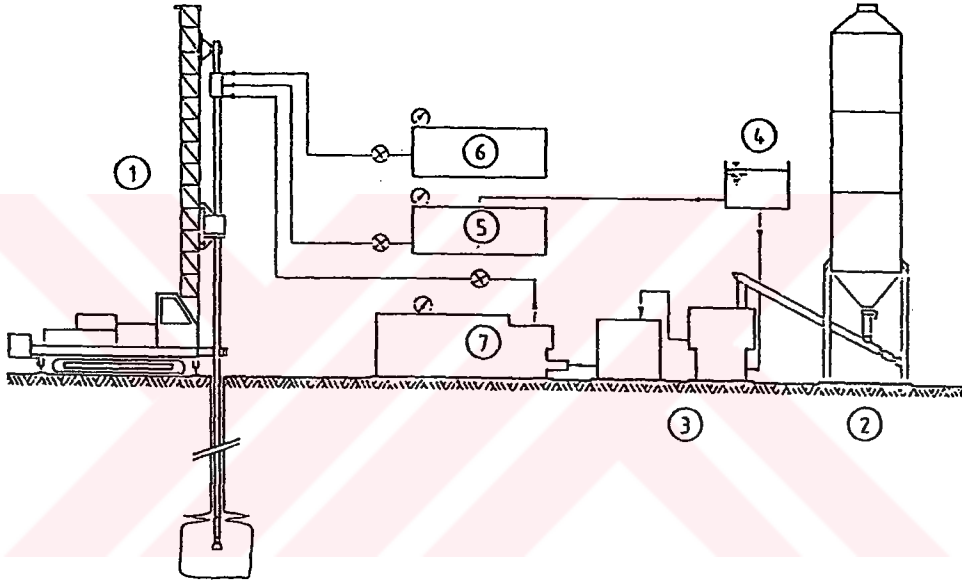
Tablodan da görülebileceği gibi zemin cinsinin, imalatın süre ve maliyet optimizasyonu açısından önemi, yöntem uygunluğu açısından önemine göre daha fazladır.



4.7 Jet Grouting Ekipmanı

4.7.1 Genel

Jet grouting ekipmanının arazide kurulması, klasik enjeksiyon yöntemine göre bir miktar farklılık göstermektedir. Jet grouting ekipmanının ana kısımları karışım tesisi, yüksek kapasiteli pompa tesisi ve delgi ve enjeksiyon aracı şeklinde özetlenebilir. Şekil 4.20’de jet grouting imalatı için gerekli olan ekipmanın tüm kısımları (delgi ve enjeksiyon yapan mobil ekipman, malzeme siloları, karışım tesisi, kompresör ve yüksek basınçlı pompalar) görülmektedir.



1. Mobil delgi ve enjeksiyon ekipmanı
2. Çimento silosu
3. Koloidal karıştırıcı ve karıştırma tankı
4. Su deposu
5. Yüksek basınçlı su pompası (aşındırma için)
6. Hava kompresörü (aşındırma için)
7. Çimento karışımı için yüksek basınçlı pompa

Şekil 4.20 Üç akışkanlı sistem için jet grouting ekipmanı [9]

Tablo 4.9'da ise ana jet grouting ekipmanları ve bunlara ilişkin bazı bilgiler verilmiştir.

Tablo 4.9 Ana ekipman için data [14]

<u>Kılavuz delgi ekipmanı</u>	*Sondaj ekipmanı ve auger *Zemin koşullarına ve cinsine göre çekilir *Delik çapı $\Rightarrow 10\sim 13$ cm.
<u>Yüksek basınçlı pompa</u>	*Dalgıç pompa *İşletme basıncı $\Rightarrow 200\sim 700$ kg/cm² (20~70 Mpa) *Kapasite > 1 m³/dak
<u>Kompresör</u>	*İşletme basıncı > 8 kg/cm² (0.8 Mpa) *Kapasite > 1 m³/dak
<u>Enjeksiyon pompası</u>	*Basınç < 10 kg / cm² *Kapasite $\Rightarrow 100\sim 150$ lt/dak
<u>Monitör</u>	*Üçlü iletim borusu (su, hava ve enj. Karışımı için) *Su jeti için püskürtme ağzı çapı $\Rightarrow 1.6\sim 2.2$ mm. *Hava jeti için püskürtme ağzı çapı $\Rightarrow 1\sim 2$ mm. (halka)
<u>Monitör için geri çekme ekipmanı</u>	*Sondaj makinası *Mobil vinç (araca monte) *Geri çekme hızı $\Rightarrow 5\sim 200$ cm/dak
<u>Diğer</u>	*Mikser *Kum pompası *Hava hortumu *Yüksek basınçlı yük asansörü *Kılıf hortumu *Su tankı

4.7.2 Jet Grout Aracı

Kullanılan delgi kulesi yeraltı zeminine ve mevcut koşullara uygun olarak çalışabilmelidir. Ayrıca bu kule, tijin dönmesini ve ilerlemesini sağlayan bağlantı halatlarını da otomatik olarak ayarlamalıdır.

Her bir delgide oluşacak etkili yarıçap, oradaki zemin özelliklerine ve imalatın değişkenlerine (dönme ve geri çekme hızları, uygulanan basınçlar) bağlıdır. Delgi noktaları birbirine bağlı olarak seçilir. Delgi için izin verilebilir düşeyden sapma miktarı, delgi boyunun %2'sidir. Delgi 90 mm. ve daha geniş çaplı tijlerle yapılır. İnce daneli zeminlerde delgi dönel (rotary) yöntem ile, iri daneli zeminlerde ise darbeli dönel (rotopercussion) yöntem ile yapılır. Bu yöntemde delici gövde boyunca besleme kırımları bulunan ağır ekipmanlar kullanılmaktadır.

Jet grout ekipmanları genellikle özel olarak imal edilmeye devam etmektedir, ancak yeterli miktarda hazır satıcılarda bulunmaktadır. Deliciler elektrikli olanlardan, vinçle desteklenenlere kadar çeşitlilik göstermektedir. Bazı deliciler, dönme ve geri çekme hızları kontrol edilerek çok çeşitli geometrilerde (daire, daire yayı, yarım daire, panel) imalat yapma imkanı vardır.

Ekonomik sebeplerden dolayı delginin istenilen derinliğe kadar tek seferde yapılması tercih edilmektedir. Bu sebeple de uzun delgi direklerinin kullanılması gerekmektedir. Tek aşamada delgi yapılması, ayrıca düşeyden sapmayı da minimuma indirmektedir. İletim borusu yada boruları da seçilen sisteme bağlı olarak tijin içinden geçen aynı eksenli bir, iki yada üç hattan oluşmaktadır ve boyları delgi direği ile uyumlu olmalıdır. Delginin yönü ve eğimi delgi sırasında kontrol edilmelidir. Ayrıca malzemenin pompaj hızının yanı sıra dönme, ilerleme ve geri çekme hızları da izlenip kaydedilmelidir. Delgi ve enjeksiyon için kullanılan makine Şekil 4.21 'de görülmektedir.



Şekil 4.21 Jet grouting uygulamasında delgi ve enjeksiyon için kullanılan makine

Tablo 4.10 Jet grouting çalışma parametreleri

PARAMETRELER		JET GROUTING SİSTEMLERİ		
		TEK AKIŞKANLI	ÇİFT AKIŞKANLI	ÜÇ AKIŞKANLI
ENJEKSİYON BASINCI				
SU	(Bar)	ÖY(200~300)	ÖY(200~300)	300~500
ENJEKSİYON	(Bar)	300~600	300~600	40~60
HAVA	(Bar)	-	8~12	8~13
AKIŞ ORANLARI				
SU	(lt/dak)	ÖY	ÖY	70~100
ENJEKSİYON	(lt/dak)	60~150	100~150	150~250
HAVA	(lt/dak)	-	10~30000	10~30001
PÜSKÜRTME AĞZI ÇAPLARI				
SU	(mm.)	ÖY(1.6~2.4)	ÖY(1.6~2.4)	1.8~2.5
ENJEKSİYON	(mm.)	1.6~3.0	2.0~4.0	3.5~6.0
PÜSKÜRTME AĞZI SAYILARI				
SU	n.	ÖY(1)	ÖY(1)	1~2
ENJEKSİYON	n.	2~6	1~2	1
TİJİN DÖNME HIZI				
	(devir/dak)	10~30	10~30	10~30
TİJİN ÇEKİLME SÜRESİ / ADIM (4 cm.)				
	(sn.)	8~15	10~20	15~25
KOLON ÇAPI				
ÇAKILLI/KUMLU ZEMİNLER	(m.)	0.6~1.0	1.0~2.0	1.5~2.5
KİLLİ ZEMİNLER	(m.)	0.5~1.0	1.0~1.5	1.0~2.0
SU/ÇİMENTO ORANI				
	(W/C)	0.8/1.0'den 2/1'e kadar		
TÜKETİLEN ÇİMENTO MİKTARI				
ISLAH EDİLEN ZEMİNİN BİRİM HACİM AĞIRLIĞI	(kg/m ³)	400~800	400~800	400~800
ZEMİN-ÇİMENTO MUKAVEMETİ				
ÇAKILLI/KUMLU ZEMİNLER	(kg/cm ²)	100~300	75~250	75~200
KİLLİ ZEMİNLER	(kg/cm ²)	15~100	15~85	15~75
NOT: ÖY= ÖN YIKAMA				

4.7.3 Monitör ve Püskürtme Ağzları

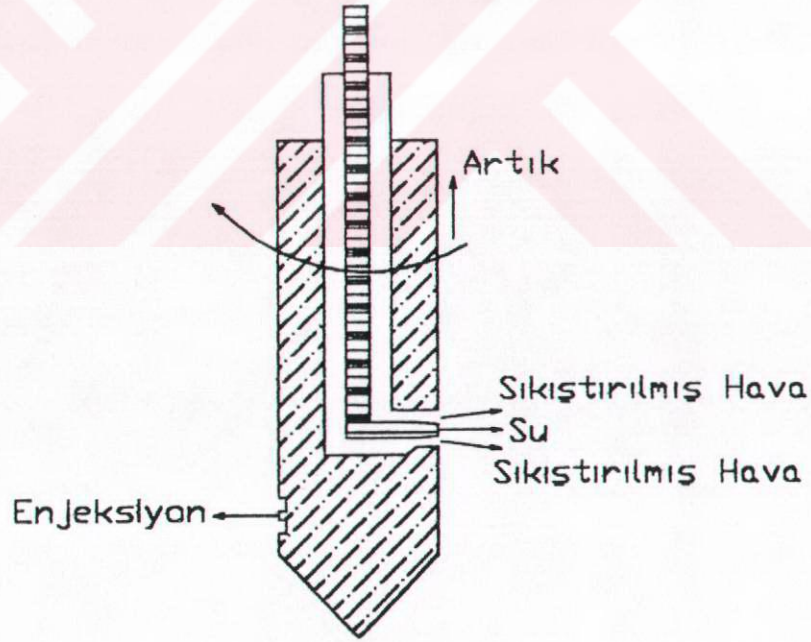


Şekil 4.22 Monitör, püskürtme ağzı ve rock bit

Jet grouting uygulamasında kullanılan, üzerinde püskürtme ağzları bulunan monitör (bit sapı) ve matkap (rock bit) Şekil 4.22'de görülmektedir. Yüksek hızlı akışkan jeti, zemini aşındırmak ve çimento enjeksiyonu ile karıştırmak amacı ile kullanılır. Yer değiştirme ve karıştırma miktarları, işlem sırasındaki zamanlamaya ve bazı parametrelere bağlı olduğu kadar, tek, iki ve üç akışkanlı sistemlerden hangisinin kullanıldığına da bağlıdır. Üç akışkanlı sistem kullanıldığında, yerinde karıştırmanın daha fazla olduğu tek ve iki akışkanlı sistemlere göre daha fazla yer değiştirme meydana gelir.

Tek akışkanlı (ve bazı iki akışkanlı) jet grouting sistemlerinin klasik enjeksiyon yönteminden farklı en önemli özelliği zeminin cinsine, dane çapı dağılımına ve permeabilitesine bağlı olmaksızın daha geniş ölçekte zeminin daha üniform şekilde iyileştirilebilmesidir.

Jet grouting yönteminde hayati öneme sahip olan kısım, imalatın en önemli adımı olan püskürtme işlemini gerçekleştiren monitördür. Jet grout aracında delici gövdenin sonunda (delici ucun hemen üzerinde) bulunan ve üzerinde püskürtme ağzlarının bulunduğu kısma monitör denilmektedir. Püskürtme ağzlarının sayısı, seçilen jet grouting sistemine (tek, iki veya üç akışkanlı sistem) bağlıdır. Her akışkan jeti için (hava, su, enjeksiyon) bir veya daha fazla püskürtücü ağız bulunur ve bunlar jetin tije dik olarak püskürtülmesini sağlarlar. Püskürtülen jetin hızı seçilen püskürtme ağızı çapına bağlıdır ve bu hız, uygulanan basınç ile birlikte aşındırma enerjisini belirler. Üç akışkanlı sistemlerde kullanılan monitörlerin şematik gösterimi Şekil 4.23’de görülmektedir.



Şekil 4.23 Üç akışkanlı jet grout monitörünün şematik görünümü [23]

İki ve özellikle üç akışkanlı sistemlerde monitör yüksekliği, yer değiştirme ve yerinde karıştırma miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Yüksek oranda yerinde karıştırmanın kabul edilebileceği uygulamalarda monitör yüksekliği azaltılabilir. Ancak killi zeminlerde yerinde karıştırmadan ziyade yer değiştirmenin

daha fazla olması tercih edilir. Monitör yüksekliğinin fazla olması durumunda aşağıda kalan enjeksiyon jeti, tremi prensibi ile çalışarak yer değiştirme miktarını artırır. Daha hafif olan ayrılmış zemin ile oluşan bulamaç, daha ağır olan çimento enjeksiyonu tarafından yüzeye itilir.

Püskürtme ağızları genellikle her uygulama için ayrı ayrı tasarlanır ve monitörlerde bu şekilde oluşturulur. Püskürtme ağızlarının çapları 1.5~8 mm. arasında değişmektedir. İdeal püskürtme ağzının Shizbaki ve Ohta tarafından önerilen kesiti Şekil 4.24'de görülmektedir.

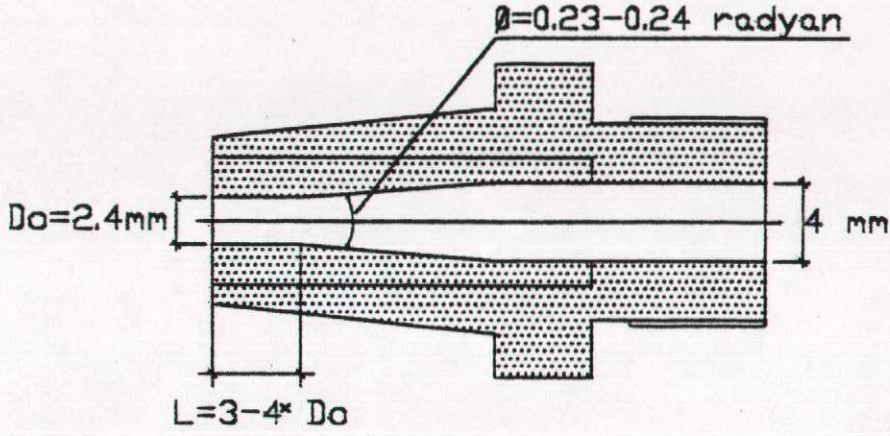
Püskürtme ağzının çapı, püskürtme enerjisi ve enjeksiyon akımı miktarını belirleyici en önemli faktördür ve bu sebeple başarılı bir jet grout imalatı için püskürtme ağzı tasarımı can alıcı öneme sahiptir. Aşındırıcı akışkanın basıncı (su jeti yada enjeksiyon jeti) genellikle 20~60 Mpa arasında olmaktadır. Gerekli jet basıncı zeminin cinsine ve birim hacim ağırlığına bağlıdır. Jet grout elemanının çapının artırılması için yalnızca basıncın artırılması gerektiği şeklindeki yaklaşımın pek de doğru olmadığı tecrübeler ve araştırma sonuçları ile belirlenmiştir. Bu konudaki en sağlıklı yaklaşım, püskürtme ağzı çapı, basınç, ve verilen enjeksiyon hacmi ve geri çekme hızı olarak sıralanabilecek parametrelerin bir arada değerlendirilmesidir.

Monitör ve püskürtme ağızlarına ilişkin bazı ortalama değerler şu şekilde sıralanabilir:

- Üç akışkanlı sistemde su jetinin basıncı 40~60 MPa'dır.
- Enjeksiyon basıncı tek akışkanlı sistemde 35~50 MPa, üç akışkanlı sistemde ise 5~8 MPa'dır.
- Püskürtülen enjeksiyon miktarı tek akışkanlı sistemde 50~150 lt/dak, üç akışkanlı sistemde ise 50~100 lt/dak'dır.
- Üç akışkanlı sistemde hava basıncı 0.7~1.7 MPa'dır.
- Üç akışkanlı sistemde verilen hava miktarı 8~13 m³/dak'dır.

Bu değerlere göre aşındırma enerjisi 6~150 MJ/m arasında değerler almaktadır. Yöntemde basınçların dikkatle takip edilmesi ile püskürtücü ağızlarda oluşabilecek tıkanmalar kontrol edilebilir. Delgi sırasında, enjeksiyona başlanmadan önce çıkartılmak üzere tıkanmayı önlemek amacı ile başlıklar takılabilir. Ayrıca

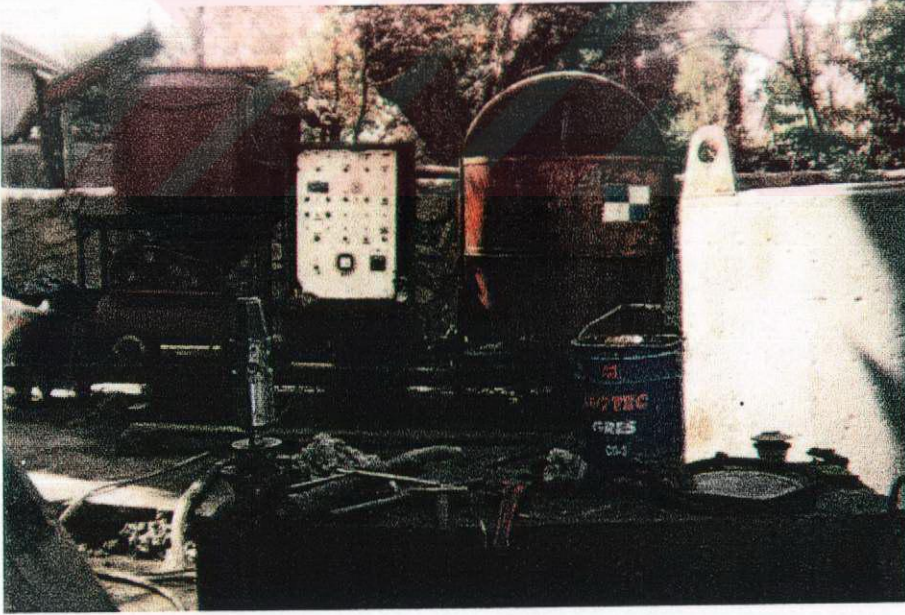
püskürtücü ağızlar yoğun miktarda aşınma, yıpranma ve yırtılma etkisine maruz kalabilmektedirler. Bu yüzden ağız çapı sıklıkla kontrol edilmeli ve ağızlar yüksek



mukavemetli çelikten imal edilmelidir.

Şekil 4.24 Tek tüplü jet püskürtme ağızı [36]

4.7.4 Karışım Tesisi



Şekil 4.25 Jet grouting tesisi karıştırma ünitesi

Jet grouting yönteminde gerekli olan enjeksiyonun hazırlandığı karıştırma ünitesi (santral) Şekil 4.25’de görülmektedir.

Jet grout karışımı basit şekilde elle veya küçük mekanik karıştırıcılar ile karıştırılarak hazırlanabileceği gibi, tamamen otomatize edilebilir. Bu, grup karıştırma sistemi için de, sürekli karıştırma sistemi için de geçerlidir. Jet grout yapılabilmesi için her durumda uygulanan sisteme bağlı olarak, $1.4\sim 1.8 \text{ gr/cm}^3$ özgül ağırlığa sahip, $5\sim 25 \text{ m}^3/\text{saat}$ miktarında karışım hazırlanması ve dolayısıyla bu kapasiteye sahip karışım tesisi gerekmektedir.

Karışım tesisi, klasik enjeksiyon yönteminde kullanılan tesise benzer bir tesistir ve silolar, dozaj ayarlama ekipmanı, kolloidal kırıcılar ve ölçme kayıt etme cihazı gibi kısımlardan oluşmaktadır. Tesisin tüm parçaları, gerekebilecek maksimum kapasiteye göre oluşturulmalıdır.

4.7.5 Yüksek Basınç Pompaları



Şekil 4.26 Jet grouting tesisi pompa ünitesi

Karışım ünitesinde hazırlanan enjeksiyonu yüksek basınç altında, delgi ve enjeksiyon için kullanılan makineye aktaran yüksek basınç pompası Şekil 4.26'da görülmektedir. Jet grouting yönteminde kullanılan pompaj sistemleri de özeldir ve 300~500 Beygir arasında güce sahip olan bu pompalar klasik enjeksiyonda kullanılanlardan çok daha güçlüdür.

Kullanılan pompalar, Petrol Mühendisliğinde derin sondajlarda kullanılan pompaların tipinde, onlara yakın güçte ve kapasitede pompalardır. Boşaltım istenen etkili yarıçapa göre belirlenmiş olan darbe frekansına bağlıdır ve basınç ile boşaltım sürekli olarak kaydedilmelidir.

Jet grouting yönteminde kullanılan pompalar (özellikle üç akışkanlı sistemde) depoludur ve böylece tüm parametreler (hava, su ve enjeksiyon) kontrol edilip gözlemlenebilir. Kullanılan pompalar 500 lt/dak'ya kadar pompaj (boşaltım) yapabilmekte ve basınçlar 100 Mpa'ya kadar çıkabilmektedir. Bu yüksek basınç pompalarının ağırlıkları 14 tona ve boyutları ise 6m.x6m.x3m.'ye varabilmektedir.

4.8 Jet Grout Elemanlarının Özellikleri

Jet grouting yöntemi ile imal edilen elemanların özellikleri enjeksiyon karışım oranına, zemin cinsine ve imalatta uygulanan işleme bağlıdır. Oluşturulan elemanın yapısal açıdan önemli olan özellikleri; mukavemet, permeabilite ve erozyona (aşınmaya) karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir.

4.8.1 Çeşitli Zeminlerde Jet Grout Elemanlarının Yapısı

Jet grouting yöntemi ile zemin iyileştirilmesinin başarısı uygulanacak parametrelerin dikkatli olarak seçimine bağlıdır. Uygulanan ıslah işlemi sırasında kullanılan basınç değeri ve enjeksiyon süresi, zeminin mukavemetine bağlıdır. Aşağıda farklı iki zemin cinsi için en sık karşılaşılan durumlar özetlenmektedir:

4.8.1.1.Kil

Düzgün ve sürekli bir yapı elde etmek için küçük çaplı püskürtme ağızları kullanılmalıdır. Çapları 1.6 mm. ile 2.0 mm. arasında değişen en fazla iki püskürtme ağızı kullanılmaktadır. Kil zeminlerde yüksek basınç sebebi ile sıklıkla oluşan kırılma ve kabarmaları önlemek amacı ile yüksek basınç (500~600 Bar) ve enjeksiyon malzemesi miktarı azaltılmalıdır[16].

Kesilen zemin muhtelif sebeplerden dolayı enjeksiyon deliğinin tıkar ve fazla gelen zeminin dışarı atılmasına engel olabilir. Bu halde zeminde basınç altında bulunan bir ortam yaratılmış demektir. Enjeksiyona devam edilmesi halinde, artan basınçla enjeksiyon kuyusu içinde bulunan enjeksiyon bulamacı; çevrede bulunan zemini, hidrolik piston gibi enjeksiyon borusu istikametinde iterek yüzeyde kabarmalar halinde kendini gösteren çatlama ve kırılmalara sebep olur. Bu arada radyal istikamette oluşan çatlaklarda enjeksiyon malzemesi ile doldurulmuş olur [1].

Sistemin bu zayıf zeminlerdeki çatlakları da bulup doldurabilme özelliğinden geçirimsizlik aranan enjeksiyonlarda geniş çapta kullanılmaktadır. Genellikle istenmeyen ve özellikle kaçınılması gereken bu kabarmalar zamanında önlem alınmazsa desimetreler seviyesine çıkmaktadır. Ancak bu kabarmalar oturmuş temellerin düzeltilmesi gibi olumlu yönde de kullanılabilir.

İyileştirme işlemi zor ise (konsolide killer), sadece bir püskürtme ağzı kullanılmalıdır. Böylece yüksek basınç (600 Bar) altında meydana gelen enerji kayıpları kontrol edilebilmektedir. Bu durumda, enjeksiyon yapımı yavaş ve enjekte edilen karışım miktarı çok az olmalıdır. Bu zeminlerde 250~300 barlık su enjeksiyonu ile (ön yıkama) kil zemini gevşettiği için önerilmektedir [16].

4.8.1.2.Çakıl

Genellikle granüler zeminlerde kullanılan çalışma parametreleri kil zeminlerde kullanılanlardan farklıdır. Enjeksiyon basıncı 400~500 bar arasında değişmektedir. Püskürtme ağzı çapları 2.5~3.0 mm. arasında değişmekte olup bu zeminlere daha fazla miktarda karışım enjekte edilebilmektedir. [37]. Kum ve siltli zemin içersinde gerçekleştirilen jet grout kolonu Şekil 4.27'de görülmektedir.

Aşağıdaki hususların çeşitli enjeksiyon sistemlerine uyarlanması gerekmektedir [16].

Tek Akışkanlı Sistem: Genelde bir veya iki adet püskürtme ağzı kullanılmaktadır. Daha az sayıda püskürtme ağzı kullanıldığında enerji kaybının daha az olması sebebi ile eşit ıslah alanları oluşmaktadır. Daha küçük çaplı püskürtme ağızları kullanıldığında enerjide oluşan kayıp, enjeksiyonun, püskürtme ağızlarından çıkışını ve etrafa yayılmasını etkilemektedir. Püskürtme ağız çapları büyüdüğünde enjeksiyonun etrafa yayılımında azalma oluşur.

Çift Akışkanlı Sistem: Çoğunlukla bir püskürtme ağzı kullanılmaktadır. Çünkü iki adet püskürtme ağzı kullanıldığında, hava bu iki püskürtme ağızlarının birinde çıkabilir ve operatör bu durumun farkında olmayabilir. Bu durumda zemin ıslahı gerektiği gibi yapılamayabilir. Bu yöntemde kullanılan püskürtme ağız çapları, tek akışkanlı sisteme göre daha büyüktür. Çap boyutları 2.5 mm. ile 4.5 mm. arasında değişmektedir.

Üç Akışkanlı Sistem: Çift akışkanlı sistemde ki hususlar bu yöntem için de geçerlidir.

Şekil 4.27'de ise kumlu ve siltli bir zeminde oluşturulmuş bir jet grout kolonunun daha sonra kazılarak ortaya çıkartılması görülmektedir. Kolonda oluşan düzensiz yapı, çok belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

4.8.2 Enjeksiyon Karışımının Özellikleri

Yüksek basınçlı enjeksiyon numuneleri üzerinde yapılan deneyler su/çimento oranı ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki bağıntıyı ortaya koymuştur. Aynı enjeksiyonda kullanılan şerbetin akma mukavemeti ve terleme yüzdesi de dikkate alınacak olursa en uygun sonuçların su/çimento oranının 0.7 ile 0.8 limitleri arasında iken alındığı görülmektedir. Genelde enjeksiyon şerbetine akışkanlık sağlamak için %2~3 oranında bentonit ilave edilmekte, su/çimento oranı ise 1.0'e yükselmektedir.



Şekil 4.27 Kum ve siltli zeminde imal edilmiş jet grouting kolonunu [38].

Bentonit ilavesi enjeksiyon şerbetinin akışkanlığını ve işlenebilirliğini arttırmakta, buna karşılık jet grout kolonu basınç mukavemetlerinde büyük bir değişiklik yapmamaktadır [1].

Standart su/çimento oranı 1 ve özgül ağırlık $1410\sim1570 \text{ kg / m}^3$ düzeyindedir. Bu oran kullanılan yöntem, istenilen iyileştirme tipi, kolonların istenilen nihai dayanımları ve zemin cinsine bağlı olarak değişmektedir.

Bentonit karışımların kullanıldığı geçirimsiz perde duvarları dışında, su/çimento oranının $(W/C)=0.70$ 'den daha az olduğu karışımlar genelde uygulanmaz. İyileştirilmiş zemin birim m^3 'ü başına çimento miktarı $350\sim 700\text{ kg/m}^3$ arasında değişmekle birlikte ortalama olarak 450 kg/m^3 'dür. Enjeksiyon karışımına bazı katkı maddeleri ilavesiyle iyileştirme etkilerinin artırılması mümkündür. Örnek olarak yüksek yer altı suyu akışının söz konusu olduğu yerlerde %1~3 sodyum silikat katılması tavsiye edilmektedir [16].

Jet grout kolon mukavemeti su/çimento oranına bağlı olup iyileştirilmiş kum zeminin mukavemeti, aynı dozaj ve hacimdeki enjeksiyon karışımı ile iyileştirilmiş kil zeminin mukavemetinden çok daha fazladır.

Jet grouting yönteminde kullanılan karışımlar genellikle su ve çimentodan oluşur ve su/çimento oranı (W/C) 0.8'den 1.5'e kadar değişmektedir. 1.5'in üzerindeki su/çimento oranları uygulamada kullanılan oranlar değildir. Diğer taraftan prizın geciktirilmesi, büzülmenin azaltılması, geçirimsizliğin azaltılması, ekipmanın temizlenmesinin kolaylaştırılması ve karışımın pompalanabilirliğinin artırılması gibi teknik sebepler ve maliyetlerin azaltılması gibi ekonomik sebepler dolayısıyla çeşitli katkı maddeleri de kullanılabilir.

Jet grouting elemanında istenilen özellik, öncelikle geçirimsizlik ise, şişen kil (bentonit) katkısı kullanılmalıdır. Ayrıca ağırlıkça 1/1 ila 1/10 arasında değişen oranlarda uçucu kül katkılarında kullanılabilir. Ancak enjeksiyonda kil kullanılması, jet grouting elemanının mukavemetinde azalmaya yol açmaktadır ve bu sebeple kil katkıların kullanımı özel dikkat gerektirmektedir. Karışımlarda kullanılabilen katkı maddeleri cüruf çimentoları, uçucu küller ve şişen killeri(bentonit) olarak sıralanabilir [9,15,22]

Enjeksiyon karışımları ile ilgili Welsh tarafından ortaya konmuş olan en temel unsurlar aşağıda sıralanmıştır [21].

- Kullanılan enjeksiyon karışımlarının nerede ise tamamı çimento esaslıdır ancak nadir olarak da olsa kimyasal enjeksiyonlar da kullanılabilir.

- Çimento-uçucu kil karışımları ile hazırlanan enjeksiyonlarda, oranlar ağırlıkça 1/1~1/10 aralığında olmaktadır.
- En önemli kriterin geçirimsizlik olduğu, sızdırmazlık perdesi gibi uygulamalarda çimento bentonit karışımları tercih edilmelidir.
- Serleşmiş enjeksiyon karışımının permeabilite değerleri $10^{-6} \sim 10^{-9}$ cm/sn aralığında olmalıdır.
- Uçucu külden daha iri ve aşındırıcı katkı maddeleri; jet grout elemanına, iletim kanallarına ve püskürtme ağızlarına verebilecekleri zararlar sebebi ile kullanılmamalıdır.
- Su/katı madde oranı genellikle 0.8~1.5 arasında, uygulamanın tipine ve tasarım gereklerine bağlı olarak değişir ancak bentonit katkılı özel uygulamalarda 4.0'e kadar çıkabilmektedir.
- Enjeksiyon karışımından beklenen küp mukavemeti özel uygulamalar için tasarım gereklerine bağlı olarak değişebilmekle beraber genellikle 350 kPa (350 kN/m²) ile 14000 kPa (14000 kN/m²) aralığında olmaktadır.

4.8.3 Jet Grout Elemanların Birleşimi

Her tür jet grout uygulamasında sağlıklı tasarım yapılabilmesi için, oluşturulacak jet grout elemanların mukavemetlerinin, birleşimlerinin ve geometrilerinin gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. İmalat süresince bu parametreler kontrol edilmeli ve istenilen sonuca uygun şekilde doğrulanmalıdır.

Jet grout elemanların kütle denge denklemlerinin bulunması, oluşan jet grout elemanında ve artık malzemedeki zemin-enjeksiyon birleşimlerinin tahmini için çoğunlukla tek akışkanlı sistem ile oluşturulan örnekler incelenmektedir. Kütle denge denklemlerinin oluşturulması için yapılması gereken bazı temel kabuller şunlardır [39]:

- Jet grout elemanında zemin enjeksiyon karışımı homojendir.
- Zemin ve zemine verilen enjeksiyon üniform silindirik bir eleman oluşturur, bu elemanda kırılma ve sızma yoktur.

- Jet grout kolonun kendi ağırlığı altındaki konsolidasyonu sırasındaki suyun drenajı dikkate alınmaz.
- Yüzeyle çıkan zemin parçacıkları ve artık malzeme, enjeksiyonun yapıldığı noktadaki ile aynı özellikleri taşır.

Oluşturulan jet grout kolonunun boyunu direkt olarak doğrulayan bir yöntem mevcut değildir. Jet grout elemanlarının boyut ve mukavemetleri genellikle maliyeti yüksek sınırlı sayıda deneme sahaları oluşturularak ölçülür. Yüksek maliyetli direkt ölçümlere ek olarak, elemanların boyut ve birleşimleri kütlenin korunumu kanunlarından yararlanarak da tahmin edilebilir.

Kolondaki çimento ; $W_{çim}^c = \text{enjekte edilen çimento} - \text{dışarı alınan çimento}$
 Kolondaki su ; $W_{su}^c = [(zemin suyu + \text{enjekte edilen su}) - \text{dışarı alınan su}]$
 Kolondaki zemin ; $W_{zemin}^c = \text{işlemden etkilenen zemin} - \text{dışarı alınan zemin}$

Diğer taraftan kolonun toplam ağırlığı(W_t^c)nın, toplam hacme oranı (V_t^c) ile bulunan; toplam birim hacim ağırlığı (γ_t^c) şu şekilde gösterilir :

$$\gamma_t^c = W_t^c / V_t^c \quad (4.5)$$

Silindirik kolon hacmi(V_t^c) ise şu şekilde hesaplanır :

$$V_t^c = ((\pi / 2) \times D^2 \times \Delta Z) \quad (4.6)$$

Burada ΔZ kolonun yüksekliğini, D ise çapını göstermektedir. Kolonun toplam ağırlığı ise

$$W_t^c = W_{çim}^c + W_{su}^c + W_{zemin}^c + W_{hava}^c \quad (4.7)$$

İfadesi ile hesaplanır ki burada hava ağırlığı (W_{hava}^c) ihmal edilebilir. Bu durumda jet grout kolonun çapı (D) :

$$D = \sqrt{W_t^c / ((\pi / 4) \times \Delta Z \times \gamma_t^c)} \quad (4.8)$$

Şeklinde hesaplanabilir. (8) no'lu eşitlikte; W_t^c :kolonun toplam ağırlığını, ΔZ : kolonun yüksekliğini, γ_t^c : kolonun toplam birim hacim ağırlığını göstermektedir. Dolayısıyla jet grout kolonunun taşlaşmış birim hacim ağırlığı bulunabilirse (4) no'lu eşitlik kullanılarak kolonun çapı hesaplanabilir. ΔZ aralığındaki jet grout kolonunun toplam ağırlığı ise şu şekilde hesaplanabilir :

$$W_{\text{çim}}^c = W_{\text{çim}}^{\text{enj}} - W_{\text{çim}}^{\text{artık}} \quad (4.9)$$

$$W_{\text{su}}^c = W_{\text{su}}^{\text{ze min}} + W_{\text{su}}^{\text{enj}} - W_{\text{su}}^{\text{artık}} \quad (4.10)$$

$$W_{\text{ze min}}^c = W_{\text{ze min}}^{\text{etkilenen}} - W_{\text{ze min}}^{\text{artık}} \quad (4.11)$$

(9) no'lu eşitlikte: Kolondaki çimento ağırlığı ($W_{\text{çim}}^c$); Enjekte edilen çimento ağırlığından ($W_{\text{çim}}^{\text{enj}}$), dışarıya alınan artıktaki çimento ağırlığının ($W_{\text{çim}}^{\text{artık}}$) çıkarılması ile elde edilir. (10) no'lu eşitlikte: Kolondaki su miktarı (W_{su}^c); zemin suyu ($W_{\text{su}}^{\text{ze min}}$) ve enjekte edilen su ağırlığı ($W_{\text{su}}^{\text{enj}}$)nın toplamından, dışarıya alınan artıktaki su ağırlığı($W_{\text{su}}^{\text{artık}}$)nın çıkarılmasıyla bulunur. (11) no'lu eşitlikte ise kolondaki zeminin ağırlığı ($W_{\text{ze min}}^c$); işleminden etkilenen zemin ağırlığı ($W_{\text{ze min}}^{\text{etkilenen}}$)nın, dışarıya alınan artıktaki zemin ağırlığı($W_{\text{ze min}}^{\text{artık}}$)ndan çıkarılmasıyla elde olunur.

(5),(6),(7) no'lu eşitlikler göstermektedir ki jet grout kolonunun toplam ağırlığının bulunması için toplam yedi değişkenin bilinmesi gerekmektedir. Üç temel değişken olan zemin, çimento ve su miktarları şu şekilde hesaplanır :

a) Jet grout işleminden etkilenen zemin miktarı ($W_{\text{ze min}}^{\text{etkilenen}}$)

$$W_{\text{ze min}}^{\text{etkilenen}} = ((\pi \alpha D^2) x \Delta Z x \gamma_t^{\text{arazi}} x (1/1 + w)) \quad (4.12)$$

burada w: zeminin doğal su muhtevasını, γ_t^{arazi} : kolonun yerindeki birim hacim ağırlığını, ΔZ : kolonun yüksekliğini, D: kolonun çapını göstermektedir.

b) Zemin içersindeki su miktarı ($W_{su}^{zemin\ deki}$) ise; etkilenen zemin ağırlığının($W_{zemin}^{etkilenen}$), su muhtevası(w) ile çarpılması ile bulunur.

$$W_{su}^{zemin\ deki} = wx(W_{zemin}^{etkilenen}) \quad (4.13)$$

c) Birim kolon yüksekliği (ΔZ) için, yapılan enjeksiyondaki çimento ağırlığı($W_{enj.}^{yapılan}$) :

$$W_{enj.}^{yapılan} = [(G_c x \gamma_w) / (1 + (G_c x (W/C)^{enj}))] x (Q^{yapılanenj.} / L) \quad (4.14)$$

Burada; $L \Rightarrow \Delta Z$ boyunca monitörün geri çekilme hızı, $Q^{yapılanenj.}$: Enjeksiyonun miktarı, G_c (3.0) enjekte edilen çimentonun ve γ_w 'de suyun özgül ağırlığıdır. (W/C)^{enj} ise; enjeksiyondaki su/çimento oranını göstermektedir. Buradan enjekte edilen çimentonun özgül ağırlığı($W_{çim}^{enj}$);

$$W_{çim}^{enj} = W_{çim}^{yapılan} x \Delta Z \quad (4.15)$$

şeklinde bulunur. (15) no'lu eşitlikte $W_{çim}^{yapılan}$: kullanılan çimento ağırlığını ve ΔZ kolonun yüksekliğini göstermektedir. Benzer şekilde enjekte edilen suyun miktarı ($W_{su}^{enj.}$) :

$$W_{su}^{enj} = W_{çim}^{enj} x (W/C)^{enj}_{su} \quad (4.16)$$

ifadesi ile hesaplanır ki burada $W_{çim}^{enj}$: enjeksiyondaki çimento ağırlığını, (W/C)^{enj}_{su} ise enjeksiyondaki su/çimento oranını göstermektedir. (8) ve (10) no'lu eşitliklerdeki değişkenler zemin inceleme sonuçlarından ve seçilen jet grout parametrelerinden elde edilebilir. Bu durumda (5), (6) ve (7) no'lu eşitliklerin tamamlanması için gereken dışarı alınan çimento, zemin ve su miktarlarıdır. Jet grouting sırasında delikten dışarı alınan zeminin suya oranı ($W_{zemin}^{alınan} / W_{su}^{alınan}$) şu şekilde belirlenir :

$$W_{zemin}^{alman} / W_{su}^{alman} = \frac{(S/W)^a = \left\{ \gamma_t^0 x \left[(1/\gamma_w) + (1/(\gamma_w x G_c)) x (C/W)^a \right] - [1 + (C/W)^a] \right\}}{[1 - (\gamma_t^0 x (\gamma_w x G_s))]} \quad (4.17)$$

Burada ; γ_t^0 = artık malzemenin yoğunluğunu, γ_w = suyun yoğunluğunu, G_s = zemin danelerinin özgül ağırlığını, G_c = enjekte edilen çimentonun özgül ağırlığını, $(C/W)^a$ = artık malzemedeki su/çimento oranını, $(S/W)^a$ = artık malzemedeki zemin/su oranını ifade etmektedir.

Dışarı alınan çimento, zemin ve su ağırlıkları aşağıdaki ifadeler ile hesaplanabilir :

$$W_{zemin}^{alman} = \left\{ (\gamma_t^0 x \gamma_w) \right\} / [1 + ((C/W)^a / (S/W)^a) + (1/(S/W)^a)] x [Q^{alman} x \Delta Z / L] \quad (4.18)$$

$$W_{çim}^{alman} = \left\{ \gamma_t^0 x \gamma_w \right\} / [1 + ((S/W)^a / (C/W)^a) + (1/(C/W)^a)] x [Q^{alman} x \Delta Z / L] \quad (4.19)$$

$$W_{çim}^{alman} = \left\{ \gamma_t^0 x \gamma_w \right\} / [1 + ((C/W)^a / (S/W)^a)] x [Q^{alman} x \Delta Z / L] \quad (4.20)$$

Burada ; Q^{alman} = dışarı alınan artığın akım hızını (debi), $Q^{alman} x \Delta Z / L$ = artığın hacmini, $\Delta Z / L = \Delta t$ = zemin aşındırılırken geçen süreyi, $(C/W)^a$ = artık malzemedeki su/çimento oranını, $(S/W)^a$ = artık malzemedeki zemin/su oranını, γ_t^0 = artık malzemenin yoğunluğunu, γ_w = suyun yoğunluğunu, ifade etmektedir.

Tamamlanmış bir jet grout kolonunun birleşimi, (5),(6) ve (7) no'lu eşitliklerde, W_{zemin}^{alman} , $W_{çim}^{alman}$, W_{su}^{alman} 'yun yerlerine konulması ile bulunur. Böylece jet grout elemanındaki zemin, çimento ve su ağırlıklarının bulunması için aşağıdaki eşitlikler türetilebilir:

$$W_{zemin}^c = \left(\frac{\pi x D^2}{4} x \Delta Z \right) \left(\frac{\gamma_t^{yerinde}}{1 + w} \right) - \frac{\gamma_t^0 x \gamma_w}{(1 + (C/W)^a / (S/W)^a + 1/(S/W)^a)} x \frac{Q^{alman} x \Delta Z}{L} \quad (4.21)$$

$$W_{\text{çim}}^c = \left(\frac{G_c x \gamma_w}{1 + G_c x (W/C)^{\text{enj}}} \right) \left(\frac{Q_{\text{püsk}} x \Delta Z}{L} \right) - \left(\frac{\gamma_t^0 x \gamma_w}{1 + \frac{(S/W)^a}{(C/W)^a} + \frac{1}{(C/W)^a}} \right) \left(\frac{Q_{\text{alınan}} x \Delta Z}{L} \right) \quad (4.22)$$

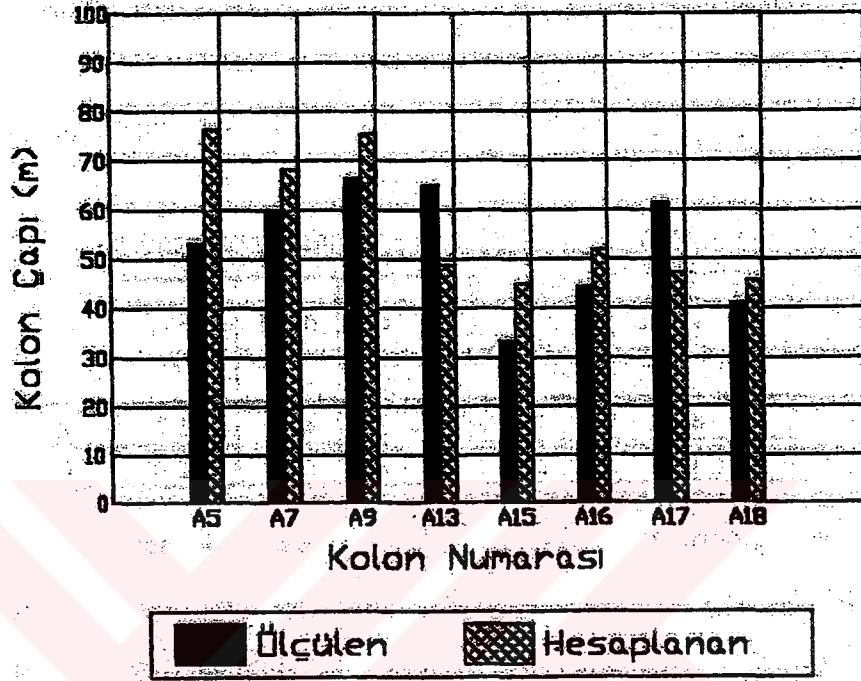
$$W_{\text{su}}^c = \left(\frac{w x \pi x D^2}{4} x \Delta Z \right) \left(\frac{\gamma_t^{\text{yerinde}}}{1 + w} \right) + \left(\frac{W}{C} \right)^{\text{enj}} \left(\frac{G_c x \gamma_w}{1 + G_c x (W/C)^{\text{enj}}} \right) \left(\frac{Q^{\text{enj}} x \Delta Z}{L} \right) - \left(\frac{\gamma_t^0 x \gamma_w}{1 + (C/W)^a + (S/W)^a} \right) \left(\frac{Q^a x \Delta Z}{L} \right) \quad (4.23)$$

(21), (22) ve (23) no'lu eşitliklerde; $W_{\text{ze min}}^c$ = kolondaki zemin ağırlığını, $W_{\text{çim}}^c$ = kolondaki çimento ağırlığını, W_{su}^c = kolondaki su ağırlığını, D = kolonun çapını, ΔZ = kolonun yüksekliğini, γ_t^0 = artık malzemenin yoğunluğunu, $\gamma_t^{\text{yerinde}}$ = oluşturulan kolonun yoğunluğunu, γ_w = suyun yoğunluğunu, G_s = zemin danelerinin özgül ağırlığını, G_c = enjekte edilen çimentonun özgül ağırlığını, $(C/W)^a$ = artık malzemedeki su/çimento oranını, $(S/W)^a$ = artık malzemedeki zemin/su oranını $(W/C)^{\text{enj}}$ = enjeksiyondaki su/çimento oranını, w = su muhtevası, $Q_{\text{püsk}}$ = püskürtülen enjeksiyonun debisini, $Q^{\text{alınan}}$ = dışarı alınan artığın akım hızını (debi), $Q_{\text{alınan}} x \Delta Z / L$ = artığın hacmini, $\Delta Z / L = \Delta t$ = zemin aşındırılırken geçen süreyi, ifade etmektedir.

Teorik temeli yukarıda anlatılmış olan kütle denge denklemlerinin tutarlılıklarının ve geçerliliklerinin değerlendirilmesi amacı ile, nemli kumlu çakıl zeminden oluşan Varallo Pompia test sahasında jet grout uygulaması yapılmış ve bu çalışma Rodio ve diğerleri tarafından rapor edilmiştir [40]. Çalışmada tek akışkanlı jet grouting yöntemi ile 19 adet jet grout kolon oluşturulmuştur. Bu 19 kolondan 8 tanesinde, kütle denge denklemlerinde yerine konulması için gereken veriler mevcuttur. Yüzeye çıkan artık malzemedeki çimento miktarının tahmini için Rodio tarafından aşağıdaki ampirik bağıntı önerilmektedir; artık malzemedeki su/çimento oranı $(C/W)^{\text{alınan}}$ [40]:

$$(C/W)^{\text{alınan}} = 0.135 + q_u^{1/2} \quad (4.24)$$

Burada q_u (kg/cm^2), sertleşmiş artık malzemenin basınç mukavemetidir. Bu 8 kolonun kütle denge denklemleri yardımı ile hesaplanan çapları ile ölçülen çapları Şekil 4.28’de görülmektedir. Genellikle (8’de 6) hesaplanan çapların ölçülen çaplardan büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 Varallo Pompia’da jet grout kolonların ölçülen ve hesaplanan çapları [40]

Nötralizasyon Isısı Testi

Jet grouting yönteminde, akışkanlar mekaniği kavramları uyarınca enjeksiyon noktasından artığın alındığı yüzeydeki deliğe kadar kesintisiz bir akım oluşmalıdır. Bunun oluşması sayesinde, püskürtme noktasındaki basınç yüksek hıza dönüşür. Böylece püskürtülen çimentonun bir miktarı dışarı çıkarken, bir miktarı ise zeminde kalır. Önemli olan dışarı çıkan ve zeminde kalan çimento miktarlarının bilinmesidir. Bu amaçla arazide uygulanabilecek, basit bir yöntem olan “nötralizasyon ısı testi” geliştirilmiştir. Bu testin yapılması için, içersinde uygun ortamlarda sodyum asetan, asetik asit gibi indikatörler bulunan bir tampon çözelti hazırlanmalıdır. Çimento, bu tampon çözelti ile nötralize olurken oluşan ısı artışı geliştirilmiş olan bir kalibrasyon eğrisi yardımı ile, çimento oranının bulunuşunda direkt olarak kullanılır [39].

4.8.4 Jet Grouting Yönteminin Tasarım Esasları

Jet grouting yönteminde tek ve kesin bir hesap yöntemi oluşturmak zordur fakat gerçekleştirilen birçok uygulama ve bu uygulamalardan elde edilen tecrübeler sonucunda hesap yöntemi için bazı öneriler geliştirilmiştir.

Teorik ve ampirik uygulamalar içeren birçok hesap yöntemi jet grouting tasarımına uyarlanmıştır. Sonuçta, tasarı yöntemi tasarımcının kişisel tecrübelerinden gelen bilgilerine bağlı olup diğer taraftan iyi, güvenli ve gerçekçi tasarım; derin çalışma yöntemi bilgisi ve yöntemin uygulanabilirliği ile sağlanabilmektedir.

İlk aşamada, tasarımdan önce yapılması gerekenler [16]:

1. Zemin hakkında elde edilebilecek tüm verilerin toplanması : detaylı zemin profili ve hidrojeolojik bilgiler, SPT ve CPT gibi zeminin kıvrımı ve sıklığı hakkında bilgi veren arazi deneyleri, zeminden alınan temsili ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan lâboratuar deneyleri [.4],
2. Zeminin mekanik olarak modellenmesi,
3. Yükleme koşullarının seçimi,
4. Yüklerin hesaplanması,
5. Malzemelerin seçimi.

Bu aşamadan sonra tasarımcı jet grouting yönteminin zemin iyileştirme veya yapısal eleman olarak kullanılmasına karar vermelidir. İkinci aşamada :

1. Zemin cinsi ve parametreleri,
2. Enjeksiyon özellikleri,
3. Zemin-enjeksiyon karışımları,

4. Çelik donatı, tip ve geometrisi,

5. Katkı malzemeleri

Düşünülmelidir. Son olarak, jet grouting sistemi ihtiyaçlara cevap verecek şekilde teknolojiye uygun olarak seçilmelidir.

4.8.5 Jet Grout Kolon Hesabı

Jet grouting yönteminde düşey tekil elemanlar kazık gibi düşünülerek hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Kolonlar yapısal yükleri zeminin zayıf veya yumuşak tabakalarından geçirerek daha derinlerdeki taşıyıcı tabakalara aktarmak amacıyla kullanılmaktadır [16].

Jet grout kolonunun taşıma kapasitesi kazıklarda olduğu gibi belirlenmektedir. Jet grout kolonunun azami taşıma kapasitesi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [16]:

$$q_u = q_{uç} + q_s \quad (4.25)$$

Efektif gerilme (uzun süreli):

$$q_u = A_b \cdot Q_b + \pi \cdot D_a \cdot \int_{11}^{12} \gamma \cdot z \cdot K_s \cdot \tan \delta \cdot d_z \quad (4.26)$$

Toplam gerilme (kohezyonlu zeminlerde kısa süreli):

$$q_u = A_b \cdot Q_b + \pi \cdot D_a \cdot \int_{11}^{12} \alpha \cdot c_u \cdot d_z \quad (4.27)$$

Formülde:

A_b : Kolon kesit alanı

$Q_b : (1+2K_o)/3 \cdot \sigma_{vo} \cdot N_q^* \cdot \xi$ (kumlarda)

$Q_b : 9 \cdot c_u$ (kohezyonlu zeminlerde)

D_a : Ortalama ϕ

N_q^* : Taşıma gücü faktörü, derin temeller için

σ_{vo} : Düşey basınç

γ : Zeminin γ birim hacim ağırlığı

K_o : Sukünetteki yatay toprak basıncı katsayısı

K_s : Yatay yatak katsayısı

δ : Zemin-kolon sürtünme açısı

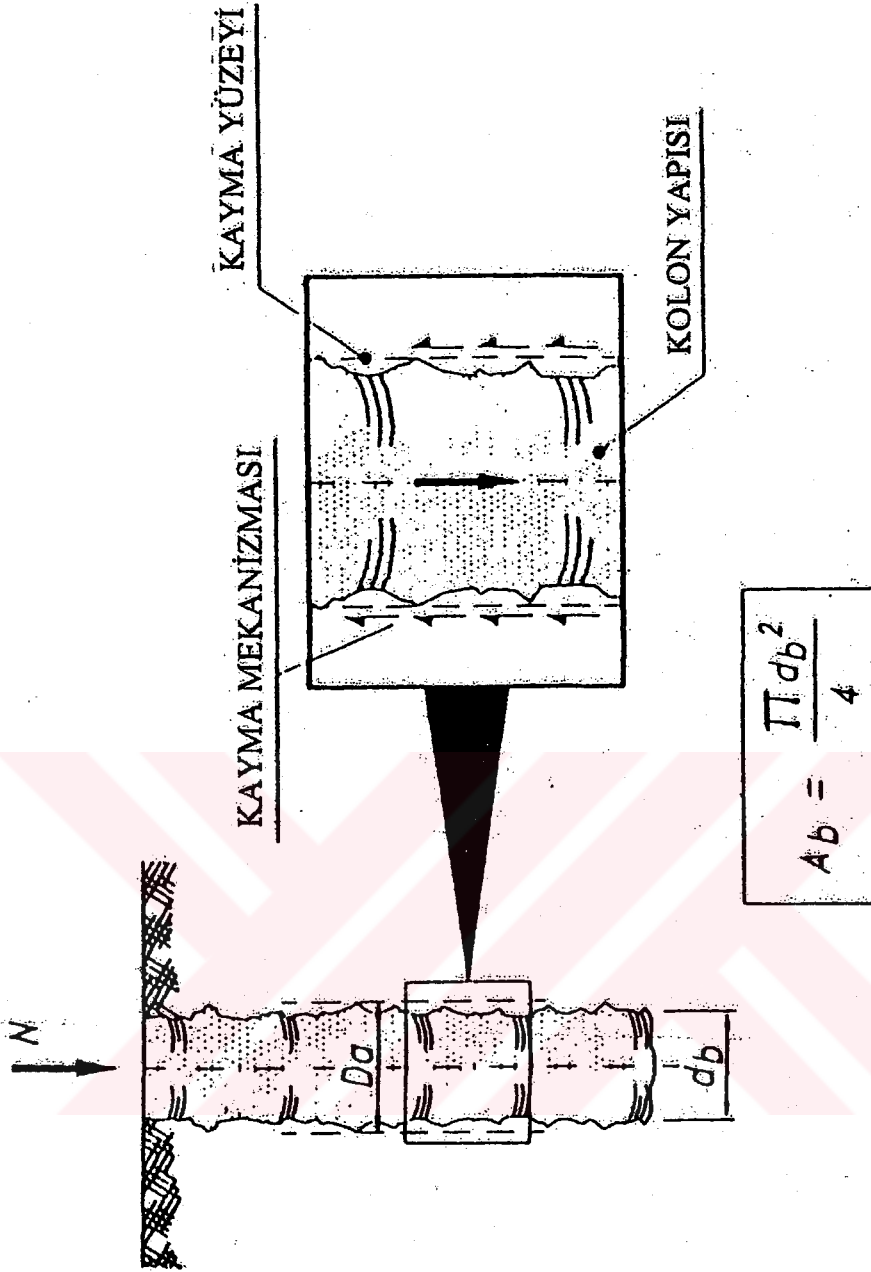
α : Adezyon için azaltma faktörü

c_u : Drenajsız kayma mukavemeti

z : Zemin yüzeyinden itibaren derinlik

ξ : Kolon uç mukavemeti azaltma faktörü

Jet grouting yöntemi sonucunda stabilize kolon çevresindeki zemin az yada çok sıkışmış olabilmekte, diğer taraftan Şekil 4.29'da görüldüğü gibi jet grout kolon kesiti derinlik boyunca üniform olmamaktadır [16].



Şekil 4.29 Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonunun davranışı [16].

Jet grout kolonu çevresinde oluşabilecek muhtemel kayma yüzeyi Şekil 4.30'da verilmektedir.

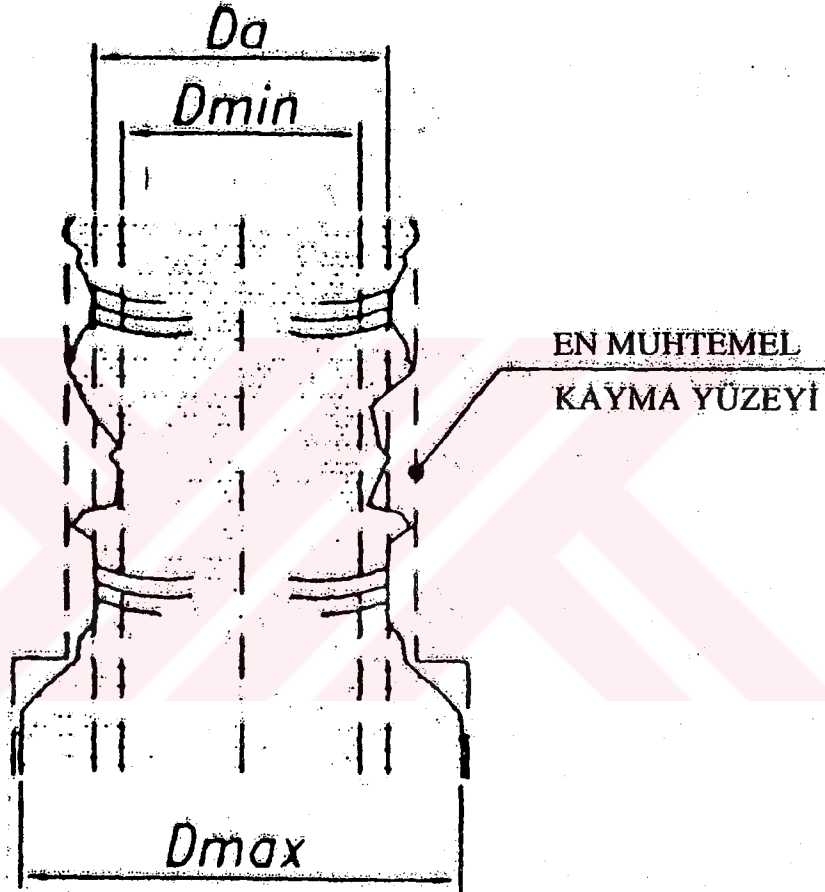
Bu mekanizmadan hareketle aşağıdaki kriterler oluşur [16]:

a) Kohezyonlu zeminlerde $\alpha=1$ (Normal Konsolide Zeminler)

$\alpha=0.45$ (Aşırı Konsolide Zeminler)

b) Granüler zeminler : $K_s > 1$

Kolon ortalama çapının (D_a) güvenlik sınırları içerisinde kalması için dikkatli bir şekilde tayin edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, kayma silindirin gerçek çapı tahmin edilenden daha büyük olmaktadır.



Şekil 4.30 Taşıyıcı eleman olarak teşkil edilen stabilize zemin kolonu çevresinde oluşabilecek olası kayma yüzeyi [16].

Kayma mukavemeti, killi zeminlerde 4MPa'dan, kumlu zeminlerde de 12 MPa'dan daha büyük olarak elde edilebilmektedir. Ön yıkama tekniği ile özellikle killerde daha yüksek değerler elde edilebilmektedir.

Jet grout kolon tasarımında granüler ve kohezyonlu zeminler için kullanılan limit değerler Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’de verilmektedir.

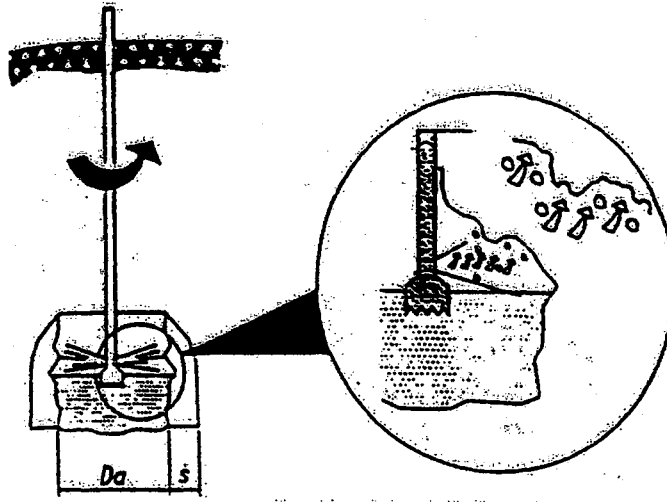
Tablo 4.11 Jet Grout Kolon Tasarımında Granüler Zeminlerde Kullanılan Limit Değerler [16].

Yapılış Tipi	Çeper sürtünmesi için azaltma faktörleri α	Birim çeper sürtünmesi limit değeri τ (kPa)	Uç mukavemeti azaltma faktörleri ξ	Birim uç mukavemeti limit değeri σ (MPa)
Fore kazık	0.6 0.50~0.65	100~200	0.33~0.50	4.5
Çakma kazık (açık uç)	2/3 0.65~0.95	120	0.7~0.8	12
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75 1.0~1.5	120~180	1.0	15
Jet grouting	1.0 1.0~2.0	>180	1.0	Kolon direnci

Tablo 4.12 Jet Grout Kolon Tasarımında Kohezyonlu Zeminlerde Kullanılan Limit Değerler [16].

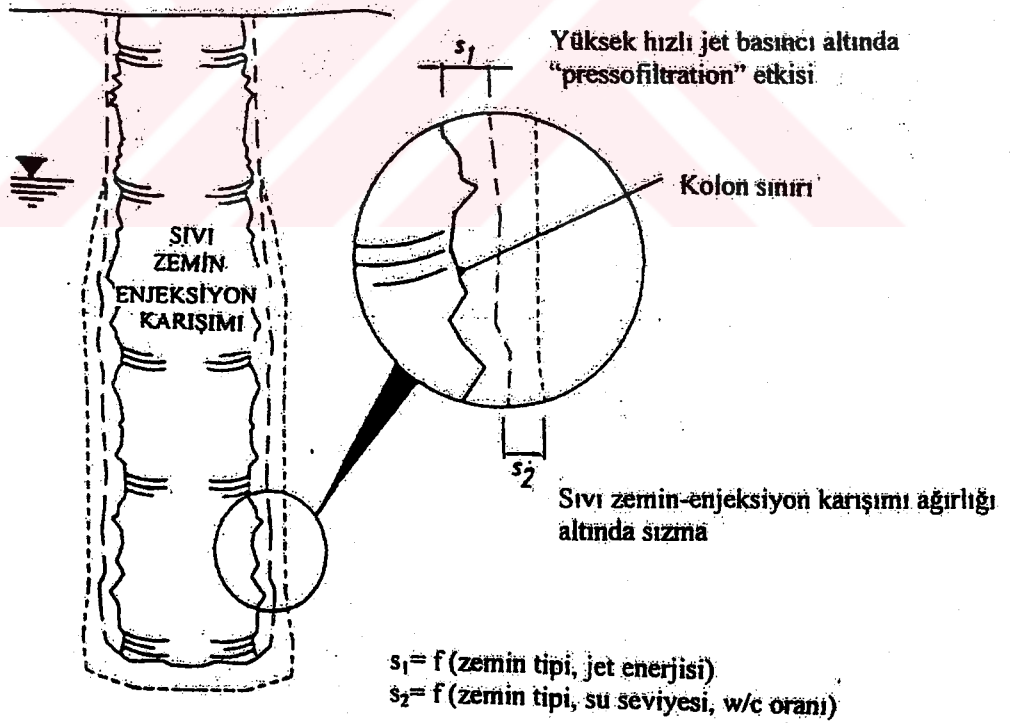
Yapılış Tipi	Çeper sürtünmesi için azaltma faktörleri α	Birim çeper sürtünmesi limit değeri τ (kPa)	Uç mukavemeti azaltma faktörleri ξ	Birim uç mukavemeti limit değeri σ (MPa)
Fore kazık	0.6 0.9	275	0.66	4.00
Çakma kazık (açık uç)(e:dış, i:iç)	0.95e 0.40e 0.80i 0.35i	200	0.70	1.50
Çakma kazık (kapalı uç)	0.75 0.45	200	0.80	5.0
Jet grouting	1.0 0.45	280	1.00	Kolon direnci

Jet grouting uygulamasının mekanizması Şekil 4.30'da verilmektedir.



Da =Zemin-enjeksiyon karışımı tarafından örselenen malzeme yapısı (tamamen ıslah edilmiş)

s = "Pressofiltration" işleminin etkidiği dairevi kısmın kalınlığı



Şekil 4.31 Jet grouting uygulamasının mekanizması [16].

4.9 İyileştirilmiş Zeminin Fiziksel Özellikleri

Jet grouting kolonunun özellikleri enjeksiyon karışımına, kolon yapısındaki çimento miktarına ve uygulanan sisteme bağlıdır [9].

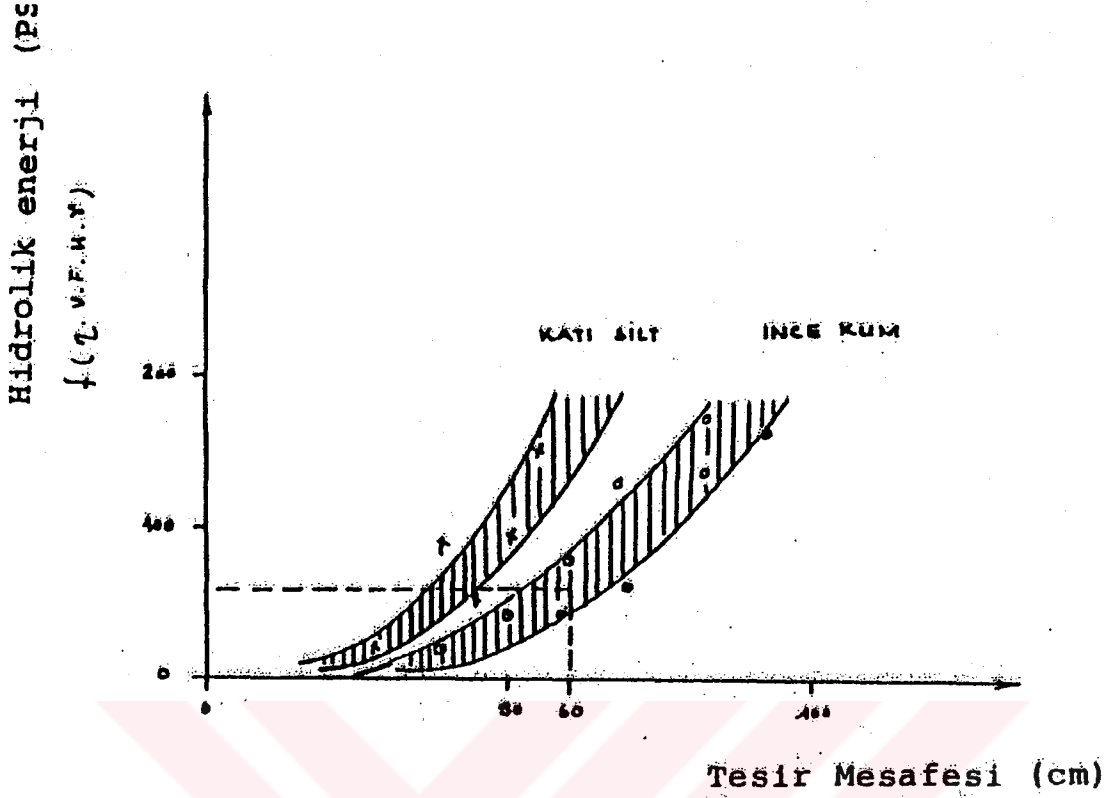
1-Kesici jet tesiri bulunduğu zemin cinsine, zeminin sıklığına, kıvamına, enjeksiyon tijinin devir sayısına, çekme hızına, basınca v.s. bağlı olduğundan (Şekil 3.31) bu parametrelerin uygun kullanılması halinde kumlu zeminlerde 0.6 m. ile 2.0 m. arasında değişik çaplı enjeksiyonlu kolonlar elde edilebilir [1].

2-Enjeksiyon tijini döndürmeden düşey istikamette hareketi ile kalınlığı 12 cm.'den 2 cm.'ye kadar değişen perde duvarları 4 ile 6 m.'ye kadar uzanmaktadır.

3-Jet grout kolonlarından alınan numuneler üzerinde yapılan permeabilite deneyleri sonucu permeabilite katsayısı değişik zemin türleri için Tablo 4.13'de verilmektedir [6].

Tablo 4.13 Zemin Türleri ve Beklenen Permeabilite Katsayısı Değerleri

Siltli Kil-Kil	$10^{-7} - 10^{-9}$ m/s
Killi Silt-Silt	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s
Siltli veya Çakıllı Kum-Kum	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s
Kumlu Çakıl-Çakıl	$10^{-7} - 10^{-10}$ m/s

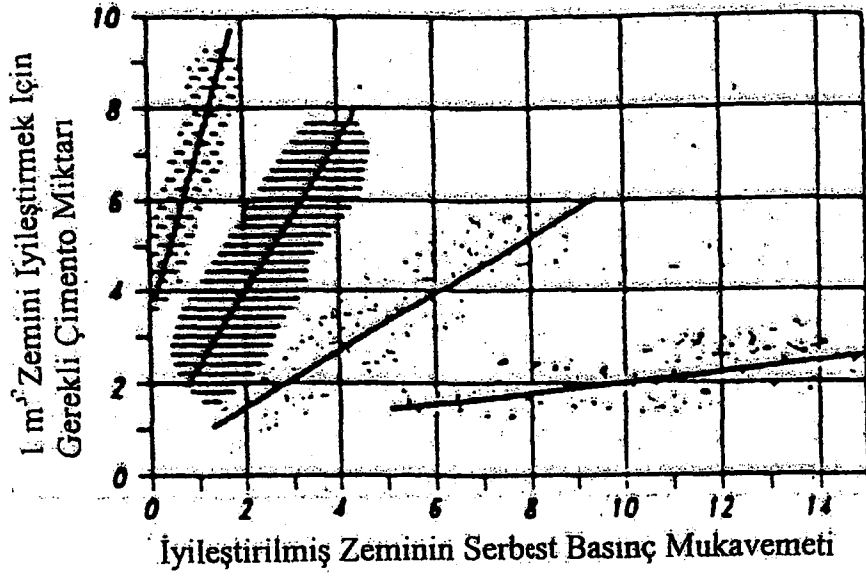


Şekil 4.32 Zemin, püskürtme enerjisi ve tesir mesafesi arasındaki bağıntı [1].

4- Jet grouting yönteminde mevcut zeminin bir kısmı enjekte edilen çimento bulamacı ile karıştığından, sonuç olarak elde edilen malzemenin serbest basınç mukavemeti genel olarak bu zeminin cinsine de bağlıdır. Basınç mukavemeti, kolonlardan alınan karot numuneleri üzerinde laboratuvar da yapılan serbest basınç mukavemeti deneyi ile doğrudan belirlenebilmektedir. İyileştirilmiş zeminin basınç mukavemetindeki artış miktarı Şekil 4.33’de verilmektedir[9].

Yüksek mukavemet değeri su/çimento oranı 0.6 ile 0.8 arasında iken daha düşük mukavemet değeri ise su/çimento oranı 1.0’ın üzerinde iken elde edilmektedir [6].

Jet grouting metodu ile Su/Çimento=1 ve 450 kg/m³ dozajında çimento kullanılarak çeşitli uygulamalarda elde edilen zemin taşıma gücü ortalama değerleri aşağıdaki Tablo 4.14’de verilmektedir [16].



Şekil 4.33 Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi [16]

Tablo 4.14 Çeşitli Uygulamalarda Elde Edilen Zemin Taşıma Gücü Ortalama Değerleri

Organik Zeminler	3 kg/cm ²
Kil	18~30kg/cm ²
Silt	30~45kg/cm ²
Kum	60~90kg/cm ²
Çakıl	100kg/cm ²

Organik zeminlerde m³ başına kullanılan çimento miktarı 450 kg'dan 600~700 kg'a yükseltilebilir. Bunun sebebi organik zeminler içersinde bulunan ve çimentonun bağlayıcı etkilerini azaltan humik asidi nötralize etmektir [16].

Aynı çimento miktarı ve su/çimento oranı ile çift akışkanlı sistem kullanılarak elde edilen kolonların taşıma gücü, tek akışkanlı sistem ile elde edilen kolonların taşıma gücünden %10~15 daha az olmaktadır (basıncılı havanın etkisi).

Aynı dozajlar uygulandığında üç akışkanlı sistem ile elde edilen kolonların taşıma gücü değerlerinden az olması sebebi ise: bu yöntem uygulanırken fazla miktarda su kullanılmasıdır [16].

Enjekte edilen çimento miktarı ve basınç mukavemeti ilişkisi Şekil 4.33'de verilmektedir. Kil zeminde çakıldan daha fazla çimento gerekmektedir. Ancak elde edilen mukavemet kilde daha az olmaktadır [16].

5-Jet grout yönteminin bir başka dolaylı etkisi de ıslah edilen zeminde SPT/N değerlerinin doğal zemin şartlarında elde edilen SPT/N değerlerinden % 20~25 oranında fazla olmasıdır. Bu yöntemde, diğer enjeksiyon yöntemlerinin tersine, yüksek basınçla enjeksiyon yapılmasına rağmen yalnızca ıslah edilen hacim içerisinde 0.5~1.0 bar mertebesinde bir basınç artışı meydana gelmektedir.

4.9.1. Jet Grout Elemanlarının Basınç Mukavemeti

Birçok jet grouting uygulaması yapısal enjeksiyon işlevi görmektedir. Bu sebeple jet grout elemanının mekanik özellikleri büyük önem taşımaktadır. Zemin cinsi ve enjeksiyon karışımının özellikleri, oluşturulan elemanın basınç mukavemetini, diğer mekanik özelliklerini, uygun imalat işlemini ve parametrelerini belirleyen en önemli iki faktördür. Tablo 4.15, gerçekleştirilmiş olan bazı uygulamaların kayıtları derlenerek çeşitli zeminlerde farklı iki su/çimento (W/C) oranında kolon tipi elemanlarda erişebilecek tek eksenli basınç mukavemeti değerleri hakkında bilgi vermek amacı ile oluşturulmuştur.

Tablo 4.15 Jet grout uygulanmış zeminlerin basınç mukavemeti (MPa) [9]

Enjeksiyon Karışım	Çakıl 1	Kum 2	Silt 3	Organik Zemin 4	Kumlu Çakıl 5	Siltli Kum 6	Killi Silt 7
W/C=0.67	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	12~18	10~14	6~10
W/C=1.0	≤ 20	≤ 15	≤ 12	≤ 3	6~10	5~7	3~5

Görüldüğü gibi 1'den 4'e kadar olan zeminlerde oluşturulan kolonların basınç mukavemetleri 5, 6 ve 7 zeminlerinden bir miktar daha yüksektir. İlk üç zeminin iyi derecelenmiş , 5, 6 ve 7 zeminlerinin kötü derecelenmiş zeminler olması bunun sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum beton üretiminde kullanılan agreganın derecelenmesinin mukavemete olan etkisi ile aynı mantığı taşımaktadır.

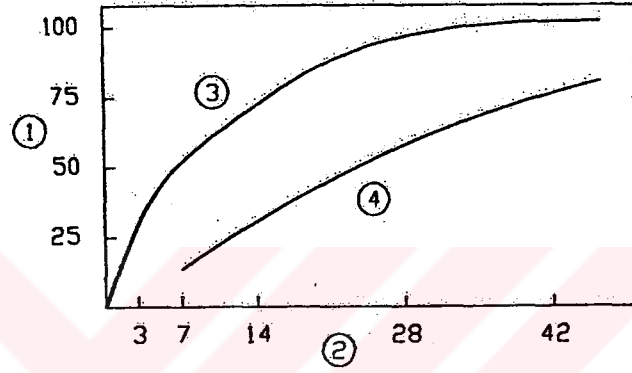
Bir jet grout kolonda mukavemetin merkezden kenara doğru % 30 oranında azaldığı, yapılmış olan çeşitli elemanlar sonucunda belirlenmiştir. Eğer jet grouting uygulaması sırasında zeminin iskeletinde ciddi bir kırılma meydana gelirse kolon oluşturulamaz. Bu tip bir kırılma, artık malzemenin yüzeye transferi bir şekilde engellenmiş ise meydana gelir. Dolayısıyla jet grout kolondan beklenen tüm mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için, artık malzemenin kesintisiz bir akım ile yüzeye ulaşması sağlanmalıdır.

Temel takviyesi gibi stabilizasyon uygulamalarında 10 MPa ve daha yüksek mukavemet değerleri hedeflenmektedir ve bu değerlere organik zeminler hariç, her tür zemin cinsinde ulaşılabilir. Ayrıca jet grouting yöntemi ile 1.5 m. kalınlığa kadar olan bir ara organik zemin tabakası tamamen aşındırılarak enjeksiyon ile yer değiştirebilir. Bu tip temel takviyesi uygulamalarında organik zemin tabakasının kalınlığı 1.5 m.'yi geçiyor ise bu durumda jet grouting yönteminden vazgeçilerek kazıklar, beton elemanlar gibi farklı uygulamalar yapılmalıdır.

Jet grout uygulanmış kohezyonsuz zeminlerdeki mukavemet artışı, çimento harçlarının mukavemet artışına benzemektedir. Kohezyonlu zeminlerdeki mukavemet artışının daha az ve yavaş oluşunun sebepleri; boşluk suyunun bir miktarının uzaklaştırılamaması, su jetinden çıkan suyun bir miktarının ortamda kalması ve enjeksiyonun içerdiği suyun fazlasının ortamda kalması olarak sıralanabilir.

Jet grout elemanların mukavemetinin zamanla değişimi Şekil 4.34'de gösterilmiştir.

Jet grout elemanlarda çimento karışımın oranı, elemanın basınç mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bu orana ilişkin bilgiler oluşan elemanın birim hacim ağırlığından ve imalat sırasında yüzeye çıkan artık malzemedan elde edilebilir. Genellikle zeminin birim hacim ağırlığı, enjeksiyon karışımınıninkinden büyüktür. Dolayısıyla elemanın %100'ü enjeksiyon karışımı değilse, ölçülen birim hacim ağırlık; enjeksiyon karışımınıninkinden büyük olmaktadır.



- 1 Basınç Mukavemeti
(nihai mukavemetinin %'si olarak)
- 2 Geçen süre (gün)
- 3 Kohezyonsuz zeminler
- 4 Kohezyonlu zeminler

Şekil 4.34 Jet grout elemanların basınç mukavemetlerinin zamanla değişimi [9]

Oluşturulan homojen elemanın mukavemeti enjeksiyon karışımının oranına bağlıdır. Kohezyonsuz zeminlerde, enjeksiyon karışımının oranı ile mukavemet doğrusal bir ilişki göstermektedir. Kohezyonsuz zeminlerde, enjeksiyon karışımının oranı %50 olan elemanın mukavemeti, saf karışımın mukavemetinin %50'si kadar olmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde ise, kohezyonsuz zeminlere göre mukavemette bir düşüş olmaktadır.

Elemandaki enjeksiyon karışımının oranı %80 olması durumunda mukavemet saf karışımın %40'ı kadar, karışım oranının %30 olması durumunda ise mukavemet saf karışımın %10'u kadar olmaktadır.

Maliyetlerin uygun seviyelerde tutulabilmesi için, kohezyonsuz zeminlerde optimum mukavemet sadece zemin boşluklarının enjeksiyon ile doldurulması ile elde edilebilmektedir. Bu da oluşturulan elemandaki enjeksiyon oranının %25~30 dolaylarında olmasına karşılık gelmektedir. Bu oranlarda bir imalatın yapılması ve saf enjeksiyon mukavemetinin 50 MPa olması ($W/C < 0.8$) durumunda oluşturulan elemanın 12~16MPa dolaylarında mukavemet değerlerine erişebileceği deneylerle belirlenmiştir ki bu mukavemet değerleri genel temel takviyesi uygulamaları için yeterlidir. Söz konusu zeminlerde, zeminin doğal durumdaki birim hacim ağırlığının 20 kN/m^3 , su/çimento (W/C) oranı % 67 olan prizi bitmiş enjeksiyon karışımının birim hacim ağırlığının 16.7 kN/m^3 olduğu durumda oluşan elemanın birim hacim ağırlığı $\sim 19 \text{ kN/m}^3$ gibi bir değer alacaktır. Bu tip zeminlerde yapılan uygulamalarda, zeminlerin sahip oldukları farklı boşluk oranları sebebi ile iyileştirilmiş zeminin birim hacim ağırlığının $18\sim 21 \text{ kN/m}^3$ arasında değerler alacağı yolunda bir genelleme yapılabilir [23].

Yüzeye çıkan artık malzemenin gözlenmesi, jet akım hızının kontrolü yanı sıra oluşan elemanın kalitesi ve geometrisinin kontrolü açısından da önemlidir. Jet grouting imalatında kalite parametrelerinden birisi elemanın homojenliğidir. Diğer taraftan homojenlik; zeminin homojenliği, tabakalanma durumu ve uygulanan imalat işlemi gibi faktörlerden etkilenir ve pratikte tüm detay ve parametrelerin o koşullara tam olarak uydurulması mümkün değildir.

Zemindeki tabakalanma, jet grout elemanların mukavemeti üzerinde etkilidir. Yapılan bir çalışmada, geri çekme hızında bir ayarlama yapılmadan kumlu çakıl tabakadan silt tabakaya geçilmesi durumunda, jet grout eleman boyutunun (kesit alanı) 3'den 1'e düştüğü görülmüştür. Geri çekme hızında 10 cm/dak ve jet akım miktarının 200 lt/dak olması durumunda, oluşturulan jet grout eleman kumlu çakıl tabakada 2.65 m çapında (karışım oranı=%36), silt tabakada ise 1.6 m çapında oluşmuştur. Bu durumda oluşan eleman homojen olmamakta, çakıl tabakadaki bölümün mukavemeti, silt tabakadakinden %30~40 oranında yüksek olmaktadır.

Geri çekme hızının çakıl tabakada 40~50 cm/dak'ya çıkartılması durumunda iki farklı tabakada ki mukavemetler yaklaşık olarak eşit olmakta ancak elde edilen bu mukavemet 5 MPa (yada priz yapmış saf karışımın %10'u) gibi düşük bir seviyede kalmaktadır [23].

Oluşturulan jet grout elemanın homojen olmamasına yol açan bir diğer sebep ise zeminde boyutu 60 mm.'yi geçen iri çakıl ve blokların bulunmasıdır. Çünkü kullanılan jetin gücü, bu boyuttaki danelerin arkasında kalan zemini aşındırmaya ve enjeksiyon ile karıştırmaya (daneyi yerinden oynatamaması sebebi ile) yetmez.

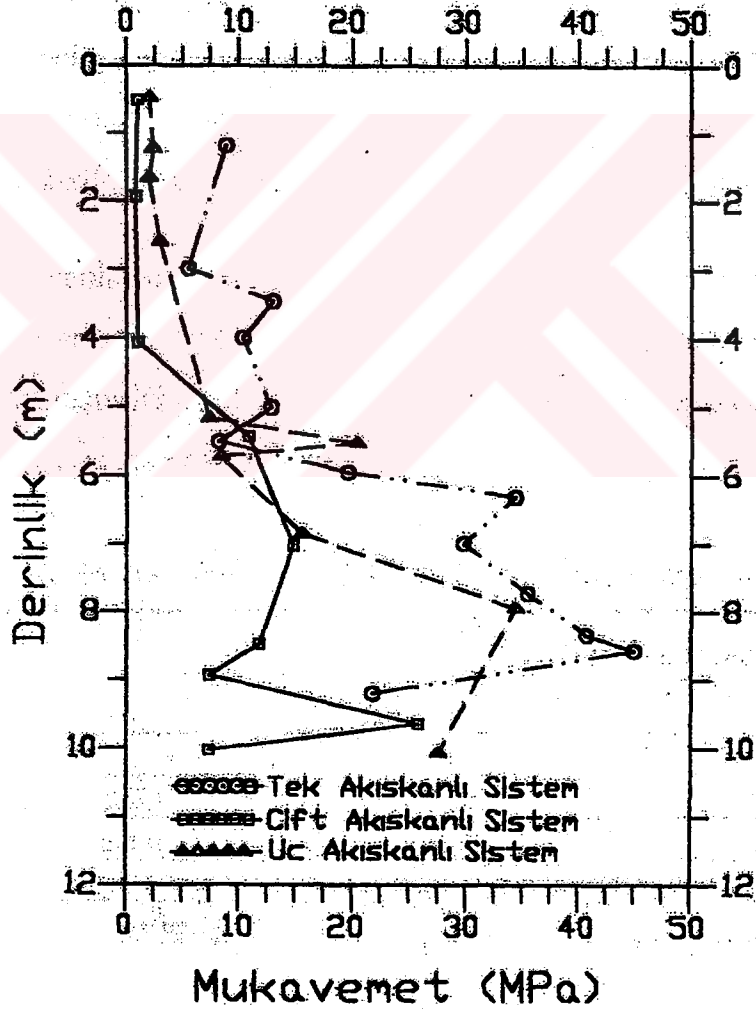
Milano yakınlarındaki Casamailco deneme sahasında Rodio tarafından yapılan jet grout elemanların mukavemetlerinin çeşitli faktörlere bağlı olarak değişimini inceleyen testler konu edilmiştir. Jet grout elemanların mukavemetlerindeki değişim, farklı jet grout yöntemlerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Üç farklı kumlu zeminin bulunduğu bu test sahasında ilk dört metrede düşük plastisiteli silt (ML) ve altta ise siltli ince kum bulunmaktadır. Altı metrenin altında ise daha az silt içeren (%20 silt, %5~50çakıl) kumlu bir zemin bulunmaktadır.

Jet grout elemanların mukavemetlerinin tek akışkanlı, çift akışkanlı ve üç akışkanlı sistemlerin kullanımı ile değişimi incelenmiştir. Değerlendirme için, yapılan enjeksiyon miktarı ile oluşan elemanın kesiti arasındaki oranı yaklaşık eşit olan elemanlar seçilmiştir.

Tek, çift ve üç akışkanlı sistemler ile oluşturulan jet grout elemanların çapları aynı sıra ile yaklaşık 0.8 m., 2.0 m. ve 2.2 m., yapılan enjeksiyon miktarları ise 200 kg/m, 1000kg/m ve 1000kg/m olarak gerçekleşmiştir. Dolayısıyla oluşturulan her metre küp jet grout eleman için yapılan enjeksiyon miktarı her üç yöntemde de yaklaşık 395 kg/m³ olmuştur. Jet grout elemanların mukavemetleri ise 220~240 günlükken ölçülmüştür.

Jet grout elemanların tek eksenli basınç mukavemetlerinin derinlik ile değişimini gösteren grafik Şekil 4.35'de verilmiştir.

Açıkça görülmektedir ki en yüksek mukavemet değerleri tek akışkanlı sistem ile elde edilmiştir. İlk dört metrelik zayıf zeminde iki ve üç akışkanlı yöntem ile 25 kg/cm^2 ve daha düşük mukavemetler, tek akışkanlı yöntem ile ise $50\sim 125 \text{ kg/cm}^2$ gibi yüksek mukavemetler elde edilmiştir. 4 ile 6m. arasındaki tabakada en yüksek 225 kg/cm^2 gibi bir mukavemet değerine üç akışkanlı sistem ile (çakıl oranının yüksekliği sebebi ile) ulaşılmıştır. 6m.'den aşağıdaki tabakalarda ise yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmış, özellikle tek akışkanlı yöntem ile 400 kg/cm^2 'lik mukavemet değerine (beton mukavemetine yakın) ulaşılmıştır. Bu bölümde üç akışkanlı sistem ile $150\sim 300 \text{ kg/cm}^2$, iki akışkanlı sistem ile ise $75\sim 150 \text{ kg/cm}^2$ 'lik mukavemet değerleri elde edilmiştir [18].



Şekil 4.35 Üç jet grouting yöntemi ile oluşturulan elemanların mukavemetleri [18]

4.9.2 Jet Grout Elemanların Permeabilitesi

Permeabilite esasen zeminin cinsine, enjeksiyon karışımının özelliklerine ve zemin ile enjeksiyonun karışım oranına bağlıdır. Bugüne kadar yapılmış olan uygulama ve testler, elde edilebilecek permeabilite değerlerinin $k \leq 10^{-8}$ m/s mertebelerinde olduğunu göstermektedir. Toth (1989) tarafından yapılan bir araştırma sonucunda, jet grout uygulanmış kum zeminde permeabilite değerlerinin $3 \times 10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s olduğu görülmüştür ki testin yapıldığı bu kum zeminin doğal permeabilitesinin 2×10^{-4} m/s ve üniformalık katsayısının (c_u) ise 1.5 (kötü derecelenmiş) olduğu da belirtilmiştir [4]. Permeabilitenin düşük olması için elemandan alınan numunenin birim hacim ağırlığının yüksek olması gerekmektedir. Yapılan testlerde 70 günlük numuneler kullanılmış ve $i=100$ değerinde hidrolik eğim uygulanmıştır.

Baumann (1984) tarafından yapılan bir diğer araştırma ise, $i=300$ 'lük bir hidrolik eğim değerinde elemanların permeabilitelerinde 180 gün süresince düşüş gözlenmiştir. Özellikle atık sahalarının geçirimsizliğinin sağlanmasında uygulanan çimento kil karışumlu enjeksiyonlar ile jet grouting uygulamalarında $10^{-11} \sim 10^{-9}$ m/s mertebelerinde permeabilite değerlerine ulaşılabilir. Jet grouting uygulaması yapılan kohezyonlu zeminlerde de $k \leq 10^{-8}$ m/s'lik permeabiliteye ulaşılabilir [9].

Jet grouting uygulaması yapılmış ve yapılmamış zeminlerin özelliklerinin karşılaştırılarak yöntemin meydana getirdiği iyileştirmenin gözler önüne serilmesi amacıyla birçok araştırma yapılmıştır. Mitchell (1981) tarafından yapılan çalışma da böyle bir çalışmadır ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.16'da özetlenmiştir.

Tablo 4.16 Doğal ve iyileştirilmiş zemin özellikleri [14]

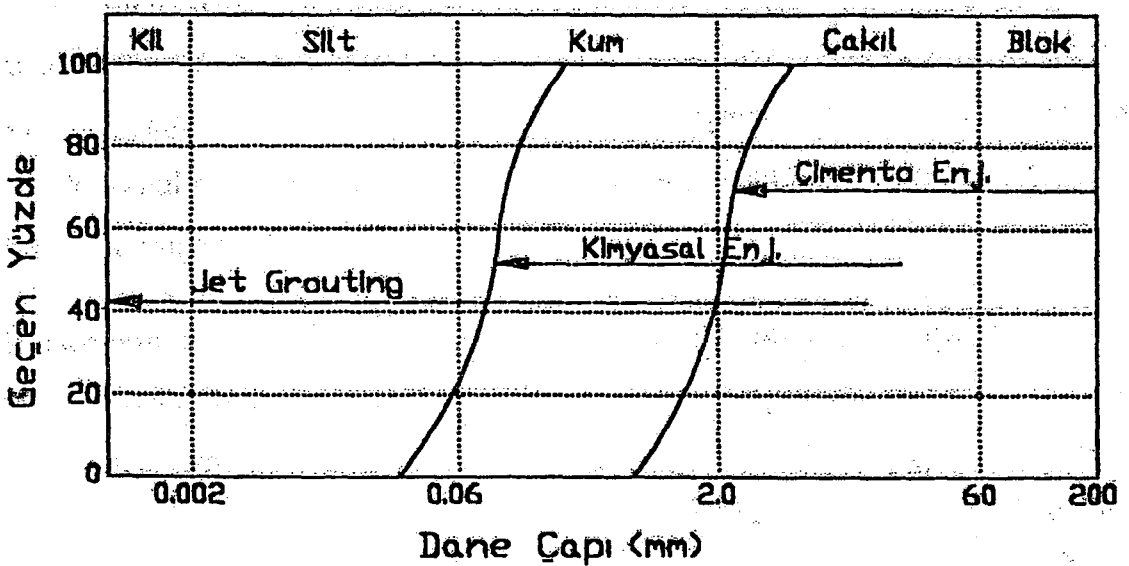
Özellik	Jet grouting Uygulanmamış kum zemin	Jet grouting uygulanmış kum zemin
SPT-N	20	100 +
CPT q_n (kg/cm ²)	125	500 +
Kayma dalgası hızı (m/s)	200	1000
Sukunetteki toprak basıncı kats. (K_o)	0.45	3.3
Tek Eksenli Basıncı Mukavemeti (KPa)	-	1500
Kohezyon (KPa)	0	580
Sürtünme açısı (°)	39.5	39.5
Plaka yükleme testi modülü (MPa)	14	1000
Pressiyometre modülü (MPa)	13	150
Pressiyometre limit basıncı (MPa)	2.5	10+
Permeabilite katsayısı (m/s)	2×10^{-5}	8×10^{-7}

4.10 Uygulamada Jet Grouting

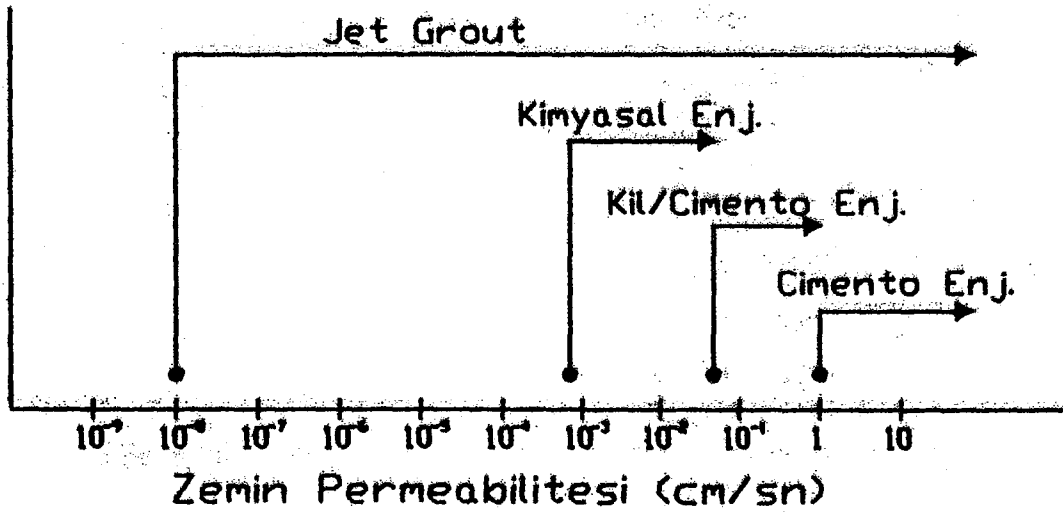
4.10.1 Jet Grout Yönteminin Uygulandığı Ortamlar

Jet grouting yönteminin uygulandığı ortamlar temel olarak uygulamanın yapılacağı zeminin (kesme yapılacak zemin) mukavemeti ile sınırlıdır. Klasik enjeksiyon yöntemleri ile jet grouting yönteminin en önemli farklarından birisi de budur. Klasik enjeksiyon yöntemlerinde uygulanabilirlik, boşlukların ve çatlakların boyutuna bağlıdır. Ancak bu durumun jet grouting yönteminde herhangi bir kısıtlayıcı etkisi yoktur.

Daha öncede belirtildiği gibi jet grouting yönteminde uygulanan yüksek basınçlar ve elde edilen yüksek aşındırma enerjisi, zeminin dane dağılımı özelliklerine ve permeabilitesine bağlı olmadan yöntemin hemen hemen her tür zeminde uygulanabilmesini sağlamaktadır. Jet grouting yönteminde uygulanan yüksek basınçlar ile pratikte tüm zeminlerin aşındırılabilceği kabul edilmektedir. Welsh ve diğerleri (1986), jet grouting yönteminin zeminin dane çapı ve permeabilitesine bağlı olarak uygulanabilirliğini gösteren ve klasik enjeksiyon yöntemleri ile kıyaslayan bir çalışma yapmış ve fiilen tüm zeminlerin jet grouting yöntemi ile iyileştirmeye tabi tutulabileceği sonucunu ortaya koymuştur. Söz konusu çalışmaya ait sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.36 Dane çapına bağlı olarak enjeksiyon uygulanabilirliği



Şekil 4.37 Permeabiliteye bağlı enjeksiyon uygulanabilirliği [21]

Standart penetrasyon deneylerinden (SPT) elde edilen sonuçlar da zeminlerin mukavemetleri ve dolayısıyla jet grouting yönteminin uygulanabilirliği hakkında bilgi vermektedir. Tablo 4.17’de tek, çift ve üç akışkanlı sistemlerin farklı zemin cinslerinde SPT-N değerlerine bağlı olarak uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Tablo 4.17 Jet grouting yönteminde uygulanabilirlik [31]

	Tek akışkanlı sistem	Çift akışkanlı sistem	Üç akışkanlı sistem
Kohezyonlu zeminler	N<10	N<5	N<10
Kohezyonsuz zeminler	N<15 (kum)	N<50 (kum&çakıl)	N<50 (kum)

Zeminin ve zayıf kayanın cinsine bağlı olarak ortamın mukavemetini yansıtan en önemli parametrelerden birisi, kohezyonlu zeminlerdeki kohezyon değeridir. Kohezyonlu zeminlerde mukavemeti kohezyon belirler. Plastisite indisi ve kıvam arttıkça, kohezyon da artar.

Jet grouting yönteminin uygulanabilmesi için sınır değerlerin yaklaşık olarak 40 Kpa'lık drenajsız kohezyon değeri ve %40'lık likit limit değeri olduğu kabul edilmektedir. Kohezyonu çok yüksek zeminlerde kesme genişliğinin 2~5 mm.'yi aşmadığı durumlar olabilmektedir.

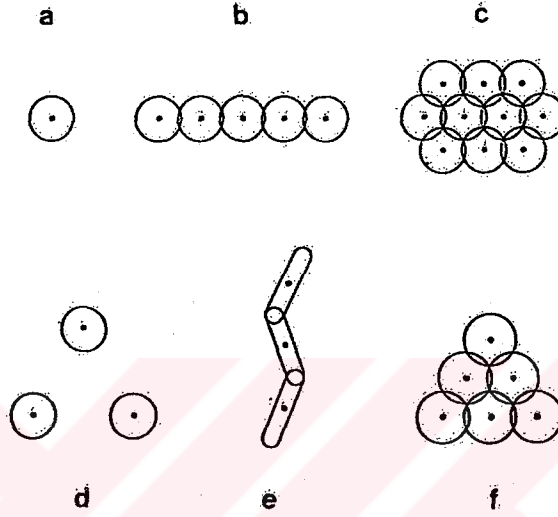
Kohezyonsuz zeminlerde ise mukavemeti sıklık belirler. Uygulamada sıklıkları yüksek olan kum ve çakıl zeminlerde jet grouting yöntemi başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Tecrübeler göstermiştir ki, çakıllı zeminlerde jet grouting yönteminin uygulanabilir olması için en büyük dane çapının 60 mm.'yi geçmemesidir. Büyük boyutlu çakıl, blok ve taşların kullanılan jet ile yerinden oynatılıp yüzeydeki halka biçimli boşluktan dışarı alınması mümkün değildir. Bu tip zemin koşullarında problem, zemin yapısının değiştirilerek işlemin yapılmasından boşlukların karışım ile doldurulmasına dönüşmektedir ki bu durumda klasik enjeksiyon yöntemlerinin kullanılması tercih edilmektedir. Klasik enjeksiyon yöntemlerinin uygulanmadığı kohezyonlu (ince daneli) zeminlerde de bu tip bir iyileştirme yapılması jet grouting yöntemi ile mümkün olmaktadır. Sonuç olarak klasik enjeksiyon yöntemlerine jet grouting yönteminin de eklenmesi ile bütün zemin cinslerinde enjeksiyon uygulanabilir olmaktadır [9].

Kaya ortamlarda ise jetlerin uyguladığı aşındırma kuvvetlerine ortamın basınç mukavemeti karşı koymaktadır. Ancak Almanya'a yapılan (1985) bir uygulamada sıkıştırılmış hava jeti ile yastıklanan su jeti kullanılarak Kumtaşı aşındırılıp jet grouting uygulanmıştır. Bu uygulama ile ilgili kayıta ortamın basınç mukavemetinin 8 MPa olduğu belirtilmiştir. İmalatta izlenen prosedür ise çatlaklardaki birikimlerin aşındırılıp bu bölgelerin enjeksiyon ile doldurulması olmuştur.

Kohezyonlu zeminlerde jet grouting uygulamalarını kısıtlayan bir diğer faktör de ekonomidir. Bu tip zeminlerde iletim hızının düşük olması sebebi ile jet grout elemanın oluşturulma süresi artmaktadır.

4.10.2 Delgi Noktalarının Düzenlenmesi

Stabilizasyon ve özellikle sızdırmazlık amaçlı uygulamalarda jet grout elemanların bütün bir yapı oluşturabilmesi için, kilitlenecek şekilde imal edilmesi gerekmektedir. Bu da delgi noktalarının uygun şekilde belirlenmesi ile olur. Delgi noktalarına ait tipik düzenlemem şekilleri Şekil 4.38’de görülmektedir.



a Tek kolon, b Kilitlenen kolonlarla dayanma yapısı, c Kilitlenen kolonlarla temel takviyesi, d Zemin iyileştirilmesi için tekil kolonlar, e Kilitlenen panellerle sızdırmazlık yapısı, f Kilitlenen kolonlarla yatay sızdırmazlık yapısı

Şekil 4.38 Farklı jet grout yapıları için delgi noktalarının düzenlenmesi [9]

Kayalarda çatlaklardaki birikmiş malzemenin aşındırılıp bu bölgeden enjeksiyon ile doldurulması şeklinde yapılan uygulamanın bir benzeri Şekil 4.38-e’de görülmektedir. Klasik enjeksiyon yöntemi ile kaya ortamda delgi sayısı, çatlakların atlanmasını riskini önlemek amacı ile çok artmakta, bu durumda maliyetleri kabartmaktadır. Ancak jet grouting yönteminde uygulanan basınçlar sayesinde delgi sayısı azaltılıp delgi aralıkları arttırılmakta ve böylece maliyetler makul seviyelerde tutulabilmektedir.

4.11 Uygulamanın Başarısını Belirleyen Değişkenler

İmal edilen jet grout kolonların ve iyileştirilen zeminin istenilen proje kriterlerini sağlaması için yapılan uygulamanın kontrolü çok önemlidir. Kalite kontrol, uygulamanın başarısını belirlemektedir [6].

Jet grouting yönteminin değişik zeminlerdeki fizibilitesi ve yapı temellerinin stabilizasyonuna uygunluğunu belirlemek için deneme sahası önerilmektedir. Deneme sahaları, arazi deneylerinin jet grouting uygulaması için gerekli verilerin elde edilmesinde yeterli olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Deneme sahasında oluşturulan jet grouting kolonlar üzerinde yapılan kontrol ve deney sonuçlarına göre söz konusu sahada sistematik olarak jet grouting uygulaması gerçekleştirilir. Deneme sahaları, farklı deneylerin uygulanması amacı ile bölümlere ayrılabilir. Bu bölümlerde yapım prosedürünün teşkili ve kontrolüne yönelik deneyler gerçekleştirilirken, bazı bölümlerde de çekme ve yükleme deneyleri gerçekleştirilebilir [41]. Deneme sahasının amacı, projenin büyüklüğü ve/veya karmaşıklığı ve çalışma parametrelerinin önceden belirlenmesindeki zorluklara bağlı olarak gözlemler ve deneyler yapılmasıdır.

Çok geniş bir kullanım alanı olan jet grout yönteminin uygulanmasında, başlıca dört değişken önemlidir:

- a. zemin cinsi ve zemin özellikleri,
- b. püskürtülen harcın özellikleri,
- c. püskürtme basıncı,
- d. ağızlıkların yer aldığı delgi borusunun dönme ve yukarı çekilme hızları.

İmal edilen jet grout kolonlarının yeterli olup olmadıklarına, belirli değişkenlerin değerlerinin ölçülmesi ile karar verilmektedir. Bu değişkenler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir [13].

1. Zemin/çimento karışımının kalitesi,
2. Yapılmış kolonun bütünlüğü ve boyu,
3. Kolonun çapı,
4. Kolonun geçirimsizliği,
5. Zemin/çimento karışımının mukavemeti,
6. Kolonun taşıma gücüdür.

4.11.1 Zemin-Çimento Karışımının Kalitesi

İmal edilmiş jet grout kolonundan Şekil 3.38'deki gibi alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerle birim hacim ağırlığı belirlenir [42]. Pratikte, zemin-çimento karışımının birim hacim ağırlığı, 16-22 kN/m³ arasında değişmektedir.

Jet grout kolonlarının yapımında kullanılacak çimento yeteri kadar ince daneli olmalı, "blain" değeri 3000 cm²/gr'dan daha büyük olmalıdır. Çimento/su oranının ağırlıkça 1/1 olması yeterlidir.

Bazı zeminlerde harcın kasma niteliklerinin uygun duruma getirilmesi gerekir. Zeminin gereğinden fazla harca gereksinim gösterdiği bu gibi durumlarda harcın içine bentonit veya taş tozu katılır [13].

4.11.2 Yapılmış Kolonların Bütünlüğü ve Boyu

Kolonun malzeme kalitesini belirlemek amacı ile kolondan sürekli karot alınması, jet grout kolonunun boyunun ve bütünlüğünün belirlenmesinde yararlı olur. Bu amaçla, yapımından 28 gün geçtikten sonra denetlenecek kolonun alt ucundan 0.5 m. kalana kadar sürekli karot alınır.

Öte yandan, jet grout kolonlarının boylarının belirlenmesinde "tahribatsız muayene metotları"ndan yararlanılabilir. Bunların uygulanması kolay, ucuz ve hızlıdır. "Integrity test", kolon tepesinden başlayarak kesitteki düzensizliği ortaya çıkarabilir. Eğer kolonda böyle bir düzensizlik bulunmuyor ise kolon boyu da bu yöntemle belirlenebilir.

Integrity test, bir şok dalgasının kolon içersinde yayılması esasına dayanmaktadır. Bu deneyin sonuçlarını yorumlarken; zemin-çimento malzemesinin özelliği, kolonun geometrisi, zemin ile kolon arasındaki yüzey ve zemin koşulları hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Karot alınarak denetlenen kolonların uzun eksenı boyunca açılan delikler daha sonra betonlanarak kapatılmalıdır (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 Jet grout kolonundan karot alınması

4.11.3 Kolonun Çapı

Jet grout (Harç püskürtme) uygulamasında üzerinde en çok durulan özellik, jet grout kolonlarının çapı olmaktadır. Kolon çapı, püskürtme enerjisine doğrudan bağlı görülse de zeminin davranışını tahmin etmek o kadar kolay değildir.

Püskürme enerjisi (E) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$(E) = (p.Q)/L \quad (4.28)$$

formülde;

p (MPa) : püskürtülen enjeksiyonun basıncı

Q (m³/sn) : enjeksiyonun debisi

L (m/sn) : püskürtme ağzının yukarı çekilme hızı

Herhangi bir arazide yapılan uygulamada, uygulanacak maksimum basınç en az üç deney yapılarak belirlenmelidir. Basınç gereğinden daha büyük olursa atık miktarı fazla olur ve zeminin kabarması kontrol edilemez. Ayrıca anı deneylerde uygun enjeksiyon debisi, tijin yukarı çekiliş hızı ve kendi etrafında dönme hızının uygun değerleri belirlenmelidir.

Meydana gelen kolonların çap ve mekanik özellikleri 4 ana faktöre bağlıdır:

- Püskürtme deliği (nozzle) boyutu ve şekli,
- Zemin cinsi ve özellikleri,
- Enjeksiyonun bileşimi,
- Püskürtme basıncı,
- Tijin dönme ve yukarı çekilme hızı.

Zeminin kolon yapımı bakımından önemli özellikleri, dane çapı dağılımı, serbest basınç direnci, su muhtevası ve kıvam limitleridir.

Jet grout kolonlarının çapları genellikle 0.40 m. ile 0.80 m. arasında olur, çap üçlü jet tekniği kullanılarak 2.00 m.'ye kadar artırılabilir.

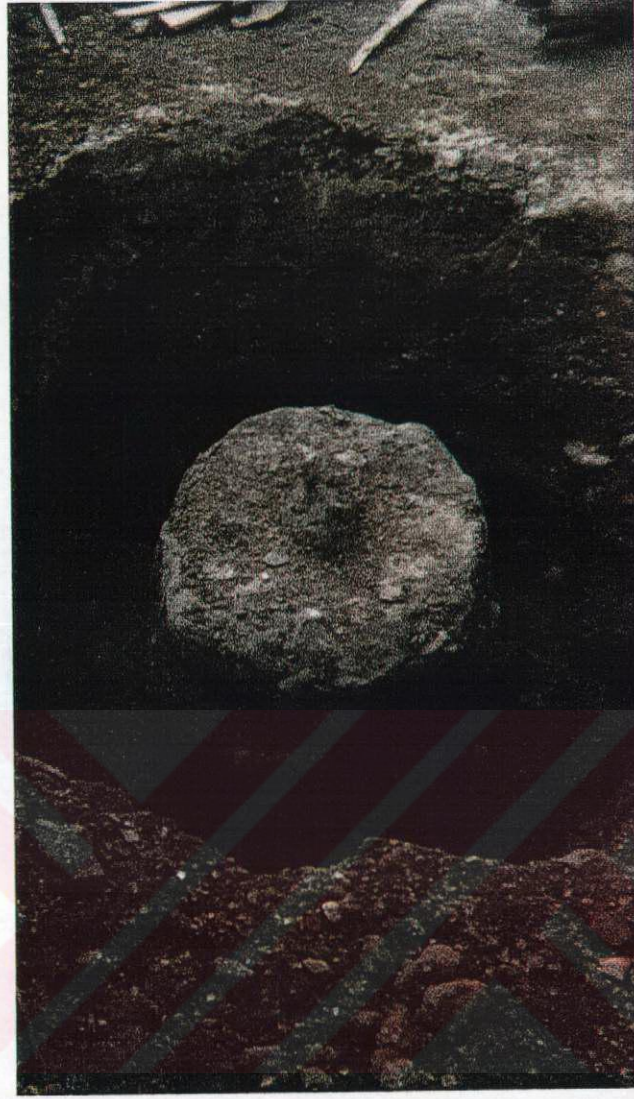
Kolon çapının denetimi, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de görüldüğü gibi deneme kolonları kazılarak kolonun ortaya çıkarılması ile yapılır.

Jet grout kolonları yapılırken kolonlar çevresinde s^2 gibi bir alanda zemin, artan basınç nedeni ile sıkışır. Yanal basınç artımı bir süre sonra krip ve diğer nedenlerle bir miktar azalsa da zeminin birim hacim ağırlığındaki ve yanal gerilmesindeki kalıcı artış, kolon/zemin sürtünmesini, başlangıç değerinin üstüne çıkarır. Kolon çevresinde kolon yarıçapı kadar uzaklıktaki zeminde bu sıkışmanın etkisi özellikle görülür. Sıkışmanın etkisi, kolon yapımından önce ve sonra yapılacak pressiometre ve CPT deneyleri ile belirlenebilir.

Kontrolsüz olarak yapılmış dolguların “jet grout” tekniği ile iyileştirilmesinde dolgunun ne kadar sıkıştırıldığının yüzeysel dalgalar ve gama ışını absorpsiyonu gibi jeofizik yöntemler ile belirlenmektedir.

4.11.4 Kolon Geçirimsizliği

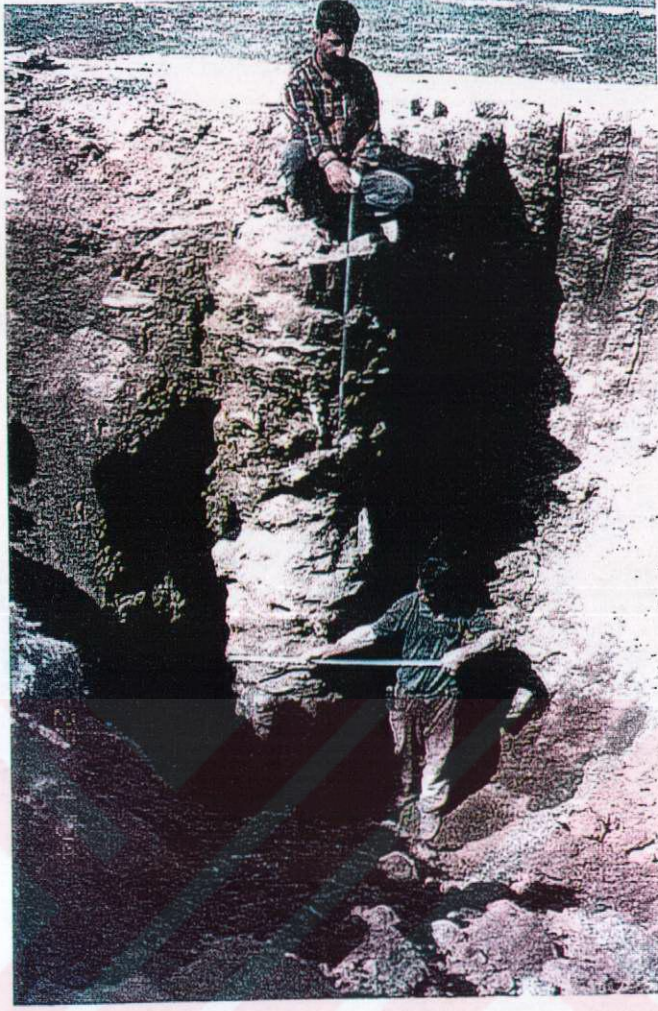
Jet grout kolonları geçirimsizlik sağlanması amacıyla yapılmışsa, zemin-çimento kalitesini denetlemek için açılan karot deliklerinde “sabit seviyeli permeametre” deneyi yapılabilir.



Şekil 4.40 Deneme kolonunun kazılarak ortaya çıkarılması

4.11.5 Zemin-Çimento Karışımının Mukavemeti

Jet grout kolonları yapımından en az 28 gün sonra alınan ve yükseklik/çap oranı en az iki olan karot numuneleri üzerinde, “serbest basınç mukavemeti” ve “elastisite modülü” belirlenir. Zemin-çimento karışımının mukavemeti, içerdiği çimento miktarına ve zeminin cinsine bağlıdır. Deney sonuçları arasında, deney sırasındaki aksenal birim deformasyon ve serbest basınç mukavemetinin %40’ına tekabül eden sekant modülü verilmelidir.



Şekil 4.41 Jet grout kolon çapı tahkiki [38]

Serbest basınç deneyleri, yükün sabit hızla (yaklaşık 1 mm/dakika) tatbiki ile gerçekleştirilmelidir. Yükün hidrolik bir düzen ile uygulandığı (gerilme kontrollü) deney aletlerinde yükleme 140 ± 70 kPa/sn. hızla yapılmalıdır. Kırılma halinde toplam yük 50 N hassasiyetle saptanabilmektedir.

Deney raporlarında, numuneler ile ilgili bilgiler arasında, numune yüksekliği, çapı; uygulanan maksimum yük; 50 kPa hassasiyetle belirlenen serbest basınç mukavemeti; aksenal birim deformasyon; serbest basınç mukavemetinin %40'ına tekabül eden sekant modülü; numunenin yaşı belirtilmelidir.

Tekli jet tekniği kullanılması halinde, daha fazla çimento harcandığı için; karışımın mukavemeti diğer tekniklere nazaran yüksek olur.

Jet grout kolonlarının imal edildiği zemine bağlı olarak, zemin çimento karışımının mukavemeti, alüvyon zeminlerde 60~70 MPa, kumlu zeminlerde 30 MPa, az siltli kum zeminlerde 10 MPa olabilmekte, kil yüzdesi fazla ise 1.5~2.5 MPa olmaktadır. Yüksek plastisiteli killerde çimento miktarını arttırmadan 2~3 MPa değerinin üzerine çıkılamamaktadır.

Zemin çimento karışımının serbest basınç direncinin; killer ve killi siltler içinde 1.2~4 MPa, siltler ve kumlar içinde 3~12 MPa, kumlar ve çakıllar içinde 6~12MPa arasında olabilmektedir

Sıkıştırılmış silt dolgu içinde yapılan jet grout kolonlarının serbest basınç mukavemeti 10MPa, elastisite modülü 5400 MPa, Poisson oranı 0.27 olarak bulunmuştur[Lioret v.d.,1991].

İçinde silt bulunan kumlu ve serbest basınç direnci 25~27 MPa olan zeminin elastisite modülü, 2500~6500 MPa olarak bulunmuştur.

Deney sonuçlarının verildiği raporlarda,

1. numuneyi tanıttıcı isim veya numara,
2. numune çapı,
3. numunenin deney başındaki yüksekliği ve çapı,
4. tatbik edilen maksimum deney yükü,
5. 50 kPa hassasiyetle bulunacak serbest basınç mukavemeti,
6. serbest basınç mukavemetinin %40'ına tekabül eden eksenel birim deformasyon ve sekent modülü yer almalıdır.

4.11.6 Kolonun Taşıma Gücü

Jet grout kolonlarından taşıyıcı elemanlar olarak yararlanılması söz konusu ise, bunlar üzerinde yükleme ve çekme deneyleri yapılır. Jet grout kolonu üzerinde yapılan çekme deneyi, deney düzeneği planı Şekil 4.42, deney düzeneği kesiti Şekil 4.43'de gösterilmiştir.

Yükleme deneyleri, bilinen zemin koşulları veya yükleme şekillerine uymayan sistemlerde ve kolon imali sırasında, zemin incelemeleri veya sahaya ilişkin bilgi ve tecrübelerin yeterli olmadığı durumlarda kesinlikle yapılmalıdır.

Yükleme deneyleri, bilinen zemin koşulları veya yükleme şekillerine uymayan sistemlerde ve kolon imali sırasında, zemin incelemeleri veya sahaya ilişkin bilgi ve tecrübelerin yeterli olmadığı durumlarda kesinlikle yapılmalıdır.

Yükleme deneyleri, deneme kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyleri ve daha sonra kullanılacak kolonlar üzerinde yapılan kontrol deneyleri olarak iki gruba ayrılabilir. Birinci gruptaki deneyler, kolon imalinde kullanılacak parametrelerin (basınç, harç debisi, delgi borusunun kendi etrafında dönme hızı, delgi borusunun yukarı çekilme hızı, v.s.) belirlenmesi için imal edilen deneme kolonları üzerinde yapılır. Deney sonunda kazılarak kolon meydana çıkarılır ve boyutları tahkik edilir, zemin-çimento karışımının mukavemeti, birim hacim ağırlığı belirlenir. Deneme kolonları, göçene kadar veya maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar yüklenir.

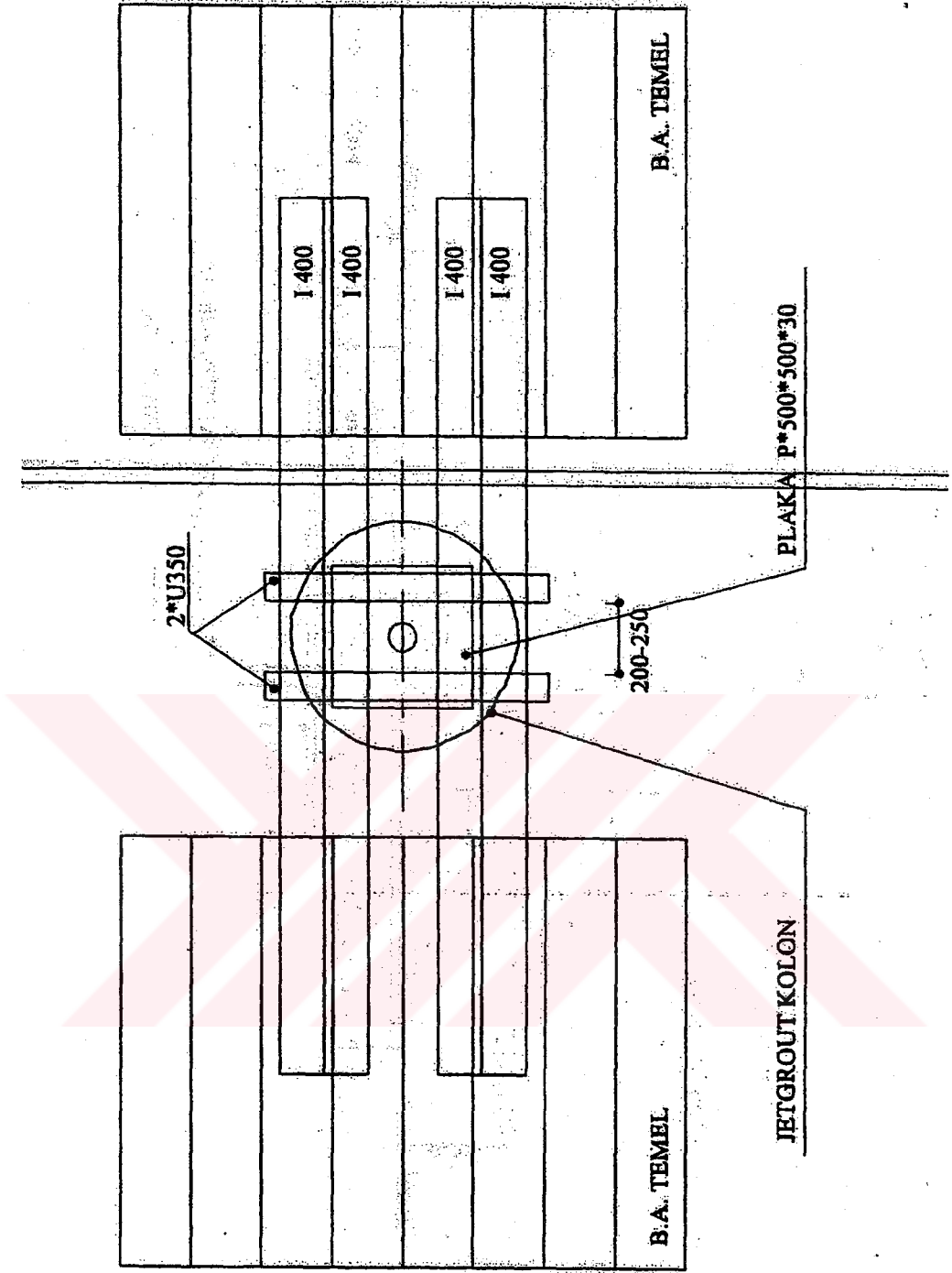
Göçme yükü aşağıdaki tanımlara göre belirlenir:

- 1) yükün daha fazla artmadığı halde oturma devam etmesi halindeki yük,
- 2) kolon çapının %10'u kadar bir toplam oturmaya yol açan yük,
- 3) kalıcı oturma eğrisinin eğiminin her 10 kN'luk deney yükü için 0.25 mm. oturmaya eşit olduğu yük

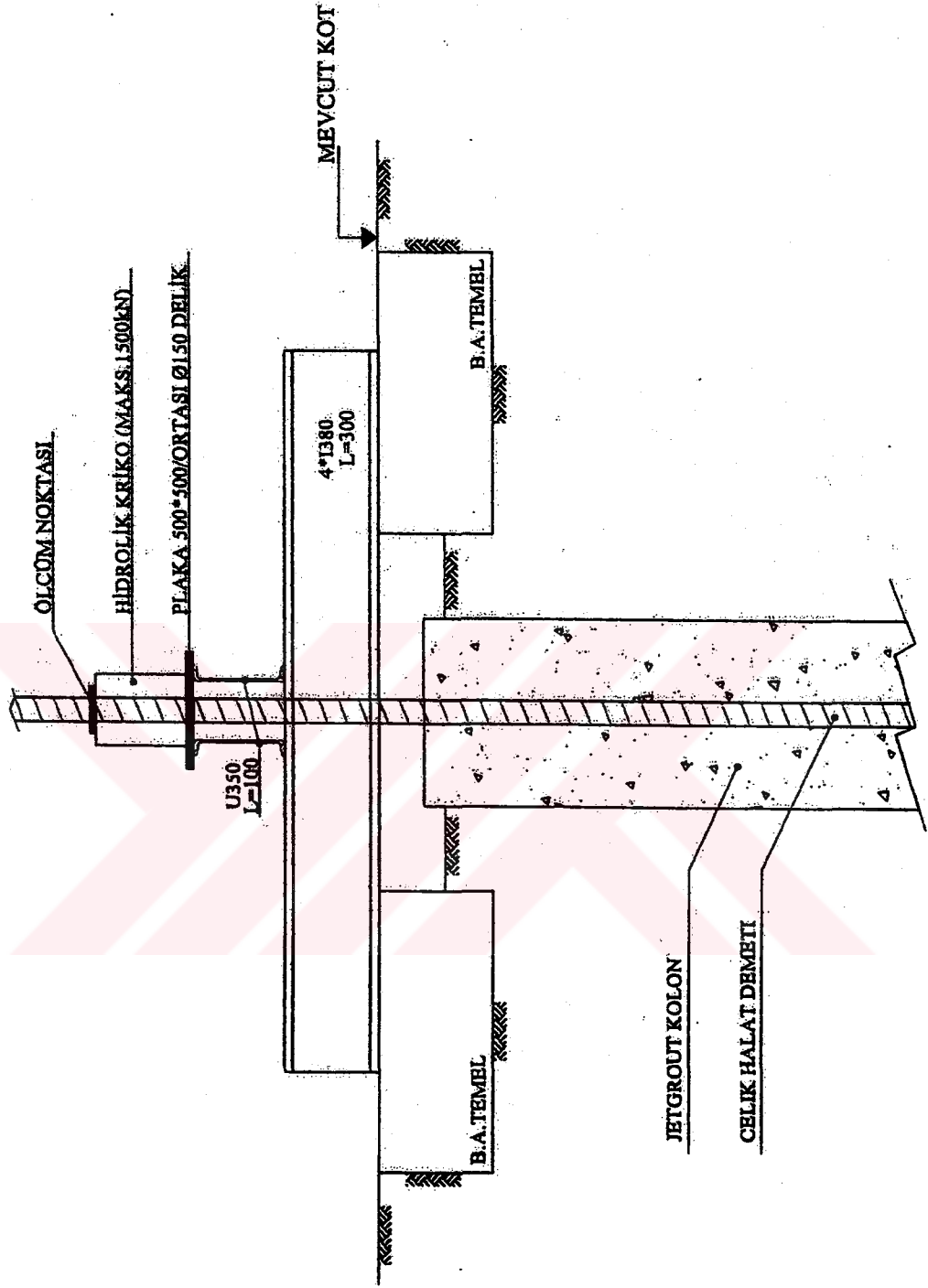
Kontrol deneyleri, imal edilen kolonların yeterli olup olmadıklarının araştırılması amacı ile yapılır. Uygulanacak deney yükü, en az kolonun proje yükü kadar olmalı, tercihen bu yükün 1.5 katı olmalıdır.

Hangi kolonlar üzerinde kontrol deneyi yapılacağı inşaatın teknik şartnamesinde belirtilmelidir.

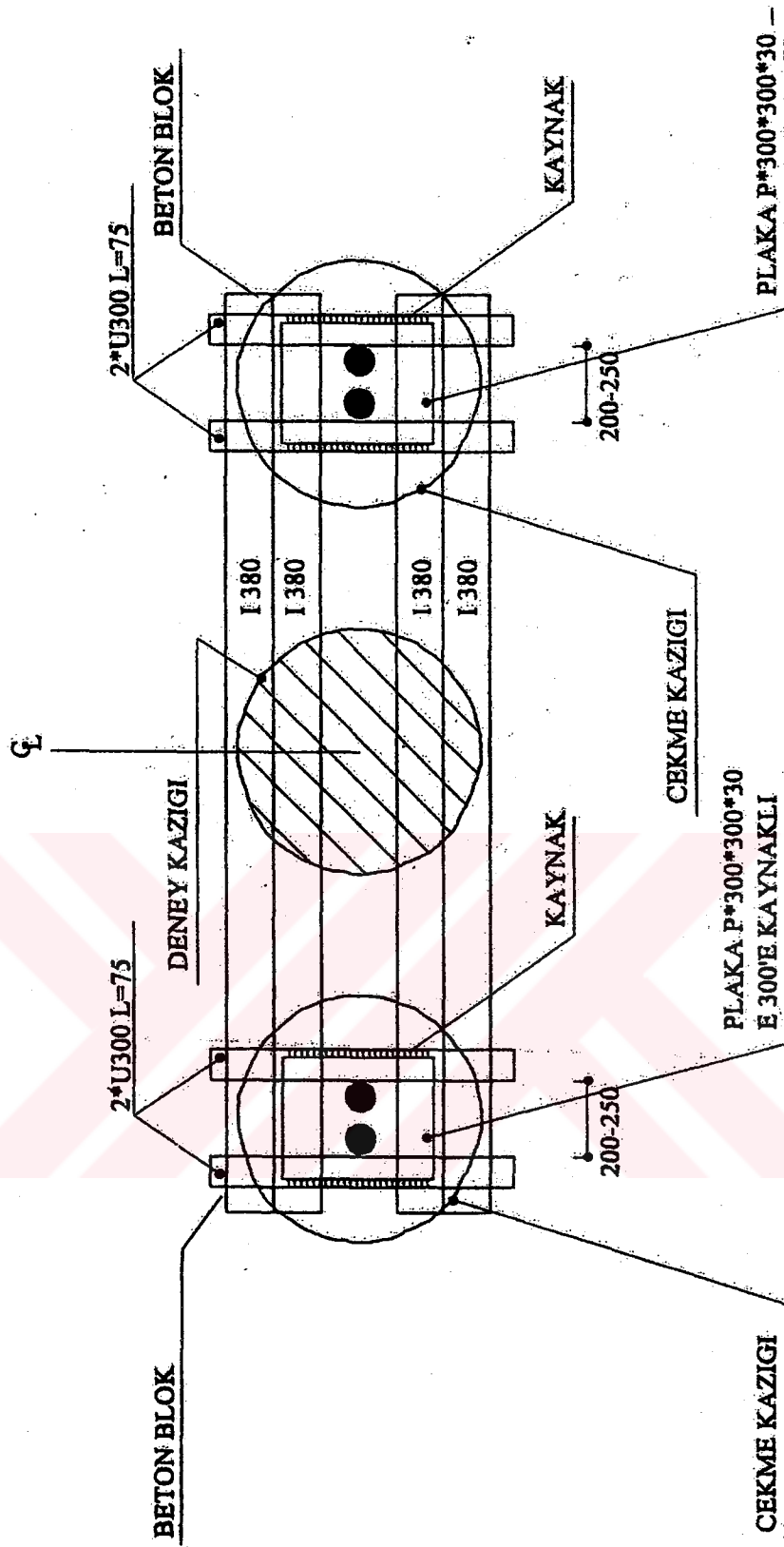
Yükleme deneylerinde "ASTM D 1143-81" in standart yüklemeye için, uygun maddeleri veya benzeri bir standart uygulanabilir.



Şekil 4.42 Jet grout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzeneği planı



Şekil 4.43 Jet grout kolon üzerinde yapılan çekme deneyi düzeneği kesiti



Şekil 4.44 Jet grout kolon üzerinde yapılan basınç deneyi düzeneği planı

Jet grout kolonu üzerinde yapılan basınç deneyi, deney düzeneği planı Şekil 4.44, deney düzeneği kesiti Şekil 4.45'de gösterilmiştir.

(1) Süreklilik Gözlemleri:

Kolon imali sırasında basılan harcın kusması, çalışma koşullarında meydana gelen değişiklikler gibi hususlar devamlı izlenmeli, kayda alınmalı ve nedenleri araştırılmalıdır.

(2) Malzeme Kontrolü:

Her enjeksiyon karışımı püskürtülmeden önce, kontrol edilmeli ve çimento miktarı kaydedilmelidir.

(3) İmalat Bilgileri:

Kolonların imali ile ilgili bilgileri içeren bir form hazırlanmalıdır. Bu formun birinci kısmında jet grout kolonunun imali amacı ile açılan deliğin uzunluğu, kolonun boyu, harcın çimento/su oranı, harcın dakika ve litre olarak debisi, delgi çubuğunun harç püskürtülmesi sırasında kendi etrafında dönme hızı (devir/dakika), delgi çubuğunun yukarı çekilme hızı (m/dakika), kolon imali sırasında kullanılan basınç, her kolon için ayrı ayrı kaydedilecektir. Formun ikinci kısmında ise; kolon numarası, kolon boyu, delik delinmesinde kullanılan su basıncı, harç püskürtülmesinde kullanılan basınç, püskürtülen malzeme miktarı kuru çimento ve harç olarak, ayrıca harçtaki çimento/su oranı kaydedilir.

(4) Kullanılmayacak Kısımlar:

Zemin yüzeyine kadar yükseltilemeyen jet grout kolonlarında, yüzeye yaklaşık 50 cm'lik kısmı, zeminin basınçla paralanması sonucu, istenilen nitelikleri sağlamadığından kırılarak alınır. Gerekirse kolonun üst kısmı beton dökülerek düzeltilir veya başlık kirişi haline getirilir.

(5) Yapım Sırası:

Bir jet grout kolonu yapıma tamamlandıktan sonra 2-3 gün geçmeden hemen yanındaki kolonun yapımına başlanılmamalıdır. Yüksek basınçlı püskürtme, prizi

tamamlanmamış kolonu tahrip edebilir. Bu bakımdan kolonların yapım sırası dikkatle programlanmalıdır.

(6)Enjeksiyon Malzemeleri:

Su: pH, klorür, sertlik ve organik madde içeriği

Çimento: dane boyu dağılımı, birim hacim ağırlığı

Karışım: birim hacim ağırlığı, viskozite, basınç mukavemeti



4.12 Jet Grouting Yönteminin Uygulama Alanları

Jet grouting yöntemi hemen hemen tüm zemin koşullarında uygulanabilir olmasının getirdiği avantajla gerek geçici, gerekse kalıcı olarak çok geniş alanda uygulanmaktadır. Jet grouting yönteminin temel uygulama alanları ;

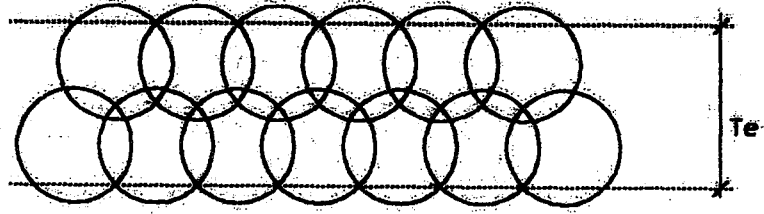
- Temel takviyesi
- Kazı desteklenmesi ve stabilizasyonu
- Zemin iyileştirilmesi
- Tünel ve shaft inşaatlarında kazı desteklenmesi
- Kazı çukurlarına gelen sızıntı sularının azaltılması
- Şev ve heyelan stabilizasyonu
- Mevcut yapı temellerinin stabilizasyonu
- “Cut-off” yapılması (Geçirimsizlik perdeleri)
- Binalara ilave temel yapılması
- Temel altı zeminlerin iyileştirilmesi
- Yeraltı sularının kontrolü
- Atık sahalarının geçirimsizliğinin sağlanması

olarak sıralanabilir [43].

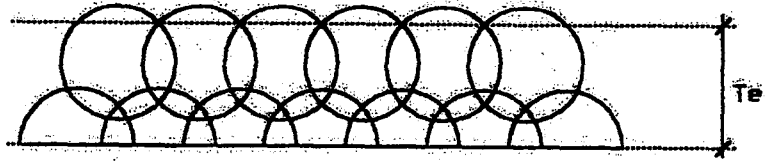
Yer altı suyu kontrol amaçlı jet grouting uygulamaları, geçici kazılarda sızıntı sularının azaltılmasından, baraj gövdeleri altında oluşturulan kalıcı geçirimsizlik perdeleri oluşturulmasına kadar çeşitlilik göstermektedir. Geçirimsizlik perdeleri, kilitlenen şekilde imal edilen kolon, panel yada kanat şeklinde elemanlardan oluşturulabilir. Kilitlenen şekilde imal edilen jet grout elemanlar Şekil 4.46’da görülmektedir.

Bu elemanlar eğik yada düşey şekilde oluşturulabilir ve yüzeye kadar çıkması gerekmiyor ise belli derinlikte kesilebilir. Sızdırmazlığın yanında stabiliteninde önemli olduğu durumlarda kalın paneller (bir veya birkaç sıra kolon tipi elemanlar ile), sadece sızıntı sularının azaltılması amaçlı uygulamalarda ise ince panel duvarlar oluşturulabilir. Geçirimsizlik perdeleri yeni baraj inşaatlarında, mevcut barajlarda yapılan iyileştirme çalışmalarında, kazı ve tünellere gelen sızıntı sularının

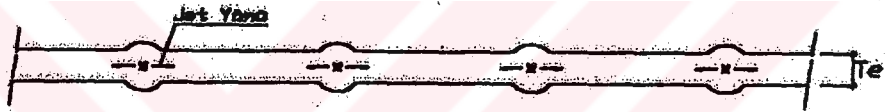
kontrolünde, nehir yada kanal ıslah çalışmalarında ve kirlenmiş zeminler ile atık sahalarının geçirimsizliklerinin sağlanıp stabilize edilmesinde uygulanmaktadır. Geçirimsizlik amaçlı bu uygulamalara ait örnekler Şekil 4.47'de görülmektedir.



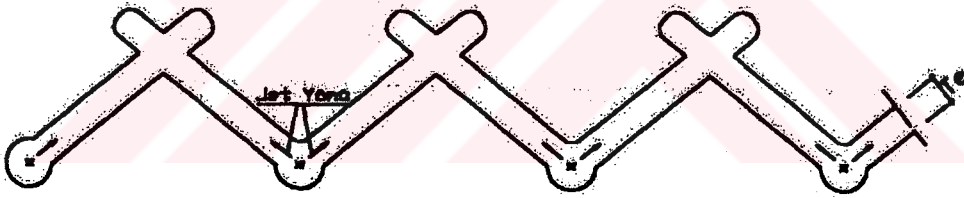
B) Çift Sıra Geçirimsizlik Perdesi



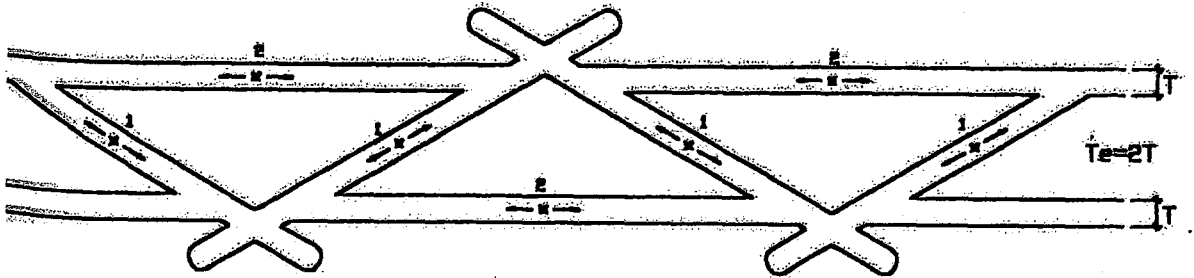
C) Bir Tek Bir Yarım Sıra Geçirimsizlik Perdesi



D) Tek Sıra Panel Perde



E) Tek Sıra Blindirmeli Panel Perde

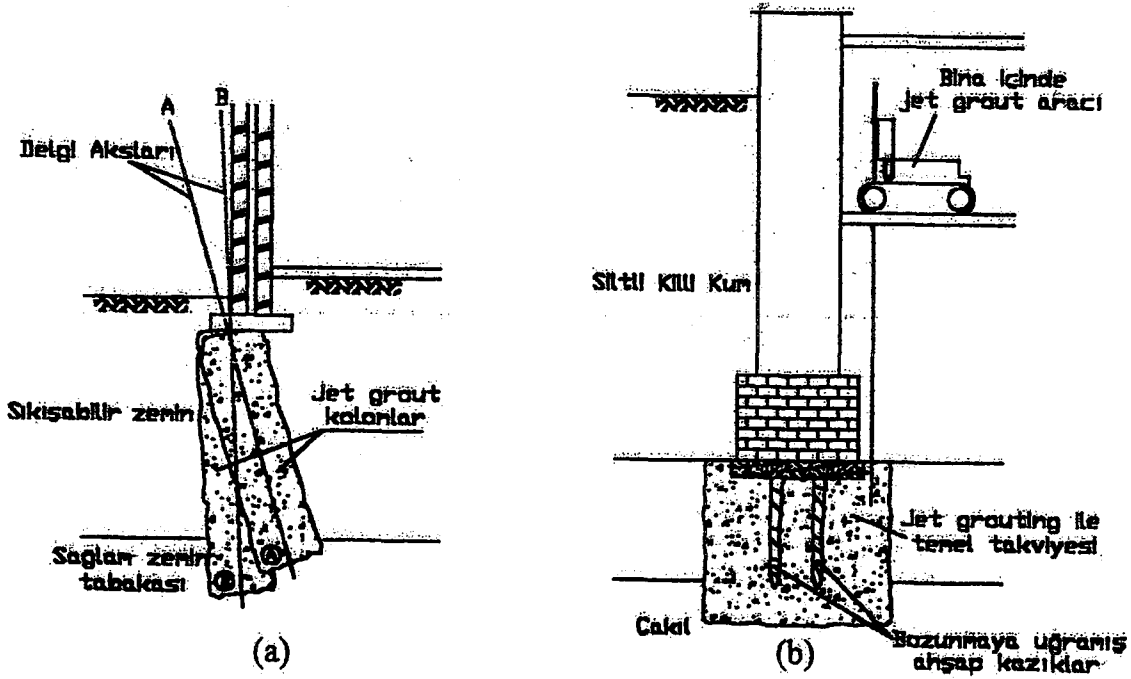


F) Çift Sıra Hücreli Panel Perde

Şekil 4.46 Tipik kolon, panel ve kanat şekilleri [43]

Yöntem ile komşu yapıların, dış duvarların ve yapı geometrisinin müsaade etmesi durumunda eğimli imalat yapılabilme şansı, temelin altında istenilen bölgeye ulaşarak iyileştirme yapılabilmesine ve böylece mevcut temel jet grout eleman bütünleşmesinin sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesine yol açmaktadır. Bu şekilde yapı dışından jet grouting uygulaması Şekil 4.48-a'da görülmektedir. Jet grouting yöntemi ile ayrıca yapıların içersinden, tünel kazısının içinden ve bu gibi kapalı mekanlardan, üstteki kısıtlayıcı yüksekliğin (tavan döşemesi gibi) 3 m. ve daha fazla olması durumunda uygulanabilmektedir. Ancak böyle iç mekan jet grouting imalatında artık malzemenin tam anlamıyla kontrol altına alınarak toplanması gerekmektedir. Jet grouting ayrıca yeraltı su seviyesi altında imal edilmiş ve zamanla çürümüş olan veya çürüme eğilimi gösteren temellerin takviyesinde de kullanılmaktadır. Çürümüş olan bu kazıkların yerlerinden sökülmesini gerektirmeden, jet grouting yöntemi sayesinde kazık başlıkları ile taşıyıcı tabaka arasında mükemmel yapısal bağlantı sağlanabilmektedir. Bu tip kapalı mekandan ahşap kazıklı temel takviyesi uygulaması Şekil 4.48-b'de görülmektedir.

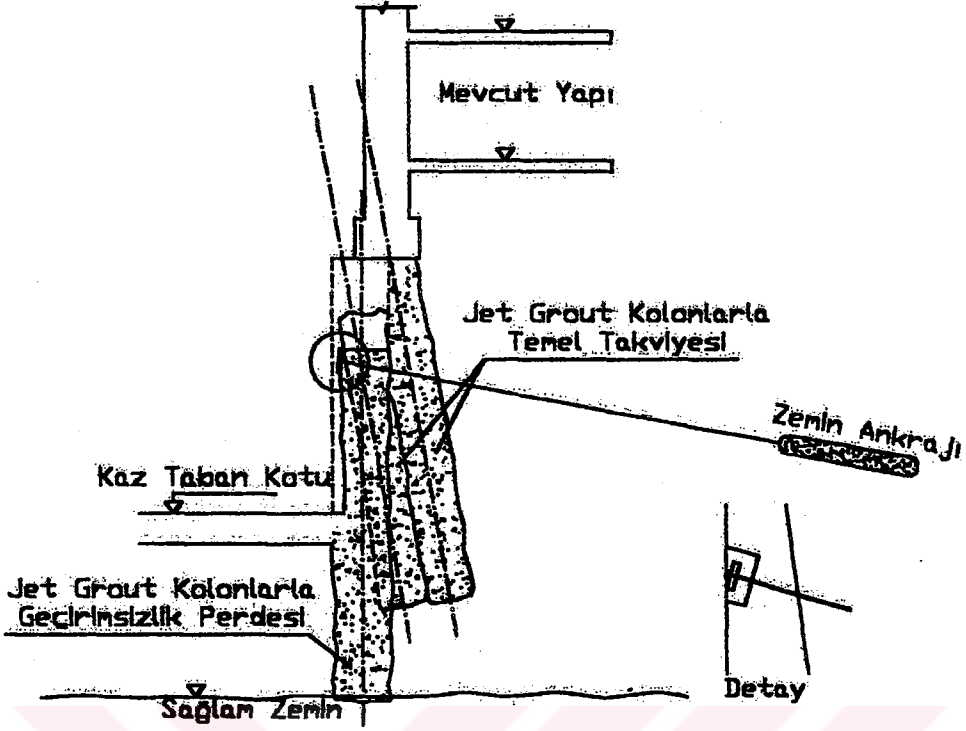
Jet grouting ayrıca mevcut yapılara bitişik derin kazıların güvenliği amacı ile yapılan uygulamalarda da oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Yöntem ile iyileştirilen zemin, mevcut yapı için temel takviyesi olarak işlev görmesinin yanı sıra, yapılan kazıda zemin için istinat yapısı, sızıntı suları için ise geçirimsizlik perdesi işlevi görmektedir. Kazı derinliğine ve zemin özelliklerine bağlı olarak bu tip uygulamalarda zemin ankrajlarına da ihtiyaç duyulabilmekte ve zemin ankrajları jet grout yapının üzerinden delgi yapılarak imal edilebilmektedir. Jet grouting ile iyileştirilmiş olan zeminin ciddi boyutta yükselen mukavemet özellikleri, ankrajlar için göğüsleme kirişi imalatının gerekliliğini ortadan kaldırmakta ve kenar boyutu 25-40 cm. civarında olan plakalar ile ankraj kafaları sabitlenebilmektedir. Bu tip uygulamalara temsili bir örnek Şekil 4.49'da görülmektedir.



Şekil 4.48 Jet grouting ile temel takviyesi uygulamaları [43]

Temel takviyesi amaçlı jet grouting uygulaması yapılmadan önce aşağıda sıralanan hususlar incelenmeli ve açıklığa kavuşturulmalıdır [43].

- **Tasarım:** Mevcut yapının durumu ve temellerin kapasitesi, imalattan sonra priz sağlanana kadar taşıma gücünü kaybeden zeminin durumu açısından incelenmelidir.
- **İmalat sırası:** İmalat sırası, imal edilmiş kolonun yeterli mukavemeti kazanarak, bitişik kolonun imalatından etkilenip bozulmasını engelleyecek şekilde düzenlenmelidir.
- **Kolon çapı:** Uygulanan jet grouting sisteminin daha büyük çaplı kolonlar imal edebilecek olması halinde dahi küçük çaplı (1.2 m. veya daha küçük çapta) kolonlar imal edilebilmektedir.
- **Kilitlenme:** Zeminde süreksizlikler oluşmayacak şekilde iyileştirme yapılabilmesi ve yetersiz özelliklere sahip zeminin minimize edilebilmesi için tasarım kolonların birbiri ile kilitleneceği şekilde yapılmalıdır.
- **Çimento miktarı:** Mevcut zemin koşullarına bağlı olarak, iyileştirilmiş zeminin yeterli mukavemete erişebileceği enjeksiyon karışım oranları ve çimento miktarları belirlenmelidir.



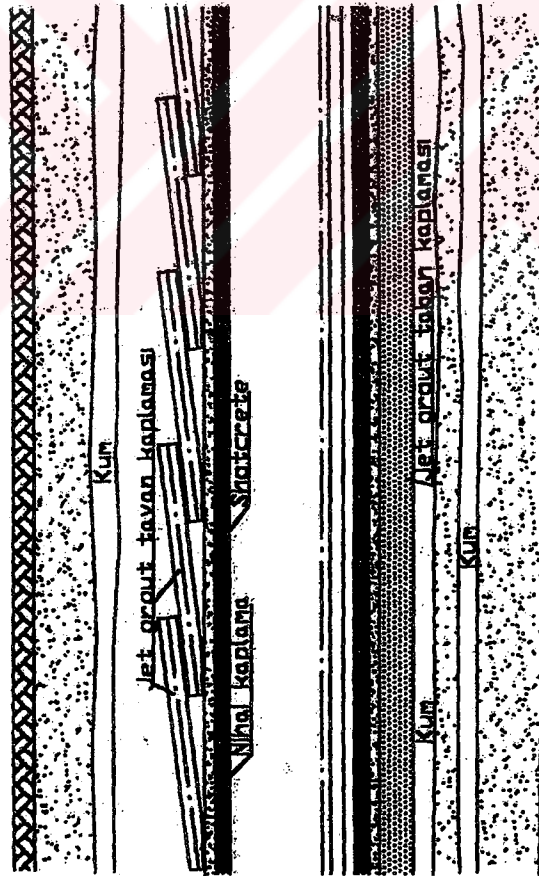
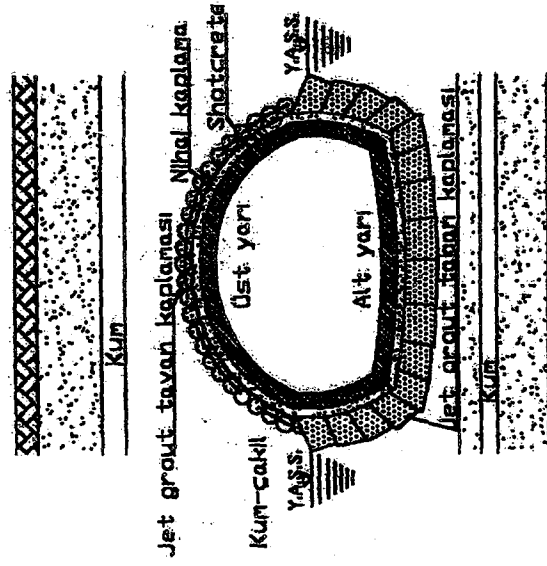
Şekil 4.49 Mevcut yapıya bitişik kazılarda jet grout uygulaması

- Kohezyonlu zeminlerin varlığı: İyileştirme yapılacak derinlik boyunca kil yada %15'den fazla silt içeren zonlar geçilecek ise, kolon çapında oluşacak küçülme ve mukavemetteki düşüş göz önünde bulundurulmalıdır.
- Temel-enjeksiyon bağı: Aşındırıcı jet, mevcut temel plağının yada pabucun altını temel ile iyileştirilmiş zemin arasında güçlü bir bağlantı olacak şekilde temizler. Temel ile jet grout eleman arasındaki kontağın sağlanması için enjeksiyon temel kotunun biraz üzerine kadar sürülmelidir.
- Yapıların hareketi: Tüm delgi ve enjeksiyon işlemleri sırasında yapıda aletsel gözlemler yapılmalıdır. Bunun için en sağlıklı yöntem, zeminde oluşacak oturma ve kabarmalarında bir an önce fark edilebilmesi açısından optik seviye takibi yapılmasıdır.

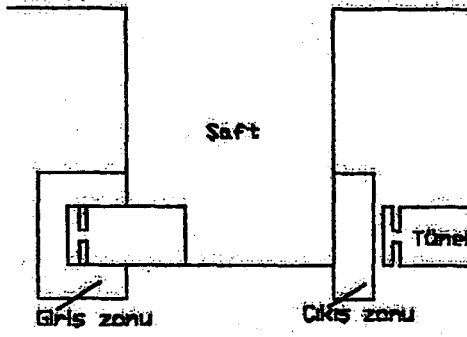
Tünel inşaatlarında kazının uzun bir mesafe boyunca yapılması sebebi ile zemin koşullarında ve özelliklerinde değişiklikler olması doğaldır. İyileştirme yapılması gereken zemin koşullarında açılı ve yatay olarak uygulanabilir olması, kolay ve hızlı iyileştirme sağlaması ve hemen hemen her tür zeminde iyileştirilebilir olması sebebi

ile jet grouting yöntemi geniş uygulama alanı bulmaktadır. Yapılaşmanın olduğu yerlerde tünel kazısı yapılırken kazıya yakın mevcut yapılar jet grouting yöntemi ile takviye edilebilir. Aynı şekilde mevcut tünellerin yakınındaki yeni tünel kazılarında da jet grouting ile takviye yapılabilir. Uzun süredir kullanımda olan ve aşırı oturma riski taşıyan tünellerde de yöntem ile takviye ve stabilizasyon yapılabilir. Tünel kazısı sırasında üstteki zeminin korunması ve tünel kazısının güvenliğinin sağlanması amacı ile jet grouting ile temel tavanı üzerinde, kemerlenme oluşturacak şekilde takviye yapılabilir. Bu şekilde uygulamalara ilişkin bir örnek Şekil 4.50’de görülmektedir.

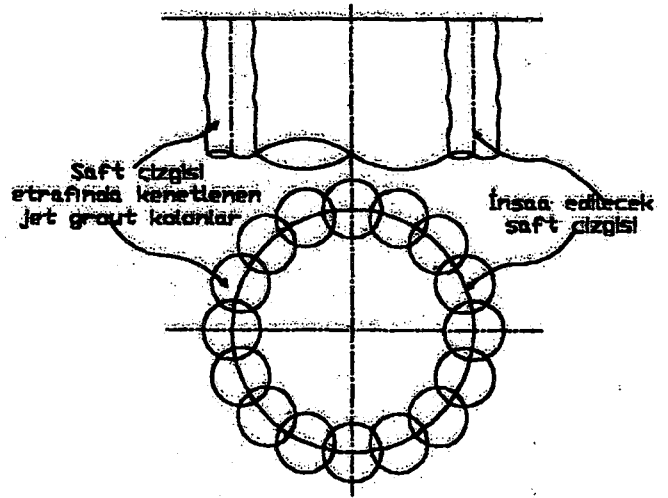
Tabanda yapılan jet grouting uygulaması ile de, ortamın kohezyonsuz zemin olması durumunda ortaya çıkabilecek kaynama ve borulanma riski ortadan kaldırılmış ve taban plağının kalınlığının artması ile de taban kabarmasının önüne geçilmiş olur. Ayrıca shaft inşaatlarında su sızma problemlerine karşı jet grouting geçici önlem olarak da uygulanabilmekte ve sızdırmazlık perdesi işlevi görmektedir. Bu imalat kesişen kolonlar ile halka şeklinde bir perde oluşturularak gerçekleştirilmektedir. Bu tip uygulamalara ait örnek Şekil 4.51’de gösterilmiştir.



Şekil 4.50 Tünellerin ve tünel kazılarının desteklenmesi amacı ile jet grout uygulaması [45]

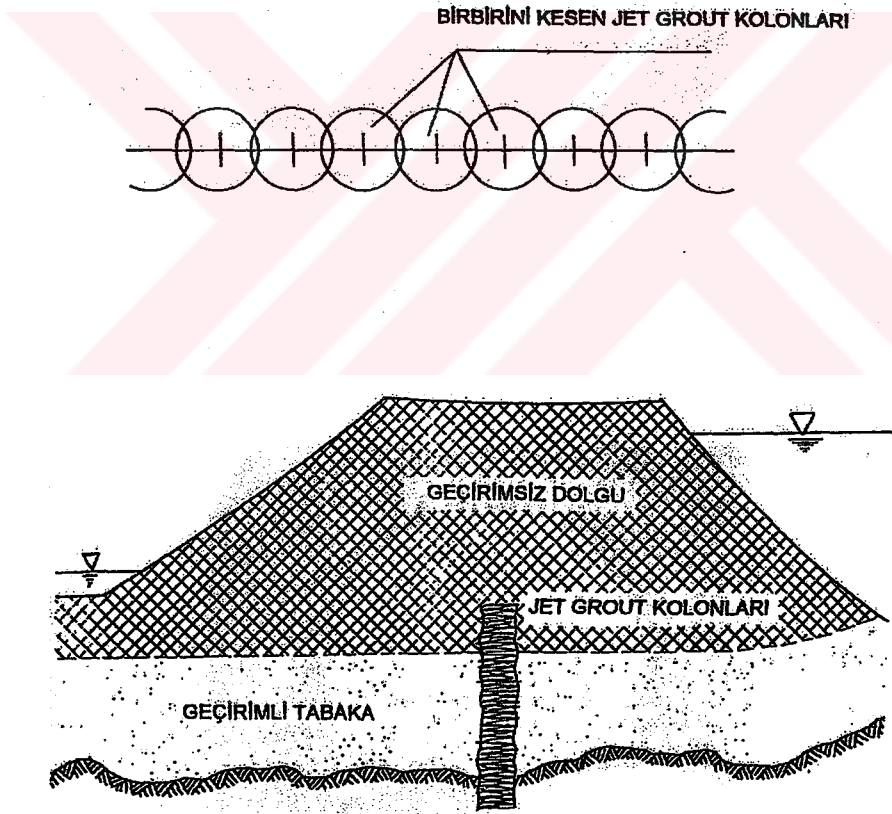


a) Tünel Giriş Çıkışında İyileştirme



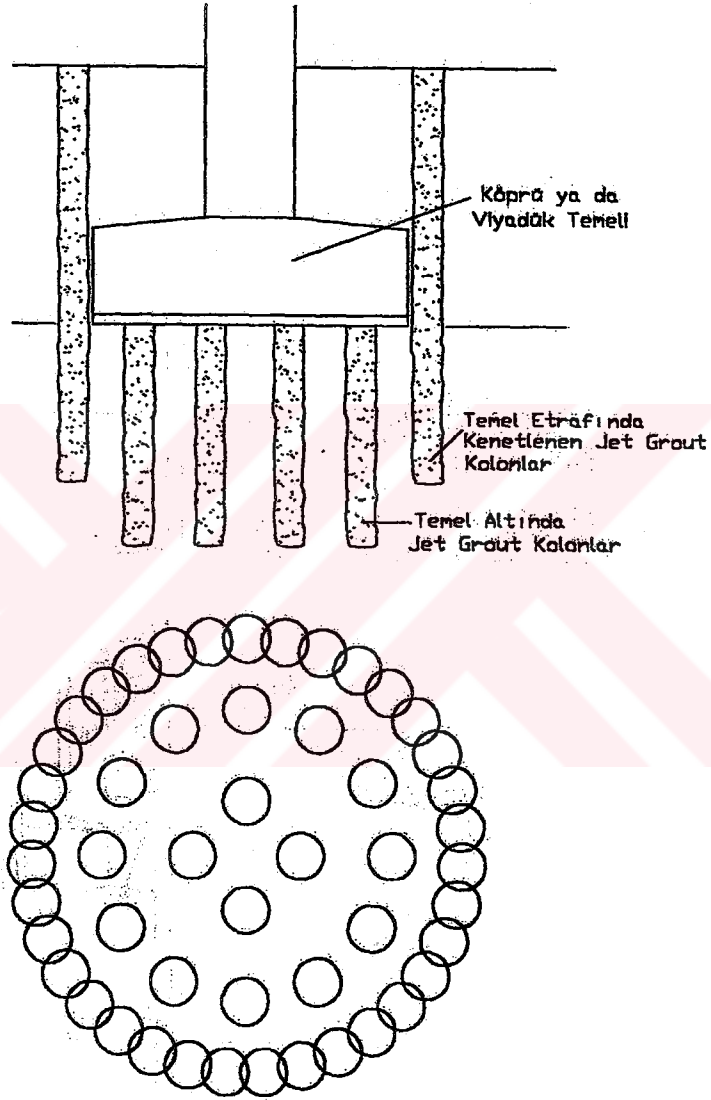
b) Şaft stabilizasyonu

Şekil 4.51 Tünel giriş çıkış bloklarının ve şaftların stabilizasyonu [27].

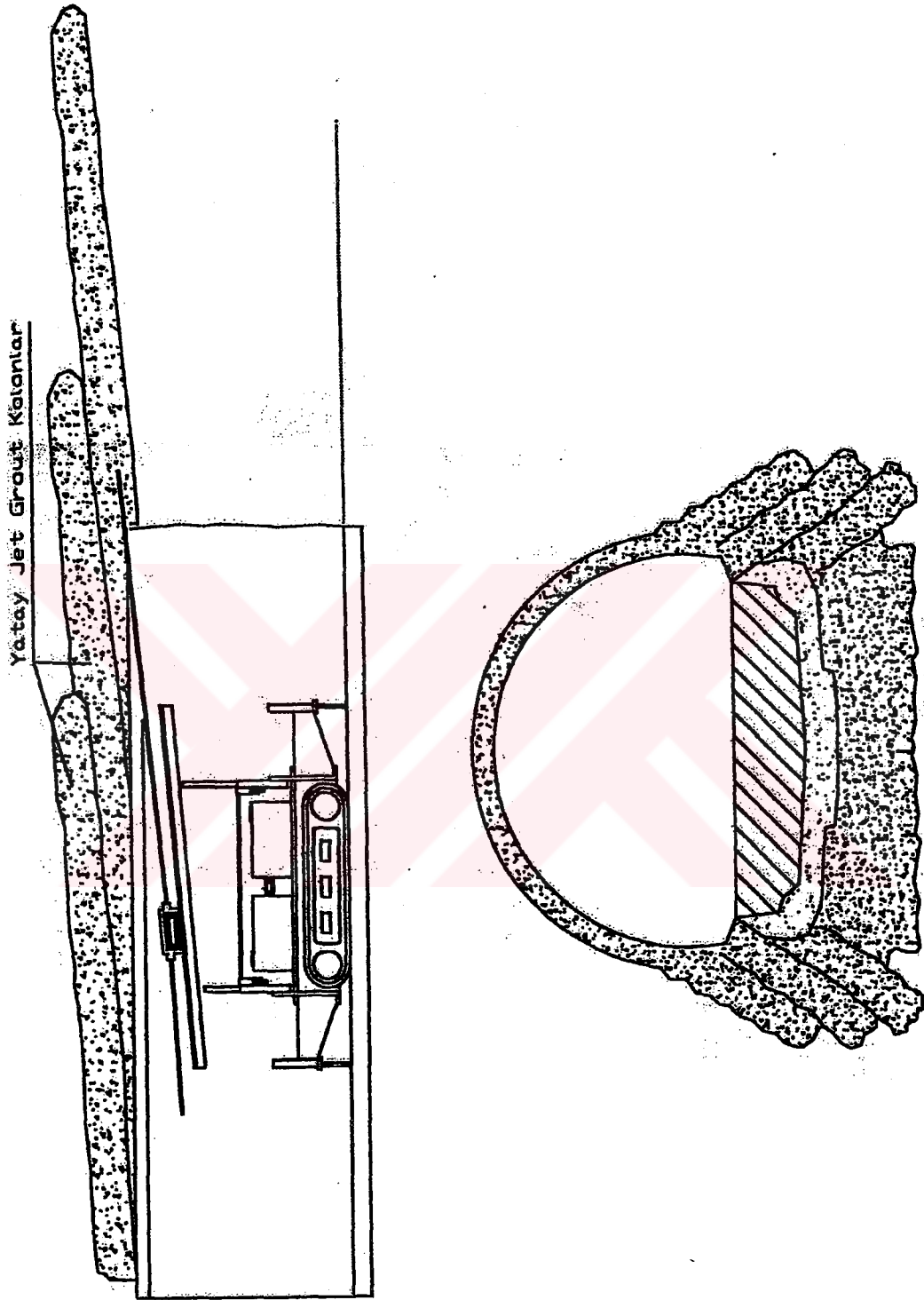


Şekil 4.52 Baraj gövdesi altında geçirimsizlik perdesi [38]

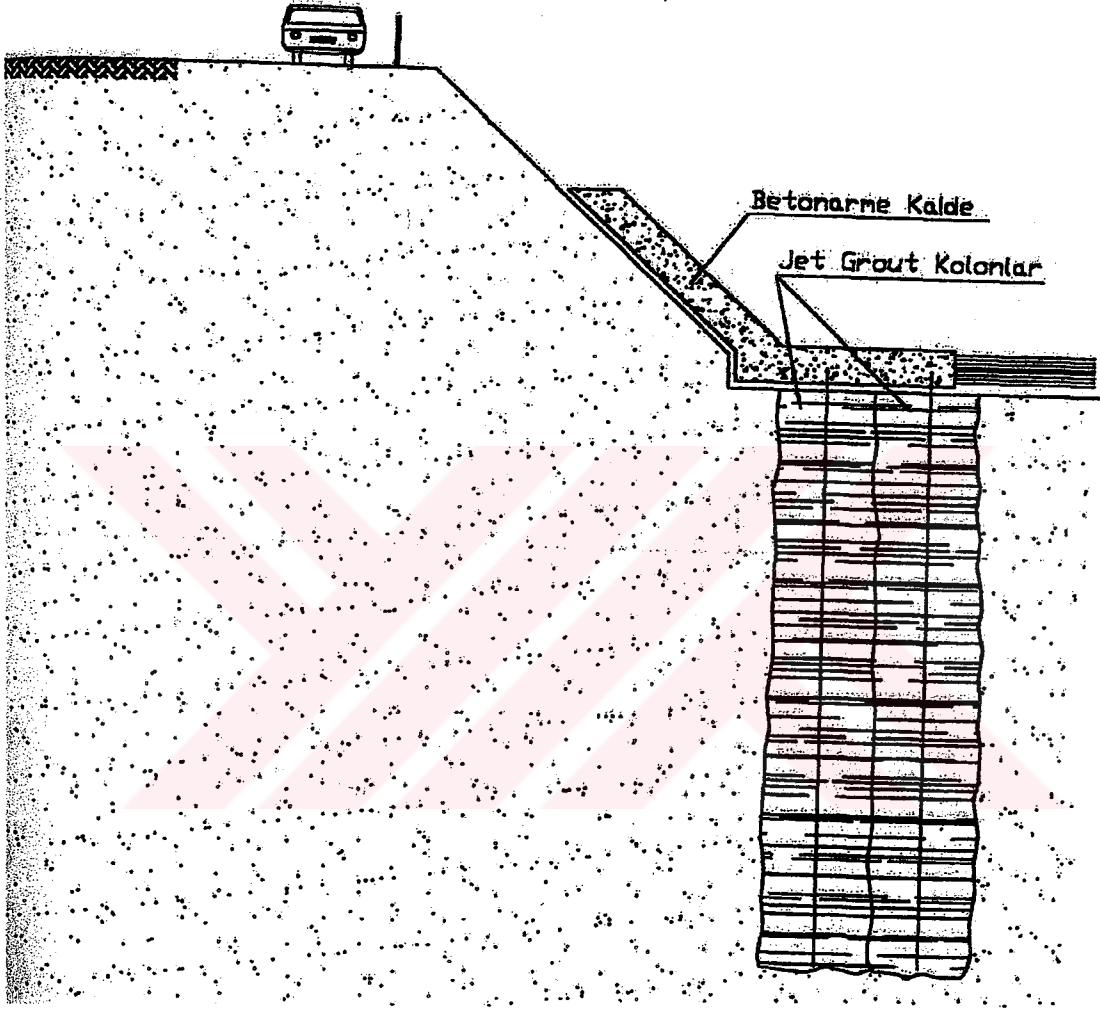
Şekil 4.52’de bir su toplama yapısının ana gövdesi altında oluşturulan geçirimsizlik perdesi, Şekil 4.53’de köprü yada viyadük temeli altında temel takviyesi uygulaması, Şekil 4.54’de tünel kazısında takviye amaçlı yapılan yataya yakın jet grouting uygulaması, Şekil 4.55’de jet grouting yöntemi ile şev yada heyelan korunmasına ilişkin bir uygulama görülmektedir.



Şekil 4.53 Bina,viyadük ve köprü ayakları için temel takviyesi [38]

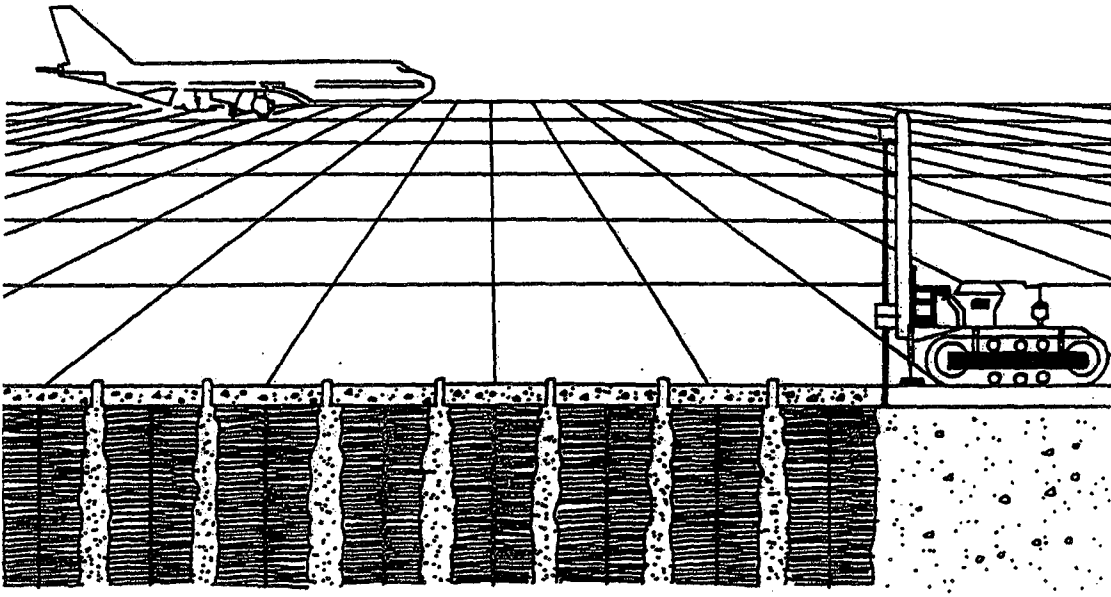


Şekil 4.54 Tünel kazısının jet grout ile desteklenmesi [38]

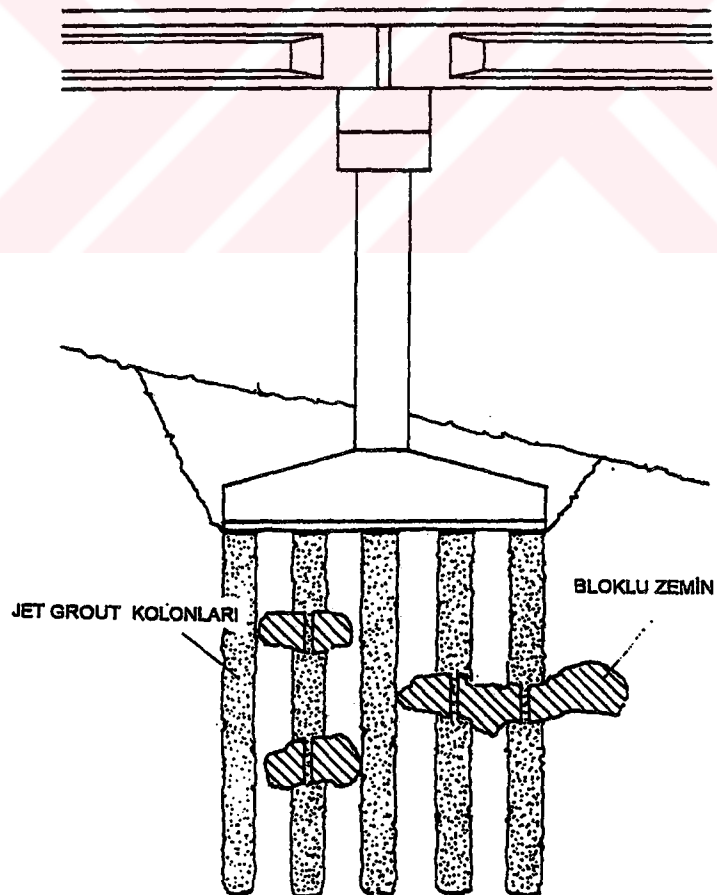


Şekil 4.55 Jet grouting ile şev korunması [38]

Şekil 4.56'da deformasyona uğramış asfalt yada beton pist altındaki stabilizasyon ve takviye uygulamasını, Şekil 4.57'de sert zonlar bulunan zeminde yapılan derin temel takviyesi uygulamasını ve Şekil 4.58'de ise kazı çukurunun iksası, temel altında zemin iyileştirmesi ve su sızıntısının minimize edilmesi amacı ile jet grout imalini göstermektedir.

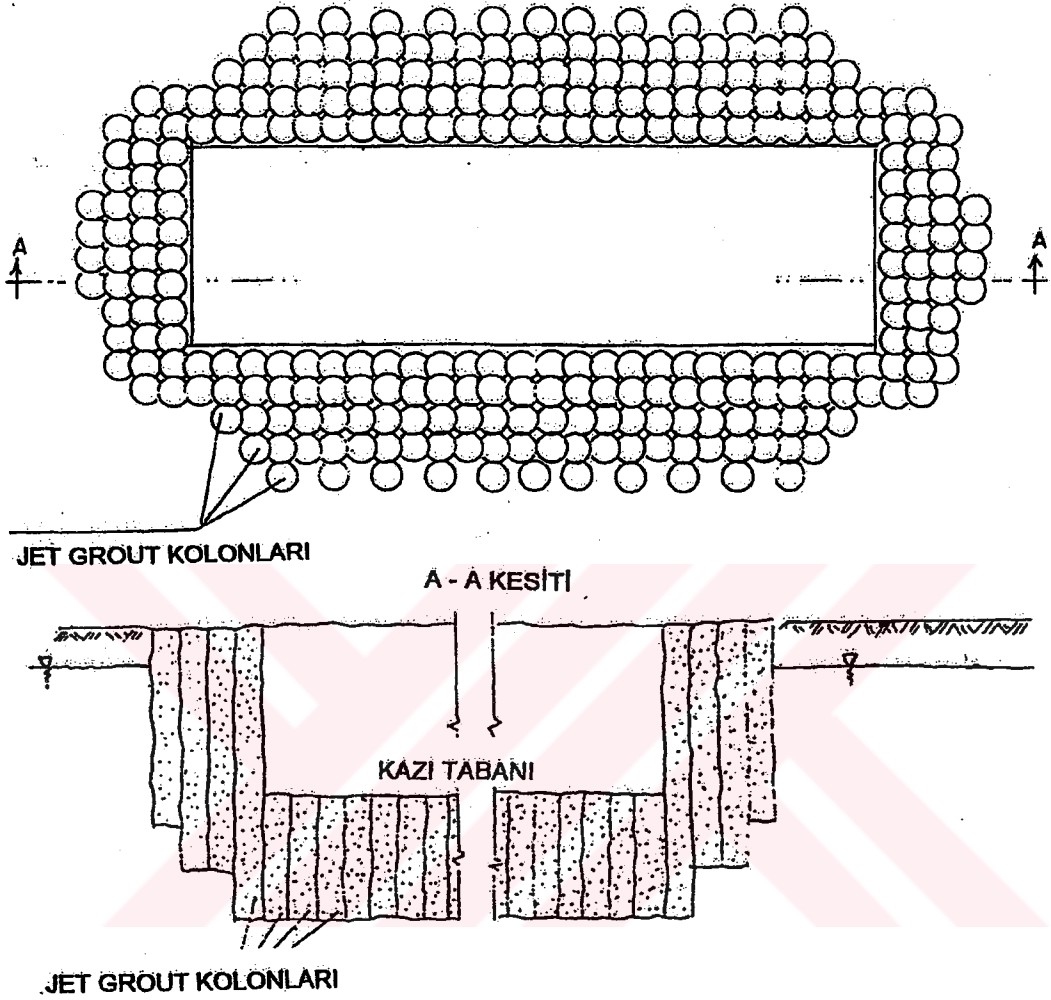


Şekil 4.56 Deforme olmuş kaplamaların rehabilitasyonu [38]



Şekil 4.57 Zayıf zeminlerde derin temel sistemi [38]

PLAN



Şekil 4.58 Kazı çukurunun iksası, temel altında zemin iyileştirmesi ve su sızıntısının minimize edilmesi amacı ile jet grout imali [38]

4.13 Maliyet

Welsh ve diğerleri (1986) tarafından yapılan bir çalışmada, jet grouting yöntemi ile zemin iyileştirme maliyetinin tahmin edilebilmesi için araştırma sonuçlarının ve özellikle gerçekleştirilmiş olan uygulamalardan edinilen tecrübelerin kullanılması gerektiği belirtilmiş ve kesin bir maliyet verilebilmesinin pek de mümkün olmadığı vurgulanmıştır [21].

Mitchel tarafından yapılan bir çalışmada ise (1981), jet grouting yöntemi ile iyileştirilen zeminin m^3 'ünün maliyeti, 1980 fiyatları ile ~250\$ olarak belirtilmiştir [21]. Jet grouting yönteminin yanı sıra diğer belli başlı zemin iyileştirme yöntemlerinin maliyet tahminleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4.18'de görülmektedir.

Tablo 4.18 Çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri için karşılaştırmalı maliyet analizi[6]

Yöntem yada malzeme		Maliyet / metre	Maliyet / m^2 Zemin yüzeyi	Maliyet / m^3 İyileştirilen hacim
Beetonarme				100-250
Kimyasal enjeksiyon			200-400	150-250
Klasik	Malzeme			250-650
Enjeksiyon	Zemin			3-30
Zemin ankrajları		50-100		
Dinamik konsolidasyon			7.50-30	1.5-3.0
Diyafram duvar			400-750	500-750
Geçirimsizlik perdesi			80-120	125-250
Jetle imal edilen perde			30-50	125-250
Taş kolon		40-75	100-150	13-20
Jet grout				~250

4.14 Kalite Kontrol

Jet grouting imalatında, malzeme ve parametrelerin proje gereklerine ve istenen sonuçlara uygun olarak devam ettirilmesi önem taşımaktadır. Jet grout elemanın imalat öncesinde kalite ve geometrisini test edecek düzen mutlaka kurulmalıdır. Daha önceden belirli arazide imalat yapılmamış ise, jet grout parametrelerinin doğrulukla tahmin edilebilmesi mümkün değildir. Ancak benzer zemin koşullarında yapılmış geçmiş uygulamaların ışığında ampirik olarak bu parametrelerin tahmini mümkün olabilmektedir. Bu parametreler ;

- Delgi: Delik çapı, delgi sıvısı hazırlanması
- Delici ayarları: Geri çekme hızı, dönme hızı
- Aşındırıcı: Püskürtülen her elemanın püskürtme ağzı boyutları, açıları, sayısı
- Püskürtme: Püskürtülen her elemanın hacmi, debisi ve basıncı
- Malzeme: Malzeme bileşenleri ve yoğunlukları, karıştırma metodu olarak sıralanabilir [15].

İmal edilen jet grout elemanların performanslarının değerlendirilmesi, diğer bir deyişle uygulamanın başarısı, belirli değişkenlerin ölçülmesi ile anlaşılır. Bu değişkenler;

- Zemin/çimento karışımının kalitesi,
- Yapılmış kolonun bütünlüğü ve boyu,
- Kolonun çapı,
- Kolonun geçirimsizliği,
- Zemin/çimento karışımının mukavemeti,
- Kolonun taşıma gücüdür [13].

Uygulamada zemin-çimento karışımının birim hacim ağırlığı $16\sim 22 \text{ kN/m}^3$ arasında değişmektedir. Jet grout imalatında kullanılacak çimento yeteri kadar ince olmalı, blain değeri $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ 'dan daha büyük olmalıdır. Bazı durumlarda, istenilen kaliteye ulaşılabileceğinden emin olmak için enjeksiyon karışımı laboratuarda test edilmelidir. Ancak bu malzeme özellikleri ve kullanılan çimento miktarının bilinmesi ile genellikle yeter doğrulukta tahmin edilebilmektedir. Klasik enjeksiyonda olduğu gibi, imalat sırasındaki kontroller ile kalite kontrol yapılabilir. İmalat için uygun jet grouting parametreleri bu testler sonucunda belirlenir. Değişmeyen zemin koşullarında aynı jet grouting parametreleri ile aynı özellik ve geometride elemanların oluştuğu kabul edilir ve bu durumda parametrelerin kontrolü kalite kontrolün bir bölümünü teşkil eder.

Benzer bir kabul enjeksiyon ve jet akım hızları ile enjeksiyonun birim hacim ağırlığının değişmemesi durumunda yüzeye çıkan artık malzeme için yapılabilir. Bu durumda artık malzeme için yapılan kontroller de kalite kontrolün bir parçası olmaktadır. Tüm kontrol ve testler, projenin önemine ve kapsamına göre farklılaştırılabilir. Enjeksiyon malzemesi üzerinde yapılan testler şunları içermektedir:

- Su : pH derecesi, klor ve organik madde oranı
- Çimento: Dane çapı dağılımı
- Karışım: Birim hacim ağırlık, Marsh viskozitesi, priz süresi, basınç mukavemeti ve sızma.

Arazide çimento kapsamını belirlemek ve çıkan delgi artığının birim hacim ağırlığını ölçerek jet grout kolonun geometrisini tayin etmek için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerin yeterince güvenilir olduğu ispatlanamamıştır ve bu sebeple en geçerli yöntem olarak karot alma/kazma yöntemi uygulanırlığını korumaktadır.

Kolon bütünlüğünün belirlenmesi amacıyla kolon tepesinden başlayarak kesitteki düzensizliği ortaya çıkarabilen “integrity test” (bütünlük testi) yapılabilir ve düzensizliğe rastlanmazsa bu yöntemle kolon boyu da belirlenebilir.

Son on yıl içinde jet grout elemanlardan numune alınması ve test edilmesi amacı ile birçok yöntem geliştirilmiştir. Priz almamış numuneyi herhangi bir derinlikten alabilen aletler geliştirilmiştir. Ancak zeminde kum oranı çok yüksek ise ve / veya çakıl ve iri daneler içeriyor ise numune alınabilecek derinlik kısıtlanmış olmaktadır. Bu yaş numuneler kalıplara dökülüp kür yapılmasının ardından klasik silindirik numuneler gibi test edilirler. Jet grout elemanlardan numune alma tekniklerinden bir kısmı Tablo 4.19’da gösterilmiştir.

Tablo 4.19 Jet grout elemanlarda numune alma ve test teknikleri [9]

Jet grout elemandan beklenen	Numune alma yöntemleri	Test yöntemleri
Mukavemet	• Prizden önce kalıba dökme • Karot numune alma • Yerinde koyulan plastik borunun prizden sonra geri alınması	• Serbest basınç • Üç eksenli • Gerilme • Direkt kesme • Yeterince yumuşak ise yerinde CPT
Geçirimsizlik	Yukarıdakilerin yanı sıra • Yerinde koyulan piezometre • Delinip koyulan piezometre	• Permeametre • Packer testi

Jet grout elemanların mukavemetleri ise tek eksenli basınç deneyleri (yükleme testleri) ile kontrol edilmelidir. Ayrıca gerekmesi durumunda (deformasyon modülü isteniyor ise) test sırasında deformasyon ölçümleri de yapılabilir.

Bunun yanı sıra jet grout elemana çekme testleri de uygulanarak iyileştirilmiş zeminin taşıma gücü bulunabilir. Bu testlerde numunenin yaşı da önem kazanmaktadır. Mesela ince dane oranı %5'in altında olan kumlu çakıllı zeminde imal edilen jet grout elemanların 28 günden, killi zeminlerde imal edilen jet grout elemanların ise 120 günden sonra test edilmesi tavsiye edilmektedir.

Jet grout elemanların ve yapıların geometrisi gözlemsel olarak da kontrol edilebilir. Örneğin temel takviyesi uygulamalarında kazı sonrası ortaya çıkan jet grout elemanlarda bu tip bir kontrol yapılabilir. Kazı yapılarak bu tip bir kontrolün yapılamayacağı yada istenmediği durumlarda ise geometri kontrolü yine karot delgileri ile yapılabilir.

Eğer jet grout imalatında amaç geçirimsizlik ise test yöntemi iyi belirlenmeli ve anlaşılmalıdır. Bunu test etmek için uygulanabilecek en sağlıklı yöntem tahribatsız ve güvenilir bir yöntem olan jet grout kolonlarla tam olarak çevrelenmiş içi zemin dolu tankta uygulanacak pompa deneyidir. Yerinde koyulan piezometre yöntemi ile de güvenilir sonuçlar elde edilebilmekte ve bu sonuçlar yaş numune testlerinden elde edilen sonuçlara yakın değerler vermektedir. Packer testi ise hiçbir tahribat olmadan karot numune alınabileceği kabulünü yapmaktadır ancak bunun çok zor olduğu kanıtlanmıştır ve Packer testinden elde edilen sonuçlar ile yaş numuneler üzerinde yapılan testlerden elde edilen sonuçların çok değişken bir korelasyon sergiledikleri bilinmektedir[9,15].

5. TEMEL TAKVİYESİ VE ESKİ ESERLERİN KORUNMASI:

Temel takviyesi çok kapsamlı bir konudur. Eski eserlerin yanında çok sayıda yeni eser de yanlış tasarım, zemin şartlarının doğru değerlendirilmemesi neticesinde hasara uğramakta ve temelleri ile ilgili takviye ve düzeltme gerektirmektedir. Halen Stockholm, Venedik gibi çok sayıda antik Avrupa şehirlerinde çeşitli eski eser hem üst yapıda hem de temellerde olmak üzere takviye edilmektedir.

Temeller ile ilgili takviye gereksinimi aşağıdaki sebeplerden bir veya birkaçının sonucu ortaya çıkmaktadır.

1. Sıkışabilir zemin tabakalarının farklı kalınlık veya özellikte olması,
2. Çok sıkışabilir tabakaların varlığı,
3. Yeraltı suyu rejimindeki değişiklikler, su çekme,
4. Çöken zeminler gibi özel zemin halleri,
5. Komşu kazılar, tünel kazıları gibi tesirler,
6. Yalı temeli gibi su ile irtibatta olan zeminlerde: dalga hareketinin sonucu olarak oyulmalar ve oturmaları engelleme,
7. Çürüme veya bozuşma (ahşap kazıklar, paslanma, sülfatlı ortamda temeller),
8. Diğer.

Yapılarda ortaya çıkan hasar genellikle ya komple yana yatma yada farklı oturma sonucu üst yapı elemanlarında çatlama ve ayrılmalar şeklinde olmaktadır [46].

5.1 Takviye Yöntemleri

Takviye yöntemlerini üç ana grupta toplayabiliriz:

1. Sığ takviye,
2. Alttan destekleme veya takviye kazıkları,
3. Enjeksiyon yöntemleri

5.1.1 Sığ Takviye

En fazla 4~5 m. derinlikte ve yeraltı su seviyesinin daha düşük olduğu hallerde, yapının altını planlı bir şekilde kazarak girip yeni temel ve/veya değişiklikleri yapmak şeklindedir. Genellikle duvar altlarına bir işçinin çalışabileceği en dar çukurlar ile ano ano çalışılarak ve 2~3 ano atlayarak yapılır (DIN 4123 gibi). Duvar ve sömeller önce geçici desteğe alınır ve bilahare yeni temel sistemi inşa edilir. Yapının ve takviyenin nedenlerine göre çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu gruba yatayda delerek veya boru sürerek elde edilen yatay ızgara takviye tipini de dahil edebiliriz.

5.1.2 Altın Destekleme veya Takviye Kazıkları

Bu grupta bütün kazık ve benzer elemanları toplayabiliriz.

- a. Normal çapta delme kazıklar 30~80 cm. arası kazıklar dışarıdan normal makineler ile, bodrumda da çalışacak ise 2~4 m. yükseklikte makineler ile yapılır.
- b. Parçalı itme kazıklar genellikle 20~60 cm. çapında ve 0.50~1.50 m. parçalar halinde zemine itilerek sokulmaktadır. Çeşitli patentler mevcuttur.
- c. Mini veya mikro kazıklar 7~30 cm. çaplı olup daha küçük (sondaj veya ankraj) makineleri ile yapılabilir. Kapalı hacimlerde çalışılabilecek özel tipleri bulunmaktadır. Büyük çaplı kazıklara göre bir avantajları da çeşitli eğimlerde yapılabilirlerdir.
- d. Zemin çivilemesi uygulaması, kısmen mikro kazıklara benzemektedir. İtilerek veya delerek yerleştirilen donatı genellikle eğimli ve pasif bir eleman olarak çalışmaktadır.

- e. Kalıcı veya sürekli öngermeli ankrajlar bu grupta düşünülebilir. Yana yatma ve benzeri deformasyon hallerinde, deformasyonları önleyecek şekilde öngermeli ankrajlar uygulanmaktadır.
- f. Delme kazıklarının yanında “Slurry wall” (çamurlu duvar) yöntemi ile yapılan dikdörtgen kazıkları da saymadan geçmemek yerinde olacaktır. Bu elemanlar yüksek taşıma kapasitelerine sahip olup bentonit karışımı desteği ile yapılmaktadır.

Bütün kazık ve benzeri elemanların ön yüklemesi bir alternatiftir. Bu takdirde proje yükleri altında kazıkların deplasman yapmaları önlenmektedir. Diğer taraftan hemen çoğu takviye yönteminde karşılaşılan esas sorun, mevcut üst yapı veya temel elemanlarını yeni hazırlanan sisteme bindirmeden önce, geçici destekleme ve daha sonra hazırlanan yeni sisteme yüklemektir. Bu işlem sırasında yapı elemanlarını sıfır deplasmanda tutmak gerekmektedir. Ayrıca bağlantı sistemi ve detayları çok önemlidir. Bazı hallerde yeni destek sistemine basarak yapının kaldırılması ve düzeltilmesi gerekmekte ve genellikle paralel bağlı kriko sistemleri ile olan bu operasyon sırasında yüklerin aktarılması ve mevcut yapının analizi daha fazla önem kazanmaktadır [46].

5.1.3 Enjeksiyon Yöntemleri

Temel Mühendisliği açısından enjeksiyon yöntemi, temel takviye çalışmalarında önemli bir yer tutmaktadır. Çeşitli tipte enjeksiyon uygulamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a. Daneler arasına zeminin yapısını bozmadan girecek şekilde bir enjeksiyon karışımı çimento/su'dan oluşmakta ise en çok orta kum ebadına girebilmekte, kil/çimento karışımları ise en çok kaba kumlara nüfuz edebilmektedir. Daha ince daneli zeminlere girmek, kimyasal enjeksiyon karışımları ile mümkün olmaktadır. En yaygın kimyasal enjeksiyon karışımı olan silikatlar ile ince kumlara ve kaba siltlere, daha ince (su viskozitesine yakın) özel rezinler ve diğerleri ile daha ince zeminlere girilebilmektedir.

- b. Zeminlerin daneleri arasına girmek yerine, biraz daha yüksek basınçla enjeksiyonu zemini çatlatarak yapraklanma şeklinde enjekte etmek çoğunlukla mümkün olmaktadır.
- c. Katı beton kıvamında malzemeyi biraz daha yüksek basınçla zemine enjekte ederek zemini tamamen deplase etmek mümkün olmaktadır. Kompaksiyon enjeksiyonu olarak adlandırılan bu yöntem özellikle yan yatmış ve oturmuş yapıların eski seviyelerine kaldırılmasında başarıyla kullanılmaktadır. Aşağıdan yukarı veya yukarıdan aşağıya uygulanabilen bu yöntemde, başlangıçta çevrede yapılan enjeksiyon özellikle daha yumuşak zeminlerde yöntemin tesirini artırmaktadır.
- d. Son senelerde popüler enjeksiyon yöntemi olarak ortaya çıkan jet enjeksiyonu temel takviye ve destek işlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Jet malzemesi ve basıncı ile zemin cinsine göre farklılıklar gösteren bu yöntemde zemin ile enjeksiyon malzemesi farklı oranlarda karıştırılabileceği gibi zemin tamamen dışarı alınıp enjeksiyon ile doldurmak mümkündür.
- e. Çevreyi sınırlayıp yapı-zemin kontağına enjeksiyon bazı hallerde çok etkin olabilmektedir[46].

Geçici bir yöntem olan dondurma tekniği kritik şehir içi takviye işlerinde kullanılmaktadır. Ancak hacim artışından dolayı oluşan kabarmaların takviye işine zarar vermeyecek seviyede tutulması gerekmektedir.

Sonuç olarak; alttan destekleme veya temel takviye işlerinde sığ durumlarda doğrudan kazarak destekleme yöntemleri, kazıklı yöntemler ve enjeksiyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Yapısal sistem hakkında detaylı bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Gerek doğrudan destekleme işlerinde, gerekse önce askıya alıp sonra destekleme işlerinde yapı mekaniği ön plana çıkmaktadır.

Bu işler sırasında hassas, sık ve devamlı ölçümler önem arz etmektedir. Genellikle karakteristik çatlaklar mikrometrik olarak ölçülür. Hassas topoğrafik ölçüm ağı, bütün destekleme işlerinde kaçınılmaz bir gerektir.

Zemin tabakalarının konumun ve özelliklerinin detaylı olarak bilinmesi, diğer çoğu geoteknik işlerde olduğu gibi, pek gereklidir [46].



6. TEMEL TAKVİYESİ YÖNTEMLERİNE YENİ BİR BAKIŞ:

Mevcut temellerin oturmalarını önlemek ve davranışlarını kontrol etmek için bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemleri şöyle özetleyebiliriz:

1. Geleneksel temel takviye yöntemleri,
2. Zemini iyileştirme esasına dayalı yöntemler,
3. Temel yüklerini derindeki taşıyıcı tabakaya aktarmak için kullanılan yöntemler.

6.1 Giriş

Mevcut temellerin davranışını incelemek ve oturmalarını kontrol etmek amacı ile çeşitli temel takviye yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemleri üç sınıfa ayırmak mümkündür:

1. Geleneksel temel takviye yöntemleri ile temelin genişletilmesi ve/veya derinleştirilmesi yoluyla temel davranışının iyileştirilmesine çalışılır.
2. Temel altındaki zeminin iyileştirilmesine dayalı yöntemler. Temel zemini, çimento enjeksiyonu, kimyasal enjeksiyon veya “jet grouting” kullanılarak iyileştirilir.
3. Temel yükleri daha derindeki taşıyıcı tabakaya aktaran yöntemler. Bu amaçla çakma kazıklar, itmeli kazıklar, mini kazıklar, jet grout kolonları kullanılır [47].

Temel takviyesi, başlıca üç amaçla uygulanır:

1. **Mevcut yapılarda değişiklik yapılması istenildiğinde.** Eski ve tarihi yapıların yenilenmesi veya bunlara yeni bir işlev kazandırılması için öngörülen değişiklikler, yapı yüklerinin artmasına neden olabilir. Bu durumda temellerin yeni yükleri taşıyabilecek şekilde takviyesi gerekir.

İkinci sınıf eski eser olarak ayrılan yapıların dış cephelerinin korunması kaydı ile, içlerinde yapısal değişikliğe izin verilmektedir. Bu gibi değişiklik ve ilave yükler, önemli temel sorunları çıkarabilmektedir.

2. **Koruma amacıyla.** Yapıların stabilitesinin aşağıda sayılan nedenlerle tehlikeye girmesi halinde, korunması ve iyileştirilmesi için temel takviyesi gerekebilir:
 - a. Komşu arsada yapılan derin bir kazı, sığ temelli yapılarda oturmalara ve temel zemininde hareketlere yol açar. Yapıyı emniyete almak amacı ile temellerin takviyesi ve derinleştirilmesi gerekebilir. Benzer şekilde metro kazıları veya sokak kotunun alçaltılması da temel takviyesini gerektirir.
 - b. Mevcut yapıların tadilatında, yapı yüklerinin kaldırılması veya bodrum kazanmak için kazı yapılması sonucu zeminde önemli elastik veya kalıcı deformasyonlar meydana gelebilir ve temellerin takviyesi gerekebilir.
 - c. Mevcut yapıların yakınından boru, kanal, tünel v.s. geçirilmesi gibi durumlarda temel takviyesi gerekebilir.
 - d. Killi zeminlerde kuruma nedeni ile veya ağaç köklerinden kaynaklanan oturmalar meydana gelebilir. Kurumaya karşı, 1.50~2.00 m. derinliğe inen sığ bir temel takviyesi yeterli olabilir. Ağaç köklerine karşı ise, temel takviyesi kök sisteminin iyice aşağısına doğru indirilmelidir.
 - e. Endüstri devamlı gelişmekte, fabrikalar yeni üretim yöntemlerini benimsemektedir. Bu yöntemlerin getirdiği makinelerin oluşturacağı titreşimlere karşı temellerin takviyesi zorunlu olabilir.
 - f. Yeraltı su seviyesinin değişmesinin yol açacağı ilave oturmalara karşı da önlem alınması gerekir.

Hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın temel takviye yöntemine karar vermeden önce; sondajlar, deneme çukurları ve numuneler üzerinde yapılacak laboratuvar deneyleri ile dikkatli bir zemin incelemesi yapılmalıdır.

Eğer temelin oturmalarına karşı takviyesi gerekiyor ise temel yükleri oturmalarından etkilenmeyecek bir derinliğe aktarılmalıdır. Bunun içinde arazi profilinin ve zemin özelliklerinin bilinmesi gerekir. Öte yandan, temelin takviye edilmesini gerektiren neden iyice belirlenmelidir. Oturmaların kaynağı çok derinde ise (Maden ocağı açılması gibi), temellerin kazıklar üzerine oturtulmaları bir yarar sağlamayacaktır [47].

6.2 Geleneksel Yöntemler

Temel takviyesinde ilk akla gelen yöntem, kazı yapılması ve mevcut temel altında bir beton kütlesi oluşturulmasıdır

Bu yöntem, kazı derinliğinin fazla olması veya yeraltı suyunun meydana getirdiği sorunlar nedeni ile her zaman ekonomik olmayabilir. Ya da yapı yükleri çok büyüktür, bir ilave beton kütlesi kabul edilmeyecek oturmalara neden olabilir.

Mütemadi (Sürekli) bir sömelin takviyesi için temelin altı, anolar halinde kazılır. Desteksiz bırakılabilecek uzunluk, usulüne göre inşa edilmiş tuğla duvarlarda 1.50~2.00 m.'yi geçmemelidir. Herhangi bir aşamada desteksiz kalacak uzunluk, yapı uzunluğunun dörtte birinden fazla olmamalıdır.

Betonlama, mevcut temelin 5~10 cm. altına gelene kadar sürdürülmeli, betonun prizi ve çekmesi beklenmelidir. Daha sonra kuru harç ile tam temas sağlanır. Bazen aradaki boşlukların çimento enjeksiyonundan yararlanılır.

Bir uygulamada; münferit sömeller üzerine oturan kooperatif binalarının hemen yakınından yol geçmesi nedeni ile, 5~6 m. derinliğinde kazı yapılması sonucu, stabilitenin bozulmasını önlemek için yol seviyesinin altına inen kuyu ayaklarla başarılı bir temel takviyesi yapılmıştır.

Her smel dört ano halinde takviye edilmiş, mevcut temel ile ayak arasındaki boşluk plaka sokularak sıkılanmıştır [47].

6.3 Temel Zemininin İyileştirilmesi

6.3.1 Enjeksiyon:

Temel takviyesi amacıyla kullanılan iyileştirme yöntemlerinden birisi enjeksiyondur. Genellikle zeminlerin geçirimsizliğinin azaltılması ve kayma mukavemetlerinin artırılması amacıyla kullanılır.

Enjeksiyon teknikleri 4 grup altında toplanabilir [47]:

- a. "Hydrofracture" enjeksiyonu,
- b. Sıkılama enjeksiyonu,
- c. Geçirimsizlik enjeksiyonu,
- d. "Jet grouting" (Harç püskürtme).

- a. "Hydrofracture" enjeksiyonunda, imento esaslı harçla zemin 10 kg/cm^2 'ye kadar bir basınç altında paralanır. Böylece zemin içinde enjeksiyon mercekleri ve tabakaları oluşur. Birbirleri ile bağlantılı olmayan boşluklar doldurulur, hatta zemin bir miktar sıkışır.

"Hydrofracture" enjeksiyonu, genellikle çökelmiş zeminlere uygulanır. Kontrolü güçtür. Çevredeki yapılara zarar verme riski büyüktür. Paralanmanın başladığı, enjeksiyon basıncının düşmesi ile anlaşılır.

- b. Sıkılama enjeksiyonu. Zemin-imento harcı oldukça büyük bir basınçla (35 kg/cm^2 gibi) zemine basılır. Gevşek veya örselenmiş zeminleri sıkıştırmak ve zeminin birim hacim ağırlığını artırmak için kullanılır. Böylece, yoğun, üniform bir kütle oluşturulur.

“Hydrofracture” enjeksiyonuna göre, enjeksiyon noktasından çok uzağa gitmeyen bir enjeksiyondur. Zemin yüzüne yakın yerlerde kabarmalara yol açabilir.

Sıkılama enjeksiyonun harcı, çimentolu veya çimentosuz siltli kumdur. Bu harç gevşek zeminleri sıkıştırmada başarı ile kullanılmaktadır. Sıkılama enjeksiyonun kullanıldığı başlıca yerler,

1. Gevşek dolguların veya gevşek doğal zeminlerin sıkıştırılması,
2. Yapıların kaldırılması,
3. Ayakların takviye edilmesidir.

A.B.D.’nin çeşitli yerlerinde inşa edilmiş, 14.50 m. yüksekliğinde, 30.00 m. çapındaki akaryakıt tanklarında meydana gelen farklı oturmaların tanklar boşaltılmadan kontrol altına alınabilmesi için, inşaat gabarisi dışından sıkılama enjeksiyonu yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır [47].

c. **Geçirimsizlik enjeksiyonu.** Enjeksiyon ile zeminin boşlukları, zeminin hacmi veya yapısı değiştirilmeden doldurulur. Kullanılan enjeksiyon harcı, zeminin dane çapı dağılımına bağlı olarak çok çeşitli olabilir. k, permeabilite sayısı 10^{-3} cm/sn olan zeminlerde silikat esaslı, 10^{-4} cm/sn. olan zeminlerde reçine esaslı harçlar kullanılır.

Son yıllarda, ince daneli çimento ile oluşturulan süspansiyonlar, daha ince zeminlere enjeksiyon yapılmasını mümkün kılmıştır .

6.3.2 Enjeksiyon harcı türleri:

En basit harç, su içinde çimento süspansiyonudur. Çimento harçları, erozyon ile veya gevşek ayrık daneli zeminlerin sarsıntılarla boşalması hallerinde kullanışlıdır. Bazen temel altına basınçlı çimento enjeksiyonu ile oturmuş olan temelin bir miktar kaldırılması sağlar.

Çimento harçları, çimento ağırlığının su ağırlığına oranı ile karakterize edilir. Bu harçlar önemli ölçüde çökelmeye maruz kaldıklarından stabil sayılmazlar.

Stabil olmayan harçlar sulandırılrsa da kumlara ve çakıllara yapılan enjeksiyonlarda yapılması doğru değildir.

Kaba kumlarda ve kumlu çakıllarda kimyasal enjeksiyon kullanılır. Böylece temel altındaki zeminde istenilen seviyeye kadar bir blok oluşturulur. Yanında kazı yapılacak temellerin emniyete alınması gibi hallerde sık kullanılmalıdır.

Enjeksiyon harçları üç sınıfa ayrılabilir[47]:

1. Taneli süspansiyonlar; çimento, kil, bentonit, bazen de kum ile hazırlanır. Çökelme hızına göre stabil veya stabil olmayan harçlardır.
2. Kimyasal harçlar da denilen solüsyonlardır. Bunlar Newton sıvılarıdır. Organik momomerlerden (Acrylamids, phenoplast, aminoplast) yapılır. Viskoziteleri suyunkine yakındır ve piriz yapana kadar da sabit kalır. Bunlara çoğu kez “organik reçine” denir. Kimyasal harçların yüzlerce çeşidi bulunmaktadır.
3. Gazların emülsifiye edilmesi ile elde edilen köpükler de enjeksiyon harcı olarak kullanılır. Bu köpükler kabarma sayısı ile tanımlanır. Kabarma sayısı, gazın hacminin sıvının hacmine oranıdır. Bu sayı zeminin boşluk oranına eşdeğerdir.

Zeminin enjeksiyon kabul edip etmeyeceğini anlamak için en iyi gösterge, zeminin permeabilite katsayısıdır. Kimyasal enjeksiyon harçları taneli olmadığı için kullanılabilmesi doğrudan zeminin permeabilite katsayısına bağlıdır. Taneli enjeksiyon harçları için ise bazı alt sınırlar vardır. Bu sınırlar,

Çimento harcı için 5×10^{-4} m/sn,

Kimyasal harç için 1×10^{-6} m/sn ‘dir.

Temel zemininin iyileştirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem “jet grouting” (Harç püskürtme)dir. Bu yöntem, temel yüklerinin taşıyıcı tabakalara aktarılmasında da kullanılmaktadır.

6.4. Temel Yüklerinin Daha Derindeki Taşıyıcı Tabakalara Aktarılması

6.4.1 Ayaklar ve Kazıklar

Çevredeki inşaat nedeni ile veya yüklerin artması, v.s. yüzünden meydana gelecek oturmaları önlemek için yapılan geleneksel temel takviyesi, bazen temeli derinleştirerek bir ayak oluşturulmasına dönüşür. Yurdumuzda geliştirilen kuyu yöntemi buna bir örnektir.

Taşıyıcı tabakaların derinde oluşu, ayak kazılmasında karşılaşılan güçlükler, ayak veya kuyu yapılmasını önleyebilir. Bu gibi durumlarda, kazıklar veya “jet grout” kolonları kullanılır [47].

Temel takviyesinde kazıklar, duvarın iki yanında olmak üzere çift çift imal edilir. Eğer binanın içinde kazık yapılamıyorsa bu kez dışarıda yapılan kazıklara duvar portafo olarak taşınır.

Yerinde dökme betonarme kazıklar, yapım sırasında fazla sarsıntıya yol açmadıkları için temel takviyesi işlerinde yaygın olarak kullanılır. Yeraltı su seviyesinin altındaki kumlu zeminlerde yılanma olmaması için, delik delme işleminin dikkatle yapılması gerekir.

Çelik çakma kazıklar, eğilme momentine veya yanal yükler olması durumunda kullanılır.

Temel takviyesinde kullanılan diğer bir tür ise itmeli kazıklardır. Prensip olarak kısa parçalar halinde zemine bir kriko vasıtasıyla itilerek sokulur. Nihai kriko yükü, kazık servis yükünden en az %50 daha büyük olarak seçilir. Böylece güvenlik sayısı, 1.5 alınmış olur. İtmeli kazık uygulamasında önemli nokta, kriko boşaltılmadan önce temel ve kazık arasına sağlam bir takoz yerleştirilmesidir.

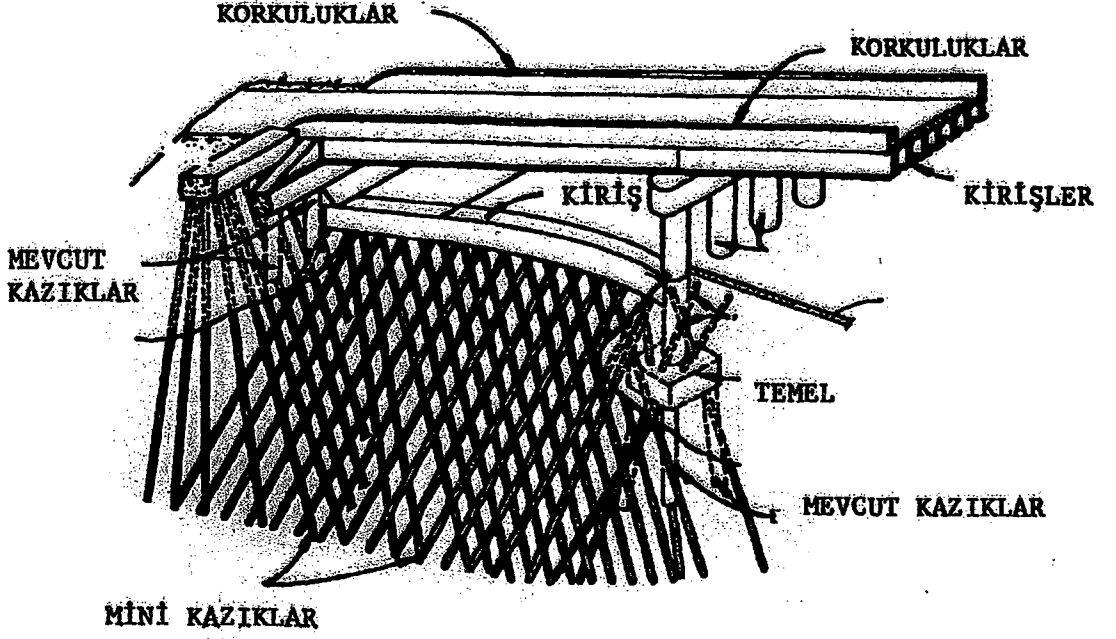
Temel takviyesi için son yıllarda çeşitli çapta kazık kullanılmaktadır. Yapım kolaylığı nedeni ile küçük çaplı, zemin delinerek ve enjeksiyonla doldurularak oluşturulan kazıkların kullanılması yaygınlaşmış bulunmaktadır. Bir tasnife göre çapı 300 mm. ile 600 mm. arasında olan kazıklara **küçük çaplı kazık**, çapı 300 mm. ile 75 mm. arasında olanlara **mini kazık**, çapı 75 mm.'den küçük olan kazıklara **mikro kazık** denilmektedir [47].

Mini ve mikro kazıkların belirgin özelliği, ankraj yapmakta veya enjeksiyon için kullanılan araç, gereçlerle ve konvansiyonel kazık makinelerinin giremediği yerlerde dahil kolayca imal edilebilmeleridir.

Mini ve mikro kazıklar, daha büyük çaplı kazıkların temelini dışında yapılmaları zorunluluğundan kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmaktadır. Bu kazıklar, temeli rotari ile açılan ufak çaplı delikle geçerek taşıyıcı zemine ulaşmaktadır. “**Pali radice**” (kök kazığı) adı verilen sistemle çeşitli açılarda eğimli, yerinde dökme betonarme kazık yapılmaktadır. İstenilen derinliğe inildiğinde 100 mm. çaplı tiplerinde bir çelik çubuk, daha büyük çaplı (300 mm.'ye kadar) olanlarda bir boru veya kafes deliğe indirilir. Gevşek zeminlerde veya yeraltı su seviyesinin altında uygulanması zordur.

Şekil 6.1’de Jackson, Mississippi’de bir karayolu köprüsünün temellerini takviye için kullanılan bir “pali radice” uygulaması görülmektedir.

Alanya-Obaköy’de 1986-1987 yıllarında çeşitli kalınlıklarda dolgu toprak üzerine inşa edilmiş 18 adet beş katlı binada 1991 yılına gelindiğinde 60~70 cm.’ye varan farklı oturmalar görülmüştür. Toplam ve farklı oturmaların sahada yer yer taşıma gücünün aşılmasından kaynaklandığı anlaşılmış, temellerin 120 cm. çaplı ve 8 mm. et kalınlığına sahip mini kazıklarla takviyesine karar verilmiştir. Bu arada aşırı oturmaya maruz kalan iki blok ise sadece takviye edilmekle kalmamış; binanın bütün kolonları krikolara alınmış (Şekil 6.2), böylece 40 kriko yardımı ile aşırı oturan tarafları 305 mm. kaldırılarak bina düzeltilmiştir.



Şekil 6.1 Bir “Pali radice” uygulaması [47].

Temel takviyesi yapıldıktan sonra yapılar 6 ay gözlenmiş; herhangi bir oturma ve deformasyon kaydedilmemiştir. 10.65 x 41.85 m, taban alanındaki düzeltilen blokların birer köşelerinin oturması 0.0 kabul edilerek hesaplanan farklı oturmaları, birinci blokta 34.8 cm, 52.0 cm., 21.0 cm., diğer blokta 22.5 cm., 37.2 cm., 12.3 cm. idi.

Başka bir örnekte, çapları 100 mm., boyları 6.25~7.26 m. olan mini kazıklar kullanılarak “dipsiz” Beaumont Kili içindeki temellerin takviyesi ile ilgili olarak kazık yükleme deneyleri yapılmış, çevre sürtünmesi değerlerinin o yörede yapılan büyük çaplı kazıklar için elde edilen değerler ile uygunluk gösterdiği belirlenmiştir

6.4.2 “Jet grout” Yöntemi

Gerek temel altındaki zeminin iyileştirilmesi, gerekse temel yüklerinin daha derindeki taşıyıcı tabakalara aktarılmasında diğer bir yol “jet-grout” harç püskürtme yöntemidir.



Şekil 6.2 Kriko kullanılarak binaların kaldırılması [38]

“Jet-grout” yönteminin uygulanmasında iki aşama bulunmaktadır: delme aşaması ve püskürtme aşaması [47]:

1. Delme aşamasında, “jet-grout” uygulanacak derinliğe kadar delme borusunun indirilmesi sağlanır. Bunun için borunun bitiminde kesici bir uç veya boru eksenine dik bir veya daha fazla ağızlığa (nozzle) sahip özel püskürtme valfi vardır.
2. Püskürtme aşamasında, boru yukarıya çekilirken çimento harcı yüksek hızla püskürtülür. Püskürtmenin etkisini arttırmak için boru bir yandan yukarı çekilirken bir yandan da döndürülür. Böylece zemin içinde silindirik bir çimentolu-zemin kütlesi elde edilir.

“Jet-grout” yöntemi kısa zamanda yaygın bir uygulama alanı bulmuştur.

İtalya'da bir termik santral inşaatında deşarj kanalının diyafram duvarları geçirimsizliği sağlayamamış, çevredeki zeminin ayrılmaya başladığı görülmüştür. Bunun üzerine kanalın içi suyla doldurulup zeminin ayrılması önlenmiş ve diyafram duvar çevresine üç sıra "jet-grout" kolonu ile oluşturulan bir geçirimsizlik perdesi imal edilmiştir. "Jet grout" kolonları, bir yanda -4.40 m. ile -13.00 m., diğer yanlarda +1.50 m. ile -13.00 m. arasında imal edilmiştir. Delik rotari yöntemi ile zemin yüzünden 17.50 m. derine kadar açılmış, çubuk yukarı çekilirken 0.40 m/dak. hızla çekilirken 20 devir/dak. hızla döndürülmüştür. Enjeksiyon harcının debisi 100 lt/dak., her metre delik için enjeksiyon miktarı 0.25 m³ olmuştur.

Zeminin dane birim hacim ağırlığının 27 kN/m³ (S), çimentonun birim hacim ağırlığı 30 kN/m³ (C) olduğuna göre, suya doymun harç zemin karışımının birim hacim ağırlığının

$$\gamma = \frac{(1 + S/W + C/W)}{(0.1 + 0.37S/W + 0.33C/W)} \text{ [kN/m}^3\text{]} \quad (6.1)$$

ifadesi ile verilebileceğini göstermiştir. Bu ifadede S/W ve C/W kuru zemin ile su, çimento ile su oranını göstermektedir [47].

Geçirimsizlik perdesinin davranışı uzun süre izlenmiş, sızma olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sızma önlendiği gibi, "jet grout" uygulaması sonunda civardaki mevcut yapılarda da gözlenebilir bir deformasyon meydana gelmemiştir.

Yeraltı su seviyesi altında yapılan derin temel çukurlarının geçirimsizliğinin sağlanmasında "jet grout" yönteminin kullanılması faydalı olmaktadır

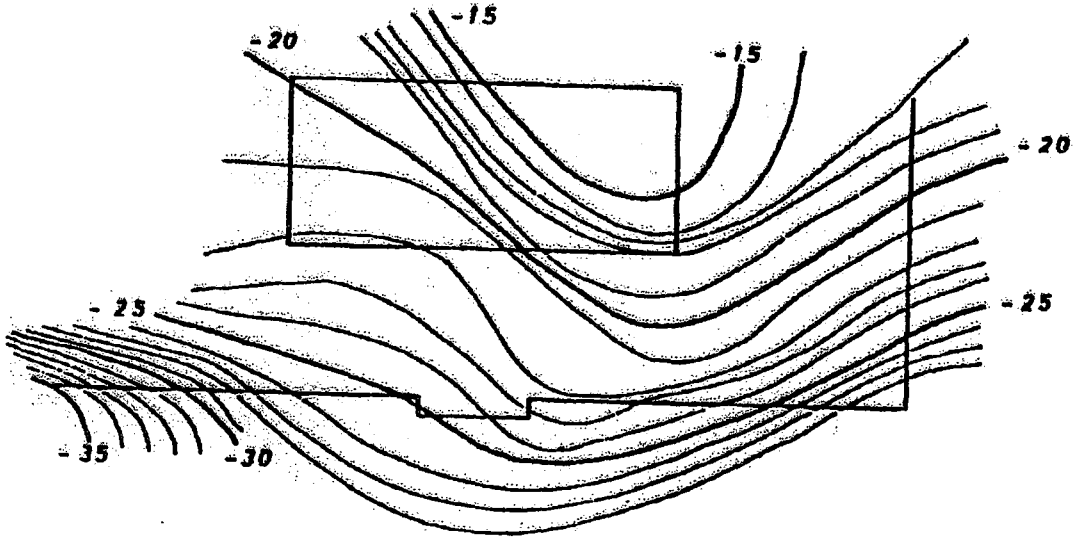
6.4.3 Bir örnek: Küçükse Kasrı Temel Takviyesi

Küçükse kasrı, Boğaziçi'nin Anadolu yakasında, Küçükse Çayırı'nın deniz tarafındadır. Boğaz'ın dar bir yerinde bulunuşu, zengin süslemeleri ve doğaya uyumu ile dikkat çekmektedir .

Kasır, bir zemin ve iki kattan oluşmuştur. 18 yüzyılın ortalarında aynı yerde klasik Osmanlı üslubunda ahşap bir kasır yapılmıştı. Bu kasra ait temel kalıntılarına onarım sırasında şimdiki kasrın temellerinde rastlanmıştır.

Küçüksu kasrı, kalınlığı deniz tarafında 20~23 m., kara tarafında 13~15 m.'yi bulan deniz oluşumu gevşek ve yumuşak tabakalar üzerinde inşa edilmiştir. İnce bir dolgu tabakası altında güney tarafta 5.60m. kalınlığında cıvık kıvamda az çakıllı siltli kil, bu tabakanın altında 11.00 m. kalınlığında gevşek az killi orta kabuk, daha altta 3.00 m. kalınlığında orta sıkı az kumlu ince kabuk; kuzey tarafta ise, 3.00 m. kalınlığında kum çakıl altında 1.50 m. kalınlığında cıvık kıvamda ince çakıllı siltli kil, altında 10.00 m. kalınlığında gevşek az killi iri kabuk, daha altta ise 3.00 m. kalınlığında yumuşak kıvamda iri kabuklu kil arazi profilini oluşturmaktadır. Taban kayası, batıya doğru 13°~15° derece eğimlidir (Şekil 6.3). Yeraltı su seviyesi 0.70~0.80 m. derinliktedir [47].

Onarım sırasında ortaya çıkan çatlak ve deformasyonların incelenmesi amacıyla ile 1975-1976 yıllarında bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yapının rijit bir cisim gibi döndüğü ve oturduğu belirlenmiştir. Kasrın 120 yıllık mazisine ait kayıt bulunmadığı için bir süre gözlem yapılmasının yararlı olacağı bu ilk çalışmanın sonuçları arasındadır.



Şekil 6.3 Küçüksu kasrında ana kaya derinlikleri [47].

Bu tarihten 1989 yılına kadar, çeşitli zamanlarda çeşitli kişi ve kuruluşlar tarafından yapının stabilitesini artırmak amacı ile çalışmalar yapılmıştır. Hareketlerin nedenleri olarak görülen; Kasrın arkasındaki yoldan geçen ağır vasıtalar yasaklanmış, Kasrın hemen yakınındaki iskeleye vapur seferleri durdurulmuştur. Kıyı şevlerinin iyileştirilmesi amacı ile deniz içinde dolgu yapılmış(1980), bahçede kasrı çevreleyecek şekilde, kayaya kadar ulaşan 55 adet sıkılama enjeksiyonu yapılmış (1983-1984), ve nihayet beton bloklarla rıhtım yapılmasına başlanılmıştır (1987).

Küçüksu kasrındaki çatlak ve deformasyonlar ilk kez 1975 yılında fotogrametrik olarak ölçülmüştür. Kasrın düşeyden sapması ve özellikle iç mekanlardaki çatlaklar iyi bir şekilde belirlenmiştir. Daha gelişmiş fotogrametrik yöntemler kullanılarak Nisan 1993 ve Haziran 1994 tarihlerinde iki seri ölçme alınmıştır.

Bu ölçmelerde Kasrın köşelerinin 4 seviyede düşeyden ayrılmaları ve hareket doğrultuları belirlenmiştir. Bu ölçmelerden Kasrın yaklaşık doğu-batı doğrultusunda denize doğru eğilmiş olduğu görülmüştür. Düşeyden en büyük ayrılma, güney-doğu köşesinde ve 17.40 cm.'dir.

Ocak 1989 tarihinden itibaren Kasrın ve bahçesinin hareket ve deformasyonlarının incelenmesine yeniden başlanmıştır. Binanın yakın çevresinde bahçe içinde 5, dışında 2, binanın deniz tarafında 2 adet ve binadan yaklaşık 390 m. ve 320 m. uzaklıkta, Ömür Tepe'nin üzerinde 2 adet olmak üzere toplam 11 adet "pilye" yerleştirilerek bir mikrojeodezik ağ oluşturulmuştur.

Mayıs 1989'dan başlayarak bu noktalar gözlenmiş, çalışmalar Ağustos 1991'e kadar sürdürülmüştür.

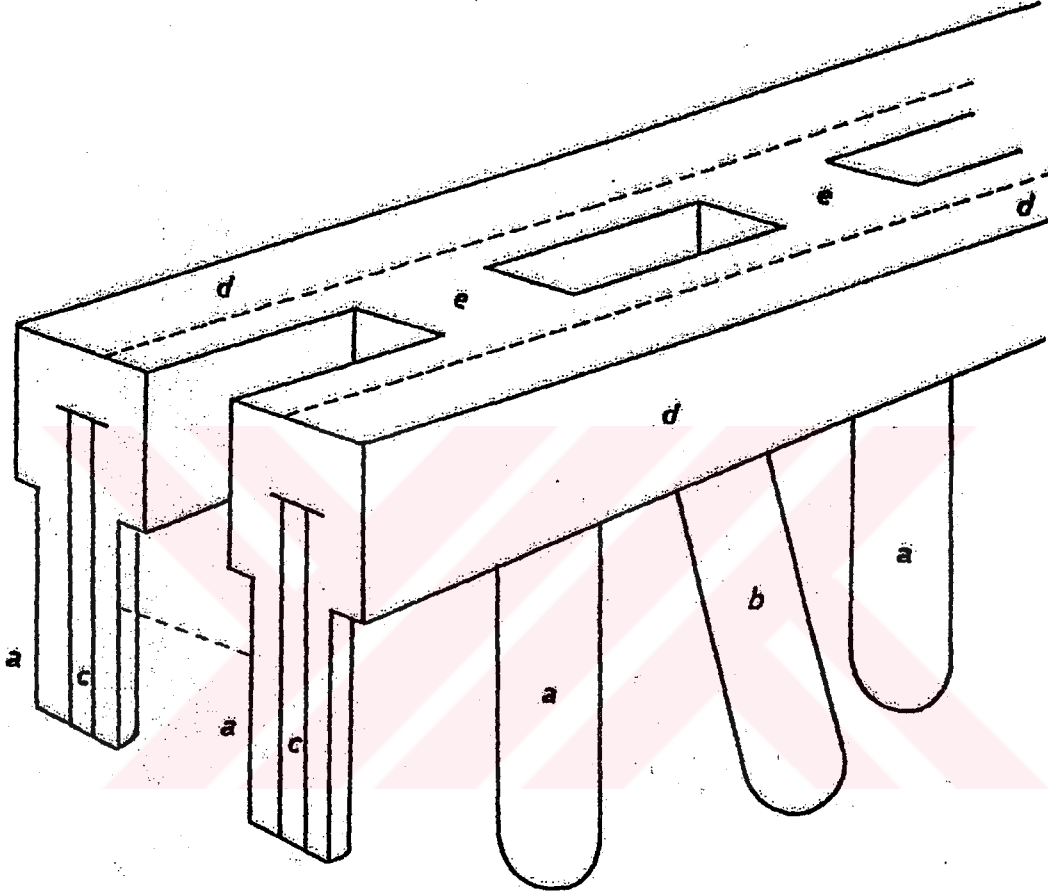
Aralık 1991'de tahrip edilme tehlikesine karşı birinci derece triangülasyon noktası olarak inşa edilmiş 6 noktalı bir kontrol ağı kurulmuştur. Ağda 4 sabit noktadan ikisi Küçüksu Sevda Tepesinde, biri Boğaziçi Üniversitesi Atatürk Korusunda, diğeri Anadolu Hisarındadır. Deformasyon noktalarının üçü de Kasrın çatısında yer almaktadır. Bu ölçmeler, 16 Ekim 1992'de başlayan temel takviyesi çalışmalarına yetişmiş ve inşaat sırasında yapıda herhangi bir hareket meydana gelip gelmediğini kontrol amacıyla da kullanılmıştır.

Ölçme sonuçları, Kasrın bahçesinde denize doğru hareket ve çökme şeklinde hareketler olduğunu göstermiştir. Mayıs 1989 tarihinden başlayarak yapılan ölçmelerde bir artış eğilimi gözlenmiş, önce bahçedeki ölçmelerde görülen bu eğilim, bina için tehlikeli boyutlara varmış, son ölçmelerde binada da oturmalar görülmüştür. Özellikle Ekim 1989'dan sonra deniz tarafındaki oturma ve hareketlerin artmış, gözle görülür hale gelmiştir. Rıhtım ve deniz tarafındaki duvar su altında kalmış, deniz tarafındaki süslü kapı tehlikeli bir biçimde denize doğru yatınca sökülerek korunmaya alınmıştır.

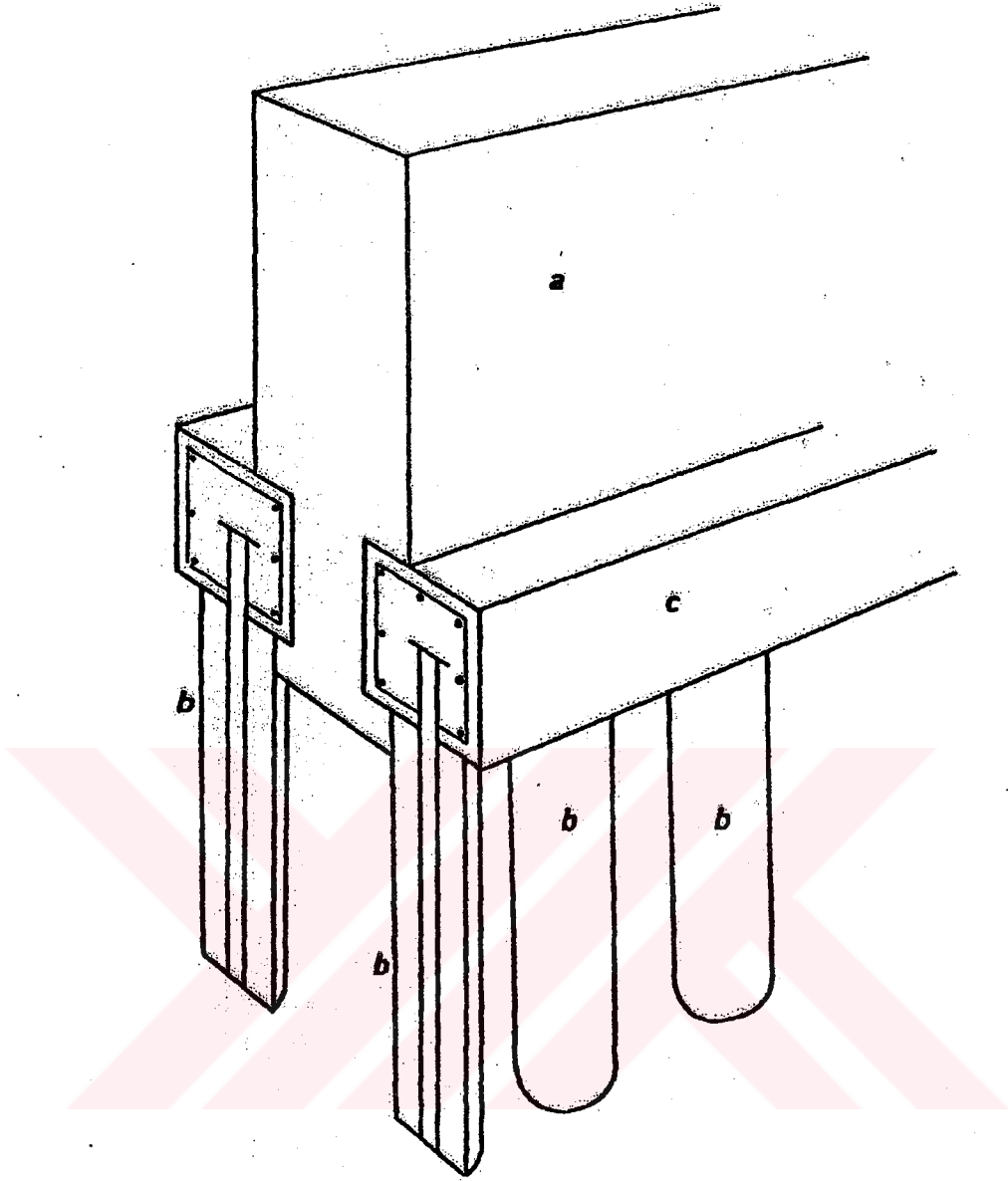
Binanın bir yandan denize doğru yatarken bir yandan da oturduğu anlaşılmaktadır. Bu hususa önceki yıllara ait ölçme ve rasatlar bulunmamaktadır. Kasrın çeşitli öğelerinin bugünkü durumlarına bakılarak bugüne kadar 0.50~0.60 m. mertebesinde bir toplam oturma meydana gelmiş olduğu tahmin edilebilir. Kasrın temellerini oluşturan ahşap ızgara ve bu ızgara altındaki ahşap kazıklar bir radye gibi davranmış, bu çapta oturmalar karşısında yapının daha fazla hasar görmesini önlemiştir.

Oturma ve deformasyonların hızlanması ve üst yapıda çatlak, ayrılma ve bahçede gözle görünür hareketlerin meydana gelmesi, temel takviyesini güncel hale getirmiştir. Takviye yapı yüklerinin “jet grout” kolonları ile kaya tabakasında aktarılması ilkesine göre yapılmıştır. Kolonların boyları, Kuzey cephesinde 23 m.'ye ulaşırken, kaya derinliğine bağlı olarak Güney cephesinde 15 m. civarında kalmıştır. “Jet grout” kolonlarının yapımına başlanılmadan deneme kolonları imal edilmiş ve çimento/su oranı 1:1, enjeksiyon basıncı 10 MPa olarak belirlenmiştir. Yapımda esas olarak tek akışkanlı yöntem uygulanmıştır. “Jet grout” kolonlarının içine dış çapı 89 mm., et kalınlığı 9 mm. olan ucu açık çelik boru yerleştirilmiştir.

Temellerin her iki yanında “jet grout” kolonları teşkil edildikten sonra bina temelleri yer yer açılarak her iki yana 0.60 x 0.65 m. kesidinde betonarme yanak kirişleri dökülmüştür (Şekil 6.4). Bu kirişler, duvar içine 0.20 m. kadar sokulmuş, ayrıca duvarda oyuklar açılarak yanak kirişleri enine kirişler ile birbirlerine bağlanmıştır (Şekil 6.5). Yanak kirişleri içine giren jet grout kolonları, yanak kirişlerinin omuzladığı duvar yüklerini kaya tabakasına aktarmaktadır [47].



Şekil 6.4 a-“Jet grout” kolonları, b- Eğik “jet grout” kolonları, c- Donatı, d- Yanak kirişleri, e- Enine kirişler.



Şekil 6.5 a-Kasrın mevcut bodrum duvarları, b-“Jet grout” kolonları, c-Yanak kirişleri

Temel takviyesi sırasında, yapıda ilave gerilme ve deformasyonlar ortaya çıkmaması için azami itina gösterilmiş, kazı ve imalat anolar halinde ve dengeli bir biçimde gerçekleştirilmiştir. İnşaat sırasında ve daha sonra alınan ölçüm sonuçları bunu doğrulamaktadır.

6.4.4 Hoca Ahmet Yesevi Türbesi Temel Takviyesi

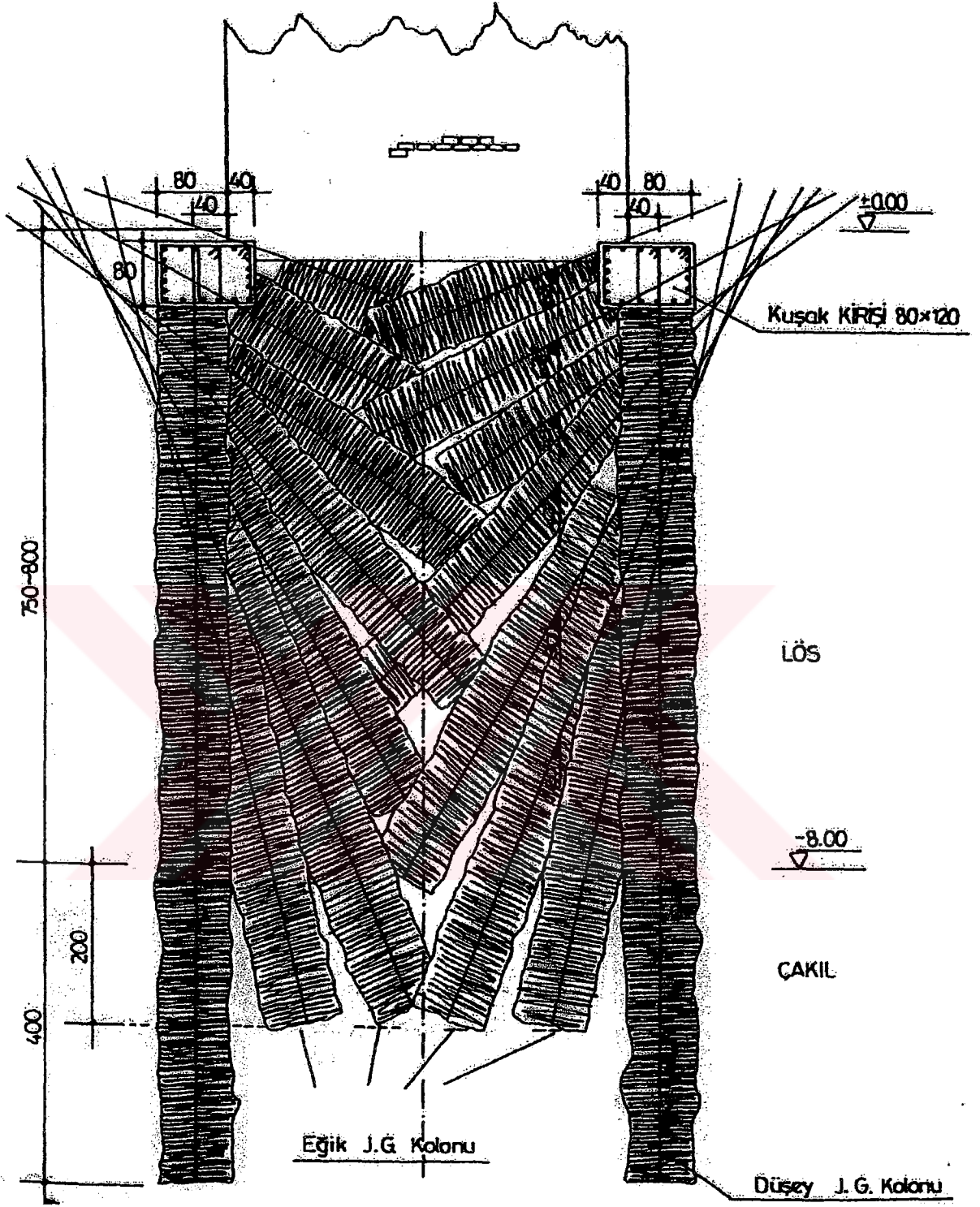
Küçüksu kasrındakine benzer bir uygulama Kazakistan'ın Türkistan kentinde bulunan Hoca Ahmet Yesevi Türbesinin temellerinin takviyesinde yapılmaktadır. Türbe 14. Yüzyılda inşa edilmiş, yüksekliğı 30 m.'yi geçen, tuğla bir yapıdır. Çeşitli zamanlarda hasara uğramış, onarım görmüştür.

Yapı temelleri ince kum ve silt olarak nitelendirilebilen bir lős oluşumuna oturmaktadır. Kalınlığı 5~7 m. olan bu tabakanın altında sıkı çakıl tabakası vardır. Yeraltı su seviyesi zeminden 7~10 m. aşağıdadır, fakat zaman zaman zemin yüzeyine kadar yükselmektedir [47].

Yapı ile ilgili, 1870'den beri alınan oturma kayıtları vardır. Yerel uzmanlar oturmaların 0.70 m. mertebesinde olduğı sonucuna varmıştır.

Bu görkemli ve Orta Asya'da büyük önem verilen yapının ne yazık ki, düzenli bir temeli bulunmamaktadır. Çeşitli zamanlarda yapılmış, onarım ve temel takviyeleri ise durumu bir hayli karmaşık hale getirmiştir.

Temel takviyesi, çakıl tabakasına giren "jet grout" kolonları ile yapılmaktadır. Temeller yanak kirişleri ile omuzlanmakta, betonarme yanak kirişleri yer duvarın içinden geçirilen raylarla birbirine bağlanmaktadır (Şekil 6.6).



Şekil 6.7 Hoca Ahmet Yesevi Türbesi - Temel iyileştirilmesi [47].

Kalın duvarların bulunduğu kısımlarda, yanlardan çeşitli açılarda “jet grout” kolonları oluşturularak temel altı zemini iyileştirilmektedir (Şekil 6.7).

7. JET GROUT YÖNTEMİ KULLANILARAK KAZI ÇUKURU VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNE BİR ÖRNEK: YÜKSEL ERİMTAN YALISI

7.1 İnşaat Sahasının Yeri ve Jeolojisi

Araştırma sahası, İstanbul Boğazının Asya yakasındaki Kanlıca semtindedir.

İnşaat sahası, İstanbul Paleozoyik arazisinin “Üst Devoniyen” yaşlı kayaçlarının içinde bulunmaktadır. Bu kayaçlar Kumtaşı-Kireçtaşı-Fosilli Şeyl (d_{2-3}) ardalanmalarından oluşur. Şeyl tabakalarının tabaka yüzeyleri yer yer kayma yüzeyleri olarak izlenmektedir.

Kumtaşı (d_{2-3}) tabakalı kıvrımlı (eğik durumlu), kırıklı, bol çatlaklı ve yer yer faylı, kayma yüzeyli bir yapısı olan birim özellikle İstanbul Boğazının her iki yakasında geniş alanlar kaplar.

Lokal olarak bölgede yapılan çalışmalarda üst Devoniyen yaşlı Kumtaşı-Kireçtaşı-Fosilli Şeyl tabakalarının üzerinde bulunan güncel altüvyon seviyeleri bulunmaktadır. Altüvyon altında sağlam ana kayaya rastlanılmamıştır.

7.2 Yapılan Araştırma Çalışmaları

7.2.1 Sondajlar

Sondajların yapımı sırasında zeminin göçmesini önlemek amacı ile 101 mm.’lik muhafaza borusu kullanılmıştır. Açılan sondajların yerleri Şekil 7.1’de görülmekte olup, numaraları ve derinlikleri Tablo 7.1’de gösterilmektedir.

Tablo 7.1 Sondaj numaraları ve derinlikleri

Sondaj No:	Derinlik (m.):
S-1	22.95
S-2	15.95
S-3	21.45

7.2.2 Numune Alma Yöntemleri

Sondajlar sırasında yapılan standart penetrasyon deneylerinden alınan zemin numuneleri cam kavanozlar içinde standart numune etiketleri ile etiketlenerek temsili numuneler halinde test için laboratuara sevk edilmiştir.

7.2.3 Arazi Deneyleri

7.2.3.1 Standart Penetrasyon Deneyi:

Deney dış çapı 50.8 mm., iç çapı 34.9 mm. olan yarık bir tüpün 63.5 kg ağırlığındaki bir tokmakla zemine çakılması ile yapılmıştır. Tokmanın serbest düşüş yüksekliği 0.76 m.'dir. SPT tüpünün zemine üç adet 15 cm.'lik girişi için vurulan darbe sayıları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Son iki 15 cm.'lik giriş için vurulan darbe sayılarının toplamı standart penetrasyon direncini (N) vermektedir. Bulunan değerler sondaj loglarında görülmektedir.

7.2.4 Yeraltı Suyu Gözlemleri

Sondajlar deniz seviyesinde yapılmıştır. Tüm sondajlarda yeraltı su seviyesinin, yüzey kotunda olduğu gözlenmiştir

7.3 Zemin Profili

Yüksel Erimtan yalısının oturduğu alanın geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile, yalı sahasında üç adet zemin inceleme sondajı ile zemin profili ve bu profili oluşturan tabakaların özellikleri belirlenmiştir.

Zemin profili, en üstte kalınlığı 3.85 ile 4.50 m. arasında değişen kontrolsüz bir dolgu ile örtülüdür. Dolgu; kil, silt, kum ve çakıldan oluşmaktadır. Deniz tarafında yapılan sondajlarda, “dolma zemin” 3.85 ile 4.50 m. arasında değişirken kara tarafında yapılan S1 no’lu sondajda dolgu kalınlığı 4.50 m.’yi bulmaktadır.

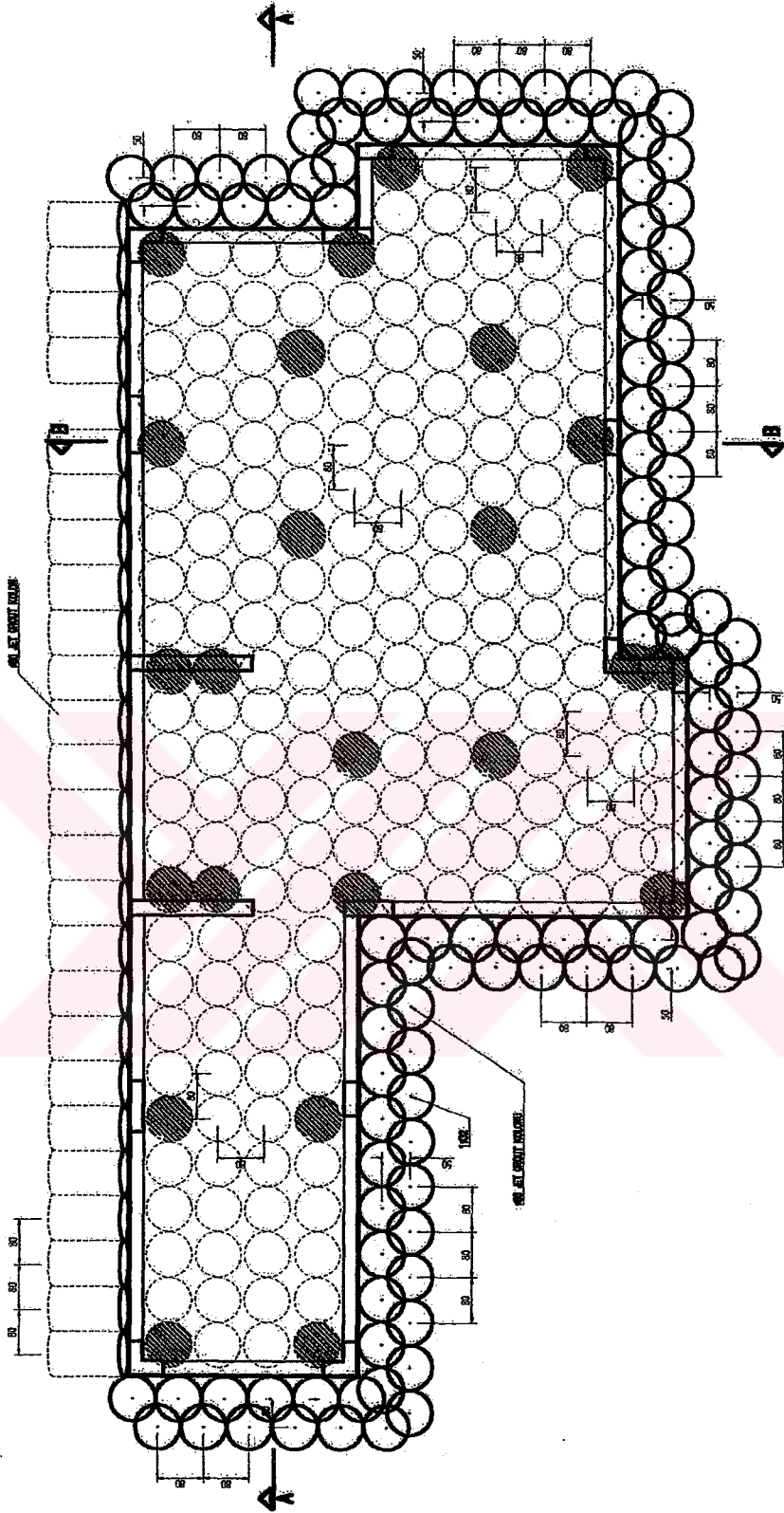
“Dolma zemin” altında gevşek-orta sıkı, gri renkli kabuklu killi KUM, kabuklu çakıllı KUM seviyeleri yer almaktadır. S1 ve S3 no’lu sondajlarda bu seviyelerin altında yarı katı-katı, açık kahve-sarı renkli, KİL tabakası bulunmaktadır.

7.4 Sonuç ve Tavsiyeler

Yalı’nın inşa edileceği yerde yeraltı su seviyesi, deniz seviyesindedir. Bu yüzden de temellerin su seviyesinin altında atılması gerekmektedir.

Arazinin yer yer kalınlığı 4.50 m.’yi bulan bir dolgu tabakası ile örtülü oluşu, dolgu tabakasının güvenilir bir temel zemini özelliklerine sahip bulunmayışı temel kazısı halinde su çekilmesi halinde kabarak zeminin mukavemetini kaybetmesi tehlikesi, temellerin daha çok derine atılması yada temelin zeminini iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan dolgu kalınlığının değişken oluşu, önlem alınmadan oluşturulacak yüzeysel temellerin farklı oturma yapmalarına yol açacaktır.

Temel zeminini oluşturan dolgu içinde gevşek kumların yer alması, deprem sırasında bir sıvılaşma olabileceği ihtimalinin incelenmesini gerektirmiştir.



Şekil 7.2 Jet grout aplikasyon planı (Ölçek: 1/50)

Yapılan incelemede, zeminin özellikle suya yakın kesimlerindeki kumların depremde sıvılaşma potansiyelini artıracak bir üniformluk göstermediği, çakıl boyutunda bol malzeme içerdiği görülmüş ve sıvılaşma tehlikesi bulunmayacağı kanaatine varılmıştır.

Temellerin teşkilinde diğer bir sorun, yeraltı su seviyesinin altında inşaat yapılması olacaktır.

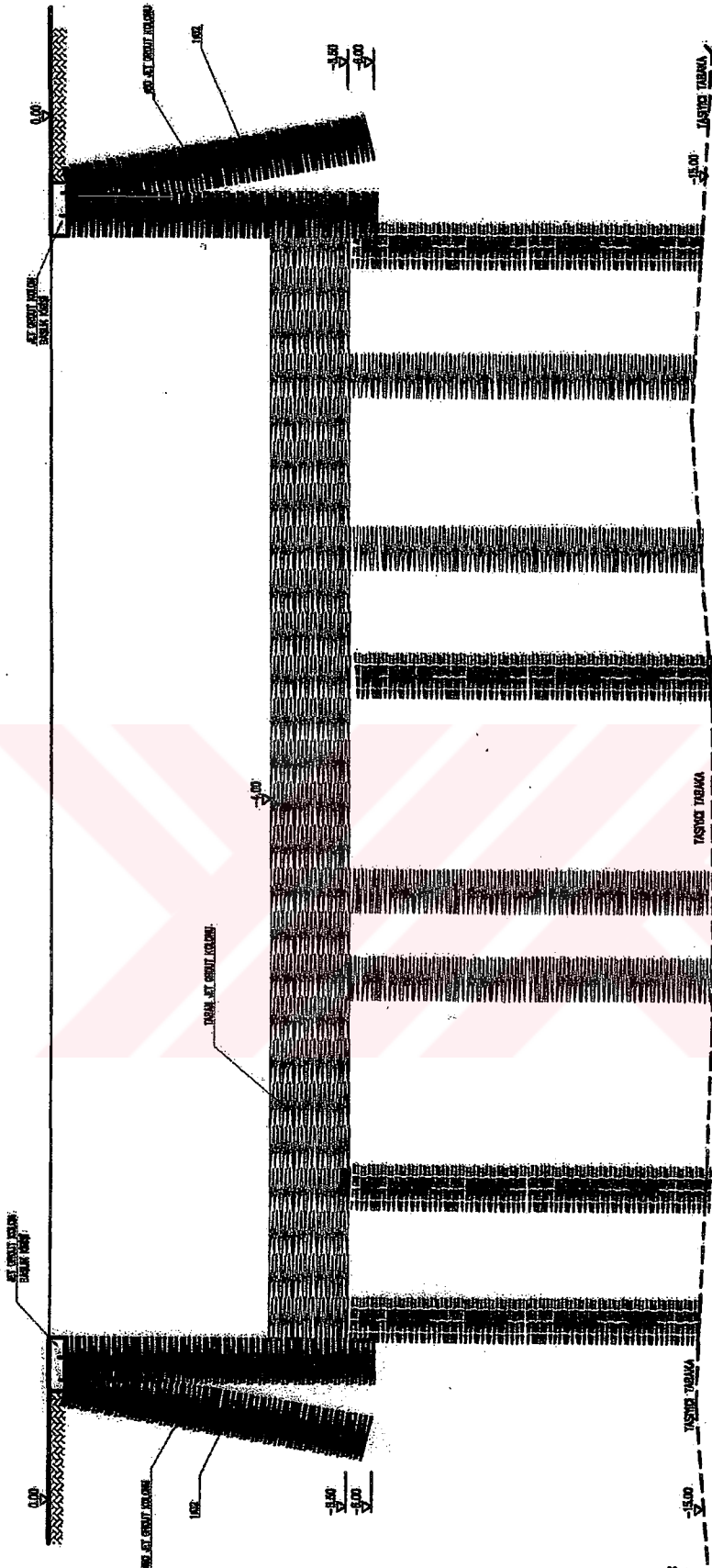
Yeraltı su seviyesinin altında 2.00 m. derinlikte yapılacak bir kazı dahi, temel zeminin kabarmasına yol açacaktır. Temel zemininin kabarması, zeminin daha gevşemesini ve taşıma gücünün azalması sonucunu doğurur. Zemin profilinin yüzeye yakın kesiminin dolgu ile örtülü oluşu, böyle bir kabarma sonucunda temel tabanındaki zeminin birbirine yakın noktalarda dahi, farklı davranması ile sonuçlanabilecektir.

Yukarıda açıklandığı üzere,

- a. temel zemininin iyileştirilmesi ve temelden gelecek yüklerin yeterli bir taşıma gücüne sahip olduğu anlaşılan kum/çakıl tabakasına taşıttırılabilmesi,
- b. temel kazısı sırasında taban kabarmasının ve temel zeminin bozulmasının önlenmesi,
- c. temellerin kuruda teşkil edilebilmesi için temel çukurunun “jet grout” tekniği kullanılarak “bohçalanması” tavsiye edilir. Böyle bir bohçalamanın ve yapı yüklerinin çakıl-kum tabakasına aktaracak “jet grout” kolonlarının aynı zamanda deprem halinde “sıvılaşma” riskini de en aza indireceği muhakkaktır.

Jet grout tekniği ile zemin içinde istenilen derinlikten istenilen derinliğe kadar jet grout kolonu yapılabilmektedir. Böylece, “jet grout” tekniği ile, kazı başlamadan önce, zemin içinde geçirimsizliği sağlamak üzere, temel altında ve kazı çukuru çeperlerinde istenilen geometride bir geçirimsizlik bohçası yapılabilmektedir. Bu yöntemle, temel kazısı tamamen kuruda yapılabilecektir.

Şekil 7.2’de jet grout kolonların ne şekilde yapılacağı görülmektedir.



Şekil 7.3 Jet grout ile bohçalama tekniği – AA kesiti (Ölçek: 1/50)

Zemine başka bir katkı maddesi kullanılmadan çimento harcı püskürtülerek oluşturulan bir geçirimsizlik bohçası, aynı zamanda zeminin taşıma gücünü artırmak ve temel yüklerini daha derindeki kum/çakıl tabakasına iletmek gibi bir fonksiyon gerçekleştirilecektir.

Taşıma özelliği bulunmayan dolgu tabakasının altındaki kabuklu killi kum ve kabuklu çakıllı kum tabakalarının üst kısımlarında ortalama Standart Penetrasyon değeri $N=8$ alınırsa, ampirik bağıntılardan $S_u=0.5 \text{ kg/cm}^2$ bulunur. Burada S_u : drenajsız kohezyonu ifade etmektedir. Taşıma gücü (q_d)nın hesaplanması için aşağıdaki ifadeyi kullanmak mümkündür:

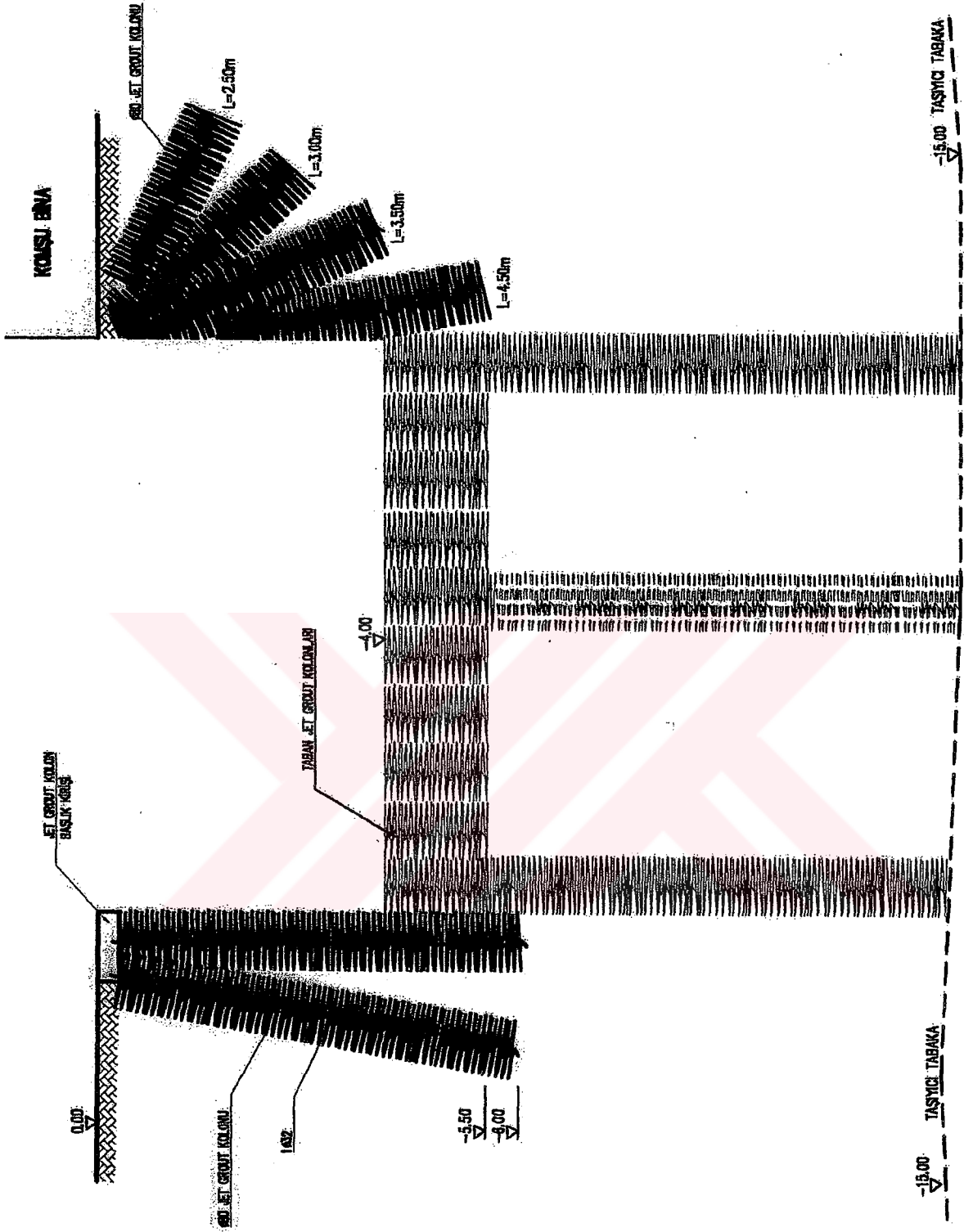
$$q_d = 5 \cdot S_u \cdot (1 + 0.2 D_f/B) \cdot (1 + 0.2 B/L) \quad (7.1)$$

Temel derinliğini $D_f = 3.50 \text{ m}$, yapının genişliği $B = 8.50 \text{ m}$, uzunluğu $L = 20.00 \text{ m}$ ve güvenlik sayısı 3 alınarak zemin emniyet gerilmesi (σ_{em});

$$\sigma_{em} = 1.0 \text{ kg/cm}^2$$

olarak hesaplanır.

Şekil 7.3'de imal edilecek olan jet grout kolonlarının AA doğrultusunda en kesiti görülmektedir. Şekil 7.4'de ise; BB doğrultusunda en kesiti görülmektedir.



Şekil 7.4 Jet grout ile bohçalama tekniği – BB kesiti (Ölçek: 1/50)

Tablo 7.2 Zemin deneyleri özet tablosu

Sondaj no	Örnek no	Derinlik		Su içeriği	Kıvam limitleri				Elek analizi %< Elek No				Zemin sınıflaması	
		ÜST m	ALT m		W _n %	W _L %	W _P %	I _P %	200 %	40 %	10 %	4 %		
S1	D1	1.50	1.95	37	45	22	23	13	35	60	72		SC	Çakıllı, killi KUM
S1	D2	3.00	3.45					1	2	7	29		GP	Kumlu, ÇAKIL
S1	D3	4.50	4.95					2	10	49	80		SW	Çakıllı, düzgün dağılımlı KUM
S1	D4	6.00	6.45	32	46	20	26	25	53	88	98		SC	Killi KUM
S1	D5	7.50	7.95	38	53	25	28	11	40	68	83		SP-SC	Çakıllı, killi uniform KUM
S1	D6	9.00	9.45	37	51	23	28	13	57	87	94		SC	Killi KUM
S1	D7	10.50	10.95	31	48	22	26	36	52	67	80		SC	Çakıllı, killi KUM
S1	D8	12.00	12.45	42	47	21	26	7	27	86	98		SW-SC	Killi, düzgün dane dağılımlı KUM
S1	D9	13.50	13.95	39	48	20	28	7	37	86	98		SP-SC	Killi, uniform KUM
S1	D10	15.00	15.45	41	47	22	25	11	49	78	97		SP-SC	Killi, uniform KUM
S1	D11	16.50	16.95	38	44	20	24	11	46	86	93		SP-SC	Killi, uniform KUM
S1	D12	18.00	18.45	42	50	24	26	11	78	96	100		SP-SC	Killi, uniform KUM
S1	D13	19.50	19.95	41	48	21	27	5	71	88	92		SP-SC	Killi, uniform KUM
S1	D14	21.00	21.45	23	57	22	35						CH	Yağlı KİL
S1	D15	22.50	22.95	21	44	20	24						CL	KİL
S3	D1	4.50	4.95					1	37	100	100		SP	Uniform KUM
S3	D2	6.00	6.45	31	47	22	25	16	36	70	82		SC	Çakıllı, killi KUM
S3	D3	7.50	7.95	44	48	21	27	17	39	66	78		SC	Çakıllı, killi KUM
S3	D4	9.00	9.45	37	51	22	29	13	33	66	87		SC	Killi KUM
S3	D5	10.50	10.95	42	50	25	25	6	29	82	92		SP-SC	Killi, uniform KUM
S3	D6	12.00	12.45	34	36	18	18	20	77	93	100		SC	Killi KUM
S3	D7	13.00	13.45	34	39	17	22	13	36	73	88		SC	Killi KUM
S3	D8	15.00	15.45	31	34	16	18	32	56	77	90		SC	Killi KUM

Tablo 7.3 Uygulama öncesi yapılan jet grouting test sonuçları

Deney no:	Basınç: (bar)	Geri çekme hızı: (cm/dak)	Karışım oranı: (çimento/su)	Jet grouting 'den önce kazan okuması: [h ₁] (cm)	Jet grouting 'den sonra kazan okuması: [h ₂] (cm)	[h ₂ -h ₁]: (cm)	Kolon boyu: (m)	Kullanılan enjeksiyonun hacmi: (m ³)	Mukavemetler: (kg/cm ²)
1	350	34,30	1/1	50	92	42	2	0.64	16.5
2	450	48,00	1/1	62	93	31	2	0.48	14.5
3	350	34,30	1/2	86	122	36	2	0.55	-
4	450	48,00	1/2	75	108	33	2	0.50	-

350 bar, 7 saniye ve 1/1 karışım oranı uygulandığında; en yüksek mukavemet değeri elde edilmektedir. 450 bar, 5 saniye ve 1/1 karışım oranı uygulandığında ise mukavemet değeri düşmektedir. Buna karşılık, çimento sarfiyatı ve işçilik masrafları (geri çekme hızı daha hızlı olduğu için) azalmaktadır. 3 ve 4 no'lu deneylerde ise karışımın 1/2 oranında olmasından dolayı ve jet grout yapıldıktan 28 gün sonra alınmasına rağmen karotiyer ile karot numunesi alınamamıştır. Karotiyer delerken jet grout kolonunu hıztmış ve sadece zemin içindeki taş parçaları alınabilmekmiştir.

7.5 Yüksel Erimtan Yalısı-Jet Grout ile Kazı Çukuru Yapılmasının Statik Hesapları

7.5.1 Hesap Kabulleri

- Jet grout kolonunda basınç gerilmesi, $\sigma_b = 40 \text{ kg/cm}^2$
- Zeminin birim hacim ağırlığı, $\gamma_t^c = 1.80 \text{ t/m}^3$
- Zeminin içsel sürtünme açısı, $\phi = 30^\circ$
- Betondan yapılacak başlık kirişi için birim hacim ağırlık, $\gamma_c = 2.40 \text{ t/m}^3$
- Jet grout kolonları için birim hacim ağırlık, $\gamma_{JG} = 2.10 \text{ t/m}^3$ alınmıştır.
- $\phi = 30^\circ$ için $K_o = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0.33$ olarak hesaplanır.
- Su altındaki zeminin birim hacim ağırlığı, $\gamma' = 0.80 \text{ t/m}^3$
- Su altındaki jet grout kolonları için birim hacim ağırlık, $\gamma_t'^c = 1.10 \text{ t/m}^3$
- Jet grout yapılmış zemin için $K_p = 7.55$ alınmıştır.

7.5.2 Kuvvetler

7.5.2.1 Koruyucu kuvvetler

$$W_1 = 1,30 * 0,50 * 2,40 = 1,56 \text{ t/m}$$

$$W_2 = 5,50 * 1,30 * 1,10 = 7,87 \text{ t/m}$$

$$W_3 = 2,00 * 1,50 * 1,10 = 3,30 \text{ t/m}$$

$$W_4 = \frac{1}{2} * (0,97 * 5,50 * 1,10) = 2,94 \text{ t/m}$$

$$W_5 = \frac{1}{2} * (0,97 * 5,50 * 0,80) = 2,13 \text{ t/m}$$

$$W_6 = 0,97 * 0,50 * 1,80 = 0,873 \text{ t/m}$$

$$P_p = \frac{1}{2} * 1,50 * 12,46 = 9,35 \text{ t/m}$$

7.5.2.2 Devirici kuvvetler

$$P_w = \frac{1}{2} * 3,50 * 3,50 = 6,13 \text{ t/m}$$

$$P_1 = \frac{1}{2} * 0,50 * 0,297 = 0,07 \text{ t/m}$$

$$P_2 = 0,297 * 5,50 = 1,63 \text{ t/m}$$

$$P_3 = \frac{1}{2} * 1,452 * 5,50 = 7,84 \text{ t/m}$$

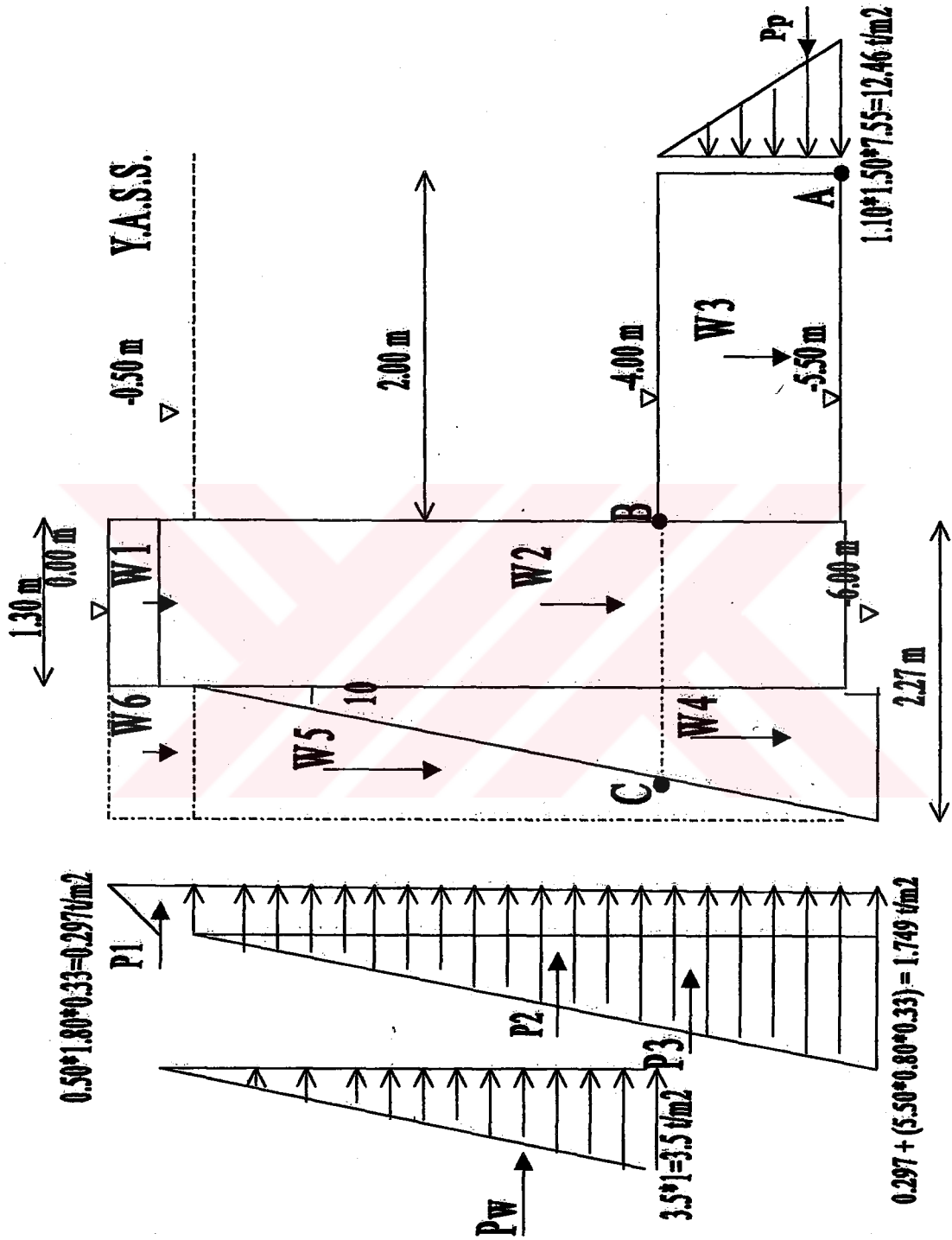
7.5.3 A noktasına göre momentler

7.5.3.1 Devirici momentler

$$\left. \begin{array}{l} (P_1 = 0,07t) \cdot 5,17m = 0,36tm \\ (P_2 = 1,63t) \cdot 2,25m = 3,67tm \\ (P_3 = 7,84t) \cdot 1,33m = 10,43tm \\ (P_w = 6,13t) \cdot 2,67m = 16,37tm \end{array} \right\} \sum_D = 30,83tm$$

7.5.3.2 Koruyucu momentler

$$\left. \begin{array}{l} (W_1 = 1,56t) \cdot 2,65m = 4,14tm \\ (W_2 = 7,87t) \cdot 2,65m = 20,86tm \\ (W_3 = 3,30t) \cdot 1,00m = 3,30tm \\ (W_4 = 2,94t) \cdot 3,62m = 10,64tm \\ (W_5 = 2,13t) \cdot 3,95m = 8,41tm \\ (W_6 = 0,873t) \cdot 3,79m = 3,31tm \\ (P_p = 9,35t) \cdot 0,50m = 4,68tm \end{array} \right\} \sum_K = 44,70tm$$



Şekil 7.5 Jet grouting ile oluşturulan elemanların kuvvet ve moment diyagramı

7.5.4 Tahkikler

7.5.4.1 Devrilme tahkiki

A noktasına göre: $\sum_D m = 30,83tm < \sum_K m = 44,70tm$

$$F_s = \frac{44,70}{30,83} \cong 1,50$$

7.5.4.2 Kayma tahkiki

- Toplam düşey yük: $\sum F_z = 18,67 \text{ t/m}$
- Koruyucu kuvvet: $\sum F_r = \sum F_z * p + \sum P_p$
 $\sum F_r = (18,67 * 0,50) + 9,35 = 18,69 \text{ t}$
- Kayma kuvveti: $\sum F_s = P_w + P_1 + P_2 + P_3 = 15,67 \text{ t}$

$$\boxed{\sum F_s < \sum F_r}$$

Yapılan hesaplara göre koruyucu kuvvet, kayma kuvvetinden büyük çıktığı için, istinat duvarı gibi çalışacak olan jet grout elemanlarında herhangi bir hareket söz konusu olmayacaktır.

7.6 İşin yapılması:

Jet grout'un yapılması aşamalarından (delgi ve enjeksiyon) hemen sonra, her bir delgiye projede öngörülen donatı indirilir.(Şekil 7.6) Jet grout elemanları projeye uygun olarak (Şekil 7.2) öncelikle kenardaki jet grout kolonları birer adet atlayarak tamamlanmıştır. Burada amaç, kolonların yanyana imal edilmesinden ötürü, prizini henüz tamamlamamış kolonları yüksek basınçlı enjeksiyon ile paralamamaktır.

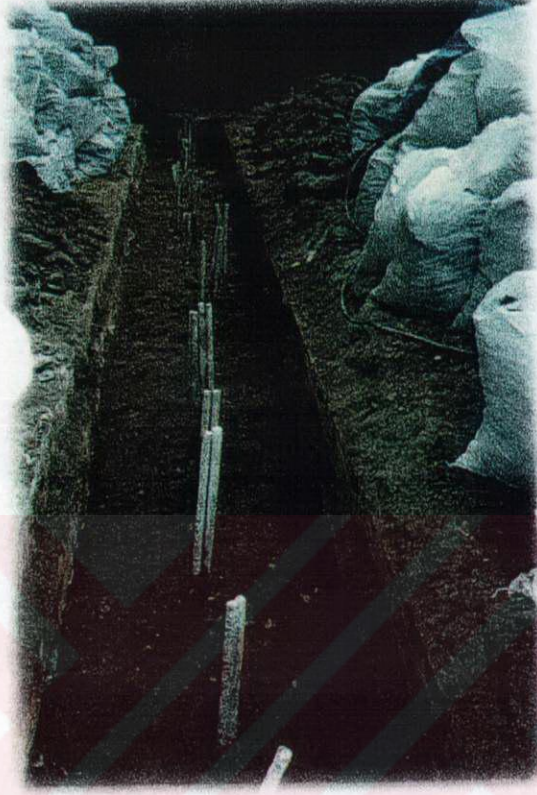
Daha sonra kenardaki kolonların ilk sıraları yani atlanılan noktalar bitirilmiştir. Aynı işlem ikinci sıra için de yapılmıştır. (Eğer projede n adet kenar jet grout elemanları olsa idi, yukarıda anlatıldığı gibi n kere tekrarlanılacaktı).



Şekil.7.6 Jet grout işlemi biter bitmez donatının indirilmesi

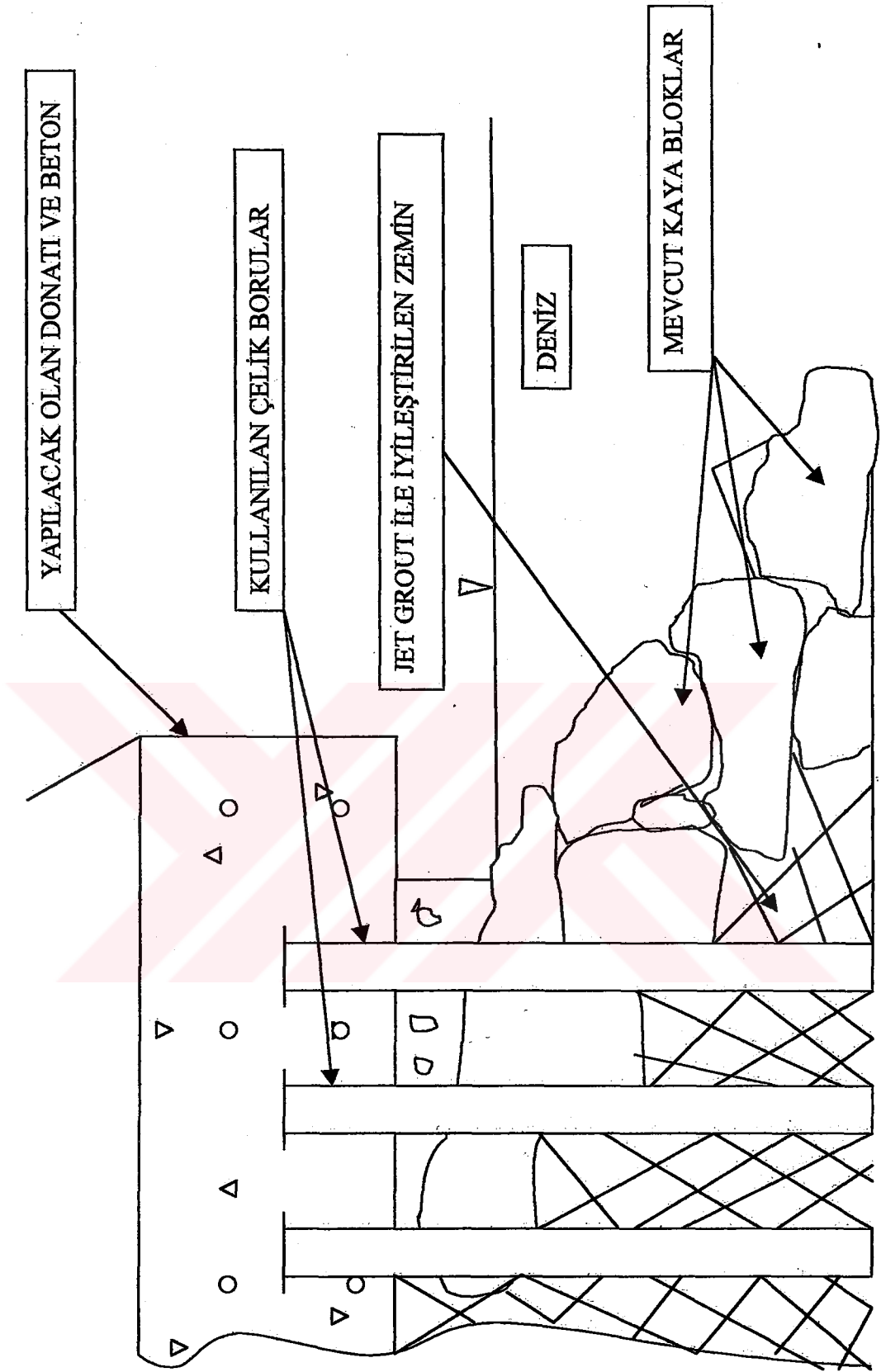
Birer adet atlanarak devam eden uygulama bina temelini oturacağı saha için de yapılmıştır. Böylelikle tam bir bohçalama yapılmış ve diğer jet grout kolonlarının zarar görmemesi sağlanmıştır. Sonra Şekil.7.7’de görüldüğü gibi, sadece kenardaki jet grout elemanlarının, 50 cm. kadar başları kırılmıştır. Projede kolon başına ikişer adet düşen 22 mm.’lik donatı düşmektedir. Bu donatının üst kısımları, yapılacak olan başlık kirişinin donatısını içinde kalacak şekilde donatı yerleştirilir ve beton dökülür. Başlık kirişinin yapılmasındaki gaye, özellikle kazı çukurunun açılması sırasında kenar jet grout elemanlarının bir bütün olarak (Yani istinat duvarı gibi) davranmasıdır.

Böylelikle kazı çukurunun açılması,kazı tabanının kabarmasının önlenmesi ve zeminin takviye edilmesi için gerekli tüm çalışmalar tamamlanmıştır.



Şekil.7.7 Başlık kirişinin yapılabilmesi için mevcut jet grout elemanlarının yaklaşık 50 cm. kadar kırılması.

Mevcut rıhtım zemininin iyileştirilmesi için; jet grouting yöntemi ile kıyıda bir çeşit kazık imali öngörülmüştür. Burada uygulanan işlem sırası: gene delgi ve enjeksiyon hemen akabinde ise donatı yerine delgi çapından biraz küçük olarak iki ucu açık boru indirilmesi ve boru içinde enjeksiyonun yetersiz kalması halinde, yine enjeksiyon ile doldurulmasıdır. Buradaki yöntemde amaç, boruları delgi kotundan yaklaşık olarak 25 cm. yukarıda bırakmak ve üzerlerine kare şeklinde kapak yaparak, dökülecek olan betonun ve donatının içersinde kalmasını sağlamaktır. Bu işlemde zamanından önce bitirilerek işverene teslim edilmiştir. (Şekil.7.8)



Şekil 7.8 Jet grout yönteminde çelik borular kullanılarak rıhtım yapılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında jet grouting yönteminin uygulanışı, kullanılan ekipman ve araçlar, uygulama teknikleri, uygulama teknikleri, uygulamanın başarısının belirleyen çalışma parametreleri, iyileştirilmiş zeminin fiziksel özellikleri, yöntemin avantajları, limitleri ve uygulamada dikkat edilmesi gereken hususlar, yöntemin tasarım esasları, uygulamanın kalite kontrolü, yöntemin uygulama alanları, temel takviyesi ve eski eserlerin jet grouting yöntemi ile korunması ile yöntemin uygulandığı bir örnek detaylı olarak incelenmiştir.

Örnek çalışma olarak, Kanlıca'daki Yüksel Erimtan yalısında kazı çukurunun oluşturulması, temel zeminin takviye edilmesi, kıyıda kazık imal edilmesi amacı ile jet grouting uygulaması, projenin her aşamasında bizzat izlenerek detayları ile tez çalışmasına dahil edilmiştir.

Proje kapsamında, zeminin temel mühendisliği açısından değerlendirmeye yönelik zemin etütleri gerçekleştirilmiş olup yapılan analizler sonucunda, sözkonusu zeminde oturma problemi, kabarma problemi ve muhtemel sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

Bu durum sunucunda jet grout kolonların yanyana uygulaması ile $\varnothing$ 80 cm. çaplı; toplam 2140 m. boyunda temel altında , bohçalama ile kazı iksası sağlamak amacıyla toplam 436 adet jet grout kolon teşkil edilmiştir. Projede tekli jet sistemi tercih edilmiş olup enjeksiyon basıncı 350~375 bar, tijin geri çekilme hızı 24 cm/dak., tijin dönme hızı 10 devir/dak., enjeksiyon memesi çapı 2,0 mm, su/çimento oranı=1 ve birim metrede kullanılan çimento miktarı 225 kg olarak kullanılmıştır.

Uygulamada kalite kontrolünün yapılması amacı ile değişik; basınçlarda, geri çekme hızlarında ve karışım oranlarında deneme jet grout kolonları yapılmıştır.

Kolonlardan karot numuneleri alınmış ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. 350 bar, 34 cm/dak. geri çekme hızı ve su/çimento oranının 1/1 alınmasıyla 16,5 kg/cm² mukavemet bulunmuştur.

Gerçekleştirilen uygulama sonunda yapılan kontrol ve deneylerin sonuçlarına göre istenilen mukavemet özelliklerine ve zemin parametrelerine ulaşılmıştır. 60 gün gibi kısa bir sürede bitirilmiş ve kazı çukurunun oluşturulması işleminde herhangi bir su problemi ve istinat duvarı gibi çalışan jet grout kolonlarında hareket olmamıştır.

Jet grouting yöntemi çok farklı zemin koşullarında ve çok geniş uygulama alanlarında uygulanabilmekte ve gerek maliyet, gerekse zaman açısından diğer zemin iyileştirme yöntemlerine geçerli bir alternatif olmaktadır.

Bunun yanında jet grouting yöntemi ile diğer zemin iyileştirme yöntemleri arasındaki en büyük fark elde edilecek zemin parametreleri ve maliyetin işin başlangıcında tahmin edilebilmesidir.

Yöntemde kullanılacak çalışma parametrelerinin seçimi, arazide karşılaşılan zemin koşullarına ve teşkil edilecek kolonların istenilen fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Yöntemin başarısı, bu yöntemin bağlı bulunduğu parametrelerin uygun biçimde seçimine bağlıdır. Uygulanacak sistemin oluşturulması, istenilen kolon çapına göre seçilmelidir.

Jet grouting yönteminde tek ve kesin bir hesap yöntemi oluşturmak mümkün değildir. Şantiyelerdeki denetim sonuçlarının teori ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi, bu yöntem için çok önemlidir.

Temel takviyesi yöntemleri, temelin genişletilmesi ve/veya derinleştirilmesi şeklinde özetlenebilecek geleneksel yöntemler, temel zeminin iyileştirilmesine dayalı yöntemler ve temel yüklerinin daha derindeki taşıyıcı tabakalara aktarmayı amaçlayan yöntemler olarak üçe ayrılabilir.

Hangi yöntemin belirli bir durumda daha yararlı olacağına karar verilebilmesi için arazi profilinin ve zemin özelliklerinin sondajlar, arazi ve laboratuvar deneyleri ile itinalı bir şekilde belirlenmiş olması gerekir.

Son yıllarda ortaya atılan ve yaygın bir kullanım alanı olan mini ve mikro kazıklar, “jet grout” gibi yöntemler, temel takviyesi alanında yeni olanaklar yaratmıştır. Kullanılan araçların geniş hareket kabiliyeti, çevre bakımından en az mahzurlu oluşları, yüksek riskli inşaatlarda can güvenliği sağlamaları, inşaatın süresini kısaltabilmeleri gibi birçok yarar sağlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Okyay, S., 1987. Yüksek Basıncılı enjeksiyon, *Rapor*, BAUER Spezialtiefbau GmbH, İstanbul.
- [2] ISSMFE-TC-17, 2001, Jet Grouting, <http://wolf.poly.edu/jet-grouting.htm>
- [3] Gallavresi, F., 1992. Grouting Improvement of Foundation Soils, *Proceedings of the Conference of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, New Orleans, Louisiana, 25-28 February 1992, Vol.1, pp. 1-38, ASCE, New York.
- [4] Bell, F. G., 1993. Engineering Treatment of Soils, E & FN Spon, London.
- [5] Haussmann, M. R., 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, Singapore.
- [6] Moseley, M. P., 1993. Ground Improvement, Chapman & Hall, Boca Raton.
- [7] İncecik, M., 1999, Zemin Stabilizasyonu ve Zemin Yapıları Ders Notları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [8] Van Impe, W. F., 1989. Soil Improvement Techniques and their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [9] Kutzner, C., 1996. Grouting of Rock and Soil, A.A. Balkema, Rotterdam.
- [10] Nonveiller, E., 1989. Grouting Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam.

- [11] Henn, R. W., 1996. Practical Guide to Grouting of Underground Structure, Thomas Telford, London.
- [12] Welsh, J. P. and Burke, G. K., 1991. Jet Grouting – *Uses for Soil Improvement, Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress 1991*, Boulder-California, 10-12 June 1991, Vol. 1, pp.335-345, ASCE, New York.
- [13] Toğrol, E., 1998, “Jet Grout Kolonların Yapımında Kalite Denetimi” , *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7.Ulusal Kongresi*, İstanbul, 22-23 Ekim 1998, Cilt 2 s:393-402, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [14] Juran, I.; Ider, H. M. And Acar, Y. B., 1988. Soil Improvement Methods for Reinforcing Foundation Soils-*Jet Grouting and Compaction Grouting*, Vol. 7, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
- [15] Schaefer, V. R., 1997. Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment Developments 1987-1997, *Proceedings of Sessions sponsored by the Committee of Soil Improvements and Geosynthetics of the Geoinstitute of the ASCE*, Geotechnical Special Publication No:69.
- [16] Melegari, C. and Garassino, A.L., 1997. Seminar on Jet Grouting, CI-Premier Pte. Ltd.,Singapore.
- [17] Novatechna Co, 2001, history of jet grouting, ,
<http://www.novatechna.com.br/4000htm>
- [18] Kauschinger, J.L.; Perry, E.B. and Hankour, R., 1992. Jetgrouting: State of the Practice, *Proceedings of the Conference of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, New Orleans, Louisiana, 25-28 February 1992, Vol.1, pp. 169-181, ASCE, New York.
- [19] Gökmen, C., 1992. Compaction Grouting and Jet Grouting. CE 7335, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.

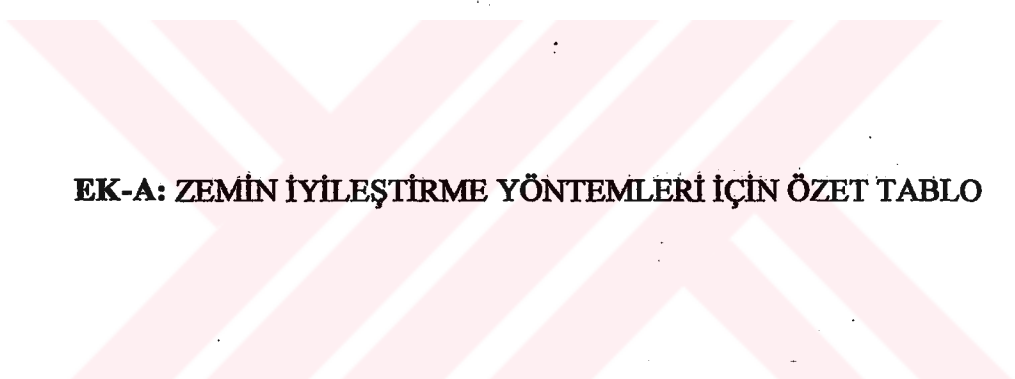
- [20] **Welsh, P.**(editor), 1987. Soil Improvement – A Ten Year Update, *Geotechnical Special Publication*, No:12, ASCE, New York.
- [21] **Welsh, J.P. , Rubright, R.M. & Coomber, D.B. ,** 1986, "*Jet grouting for Support of Structures Session*" , ASCE Spring Convention - Seattle
- [22] **ASCE Committee on Replacement and Improvement of Soils,** 1986, "Soil Improvement A Ten Year Update" , *Proceedings of Symposium at ASCE Convention*, Atlantic City, New Jersey, April 28 , Edited by J.P. Welsh
- [23] **Bell, A.L. , Burke, G.K. ,** 1994, "The Compressive Strength of Ground Treated Using Triple System Jet Grouting" , *Grouting in the Ground* , Thomas Telford , London , pp:525-538
- [24] **Petropages,** 2001, <http://www.petropages.com/keywords/k563htm>
- [25] **Rodio & C., S.p.a.,** 1987 , "Casalmoico Trial Field", *Rodio Report No:20455/1, 20455/4*, April.
- [26] **Covil, C.S. , Wilson Kirkpatrick & Partners, Skinner, A.E. ,** 1994, "Jet Grouting – a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process" , *Grouting in the Ground*, Thomas Telford , London
- [27] **Coomber, D.B. ,** 1985 , "*Tunneling and Soil Stabilization by Jet Grouting*" , *Tunnelling'85* , The Institution of Mining and Metallurgy , pp:227-283
- [28] **Cippo, P.A. , Tornaghi, R. ,** "Soil Improvement by Jet Grouting", *Rodio S.p.a., Brochure Technical Paper*

- [29] STFA Temel Araştırma A.Ş., Fotoğraf arşivi.
- [30] Bruce, D. A. and Pellegrino, G., 2001. Jet Grouting for Solving Tunneling Problems in Soft Clays, <http://www.nicholson-rodio.com/papers/bruce/clay.htm>
- [31] Kanematsu, H. , 1980 , “*High Pressure Jet Grouting Method*” , Doboku Skoh, (Civil Construction), Vol:21 , No:13 , November
- [32] Miki, G. , Nakanishi, W. , 1984, “Technical Progress of the Jet Grouting Method and Its Newest Type” , *Proceedings of the Internal Conference of the In Situ Soil and Rock Reinforcement* – Vol:1, pp:195-200 , Paris, October 9-11
- [33] Burke, G. K. , Welsh J.P. , 1991, “Jet Grout Uses for Soil Improvement” , *Geotechnical Engineering Congress*, ASCE Special Publication No:27, Vol:1, pp:403-419
- [34] Covil, C.S. , 1991, “Jet Grouting – A State of the Art Review” , *Msc. Thesis*, Imperial College, London
- [35] Guatterri, G., Kauschinger , J.L., Doria, A.C.& Perry, E.B. , 1988, “Advances in the Construction and Design of Jet Grouting Methods in South America” , *Proceedings of the 2nd. International Conference on Case Histories on Geotechnical Engineering*, St. Louis MO June 1-5, pp:1037-1048
- [36] Shizbaki, M., Ohta, S., 1982, “A Unique Underpinning for Soil Solidification Utilising Super High Pressure Jet Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering” , ASCE, New Orleans, pp:680-693

- [37] **Pagani Geotechnical Equipment**, 2001. Jet Grouting Recording Data JGR-2, <http://www.pagani-geotechnical.com/immagini/jumbo.jpg>
- [38] **STFA-Temel Araştırma A.ř.**, 2001, Jet grouting Uygulamaları, İstanbul.
- [39] **Kauschinger, J.L., Rachiol, S.M. & Perry, E.B.**, “Methods to Estimate the Composition of Jet Grout Bodies” , Grouting, Soil Improvements and Geosynthetics, pp:194-205
- [40] **Rodio & C., S.p.a.**, 1983, “Jet grouting Test Results at Varallo Pombia Rodinjet Trial Field”, *Rodio Report No: L3052 & No:19852*, November
- [41] **ZETAş-Zemin Teknolojisi A.ř.**, 1997. *Migros/Ankara (GİMAT) Hipermarket ve Alışveriş Merkezi Temel Mühendisliği Etüd ve Değerlendirme Raporu*, İstanbul.
- [42] **ZETAş-Zemin Teknolojisi A.ř.**, 1998. *İzmir Atıksu Arıtma Tesisi Alanı / Çiğli Jet Grout Kolonlarının Yükleme Deneyleri Değerlendirme Raporu*, İstanbul.
- [43] **Moseley, M.P.**, 1993, “Ground Improvement” , Blackie A&P , Maryland, U.S.A.
- [44] **Coomber, D.B. & Bell, A.L.**, 1985, “Groundwater Control By Jet Grouting” , 21st. *Regional Conference of the Geological Society on Groundwater in Engineering Geology*, University of Sheffield, September 15-19, pp:485-498
- [45] **Arslan, U., Katzenbach, R., Quick,H., Schmitt, A.**, 1998, “Tunnelling in Cities and Urban Areas” , *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 7.Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 22-23 Ekim, Cilt 2 pp:332-343

- [46] Ergun, U., 1994, "Temel Takviyesi ve Eski Eserlerin Korunması" , *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 3.Ulusal Kongresi*, Ankara, 1994, s:519-524, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- [47] Toğrol, E., 1994, "Temel Takviyesi Yöntemlerine Yeni Bir Bakış", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5.Ulusal Kongresi*, Ankara, 1994, s:887-915, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.





EK-A: ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ İÇİN ÖZET TABLO

Tablo A.1 Zemin İyileştirme Yöntemleri Özet Tablosu [4].

YÖNTEM	ZEMİN	KULLANIM ALANLARI	FAYDALARI	SAKINCALARI
1. DONDURMA:				
1.1.AMONYAK / TUZLU SU İLE SOĞUTMA	%10 su muhtevasını aşan her türlü zeminde	-Boşluklardaki su akışının zor olduğu yerlerde buzun oluşumu sağlanır -Kuyular ve dar-derin kazılarda	-Zeminlerin geçici mekanik mukavemetlerini vermektedir -Dışarıdaki yüzey çalışmalarından daha etkili bir iyileştirmedir -Uzun vadeli büyük uygulamalarda daha etkindir	-İyileştirmenin gelişmesi zaman almaktadır -Başlangıçtaki kurulma fiyatı yüksektir ve soğutucu pahalıdır -Dikkatli şekilde arazi kontrolü gerekmektedir -Zeminde bazı problemler olabilir -Yağışlı havalarda uygun değildir
1.2.LİKİT NİTROJEN	%10 su muhtevasını aşan her türlü zeminde	-Boşluklardaki su akışının zor olduğu yerlerde buzun oluşumu sağlanır -Kuyular ve dar-derin kazılarda -Sık sık geçici çözüm olarak kullanılır	-Zeminlerin geçici mekanik mukavemetlerini vermektedir -Dışarıdaki yüzey çalışmalarından daha etkili bir iyileştirmedir -Dondurma işleminin hızlı yapılması gerektiği yerlerde yada kısa süreli küçük uygulamalarda daha etkindir -Su akışının 50 m/gün 'e kadar olduğu yerlerde kullanılabilir	-Likit nitrojen pahalıdır -Arazi kontrolü gerekmektedir -Zeminde bazı problemler olabilir
2.DRENAJ:				
2.1.FİLTRE DRENLER	Kumlu siltler, siltler, killer ile buzulların etkisi ile oluşmuş kum ve çakıl yığınları	Arazi drenajı, şev ve dolgu topuklarının drenajı	Nispeten fiyatı düşüktür	Doku yırtılmasından sakınılmalı aksi halde filtre tıkanabilir
2.2.DRENAJ GALERİLERİ	Herhangi bir su taşıyıcı tabaka altında, düşük permeabiliteli tabaka yakınında galeri açmak uygundur	-Baraj ayakları ve sızdırmazlık perdeleri gibi yerlerde, büyük miktarlarda suyu tahliye etmek amacı ile -Şevlerin stabilitesinde	Suyun çok büyük bir miktarı, klasik büyük ölçekli pompalar vasıtasıyla tahliye edilebilir veya galeriden drene edilebilir	-Çok pahalıdır -Galerilerin betondan veya nihai enjeksiyondan olmaları gerekir
2.3. KUM VE BANT DRENLER	Yumuşak kil,silt ve organik zeminlerde	Zeminlerin konsolidasyonu 20 m. derinliğe kadar çok geniş alanlarda daha hızlı	-Yapılması kolaydır, sonuç üniformdur -Fiyatı düşüktür	Nispeten yavaştır
2.4.KİREÇ KOLONLAR	Silt,organik zemin,siltli kil, kil	Yaklaşık 10 m. derinliğe kadar, çok geniş alanlarda zeminde donatı ve konsolidasyon, drenaj amacı ile	Yapılması kolay, sonuca ulaşmak hızlıdır	-Üniform değildir -Fiyatı yüksektir

3. YER ALTI SU SEVİYESİNİN DÜŞÜRÜLMESİ İL R SUYUN TAHLİYESİ:

3.1.ÇAMUR POMPALARI (SUMP PUMPİNG)	Temiz çakıl ve kaba kumlar da	Açık, su kazılar da	Basit pompa ekipmanı	-İnce daneler kolaylıkla taşınabilir ve formasyonda stabilite problemleri yaratabilir
3.2.EMME POMPALI NOKTA KUYU YÖNTEMİ	Kumlu çakıldan ince kuma kadar (siltli kum dahi olabilir)	-Açık kazılar da (inişli- çıkışlı boru hendek kazılarını kapsamakta) -Şehir dışında özellikle yatay sistem ile ilgili boru hendek kazılarında	-Uygun zeminler içine yerleştirmek hızlı ve kolaydır -Haftada birkaç kez kısa süreli pompalama için ekonomiktir	-Çok iri çakıl ve iri taş içeren zemine yada çakıllı zemine yerleştirilmesi zordur -Pompanın gürültüsü ve sürekli pompalama sonucu binaların bulunduğu bir alanda problem olabilir -Emme basma sınırı yaklaşık 4.00 ile 5.50 m.'dir ve zemine bağlıdır; eğer fazla düşüşler gerekli ise çok katlı yerleştirme gereklidir
3.3.EMME POMPALI SİĞ KUYU YÖNTEMİ	Kumlu çakıldan siltli ince kuma kadar	-Nokta kuyu yöntemine benzemektedir -Birkaç ay içinde veya siltli zeminlerde (filtrasyonun doğru yapılması önemlidir) pompanın yerleştirilmesi daha uygundur	-Genellikle nokta kuyu yöntemine göre fiyatı düşüktür, eğer; pompalama birkaç ay sürecek ise karşılaştırmak gerekir -Doğru filtrasyon ile, siltli zeminlerden daha incelerin yok olmasını önlemek amacıyla, nokta kuyu yönteminden daha iyi kontrol edilebilir	-Başlangıçtaki kurulma fiyatı yüksektir -Pompanın gürültüsü ve sürekli pompalama sonucu binaların bulunduğu bir alanda problem olabilir -Emme basma sınırı yaklaşık 4.00 ile 5.50 m.'dir ve zemine bağlıdır; eğer fazla düşüşler gerekli ise çok katlı yerleştirme gereklidir
3.4.DALGIÇ POMPALI-DERİN FİLTRELİ KUYU YÖNTEMİ	Çakıldan, siltli ince kuma kadar	Su taşıyan formasyonların üstünde veya arasında, derin kazılar içinde	-Emme pompalarda geçerli olan alt çizgi miktarındaki sınırlama burada yoktur -Vakum, ince zeminlerin drenajına yardım için uygulanabilir -Kuyular çalışma alanının açığına yapılır -Eğer elektrik destekli ise ses problemi yoktur	-Başlangıçtaki kurulma fiyatı yüksektir
3.5."JET EDUCTOR" SİSTEMİNİ KULLANARAK SUYUN YÜKSELTİLMESİ İLE KUYUYA KADAR VAKUM YARATILARAK YÜKSEK BASINÇLI SU ELDE EDİLMESİ	Kumlu zeminler de (Özellikle kontrol edilirse siltli kum ve kumlu siltlerde bile kullanılabilir)	-Boşluk içindeki derin kazılar da çok katlı nokta kuyu yöntemi kullanılmaz -Genellikle permeabilitesi düşük zeminlerde daha uygundur	-Alt çizgi miktarındaki sınırlama yoktur -Delikleri eğik olabilir	-Başlangıçtaki kurulma fiyatı yüksektir -Eğer yüksek basınç altında su patlarsa kazıda kabarma tehlikesi oluşur
3.6.VAKUMLA SUYUNU ALMA	Siltli ve siltli killerde	Vakum pompası yüzeydedir	Sonuç hızlı ve üniformdur	Soğuk bölgelerde etkin değildir

4. ELEKTROOSMOZ VE ELEKTROKİMYASAL STABİLİZASYON:

4.1.ELEKTRO OSMOZ	- Siltlerde, siltli killerde ve bazı organik zeminler de	-Doğru akım sonucu anottan katoda doğru su akışı olmaktadır -Uygun zemin içindeki açık kazılar da yada boşluk suyu basıncı sönümünü hızlandırmak için	-Uygun zeminlerde suyu düşürme yöntemlerinden hiçbirini kullanılmadığı zaman uygulanabilir	-Yerleştirilmesinin ve çalışmasının fiyatı genellikle yüksektir -Tuzlu zeminlerde faydasız -Zamanla birlikte daha az efektif olmaya başlar -İyileştirme sonucu rehidratasyon oluşur
--------------------------	--	--	--	--

4.2.ELEKTRO KİMYASAL STABİLİZASYON	Normal konsolide siltler, siltli killler, killler, akıcı killler ve lölser	-Yaklaşık 15 m. derinlikte -İyileştirici kimyasallar, elektroosmoz vasıtasıyla zemine nakledilir	-Oldukça hızlı -Yumuşak killerde oturma olmaksızın (ör:sıkışabilirliğin artması) kayma mukavemetini iyileştirir	-Yapılması pahalıdır -Tuzlu zeminlerde faydalı değildir
---	--	---	---	--

5. KOMPAKSİYON TEKNİKLERİ:

5.1.ÖN YÜKLEME	Yumuşak kil, siltli organik zemin, turba ve löl	-Sıkışabilen zemin,dolgu ve filtre malzemesi gerekli -Yaptı yapılmadan önce yeterli yük uygulayarak yumuşak zeminin sıkışması tamamlanır.Drenler ile birlikte de kullanılabilir	-Kolaydır ve düşük fiyatta üniform sonuç elde edilir -Su muhtevası azaldıkça mukavemet artar -Geniş bir alan önemli derinliklere kadar iyileştirilebilir	-Çok yavaştır
5.2.SÜRŞARJ (İLAVE) DOLGU	Normal konsolide yumuşak kil, silt,organik birikimler,turba ve löl	-Drenaj şilte için çakıl veya zemin hareketi için kum yüklemesi -Daha kısa zamanda sürekli oturma miktarını elde etmek için aşırı dolgu gerekmektedir. Daha sonra aşırı dolgu kaldırılır -Konsolidasyon süresini kısaltmak için düşey drenler kullanılabilir	-Su muhtevası, boşluk oranı ve sıkışabilirliği azaltmak; mukavemeti artırmak -Ön yüklemesiz sürşarj daha hızlıdır -Fiyatı uygundur	
5.3.ÖNCEDEN İSLATMA (PREWETTING)	Şişen ve göçen zeminlerde (ör:löl)	Farklı oturmaları azaltmak	-Fiyatı oldukça düşüktür -4.00 m' den daha derin alanlarda yapılabilir	-Yavaş ve kontrol edilememesi
5.4.HİDROKOM-PAKSİYON	Göçebilen zeminlerde (ör:kuru iklimlerdeki siltlerde ve lölserde)	-Göçebilen zeminlerdeki oturmaları önlemek	-Hızlı ve fiyatı düşük	-Sadece kuru silt ve lölü dağıtmak için kullanılır
5.5.VİBROKOM-PAKSİYON 5.5.1.VİBROFLOTASYON 5.5.2.VİBRO-YERDEĞİŞTİRME (VİBRO-REPLACEMENT) 5.5.3.TERRA-PROBE	Çakıl ve kum Yaklaşık 20 kN/m ² nin üzerinde mukavemet veren silt ve kil Suya doygun yada kuru, temiz kum	- Vinç den 20 m. derinliğe kadar asılı vibroflot ile zeminin sıkıştırılması - Taş kolonların (kazık davranışına benzer bir hareketle) dahil edilmesiyle yerin sıkılığında ve mukavemetinde -Titreşimli kazık çakıcı (şahmerdan) ve 750 mm. Çapında çelik muhafaza ile 20 m. derinliğe kadar iyileştirme (3-4 m.'den daha derin ise etkisiz) -Vibrasyonla sıkıştırma: örtü tabaka altındaki oturmanın nedeni sıvılaşmadır.	Uygun fiyatla üniform zemin şartlarının elde edilmesi -Oturmanın azaltılması ve taşıma gücünde önemli iyileştirme -Drenaj, kolonlar vasıtasıyla kolaylaştırılabilir -%80 in üzerinde relatif sıkılık elde edilebilir. Bazı kumlu zeminlerde etkisizdir -Hızlı,basit, su altında uygulanabilir ve fiyatı uygundur	Nispeten işlem yavaştır -Kolonlar etrafındaki zemin oturabilir -Vibrasyonla alttaki yumuşak tabakalar kalkabilir, tabakaların üstünden penetrasyon yapmak güçtür, kısmen suya doygun zeminlerde başarılı değildir

5.6.DİNAMİK KOMPAKSİYON	Hemen hemen bütün zeminler de	200 ton'a kadar, vince bağlı ağır bir tokmağın zemine serbest düşürülmesi (bir çok kez geçiş yapılır)	-30 m. derinliğe kadar, geniş alanlar iyileştirilebilir. Taşıma kapasitesi oldukça artırılabilir	-Kohezyonlu zeminlerde; geçişler arasında boşluk suyu basıncının dağılması için beklenmeli
5.7.KOMPAKSİYON KAZIKLARI	Gevşek kumlu zeminler , kısmen suya doymun kumlu zeminler , lës,turba	-Çakma sırasındaki titreşim ve kazığın yer değiştirmesi ile sıkılaştırma -20 m.'ye kadar olan derinlikler iyileştirilebilir	-Kazıklar arasında iyi bir eşdeğerlilik ve yüksek sıklık elde edilebilir -Sonuçları kontrol etmek kolaydır, kompaksiyon <i>üniformdur,çok ince daneli</i> zeminlerde faydalıdır	1 ile 2 m. arasındaki iyileştirmeler yavaştır -Fiyatı yüksek olmasına rağmen uygundur
5.8.ELEKTRİK ŞOKU	Islak kumlard a ve siltlerde	-Yüksek voltajlı jeneratör ve sıvılaştırıcı gerektirmektedir -10 m.'ye kadar derinlikler iyileştirilebilir	-Basittir -Fiyatı düşüktür	1 m. derinliğin üzerinde yararlı değildir
5.9.PATLATMA	Kısmen suya doymun ve suya doymun kumlar,s iltli lës	Patlayıcıları yerleştirmek için sondaj makinesi gereklidir (30 m. derinliğine kadar geniş alanları iyileştirmek için)	-Hızlı ve ucuzdur -%70-80 arasında relatif sıklık değerine ulaşılabilir	-Kısmen suya doymun zeminlerde özellikler değişebilir. Yüze yakın yerlerde iyileştirme yapılamaz
5.10.MEKANİK KOMPAKSİYON	Çakıl,ku m,silt ve kil	Zemin cinsine bağlı olarak kullanılan farklı özelliklerde silindirler	-Hızlı, basit ve ince tabakaların maliyeti düşüktür	-

6.DONATI:

6.1.DONATILI ZEMİN	Kum,silt ,çakıl	-İstinat duvarı, dolgu gibi yerlerde zeminin mukavemetini artırmak için: geotekstiller,ağlar ve metal şeritler kullanılır	-Dayanıklıdır ve yerleştirilmesi basittir -Fiyatı oldukça uygundur	-
6.2.ZEMİN ÇİVİLEME VE KÖK KAZIKLARI	Hemen hemen bütün zeminler de	-Temellerin ve şevlerin stabilizasyonunda -Kök kazıkları, temel takviyesi amacı ile de kullanılır	-Uygun fiyatla zeminin mukavemeti artırılır	-

7.ENJEKSİYON:

7.1.ÇİMENTO, KİL VE ÇİMENTO-KİL ENJEKSİYONU	Kum ve çakıl	-Su haricindeki boşlukları doldurmak -Düşey veya yatay geçirimsizlik perdesi oluşturmak -"Uzun süre bükülebilme" şartına uygun olması istenir. Ör.Baraj çekirdeğinde -Büyük derinliklerin iyileştirilmesine gidilebilir	-Ekipmanı basittir ve sınırlı boşluklarda kullanılabilir -Uzun süreli bir iyileştirmedir -Enjeksiyon borusunun anlamı, enjeksiyonun yayılma sınırıdır -Ağır ve düzensiz tabakaların içine yerleştirilebilir -Fiyatı en düşük olan enjeksiyon yöntemidir	-Nispeten kalıcı bir bariyer ile sürekliliği sağlamak gereklidir -En az 4.00 m.(yada eşdeğeri) doğal örtü gereklidir
7.2.SİLİKAT ENJEKSİYONU	Orta-kaba kum, çakıl, lës	-Su haricindeki boşlukları doldurmak -Düşey veya yatay geçirimsizlik perdesi oluşturmak -Büyük derinliklerin iyileştirilmesine gidilebilir	-Nispeten mekanik mukavemeti yüksektir -Enjeksiyon dağılımının kontrol derecesi yüksektir -Ömrü süresizdir -Su seviyesi altındaki temel takviyesi işlerinde kolaylaştırıcıdır	-Nispeten kimyasalların fiyatı yüksektir -En az 2.00 m. (yada eşdeğeri) doğal örtü gereklidir -Kil yada silt merceğinin olduğu veya siltli malzeme içindeki iyileştirme, tamamlanamayabilir

7.3.REÇİNE ENJEKSİYONU	Siltli ince kum	-Su haricindeki boşlukları doldurmak -Düşey veya yatay geçirimsizlik perdesi oluşturmak -"Biraz bükülebilirlik" gösterir -Büyük derinliklerin iyileştirilmesine gidilebilir	-Çok ince tabakaların iyileştirilmesinde, kil ve çimento enjeksiyonu ile beraber kullanılabilir	-Genellikle fiyatı yüksektir -Sadece çok büyük İnşaat Mühendisliği işlerinde ekonomiktir -Mutlaka arazi kontrolü gerekir
7.4.KOMPAKSİYON ENJEKSİYONU	Yumuşak, ince daneli zeminler, büyük boşluklu temel zemini, lős	-Viskozitesi yüksek olan enjeksiyon, yüksek basınç altında pompalandığı zaman, radyal (ışmsal) hidrolik krik gibi davranır -İyileştirme derinliği genellikle birkaç m.'dir	-Zemin yapısı içeride sıkıştırdıktan enjeksiyon yumruşu şeklini alır -Büyük boşlukların doldurulmasında, farklı oturumların düzeltilmesinde iyi sonuçlar verir	-Dikkatli kontrol gerektirir -Nispeten fiyatı yüksektir
7.5.JET GROUTING	Hemen hemen bütün zeminlerde	Derin kazılarda yüksek hızlı jet ile, kolon veya panel şeklinde, zemini enjeksiyonla yada karışımla stabilize etmek	-Kolon ve duvarlar kalınlaştırılır -Permeation(Nüfuz etme) enjeksiyonunun yapılmadığı zeminlerde yararlı	-İyileştirilecek bölgenin doğru olarak belirlenmesi gerektirir

8. ZEMİN STABİLİZASYONU:

8.1.ÇİMENTO VE KİREÇLE STABİLİZASYON, DİĞER KATKI MADDELERİ(Bittm, diğer kimyasallar v.s.)	Hemen hemen bütün zeminlerde	-Zemin ve katkı malzemelerinin her ikisi de, ya arazi üzerinde yada bir yerde karıştırılarak tabakalar halinde sıkıştırılır -Genellikle geniş alanlar ve sığ derinlikler iyileştirilir -Yol ve havaalanı yapımında, kanal kaplamasında -Çimento siltte	-Üniform zemin şartlarında, Mühendislik performansını artırır -Fiyatı uygun, hızlı ve basit bir yöntemdir	Katki malzemeleri tüm zemini eşit olarak etkilemez
8.2.YERİNDE KARIŞTIRMA KAZIKLAR,V.S.	Silt ve kil(yumuşak ve şişen cinsleri de kapsayan), lős	-Kirecin çatlıklar içine girmesi ile ağ oluşturulur -10 ile 20 m. derinliğe kadar geniş alanlarda iyileştirme yapılabilir	-Zeminin mukavemeti artar, etkisi hızlıdır ve fiyatı uygundur	
8.3.ISITMA	Suya doygun olmayan silt, kil ve lős	-Pişirme ile nispeten sığ derinlikte küçük alanlar iyileştirilir -Temellerin ve şevlerin stabilizasyonunda	-Hızlı ve uzun süreli mukavemet elde edilir	-Suya doygun zeminlerde yararlı değildir -Fiyatının yüksek olmasına rağmen uygundur

EK-B: YÜKSEL ERİMTAN YALISI'NA AİT SONDAJ LOGLARI

YER : KANLICA											KUYU NO : S1		
EKİPMAN : ACKER ACE											ZEMİN KOTU : 1.00 m.		
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARİ SONDAJ : 0.00-22.95m arası.										KOORD. : N :		E :	
KUYU ÇAPI : 0.00-22.95m arası - 101mm.										BAŞLANGIÇ : 22/09/1999		BİTİŞ : 24/09/1999	
NÜMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m)	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15cm	15cm	15cm	Tarih	Y A S							
					22/09	0.50							
1.50	D1	3	4	4									
1.95			N = 8										
3.00	D2	4	4	6									
3.45			N = 10										
4.50	D3	3	3	4						4.50		-3.50	
4.95			N = 7										
6.00	D4	2	3	3									
6.45			N = 6										
7.50	D5	3	4	4									
7.95			N = 8							8.40		-7.40	
9.00	D6	2	4	4									
9.45			N = 8										
10.50	D7	2	4	6	10.50	0.50							
10.95			N = 10		23/09	0.50							
11.95	D8	4	6	6	22.95	0.50							
12.45			N = 12		25/09								
13.50	D9	12	20	7									
13.95			N = 27										
15.00	D10	10	13	9									
15.45			N = 22										
16.50	D11	11	13	10									
16.95			N = 23										
18.00	D12	16	21	23									
18.45			N = 44										
19.50	D13	16	22	24									
19.95			N = 46										
NOTLAR :													

Şekil B.1 Yüksel Erimtan Yalısı- S1 no'lu sondaj logları (1/1)

YER : KANLICA										KUYU NO : S1			
EKİPMAN : ACKER ACE										ZEMİN KOTU : 1.00 m.			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARİ SONDAJ : 0.00-22.95m arası.										KOORD. : N : E :			
KUYU ÇAPI : 0.00-22.95m arası - 101mm.										BAŞLANGIÇ : 22/09/1999 BİTİŞ : 24/09/1999			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbê sayısı			Muh. Dm. (m) Tarih	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15cm	15cm	15cm									
21.00	D14	10	20	25	25/09					20.20	See previous sheet (1)	-18.20	
21.45			N = 45								Katı, sarı-kahve renkli kıl.		
22.50	D15	12	22	26						22.95	SONDAJ BİTİMİ	-21.95	
22.95			N = 48										
NOTLAR :													

Şekil B.2 Yüksel Erimtan Yalısı- S1 no'lu sondaj logları (1/2)

YER : KANLICA										KUYU NO : S2			
EKİPMAN : ACKER ACE										ZEMİN KOTU : 1.00 m.			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARİ SONDAJ : 0.00-15.95m arası.								KOORD. : N :		E :			
KUYU ÇAPI : 0.00-15.95m arası - 101mm.								BAŞLANGIÇ : 24/10/1999		BİTİŞ : 26/10/1999			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m)	Y.A.S. Dm. (m)	TCR	RQD	SCR	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15cm	15cm	15cm	Tarih	Y A S v 0.50	%	%	%	(m)			
1.50 1.60	D1	50/10	-	-	24/10								
3.00 3.10	D2	50/10	-	-									
4.50 4.95	D3	10	8 N = 16	8						4.50		-3.50	
6.00 6.45	D4	11	7 N = 13	6	6.00 24/10	0.50 0.60							
7.50 7.95	D5	4	4 N = 10	6									
9.00 9.45	D6	4	5 N = 12	7									
10.50 10.95	D7	4	6 N = 13	7									
12.00 12.45	D8	6	8 N = 17	9									
13.50 13.95	D9	2	6 N = 14	8									
15.50 15.95	D10	6	8 N = 17	9	15.95 26/10	0.65				15.95	SONDAJ BİTİMİ	-14.95	
NOTLAR :													

Şekil B.3 Yüksel Erimtan Yalısı- S2 no'lu sondaj logları (1/1)

YER : KANLICA										KUYU NO : S3			
EKİPMAN : ACKER ACE										ZEMİN KOTU : 1.00 m.			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARI SONDAJ : 0.00-21.00m arası.								KOORD. : N :		E :			
KUYU ÇAPI : 0.00-21.00m arası : 101mm.								BAŞLANGIÇ : 26/10/1999		BİTİŞ : 28/10/1999			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m)	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KOT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15cm	15cm	15cm	Tarih	Y A S							
					26/10	0.50							
1.50	D1	50/5	-	-							DOLMA ZEMİN		
1.95													
3.00	D2	50/10	-	-									
3.45										3.85		-2.85	
4.50	D3	10	8	8									
4.95			N = 16										
6.00	D4	4	6	8									
6.45			N = 14										
7.50	D5	4	6	8									
7.95			N = 14										
9.00	D6	4	8	10	9.00	0.70							
9.45			N = 18		26/10	0.75							
10.50	D7	6	7	8									
10.95			N = 15										
12.00	D8	6	8	9									
12.45			N = 17										
13.50	D9	8	7	9									
13.95			N = 16										
15.50	D10	6	9	11									
15.95			N = 20										
16.50	D11	5	7	8									
16.95			N = 15										
18.00	D12	6	7	9									
18.45			N = 16										
19.00					19.00	0.65				19.00		-18.00	
19.50	D13	8	8	10	27/10	0.65							
19.95			N = 18										
NOTLAR :													

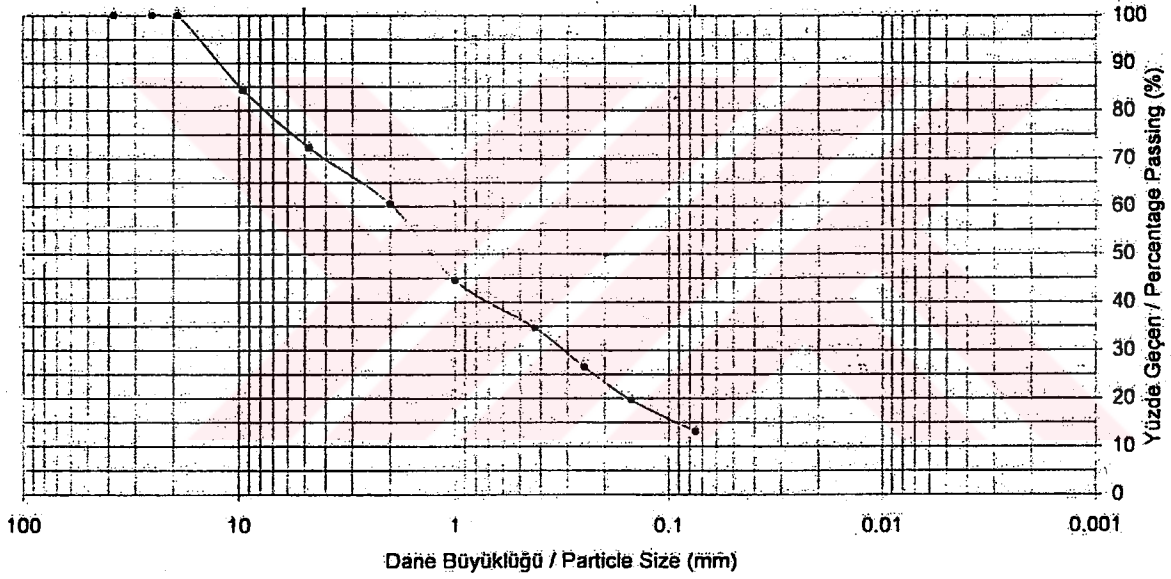
Şekil B.4 Yüksel Erimtan Yalısı- S3 no'lu sondaj logları (1/1)

YER : KANLICA										KUYU NO : S3			
EKİPMAN : ACKER ACE										ZEMİN KOTU : 1.00 m.			
SONDAJ YÖNTEMİ : ROTARI SONDAJ : 0.00-21.00m arası,										KOORD. : N : E :			
KUYU ÇAPI : 0.00-21.00m arası - 101mm.										BAŞLANGIÇ : 26/10/1999 BİTİŞ : 28/10/1999			
NUMUNE VE YERİNDE DENEY.		S.P.T. darbe sayısı			Muh. Dm. (m)	Y.A.S. Dm. (m)	TCR %	RQD %	SCR %	Dm. (m)	ZEMİN CİNSİ	KÖT (m)	LEJAND
Dm. (M)	TİP	15cm	15cm	15cm	Tarih								
21.00	D14	9	9	11	27/10	21.00	0.70				Yan kakt, açık kahve - sarı renklil kıl.		
21.45				N = 20	28/10					21.45	SONDAJ BİTİMİ	-20.45	
NOTLAR :													

Şekil B.5 Yüksel Erimtan Yalı- S3 no'lu sondaj logları (1/2)

**EK-C: YÜKSEL ERİMTAN YALISI'NA AİT ZEMİN NUMUNELERİNDEN
YAPILAN DANE DAĞILIMI ANALİZLERİ**

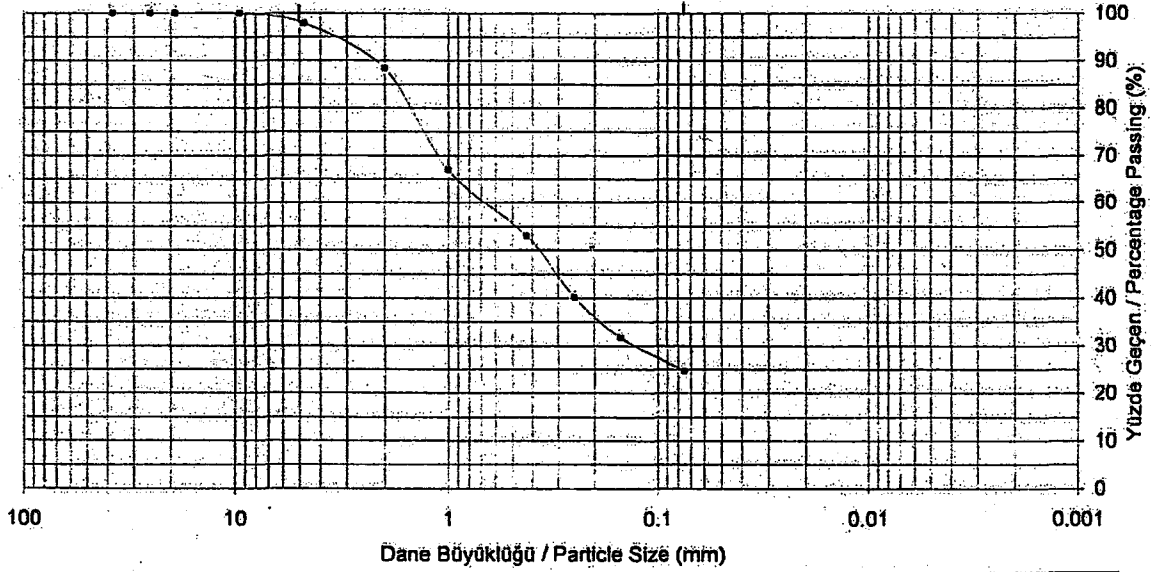
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Çakıllı, killi KUM	37	45	22

Şekil C.1 S1 nolu / D1 (1.50-1.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

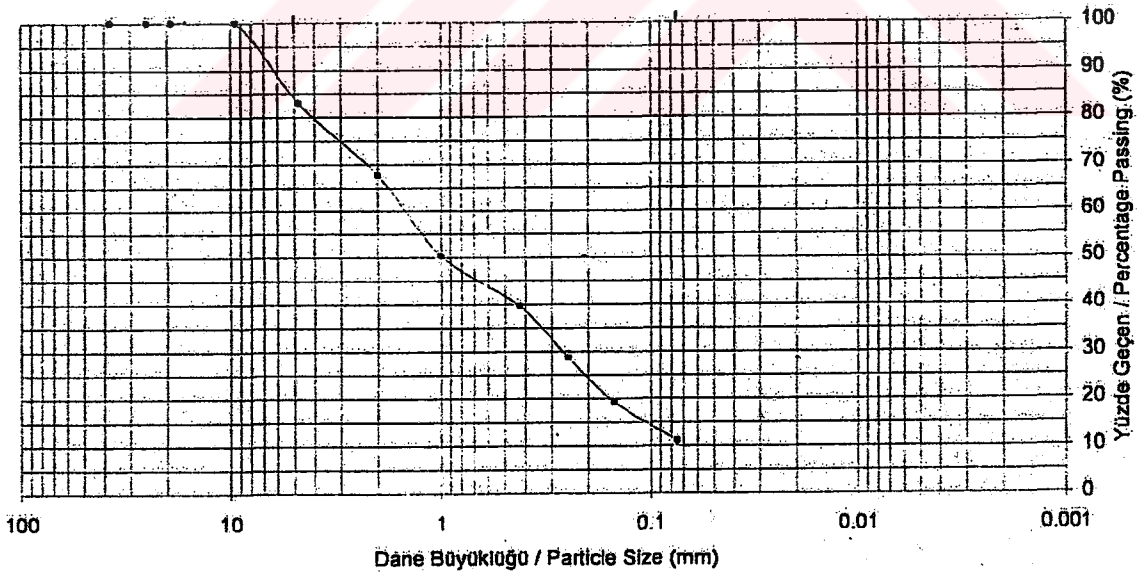
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	32	46	20

Şekil C.4 S1 nolu / D4 (6.00-6.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

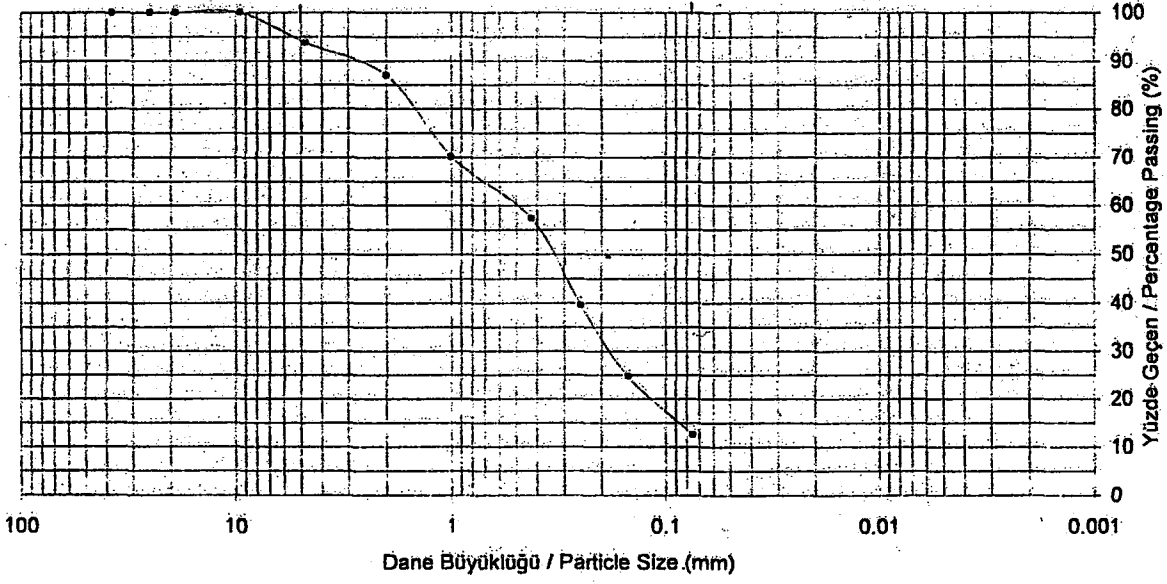
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SP-SC	Çakıllı, killi üniform KUM	38	53	25

Şekil C.5 S1 nolu / D5 (7.50-7.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

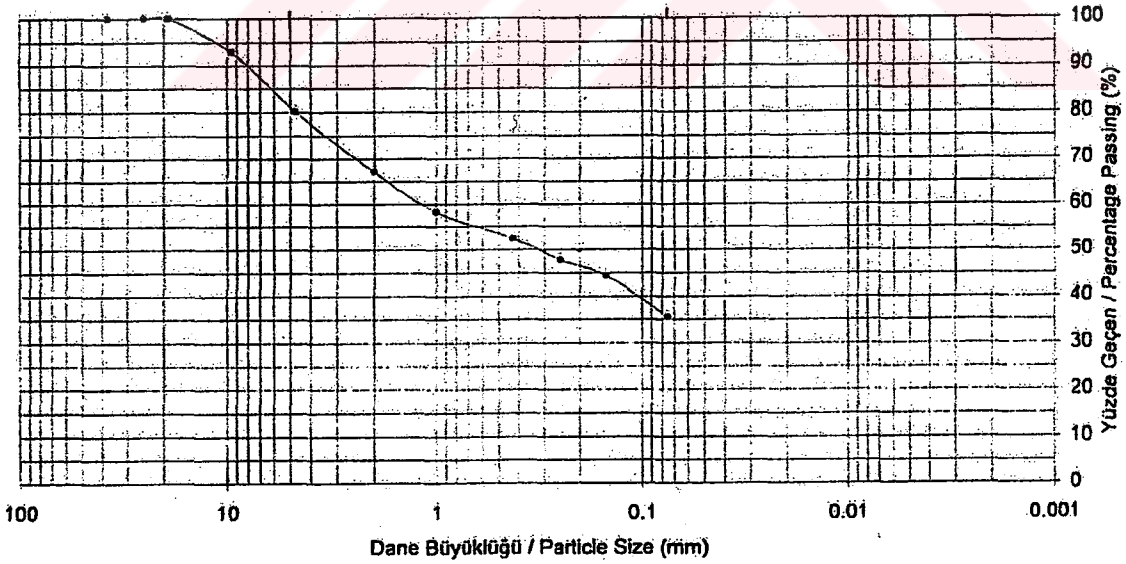
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	37	51	23

Şekil C.6 S1 nolu / D6 (9.00-9.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

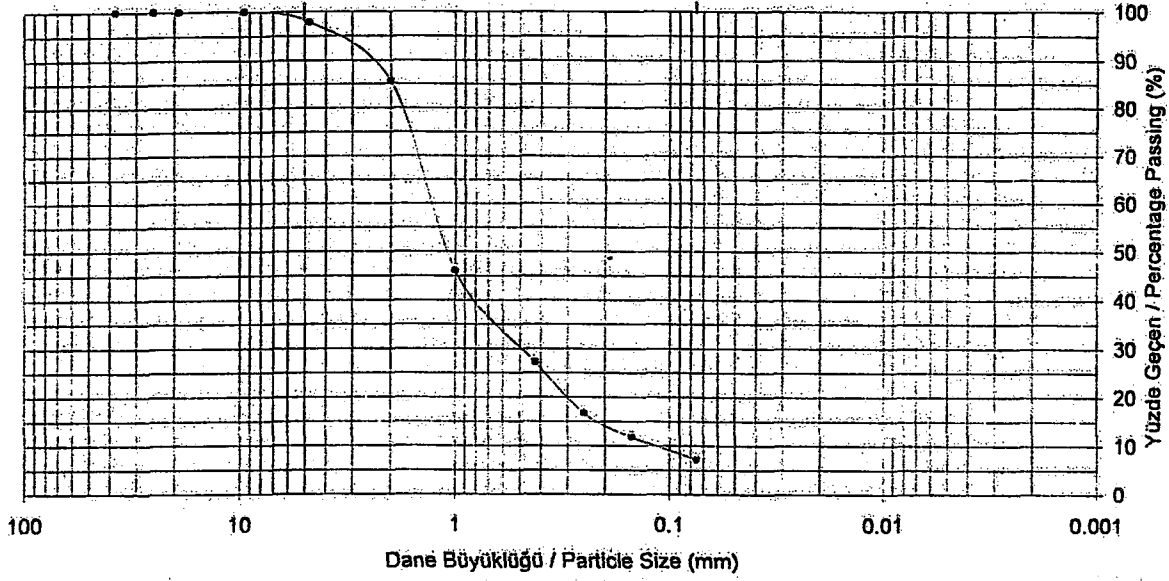
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Çakıllı, killi KUM	31	48	22

Şekil C.7 S1 nolu / D7 (10.50-10.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

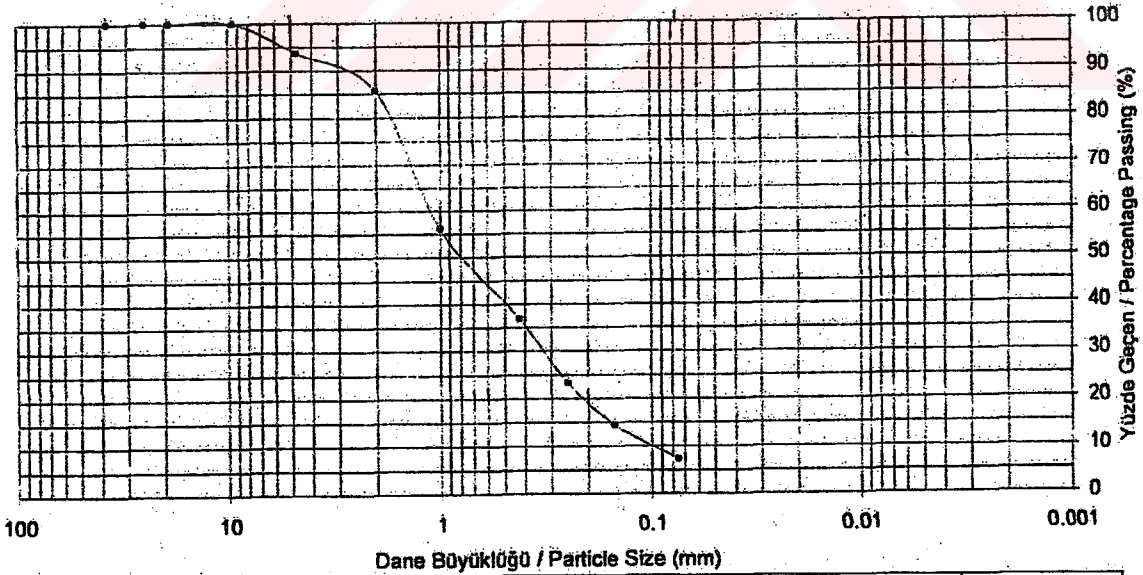
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SW-SC	Killi, düzgün dane dağılımlı KUM	42	47	21

Şekil C.8 S1 nolu / D8 (12.00-12.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

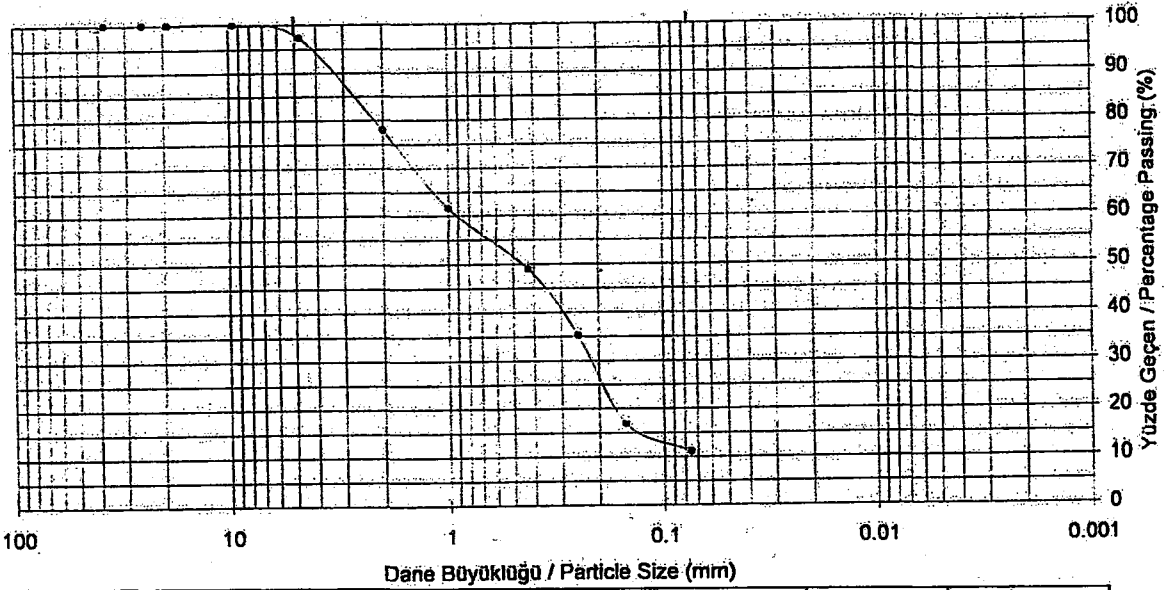
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



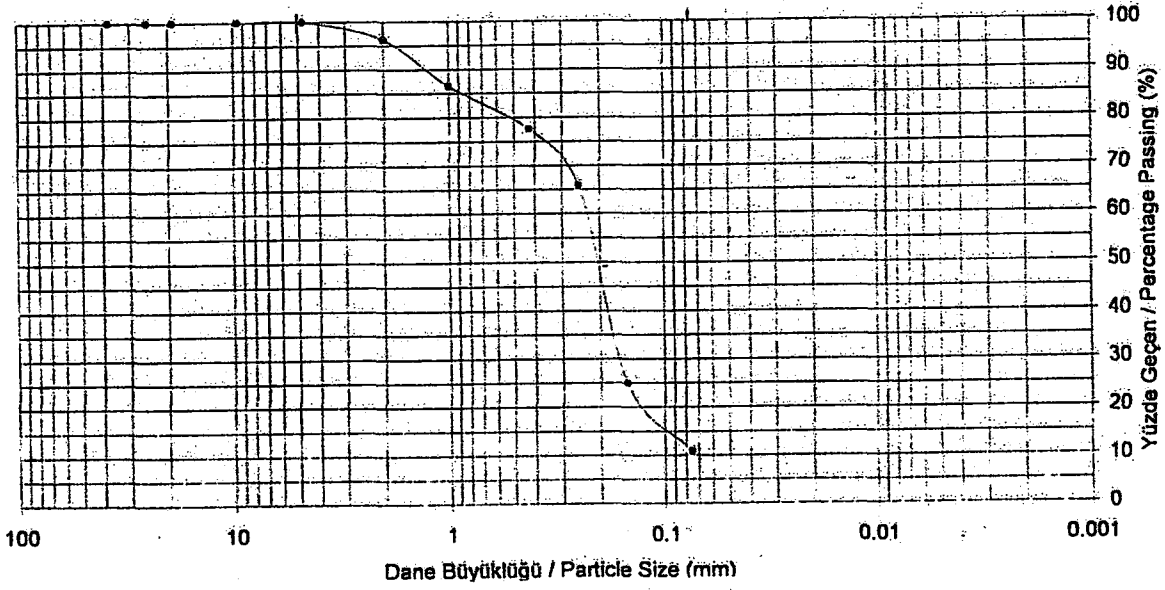
SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SP-SC	Killi, üniform KUM	39	48	20

Şekil C.9 S1 nolu / D9 (13.50-13.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



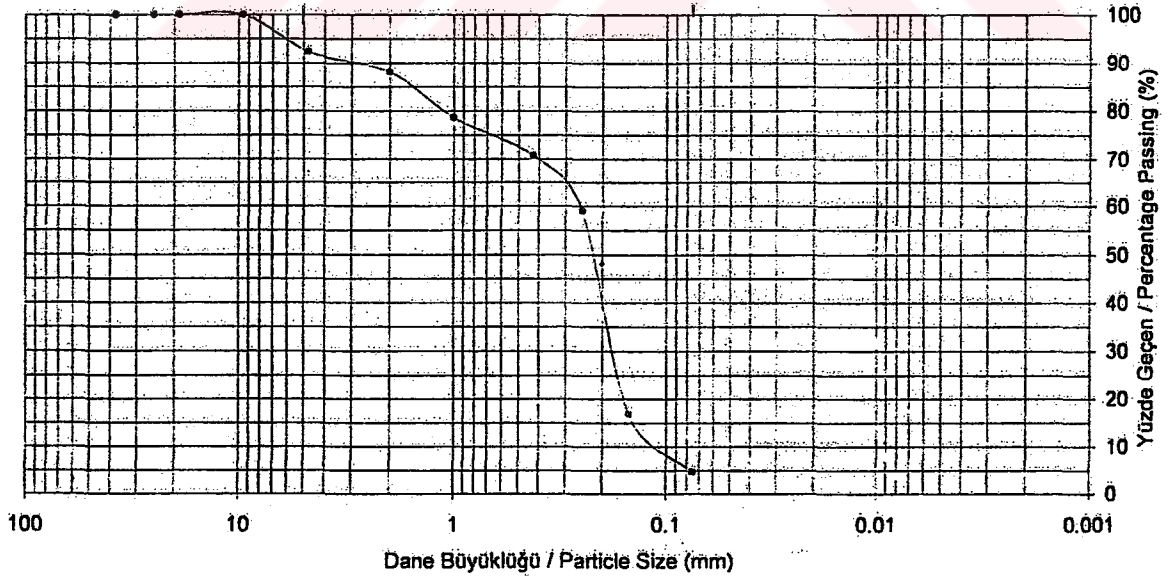
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SP-SC	Killi, üniform KUM	42	50	24

Şekil C.12 S1 nolu / D12 (18.00-18.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

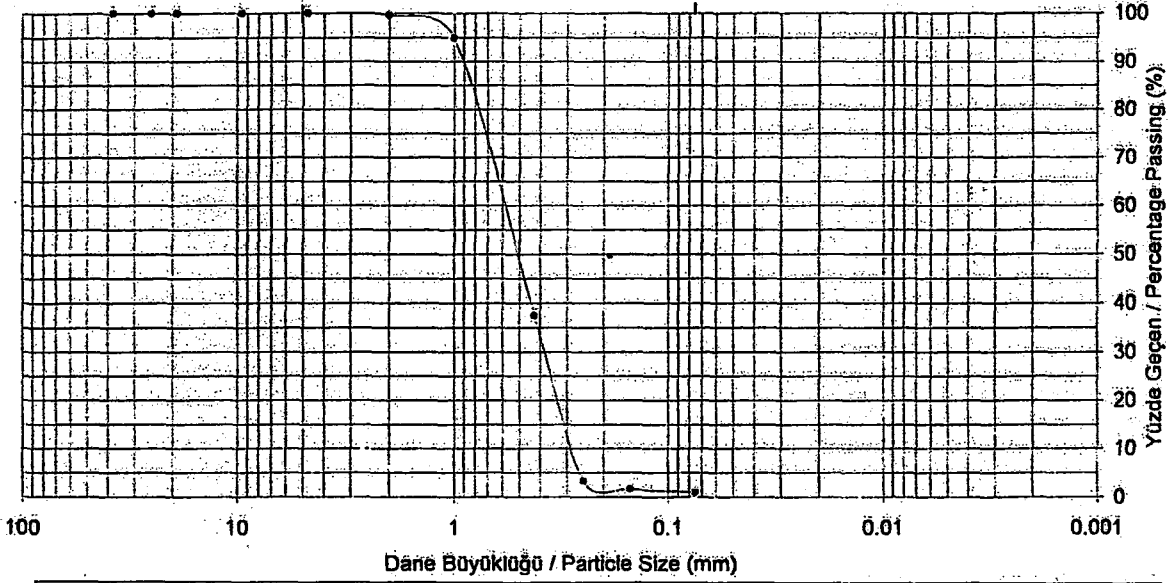
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SP-SC	Killi, üniform KUM	41	48	21

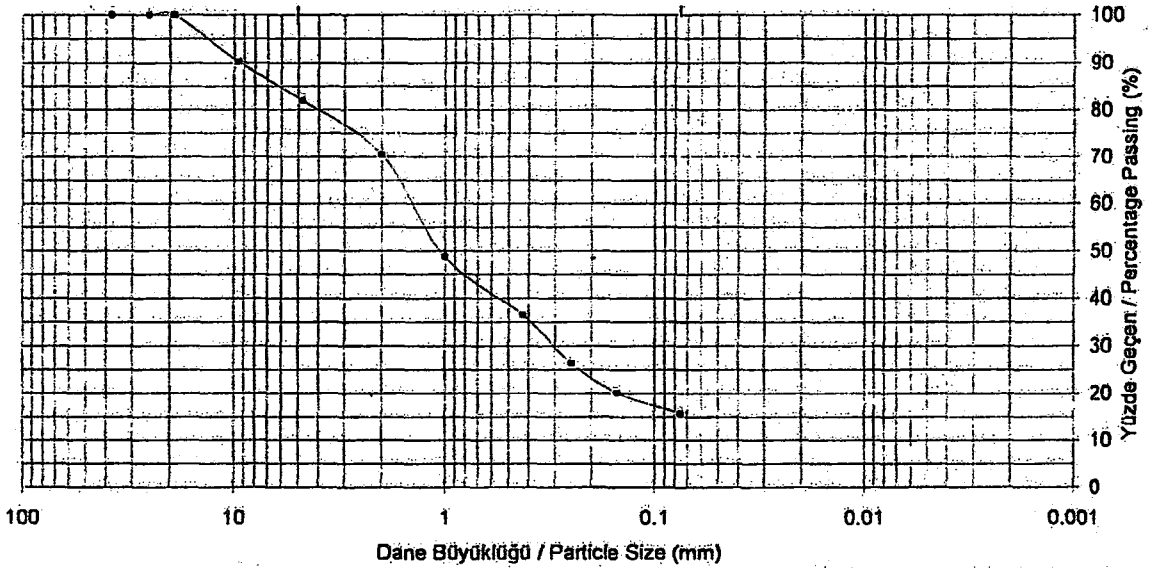
Şekil C.13 S1 nolu / D13 (19.50-19.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



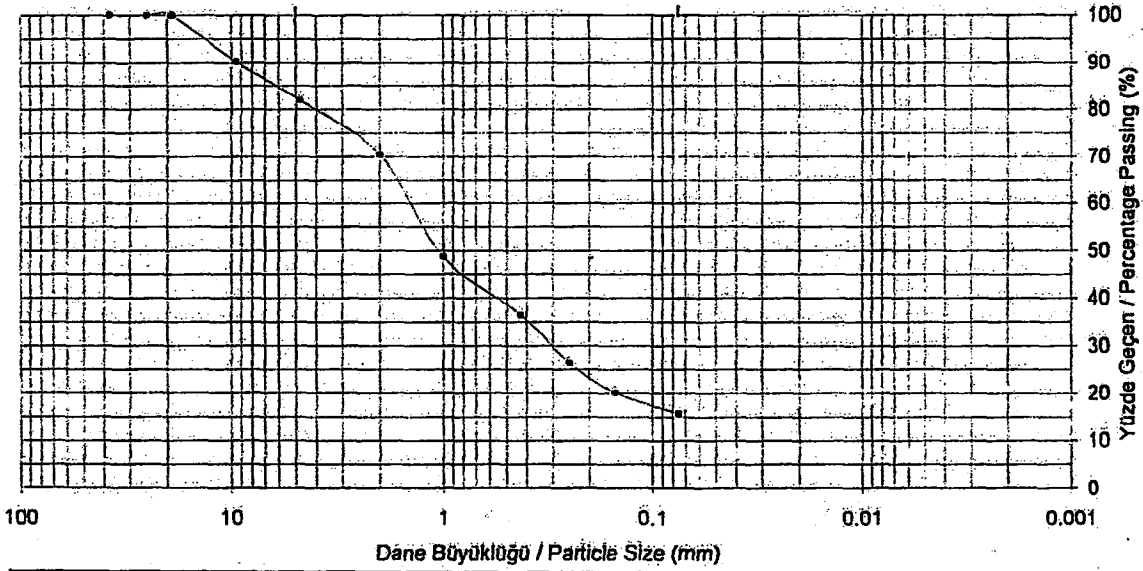
Şekil C.14 S3 nolu / D1 (4.50-4.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



Şekil C.15 S3 nolu / D2 (6.00-6.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

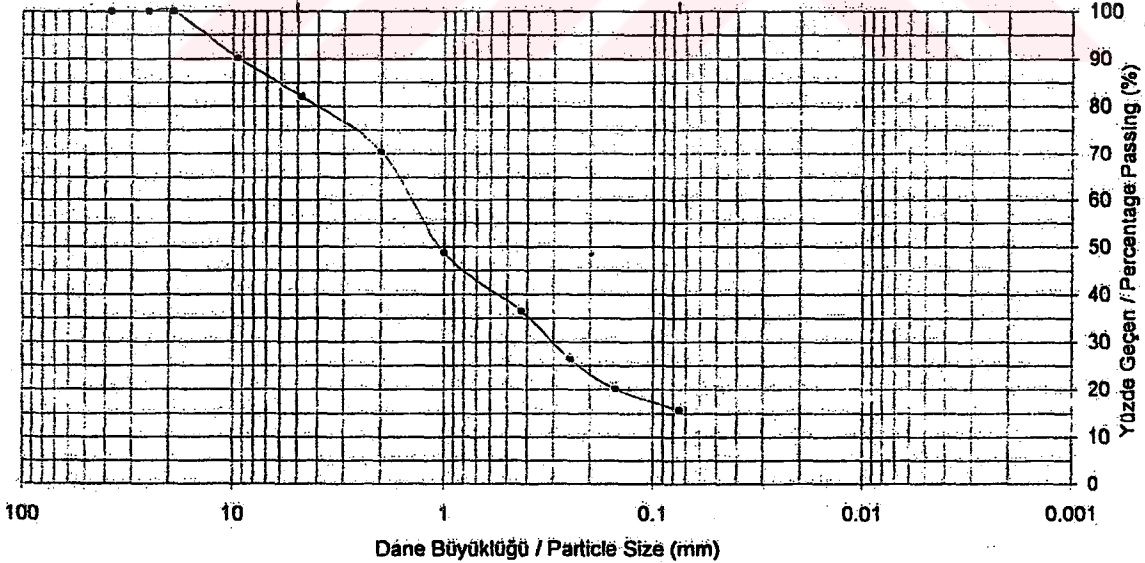
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Çakıllı, killi KUM	44	48	21

Şekil C.16 S3 nolu / D3 (7.50-7.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

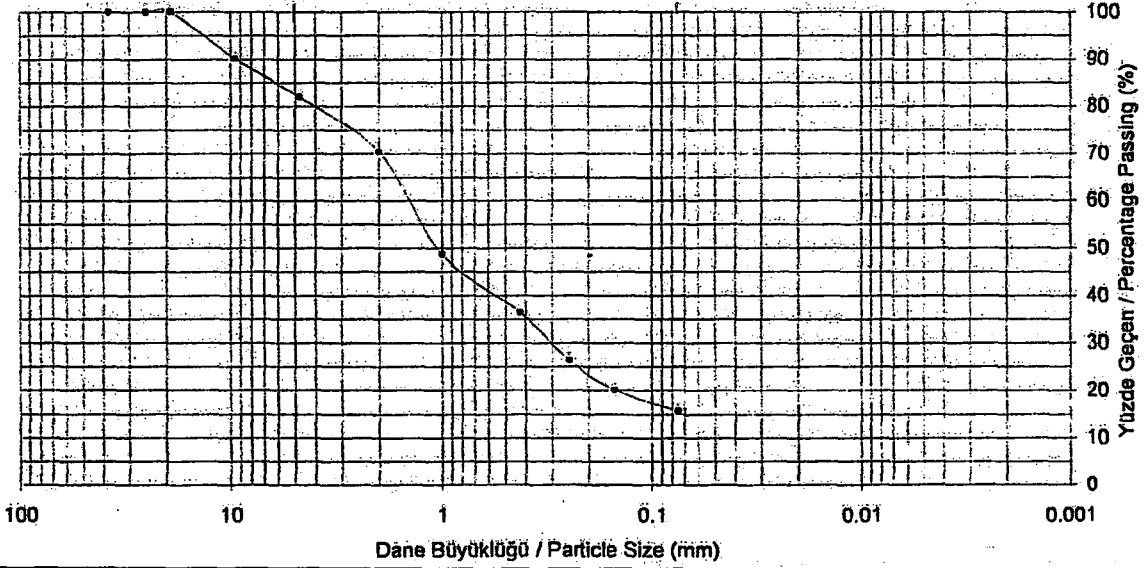
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	37	51	22

Şekil C.17 S3 nolu / D4 (9.00-9.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

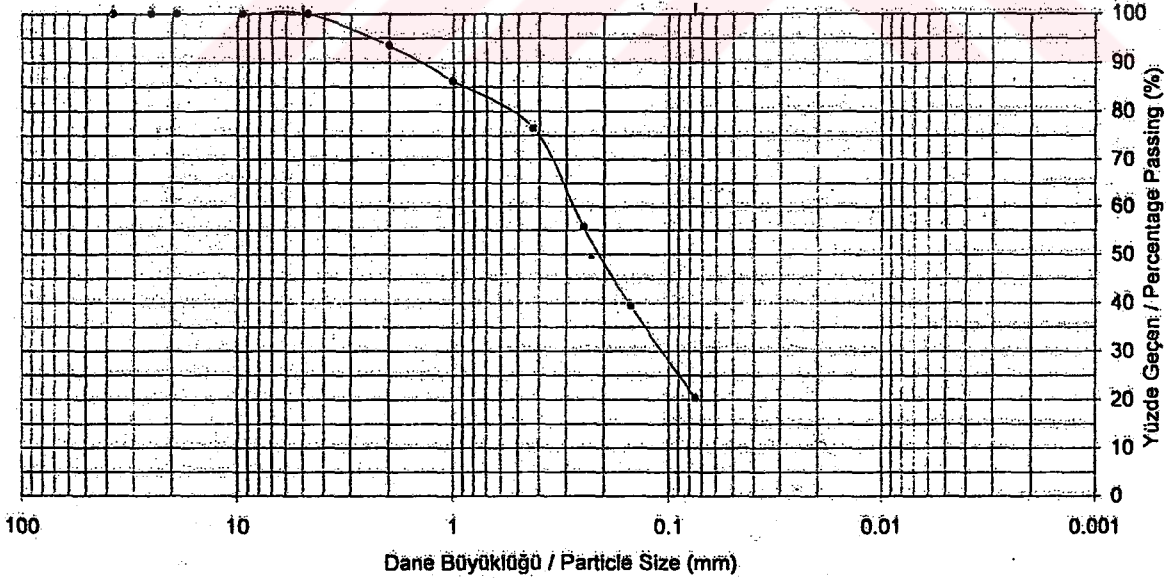
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SP-SC	Killi, üniform KUM	42	50	25

Şekil C.18 S3 nolu / D5 (10.50-10.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

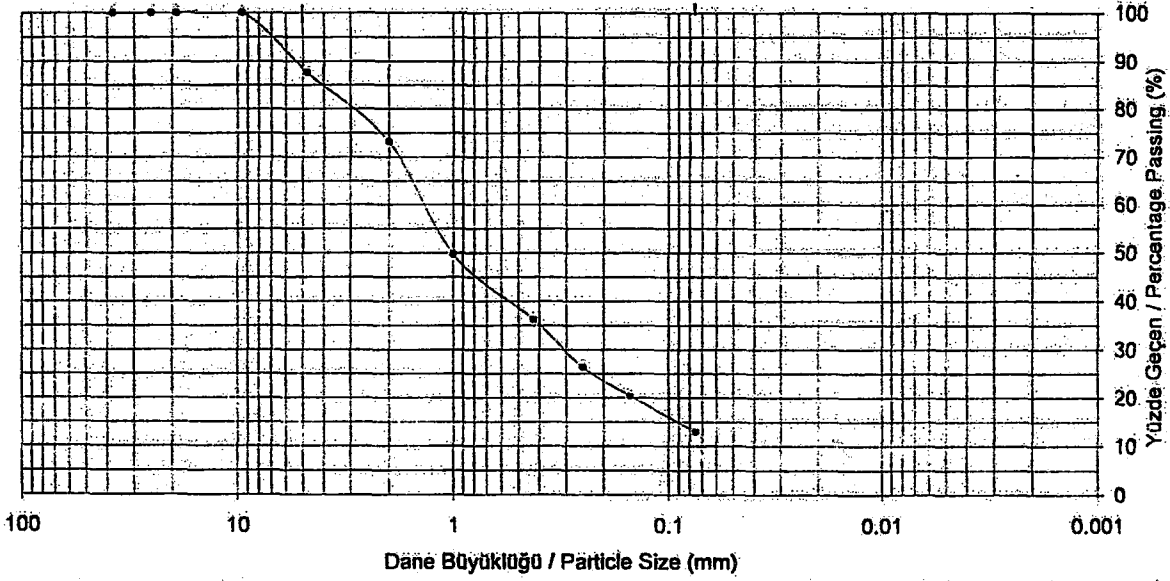
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SILT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	34	36	18

Şekil C.19 S3 nolu / D6 (12.00-12.45 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

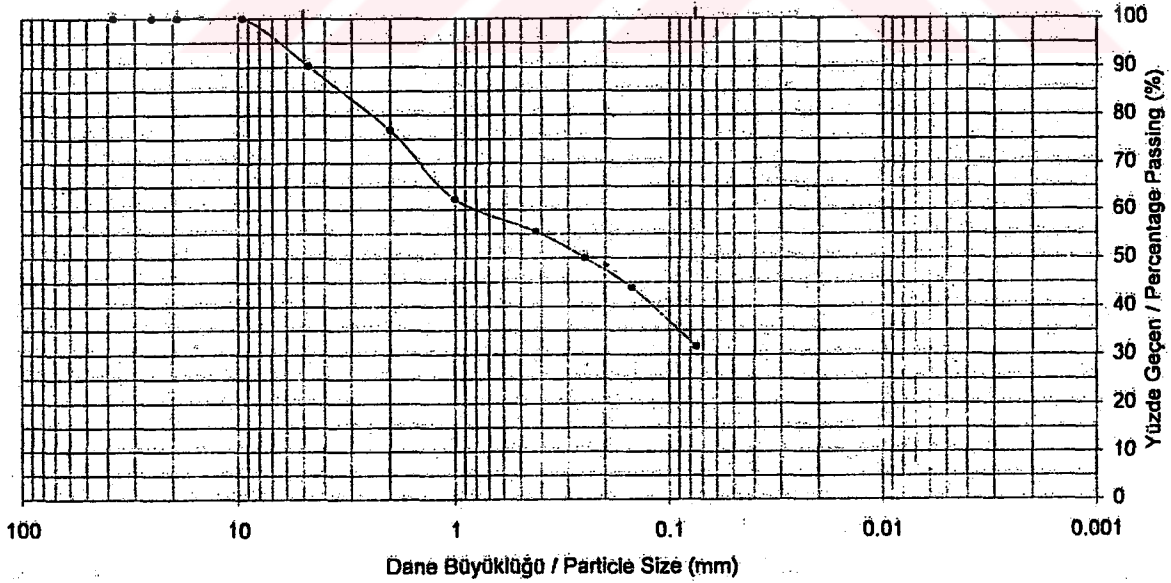
ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	34	39	17

Şekil C.20 S3 nolu / D7 (13.50-.13.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

ÇAKIL / GRAVEL		KUM / SAND			SİLT YA DA KİL SILT OR CLAY
COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	



SEMBOL	SINIFLANDIRMA	W(%)	W _L (%)	W _P (%)
SC	Killi KUM	31	34	16

Şekil C.21 S3 nolu / D7 (13.50-.13.95 m) derinliğindeki zemin numunesinin dane dağılımı analizi

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Turgay Fırat 1974 yılında Fatih / İstanbul'da doğdu. 1992 yılında İ.Ü. Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü kazandı. Burada bir sene okuduktan sonra, not ortalamasının yüksek olması nedeni ile İ.T.Ü. Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümüne yatay geçmiş yaptı. 1996 yılında İ.T.Ü. Maden Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünü birincilikle bitirdi. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Mühendisliği programına kabul edildi. Hazırlık sınıflarını ve yüksek lisans derslerini başarı ile tamamladı. 2000 yılında İ.T.Ü. Bilişim Enstitüsü İnşaat Yönetiminde Bilişim MBA programına başladı.

