

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ

ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

TEZSİZ YÜKSEK LİSANS BİTİRME PROJESİ

MURAT ÖZTURAN

DENİZLİ, OCAK-2017

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ**



ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

TEZSİZ YÜKSEK LİSANS BİTİRME PROJESİ

MURAT ÖZTURAN

DENİZLİ, OCAK-2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat ÖZTURAN tarafından hazırlanan “**ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME**” başlıklı çalışma, kapsamı ve niteliği açısından bir yüksek lisans dönem projesi olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Doç. Dr. Devrim ALKAYA

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/.../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Uğur YÜCEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu yüksek lisans bitirme projesinin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulguların analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini ; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Murat ÖZTURAN

ÖZET

**ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME
YÜKSEK LİSANS BİTİRME PROJESİ
MURAT ÖZTURAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ
DANIŞMAN : DOÇ. DR. DEVRİM ALKAYA**

DENİZLİ, OCAK - 2017

Zemin enjeksiyonları özellikle son 10-15 yıllık bir dönemde zeminlerde meydana gelen oturmaların, sıvılaşma etkilerinin azaltılmasında ve zemin taşıma kapasitesinin artırılmasında kullanılmaktadır.

Bu yüksek lisans proje çalışmasında enjeksiyon teknikleri araştırılmış ayrıca jet grout zemin enjeksiyonu yöntemi çok farklı zeminlerde başarıyla uygulanabilmesi ve temel mühendisliğinde ekonomik çözümler sunması sebebiyle ağırlıklı olarak ele alınmıştır.

Ülkemizde en yaygın olarak kullanılan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi de jetgrout yöntemidir. Bu yüksek lisans projesi laboratuvar ve arazi deney verilerini kullanarak, jetgrout yöntemi ile iyileştirilmesi hedeflenen zeminlerin tasarım aşamasında ihtiyaç duyulan , taşıma gücünü hesaplayacak, sıvılaşmaya karşı önlem alacak , jet grouting tasarımı-analizi yaparak doğru proje yapabilirliği sağlayacak bir program önermektedir.

**ANAHTAR KELİMELER : ZEMİN İYİLEŞTİRME, ENJEKSİYON
YÖNTEMİ, JET GROUTING**

ABSTRACT

**SOIL STABILIZATION BY INJECTION METHOD
MSC PROJECT
MURAT ÖZTURAN
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
GEOTECHNICAL ENGINEERING
SUPERVISOR : DOÇ. DR. DEVRİM ALKAYA**

DENİZLİ, JANUARY - 2017

Soil injections especially are used to reduce settlement and liquefaction effects of soils and increase bearing capacity of ground for last 10-15 years.

In this MSC project study, the soil injection techniques are investigated and it is emphasized that the jet grouting technique can be used in treating a wide range of soil types and performing economic solutions for geotechnical engineering.

One of the most commonly used soil stabilization methods in our country jet grouting method. By using this master project lab and field test data, improving the jet grouting methods needed in the design phase of the target soils, to calculate the bearing capacity, take measures against liquefaction by jet grouting design-analysis suggest a program that will provide the right project capability.

**KEYWORDS : SOIL STABILIZATION, INJECTION METHOD,
JET GROUTING**

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
1. ZEMİN İYİLEŞTİRME	1
1.1 Giriş	1
1.2 İyileştirme Gereken Zeminler	2
1.3 Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	3
1.3.1 Mekanik (Kompaksiyon) Yöntemler	3
1.3.2 Suyun Ortamdan Uzaklaştırılması – Drenaj.....	3
1.3.3 Zemin İçinde Rijit Kolonlar Oluşturulması	3
1.3.4 Enjeksiyon Teknikleri.....	3
1.3.5 Donatılı Stabilizasyon – Geosentetikler.....	4
1.3.6 Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon	4
1.3.7 Isıl İşlemler	4
2. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ	5
2.1 Giriş	5
2.2 Enjeksiyonun Tarihçesi.....	5
2.3 Enjeksiyonun Uygulama Alanları	6
2.4 Günümüzde Enjeksiyon.....	8
2.5 Enjeksiyon Yöntemleri	8
2.5.1 Çatlatma Enjeksiyonu	9
2.5.2 Kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) Enjeksiyonu	10
2.5.3 Emdirme (Sızdırma, Permeasyon) Enjeksiyonu.....	12
2.5.4 Kayada Enjeksiyon	12
2.5.5 Doldurma Enjeksiyonu.....	12
2.5.6 Jet Enjeksiyonu	12
2.6 Jet Grouting.....	13

2.6.1. Tarihsel Gelişimi.....	17
2.6.2. Tesis ve Ekipman.....	19
2.6.3. Jet Grouting Sınırlamaları.....	21
2.6.4. Jet Grouting Teknikleri.....	21
2.6.4.1 Tekli Jet Sistemi (JET 1).....	21
2.6.4.2 İkili Jet Sistemi (JET 2).....	22
2.6.4.3 Üçlü Jet Sistemi (JET 3).....	23
2.6.4.4 Süper Jet Sistemi (JET 4).....	24
2.6.5 Jet Grouting Sistemlerinin Karşılaştırması.....	25
2.6.6 Stabilizasyon Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3].....	28
2.6.6 Stabilizasyon Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3] – Devamı.....	29
2.6.7 Yalıtım Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3].....	30
2.6.7 Yalıtım Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3] – Devamı.....	31
2.6.8 Jet Grout Yönteminde Kullanılan İşletim Parametreleri.....	32
2.6.9 Farklı Zeminlerde Jet Grout Uygulama Parametreleri.....	34
2.6.10 Jet Grouting Uygulaması.....	36
2.6.10.1 Jet Grouting Uygulamasının Avantajları.....	41
2.6.10.2 Jet Grouting Uygulamasının Dezavantajları.....	42
2.6.11 Kontrol ve Testler.....	43
2.6.11.1 Deneme Kazıkları ve Çap Kontrolü.....	43
2.6.11.2 Deneme Kazıkları ve Çap Kontrolü.....	44
2.6.11.3 Kazık Yükleme Deneyi.....	46
2.6.11.4 Kazık Süreklilik Deneyi.....	48
2.6.11.5 Sismik Deney.....	49
2.6.11.6 Rezistivite Deneyi.....	50
2.6.11.6.1 Rezistivite Yöntemi Uygulama Biçimleri.....	51
2.6.11.6.1.1 Düşey Elektrik Sondajı (DES).....	51
2.6.11.6.1.2 Elektrik Haritalama veya Profil.....	52
2.7 Jet Grout Kolonlarının Zeminlerin Sıvılaşması Direnci Üzerine Etkisi.....	52
2.7.1 Sıvılaşmanın Tanımı ve Sıvılaşma Kriterleri.....	52
2.7.2 Periyodik Gerilme Oranı (CSR).....	55
2.7.3 Devirsel Gerilme Oranı (CRR).....	56
2.7.4 Sıvılaşmaya Karşı Emniyet Faktörü.....	57

2.7.5 Çevrimsel Gerilim Azaltım Faktörü	61
2.7.6 Sıvılaşma Potansiyeli Analizlerinde CPT Verilerinin Kullanılması.....	65
3. JET ENJEKSİYONU TASARIMI	69
3.1 Giriş	69
3.2 Kolon Tasarımı.....	70
3.3 Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Belirleyen Etmenler	73
3.3.1 Zemin – Çimento Karışımı Özellikleri.....	73
3.3.2 Kolonların Bütünlüğü ve Boyu.....	74
3.3.3 Kolonların Çapı.....	75
3.3.4 Kolonların Geçirimsizliği.....	76
3.3.5 Kolonların Taşıma Gücü	76
3.3.6 Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Etkileyen Diğer Etmenler	76
4. JETGROUTING KARIŞIM HESABI	78
5. JET GROUTING KOLONLARININ TABLOLAMA	79
PROGRAMI KULLANARAK TASARIMI	79
5.1 Hesap Algoritması	79
5.2 Veri Giriş Sayfası ve Hesaplar	80
5.3 Çevrimsel Gerilme Azaltma Faktörünün Belirlenmesi	81
5.4 Plan , Kesit ve İmalat Bilgileri.....	82
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	83
7. KAYNAKLAR	84
8. ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 : Enjeksiyon Yöntemleri [TMH, 2004/2].....	8
Şekil 2 : Düşey Yönde Çatlakların Oluşumu ve Yatay Sıkıştırma [Gallavresi, 1992].	9
Şekil 3 : Kompaksiyon Enjeksiyonunun Şematik Gösterimi [Essler vd, 2000].....	10
Şekil 4 : Kompaksiyon (Telafi, Sıkıştırma) Enjeksiyonu Dane Dağılımları	11
Şekil 5 : Kompaksiyon (Telafi, Sıkıştırma) Enjeksiyonu Uygulama Alanı [Y1].....	11
Şekil 6 : Delgi makinası parçaları [Y2]	19
Şekil 7 : İdeal jet enjeksiyonu tesisi [Y1]	20
Şekil 8 : Jet 1 uygulaması [W1].....	22
Şekil 9 : Jet 2 uygulaması [W1].....	22
Şekil 10 : Jet 2 Yöntemi Kullanılarak Oluşturulmuş Kolon [Y2]	23
Şekil 11 : Jet 3 uygulaması [W1].....	23
Şekil 12 : Jet 3 Yöntemi Kullanılarak Oluşturulmuş Kolon [Y2]	24
Şekil 13 : Süper Jet Enjeksiyon İşlemi [Y2]	25
Şekil 14 : Süper Jet Kolonları [Y2]	25
Şekil 15 : Basınç-kademeli bekleme süresi-hedeflenen kolon çapı ilişkileri [Melegary ve Garassino, 1997]	34
Şekil 16 : Farklı Zemin Türlerindeki Deneme Kazıkları [Y2].....	44
Şekil 17 : Kazıkların Çap Kontrolü [Y2]	44
Şekil 18 : Karot Numunelerinin Alınması [Y2]	45
Şekil 19 : Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi Yapılışı [Y2]	45
Şekil 20 : Kazık Yükleme Deney Sistemi [ASTM D1143/D1143M, 2007].....	46
Şekil 21 : Kazık Yükleme Deneyi Genel Görünümü [Y2]	47
Şekil 22 : Kazık Yükleme Deneyi Ekipmanları Genel Görünümü [Y2]	48
Şekil 23 : Kazık Süreklilik Deneyi [Y2].....	48
Şekil 24 : Derinliğe Bağlı Sayısallaştırılmış Hız Sinyali Grafiği [Y2].....	49
Şekil 25 : Sismik Deney Yöntemi ve Deney Ekipmanları [R1].....	50
Şekil 26 : Rezistivite Deney Ekipmanları [R1]	51
Şekil 27 : Rezistivite Deney Yapılışı [R1]	52
Şekil 28 : Devirsel direnç oranı – düzeltilmiş SPT ilişkisi [Seed vd, 1985].....	57
Şekil 29 : Devirsel direnç oranı-düzeltilmiş kayma dalgası hızı arasındaki ilişki [Andrus ve Stokoe, 1997]	61
Şekil 30 : Deprem kayma dalgalarının dağılım modeli ve birim hücrenin tanımlanması [Özsoy ve Durgunoğlu, 2003]	64
Şekil 31 : Birim alan ve kayma modülü oranlarına göre azaltım eğrileri [Özsoy ve Durgunoğlu, 2003].....	65
Şekil 32 : Temiz kum, siltli kum ve kumlu silt için M=7.5 depremlerinde kullanılan devirsel direnç oranı ile düzeltilmiş CPT uç direnci ilişkisi [Stark ve Olson, 1995] .	66
Şekil 33 : Temiz çakıl ve siltli çakıl için M=7.5 depremlerinde kullanılan devirsel direnç oranı ile CPT uç direnci değerleri ilişkisi [Stark ve Olson, 1995].....	67
Şekil 34 : Jet enjeksiyonu kolonlarında oluşan kayma yüzeyi [Y3].....	71

Şekil 35 : Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması [Y3].....	72
Şekil 36 : Jet enjeksiyon kolonlarından alınan karot örnekleri [W2]	73
Şekil 37 : Integrity test uygulaması [Y3]	74
Şekil 38 : Kolon çapı ölçümü [Durgunoğlu H.T. , 2008]	75

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 : Zemin cinsine göre soilcrete Serbest Basınç Mukavemeti ve Modülü [Durgunoğlu, H.T. , 2004].....	15
Tablo 2 : Jet Grouting Uygulama Alanları [Y1].....	26
Tablo 3 : Farklı Jet Sistemlerinin Karşılaştırması [Y3].....	27
Tablo 4 : Jet grout imalat parametreleri [Y1].....	32
Tablo 5 : Jet grouting işletim parametreleri genel değerleri [Melegary ve Garassino, 1997]	36
Tablo 6 : Gerilme azaltım faktörünün derinliğe bağlı değişimi [Seed ve Idriss, 1971].....	55
Tablo 7 : Düzeltilmiş SPT değeri-potansiyel hasar ilişkisi [Seed vd., 1985]	56
Tablo 8 : Manyitüd düzeltme faktörleri [Youd ve Idriss, 1997]	67
Tablo 9 : Granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri. [Melegary ve Garassino, 1997].....	72
Tablo 10 : Kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri. (Melegary ve Garassino, 1997).....	72

SEMBOL LİSTESİ

A_r	Alan değiştirme oranı
a_{max}	Maksimum yanal yer ivmesi
c_N	Düzeltilme faktörü
c_u	Drenajsız kayma mukavemeti
C_v	Düzeltilme faktörü
CSR_{imp}	Azaltılmış periyodik gerilme oranı
CRR	Devirsel direnç oranı
CSR	Periyodik gerilme oranı
E_{JG}	Jet grout kolonlarının elastisite modülü
FS	Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü
G_s	Zemin Kayma Modülü
G_r	Kayma modülleri oranı
S_R	Çevrimsel gerilme oranı azaltma faktörü
σ_{ult}	Toplam Jet grout kolon taşıma kapasitesi
r_d	Gerilme azaltma faktörü
V	Enjeksiyon malzemesi çıkış hızı
σ_o	Düşey toprak basıncı
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
z	Derinlik
τ	Deprem sırasında sistemde oluşan kayma gerilmesi
N	Tashih edilmemiş SPT darbe sayısı
V_T	Birim Alana gelecek olan toplam kayma gerilmesi
V_Z	Zemin tarafından taşınan kayma gerilmesi
V_{JG}	Jet grout kolonları tarafından taşınan kayma gerilmesi

V_{ult}	Jet grout kolonlarının kayma gerilmesi kapasitesi
D_{JG}	Jet grout kolon çapı
A_{JG}	Jet grout kolon alanı
P_{ult}	Jet grout kolonu için Kabul edilen taşıma gücü
Z_{emn}	İyileştirme öncesi zemin emniyet gerilmesi
L_X	İki jet grout kolonu arasındaki yatay uzaklık
L_Y	İki jet grout kolonu arasındaki düşey uzaklık
A_1	Her bir jet grout kolonuna düşen alan miktarı
σ_{ult}	İyileştirme sonraki zemin emniyet gerilmesi
γ_{JG}	Jet grout kolonu birim hacim ağırlığı
P	Bina ağırlığı
P_v	Binanın zeminde oluşturacağı gerilme
B	Yapı temel genişliği
L	Yapı temel uzunluğu
$G.S.$	Güvenlik katsayısı
ν	Poison oranı
γ_{ort}	Zeminin ortalama yoğunluğu
X	Arazi kenarından yatay jet grout uzaklığı
Y	Arazi kenarından düşey jet grout uzaklığı
M_x	Modal işlem x yönünde
M_y	Modal işlem y yönünde
JG_s	Toplam jet grout sayısı

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışmamda beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda bana yardımcı olan değerli Danışman Hocam, Sayın Doç. Dr. Devrim ALKAYA'ya ve tüm eğitim hayatımda yer alan öğretmenlerime, her zaman destek olan dostlarıma ve son olarak, beni bugünlere kadar getiren canım aileme teşekkürü bir borç bilir, sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Murat ÖZTURAN
Denizli / 2017

1. ZEMİN İYİLEŞTİRME

1.1 Giriş

Binaların temel mühendisliğinde ana prensip yapının yüzeysel, tekil veya tercihen kare ayaklar üzerine oturtulmasıdır. Tekil temellerin kullanılmadığı durumlarda yayılı temel seçeneğine başvurulabilir. Türkiye’de günümüzde yapı ağırlıklarının artması ya da zemin koşullarının kötüleşmesi ile projeci mühendislerde eğilimin derin temellerin kullanımı yönünde olduğu gözlemlenmektedir. Oysa örneğin, kazık gibi pahalı bir seçeneğe başvurmadan önce birçok durumda yayılı temel kullanmak veya zemini iyileştirerek yüzeysel temel seçeneğini sürdürebilme olanağı değerlendirildiğinde, önemli maliyet düşüşleri sağlandığı deneyimlerle görülmüştür.

Türkçe’de eşanlamı olarak kullanılan “zemin iyileştirme”, ıslah ve “stabilizasyon” terimleri gerçekte bazı farklılıklar gösterirler. İyileştirme genel bir terim olup zeminin birim hacim ağırlığı, geçirimsizliği, ısı iletkenliği, şişme/büzülme yeteneği, göçebilirliği, dağınık yapısı gibi özellikleri değiştirmeyi gözetir.

Mühendislik yapısının yükünün makul derinliğe inilmesine karşın zemin veya kaya tarafından hedeflenen taşıma gücü veya oturma limitleri içinde kalarak yüzeysel temele taşıyamaması durumu ise stabilizasyon uygulaması gerektirir. Stabilizasyon işlemleri özellikle sıkışabilirlik ve kayma direnci parametrelerinin istenen yönde değiştirilmesi ve sıvılaşma riskinin giderilmesi olarak algılanmalıdır.

Barajlar, karayolları, tüneller, rıhtım yapıları, limanlar, tüm binalar, kanalizasyon ve içme suyu tesisleri, dayanma yapıları, petrol ve gaz boru hatları gibi mühendislik yapılarının temel sistemleri veya kendileri zemin içerisinde yer almaktadır. Burada zeminin görevi; inşa edilecek olan bu yapılardan oluşan ve zemine aktarılan gerilmeleri güvenle taşıması, yapı yükü altında oluşabilecek deformasyonların istenilen sınırlar içinde kalmasını sağlamaktır.

1.2 İyileştirme Gereken Zeminler

Zayıf zemin özelliği gösteren alanlar istenmese de kullanıma açılmakta uygun olmayan zeminler üzerindeki yapılaşma, taşıma gücü, oturma, yer altı su seviyesi ve zemin özelliklerine göre sınılaşma gibi mühendislik problemlerini gündeme getirmektedir. Bu durumda zayıf zeminlerin kullanılabilir hale getirilmesi uygun iyileştirme yöntemleri ile sağlanmalıdır.

İyileştirme gerektiren zeminler aşağıda sıralanmıştır:

- Turbalık ve bataklık zeminler
- Yumuşak killer
- Gevşek kumlar
- Yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyonlar

Turbalık ve bataklık zeminler içerdikleri bitkisel maddelerin çürümesi ile büyük şekil değişimi yapabilecek özelliklerdedir. Ayrıca bu tip zeminlerin taşıma güçleri de yok denecek kadar azdır. Bu özellikleriyle karşılaşılması hiç istenmeyen bir zemin grubudur. Zorunluluk halinde temel zemini olarak kullanılacak ise mutlaka uygun bir yöntem ile iyileştirilmesi gerekmektedir.

Yumuşak killer de taşıma gücü çok düşük olan bir zemin grubudur. Küçük yükler altında bile büyük deformasyonlar yapabilecek yapıya sahiptir. Temel zemini olarak karşımıza çıktığında iyileştirme yöntemleri ile kullanılabilir hale getirilmesi zorunludur.

Gevşek kumlar ve yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak kalın alüvyon zeminler ise orta büyüklükte yükler taşıyabilir ve bu yük altındaki deformasyon değerleri de sınırlı kalabilir. Bu tip zeminlerin tekrarlı yükler (deprem, titreşimli ağır makinelerin çalışması, trafik yükü, geçici patlamalar, dalgalar vb.) etkisi altındaki davranışı problem oluşturabilir. Tekrarlı yükler, mukavemet kaybına bağlı olarak taşıma gücünde azalma ve aşırı deformasyona yol açabilir. Özellikle yeraltı su seviyesi altındaki gevşek kumlarda tekrarlı yükler sonucunda sınılaşma davranışı gözlenebilir. Bu davranış biçiminde mukavemet değerleri sıfıra düşebilir ve şekil değiştirmeler aşırı derecede artarak toptan göçmeler meydana gelir.

Taşıma gücünün düşük, oturma değerlerinin yüksek olduğu ve sıvılaşma özelliğine sahip zeminler, yapıdan zemine aktarılan gerilme değerlerine ve oturma kriterlerine bağlı olarak uygun iyileştirme yöntemleri kullanılarak iyileştirilmelidir.

1.3 Zemin İyileştirme Yöntemleri

Literatürde iyileştirme yöntemleri farklı kriterlere göre gruplandırılmıştır.

1.3.1 Mekanik (Kompaksiyon) Yöntemler

- Yüzey Kompaksiyonu
- Dinamik Kompaksiyon
- Patlayıcılar Kullanılarak
- Vibrokompaksiyon

1.3.2 Suyun Ortamdan Uzaklaştırılması – Drenaj

- Yüzeysel Suların Drenajı
- Yeraltı Sularının Drenajı
- Drenler
- Ön yükleme
- Elektro osmoz
- Yerçekimi etkisi

1.3.3 Zemin İçinde Rijit Kolonlar Oluşturulması

- Jet Grout Kolon,
- Taş Kolon
- Fore Kazık ve Mini Kazık

1.3.4 Enjeksiyon Teknikleri

- Çatlatma enjeksiyonu
- Kompaksiyon (Telafi,sıkıştırma) enjeksiyonu
- Emdirme (sızdırma, permeasyon) enjeksiyonu
- Kayada enjeksiyon

- Doldurma enjeksiyonu
- Jet enjeksiyonu

1.3.5 Donatılı Stabilizasyon – Geosentetikler

- Geotekstilller
- Geogridler
- Geomembran
- Geokompozitler

1.3.6 Katkı Maddeleri İle Stabilizasyon

- Kireç ile Stabilizasyon
- Çimento ile Stabilizasyon
- Bitüm ile Stabilizasyon
- Uçucu Kül ile Stabilizasyon
- Diğer Maddeler ile Stabilizasyon

1.3.7 Isıl İşlemler

- Isıtma Yöntemleri
- Dondurma Yöntemleri

2. ENJEKSİYON YÖNTEMLERİ

2.1 Giriş

Zemin veya kaya ortamına dışarıdan, basınç altında ve sondaj kuyusu gibi bir girişten yollanan akışkanlaştırılmış bir madde ile iyileştirme ve stabilizasyon sağlamaya yönelik işlemlere **enjeksiyon (içitim)** denir.

Bu iyileştirme, zeminin gerilme-deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimsizlik gibi hidrolik özellikleri değiştirilerek elde edilir. Üst yapı yüklerini zeminin sağlıklı bir şekilde taşıyabilmesi için zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda zeminin geçirimsizliği azaltılarak kayma mukavemeti artırılır ve enjeksiyon sayesinde danelerin kenetlenmesi sağlanarak şekil değiştirme direnci artırılır.

Enjeksiyon işlemlerinde çözelti halinde bentonit, çimento, kireç, kil, uçucu kül, bitüm ve bazı kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Zemindeki boşlukların büyüklüğüne ve enjeksiyonun amacına göre uygun enjeksiyon malzemesinin belirlenmesi gerekmektedir. Enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme biçimine ve zemin özelliklerine bağlı olarak da farklı enjeksiyon teknikleri geliştirilmiştir. Enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim vb.) zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, rölatif sıklık, geostatik gerilmeler vs.) ve uygulama amacına yönelik olarak tasarlanmalıdır.

2.2 Enjeksiyonun Tarihçesi

Enjeksiyon teknolojisinin kökeni diğer zemin iyileştirme teknikleri gibi eskiye dayanmakla beraber bu teknoloji hem yeni enjeksiyon malzemeleri hem de bu malzemelerin zemin içerisine nüfuz ettirilmesi bakımından sürekli bir gelişim içerisinde dir.

Enjeksiyon yöntemiyle zemin iyileştirilmesi 19. yüzyılın başından beri

bilinmesine rağmen ilk ciddi gelişmeler yirminci yüzyılın başında ortaya çıkmıştır. İlk enjeksiyon uygulaması Fransa'da Dieppe de Charles Berigny tarafından 1802 yılında yapılmıştır. Berigny, gelgit sonucu dalgaların aşındırmış olduğu bir köprü ayağının temelini, puzolanlı çimento ve su karışımından oluşan süspansiyonla, açmış olduğu enjeksiyon deliklerine enjeksiyon yaparak takviye etmiştir.

İlk başlarda enjeksiyon malzemesi olarak kil, puzolan ve hidrolik kireç kullanılmıştır. Portland çimentosu ise 1821'de bulunmuş olup ancak bu tarihten sonra bir enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1900-1920 yılları arasında ise enjeksiyon uygulamaları enjeksiyon teknolojisine paralel bir gelişim göstermiştir. 1914 yılında Albert Francois kesonların zemine sokulmasında yüksek basınçlı çimento enjeksiyonu kullanmıştır. Nihayet 1925 yılında Hugo Joosten jel tipi enjeksiyon kullanmıştır. Böylelikle kalıcı sertlikte ve iyi derecede kırılma direnci elde edilen bu metod kimyasal enjeksiyon olarak tanımlanmıştır. II. Dünya Savaşı'ndan sonra ahşap elemanlardan oluşan pompaların yerini demir elemanlar içeren hidrolik pompalar almış ve böylece istenen basınca daha kolay ulaşılabilmektedir.

1950 yılında tek bileşenli enjeksiyon yöntemi geliştirilmiştir. 1970'li yıllarda kimyasal enjeksiyonların zamanla şekil değiştirme davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

Zemin enjeksiyonları özellikle son 10-15 yıllık bir süreç içerisinde tünel kazımı dolayısıyla yüzeydeki veya yakın çevredeki yapılarda meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde, deprem esnasında sıvılaşabilecek gevşek, suya doymuş granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında ve zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılmasında kullanılmıştır.

2.3 Enjeksiyonun Uygulama Alanları

Zemin enjeksiyonu kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır:

1. Aşırı oturmaların önlenmesi için boşlukların doldurulması
2. Bitişik kazı, kazık çakma çalışmalarında oluşabilecek hareketlerin önlenmesi

3. Mevcut yapıların büyütülmesinde zeminin emniyet gerilmesini artırma
 4. Tünel kazısında kazı duvarları ve üstteki tabakaların hareketinin kontrolü
 5. Yer altı su akımını kontrol altına alma
 6. Yanal toprak basıncını kısıtlama
 7. Kazıkların yanal yük kapasitesini arttırma
 8. Gevşek kumlarda titreşimden dolayı sıvılaşmanın önlenmesi
 9. İksa problemlerini rahatlatmak amacıyla zemin güçlendirmesi
 10. Şev stabilizasyonu
 11. Temel takviyesi
 12. Hacim değişimleri gösteren zeminlerde büzülme ve şişmenin azaltılması
 13. Sondaj ve numune alımı esnasında su problemlerinin çözümü
 14. Yeraltı yangınlarının söndürülmesi
 15. Zemine suyun ya da kirli akışın girmesini engelleme
 16. Özellikle yol inşaatlarında dinamit atımları nedeniyle gevşeyen temel kayasının üst kısımlarının sağlamlaştırılmasında (konsolidasyon enjeksiyonu),
 17. Yapı ile ana kaya arasında kalması muhtemel boşlukların doldurulmasında (kontak enjeksiyonu),
 18. Boru itme (pipe jacking) inşaatlarında çevre sürtünmesinin azaltılmasında
- Üzerinde durulması gereken nokta, bütün bu uygulamalar için aynı enjeksiyon malzemesinin ve enjeksiyon parametrelerinin kullanılmayacağıdır.

Farklı uygulama alanına sahip olan zemin enjeksiyonlarının başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için enjeksiyon tekniklerinin, enjeksiyon harcı türlerinin, dolgu malzemelerinin özelliklerinin ve zeminin enjeksiyona karşı göstereceği davranışın bilinmesi gerekmektedir.

Bu proje çalışmasının amacı günümüzde uygulanan enjeksiyon tekniklerini incelemek, özellikle de -jet grout- zemin enjeksiyonu yönteminin zemin sıvılaşması, üst yapı yüklerinden dolayı zeminde meydana gelen oturmalar ve zeminlerin taşıma kapasitesindeki etkinliğini belirtmektir.

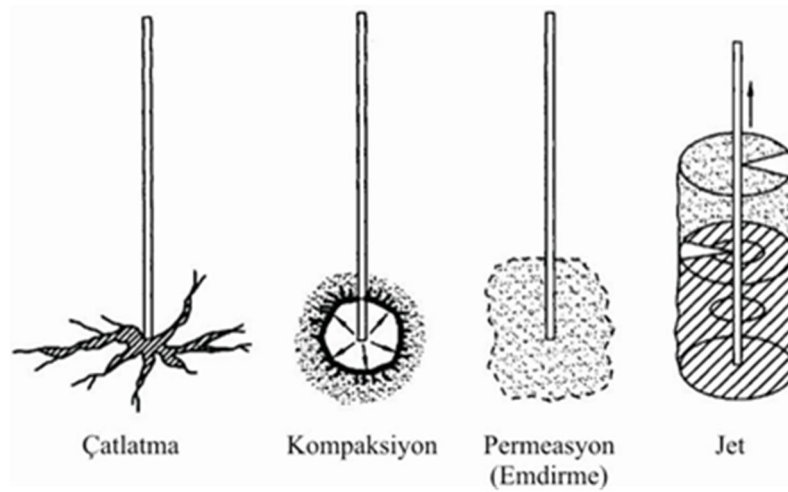
2.4 Günümüzde Enjeksiyon

İçitim veya Türkiye’de kullanılan yabancı adıyla enjeksiyon çalışmaları birçok amaca yönelik olarak yapılmakta, hacimce en büyük uygulaması da baraj temellerinde geçirimsizliğin sağlanması için gerçekleştirilmektedir.

Binalara yönelik enjeksiyon çalışmalarının günümüzde zeminin güçlendirilmesi, sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesi, farklı oturmaların giderilmesi (kaldırma), özel durumlarda komşu yapının güvenliğine yönelik olarak kazı duvarlarının oluşturulması gibi giderek artan önemli uygulamaları bulunmaktadır.

2.5 Enjeksiyon Yöntemleri

Enjeksiyon yöntemleri enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme biçimine bağlı olarak değişmektedir. Enjeksiyon malzemesinin özelliğine bağlı olarak çimento enjeksiyonu ve kimyasal enjeksiyon şeklinde bir ayırım yapılabilir. Zemin içerisine yerleştirilmesine göre temel enjeksiyon teknikleri Şekil 2.0.’de gösterilmiştir.



Şekil 1 : Enjeksiyon Yöntemleri [TMH, 2004/2]

Buna göre temel enjeksiyon yöntemleri;

- 1) Çatlatma enjeksiyonu
- 2) Kompaksiyon (Telafi,sıkıştırma) enjeksiyonu
- 3) Emdirme (sızdırma, permeasyon) enjeksiyonu
- 4) Kayada enjeksiyon
- 5) Doldurma enjeksiyonu

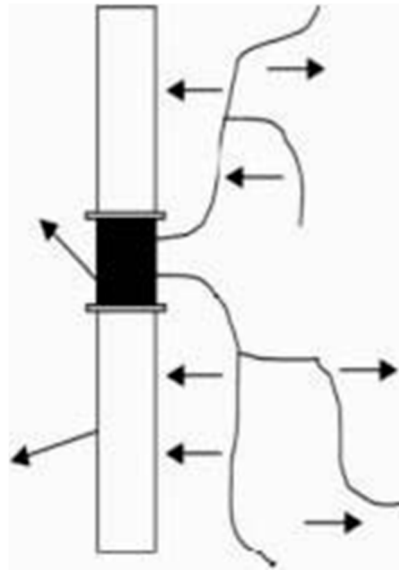
6) Jet enjeksiyonu

olmak üzere altı farklı grupta ele alınmaktadır.

Bu gruplara ek olarak elektro-enjeksiyon olarak nitelendirilen, elektroosmoz sırasında ortama anot tarafında sodyum silikat veya kalsiyum klorür gibi kimyasallar katılmasıyla gerçekleştirilen taşlaşdırma işlemi de özel bir grup oluşturmaktadır.

2.5.1 Çatlatma Enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu yüksek basınç altında (4 Mpa) enjeksiyon malzemesi kullanarak zeminin kasıtlı olarak çatlatılmasıdır. Emdirme (permeasyon) enjeksiyonunun başarılı olamadığı düşük hidrolik iletkenlikli kil ve kaya ortamlarında bir tür telafi enjeksiyonu olarak nitelendirilebilecek yeni bir yöntem çatlatma/yapraklandırma enjeksiyonudur. Bu yöntemde ortalama yeterince yüksek basınçta yollanan sıvının mevcut kılcal çatlakları açarak veya yeni çatlaklar oluşturarak olası oturmaların önlenmesi gözetilmektedir. Basıncın düzeyi oluşacak hidrolik eğim ve söz konusu zemin derinliğinde etkiyen efektif gerilmeye bağlı olarak saptanır. Çoğunlukla zeminin sıkıştırılması ve sertleştirilmesi için ya da ulaşılamayan boşluklara ulaşarak zeminin geçirgenliğini azaltmak için kullanılır. Ayrıca yapılarda kontrollü kabarmaları oluşturmada kullanılmaktadır.



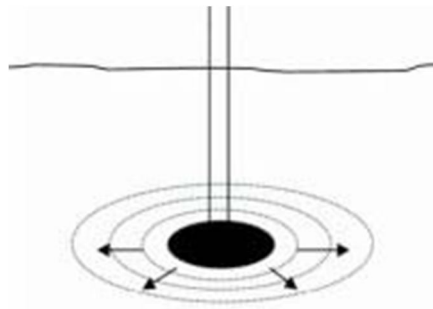
Şekil 2 : Düşey Yönde Çatlakların Oluşumu ve Yatay Sıkıştırma [Gallavresi, 1992]

Normal yüklenmiş bir zeminde oluşacak ilk enjeksiyon merceği büyük asal gerilme yönü olan düşeyde ilerleyecek ve zemini sıkıştırarak, artan enjeksiyon hacimleri ise yatay mercekler oluşturacağından dikkatli olunmazsa zeminde istenmeyen kabarmalar başlayacaktır. Diğer ortamlarda, özellikle mevcut çatlaklar ve süreksizlikler varsa, ilk yapraklanma etkin gerilmelere değil bunların konumlarına bağlı olacaktır.

2.5.2 Kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) Enjeksiyonu

Bu yöntemde orta-yüksek viskoziteli karışımların ortamam yüksek basınçlarla (>50 bar) yollanması ve bunların boşluk/çatlaklara girmeden kendisinin ortamda balon benzeri ayrı bir kütle oluşturması gözetilmektedir.

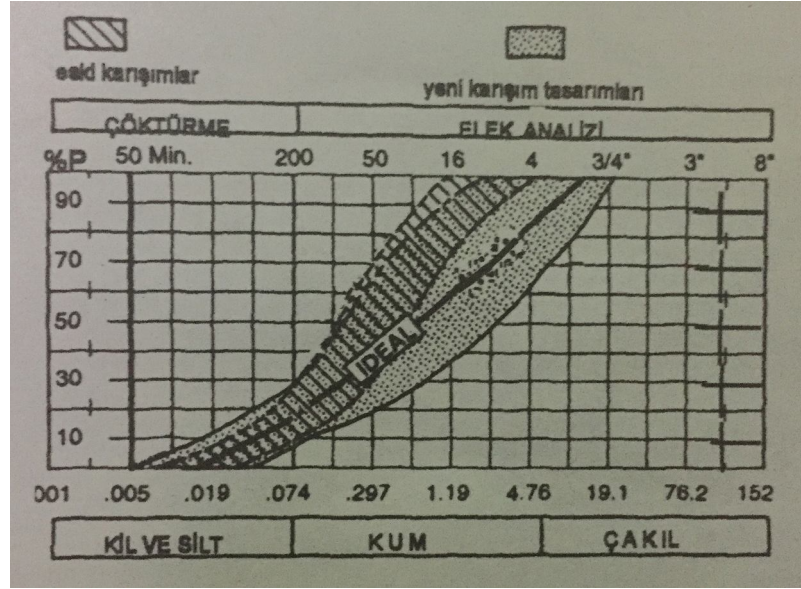
Kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) enjeksiyonu, çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminin yer değiştirmesi veya sıkıştırılması için yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar kum içeren katı ve yüksek vizkoziteli enjeksiyon malzemesinin çok yüksek basınçta (3.5 Mpa) zemin boşlukları içerisine girmeden enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturarak etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştırarak şekilde yüksek basınçlarda enjekte edilmesidir. Buna ek olarak kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) enjeksiyonu temel alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrolünde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin iyileştirilmesinde ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde uygulanmaktadır.



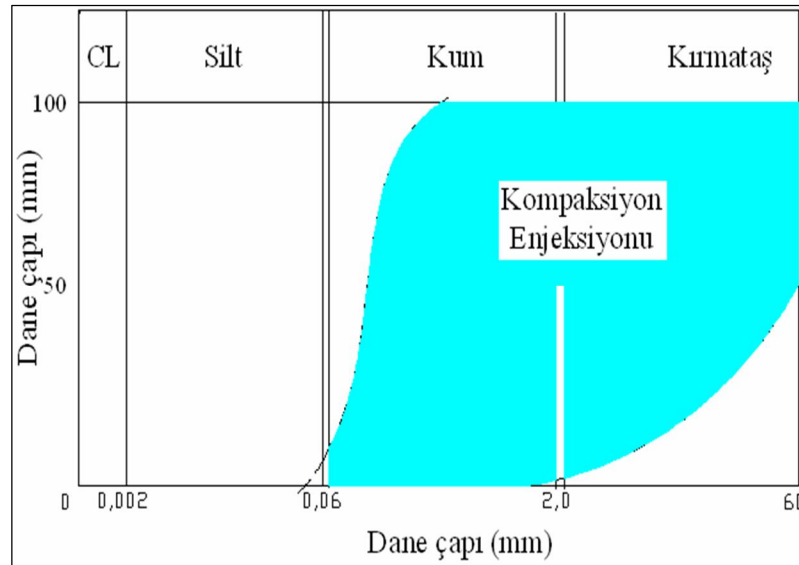
Şekil 3 : Kompaksiyon Enjeksiyonunun Şematik Gösterimi [Essler vd, 2000]

İlk kez 1951'de Almanya'da bir hidroelektrik santralini kaldırmak için uygulanmıştır.

Bu uygulama sonucunda zemine önemli ek hacımlar girdiğinden kontrollü veya kontrolsüz kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) etkisi, ayrıca mevcut yapının istenen yönde ötelenmesi sağlanır. Böylece kompaksiyon (telafi, sıkıştırma) enjeksiyonu yapıların farklı oturmalarının giderilmesi, bunların yükseltilmesi/kaldırılması ve ortamın sıkıştırılması sonucu taşıma gücünün yükseltilmesi gibi önemli yararlar sağlar.



Şekil 4 : Kompaksiyon (Telafi, Sıkıştırma) Enjeksiyonu Dane Dağılımları



Şekil 5 : Kompaksiyon (Telafi, Sıkıştırma) Enjeksiyonu Uygulama Alanı [Y1]

2.5.3 Emdirme (Sızdırma, Permeasyon) Enjeksiyonu

Emdirme (sızdırma, permeasyon) enjeksiyonu 1802'de Fransada geliştirilmiş bir yöntem olup, kumlar ve çakıllar gibi zeminlerin özelliklerini (dokusunu) bozmadan içine düşük viskoziteli peltelcil veya daneli karışımları göreceli düşük basınçlarda yollama tekniğidir. Ortamın özellikleri bu işleme elverişli ise enjeksiyon sıvısı çatlak ve boşluklara kolayca girerek onları tıkar ve daneleri yapıştırır. Böylece sıkışabilirlik ve geçirimsizlik azalır, kayma direnci ve buna bağlı olarak da temel taşıma gücü yükselir. Bu uygulamada yüzeyde oluşabilecek kabarmaları önlemek için kural olarak enjeksiyon basıncının o noktadaki örtü yükü eşdeğerinden yüksek olmaması istenir. Emdirme (sızdırma, permeasyon) enjeksiyonu killer ve sağlam, çatlaksız kayalar gibi düşük geçirimsizlikteki ortamlarda uygun bir yöntem değildir.

2.5.4 Kayada Enjeksiyon

Kaya enjeksiyonu, bir kaya kütledeki ince ve kalın çatlakların veya bunların birleştiği yerlerin geçirgenliğini azaltmak ve kaya kütlelerini sertleştirmek amacıyla, yeni çatlaklara neden olmadan veya var olan çatlakları genişletmeden enjeksiyon malzemesi ile tam olarak veya kısmen doldurulmasıdır.

2.5.5. Doldurma Enjeksiyonu

Türkiye'de bir çok yörede karşılaşılan karst, özellikle baraj temellerinde binlerce m³'e varan hacımlardaki boşluklarla mühendislere kabus yaşatan doğal bir malzemedir. Doldurma enjeksiyonu, boşlukların yeri ve hacminin sondajla saptanmasından sonra buraya, kil, uçucu kül, kum ve bunların çimento karışımları ile doldurulmasıdır.

2.5.6. Jet Enjeksiyonu

Bu enjeksiyon türünde tasarım derinliğine kadar, su kullanılarak delgi yapılmakta ve delgi için kullanılan tijlerin ucundaki nozullardan yüksek basınçlarda çimento şerbeti zemine jetlenmektedir. Bu jetleme esnasında tijler de belirli bir hızla döndürülmekte ve yine belirli bir hızla da zemin içinde aşağıdan yukarıya doğru çekilmektedir.

Böylece, belirli bir çapta ve boyda zemin içinde silindirik bir kolon oluşturulmaktadır. Jetleme esnasında kolon çapını artırabilmek için çimento jeti yanında hava ve su jetleri de kullanılabilir. Buradaki mekanizmadan anlaşılabilir gibi jet enjeksiyonu aslında bir enjeksiyon tekniği değil bir karıştırma yöntemidir. Sonuçta zemin içerisinde beton-zemin karışımı yüksek dayanımlı ve geçirimsizliği düşük kolonlar elde edilmektedir. Bu yönüyle jet enjeksiyonu diğer enjeksiyon türlerinden kesin olarak ayrılmaktadır.

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.

Jet enjeksiyonu sonucu zemin içerisinde oluşturulan kolonlar, temeller, döşemeler ve dolgular altında taşıma gücü ve oturma kontrolü için kullanılabilir gibi yumuşak zeminlerde açılan tünellerde tünel kesiti üzerinde taşıyıcı şemsiye, yine yumuşak killerdeki derin kazılarda kazı tabanı altında payanda elemanı olarak da kullanılabilir. Ayrıca bu enjeksiyon tekniğinin sıvılaşma riskinin azaltılması gayesiyle kullanımına ait örnekler de bulunmaktadır.

2.6 Jet Grouting

Jet grouting, çoğu zemin türü için zeminin yer değiştirmesi amacıyla çimento hamurunun kontrollü bir şekilde püskürtülmesidir.

Jet grouting, direk olarak küçük çaplı nozul ile çok yüksek basınçla zemine enjekte edilen stabilite malzemesinin (genellikle su-çimento karışımı) doğal zemin ile karıştırılmasıdır. Stabilite malzeme küçük çaplı nozülde 300-600 bar gibi yüksek basınçlarda püskürtülür. Bu yöntemde, enjeksiyon nozullarından çok yüksek basınçla püskürtülen malzeme ile zeminin doğal matrisi bozulmakta ve stabilite malzemesinin yerindeki zeminle karışması sağlanmaktadır. Sonuçta, homojen ve sürekli yapıya sahip ve temel karakteristikleri önceden belirlenebilen bir yapı elde edilmektedir.

Zemin iyileştirmesi, zeminin mekanik özelliklerini değiştirir ve geliştirir, özellikle zeminin taşıma gücünü ve elastisite modülünü arttırırken aynı zamanda

geçirgenliğini azaltır. Jet grouting yöntemi bu sonuçlara ulaşmak için en başarılı yöntemlerden birisidir.

Jet grouting, bir başka tanımlamaya göre, “soilcrete” olarak bilinen zemin-çimento ürünüdür ve bir aşındırma-yer değiştirme sistemidir. Birçok zemin tipi için uygundur ve zemin altındaki kısıtlı alanlara karşın gerçekleştirilebilir. Jetgrout; zemin stabilizasyonu, zemin takviyesi, kazı desteği ve yeraltı suyu kontrolü için kullanılan çok yönlü bir tekniktir

Jet grouting geleneksel grouting sistemlerine, temel takviyesi sistemlerine, mini kazıklara ve sıkıştırılmış hava kullanımı gibi yöntemlere alternatif bir yöntemdir.

Jet grouting yöntemleri genellikle mevcut tesislerin normal çalışmalarını engellemeden gerçekleştirilebilir. Jet gouting sadece en güvenli yöntemlerden biri olmayıp aynı zamanda zaman tasarrufu sağlayacak kadar da hızlı bir yöntemdir.

Jet grouting kohezyonsuz az daneli zeminden kohezyonlu plastik killere kadar birçok zemin tipinde uygulanabilir. Jet grouting yöntemi bazı özellikleri itibariyle diğer grouting yöntemlerine göre üstün bir yöntemdir. Klasik enjeksiyon sistemleri ile zemin özellikleri büyük oranlarda değiştirilememekte, buna karşın jet groutin yöntemi ile zemin su-çimento karışımı ile karıştırıldığı için zeminin temel özellikleri değiştirilebilmektedir.

Mevcut zemin çimento ile mekanik karıştırıcılar vasıtası ile karıştırılması halinde yöntem “deepmix” olarak tanımlanır. Kolonların diğer bir teşkil yöntemi ise mevcut zeminin önce özel delgi makinesi ile delinmesi ve bilahare yüksek basınçta 400-500 bar çimento şerbetinin jetlenerek, zeminin yerinde parçalanarak karıştırılması ve kullanılan özel tij ve monitörün belirli bir hızla döndürülerek yukarı çekilmesi suretiyle yerinde silindirik kolon teşkil edilmektedir. Bu inşa metodu jetgrout yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

Jet grout kolonları mevcut zeminin yerinde bir katkı malzemesi ile

karıştırılarak bir kolon teşkil edilmesi halinde oluşan kolonlardır. Katkı malzemesi olarak genellikle çimento şerbeti (çimento-su karışımı) kullanılmakla birlikte çok yumuşak ve hassas İskandinav ülkelerinin killerinde, özellikle İsveç'te kireç veya belirli oranlarda kireç- çimento karışımı da kullanılmaktadır.

En sık kullanım alanı olarak mevcut yapıların toplam ve farklı oturmalarını azaltmak olup, tünellerde tıkaç betonları, açık kanallar ve barajlarda farklı amaçlı uygulamaları bulunmaktadır. Jet grouting ayrıca yeni yapılar, dolgular ve istinat duvarları için yumuşak zeminin konsolidasyonunda da kullanılır. Diğer uygulamalar da açık kazılarda destek ve şev stabilizasyonu amacını taşımaktadır.

Oluşan "soilcrete" mekanik özellikleri, serbest basınç mukavemeti R_f -Mpa, deformasyon modülü E_{jg} - Mpa diğer uygulama parametreleri ile birlikte mevcut zeminin cinsi ve su-çimento oranı ile kontrol edilmektedir. Aşağıda Tablo 2.1'de özetlenen çeşitli zeminler için soilcrete deformasyon modülü ortalama $E_{jg} \approx 500-12,500$ Mpa olarak alınabilir. Bu takdirde zemine göre kolon deformasyon modülü oranı $E_{jg}/E_s \approx 10-250+$ olarak verilebilir.

Tablo 1 : Zemin cinsine göre soilcrete Serbest Basınç Mukavemeti ve Modülü [Durgunoğlu, H.T. , 2004]

Zemin Cinsi	Serbest Basınç Mukavemeti, f_{jg} ,Mpa	Modül Oranı(*), E/f_{jg} '
Kil	2-5	150
Silt	3-7	200
Kum	7-14	600
Çakıl	12-18	900

(*) %40 gerileme seviyesine tekabül eden modül

Jetgrout kolonların çeşitli kullanımları aşağıda sıralanmıştır,

- Temeller altında, düşey yükler için basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü
- Döşemeler altında düşey ve özellikle yüksek yayılı yükler altında basınç

elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü

- Dolgular altında basınç elemanı olarak taşıma gücü ve deplasman kontrolü
- Köprülerde yaklaşım dolguları altında düşey dolgu yüklerinin taşınması, dolgu altında oturma kontrolü ve kenar ayak kazıklarına negatif çeper sürtünmesi aktarılmasının önlenmesi
- Havuzlarda, yeraltı su depolarında ve su yapılarında, donatılı çekme elemanı olarak
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması
- Kazılarda donatı ile teçhiz edilerek düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak
- Geçirimli zeminlerde ve yüksek YASS ile kazılarda taşıyıcı elemanlar arasında batardo kapama elemanı olarak
- Yumuşak killerdeki kazılarda kazı öncesi kazı taban seviyesi altında teşkil edilen payanda elemanı olarak
- Kazı tabanından kazıya gelecek yeraltı suyunun kontrolü için tıkaç elemanı olarak
- Şevlerde stabilitenin sağlanması için zemin takviye elemanı olarak veya ağırlık batardosu teşkili ile
- Yumuşak zeminde açılan yüzeye yakın tünellerde tünel üstündeki zeminin iyileştirmesi amacı ile
- Yumuşak zeminde açılan tünellerde tünel içinde ve ayna önünden yapılarak, kazı öncesi tünel kesiti üzerinde taşıyıcı bir şemsiye oluşturulması amacı ile
- Önemli ve ağır yapılarda sıvılaşma güvenlik sayısı düşük olan yerlerde

kazıklı temellere gelecek yatay yüklerin ve oluşacak deplasmanların kontrolü için, kazıklarla birlikte

- Sıvılaşma sonucu oluşacak zemin yanal ve düşey deplasmanlarının sınırlandırılması için yapı etrafında veya altında kapama elemanları olarak
- Sıvılaşma riskine karşı güvenlik sayısının artırılması, zeminde oluşan kayma gerilmelerinin bir kısmının taşınarak deprem sonucu oluşabilecek düşey ve yanal deplasmanların sınırlandırılması

Jetgrout metodunda, imalatta yer alan üniteler, çimento silosu, karışım ünitesi, yüksek basınç pompası, su pompası, hava kompresörü ve delgi makinesi olarak sıralanabilir. Bir kolon, belirli bir derinliğe kadar su kullanılarak delgi yapılması, delginin sona erdirilmesini müteakip suyun tahliye olduğu nozulun kapanarak tijin ucunda yer alan jetleme monitörünün üzerindeki nozullardan yüksek basınç altında çimento şerbetinin jetlenmesinden ibarettir. Jetleme sırasında tijler belirli bir hızla döndürülmekte ve belirli bir hızla da zemin içinde aşağıdan yukarıya doğru çekilmektedir. Böylece, belirli bir çapta ve boyda zemin içinde silindirik bir “soilcrete” kolon teşkil edilmektedir

2.6.1. Tarihsel Gelişimi

“Çok yüksek basınçlı grouting”, Almanya’da Hohe Druck Injektion (HDI) olarak da bilinen jet grouting 1950’li yıllarda ilk kez Pakistan’da “Cementation Co.” adlı firma tarafından uygulanmıştır. 1965’den itibaren Japonya’da “Yamakado Kardeşler” tarafından geliştirilmiştir.

1970’li yıllarda ise iki jet grouting yöntemi eşzamanlı olarak geliştirilmiştir. Nakanishi N.I.T. tarafından geliştirilen jet grouting yöntemi “Chemical Churning Pile” (CCP) jet grouting olarak adlandırılmıştır. . Kimyasal ya da çimento şerbeti 1-2 mm çapındaki nozullardan çok yüksek basınçlarda püskürtülürken nozulun bulunduğu delme çubuğu çekilir ve döndürülür ve böylece zemin-çimento enjeksiyonu kolonu elde edilir.

Yahiro tarafından bulunan diğer yöntem ise zeminin kesilmesi, yer değiştirmesi ve çimento hamuru ile karıştırılması esasına dayanır. Bu yöntemde eşmerkezli üç çubuk su, hava ve çimento enjeksiyonu sağlamak için kullanılır. Japonya’da jet grouting sistemi ile ilgili birçok modifikasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bunların arasında en önemlisi “Jumbo Special Grout” (JSG) adı verilen hava kapsüle edilmiş çimento hamurunun kullanılmasıdır. Bu yöntem, CCP kolonlarına göre çapı 1.5-2 kez daha büyük kolonlar sağlama kapasitesine sahiptir.

Japonya’daki ilk gelişmeleri takiben, daha sonraki gelişmeler 1980’li yıllarda Almanya’da, Fransa’da, Brezilya’da ve özellikle İtalya’da gerçekleştirilmiştir. Jet grouting sisteminin en son uygulaması “X-jet” adı verilen sistemdir. Çok büyük bir doğrulukla büyük çaplı jet grout kolonları elde edilmesine imkân sağlayan bu yöntem Japonya’da geliştirildi ve Avrupa’da Keller tarafından lisanslandı. Bu sistem, birbirleriyle kesişene kadar yüksek kesme enerjisine sahip iki jetten oluşur.

Lisanslı bir teknoloji olarak X-jet grouting delme deliğinden 1 m uzaklıkta kesişecek şekilde konumlanmış bir çift hava-su nozulunun, 2-2.5 m çapındaki ayrı kolonu parçalamak için kullanıldığı bir yöntemdir.

Karşılaşma noktasında aşındırma enerjisi dağılarak kesme enerjisini büyük ölçüde azaltır. Çimento hamuru aşındırma nozullarının altında yer değiştirme ve yüksek kalitede soilcrete kolonunu oluşturmak için zemine enjekte edilir.

Çok yumuşak, değişken dayanıklılıkta ve oldukça tabakalı zeminlerde, bu durum belirli geometri ve hassas malzeme gereksinimleri açısından önemli bir avantaj sağlar.

İnşa yöntemi üç akışkanlı jet grouting yöntemininkine benzerdir ancak kaldırma oranı ve döndürme hızı jetin üst kısmının parçalanmasını ve kesişme enerjisine ulaşmasını sağlayacak kadar yavaştır. nozul ayarı jetlerin karşılaşmasını ve enerjinin dağılmasını sağlaması açısından kritiktir. Özel donanım bu akışkanları enjekte etmek için şarttır.

Son yıllarda ilerleyen teknoloji sayesinde enjeksiyon pompası basıncı, enjeksiyon hızı arttırılmış böylelikle kullanılan araçların güvenilirliği arttırılmış, insan gücü ihtiyacı azaltılmış, hazırlık çalışmalarının daha çabuk yapılmasını sağlamıştır.

2.6.2. Tesis ve Ekipman

Jet enjeksiyonu Şu ekipmanları gerektirmektedir:

Delgi makinesi: Uygulama projesinde öngörölen derinliğe kadar yukarıdaki yöntemlerden biri ile delgi yapabilecek ve jet grout kolon teşkil edebilecek kapasitede delgi makinesidir.

Pompa ünitesi: Jet grout enjeksiyon karıŐımını istenen çapta jet grout kolon teşkil edebilecek basıncı verebilecek pompadan oluşacak jet grout ünitesidir.

Mikser ünitesi: Jet grout enjeksiyon karıŐımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıŐıracak mikser ve dinlendiriciden oluşan, jet grout pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede mikser ünitesidir.

Çimento silosu: Dökme imento depolayabilen ve jet grout mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek imento silosu ve konveyörüdür.

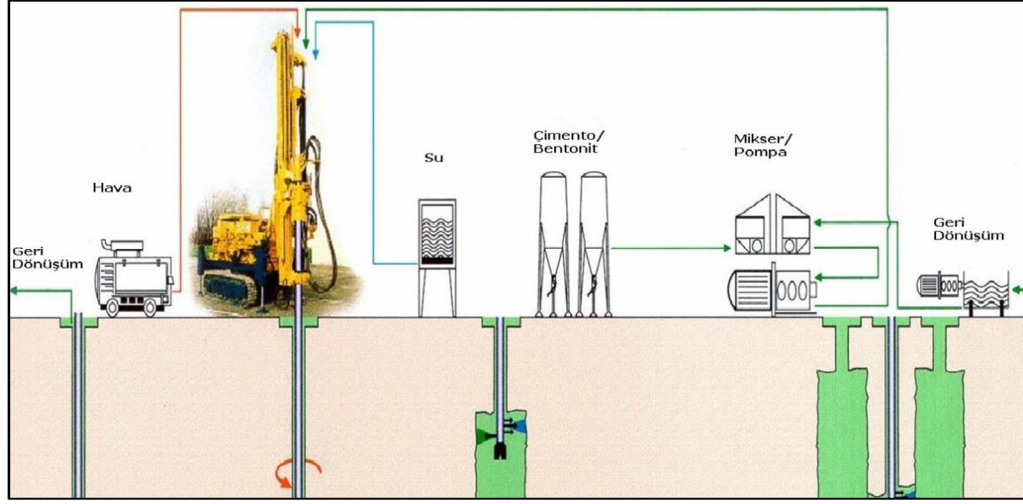
Su tankı: 15-25 ton kapasiteli sağlam su tankı-havuzu ve su pompası olmalıdır.

Diğer ekipmanlar: 8-12 bar basıncılı kompresör, kaynak makinesi ve elektrik kesintilerinin olması halinde 50KVA' lık bir jeneratör bulundurulmalıdır.

Karıştırma ünitesinde enjeksiyon uygulaması için hazırlanan karışım otomatik olarak hazırlanmalıdır. Sonra bu karışım pompa ünitesine aktarılır.



Şekil 6 : Delgi makinası parçaları [Y2]



Şekil 7 : İdeal jet enjeksiyonu tesisi [Y1]

Jet enjeksiyonunda değiştirilmiş bir delgi makinası kullanılır. Tijin devir ve geri çekilme hızı ve istenilen kolon çapı bu uyarlanmış delgi makinasındaki kontrol panelinden ayarlanmaktadır. Delgi ve enjeksiyon işleminde aynı tij kullanılır. Delgi makinası deliği oluşturur ve kesici akışkan ve enjeksiyon malzemesi valfler aracılığıyla enjekte edilir. Eğer sert zemin tabakaları veya temellerle karşılaşırsa enjeksiyon deliğini delmek için normal tip delgi kullanılır. Genelde işlem tek enjeksiyon safhasında yapılır. Yükseklik sınırlamaları veya yüksek enjeksiyon derinliklerinden dolayı bunun mümkün olmadığı durumlarda bu işlem birkaç safhada yapılacak şekilde tasarlanmalıdır.

Enjeksiyon sistemi kullanılacak ekipmanı belirler. Tek fazlı enjeksiyon ekipmanı dibinde bir veya daha fazla enjeksiyon nozzle'ı olan içi oyuk gövdeli boruyu içermektedir. İki fazlı enjeksiyon sisteminde enjeksiyon malzemesi borunun içini ve basınçlı hava ise iç boru ile dış boru arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Enjeksiyon malzemesi ve onu çevreleyen hava ikili nozzle ile enjekte edilir. Üç fazlı enjeksiyon ise aynı merkezli üçlü boru sistemi kullanır. Bu sistem hava borusunun içinde su borusunu ve bunları çevreleyen enjeksiyon malzemesi borusunu içermektedir. Bu sistemde enjeksiyon malzemesi farklı bir nozzle'dan enjekte edilir. Jet nozzle'larının çapı çok farklılık göstermektedir. Ancak eğer çap çok küçük olursa sıvı basıncının artacağı göz önünde tutulmalıdır. Diğer taraftan eğer nozzle çapı çok büyük alınırsa, bu yüksek akış oranına, düşük sıvı basıncına ve küçük çaplı jet kolonlarına neden olur.

2.6.3. Jet Grouting Sınırlamaları

Jet enjeksiyonunda üç ana kısıtlama vardır.

1. Zemin şişmesini minimuma indirmek veya ortadan kaldırmak için jet enjeksiyon sürecinin atık dönüşümüne bağlı iyi kontrolünün sürekliliğinin sağlanması önemlidir. Aşırı zemin şişmesi yer altı hizmetlerine komşu yapılara veya temellerle zarar verebilir.
2. Atık dönüşümleri engellenebilir; eğer jet enjeksiyonunda ısrar edilirse zeminde çatlaklar oluşabilir.
3. Çok miktarda çamurlu atık oluşabilir. Örnek olarak bir jet enjeksiyon birimi her vardiya için 50 m³ atık oluşturur. Bunun hacminin %33'e kadar olanı, seçilen jet enjeksiyon süreci ve malzemeye bağlı olarak katı malzemeden oluşabilmektedir.

2.6.4. Jet Grouting Teknikleri

Jet enjeksiyonunda ilk aşama bir enjeksiyon deliği açmaktır (genelde 100-200 mm. çapında). Jet borusu genelde delme ekipmanının bir parçasıdır ve çimentolu zemin kolonunun temeli için gereken derinliğe yerleştirilir. Zor zemin şartlarında sondaj deliği önceden delinmiş olabilir.

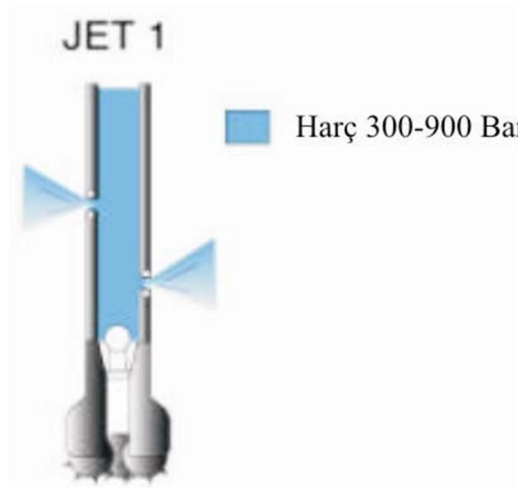
Enjeksiyon malzemesinin veya su ile enjeksiyon malzemesinin yüksek basınçla jetlenmesi sondaj deliği çevresindeki zemini aşındırır ve malzeme zeminle karışır veya malzeme zeminin yerini alır. Jet monitörünün döndürülmesi ve çekilmesi sonucunda sadece çimento yada zemin ve çimento kolonları oluşur. Sonra jet enjeksiyon aleti yeni bir konuma götürülür ve süreç tekrar edilir.

Şu anda kullanımda olan üç jet enjeksiyonu sistemi vardır

2.6.4.1 Tekli Jet Sistemi (JET 1)

Bu en basit ve en yaygın tekniktir. Enjeksiyon malzemesinin 5-10 mm çapındaki bir veya birkaç nozzleden yüksek basınçla (60 Mpa, 600 bar) zemine

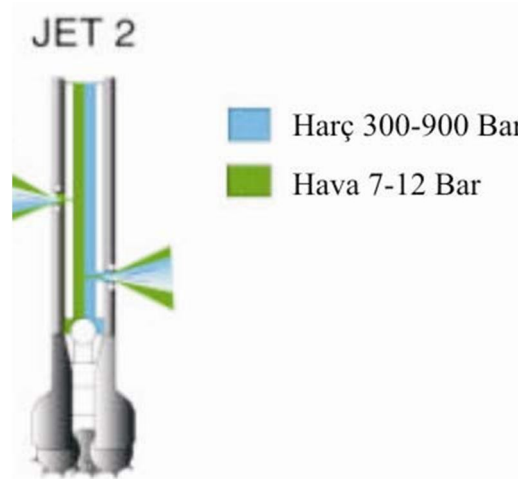
enjekte edilmesidir. Enjeksiyon jeti püskürttüğü harç ile zemini aşındırarak zemin-çimento karışımı meydana getirir. Bu sistemde atık az olur.



Şekil 8 : Jet 1 uygulaması [W1]

2.6.4.2 İkili Jet Sistemi (JET 2)

Çift çeperli bir boru takımının delici olarak kullanıldığı bir sistem olup tekil sistemin bir uzantısıdır. Enjeksiyon jetinin (iç boru) genellikle 0,2–1,5 Mpa (2-15 bar) basınçlı hava (dış boru) ile çevrelendiği bir sistemdir. Kinetik enerji kayıplarındaki tekli sisteme göre azalma daha yüksek hacimde bir zeminin iyileştirilmesini sağlar. İç borudaki malzemenin hava ile çevrelenmesi jettin kesme kabiliyetini artırır.



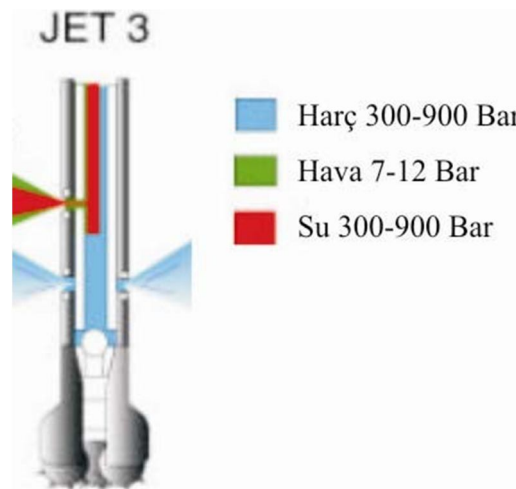
Şekil 9 : Jet 2 uygulaması [W1]



Şekil 10 : Jet 2 Yöntemi Kullanılarak Oluşturulmuş Kolon [Y2]

2.6.4.3 Üçlü Jet Sistemi (JET 3)

Bu sistem zemini aşındırmak için basınçlı hava ile çevrelenmiş bir basınçlı su ve malzemenin enjeksiyonu için ayrı nozzle kullanmaktadır. Hava, su ve malzemeyi farklı basınçlarda enjekte edebilmek için iç içe üçlü bir boru sistemi gerekmektedir. Genelde hava için 0,2–1,5 Mpa (2–15 bar), su için 4 Mpa (40 bar) ve enjeksiyon malzemesi için 0,5–3 Mpa (5–30 bar) basınç uygulanmaktadır.



Şekil 11 : Jet 3 uygulaması [W1]



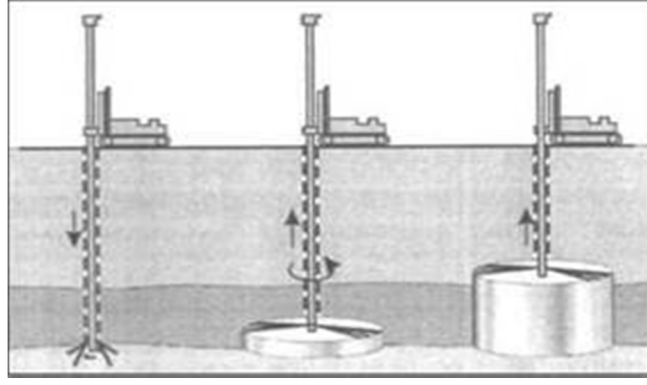
Şekil 12 : Jet 3 Yöntemi Kullanılarak Oluşturulmuş Kolon [Y2]

Yakın zamanda, yukarıdaki sistemlerden farklı olarak yeni bir çiftli sistem uygulamasına geçildi. Bu sistem, yukarıdakilerden ayırmak için çiftli su sistemi olarak adlandırılabilir. Üçlü sisteme çok benzemekle beraber, burada basınçlı suyu çevreleyen basınçlı hava bulunmamaktadır. Püskürtme pompaları ve ilgili donanımdaki devam eden gelişim ve düzenleme sayesinde günümüzde daha yüksek püskürtme enerjileri elde etmek mümkün olmaktadır. Bu da çiftli püskürtme sistemlerinin kullanımını arttırmakta ve dolayısıyla üçlü sistemin etkinliğini giderek azaltmaktadır.

2.6.4.4 Süper Jet Sistemi (JET 4)

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

Bu yöntemde büyük çaplı kolonlar elde edebilmek için tijlerin dönme ve çekme hızları diğer jet yöntemlerine göre çok yavaştır. Uygun rotasyon ve kaldırma parametreleri ile 5 metre çapa kadar jet kolonlarının oluştuğu kanıtlanmıştır



Şekil 13 : Süper Jet Enjeksiyon İşlemi [Y2]

Süper jet yöntemi;

- Kolonların birbirine bağlanmasıyla yapıların yatay ve düşey desteklenmesi,
- Yer altı suyunun izole edilmesi,
- Sıvılaşmaya uygun zeminlerin stabilizasyonu,
- Tünel inşaatları sırasında karşılaşılan yumuşak zeminlerin stabilizasyonu,

Yenileme ve modifikasyon için derin altyapı sistemlerinin güvenliği, gibi amaçlarla kullanılmaktadır.



Şekil 14 : Süper Jet Kolonları [Y2]

2.6.5 Jet Grouting Sistemlerinin Karşılaştırması

Tek enjeksiyon sistemi temelde enjeksiyon ve enjeksiyon malzemesinin zemin ile karışması ile sonuçlanır. İkili ve üçlü enjeksiyon sistemleri daha fazla atık oluşturur. Bu fazla miktardaki atık bu sistemlerin yarı karışım ve yarı yer değiştirme süreçleri içerdiğini göstermektedir.

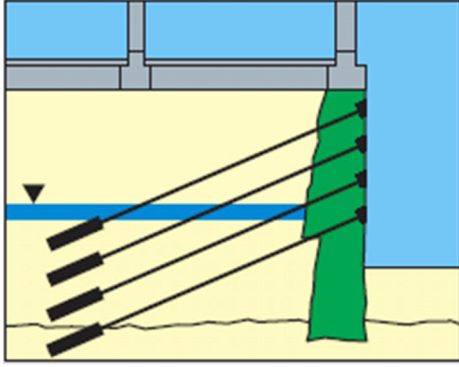
Tablo 2 : Jet Grouting Uygulama Alanları [Y1]

Jet 1 (Tek akışkanlı sistem)	Jet 2 (Çift akışkanlı sistem)	Jet 3 (Üç akışkanlı sistem)
<ul style="list-style-type: none"> • Boşluklu zeminde geçirimsizlik perdeleri • Tünel çatı için zemin konsolidasyonu • Yumuşak zeminde derin hendeklerin takviyesi <ul style="list-style-type: none"> • Ankrajlar • Geçirimsizlik uygulamaları 	<ul style="list-style-type: none"> • Zemin stabilizasyonu • Boşluklu zeminde temel takviyesi • Panel geçirimsizlik perdeleri • Yumuşak zeminde derin hendeklerin takviyesi 	<ul style="list-style-type: none"> • Temel takviyesi ve kazı desteği <ul style="list-style-type: none"> • Döşeme/yeraltı suyu kontrolü • Panel geçirimsizlik perdeleri • Geçirimsizlik uygulamaları • Çoğu ince daneli zeminlerin stabilizasyonu

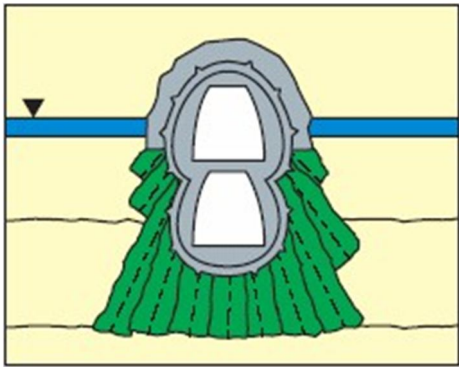
Tablo 3 : Farklı Jet Sistemlerinin Karşılaştırması [Y3]

	Tekli	Çift	Üçlü
İyileştirilmiş zemin tipi	İri taneli zeminler, Zayıf ayrılmış kaya	İri taneli zeminler ve zayıf kaya ve bazı killi zeminler	Herhangi bir taneli zemin, killi zeminler, sert veya sıkı zeminler, karışık alüvyon ve
Kolon Çapı	En küçük (enerji soğuruluyor.) Genelde 0,5 – 0,6 metre	Orta dereceli	En büyük (basıncılı havanın çevrelediği püskürtmenin penetrasyonu nedeniyle) Genelde 1,0–2,0
Uygulama	Yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesi zemine direk enjekte edilir.	Basıncılı hava ile çevrelenmiş yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesi zemine direk enjekte edilir.	Aşınma için basınçlı hava ile çevrelenmiş basınçlı su; enjeksiyon malzemesi zemine düşük basınçla
Zemin Hareketi	Atık dönüşündeki tıkanıklık yüksek basınç oluşmasına neden olabilir, siltlerde ve killerde çatlaklar oluşabilir ve sonucunda zemin hareketleri görülebilir.	Atık dönüşündeki tıkanıklık yüksek basınç oluşmasına neden olabilir, siltlerde ve killerde çatlaklar oluşabilir ve sonucunda zemin hareketleri görülebilir.	Hava sızıntısı oluşabilir ve bu sızıntı zayıf zemin yüzeylerinin aşınmasına neden olabilir.
Basınçlar	Enjeksiyon malzemesi 30-50 Mpa (Grout) (300-500 bar)		
Maliyet	Genelde halledilemsi gereken daha az atık madde Daha az tesis ve donanım Daha fazla kolon gerekliliği toplam maliyeti artırabilir.	Orta dereceli; tekliye göre daha fazla tesis, üçlüye göre daha fazla kolon	Diğer sitemlerden daha fazla tesis Daha az kolon gerekliliği toplam maliyeti azaltabilir.
Diğer	Daha zayıf kolonlar oluşur. Teknik olarak ikili ve üçlü sisteme göre daha düşük niteliklidir.	Orta dereceli	Su jeti daha az viskoz, daha iyi akan enjeksiyon malzemesine olanak sağlar

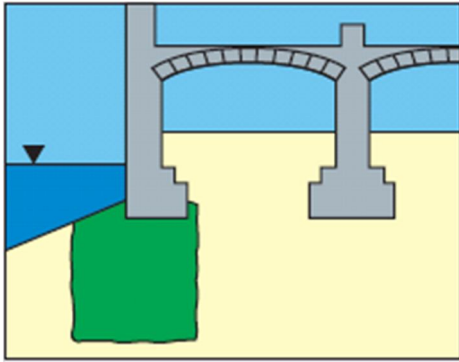
2.6.6 Stabilizasyon Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3]



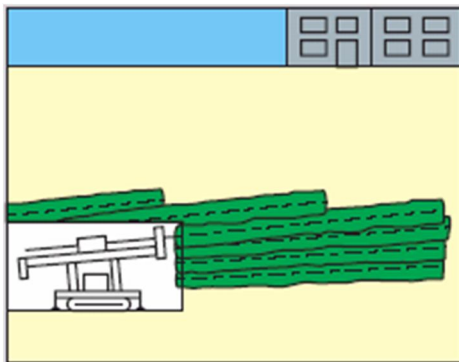
Temel Takviyesi : Bazı zamanlarda yeraltı suyu sızıntı bariyeri olarakta kullanılan düşük deformasyonlu ağırlık duvarları ile yapılan temel takviyesi sınırlı çalışma alanları içinde güvenle kullanılabilir. [W3]



Tünellerde koruma : Jet grout tünel koruması, zayıf zemine oturan tehlike altındaki yapıların altında inşa edilecek olan tünel kazısı sırasında yeraltı suyu [W3]

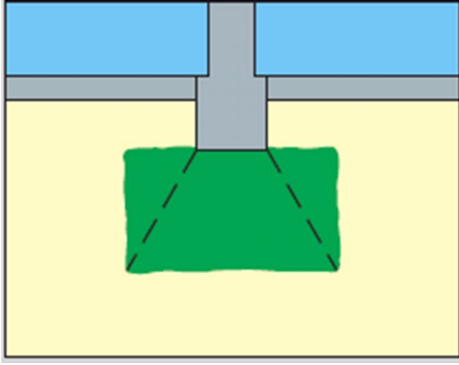


Temellerin restorasyonu : Tarihi yapıların temelleri oturma durumunda zarara uğrayabilir. Bu durumlarda jet grout uygulaması ile maksimum yapısal koruma ve güvenli bir temel yapılmış olur. [W3]

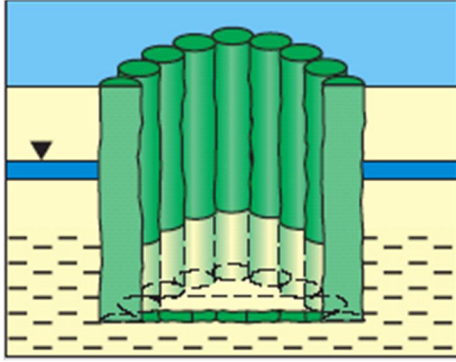


Yatay uygulamalar : Yatay jet grout kolonları, zayıf zemin formasyonlarında tünel yüzeylerini koruyabilir. Yatay yada hafif meyilli uygulamalar yapılabilir [W3]

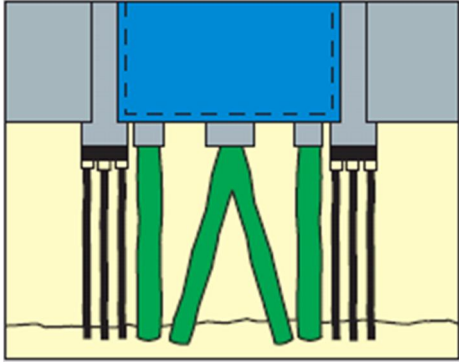
2.6.6 Stabilizasyon Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3] – Devamı



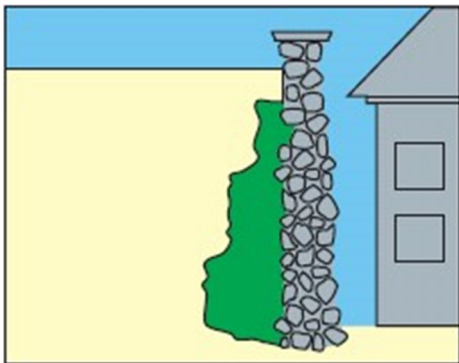
Temellerin modifikasyonu : Binalarda farklı kullanım amaçlarına gerek duyulması durumunda genellikle temellerin genişletilmesine yada değiştirilmesine gerek duyulur. jet grout bu durumlar için ekonomik ve esnek çözümler sağlar [W3]



Şaft destekleri : Titreşim istenilmeyen tesisatlar için oluşturulacak shaftlar yada su taşıyıcı tabakalara kadar girecek olan shaftlar için birbirine bitişik şekilde yapılan kolonlar ile imalat yapılabilir. [W3]

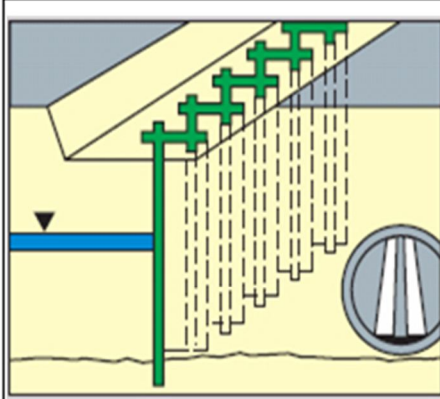


Derin temeller : Jet grout mevcut yapıların içerisinde, tarihi binalar yada bilgi işlem merkezleri gibi özel yapılar için yeni temeller inşaatı gerektiği durumlarda kullanılabilir. [W3]

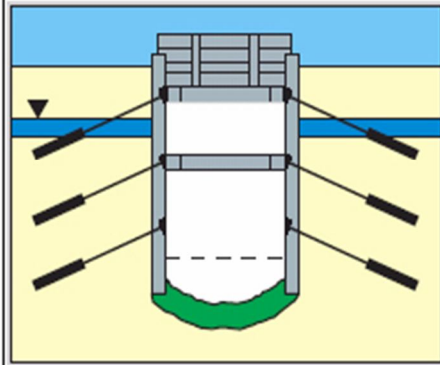


Toprak basıncı : Tarihi duvarlar, avalanş galerileri, rıhtım duvarları gibi toprak itkilerine maruz kalan yapılar statik hesaplamaları yapılmış olan soilcrete yapılarına bağlanabilir [W3]

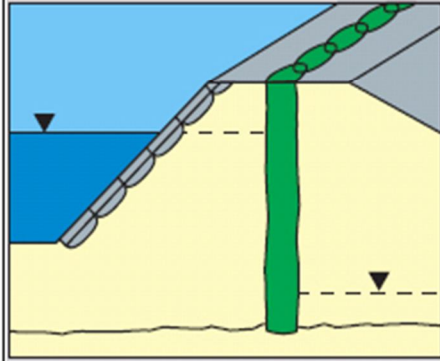
2.6.7 Yalıtım Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3]



Panel duvarlar : Panel duvarlar, yol yada yapı amacıyla açılalan çukurları ayırmak, kesişen tesisat borularına karşı önlem almak, yeraltı suyuna karşı önlem almak amacıyla kullanılırlar. Yalıtım gereksinimine göre tek yada çoklu panel duvarlar inşa edilebilir.

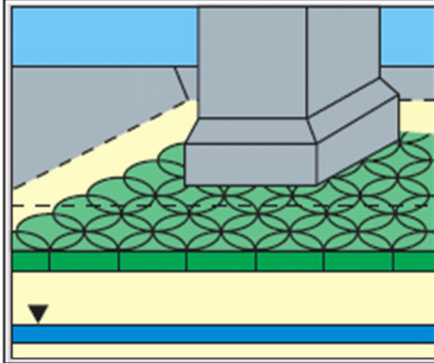


Tampon kat döşemeleri : Kısa açıklıklı soilcrete döşemeler yapılarak özellikle küçük yapıların temel çukurlarında suyun kaldırma kuvvetine karşı koruma amacıyla, normalde daha kalın yapılacak yapı döşemesinin kalınlığı azaltılmış olur.

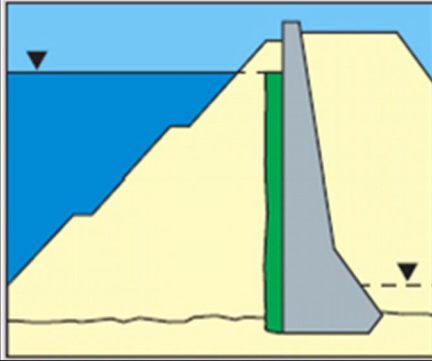


Diyafram duvarları : Kesme kuvveti yoluyla daha yüksek mekanik gerilmeler oluşması durumunda, yüksek derecede geçirimsizlik beklentilerinin tehlikeye atılmaması için birbirini kesen yanyana kolonlar ile diyafram duvarı oluşturulabilir.

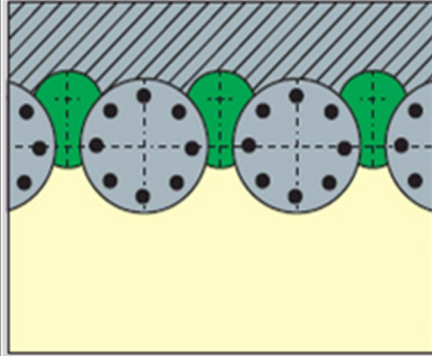
2.6.7 Yalıtım Amaçlı Jet Grouting Kullanımı [W3] – Devamı



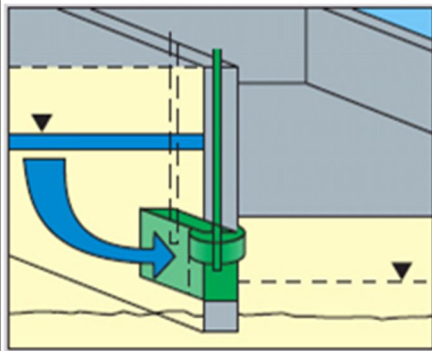
Yalıtım kaplaması : Yapıların altındaki yeraltı suyunun yapı aktivitelerinden ve toksik atıklardan korunması amacıyla kullanılabilir.



Baraj enjeksiyon perdesi : Barajların geçirimsizlik çekirdeklerinin tamirinde yada geçirimsizlik perdelerinin genişletilmesinde kullanılabilir.



Yalıtım bağları : Kazıklar ve perde yapıların arasında sızıntıların önlenmesi için kullanılabilir.



Yeraltı suyu bariyerleri : Geçirimsizlik perdeleri genellikle yeraltı suyu bariyerleri olarak kullanılırlar.

2.6.8 Jet Grout Yönteminde Kullanılan İşletim Parametreleri

Jetgrout sisteminde kullanılan imalat parametreleri şu şekilde sıralanabilir:

- Jet sistemi (Jet-1, Jet-2, Jet-3)
- Enjeksiyon Basıncı (Bar)
- Nozul Sayısı ve Çapı (rpm)
- Tij Dönme Hızı (rpm)
- Tij Çekme Hızı (cm/dak)
- Su/Çimento Oranı
- Pompa Kapasitesi (lt/dak)

Çalışma parametreleri, zemin özelliklerine, elde edilmek istenen kolon çapına, kolonunun taşıma kapasitesine ve tercih edilen jet grout metoduna göre seçilmektedir. Bu parametrelerin başlıcaları; enjeksiyon basıncı, dozaj, çekme ve dönme hızı olarak gösterilebilir. Jet grout kolon imalatına başlanmadan önce farklı işletim parametreleri kullanarak test kolonları imal edilmektedir. Zemin yapısına uygun, istenen kolon çapının elde edildiği, kolonda sürekliliğin sağlandığı ve ekonomik olan parametreler tercih edilmektedir.

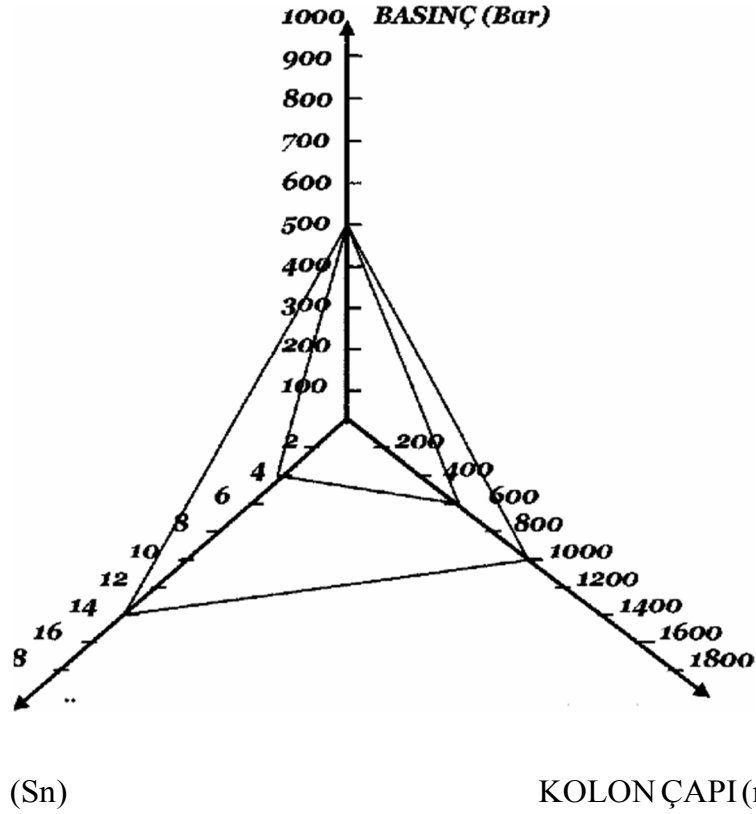
Tablo 4 : Jet grout imalat parametreleri [Y1]

Sistem	Enjeksiyon Tipi	Basınç (bar)	Nozul Adedi ve Çapı (adet, mm)	Çekme Hızı (cm/dak)	Dönme Hızı (rpm)	Su / Çimento Oranı	Pompa Kapasitesi (lt/dak)
JET 1	Çimento	400 – 550	1-2 x 2-5	15 –100	5 – 15	1.0 – 1.5	70–600
JET 2	Çimento	400 – 550	1-2 x 2-5	10 – 30	4 – 8	1.0 – 1.5	70–600
	Hava	10 – 12	-	10 – 30	-	-	4000-10 000
JET 3	Çimento	50 – 100	1-2 x 4-5	6 – 15	4 – 8	1.2 – 1.5	80–200
	Hava	10 –12	-	6 – 15	-	-	4000–10 000
	Su			6 – 15	-	-	40–100

- Zeminin sökülebilmesi için kullanılan jetin spesifik enerjisi, 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 arttırır.
- Gereksinilen pompaj kapasitesi spesifik enerjiye ve pompalanacak malzemenin miktarına bağlıdır.
- 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 arttırılması gerekir. Zemin mukavemetinin derinlik ile birlikte artması bunun sebebidir.
- İmal edilen elemanların mukavemeti, imento karışımının nihai mukavemetine, imento karışımı ile zemin karışım oranlarına, imalat öncesi doğal zemin özelliklerine ve oluşturulacak elemanın homojenliğine bağlıdır.
- 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 temellerin köşe ve kenarlarından ortasına doğru ilerlenmelidir. Böylece zeminde kemerleme oluşur ve iyileştirilen zemin yük taşıyacak duruma gelinceye kadar yapıdaki deformasyonlar ve oturmalar minimize edilmiş olur.
- Genel olarak, imal edilen elemanın mukavemeti homojenliği arttıkça permeabilitesi azalır. Mukavemeti düşük kohezyonlu zeminlerde oldukça düşük permeabilite değerlerine ulaşılabilmektedir. Ancak imalatta karışım oranının düşüklüğü ve elemanın homojen olmaması istenmeyen şekilde aşınabilirliğe yol açmaktadır.



Şekil 15 : Basınç-kademeli bekleme süresi-hedeflenen kolon çapı ilişkileri [Melegary ve Garassino, 1997]

2.6.9 Farklı Zeminlerde Jet Grout Uygulama Parametreleri

Jet-grout metodu ile yapılacak zemin ıslahının başarısı, uygulama parametrelerinin çok dikkatli seçimine bağlıdır. Basınç değeri ve enjeksiyon süresi, ıslah edilecek tabii zeminin mukavemet değerine göre belirlenmektedir. Jet grout tekniğinin uygulanabilmesi ve en uygun jet grout tekniğinin seçilebilmesi için bazı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bunlar; arazideki SPT, CPT deneylerinden elde edilen veriler ve relatif sıkılığın tayini, Kohezyonsuz zemin numunelerinin dane dağılımı, su muhtevası, doymun birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi, kohezyonlu zeminlerinin kıvam limitlerinin tayini olarak sayılabilir. Bu veriler doğrultusunda en uygun jet grout tekniği ortaya koyulmaktadır.

Killi zeminlerde, düzgün bir kolon elde etmek için, küçük çaplı nozzle kullanılmalıdır. Genellikle kullanılan nozzle adedi 2, çapları ise 1,6- 2.0mm dir.

Basınç 500-600 bar değerlerde ve yüksek, grout debisi ise, sıkça rastlanılan zemin kırılmalarını engellemek amacıyla düşük tutulmalıdır (Melegary ve Garassino, 1997).

Eğer zemin konsolide kil gibi, karışım oluşturması zor özelliklere sahipse, nozzle adedi bire düşürülmelidir. Bu yolla, yüksek basınçla elde edilen kinetik enerjinin sürtünme kayıpları kontrol altına alınabilir- Bu halde enjekte edilen grout miktarı düşük ve kademedeki bekleme süresi uzun olmalıdır. Bu tür killi zeminlerde kum yoğunluğunu azaltmak amacıyla 250- 300 bar basınçlı su enjeksiyonu(ön yıkama) tavsiye edilmektedir.

Çakıllı ve genellikle granüler karakterli zeminlerde, işletme parametreleri killi zeminlere nazaran farklıdır. Enjeksiyon basıncı genellikle 400-500 bar arasında, nozzle çapları ise 2.5-3.0 mm arasında tutularak, zemine daha fazla miktarda grout enjeksiyonu sağlanmaktadır.

Bu genel kurallar seçilen jet sistemine uyarlanmalıdır. Killi zeminlerle birlikte kumlu ve çakıllı zeminlerdeki farklı çalışma parametreleri ve bunların elde edilecek sonuca etkileri Tablo 2.6.9. da görülmektedir.

Tablo 5 : Jet grouting işletim parametreleri genel değerleri [Melegary ve Garassino, 1997]

PARAMETRE		JET GROUTING METODU		
		Jet-1	Jet-2	Jet-3
Enjeksiyon Basıncı		Ö.Y. : Ön Yıkama		
Su		Ö.Y (200-300)	Ö.Y (200-	300-500
Grout	Bar	300-600	300-600	40-60
Basınçlı Hava	Bar	kullanılmaz	8-12	8-12
Grout Debisi				
Su	lt/dak.	Ö.Y	Ö.Y	70-250
Grout	lt/dak.	60-250	100-350	150-300
Basınçlı Hava	lt/dak.	kullanılmaz	5-15.000	5-15.000
Nozzle Çapları				
Su	mm	Ö. Y (1,6-2,4)	Ö.Y(1,6-2,4)	1,8-2,5
Grout	mm	1,6 - 3,0	2,0-5,0	3,5-6,0
Nozzle Sayısı				
Su	adet	Ö.Y(1)	Ö.Y(1)	1 -2
Grout	adet	2-6	1-2	1
Takım Dönme Hızı				
	d/d	10-30	10-30	10-30
Takım Çekme Hızı (Kademeli Çekme - Her kademe 4 cm)				
	Saniye	8-15	10-20	15-25
Kolon Çapı				
Kumlu -Çakıllı	m	0,6-1	1,0-2,0	1,5-2,5
Killi	m	0,5-1	1,0-1,5	1,0-2,0
Su/Çimento oranı		S:Ç		
		0,8:1	den	2: 1'e
Çimento Sarfiyatı		(Karıştırılmış zeminin birim hacminde)		
	kg/m ³	400-800	400-800	400-800
Soilcrete (Karıştırılmış zemin) mukavemeti				
Kumlu -Çakıllı	kg/cm ²	100-300	75-250	75-200
Killi	kg/cm ²	15-100	15-85	15-75

2.6.10 Jet Grouting Uygulaması

Jet grout kolonu, bağlantı manşonlarında 500 - 700 bar basınca dayanıklı sızdırmazlık elemanları vasıtasıyla delgide 90 mm çapında tijler kullanılarak istenilen derinliğe kadar inilerek 400 - 450 bar basınçla püskürtülen su ve çimento karışımının zeminin boşluklarını doldurup ve sıkıştırılması suretiyle elde edilir. Yüksek basınç, sevk edilen enjeksiyonun 1.50 mm - 2.50 mm çapındaki 2 - 4 adet nozul'dan geçerken yüksek bir kinetik enerji kazanmasını sağlar. Delgi takımı sabit bir hızla dönerek yukarı doğru çekilirken su - çimento karışımının hızı 250m/sn değerlerine ulaşarak, enjeksiyon zemini yırtarak zeminle birleşerek çimentolu zemin

yapısı (soilcrete) oluşmaktadır.

Başlangıç imalat parametreleri olarak min. 160 kg/m çimento dozajı, PÇ 42.5 veya muadili çimento ve 450 bar basınç ve 120 sn/m çekme hızı (2.0 nozul) baz alınabilir.

Uygulama safhaları aşağıda verilmektedir.

- Projede belirtilen uzunluktaki delgi işlemi.
- Deliğin sonuna jet enjeksiyon tipine bağlı bir monitör yerleştirilmesi. Monitör vasıtasıyla çimentolanan ve ayrıştırılan akışkanın püskürtülmesi ve aynı zamanda önceden belirlenmiş çekme ve döndürme hızları, pompa basıncı ve akışkanın debisi gibi jet enjeksiyonu parametreleri ile tijin çekilmesi ve döndürülmesi.

Saha Hazırlıkları:

- Kararlı ve kuru bir çalışma ortamı hazırlanmalıdır. Uygun yüzey suyu drenaj sistemi teşkil edilmelidir.
- Her bir delgi noktasının konumu hassas bir şekilde tespit edilmeli ve işaretlenmelidir.
- Çalışma sahası delgi makinesi, paletli vinç, beton mikseri, beton pompası ve iş makinelerinin batmadan çalışmalarına olanak sağlayacak şekilde düzeltilip sıkıştırılacaktır. Dolgular, delme işini zorlaştırmayacak uygun malzemelerle yapılmalıdır.
- Artık akışkanın depolanıp atılmasına yönelik bir sistem öngörülmelidir. Yeraltı suyu sürekli olarak sahadan uzaklaştırılarak çalışma sahasının bozulması önlenmelidir.
- İmalat sahasında bilinen ve yüzeye yakın engeller çalışmalara başlamadan önce sahadan uzaklaştırılmalıdır. Bu engellerin kaldırılmasıyla oluşan boşluklar uygun granüler malzeme ile doldurulmalıdır.

Delgi İşlemi:

- Delme işlemi için malzeme olarak su, hava, çamur, enjeksiyon şerbeti veya köpük kullanılabilir. Gerektiğinde muhafaza borulu delgi yapılabilir.
- Delgide kuyunun kararlı olmadığı veya akışkanda büyük kayıplar varsa veya kirlenmiş akışkan suyunun atılmasında zemin koşullarının zorluk çıkarması muhtemel ise uygun tedbirler alınmalıdır.
- Aksi belirtilmedikçe delgi noktası teorik konumundan 50 mm'den fazla sapmamalıdır.
- Delgi noktasının teorik eksenden sapması 20 m derinliğe kadar % 2'den fazla olmalıdır.
- Jet grout kolon imalatını takip eden 24 saat süresince kolona yeni imalat yapmak amacıyla yatayda 2 m'den daha fazla yaklaşılmalıdır.
- Delgi çapı ve çubuklar arasındaki sirkülasyon hacmi kirlenmiş akışkanın serbestçe delgi başına dönmesine yetecek kadar büyük olmalıdır.
- Yeraltında tahmin edilemeyen engellere rastlanırsa, jet enjeksiyon aşamasında istenmeyen etkilerin ortaya çıkmaması için uygun tedbirler alınmalı ve proje müellifi uyarılmalıdır.

Jet Enjeksiyon:

- Jet enjeksiyon işlemi, uygun eğitim almış ve bilgili personel vasıtasıyla yapılmalı ve kontrol edilmelidir.
- Projede belirtilen derinliğe inildiğinde delme ve enjeksiyon basma işlemi durdurulur.
- Çelik bilye grout borusuna yollanarak groutun yönü "monitör" diye adlandırılan ve delgi ucunun hemen arkasında bulunan nozulları taşıyan takıma çevrilir.

- Yüksek basınçlı enjeksiyon malzemesinin pompalanmaya başlanması ile enjeksiyon fazına geçilir.
- Grout hızla birlikte, delici takımın rotasyon hareketi ile dairesel kesitli bir grout tabakası formunu alır. Delici takımın önceden belirlenmiş dönme hareketi sabit hızla çekme hareketi ile birleşince düşey kolon şeklinde bir yapı meydana gelir.
- Zemine çimento enjeksiyonu, istenilen jet grout üst kotuna kadar yapılır. Enjeksiyonun kinetik enerjisinden zarar görmemesi için, jet grout üst kotu her zaman 50 cm. yukarıda bırakılmalıdır.
- Enjeksiyon işlemine ara verildiği durumlarda, işleme elemanın sürekliliğini sağlayıcı uygun tedbirler alındıktan sonra başlanmalıdır.

Kirlenmiş Akışkanın Dönüşü:

- Jet enjeksiyonun yapılması esnasında kirlenmiş akışkanın dönüş miktarı ve niteliği devamlı kontrol edilmelidir.
- Jet enjeksiyonunda kirlenmiş akışkanın dönüşünde beklenmeyen değişiklikler olursa uygulama parametreleri ve yöntemleri gözden geçirilmelidir.
- Kirlenmiş akışkanın dönüşünde beklenmeyen bir azalma olduğunda derhal inceleme yapılmalıdır. Bu dönüş yolunda tıkanmayı işaret edebilir. Jet grouting yönteminin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir
- Bu konuda özenli ve dikkatli gözlem ve testler yapılmalı, iş konusunda tecrübe ve bilgi sahibi Mühendislerce kontrol ve idare edilmelidir. Geniş emniyet tedbirleri alınmalıdır.
- Yüksek basınçla çalışırken püskürtme ağızlarının tıkanmalarını önleyici tedbirler alınarak, enjeksiyon hortumlarının patlamasının önüne geçilmelidir.

- Aşınmanın yüksek oluşundan dolayı tamir ve bakım süresi mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.
- Enjeksiyon sırasında uygulanan basıncın kontrollü olarak ortadan kaldırılabilmesi sağlanarak zeminde arzu edilmeyen kabarma, çatlama ve kırılmaların önüne geçilmelidir.
- Mutlak suretle yapılması gereken periyodik bakım (bilhassa pompanın temizliği ile) ve yedek parça sarfiyatının minimum tutulması gereklidir.

Temel takviyesi amaçlı jet grout uygulaması yapılmadan önce aşağıda sıralanan hususlar incelenmeli ve açıklığa kavuşturulmalıdır

• **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 mukavemet kazanarak, bitişik kolonun imalatından etkilenip bozulmasını engelleyecek şekilde düzenlenmelidir.

• **Kolon çapı** : Uygulanan jet grouting sisteminin daha büyük çaplı kolonlar imal edilecek olması halinde daha küçük çaplı (1.2 m veya daha küçük çaplı) kolonlar imal edilebilmektedir.

• **Kilitlenme** : Zeminde süreksizlikler oluşmayacak şekilde iyileştirme yapılabilmesi ve yetersiz özelliklere sahip zeminin minimize edilebilmesi için tasarım kolonların birbirine kilitleneceği şekilde yapılmalıdır.

• **Çimento miktarı** : Mevcut zemin koşullarına bağlı olarak, iyileştirilmiş zeminin yeterli mukavemete erişebileceği enjeksiyon karışım oranları ve çimento miktarları belirlenmelidir.

• **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 bağ olacak şekilde temizler. Temel ile jet grout eleman arasındaki kontağın sağlanması için enjeksiyon temel kotunun biraz üzerine kadar sürdürülmelidir.

• **Yapıların hareketi** : Tüm delgi ve enjeksiyon işlemleri sırasında yapıda aletsel gözlemler yapılmalıdır. Bunun için en sağlıklı yöntem, zeminde oluşacak oturma ve kabarmaların da bir an önce fark edilebilmesi açısından optik seviye takibi yapılmasıdır.

2.6.10.1 Jet Grouting Uygulamasının Avantajları

Jet Grout yönteminin avantajları aşağıdaki şekilde belirtilebilir.

- Genel olarak her türlü zemin tipini uygulanabilir
- Diğer inşaat yöntemlerine kıyasla daha hafif ve küçük ekipmanla gerçekleştirilebilir.
- En yumuşak zemin ortamlarından kaya ortamlarına kadar tüm uygulamalarda ve zemin koşullarında aynı ekipman kullanılmaktadır.
- Kullanılan su jetinin aşındırma etkisi sayesinde metot klasik enjeksiyon yöntemlerine göre daha verimli ve ekonomik olmaktadır.
- Küçük boyutlu makineler kullanılarak, mevcut binaların bodrum katından veya bitişik bina arasındaki dar sahadan enjeksiyon işi gerçekleştirilebilir.
- 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 yapıda deformasyon çok az yada hiç olmaz.

- Önceden belirlenebilecek geometrik ölçüler çerçevesinde uygulanacağından ötürü malzeme sarfiyatı, büyük yaklaşımla önceden hesaplanabilir.
- 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.
- Klasik enjeksiyona göre kontrolü çok daha kolaydır. İstenilen mukavemet ve permeabilite de tasarlanabilir.
- Yöntemde kullanılan enjeksiyon malzemeleri çok basit çimento karışımlarıdır. Ancak karışımların basitliğinin yanında minimum birim maliyetteki sarfiyat yüksektir.
- 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.
- Yüksek riskli inşaatlarda can güvenliği sağlanır.
- Arazi şartlarına bağlı olarak inşaat süresini %30 ile %60 kısaltır.
- Sahada spesifik yer değiştirme mümkündür.
- Özel yeraltı yapıları iyileştirilebilir.
- Bakım istenmez.
- Gömülmüş aktif elemanların çevresinde çalışmak mümkündür.
- Alternatif yöntemlere nazaran daha hızlıdır.

2.6.10.2 Jet Grouting Uygulamasının Dezavantajları

Bu avantajlarının yanında yöntemin bazı dezavantajları ve zayıf noktaları da mevcuttur. Bunlar aşağıda belirtilmiştir.

- 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.

- Yöntem henüz gelişme aşamasındadır ve ekipmanların geliştirilmesi ile ilgili bazı sorunlar henüz çözüme kavuşmamıştır ve bu durum da imalatın durumunu etkilemektedir. İşe başlanmadan önce maliyet tam olarak belirlenemeyebilir. 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.

- Tasarımda yararlanabilecek kesin kurallar mevcut değildir ve tecrübe ile yapılmış uygulamalardan elde edilmiş 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.

- 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 gözlenebilmektedir.

2.6.11 Kontrol ve Testler

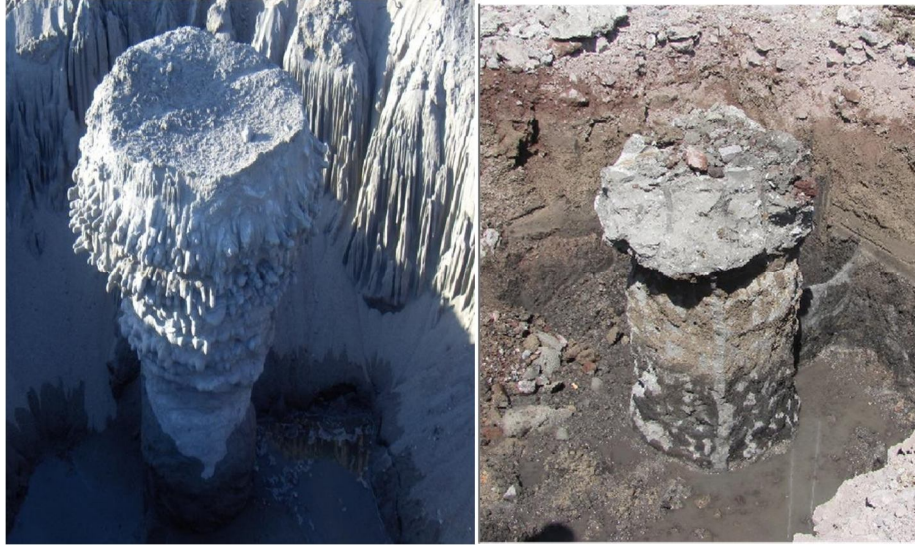
Arazide uygulama öncesi ve sonrasında imalatı tamamlanmış olan jet kolonları proje değerlerine uygun imal edilip edilmediğinin kontrolleri için arazi ve laboratuvarında bir seri testler uygulanır.

2.6.11.1 Deneme Kazıkları ve Çap Kontrolü

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

Projeyi sahaya uygulamadan önce hesaplanan değerlerde ki kolon çapının iyileştirilecek zeminde hangi parametrelerce meydana getirilebildiğini belirlemek

için uygulama sahasının uygun bir yerinde deneme kolonları imal edilir. Bu kolonlar, aynı jet sisteminde enjeksiyon basıncı ve çekme süresi değiştirilerek belirlenir. Deneme kazıklarının etrafı belirli bir priz süresi sonunda açıldıktan sonra kazıkların çevresi ölçülerek çap kontrolü yapılır. Hedeflenen çapa uygun parametreler bu şekilde belirlenir ve bu değerlere göre imalata geçilir.



Şekil 16 : Farklı Zemin Türlerindeki Deneme Kazıkları [Y2]



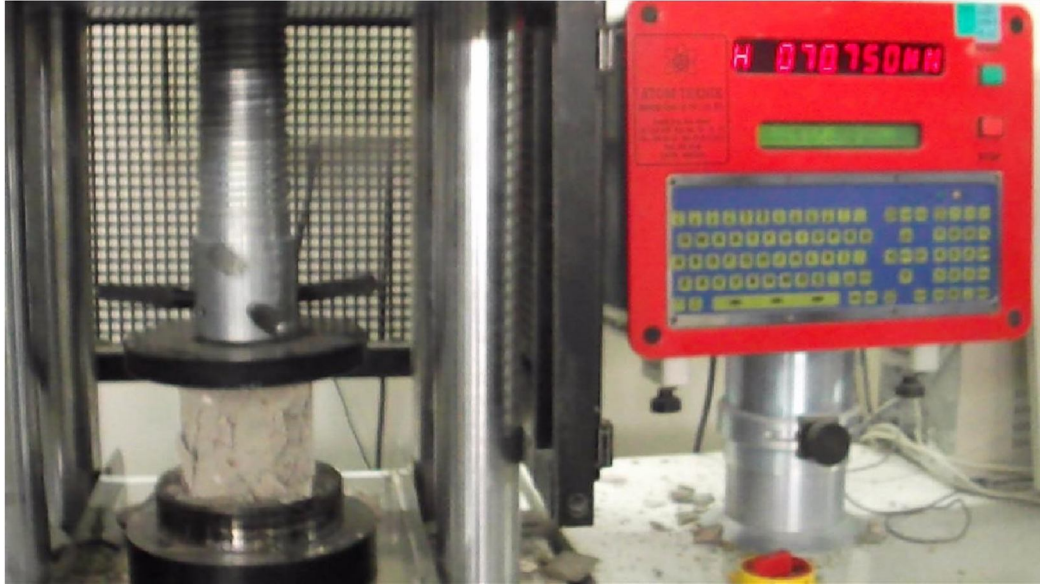
Şekil 17 : Kazıkların Çap Kontrolü [Y2]

2.6.11.2 Deneme Kazıkları ve Çap Kontrolü

Jet sistemi araziye uygulandıktan 28 gün (priz alma süresi) sonra Jet kolonlarından karot numuneleri alınarak serbest basınç deneyi yapılır. Böylece kolonların basınç dayanımı elde edilerek hedeflenen mukavemet değerlerine ulaşılıp ulaşılmadığı kontrol edilir ve bu değerlerin kolonlara gelen yükleri belli bir emniyet faktörü ile taşıdıkları sonucu ortaya koyulmalıdır.



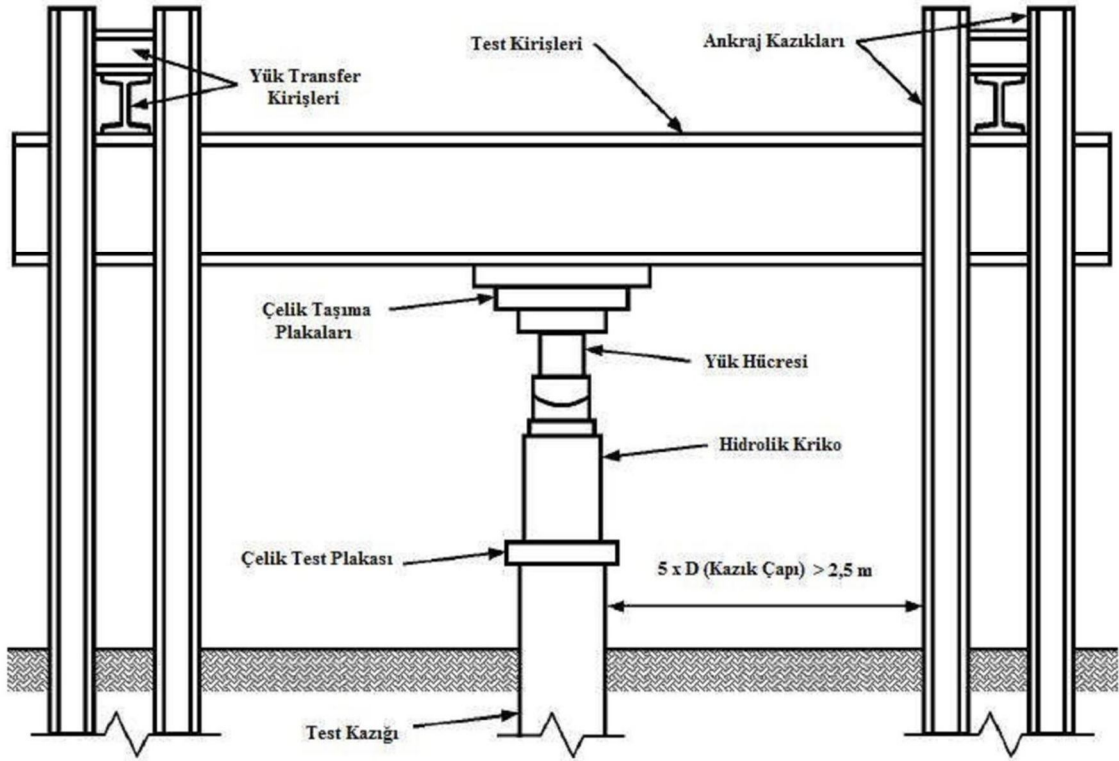
Şekil 18 : Karot Numunelerinin Alınması [Y2]



Şekil 19 : Karot Numuneler Üzerinde Serbest Basınç Deneyi Yapılışı [Y2]

2.6.11.3 Kazık Yükleme Deneyi

Kazık Yükleme Deneyleri tam ölçekli bir model deney olmasıyla, zeminlerde inşa edilen ya da inşa edilmesi tasarlanan kazıkların yük taşıma kapasiteleri ve yük-oturma davranışını belirlemek için uygulanabilecek en sağlıklı yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 20 : Kazık Yükleme Deney Sistemi [ASTM D1143/D1143M, 2007]

Kazık yükleme deneyinin amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kazıkların yük taşıma kapasitesini belirlemek,
- Proje kapsamında öngörülen kazık servis yükünün, kazık imalatından sonra kontrolünü yapmak,
- Kazık temelin yük-oturma ilişkisini saptamak.

Yükleme deneyi için, bir adet basınç çalışan kolon ile iki adet çekmeye çalışan kolonlar seçilir. Deney doğrultusunda basınç kolonuna statik eksenel basınç yükü yüklenerek yük -oturma, yük - zaman ve oturma - zaman grafikleri hazırlanır.

Deney yükü için jet kolonun toplam kapasitesinin 1,5 katı dikkate alınmalıdır.

Jet kolonun toplam kapasitesini ise kolon uç ve çevre taşıma gücü toplamı oluşturur. Uç direncinin ihmal edildiği durumlarda kolon içine çekme donatısı yerleştirmek suretiyle çekme deneyi yapılması tercih edilir.

Deney ekipmanları ise aşağıdaki dört ana gruptan oluşmaktadır;

- Kazığa iletilecek eksenel yüke maruz kalan reaksiyon kirişleri,
- Hidrolik krika ve hidrolik basınç pompası,
- Yüğü ölçmek için manometre,
- Ölçüm düzenekleri

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



Şekil 21 : Kazık Yükleme Deneyi Genel Görünümü [Y2]

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



Şekil 22 : Kazık Yükleme Deneyi Ekipmanları Genel Görünümü [Y2]

2.6.11.4 Kazık Süreklilik Deneyi

Uygulanan jet grout kolonların boyları ve süreklilikleri, ülkemizde de yaygın olarak kullanılan integrity deneyi ile belirlenmektedir.

Kazık çap ve boy sürekliliğinin denetlenmesi için uygulanan kazık süreklilik deneyinde kazıkların üst ucundan küçük bir çekiç darbesi verilmektedir. Bu darbenin ivme sinyali A, kazık üstüne geçici olarak yapıştırılan bir akselometre ile algılanmakta olup sayısallaştırılarak bilgisayarda kaydedilir.



Şekil 23 : Kazık Süreklilik Deneyi [Y2]

Kazıktaki şekil/malzeme değişikliklerinden ve kazık ucundan yansıyan sinyaller de algılanarak hız sinyali olarak kaydedilir. Bu sinyal hıza bağlı bir

değişkendir. Geçen zaman da ölçümle tam olarak belirlenir.

Alınan yansımaların yerini tespit için sinyal derinliğe bağlı bir fonksiyona dönüştürülür. Bu dönüşümde bilinmesi gereken dalganın yayılma hızı olup beton/jet grout kolon için ortalama $C=3000-4500$ m/sn dir (Rausche, 1988).

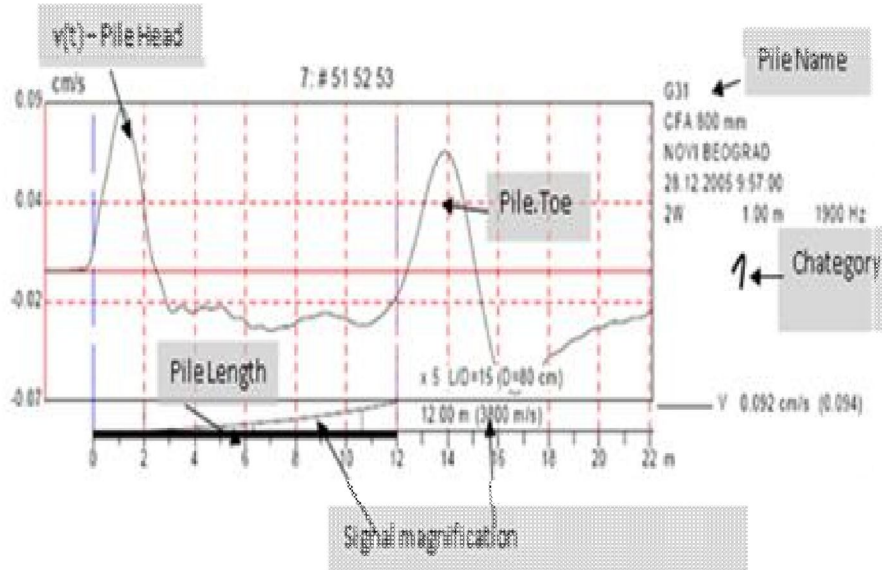
Deney sistemindeki ölçüm formüle edilirse, yansıma derinliği olan X değeri, (2.6.11.4) Eşitliği ile bulunur.

$$X = 12 * C * t \quad (2.6.11.4)$$

t : Darbeden yansıma anına kadar geçen süre

C: Dalganın yayılma hızı

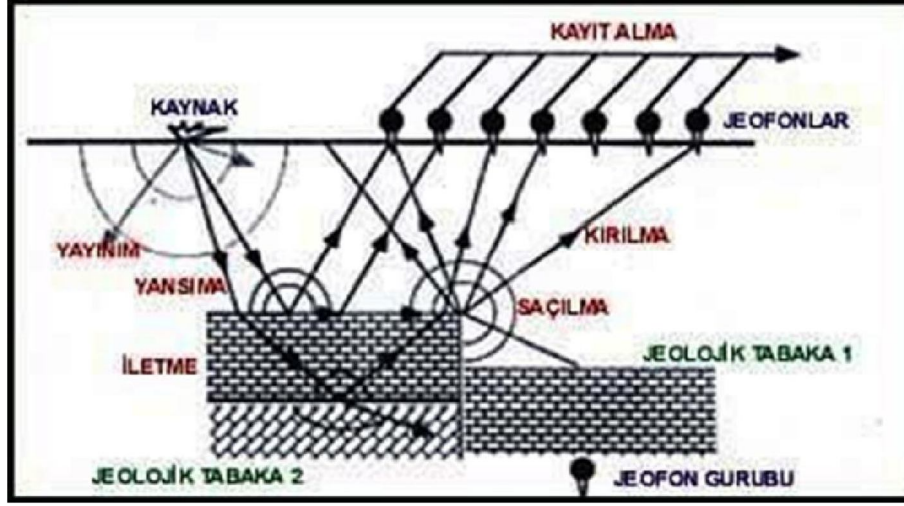
Bu şekilde derinliğe bağlı sayısallaştırılmış hız sinyali grafiği yorumlanarak kazıkta olası boy ve uç şekli değişiklikleri anlaşılabilir.



Şekil 24 : Derinliğe Bağlı Sayısallaştırılmış Hız Sinyali Grafiği [Y2]

2.6.11.5 Sismik Deney

Sismik kırılma, zeminde oluşturulan yapay titreşimler ve bunların ölçülmesi esnasına dayanan bir yöntemdir. Yüzeide oluşturulan yapay sismik titreşimlerinin yeraltındaki farklı yoğunluktaki seviyelerden kırılarak yüzeeye geri dönme süresinin ölçülmesiyle yapılır. Tabakaların bulunan P ve S dalgası hızlarına göre dinamik parametreleri hesaplanabilir.



Şekil 25 : Sismik Deney Yöntemi ve Deney Ekipmanları [R1]

2.6.11.6 Rezistivite Deneyi

Rezistivite (Elektrik Özdirenç) yönteminde, yeryüzündeki belirli bir noktadan yer içerisine büyüklüğü bilinen bir akımı vermek ve kullanılan elektrot dizilimi ile yer içerisinde oluşan gerilim farkı belirlenir. Sonuçta, arazide uzaklığın değişkeni olarak ölçülen özdirenç, ayrılıklarının yarattığı derin görünür özdirenç (ρ_a) eğrilerinden yararlanmak suretiyle yeraltındaki jeolojik yapı tanımlanır. Değerlendirmede amaç; (ρ_a) eğrisini veren yapıyı oluşturan katmanların özdirenç (ρ_a) ve kalınlıklarının (h) bulunmasıdır.

Özdirenç yönteminin arazide uygulanışı iki şekilde olur. Bunlardan biri yerin

yanal yöndeki deęişimini arařtıran "Elektrik Haritalama veya Profil" dięeri ise yer içerisindeki tabakaların dūőey yöndeki deęişimlerinin incelendięi " Dūőey Elektrik Sondajı (DES) " dır.

DES jeofizikte çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. Yöntem, yeryüzündeki iki elektrot yardımıyla yer içerisine doğru akım verilmesi ve diğer bir çift elektrotla gerilim farkının saptanması şeklinde uygulanır. DES' in en önemli özelliği, her ölçü sonunda iki akım elektrotu arasındaki uzaklığının arttırılması ve böylece akımın daha derine erişmesinin sağlanması ve görünür özdirenç derinlik değişiminin grafik olarak elde edilmesidir.



Şekil 26 : Rezistivite Deney Ekipmanları [R1]

2.6.11.6.1 Rezistivite Yöntemi Uygulama Biçimleri

Bu yöntem Dūőey Elektrik Sondajı (DES) ve Elektrik Haritalama veya Profil olmak üzere iki biçimde uygulanmaktadır.

2.6.11.6.1.1 Dūőey Elektrik Sondajı (DES)

Yeraltının yataya yakın birçok tabakadan oluştuğu yerlerde özdirençin dūőey değişiminin elde edilmesi için yapılan işlemlerdir. DES yer yüzeyi üzerindeki tek bir noktadan aşağıya doğru derinlikle özdirenç değişimini ortaya koyar ve ilgili derinliklerdeki jeolojik bilgiyle korelasyonu sağlar. Temel ilke akım elektrotları

aralığını arttırmak suretiyle akımın sürekli bir şekilde daha derine nüfuz etmesini sağlamaktır.



Şekil 27 : Rezistivite Deney Yapılışı [R1]

2.6.11.6.1.2 Elektrik Haritalama veya Profil

Eğer tabakalar veya ara yüzeyler yatay olmayıp düşey iseler uygulanan özdirenç ölçüm yöntemi Elektrik Haritalama veya Profil (Kesit) adını alır. Bu yöntemin amacı yanal değişimleri bulmaktır ve bilhassa mineral aramasında faydalıdır.

Özdirenç ölçümleriyle yanal arama en iyi şekilde; dik olan meyilli kontaklar ve özdirenç farklılığına sahip dayklar gibi iki boyutlu anomalilerin bulunmasına ve daha az mertebede örneğin kabaca küreye benzetilen üç boyutlu iletkenlerin yerinin saptanmasında elverişlidir.

2.7 Jet Grout Kolonlarının Zeminlerin Sıvılaşması Direnci Üzerine Etkisi

2.7.1 Sıvılaşmanın Tanımı ve Sıvılaşma Kriterleri

Depremler sırasında üstyapıda meydana gelen hasarların başlıca sebeplerinden biri zemin sıvılaşmasıdır. Sıvılaşma suya doymun granüler

zeminlerde deprem halinde gerçekleşen tekrarlı yükleme koşullarında boşluk suyu basıncının artarak zeminin kayma mukavemetinin, efektif gerilmelerin azalması ve dolayısıyla taşıma kapasitesinin düşmesi veya tamamen kaybolması olarak açıklanmaktadır. Boşluk suyu basıncının artması, yer altı su seviyesindeki değişimler ve depremler sırasında suya doygun granüler zeminlerde meydana gelen tekrarlı kesme kuvvetleri, sıvılaşma olarak tariflenen mekanizmayı harekete geçirmektedir.

Sıvılaşmanın oluşması ile zeminin mukavemetinde azalma oluşmakta, yapıların temellerini destekleyen zeminlerde olduğu takdirde ise yapının dönmesine veya zemin içine batmasına sebep olabilmektedir. Sıvılaşma potansiyeli bulunan suya doygun zeminler üzerine inşa edilen yapılarda depremlere dayalı devirsel yükleme koşullarında oturma ve taşıma gücü problemleri yaşanmaktadır. Zemin sıvılaşmasına bağlı ilk aşama , bölgede potansiyel sıvılaşma yapısında zemin olup olmadığının incelenmesidir.

Son 20-30 yıl içerisinde yapılan araştırmalar, göreceli temiz kumlu, az ince daneli granüler yapıdaki zeminlerin deprem kaynaklı sıvılaşmaya karşı hassas olduklarını göstermektedir. Bunun yanı sıra, kohezyonlu siltli zeminlerin de potansiyel sıvılaşma durumu son zamanlarda araştırma konusu olmuştur.

Potansiyel sıvılaşma özelliğinde olan zeminler;

- a) Dane boyu 0.005 mm den küçük olma yüzdesi $\leq \%15$
- b) Zeminin Likit Limiti (LL) $\leq \% 35$
- c) Su muhtevası (w) $\geq 0.9 * LL$

olarak tariflenmektedir (Youd ve Idriss, 1997)

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik başka bir çalışmada zemin aşağıdaki özellikleri gösterdiği takdirde sıvılaşma potansiyeline sahip olmaktadır (Ishihara ve Yoshimine, 1998).

1. Dane içeriği (200 nolu eleği geçme miktarı) $\leq \% 35$

2. Ortalama Parça Çapı (D50) ; $0.02 \text{ mm} \leq D50 \leq 2 \text{ mm}$
3. Doygun tabakanın derinliği ≤ 15 ile 20 metre
4. SPT – N Değeri ≤ 20 ile 30

Türkiye’de 1998 tarihli deprem yönetmeliğinde yer alan ve aşağıdaki özetlenen kriterler baz alındığında, herhangi bir sahadaki sıvılaşma potansiyeli aşağıdaki koşulların mevcudiyeti söz konusu olduğunda ele alınmaktadır.

- Yer altı su seviyesi zemin üst seviyesine 10.0 metreden yakınsa
- Söz konusu sahada kalın ve gevşek/yumuşak alüvyon katmanı bulunuyorsa
- Söz konusu sahada gevşek kum-silt tabakası bulunuyorsa

Ulusal ve uluslararası platformda değişik araştırmacılar tarafından öngörülen ve yukarıda tariflenen kabullere göre, suya doymuş temiz kumların potansiyel olarak sıvılaşabildikleri görülmektedir. Diğer yandan, daha önceleri sıvılaşmayacakları düşünülen siltli kum veya kumlu siltten oluşan, suya doymuş, tabii Zemin tabakalarının da depremler sırasında sıvılaşabilirliği yapılan araştırmalarda ortaya çıkmıştır (Erken vd., 1995). Son yıllarda olan bazı büyük depremlerde bu tür zemin tabakalarında sıvılaşma olaylarının gözlenmiş olması ve tabii saf kum tabakalarına göre bu tür tabakalarla daha sık karşılaşılması sıvılaşma olayının daha kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirmektedir.

İri daneli ve çakıllı zeminlerin de potansiyel olarak sıvılaşabildikleri uluslararası bilimsel araştırmalarda rapor edilmiştir. Ancak çakıllı zeminlerin ince daneli kumlu zeminlere göre davranış olarak önemli bir farklılığı bulunmaktadır. Bu farklılık, çakıllı zeminlerin geçirimli olması sebebiyle sismik yüklemeler altında oluşan tekrarlı boşluk suyu basınçlarını göreceli olarak çabuk dağıtmalarıdır. Bu şekliyle, çakıllı zeminlerin sıvılaşma potansiyeli aşağıda tariflenen durumlar dahilinde irdelenmektedir (Evans, 1987).

- Çakıllı zeminlerin daha az geçirimli tabakalar arasında sıkışması
- İnce daneli zeminlerin çakıllı zeminlerin boşluklarını doldurması
- Çakıllı tabakaların oldukça kalın olduğu ve tekrarlı yükler altında oluşan boşluk suyu basınçlarının dağılması için gerekli olan drenaj

boylarının uzamasıdır.

Sıvılaşma başlangıcının nicel değerlendirmelerinde, saha deneylerinin yapılması en yaygın mühendislik yaklaşımıdır. Yapılan araştırmalar neticesinde dört farklı saha deneyi, yararlı bilgiler sağlayabilecek olgunluğa ulaşmıştır. Bunlar; standart penetrasyon deneyi (SPT), koni penetrasyon deneyi (CPT), arazi kayma dalga Hızı (Vs), Becker penetrasyon deneyi (BPT) dir.

İnceleme alanında sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde, en eski ve yaygın yöntem SPT sonuçlarının iyi geliştirilmiş bağıntılar ve hesaplamalarla kontrol edilmesidir. Sözü edilen yaklaşımların temelinde Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilen bağıntılar bulunmaktadır. Hesaplamalarda zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi iki farklı parametreye bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Bu parametreler, bir deprem yüklemesi altında oluşacak periyodik gerilme oranı (CSR) ve zeminin sıvılaşmaya karşı dayanımını temsilen devirsel direnç oranıdır (CRR). Zemin sıvılaşması zeminin periyodik gerilme oranının, zeminin devirsel direnç oranından büyük olması durumunda oluşmaktadır.

2.7.2 Periyodik Gerilme Oranı (CSR)

Seed ve Idriss (1971) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak Periyodik gerilme oranı (CSR) Eşitlik (2.7.2)' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$CSR = 0,65 (\sigma_0 / \sigma'_0) a_{max} \cdot r_d \quad (2.7.2)$$

0,65: Seed tarafından önerilmiş ağırlıklı ortalama katsayısı,

Tablo 6 : Gerilme azaltım faktörünün derinliğe bağlı değişimi [Seed ve Idriss, 1971].

Gerilme Azaltım Faktörü r_d	Derinlik
$1,00 - 0,00765 \cdot z$	$z < 9,15 \text{ m}$
$1,174 - 0,0267 \cdot z$	$9,15 \text{ m} < z < 23 \text{ m}$
$0,744 - 0,008 \cdot z$	$23 \text{ m} < z < 30 \text{ m}$
0,50	$z > 30 \text{ m}$

2.7.3 Devirsel Gerilme Oranı (CRR)

Devirsel direnç oranı, arazideki zeminin sıvılaşma direncini temsil etmektedir. Devirsel direnç oranını belirlemek için en yaygın ve kullanışlı yol standart penetrasyon deneyinden elde edilen verileri kullanmaktır. Genelde bir zeminin sıvılaşma direncini arttıran faktörler standart penetrasyon deneyinden bulunan düzeltilmiş SPT ($(N_1)_{60}$) değerini de artırmaktadır.

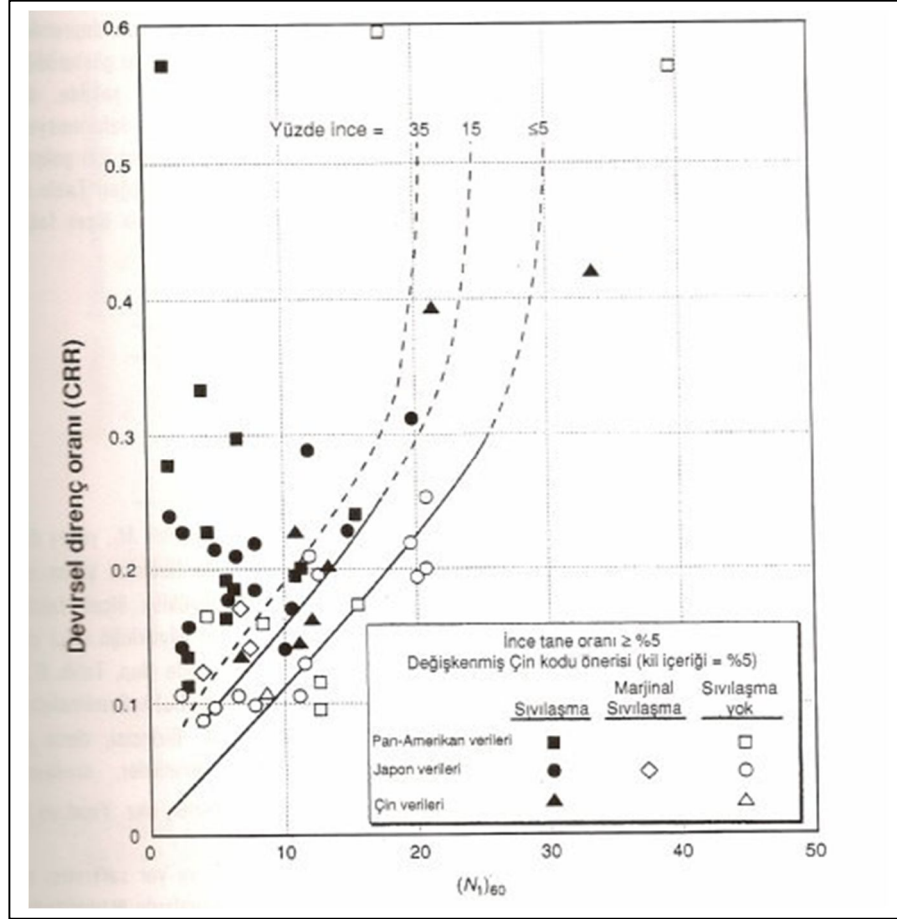
Seed vd. (1985) standart penetrasyon deneyi ve arazi performans verilerine dayanarak tanımlanabilecek üç yaklaşık potansiyel hasar dağılımı olduğu sonucuna varmıştır.

Tablo 7 : Düzeltilmiş SPT değeri-potansiyel hasar ilişkisi [Seed vd., 1985]

$(N_1)_{60}$	Potansiyel hasar
0-20	Yüksek
20-30	Orta
> 30	Önemsiz hasar

Bu tabloya göre, $(N_1)_{60} = 20$ değeri orta ve sıkı kumlar arasında yaklaşık bir sınırdır. $(N_1)_{60} > 30$ olduğunda, kum ya sıkı veya çok sıkı bir durumdadır. Böyle bir durumda hacimsel artma nedeniyle büyük deformasyonlar üretmemekte ve bu nedenle önemli hasar oluşmamaktadır.

Şekil 28'de arazideki zeminin devirsel direnç oranını belirlemede kullanılabilen grafik depremler esnasında sıvılaşmış veya sıvılaşmamış pek çok yerde yapılan araştırmalara dayalı olarak geliştirilmiştir. Şekilde kullanılan verilerin çoğunda deprem büyüklüğü 7.5 civarındadır (Seed vd., 1985) . Şekilde düzeltilmiş SPT ile devirsel direnç oranı arasındaki ilişkiler farklı ince dane oranları için görülmektedir. Burada çizginin sağındaki veriler genellikle deprem esnasında sıvılaşmayan sahaları gösterirken, solundaki veriler sıvılaşma gözlenmiş yerleri belirtmektedir.



Şekil 28 : Devirsel direnç oranı – düzeltilmiş SPT ilişkisi [Seed vd, 1985]

Şekil 28 incelendiğinde 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için, $(N_1)_{60}$ değerinin 30 dan büyük olması durumunda temiz kumun sıvılaşmadığı, $(N_1)_{60} = 30$ değerindeki kumun ya sıkı ya da çok sıkı bir kıvamda bulunduğu ve bu kumun makaslama esnasında hacimsel olarak genleşme eğiliminde olduğu söylenebilmektedir.

2.7.4 Sıvılaşmaya Karşı Emniyet Faktörü

Sıvılaşma analizinde son adım sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünün hesaplanmasıdır. Depremi neden olduğu devirsel gerilme oranının arazideki zeminin devirsel direnç oranından büyük olması halinde deprem esnasında sıvılaşma meydana gelebilmektedir. Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü Eşitlik (2.7.4.1)'deki bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2.7.4.1)$$

Emniyet faktörü ne kadar yüksek ise zemin de sıvılaşmaya karşı o kadar dirençlidir. Bununla birlikte, emniyet faktörünün 1'in hafifçe üzerinde olduğu zeminler yine de bir depreminde sıvılaşabilmektedir.

Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünü belirleyebilmek için zeminin kayma dalgası hızı da kullanılabilir.

Ohba ve Toriumi (1970), Japonya'da Osaka yakınlarında alüvyon zeminlerde yapılan Rayleigh hızı ölçümlerine dayanan,

$$V_s = 84 * N_0^{.31} \quad (2.7.4.2)$$

bağıntısını sunmuşlardır. Bu korelasyon eşitliklerinde V_s , m/sn biriminde kayma dalgası hızını, N_0 ise SPT darbe sayısını göstermektedir.

Ohta ve Goto (1978), her birinde V_s , SPT-N, derinlik, jeolojik yaş ve zemin tipi ile ilgili bilgiler bulunan 300 set veriyi kullanarak, kayma dalgası hızının bu değişkenler ile ilişkisini incelemişlerdir. SPT-N değeri, derinlik, jeolojik yaş ve zemin cinsi ile kayma dalgası hızı arasında yaptıkları analiz sonucunda aşağıda verilen korelasyon eşitliğini tanımlamışlardır. Bu bağıntıda, çok sıkı zeminlerde SPT deneyinde, 30 cm nin 50 vuruşta geçilememesi durumunda SPT-N değerleri, 50 darbe için belirlenen giriş miktarından Eşitlik (2.7.4.3) deki formülle hesaplanmıştır.

$$V_s = 69 N_0^{.17} D_0^{.2} E F \quad (2.7.4.3)$$

Burada,

$E=1.0$, $F=1.00$ (Kil); $F=1.09$ (İnce Kum)

$E=1.3$, $F=1.07$ (Orta Kum); $F=1.14$ (Kaba Kum)

$F=1.15$ (Kum-Çakıl); $F=1.45$ (Çakıl)

olarak alınması önerilmekte ve F zemin cinsini, E jeolojik yaş faktörünü ve D ise metre cinsinden derinliği ifade etmektedir.

İyisan (1996), Erzincan'da yapılan bir grup sismik ve arazi penetrasyon (SPT) deneyi sonuçlarını değerlendirerek ve tüm zemin grubunu içeren 65 adet veri kullanarak yaptığı regresyon analizi sonucunda Vs ve N arasında ;

$$V_s = 51.5 \cdot N_0^{0.516} \quad (2.7.4.4)$$

ampirik bağıntısını elde etmiştir. Bağıntının geliştirilmesinde, sismik dalga hız ölçümleri yeraltı su seviyesinin üzerinde yapıldığından YASS'nin etkisi dikkate alınmamıştır.

Çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen SPT N-Vs korelasyonlarında, SPT deneyinin arazide uygulanması sırasında kullanılan donanım, deney teknikleri ve analizlerde kullanılan veri sayısı bu bağıntılardan elde edilen sonuçlar üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle elde edilen bağıntılarda korelasyon katsayısı ne kadar büyük olursa olsun sonuçların bir çok faktörden etkileneceği dikkate alınarak, bu bağıntılardan hesaplanan hız değerlerini, arazi ölçümlerinden bulunanlar gibi değerlendirmek yoluna gidilmemelidir.

Bu ampirik bağıntılardan bulunan sonuçları, arazi sismik deneylerinin yapılamadığı durumlarda zemin dinamik özellikleri hakkında yaklaşık bir fikir edinmek veya sınırlı sayıda sismik deneyin uygulanabildiği durumlarda ise, ölçülen hız değerlerini kontrol etmek ve sismik deney programını desteklemek amacıyla kullanmak daha anlamlı olmaktadır. Kayma dalgası hızı ölçümü için Eşitlik (2.7.3.5)' daki denklem kullanılabilir (Robertson , 1992).

$$V_{s1} = V_s \cdot C_v = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (2.7.3.5)$$

Bu formülde,

V_{s1} = Düzeltmiş kayma dalgası hızı

C_v = Düzeltme faktörü

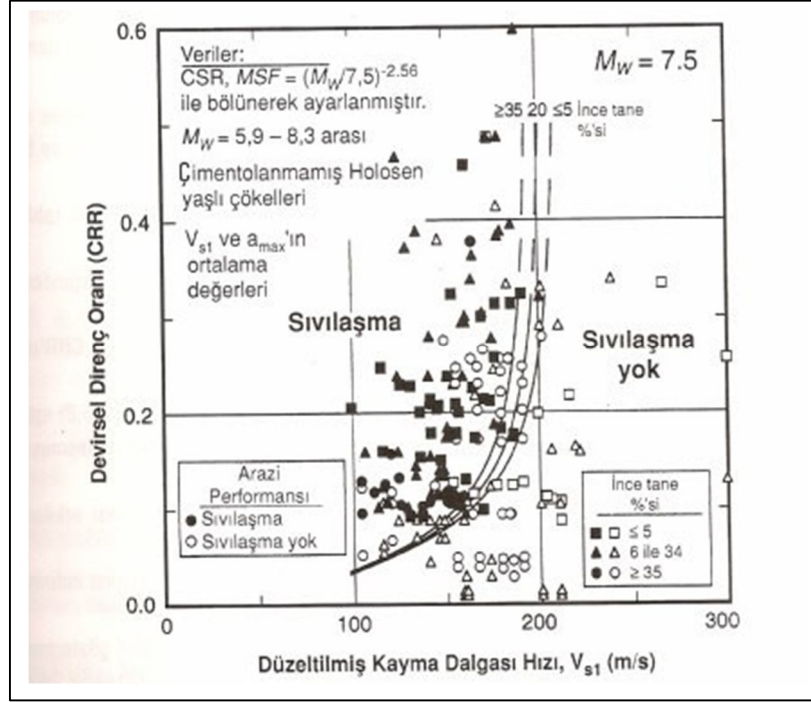
σ'_{v0} = Düşey efektif gerilme (kPa)

V_s = Arazide ölçülen kayma dalgası hızını göstermektedir.

Devirsel direnç oranını belirlemede kayma dalgası hızı kullanıldığı zaman Şekil 29 kullanılmaktadır(Andrus ve Stokoe, 1997). (2.7.3.5) Eşitliğinden elde edilen düzeltilmiş kayma dalgası hızı V_{s1} değerine karşılık ince tane miktarına bağlı olarak devirsel direnç oranı elde edilir. Sonra sıvılaşmaya karşı emniyet faktörü (2.7.4.1) Eşitliği kullanılarak hesaplanır. Sıvılaşmaya karşı emniyet faktörünü belirlemek amacıyla kayma dalgası hızını kullanmanın avantajı, sıvılaşma potansiyeli ilk analizinin gerekli olduğu çok büyük sahalar için kullanılabilmesidir.

Bu yöntemin dezavantajı ise; deney işleminde çoğu kez zemin numuneleri elde edilmeyişi, potansiyel olarak sıvılaşabilir ince tabakanın teşhis edilemeyişi ve yöntemin zeminin küçük deformasyonları üzerine dayanmasıdır. Halbuki sıvılaşmada yüksek deformasyonlar söz konusudur.

Şekil 29'daki veriler arazi performans verilerine dayandırılmıştır. Devirsel direnç oranı CRR'nin 0.3 değeri üstündeki eğrileri doğru olarak tanımlayabilmek için çok az veri bulunmaktadır. Eğriler 200 m/sn lik kayma dalgası üzerinde çok dik olup, kayma dalgası hızını ölçmede yapılacak küçük bir hata, emniyet faktöründe önemli değişikliklere sebep olabilmektedir. Örneğin kayma dalgası hızında 190' dan 210 m/sn 'ye artış, devirsel direnç oranında iki kat artışa sebep olmaktadır.



Şekil 29 : Devirsel direnç oranı-düzeltilmiş kayma dalgası hızı arasındaki ilişki [Andrus ve Stokoe, 1997]

2.7.5 Çevrimsel Gerilim Azaltım Faktörü

Çimento – zemin karışımı ile elde edilen yüksek kayma mukavemetine sahip kolonlarla hesap için öncelikli adım zeminin maksimum kayma modülünün tayinidir. Jet grout imalatları sonrasında oluşan jet grout kolonların zeminin sıvılaşma potansiyelinin düşürülmesine yönelik etkisinin değerlendirilmesi için Hayden ve Baez (1994) tarafından çimento kolonları için önerilen kabullerden yararlanılabilir.

Bu kabule göre kolonla iyileştirilen çevre zemin arasında birim kayma deformasyonu uyumluluğu olduğu takdirde ;

$$\tau_s / \tau = ((1/G_r)(1/(A_r + (1/G_r)(1 - A_r)))) \quad (2.7.5.1)$$

bağıntısının sağlanmış olması gerekmektedir. Bu formülde;

τ_s ; kolonla iyileştirilen zemin arasındaki kayma gerilmeleri, τ ; deprem sırasında sistemde oluşan kayma gerilmesi, A_r ; alan değiştirme oranı = A_c/A , A_c ; kolon alanı, A ; her bir kolonun iyileştirdiği birim alan, G_r ; kayma modülleri oranı = G_c/G_s , G_c ;

kolon kayma modülü, G_s ; zemin kayma modülünü ifade etmektedir.

Eşitlik 2.7.5.1'den da görüldüğü üzere, iyileştirilmiş zeminde deprem sırasında oluşacak kayma gerilmeleri, kolon çapı, aralığı ve kayma modülü değişkenleriyle ilişkilidir.

Hesaplanan oran, Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen yöntemle bulunan periyodik gerilme oranlarına, azaltma faktörü olarak uygulanırsa; Azaltılmış CSR değeri CSR_{imp} (2.7.5.2) Eşitliği ile bulunmaktadır.;

$$CSR_{imp} = K_G \cdot CSR \quad (2.7.5.2)$$

Dolayısıyla iyileştirilmiş olan zemine tasarım deprem büyüklüğü ve maksimum yer ivmesi altında etkileyecek gerilmeler, bu oran miktarınca düşecek ve sıvılaşma riskini azaltacaktır. Sıvılaşma analizlerinde hesaplanan gerilme oranları bu şekilde revize edilecek olursa, sıvılaşma riski olduğu hesaplanan kritik tabakalarda hedef güvenlikler sağlanmakta ve sıvılaşma riski kalmamaktadır.

Yüksek kayma modüllü zemin – çimento karışımı kolonlar ile yapılan uygulamalarda ikinci adım olarak tasarımcının tecrübesine de bağlı olarak uygun bir kolon çapı ve aralığı seçilerek iterasyona başlanmaktadır. Kolonların kayma modülleri tercihen arazide yapılacak aplikasyon deneyleri veya başlangıç olarak müteahhit firmaların benzer sahalarda elde ettiği tek eksenli silindirik basınç deneyi mukavemetlerinin (f_{JG}) yorumlanması ile elde edilebilmektedir. Her durumda bu verilerin inşaat aşamasında deneylerle doğrulanması zorunludur. Tercihen Jet Grout kolon karot numunelerinden alınacak örnekler tek eksenli basınç deneyine tabi tutularak ve geçici yükleme durumlarında Poisson Oranı (ν) 0.5 kabul edilerek, aşağıda açıklandığı şekilde elastisite (E_{JG}) ve kayma (G_{JG}) modülleri bulunabilmektedir (Seed ve Idriss, 1971).

$$E_{JG} = 4730 \sqrt{f_{JG}} \text{ (MPa)} \quad (2.7.5.3)$$

$$G_{JG} = \frac{E_{JG}}{2*(1+\nu)} \quad (2.7.5.4)$$

Kayma modülünün alabileceği değer aralığı literatürde 1000 MPa ile 4000 MPa arasında olabilmektedir (Seed ve Idriss, 1971). Uygulamada zemindeki değişim miktarlarını tanımlamak üzere yüksek modüllü kolon alanının (A_{JG}), Şekil 2.7.5.6' da gösterilen birim hücre alanına (A) oranı olan, alan yerdeğiştirme oranı (a_r) aşağıdaki formüldeki gibi tanımlanmaktadır.

$$a_s = \frac{A_{JG}}{A} \quad (2.7.5.5)$$

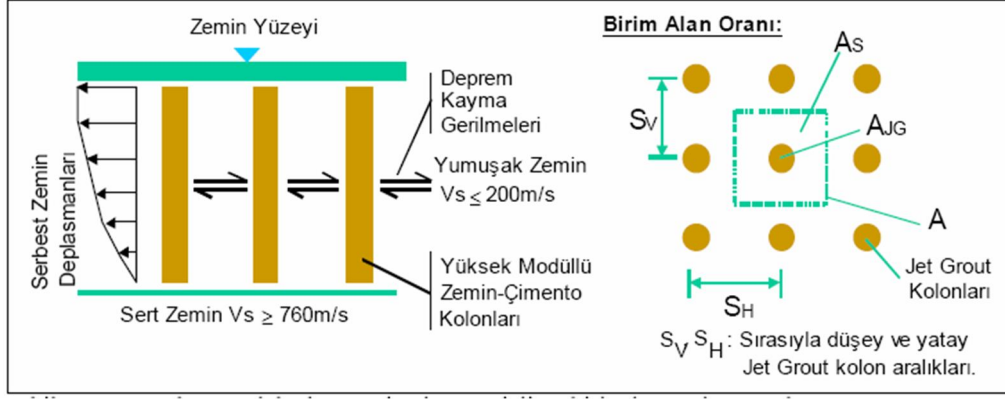
$$a_s = \frac{A_{JG}}{A} = 1 - a_r \quad (2.7.5.6)$$

Hesabın bundan sonraki adımları; deprem durumunda oluşacak kayma gerilmelerinin birim alan içerisinde üniform olarak oluşturulan kolonlar ve bu elemanları çevreleyen zemin arasında, kayma modülleri oranında dağılacağı kabulüne dayanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli gösteren alüvyonal zeminlerde kayma dalgası hızının genelde 200m/s'den az olacağı düşünülürse burdan elde edilecek çimento karışımı kolonların kayma modülünün zemin kayma modülüne oranının (G_r) 15 ile 160 kat farklı olabileceği hesaplanmıştır. Bu durumda oluşacak kayma gerilmeleri uygun bir uygulama çapı ve aralığının seçimi ile kolonlar arası kalan zeminden ziyade kolonlar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Birim alan içerisindeki gerilme konsantrasyonu (n) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır :

$$n = \frac{\tau_{JG}}{\tau_s} \quad (2.7.5.7)$$

Yukarıdaki ifadede, τ_{JG} ; çimento-zemin karışımı kolonlara ve τ_s ; kolonlar arasındaki zemine etkiyen kayma gerilmesini temsil etmektedir.



Şekil 30 : Deprem kayma dalgalarının dağılım modeli ve birim hücrenin tanımlanması [Özsoy ve Durgunoğlu, 2003]

Bu durumda birim alan üzerine etki eden gerilme (τ), herhangi bir derinlikte birim alan içerisindeki kayma gerilmesinin dengesinden yola çıkarak ve alan değişim oranı (a_r)'ye bağlı olarak şu şekilde hesaplanmaktadır :

$$\tau = \tau_s a_s + \tau_{JG} a_r \quad (2.7.5.8)$$

Yukarıdaki eşitlik gerilim konsantrasyonu oranına bağlı olarak çözüldüğü takdirde aşağıdaki formül elde edilmektedir :

$$\tau_s = \frac{\tau}{(1 + (n - 1)a_r)} \quad (2.7.5.9)$$

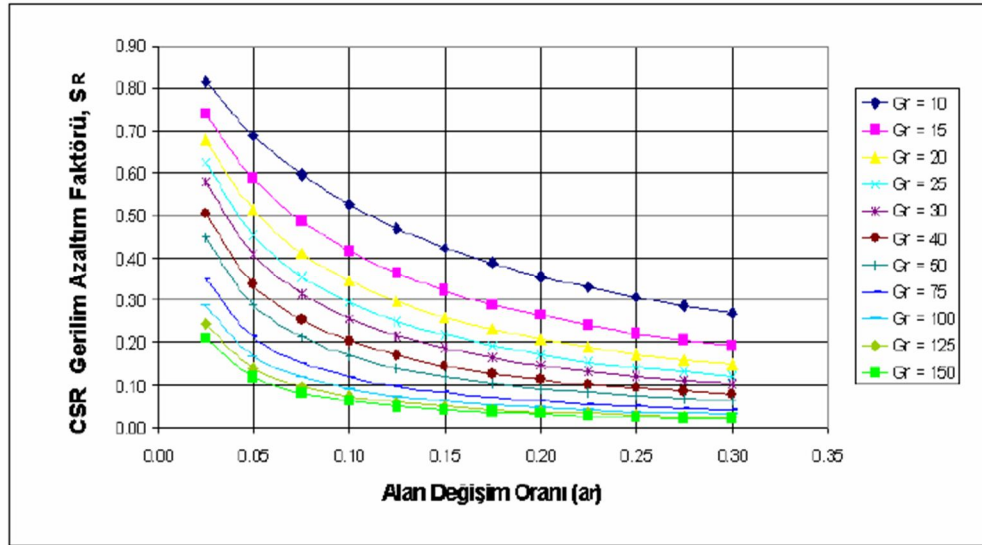
Kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımının hesabında deprem halinde kolonların ve onları çevreleyen zeminin deplasmanlarının aynı olacağı tezinden hareket edilmektedir. Bu takdirde depremde oluşan kayma gerilmeleri, kolon ile zemin arasındaki rijitlik farkından dolayı, nisbeten daha rijit olan kolonlar üzerinde yoğunlaşmaktadır (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003). Kolonlar arasında kalan zeminin sıvılaşma riskinin azaltılması için yüksek kayma modüllü kolonların kendilerine gelecek kayma kuvvetini karşılayacak mukavemete sahip olması gerekmektedir. Zemin-çimento karışımı kolonlarda birim alan üzerine etki eden toplam kayma gerilmesi (τ) yerine ortalama kayma gerilmesi (τ_{avg}) kullanılmaktadır. Deprem esnasında şekil değiştirmeler bu gerilme sayesinde ortaya çıkmakta, kolonlar ve onları çevreleyen zemin arasındaki gerilme paylaşımı kolon çapı ve kolonlar arası mesafenin bir fonksiyonu haline gelmektedir.

Birim alan içerisindeki kolonlar ve bunları çevreleyen zemin arasında şekil değiştirme uyumu olduğu kabulüyle zeminin çevrimsel gerilme oranı (CSR) üzerinde azaltma faktörü (S_R) oluşmaktadır. Azaltma faktörü (2.7.5.10) Eşitliği ile belirlenmektedir. Bu sayede çevrimsel gerilme oranı azalmakta ve sıvılaşmaya karşı zeminin güvenlik sayısı artmaktadır (Özsoy ve Durgunoğlu, 2003).

$$S_R = \frac{\tau_S}{\tau} = \frac{\tau_S}{\tau_{avg}} = \frac{1}{(1+(G_r-1)a_r)} \quad (2.7.5.10)$$

Bu formülde (S_R) azaltma faktörü, τ_S kolonlar arası zemine etkileyen kayma gerilmesi,, bir başka deyişle Zemin tarafından taşınan kayma gerilmesi, τ_{avg} zemin-çimento karışımı kolonda birim alana etki eden kayma gerilmesi, G_r modül oranı, a_r alan oranı olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 31 'de alan değişim oranlarına göre gerilim azaltım faktörlerinin değişimi, G_r : 10-150 arasında tanımlanmıştır.



Şekil 31 : Birim alan ve kayma modülü oranlarına göre azaltım eğrileri [Özsoy ve Durgunoğlu, 2003]

2.7.6 Sıvılaşma Potansiyeli Analizlerinde CPT Verilerinin Kullanılması

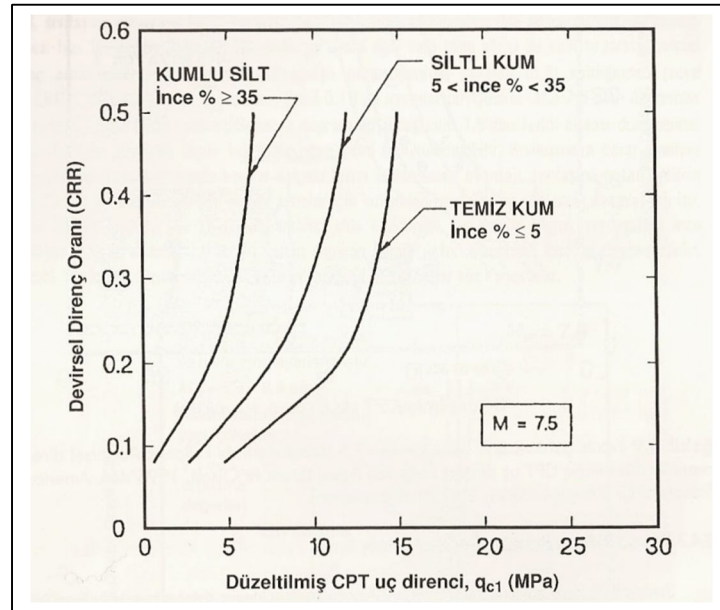
Kaba daneli zeminlerde arazide numune alımı ve laboratuvar ortamında arazideki gerçek gerilme koşullarının oluşturulmasında zorluklar bulunmaktadır.

Bundan dolayı sıvılaşma potansiyeli analizlerinde arazi deneylerinden elde edilen verilerden faydalanılmaktadır. CPT sürekli veri toplama özelliği, güvenilirliği, hızı ve ekonomik olma özellikleri ile sıvılaşma analizlerinde kullanılan modern bir yöntemdir.

CPT ile sıvılaşma değerlendirmeleri için ilk aşama düzeltilmiş CPT uç direncinin belirlenmesidir. CPT uç direnci Eşitlik (2.7.6.1)' da verilmiştir.

$$q_{c1} = c_N \cdot q_c = \frac{1,8 q_c}{0,8 + \sigma'_{v0}/100} \quad (2.7.6.1)$$

Burada q_{c1} düzeltilmiş CPT uç direnci, c_N düzeltme faktörü, σ'_{v0} düşey efektif gerilme, q_c konik uç direncidir. Düzeltilmiş CPT uç direnci belirlendikten sonar arazideki zeminin devirsel direnç oranını belirleyebilmek için Şekil 32 'deki grafikten yararlanılmaktadır.



Şekil 32 : Temiz kum, siltli kum ve kumlu silt için M=7.5 depremlerinde kullanılan devirsel direnç oranı ile düzeltilmiş CPT uç direnci ilişkisi [Stark ve Olson, 1995]

Temiz çakıl ve siltli çakıllar için ise 7.5 manyitüdündeki depremler için devirsel direnç oranını belirleyebilmek için Şekil 2.33'den yararlanılmıştır.

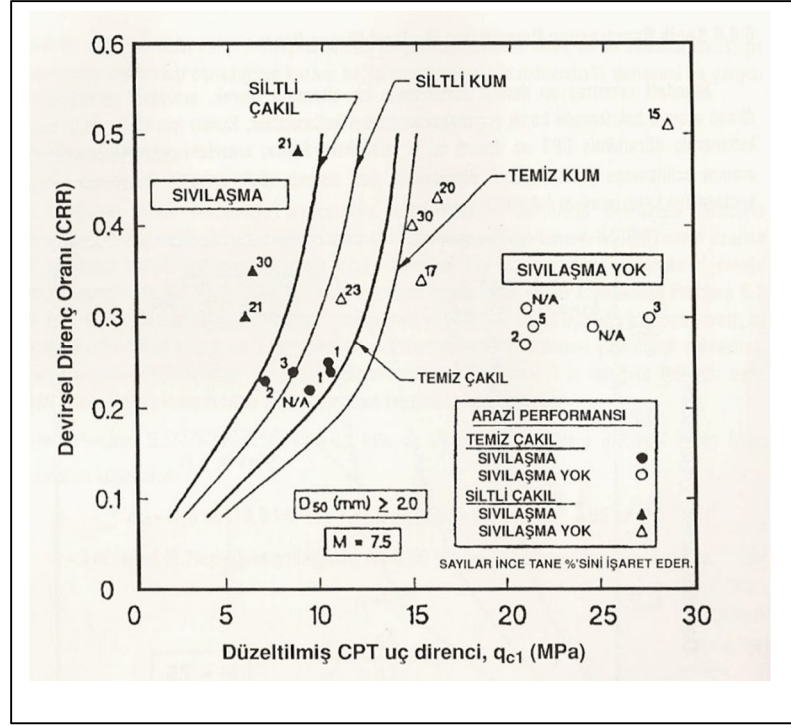
Diğer manyitüdeki depremler için devirsel direnç oranı CRR Eşitlik

(2.7.6.2) ile bulunmaktadır.

$$CRR = (CRR_{7.5}) \cdot (MSF)$$

(2.7.6.2)

Burada, MSF manyitüd düzeltme faktörüdür.



Şekil 33 : Temiz çakıl ve siltli çakıl için M=7.5 depremlerinde kullanılan devirsel direnç oranı ile CPT uç direnci değerleri ilişkisi [Stark ve Olson, 1995]

Tablo 8'de Youd ve Idriss (1997) tarafından düzenlenmiş olan manyitüd düzeltme faktörleri verilmiştir.

Tablo 8 : Manyitüd düzeltme faktörleri [Youd ve Idriss, 1997]

Deprem Büyüklüğü	Manyitüd Düzeltme Faktörü (MSF)
8,5	0.89
7,5	1.00
6,5	1.13
6	1.32
5,5	1.50

Buna göre farklı bir manyitüd etkisi dikkate alınarak sözkonusu zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanımını temsil eden güvenlik faktörü GS Eşitlik (2.7.6.3) ile belirlenmektedir.

$$GS = (CRR_{7.5} / CSR).MSF \quad (2.7.6.3)$$

3. JET ENJEKSİYONU TASARIMI

3.1 Giriş

Jet enjeksiyonu uygulaması önceleri sadece granüler zeminlere uygulanabileceği düşünülmüş ve bu tür zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Sonraları tekniğin zamanla ilerlemesi sayesinde ince daneli zeminlerde de kullanılabilmesi anlaşılmış ve başarılı olunmuştur.

Jet enjeksiyonu uygulamasının kesin ve basit bir hesaplama yönteminin olmaması nedeniyle uygulama birçok ampririk ve teorik içeriğe dayandırılmıştır. Tasarım yöntemleri tasarımcının yapmış olduğu birçok çalışma sonucunda elde etmiş olduğu tecrübelerine dayalı olarak ekonomikliğin göz önünde bulundurulması suretiyle iyi, güvenli ve kesin tasarımın yapılmasına olanak veren yol gösterici öğelerdir.

Tasarım yöntemi uygulanmadan önce yapılması gerekenler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- İyileştirme yapılacak zeminle alakalı tüm verilerin toplanması
- Zeminin mekanik olarak modellenmesi
- Yükleme koşullarının seçimi
- Yüklemelerin hesaplanması
- Malzemenin seçimi

Bunlar yapıldıktan sonra tasarımcı yapılacak olan uygulamanın zemin iyileştirmesi mi yoksa yapı elemanı mı olacağını tespit etmelidir. Sonraki aşamada yapılacak olan tasarımda dikkate alınması gereken parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Zemin çeşidi ve parametreleri
- Kullanılacak enjeksiyon harcının parametreleri
- Zemin ve enjeksiyon karışımları
- Teşkil edilecek elemanlarda kullanılacak olan çelik donatısı, tipi ve geometrisi

- Katkı malzemelerinin özellikleri

Son aşama olarak tasarımcı jet enjeksiyon yöntemlerinden uygun olanını seçmelidir.

3.2 Kolon Tasarımı

Zeminde düşey olarak teşkil edilen tekil jet enjeksiyon kolonları kazık elemanlar gibi düşünülerek hesapları yapılmaktadır. Jet enjeksiyon kolonlarının taşıma kapasitesi aşağıdaki formüllerle hesaplanmaktadır.

$$q_u = q_{uç} + q_s$$

$$\text{Granüler zeminler için} \quad : q_{uç} = A_b \cdot q_b + \pi D_a \int \gamma \cdot z \cdot K_s \cdot \tan \delta \cdot dz$$

$$\text{Kohezyonlu zeminler için} \quad : q_u = A_b \cdot q_b + \pi D_a \cdot \int \alpha \cdot c_u \cdot dz$$

Bu formülde:

A_b : kolon tabanı alanı

q_b : $(1+2K_0) \cdot \sigma_{vo} \cdot N_q^* \cdot \xi$ (kumda)

q_b : 9.cu (kohezyonlu zeminde)

D_a : kolon çapı

N_q : taşıma gücü faktörü

σ_{vo} : düşey toprak basıncı

γ : zeminin birim hacim ağırlığı

K_0 : sukünetteki zemin basıncı katsayısı K_s : zemin basıncı katsayısı

δ : zemin-kolon arasındaki sürtünme açısı

α : adhezyon azaltma katsayısı

Jet enjeksiyon yöntemi ile imal edilen kolonların çevresinde azdan çok doğru sıkışma oluşmakta ve derinliğin artması ile de kolonlar üniform oluşturulamamaktadır.

Jet enjeksiyon kolonunun çevresinde oluşabilecek kayma yüzeyi Şekil 3.1.'de verilmiştir.

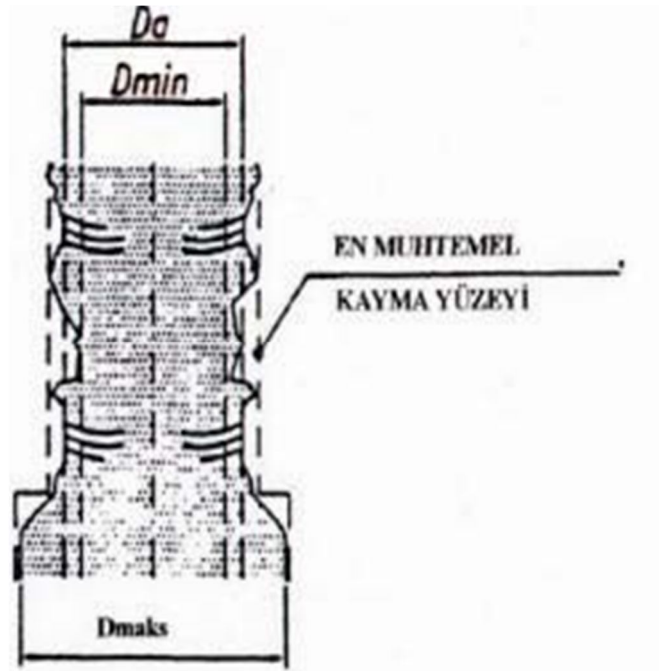
Kayma yüzeyine bağlı olarak kriterler aşağıda gösterilmiştir.

- Granüler zeminlerde
 $K_s > 1$

Tablo 3.1.'de granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerler verilmiştir.

- Kohezyonlu zeminlerde
 $\alpha = 1$ normal konsolide olmuş zeminlerde
 $\alpha = 0.45$ aşırı konsolide zeminler

Tablo 9 'da kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri verilmiştir.



Şekil 34 : Jet enjeksiyonu kolonlarında oluşan kayma yüzeyi [Y3]

Jet enjeksiyon yöntemi ile iyileştirilen zemindeki kayma mukavemeti killerde 4 Mpa, kumlu ve çakıllı zeminlerdeki kayma mukavemeti ise 12 Mpa olabilmektedir. Ön yıkama yöntemi ile killerde bu değer daha yukarılara çıkabilmektedir.

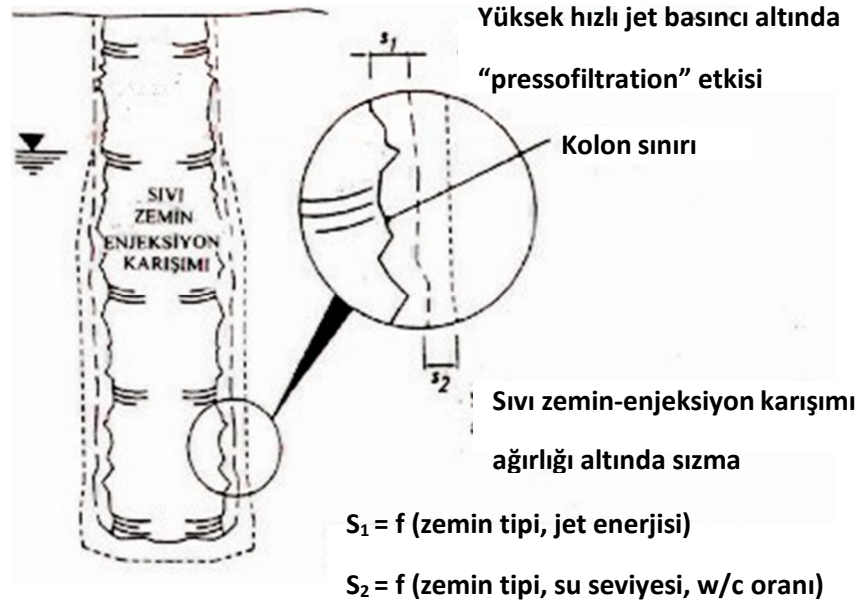
Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması Şekil 35'de verilmektedir.

Tablo 9 : Granüler zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri. [Melegary ve Garassino, 1997]

Kazık Tipi	Sürtünme kapasitesi azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç kapasitesi azaltma faktörü
	δ/φ	K_s	τ (kPa)	ξ
Fore kazık	0.6	0.5-0.65	100-200	0.33-0.5
Çakma kazık(	2/3	0.65-0.95	120	0.7-0.8
Çakma kazık (	0.75	1.0-1.5	120-180	1.0
Jet Enjeksiyon	1	1.0-2.0	≥ 180	1.0

Tablo 10 : Kohezyonlu zeminde jet enjeksiyonu kolon tasarımı için kullanılan limit değerleri. (Melegary ve Garassino, 1997)

Kazık Tipi	Sürtünme kapasitesi azaltma faktörü		Birim çeper sürtünmesi için limit değerler	Uç kapasitesi azaltma
	α (Normal konsolide)	α (Aşırı konsolide)	τ (kPa)	ξ
Fore kazık	0.9	0.35	275	0.66
Çakma kazık(açık uç) (e:)	0.95e 0.80i	0.40e 0.35i	200	0.7
Çakma kazık (	0.95	0.45	200	0.8
Jet Enjeksiyon	1	0.45	280	1.0



Şekil 35 : Jet enjeksiyonu yöntemi uygulama mekanizması [Y3]

3.3 Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Belirleyen Etmenler

Jet enjeksiyon yöntemi ile teşkil edilmiş kolonların ve iyileştirme yapılmış zeminin proje kriterini sağlayıp sağlamadığının kontrolü çok önemlidir. Kalite kontrol testleri uygulamanın başarısında önemli bir faktördür.

Jet enjeksiyon yöntemi ile teşkil edilen kolonların yeterli olup olmadığı aşağıdaki değişkenlerin değerlerinin ölçülmesi ile tespit edilebilir.

3.3.1 Zemin – Çimento Karışımı Özellikleri

Jet enjeksiyon yöntemi kullanılarak teşkil edilmiş kolonlardan alınan karot numunelerin üzerinde yapılan deneyler ile zemin-çimento karışımı birim hacim ağırlığı tespit edilir. Bu değer pratikte 16-22 Kn/m² arasında değer almaktadır.

Jet enjeksiyon kolonunun yapımında kullanılan çimento yeterince ince daneli olmalı ve çimento/su oranı 1/1 olmalıdır.

Jet enjeksiyonu yöntemiyle yapılan kolonların mukavemetini ise imalinden en az 28 gün geçtikten sonra alınan karotların laboratuvara gönderilerek bunların serbest basınç mukavemeti ve elastisite modülü tespit edilmesi ile belirleriz. Zemin-çimento karışımı mukavemeti karışımda bulunan çimentonun miktarına ve zeminin çeşidine bağlıdır. Şekil 36 'da alınan ve laboratuvara gönderilen karotlar görülmektedir.



Şekil 36 : Jet enjeksiyon kolonlarından alınan karot örnekleri [W2]

3.3.2 Kolonların Bütünlüğü ve Boyu

Kolonların bütünlüğü ve kullanılan malzemenin kalitesini tespit etmek amacıyla imalinden 28 gün sonra alttan 0.5 m kalana kadar devamlı karot alınır.

Kolonun boy ve kesitindeki düzensizlikleri tespit etmek amacıyla Pile Integrity test yapılır. Bu yöntem ile kolonda düzensizlik tespit edilmez ise kolon boyu da belirlenebilir.

Integrity test jet enjeksiyon kolonunun üst kısmına küçük bir çekiçle vurularak jet enjeksiyon üstüne yerleştirilmiş ivme ölçer ile yansıma sinyali kaydı esasına dayanır. Integrity testin sonuçlarını yorumlayabilmek için kolonun geometrisi, zemin ile kolon arasındaki yüzey ve zemin koşulları hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Şekil 37’de integrity test uygulaması verilmiştir.

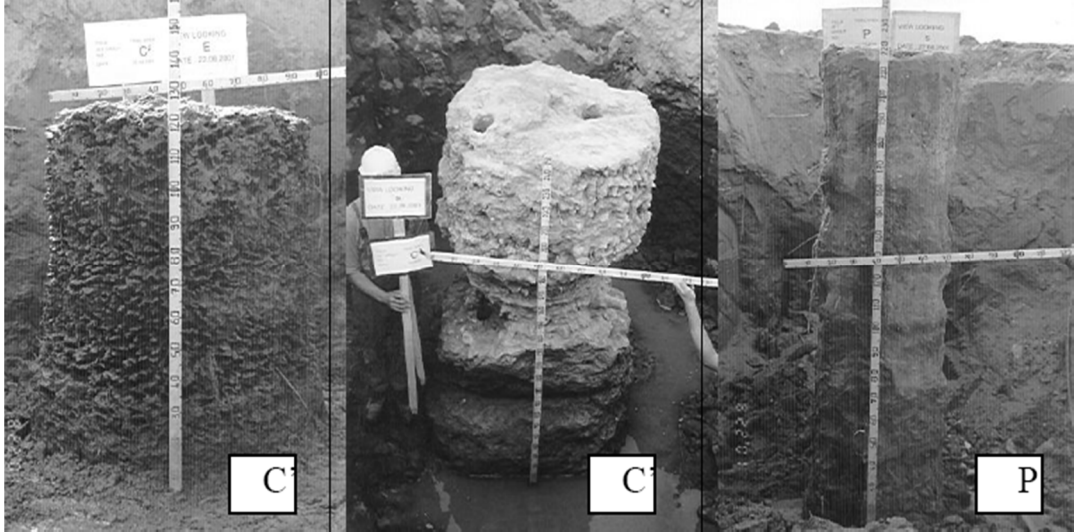


Şekil 37 : Integrity test uygulaması [Y3]

3.3.3 Kolonların Çapı

Kolon çapı jet enjeksiyon yönteminin başarısını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Çoğunlukla imal edilmesi düşünülen minimum kolon çapı proje kriteri olarak belirlenir. Seçilen sistem parametreleri ile kolon çapının istenilen şekilde oluşup oluşmadığı kolonların etrafı açılarak çeşitli seviyelerden çevresinin ölçülmesi suretiyle mümkün olur. Farklı zemin tabakalaşmalarında özellikle ince daneli zeminlerde seçilen parametreler altında en küçük çap oluşacağından tasarım bu çap baz alınarak yapılabilir. Japonya’da yeni bulunan teknoloji sayesinde her zeminde üniform çap elde edilebilmektedir.

Ülkemizde henüz kullanılmaya başlanmamıştır. Şekil 38’de kolon çapı ölçümü resimleri verilmiştir.



Şekil 38 : Kolon çapı ölçümü [Durgunoğlu H.T. , 2008]

Jet enjeksiyon yöntemiyle oluşturulan kolonların çapları ve özellikleri aşağıdaki kriterlere dayanmaktadır:

- Zeminin cinsi ve özellikleri
- Enjeksiyon karışımının içeriği
- Püskürtme basıncı
- Delgi borusunun dönme ve yukarı çekilme hızı

3.3.4 Kolonların Geçirimsizliği

Jet enjeksiyon kolonların yapılış amacı geçirimsizlik sağlamak ise açılan karot deliklerinde sabit seviyeli geçirgenlik deneyiyapılabilir.

3.3.5 Kolonların Taşıma Gücü

Jet enjeksiyon kolonları taşıyıcı eleman olarak tasarlanmış ise üzerinde çekme ve yükleme deneyleri yapmamız gerekir.

Yükleme deneyi önce test kolonları, daha sonrada uygulama için kullanılacak kolonlar üzerinde kontrol amaçlı yapılır. Test kolonları üzerinde yapılan yükleme deneyleri daha sonra uygulamada kullanılacak kolonların imalinde kullanılacak parametreleri belirlemek amacıyla yapılır. Yükleme deneyine test kolonlar göçene kadar yada maksimum kabul edilebilir oturma meydana gelene kadar devam edilir.

Uygulanacak deney yükü en az proje yükü kadar olmalı tercihen proje yükünün 1.5 katı olmalıdır. Yapılan deneyler kontrol amaçlı olup imal edilen kolonların yeterliliğinin ölçülmesinde kullanılır.

3.3.6 Jet Enjeksiyon Tekniğinin Başarısını Etkileyen Diğer Etmenler

1. Malzeme Kontrolü: Çimento harcı kullanılmadan önce kontrol edilip içerdiği çimento miktarı kaydedilmelidir.
2. İmalat Bilgileri: Kolonların imal edilmesi ile ilgili parametreler kaydedilmelidir.
3. Süreklilik Gözlemleri: Kolonların imali sırasında meydana gelen sorunlar örneğin basılan harcın kusması gibi kayıt edilmeli ve sebepleri incelenmelidir.
4. Enjeksiyon Malzemeleri: Enjeksiyon malzemeleri olan suyun; ph, sertlik , klorür ve organik madde içeriğine çimentonun dane boyu dağılımına ve birim hacim ağırlığına, karışımın ise birim hacim ağırlığı, viskozite ve basınç mukavemetini kontrol etmek gerekir.
5. Kullanılmayacak Kısımlar: Jet enjeksiyon kolonlarının yüzeye yakın yaklaşık 50 cm'lik kısmı istenen özellikleri sağlamadığından kırılarak alınır.
6. Yapım Sırası: Kolonları yapım sırası önemlidir. Jet enjeksiyon kolon imali

bitiminden 2-3 gün geçtikten sonra yanındaki kolonun imaline
başlanılmamalıdır.

4. JETGROUTING KARIŞIM HESABI

Kullanılacak Çimento Miktarının Hesabı :

Uygulanacak metod jet 1,

Killi-siltli SPT değerleri düşük zeminde, 800 mm kolon çapı,

İslah edilmiş zemindeki çimento dozajı 450 kg/m³

s/ç=1 , Nozzle sayısı =2 , Nozzle çapı =2 mm , Enjeksiyon basıncı:400 bar

Parametrelerin hesabı:

1 mt ıslah edilecek zeminin hacmi: $V = 1,00 \times 0,30 \times 0,3 \times 3,14 = 0,5024 \text{ m}^3$

1 mt ıslah edilmiş zemindeki çimento miktarı: $450 \text{ kg/m}^3 \times 0,5024 \text{ m}^3 = 226 \text{ kg / mt}$

Çimento enjeksiyonunun hacmi su/çimento oranı 1/1 oranına göre ;

(Çimento Özgül ağırlığı : 2,9 kg/İt olarak kabul ediliyor)

$1 / 2,9 = 0,35 \text{ İt /kg}$ $1,00 + 0,35 = 1,35 \text{ İt/kg (grout)}$

t mt kolondaki grout hacmi: $226 \text{ kg/mt} \times 1,35 \text{ İt/kg} = 305 \text{ İt.}$

Enjeksiyon karışımının özgül ağırlığı : $2,0 \text{ kg} / 1,35 \text{ İt /kg} = 1,48 \text{ gr / cm}^3$

H Eşdeğer yükseklik (400 bar = 4000 m) : $4000 / 1,48 = 2703 \text{ m}$

Jet huzmesinin nozzle 'dan çıkış hızı: $V = \sqrt{2gh}$,

$h = \text{hidrostatik düşü} = 4000 / 1,48 = 2,703 \text{ mt}$

$V = \sqrt{2 \times 9,81 \times 2,703} = 232 \text{ m/sn}$

Grout miktarı: $Q = V \times A$,

$V = \text{jet hızı}$,

$A = \text{jet çıkış kesit alanı}$,

$Q = 2320 \text{ dm/sn} \times 0,00062 \text{ dm}^2 = 1,45 \text{ İt/sn}$,

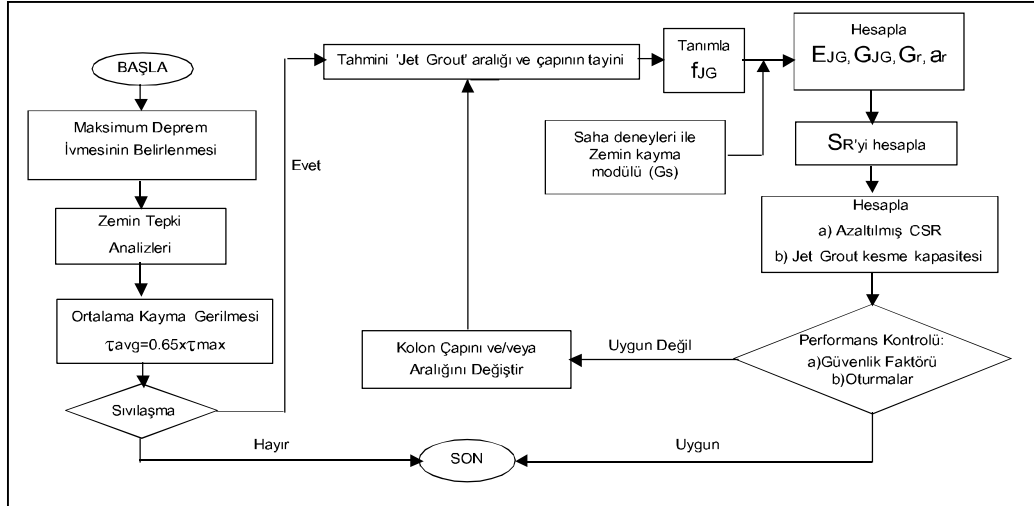
1 mt kolon teşkili için gerekli süre yaklaşık 120 sn'dir. ($305/1,45 = 210 \text{ sn}$)

Takımın her çekmede 4 cm ilerlediğini hatırlarsak, 1mt için 25 kademe gerekir.

$210 \text{ sn}/25 \text{ kademe} = 9 \text{ sn.}$, her kademedeki bekleme süresi.

5. JET GROUTING KOLONLARININ TABLOLAMA PROGRAMI KULLANARAK TASARIMI

5.1 Hesap Algoritması



[Özsoy ve Durgunoğlu, 2003]

5.2 Veri Giriş Sayfası ve Hesaplar

JET GROUT ANALİZ VE TASARIMI			
		1	
Hesap Parametreleri	Semboller	Veriler	Hesap
Jet Grout Kolon Çapı	D_{JG}	0.6	
Jet Grout Kolon Alanı	A_{JG}		0.28
Jet Grout Kolonu için Kabul Edilen Taşıma Gücü	P_{ult}	200	
İyileştirme Öncesi Zemin Emniyet Gerilmesi	Z_{emn}	10	
İki Jet Grout Kolonu Arasındaki Yatay Uzaklık	L_X	2	
İki Jet Grout Kolonu Arasındaki Düşey Uzaklık	L_Y	2	
Her Bir Jet Grout Kolonuna Düşen Alan Miktarı	A_1		4.00
İyileştirme Sonrası Zemin Emniyet Gerilmesi	σ_{ult}		23.42
Jet Grout Kolonu Birim Hacim Ağırlığı	γ_{JG}	2.4	
Bina Ağırlığı	P	1500	
Binanın Zeminde Oluşturacağı Gerilme	P_v	18.52	
Zemin Emniyet Gerilmesi Kontrolü	$P_v < \sigma_{ult}$		uygun \checkmark
Yapı Temel Genişliği	B	9	
Yapı Temel Uzunluğu	L	9	
Güvenlik Katsayısı	$G.S.$	3	
Poison Oranı	ν	0.5	
Zeminin Ortalama Yoğunluğu	γ_{ort}	1.8	
Arazi Kenarından Yatay Jet-Grout Uzaklığı	X	0.5	
Arazi Kenarından Düşey Jet-Grout Uzaklığı	Y	0.5	
Modal İşlem X Yönünde	M_X	0	
Modal İşlem Y Yönünde	M_Y	0	
Toplam Jet Grout Kolonu Sayısı	JG_s		25.00
Bütün Sistem için ,	σ_{ult}		26.57
İyileştirme Sonrası Zemin Emniyet Gerilmesi	tüm sistem		
SIVILAŞMA ANALİZİ			
Emniyetli Basınç Mukavemeti	σ_{ult}		2.00
Elastisite Modülü	E_{JG}		6689.23
Kayma Modülü	G_{JG}		2229.74
Zemin Tabakasının Ortalama Hızı	V		220.35
Tashih Edilmemiş SPT Darbe Sayısı	N	16	
Tabaka Kalınlığı	H	12	
Zemin Tipine Bağlı Düzeltme Faktörü	F	1.091	
Zeminin Maksimum Kayma Modülü	G_s		87.40
Kayma Modülü Oranı	G_r		25.51
Projeye Ait Yer Değiştirme Oranı	A_r		0.07
Derinlik	z	12	
Derinliğe Bağlı Azaltma Faktörü	r_d		0.76
Maksimum Eşik İvme	σ_{max}	0.4	
Maksimum Kayma Gerilmesi	τ_{max}		72.78
Birim Alana Gelecek Olan Kayma Gerilmesi	V_T		291.14
Zemin Tarafından Taşınan Kesme Kuvveti	V_Z		181.92
Jet Grout Kolonları Tarafından Taşınan Kesme Kuvveti	V_{JG}		109.21
Kolonun Taşıyabileceği Kayma Gerilmesi	V_{ULT}		119.90
Kayma Emniyeti Kontrolü	$V_{JG} < V_{ULT}$		uygun \checkmark

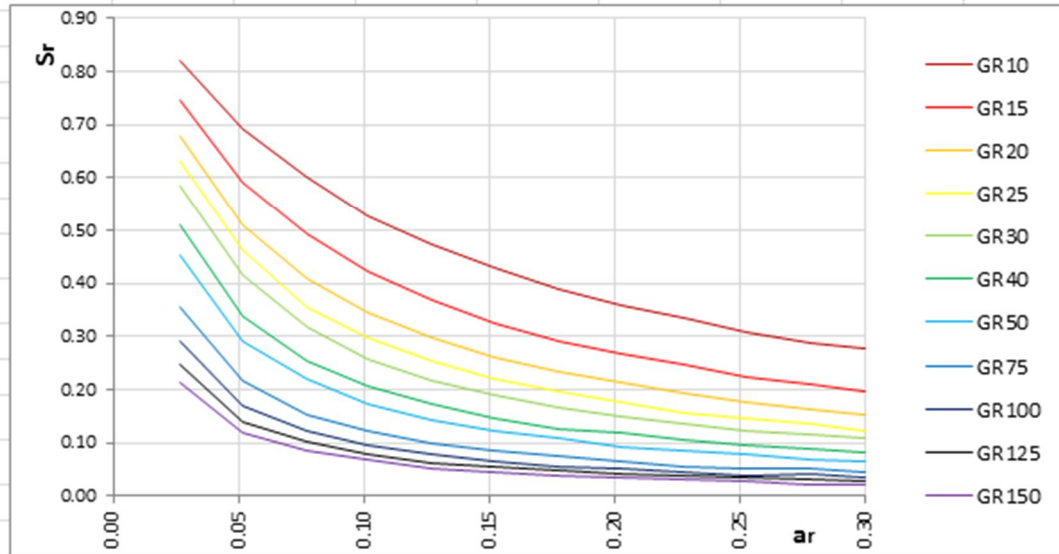
5.3 Çevrimsel Gerilme Azaltma Faktörünün Belirlenmesi

JET GROUT ANALİZ VE TASARIMI

2

Çevrimsel Gerilme Azaltma Faktörü

ar	GR10	GR15	GR20	GR25	GR30	GR40		
							10.00	0.62
0.30	0.28	0.20	0.15	0.12	0.11	0.08	12.50	0.57
0.28	0.29	0.21	0.16	0.14	0.12	0.09	15.00	0.51
0.25	0.31	0.22	0.18	0.15	0.12	0.10	17.50	0.47
0.23	0.33	0.25	0.19	0.16	0.14	0.11	20.00	0.43
0.20	0.36	0.27	0.21	0.18	0.15	0.12	22.50	0.40
0.18	0.39	0.29	0.23	0.20	0.17	0.13	25.00	0.38
0.15	0.43	0.32	0.26	0.22	0.19	0.15	25.51	0.38
0.13	0.47	0.37	0.30	0.25	0.22	0.17	30.00	0.34
0.10	0.53	0.42	0.34	0.30	0.26	0.21	35.00	0.30
0.08	0.60	0.49	0.41	0.35	0.32	0.25	40.00	0.27
0.05	0.69	0.59	0.51	0.46	0.41	0.34	45.00	0.25
0.03	0.82	0.74	0.68	0.63	0.58	0.51	50.00	0.23
							67.50	0.20
GR50	GR75	GR100	GR125	GR150			85.00	0.17
0.07	0.05	0.04	0.03	0.02			92.50	0.15
0.07	0.05	0.04	0.03	0.02			100.00	0.13
0.08	0.05	0.04	0.03	0.03			112.50	0.12
0.09	0.06	0.05	0.04	0.03			125.00	0.11
0.09	0.07	0.05	0.04	0.04			137.50	0.10
0.11	0.08	0.06	0.05	0.04			150.00	0.09
0.12	0.09	0.07	0.05	0.05				
0.14	0.10	0.08	0.06	0.05				
0.17	0.12	0.09	0.08	0.07				
0.22	0.15	0.12	0.10	0.08	Gr :	25.51	0.07	0.00
0.29	0.22	0.17	0.14	0.12	ar :	0.07	0.07	0.38
0.45	0.35	0.29	0.25	0.21	Sr :	0.38	0.00	0.38

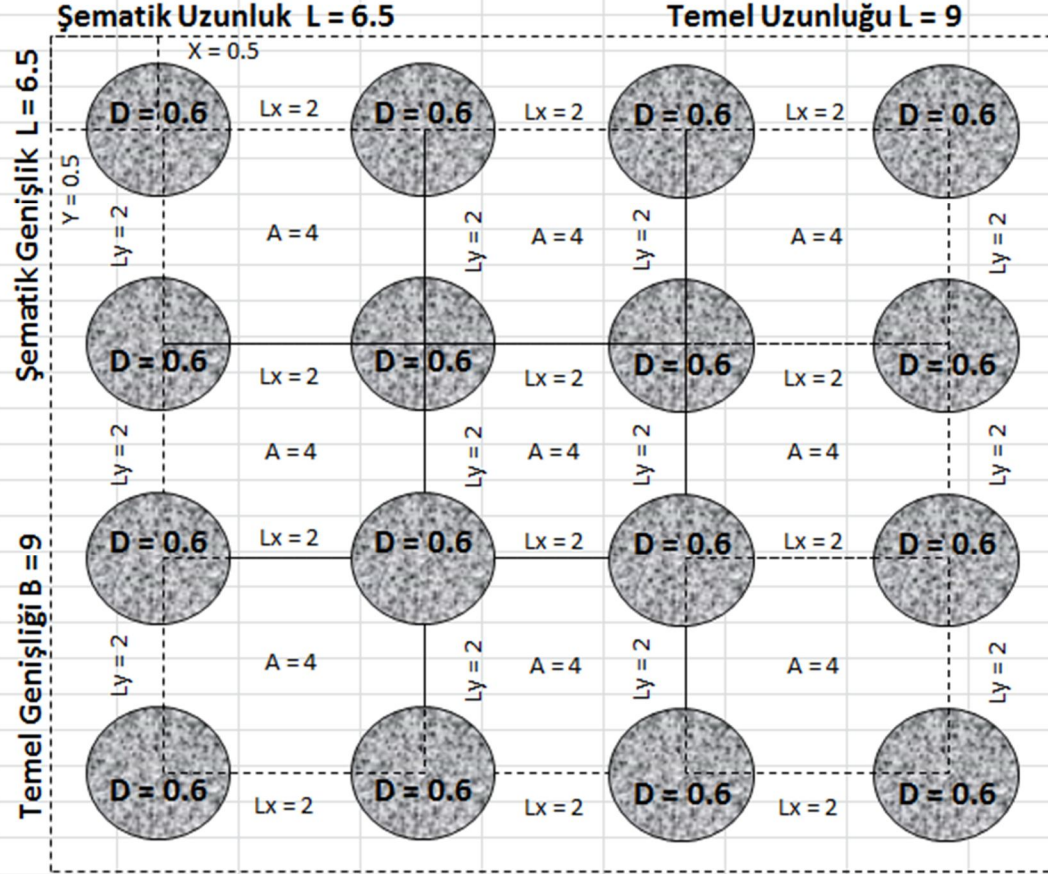


5.4 Plan , Kesit ve İmalat Bilgileri

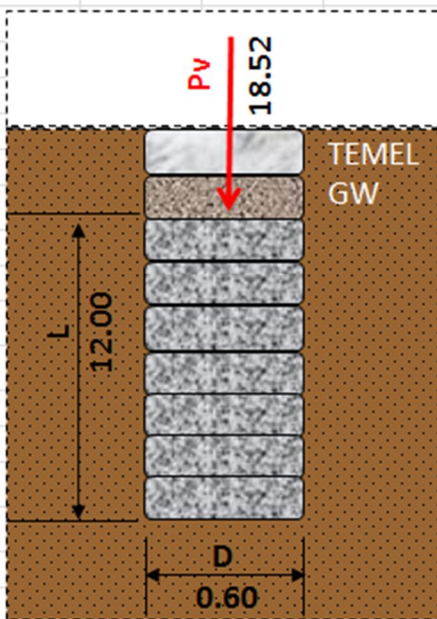
JET GROUT ANALİZ VE TASARIMI

3

Jet Grouting Şematik Yerleşim Planı



Jet Grout Kolonu Boy Kesiti



Jet Grouting İmalat Bilgileri

Jet Grout Çapı (m)	0.6
Jet Grout Boyu (m)	12.00
Jet Grout Adeti	25.00
Güvenlik Katsayısı	2.4
Yöntem	Jet - 1
Enjeksiyon Tipi	Çimento
Basınç (Bar)	450
Nozzle	2.4 mm / 2dk
Çekme Hızı (cm/dak)	145 cm / dk
Dönme Hızı (rpm)	20 d/d
Çimento	PÇ 42.5
Çimento Dozajı	450
Su/Çimento Oranı	1/1
Dolgu	40 cm GW-Kırmataş
Jg - Karot Numune Basınç Mukavemeti	en az, 6 MPa

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde sağlam zemin özelliği gösteren bölgelerin giderek azalması, teknoloji ve ihtiyaçlara bağlı olarak yapı yüklerinin artması zorunlu olarak taşıma gücü, deformasyon ve sıvılaşma açısından uygun olmayan zeminlerin iyileştirilmesini gündeme getirmektedir.

Hazırlanan program ile Jet grouting hesaplarının yapılması ve kontrolü kolaylaştırılmış proje hatalarının önüne geçilebilmesi amaçlanmıştır.

Jet grouting yöntemi statik yükler ve depreme karşı güvenle kullanılabilen yöntemlerden birisi olmakla birlikte oldukça pratik, hızlı ve ekonomik bir iyileştirme yöntemidir.

7. KAYNAKLAR

Andrus, R.D. ve Stokoe, K.H.II., "Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, (11), 1015-1025, (2000).

Andrus, R.D., Stokoe, K.H., "Liquefaction Resistance based on Shear wave Velocity Proceedings", *Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, (1997).

Burke, G.K. and Koelüng, U.A., "Special Application for Jet Grouting: Underpinning, Excavation support and Groundwater Control", *Proceedings of Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, B.C., (1995).

Çamlıbel, A. N., *Temellerin Takviyesi*, İstanbul : Birsen Yayınevi, (2000).

Durgunoglu H. T., Kulaç H. F., Oruç K., Yıldız R., Sickling J.,Boys I. E., Altugu T, Emrem C., "A Case History Of Ground Treatment With Jet Grouting Against Liquefaction For A Cigarette Factory İn Turkey", *Grouting And Grout Treatment*, New Orleans, Usa, (2003).

Durgunoglu H.T., Kulaç H.F., Oruç K., Yıldız R., Altugu T.,Emrem C.A., "Sıvılaşmaya Karşı Jet Grout Yöntemi İle Zemin İslahına Ait Bir Vaka Analizi", *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2002).

Durgunoğlu H. T., Kulaç H. F., Oruç K., Öge C.E., Eker F.Ş., "JetGrout Yöntemi İle Zemin İyileştirme Üzerine Bir Uygulama", *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, (1998).

Durgunoğlu H. T., "Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı", *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2004).

Durgunoğlu H.T., “Zeminlerde Karşılaşılan Problemler ve Zemin İyileştirmesi”, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Deprem ve Yapı Bilimleri Ana Bilim Dalı Bahar Sempozyumu*, (2008).

Essler, R. D., Drooff, E. R., Falk, “Compensation grouting, concept, theory, and practice”, Geotechnical Special Publication No. 104, *American Society of Civil Engineers*, 1–15, (2000).

Ergun, U., “Temel takviyesi ve eski eserlerin korunması”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği III. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 887- 917, (1994).

Fırat, A., T., “Jet grouting yöntemi ile temel takviyesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, İstanbul, (2001).

Gallavresi, F., “Grouting Improvement of Foundation Soils Grouting”, *Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication*, 1, 1-39, (1992).

Keskin, S.N., Çimen, Ö., “Zemin İyileştirilmesinde Jet Grout Yöntemi Kullanılması Üzerine Bir Uygulama”, *Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2002).

Kumbasar V., Kip F., “Zemin Mekaniği Problemleri”, İstanbul : Çağlayan Kitabevi, 520, (1985).

Melegari, C., Garassino A.L., “Seminar on Jet Grouting”, CI-Premier Pte. Ltd., Singapore, (1997).

Moseley, M., P., “Ground Improvement”, Chapman & Hall, Boca Raton, (1993).

Namlı, M., “Tarihi yapıların temel sistemleri ve temel takviyesi yöntemleri”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2001)

Nakanishi, W. and Nakazawa, J., “The process of development on jet grouting methods and their future”, 54, 7, 10-12, (2006).

Özsoy B., Durgunoğlu H. T., “Sıvılaşma Etkilerinin Yüksek Kayma Modüllü Zemin-Çimento Karışımı Kolonlarla Azaltılması”, 5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, (2003).

Özsoy M.B., “The Mitigation Of Liquefaction By Means Of Soil Improvement Techniques”, Ph.D. Thesis, Boğaziçi University, Civil Engineerin Department, İstanbul, Türkiye, (2002).

Önalp, A., Geoteknik Bilgisi-I, “Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği”, İstanbul : Birsen Yayınevi, (2007).

Önalp, A., Sert, S., Geoteknik Bilgisi-III, “Bina Temelleri”, İstanbul : Birsen Yayınevi, (2010).

Önalp, A., Arel, E., Geoteknik Bilgisi-II, “Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği”, İstanbul : Birsen Yayınevi, (2004).

Önalp, A., “İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi I ve II”, Trabzon : KTÜ, (1982).

Robertson, P.K. and Campanella, R.G., “Liquefaction potential of sands using the CPT”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 1, 35-50, (1985).

Robertson, P.K., Woeller, D.J. and Finn, W.D., “Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading”, *Can. Geotech, J.*, Ottawa, 29, 686–695, (1992).

Robertson, P.K. and Wride, C.B., “Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT, in Youd, T.L. and Idriss, I.M., eds., Evaluation of liquefaction resistance of soils”, Salt Lake City, UT, National Center for Earthquake Engineering and Research Technical Report 97-0022,41-87, (1997).

Sağlam, A., Zemin İyileştirme Yöntemleri, ZM11, Trabzon : Karadeniz Teknik Üniversitesi, (2011).

Seed, H. B., “Soil Liquefaction And Cyclic Mobility Evaluation For Level Ground During Earthquakes”, *Journal Of Geotechnical Engineering Division*,105, 201-255, (1979).

Seed, H. B., Idriss, I. M., “Simplified Procedure For Evaluating The Soil Liquefaction Potential”, *Journal Of The Soil Mechanics And Foundations Division*, 97, 1249-1273, (1971).

Seed, H. B., Idriss, I. M., “Ground Motions And Soil Liquefaction During Earthquakes”, Earthquake Engineering Research Institute., (1982).

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R., “Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425-1445, (1985).

Stark, T. D., and Olson, S. M., “Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121, 12, 856-869, (1995).

Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics. New York : Wiley, (1943).

Terzaghi, K., Peck, Ralph B., Soil Mechanics In Engineering Practice, New York : John Wiley And Sons, (1948).

Tunçdemir , F.,Türkiye Mühendislik Haberleri, 430-2, Ankara, Türkiye, (2004).

Toğrol, E., “Temel takviyesi yöntemlerine yeni bir bakış”, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği V. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara, III, 887- 917, (1994).

Uzuner, B.A., Temel zemin mekaniği, Trabzon : Derya kitabevi, 369-400, (2007).

Uzuner, B.A., Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği, Trabzon : Derya kitabevi, (2005).

Uzuner. B., Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, (2000).

Yıldırım, S., Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, (2002).

Welsh,P.(editor), “Soil Improvement-A Ten Year Update”, *Geotechnical Special Publication*, 12, New York, (1987).

Witt, K.J. and Smolczyk, U., *Geotechnical Engineering Handbook*, 1st edition,2, 2.3, Ernst und Sohn, Berlin, (2002).

(W1) - www.Geoconstruction.com Jet Uygulamaları

(W2) - www.trevispa.com Jet Enjeksiyonu.

(W3) - www.KellerGrundbau.com Jet Enjeksiyonu Uygulamaları.

(Y1) Baş, K., Temel Takviye Yöntemleri ve Uygulamalardan Örnekler, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).

(Y2) Çınar, H., Jet Grout Yöntemi Ve Uygulamaya Yönelik Proje Çalışmaları, *Yüksek Lisans Tezi*, ERCİYES Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, (2014).

(Y3) K  c kali, N., Demiryolu Altyapısının Jet Enjeksiyonu Yöntem İle İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T. . Fen Bilimleri Enstitüsü, İnaaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, (2008).

(R1)  nal, G., Parsele Esas Jeofizik Etüt Raporu, Farkım Mimarlık Mühendislik, 2-14, (2013).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat ÖZTURAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli / 25.07.1984
Lisans Üniversite : İstanbul Kültür Üniversitesi
Elektronik posta : murat.ozturan@gmail.com
İletişim Adresi : Kınıklı Mah. Çamlık Cad. NO:78/A Kat:2

Pamukkale / Denizli

1984 yılında Denizli’de doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Lise öğrenimini Denizli’de tamamladı. 2003 yılında İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2008 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2012 yılında Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Mühendisliği programında yüksek lisans hakkı kazandı ve halen eğitimini sürdürmektedir.