

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME
YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

İnş. Müh. Serkan ARSLAN

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Kıyı ve Liman Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Esin ÇEVİK (YTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTARCT	xi
1. GİRİŞ	12
2. SIVILAŞMANIN POTANSİYELİ VE ETKİLERİ	13
2.1 Giriş	13
2.2 Sıvılaşıma Potansiyelinin Değerlendirilmesi	14
3. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	19
3.1 Giriş	19
3.2 Kompaksiyon Betonlama (Compaction Grouting)	19
3.3 Jet Betonlama (Jet Grouting)	25
3.3.1 Jet Betonlama Sistemleri	25
3.3.2 Jet Betonlama Uygulama Alanları ve Avantajları	28
3.4 Çimento Enjeksiyonu (Cement Grouting)	30
4. BETONLAMA TEKNOLOJİSİNDE YENİ DENEYSEL SAPTAMALAR VE SAHA TECRÜBELERİ	33
4.1 Giriş	33
4.2 Betonlama (Grouting) Tekniklerde Yeni Saha Uygulamaları	33
4.3 Kompaksiyon Betonlama Üzerine Karşılaştırmalı Saha Denemeleri	37
5. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	42
6. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARI	44
6.1 Giriş	44
6.2 Kompaksiyon Betonlama Yönteminin Uygulanması (Marmaray Projesi)	44
6.2.1 Bir Kompaksiyon Betonlama Deliğinin Betonlanması Zaman Akış Programı	46
6.2.2 İşin Yöntem ve İşleyişi	46
6.2.3 Betonlama İşlerinin Akışı	47
6.2.4 Bir Betonlama Deliğinin Enjeksiyon Akış Şeması	49
6.2.5 Delme İşlemi	51
6.2.6 Betonlama İşlemi	52

6.2.7	Betonlama Düzeni	54
6.2.8	Çalışma Dubasının Konumlandırılması.....	57
6.2.9	Malzeme Özellikleri	59
6.2.10	Kompaksiyon Betonlamanın Kabul Edilebilirlik Ölçütleri	62
6.2.11	Zemin İyileştirmesi Etkinliğinin Değerlendirilmesi	63
6.2.12	Konik Penetrasyon Test Yöntemi (CPT).....	64
6.2.12.1	Konik Penetrasyon Testinin Veri Doğrulaması.....	65
6.3	Jet Betonlama Yönteminin Uygulanması (Ford-Otosan Fabrikası Limanı)	65
6.3.1	Giriş	65
6.3.2	Limana Deniz Sahasının Hazırlanması.....	65
6.3.3	Jet Beton Kolonlarının Yerleştirilmesi ve İmalat Toleransları	66
6.3.4	Jet Beton İmalatı	67
6.3.5	Delme İşlemi	67
6.3.6	Enjeksiyon İşlemi	68
6.3.7	Jet Betonlama Malzemeleri	69
6.3.7.1	Çimento	69
6.3.7.2	Su	69
6.3.8	Çalışma Dubasındaki Jet Betonlama Makine ve Ekipmanları	69
6.3.9	Zemin İyileştirmesinin Etkinliğinin Değerlendirilmesi	70
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
	KAYNAKLAR.....	75
	ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGE LİSTESİ

e_c	Kritik boşluk oranı
e	Boşluk oranı
σ_{3c}	Üç eksenli basınç
E_M	Basınçölçer modülü
p_l	Limit basınç
S	Bir sonraki gemi pozisyonundaki su derinliği
B	Toplam enjeksiyon boru uzunluğu
π	Pi sayısı
Φ	Delgi borusunun yarıçapı
L	Bentonitle doldurulmuş betonlama borusunun uzunluğu
V_{TS}	İyileştirilecek zemin kısmının toplam hacmi
a_s	İyileştirme oranı
C_C	Beton malzemesi sıkışma (kompresyon) sabiti
S	Delik aralığı
FL_{target}	Sıvılaşma güvenlik faktörü
Dr_{target}	Özgül yoğunluk
δ_{target}	Oturma miktarı
q	Kuvvet
ε_a	Şekil değiştirme
S_R	Azaltım faktörü

KISALTMA LİSTESİ

CEBTP	Centre d'Etudes du BTP
CIQP	Construction and Installation Quality Plan
CSR	Çevrimsel Gerilme Oranı
CPG	Compaction Grouting
CPT	Cone Penetration Test
DTH	Dış Tüy Hücreleri
FL	Liquefaction Safety Factor
FNTF	Federation Nationale des Travaux Publics
PÇ	Porland Çimentosu
RTK-GPS	Real Time Kinematic-Global Positioning System
SPT	Standard Penetration Test
TBM	Tunnel Boring Machine

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Aritmetik ve logaritmik çevre basıncı için KBO çizgisi [1]	13
Şekil 2.2 Farklı yoğunluklardaki üç numune için statik üç eksenli test gerilim eğrileri [2]	14
Şekil 2.3 Kum yanardağları, Moss düzlüğü (Chr. Moorman, 2001)	16
Şekil 2.4 San Lorenzo kıyı koruma şeridi, (Katzenbach, 2001)	17
Şekil 2.5 Başarısız kıyı koruma şeridi, Walten City, Santa Cruz (Katzenbach, 2001)	17
Şekil 3.1 Deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemleri (Arslan, 2006)	19
Şekil 3.2 Kompaksiyon betonlama iyileştirme yönteminin kesit alan ve plan görünümü (Arslan, 2006)	20
Şekil 3.3 Çok düşük slump değerini sağlayan beton malzemesi (Arslan, 2006)	21
Şekil 3.4 Beton hortumundan püskürtülen yüksek sıklıktaki koyu beton malzemesi (Arslan, 2006)	21
Şekil 3.5 Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan bölgedeki zeminden çıkartılan sertleştirilmiş kompaksiyon beton malzemesinin şekli, Taisei, çap:400mm (Arslan, 2006) .	22
Şekil 3.6 Kompaksiyon betonlama ekipmanlarının şematik görünümü (Arslan, 2006)	23
Şekil 3.7 Uygulanan kompaksiyon betonlama yöntemleri 1) bottom-up yöntemi, 2) top-down yöntemi (Arslan,2006).....	24
Şekil 3.8 Jet betonlama akışı [4]	26
Şekil 3.9 Deniz tabanı zemin türlerinde tipik beton-zemin (soilcrete) dayanımları (Burke, 1989)	27
Şekil 3.10 Jet betonlama uygulama alanları (Burke, 1989)	28
Şekil 3.11 Jet betonlama yöntemiyle zemin iyileştirme [3]	29
Şekil 3.12 Çeşitli çimento enjeksiyonu zemin iyileştirme yöntemleri (Özsoy, 2003)	30
Şekil 4.1 Tanecikli (granular) zeminde jet betonlama yöntemiyle uygulanmış beton sütunlarında fosil tahta parçalarının oluşturduğu kusurlar (Gudehus ve Schwarz,1998)	33
Şekil 6.1 Potansiyel sıvılaşma riski olan zeminin tünel boylemsal kesiti (Arslan, 2006)	45
Şekil 6.2 Kompaksiyon betonlama deliklerinin ilgili konumları, tünelin enkesiti (Arslan, 2006)	45
Şekil 6.3 Betonlama işinin akış şeması	48
Şekil 6.4 Delme ve betonlama akış şeması.....	49
Şekil 6.5 Tek deliğin delme ve betonlama işlemi.....	50
Şekil 6.6 Dağıtım hattı, delgi pompası ve betonlama pompasının kurulumu.....	53
Şekil 6.7 Önerilen kompaksiyon betonlama plan dizilimi	56

Şekil 6.8 Kompaksiyon betonlamanın uygulanma sırası ve sıkıştırma etkisi	57
Şekil 6.9 Örnek merkez nokta (waypoint) gösterimi (M 12 noktası)	58
Şekil 6.10 Kompaksiyon betonlamada kullanılan doğal kumun tane büyüklüğü dağılımı	60
Şekil 6.11 Alınan jet betonlama numunelerinin tek eksenli basınç mukavemeti sonuçları (Özsoy, 2003)	67
Şekil 6.12 Birim alan ve kayma modülü oranlarına bağlı olarak CSR azaltım eğrileri (S_R) (Özsoy, 2003)	71
Şekil 6.13 Zemin ıslahı öncesi ve sonrası sıvılaşma güvenliği analizlerinin simulasyonu (Özsoy, 2003)	72

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Basınç ölçer testlerinin karşılaştırmalı sonuçları	39
Çizelge 4.2 Oturma sonuçlarının özeti	40
Çizelge 4.3 Beton levhaların merkezindeki kıyaslamalı oturma miktarları	41
Çizelge 5.1 Deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	43
Çizelge 6.1 Bir kompaksiyon betonlama deliğinin zaman akış programı.....	46
Çizelge 6.2 Beton malzemesinin bileşim oranları (referans karışım)	60
Çizelge 6.3 Kompaksiyon betonlamanın kabul edilebilirlik ölçütleri.....	63

ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca sahip olduğu bilgi, tecrübe ve desteği benden esirgemeyen, bu niteliklerine gelecekte de fazlasıyla ihtiyaç duyacağım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Esin ÇEVİK'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesinden faydalandığım, bu bilgi ve tecrübesine her zaman ihtiyaç duyacağım hocam Prof. Dr. Yalçın YÜKSEL'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında ihtiyacım olan her konuda fikrini ve önerilerini aldığım, hiç bir zaman benden yardımını ve desteklerini benden esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana her konuda destek olan, sevgi ve desteklerini bana her zaman hissettiren ve sevgileriyle bana güç veren ailem ve Didem Gülgüden'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Serkan ARSLAN

Ocak, 2008

ÖZET

Zemin taneleri arasındaki efektif gerilmenin ortadan kalkması ve su-katı heterojen karışımının sıvı gibi hareket etmeye başlamasına ‘sıvılaşma’ denilmektedir. Bu şartlar altındaki deniz yapısının temel zemini taşıma kabiliyetini yitirmekte ve üzerindeki yapıda ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Bu çalışmada öncelikle sıvılaşma olayı örneklerle vurgulanmakta, özellikle deprem etkisiyle belirme ihtimali yüksek olan deniz tabanı sıvılaşmasını engellemek veya en aza indirmek amacıyla uygulanan başlıca deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemleri açıklanarak karşılaştırılmaları yapılmakta ve yöntemler hakkında önerilerde bulunmaktadır.

Kompaksiyon betonlama, jet betonlama ve çimento enjeksiyonu olmak üzere başlıca üç farklı deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu yöntemler sırayla açıklanmakta, Marmaray Projesi deniz altı tüp geçit temel zemininde ve Gölcük Ford-Otosan Limanı deniz tabanında uygulanmış kompaksiyon ve jet betonlama deniz tabanı iyileştirme uygulamaları ayrıntılarıyla anlatılmaktadır.

Ayrıca üç temel zemin iyileştirme yöntemi belirli ölçütlere göre karşılaştırılmakta, hangi yöntemin hangi şartlar altında daha başarılı ve uygun olacağı hakkında çeşitli saptamalarda bulunmaktadır.

Sonuç olarak da yöntemlerin uygulanma koşulları, verimlilikleri, zemin iyileştirmedeki başarıları hakkında yorumlar yapılmakta ve çeşitli öneriler sunulmaktadır.

Anahtar sözcükler:

Sıvılaşma, deniz tabanı iyileştirme yöntemleri, deprem, sıvılaşma potansiyeli, kompaksiyon betonlama, çimento betonlama, jet betonlama, zemin taşıma kapasitesi, konik penetrasyon test yöntemi (CPT).

ABSTRACT

Liquefaction is that the elimination of the effective stress between soil grains and behaviour of the heterogeneous water-solid mixture like a fluid. The carrying capacity of sea construction ground decreases under these conditions, which might cause irrecoverable damages at the sea construction. In this study; primarily liquefaction occurrence is emphasized with past examples. For obstructing or minimizing the probability of liquefaction especially with the caused by earthquake impact; applied main sea ground improvement methods are explained, compared and some proposal are given regarding to related sea ground improvement methods.

Mainly, there are three sea ground improvement methods. These are mentioned respectively; compaction grouting, jet grouting and cement grouting methods. In this study; the three main sea ground improvement applications are clarified and regarding to Marmaray Immersed Tunnel Project at the Bosphorus and Gölcük Ford-Otosan Port, compaction and jet grouting applications for ground treatment is explained with the details.

Additionally, the methods are compared considering with many criteria. Through these comparisons, which method under which condition, has much more satisfactory is clarified

Consequently, regarding to the application conditions of treatment methods, capabilities, achievements in improvement, comments are shown and various suggestions are emphasized.

Keywords:

Liquefaction, sea ground improvement methods, earthquake, liquefaction potential, compaction grouting, cement grouting, jet grouting, ground carrying capacity, kolmatation, cone penetration test (CPT).

1. GİRİŞ

Deniz tabanı iyileştirme yöntemlerinin başlıca amacı; deprem yükleri altında gerçekleşme olasılığı yüksek olan sıvılaşma potansiyelini engellemek ve zeminin taşıma kapasitesini arttırmaktır.

Bu çalışmada basitçe amaçlanan; deniz yapılarına olumsuz etkileri olan, zaman zaman da büyük hasarlara yol açabilen sıvılaşma olayını engellemek amacıyla deniz tabanında uygulanabilen başlıca zemin iyileştirme yöntemlerini açıklamak, iyileştirme yöntemlerini birbirleriyle karşılaştırmak, çeşitli uygulama yöntemlerini sunmak ve deniz tabanı iyileştirmeleriyle ilgili önerilerde bulunmaktır.

Zemin iyileştirme gereksiniminin ana sebebi olan zemin sıvılaşması, deprem durumunda geçici ve tekrarlı yüklerle yeraltı su seviyesi altındaki kumlu ve siltli zeminlerin boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak mukavemet kaybı olarak adlandırılmaktadır (Seed ve Idriss, 1971).

Sıvılaşma, deprem sallantıları ya da diğer ani ve zamansız yüklemeler nedeniyle zeminin mukavemeti ve rijitliğinin azalmasıyla oluşmaktadır. Sıvılaşma sonucu geçmişte yaşanan büyük ölçekli depremler sonrasında büyük hasarlar meydana gelmiştir.

Deniz tabanının sıvılaşması sonucu ise, deniz yapısı (tüp geçit, köprü ayakları, dalgakıran vb.) zemine batma veya hafif yapılarda yukarı doğru hareket ederek yüzme eğilimi gösterebilmektedir. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan deniz tabanında, yön değiştiren küçük kayma gerilmeleri büyük şekil değiştirmelerine sebep olmakta ve yapılarda zemin göçmesi hasarları meydana getirmektedir.

Deniz tabanının sıvılaşmasının belli başlı etkileri arasında, sırasıyla deprem esnasında ve sonrasında oluşan zemin taşıma gücü kayıpları, oturmalar, şevli arazilerde yanal zemin ötelenmeleri, deniz tabanına gömülü boru ve diğer servis hatlarının deformasyonları sayılabilir. Geçmişte Niigata ve Alaska (1964) depremlerindeki gözlemler akademik alanda ilgiyi bu konuya çekmiş, deniz tabanının sıvılaşması riskinin tespitine yönelik çalışmalar yapılmış ve özellikle Kobe (1995) depremi sonrasında deniz tabanı zemin ıslah yöntemlerinin etkinliği gündeme gelmiştir.

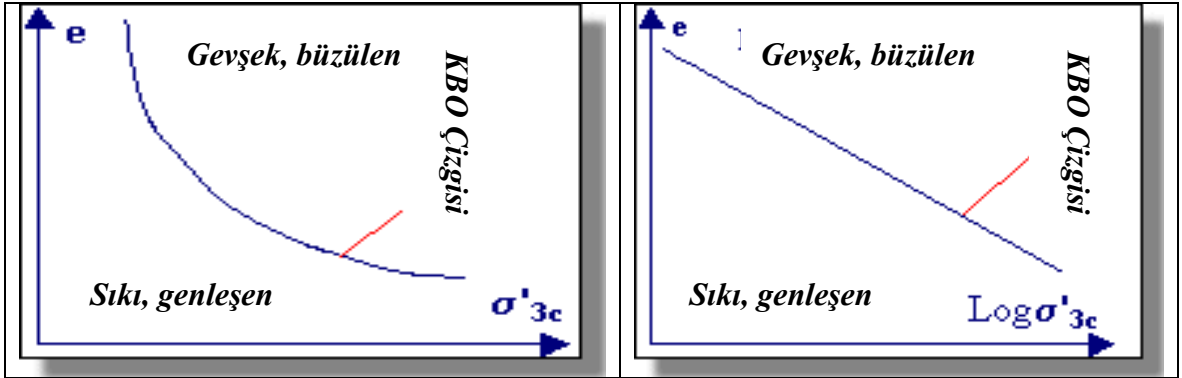
2. SIVILAŞMANIN POTANSİYELİ VE ETKİLERİ

2.1 Giriş

Sıvılaşma potansiyeli, çok sayıda deneysel yöntem kullanılarak elde edilmiş bağıntıların gerçek arazi verileri ile karşılaştırılması ve belli kabullerin göz önünde bulundurulmasıyla tespit edilmektedir. Ancak bu çalışmaları uzman yardımı almadan yürütmek, uygun yöntem ve bağıntıları bulmak, kavramak ve sonuca ulaşmak, proje tasarım ve uygulama mühendisleri için çoğu zaman kolay olmamaktadır. Sıvılaşmanın nasıl başladığını anlayabilmek için, bazı ana zemin mekaniği kavramlarına hakim olmak gerekmektedir. Sıvılaşmanın oluşumuyla ilgili zemin mekaniği kavramları aşağıda özetle açıklanmıştır:

Kritik boşluk oranı

1936'da, Dr. Arthur Casagrande tarafından drenajlı deformasyon kontrollü üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve sıkı numunelerin üzerinde yapılan deneyler esnasında, uygulanan basınç sonucunda söz konusu numunelerin büyük deformasyonlara uğrayana dek aynı yoğunluğa yaklaştığı fark edilmiştir. Yaklaşılan bu yoğunluğa 'kritik boşluk oranı' (KBO) denilmektedir (e_c).



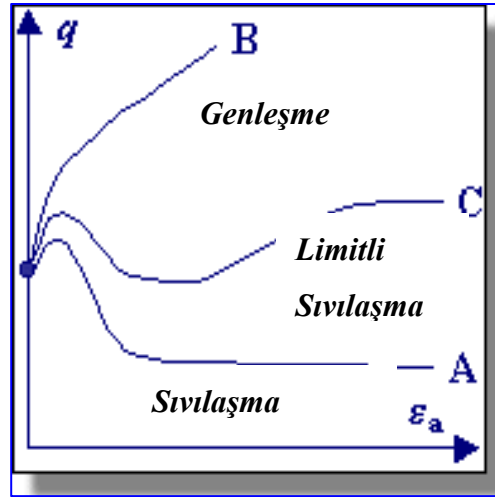
Şekil 2.1 Aritmetik ve logaritmik çevre basıncı için KBO çizgisi [1]

Çeşitli etkin çevre basınçlarında gerçekleştirilen deneylerde, Casagrande kritik boşluk oranının etkin çevre basıncıyla değiştiğini bulmuştur. Şekil 2.1'deki grafik üzerinde kritik boşluk oranı doğrusunu referans eden eğri gösterilmektedir (KBO çizgisi). KBO çizgisinin, drenajlı üç eksenli basınç deneyleri sonucunda, genleşen ve büzülen davranış arasında sınır oluşturduğu bulunmuştur. KBO çizgisinin üzerinde yer alan zemin Şekil 2.1'den de görüldüğü üzere büzülen (çekilen) davranış göstermektedir.

Şekil Değiştirmenin (Deformasyon) Kararlı (Sabit) Hali

1960'ların ortasında, Gonzalo Castro, (Casagrande'nin öğrencisi), drenajsız gerilme kontrollü üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirmiştir. Castro bu deney esnasında zemin durumuna bağlı üç farklı gerilme şekil değiştirme davranışı gözlemlemiştir. Sıkı numuneler önce büzölmüşler fakat daha sonra artan çevre basıncı ve kesme gerilimi ile genişmişlerdir. Gevşek numuneler ise düşük bir kesme kuvvetiyle ilk olarak çökmüşler ve daha sonra hızla büyük şekil değiştirmelerine uğrayarak yıkılmışlardır. Castro; bu davranışa 'sıvılaşma' adını vermiştir. Orta yoğunluktaki zeminler başlangıçta tıpkı gevşek zeminler gibi davranış göstermişler, fakat daha sonra ilkin büzölme ve son olarak da genişleme davranışı sergilemişlerdir. Castro bu tipteki davranışa 'limitli sıvılaşma' adını vermiştir. Şekil 2.2'de yukarıda bahsedilen genişleme, limitli sıvılaşma ve sıvılaşmaya ait üç farklı sıklıktaki numunenin (sırasıyla A, B, C) kuvvet-şekil değiştirme eğrileri görölmektedir.

Kuvvet



Şekil Değiştirme

Şekil 2.2 Farklı yoğunluklardaki üç numune için statik üç eksenli test gerilim eğrileri [2]

2.2 Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, deprem yüklemeleri ve sıvılaşma direncinin eşdeğerli ölçümlerinin karşılaştırılması ile tamamlanabilmektedir. Deprem yüklerinin belirlenmesi için en yaygın yaklaşım periyodik kesme itkilerinin kullanılmasıdır. Öncül etkin dikey gerilimler kullanılarak periyodik kesme kuvveti genliklerinin (amplitude) ayarlanması (normalleştirilmesi) ile elde edilen periyodik gerilim oranı, depremde zemin profilindeki farklı derinliklerde eyleme geçirilen yükleme seviyelerini temsil etmektedir. Periyodik kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde farklı yöntemler mevcuttur. Maksimum (pik) zemin

yüzeyi ivme genliği fonksiyonuna sahip olacak periyodik gerilim oranını hesaplamada bölge tepki (yanıt) analizleri uygulanabilmekte ve basitleştirilmiş yaklaşımlar kullanılabilir. Sıvılaşma direnci, genellikle uygulanan saha performanslarının gözlemleri esas alınarak karakterize edilmektedir. Gerçek deprem durum geçmişlerinin detaylı araştırılması, sahadaki etütlerin (genellikle SPT ve CPT direnci) ve her geçmiş durum için periyodik gerilim oranı kombinasyonlarının belirlenmesine izin vermektedir.

Bir zeminin sıvılaşması esas olarak; gevşek bir yerleşime sahip olmasına, taneler arasındaki bağı, kil miktarına ve boşluk suyunun drenajının engellenmesine bağlıdır. Zemin sıvılaşmasında ortaya çıkan büyük yer değiştirme ve şekil değiştirmeler, ayrıca sıvılaşan tabaka kalınlığına, yüzey eğimine ve yükleme durumuna bağlıdır. Genellikle, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerdeki yakın zamana ait olan sıkışmamış kum ve siltlerin sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Yeraltı su seviyesinin yüzeye 10 m'den daha yakın olması da sıvılaşma tehlikesini arttırmaktadır. Buna karşılık yeraltı su seviyesinin 20 m'den daha derinde bulunması durumunda ve sıkı zeminlerde sıvılaşma potansiyeli azdır.

Zeminin sıvılaşmasının kendisi hasara sebep olan bir olay değildir. Ancak, bu olayın büyük şekil değiştirmeleri meydana getirmesi, ciddi hasarlar doğuran temel göçmelerine neden olmaktadır. Deprem hareketi ile oluşan zemin sıvılaşması, büyük kütleler halinde şev akmalarına sebep olabilmektedir. Yataya yakın deniz tabanının tabakalarının sıvılaşmasında, eğime doğru akış meydana gelmektedir. Akan zeminin yapısı bozulurken, mevcut temellerde ve köprü ayaklarında önemli hasarlar oluşmakta ve ortaya çıkan rölatif yer değiştirme dolayısıyla köprü tabliyelerinde hasar ve deniz altı boru hatlarında burkulmalar meydana gelmektedir. Yapılan incelemeler, zemin yüzeyinin birkaç metre altında bulunan kum tabakasında sıvılaşmanın meydana geldiğini, bu durumun yukarı doğru üstteki kum tabakalarına yayılmasıyla temel altı zeminin taşıma gücünü zayıflattığını göstermiştir. Yeraltı su seviyesinin yüksek olması ve zeminin siltli kil olması kıyı zemin sıvılaşmasının ortaya çıkmasında çok önemli rol oynamaktadır. Örneğin; 1999 depremi sonucunda, Gölçük bölgesinde sahillerde batmalar, şev kaymaları gibi olaylar ortaya çıkmıştır.

Deprem sarsıntıları genellikle boşluk suyu basıncını artırarak sıvılaşmayı tetiklemekte ve bununla birlikte zemin üst yapılarının tahrip olmasına neden olmaktadır.

Sıvılaşmanın sonucu olarak yumuşak, genç, suya doymuş, düzgün dağılımlı, ince taneli kumlar ve siltler viskoz akışkan gibi davranmaktadırlar. Sıvılaşma, depreme ait (sismik) kesme dalgalarının, doymuş ve tanecikli zemin tabakaları boyunca ilerlemesi sonucu zeminin

tanecikli yapısını bozmaktadır. Tanecikli zemin yapısının zarar görmesi boşluk suyu basıncının artmasına ve zeminin kesme mukavemetinin azalmasına yol açmaktadır. Eğer deniz tabanının herhangi bir noktasındaki ani boşluk suyu basıncı zeminin taşıma kapasitesini yenerse, deniz tabanı bir akışkan gibi davranmaya başlamakta ve bu durum geniş yüzey hasarlarına neden olmaktadır. Söz konusu hasar oluşumları ile ilgili örnekler aşağıda sunulmuştur:

Batık suya doygun zeminlerin deprem nedenli (sismik) sallantılar ile sıvılaşması sonucu birçok kum yanardağı, oluşmakta ve batık zemin yüzeye çıkmaktadır. Şekil 2.3'te, gerçekleşmiş olan deprem etkisinde deniz tabanının sıvılaşması sonucu oluşan kum yanardağlarının mevcudiyeti (yaklaşık olarak 20 m. çapında), denizin geriye çekilmesiyle kolaylıkla görülebilmektedir.



Şekil 2.3 Kum yanardağları, Moss düzlüğü (Chr. Moorman, 2001)

Şiddetli deniz tabanı sallantılarının etkisiyle drenajsız (konsolidasyonsuz) çamurun sıvılaşması sonucu çökmüş olan San Lorenzo kıyı şeridi Şekil 2.4' de gösterilmektedir. Çöken kıyı şeridi kısımlarının doğrudan doymuş çamur tabakasının üstünde olduğu yapılan etüdler sonucunda farkedilmiştir.



Şekil 2.4 San Lorenzo kıyı koruma şeridi, (Katzenbach, 2001)

Walten kıyı koruma şeridi gömülü drenajsız (konsolidasyonsuz) plaj ve akarsu katı (tortu) maddelerinin sıvılaşması sonucu Şekil 2.5’de görüldüğü üzere çökmüş ve parçalanmıştır.



Şekil 2.5 Başarısız kıyı koruma şeridi, Walten City, Santa Cruz (Katzenbach, 2001)

Sıvılaşabilir katı sedimentler genç, gevşek, suya doymun, düzgün dağılmış ve diğerlerine göre daha ince taneli kum ve siltlerdir. Genellikle mevcut çağdaş nehir ve çayların taşkın yataklarından oluşmaktadırlar.

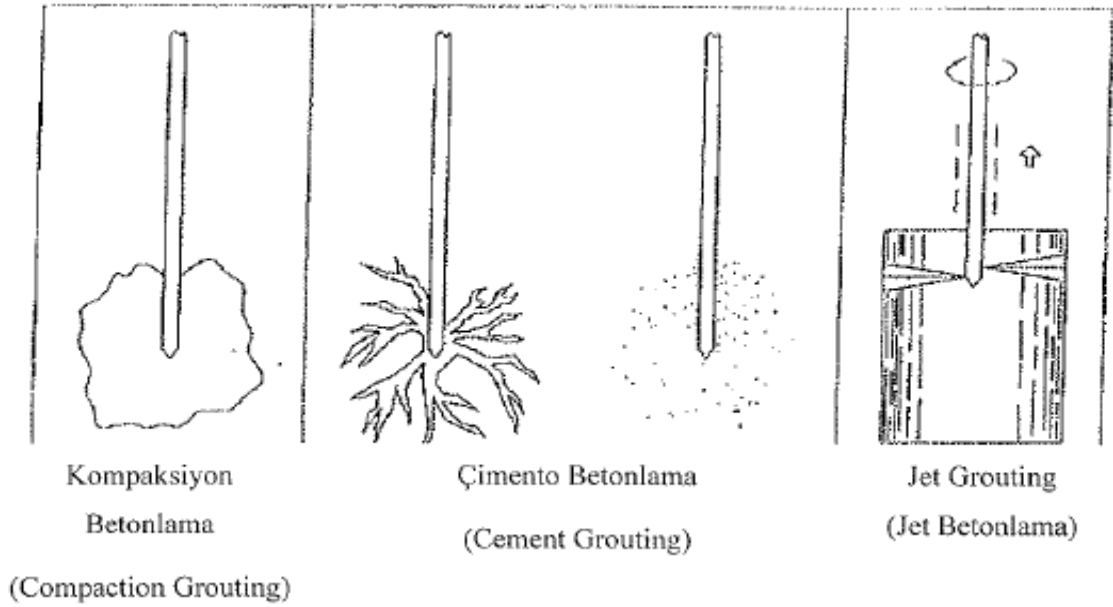
Sıvılaşma potansiyeli olan deniz tabanı kısımlarını, zeminin yapısından hareket ederek belirli ölçüde tahmin etmek mümkün olabilse de, bir depremde sıvılaşmanın olacağını tahmin etmek zordur. Zeminin türünü, yoğunluğunu ve yeraltı su seviyesinin derinliğini belirleyerek, zemin sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler belirlenebilmektedir. Bunun yanında depremin sıklığı ve büyüklüğü, alınacak tedbirlerin belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Açıklamalardan da anlaşıldığı üzere; sıvılaşmayı tetikleyen en önemli etken deprem ve yükleridir. Dolayısıyla özellikle Türkiye’de sıvılaşma riski tüm deniz yapılarının zeminlerinde göz önünde bulundurulmalı ve uygun zemin iyileştirme yöntemi uygulanmalıdır.

3. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1 Giriş

Günümüzde büyük çaplı yatırımlara temel oluşturan deniz tabanı zemininin taşıyacağı yükler açısından araştırılması ve yeterli mukavemet koşullarını sağlayamaması durumunda, iyileştirmelerinin yapılması büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda, gerekli görüldüğünde uygulanabilen başlıca deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 3.1’de görüldüğü üzere üç ana başlıkta gruplandırılmaktadır. Bunlar kompaksiyon betonlama (compaction grouting), çimento betonlama (cement grouting) ve jet betonlama (jet grouting) yöntemleridir.



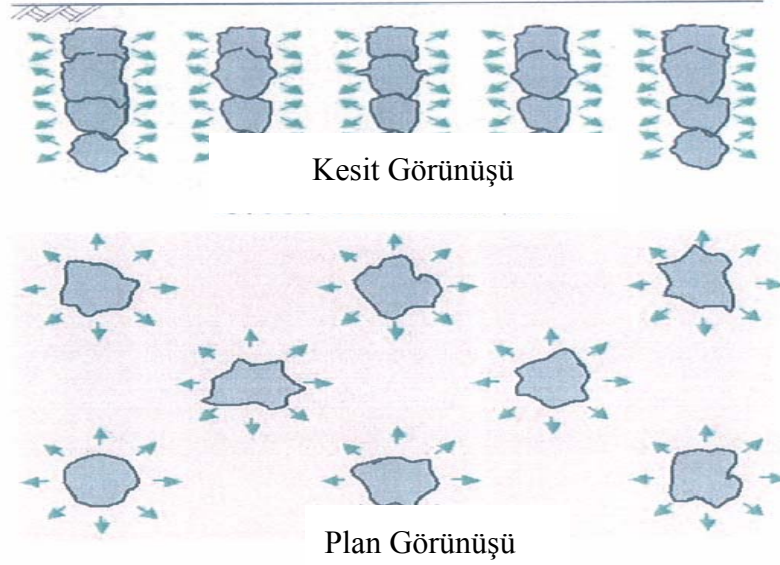
Şekil 3.1 Deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemleri (Arslan, 2006)

3.2 Kompaksiyon Betonlama (Compaction Grouting)

Kompaksiyon Betonlama Mekanizması

Standart betonlama sırasında, beton malzemesi çok akıcıdır ve betonun davranışı; deniz tabanı zemininin boşlukları arasında penetrasyonuna dayanmaktadır. Bununla beraber kompaksiyon betonlamada ise malzeme standart betonlamadan farklı olarak çok yoğundur. Bu çok yoğun ve akıcı olmayan katı beton harcı yüksek basınçla birlikte zemine enjekte edilmektedir.

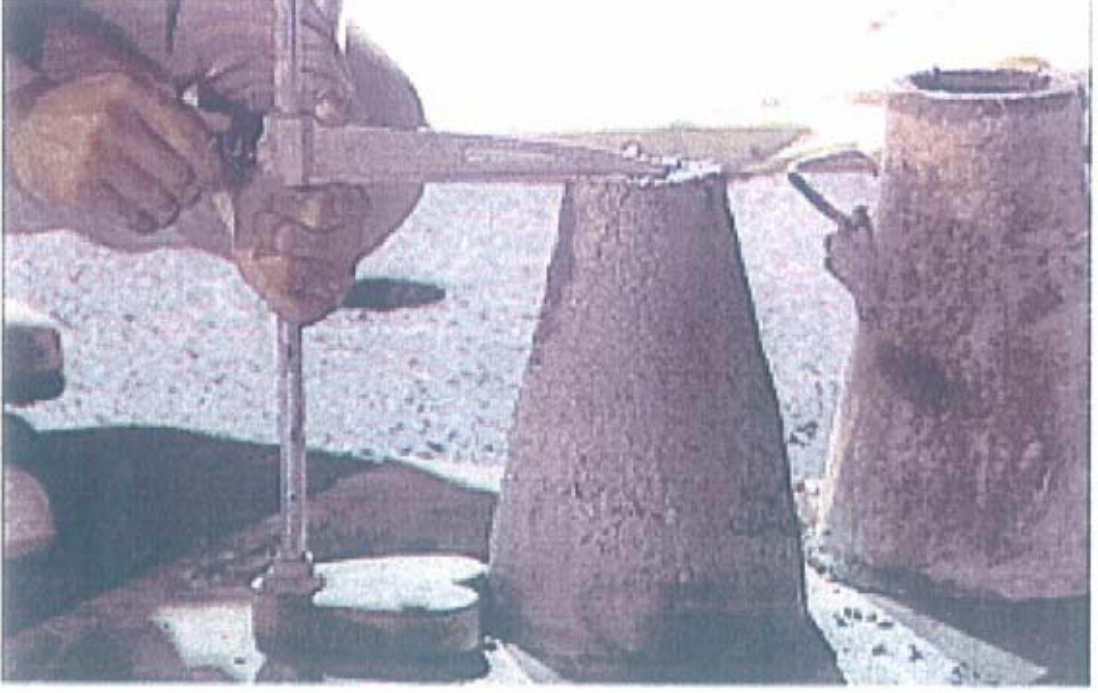
Şekil 3.2'deki kompaksiyon betonlama yönteminin kesit alan ve plan görünümüne bakılacak olursa, uygulanan enjeksiyon bitiminde, beton malzemesinin hacmi zamanla artmaya başlamakta ve zemin içinde sonuçlanan deplasmanla kendi içinde homojen küme halini almaktadır.



Şekil 3.2 Kompaksiyon betonlama iyileştirme yönteminin kesit alan ve plan görünümü
(Arslan, 2006)

Kompaksiyon Betonlama Malzemesi

Kompaksiyon betonlamanın iyileştirme mekanizması beton malzemesinin karakteristikleri ve karışım oranlarının denetimiyle kontrol edilmektedir. Beton malzemesi, özel bir agrega (ince kum bileşeni), çimento ve suyun belirli oranlarda karışımından oluşmaktadır. Malzemenin en önemli ölçütü, betonun çökme (slump) değeridir. Kompaksiyon betonlama yönteminde, ideal çökme (slump) değeri 7.5 cm'dir.



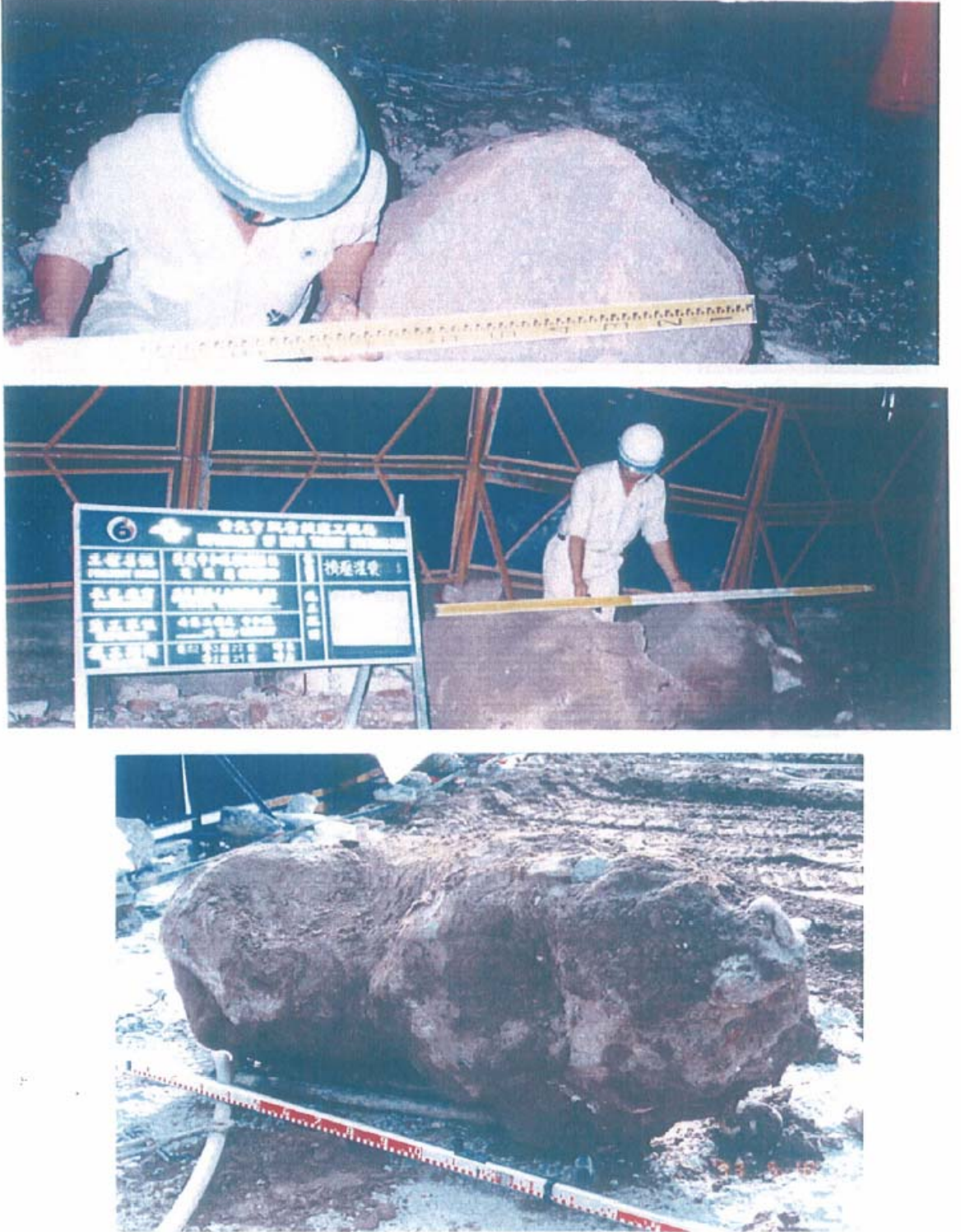
Şekil 3.3 Çok düşük slump değerini sağlayan beton malzemesi (Arslan, 2006)

Kompaksiyon betonlama ile iyileştirilmiş zemin kesiti, toprak ve Şekil 3.3 ve 3.4’de gösterilen yüksek sıklıktaki beton malzemesi içeren beton sütunlardan oluşmaktadır. Kompaksiyon betonlama sütunları zeminin içinde belirgin bir ara yüz oluşturarak zeminin taşıma kapasitesini arttırmakta, toprak sütunları çevreleyerek sıkıştırmakta ve boşluk oranını büyük ölçüde azaltmaktadırlar. Zemin bir bütün halinde çalışmaya başlamaktadır.



Şekil 3.4 Beton hortumundan püskürtülen yüksek sıklıkta koyu beton malzemesi (Arslan, 2006).

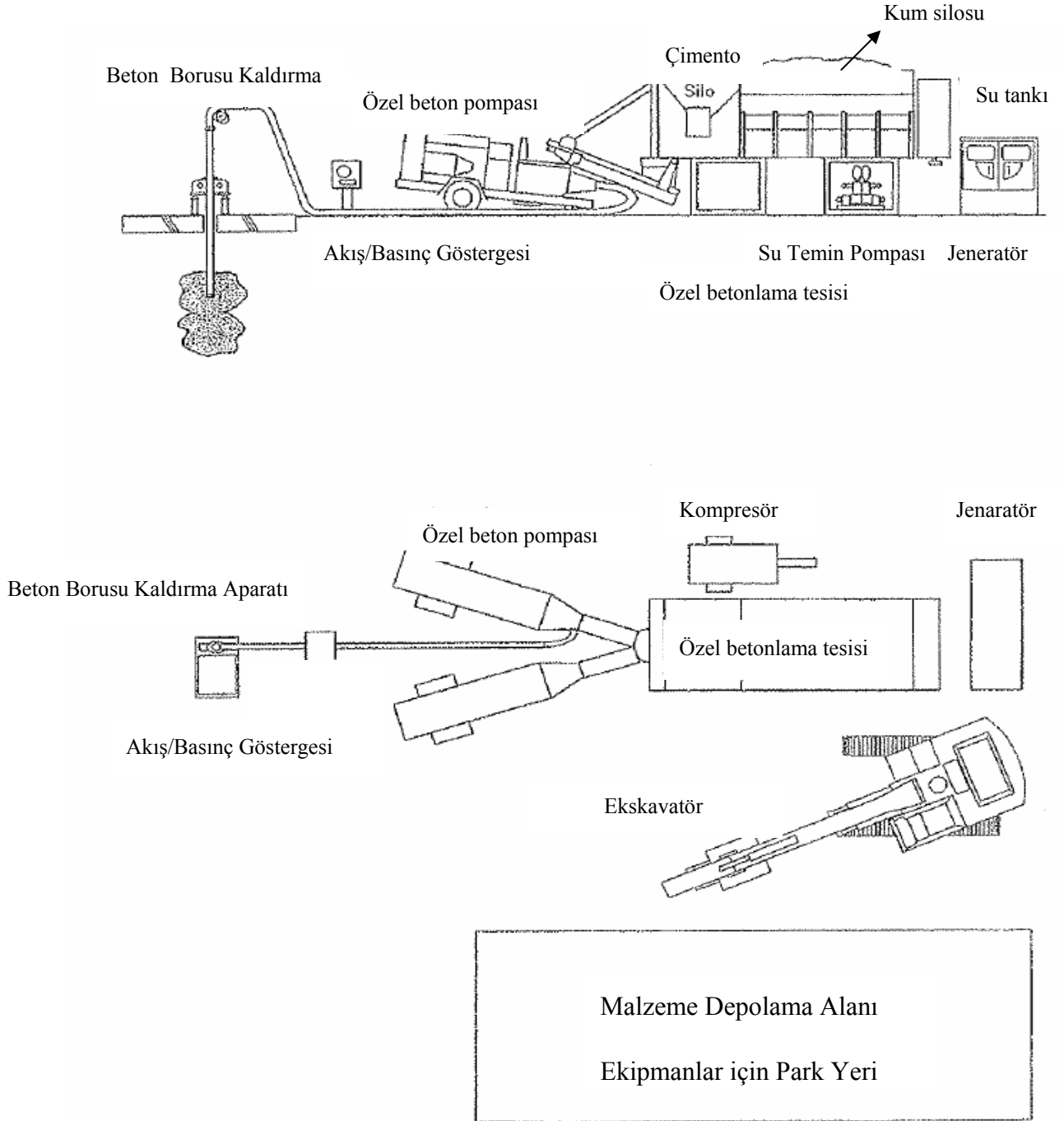
Şekil 3.5'te, sıvılaştırma potansiyeli yüksek olan bölgede uygulandığı zeminden çıkartılmış olan, mukavemetini kazanmış ve sertleşmiş kompaksiyon beton sütunu görülmektedir.



Şekil 3.5 Sıvılaştırma potansiyeli yüksek olan bölgedeki zeminden çıkartılan sertleştirilmiş kompaksiyon beton malzemesinin şekli, Taisei, çap:400mm (Arslan, 2006)

Betonlama Ekipmanları

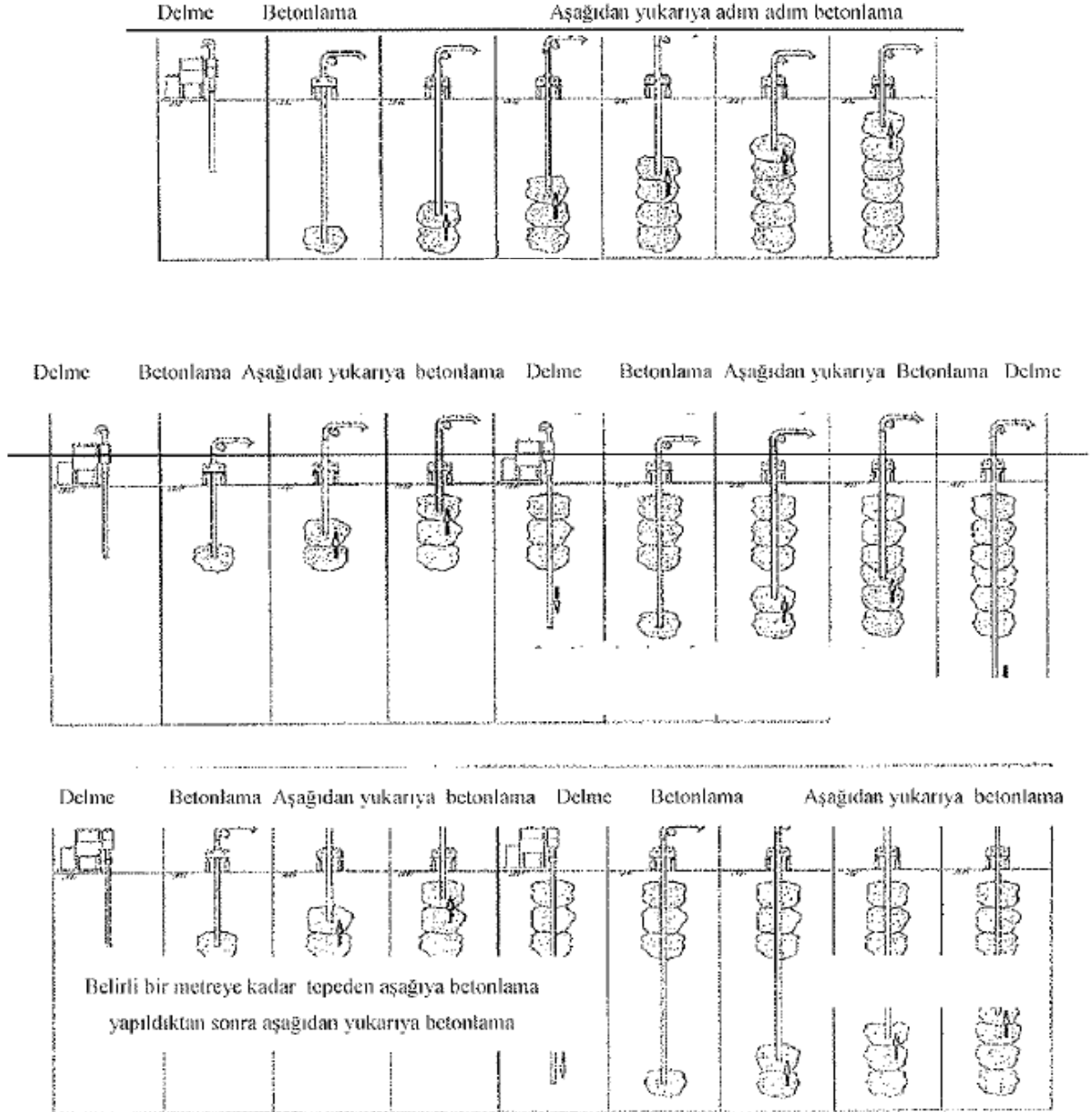
Kompaksiyon betonlamanın ana ekipmanları, Şekil 3.6'da şematik olarak gösterildiği gibi, karıştırma (harmanlama) yapan tesis (mixing plant), malzemeyi zemine yüksek basınçla enjekte eden betonlama pompası (grouting pump) ve proje derinliğine ulaşmaya yarayan delici makinelerdir (boring machine).



Şekil 3.6 Kompaksiyon betonlama ekipmanlarının şematik görünümü (Arslan, 2006)

Betonlama İşlemi

Kompaksiyon betonlamadaki betonlama işlemi, genellikle Şekil 3.7'deki gibi beton balonlarının, zemin içerisine en derin kottan en üst zemin kotuna kadar, aşağıdan yukarıya doğru (staging up) enjekte edilmesiyle yapılmaktadır. Betonlama işleminde, en derin beton balonunun harcı, ilk önce enjekte edildikten sonra diğer beton balonlarının tasarlanan hacimleri de adım adım yukarıya doğru çıkılarak enjekte edilmektedir.



Şekil 3.7 Uygulanan kompaksiyon betonlama yöntemleri: bottom-up yöntemi, top-down yöntemi (Arslan, 2006)

3.3 Jet Betonlama (Jet Grouting)

Jet betonlama, basit olarak yüksek basınç ile mevcut deniz tabanı zemininin içinin oyulup betonla doldurması işlemidir. Jet betonlama operasyonunun evrelerinden ilki olan delme işlemi esnasında kullanılan püskürtme sistemi ile tıpkı bir spiral gibi kendi eksenini etrafında dönererek toprağın alt katmanlarına kadar inilmektedir. Püskürtme sisteminde kullanılan yüksek basınçlı suyun yatay olarak çalışması sayesinde toprak itilmekte ve daha sonra sistem aynı hareketi yukarı çıkarken yapmaktadır. Ancak yukarı çıkış esnasında, jet betonlama sistemi; çimento karışımını basmaya başlamaktadır. Böylece oyulma sırasında boşaltılmış olan toprakların yerini yüksek mukavemetli çimentolu zemin harcı almaktadır. Bu çimentolu zemin yapısına 'soilcrete' denilmektedir.

Jet grouting, su jeti prensibine dayanmaktadır. Uygulama sırasında zemine yüksek basınçla sokulan sonda istenilen derinliğe indirilinceye kadar enjeksiyon uygulanmamaktadır. Tasarlanan derinliğe ulaşıldıktan sonra çok yüksek hızda bir enjeksiyonla sonda döndürülerek ve yavaşça çekilerek çıkartılmaktadır. Jet betonlamanın maliyet giderleri kullanılan teknolojik sistem ve ekipmanlar dolayısıyla oldukça yüksektir.

3.3.1 Jet Betonlama Sistemleri

Üç adet kullanılan jet grouting sistemi bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; tek milli jet betonlama, çift milli jet betonlama ve üç milli jet betonlama sistemleridir. En uygun olan sistem; zemin, uygulama (aplikasyon), uygulama için gerekli fiziksel karakteristiklerin fonksiyonuna ve ekonomik koşullara bağlı olarak belirlenmektedir. Bununla beraber, her sistem doğru tasarım ölçütleri ve operasyon şartlarını sağladığı sürece, birçok uygulamada birbirlerinin yerine kullanılabilirlerdir.

Tek Milli (Single Rod) Jet Betonlama

Beton ve su sırasıyla tek bir milin içinden yaklaşık 200 m/s'lik hızla pompalanabilmektedir. Bu hızın oluşturduğu enerji zeminin aşınmasına ve betonun zemin altına karışmasına ve yerleşmesine neden olmaktadır. Tek mil jet betonlama zemin iyileştirme ile ilgili jet betonlama sistemleri arasında en az etkili olanıdır.

Çift Milli (Double Rod) Jet Betonlama

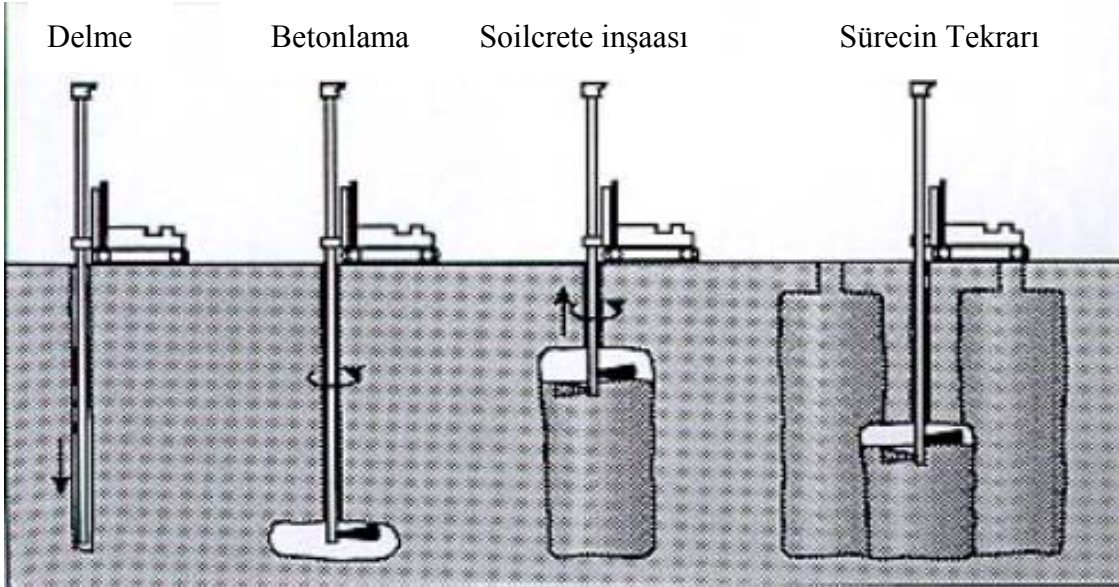
İki aşamalı dâhili mil sisteminde; beton+su karışımı ile havanın münferit olarak eş zamanlı parçacıklar halinde uygulanması amaçlanmaktadır. Bu sistemde yüksek oranda çimento içeren beton harcının toprak içine karışması amaçlanmaktadır. Hava, yüksek hızda enjekte edilen

beton parçacıklarını örtmekte ve delme esnasında zeminin aşınma (erozyon) kabiliyetini arttırmaktadır. Çift mil sistemi, kendi içinde bağlılığı yüksek olan kohesif (cohesive) zeminlerde tek mil sistemine göre daha etkilidir.

Üç Milli Jet Betonlama

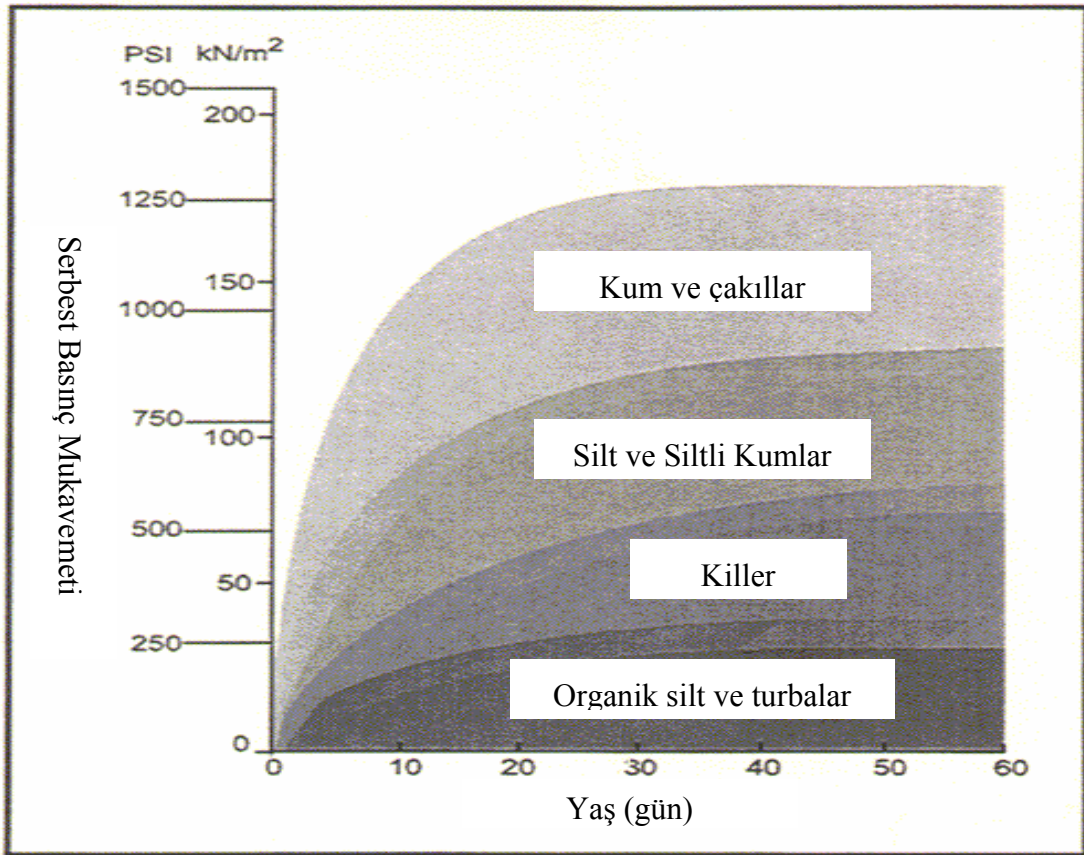
Yüksek oranda çimento içeren beton harcı, hava ve su istenen bölgeye üç farklı hat içinden yollanmaktadır. Yüksek hızlı eşeksenli hava ve su yeterli aşınmayı sağlamaktadır. Beton nispeten düşük bir hızla ayrı deliklerden aşınmanın sağladığı etkiyle yayılmaya başlamaktadır. Bu bir bakıma aşınma sürecini betonlama sürecinden ayırmakta ve daha yüksek kalitede zemin-çimento (soilcrete) yapısını ortaya çıkartmaktadır. Üçlü mil jet betonlama sistemi kohesif (cohesive) zeminlerde en etkili sistemdir.

Şekil 3.8’de ise jet betonlama operasyonuna ait akış şeması görülmektedir. Sırasıyla jet betonlama operasyonu; delme, betonlama (grouting), çimento+zemin yapısı (soilcrete) oluşturma ve sürecin tekrar edilmesi aşamalarından oluşmaktadır.



Şekil 3.8 Jet betonlama akışı [4]

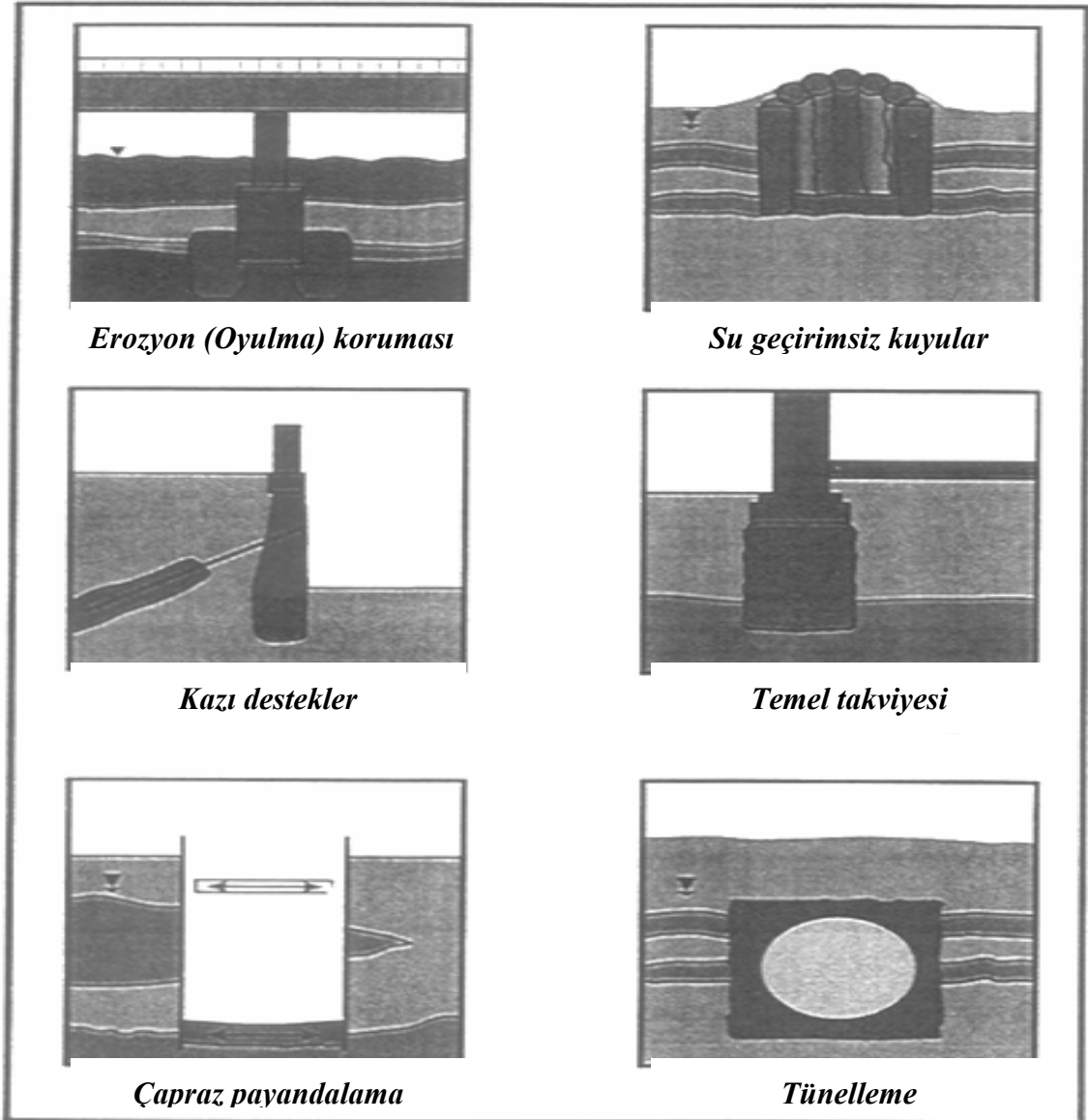
Deniz tabanı zemin türlerine ilişkin tipik jet beton sütunlarının dayanımları, kolon yaşı (gün) ölçütüne göre Şekil 3.9'da görüldüğü gibi değerlendirilmektedir. Şekilden de kolaylıkla anlaşıldığı üzere, jet beton kolonlarının kum ve çakıl içerikli zeminlerde maksimum verimliliği sağladığı görülmektedir (60. günde kolon dayanımı: 1000–1250 kN/m²). Bununla beraber, organik silt ihtivası fazla olan deniz tabanlarında ise jet beton kolonlarının iyileştirme etkileri oldukça azalmaktadır (60. günde kolon dayanımı: 0–200 kN/m²).



Şekil 3.9 Deniz tabanı zemin türlerinde tipik beton-zemin (soilcrete) dayanımları (Burke, 1989)

3.3.2 Jet Betonlama Uygulama Alanları ve Avantajları

Jet betonlama, uygulanma alanları açısından, klasik betonlama, kimyasal betonlama, temel takviyesi (underpinning), sıkıştırılmış hava ve tünellemede dondurma uygulamalarına bir alternatiftir. Sıvılaşma riski yüksek olan deniz tabanı zeminlerinde uygulanmak üzere düşünülebilir. Şekil 3.10'da jet betonlamanın uygulama alanlarına ilişkin çeşitli örnekler gösterilmiştir.



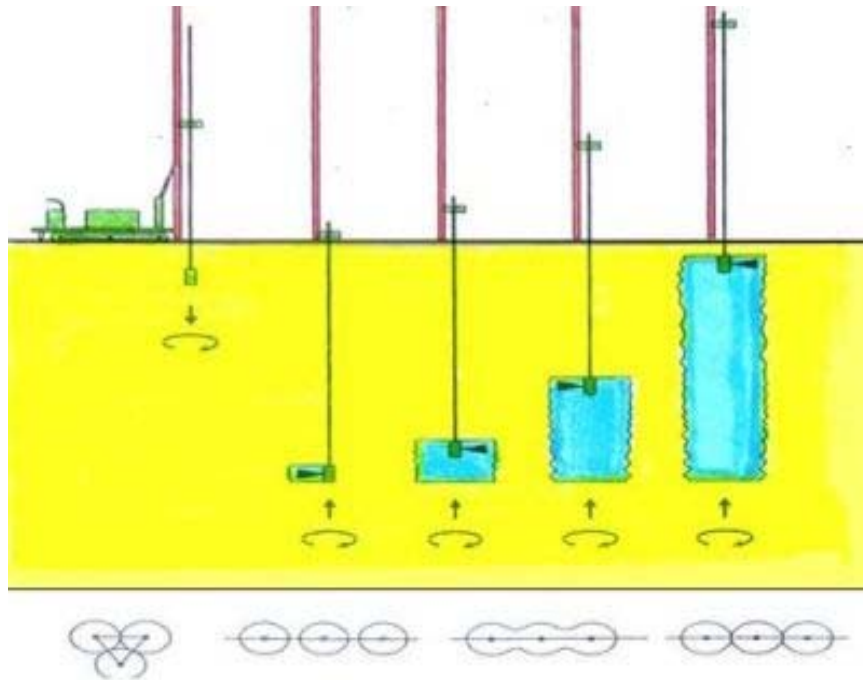
Şekil 3.10 Jet betonlama uygulama alanları (Burke, 1989)

Jet betonlama yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları aşağıdaki gibidir:

Jet Betonlamanın Avantajları

- 1) Hemen hemen bütün zemin tiplerinde uygulanabilme şansı vardır.
- 2) İstenen tasarım dayanımı ve geçirgenliği sağlayabilir.
- 3) Özel (deniz) yeraltı koşullarında iyileştirme başarısı mevcuttur.
- 4) Sadece hareketsiz aksamlar kullanılabilme özelliği vardır.
- 5) Deniz tabanına zarar verici titreşimleri oluşturmaz.
- 6) Kısıtlı çalışma mekânı yeterlidir (deniz üstü çalışma platformu, duba vb.).
- 7) Ekipmanların teknik yeterliliklerinin üst düzey olmasından dolayı, tasarlanmış olan zemin-çimento yapısı (soilcrete) en kesitin uygulanması mümkündür.
- 8) Diğer deniz tabanı iyileştirme yöntemlerine göre, inşa alanındaki güvenlik açısından en güvenli yöntemdir.
- 9) Alternatif deniz tabanı iyileştirme yöntemlerine göre daha hızlıdır.

Avantajlarından yukarıda bahsedilen jet betonlama deniz tabanı iyileştirme yönteminin uygulama safhaları Şekil 3.11’de ana hatlarıyla gösterilmektedir.



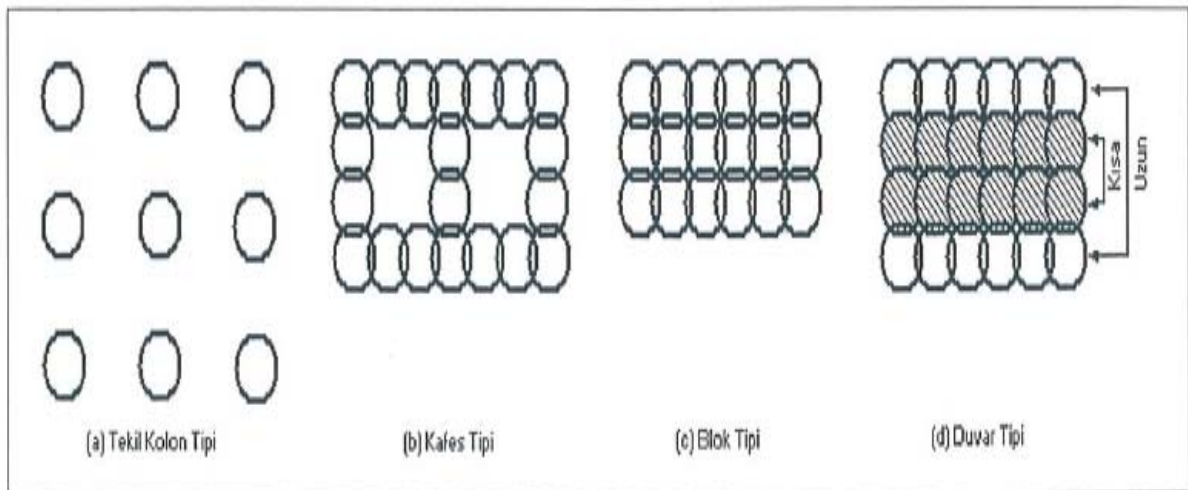
Şekil 3.11 Jet betonlama yöntemiyle zemin iyileştirme [3]

3.4 Çimento Enjeksiyonu (Cement Grouting)

Çimento enjeksiyonu özellikle taşıma gücü zayıf olan deniz tabanında düşük basınçlar altında uygulanmaktadır. Bunun için deniz zemininin içine kadar uzanan borular yerleştirilmektedir. Daha sonra önceden belirlenmiş, derinlik olarak alt kısımlardaki deliklerden başlanarak düşük basınç altında çimento şerbeti enjeksiyonu yapılmaktadır. Herhangi bir borudan uygulanan çimento pompalama işlemi, tasarlanmış hacim sağlanana kadar devam etmektedir. Çimento içirimi yapılmış delik kapatılmaktadır. Bu işlem her bir sıradaki delikler doluncaya kadar sürdürülmektedir. Daha sonra aynı işlemler bir sonraki sıradaki enjeksiyon delikleri için uygulanmaktadır. Tasarıma göre delikler arasında boşluklar mevcut olabilir. Bu deliklerin, o bölgedeki sıvılaşma potansiyelinin azlık ve çokluk durumuna göre yerleştirilmesi gerekmektedir. Deliklere takılacak borular kullanılacak pompanın hortum ucu boyutuna göre seçilmektedir.

Çimento enjeksiyonu ile yapılan zemin iyileştirmelerinde, yerinde alınan karot numunelerindeki gözlemler ve basınç deneyleri, tekil ve grup yükleme deneyleri, kazı yapılıp uygulama çapının kontrolü, enjeksiyon karışımından alınan numuneler üzerinde viskozite, yoğunluk, kür zamanı kontrolü ve uygulama sırasındaki basınç tahkiki gibi yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Şekil 3.12’de çeşitli uygulama yöntemlerinin gösterildiği çimento enjeksiyonu, ilerleyiş açısından yavaş ve zaman alıcıdır. Ayrıca çimento pompalama donanımı gerektirmektedir. Kullanılan çimento genleşen ve ilk direnci yüksek çimento olmalıdır.



Şekil 3.12 Çeşitli çimento enjeksiyonu zemin iyileştirme yöntemleri (Özsoy, 2003)

a) *Çimento Enjeksiyonu Malzemeleri*

Gerekli olan malzemeler; çimento, su, sert zeminlerde bentonit, kum ve katkı malzemeleridir.

Çimento; torbalar halinde ya da büyük miktardaki işlerde silodan alınarak enjeksiyon karışımına katılmaktadır. Önemli olan belirlenen ağırlıkta çimentonun teminidir. Enjeksiyon işlerinde PÇ 32.5 çimento kullanılabilir. Enjeksiyon işlerinde PÇ 32.5 çimento kullanılabilir.

Bentonit; bazı karışımlarda ilave olarak katılmakta ve çimento ağırlığına göre daha önceden belirlenen oranda sıvı olarak uygulanmaktadır. 12 saat önce su ile karıştırılan bentonit şişerek daha sonra çamur haline gelmektedir. Yoğunluğu ve viskozitesi ölçülerek katılacak konumda muhafaza edilmektedir. Böylece bentonit kullanılmasıyla, karışımdaki su miktarı azaltılmış ve yerine bentonit çamuru kullanılmış olmaktadır.

Su; katkısız, asitsiz ve yeterli oranda bulundurulmalıdır. Kimyasal analizi yapılmış temiz su kullanılmaktadır.

Katkı malzemeleri; çimento enjeksiyonunda su+çimento yeterlidir. Enjeksiyon alış durumuna göre bazen uçucu kül, priz hızlandırıcı, sodyum silikat vb. gibi özellikte kimyasal katkıları enjeksiyon karışımına katılabilir.

b) *Çimento Enjeksiyonu Donanımı*

Delici makine: Deniz tabanı ortamının toprak türü zemin veya kaya olmasına göre, uygun bir delici makine ve ilgili delici uç, matkap, vidye, tij, su başlığı gibi donanım kullanılmaktadır.

Enjeksiyon istasyonu donanımları: Mikser, dinlendirici, pompa, su tankı, çimento silosu, basınç göstergeleri, vanalar, su saati vb. donanımlardır.

Enjeksiyon uygulama donanımları: Gidiş-dönüş hattı, hortumlar, özel sondaj contaları (packerler), kurtağzı.

c) *Enjeksiyon Karışımı*

Enjeksiyon karışımı belirli orandaki suyun ve çimentonun mikserde birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Uygulama alanına göre su/çimento oranı ayarlanmakta, çok miktarda hacim dolacaksa, pompanın basmasının mümkün olduğu oranda (%25 kadar) kum katılmaktadır. Geçirimsizlik ve ince çatlakların doldurulması bentonit karışımı ile sağlanmaktadır.

Mikserde hazırlanan enjeksiyon karışımı, dinlendiriciye alınmakta ve oradan pompa aracılığıyla hortumlar ile kuyuya verilmektedir.

d) Enjeksiyon Şekli ve Enjeksiyon Uygulaması

Projede belirlenen yere, teknik bilgiler aracılığıyla hazırlanan enjeksiyon karışımı basılmaktadır. Bunun için:

Delici makine ile açılan kuyu içine bırakılan tij+matkap ucundan zemine enjeksiyon karışımı basılmaktadır. Tasarıma göre uygulama noktası üzerinde kuyuya paketleyici (packer) yerleştirilerek, enjeksiyon karışımının zemine girmesi sağlanmaktadır. Zemin enjeksiyon karışımına doyunca, packer daha yukarı alınarak enjeksiyon karışımının daha üst seviyelere verilmesi sağlanabilmektedir. Su/çimento oranı 3/1 gibi ince karışım olarak başlanabilmektedir, sonra 1/1 ve 1/3 gibi kaba karışıma gerekirse kum ilave edilerek, zeminin dolmasına çalışılmaktadır. Bahsedilen tek kademeli paketleyicili (packerli) aşağıdan yukarıya yönteminin yanı sıra çift paketleyicili (packerli) uygulama da yapılabilmektedir. Yukarıdan aşağıya kademeli yöntemle zemini iyileştirerek daha derinlere inmek mümkündür. Zeminin doymasına ‘enjeksiyon refüsü’ denmekte ve karışım geri dönerek, enjeksiyon istasyonuna alınmaktadır. İnce karışım ile başlayarak, kaba karışıma geçmek, refüden sonra ince karışım uygulaması ile enjeksiyonu tamamlamak tercih edilmektedir.

e) Enjeksiyon Çeşitleri ve Katkılar

Deniz zemini iyileştirmesinin durumuna göre farklı malzemelerden oluşan değişik orandaki karışımlar uygulanabilmektedir. Bunlar enjeksiyon için değişik karışımları gerektirmektedir. Uygulanabilen enjeksiyon çeşitleri şunlardır:

- 1) Kontak enjeksiyonu, konsolidasyon (pekiştirme) enjeksiyonu, örtü enjeksiyonu, dolgu enjeksiyonu, boru enjeksiyonu, harç enjeksiyonu
- 2) Kimyasal enjeksiyon (betonlama), yüzey enjeksiyonu, epoksi enjeksiyonu, bentonit enjeksiyonu, katkılı özel enjeksiyon.

f) Uygulama, Kayıtlar ve Raporlar

Enjeksiyon karışımının zemine uygulaması ile ilgili her türlü malzeme ve davranış kayıt edilmektedir. Zemin enjeksiyon uygulama raporunda, başlama – bitiş zamanları, delici makine sondaj bilgileri, paketleyici (packer) yerleştirme kotları, karışım oranları ve verilen miktarları, enjeksiyon ekipman adları ve özellikleri, sarf edilen malzeme (su, kum, çimento) miktarları, enjeksiyon basınçları, enjeksiyon kalıp (pattern) bilgileri bulunmaktadır. Zemin enjeksiyon uygulama raporunun değerlendirilmesiyle, plan ve kesitte enjeksiyon alışı durumuna göre zeminin son durum kontrolü gerçekleştirilmektedir.

4. BETONLAMA TEKNOLOJİSİNDE YENİ DENEYSEL SAPTAMALAR VE SAHA TECRÜBELERİ

4.1. Giriş

Tanecikli (granular) ve yumuşak zeminlerde betonlama (grouting) uygulamalarının ana amacı dayanım kazanımı sağlamak ve permeabiliteyi azaltmaktır. Tasarımda ve uygulamalarda kayda değer bir ilerleme elde edildiği halde, kalite kontrol ölçümlerinde hala birçok konuda eksiklikler mevcuttur. Örnek olarak; kazılmış oyukları sıkılaştırmak ve dayanımını arttırmak için kullanılan betonlama (grouting) kümeleri (rafts) tasarımında, kesin bir kalite kontrol stratejisi bulunmamaktadır. Grouting (betonlama) kümelerinin (rafts) su geçirimsizliği hakkındaki güvenilirliği, grouting (betonlama) delgilerinin seçilmiş aralıkları ve enjekte edilmiş beton malzeme hacimlerini bularak belirlenmektedir. Bir diğer yandan, toprak ve beton birbirleriyle farklı etkileşimi gösteren mekanik modeli ve toprakla zeminin karışma süreci ile ilgili elde edilmiş veriler yetersiz kalmaktadır. Şimdiye kadar deneysel tasarım kuralları, çoğunlukla başarılı olmuş ve doğru oranlama (çözelti) sağlanmış uzun vadeli tecrübelerle dayanılarak saptanmıştır.

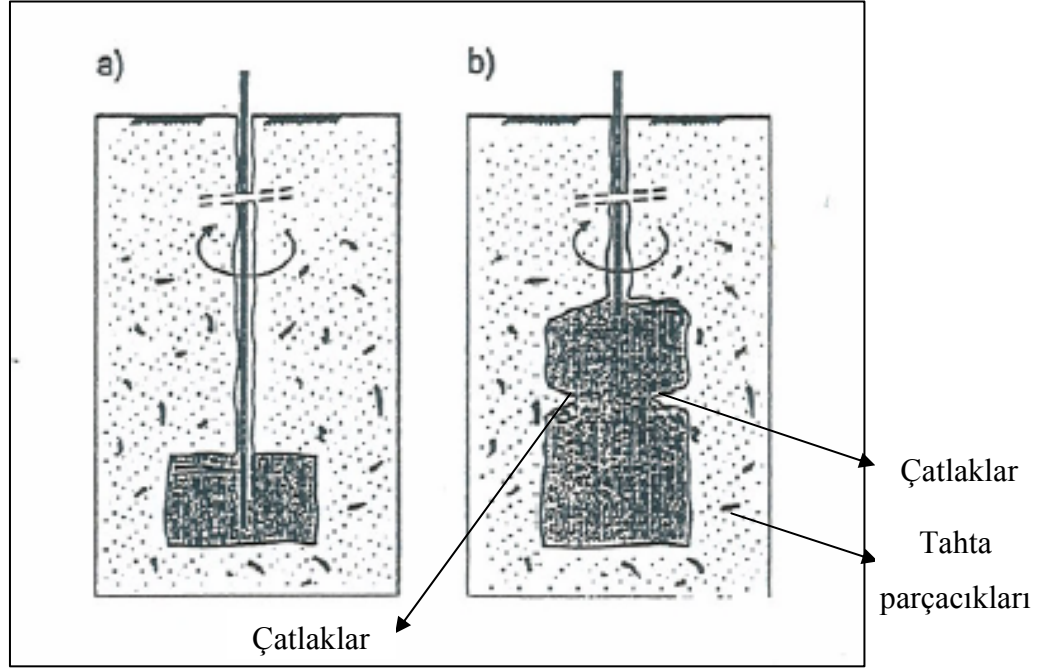
4.2. Betonlama (Grouting) Tekniklerinde Yeni Saha Uygulamaları

Son yıllarda, zeminin taşıma kapasitesini artırma üzerinde çok etkili olabilen zemin iyileştirme yöntemlerinde etkileyici bir gelişme süreci görülmüştür (Kutzner, 1996). Bu bağlamda, uygulanan betonun özellikleri dayanım ve su sızdırmazlık kıstaslarında istenen yüksek talebe ayak uydurmuşlardır.

Pek çok durumda görüldüğü üzere, betonlanmış zemindeki küçük kusurlardan dolayı kritik limit durumlarında tehlike ve ciddi hasarların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, iyileştirilecek zemin için, özellikle laboratuvarlarda birebir modeller yapılarak, detaylı araştırmalar sonucunda doğru zemin ıslahı yöntemi seçilmelidir.

Aşağıda özellikle tanecikli zeminde uygulanmış betonlama örnekleri ile zeminde betonlama ile yapılmış zemin iyileştirmelerine ilişkin daha bazı görüşler ve zorluklar açıklanmıştır:

1) *Tanecikli (Granular) zeminde jet betonlama (grout) yöntemiyle uygulanmış beton sütunlarında fosil tahta parçalarının oluşturduğu hatalar*



Şekil 4.1 Tanecikli (Granular) zeminde jet betonlama (grout) yöntemiyle uygulanmış beton sütunlarında fosil tahta parçalarının oluşturduğu kusurlar (Gudehus ve Schwarz,1998).

Almanya'nın kuzey kısmındaki kumlu ve kısmen çakıllı zeminde jet betonlama uygulanan bir çalışmada, odun ve odunsu malzeme içeren tabakaların çevrenmesinde ciddi hataların farkına varılmıştır. Küçük miktardaki tahta parçacıklarının mevcudiyetinin enjekte edilmiş beton bloklarının çapında ve dayanımında azalmalara neden olduğu görülmüştür. Gudehus ve Schwarz (1998), bu dirençli ve yapışkan birkaç cm çapındaki tahta orijinli parçaların jet betonlama operasyonun başarı ile uygulanmasına olumsuz etkide bulunduğunu deneylerle kanıtlamışlardır. Tahta taneciklerinin açıkça zemine su ve süspansiyon jetiyle basılan malzemenin üstüne yerleştiği görülmüştür. Tahta parçacıklarının bu şekilde yığılması kesme (cutting) jetinin ters yöndeki akışını sınırlamaktadır. Şekil 4.1'e bakılacak olursa kayda değer ölçüde çatlakların küçük tahta parçacıklarının ve kum tabakalarının varlığı mevcuttur. Böyle bir durumda beton sütunlarının taşıma gücü, dayanım kazandırma ve su geçirimsizliği gibi özelliklerini yitirdikleri görülmüştür.

2) *Tanecikli zemindeki yumuşak dökülmüş betonda organik metal içeriğinden kaynaklanan hatalar*

Berlin kumundaki derin kazı saha çalışmaları sırasında dipteki toprak kotlarına basılmış beton yığınlarıyla ilgili başka bir olay ile karşılaşmıştır. Yüksek yeraltı su seviyesi yüzünden, yapılan kazılar istinat duvarlarıyla çevrelenmiş su geçirmez kutular içinde yapılacak şekilde tasarlanmaya başlanılmıştır. Beton yığınları yumuşak jel kıvamında sodyum silikat solüsyonu halinde uygulanmıştır. Kazı sırasında ve suyu uzaklaştırma çabaları esnasında; baştan mevcut olan yüksek permeabilitenin derin kota kadar basılmış beton yığınları sayesinde önemli şekilde düştüğü görülmüştür.

Yumuşak jel kıvamındaki beton kümelerinin inşası, yapılan su altı kazısı tabanında temel görevi görmüş ve uygulanan zemini taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırmıştır (Kutzner, 1996).

Kumlu toprak ve çakıl tabakası arasındaki ara yüzde, yeraltı suyunun izlediği yoldaki keskin değişim türbülansa neden olmaktadır. Yeraltı suyuna karışmış organik özellikli parçalar çökelmekte ve ara yüzdeki boşlukları tıkamaya başlamaktadır. Bu tıkanma sürecine 'kolmatasyon' (kolmatation) adı verilir (Katzenbach, 1998).

Kum ile çakıl tabakaları arasındaki ara yüzdeki tıkanma, tasarımda istenen hidromekanik koşullardaki değişime öncülük etmektedir.

3) *Derin kota sahip jet betonlama ile elde edilmiş beton bloklarının su geçirimsizliği*

Beton yığınlarının su geçirimsizliği, kazmaya başlamadan önce kazı yeraltı su seviyesinin ölçülmesi sonucunda kontrol edilen suyu uzaklaştırma uygulamasıyla elde edilebilmektedir. Suyu uzaklaştırma çalışması, bitirilen betonlama işinin kalitesinin ve basılan beton yığınının bütünlüğü ile su geçirimsizliğinin tespit edilebilmesi için etkili tek yöntemdir (Iagolnitzer, 1999).

Derinlik arttıkça basılmış betonun eşdeğer kalite kontrolünü gerçekleştirmek daha da zorlaşır.

Tünel sondaj makinesi (tunnel boring machine) için yapılan başlangıç çukuru kazısından (starting pit) sonra, yine tünel sondaj makinesinin başlama konumu için diyafram duvarının içinde bir pencere açılmalıdır. Bu süreç sırasında, diyafram duvarının arkasındaki jet betonlama yapılmış beton blokun su geçirimsizliği ve dayanımı emniyete alınmalıdır. Bu sayede, diyafram duvarındaki pencerenin dayanımı, tünel sondaj makinesi rotasını geçene

kadar korunmuş olacaktır.

Projelendirmenin en önemli özelliği, jet betonlama uygulaması sırasında su geçirimsizliğinin büyük ölçüde başarıyla tamamlanabilmesidir. Kahire Metrosu (Wheeler ve Assor, 1998) ve Berlin'deki demiryolu tüneline uygulanan projelere bakılacak olursa buradaki yapılan uygulamalarda jet betonlama bloklarının su geçirimsizliğini sağlayamadıkları görülmüş ve bunun sonucunda büyük sorunlar ortaya çıkmıştır. Her iki projede de; Kahire ve Berlin'de; jet beton bloklarının üst üste uygulanması (overlapping) orta sıklıkta kum içinde yapılmıştır. 200 kadar jet betonlama sütunu çeşitli hatlarda ayarlanmış; 10-15 metre yükseklikte, 20-60 m genişlik ve 5-8 metre derinlikte tünelin bazı bölümlerinde uygulanmıştır.

Diyafram duvarının bir parçası olan; tünel sondaj makinesi için pencere oluşturmak konusunda, her iki proje esnasında da, büyük problemler ortaya çıkmış ve hasarlarla karşılaşmıştır. Jet betonlama blokları, kumlu zeminlerde ve yüksek basınç içeren büyük derinliklerde uygulandığı zaman, beton blok kümesi arasında oluşan küçük, zayıf ve iyileştirmeye uğramamış zemin kısımlarının bitişik zeminler arasında borulanmaya sebep olabildiği görülmüştür. Böyle bir durumda devam etmekte olan deniz altı tünel projesinin ilerleme sürecinin gecikme riski doğmuştur.

Yapılan iyileştirme esnasında, jet beton blokları arasında bulunan zayıf ve hala iyileştirilememiş zemin kısımlarına rastlanabilmesi, bu duruma toprak karakteristiklerinin sahip olduğu çeşitlilik ve tahta ya da kaya parçalarının oluşturduğu süreksizlikler sebep olabilmektedir. Düzenli sütun çapları ve homojen dağılımlı sütunları elde edebilmek için önkoşul; süspansiyon haldeki betonlanmış malzemenin kendi dayanıklılığına ulaşana kadar taze betonla çevrelenmiş toprağın kararlı, sağlam ve stabil halde kalabilmesidir. Blokların uygulanması sırasında dikeylikteki sapma önemli ölçüde engellenmeli, sınırlamalar içerisinde kalmalıdır.

Kahire ve Berlin projeleri esnasında uygulanan jet betonlama sütunları dikkatli bir şekilde gözlemlenmiş ve ilgili veriler inşaat süreci için uygun bulunmuştur. Kahire'de, ilk hasar görüldükten sonra, delme ve betonlama parametreleri gelecekte uygulanacak jet beton blokları için geliştirilmiş ve söz konusu bloklar için ek kalite kontrol operasyonları gerçekleştirilmiştir. Fakat buna rağmen iyileştirilmemiş kısımların kaldığı gözlemlenmiştir. (Wheeler ve Assor, 1998). Daha ayrıntılı araştırmalar; nadiren de olsa sızıntı yollarının jet betonlama bloklarının temellerinde görüldüğünü işaret etmiştir.

Başlama oyuğu (starting pit) içindeki diyafram duvarına ait pencereyi açmadan önce, jet betonlama bloklarının sızıntıya sahip olup olmadığını kontrol etmek için güvenilir bir yöntem bulunmamaktadır. Bu yüzden jet betonlama bloklarının su geçirimsizliğinin sağlanması garanti edilemez. Dolayısıyla, özellikle yüksek basınç altındaki yüksek oranda kumlu malzeme içeren deniz zemininde, jet betonlamanın tek başına uygulanması su geçirimsizliğini (watertightness) sağlayamamakta ve sızıntı riski sürekli olarak devam etmektedir.

Jet betonlama bloklarının boyutlarını ve geometrisini kontrol edebilmek, mekanik olarak inşaat sürecini daha iyi analiz etmek, betonlama ve zemin arasındaki etkileşimi tam anlayıp daha etkili ve doğru kalite kontrol ekipmanları üretebilmek için; daha fazla ölçüm ve deneysel anlamda araştırma yapmak gerekmektedir.

4.3 Kompaksiyon Betonlama Üzerine Karşılaştırmalı Saha Denemeleri

Kompaksiyon betonlama tekniği, zemine yerleştirilmiş beton kolon şebekelerinin sıkıştırma (kompaksiyon) etkisiyle, zeminin boşluk oranının azaltılması ve taşıma kapasitesinin artırılmasını hedeflemektedir. Söz konusu teknikteki, beton harcı çok yoğun ve katı halde zemine yüksek basınç kapasiteli pompalar aracılığıyla basılmaktadır (8 MN/m^2).

Kompaksiyon betonlama tekniği, Amerika'da çok iyi bilinen ve 1940'lardan beri kullanılan yaygın bir yöntemdir (Warner ve diğ., 1992; Graf, 1992). Kompaksiyon betonlama daha sonra Avrupa'da da kullanılmaya başlanılmış ve Fransa'da 1996 yılında uygulanmıştır (Iagolnitzer, 1999). Günümüzde ise birçok önemli deniz altı projesinde zemin iyileştirme yöntemi olarak yerini almıştır. Bunlardan biri de Marmaray Projesi'dir.

Söz konusu yöntem çeşitli projelerdeki farklı saha ve koşullarına karşılaşılan sorunlarla başa çıkmış, zorlu deniz koşulları altında başarılı sonuçlar vermiştir. Örneğin; destekleme amaçlı (Burke ve diğ., 1991), oturma miktarını azaltma amaçlı (Steiner, 1992), kireçtaşı (karst) arazilerinin iyileştirilmesinde (Shibazaki ve Okta, 1992), sızıntı riskini azaltmak amacıyla (Burke ve diğ., 1989), yerini doldurma, telafi (kompansasyon) betonlamalarında (Critchfield ve Macdonald, 1989), şev dengellemelerinde (stabilizasyon) (Gudehus ve Schwarz, 1998), pürüzsüz düzgün temel yapımında (Bell, 1993) kompaksiyon betonlama tekniği uygulanmıştır. Kompaksiyon betonlama kilden (doymamış olması tercih edilmektedir) kuma kadar çeşitli zeminlerde uygulanabilmektedir.

Kompaksiyon betonlama gereksinimlerini araştırmak, oturma miktarını azaltmak amacıyla yeni tasarım yöntemleri geliştirmek, kompaksiyon betonlama projeleri hazırlamak ve bunlarla ilgili literatür çalışmaları oluşturmak amacıyla; Darmstadt Üniversitesi Geoteknik Enstitüsü'nde bir araştırma programı yürütülmüştür (Iagolnitzer, 1999). Bu araştırma programının bir parçası olarak, Fransa- Almanya ortaklığı (FNTP – Federation Nationale des Travaux Publics) ve Bachy ve Darmstadt Üniversitesi Geoteknik Enstitüsü; kompaksiyon betonlama üzerine karřılařtırılmalđ saha denemelerinin yapılmasına imkan tanımıştır. Bu çalışmalar aşağıda belirtilen amaçlar kapsamında gerçekteştirilmiştir:

- Geniş ölçüde yapılan uygulamalarda kompaksiyon betonlamanın etkinliğini kanıtlamak; iyileştirilmiş ve iyileştirme yapılmamış zeminlerdeki oturma miktarlarının kıyaslanması.
- Kullanılan yöntemin uygulanması sonucunda sıvılaşma riskine karşı zemini iyileştirmedeki başarısının gözlemlenmesi.
- Bu tür betonlama uygulamasında tasarım yönteminin geliştirilmesi.

Deneme, Paris yakınlarında bulunan CEBTP (Centre d'Etudes du BTP)'in gözetiminde yapılmış olup şu aşamalardan oluşmaktadır: sahanın inşası, zemin etüdü, kompaksiyon betonlamanın sahanın yarısına uygulanması, saha kalite kontrol deneyleri, iyileştirme yapılmış ve yapılmamış zeminlere yükleme yapılması ve oturma hesapları (CEBTP 1996, 1997a ve 1997b).

Sahanın İnşası

Saha, 3 metre kalınlığında sıkıştırılmadan dökülmüş ince kumdan oluşturulmuştur. Yoğunluk ve su ihtivası düzenli olarak ölçülerek ve sırasıyla 15 KN/m³ ve %6 koşullarında ayarlanmıştır. Malzemenin üst kısmına, kompaksiyon betonlama sırasında kum malzemesinin yukarıya çekilmesini engellemek için 2m kalınlığındaki kaplama yerleştirilmiştir.

Kompaksiyon Betonlama Uygulaması

Kompaksiyon betonlama, belirlenen tasarım yöntemine göre gerçekteştirilmiş ve sahanın yarısına uygulanmıştır. Sahada planlanan tasarım kalıbına göre kesifen yatay ve düşey çizgilerden her birinin içinde kalan alan 3.5 m² (2.0 m × 1.85 m) dir. Enjeksiyon evreleri 25 cm yüksekliğindedir.

Kompaksiyon betonlama, aşağıdaki saha kriterlerine erişildiğinde durdurulmuştur:

* Zemin kabarması (yükselmesi)

* Beton harcı miktarının 70 litre/iyileştirilen bölgeye ulaşması durumu

* Maksimum pompa basıncının kum tabakasının üst tarafında 8 kg/cm^2 'den tabanda 20 kg/cm^2 'ye ulaşması durumu

Kalite kontrol verileri; delgi ve betonlama parametrelerine dayanılarak oluşturulmuştur.

Beton harcının çökme (slump) değeri 5 ile 9 cm arasında ve basınç dayanımı 51 kg/cm^2 olarak kullanılmıştır. Kompaksiyon betonlamadan sonra zeminin taşıma kapasitesi 1200 kN yük [8 adet çapa her iki kısma (iyileştirme yapılmış ve yapılmamış kısım) 4'er adet] uygulanarak test edilmiştir.

İyileştirme öncesi ve sonrası yapılan deneyler

Kompaksiyon betonlama değerlendirilmesine ilişkin normal deney yöntemi; iyileştirme yapılmış ve yapılmamış zeminlerin birbirleriyle karşılaştırılmasıdır.

4 basınç ölçer deneyi ve 6 CPT (Cone Penetration test) her iki kısımda da iyileştirmeden önce ve sonra gerçekleştirilmiştir. İyileştirilen zeminde, deneyler anlaşıldığı üzere yatay ve düşey hatlardan oluşan iyileştirme kalıbının orta kısımlarında konumlandırılmıştır. CPT belirgin bir iyileştirmenin sağlandığını ispatlamıştır. Şöyle ki; iyileştirmeden önceki basınç dayanımı değerleri $0-10 \text{ kg/cm}^2$ arasındayken, iyileştirmeden sonraki değerlerin $1-25 \text{ kg/cm}^2$ içerisinde olduğu görülmüştür. Fakat bu bilgiler sadece nitelik bakımından geçerlidirler.

Basınç ölçer deneylerindeki sonuçlar ile iyileştirme yüzdeleri hesaplanmış ve Çizelge 4.1'de sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Basınç ölçer deneylerinin karşılaştırmalı sonuçları

Basınç ölçer sonuçları	İyileştirilmiş bölge	İyileştirilmemiş bölge	Oran
Basınç ölçer modülü $E_M \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	3.2 ± 0.66	1.72 ± 0.91	1.86
Limit basınç p_1 $\text{(kN /m}^2\text{)}$	270 ± 40	180 ± 70	1.5

Karşılaştırmalı yükleme deneyi

2 metrelik kaplama sökülmiş ve 40 cm kalınlığında her birinin kapladığı alan 10.5 m² olan 2 adet köşeli beton levha kurulmuştur. İyileştirme yapılmış bölge üzerinde, beton levhalar üç adet beton basılmış noktanın üzerine gelecek şekilde konulmuştur.

Yükleme yapısı çapalar sayesinde zemine sabitlenmiştir. Yapılan yüklemelerin zemine etkisi basınç ölçer ile ölçülmüştür. Beton levhaların ortalarındaki oturmalar kenarlara göre 1.5 cm daha büyük ölçülmüştür. İyileştirme sonuçları, Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi özetlenmiştir:

Çizelge 4.2 Oturma sonuçlarının özeti

Oturma Miktarı (cm)	İyileştirilmemiş bölge	İyileştirilmiş bölge	İyileştirme oranı
Orta kısımda	8.0	2.5	3.2
Kenarlarda	6.5	1.0	6.3
Ortalama	7.2	1.8	4.0

Sonuç olarak; 4 yerde ölçülen oturma miktarlarındaki azalmaya dayanılarak kompaksiyon betonlamanın etkinliği çok açık bir şekilde görülmektedir.

Bu iyileştirme (sırasıyla iyileştirme oranları; merkezde 3.2, kenarlarda 6.3 ve ortalama olarak 4) basınç ölçer modülü (E_M) (iyileştirme oranı:1.86) iyileştirmesinden daha büyüktür. Bu büyük fark şöyle açıklanabilir; basınç ölçer deneyi sadece zemindeki kompaksiyon miktarını hesaba katarken, beton kolonlarının etkisini hesaba katmamaktadır. Bu ise oturma miktarındaki azalmada önemli bir rol oynamaktadır.

Sonlu elemanlarla hesaplamalarının sonuçları Çizelge 4.3’te görülmektedir.

Çizelge 4.3 Beton levhaların merkezindeki kıyaslamalı oturma miktarları

	Oturma miktarları (cm)	
	Sonlu eleman hesabı	Saha deneyi
İyileştirilmemiş bölge	7.9	8.0
İyileştirilmiş bölge	1.9	2.5
Sadece kompaksiyon ile modelleme	4.4	-
Sadece kolonlar ile modelleme	3.2	-

Sadece kompaksiyon betonlama uygulanarak iyileştirme sağlanmış zemindeki oturma miktarı 4.4 cm ve iyileştirilmemiş zemindeki oturma miktarı 7.9 cm ise buna göre, iyileştirme oranı 1.8 ($7.9/4.4$), elde edilen basınç ölçer modülü (E_M) 1.86 ile çok yakın değerde çıkmıştır. Bu sonuç; zemin iyileştirmesini tayin etmede basınç ölçer deneylerine güvenilebileceğini göstermektedir.

Bütün uygulamalarda, sütunların sıkıştırmayı (compression) sağlamasının, iyileştirmede önemli bir etkisi olduğu yadsınamaz. Oturmaların yarı oranda azaltılmasında sütunların etkili olduğu görülmüş ve ince kumda en uygun sıkıştırmayı sağladığı anlaşılmıştır.

Uygulanan yeni saha tecrübeleri ve vaka geçmişlerine dayanılarak şu sonuçlar elde edilmiştir: zemin iyileştirmesinin kalite kontrol ve tasarımının önemine değinilmiş, fosil ve tahta parçalarının jet beton kolonlarında az miktarlarda da olsa tamir edilemez hasarlara ve heterojenliğe yol açtığı saptanmıştır. Yumuşak jel kıvamında beton kümeleri ile sıkıştırılmış temeller için kumlu zeminde çevrelenmiş organik malzemeler ve hidrolik şartların karmaşık etkileşimi kolmatasyon (kolmatation)'a neden olmuştur. Kolmatasyon; betonlama tabakasının üzerindeki çakıl tabakasının tıkanması sonucu oluşan kaldırıcı kuvvetler (uplift forces) tarafından kazı tabakasının göçmesine sebep olan durum olarak açıklanabilir.

5. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemleri, çeşitli ölçütlere göre birbirleriyle karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırma ölçütleri; hangi zemin cinsinde uygulanabildikleri, inşaat sektöründeki uygulanma alanları, ekonomik koşulları, teknik özellikleri ve zemin iyileştirmedeki başarılarıdır.

Zemin cinsi ölçütü dikkat alınacak olursa, kompaksiyon betonlama; kilden kuma kadar çeşitli zemin türlerinde, jet betonlama; bütün zemin tiplerinde (özellikle kohezif zeminlerde) uygulanabilmekte; ancak kumlu ve kısmen çakıllı zeminlerde sakıncaları bulunmakta, çimento enjeksiyonu ise; boşluk oranı kısmen yüksek olan zeminlerde iyi sonuçlar vermekte fakat sıkı zeminlerdeki başarısının yeterli olmadığı görülmektedir.

İnşaat sektöründeki uygulanma alanlarına göre, kompaksiyon betonlama; tünel tabanı, köprü ayakları ve kıyı duvarları zemin iyileştirmelerinde, jet betonlama; tünelleme, kazı destekleme, deniz yapısı temel takviyesi ve oyulma koruması alanlarında, çimento enjeksiyonu ise sığ derinliklerdeki deniz tabanı iyileştirmelerinde (ekipman nitelikleri, yüksek derinliklerde yeterli olmadığından) uygulanabilmektedir.

Ekonomik koşullar açısından, kompaksiyon betonlama; deniz koşullarında pahalı, jet betonlama da kompaksiyon betonlama gibi yüksek maliyetlidir. Her iki zemin iyileştirme yönteminde kullanılan ekipmanlar ileri teknolojiye sahip olup, bakımları pahalıdır. Çimento enjeksiyonu ise ucuz bir yöntem olmasına karşın ekipmanları yeterli teknolojik özelliklere sahip değildir.

Deniz tabanı iyileştirme yöntemlerinin teknik özellikleri diğer karşılaştırma ölçütleri ile beraber Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Yöntemler zemin iyileştirmesi açısından değerlendirildiğinde; kompaksiyon betonlama; zemin iyileştirmede çok iyi sonuçlar vermekte, uygulandıktan sonra zemin oturmalarını %50 oranında azaltmaktadır. Jet betonlama ise; zemin iyileştirmesini hızlı bir şekilde başarıyla tamamlamakta ancak su geçirimsizliğini özellikle kumlu ve kısmen çakıllı zeminlerde sağlayamamaktadır. Çimento enjeksiyonu ise iyileştirmede başarılı fakat uygulama alanı sınırlı ve ilerleme hızı yavaştır.

Çizelge 5.1 Deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırılması

YÖNTEM	Zemin Cinsi	Uygulama Alanları	Ekonomik Koşullar	Teknik Özellikler	İyileştirme Değerlendirmesi
<u>Kompaksiyon Betonlama (Grouting)</u>	*Kilden kuma kadar çeşitli zeminlerde uygulanabilir. *Deniz tabanı	*Tünel tabanı *Köprü ayakları *Kıyı duvarları	*Normal; deniz koşullarında pahalı *Kullanılan ekipmanlar kapsamlı ve teknolojik	*İnce kum, çimento ve su bileşimi *Malzeme yoğun ve akıcı olmayan beton yüksek basınçla (80 kg/cm ²) zemine basılmaktadır. *İdeal çökme (stump) değeri 5 ile 9 cm arasındadır. İdeal değer 7.5 cm'dir.	*Zemin iyileştirme başarısı çok iyi *İnce kumda en uygun sıkıştırmayı sağlamaktadır. *Zemin oturmalarını yarı yarıya azaltmaktadır. *Hızlı değil *Denizde uygulanması zaman alıcı
<u>Jet Grouting (Betonlama)</u>	*Bütün zemin türlerinde uygulanabilir. *Kumlu ve kısmen çakıllı zeminlerde sakıncalı *Özellikle kohezif zeminlerde uygulanabilir.	*Tünelleme *Kazi destekleme *Temel takviyesi *Deniz tabanı *Oyulma koruması	*Maliyeti yüksek *Pahalı *Kullanılan ekipman teknolojik	*Su ve beton bileşimi su jeti prensibine göre çalışmaktadır. *Yüksek mukavemetli rijit soillecre (çimentolu zemin) yapısı *Beton malzemesi akıcı *Su/çimento oranı 0.7'nin altında olmamalıdır.	*Zemin iyileştirme başarısı iyi *Su geçirimsizliğini kısmen sağlayamamaktadır. *Hızlı
<u>Cimento Betonlama (Enjeksiyonu)</u>	*Boşluklu zemin *Sıkı zeminlerde sakıncalı	*Oyulma (erozyon) koruması *Sığ derinlikteki deniz tabanı	*Ucuz *Ekipman kısıtlı *Çimento pompalama ekipmanı gerekmektedir.	*Beton malzemesi akıcıdır. *Zemin boşluklarına iyi penetre olmaktadır. *Bağlayıcıdır. *Uygulama sonrası mukavemet kazandıktan sonra zemin toplu hareket eder. *Su/çimento oranı 3/1, 1/1 ve 1/3 oranları arasında değişebilmektedir. *%25 oranında su çimento karışımına kum eklenebilmektedir.	*Zemin iyileştirme başarısı iyi *Sınırlı kullanım *Yavaş *Zaman alıcı

6. DENİZ TABANI ZEMİN İYİLEŞTİRME UYGULAMALARI

6.1 Giriş

Idriss (2002), sınıvlaşma riski olan deniz tabanı için alınabilecek kararları; öngörülen riskin göz ardı edilerek bir önleme gidilmemesi, tasarımın sınıvlaşmanın ortaya çıkarabileceği olumsuz etkileri azaltacak yönde değiştirilmesi ve deniz tabanı zemin ıslah çalışmaları ile sınıvlaşmanın önlenmesi ya da etkilerinin azaltılması olarak üç ana gruba ayırmaktadır.

İdris (2002)'in yaptığı sınıflandırmadaki üçüncü gruba ilişkin olarak, bu bölümde, sınıvlaşmanın etkilerinin azaltılmasına yönelik deniz tabanı iyileştirme yöntemlerinden biri olan kompaksiyon betonlama yönteminin Marmaray Projesi kapsamındaki deniz altı tüpgeçiti tabanında uygulanması anlatılmaktadır. Bir diğer deniz tabanı zemin iyileştirme yöntemi olan jet betonlama yöntemine örnek ise, Ford-Otosan Gölcük Fabrikası Limanı deniz tabanı iyileştirme uygulamasıdır.

6.2 Kompaksiyon Betonlama Yönteminin Uygulanması (Marmaray Projesi)

Kompaksiyon betonlama, batırma tüplerden oluşan Marmaray tüpgeçiti yapısı boyunca sınıvlaşma potansiyelinin yüksek olduğu deniz tabanının iyileştirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Şekil 6.1'de potansiyel sınıvlaşma riski olan zeminin, tünel boylamsal kesiti boyunca konumu gösterilmektedir. Batırma tünel sismik araştırmalara dayanılarak iyileştirme uygulanacak kısmının İstasyon (8+333.75)'dan başlayarak İstasyon (8+ 794.75)'a kadar çeşitli derinliklerde olduğu belirlenmiştir. İstasyon (8+568)'daki, kompaksiyon betonlama deliklerinin konumları ve tünelin enkesiti örnek olarak Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Marmaray projesinde ait kompaksiyon betonlama işleriyle ilgili genel bilgiler aşağıda verilmiştir:

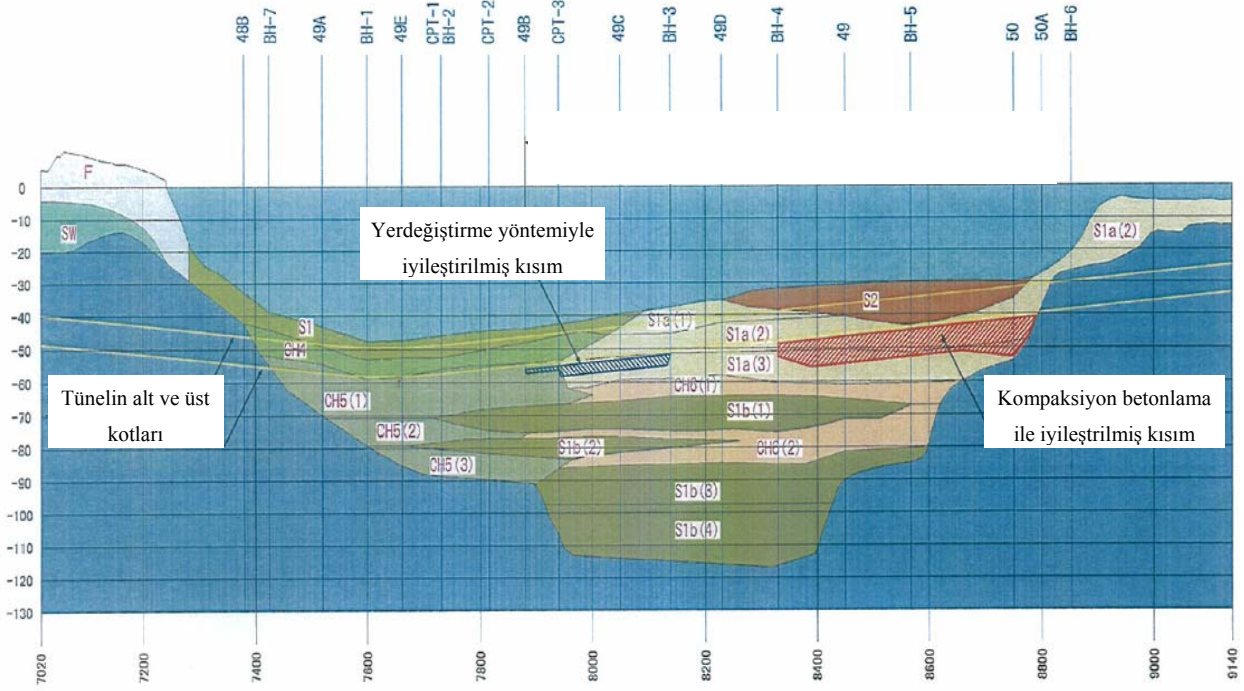
Betonlama alanı: 470.9 m × 20.4 m

İyileştirilecek kısmın hacmi: 74.468 m³

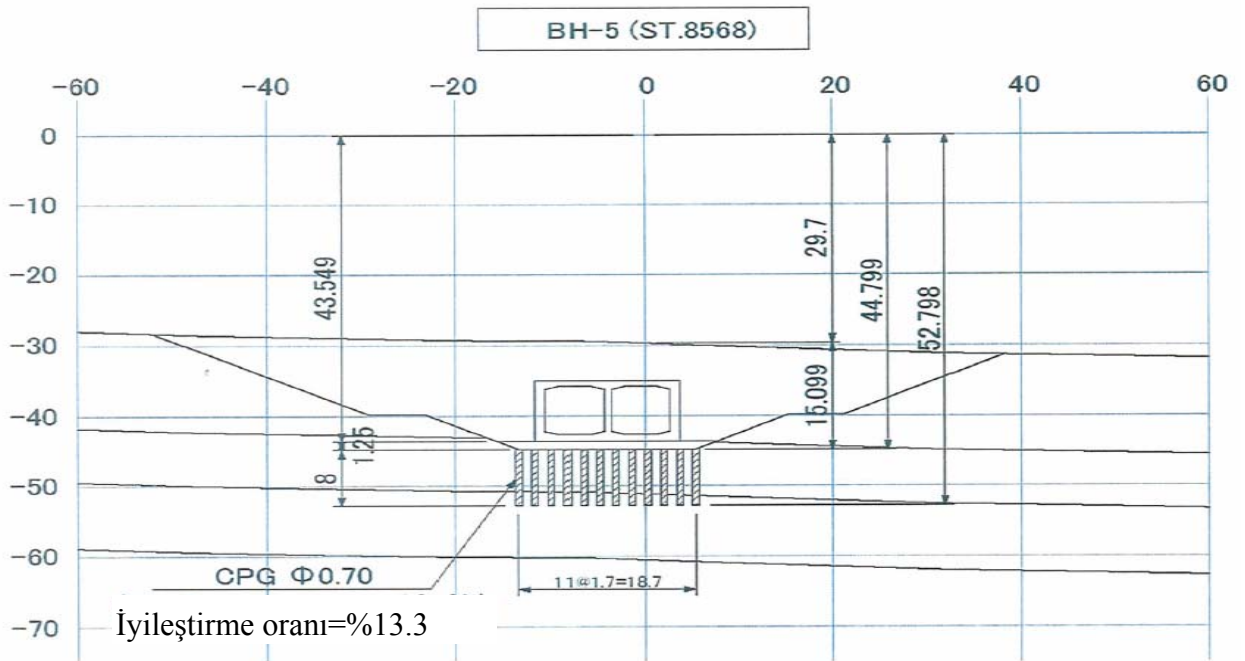
Toplam tasarım beton hacmi: 11.005 m³

Toplam tasarım deliği sayısı: 2622 delik

Betonlama sütunlarının uzunluğu: 0.604 m ile 10.282 m arasında değişmektedir.



Şekil 6.1 Potansiyel sıvılaşma riski olan zeminin tünel boylamsal kesiti (Arslan, 2006)



Şekil 6.2 Tünelin enkesiti ve kompaksiyon betonlama deliklerinin konumları, tünelin enkesiti (Arslan, 2006)

6.2.1 Bir Kompaksiyon Deliğinin Betonlanmasının Zaman Akış Programı

Marmaray projesine dahilinde yapılan iyileştirme kapsamında bir kompaksiyon deliğinin betonlanmasının tamamlanmasına ait operasyonel aktivite-zaman (dk.) akış programı, Çizelge 6.2’de gösterilmektedir.

Çizelgede görüldüğü üzere, bir kompaksiyon betonlama operasyonu; hazırlık, delme, betonlama, betonlama bittikten sonra enjeksiyon borularının sökülmesi, delgi makinesinin diğer kompaksiyon deliğinin delinebilmesi için saat veya saatin tersi yönünde döndürülmesi ve bahsedilen kompaksiyon deliğinin konumunun çalışma dubasının manevrası ile sağlanması kısımlarından oluşmaktadır. Çizelgede her operasyon kısmı için gereken süreler verilmiş ve açıklayıcı notlar koyulmuştur.

Çizelge 6.1 Bir kompaksiyon betonlama deliğinin zaman akış programı

Operasyon		Zaman (dk.)	Notlar
Hazırlık	Delgi Makinesinin Kurulumu	10	
	Betonlama Borularının Birleştirilmesi	15	
	Borularının Deniz Zeminine İndirilmesi	2	
Delme		45	Dakikada 1.5 m delme kapasitesi
Betonlama	Hazırlık	15	
	Betonlama	90	
Boruların Sökülerek Kaldırılması		20	0.06 m ³ /dk. betonlama kapasitesi
Delgi Makinesinin Döndürülmesi		15	
İnşaat Gemisinin Manevrası		1	
Toplam Zaman		213 dk.	

6.2.2 İşin Yöntem ve İşleyişi

Kompaksiyon betonlamanın temel mekanizması diğer yöntemlere kıyasla farklıdır. Kompaksiyon betonlamada; yüksek basınçla yoğun ve katıya yakın beton kütlesi, sıvılaşma riski yüksek olan deniz tabanına enjekte edilmektedir. Beton malzemesi, enjeksiyon sırasında homojen bir yapı sergilemekte ve toprak içinde mukavemetini kazanırken zamanla hacim artmaktadır.

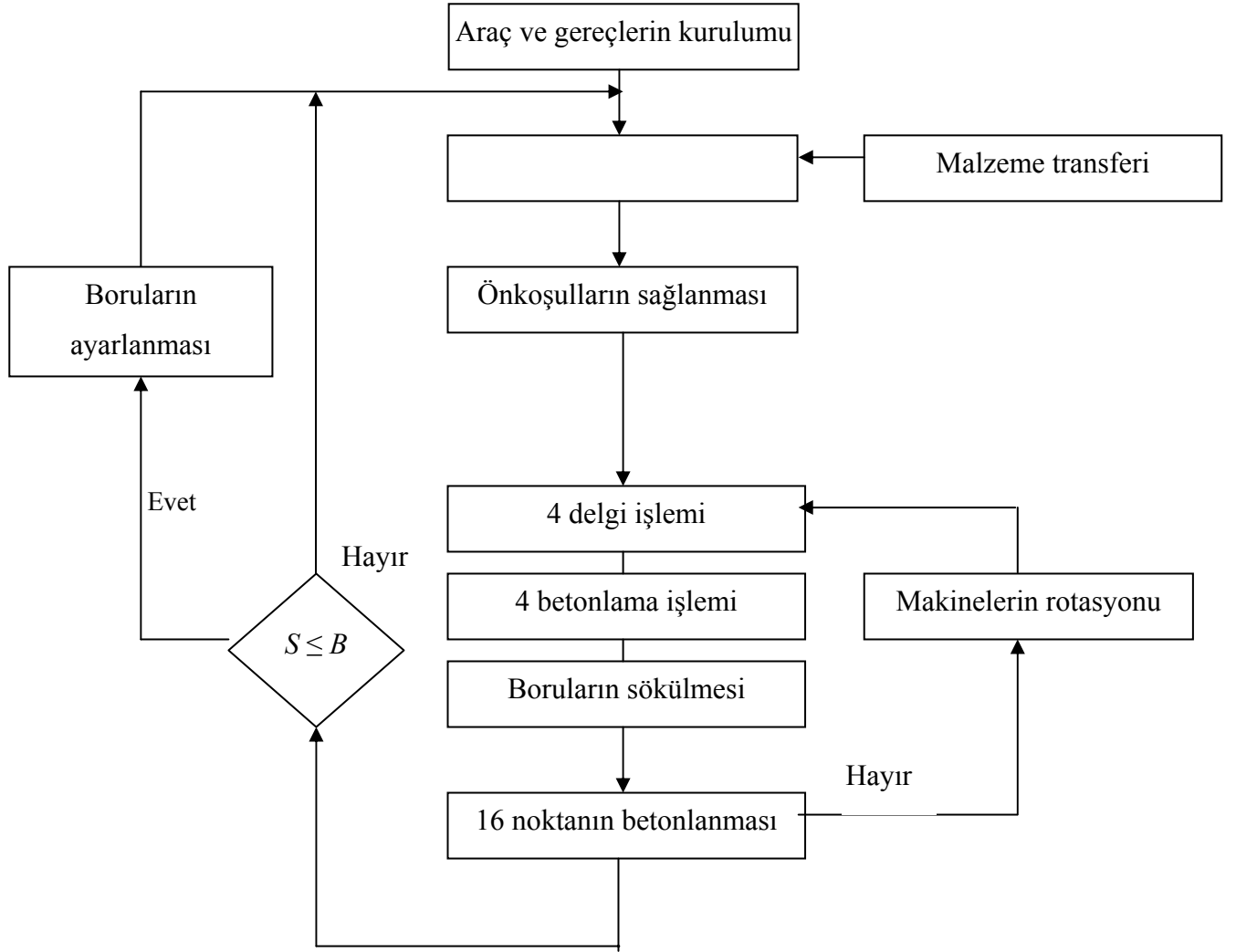
Kompaksiyon betonlama sistemi, boşluk hacmi fazla olan zeminlerde, doğal geçirimli tanecikli tabakalarda, destek amaçlı köprü ayaklarının zeminlerinde, farklı oturmalara sahip zemin tabakalarının taşıma kapasitesinin artırılmasında kullanılır. Tünel altı zemin hareketlerini engellemek için son dönemlerdeki projelerin ana inşaa bölümlerinden biri olarak uygulanmaya başlanmıştır. Marmaray projesindeki öncül kullanım amacı ise uygulanan kısımda tünel boyu depremler veya aşırı yükler sonucu oluşabilecek potansiyel sıvılaşma riskinin giderilmesidir.

Kompaksiyon betonlamanın temel mekanizması ve beton malzemesinin doğasındaki çok yoğun malzeme içeriğinden dolayı (malzemenin çökme (slump) değeri çok düşük ve 7.5 cm'yi aşamaz.) kontrollü enjeksiyonlar başarılı olmaktadır. Eğer iyileştirme tam olarak planlanırsa, sonuçlar tutarlı ve başarılı olmaktadır. Kompaksiyon betonlama deliklerinin bir diğer avantajı ise basılan malzemenin taşıma dayanımının yüksek olmasıdır. Her bir deliğe basılan beton malzemenin taşıma kapasitesi 3-15 MN/m² (3- 15 Mpa) gibi bir aralıkta olmaktadır.

6.2.3 Betonlama İşlerinin Akışı

Betonlama işlerinin genel akışı Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Genel akış aşağıdaki aşamalardan oluşur:

1. İnşaat gemisinde araç ve gereçlerin kurulumu
2. Geminin daha önceden belirlenmiş konuma manevrası ve bu konumda sabitlenmesi
3. Delik sayısı, delgi mesafesi, enjekte edilecek malzeme hacmi vb. önkoşulların kontrolü
4. Eş zamanlı olarak dört deliğin 4 delme makinesiyle tasarım derinliğine kadar delinmesi operasyonu
5. Eş zamanlı olarak dört deliğin 4 beton pompasıyla betonlanma operasyonu
6. 4 delikteki çelik enjeksiyon borularının sökülmesi
7. Delme makinelerinin bir sonraki aşamadaki 4 delik için saat yönünde döndürülmesi
8. Aynı işlemlerin (delme, betonlama ve delgi makinelerinin döndürülmesi) geminin pozisyonu koruyarak 4 delgi makinesinin saat ve saat tersi yönünde 360° döndürülerek yapılabileceği toplam 16 noktanın bitirilmesine kadar devamı
9. Bir sonraki belirlenmiş gemi konumuna geçmeden önce, su derinliğine göre çelik enjeksiyon borularının uzunluklarının ayarlanması
10. Bir sonraki noktaya geminin manevrası



S : Bir sonraki gemi pozisyonundaki su derinliği

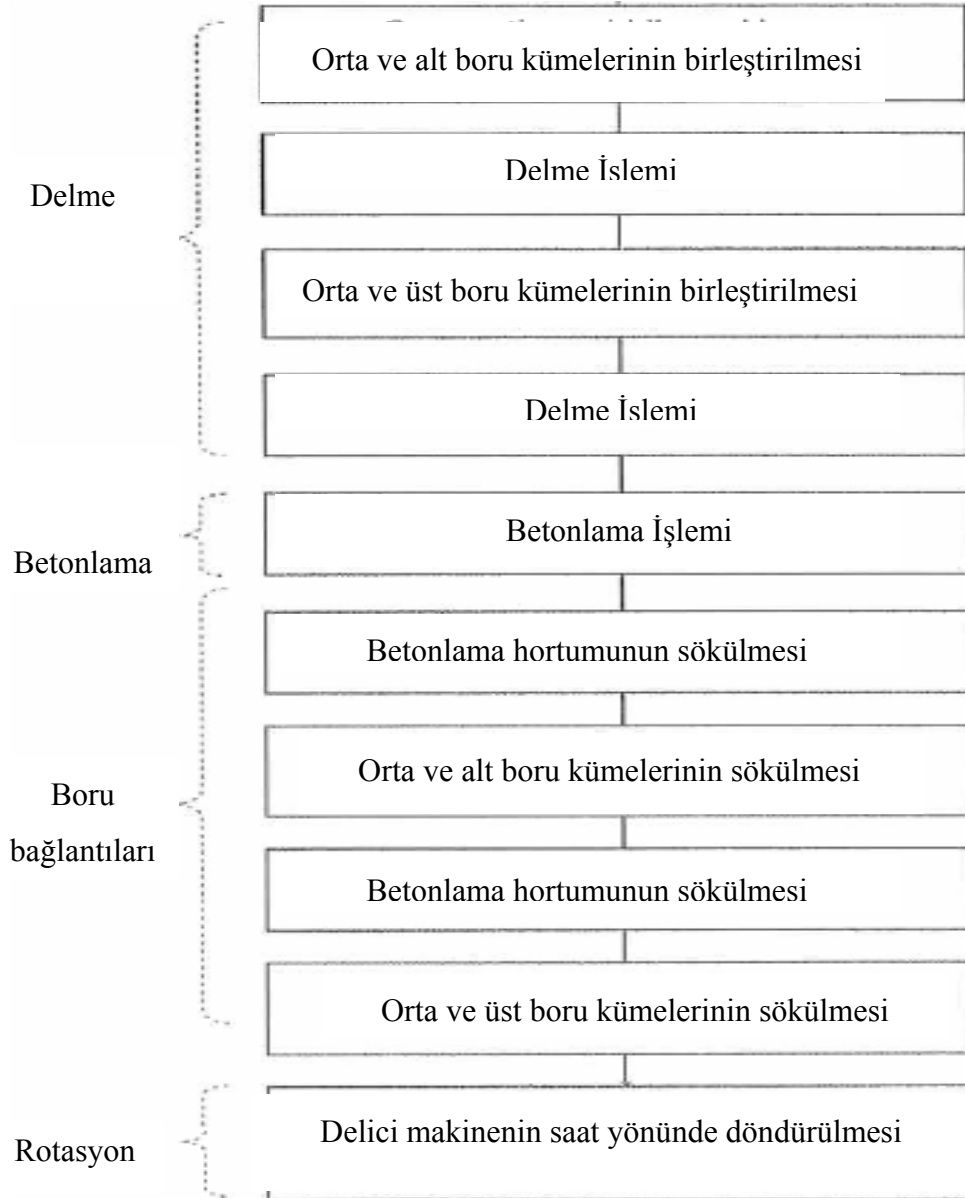
B : Toplam enjeksiyon boru uzunluğu

Şekil 6.3 Betonlama işinin akış şeması

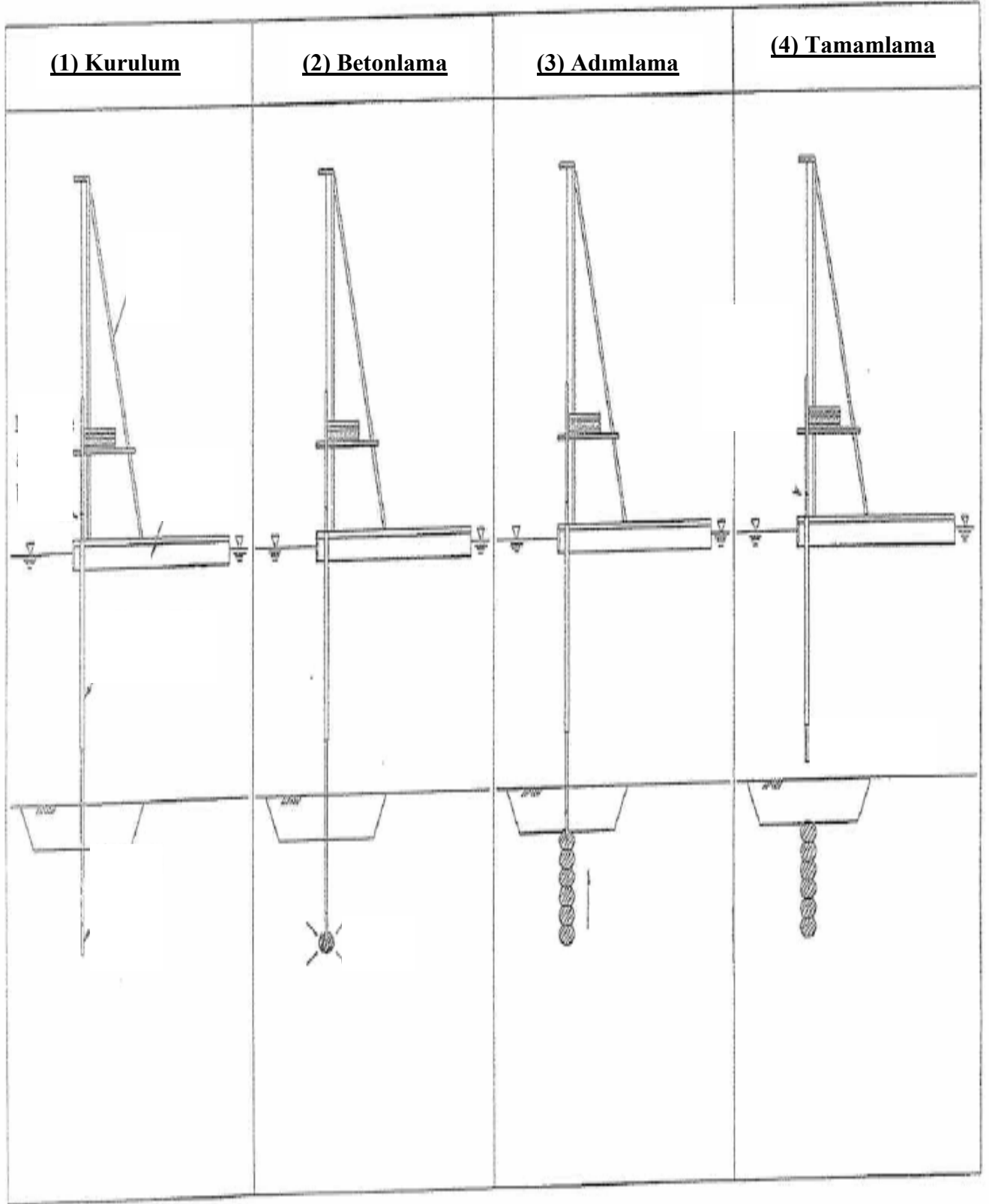
6.2.4 Bir Betonlama Deliğinin Enjeksiyon Akış Şeması

Bir delme / betonlama borusunun bir betonlama deliği için maksimum derinliği yaklaşık olarak 54 metre civarındadır. Bu uzunluğa erişebilmek için 3 boru kümesi (alt, orta ve üst) birbirleriyle bağlanır. Bağlanma tiyş (vida) sistemine dayanmaktadır.

Şekil 6.4 ve 6.5 tek delik için delme ve betonlama çalışma akışını göstermektedirler.



6.4 Delme ve betonlama akış şeması



Şekil 6.5 Tek deliğin delme ve betonlama işlemi

6.2.5 Delme İşlemi

Betonlama borusu ve hortumu delme ve betonlama işlemlerinin her ikisinde de kullanılmaktadır. Tek bir betonlama deliğine ait delme işleyişi aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir (Ayrıntılar için Şekil 6.5).

1. Dağıtım hattının delgi pompasına takılması
2. Delgi noktasal koordinatının delmeye başlamadan önce onaylanması (konfirmasyonu)
3. Deniz tabanına ulaşılan kadar delme/betonlama borularının akıntıya karşı koruyucu boruların içinden indirilmesi
4. Delme suyunun (bentonit içerikli) 100–180 l/dk. oranında dağıtımı (basılması)
5. Tasarım derinliğine ulaşıncaya kadar deniz taban zemininin delinmesi
6. Gel-git ölçerden elde edilen gel-git seviyesinin, inşaat platformu ile deniz seviyesi kotunun ve kullanılan delme borusu uzunluğunun hesaplanması
7. Platformun üstünde kalan delme borusu üst kısmının uzunluğunun hesaplanması ve her betonlama balonunun tasarım hacmi enjekte edildikten sonra borunun adım (step up) yöntemine göre 33 cm kaldırılması (betonlama sırasında herhangi bir şıkışma gerçekleşirse bentonit karışımı ara ara basılmaktadır.)
8. Delme pompası akışının durana kadar yavaş yavaş azaltılması
9. Delgi borusunu doldurana kadar bentonit karışımının basılması

Bentonit karışımı delgi/betonlama borularının betonlama sırasında yukarı kaldırılmasını (staging up) kolaylaştırır ve birnevi yağlayıcı görevi görmektedir. Bu karışım sayesinde delgi işlemi hızlanır ve verim artmaktadır. Bentonitin kullanım hacmi aşağıdaki gibi hazırlanmaktadır.

$$\text{Bentonit karışımının hacmi} = (\pi/4) \Phi^2 L$$

Φ = Delgi borusunun yarıçapı

L = Bentonitle doldurulmuş betonlama borusunun uzunluğu

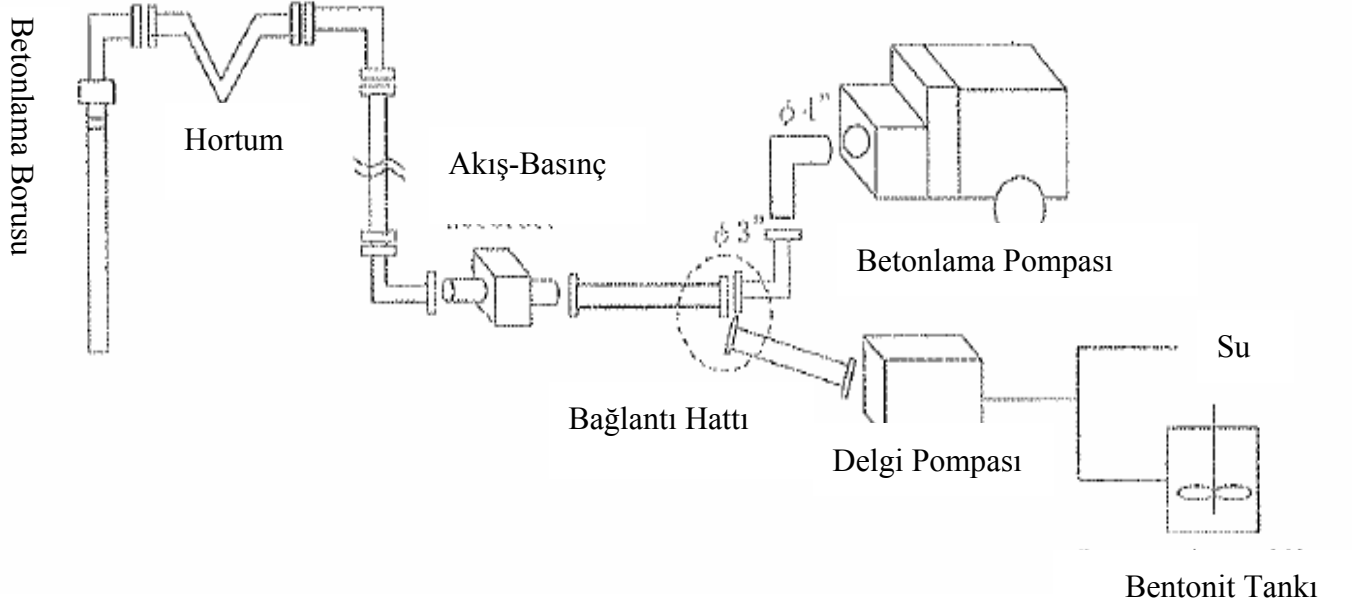
10. Çalışma platformunun manevrası ve dağıtım hattının delgi pompasına takılması. Beton tıkaçı (grout plug) dağıtım hattına delgi suyu ve beton malzemesini ayırmak için takılmaktadır.

11. Zemin araştırmasına göre; kompaksiyon betonlamanın uygulandığı hat boyunca BH50 sondaj deliğinden tünelin Asya tarafının 36.5 m'sine kadar kaya yatağına rastlanılmıştır. Bu kaya yatağının bulunduğu kısımda, iyileştirme sınırı kaya yatak zemin kotunun 1m yukarisından başlanarak uygulanmıştır. Kaya zemin kotunun durumu delmeye karşı zeminin uyguladığı dirence göre yeniden şekillenebilmektedir ve tasarım düzeltmeye uğrayabilmektedir.

6.2.6 Betonlama İşlemi

Betonlama işlemi her delik için tabandan yukarı yöntemi (bottom-up/staging up method) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem aşağıda açıklanmaktadır:

1. Bütün betonlama ekipmanlarının (akış ölçerler, betonlama boruları ve pompaları vb.) kontrolü
2. Betonlama/delgi borularının istenilen derinliğe ayarlanması (delme işleminin ardından) ve betonlamadan önce sıkışmaları engellemek amacıyla bentonit karışımının pompalanması
3. Beton malzemenin betonlama pompasıyla zemine enjekte edilmesi
4. Bir sonraki betonlama balonu için boruların yukarı (bu proje için 0.33 m) çekilmesi ve enjeksiyona devam edilmesi
5. En üstteki betonlama balonuna ulaşana kadar betonlamanın kademeli olarak devam ettirilmesi



Şekil 6.6 Dağıtım hattı, delgi pompası ve betonlama pompasının kurulumu

6. Şekil 6.6'da gösterilen dağıtım hattı ve delgi pompasının birbirleriyle bağlanması. Ayrıca, beton tıkaçı (grout plug) dağıtım hattına delgi suyu ve beton malzemesini ayırmak için takılmaktadır.
7. Borunun sökülmesi ve delme pompasından basılan basınçlı su ile boruların temizlenmesi.
8. Platformun üst tarafında kalan boruların kaldırılması ve sökülmesi.
9. Delgi makinesinin saat yönünde döndürülerek yeni pozisyonuna konumlandırılması ve inşaat platformunun manevrası.

Beton malzemesi aşağıdaki koşullar içerisinde kalınarak uygulanmaktadır:

- * Derinlik aralığı: Betonlama adımları arasındaki derinlik aralığı 0.33 m olmalıdır.
- * Beton hacmi: Her betonlama balonuna 0.143 m³ malzeme enjekte edilmektedir. Akış-basınç ölçer, basılan beton hacmini ve enjeksiyon basıncını kaydetmekte kullanılmaktadır.
- * Akış- basınç ölçer sayesinde her beton balonuna basılan hacim de kontrol edilmektedir.

* Sınırlayıcı koşullar: Beton enjeksiyonu tasarım hacmine veya 8 Mpa basınca ulaşılan kadar devam ettirilmiştir. Daha sonra, enjeksiyona son verilerek betonlama borusu diğer aşama için sökülmetedir.

Boruların sökümü sırasında ve daha sonrasında, beton malzemenin akışının blokaja (malzemenin boru içinde sıkışıp hareket edememesi durumu) izin vermemesi durumunda, enjeksiyon süreci tasarım hacmine ulaşılan kadar devam etmelidir. Aksi takdirde, enjeksiyona son verilip borular sökülme ve delme-betonlama uygulamasına kalınan derinlikten tekrar başlanmaktadır.

Betonlama esnasında, delme makinası betonlama borusunu yukarı doğru döndürerek kaldırmak için yeterli kapasiteye sahip olamayabilir. Bu durum, boru ile onu çevreleyen zeminin sıkışması sonucunda gerçekleşmektedir. Sıkışma (jamming) olayıyla karşılaşıldığında; borunun etrafına takılacak olan krikoyla boru yukarı çekilmekte ve sıkışma giderilmektedir. Krikoyla kaldırma uzunluğu 0.33 m (balon derinlik aralığı) veya daha az olmalıdır. Sıkışma kısmından çıkıldıktan sonra, normal betonlama işleyişine devam edilmektedir. Betonlama operasyonu, istenen tasarım betonlama hacmine ulaşılmadan boru sıkışması, delme makinasının arızası, büyük çaptaki platform hareketleri yüzünden sonlandırılabilir. Böyle bir durumda kalan betonlama balonlarını bitirmek için tasarım noktasına manevra yapılmaktadır, söz konusu nokta kalınan derinliğe kadar delinmekte ve betonlama işleyişi kaldığı yerden devam etmektedir.

6.2.7 Betonlama Düzeni

İyileştirme uygulanacak bölge ve kompaksiyon betonlama deliklerinin yerleşim planları

Zemin sıvılaşma ve tünel stabilite analizi sonucunda; sıvılaşma potansiyeli ve oturma riski yüksek olan tünel zemin kısmının, kompaksiyon betonlama tekniği uygulanarak deprem yüklerine karşı koyması ve tünel güvenliği açısından, % 13.3 oranında iyileştirilmesi yoluna gidilmiştir. Çalışma dubasının konumlandırma uygunluğunu sağlamak ve yapacağı manevra sayısını en aza indirmek için, betonlama delikleri kare kalıp üzerinde dizilmektedir. İyileştirme oranına (a_s) beton deliklerinin çapı ve aralığının farklı kombinasyonları ile erişilebilmektedir. Kompaksiyon betonlama deliğinin çapı (Φ), 0.7 m ve delik aralığı (S) aşağıda verilen 6.1 formülü kullanılarak iyileştirme oranı olan 13.3%'ün sağlanması için şu şekilde hesaplanmıştır:

$$s = \sqrt{\frac{\pi\phi^2}{4a_s}} = \sqrt{\frac{\pi(0.7)^2}{4 \times 0.133}} \cong 1.7m \quad (6.1)$$

İyileştirme kısmı İstasyon (8+333.75)'ten başlayarak İstasyon (8+794.45)'e kadar uzanmaktadır. Toplam uzunluğu 460.7 m'dir. İyileştirme alanının genişliği 20.4 m ve kompaksiyon betonlama deliklerinin maksimum uzunluğu 10.282 m'ye kadar çıkmaktadır.

Betonlama deliklerinin dizilimi

Betonlamanın önemli parametrelerinden biri de betonlama dizilimidir. Verimli bir şekilde tasarlandığı takdirde; iyileştirmeyi önemli ölçüde arttırmaktadır. Betonlama dizilimine karar verilirken üç kontrol ölçütü göz önünde bulundurulmalıdır.

1. Tünelin merkez kısmının altındaki tesis zemininde olabilecek en büyük iyileştirmeyi elde etme.
2. Ekipmanların kurulumu.
3. Çalışma dubasının manevrası.

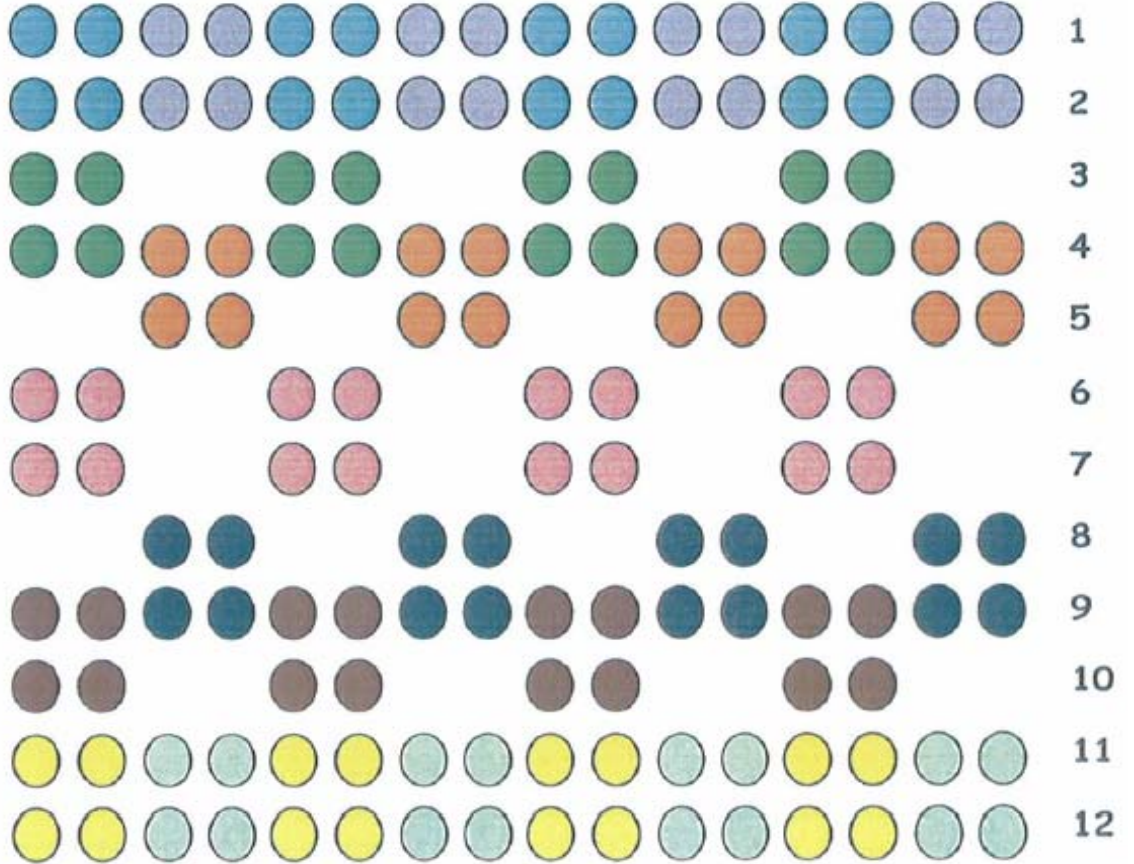
Bu kriterler dikkate alınarak; betonlama dizilimi Marmaray projesi için aşağıda bahsedildiği gibi belirlenmiştir:

- Her bölümde kompaksiyon betonlama (compaction grouting) delikleri yatay hizada enjekte edilebilmektedir.
- Şekil 6.7'de görüldüğü üzere her betonlama bölümü 16 yatay ve 12 düşey hattın oluşmaktadır.
- Herbir manevra bitiminde kurulmuş olan 4 (dört) delgi makinasında, toplamda 16 delik (her delgi makinası 4 deliği gemi manevrasına gerek olamadan bitirebilir.) bitirilebilmektedir.
- Her iki yatay hat (1'den 12'ye kadar düşey hatta sahip olan) iki manevra halinde doldurulmaktadır. İlk 16 delik bitirildikten sonra, bu bitirilmiş 16 delik arasındaki kalan 16 delik doldurulmaktadır. Bu işlemler diğer tüm yatay 2'li hatlar için de uygulanmaktadır. Bu şekilde uygulanan birincil ve ikincil manevra uygulamaları daha düzenli iyileştirmeler sağlamaktadır. 4 set halinde çalışma dubası üzerine monte edilmiş delme ve betonlama ekipmanlarının dönme (rotasyon) özellikleri sayesinde bir manevrada 16 delik bitirilmektedir.
- Betonlama düzeni şöyle özetlenmektedir:

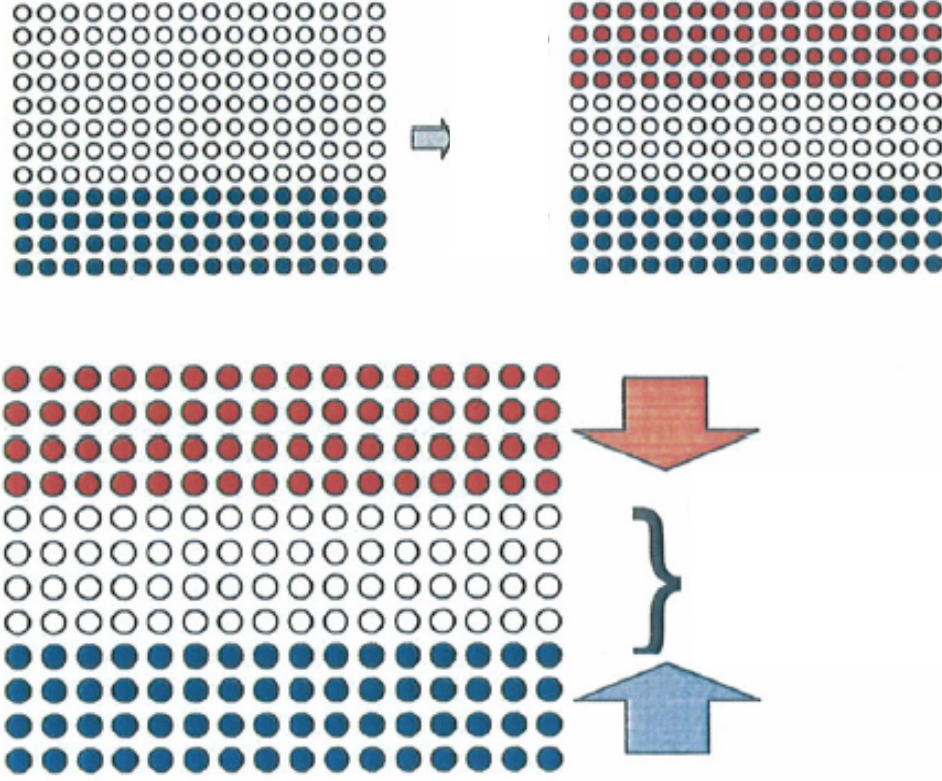
- Yatay yönde toplam bölüm sayısı = 17 bölüm (Örnek: Q Stage)
- Herbir bölüm için yatay yönde hat sayısı = 16 hat (Örnek: Q01)
- Dik yönde hat sayısı = 12 hat (Örnek: Q01-02)
- Her bir çalışma dubası manevrasında bitirilebilecek betonlama deliği sayısı = 16 delik
- 2 adet çalışma dubası manevrasıyla bitirilebilecek yatay hat sayısı = 2 hat
- Her bir bölüm için maksimum manevra sayısı = 12 manevra

Çalışma dubasının konumu her bir bölüm veya kalıptaki delik konumlarına göre ayarlanmaktadır. Şekil 6.7’de 16 dikey sütun ve 12 yatay sıradan oluşan bir bölüme ait kompaksiyon betonlama plan dizilimi görülmektedir.

Kompaksiyon betonlama delikleri her bir bölüm için bölümün alt tarafından başlanıp daha sonra üst tarafa geçilerek yapılmaktadır. Bu uygulamanın amacı; alt ve üst taraflardaki uygulanan beton malzemenin, bölümün orta kısmını kompaksiyon betonlama uygulanmadan bile sıkıştırmasını sağlamak (ayrıntılar için Şekil 6.8) ve sıvılaşma riskini nispeten azaltmaktır. Tünel orta zemin kısmı tünel elemanı için en önemli kısımdır.



Şekil 6.7 Önerilen kompaksiyon beton dizilimi



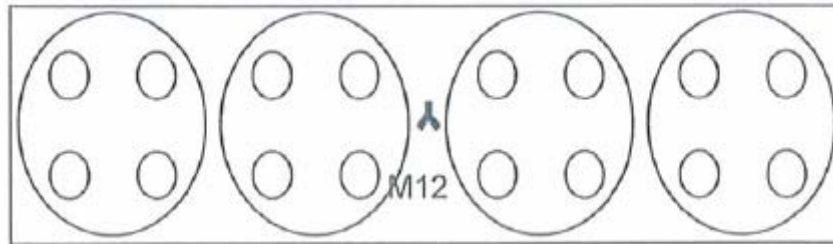
Şekil 6.8 Kompaksiyon betonlamanın uygulanma sırası ve sıkıştırma etkisi

6.2.8 Çalışma Dubasının Konumlandırılması

Kompaksiyon betonlamanın gerçekleştirildiği Armarin 3 dubasının konumlandırılmasına ilişkin bilgiler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

- Kompaksiyon betonlama delikleri 17 ana bölümde yatay yönde her bir bölüm için 9 ile 12 arasında değişen manevra sayıları ile doldurulmaktadır.
- Konumu kontrol edebilmek için 4 adet delgi makinasının tam orta noktası (waypoint) seçilerek ve çalışma dubasının konumlandırılması bu nokta dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 6.9’da işaretlenmiş olan orta nokta (waypoint) uygulaması görülmektedir. Bu merkez noktalar delgi makinelerinin konumlarını tasarım koordinatları üzerine sabitlemeye yaramaktadır. Orta nokta (waypoint) ile her kompaksiyon betonlama deliğinin arasındaki uzaklık sabit ve kesindir. Çalışma dubasının konumu ve duruş açısı (pruva) orta noktayı sağlamalıdır.

- Eğer delgi makinelerinin birinde veya birkaçında herhangi bir arıza oluşursa ekstra orta noktalar belirlenebilmekte ve arızalı olan makinelerin delikleri çalışır durumdakiler tarafından yapılabilmektedir.
- Çalışma dubasının hareketleri, duba kaptanı ve ona bağlı olan mürettebatının kontrolünde yapılmaktadır. Dubanın konumlandırılması RTK-GPS (Real Time Kinematic-Global Position System) kullanılarak sağlanmaktadır. GPS (Global Position System) alıcısı çalışma dubasının kaptan köşkündeki bilgisayara bağlanmakta ve aynı GPS önceden koordinatları bilinen karadaki baz istasyonuna monte edilmektedir. Karşılaştırılmış veriler bilgisayar ekranına iletilmekte ve karadan elde edilmiş koordinatları bilinen orta nokta (waypoint) değeriyle çalışma dubasının konum değeri aynı yapılmaya çalışılmaktadır.
- Bilgisayara bağlı gyrocompass ile de geminin baş açısı (pruva) kontrol edilmekte ve bu açı tünel plan eğimine göre ayarlanmaktadır.
- İstenilen konum sağlandıktan sonra, çapa ve halat sistemleriyle çalışma dubasının hareketi kontrol altında tutulmaktadır. Halat sistemleri; ırgat (vinç) hidrolik sistemlerinin yardımıyla mayva-vira (boşalt-çek) prensibine göre yönlendirilmektedir.
- Çalışma dubası koordinatının orta noktadan uzaklaşabileceği en yüksek limit uzaklık sadece 20 cm'dir. Her manevradan sonra bu uygunluk şartı saha mühendisi ve duba kaptanı tarafından kontrol edilmelidir. Bu kontroller delme ve betonlama sırasında periyodik olarak sürdürülmektedir. Koordinattaki hata uzaklığı limiti aşmışsa operasyon saha mühendisi tarafından durdurulmalı ve daha sonra gemi yeniden konumlandırılarak süreç kaldığı yerden devam ettirilmelidir.



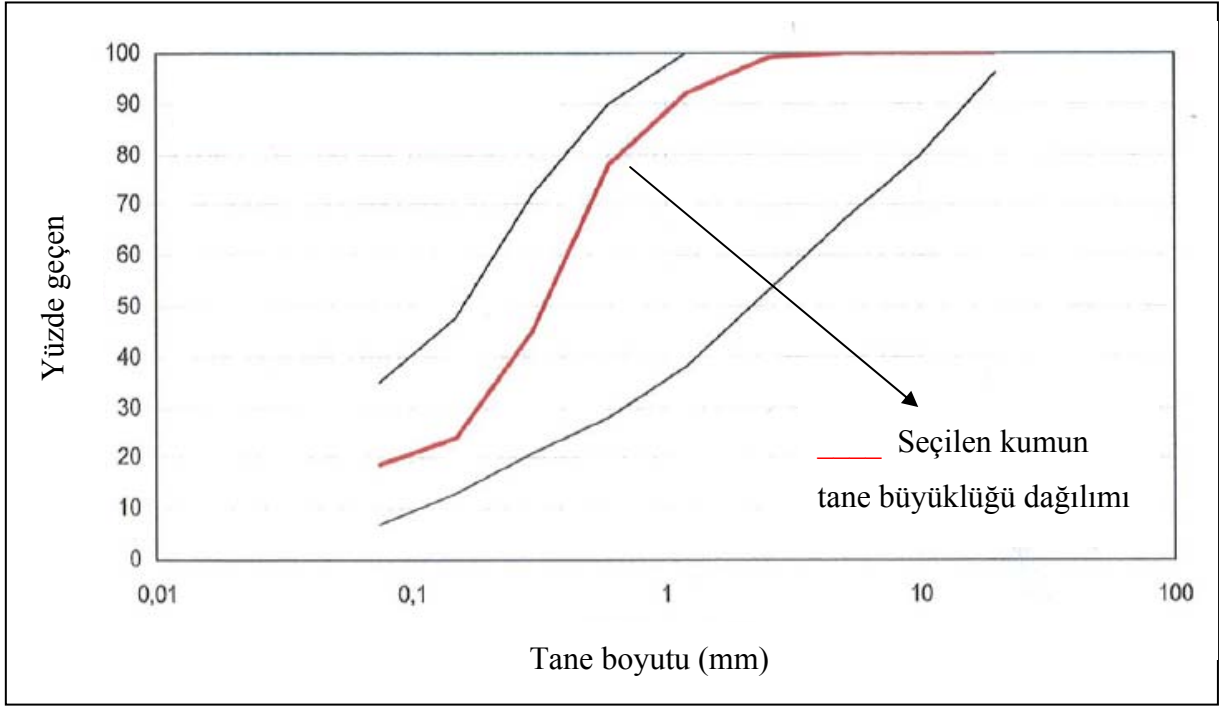
Şekil 6.9 Örnek merkez nokta (Waypoint) gösterimi (M 12 noktası)

6.2.9 Malzeme Özellikleri

Geçerli tasarım şartları, zeminin boşluk hacmini yeterince doldurarak ve gerekli iyileştirmeyi sağlamak amacıyla hacimsel olarak iyileştirilecek zemine denk düşen hacimde beton basılarak elde edilmektedir. Bu bağlamda, iyileştirme oranı boşluk hacminin ne kadarının beton hacmi ile doldurulduğunun göstergesidir. Bu yaklaşım, farklı beton-zemin arayüzlerinde basılan beton tarafından uygulanan basıncın sonucunda doğan zemin partiküllerindeki göreceli deplasmanların sıkıştırılmasıyla elde edilmiş iyileştirmeye dayanmaktadır. Beton malzemesi zemin gözenekleri arasından yayılan masif bir kütle halinde homojen bir durumda mukavemetini kazanmaktadır. Bu mekanizmanın sağlanmasındaki ana etkenler, beton malzemesinin bileşimi ve karakteristikleridir.

Beton malzemesi agrega, çimento ve suyun belirli ölçülerdeki karışımıyla elde edilmektedir. Zemin içinde basıldıktan sonra permentasyon (sızma) yapmayan beton kabiliyetini sağlamak için, beton malzemesinin kesme dayanımının (shear strength) çevrelediği zemininkinden daha yüksek olması gerekmektedir. Söz konusu bahsedilen dayanımı sağlamak amacıyla özel bir gradasyona sahip agrega kullanılmaktadır.

Daha önceki tecrübeler, Şekil 6.10'da verilen gradasyona göre belirlenen çakıl, kum, silt ve kil oranlarının efektif sonuçlar verdiğini göstermiştir. Buna göre, agrega gradasyonu Çizelge 6.4'te verilen sınırlar içinde olmalıdır. Söz konusu gradasyona sahip agrega içeriğinin sağlanması sayesinde, uygulama esnasında oluşabilecek beton malzemesinin yüksek basınç, blokaj (hareketini engelleme) gibi operasyonun verimliliğini olumsuz etkileyen durumlar en aza indirgenmiş olmaktadır. Seçilen kum gradasyonu kırmızı çizgi olarak Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Bu projede, beton teslim hattı (beton üretim tesisi ile iyileştirilecek deniz tabanı zemin kotu arası) göreceli olarak 100–110 metre arasında değişmektedir. Bu uzaklık yüzünden, beton pompa kabiliyeti geliştirilmelidir.



Şekil 6.10 Kompaksiyon betonlamada kullanılan doğal kumun tane büyüklüğü dağılımı

Çizelge 6.2 Beton malzemesinin bileşim oranları (referans karışım)

<i>Malzeme</i>	<i>Oran</i>
Özel Agregası	0.85 m ³
Çimento	0.065 m ³
Deniz suyu	0.085 m ³
Toplam	1 m ³

Cürüflu çimento (CEM III.B 42,5 N) beton malzemesi içinde kullanılmıştır. Kompaksiyon betonlamanın deneme çalışmasında kullanılan bu cürüflu çimentonun basınç dayanımı (compressive strength) bakımından memnun edici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Deniz suyu, karıştırıcı su olarak kullanılmıştır. Marmara deniz suyunun tasarlanan çökme (slump) ve dayanımı sağladığı karıştırma deneylerinde (mixing test) saptanmıştır.

Çizelge 6.4 beton malzemesinin karışım oranlarını göstermektedir. Beton malzemesini karakterize eden önemli bir etken slump değeridir. Maksimum slump değeri, daha önceki deneyimler (St. John Nehir güç ünitesi slump değeri 8.0 cm, Pinopolis Batı barajı slump değeri 8.0 cm, Chessman barajı slump değeri 7.5 cm, Tokyo uluslararası havalimanı slump değeri 7.5 cm) ve standart kompaksiyon betonlama slump deneylerine göre 7.5 cm olarak kararlaştırılmıştır. Maksimum beton slump değerinin 7.5 cm değerine erişmek için, su karışım oranı agreganın kuru haldeki rutubet ihtivasına göre ayarlanmaktadır. Akış ölçer ile sabit su oranı temini kontrol edilmektedir.

Basınç dayanımı (compressive strength) deneyleri 7.5 ile 8.0 cm arasında slump değerlerinde olan beton numune üzerinde uygulanmıştır.

Beton Hacminin Hesaplanması

Tünel zemin hattının (İstasyon 8+333.75 ile İstasyon 8+794.45 arası) 461 metrelik kısmında sıvılaşma potansiyelini olabildiğince azaltmak amacıyla, %13.3 iyileştirme oranı ile kompaksiyon betonlama yapılmıştır.

Beton malzemesi için sıkışma (kompresyon) katsayısı 0.9 olarak seçildiğinde, uygulanacak olan toplam beton malzemesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Beton Hacmi} = (V_{TS} \times a_s) / C_C = (74468 \times 0.133) / 0.9 = 11005 \text{ m}^3$$

V_{TS} = İyileştirilecek zemin kısmının toplam hacmi

$$= 74468 \text{ m}^3$$

a_s = İyileştirme oranı = %13.3

C_C = Beton malzemesi sıkışma (kompresyon) sabiti

Beton karışımı orantı kuralı

Beton malzemesi çimento, özel agrega (ince taneli kum ağırlıklı) ve suyun karışımından oluşmaktadır. Bu malzemeler sürekli olarak karıştırılmakta ve beton pompasından basılmaktadır. Gerekli karışım tasarımını elde etmek için, çimento besleyicisi ve CPG karıştırma tesisi (mixing plant) kum girişinin düzenli olarak kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon ile elde edilen sonuçlar, tasarım karışım oranlarıyla karşılaştırılarak yeniden

düzenlenmelidir.

Kalibrasyon aşağıda sıralanan üç adımda yürütülmektedir:

- a. Çimento besleyicisi; önceden kararlaştırılmış sabit bir sürede (count) basılan çimento miktarının belirlenmesi ile kalibre edilmektedir. Tek bir sabit sürede basılan çimento miktarı, daha önceden yapılan ölçümlerle karşılaştırılmakta ve sistem buna göre düzenlenmektedir.
- b. Agregası girişi daha önceden belirlenmiş tek bir sabit süre için; farklı giriş kurulumlarında sisteme katılan agrega miktarının belirlenmesiyle kalibre edilmektedir.
- c. Adım (a) sonuçları ve betonun 1m^3 için çimento miktarı esas alınarak 1m^3 beton için kaç adet sabit süre gerektiği ölçülmektedir. Daha sonra aynı sabit süre, adım (b) sonuçları kullanılarak 1m^3 beton malzemesi için agrega miktarını veren agrega girişi ayarına karar verilmektedir.

6.2.10 Kompaksiyon Betonlamanın Kabul Edilebilirlik Ölçütleri

Marmaray Projesi'ne ait kompaksiyon betonlama zemin iyileştirme operasyonunun başarıyla tamamlanabildiğini ispatlayan kabul edilebilirlik ölçütleri Çizelge 6.5'te sunulmuştur.

Beton malzemesinin akışkanlığının ölçütü olan slump (çökme) değeri 7.5'e eşit veya 7.5 cm den küçük olmalıdır. Ayrıca beton malzemesinin dayanımı, 28 günlük basınç mukavemeti deneyi sonucunda 2 MPa'ya eşit veya daha büyük olmalıdır. Çalışma dubasının operasyon sırasındaki konumu her bir kompaksiyon deliği için daha önceden tasarlanmış koordinatlardan en fazla 20 cm uzakta olabilir, daha fazlasına müsaade edilmemektedir. Delme ve betonlama boruları, betonlama esnasında dikeyde tam dik konumda ya da en fazla $\pm 0.5^\circ$ kaçıklıkta olmalıdır. Basılan beton hacminin toleransı tasarım hacminden $\pm 0.01\text{m}^3$ uzakta olabilmektedir. Kompaksiyon betonunu oluşturan unsurlardan çimentonun kontrolü çimentoyu sağlayan tedarikçinin sunmak zorunda olduğu dayanım ve kimyasal özellik sertifikaları ile agreganın kontrolü ise yapılan elek analizi sonuçlarının Şekil 6.10'daki aralığı sağlayıp sağlamadığına bakılarak yapılmaktadır. Zemin iyileştirme kontrolü ise konik penetasyon testinin (CPT) uygulanması sonucu elde edilen sıvılaşma güvenlik faktörü (FL value) , bağıl yoğunluk ve oturma miktarlarının analiziyle yapılmaktadır.

Çizelge 6.3 Kompaksiyon betonlamanın kabul edilebilirlik ölçütleri

Kompaksiyon betonlanma unsurları	Kabul edilebilirlik ölçütü	Açıklamalar
Beton malzemesi	Slump (çökme) ≤ 7.5 cm	
Beton malzemesi	Mukavemet ≥ 2 MN/m ² (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti deneyi
Delme konumu	± 20 cm	Çalışma dubasında
Delme açısı	$\pm 0.5^\circ$	Delgi borusu 90° olmalıdır
Beton hacmi	± 0.01 m ³	
Çimento	Tedarikçi sertifikaları	
Agrega	Şekil 6.14'deki aralıkta	
İyileştirme	Sıvılaşma güvenlik faktörü (FL value), bağıl yoğunluk ve oturma miktarı iyileştirme yapıldıktan sonraki CPT (cone penetration test) sonuçlarına göre hesaplanmaktadır.	

6.2.11 Zemin İyileştirmesinin Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Kompaksiyon betonlama ile zemin iyileştirilmesinin etkinliğinin değerlendirilmesi, betonlama sonrasında yapılan CPT deneylerinin sonuçları ile gerçekleştirilmektedir. CPT sonuçları, kompaksiyon betonlama ile iyileştirilmiş tünel temeli zemininin sıvılaşma durumuna değer biçmek için kullanılmaktadırlar. Betonlama bittikten sonraki CPT özel üretilmiş koni penetrasyon sistemi kompaksiyon betonlama hattı boyunca önceden seçilmiş yerlerde uygulanmıştır.

İyileştirmenin etkinliğini tespit etmek için kullanılacak hedef parametreler; sıvılaşma güvenlik faktörü (FL_{target}), bağıl yoğunluk (Dr_{target}) ve oturma miktarıdır (δ_{target}).

6.2.12 Konik penetrasyon deney yöntemi (CPT)

Konik penetrasyon testi (CPT) başlıca dört aşamada uygulanmıştır.

1) Çalışma dubasının konumunun sabitlenmesi ve kılavuz boruların kurulumları

Çalışma dubasını konumlandırmak için GPS kullanılmıştır ve istenilen konumda çapalar yardımıyla duba sabitlenmektedir. İstenen konum sağlandıktan sonra, çalışma dubası dalga ve akıntı etkisinde yatayda ve düşeyde salınım gösterebilmektedir. Dubanın konumunun tam anlamıyla ayarlanması için çapa halatlarının gerginlikleri kontrol edilmelidir.

Duba konumlandırmasından sonra 36 mm'lik CPT boruları, ilk 5m'deki yüksek yüzey akıntısından koruyacak olan kılavuz borular parça parça sıkılarak aşağı yönde dik konumda birleştirilip sabitlenmektedirler.

2) Ölçüm çubuklarının kurulumu

Kılavuz borusunun içerisinden ölçüm boruları takılmaktadır ve konik penetrasyon testinin başladığı derinlikten yaklaşık 1 m. uzaklığa kadar sulu sondaj yöntemiyle borular penetre edilmektedir.

3) Konik penetrasyon deneyi (CPT)

CPT penetrasyon tentesi boru kalkasının üst bitimine bağlanmaktadır (penetrasyon kuvveti=10 ton). 50 mm' lik penetrasyon boruları ile 36 mm'lik ucunda kablosuz vericisi olan konik aparat birbirleriyle eğim ölçer kontrollünde bağlanmaktadır ve tasarlanan derinlikten itibaren 1 ile 2 cm/s hızda zemine penetre edilmektedir. Ölçülen değerler kazıcıdan ses dalgası olarak iletilmekte ve bu ses dalgaları penetrasyon makinesinin üst kısmına monte edilmiş algılayıcılar tarafından toplanmaktadır.

Penetrasyon çubuğu ve zemin arasındaki sürtünme kuvvetini azaltmak amacıyla penetrasyon çubuğu üzerine çamurlu su gönderilmektedir. Aynı zamanda çubuk penetrasyonu için gerekli tepkime (reaksiyon) kuvvetini sağlayacak olan toplam ağırlık kuvveti, 10 tonluk penetrasyon ağırlık tentesi, kılavuz borular, kalkan çubuğu ve kılavuz boruların üst tarafına takılan ağırlıklarla sağlanmaktadır.

4) Sistemin sökülmesi (geri alınması)

Ölçüm istenilen derinliğe kadar gerçekleştirildikten sonra; boru tutucuları (boru başlıkları), üst penetrasyon donanımlarının yukarı tarafına takılmakta ve CPT penetrasyon boruları çalışma dubasının üstüne yerleştirilmiş yeterli kaldırma kapasitesine sahip vinçlerle sırayla dubanın üzerine konulmaktadır.

6.2.12.1 Konik penetrasyon testinin veri doğrulaması

Sıkıştırma krikosu ve penetrasyon çubuğunu bağlayan bir kelepçe bulunmaktadır. Koni ucun penetrasyon esnasında sert bir malzemeye (taş, kaya vb.) vurması durumunda sözü edilen kelepçenin kayması durumu oluşmaktadır. Algılayıcıların sunduğu sinyallerin işlenmesi sonucunda elde edilen verilerde, ham bir veri (diğerlerine göre düşük veya tutarsız) ile karşılaşılması bu verinin kayma olgusuna ait olduğu ve elenmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Aynı zamanda ‘spike noise’ diye adlandırılan veriler görünüşte; bitişik, tutarlı ve süregelen verilerden farklı olduklarından hesaplamalar esnasında dikkate alınmayıp elenmektedir.

6.3 Jet Betonlama Yönteminin Uygulanması (Ford-Otosan Gölcük Fabrikası Limanı)

6.3.1 Giriş

Konum olarak İzmit Körfezi içinde yer alan Ford Otosan Limanı'nın deniz tabanı jeolojik olarak İhsaniye deresinin getirdiği alüvyonal çökeltilerden oluşmaktadır. Deniz tabanı zemininin geneli için tek bir zemin profili çıkartmak mümkün olmamakla beraber zeminin Kuzey kesimlerinde derenin denize açılan kısmı çok siltli ve killidir.

6.3.2 Liman Deniz Sahasının Hazırlanması

İzmit Körfezi'ndeki deniz inşaat sahasının (duba, platform vb.), makine ve personelin verimli çalışarak planlanan günlük imalat miktarlarının yapılabilmesi ve imalat kalitesine ulaşılabilmesi için düzgün ve kuru tutulması amaçlanmıştır. Jet betonlama delgi makinesi, paletli vinç, beton mikseri, beton pompası ve bunun gibi ağır iş makinelerinin üzerinde çalıştığı platform (çatlak, delik vb.) fazla deforme olmadan çalışmalarına olanak sağlayacak biçimde düzeltilip konumlandırılmıştır. Dolgular ise delme işini zorlaştırmayacak uygun malzemelerle yapılmıştır. Çalışma sahasında uygun yüzey drenaj sistemi tesis edilerek platformun kuru kalması sağlanmıştır.

Deniz tabanında yapılan bazı sondaj sonuçlarından elde edilen SPT (Standart Penetration Test) sayıları, özel numune alıcılarıyla elde edilen örnekler ve CPT (Cone Penetration Test) deneyleri sayesinde saha için sınılaşma analizleri yapılabilmektedir (Ove Arup ve Partners, 2000). Liman altı deniz tabanı zemin bilgileri, uygulama projeleri ve yapım yöntemleri zemin raporlarına göre belirlenmiştir.

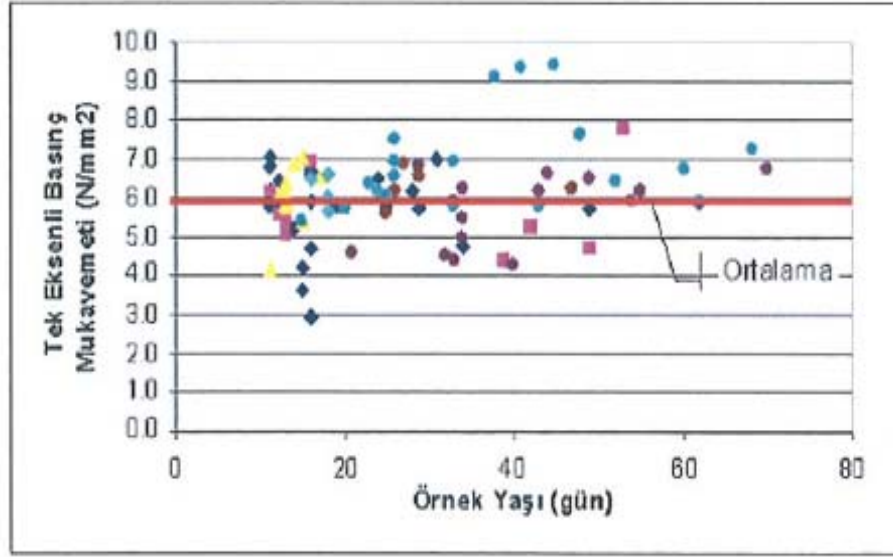
İzmit ve Gölcük deniz yolu ve çevre bilgileri, deniz tabanı ile üstündeki delmeyi zorlaştıran beton ve çelik engeller, altyapı (su, doğalgaz vb.) kanalları uygulama öncesi tekrar gözden geçirilmiştir (Ove Arup ve Partners, 2000).

6.3.3 Jet beton kolonlarının yerleştirilmesi ve imalat toleransları

Uygulama kapsamında tasarlanan jet betonların zemine işaretlenmesi tek tek yapılmaktadır. Tüm jet betonlama kolonlar, uygulama projelerinde gösterilen konumlarından en fazla 7.5 cm mesafe içinde kalacak şekilde oluşturulmaktadır. Ayrıca, jet betonlama kolon deliğinin oluşturulması esnasında, delgi ucu mümkün olduğunca düşey ve dik bir konumda tutulmakta ve düşeyden sapması 1/60'dan (1.5°den) daha fazla olmamalıdır. Jet beton kolonlarının projede istenilen ortalama çapını elde etmek için gerekli imalat parametreleri deney kolonları oluşturularak belirlenmiştir.

Gölcük donanması liman zemininde daha önce uygulanmış çimento enjeksiyonu parametreleri, işi gerçekleştiren yetkili firma aracılığıyla elde edilmiş ve bu parametrelerin projede belirlenmekte olan iyileştirme parametrelerine yardımcı olması amaçlanmıştır. Jet beton sütunlarının yerleştirme sırası, daha önce yapılmış olan jet kolonları yerlerinden yatay ve düşey doğrultularda minimum derecede hareket ettirecek şekilde olmalıdır. Bir jet betonlama bitiminden en az 24 saat geçmeden iki çap çevresinde delgi uygulanmamakta, imalat atlamalı olarak sürdürülmektedir.

Sahada kalite kontrol deneylerinin bir parçası olarak başta 100 mm çaplı karot numuneleri alınarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 6.11'de alınan bazı karot numuneleri üzerinde uygulanan tek eksenli basınç deneyi sonuçları gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere jet beton numunelerinin ortalama tek eksenli basınç mukavemetleri 6 N/mm²'dir.



Şekil 6.11 Alınan jet betonlama numunelerinin tek eksenli basınç mukavemeti sonuçları (Özsoy, 2003).

6.3.4 Jet Kolon İmalatı

Jet beton kolonu, 300 – 600 bar basınç aralığında olmak üzere, genellikle 400 – 450 bar basınçla püskürtülen su ve çimento karışımının zeminin boşluklarını doldurup, sıkıştırılması suretiyle elde edilmektedir (Ove Arup ve Partners, 2000). Yüksek basınç, sevk edilen enjeksiyonun hortum ağzlarından geçerken yüksek bir kinetik enerji kazanmasını sağlamaktadır. Su-çimento karışımının hızı yer yer 300 m/s değerlerine ulaşarak, basılan enjeksiyon zemini yırtmakta ve zeminle birleşerek çimentolu zemin yapısını (soilcrete) oluşturmaktadır.

Liman zemininde uygulanan jet betonlama kolonlarının özelliklerini belirleyen parametreler; enjekte edileceği zeminin cinsi, jet enjeksiyon tiji içerisinde kullanılan akışkan basıncı, jet enjeksiyon tiji içerisindeki akışkanın debisi, enjeksiyon karışımının bileşimi ile birleşme oranları (mix proportion) ve jet enjeksiyon tijinin yukarı çıkma (çekilme) hızından oluşmaktadır.

6.3.5 Delme İşlemi

Çalışma platformu üzerinde bulunan 2 adet delgi makinesinin gerçekleştirdiği delgi işlemi sırasında kuyu ağzının, deniz tabanı yer altı su seviyesinin üzerinde olması tercih edilmektedir. Delme yöntemi, zemin cinsine bağlı olarak seçilmektedir. Özellikle sert kaya zeminlerle karşılaşılması durumunda ihtiyaç duyulan delme işleminin kolaylaştırılması, uç takımın soğutulması ve deniz zemininin enjeksiyona hazırlanması amacıyla delme sırasında değişik akışkanlar (bentonit, metil selüloz vb.) katılması ile sağlanabilmektedir.

Delgi uç takımı olarak yumuşak karakterli zeminlerde genellikle kil bitleri, sert karakterde ise tricone bitler ve bloklu zeminde DTH elemanlar kullanılmaktadır. Bağlantı manşonlarında ise 600 – 800 bar basınca dayanıklı sızdırmazlık elemanları ve delgide 100 mm çapında tijler kullanılmaktadır.

6.3.6 Enjeksiyon işlemi

Projede belirtilen derinliğe ulaşıldığında delme ve akışkan basma işlemi durdurulmaktadır. Çelik bir bilye beton borusuna yollanarak betonun yönü ‘monitor’ diye adlandırılan ve delgi ucunun hemen arkasında bulunan 2.0 mm – 2.5 mm çapındaki 2–4 adet nozzle’ları taşıyan takıma çevirilmektedir.

Su/çimento oranının uygulama esnasındaki değerinin 0.7’nin altında olmamasına dikkat edilmektedir.

Yüksek basınçlı beton pompalanmaya başlanması ile enjeksiyon işlemine geçilmektedir. Yaklaşık olarak 300 m/s hızlı beton bileşimi, delici takımın rotasyon hareketi ile dairesel kesitli bir betonlama tabakası şeklini almaktadır. Delici takımın önceden belirlenmiş dönme hareketi, sabit bir hızla yukarı doğru çekilme hareketi ile birleşince düşey kolon şeklinde bir yapı meydana gelmektedir.

Zemine çimento enjeksiyonu istenilen jet betonlama üst kotuna kadar yapılmaktadır. Enjeksiyonun kinetik enerjisinden zarar görmemek için, jet betonlama üst kotu her zaman yüzeyden 50 cm aşağıda bırakılmaktadır.

Oluşacak kesitlerin boyutları zemin özelliklerine bağlı olduğu gibi; dönüş hızı, çekme hızı, betonlama basıncı, betonlama debisi, enjeksiyon tij delikleri çapı ve adedine de bağlıdır.

Basınçlı enjeksiyon sırasında özellikle sığ derinliklerde su ve hava kabarcıklarının görülmesi delici takımın etrafından dışarıya belli miktarda zemin malzemesinin taşıdığını

kanıtlamaktadır. Bu durumda, betonlama ile karıştırılan zemin içinde aşırı basınç oluşmadığı anlaşılmaktadır. Bu avantajlı bir oluşumdur; aşırı basınç oluşması halinde zeminde kırılmalar ve kolonlarda süreksizlik gibi problemler meydana gelebilmektedir.

6.3.7 Jet betonlama malzemeleri

6.3.7.1 Çimento

Jet beton üretiminde, projede belirtilen PÇ 32.5 cins Portland çimentosu kullanılmıştır.

6.3.7.2 Su

Enjeksiyon karışımında kullanılacak su, tortu ve yabancı katı maddelerden arındırılmış, çimentoya zarar vermeyecek kalitede su olmalıdır.

6.3.8 Çalışma dubasındaki jet betonlama makine ve ekipmanları

Jet betonlama donanımı ve ilgili aksesuarlar operasyonu tam anlamıyla yapabilecek kapasite ve nitelikte olmalıdır. Seçilen ekipman gerektiğinde zeminin kabarmasına engel olmak veya istenen kazık çap ve mukavemetine ulaşmak üzere ön yıkama (prewashing) gerçekleştirilebilecek nitelikte seçilmiştir. Çalışma dubası üzerindeki jet betonlama donanımı aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır:

- 1. Delgi makinesi:** Uygulama projesinde öngörülen derinliğe kadar delgi yapabilen ve jet beton kolonu çapı ve hacmini zemin içerisinde delebilen kapasitedeki delgi makinesidir.
- 2. Pompa ünitesi:** Jet betonlama enjeksiyon karışımını istenen çapta jet betonlama kolonu teşkil edebilecek basıncı verebilecek pompadan oluşacak jet betonlama ünitesidir.
- 3. Mikser ünitesi:** Jet betonlama enjeksiyon karışımını istenen karışım oranında elektronik olarak tartarak karıştıracak mikser ve dinlendiriciden oluşan, jet betonlama pompa ünitesini beslemeye yeterli kapasitede mikser ünitesidir.
- 4. Çimento silosu ve konveyörü:** Dökme çimento depolayabilen ve jet betonlama mikser ünitesini yeterli düzeyde besleyecek çimento silosu ve konveyörüdür.
- 5. Su depolama ve dağıtım sistemi:** 15–25 ton kapasiteli sağlam su tankı, su havuzu ve su pompasından oluşan sistemdir.

6.3.9 Zemin iyileştirmesinin etkinliğinin değerlendirilmesi

Uygulanan jet betonlama işleminin etkinliğinin değerlendirilmesindeki hesapta tahkik edilecek 'Jet Betonlama' düzeni 800 mm çapında 2.5 m × 2.5 m aralıkta tekil kolon uygulamaları şeklindedir. Şekil 6.11'deki deney sonuçlarının ortalama değeri 6.0 MPa alınıp malzeme güvenlik faktörü olarak ise 2.0 kullanıldığında, emniyetli basınç mukavemeti olarak 3.0 MPa elde edilmektedir. Bu basınç mukavemeti değerine karşılık gelen elastisite ve kayma modülleri formül yardımıyla sırasıyla 8.190 MPa ve 2.730 MPa'dır. Söz konusu deniz zemininde gerçekleştirilen kayma dalgası hız ölçümleri ilk 10 m.'deki zemin tabakası için ortalama 220 m/s kayma dalgası hızını işaret etmektedir. Bu durumda elde edilecek zemin maksimum kayma modülü (G_s) ve kayma modülü oranı (G_r) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

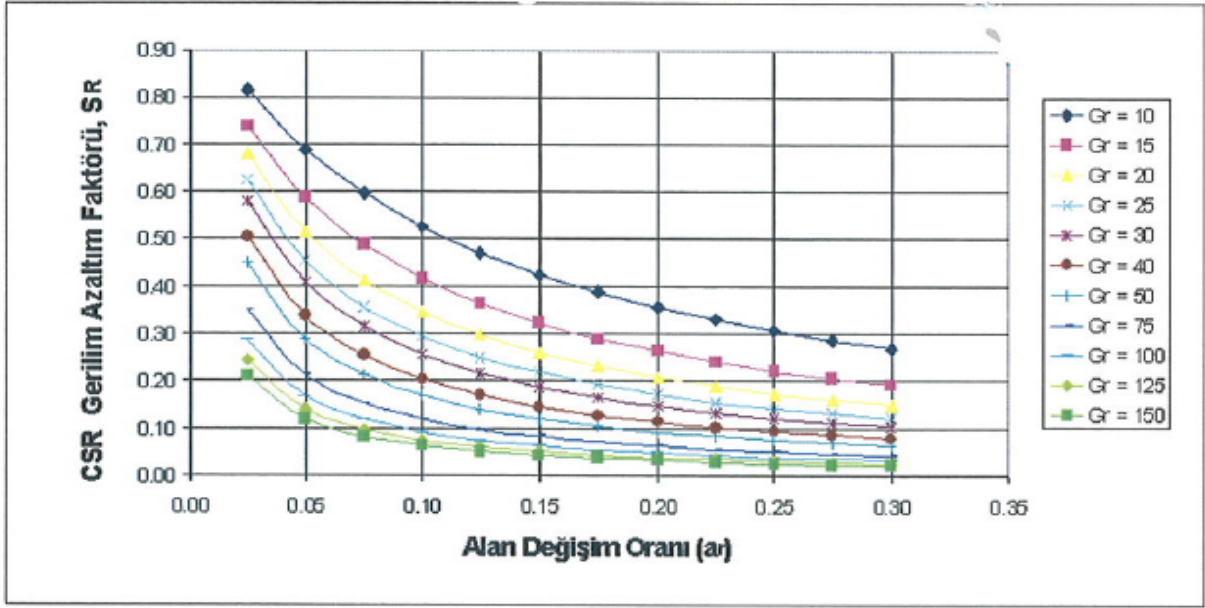
$$G_s = p \times V_s^2 = 1.8 \times 220^2 = 87120 \text{ kPa} \quad (6.2)$$

$$G_r = \frac{2730}{87.12} \cong 31 \quad (6.3)$$

Burada p ; ilgili zemin tabakalarının ortalama özgül kütlelerini (t/m^3) temsil etmektedir. Birim alan oranından yola çıkarak alan yer değiştirme oranı da şu şekilde bulunabilecektir.

$$a_r = \left[\frac{\pi 0.8^2}{4} \right] / (2.5 \times 2.5) \cong \%8 \quad (6.4)$$

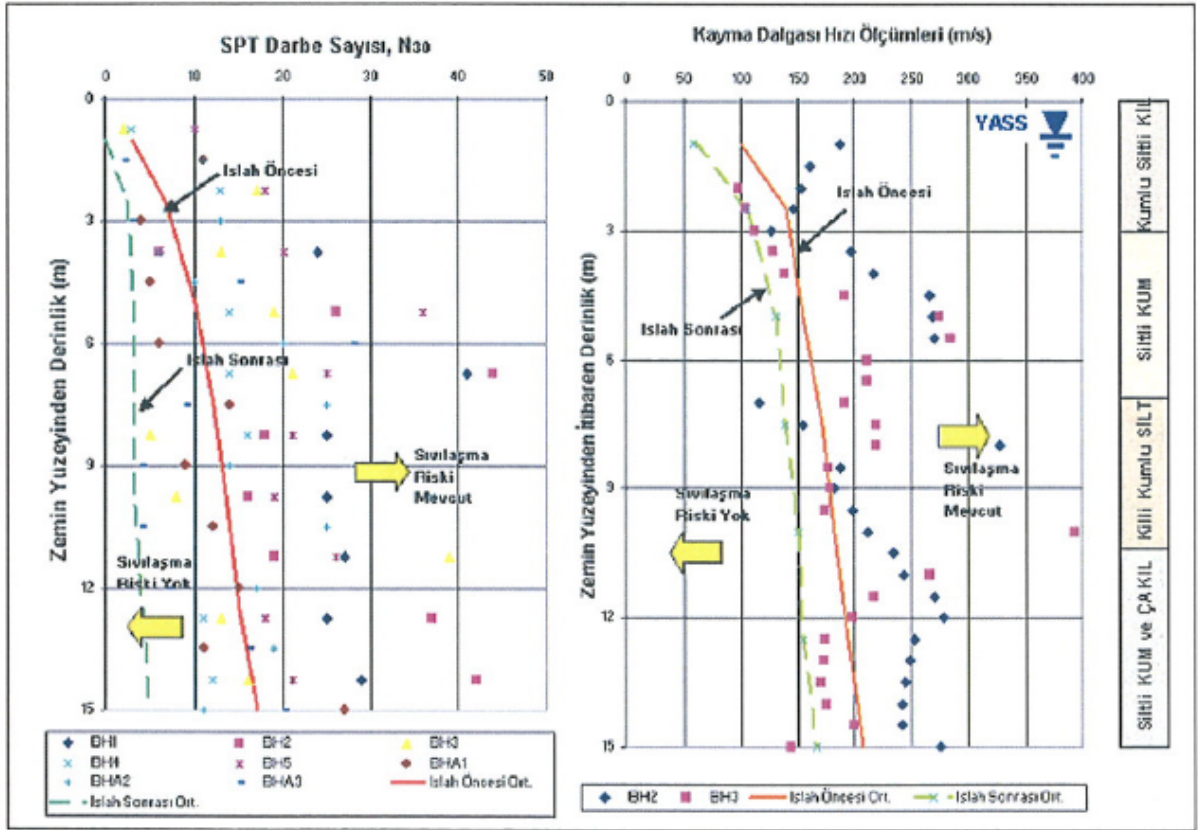
Burdan Şekil 6.12'de gösterilen CSR (Gerilim Azaltma Faktörü) azaltım eğrileri yardımıyla %8 alan değişim oranı ve kayma modülü oranı 31'e karşılık gelen çevrimsel gerilim azaltma oranı (S_R) 0.30 mertebesinde beklenmektedir. Bu durumda özet olarak depremden kaynaklanan deniz tabanı kayma gerilmelerinin %70'inin 'Jet Betonlama' kolonlarda yoğunlaşacağı ve ancak %30'unun kolonlar arası zemine aktarılacağı sonucu çıkmaktadır. Bu sondajlar için gerçekleştirilen özel tek boyutlu saha tepki analizlerinin bir göstergesi olarak, sınırlama potansiyeli görülen ilk 10 m.'lik tabakada en olumsuz durumda 60 KPa mertebesinde bir maksimum deprem kayma gerilmesi beklenmesi gerekmektedir. Bu durumda formül yardımıyla, ortalama kayma gerilmesi bu maksimum değer %65'i mertebesinde bir kayma kuvvetinin 80 mm çapındaki kolon kesitince güvenli olarak taşınması gerekmektedir. Bu tahkik için formül kullanılması durumunda;



Şekil 6.12 Birim alan ve kayma modülü oranlarına bağlı olarak CSR (Çevrimsel Gerilme Oranı) azaltım eğrileri (S_R) (Özsoy, 2002).

$$V_{JG} = 0.3\sqrt{3.0} \times 800^2 / 4 = 261187 N = 261 kN \geq 175 kN \quad (6.5)$$

olduğundan; sistem güvenlidir. Son aşamada statik yükler altında sistemin güvenilirliği yeterli bulunmuş ve kolon uygulama çapı ve aralığı uygun görülmüştür. Şekil 6.13 kapsamında çevrimsel gerilme azaltım faktörü uygulanması durumunda sıvılaşma riskinin nasıl azaldığı gösterilmektedir. Kısacası yukarıdaki hesabın tekrarlanması halinde elde edilecek eşik değer SPT (Standart Penetration Test) darbe sayısı ve kayma dalgası hızları altında kalan bölgeler sıvılaşma riski olan noktaları ve üstünde kalanlar ise bu riskin ortadan kaldırıldığı noktaları göstermektedir. Alınan deniz tabanı zemin numunelerinden elde edilen elek analizi sonuçları No.200 elek altında kalan malzemenin %15–75 aralığında olduğunu göstermektedir. Şekil 6.13'te gösterilen eğriler No.200 elek altında kalan malzemenin %35 olduğu durum için düzenlenmektedir. Yapılan zemin ıslah çalışmaları yüzeyden 15 m derinliğe kadar etki ettiğinden ve bu derinliğin altındaki zemin tabakalanmasında hidrometre analizleri %20'nin üzerinde kil içeriği gösterdiğinden, bu derinliğin altında sıvılaşma riski görülmemektedir.



Şekil 6.13 Zemin ıslahı öncesi ve sonrası sıvılaşma güvenliği analizlerinin simülasyonu (Özsoy, 2002).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, deniz yapılarına temel oluşturan deniz tabanının; mukavemeti, taşıma kapasitesi ve rijitliğinin azalmasına yol açarak geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilen sıvılaşma olayını engellemek amacıyla uygulanan zemin iyileştirme yöntemleri açıklanmış ve çeşitli ölçütler dikkate alınarak birbiriyle karşılaştırmaları yapılmıştır.

Sıvılaşma riskine karşı deniz tabanı zemin iyileştirmesine örnekler verilmiştir. Marmaray Projesi kapsamındaki tünel tabanı kompaksiyon betonlama uygulaması incelenmiştir. 1.3 km'lik tünel zemini hattının sıvılaşma potansiyeli yüksek olan 471 m'lik boylamsal kısmında, 20.4 m genişliğinde kompaksiyon betonlama tekniği uygulanmıştır. Uygulama sonucunda; alınan her beton numesinde uygulanan beton dayanımının 20 kg/cm²'den yüksek olması, beton slump değerinin 7.5 cm'den düşük olması önkoşullarıyla, yapılan CPT deneyleriyle elde edilen sıvılaşma güvenlik faktörü (FL_{target}), bağıl yoğunluk (D_{target}) ve oturma miktarları istenen optimum kabul koşullarını sağlamıştır. Buradan görüldüğü üzere, kompaksiyon betonlama söz konusu projede başarılı olmuştur. Bu yöntemin dezavantajı, işleyişin deniz koşullarında yavaş olması ve kullanılan ekipmaların uygulanması gereken yüksek basınçtan ötürü sıklıkla hasar görmesidir. Ekonomik açıdan kompaksiyon betonlama kısmen pahalıdır. Ancak önem derecesi yüksek olan deniz yapıları açısından performans maliyetten daha önemlidir. Diğer deniz iyileştirme yöntemlerine; jet betonlama, çimento betonlamaya (enjeksiyonu) kıyasla özellikle deniz tabanında iyileştirme açısından kompaksiyon betonlama yöntemi daha güvenilirdir.

Jet betonlama yöntemi de birçok deniz tabanı iyileştirme projesinde uygulanmaktadır. Fakat yapılan deneylere ve geçmişte yaşanmış proje bazlı tecrübelerle dayanılarak (Wheeler ve Assor, 1998) özellikle kumlu ve yüksek basınç içeren büyük derinliklerde uygulandığı zaman su geçirimsizliğini sağlayamadığı ve ayrıca zemin sıvılaşmasını engelleyemediği saptanmıştır. Diğer yandan, yöntem hızlıdır ve pratik bir şekilde uygulanabilmektedir. Birçok uygulama tecrübesi mevcuttur ve popülerite, tanınabilirlik açısından yaygın olarak tercih edilen bir iyileştirme yöntemidir.

Çimento enjeksiyonunun ise daha çok sığ derinliklerde ve kısmen küçük alanlardaki iyileştirmelerde uygulanması önerilmektedir. Yöntem zaman alıcı ve zahmetlidir. Enjeksiyon karışımında çimento en önemli yeri tutmaktadır. Kullanılan çimento kolay genleşebilen ve ilk direnci yüksek olan çimento (PÇ 32.5-Porland çimentosu) olması önerilmektedir. Çimento enjeksiyonu boşluklu zeminlerde (kumlu ve çakıllı) uygulandığında; yüksek dayanımlı,

sızdırmazlığa sahip, mukavemetini kazandıktan sonra taşıma kapasitesi yüksek ve oluşan oturma miktarında iyileştirme öncesine göre kayda değer azalmaya sahip nitelikte zemini sağlayabilmektedir.

Ani yüklemeler veya deprem sonucunda oluşma olasılığı yüksek olan sıvılaşmayı önleyebilmek için deniz tabanında uygulanabilen başlıca üç yöntem avantaj ve dezavantajlarıyla karşılaştırıldığında; en başarılı yöntemin kompaksiyon betonlama olduğu görülmekte ve deniz tabanında tercih edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Arslan, S. and Itoh, K., (2006) , "Construction and Installation Quality Plan (CIQP) of Compaction Grouting Works", Proceedings of Marmaray Project Quality Control Section, Taisei, Istanbul (2006)

Bell, A.L., (1993), "Jet Grouting", Ground Improvement edited by M.P. Moseley, Blackie Academic & Professional, Boca Raton, FL, pp. 149 – 174.

Borden, R., Holtz, R.D., Juran, I., Editors, (1992), "Jet Grouting", 7 papers -Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Specialty Conference: Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication No. 30, ASCE, New York, NY, Vol 1., pp. 144 – 214.

Burke, G.K. and Welsh, J.P. (1991), "Jet Grouting - Uses for Soil Improvement", Engineering Congress 1991, sponsored by the Geotechnical Engineering Division of ASCE and held at University of Colorado, Boulder, CO, June 10 – 12, 1991. ASCE Geotechnical Special Publication # 27, edited by F. G. Mclean, D.A. Campbell and D.W. Harris, pp. 334 – 345.

Burke, G.K., Johnsen, L.F. and Heller, R.A., (1989), "Jet Grouting for Underpinning and Excavation Support", Proceedings of the 1989 ASCE Foundation Engineering Congress.

Burke, G.K., Johnsen, L.F. and Heller, R.A., (1989), "Jet Grouting for Underpinning - The Cutting Edge", Geotechnical News, 1989.

Burke, G.K. and Koelling, M.A., (1995), "Special Application for Jet Grouting: Underpinning, Excavation support and Groundwater Control", Proceedings of Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, B.C., pp. 90–97.

Byle, M.J., 1992. Limited Compaction grouting for Retaining Wall Repairs, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *ASCE Geotech. Special Publication, N°30*, New Orleans, Feb 25-28, 1992: 288-300.

C.E.B.T.P., Etudes et Ingenierie, Service Geotechnique 1996. Injection de compactage, *Rapport de recherche*, N° 96105, Novembre 1997.

C.E.B.T.P., Etudes et Ingenierie, Service Geotechnique 1997a. Injection de compactage, *Rapport de recherche*, N° 96105, Mars 1997.

C.E.B.T.P., Departement Geotechnique 1997b. Injection de compactage, Essais comparatifs de chargement statique, *Rapport de recherche*, N° 96105, Juin 1997.

Critchfield, J.W. & Macdonald, J.F. 1989. Seattle Bus Tunnel Construction. *Rapid Excavation and Tunneling Conference, Los Angeles, June 1989*, chap 22:341-359.

Celep, Z. ve Kumbasar, N., (2000), "Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı", Beta Dağıtım, İstanbul.

Graf, E.D., (1992), "Compaction grout, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *ASCE Geotech. Special Publication. N°30*, New Orleans, Feb 25-28, 1992:275-287.

Gudehus, G. & Schwarz, W. 1998. Düsenstrahlverfahren in holzhaltigem, nichtbindigem Baugrund. *Vortage der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart*, DGGT, Essen:643-655.

- Iagolnitzer Y., (1999), Ein Beitrag zum Entwurfskonzept der Bodenverbesserung mit Compaction-Grouting. *Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik, TU Darmstadt*.
- Idriss, I.M., (2002), "Review of Field-Based Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes", ICE Meeting, London, UK, 31st of July.
- Katzenbach, R., Boley, C. & Quick, H. 1998. Vertragsrelevante Naturphänomene bei der Ausführung von Abdichtungsinjektionen. Vortage der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart, DGGT, Essen:249-261.
- Kutzner, Ch. 1996. *Grouting of rock and soil*. Rotterdam: Balkema.
- Ove Arup & Partners International Ltd. (2000), Geotechnical Interpretative & Foundation Design Report. Prepared by Bird, J. Lubkowski, Z.A., ArupGeotechnics, London.
- Özsoy, M.B., (2003), The Mitigation of Liquefaction by means of Soil Improvement Techniques, *Ph.D. Thesis*, Boğaziçi University, İstanbul, Türkiye.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., (1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, pp. 1249-1273.
- Shibazaki, M., and Ohta, S., (1982), "A Unique Underpinning of Soil Solidification Utilizing Super - High Pressure Liquid Jet", *Proceedings of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, New Orleans*, pp. 680 – 693.
- Steiner, W., Schneider, E. and Cartus, M., (1992), "Soilcrete Cut-off Wall for Undercrossing a Busy Rail Line", *Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Specialty Conference: Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication No. 30*, Edited by Roy Borden, Robert D. Holtz and Ilan Juran, ASCE, New York, NY, Vol 1., pp. 384 – 397
- Warner, J., Schmidt, N., Reed, J., Shepardson, D., Lamb, R. & Wong, S., (1992), "Recent Advances in Compaction Grouting Technology, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, *ASCE Geotech. Special Publication*, N°30, New Orleans, Feb 25-28, 1992: 252-264
- Wheeler, P. & Assor, R. 1998. Watertight answers. *European Foundations*, No. 3, Autumn 1998: 16-17.
- Welsh, J.P., and Burke, G.K., (1995), "Vertical Cutoffs and Bottom Sealing by Jet Grouting" , *Proceedings of the Specialty Conference, New Orleans, LA, February 1995, Geotechnical Engineering and Environmental Divisions, ASCE*, pp. 1208 – 1221.

İNTERNET KAYNAKLARI

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what1.html> [1]

<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/why/why2.html> [2]

www.temeltas.com.tr [3]

www.zeminarastirma.com [4]

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 27.06.1981

Doğum yeri İstanbul

Lise 1992–1999 Karamürsel Anadolu Lisesi

Lisans 2000–2004 İstanbul Üniversitesi, İnşaat Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004–2007 Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Anabilim Dalı,
Kıyı ve Liman Müh. Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2006-Devam ediyor Marmaray Projesi Batırma Tüneli Bölümü
Saha Mühendisi