

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METRO İNŞAASINDA KULLANILAN ZEMİN
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

Erol SEMİZ

Eylül, 2009

İZMİR

**METRO İNŞAASINDA KULLANILAN ZEMİN
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı**

Erol SEMİZ

**Eylül, 2009
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EROL SEMİZ tarafından **PROF. DR. AHMET HAKAN ONUR** yönetiminde hazırlanan “**METRO İNŞAASINDA KULLANILAN ZEMİN İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR

Danışman

.....

Jüri Üyesi

.....

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Çalışmalarımı yöneten, değerli yorum ve önerilerinin yanı sıra sabrını da esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR'a teőekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin oluşturulması sürecinde yaptığım tüm çalışmalarda bana destek olan, değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan, tanıdıkları tüm imkanlarla beni daha iyisini yapmak için cesaretlendiren Sayın Hasan BAR ve Sayın Aziz YUR'a,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her konuda destek ve yardımcı olan değerli arkadaşım Araş. Gör. Mehmet Volkan ÖZDOğAN'a,

Her türlü maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan ve beni yalnız bırakmayan sevgili aileme sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Erol SEMİZ

METRO İNŞAASINDA KULLANILAN ZEMİN İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZ

Bu tez çalışmasında, zemin iyileştirmesi ve uygulanan teknikler hakkında genel bilgiler verilmiş, bir vaka analizi olarak Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında jet-grouting yöntemiyle gerçekleştirilen zemin iyileştirme işleri incelenmiştir.

Proje hakkında özet bilgiler verilmiş, inşaat sahasının jeolojisi ve zemin özellikleri tanımlanmıştır. Zemin iyileştirmesi için sunulan jet-grouting tekniği ile ilgili uygulama türü, prosedürü ve parametreleri ortaya konmuştur.

Sistemin inşası öncesi deneme kolonları oluşturulması ile parametrelerinin belirlenmesi irdelenmiş, yapım sürecinde ve sonrasında uygulanan kalite kontrol çalışmaları ile uygulama başarısı değerlendirilmiştir. Proje kapsamında kullanılan ekipmanların işleyişi anlatılmış, gerçekleştirilen imalatlar hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Zemin İyileştirme Teknikleri, Jet-Grouting, Jet-Strut

EVALUATION OF GROUND IMPROVEMENT IN METRO CONSTRUCTION

ABSTRACT

In this thesis study, ground improvement and application techniques are examined then ground improvement works that used by jet-grouting method in Construction of Karşıyaka Tunnels and Stations was studied as a case study.

The geology and rock and soil masses properties of construction site are defined. Application type, procedure and the parameters of jet-grouting system that used for ground improvement was explained.

Determination of the parameters was studied with installation of trial columns before the production. Efficiency of applications was evaluated by quality controls during and after production. The process of equipments which used in the project was given and production of the project was summarized.

Keywords: Ground Improvement Techniques, Jet-Grouting, Jet-Strut

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	3
2.1 Vibrokompaksiyon (Vibroflotasyon)	4
2.2 Kum Sıkıştırma Kazıkları (SCP)	7
2.3 Vibro – Sondalar	8
2.4 Dinamik Kompaksiyon	10
2.5 Yüzey Kompaksiyonu	11
2.6 Patlatma	12
2.7 Ek Dolgu İle Ön Yükleme	14
2.8 Vakum Uygulaması İle Ön Yükleme	15
2.9 Elektro – Osmoz	16
2.10 Jeotekstiller	17
2.11 Donatılı Zemin (Fiber Güçlendirme)	19
2.12 Taş Kolonlar	20
2.13 Derin Karıştırma	21
2.14 Kireç Kolonlar	22
2.15 Isıl İşlemler (Isıtma – Dondurma)	23
2.16 Su Düşürümü (Drenaj)	25

2.17 Zemin Değiştirme	26
2.17.1 Çimento İle Stabilizasyon	27
2.17.2 Kireç İle Stabilizasyon	28
2.17.3 Uçucu Kül İle Stabilizasyon	29
2.18 Hafif Malzemeler	29
2.19 Biyoteknik Yöntemler	31
2.20 Enjeksiyon Teknikleri	31
2.20.1 Permeasyon (Sızdırma – Emdirme) Enjeksiyonu	32
2.20.2 Kompaksiyon Enjeksiyonu	35
2.20.3 atlatma Enjeksiyonu	37
2.20.4 Jet – Grouting	38

**BÖLÜM ÜÇ – İZMİR BANLIYÖ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ
2. ETAP KARŞIYAKA VE İSTASYONLARI YAPIMI
İŞİNDE JET–GROUTING YÖNTEMİ İLE ZEMİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

3.1 Projenin Tanıtımı	50
3.2 Çalışma Sahasının Jeolojisi ve Zemin Şartları	52
3.3 Jeoteknik Analizlere Esas Zemin Profillerinin Değerlendirilmesi	55
3.4 Deneme Kolonları	60
3.5 Kalite Kontrol alışmaları	63

BÖLÜM DÖRT – JET–GROUT İMALATLARI

4.1 Kullanılan Ekipmanlar	78
4.2 İmalat Bilgileri	81

BÖLÜM BEŞ – DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR	83
KAYNAKLAR	86
EKLER	91

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Büyük kentlerin ulaşım sorununda en etkili çözüm yolu olan metro; günümüz toplu taşımacılık sistemlerinin yaygın bir türü olarak, ulaşım güvenliği, konforu ve emniyeti açısından tüm dünyada giderek artan oranda kullanılmaktadır. Aslan'ın (2009) tanımladığı, seyahat süresi, güvenlik, ekonomiklik, yapı özellikleri, sosyal ve çevresel faktörlerin ışığında belirlenen bir güzergahta, tasarlanan yapı ile artan bu ihtiyaca ve ilgiye cevap verilmeye çalışılmaktadır. Bu noktada, güzergahın belirlenmesi ile yapının oluşturulacağı zemin tayin edilmekte, inşaat safhasında ve işletim esnasında yeterli performansı sağlaması gereken inşaat yönteminin kurulması ise zemin yapısının özellikleri ile belirlenmektedir.

Eğer zemin, ortaya çıkan yükler altında çok fazla deforme olursa veya taşıma gücü yönünden yeterli değilse zayıf özellikli zemin olarak ele alınır. İnşa edilecek yapıların veya mevcut tesislerin doğal zemini proje ölçütlerini sağlayamayan zayıf zemin özelliğinde ise; tasarlanan kıstaslara ulaşabilmek için uygulanan çözüm yöntemlerinden biri zemini iyileştirmektir. Bununla birlikte, tasarım ve projenin gereksinimleri kısmen iyi zemin koşullarında da iyileştirme işleri yapılmasına yol açabilir.

Yüzeyden itibaren belirli derinliklere kadar zemin iyileştirilmesi işlemlerinde çok değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir kısmı tek zemin tipi için uygun olurken bir kısmı geniş aralıktaki zemin özelliklerinde uygulanabilmektedir.

Hemen her tür zayıf zemin tiplerinde diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm olan jet-grouting yöntemi, zemin iyileştirmesi ile beraber, yapı yüklerinin derindeki tabakalara aktarılması, temel takviyesi yapılması, sığ kazılarda şev stabilitesinin sağlanması, kazı tabanından gelen suyun önlenmesi, tünel iksaları gibi çeşitli mühendislik alanlarında çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulama öncesi gerekli malzeme miktarının tespit edilebilmesi ile maliyetinin belirlenebilmesi, yapım sırasında parametrelerinin değiştirilmesi ile

istenen oranlarda iyileştirilmiş zemin şekillerinin elde edilebilmesi jet-grouting yöntemini diğer iyileştirme yöntemlerinden ayıran özellikleridir.

Jet-grouting işlemi zeminin parçalanması ve enjeksiyon şerbeti ile karışması, kısmi yer değiştirmeyi kapsar. Yüksek basınç değerleri ile zeminin erozyonu sağlanmakta, zemin enjeksiyon şerbeti ile yer değiştirmek ve karıştırmak suretiyle farklı özellikte zemin-çimento şerbeti karışımı bir yapı elde edilmektedir. Bu yapının oluşturulması sürecinde kullanılan; basınç değeri, enjeksiyon süresi, nozul çap ve adedi, uygulanacak yöntem gibi parametrelerin doğruluğu, hazırlık ve yapım safhasındaki kontroller ile yapım sonrasında gerçekleştirilen ölçüm ve deneyler jet-grouting yöntemiyle zemin iyileştirmesinin başarısını sağlamaktadır.

BÖLÜM İKİ

ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Yapıların oturduğu zemin özelliklerinin, projelendirme çalışmalarından önce incelenerek sağlıklı bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Zemin özelliklerinin proje ölçütlerini sağlamadığı hallerde yetersiz zemin koşullarına ilişkin alternatif çözümler olarak (Venkatramaiah, 2006);

- Sorunlu parselden vazgeçilip yeni bir arazi seçilebilir,
- Daha iyi nitelikli zemin tabakalarına ulaşmak için derin temeller tasarlanabilir,
- Zayıf zemin kaldırılıp yerine daha iyi bir malzeme kontrollü olarak yerleştirilebilir,
- Zayıf zemin üzerine inşa edilecek yapı zeminden beklenen davranışa uyum sağlayabilecek biçimde tasarlanabilir,
- Yetersiz ve zayıf zeminin iyileştirilmesine gidilebilir.

Zemin iyileştirilmesine ihtiyaç olup olmadığı zayıf ve sorunlu zeminlerin tanımlanması ve özelliklerinin proje tasarım ve yapım gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmesiyle belirlenir (Ergun, Özkan, Önalp, ve Keçeli, 2005). Zemin iyileştirilmesinde temel ilke, zemin içerisindeki mevcut boşlukların mekanik araçlarla azaltılması, zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması, yer altı su seviyesinin düşürülmesi veya zeminin su içeriğinin azaltılması ya da çeşitli elemanların kullanılması ile mevcut zeminin güçlendirilmesidir (Sağlamer, 2006).

Zayıf zeminin taşıma gücünü arttırmak, toplam oturmayı azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak, dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak, istinat duvarlarını desteklemek, zeminin potansiyel sıvılaşma riskini azaltmak amaçlarıyla yapılan zemin iyileştirme yöntemleri uygulandığında zeminin (Moseley ve Kirsch, 1993);

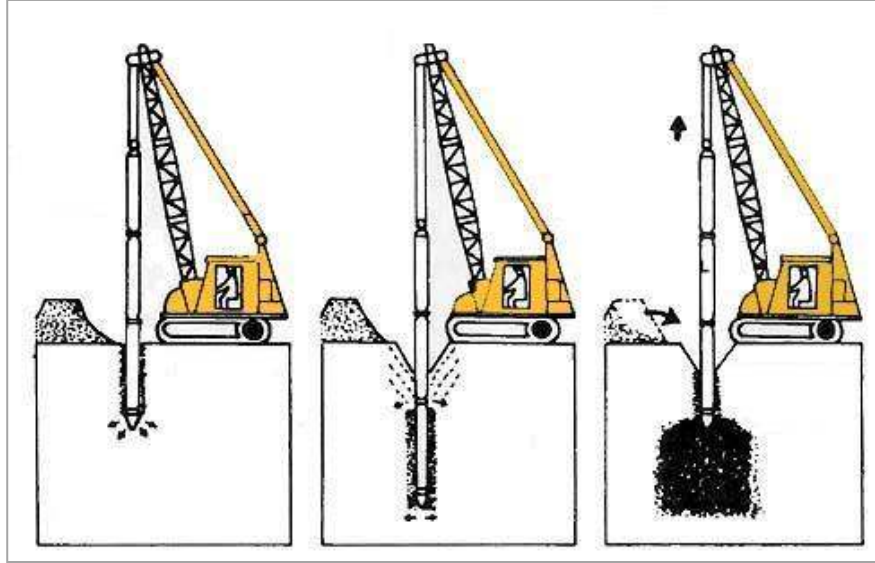
- Sıkışabilirliği azalır,
- Kayma mukavemeti artar,
- Geçirgenliği (permeabilitesi) azalır,
- Şişme ve büzülme potansiyeli düşer,
- Kumlu zeminlerin sıklığı, killi zeminlerin kıvamı iyileşir,
- Borulanmaya karşı mukavemeti artar,
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

2.1 Vibrokompaksiyon (Vibroflotasyon)

Derin granüllü zeminleri vibratörlü sondalar ile sıkıştırma işlemi olan bu yöntem vibroflotasyon olarak da isimlendirilmektedir. Vibroflotasyon ile granüler zeminlerin başlangıçtaki boşluk oranları ve sıkıştırılabilirlikleri azalırken içsel sürtünme açıları, taşıma gücü ve sıvılaşmaya karşı olan dirençleri de artmaktadır (Sondermann ve Wehr, 1993).

Vibroflot, titreşim oluşturacak sondanın tabanındaki düşey eksen üzerine kurulu olan eksantrik bir ağırlıktan oluşmaktadır. Titreşim hareketi yatay olup düşey bir eksen etrafında devirsel hareket söz konusudur. Bu sayede oluşan enerji zemine ya vibratör sondasının büyük uzunluğu boyunca ya da sadece vibratörün ucundan aktarılır. Bu enerji miktarı sondanın yerleştirildiği derinliğe bağlı olmaksızın sabittir (Sondermann ve Wehr, 1993).

Vibroflotasyon tekniği yeraltı su seviyesi altındaki çok gevşek kum malzemelerin sıkıştırılması için çok uygundur. Fakat kil bantlarının, aşırı miktarda ince daneli malzeme ve organik madde bulunması bu teknikten alınabilecek verimi önemli ölçüde düşürmektedir. Dolayısıyla granüler malzeme içerisinde ince malzeme oranı % 20'yi aşmamalı ve bunun da en fazla %3'ü aktif kil (ince daneli zeminlerin plastisite indisinin kil yüzdesine oranı zeminin aktivite katsayısı olarak tanımlanır, aktivite katsayısı 1,25'den büyük olan killer aktif kil olarak kabul edilmektedir) olmalıdır (Bell, 1993).



Şekil 2.1 Vibroflotasyon aşamaları (Bell, 1993).

Vibroflotun zemin içerisine sokulması esnasında genellikle su jeti ve basınçlı havadan yararlanılmakta dolayısıyla sondaj duvarları da bu sayede desteklenmiş olmaktadır. Granüler zeminlerin sıkıştırılması hem vibroflotun zemin içerisine sokulması hem de yavaşça yukarıya çekilmesi esnasında gerçekleşmektedir. Bu durum ise yüzeyde koni şeklinde bir çöküntüye neden olmaktadır. Bu çöküntü daha sonra granüler bir malzeme ile doldurulmalıdır (Sondermann ve Wehr, 1993).

Bu yöntemle elde edilecek sıkıştırma derecesi birkaç faktöre bağlıdır (Brown, 1977):

- Kullanılan donanımın tipi,
- Vibroflot merkezlerine ilişkin kareraj ve aralıkları,
- Vibroflotun geri çekilme yöntemi,
- Geri dolgu malzemenin yapısı ve işçilik kalitesi.

Vibroflot etrafında sıkıştırılan zeminin çapı 2,4 ile 3 m arasında değişmektedir. Genellikle üçgensel bir kareraj seçilmekte fakat vibroflot merkezleri aralıkları arazi koşullarına ve istenilen taşıma gücüne bağlı olmaktadır.



Şekil 2.2 Su jeti yardımıyla vibroflotun zemine giriş aşamaları
(<http://forum.skyscraperpage.com/showthread.php?t=107871&page=10>).

Granüler zeminlerde herhangi bir derinliğe yerleştirilen vibroflotun sağlayacağı sıkıştırmanın çoğu başlangıçtan itibaren 2 ile 5 dakika arasında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla daha yüksek bir sıkıştırma derecesi elde etmek için titreşim zamanını aşırı miktarda artırmak ekonomik görülmemektedir. Vibroflotun yukarı çekilme hızı geri dolgu malzemesinin yerleştirilmesine göre belirlenmelidir. Eğer vibroflot aşamalı olarak küçük miktarlarda yukarıya çekilirse azami yoğunluklar elde edilebilir (Sondermann ve Wehr, 1993).

Brown (1977), geri dolgu malzemesi ile ilgili (sıkıştırılacak granüler zemin ile aynı özelliğe sahip malzemeler dahil olmak üzere) bir uygunluk sayısı, S_n , tanımlamıştır:

$$S_n = 1,7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}}$$

Burada D_{50} , D_{20} ve D_{10} sırasıyla malzemenin % 50, %20 ve %10'unun küçük olduğu mm cinsinden dane çaplarıdır. Bu değer sonda etrafındaki geri dolgu malzemenin oturma hızına bağlıdır. Uygunluk sayısının 10'dan küçük olması durumunda geri dolgu malzemesi çok iyi, 50'den büyük olması durumunda ise geri dolgu malzemesinin uygun olmadığı anlamına gelir.

2.2 Kum Sıkıştırma Kazıkları (SCP)

Kum sıkıştırma kazıkları, yumuşak zeminleri iyileştirme yöntemi olarak Japonya'da geliştirilmiştir. Bu yöntem, yumuşak zemin içerisinde titreşimli bir muhafaza borusu yardımıyla kum veya benzer bir malzeme kullanarak sıkıştırılmış kum kazıkların oluşturulması şeklinde uygulanmaktadır (Aboshi, Mizuno, ve Kuwabara, 1990).

Kum sıkıştırma kazıkları yöntemine ilişkin ekipman, kum dren yerleştirme ekipmanına benzemektedir. İstenilen derinliğe ulaşıldıktan sonra daha önceden belirlenen boydaki gevşek kum kazığı donanımının mili arasından boşaltılır ve takım biraz yukarı çekilir. Daha sonra milin üstündeki bir vibratör yardımıyla mil gevşek kum kazığını sıkıştırır ve çapını artırır. Bu işlemin tekrar ettirilmesiyle sıkıştırılmış kum kazıkları oluşturulur ve ayrıca etraftaki zeminde sıkıştırılmış olur (Aboshi ve diğer., 1990).

Sıkıştırılmış kum kazıkların taş kolonlara göre üstünlükleri şunlardır (Barksdale ve Takefumi, 1991):

- Çok hızlı imalat,
- Kolon, genellikle çok daha ucuz olan kumdan oluşturulmaktadır,
- Yapım sırasında kuyu duvarı muhafaza borusu yardımıyla tamamen desteklenmekte ve dolayısıyla duvarın göçme olasılığı engellenmektedir. Ayrıca etraftaki zeminin yayılım veya erozyon yoluyla kum kazığı içersine girme olasılığı da önemli ölçüde azaltılmaktadır.

Sıkıştırılmış kum kazıkların taş kolonlara göre olumsuz yanları ise (Barksdale ve Takefumi, 1991):

- Kum kullanılmasından dolayı oluşturulan kolonun içsel sürtünme açısı ve mekanik dayanımı taş kolonlarınkinden daha düşük ve dolayısıyla da daha yüksek bir yerleştirme yüzdesi gerekmektedir,
- Bir kil tabakası içersine muhafaza borusu çakılması kolonun sınırları boyunca sıkışmaya neden olmakta ve böylelikle zeminin yatay geçirimsizliği ve kolonun da dren olarak etkinliği azalmaktadır,

- Tasarım ölçütleri göz önüne alındığında, sıkıştırılmış kum kazıkların düzgün bir şekilde tasarlanmış taş kolonlar gibi yeterli geçirimsizliğe sahip olmadıkları ve deprem esnasında düşey drenajı gereği gibi sağlayamadıkları görülmüştür.

Sıkıştırılmış kum kazıklarla zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde en önemli etmenlerden biri; kum ile değiştirilen gevşek kum veya yumuşak kil hacmidir. Değiştirilen zemin miktarını sayısal olarak belirleyebilmek için kazığın etki alanındaki zeminin toplam alanının sıkıştırılmış kum kazığın alanına bölünmesiyle elde edilen bir yer değiştirme oranı tanımlanır. Sıkıştırılmış kum kazık tasarımı standart penetrasyon direnci veya zeminin göreceli sıkılığı göz önüne alınarak gerçekleştirilir (Barksdale and Takefumi, 1991).

2.3 Vibro – Sondalar

Titreşimli borular veya sondalar, granüler zeminlerin sıkıştırılması için derinde malzeme eklenmesi yapılmaksızın, düşey vibratörler yardımıyla zemin içerisine sürülebilir. Bu işlem esnasında yüzeyde meydana gelecek çöküntü geri dolgu malzemesiyle doldurulur. Vibro-sondalar yönteminin uygulanabilmesi için kohezyonsuz zemin içerisindeki ince daneli malzeme miktarının en yüksek % 15 ila % 20 olması istenir (Raj, 2005).

Terra-Probe, Vibro-Wing ve Tri-Star veya Y-Probe, bu yöntemde kullanılan birkaç değişik patentli sondalardan bazılarıdır. Terra-Probe’da 760 mm çapındaki geniş, açık uçlu bir boru titreşimli kazık çakma makinesiyle gevşek granüler zemin içerisine çakılır. Boru tasarım derinliğinden 3-5 m daha uzundur. Zeminin sıkıştırılması borunun hem içinde hem de dışında gerçekleşmektedir. Oluşturulan titreşim genellikle düşey yönde olup vibratörün frekansı ayarlanabilmektedir. Genellikle frekans 15 Hz civarındadır. Bir saat içerisinde 1-3 m aralıklarla yaklaşık 15 sonda zemin içerisine çakılabilmektedir. Bu teknik vibroflotasyonda olduğu gibi sonda etrafına geri dolgu malzemenin yerleştirilmesini gerektirmemektedir. Fakat orijinal yüzey kotunu muhafaza etmek için bir miktar geri dolgu malzemesi eklenir (Raj, 2005).

Japon tipi vibro-sonda sistemi, üzerinde kısa nervürleri olan çelik çubuklardan oluşmaktadır. Yıldız şeklindeki Franki Y-Probe, 120 derecelik açılarla birbirlerine

kaynaklanmış 0,5 m genişliğinde çelik kanatlardan oluşur. Sonda ile zemin arasındaki sürtünmeyi artırmak amacıyla plakalar üzerinde kısa yatay nervürler oluşturulmuştur. Sonda uzunluğu 25 m boyunda kadar olabilmektedir (Massarsch, 1991).

İsveç Vibro-Wing sisteminde, 0,5 m aralıklarla yerleştirilmiş yaklaşık 0,8 m uzunluğunda kanatları bulunan, 15 m uzunluğunda bir çelik çubuk kullanılmaktadır. Sondanın zemin içerisine sürülme hızının yavaşlamasını önlemek üzere sürtünme direncini azaltmak için su jeti kullanılabilir. Sonda aynı zamanda sıkıştırma işlemi sonucunda oluşabilecek aşırı boşluk suyu basınçlarının sönmülenebilmesini kolaylaştırmak için drenaj tüpleriyle de teçhiz edilebilir. Bu teknikte sıkıştırma verimliliğini etkileyen en önemli faktörler; sıkıştırma noktaları aralıkları, her noktadaki sıkıştırma süresi ve sondanın kullanımına ilişkin özellikler (zemin içerisine sokulması, tutulması, geri çekilmesi) olarak sayılabilir. Bununla beraber zeminin başlangıçtaki izafi sıkılığı, sıkıştırılması gereken zeminin derinliği ve istenilen sıkıştırma derecesi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bir kum tabakası içerisindeki çok ince silt ve kil bantları bile sıkıştırma işlemini olumsuz olarak etkileyebilmektedir (Massarsch, 1991).

Sondanın zemin içerisine sürülmesi esnasında meydana gelen deplasmanlar da önemli ölçüde zeminin sıkıştırılmasına katkıda bulunmakta ve hem düşey hem de yatay gerilmeler artmaktadır. Sondanın farklı derinliklere sokulma sayısı ve ilerleme miktarı da önemlidir. Genellikle sonda tasarım derinliğinin sonuna kadar sürülmekte ve aşama aşama geri çekilmektedir. Bu işlem istenilen sıkışma derecesi sağlanana kadar tekrar ettirilir. Sıkıştırma noktaları arasındaki en uygun aralık, sondanın şekline ve ebatlarına bağlıdır. Daha dar bir karelaj aralığı ile daha kısa sıkıştırma süresi genellikle tercih edilir. Bu tip bir seçim daha homojen bir zemin sıkıştırması sağlayabilmektedir (Massarsch, 1991).

Yöntemin başarısını belirleyen önemli bir etmen de sıkıştırma işleminin hangi sırada yapıldığıdır. Sıkıştırma işlemini, ilki daha geniş bir karelaj aralığında olmak üzere iki geçişte yapmak daha yararlıdır. Karelaj aralığının daha geniş olması durumunda sondanın zemin içerisine sokulması daha kolay olmaktadır. İlk sıkıştırma işleminden sonra ikinci geçişe başlamadan önce zemine tekrar konsolide olabilmesi

için zaman tanınmalıdır. Uygulamalardan elde edilen sonuçlara göre; ilk geçişte sıkıştırılmış zemin, sondayı daha gevşek zeminlere yönlendirmekte ve ikinci geçiş esnasında sıkıştırma süresi daha kısa zaman aralıklarında gerçekleşmektedir (Massarsch, 1991).

2.4 Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon işlemi, ağır bir yükün tekrarlı olarak değişik yüksekliklerden zemin üzerine düşürülmesinden oluşmaktadır. Yüklerin ağırlıkları genellikle 5 ton ile 27 ton ve düşüş yükseklikleri ise 12 m ile 30 m arasında değişmektedir. Darbe sonucu oluşan enerji genellikle tüm alan üzerindeki kareyaj üzerine aşamalı olarak tek veya birden çok geçişli olarak uygulanmaktadır. Her geçişten sonra oluşan kraterler yeni geçişe başlamadan önce granüler bir dolgu malzemesiyle düzeltilir (Lukas, 1995).

Bu yöntem ile elde edilen iyileştirme derecesi, uygulanan enerjiye yani tokmağın ağırlığına, düşüş yüksekliğine, kareyaj aralıklarına ve her noktadaki düşüş sayısına bağlıdır. Hafif tokmakların alçak yüksekliklerden düşürülmesi ile 3,0 m ile 4,6 m arasında bir iyileştirme derinliği elde edilir. Daha ağır tokmakların daha yükseklerden düşürülmesiyle elden edilen iyileştirme derinliği ise 6,1 m ile 9,1 m arasında değişmektedir (Lukas, 1995).



Şekil 2.3 Dinamik kompaksiyon aşamaları (<http://keller-ge.co.uk/images/cms/DynamicCompB.jpg>, <http://kshitiya.files.wordpress.com/2006/09/dynamiccomp.jpg>, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/how/haywardpic/deepcompac.jpg>).

Dinamik kompaksiyon yöntemi granüler ve dolgulu zeminlerde uygulanır. Gevşek, suya doymuş, kohezyonsuz zeminlerde düşen ağırlığın etkisiyle zemin

sıvılaşarak zemin partikülleri birbirlerine daha yakın ve daha yoğun şekil alırlar. En büyük iyileşme, efektif derinliğin 2/3'lük kısmında elde edilir (Lukas, 1995).

İnşa edilecek yapı yüklerinden dolayı gerilme artışlarına maruz kalacak zeminlerin de sıkıştırılması amacıyla dinamik kompaksiyon işlemi genellikle dolgu veya yükleme yapılacak alandan daha geniş bir planda gerçekleştirilir (Lukas, 1995).

Dinamik kompaksiyon işlemi sonunda, etkinliğinin doğru olarak belirlenebilmesi için yapılabilecek kalite kontrol amaçlı test teknikleri; Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Konik Penetrasyon Deneyi (CPT), Pressiyometre Deneyi (PMT) ve Dilatometre Deneyi (DMT)'dir (Lukas, 1995).

2.5 Yüzey Kompaksiyonu

Kompaksiyonun amacı zemin boşluklarındaki havanın dışarı atılması ile zemin parçacıklarının birbirlerine yaklaşmasını sağlamak ve birim hacim ağırlıklarının artırılması sonucu zeminin faydalı özelliklerinin iyileştirilmesidir. Statik, vibrasyonlu ve darbeli aletlerle zeminin mekanik olarak sıkıştırılması, zemin boşluklarındaki havanın atılması ve dolayısıyla zeminin kayma mukavemetinin ve borulanmaya karşı direncinin artırılması, geçirimsizliğinin ve sıkışabilirliğinin azaltılması ve sıvılaşma riskinin düşürülmesi sağlanır (Raj, 2005).

Yüzey kompaksiyonu silindirler yardımıyla yapılır ve genel olarak kullanılan silindir tipleri aşağıda sıralanmıştır (Raj, 2005):

- Dolu gövdeli silindirler (sıkıştırma enerjisi 300 ile 400 kN/m² arasında),
- Pnömatik silindirler (sıkıştırma enerjisi 600 ile 700 kN/m² arasında),
- Keçi ayaklı silindirler (sıkıştırma enerjisi 1500 ile 7500 kN/m² arasında),
- Vibratörler.

Genellikle ıslak kil dışındaki tüm zeminler ve üniform kumlarda düz tekerlekli, ıslak kohezyonlu zeminlerde keçi ayağı silindirler, küçük çaplı işlerde ise ağırlık düşürmeli veya dövmeli tokmaklar kullanılmakta olup, daneli zeminlerde ise daha ziyade vibrasyonlu silindirler tercih edilmektedir (Raj, 2005).



Şekil 2.4 Dolu gövdeli silindir, vibratör ve keçi ayaklı silindire birer örnek
 (http://www.hewden.co.uk/_images/cache/pid_026-001.400.400.scale.jpg,
<http://www.albatooltrading.com>, <http://www.apolloequipment.net/categories/compactors.htm>).

Yüzey kompaksiyonu; kompaksiyon aletinin tipi, zemin cinsi (dane çapı dağılımı), su muhtevası, tabaka kalınlığı, pas sayısı ve kompaksiyon aletinin geçiş hızına bağlıdır (Raj, 2005).

Sıkıştırma sonucu zeminde meydana gelen yoğunluk artışı, belli bir miktardan sonra (yaklaşık 15 pas) azalır ve belli bir pas sayısından sonra zeminin yoğunluğunda değişim olmaz. Sıkışma miktarı aynı zamanda belli bir derinliğe kadar artar (yaklaşık 0,5m fakat deneyle bulunması uygundur) ve bu derinliğin altında zemin sıkışmadığı gibi gevşer. Bunun sebebi de zemin yüzüne yakın yerlerde çevreleyen gerilmenin az olmasıdır (Raj, 2005).

2.6 Patlatma

Suya doymuş, gevşek, kohezyonsuz zeminlerin dinamik olarak sıkıştırılma yollarından biri de patlayıcı maddelerin infilak ettirilmesi ile uzunlamasına ve kayma dalgalarının oluşturulmasıdır. Bu yöntem ile bağlayıcı ve yapışkanlık özelliği az olan zemin bileşenleri patlatma etkisi ile yer değiştirerek ve daha küçük parçalara ayrılarak çıkan tozun da etkisi ile sıkışmaya uygun bir yapıya dönüştürülmektedir (Court ve Mitchell, 1994).

Uygulama işleminde ilk olarak bentonit süspansiyonu veya bir muhafaza borusu yardımıyla gevşek, suya doymuş zeminde, tasarım derinliğine kadar ulaşılır. Daha sonra patlayıcı malzeme yerleştirilip delgi kuyusu kapatılır. Dikkatlice seçilmiş sıra

ile ve önceden belirlenmiş aralıklarla patlayıcı maddeler infilak ettirilir (Court ve Mitchell, 1994).

Suya doymuş, gevşek granüler zeminlerde oluşturulan ani darbe ve titreşimler kendiliğinden bölgesel sıvılaşmaya neden olmakta ve zemin taneleri yeniden düzenlenmektedir. Yük geçici olarak boşluk suyuna aktarılmakta ve zemin taneciklerinin yönelimi daha sıkı olacak bir şekilde değişmektedir. Şok dalgaların düzgün bir şekilde dağılımı için suya doymuşluk koşulu büyük önem arz etmektedir. Aksi takdirde zemin patlatma ile homojen bir şekilde sıkıştırılmış olmayabilir. Zemin içerisindeki boşlukların azalması büyük hacimlerde suyun sıkışmasını sağlarken, bu boşlukların azalma miktarı uygulama derinliği, başlangıçtaki boşluk oranı ve istenilen sıkışma derecesine bağlıdır (Court ve Mitchell, 1994).



Şekil 2.5 Patlatma ile zemin iyileştirme yöntemine ait bir örnek (<http://www.pacificblasting.com>).

Patlatma yöntemiyle sıkıştırma işleminin sınırsız bir etki derinliği olup en çok izafi sıklığı (D_r) % 50 ila % 60'dan düşük olan temiz kumlar ve siltli kumlar için uygundur. Herhangi bir tabaka kalınlığı için belli bir alan, her biri belli bir saat veya gün aralıklarla patlatılan 2 veya 3 seri patlayıcı malzeme ile iyileştirilir. Kullanılan patlayıcı malzeme miktarına ve zemin ve arazi özelliklerine bağlı olarak % 2 ile % 10 arasında bir yüzey oturması beklenebilir. Nihai tasarım için genellikle bir arazi deneyi gerçekleştirilmektedir (Court ve Mitchell, 1994).

Tipik bir patlatma programı 2 ile 15 kilogram arasında değişen patlayıcı malzemelerin 3 m ile 15 m aralıklarla yerleştirilmesini içerir. Toplam kullanılan patlayıcı malzeme miktarı genellikle 40 g/m^3 ile 80 g/m^3 'dür. 10 m'den daha az kalınlığı olan zemin tabakaları için patlayıcı malzemeler genellikle iyileştirilecek tabaka kalınlığının üçte ikisi kadar bir derinliğe yerleştirilir. Eğer tabaka kalınlığı 10 m'den daha fazlaysa tabaka alt tabakalara bölünüp her biri ayrı olarak ele alınır. Her alt tabakadaki patlayıcılar üstten alta veya alttan üste doğru fitillenir (Court ve Mitchell, 1994).

Patlatma yöntemiyle elde edilecek sıkıştırma miktarını etkileyen etmenlerden biri kullanılacak patlayıcının miktarıdır ve kullanılan patlayıcı miktarına bağlı olarak yüzeyde krater oluşmasını engellemek için patlayıcıyı daha derinlere yerleştirmek gerekir. Diğer bir etmen; patlayıcının kuyu içerisine yerleştirilme şeklidir. Patlayıcı ya tek bir noktaya yerleştirilebilir ya da birkaç farklı noktaya dağıtılabilir. Patlatma tekniğinin verimliliğini etkileyen en önemli etmen ise kareyaj içerisindeki patlayıcıların patlatılma sırasıdır. Polonya uygulamasında patlatmaya kareyajın kenarlarından başlayıp içeriye doğru ilerlemek daha avantajlıdır. Rus tecrübesine göre ise patlatmalar arasındaki gecikme çok kısa olmamalıdır. Patlatma tekniği yardımıyla gevşek kum zeminlerin izafi sıkılıkları, eğer zeminin ilk sıkılığı yeteri kadar düşükse ($D_r < \% 50$), en az ortalama $\% 15$ ile $\% 30$ arasında artırılabilir. Orta sıkılıktaki zeminlerde ise gözle görülür bir iyileştirme elde etmek genellikle çok zordur (Court ve Mitchell, 1994).

2.7 Ek Dolgu İle Ön Yükleme

Ek dolgu ile ön yükleme, konsolidasyon oturmalarının tamamlanması için gereken sürenin kabul edilemez derecede uzun veya çok kalın homojen kil tabakalarının mevcut olduğu durumlarda söz konusudur (Rowe, 2001).

Temel kural zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde ek dolgunun uygulanmasıdır. Böyle bir yükün uygulanması gereken durumlarda yükleme hızı, oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlemesini sağlayacak şekilde belirlenir ya da dolgunun hemen altında jeotekstiller kullanılmaktadır (Rowe, 2001).

Konsolidasyonu hızlandırmanın en etkili yolu, ön yüklemeden dolayı oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının hem düşey hem de yatay yönde sönümlenmesini sağlamaktır. Düşey ve yatay yöndeki geçirimsizlik katsayıları büyük değişiklikler göstermektedir. Birçok durumda kilin yapısına bağlı olarak yatay geçirimsizliğin düşey geçirimsizlikten yüksek olduğu görülmüştür. Belli aralıklarla kil içerisine yerleştirilen yüksek geçirimsiz düşey kolonlar yeraltı suyunun yatay olarak hızlı bir şekilde drene olmasını sağlamakta, bu esnada aynı zamanda düşey drenaj da devam etmektedir. Sonuç itibarıyla sistem doğal durumdan çok daha hızlı bir şekilde konsolide olmaktadır (Rowe, 2001).

2.8 Vakum Uygulaması İle Ön Yükleme

Vakum uygulaması ile konsolidasyon suya doygun yumuşak killerin ön dolgu ile yüklenerek göçmesine yol açmaksızın iyileştirilmesini sağlayan etkili bir yöntemdir. Zeminin etrafı hava geçirmez bir membranla kaplanır ve bir çift Venturi vakum pompası kullanılarak membran altında vakum oluşturulur. Bu yöntem ile 4,5 m yüksekliğinde normal bir ek dolgunun sağlayacağı eşdeğer bir ön yükleme gerçekleştirilebilir (Terashi ve Juran, 2000).

Vakum uygulaması ile konsolidasyon, normal mekanik ön yüklemeye olduğu gibi toplam gerilmeleri artırarak zemin kütleindeki etkin gerilmeleri artırmak yerine, toplam gerilmeyi sabit tutup boşluk suyu basıncını azaltma yoluyla sağlanmaktadır (Terashi ve Juran, 2000).

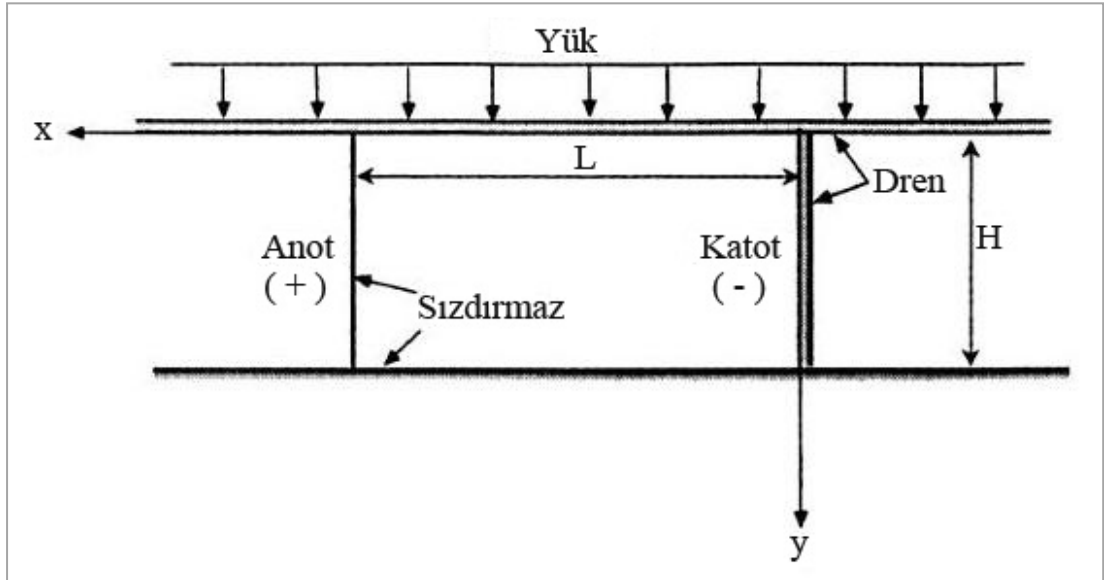
Bu yöntem ek dolgu malzemesiyle birlikte uygulandığında verimlilik artırılabilir. Saha tecrübeleri normal ek dolgu ile konsolidasyona oranla bu tekniğin büyük bir ekonomi ve zaman kazandırdığını göstermektedir (Terashi ve Juran, 2000).

Vakum uygulaması ile konsolidasyon ilk olarak 1950'lerde düşey fitil drenlerin geliştiricisi Kjellman tarafından önerilmiştir. Fakat toprak kayması duraylılığı gibi özel uygulamalar hariç vakum uygulaması ile konsolidasyon, normal ek dolgu yöntemiyle konsolidasyonda ek dolgunun yerleştirilme ve kaldırılma maliyetinin düşük olması ve vakumun uygulanmasında karşılaşılan zorluklar nedeniyle ciddi bir şekilde araştırılmamıştır. Fakat ek dolgu yerleştirme ve kaldırma maliyetlerinin doğrudan ve dolaylı olarak giderek artması ve katı atık sahalarında gaz çekim

sistemlerine ilişkin geçirimsiz membranların geliştirilmesi bu tekniğin ekonomik olarak daha uygun hale gelmesini sağlamıştır (Terashi ve Juran, 2000).

2.9 Elektro – Osmoz

Elektro-osmoz ince taneli zeminlerde katot ve anot kullanılarak elektriksel alan oluşturma sonucu su akışının ve hareketinin sağlandığı bir işlemdir. Eğer suya doygun, killi bir zemine doğru akım (DC) elektrik enerjisi uygulanırsa, katyonlar katoda ve anyonlar da anota çekilecektir. Katyonlar ve anyonlar hareket ederken kendi hidrasyon sularını ve viskoz sürtünmeden kaynaklanacak ek suları taşırlar. Net negatif yük dolayısıyla hareketli katyonlar anyonlardan daha çok olup killi zemin içerisindeki net boşluk suyu akımı katoda doğru olacaktır. Eğer katot bir nokta kuyu ise, katotta toplanan su çekilebilir ve elektrotlar arasındaki zemin de konsolide olur. Konsolidasyon anotta en fazla, katotta ise en azdır. Katotun kendisinde ise hiç konsolidasyon olmayacaktır. Elektro-osmoz işlemi daha düşük bir su muhtevası ve sıkışabilirlik, daha yüksek bir dayanım sağlamaktadır. Doğru akım elektrik enerjisinin suya doygun bir kile uygulanmasıyla iyon ve mineral değişime yol açan elektrokimyasal bir sertleşmeden dolayı dayanımda ek bir artış, plastisitede de bir düşüş gerçekleşebilir (Rittirong ve Shang, 2005).



Şekil 2.6 Elektro-osmoz ile konsolidasyonun şematik gösterimi (Rittirong ve Shang, 2005).

2.10 Jeotekstiller

Jeosentetik donatı olarak da isimlendirilen jeotekstiller oldukça ince ve esnek polimer malzemelerdir. Son yıllarda, farklı mekanik özelliklerde çok sayıda yeni malzemenin geliştirilmesiyle, jeotekstillerin kullanımında olağanüstü bir artış olmuştur. Geleneksel yöntemlerin yerine çok çeşitli işlerde kullanılabilen bu malzemeler zemine doğal olarak sahip olmadığı yeni özellikler kazandırıp mühendislik parametrelerini geliştirmekte, doğrudan ve dolaylı üstünlükler sağlamakta, muhtelif geri kazanımlara neden olmakta ve inşaat maliyetlerini düşürmektedir (Yılmaz ve Eskişar, 2007).

Jeoteknik mühendisliğinde genelde poliamid (nylon), polipropilen, poliester, polietilen ve polivinilklorid (PVC) malzemelerden oluşan jeotekstil çeşitleri olarak; örgülü jeotekstiller (ısı ile yapıştırılmış elyaftan, mekanik yapıştırılmış, kimyasal yapıştırılmış), örgüsüz jeotekstiller, ağlar ve üç boyutlu matlar sayılabilir (Yılmaz ve Eskişar, 2007).



Şekil 2.7 Jeotekstil malzeme ile bir park alanı zemin iyileştirme çalışması
(http://www.baumpub.com/cep/industry/35/layfield_group_limited.html).

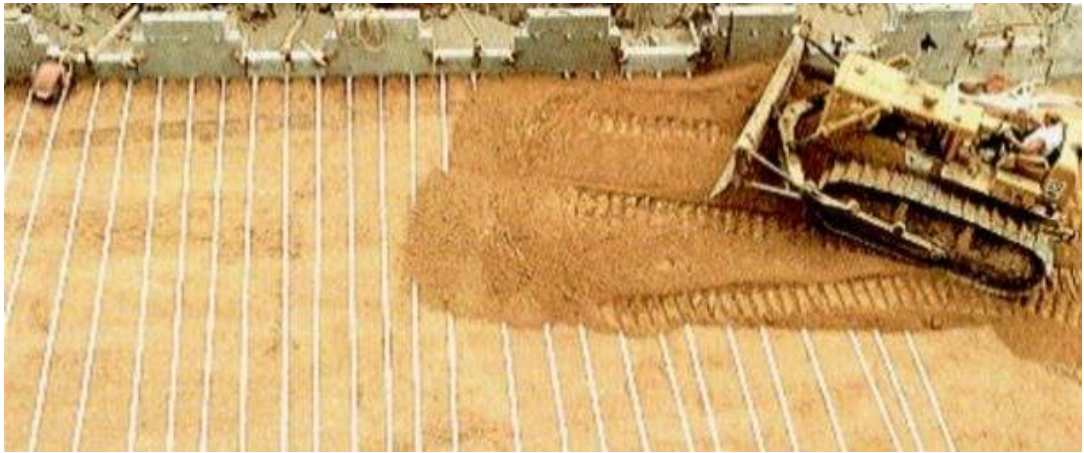
Jeotekstiller bir dizi fonksiyon yerine getirirler (Yılmaz ve Eskişar, 2007);

- Ayırma: Jeotekstiller; süreklilik, esneklik, geçirgenlik ve yüksek çekme dayanımı özelliklerinin sonucu olarak suyun doğal dolaşımına engel olmadan değişik jeoteknik özelliklere sahip iki zemini birbirinden ayırır.
- Filtrasyon: Jeotekstil, bir filtre gibi davranarak, suyun geçişine izin verir ama buna karşın belirlenmiş en küçük dane çaplı zemini tutar ve sürüklenmesine izin vermez. Su akışına engel olmamak ve boşluk suyu basıncı oluşumunu önlemek için jeotekstilin geçirgenliği en az zeminin geçirgenliği kadar olmalıdır.
- Drenaj: Jeotekstil, kendi düzlemi boyunca (bünyesindeki) sıvı veya gazı istenilen çıkışa doğru taşır. Jeotekstiller zemine nazaran, çok geçirgendir. Özellikle gözenekli olduklarında ve yeterli eğim sağlandığında, kendi düzlemlerinde su akımı sağlanabilir. Drenaj amacı ile kullanılacak jeotekstiller, kendi düzleminde yüksek geçirgenlik, basınca karşı yüksek dayanım ve iyi filtre özelliklerine sahip olmalıdır.
- Güçlendirme: Noktasal yüklerin eşit olarak geniş bir alana yayılması ve oluşan gerilme kuvvetlerine direnerek, zemin kütlelerini güçlendirmesidir. Zeminlerin aksine, jeotekstiller çekme direncine sahiptir. Çekme direncini ve kopmadan önce deformasyon kabiliyetini arttırarak, zeminin güçlendirilmesini sağlarlar.
- Koruma: Jeotekstil, deformasyonu ve gerilmeyi azaltarak ya da yayarak istenilen malzemeyi korur. İki malzeme arasına yerleştirilen jeotekstil (örneğin asfalt kaplama ile eski yol kaplaması arasına veya jeomembran ile agrega arasına) malzemelerden birini korur (asfalt kaplama veya jeomembran).
- Yalıtım: Jeotekstil, geçirimsiz bir tabaka oluşturmak için bitüm veya plastik yalıtım malzemeleriyle doygun hale getirilir ve böylelikle bir çeşit membran görevi görür. Özellikle yeni kaplama yapılacak eski kaplamalı yolların üzerine serilir. Jeotekstilin, yeterli miktarda bitümü tutma özelliği olması gerekir.

Bazı uygulamalarda tek bir fonksiyon hakim olabilir. Ancak, çoğu jeotekstil uygulamasında amaç birden fazla fonksiyonun bir kombinasyonu şeklindedir.

2.11 Donatılı Zemin (Fiber Güçlendirme)

Bu yöntemde zemin malzemesi galvanizli çelik veya plastik jeogridlerden oluşan elemanlarla güçlendirilir. Özellikle granüler zemin çekme dayanımında çok zayıf olduğundan, eğer şerit elemanlar zemin içerisine yerleştirilirse zemindeki çekme kuvvetleri bu şerit elemanlara iletilebilir. Oluşan bu kompozit yapı güçlendirici elemanların çalıştığı yönde bir çekme dayanımına sahip olmaktadır. Güçlendirmenin verimliliği, yerleştirilen malzemenin çekme dayanımı ve etrafındaki zemin ile oluşturacağı bağ kuvvetiyle ilgilidir. Zeminin hem kayma dayanımı hem de güçlendirici elemanlarla oluşturacağı bağ, sürtünmeye bağlı olup normal efektif gerilme dağılımıyla doğrudan ilgilidir. Dolayısıyla güçlendirici elemanların mevcudiyeti granüler zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Oluşan kompozit yapının verimliliğini; yapıdan kaynaklanan yüklemenin şekli, geometrisi ve tipi, kullanılan güçlendirici malzemenin tipi ve drenaj koşulları etkilemektedir (Ergun ve diğer., 2005).



Şekil 2.8 Polimer şeritli donatılı duvar (<http://www.recoireland.ie/prodTCdesign.htm>).

Güçlendirici elemanlar yeterli çekme dayanımına sahip herhangi bir malzemedен, kayma ve zeminden sökülme şeklindeki göçmeleri engelleyecek şekilde yeterli sürtünme yüzeyi sağlayabilecek herhangi bir ebatta ve şekilde oluşturulabilir. Ayrıca paslanmaya ve işlerliğini olumsuz etkileyecek diğer faktörlere karşı da dirençli olmalıdır. Güçlendirici elemanlar olarak genellikle çelik veya alüminyum şeritler,

çelik hasırlar veya kablolar, fiber-camla güçlendirilmiş plastik veya polimerik jeosentetik malzemeler kullanılmıştır (Ergun ve diğer., 2005).

Fiber güçlendirme genellikle ulaşım uygulamalarından dolgu, istinat duvarları veya köprü destek ve ayaklarının yapımında, temel döşemelerinde, dalga kırın ve sel önleme yapıları gibi hidrolik yapılarda ve göçmüş şevlerin iyileştirilme ve eski hallerine döndürülmesinde kullanılmaktadır (Ergun ve diğer., 2005).

2.12 Taş Kolonlar

Taş kolonlar, vibrokompaksiyona benzer yöntemle imal edilirler. Farklı olarak çakıl geri dolgu kullanılır ve genellikle temiz kumlardan çok, az kohezif zeminlerde veya siltli kumlarda tercih edilirler (U.S. Army Corps of Engineers, 1999).

Kuru yöntemde, vibratörle silindir bir çukur açılır ve aşağıdan yukarıya çakıl veya kırma taş ile doldurulur. Sıkıştırma vibrasyonla ve vibratörün bir kerede geri çekilmesi ve sürülmesi sırasındaki deplasmanla sağlanır. Taş kolonlar, zemin koşullarına, kullanılan donanım ve imalat yöntemine bağlı olmak kaydıyla genellikle 1 m çapında ve kare veya üçgen kareyaj sisteminde uygulanırlar. Ancak sömelleri veya duvarları desteklemek için küme veya dizi biçiminde de uygulanabilir (USACE, 1999).



Şekil 2.9 Taş kolon imalatlarında sırasıyla; borunun sürülmesi, çakılın doldurulması ve borunun geri çekilmesi (Nalçakan, 2004).

Taş kolonlar ile temel uygulamalarında, derinlikle beraber gerilme dağılımı da düşünülerek üst yapının kaplayacağı alandan daha geniş bir alanda uygulama

geniştirilmelidir. Ayrıca, üst yapıdan gelen gerilmeleri dağıtmak amacıyla uygulama alanının üzerine 0,3 m veya daha kalın bir kum veya çakıl drenaj örtüsü yerleştirilmesi önerilir (USACE, 1999).

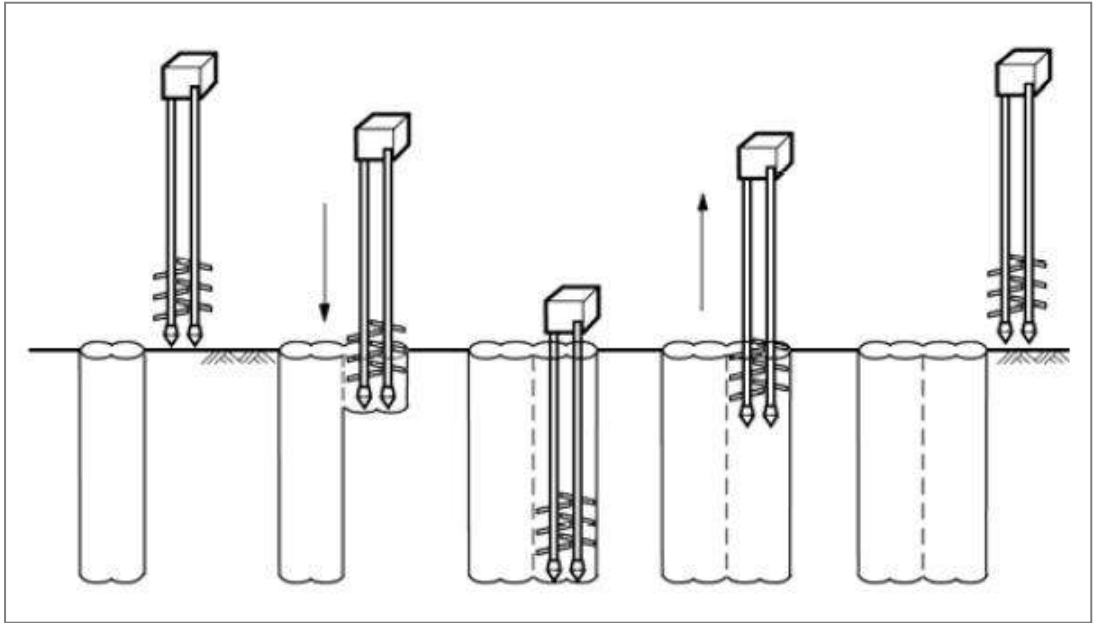
2.13 Derin Karıştırma

Derin karıştırma yönteminde zemine iyileştirme derinliğinde katkılar enjekte edilir ve bunlar kolonlar veya iyileştirilmiş malzeme panelleri oluşturacak şekilde büyük çaplı, tek veya çok eksenli burgular yardımıyla iyice karıştırılır (USACE, 1999).

İyileştirme, zeminin dayanımını artırıp, sıkışabilirliğini ve geçirimliliğini düşürerek zeminin mühendislik özelliklerini geliştirmektedir. Çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireç, çeşitli katkılar veya bunların birleşimleri bağlayıcı madde olarak kullanılmaktadır (USACE, 1999).

Derin karıştırmanın imalat süreci üç safhaya ayrılabilir (Larsson, 2003):

- Karıştırıcının gerekli derinliğe kadar girmesi,
- Bağlayıcının dağılımı,
- Moleküler difüzyon.



Şekil 2.10 Derin karıştırma imalat aşamaları (Larsson, 2003).

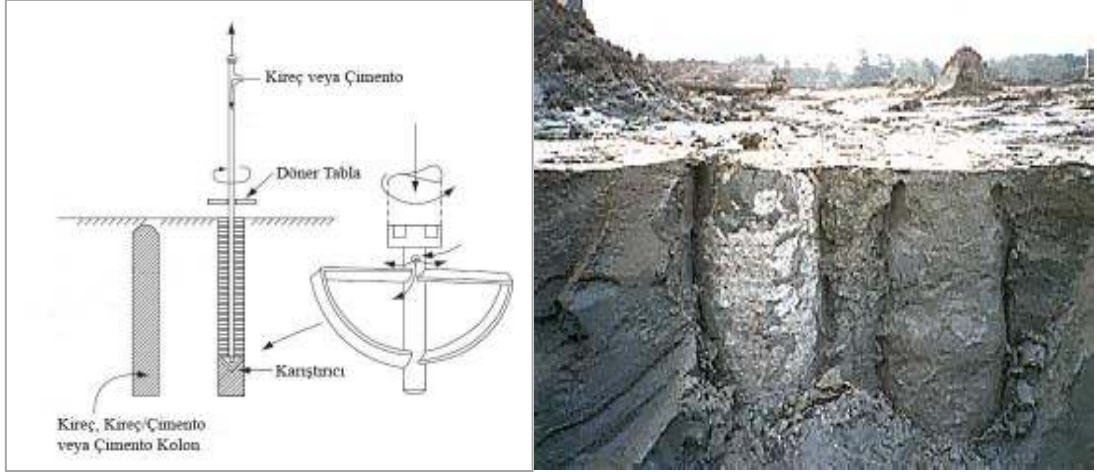
İçi boş auger borusu istenilen derinliğe indirildikten sonra boru içinden bağlayıcı madde pompalanarak boru ucundaki paletler yardımıyla zemin ile karıştırılır. Karıştırma enerjisi (geri çekme ve dönme hızı) ve çimento oranı ayarlanarak iyileştirilen zeminin özellikleri belirlenir. Karıştırma işleminin amacı, bağlayıcıyı zemin içerisinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için en uygun ortamı hazırlayacak şekilde dağıtmaktır. Eğer bağlayıcının tümü zeminin iyileştirilmesine aktif olarak katkıda bulunacaksa, bağlayıcı taneleri kolonun hacmi içerisinde düzgün bir şekilde dağılmış olmalıdır. Buna ek olarak bağlayıcı, kolon kesitinde, dayanım ve deformasyon özelliklerinin değişimini sınırlamak üzere düzgün dağılmalıdır (Sağlamer, 2006).



Şekil 2.11 Derin karıştırmada kullanılan delici makineye ve oluşan kolonlara ait birer örnek (Sağlamer, 2006).

2.14 Kireç Kolonlar

Kireç kolonlar, çimento yerine kirecin kullanıldığı veya çimento ile kirecin beraber kullanıldığı bir çeşit derin zemin karıştırma yöntemidir. Kireç kolonlar derin yumuşak kil tabakalarının stabilizasyonunda çok etkilidir. Kireç ile kil mineralleri arasında, dayanımda önemli bir artış ve yerel malzemenin plastisitesinde azalmaya neden olan bir puzolanik reaksiyonu oluşur. Kirecin hidrasyonu sonucu ortaya çıkan ısı ile killi zeminlerin su muhtevası düşer ve bu da konsolidasyonun hızlanmasına ve dayanım kazanılmasına yol açar. Kireç kolonlar yük desteğinde, doğal ve yarma şevlerin stabilizasyonunda ve kazı destek sistemi olarak kullanılabilir (Ergun ve diğer., 2005).



Şekil 2.12 Kireç kolon yapımı ve oluşturulan kolonlara ait bir örnek (Moseley ve Kirsch, 1993).

Kireç kolonlarda stabilizasyonun fizibilitesi ve puzolanik reaksiyonu tetikleyecek kireç miktarı, iyileştirilecek zemin tipine bağlıdır. Genel olarak, kireç stabilizasyonu kohezif zeminlere (hem organik hem de inorganik) uygulanır. Düşük-orta plastisiteli inorganik zeminler için, kullanılan kireç miktarı, stabilize edilen zeminin kuru birim ağırlığının % 6 ile 8 i arasındadır (Ergun ve diğer., 2005).

Yüksek plastisiteli zeminlerde, daha fazla kireç ilave edilir. Organik zeminlerin iyileştirilmesinde kirecin % 2-3'ü organik maddenin asitliğini nötrlemek için kullanılırken, geri kalan kireç (toplam %10-12) puzolanik reaksiyonu tetiklemek için kullanılmaktadır (Ergun ve diğer., 2005).

Yüksek su muhtevalı organik zeminlerin stabilizasyonunda, sönmemiş kireç ile alçı da karıştırılır. Düşük-reaktif killerde, zemin-kireç arasındaki puzolanik reaksiyonu sağlamak için uçucu kül veya fırın curufu eklenebilir. Yüksek dayanım gerektiğinde eşit oranlı kireç-çimento karışımları kullanılmaktadır (Ergun ve diğer., 2005).

2.15 Isıl İşlemler (Isıtma-Dondurma)

Isıtma ya da camlaştırma işlemi zemin bileşenlerini kristal ya da cam ürünler haline getirir. Bu işlemde zemini ısıtmak ve zeminin fiziksel karakteristiğini modifiye etmek için elektrik kullanılır. Normal hava sıcaklığında bile ince daneli malzemelerin özellikleri desikasyon (kuruma) yoluyla iyileşmektedir. Bu çoğu kez ıslah edilmiş çamur yüzeyinde kuru kabuk olarak görülmektedir. Islah işlemi çok

yavaş olduğunda desikasyona uğramış tabaka kalınlığı birkaç metreyi bulmaktadır. Zeminin suni olarak ısıtılması ise çok daha verimli olup niteliğine göre uygulanacak sıcaklık 300 ile 1000 °C arasında değişmektedir (Terashi ve Juran, 2000).

Son zamanlarda zemin ısıtma tekniği kirlenmiş zeminlerin temizlenmesinde kullanılmaktadır. Zeminin orta sıcaklıklarda ısıtılması uçucu organik bileşiklerin buharlaşmasına yardımcı olmaktadır. Zemin buhar çıkarımı verimliliği, enjeksiyon kuyuları yardımıyla kirlenmiş zemin içerisine sıcak hava veya buhar enjekte edilmesi yoluyla artırılabilir. Zeminin aşırı yüksek sıcaklıklara ısıtılması elektrik akımının kullanıldığı kristallendirme tekniğiyle gerçekleştirilir. Bu teknik organik, inorganik veya radyoaktif bileşiklerle kirlenmiş zeminlerin temizlenmesinde verimli sonuçlar vermektedir (Terashi ve Juran, 2000).

Dondurma yönteminde ise zemin içerisindeki boşluk suyu, tuzlu su veya sıvı azotla (-196 °C), soğutucu sıvı dolaşımli boru sistemi yardımıyla, dondurulup gerekli imalatlar tamamlanır. İmalatların tamamlanmasının ardından, soğutucu sıvının dondurma borularından geri dönüşünde buharlaşmayla oluşan gazlar boşaltılmakta ve zemin kendi haline terk edilmektedir. Zemin eski haline ancak birkaç yıl içerisinde dönebilirken bu süreçte zeminde farklı oturmalar gerçekleşebilmektedir. Bu yöntemde en fazla hata yapılan nokta ise dondurulacak zeminin içerdiği boşluk suyu miktarına göre zemin kesme mukavemeti artmasının göz ardı edilmesidir (Sümer, 1995).



Şekil 2.13 Tünel shaftı ve zorlu bir şevin kontrolünde zeminin dondurulması

(http://personalpages.to.infn.it/~dattola/CMS_pic/CMS-Various/CMS-CivilEng/Freezing%20the%20ground.jpg).

Isıl işlemler ile geçici olarak zeminin kayma mukavemetini ve deformasyon modülünü arttırmak mümkündür (Terashi ve Juran, 2000).

2.16 Su Düşürümü (Drenaj)

Özellikle kohezyonlu zeminlerde su muhtevsındaki artış, zeminin taşıma gücünde önemli azalmalara neden olur. Temeller belirli şartlara göre hesaplanarak tasarımılandırıldığından, su muhtevsında meydana gelebilecek değişiklikler temel sisteminde ciddi hasarlara neden olabilir. Bu nedenle yer altı suyu mutlaka kontrol altına alınmalıdır (Raj, 2005).

Kuyu ve hendeklerle yer altı su seviyesinin düşürülmesi, kum drenler, çakıl drenler ve prefabrike drenler su düşürümü ile sağlanan zemin iyileştirme yöntemleridir (Raj, 2005).

Su tablasının doğal olarak kazı tabanına yakın olduğu veya su tablası seviyesinin düşürülmesi gereken durumlarda kuyu ve hendekler sık sık kullanılmaktadır (Raj, 2005).

Kum drenler, yüksek dolguların oturduğu yumuşak veya killi taban zemininin konsolidasyonunu hızlandırmak, dolgunun yapımı sırasında ve sonunda ortaya çıkabilecek onarımı güç oturmaları önlemek için uygulanan bir yöntemdir (Xanthakos, Abramson ve Bruce, 1994).

Çakıl drenler, sıvılaşma esnasında oluşan aşırı boşluk basınçlarının boşalmasını sağlayarak sıvılaşma tehlikesinin azaltılması amacı ile kullanılması önerilen bir çeşit taş kolonlardır. Sıvılaşan bölgenin iyileştirilmesi, iyileştirilmemiş bölgeden gelecek boşluk suyu basınçlarını toplamak için iyileştirilen bölgenin çevresini ıslah eden bir yöntem olarak kullanılır (USACE, 1999).

İnşaat sırasında drenaj malzemesi ile tabii zeminin karışması halinde drenaj malzemesinin geçirimsizliği düşebilmektedir. Bu nedenle çakıl kolonlar kullanılan durumlarda asıl amaç zeminin sıkıştırılmasıdır ve drenaj genellikle yan bir yarar olarak düşünülmemektedir (USACE, 1999).

Fitil drenler olarak da bilinen prefabrike düşey drenler oturma hızını ve dolayısıyla dayanım artma hızını arttırmak amacıyla genellikle yumuşak, kohezyonlu zeminler için kullanılmaktadır. Düşey drenlerin kullanılması drenaj yolunu kısaltmakta ve dolayısıyla oturma hızını artırmaktadır (Xanthakos ve diğer., 1994).

Düşey drenler genellikle polietilen veya polipropilen, boyuna yivli filtre beziyle sarılmış, ince şerit şeklinde elemanlar olup, makineye monte edilmiş bir mandrel aracılığıyla zemine çakılır. Düşey drenlerin çakılmasıyla zemin suyunun yatay hareketi önlenir ve en yakındaki düşey dren vasıtasıyla suyun dışarı atılması sağlanır. Eğer dren, alt ucunda da geçirimli bir tabakaya girmişse çift taraflı drenaj da mümkün olabilmektedir (USACE, 1999).



Şekil 2.14 Fitil dren numunesi ve drenin zemine çakılması

(http://www.geomembranes.com/spec_cs.cfm?cutsheetid=30&productid=123).

Su düşürümü yöntemleri ile yer altındaki zemin suyunun belirli bir seviyeye ulaşmadan kat edeceği mesafenin kısaltılarak dışarı atılmasıyla zemin konsolidasyonunun hızlandırılması sağlanmaktadır.

2.17 Zemin Değiştirme

Zemin değiştirilmesi, uygun nitelikte olmayan zeminin kazılarak ortadan kaldırılması, özelliklerini iyileştirici katkı maddeleri ile karıştırılarak ıslah edildikten veya sıkıştırılarak uygun duruma getirildikten sonra kontrollü bir şekilde tekrar yerine yerleştirilmesi veya uygun vasıflı başka bir zeminle yer değiştirmesi şeklinde yapılmaktadır (USACE, 1999).

Kullanılan ek katkı malzemeleri genellikle çimento, kireç, uçucu kül veya asfalt olmaktadır. Katkı malzemeleri genellikle zeminin dayanımını artırmak,

geçirimliliğini azaltmak veya işlerliğini artırmak için kullanılmaktadır. Katkı malzemeleri zemin içerisindeki boşlukları doldurabilir, zemin taneciklerini birbirine bağlayabilir veya mevcut tanecik temasını kırarak daha güçlü bir bağ oluşturabilir (USACE, 1999).

Zeminin katkı malzemeleriyle stabilize edilmesi; zeminin kazılması ve yapısının bozulması, katkı malzemesinin ve gerekiyorsa suyun eklenmesi, karıştırma işleminin homojen bir şekilde gerçekleştirilmesi, zeminin sıkıştırılması ve kür edilmesi işlemlerinden oluşmaktadır (USACE, 1999).

2.17.1 Çimento İle Stabilizasyon

Çimento stabilizasyonu ile zemin iyileştirme; granüllü zeminlerin toz haline getirilerek çimento eklenmesi ve karıştırılması ile gerçekleşmektedir. Gerekli zemin bölümleri; toz haline getirme, çimento ekleme, ıslatma ve sıkıştırma yöntemlerinin kullanımı ile iyileştirilmektedir. Bu yöntem, gevşek ve akışkan olmayan, yoğunluk ve nem olarak tüm zemin derinliğinde benzerlik gösteren zeminlerde uygulanmakta ve etkili olmaktadır (Bell, 1993).



Şekil 2.15 Çimentonun zemine serilmesi

(http://www.reconconstruction.com/images/soil_stabilization1.jpg).

Zemin yüzeyi çimento stabilizasyonu uygulaması için yumuşak ve uygun hale getirilmelidir. Kullanılacak çimento uygulama sahasında depolandıktan sonra nemden korunmalıdır. Çimento stabilizasyonuna geçmeden önce gevşek ya da uygun olmayan zemin malzemesi uzaklaştırılmalı ya da ıslatarak, bazı yerlerde kurutarak veya zeminin yüzeyini karıştırarak uygulamanın yapılacağı alanın her bölümü aynı yoğunluğa getirilmelidir (Bell, 1993).

Çimento ile stabilizasyon uygulamasına hazır hale gelen zemine gerekli oranda çimento yayılır (Şekil 2.15). Zemin üzerine yayılma yolu ile serilen çimentonun aynı gün içinde karıştırma ve sıkıştırma işlemlerinin tamamlanması, çimentonun zemine serilme işleminde ve sonrasında rüzgar ile istenmeyen yönde yayılmasını kontrol altına almak açısından önemlidir. Çimento ve zemin su ile karıştırılmadan önce kuru bir şekilde karıştırılmalı, kuru karışım gerçekleştikten hemen sonra hızla su ile karıştırma işlemine geçilmektedir. Su ile karışımın ardından sıkıştırma yapılmaktadır (Bell, 1993).

2.17.2 Kireç İle Stabilizasyon

Kireç ile zemin güçlendirme mevcut zemin malzemesi ile kireç tozu ya da kireç çamurunun karıştırılması ve zeminin sıkıştırılması ile gerçekleşmektedir. Genellikle ince taneli zeminlerde uygulanır (Süt, 2006).



Şekil 2.16 Kireç çamuru uygulamasına ait bir örnek

(http://www.asphaltbusters.com/admin/ktml/files/cms_img/News/riverside-3.jpg).

Kireç, yüksek plastisiteli ve kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminler için iyi bir iyileştirme katıdır. Bunun nedeni, kil mineralleri ve kireç arasında meydana gelen reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar kısa vadeli ve uzun vadeli iyileşmeler sağlar. Kısa vadeli iyileşmeler, kation değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu, uzun vadeli iyileşmeler ise puzolanik reaksiyonlar sonucu olmaktadır. Hızlı bir şekilde gelişen kation değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon sonucu direnimde ani bir artış, plastisitede düşüş, işlenebilirlikte artış ve şişme potansiyelinde düşüş görülür. Yavaş ilerleyen puzolanik reaksiyonlar sonucu ise direnimde artış görülür (Süt, 2006).

Kireç katkısı aynı zamanda malzemenin sıkışma karakteristiklerinde de değişimlere yol açar. Maksimum sıkıştırılmış kuru birim hacim ağırlık azalırken, optimum su muhtevası artar. Zeminin tek eksenli dayanımıysa % 6'lık bir kireç ilavesiyle yaklaşık olarak 6 kat artar (Süt, 2006).

2.17.3 Uçucu Kül İle Stabilizasyon

Uçucu kül alüminyum, silisyum, çeşitli oksitler ve alkaliler içeren yapay puzolanik yapıda bir malzeme olup sönmüş kireçle reaksiyonunda çimentolaşma görülür. Bu yüzden çimentoyla beraber (%10~35 uçucu kül, %2~10 kireç) kullanılarak etkili karışımlar elde etmek mümkündür. Bunun yanında yapısında kireç içeren uçucu küller de vardır ve bunlar normal uçucu küllerle karıştırılarak, kirece ihtiyaç duyulmadan aynı etkiyi gösterecek karışım elde edilebilir. Maliyeti önemli ölçüde azalttığı için tercih edilen bir yöntemdir (Vazquez, 1991).

2.18 Hafif Malzemeler

Bu zemin iyileştirme tekniği yumuşak, sıkışabilir bir zemin üzerindeki ağırlığın hafif dolgu malzemelerinin kullanılmasıyla azaltılmasını içermektedir. Hafif malzeme bir dolgu yapımında olduğu gibi ya dolgu olarak yer yüzeyine veya kazılmış doğal bir zemin tabakası yerine kullanılabilir ve zemin üzerine etki eden gerilmelerin azalmasını sağlar (Ergun ve diğer., 2005).

Hafif dolgu malzemelerinin kullanılmasıyla oturmalar azaltılmakta, şev duraylılığı artırılmakta ve istinat duvarları üzerine etki eden yanal toprak basınçları

azaltılmaktadır. Bu tekniğin kazandırdığı ana yarar ise depreme karşı sağlanan yüksek dirençtir (Ergun ve diğer., 2005).

Jeoteknik uygulamalarda kullanılan hafif malzemeler Tablo 2.1’de sıralanmıştır. Bunlardan bazıları geri dönüşümlü diğerleri ise üretilmekte olan malzemelerdir. Hafif malzemeler doğal zemin üzerine aşağıdaki üç yoldan biriyle yerleştirilmektedir (Ergun ve diğer., 2005):

- Gevşek bir şekilde yayılıp sıkıştırılarak,
- Blok şekillerde kesilip belli düzenlemeye göre istiflenerek,
- Akışkan sıvı şeklinde pompalanarak.

Tablo 2.1 Zemin iyileştirmesinde kullanılan hafif malzemeler (Ergun ve diğer., 2005).

Dolgu Malzemesi	Kaynak / İşlem	Kuru Birim Ağırlık (kg/m³)
Ahşap Lifler	Talaş	550-960
Kıyılmış Lastik Parçaları	Mekanik Olarak Kesilmiş Lastik Parçaları	600-900
Deniz Kabukları	Taranmış Su Altı Zemini	1100-1200
Genişletilmiş Şist	Kristal Şist veya Kil	600-1040
Uçucu Kül	Yanmış Kömür Artığı	1120-1400
Soğutulmuş Curuf	Fırın Curufu	1100-1500
Akışkan Dolgu	Beton Matris İçinde Köpüklü Malzeme	335-770
Geo-köpük	Blok Kalıplı Genişletilmiş Polyester	12-32

Hafif malzemeler ile ağırlık azaltmaya ilişkin zemin iyileştirme tekniğinde malzemenin yerleştirilmesi, uzun vadedeki işlerliği ve ömrü, yöntemin başarısı açısından önemlidir. Örneğin uçucu kül, yerleştirme esnasında yaş ise malzeme gevşek ve sıkıştırılması zor olacak, kuru ise çok tozlu ve çevresel açıdan istenmeyen bir durum oluşturacaktır. Uzun vadede işlerliği ve dayanımı açısından örnek olarak geoköpük, çeşitli kimyasallara, haşerelere karşı zayıftır ve bazı ek önlemler ile malzemenin korunması gerekmektedir (Ergun ve diğer., 2005).



Şekil 2.17 Geoköpük ile ağırlığın azaltılması uygulaması
(<http://www.houstonfoam.com/products/geofoam/>).

2.19 Biyoteknik Yöntemler

Biyoteknik iyileştirme yöntemi canlı bitki örtüsünün istinat duvarları ve zemin kaplama sistemleri gibi yapısal veya mekanik bileşenlerle beraber kullanılmasını içermektedir. Örneğin bitki örtüsü set duvarları, hücreli gridler veya kademeli istinat duvarlarının banklarına yerleştirilebilir. Bitki örtüsü ve mekanik sistemler beraber çalışarak erozyon direnci ve şev duraylılığı sağlayabilmektedir (Gray ve Sotir, 1996).



Şekil 2.18 Biyoteknik yöntemle dere kıyısında toprak hareketlerine karşı bariyer oluşturulması
(http://www.natural.fi/html/soil_biotech.html).

Yöntem canlı bitki örtüsünün ağ şeklinde kullanılarak zemin güçlendirmesi ve toprak hareketine karşı hidrolik drenler ve bariyerler sağlanmasına yöneliktir (Gray ve Sotir, 1996).

2.20 Enjeksiyon Teknikleri

Zemin enjeksiyonu, temel olarak akışkan malzemelerin basınç altında zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilmesidir. Buradaki amaç zeminin, gerilme-deformasyon ve dayanım gibi mekanik özellikleri ile geçirimsizlik gibi mühendislik özellikleri değiştirilerek zeminin iyileştirilmesidir (Warner, 2004).

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 içerisindedir. Enjeksiyon tekniği, başlangıçta su sızıntılarını önlemek ve dayanım kontrolü için maden endüstrisinde ve baraj temellerinde sızdırmazlık perdesi oluşturulmasında uygulanmaya başlanmış, daha sonra inşaat mühendisliğinde de tünel kazısı esnasında gevşek zeminlerin ve parçalı kayaların stabilizasyonunda, sondaj ve numune alma esnasında su problemlerinin çözümünde, zemin içerisindeki boşlukların doldurularak aşırı oturmaların engellenmesinde, hem mevcut hem de yeni inşa edilecek yapıların zemin emniyet gerilmelerinin arttırılmasında, tünel kazısı dolayısıyla yüzeydeki veya yakın çevredeki yapılarda meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde ve deprem esnasında sıvılaşabilecek gevşek, suya doymuş granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında kullanılmıştır (Warner, 2004).

Enjeksiyon teknikleri üzerinde durulması gereken nokta, her bir uygulama için aynı enjeksiyon malzemesinin ve enjeksiyon parametrelerinin kullanılamayacağıdır. Enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim vs.) zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, jeostatik gerilmeler vs.) ve uygulama amacına yönelik olarak tasarlanmalıdır (Shroff ve Shah, 1993).

2.20.1 Permeasyon (Sızdırma-Emdirme) Enjeksiyonu

Bu enjeksiyon yönteminde düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi, zemin içerisindeki boşluklara, düşük basınçlarda nüfuz etmekte dolayısıyla zeminin hacmi ve yapısında bir değişiklik meydana getirmemektedir. Zemin içerisine enjekte edilen malzeme zamanla sertleşmekte ve böylece zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini değiştirmektedir (Xanthakos ve diğer., 1994).

Akışkan bir enjeksiyon malzemesinin boşluklu bir zemine veya hacme emdirme yoluyla girişine engel olan üç temel direnç söz konusudur (Byle ve Borden, 1995):

- Enjeksiyon malzemesinde zemin içerisindeki boşluklara giremeyecek kadar büyük olan taneciklerin filtrasyona (karışım içerisindeki danelerin zemin tanecikleri tarafından tutulması) uğraması,
- Enjeksiyon malzemesi zemin boşlukları içerisinde ilerlerken zeminle olan etkileşiminden kaynaklanan iç kayma direnci,
- Akışkan enjeksiyon malzemesinin zemin içerisindeki boşluklara akış hızını engelleyen viskozitesi.

Filtrasyon ve kayma direnci mutlak engeller olup enjeksiyon akışını durdururlar. Ayrıca akışkanın viskozitesinin sertleşme boyunca artması da enjeksiyon akışına ek bir direnç göstermektedir. Yüksek viskoziteler akıma yüksek dirençler göstermekte, her ne kadar akım durmasa da pratik olarak enjeksiyon mümkün olamamaktadır. Bu dirençler enjeksiyon basıncının artırılmasına yol açmaktadır ki bu artış ancak pompa kapasitesine kadar veya zemin yüksek basınçlarda çatlayana kadar devam edebilir (Byle ve Borden, 1995).

Emdirme enjeksiyonunda hem süspansiyon türünde olan çimento şerbeti hem de koloid yapıdaki saf kimyasal çözeltiler kullanılabilir. Fakat zeminin geçirimsizliği azaldıkça hem teknik hem de ekonomik zorluklar artmaktadır (Xanthakos ve diğer., 1994).

Tablo 2.2 aşağıdaki faktörleri göz önüne alarak permeasyon enjeksiyonu için genel bir çerçeve oluşturmaktadır (Nonveiller, 1989):

- Temel reolojik kategoriler ve enjeksiyon malzemesi türleri,
- Enjekte edilecek zemine bağlı olarak uygulama alanları,
- Geçirimsizlik katsayısı ve özgül dane yüzeyi cinsinden yaklaşık enjekte edilebilirlik sınırları,
- Temel enjeksiyon teknikleri.

Tablo 2.2 Enjeksiyon malzemelerinin sınıflandırılması (Nonveiller, 1989).

Reolojik Kategori	Partiküler Süspansiyonlar (Bingham Akışkanları)		Çözeltiler (Newton Akışkanları)			Gaz Emülsiyonları		
	Kararsız	Kararlı	Koloit Çözeltiler (Viskozite Zamanla Artmakta)	Saf Çözeltiler (Viskozite Zamanla Değişmemekte)				
Enjeksiyon Malzemelerinin Ana Türleri	Sadece Çimento	Bentonit veya Kil ile Birlikte Çimento	Topaklaşmamış Bentonit	Kimyasal Enjeksiyon Malzemeleri			Şişebilen Enjeksiyon Malzemeleri	
				Sodyum Silikat Bazlı		Organik Reçineler Bazlı	Çimento Bazlı	Organik Ürünler Bazlı
Uygulama Alanları	Çatlaklı Kaya ve Duvar	Mikro Fisürlü ve Geçirimli Kaya			Büyük Boşluklar veya Oyuklar			
		GRANÜLER ZEMİNLER						
		Çakıl	Kaba Kumlar	Orta-İnce Kum	İnce Siltli Kumlar (Kumlu Siltler)			
Geçirimsizlik Katsayısı (m/s)		$>5 \cdot 10^{-4}$	$>5 \cdot 10^{-5}$	$>5 \cdot 10^{-5}$	$> 1 \cdot 10^{-5}$	$>1 \cdot 10^{-6}$		
Özgül Yüzey (m^2/N)		<0.5	<1.5	<1.5	<4	<10		
Temel Enjeksiyon Tekniği	Yüksek Basınç	Kontrollü Hacim ve Basınç				Düşük Basınç (Boşlukların Doldurulması)		

Yukarıda sözü edilen karışımlar çok ince daneli çimentolar (microfine cements) ve değişik katkı malzemeleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede elde edilen karışımlar için segregasyon (karışım içerisindeki çimento veya katkı malzemesi danelerinin zamanla çökmesi ve karışım suyundan ayrılması) ve filtrasyon oranları çok daha az, viskozite parametrelerinden olan akma değeri belli bir süre boyunca sabit ve daha düşük, uzun vadedeki dayanım daha yüksek ve geçirimsizlik daha azdır. Burada kritik olan husus zeminin jeoteknik özellikleriyle enjeksiyon malzemesinin reolojik özelliklerinin (viskozite ve zamanla değişimi, statik ve basınç altındaki segregasyon miktarı, filtrasyon oranı, ilk ve son priz zamanı) tam olarak belirlenmesi ve bu özelliklerin birbirleriyle uyumlu olarak bir araya getirilmesidir (Nonveiller, 1989).

Yüzeysel derinliklerde enjeksiyon işlemi tek aşamada yapılabilir. Bu durumda enjeksiyon kuyusu tasarım derinliğine kadar açılır ve enjeksiyon borusu yardımıyla yukarıya doğru enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Alternatif olarak kuyu açılırken de enjeksiyon işlemi yapılabilir. Kuyu belli bir derinlikte açıldıktan sonra enjeksiyon

borusu indirilir ve açılan derinlik boyunca enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Bu durum tasarım derinliğine kadar tekrar ettirilir (Bell, 1993).

Kademeli enjeksiyon işlemi ise göreceli olarak yüksek enjeksiyon basınçlarının gerektiği daha derin zeminlerde ve daha etkin bir permeasyon için uygulanır. Burada enjeksiyon kuyusu belli bir derinliğe kadar açılır ve enjeksiyon yapılır. Enjeksiyon malzemesi sertleştikten sonra kuyu biraz daha derinleştirilir ve tekrar enjeksiyon yapılır. Kademeli enjeksiyon derinliğinin artması, enjeksiyon basıncının artırılmasını sağlar ve yüzeydeki sızıntıdan meydana gelebilecek enjeksiyon malzemesi kaybını engeller (Bell, 1993).

2.20.2 Kompaksiyon Enjeksiyonu

1980 yılında ASCE (American Society of Civil Engineers) Enjeksiyon Komitesi, kompaksiyon enjeksiyonunu; 25 mm'den daha az çökme değeri olan, yeterli plastisiteyi sağlayacak kadar silt ve içsel sürtünmeyi sağlayacak kadar da kum içeren zemin-çimento karışımı enjeksiyon malzemesinin, zemin boşlukları içerisine girmeksizin enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen bir kütle oluşturacak ve bu sayede etrafındaki gevşek zeminleri sıkıştıracak şekilde yüksek basınçlarda enjekte edilmesi olarak tanımlamıştır (Byle ve Borden, 1995).

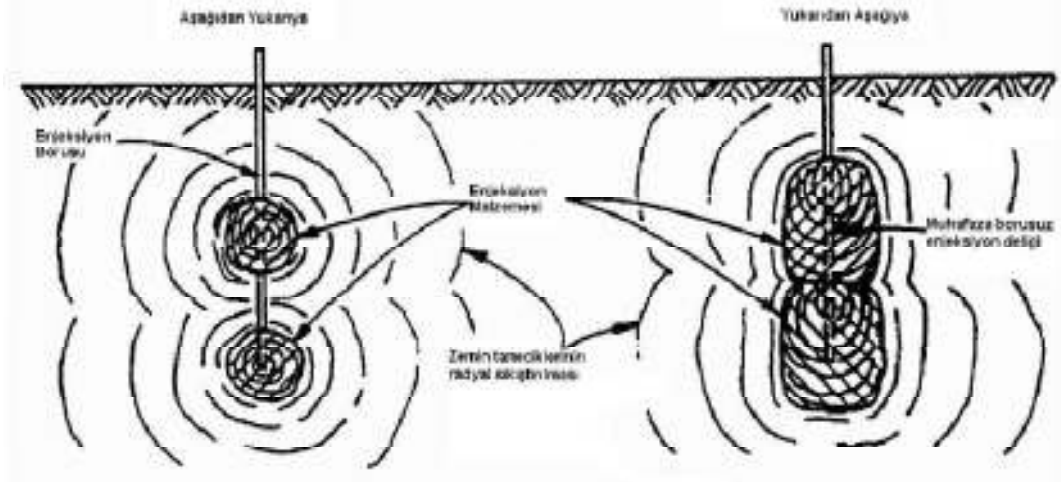


Şekil 2.19 Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi (Xanthakos ve diğer., 1994).

Kompaksiyon enjeksiyonu, çok derinlerdeki bölgesel zemin tabakalarını etkin bir şekilde sıkıştırabilmesi, kullanılan ekipmanın dar bölgelerde hatta bina bodrum katlarında bile çalışabilmesi, yapım esnasında nispeten daha az atık ve kirlilik oluşturması ve mevcut yapılar üzerindeki titreşim etkilerinin asgari olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Byle ve Borden, 1995).

Kompaksiyon enjeksiyonunda kritik nokta, enjekte edilen malzemenin enjeksiyon noktası etrafında giderek genişleyen küresel bir kütle olarak kalabilmesidir. Kullanılan malzemenin çok akışkan (düşük viskoziteli) olması durumunda etraftaki zemin hidrolik çatlama maruz kalır ve sıkıştırma işlemi üzerindeki kontrol kaybedilebilir. Daha da fazlası bu durum enjeksiyon noktası üzerindeki binalara veya yakındaki yeraltı yapılarına zarar verebilir. Kompaksiyon enjeksiyonu hemen hemen bütün tip zeminlerde uygulanmakla beraber yumuşak killerde enjeksiyondan kaynaklanan aşırı boşluk suyu basınçları çok yavaş sönmüneceğinden özel önlemlerin alınması gerekebilmektedir (Graf, 1992).

Enjeksiyonun zemin içerisine yerleştirilmesi bütün arazi koşullarını (zemin, yapı, mülkiyet hakkı sınırlamaları) göz önüne almayı gerektirmekte ve genellikle yukarıdan aşağıya, aşağıdan yukarıya ve bazen de her ikisi birden gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.20). Yüzeysel uygulamalar ve farklı oturmuş sömellerin kaldırılmaları yukarıdan aşağıya, yüzeysel kabarmaların asgari tutulması gereken stabilizasyon işleri ise aşağıdan yukarıya gerçekleştirilmektedir. Enjeksiyonun yukarıdan aşağıya yapılmasının avantajı ilk olarak üst tabakaların sıkıştırılması ve bu sayede aşağıya doğru ilerledikçe daha yüksek enjeksiyon basınçlarının kullanılabilmesidir. Fakat her enjeksiyon aşamasında ek delgi gerektiğinden maliyetin artması bu yöntemin dezavantajını oluşturmaktadır. Şayet yukarıdan aşağıya gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi derin formasyonlarda oturma problemine yol açacaksa ilk olarak aşağıdan yukarıya yapılan birkaç enjeksiyondan sonra işlem yukarıdan aşağıya tabandaki son enjeksiyon kütleline ulaşılan kadar devam ettirilir (Graf, 1992).



Şekil 2.20 Aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya gerçekleştirilen kompaksiyon enjeksiyonu işlemleri (Graf, 1992).

Enjeksiyon sondaj deliklerinin aralıkları ve yerleşimi büyük önem arz etmektedir. Zemin tipi, su muhtevası, zeminin mevcut rölatif sıklığı ve istenilen iyileştirme derecesi, jeostatik gerilmeler, mevcut yapısal elemanlar gibi faktörler enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme şeklini ve dolayısıyla elde edilen nihai iyileştirmeyi etkilemektedir. Enjeksiyon delgileri aralığı temel merkezi altında genellikle 2,5 m civarında olup tercihen üçgensel konum seçilir. Bir veya iki sıra ek enjeksiyon bölgesi oluşturmak etraftaki yapısal elemanlara yanıl yüklemeye nedeniyle zarar vermemek açısından uygun görülmektedir. Enjeksiyon noktaları arasındaki yatay aralıklar yüksek jeostatik gerilmelerin olması durumunda (ya derin formasyonlarda ya da yapısal yükler altındaki enjeksiyon noktaları) daha yüksek enjeksiyon hacmi ve basınçları gerektireceğinden daha geniş tutulmaktadır. Gevşek zeminler içerisinde gerçekleştirilen enjeksiyon işlemi daha sıkı zeminlerdekine göre daha büyük enjeksiyon kütlesi oluşturduğundan yatay aralık daha büyüktür (Graf, 1992).

2.20.3 Çatlatma Enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonunda zeminin kontrollü bir şekilde, kararlı fakat düşük viskoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda çatlatılması söz konusudur. Bu enjeksiyon tekniği temel olarak permeasyon enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirimsizliğe sahip, ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda uygulanmaktadır.

Yöntemin gelişimi tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır (Gallevresi, 1992).

Çatlatma enjeksiyonu sonucunda zemin içerisinde ağaç dallarına benzer sertleşmiş çimento kanalları oluşmakta ve bu sayede zemin kontrollü bir şekilde ve bölgesel olarak sıkıştırılmaktadır. Çimento şerbeti başlangıçta yüksek basınçlarda enjekte edilmekte ve zeminin çatlamasıyla beraber oluşan çatlaklar çimento ile doldurulmaktadır. Oluşan çatlakların boyu, genişliği ve hacmi enjeksiyon basıncına ve mevcut jeostatik gerilmelere bağlıdır (Gallevresi, 1992).

Normal konsolide, homojen bir zemin içerisinde meydana gelen ilk çatlaklar düşey doğrultuda (büyük asal gerilme doğrultusunda) oluşur, bu sayede yatay gerilmeleri artar ve zemini sıkıştırır. Eğer aynı noktadan birden fazla enjeksiyon işlemi tekrarlanacak olursa asal gerilmelerin doğrultuları değişir ve yatay yönde çatlaklar meydana gelmeye başlar. Bu da sonuç olarak (bazen ani bir şekilde) yer yüzeyinde ya da üst yapılarda kabarmaya neden olur. Fakat pratikte, meydana gelecek çatlakların yönü zemin içerisinde mevcut çatlaklara, zayıf bölgelere veya fisürlere bağlı olarak değişmektedir (Gallevresi, 1992).

2.20.4 Jet-Grouting

Bu yöntemde zemin doğrudan doğruya genellikle su-çimento karışımı stabil bir malzeme ile, en az 300 barlık çok yüksek basınçlı enjeksiyonla karıştırılır. Delme tijinin ucunda bulunan monitördeki püskürtme memelerinden (nozül) 250-300 m/sn gibi bir hızla çıkan enjeksiyon, zeminin doğal yapısını bozarak zemin ile stabilize malzemenin karışımından meydana gelen, özellikleri tamamen değiştirilmiş ve iyileştirilmiş, çimento-zemin karışımından oluşmuş jet-grout kolonlar ortaya çıkar (Essler ve Yoshida, 1993).

Jet-gouting yöntemi, hemen her tür zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda diğer iyileştirme yöntemlerinden daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifi olmakla beraber diğer klasik enjeksiyon sistemlerinden en önemli farkı, uygulamadan önce gerekli malzemenin miktarı ile iyileştirilmiş zeminin taşıma gücü, deformasyon modülü ve geçirimsizliği gibi çeşitli zemin parametrelerinin bilinmesi ve

dolayısıyla işe başlamadan maliyetin belirlenebilmesidir. Yapım sırasında enjeksiyon hızı, açısı, tijin dönme ve geri çekiş hızı, nozul çapı ve sayısı gibi parametrelerin değiştirilmesi ile çeşitli iyileştirilmiş zemin şekilleri elde etmek mümkün olmaktadır (Xanthakos ve diğer., 1994).

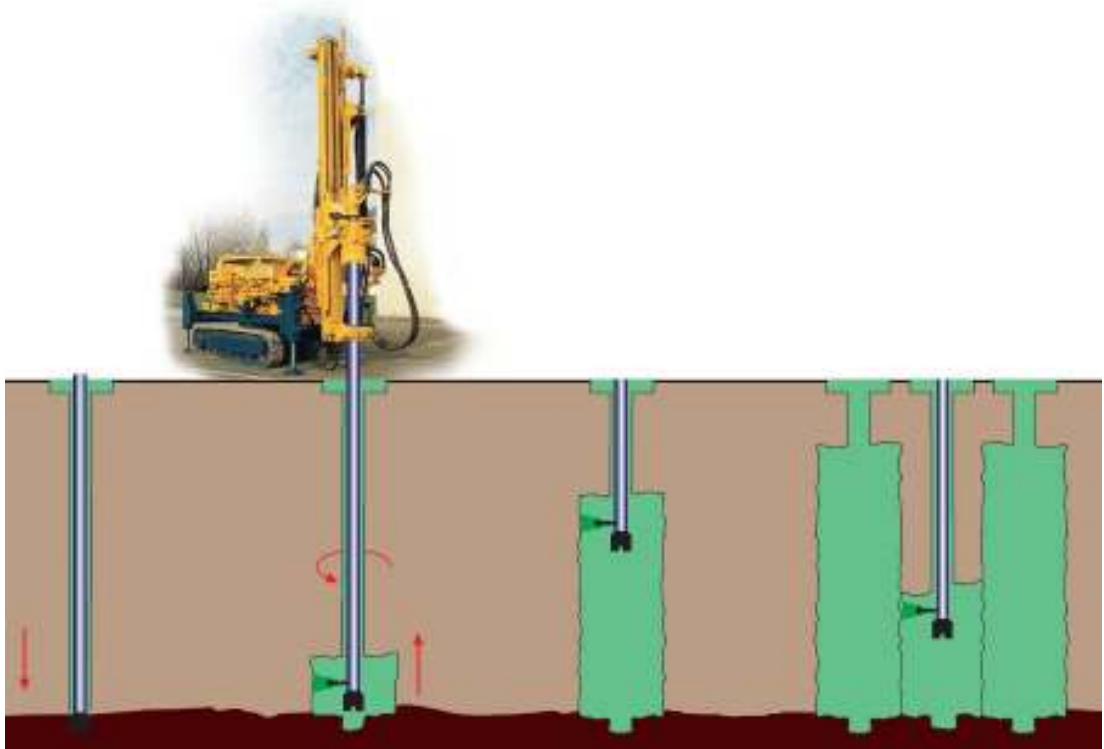
İlke olarak önceden hazırlanmış enjeksiyon şerbetinin çok yüksek basınç altında ince püskürtme memelerinden jetleme şeklinde zemin içine püskürtülerek çevredeki zeminin bu şerbetle karıştırılması esasına dayanan yöntemi delme, zemini kesme ve dolgu safhası olarak üç aşamada irdelemek mümkündür (Şekil 2.21).

Delme işleminin çeşidi, delinecek zeminin özelliklerine bağlı olarak seçilir. İlk etapta zemin özel ataşmanlı delgi makineleriyle öngörülen derinliğe kadar delinir. Delgi sırasında kuyu ağzının yer altı su seviyesi üzerinde olması çalışabilme açısından tercih edilir (Askay, 2002).

Delme işleminin kolaylaştırılması, uç takımının soğutulması ve zeminin enjeksiyona hazırlanması amacıyla delgi sırasında su, hava, bentonit süspansiyonu veya çimento-su karışımı gibi çeşitli akışkanlar kullanılmaktadır. Uç takım olarak, yumuşak karakterli zeminlerde genellikle kil bitleri, sert karakterlerde ise tricone bitler ve bloklu zeminlerde delik dibi tabanca bitleri (DTH) kullanılmaktadır. Delme borusu (tij) olarak da bağlantı manşonlarında 600~700 bar basınca dayanıklı sızdırmazlık elemanları (keçe) kullanılan yüksek basınca dayanıklı özel imal edilmiş delgi tijleri kullanılmaktadır (Askay, 2002).

Zemini kesme aşamasında, projede belirlenen derinliğe erişildiğinde delme ve akışkan basma işlemi durdurulur, çelik bir bilya tijin içine bırakılarak uç kısmın hemen üstünde yer alan bir valf bu suretle kapatılmış olur. Valf kapanınca tije gönderilecek enjeksiyonun yönü boru ucunda monitör diye adlandırılan ve nozulları taşıyan takıma çevrilmiş olur. Jetleme enjeksiyonu genellikle 300 ile 600 bar basınçla, 1,8 ile 4,0 mm çap aralıklı nozullarda yapılır. Yaklaşık 250 ile 300 m/sn arası hızla çıkan enjeksiyon şerbeti, taşıdığı yüksek kinetik enerji dolayısıyla çevredeki zemini parçalar, karıştırır ve zemin-çimento şerbetinden oluşan özellikleri tamamen farklı yeni bir malzeme (soilcrete) oluşturur (Xanthakos ve diğer., 1994).

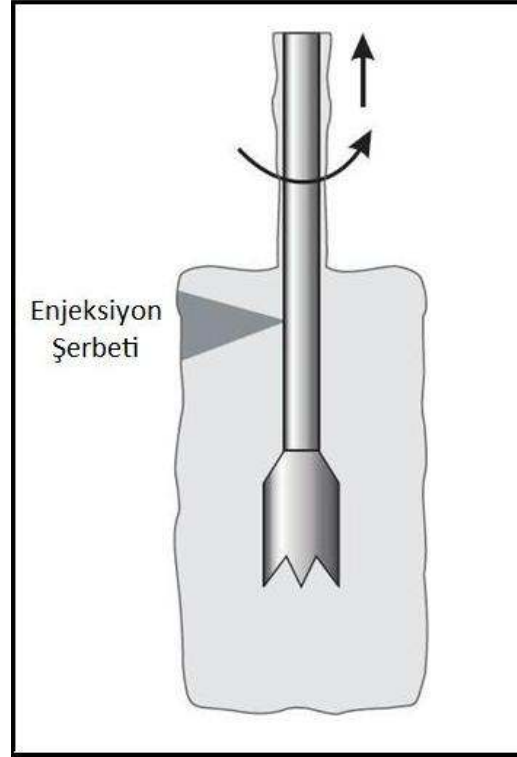
Dolgu aşamasında ise delici takımın önceden belirlenmiş dönme hareketi, sabit bir hızla çekme hareketi ile birleşince zemin cinsine bağlı olarak değişik çaplarda jet-grout kolonlar elde edilir. Dolgu işlemi sırasında kesilip karıştırılan zeminin bir kısmı delici takım etrafından yüzeye çıkar (kuma). Bu durum ıslah edilen zeminde basınç olmadığı ve enjeksiyon basıncının çevreye ve üst yapılara zarar vermeyeceğinin göstergesidir. Zemin içersinde basınç kaldığı takdirde zeminde kırılma ve buna bağlı olarak da kabarma oluşur ve kolonların sürekliliği tehlikeye girer. Bu olayı önlemek için enjeksiyon basıncını düşürürken çekme hızının artırılması, enjeksiyon debisi miktarının azaltılması, masif kil özellikli zeminlerde ön yıkamalı delgi yapılması yararlı olur. Kuma miktarı zeminin geçirimliliğine ve türüne bağlı olarak killerde daha fazla, kum ve çakıllarda daha az olmak üzere ortalama olarak enjekte edilen miktarın % 10'u mertebesindedir (Xanthakos ve diğer., 1994).



Şekil 2.21 Jet-grouting yönteminde delme, zemini kesme ve dolgu aşamaları
(http://www.kellergrundbau.com/download/pdf/en/Keller_67-03E.pdf).

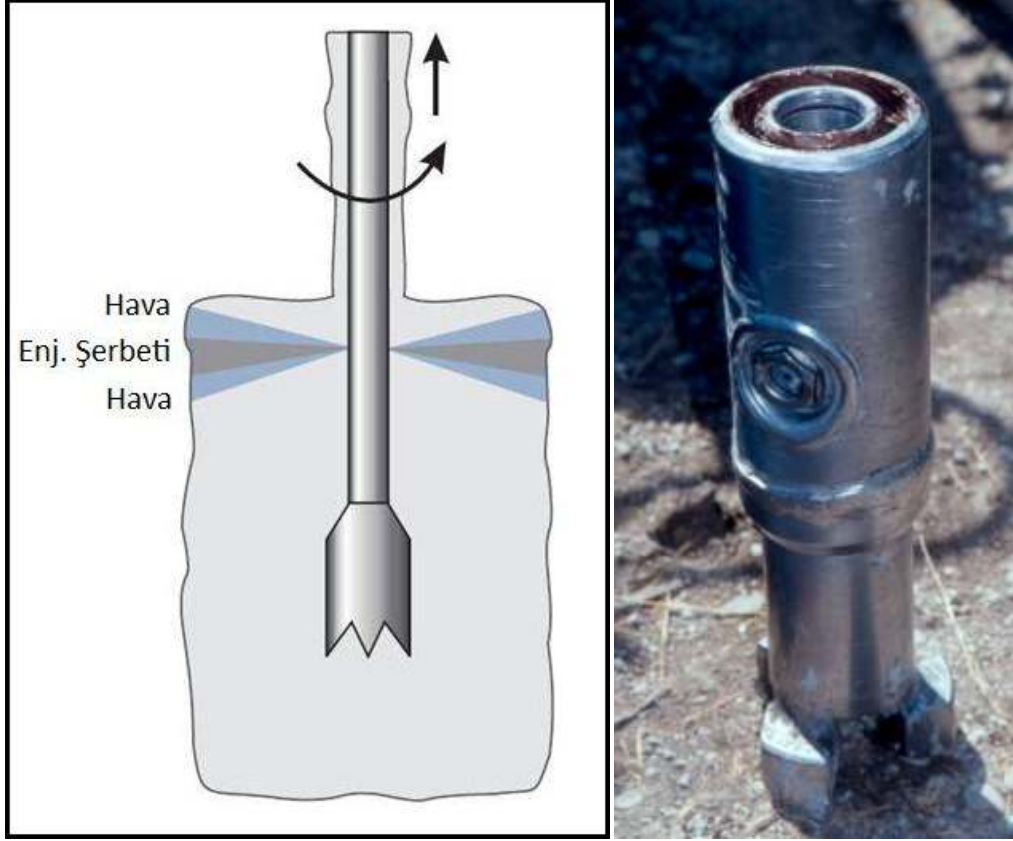
Çeşitli türden bağlayıcı materyalin yüksek hızla ve önceden belirlenmiş miktar ve dozda zemine enjekte edilmesi işlemi olan jet-grouting bunu çeşitli yollardan sağlayabilir.

Jet 1: Delgi ve enjeksiyon işlemlerinin tek kanallı tijle yapılmakta olduğu en yaygın yöntemdir. Enjeksiyon 300 ile 600 bar arasında bir basınçla tij içinden yapılmaktadır (Şekil 2.22). Bu yöntemle elde edilen zemin-çimento karışımı jet-grout kolonların çapları, zemin cinsi ve çalışma parametrelerine bağlı olarak killi zeminlerde 600 ile 800 mm, kum-çakıl zeminlerde ise 1000 ile 1200 mm arasında değişen değerlerde olabilmektedir (Croce ve Flora, 2000).



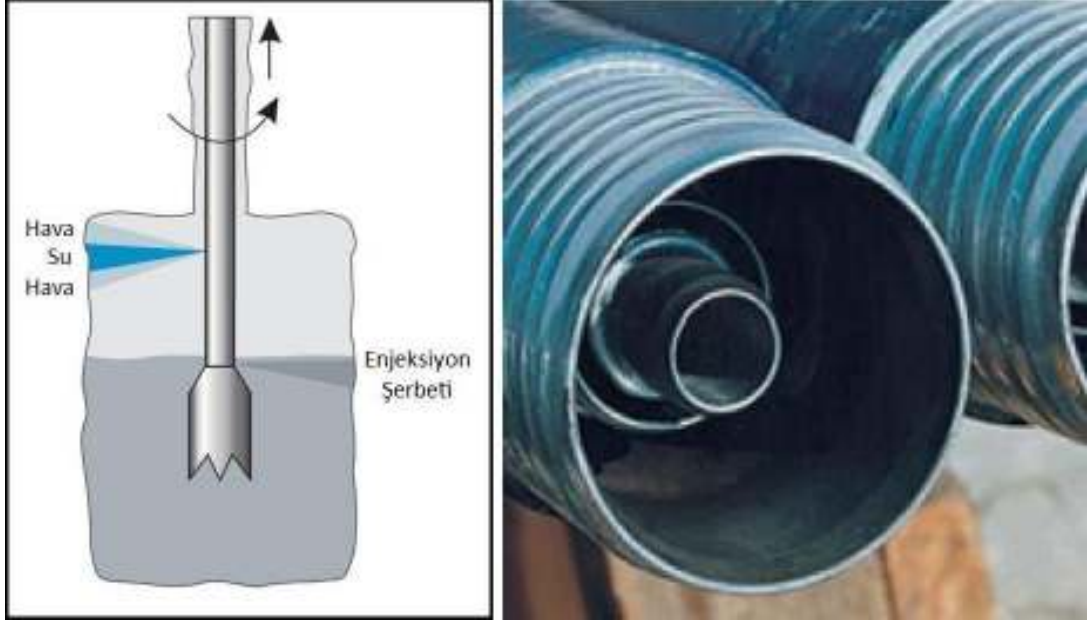
Şekil 2.22 Jet 1 kolon oluşturma prensibi
(Hayward Baker, 2004).

Jet 2: Bu yöntemde aynı merkezli iç içe iki borudan oluşan tijler kullanılmaktadır. Jetleme enjeksiyonu jet 1 yönteminde olduğu gibi içteki borudan yapılır. Dıştaki borudan 8 ile 10 bar arasında değişen miktarlarda basınçlı hava verilir. Basınçlı hava, jet 1'deki kinetik enerji sürtünme kayıplarını kısmen azalttığı için, bu yöntemle oluşan kolon çapları jet 1'e kıyasla % 60 ile % 80 daha büyük olur (Croce ve Flora, 2000).



Şekil 2.23 Jet 2 kolon oluşturma prensibi ve jet 2 yönteminde kullanılan matkap ucu monteli monitör örneği (Hayward Baker, 2004).

Jet 3: Delgide su ile hava, dolguda ise enjeksiyon şerbetinin kullanıldığı bu yöntemde sistem aynı merkezli, iç içe üç borudan oluşmaktadır (Şekil 2.24). 400 ile 600 bar arası değişen basınçlı su en iç borudan basılır. 8 ile 12 bar arası basınçlı hava ortadaki borudan verilmektedir. Su ve hava, jet 2 yönteminde olduğu gibi nozullardan zemine girer. Dıştaki borundan gelen enjeksiyon şerbetinin basıncı 30 ile 80 bar arasında değişmektedir. Hava + su basıncı ile önü açılan enjeksiyon şerbeti daha uzaklara kadar zemine nüfuz edebilir. Bu şekilde uygun zemin koşullarında 2000 mm üzeri soilcrete kolon oluşturmak mümkün olabilmektedir. Bu yöntemle imal edilen kolonlarda zemin-çimento karışımı malzeme içersine giren hava ve fazla su nedeniyle, çaptaki büyümeye karşı kolonların dayanımında bir miktar azalma söz konusu olmaktadır (Croce ve Flora, 2000).

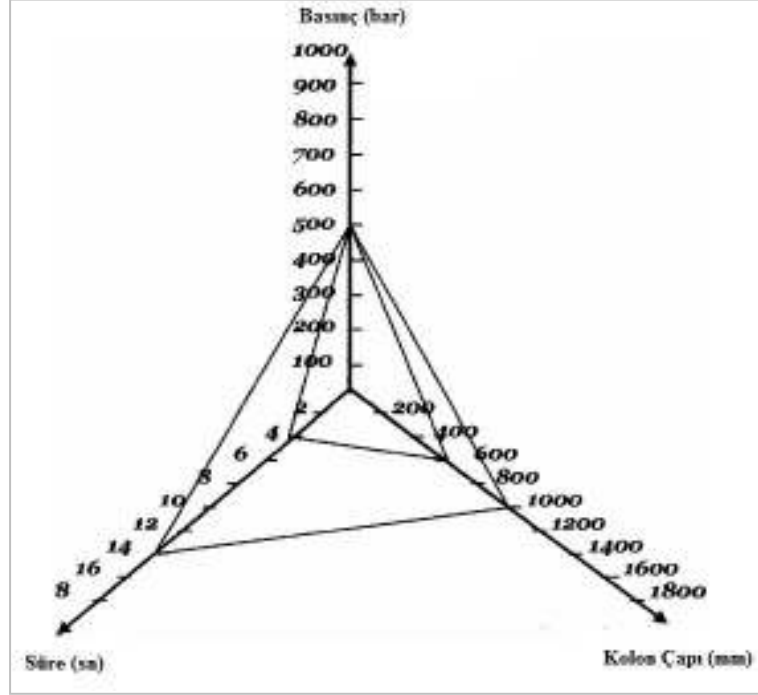


Şekil 2.24 Jet 3 kolon oluşturma prensibi ve jet 3 yönteminde kullanılan üç kanallı tij örneği (Hayward Baker, 2004).

Jet-grouting yöntemi bir seri parametrelerden oluşan bir yöntemdir. Bu parametrelerin bir kısmı kullanılan makine ve ekipmanın kapasitelerine bağlı olan sınırlı, diğer bir kısmı ise enjeksiyon işleminden istenen sonuca ve zemin cinsine bağlı değişebilen parametrelerdir. Çalışma parametreleri seçimi zemin şartları, kolon çapı, istenilen taşıma gücü değeri ve uygulanan yöntemle göre belirlenir. Kullanılan imalat parametreleri (Durgunoğlu, 2004):

- Jet sistemi (jet 1, jet 2, jet 3)
- Enjeksiyon basıncı (bar)
- Su/çimento oranı
- Dönme hızı (rpm)
- Çekme hızı (cm/dak)
- Enjeksiyon debisi (lt/dak)
- Nozul sayısı ve çapı

İstenilen çapta kolon elde edebilmek için en önemli parametre basınçtır. Basınç ve çap arasında doğru orantılı bir ilişki vardır, basınç arttırıldığı zaman kolon çapı da artar. Bununla beraber ulaşılmak istenen çapta bir soilcrete kolon elde etmek için kolon imali yapım süresi ile de ilişkilidir (Essler ve Yoshida, 1993).



Şekil 2.25 Basınç, kademeli bekleme süresi ve hedeflenen kolon çapı ilişkileri (Melegari, 1997).

Zemin ile enjeksiyon şerbetinin homojen bir karışım oluşturabilmesi için, takım dönüş hızı belirli bir değerden fazla olmamalı, takım çekme hızı da ıslah edilen bölgenin tamamında sürekliliği sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Çekme hızı, zeminin özelliklerine ve birim hacme enjekte edilecek enjeksiyon şerbeti miktarına bağlıdır. Bağ dokusu kuvvetli zeminler, jetlemenin gerekli yırtma işlemini ve homojen karışım oluşumunu sağlayabilmesi için genellikle daha uzun süreler gerektirirler (Essler ve Yoshida, 1993).

Dönme ve çekme hızı optimizasyonu ıslah edilecek zemine ve kullanılan imalat yöntemine çok sıkı bağlıdır. Jet 2 ve jet 3 metotları, daha büyük çaplar hedeflendiği ve dolayısıyla ıslah edilen zemin hacmi daha büyük olduğu için, daha uzun sürelere ihtiyaç duyarlar.

Bugün jet-grouting yönteminin bu kadar yaygınlaşmasına karşın esas sorun sistemin uygulanmasında kesin hesap yöntemlerinden çok teknik temel bilgilerin yanı sıra büyük ölçüde uygulamalardan elde edilen deneyim sonuçlarının değerlendirilmesiyle neticeye ulaşılabilmesi olmaktadır. Yöntemin tasarımında esas konu; güvenli, ekonomik ve tatminkar bir çözüme ulaşmak için uygulanacak sistemin

iyi seçilmesi, prosedür ve ayrıntıların adım adım hesaplanmasıdır. Bilinmesi gereken aktiviteler aşağıda özetlenmiştir (Essler ve Yoshida, 1993):

- Zemin hakkında elde edilecek tüm bilgilerin toplanması,
- Zeminin mekaniksel modellenmesi,
- Yükleme şartlarının belirlenmesi,
- Yüklerin hesaplanması,
- İyileştirilmiş zeminin spesifik dayanımı dahil malzemelerin seçilmesi.

Genel itibariyle tasarımcı, yöntemin zemin iyileştirilmesi veya yapısal taşıyıcı eleman olarak tasarlanacağı konusunda karar vererek, ikinci aşama olan dizayn için önemli aşağıdaki özellikleri belirler (Essler ve Yoshida, 1993);

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

Taşıyıcı olarak tasarlanacak kolonların taşıma gücü hesaplarında, toplam güvenli taşıma gücü uç ve çeper sürtünmesi ile belirlenerek, zemin-enjeksiyon şerbeti karışımı malzemedeki (soilcrete) zemin cinsi, dozaj ve işletme parametrelerine ve karot deneylerine dayanarak güvenli olarak saptanacak değerden daha büyük bir gerilme olmaması sağlanmalıdır (Essler ve Yoshida, 1993).

Hesaplama yönteminde grup şeklindeki taşıyıcı elemanların toplam taşıma gücünün tüm tekil kolonların toplam taşıma güçlerine eşit olacağı göz önüne alınır. Yapısal yük rijit bir gövde ile taşıyıcı tabaka içine girdiği durumlarda, tüm yük güvenli bir şekilde sağlam tabakalara aktarılmış olup, bu şekilde oluşacak oturma da elastik kısalma ile sınırlı kalmış olur (Burke ve Welsh, 1991).

Yükle temel arasında yeterli kalınlıkta granüler bir tabaka varsa, yükün bir kısmının kolonlarla taşınması gerçekleşirken, önemli bir kısmı da zemin tarafından taşınır. Granüler malzeme jet-grout kolonların davranışını daha düzenli gerçekleştirmelerini sağlar. Kolon boyu arttıkça zemin gerilmesinin önemli kısmını

jet-grout kolonlar taşır. Yapısal yükün rijit bir gövde ile sağlam tabakalara aktarılması durumunda jet-grout kolonunun davranışı kazık uygulamalarında olduğu gibidir. Diğer tüm şıklarda kolonların varlığı yük ile ilgili zemin davranışına göre değişen özel bir zemin iyileştirilmesi durumundadır. Jet-grout yöntemiyle zemin iyileştirilmesinde taşıma gücü, kolonları çevreleyen sınırlar içindeki alanın hesaplanmasıyla belirlenir. Doğal zeminlerle bu tür iyileştirilmiş zeminler arasındaki fark kompozit zeminlerin tanımlanmasıyla belirlenmektedir (Burke ve Welsh, 1991).

Soilcrete kolonların performanslarını etkileyen özellikleri olan zemin-çimento karışımının kalitesi ve mukavemeti, imal edilmiş kolonun bütünlüğü, boyu, çapı, geçirimsizliği ve taşıma gücü, uygulama etkinliği ve başarısı doğrultusunda kalite ve proje ölçütleri kontrol edilmelidir. Bu kontroller ön deneyler, gözlem ve proses sırasındaki deneyler, imal edilmiş kolonlar üzerindeki yapılan deneyler ve gözlem olarak sıralanabilir (TS EN 12716, 2002).

Jet-grouting yönteminin sağlıklı olarak uygulanabilirliği, zemin ile ilgili tüm etüt ve testlerin yapılmış ve bunlarla ilgili değerlerin elde edilmiş olmasını gerektirir. Bununla beraber en etkin sistem ve jet-grouting parametrelerinin belirlenmesi; seçilen sistem ve jet-grout parametrelerinin tasarım şartlarını sağladığının doğrulanması amacıyla uygulama öncesi sahada test kolonları inşası ve ön deneylerle gerçekleştirilir (Durgunoğlu, 2004).

İmalat sırasında, karışım suyu ile pH derecesi, karbonat içeriği, klor ve organik madde oranı, çimento ile dane çapı dağılımı deneyi ve enjeksiyon şerbeti ile birim hacim ağırlık, Marsh viskozitesi, priz süresi, basınç mukavemeti ve sızma deneyleri uygulanabilir (Sağlam, 2006).

Genellikle elde edilmesi gereken minimum kolon çapı proje kriteri olarak belirlenir. Seçilen sistem parametreleri ile bu çapın oluşup oluşmadığı kolonların etrafı açılarak çeşitli seviyelerde çevrelerinin ölçülmesi suretiyle tespit edilir (Şekil 2.26). Farklı zemin tabakalaşmaları olan yerlerde ince daneli zeminlerde seçilen parametreler altında en küçük çap oluşacağından tasarım, bu çap esas alınarak yapılır (Burke ve Welsh, 1991).



Şekil 2.26 Kolonların etrafının açılmasıyla çeşitli seviyelerde çap kontrolü (Sağlamer, 2006).

Soilcrete kolonların boyları, bir şaft içerisinde tek boyutlu stres dalgası yayılması teorisine dayalı süreklilik deneyi (Pile Integrity Test) ile tespit edilebilmektedir. Deney kolonu başına bir çekiç ile vurmak suretiyle oluşturulan düşük gerilimli stres dalgası kolon boyunca aşağıya doğru, sabit bir hızda ve sabit bir dalga boyunda, farklı empedanslı bir yere rastlayıncaya kadar yayılır ve geri döner. Kolonda bulunan çatlak, boşluk, kesitteki daralmalar ve genişlemeler gibi düzensizlikler, normal kolon empedansından farklı empedansta yansımaları gösterir. Böylelikle kolon boyu ile beraber kolondaki çatlakları, kesit değişikliklerini ve toprak tabakasının etkilerini saptayabilmek mümkündür (Burke ve Welsh, 1991).



2.27 Kolon süreklilik testi uygulaması (Sağlamer, 2006).

Her bir kolon tarafından taşınması öngörülen proje yükleri, kolon yükleme deneyleri ile kontrol edilir. Uç direncin ihmal edildiği durumlarda kolon içine çekme donatısı yerleştirmek suretiyle çekme deneyi yapılması tercih edilir. Arazide daha önce yapılmış deneme kolonları varsa tercihen bunlar üzerine göçertmeli veya kabul edilebilir maksimum oturmaya kadar yükleme yapılır. Kontrol deneylerinde ise proje kolonları üzerine proje yükünün en az bir buçuk katı yükleme yapılarak kolon taşıma kapasitesi tayin edilir. Yükleme deneyi tek bir kolon veya bir grup kolon üzerinde bölgesel yükleme deneyi olarak da teşkil edilebilir (Durgunoğlu, 2004).

Kolon basınç mukavemeti ve deformasyon modülü genellikle soilcrete kolonlardan arazide alınan silindirik numuneler üzerinde laboratuarda yapılan serbest basınç deneyi ile tayin edilir. Numuneler uygulama esnasında kolon yaş iken piston numune alıcı veya prizini almış kolon üzerinde karot numune alınarak yapılır (Durgunoğlu, 2004). Serbest basınç deneyinde tercihen deformasyonlar da ölçülerek deformasyon modülü tayin edilir (Sağlam, 2006).

Jet-grout kolonlar geçirimsizlik amacı ile imal edilmişse, zemin-çimento kolon kalitesini kontrol edebilmek için açılan karot deliklerinden kolaylıkla sabit permeabilite deneyleri yapılarak geçirimsizlik denetlenebilir.

Jet-grouting yönteminin çok geniş bir kullanım alanı olduğu göz önüne alınarak kalite kontrol ve denetim ölçütleri her alan için ayrı olarak (temel takviyesi amaçlı kolonlarda permeabilite testi, geçirimsizlik perdesi kolonlarında yükleme deneyi yapılmasına gerek olmaması, vb.) belirlenmelidir (Essler ve Yoshida, 1993).

Jet-grout kolonların çeşitli amaçlarla kullanımları aşağıda sıralanmıştır (Durgunoğlu, 2004):

- 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 intikalinin önlenmesi,
- Havuzlarda, yer altı su depolarında ve su yapılarında, donatı ile teçhiz edilerek çekme elemanı olarak,
- Kazılarda, ağırlık tipi istinat yapısı teşkili ile yanal zemin itkilerinin alınması
- Kazılarda donatı ile teçhiz edilerek düşey eğilmeye maruz iksa elemanı olarak,
- Kazılarda ve ankrajlı istinat yapılarında özel donatı ile ankraj elemanı olarak,
- Geçirimli zeminlerde ve yüksek yer altı su seviyesi 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.

BÖLÜM ÜÇ

İZMİR BANLİYÖ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ PROJESİ 2. ETAP KARŞIYAKA TÜNELİ VE İSTASYONLARI YAPIMI İŞİNDE JET-GROUTING YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

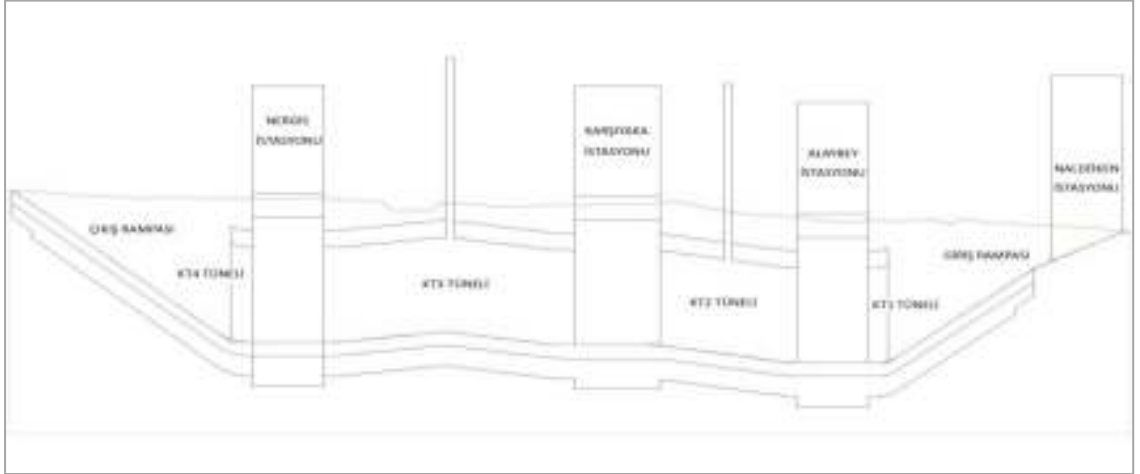
3.1 Projenin Tanıtımı

Aliağa-Menderes Raylı Sistem Projesi kapsamında yer alan İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İş, toplam uzunluğu 3.283,32 m'lik bir güzergahta aç-kapa sistemi yoluyla inşa edilmiştir.



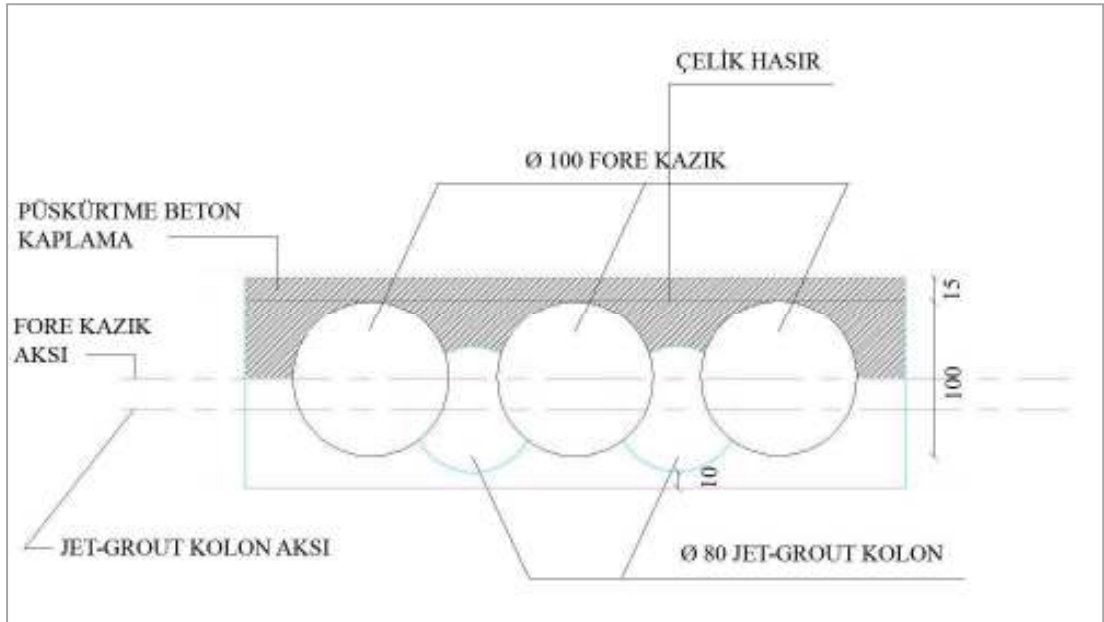
Şekil 3.1 Güzergah uydu fotoğrafı (A-B Naldöken İstasyonu, B-C Giriş Rampası, C-D KT1 Tüneli, D-E Alaybey İstasyonu, E-F KT2 Tüneli, F-G Karşıyaka İstasyonu, G-H KT3 Tüneli, H-I Nergis İstasyonu, I-J KT4 Tüneli, J-K Çıkış Rampası).

Projede, Naldöken İstasyonu'ndan başlayarak bir yaklaşım rampası ile yer altına inilmekte ve birbirlerine tüneller (KT1, KT2, KT3 ve KT4) ile bağlanan Alaybey ve Karşıyaka istasyonlardan geçilerek Nergis İstasyonu'ndan sonraki çıkış rampasından yüzeye çıkılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Proje boy kesit görünümü.

Tünel ve yer altı istasyon kesimlerinde aynı zamanda yapı duvarı olarak da kullanılmak üzere geçirimsiz iksa perdesini oluşturmak için, fore kazıkların aralarına jet-grout kolon uygulamaları sistemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre giriş ve çıkış rampalarında 20 cm'lik açıklığa sahip Ø80'lik fore kazıklar arasında 60 cm, tüneller ve istasyonlarda ise (Şekil 3.3) 30 cm'lik açıklığa sahip Ø100'lük fore kazıklar arasında 80 cm çapında jet-grout kolonlar oluşturulmuştur. Tünel ve yeraltı istasyonları tavan taşıyıcı sistemi olarak da önerilmeli prefabrike kiriş ve üzerine yerinde dökme döşemeli tabliye sistemi uygulanmıştır.



Şekil 3.3 Geçirimsiz perde detayı.

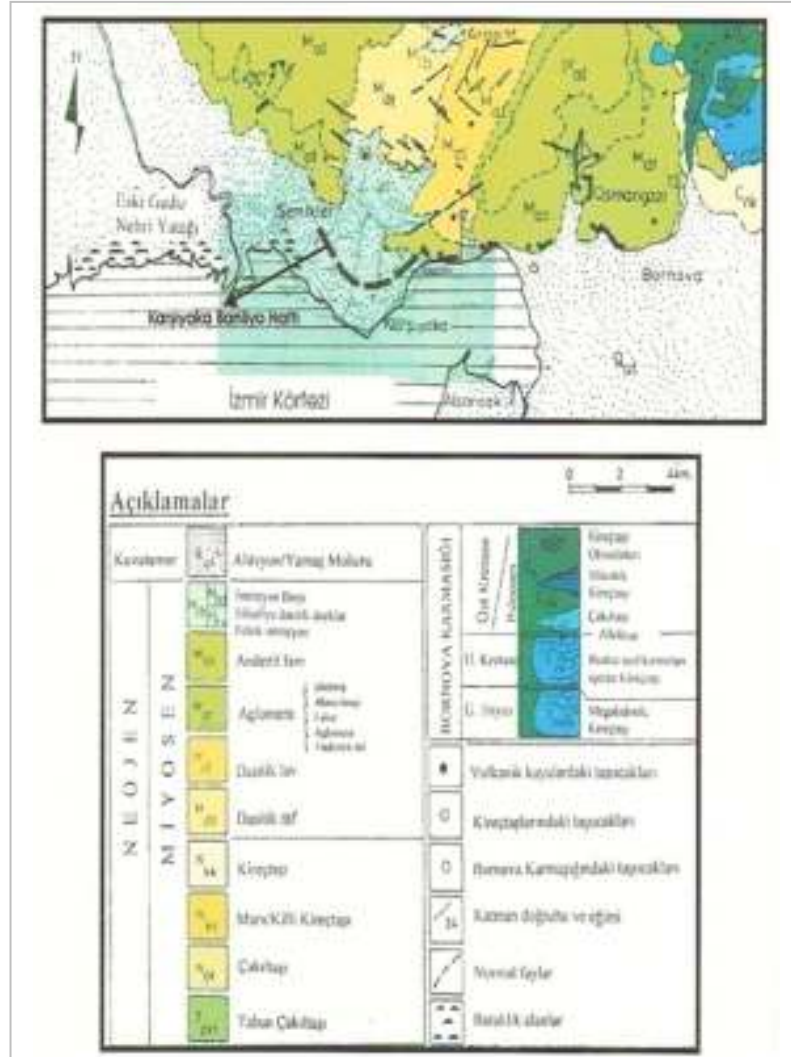
Giriş ve çıkış rampaları ile tünel ve istasyonlara ait özet bilgiler Tablo3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Projeye ait özet bilgiler.

Güzergah Özellikleri
Toplam Hat Uzunluğu: 3.283,32 m Tünel Rampaları: 1.143,32 m Tünel (Aç-Kapa): 1.260,00 m İstasyonlar: 880,00 m
İstasyonlar
Naldöken: Yer Üstü Alaybey: Tünelde Karşıyaka: Tünelde Nergis: Tünelde
Aç-Kapa Tüneller
KT1 (58,00 m): Giriş Rampası-Alaybey İstasyonu KT2 (399,78 m): Alaybey İstasyonu-Karşıyaka İstasyonu KT3 (737,22 m): Karşıyaka İstasyonu-Nergis İstasyonu KT4 (65 m): Nergis İstasyonu-Çıkış Rampası

3.2 Çalışma Sahasının Jeolojisi ve Zemin Şartları

İzmir’in kuzey kıyı bölgeleri Gediz Nehri’nin eski deltası olarak ortaya çıkmış ve zaman içerisinde çok yoğun bir şekilde yerleşim alanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bölgenin genel zemin yapısı nehrin uzun yıllar içerisinde bölgeye taşıdığı ve çok derinlere kadar ilerleyen alüvyonel özellikte zeminlerden oluşmaktadır. Bu zeminler, deltanın körfeze yakın kesimlerinde genellikle kil, silt türü kohezif özellikte, daha uzak kesimlerde ise granüler özellikte kum ve çakıl türü malzemelerden oluşmaktadır.



Şekil 3.4 Proje güzergahı ve yakın çevresi jeoloji haritası (Koca, 1995).

Genel zemin türü orta sıkı siltli kum ve yarı katı siltli kil türü zemin birimleridir. Bununla beraber bölgedeki zemin tür ve davranışları derinlikle oldukça farklı değişkenlikler arz edebilmektedir. Yer altı su seviyesi mevsimsel olarak değişkenlik göstermekle beraber, oldukça yüksek seviyelerde bulunması ve henüz konsolidasyonunu tamamlamamış ince malzemeden oluşan zemin tabakalarının varlığı yapılacak olan üst yapılar için detaylı genel zemin araştırmalarını ve uygun temel sistemi çözümlerinin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır.

Karşıyaka tüneli ve istasyonları, güzergah boyunca orta sıkı-sıkı siltli kum ve orta katı-katı kumlu siltli kil tabakaları baskın zemin yapısını oluşturmaktadır. Yüzeydeki 1,5-2,0 m kadar kalınlıktaki niteliksiz dolgu tabakasının altında siltli kum ve kumlu siltli kil tabakaları ardanmalı sıralanmaktadır.

Yapılan sondaj çalışmaları ve laboratuvar deneyleri sırasında derinlikleri 20–25 metre arasında değişen presyometre ve arazi permeabilite deneyleri, konik sondalama deneyi (CPT) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların teyidi amacıyla ise ek sondaj kuyuları açılmıştır. Çalışmalar sırasında alınan örselenmiş (SPT kaşık ve karot) ve örselenmemiş Shelby tüp örnekleri zemin mekaniği laboratuvar deneylerine tabi tutulmuştur. Bostanlı Deresi ile Naldöken arasındaki metro güzergâhı boyunca yukarıda bahsedilen çalışmalar sonucu oluşturulan sondaj logları, karotlu ilerlenen sondaj kuyularından elde edilen zemin numunelerinin tanımlanması, laboratuvar deney sonuçları ve konik sondalama penetrasyon deney (CPT) logları yardımıyla jeolojik kesitler elde edilmiştir.

Jeolojik kesitlere birlikte bakıldığında mevcut zeminler çökeltme ortamları açısından ikiye ayrılabilir:

1. Denizel Ortama Ait Çökeller: Yüzeyden 7–11 metre derinlikten itibaren başlayan ve oldukça kalın bir istif sunan, fosil içerikli çökellerdir.
2. Karasal Ortama Ait Çökeller (Akarsu Çökelleri): Yüzeyden itibaren kalınlığı 5–9 metre arasında değişen, Gediz Nehri'nin getirdiği alüvyonal çökellerin oluşturduğu zeminlerdir ve fosil içermezler.

Kesitler ortam koşulları dikkate alınmaksızın, sadece zemin cinsleri göz önüne alınarak incelendiğinde; profilin dört farklı zemin katmanından oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu katmanlar üstten alta doğru aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- Kalınlığı 2–4 metre arasında değişen dolgu malzemesi,
- Kalınlığı 3–10 metre arasında değişen, kil mercekleri içeren, killi-çakıllı-kumlu zeminler,
- Genellikle silt ve kum mercekleri içeren çakıllı siltli killer,
- Sadece silt merceklerini içeren, killi-çakıllı kumlar.

Aç-kapa tünel güzergâhı üzerinde jeolojik ve jeoteknik çalışmalara koşut olarak jeofizik arazi çalışmaları yapılmıştır. Jeofizik çalışmalarında; yeraltının yanal ve düşey yöndeki tabakalanma özelliklerini belirlemek amacıyla doğru akım öz direnç

tomografi, yer radarı (GPR) ve zemin dinamik özelliklerini araştırmak amacıyla sismik kırılma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu alışmalar sonucunda ölçü alımına elverişli hatlar boyunca toplanan jeofizik ve jeolojik veriler ile zemin sondaj log bilgileri birlikte değerlendirilmiş, metro güzergahının olası yüzey deformasyon özelliklerinin tanımlanmasına yardımcı zemin profil bilgileri ve dinamik zemin parametreleri elde edilmiştir.

3.3 Jeoteknik Analizlere Esas Zemin Profillerinin Değerlendirilmesi

Fizibilite etüdü sırasında elde edilen arazi ve laboratuvar verilerine ilave bilgi temin etmek üzere arazide pressiyometre, standart penetrasyon ve permeabilite deneyleri; zemin mekaniği laboratuvarında ise tüp ve karot örnekleri üzerinde doğal su içeriği, sınıflandırma (elek analizi ve kıvam limitleri), konsolidasyon ve üç eksenli basınç (UU) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, toplam 35 konumda konik penetrasyon deneyleri (CPT) gerçekleştirilmiştir. CPT deneyleri sonucunda zemin profilinin genelde 0-3,5 m aralığında siltli kilden, 3,5- 10,5 m arasında siltli kum ve kumdan, 10,5-15,0 m arasında kil ve organik kilden, 15,0- 20,0 m arasında ise siltli kum ve kumdan meydana geldiği görölmüştür. Deney bulgularına göre kumlu zeminler çoğunlukla sıkı ve çok sıkı durumdadır. Kil zeminler ise 0-3,5 m arasında orta katı ve katı, 10,5-15,0 m aralığında ise çok yumuşak ve yumuşak kıvamdadır.



Şekil 3.5 CPT deneyi, konik ucun zemine itilmesi.

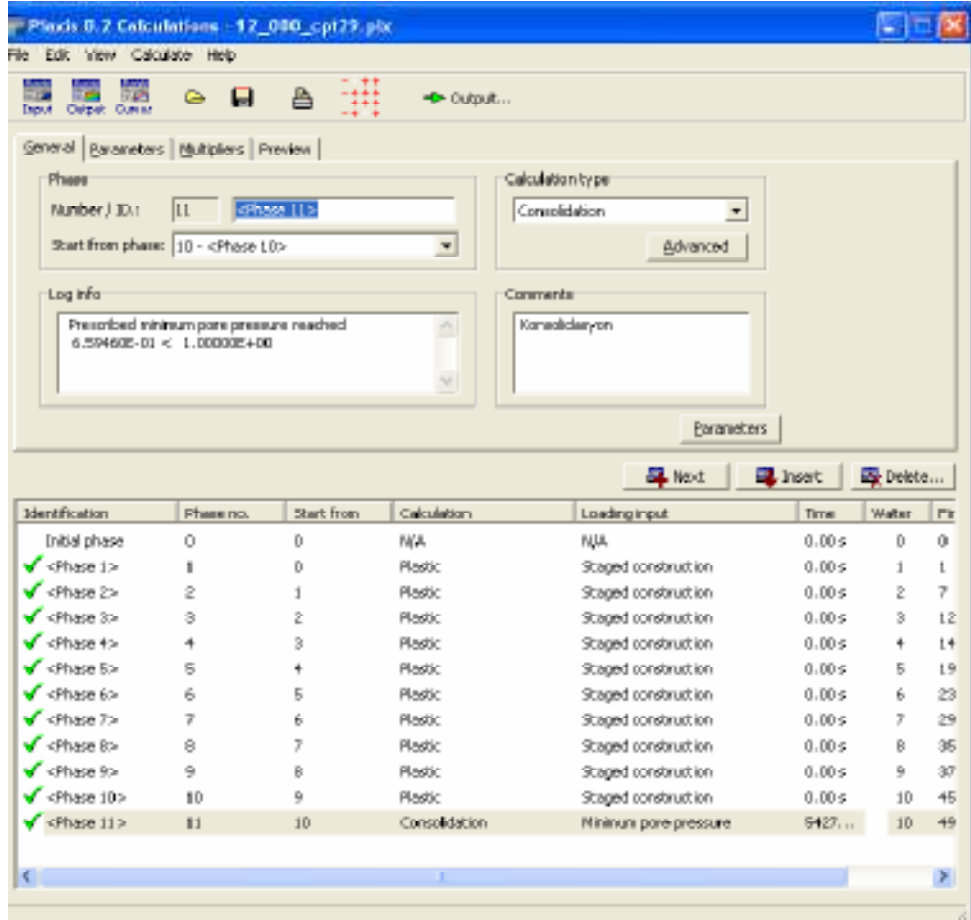
Pressiyometre amaçlı etüt sırasında her kuyuda 6 ayrı seviyede olmak üzere 14 kuyuda toplam 84 adet pressiyometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Pressiyometre kuyuları karotlu sondajla açılmış, bu sayede zemin profili hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca altı ayrı noktada toplam 6 adet arazi permeabilite deneyi amaçlı sondaj kuyusu açılmıştır. Bu sondajlarda SPT deneyleri yapılmış, SPT kaşığı, karot ve tüp zemin örnekleri alınmıştır.

Kesitte yer alan siltli kum tabakalarının SPT-N direnci 14~34 arasında bulgulanmıştır. Kumlu siltli kil tabakalarının SPT-N direnci ise 12~46 arasında değişmektedir. Derinlerde 20 m seviyelerinde bulgulan killi kum tabakalarının SPT dirençleri 25~50 arasındadır.

Zemin yüzeyinden yaklaşık 10 ila 15 m derinlikte bulunan ve ilk olarak pressiyometre ve arazi permeabilite deneyleri sondajları sırasında güzergah boyunca yaygın bir şekilde mevcudiyetinden şüphelenilen çok yumuşak-yumuşak kıvamdaki organik siltli kil/killi silt tabakasının varlığı CPT etüd bulguları ile teyit edilmiştir. Ayrıca kazık imalatları sırasında yapılan gözlemler, bu tabakaya ait çok düşük

drenajsız, konsolidasyonsuz (UU) üç eksenli basınç kohezyonu ve CPT uç direnci bulguları ile uyumludur. CPT deneylerinin hemen hemen tamamında 10-15 m aralığında çok düşük uç direnci ve eşdeğer SPT-N60 direnci gösteren çok yumuşak-yumuşak kıvamda siltli kil, killi silt tabakaları belirlenmiştir.

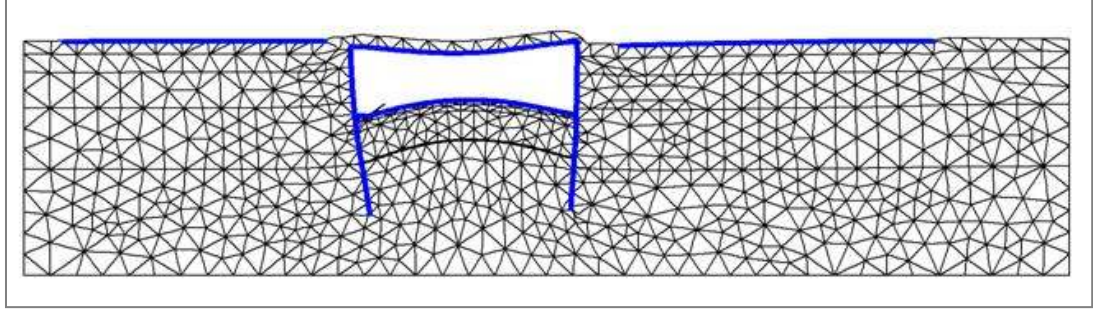
Yapılan zemin incelemeleri ve deney sonuçlarına bağlı zemin araştırmaları ile elde edilen jeoteknik verilere göre iksa sistemi, idealize edilmiş bir zemin profilinde değil de değişik noktalarda elde edilen zemin profilleri ve özelliklerine bağlı olarak güzergahın farklı noktaları için sonlu elemanlar modeliyle analiz edilmiş ve modellenmiştir. Modellerde analizin yapıldığı nokta civarında gerçekleştirilen araştırma ve yapılan deneyler sonucunda elde edilen parametreler kullanılmıştır. Böylelikle birçok farklı noktada o bölgedeki zemin koşulları dikkate alınarak iksa sisteminin performansı çevre koşulları da göz önüne alınmak suretiyle deformasyon tabanlı analizlerle değerlendirilmiştir. Analizler çerçevesinde bütün elemanlar ve zemin özellikleri model parametreleri olarak tanımlanmış ve sistem inşaat safhalarına uygun bir şekilde kademeli süreç durumu ile çözümlenmiştir. Oldukça ayrıntılı bir şekilde kurulan hesap modellerine ilişkin bir örnek Şekil 3.6'da görülebilir.



Şekil 3.6 Sonlu elemanlar analizleri hesap adımları (Altun, 2007).

Alaybey-Karşıyaka İstasyonları arasının büyük bölümü hariç diğer kısımların çoğunda, tünel ve istasyon taban radye seviyelerine yakın derinliklerde taşıma kapasitesi düşük, şekil değiştirme potansiyeli yüksek kohezyonlu zeminler bulunmaktadır. Bu zeminler nedeniyle kazıklar radye temel taban seviyesi altına kazı çukuruna doğru kapanmaya çalışmaktadır. Ayrıca zeminlerin deprem sırasında yumuşama arz etmesi ve zaten düşük olan mukavemet özelliklerinde azalma meydana gelmesi ve dayanımının rezidüel drenajsız kayma mukavemetine düşme riski yüksektir. Bu tür bir azalma durumunda iksa kazıklarına gelen yanıl yataklanma düşecek, kazıklarda yüksek deformasyon ve kesit tesirleri ortaya çıkacak, kazıklar taban radye seviyesi altında içeriye doğru kapanacaktır (Şekil 3.7). Bu davranış sırasında kazıklarda yüksek eğilme momentlerinin oluşması söz konusudur. Depremden hemen sonra işletme durumunda kalması gereken bu tesis için imal edilen kazıklı iksa sistemi kalıcı yapı olarak görev yapacağından kazıklara gelen

yataklanmanın azalması ve içeriye doğru kapanmaları işletme aşamasında istenmeyen bir durumdur. Benzer etkiler tünel yapım aşaması için de söz konusudur.

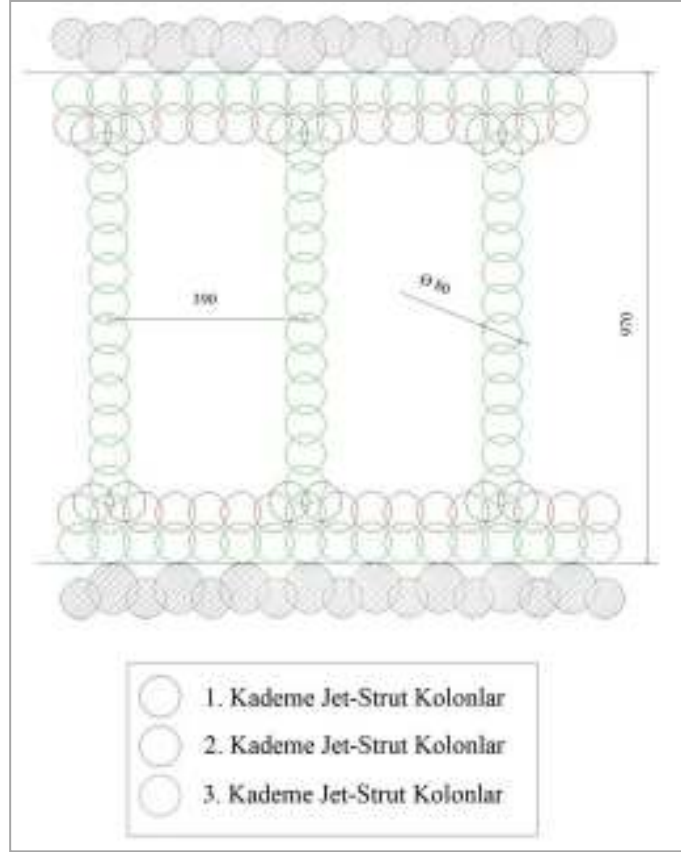


Şekil 3.7 Zemin iyileştirilmesi yapılmaksızın, statik ve dinamik yükler altında iksa sisteminin deformasyon modellemesi (Altun, 2007).

Yukarıda anılan nedenlerle söz konusu zayıf zemin tabakasında alınabilecek önlem olarak, tabakanın bulunduğu derinliklerde kazıklara içten destek sağlayacak bir sistemin oluşturulması ön görülmüştür. Bu doğrultuda güzergahın özellikle Karşıyaka ve Çıkış Rampası arasındaki bölümünde, radye temel altında belirli boy ve aralıklardaki jet-grout kolonlardan oluşan bir destek sistemi projelendirilmiştir. Fore kazıklarla beraber geçirimsiz iksa perdesini oluşturan jet-grout kolonlardan farklı olarak fore kazıklara içten destek (strut) sağlama amaçlı bu kolonlar proje dahilinde jet-strut kolonlar olarak isimlendirilmiştir. Güzergahın diğer kısımlarında zemin koşullarının fore kazıklar için nispeten yeterli pasif desteği sağladığı yapılan analizler sonucunda belirlenmiş ve bu kısımlarda destek sisteminin uygulanması gerekmediği sonucuna ulaşılmıştır.

Yüksek basınçla enjeksiyon şerbetinin zemini yırtarak ve zeminle birleşerek soilcrete kolonlar oluşturması olarak kısaca tanımlayabileceğimiz jet-grouting yöntemi ile güzergahta zemin koşullarının belirli kısım ve derinliklerde zayıf davranışlar gösterdiği, radye temel altında jet-grout kolonlarla destek sistemi oluşturulması planlanmıştır. Buna göre güzergahta Karşıyaka İstasyon'un bir kısmı ile KT3 Tüneli, Nergis İstasyon ve KT4 Tüneli için kazı tabanı altında 3 m boyunda, 3,9 m eksenden eksene aralıklı ve üç kademe halinde gerçekleştirilmek üzere 800 mm çaplı jet-grout kolonlarla dikdörtgen şeklindeki hücrelerden oluşan destek sistemi projelendirilmiştir (Şekil3.8).

Güzergahta söz konusu uygulamanın gerçekleştirileceği kısımlar için arazi deneyleri ve sondajlar ışığında oluşturulan zemin profili, çalışmanın Ekler Bölümü'nde sunulmuştur.



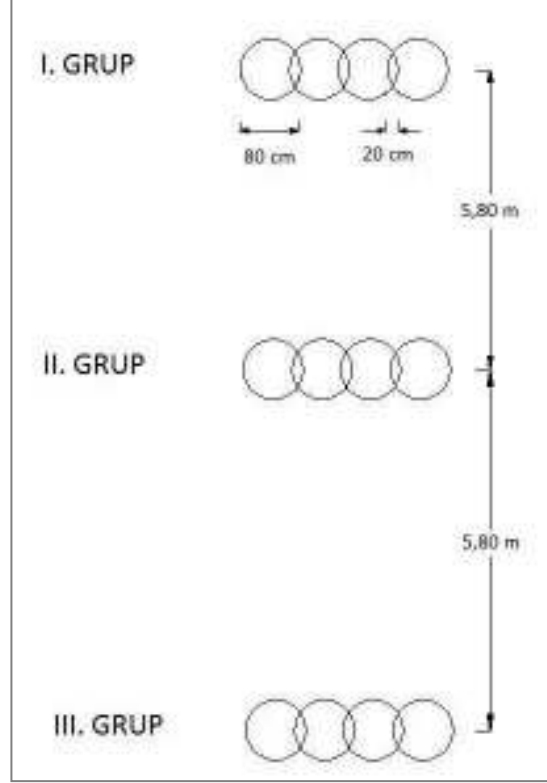
Şekil 3.8 Tüneller için hazırlanan jet-grout kolonları planı.

3.4 Deneme Kolonları

Projede ön görülen jet-grout kolon çapı ve düşeyliliğinin kontrolü, projede belirlenen değerlerinin yerinde sağlanabilmesi ve güzergahta iyileştirmenin yapılacağı zemin şartlarında (yumuşak-çok yumuşak organik silt-kil) kullanılacak olan jet-grout parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla değişik parametreler kullanılarak deneme kolonları imal edilmiştir.

Deneme kolonları imalatları için Nergis İstasyon bölgesi seçilmiş, birbirleriyle 20 cm kesişen, 800 mm çaplı kolonlar oluşturulması ön görüşüyle hatta dik yönde, her birinde 4 adet ve gruplar arası 5,80 m olmak üzere üç farklı grupta toplam 12 adet jet-grout kolon imal edilmiştir (Şekil 3,9). Güzergah boyunca belirlenen zayıf zemin özelliklerine sahip kısımların, tabii zemin kotuna göre ortalama -8,00 ile -13,00 m'ler

arasında olması nedeniyle oluşturulacak olan 3 m'lik jet-grout deneme kolonları, -8,00 ile -11,00 m aralarında imal edilmiştir.



Şekil 3.9 Deneme kolonları planı.

Deney parametrelerinden nozul çapı 2,2 mm, dönme hızı 16 dev./dak. ve enjeksiyon debisi 119,9 lt/dak. olmak üzere her üç grup için aynı değerler belirlenmiştir. Çimento/su oranı I. grup için 1,1/1, II. grup için 1/1, III. grup için 1,3/1, enjeksiyon basıncı I. grup için 480 bar, II. ve III. grup için 500 bar, çekme hızı ise I. ve III. grup için 35 cm/dak. ve II. grup için 30 cm/dak. olarak seçilmiştir (Tablo 3.2). Her üç grupta da birinci ve üçüncü kolonlar denemenin ilk günü imal edilirken, enjeksiyon şerbeti priz süresinin kesişen kolon imalatı üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla ara kolonların imatları için I. Grupta 48 saat, II. Grupta 72 saat ve III. Grupta 96 saat beklenilmiştir.

Tablo 3.2 Deney parametreleri tablosu.

DENEY GRUP NO	1	2	3
Yeri (km)	11 + 940,00	11 + 945,80	11 + 951,60
Kolon Çapı (cm)	80	80	80
Priz Süresi (gün)	1 + 2	1 + 3	1 + 4
Çimento/Su Oranı	1,1/1	1/1	1,3/1
Enjeksiyon Basıncı (bar)	480	500	500
Enjeksiyon Debisi (lt/dk)	119,9	119,9	119,9
Nozul Çapı (mm)	2,2	2,2	2,2
Çekme Hızı (cm/dk)	35	30	35
Dönme Hızı (dev/dk)	16	16	16

Deney kolonları imalatları ardından gerekli priz alma süresi sonuna binaen her grup kazılarak, kolonların etrafı açılmak suretiyle incelenmiştir (Şekil 3.10). Belirlenen parametrelere göre istenen oranda kesişen kolonlar elde edilirken, 800 mm çapında olması ön görülerek imal edilen jet-grout deneme kolonlarının yapılan incelemeler neticesinde ortalama 700 mm çapında olduğu ölçülmüştür.



Şekil 3.10 Deney kolonlarının etrafının açılması.



Şekil 3.11 Çeşitli seviyelerden kolon çapı tespiti.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler neticesinde güvenli bir uygulama açısından yapım parametreleri II. grup seçilmek kaydıyla 700 mm çapında jet-grout kolonlar oluşturulabileceği kabul edilerek yeniden bir projelendirme yapılmış ve uygulamalar bu proje parametreleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.5 Kalite Kontrol Çalışmaları

İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında, zemin özelliklerinden dolayı bir güvenlik uygulaması olarak imal edilen jet-grout kolonları ile ilgili olarak tüm imalat aşamaları dikkatlice izlenmiştir. Her bir kolon için uygulama parametreleri kontrol edilmiş, tüm veriler raporlanarak (Şekil 3.12) takip edilmiştir.

JET-STRUT GÜNLÜK İMALAT RAPORU													TARİH	02.04.2007
ÇALIŞMA BÖLGESİ	KOLON ADI	KM	KOLON NO	MEVCUT ZEMİN KOTU	KOLON ALT KOTU	KOLON BOYU (m)	BOŞ DELGİ BOYU (m)	BAŞLAMA	BİTİŞ	ENJ. SÜRESİ (dak.)	BASINÇ (bar)	DÖNME HIZI (dev/dak)	ENJ. MİKTARI (kg)	ÇİMENTO MİKTARI (kg)
NERST	828 (R)	11+935,93	1224	2,22	-9,62	3	8,84	08:23	08:36	10	500	16	1740	870
NERST	831 (R)	11+931,24	1227	2,18	-9,62	3	8,80	08:37	08:49	10	500	16	1730	865
NERST	836 (R)	11+920,37	1232	2,08	-9,62	3	8,70	08:52	09:05	10	500	16	1740	870
NERST	917 (L)	11+947,77	1363	2,43	-9,62	3	9,05	09:06	09:18	10	500	16	1730	865
NERST	920 (L)	11+945,53	1366	2,37	-9,62	3	8,99	09:19	09:31	10	500	16	1720	860
NERST	888 (R)	11+966,08	1406	2,40	-9,62	3	9,02	09:32	09:44	10	500	16	1730	865
NERST	892 (R)	11+963,88	1410	2,48	-9,62	3	9,10	09:45	09:57	10	500	16	1740	870
NERST	895 (R)	11+961,64	1413	2,48	-9,62	3	9,10	09:59	10:11	10	500	16	1740	870
NERST	902 (R)	11+957,20	1420	2,48	-9,62	3	9,10	10:19	10:31	10	500	16	1730	865
NERST	907 (R)	11+953,86	1425	2,47	-9,62	3	9,09	10:34	10:46	10	500	16	1720	860
NERST	911 (R)	11+951,66	1429	2,41	-9,62	3	9,03	10:48	11:01	10	500	16	1740	870
NERST	914 (R)	11+949,42	1432	2,39	-9,62	3	9,01	11:06	11:20	10	500	16	1720	860
NERST	919 (R)	11+946,08	1437	2,40	-9,62	3	9,02	11:25	11:39	10	500	16	1730	865
NERST	923 (R)	11+943,88	1441	2,36	-9,62	3	8,98	11:43	11:56	10	500	16	1740	870
NERST	926 (R)	11+941,64	1444	2,32	-9,62	3	8,94	12:01	12:14	10	500	16	1750	875
NERST	931 (R)	11+938,30	1449	2,02	-9,62	3	8,64	12:48	13:00	10	500	16	1740	870
NERST	935 (R)	11+936,10	1453	2,04	-9,62	3	8,66	13:22	13:42	10	500	16	1730	865
NERST	1007 (L)	11+936,10	1597	2,50	-9,62	3	9,12	14:52	15:12	10	500	16	1740	870
NERST	1010 (L)	11+933,86	1600	2,58	-9,62	3	9,20	15:14	15:31	10	500	16	1730	865
NERST	1007 (R)	11+958,87	1669	2,46	-9,62	3	9,08	15:33	15:47	10	500	16	1720	860
NERST	1010 (R)	11+958,87	1672	2,43	-9,62	3	9,05	15:49	16:03	10	500	16	1740	870
NERST	1015 (R)	11+958,87	1677	2,42	-9,62	3	9,04	16:05	16:20	10	500	16	1750	875
NERST	1019 (R)	11+958,87	1681	2,40	-9,62	3	9,02	16:22	16:34	10	500	16	1740	870
NERST	1022 (R)	11+958,87	1684	2,25	-9,62	3	8,87	16:36	16:49	10	500	16	1750	875
NERST	1027 (R)	11+958,87	1689	2,31	-9,62	3	8,93	16:55	17:07	10	500	16	1730	865

Şekil 3.12 Nergis İstasyon bölgesindeki ekiplerden biri tarafından gerçekleştirilen gündüz vardiyası imalatları günlük raporu.

Kolon imalatının projenin hangi tünel ya da istasyon bölgesinde gerçekleştiğinin belirtildiği çalışma bölgesi, projeye göre Naldöken İstasyonu'ndan Nergis yönüne doğru KM artış istikametinde güzergahta bulunduğu tarafa göre isimlendirilmiş kolon adı, güzergahtaki konumunu belirtir KM, çalışılan bölgedeki numarasını belirten kolon no, imalatı gerçekleştirilen kolonun delgiye başlandığı zemin kotunu veren mevcut zemin kotu, delginin tamamlanıp jet enjeksiyon işleminin başladığı derinliği veren kolon alt kotu, tüm jet-grout kolonlarda ortak olan kolon boyu, oluşturulan kolonun üst kotundan mevcut zemin kotuna kadar olan mesafeyi gösteren boş delgi boyu, delgi işlemi başlangıcını zamanını belirten başlama, jet enjeksiyon işlemi ardından delgi makinesi takımının kuyudan ayrılmadan hemen önceki zamanı belirten bitiş, jet enjeksiyonun başlama ve bitiş zaman aralığını gösteren enjeksiyon süresi, enjeksiyon basıncı, dönme hızı, kolon için harcanan ve mikser ünitesindeki kumanda odasından elektronik tartı vasıtasıyla miktarı kolaylıkla takip edilen enjeksiyon ve çimento miktarı bilgilerinin yer aldığı günlük raporlar gündüz ve gece vardiyaları ayrı ayrı olmak üzere her ekip için kayıt altına alınmıştır. Böylelikle bu denli yoğun imalatların gerçekleştiği bir ortamda her bir kolon için uygulama parametrelerine bağlı kalınarak imalat aşamaları takip edilmiş, kullanılan malzeme miktarları tespit edilmiştir. Enjeksiyon şerbetinin katı bir form oluşturuncaya kadar geçirdiği priz süresi sonunda etrafındaki kolonların yine priz süreleri hesaba katılarak imalatlarının gerçekleştirilmesi, önceden belirlenen imalat sırası ile yapım aşamalarının takibiyle sağlanmıştır.

Elde edilmek istenen kolon çapının oluşumundaki en önemli etkenlerden biri olan enjeksiyon basıncı, jet enjeksiyon işlemi başlangıcı ile pompa setindeki basınç ölçerden ayarlanmaktadır. Delgi makinesinin çalıştığı bölge ile pompa seti arasındaki mesafede, pompa setinden delgi makinesine enjeksiyon şerbetini yüksek basınçlarda taşıyan enjeksiyon hortum uzunluğuna bağlı olarak basınç kayıpları yaşanabilir. Uygulamaya esas enjeksiyon basınç değerinin sağlanması adına ekiplerin işe başladığı ilk anda, pompa seti ile delgi makinesi arası mesafeye bağlı olarak enjeksiyon hortumunun uzatılması ya da kısaltılması durumlarında ve haftalık periyotlarda enjeksiyon hortumuna manometre bağlanarak basınç değeri ayarlanmıştır (Şekil 3.13). Delgi makinesi hava-su başlığından çıkan enjeksiyon

hortumunun ilk bağlantı manşonuna monte edilen manometre ile 500 bar'lık enjeksiyon basınç değeri için pompa setinde okunması gereken basınç değerleri bulunmuştur.



Şekil 3.13 Enjeksiyon hortumuna manometre bağlanması ile enjeksiyon basınç değerinin takibi.

Çimento/su oranı 1 olmak üzere PÇ 42,5 (28 günlük basınç dayanım değeri 42,5 N/mm² olan portland çimentosu) kalitesindeki çimento ile hazırlanan enjeksiyon şerbetinden proje süresince küp numuneler alınmış ve bu numunelerin 4, 7, 14 ve 28 günlük basınç mukavemet değerleri tespit edilmiştir. Her bir deney için mikser ünitesindeki karıştırma tanklarından 8 adet numune alınarak şantiye laboratuvarında serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre elde edilen veriler, çimento/su oranı 1 olan enjeksiyon şerbeti için öngörülen basınç mukavemet değeri olan 10-50 N/mm² aralığında bulunmuştur (Akman ve Mutlu, 1999).

Tablo 3.3 Enjeksiyon şerbeti küp numuneleri basınç mukavemet değerleri.

NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 19.02.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm²)	
23.02.2007	4,60	5,00	23,00	2200	9,57	10,34
	4,50	5,00	22,50	2500	11,11	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
26.02.2007	4,50	5,00	22,50	2750	12,22	13,02
	4,20	5,00	21,00	2900	13,81	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
05.03.2007	4,40	5,00	22,00	3800	17,27	17,11
	4,60	5,00	23,00	3900	16,96	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
19.03.2007	4,50	5,00	22,50	4850	21,56	21,91
	4,40	5,00	22,00	4900	22,27	
NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 11.03.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm²)	
15.03.2007	4,10	5,00	20,50	2080	10,15	9,85
	4,50	5,00	22,50	2150	9,56	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
18.03.2007	4,30	5,00	21,50	2870	13,35	12,82
	4,50	5,00	22,50	2765	12,29	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
25.03.2007	4,40	5,00	22,00	3507	15,94	15,97
	4,50	5,00	22,50	3600	16	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
08.04.2007	4,40	5,00	22,00	4820	21,91	21,87
	4,50	5,00	22,50	4912	21,83	
NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 22.03.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm²)	
26.03.2007	4,20	5,00	21,00	1890	9,00	9,39
	4,40	5,00	22,00	2150	9,77	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
29.03.2007	4,00	5,00	20,00	2320	11,60	11,74
	4,00	5,00	20,00	2375	11,88	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
05.04.2007	4,30	5,00	21,50	3380	15,72	15,67
	4,40	5,00	22,00	3435	15,61	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
19.04.2007	4,20	5,00	21,00	4510	21,48	21,18
	4,30	5,00	21,50	4492	20,89	

Tablo 3.3 Enjeksiyon şerbeti küp numuneleri basınç mukavemet değerleri (devamı).

NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 03.04.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm ²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm ²)	
07.04.2007	4,40	5,00	22,00	2180	9,91	9,67
	4,50	5,00	22,50	2120	9,42	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
10.04.2007	4,50	5,00	22,50	2665	11,80	12,04
	4,50	5,00	22,50	2765	12,29	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
17.04.2007	4,50	5,00	22,50	3430	15,24	15,85
	4,40	5,00	22,00	3620	16,45	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
01.05.2007	4,30	5,00	21,50	4290	19,95	20,35
	4,30	5,00	21,50	4460	20,74	
NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 11.04.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm ²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm ²)	
15.04.2007	4,10	5,00	20,50	2270	11,07	10,42
	4,20	5,00	21,00	2050	9,76	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
18.04.2007	4,30	5,00	21,50	3190	14,84	14,91
	4,50	5,00	22,50	3370	14,98	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
25.04.2007	4,20	5,00	21,00	4100	19,52	19,18
	4,30	5,00	21,50	4050	18,84	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
09.05.2007	4,10	5,00	20,50	5260	25,66	24,62
	4,30	5,00	21,50	5070	23,58	
NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 23.05.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm ²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm ²)	
27.05.2007	4,50	5,00	22,50	2048	9,10	9,60
	4,30	5,00	21,40	2160	10,09	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
30.05.2007	4,50	5,00	22,50	3050	13,56	14,56
	4,10	5,00	20,50	3190	15,56	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
06.06.2007	4,20	5,00	20,08	3680	17,69	17,50
	4,30	5,00	21,50	3720	17,30	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
20.06.2007	4,50	5,00	22,80	5322	23,34	23,62
	4,30	5,00	21,50	5140	23,91	

Tablo 3.3 Enjeksiyon şerbeti küp numuneleri basınç mukavemet değerleri (devamı).

NUMUNE ALINIŞ TARİHİ 05.06.2007						
TARİH	EN (cm)	BOY (cm)	BASINÇ YÜZEYİ (cm ²)	BASINÇ YÜKÜ (kg)	4 GÜNLÜK (N/mm ²)	
09.06.2007	4,20	5,00	21,00	2170	10,33	9,95
	4,30	5,00	21,50	2055	9,56	
					7 GÜNLÜK (N/mm²)	
12.06.2007	4,40	5,00	22,00	3190	14,50	15,04
	4,20	5,00	21,00	3270	15,57	
					14 GÜNLÜK (N/mm²)	
19.06.2007	4,10	5,00	20,50	4100	20,00	19,42
	4,30	5,00	21,50	4050	18,84	
					28 GÜNLÜK (N/mm²)	
03.07.2007	4,30	5,00	21,50	5380	25,02	24,49
	4,40	5,00	22,00	5270	23,95	

Enjeksiyon şerbetinin nozullardan çıkarken taşıdığı yüksek kinetik enerjiyle etrafındaki zemini parçalayıp karıştırarak, zemin-çimento şerbeti karışımından oluşturduğu kolonların basınç mukavemet değerleri tayini amacıyla Tablo 3.3'de imalat bilgileri verilen kolondan karot numuneleri alınmış, özel bir laboratuarda serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.4 Karot numunesi alınan kolonun imalat bilgileri.

TARİH	ÇALIŞMA BÖLGESİ	KOLON ADI	KM	KOLON NO	MEVCUT ZEMİN KOTU	KOLON ALT KOTU	KOLON BOYU (m)
14.02.2007	ST4	338 (L)	12+069,85	649	2,35	-8,77	3,00
BOŞ DELGİ BOYU	BAŞLAMA	BİTİŞ	ENJ. SÜRESİ (dak.)	BASINÇ (bar)	DÖNME HIZI (dev/dak)	ENJ. MİKTARI (kg)	ÇİMENTO MİKTARI (kg)
8,12	01:27	01:40	10	500	16	1797	941

Projelendirme aşamasında jet-grout kolonlar için proje kriteri olarak belirlenen basınç dayanım değeri 20 kg/cm² (1,96 N/mm²)'dir. Deney sonucunda elde edilen basınç mukavemet değeri (Tablo 3.4) ile projelendirme aşamasında jet-grout kolonlar için öngörülen basınç mukavemet değeri mukayese edilmiş ve proje kriterinin sağlandığı görülmüştür. Söz konusu değerler, literatürde benzer zeminler için önerilen jet-grout kolon basınç mukavemet değerleri (18-30 kg/cm²) ile de uyumludur (Melegari ve Garassino, 1997). Sonuç olarak deney sonrasında belirlenen

değerin tasarımında kullanılan değerleri büyük güvenlik faktörleri ile sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 3.4 Karot numuneleri basınç dayanımları.

Ortalama Çapı D(mm)	Karot Boyu h(mm)	Basınç Yüzeği A(cm ²)	Basınç Yüğü P(N)	Karot Çapı Düzeltme Faktörü	Boy/Çap Oranı Düzeltme Faktörü 1/1 - 1,00	Basınç Mukavemeti $f_{sil} = f_{küp200} \cdot P/A \cdot x1,00$
72	72	40,69	52200	1,000	1,000	12,83
72	72	40,69	46330	1,000	1,000	11,39
72	72	40,69	52200	1,000	1,000	12,83
Ortalama						12,35 N/mm ²

Enjeksiyon şerbetinin yüksek basınç altında zemin içine püskürtülerek çevredeki zemini parçalaması ve parçalanmış zeminin bir kısmının bu şerbetle karıştırılması sonucu oluşan zemin-çimento karışımı yapının ihtiva ettiği zemin özellikleri (yumuşak-çok yumuşak organik silt-kil), çimento/su oranı 1/1 olan homojen yapıdaki enjeksiyon şerbeti basınç mukavemet değerleri ile jet-grout kolon basınç mukavemet değerleri arasındaki farkı meydana getirmektedir.

Jet-grout kolon yapımının tamamlandığı bölgelerde tünel kazısı işleri gerçekleştirilirken, oluşturulan kolonların radye alt kotu seviyesindeki çapları zaman zaman kontrol edilmiştir (Şekil 3.14). Yapılan gözlemler ve ölçümler neticesinde projeye esas parametrelerle kolon çaplarının 70 cm'lik proje değerini sağladığı görülmüştür. Ayrıca beş kademedan oluşan jet-grout kolon düzeninin sahaya başarıyla apliance edilerek imalatların bu düzende gerçekleştirildiği görülmüştür.



Şekil 3.14 Tünel kazısı sonrası jet-grout kolon çaplarının incelemesi.

BÖLÜM DÖRT

JET-GROUT İMALATLARI

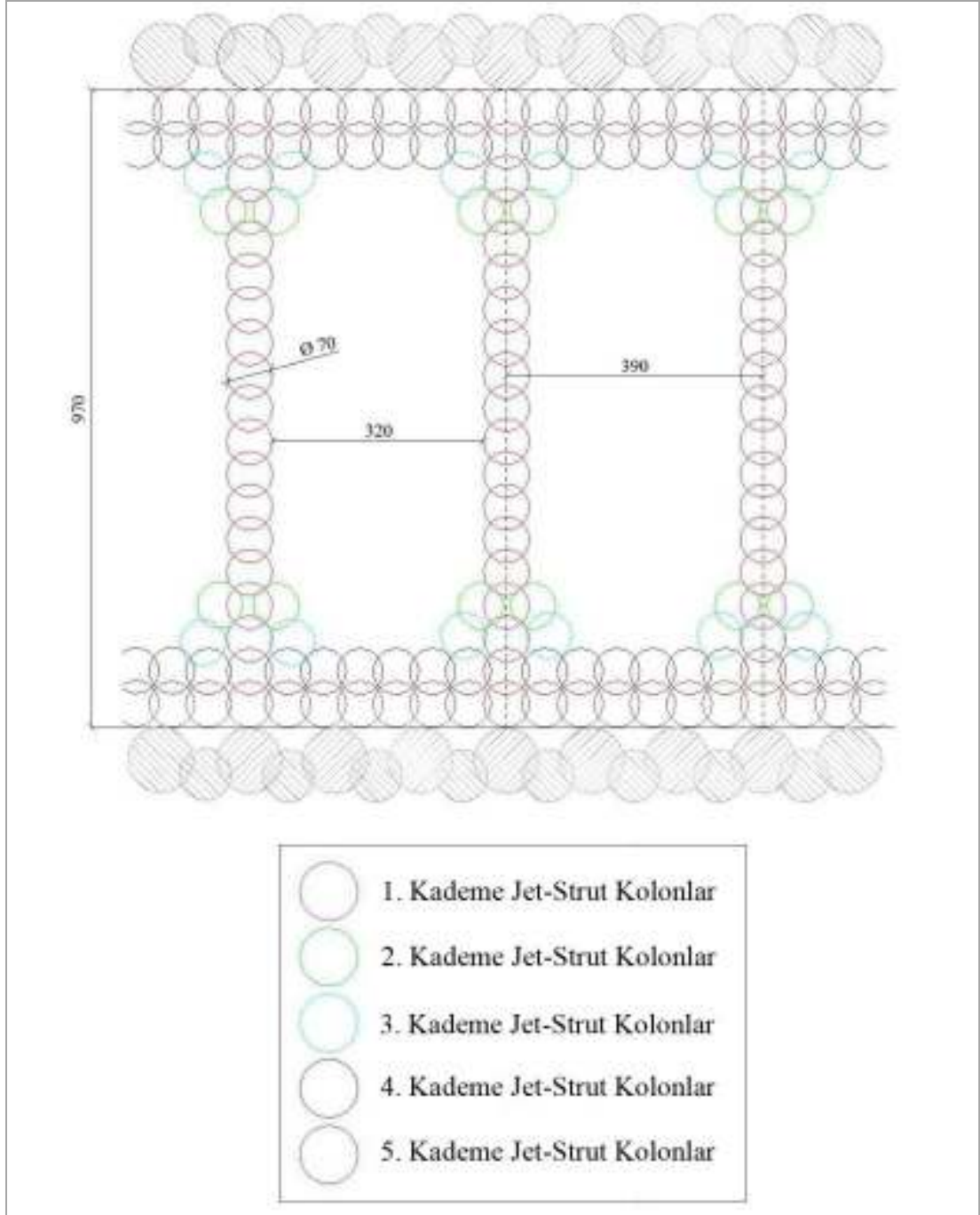
İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında, zemin koşullarının belirli kısımlar ve derinliklerde zayıf davranışlar gösterdiği güzergahta geçirimsiz iksa perdesi elemanlarından fore kazıkların içeriye doğru kapanmasını önlemek amacıyla radye temel taban seviyesi altında imal edilen jet-grout kolonları amaca uygun olması nedeniyle delgi ve enjeksiyon işlemlerinin tek kanallı tijle yapılmakta olduğu jet 1 yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Değişik parametreler kullanılarak oluşturulan deneme kolonlarından elde edilen veriler neticesinde uygulamaya esas imalat parametreleri;

- Çimento/su oranı 1/1
- Enjeksiyon basıncı 500 bar
- Enjeksiyon debisi 119,9 lt/dak.
- Nozul çapı 2,2 mm
- Çekme hızı 30 cm/dak.
- Dönme hızı 16 dev./dak.

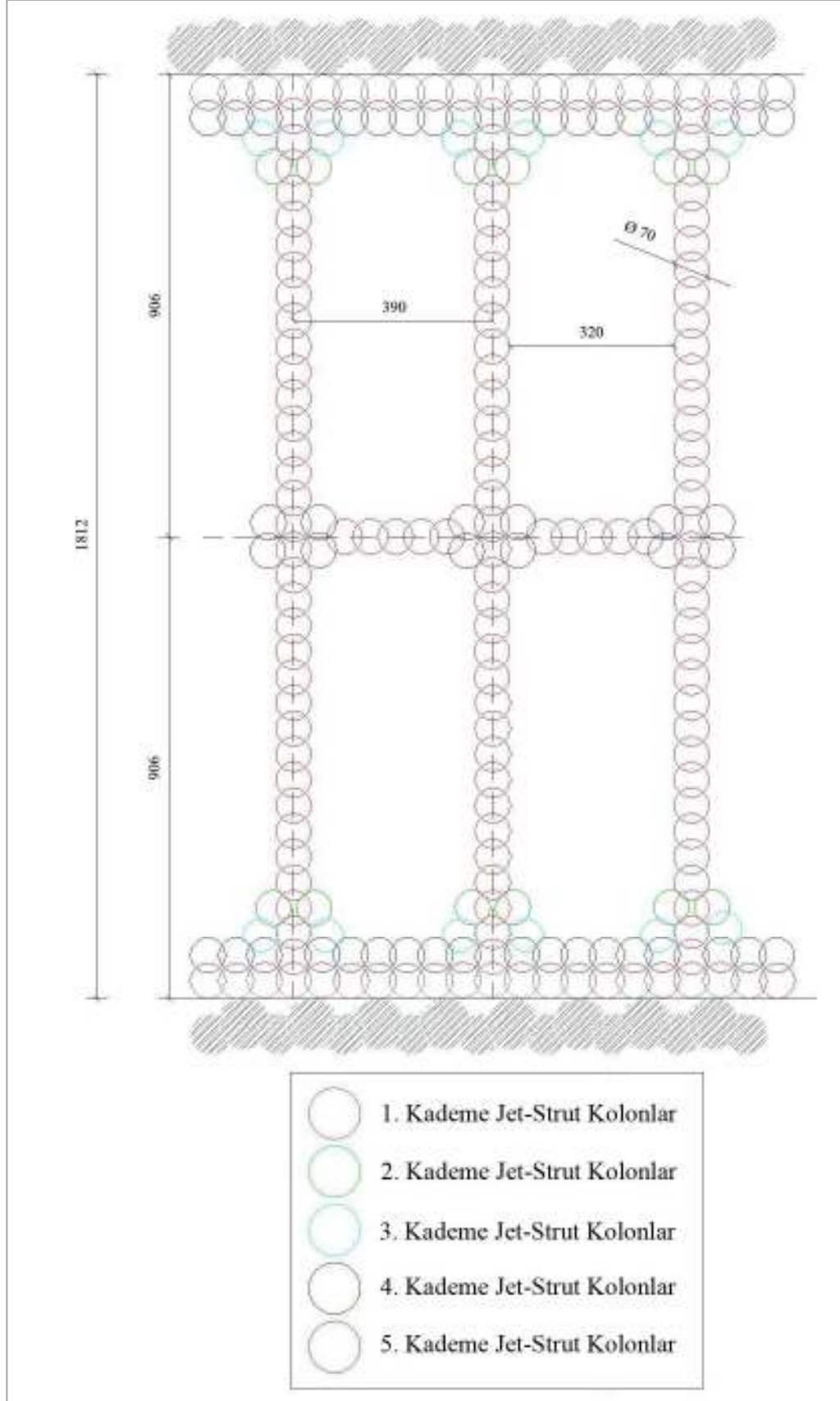
olmak üzere jet-grout kolon imalatları gerçekleştirilmiştir.

Geçirimsiz perde duvar boyunca güzergaha paralel iki sıra halinde kesişen kolonlar (4. ve 5. kademe kolonlar), güzergaha dik yönde 3.90 m aralıklarla kesişen kolonlarla birleştiği bölümlerde 1., 2. ve 3. kademe kolonları oluşturmak suretiyle dikdörtgen şeklinde hücrelerden meydana gelen anolar şeklinde bir düzende uygulama projesi tasarlanmış ve tatbik edilmiştir. Daha geniş kesit alanına sahip olmaları nedeniyle istasyonlarda tünellerden farklı olarak güzergaha paralel 5. kademe kolonlardan oluşan bir sıra kesişen kolon ve bunların güzergaha dik aksla birleştiği bölümlere ilaveten 4. kademe kolonlarla anolar oluşturulmuştur (Şekil 4.1).

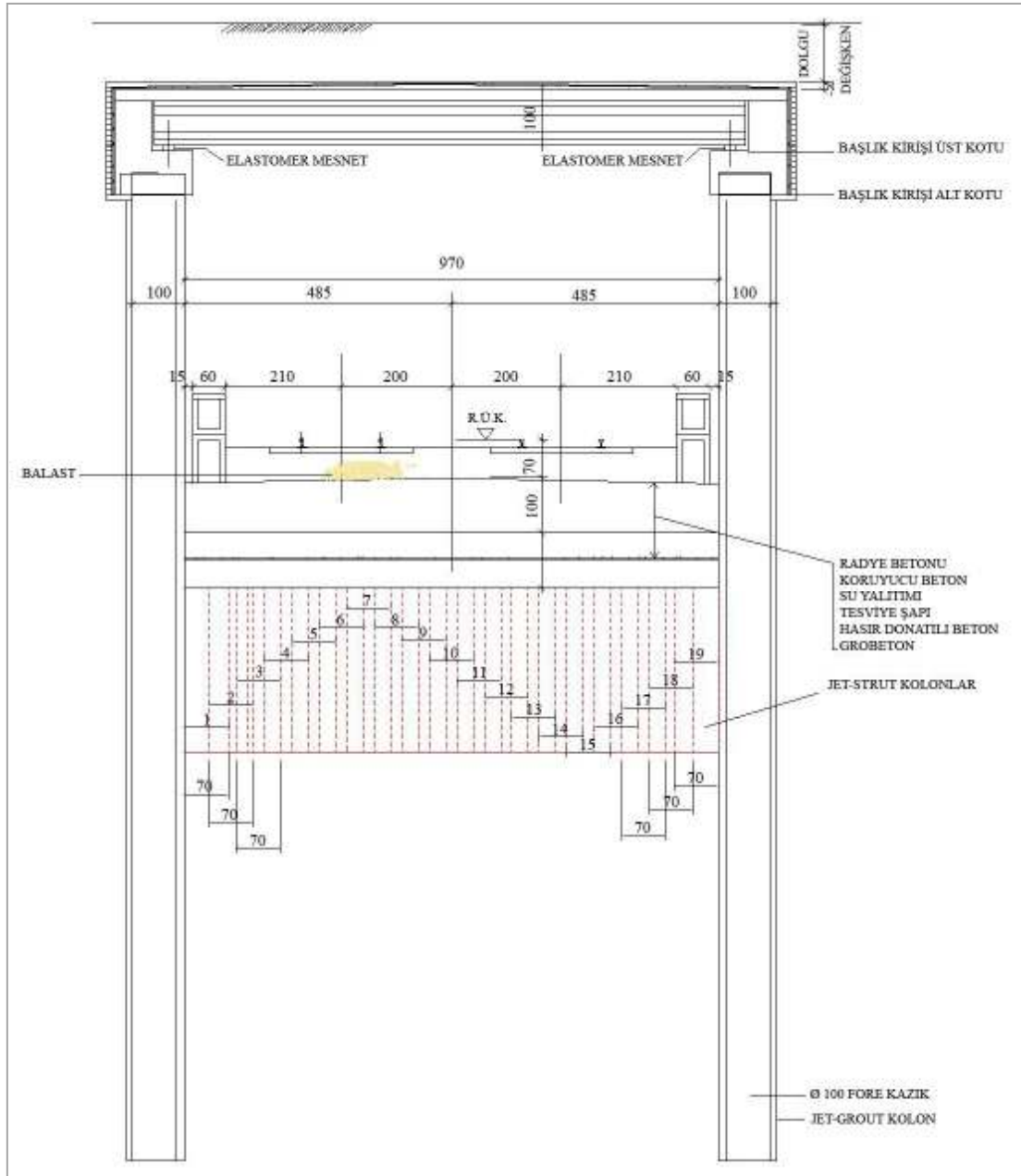
Beş farklı kademede birbirleriyle 20 cm kesişen, 700 mm çapında ve 3 m boyunda oluşturulan jet-grout kolonları, imalatlar esnasında kesişen iki kolondan birinin imalatı ardından diğer kolon imalatı için 72 saatlik priz süresi beklenilmiştir.



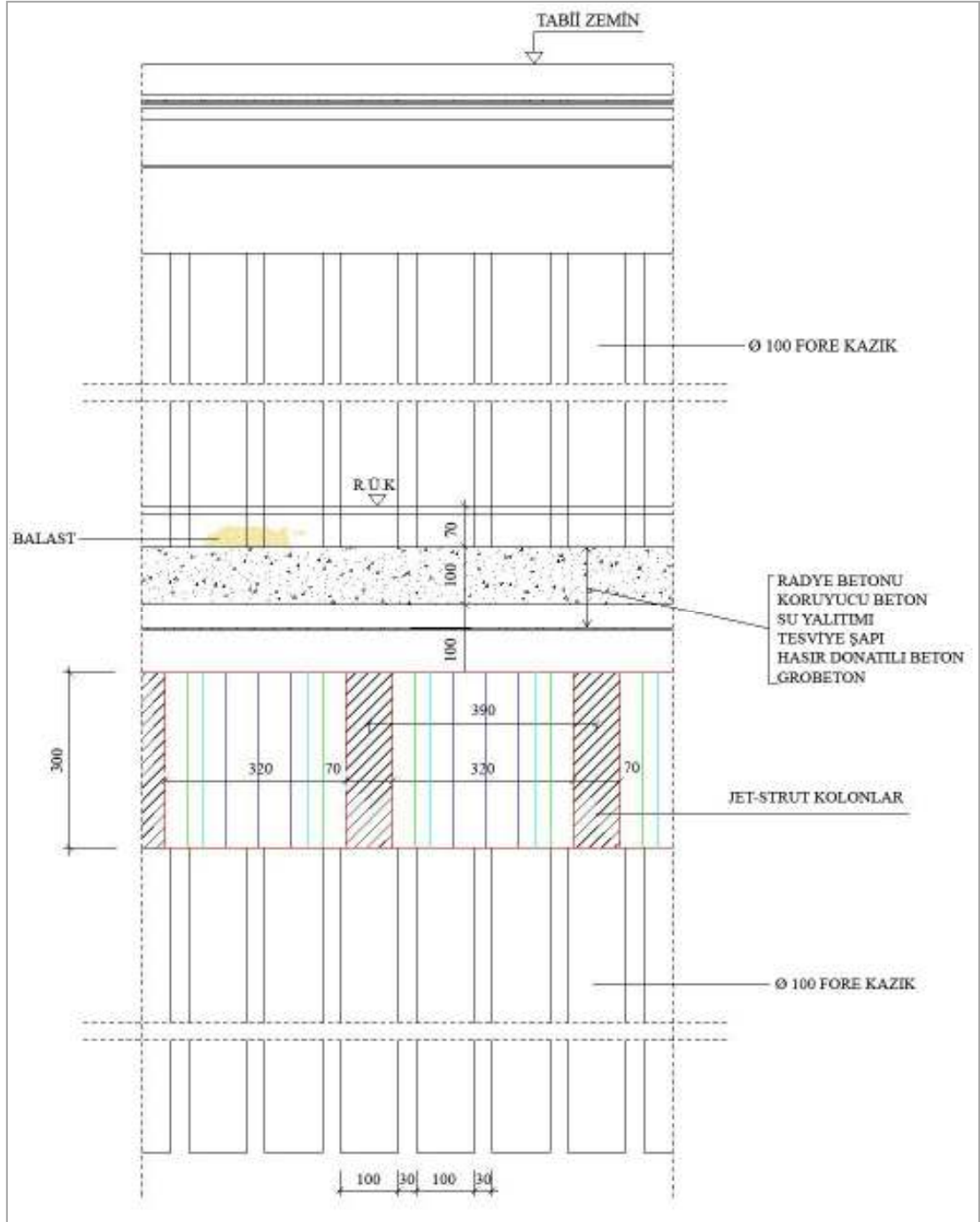
Şekil 4.1 Tüneller için jet-grout kolonları planı.



Şekil 4.2 İstasyonlar için jet-grout kolonları planı.



Şekil 4.3 Tünel enkesit planı.



Şekil 4.4 Tünel boykesit planı.

Jet-grout kolonlar, sahada yapılan delgi ve bu esnada pompa setinde hazırlanan enjeksiyon şerbetinin delgi sonrasında pompa ünitesi tarafından yüksek basınçla basılması, delgi makinesinin belirlenen çekme hızında döngüsel hareketi sonucu enjeksiyon şerbetinin zemini yırtarak ve zeminle birleşerek oluşturulur.

Öncelikli olarak delgi makineleri ve personel için uygun çalışma ortamının sağlanabilmesi ve imal edilecek kolonların istenilen parametrelerde oluşturulabilmesi açısından, yer altı su seviyesinden ortalama 50 cm yukarıda olacak şekilde çalışma platformu hazırlanmıştır. Priz bekleme süreleri göz önüne alınarak planlanan sıralarına göre verilen aplikasyonlarda belirtilen derinliğe kadar delgi işlemi gerçekleştirilmiştir. Kil matkap ucu kullanılarak kolon alt kotuna kadar yapılan delgi işleminin kolay gerçekleşebilmesi, matkap uç takımının soğutulması ve zeminin enjeksiyona hazırlanabilmesi amacıyla delgi su ile yapılmıştır. Delgiler 90 mm çapında, bağlantı manşonlarında yüksek basınca dayanıklı keçeler bulunan tijlerle gerçekleştirilmiştir.

Delgi işlemi esnasında mikser ünitesinde de enjeksiyon şerbeti hazırlanmaktadır. Mikser ünitesinde, çimento/su oranı 1/1 olmak üzere karıştırma tankına çimento (Portland Çimentosu 42,5) ve su alınmıştır. Silodan helezon (konveyör) aracılığıyla gelen çimento ve su tankından beslenen su, elektronik tartı vasıtasıyla miktarları kolaylıkla istenen değerlerde karıştırma tankına alınabilmektedir. Çimento ile su, karıştırma tankında tam olarak ve üniform bir enjeksiyon şerbeti oluşturduktan sonra karışım, çalkalayıcı tankına alınır. Böylelikle imalat esnasında bir sonraki karışım için karıştırma tankı boşaltılmış olunur. Diğer taraftan bir sonraki imalat için delgi işlemi sırasındaki duraklama süresi veya imalat sırasında çıkabilecek bir aksilik nedeniyle enjeksiyon şerbeti basma işleminin durduğu zamanlarda şerbet özelliklerini yitirdiği süre sonuna dek korunabilmesi için çalkalayıcı tankı önemli bir yer tutmaktadır.

Kolon alt kotuna ulaşıldıktan sonra su ile yapılan delgi işlemi tamamlanır. Çalkalayıcı tankta hazır haldeki enjeksiyon şerbeti buster pompa ile pompa setine gönderilir. 500 bar'lık enjeksiyon basıncı için, pompa seti ile delgi makinesi arası uzaklığa bağlı olarak aradaki enjeksiyon hortum uzunluğu nedeniyle yaşanan basınç kayıpları hesaba katılarak bulunan basınç değerine ulaşıldığında enjeksiyon şerbeti basılmaya başlanır. Delgi takımı dakikada 16 devirlik dönme hareketi ve 30 cm/dak. hızla yukarı çekilir. Projeye esas 3 m'lik jet-grout kolonunun oluşturulması ardından enjeksiyon işlemine son verilir ve delgi takımı yukarı çekilerek aplikasyonu verilen bir sonraki jet-grout kolon imalatına geçilir.

Enjeksiyon işlemi sırasında delici takım etrafından dışarıya bir miktar enjeksiyon şerbeti ile beraber malzeme çıkışı gerçekleşmektedir. Bu durum ıslah edilen zeminde basınç olmadığına işaret eder. Böylelikle aşırı basınç oluşması durumunda zeminde meydana gelebilecek kırılmalar ve kolonlarda süreksizlik gibi problemlerin önüne geçilmiştir.

4.1 Kullanılan Ekipmanlar

Jet-grout imalatlarının başladığı 18.01.2007 tarihinden itibaren güzergahın zemin iyileştirme yapılacak olan bölgelerinde, EGT MD 1500-1, EGT MD 1500-3, Casagrande C6 delgi makineleri, Soilmec, Tecniwell mikser ve pompa üniteleri olmak üzere çeşitli ekipmanlar kullanılmıştır.

Karıştırma tankı, çalkalayıcı tank ve kumanda odasını içeren ünite (Şekil 4.5) ile pompa ve motor kısmını içeren ünite (Şekil 4.6) olmak üzere iki ayrı bölümden oluşan santral, enjeksiyon şerbetinin hazırlandığı ve yüksek basınçlarla gönderildiği yerdir. Çimento ve su, kumanda odasındaki panelden elektronik tartıda ölçülerek karıştırma tankına alınır. Delgi ve enjeksiyon işlemlerinin düzenli bir şekilde yürütmesi kumanda odası tarafından yönlendirilir. Pompa ünitesinde ise çalkalayıcı tankından gelen enjeksiyon şerbeti basınçlandırılır ve 600 bar gibi yüksek basınçlara dayanaklı enjeksiyon hortumları vasıtasıyla delgi makinesine iletilir.



Şekil 4.5 Mikser ünitesi. A karıştırma tankı, B çalkalayıcı tank ve C kumanda odası.



Şekil 4.6 Pompa ünitesi. A pompa kısmı ve B motor kısmı.

Dökme çimento depolayabilen ve mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyebilen düşey ve yatay çeşitli çimento siloları kullanılmıştır (Şekil 4.7). Pnömatik sistemle silolara alınan çimento helezon vasıtasıyla mikser ünitesine gönderilmiştir. Su ihtiyacı ise güzergahın tamamını besleyen hattan sağlanmış olup, herhangi bir aksaklık durumunda hazırda bekleyen arozöz vasıtasıyla karşılanmıştır.



Şekil 4.7 Kullanılan düşey ve yatay silolar.

Delgi ve enjeksiyon, kolon alt kotundan başlayan jetleme işleminin sürekliliğinin bozulmadan tam kolon boyu sağlanması amacıyla yeterli kule uzunluğuna sahip delgi makineleriyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Delgilerde jet 1 sistemine uygun, yüksek basınçlı enjeksiyon şerbetini monitöre ileten tek kanaldan ibaret tijler kullanılmıştır. Tij ve matkap ucu arasında yer alan monitörde bulunan, enjeksiyon şerbetini jet haline getiren dairesel püskürtücüler olan 2,2 mm çaplı nozullar, aşınma periyotları sonunda değiştirilmiştir.



Şekil 4.8 Delgi makinesi.

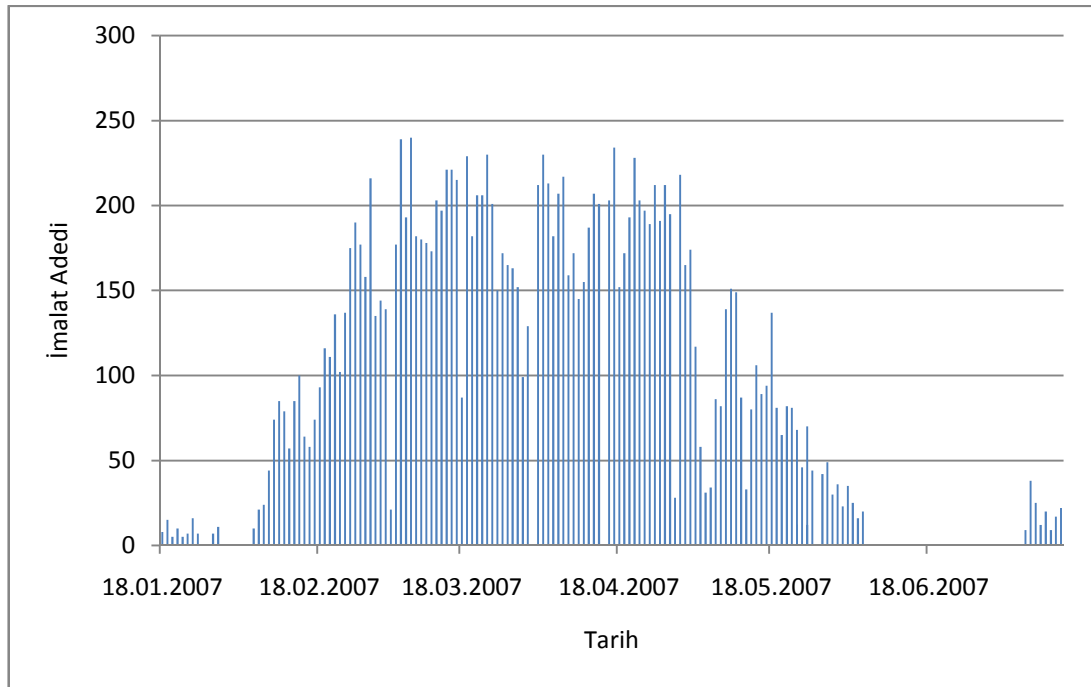
4.2 İmalat Bilgileri

İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında, zemin iyileştirme amacı ile Karşıyaka İstasyonu'nda 1260 adet, KT3 Tüneli'nde 9610 adet, Nergis İstasyonu'nda 4306 adet ve KT4 Tüneli'nde 845 adet olmak üzere toplamda 16021 adet jet-grout kolon imalatı tamamlanmıştır (Tablo 4.1). Güzergahın 1010 m'lik bölümünde gerçekleştirilen imalatlara 18.01.2007 tarihinde KT4 tüneline başlanılmış, 14.07.2007 tarihinde KT3 Tüneli imatları ile sonlandırılmıştır.

Tablo 4.1 Jet-grout imalat bilgileri.

İMALAT TARİH ARALIĞI	ÇALIŞILAN BÖLGE	ADET	METRAJ
18.01.2007 - 28.02.2007	KT4 Tüneli	845	2535
07.02.2007 - 14.07.2007	KT3 Tüneli	9610	28830
22.02.2007-14.05.2007	Nergis İstasyon	4306	12918
07.03.2007-25.05.2007	Karşıyaka İstasyon	1260	3780

Güzergah üzerinde projenin gerçekleşeceği bölgelere konuşlanan dört farklı ekiple yürütülen imalatlar süresince genellikle gündüz ve gece olmak üzere iki vardiya halinde çalışılmıştır. Makine ve ekipman arızaları, yaşam alanlarının güzergaha çok yakın olduğu bölümlerde gece vardiyalarının belirli bir saate kadar çalışabilmeleri, makine ve setlerin çalışma bölgelerini tamamlamaları sonrası bir başka bölge için taşınma süreleri, güzergah üzerinde bulunan yaya ve yol geçişlerinin imalatlar için yeniden düzenlenmeleri gibi nedenler imalat hızı, dolayısıyla projenin tamamlanma süresi üzerinde etkili olmuştur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Günlük jet-grout kolon imalat grafiği.

BÖLÜM BEŞ

DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında, zemin özelliklerinin belirli kısım ve derinliklerde zayıf davranışlar göstermesi nedeniyle bir güvenlik uygulaması olarak toplamda 16021 adet jet-grout kolon imalatı gerçekleştirilmiştir. Beş farklı kademeyle dikdörtgen şeklinde hücreler oluşturan bir planda gerçekleştirilen imalatlarda jet 1 yöntemi kullanılmış ve radye temel altında 3m boyunda olmak üzere 70 cm çapında jet-grout kolonlar oluşturulmuştur.

Kapsamlı analizler sonucunda tasarlanan proje ile jet-grout kolonların mevcut zemin koşullarında hangi parametrelerle imal edileceğinin belirlenmesi amacıyla deneme kolonları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kolonlar ile beklenen 80 cm çapın sağlanamaması nedeniyle, güvenli ve tatminkar bir uygulama açısından deneme kolonlarından elde edilen verilere dayanarak dizayn değiştirilmiş, projeye esas olacak parametreler belirlenmiştir. Buna göre;

- Çimento/su oranı 1/1
- Enjeksiyon basıncı 500 bar
- Enjeksiyon debisi 119,9 lt/dak.
- Nozul çapı 2,2 mm
- Çekme hızı 30 cm/dak.
- Dönme hızı 16 dev./dak.

olmak üzere 70 cm çapında jet-grout kolonlar imal edilmiştir. Jet-grout sisteminin uygulanmasında, kesin hesap metotlarından çok teknik temel bilgilerin yanı sıra büyük ölçüde uygulamalardan elde edilen deneyim sonuçlarının değerlendirilmesiyle neticeye ulaşılabilmesi, zemin içinde enjeksiyon şerbetinin dağılımını ve oluşan geometrinin belirlenebilmesi açısından deneme kolonları yapımı önem arz etmektedir.

Tasarım ve imalat parametreleri belirlenen jet-grout yönteminin uygulama proje kriterleri esas alınarak tatbikinde sürekliliğinin sağlanması, imalat parametrelerinin kontrolü ve takibi ile gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınçlı püskürtmenin, prizini tamamlamamış kolonda tahribat yapabileceği hususu göz önünde bulundurularak, enjeksiyon şerbetinin katı bir form oluşturuncaya kadar geçirdiği priz süresi hesaba katılarak imalatlarının gerçekleştirilmesi, önceden belirlenen imalat sırası ile yapım aşamalarının takibiyle sağlanmıştır. Buna göre kesişen iki kolondan birinin imalatı ardından diğer kolon imalatı için 72 saatlik priz süresi beklenilmiş, bekleme süreleri göz önüne alınarak aplikasyon düzeni ve imalat sırası belirlenmiştir. Özellikle beş farklı kademede birbiriyle kesişen kolonlar oluşturan bir düzende imalatların yoğun olarak gerçekleştiği bir ortamda iş programına sadık kalınarak uygulama yapılan kısımların teslim edilmesi ile jet-grout kolonlar ardından gelen imalatların da hemen başlayabilmesine olanak sağlamıştır.

Uygulamaya esas 500 bar basınç değerinin her bir kolonun oluşturulması sürecinde sağlanabilmesi amacıyla, pompa ünitesi ile kolon mesafesi arası uzaklığa bağlı olarak enjeksiyon hortumlarında yaşanabilecek basınç kayıplarının önüne geçmek için ekiplerin işe başladıkları anda ve her hortum uzunluğu değişiminde imalata başlamadan önce delgi makinesinden çıkan ilk enjeksiyon hortumu bağlantı manşonuna bir manometre monte edilmiştir. Manometrede 500 bar'lık basınç değeri sağlandığında pompa ünitesindeki basınç değeri göz önüne alınarak imalatlar boyunca bu basınç değerlerine riayet edilmiştir. Böylelikle, istenilen çapta jet-grout kolon oluşturmak için en önemli parametre olan basınç değeri proje kriteri seviyesinde tutulmuştur.

İmalatlar süresince kullanılan enjeksiyon şerbetinden çeşitli zamanlarda küp numuneler alınmış ve bu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için karıştırma tanklarından numuneler alınarak şantiye laboratuvarında serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda enjeksiyon şerbeti küp numunelerinin 28 günlük basınç mukavemet değeri en düşük 20,35 N/mm² ve en yüksek 24,62 N/mm² olarak tespit edilmiştir. Buna göre serbest basınç deneylerinden elde edilen veriler, çimento/su oranı 1 olan enjeksiyon şerbeti için öngörülen basınç mukavemet değeri olan 10-50 N/mm²

aralığında bulunmuştur. Böylelikle, kullanılan jet-grouting yöntemi ile istenilen iyileştirme miktarı ve kolonların dayanım ölçütleri göz önüne alınarak belirlenen çimento/su oranında hazırlanan enjeksiyon şerbetinin öngörülen basınç mukavemeti değerlerini sağladığı görülmüştür.

Zemin-çimento şerbeti karışımından oluşan jet-grout kolonun basınç mukavemet değerinin tespiti amacıyla serbest basınç deneyleri gerçekleştirmek üzere karot numuneleri alınmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen basınç mukavemet değeri olan 12,35 N/mm², jet-grout kolonlar için proje ölçütü olarak belirlenen basınç dayanım değeri 1,96 N/mm² (20 kg/cm²) ile mukayese edilmiş, proje ölçütlerinin sağlandığı görülmüştür.

Proje dahilinde imalatların tamamlandığı bölgelerde tünel kazısı ile birlikte, oluşturulan kolonların çap ve geometrileri ile planlanan kesişme oranlarının projeye esas konumlarında olma durumları zaman zaman gözlemlenmiş, imalatların istenen düzende gerçekleştirildiği görülmüştür.

İzmir Banliyö Sisteminin Geliştirilmesi Projesi 2. Etap Karşıyaka Tüneli ve İstasyonları Yapımı İşi kapsamında, geçirimsiz iksa perdesi elemanlarından fore kazıkların, güzergah boyunca belirli kısım ve derinliklerde bulunan zayıf zemin özellikleri nedeniyle radye temel taban seviyesi altında kazı çukuruna doğru kapanmaya çalışacağı, ayrıca bu zemin yapısının deprem yüklemelerinde yumuşayarak mukavemet ve rijitlik kaybı göstereceği ayrıntılı analizlerle belirlenmiştir. Bu doğrultuda güzergahın söz konusu kısımlarında radye temel taban seviyesi altında olmak üzere jet-grout kolonlarla bir destek sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde kazı işleri sırasında fore kazıkların radye temel taban seviyesi altında kazı çukuruna doğru kapanma eğilimlerinin kontrol altına alındığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

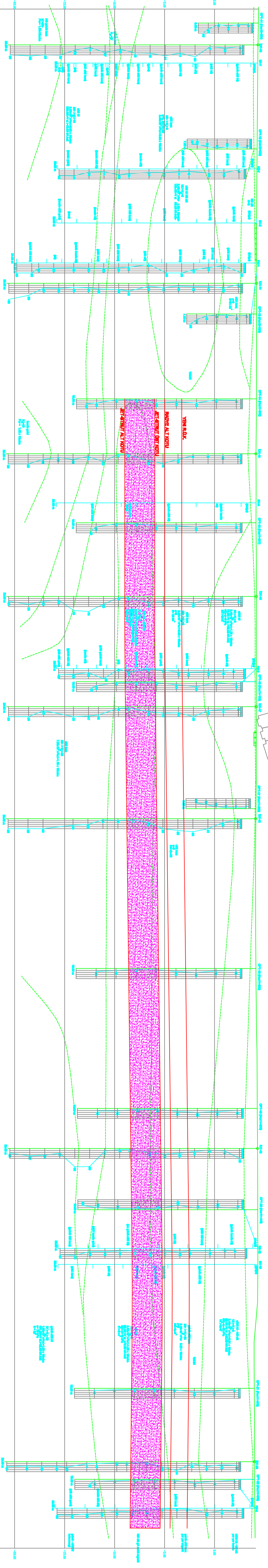
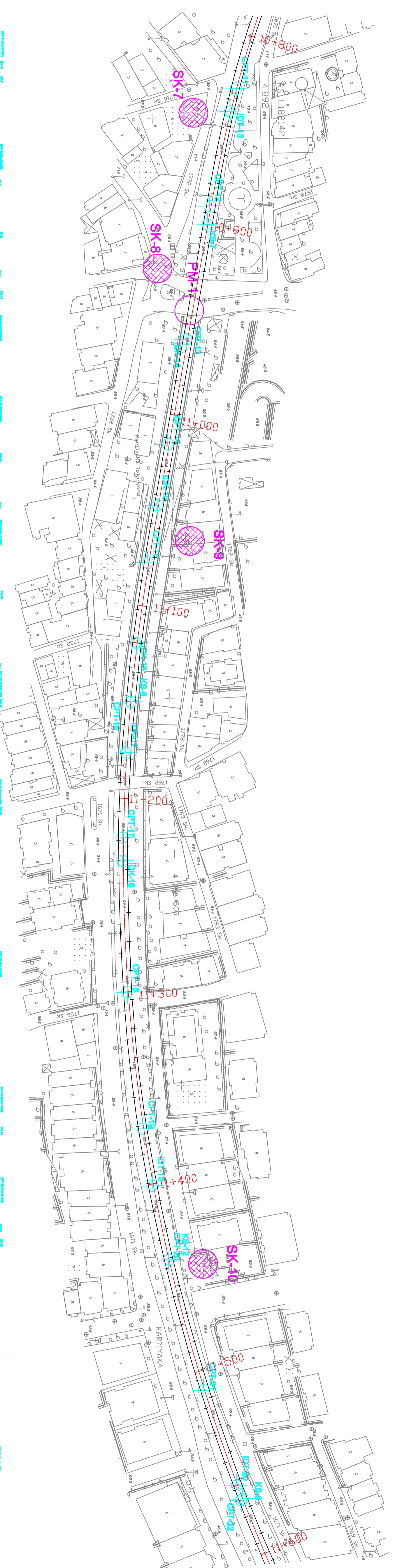
- Akman, M.S., Mutlu, M. (1999). Baraj zeminlerinde enjeksiyon teknolojisi ve malzemeleri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği, IMO, 15. Teknik Kongresi*, Ankara.
- Alba Tool Trading Web Sitesi*, (b.t). 20 Şubat 2009,
<http://www.albatooltrading.com>
- Altun, S. (2007). *Karşıyaka tünel ve istasyonları yapımı, jet grout destek yapısı uygulaması değerlendirme raporu*.
- Apollo Equipment Web Sitesi*, (b.t). 20 Şubat 2009,
<http://www.apolloequipment.net/categories/compactors.htm>
- Askay, A. (2002). *Soil improvement case studies using jet grouts*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Aslan, C. (2005). *İzmir'deki raylı sistemlerin kent içi trafiğine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Asphalt Busters Company Web Sitesi*, (b.t). 5 Nisan 2009,
http://www.asphaltbusters.com/admin/khtml/files/cms_img/News/riverside-3.jpg
- Barksdale, R.D., Takefumi, T. (1991). Design, construction and testing of sand compaction piles. M.I., Esrig, & R.C., Bachus, (Eds.) *Deep foundation improvements: design, construction and testing* (4-19). Philadelphia: ASTM.
- Baum Publications Ltd. Web Sitesi*, (b.t). 14 Mart 2009,
http://www.baumpub.com/cep/industry/35/layfield_group_limited.html
- Bell, F.G. (1993). *Engineering treatment of soils*. Eastbourne: Taylor&Francis.
- Brown, R.E. (1977), Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils. *Proc. American Society Civil Engineers, Journal Geotechnical Engineering Division*, 103 (12), 37-51.

- Brown, W.D. (Ed.) (2003). *Guidelines on ground improvement for structures and facilities*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- Burke, G.K. , Welsh J.P. (1991). Jet grout uses for soil improvement. *Geotechnical Engineering Congress, Geotechnical Special Publication No. 27*, s. 334-345.
- Byle, M.J., Borden, R.H. (Eds.). (1995). *Verification of geotechnical grouting, geotechnical special publication no.57*. NY: ASCE.
- Court, W.A., Mitchell, J.K. (1994). Soil improvement by blasting: part II. *Journal of Explosive Engineering*, 12, (3), 34-41.
- Croce P. & Flora A., (2000). Analysis of single-fluid jet grouting. *Geotechnique*, 50, (6), 739-748.
- Durgunoğlu, T., (2004). Yüksek modüllü kolonların temel mühendisliğinde kullanımı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 3 (431), 9-51.
- Ergun, U., Özkan, Y., Önalp, A. ve Keçeli A. (2005). *Parsel Bazında Zemin-Temel Etüdüleri ve Zemin İyileştirme İşleri Hakkında Yönetmelik Taslağı Ön Raporu*, Afet İşleri Genel Müdürlüğü Çalışma Raporu.
- Essler, R., Yoshida, H. (1993). Jet grouting. M.P., Moseley, & K., Kirsch (Eds.). *Ground improvement* (2nd ed.) (160-196). NY: Spon Press.
- Gallevesi, F. (1992). Grouting improvement of foundation soils. R.H., Borden, (Ed.). *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics (GS30)* (4-39). NY: ASCE.
- Geoforum, Dynamic Compaction*, (b.t). 4 Mart 2009,
<http://kshitija.files.wordpress.com/2006/09/dynamiccomp.jpg>
- Graf, E.D. (1992). Compaction grout, 1992. R.H., Borden, (Ed.). *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics (GS30)* (275-287). NY: ASCE.
- Gray, D.H., Sotir, R.B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: s practical guide for erosion control*. NY: John Wiley & Sons.

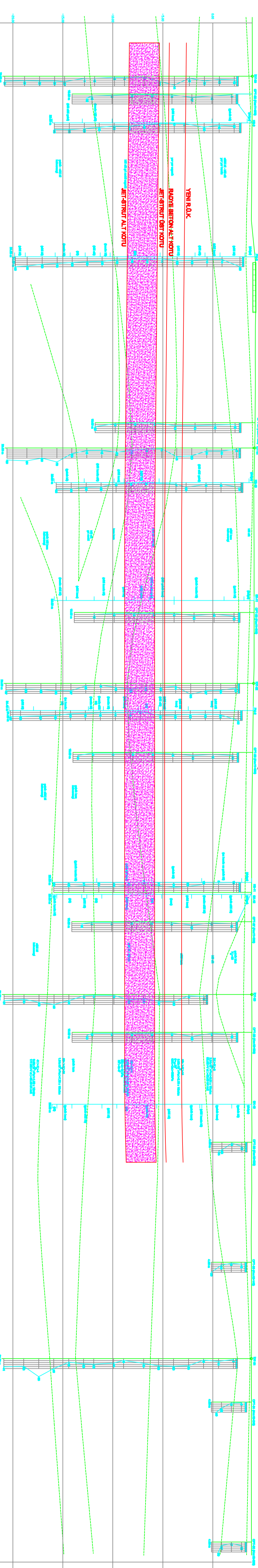
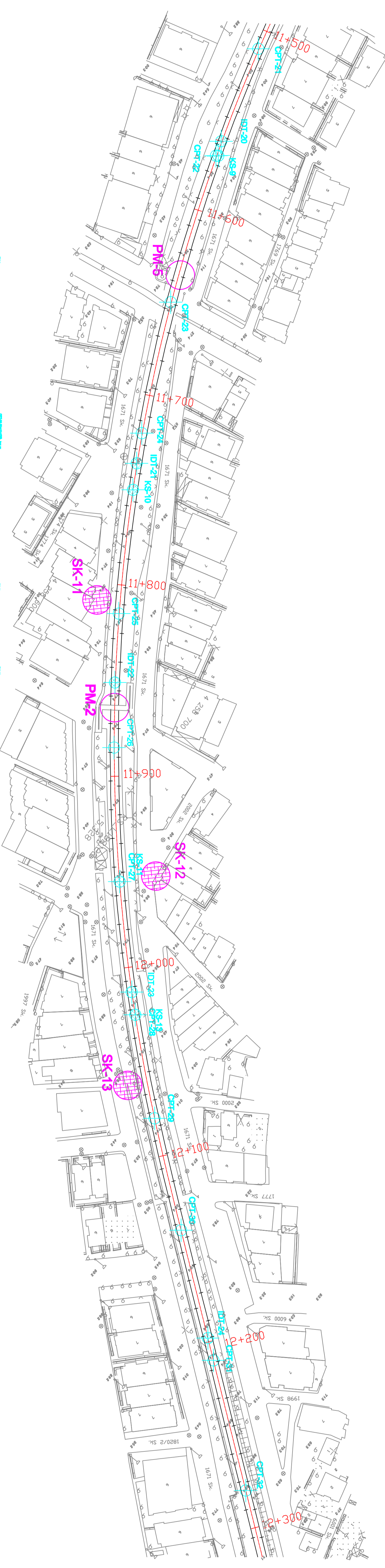
- Hayward Baker Geotechnical Construction Web Sitesi*, (2004). 11 Ocak 2009,
http://www.tagteam.com/ttserverroot/Download/387214_G32%20-%20Jet%20Grouting%20Brochure%20rev.%207-04.pdf
- Hewden Company Web Sitesi*, (b.t). 20 Şubat 2009,
http://www.hewden.co.uk/_images/cache/pid_026-001.400.400.scale.jpg
- Houston Foam Plastics Web Sitesi*, (b.t). 11 Mart 2009,
<http://www.houstonfoam.com/products/geofoam/>
- Keller Ground Engineering Web Sitesi*, (b.t). 4 Mart 2009,
<http://keller-ge.co.uk/images/cms/DynamcCompB.jpg>
- Keller Ground Engineering Web Sitesi*, (b.t). 5 Mart 2009,
http://www.kellergrundbau.com/download/pdf/en/Keller_67-03E.pdf
- Koca, M.Y. (1995). *Slope stability assesment of the abandoned andesite quarries in and around the İzmir city center*. Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Larsson, S. (2003). *Mixing process for ground improvement by deep mixing*. Doktora tezi, Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology.
- Lukas, R.G., (1995). *Dynamic Compaction*. Illinois: Geotechnical Engineering Circular No:1, Publication No. FHWA-SA-95-037, Federal Highway Administration, Office of Engineering, s. 5-97.
- Massarsch, K.R. (1991). Deep soil compaction using vibratory probes. M.I., Esrig, & R.C., Bachus, (Eds.). *Deep foundation improvements: design, construction and testing* (297-320). Philadelphia: ASTM.
- Melegari, C. (1997). Introduction to the jet-grouting methods. *Seminar on Jet Grouting*, Singapore. s.12.
- Moseley, M.P., & Kirsch, K. (Eds.). (1993). *Ground improvement* (2nd ed.). NY: Spon Press.
- Nalçakan, M.S. (2004). Problemlı zeminlerde geoteknik çözümler. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2 (430), 29-30.

- Nonveiller, E. (1989). *Grouting theory and practice*. Amsterdam: Elsevier.
- Pacific Blasting & Demolition Ltd. Web Sitesi*, (b.t). 7 Mart 2009,
<http://www.pacificblasting.com>
- Personal Pages*, (b.t). 10 Mart 2009,
http://personalpages.to.infn.it/~dattola/CMS_pic/CMS-Various/CMS-CivilEng/Freezing%20the%20ground.jpg
- Raj, P.P. (2005). *Ground improvement techniques*. New Delhi: Laxmi Publications.
- Recon Construction Services, Inc. Web Sitesi*, (b.t). 5 Nisan 2009,
http://www.reconconstruction.com/images/soil_stabilization1.jpg
- Reinforced Earth Company Web Sitesi*, (b.t). 10 Mart 2009,
<http://www.recoireland.ie/prodTCdesign.htm>
- Rittirong, A., Shang, J. (2005). Electro-osmotic stabilization. B. Indraratna, J. Chu, (Eds.), *Ground improvement case histories (967-996)*. Oxford: Elsevier.
- Rowe, R.K. (Ed.). (2001). *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Sağlam, A., (2006). *Zemin iyileştirme yöntemleri*, 3 Mart 2009,
<http://forum.yapisal.net/21-geoteknik-zeminler-istiad-duvarlari/6056-profdr Ahmet-saglamerin-zemin-iyilestirme-yontemleri-sunusu.html>
- Shroff, A.V., Shah, D.L. (1993). *Grouting technology in tunnelling and dam construction*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Skyscraper Page Web Sitesi Forum Sayfası*, (23 Ekim 2007). 18 Şubat 2009,
<http://forum.skyscraperpage.com/showthread.php?t=107871&page=10>
- Soil Biotechnology Web Sitesi*, (b.t). 10 Mart 2009,
http://www.natural.fi/html/soil_biotech.html
- Sondermann, W., Wehr, W. (1993). Deep vibro techniques. M.P., Moseley, & K., Kirsch (Eds.). *Ground improvement (2nd ed.) (57-92)*. NY: Spon Press.

- Sümer, T. (1995). Su içeren yumuşak zemin ortamında konvansiyonel yöntemle açılan metro tünellerinde karşılaşılan problemler ve çözümleri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 13. Teknik Kongresi*. Ankara. s. 689-703.
- Süt, İ. (2006). *Kohezyonlu zeminlerin kireçle iyileştirilmesinin CBR değeri üzerindeki etkisinin irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Terashi, M. & Juran, I. (2000). Ground improvement-state of the art. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne.
- The Layfield Group of Companies Web Sitesi*, (b.t). 8 Mart 2009, http://www.geomembranes.com/spec_cs.cfm?cutsheetid=30&productid=123
- TS EN 12716, (2002). *Özel Jeoteknik Uygulamalar-Jet Enjeksiyon*. TSE, Ankara.
- Vazquez, E. (1991). Fly ash in soil stabilization. K, Wesche (Ed.). *Fly ash in concrete, properties and performance* (175-176). London: Taylor & Francis
- Venkatramaiah, C. (2006). *Geotechnical engineering* (3rd ed.). Delhi: New Age International Publishers.
- Warner, J. (2004). *Practical handbook of grouting, soil, rock and structures*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Washington Üniversitesi Web Sitesi*, (b.t). 4 Mart 2009, <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/how/haywardp/deepcompac.jpg>
- Xanthakos, P.P., Abramson, L.W., Bruce, D.A. (1994). *Ground control and improvement*. NY: John Wiley & Sons.
- Yılmaz, H.R., Eskişar, T. (2007). Geosentetik ürünlerin geoteknik mühendisliği sorunlarının çözümünde kullanımı ve sağlanan faydalar. *TMMOB, IMO Adana Şubesi 2. Geoteknik Sempozyumu*, s. 433-447.



İSTASYON	11+820.00	11+850.00	11+900.00	11+950.00	12+000.00	12+050.00	12+100.00	12+150.00	12+200.00	12+290.00
ZEMİN YÜZÜ (m)	107.300	107.000	106.500	106.000	105.500	105.000	104.500	104.000	103.500	103.000
TUNEL YÜZÜ (m)	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000
DERİNLİK (m)	4.300	4.000	3.500	3.000	2.500	2.000	1.500	1.000	0.500	0.000



İSTASYON	11+500.00	11+600.00	11+700.00	11+800.00	11+900.00	12+000.00	12+100.00	12+200.00	12+300.00
ZEMİN YÜZÜ (m)	111.500	111.000	110.500	110.000	109.500	109.000	108.500	108.000	107.500
TUNEL YÜZÜ (m)	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000	103.000
DERİNLİK (m)	8.500	8.000	7.500	7.000	6.500	6.000	5.500	5.000	4.500