

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DERİN VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİNİN
ENERJİ TABANLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet DİNÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

OCAK 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DERİN VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİNİN
ENERJİ TABANLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet DİNÇ
(501181312)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aykut ŞENOL

OCAK 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181312 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet DİNÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DERİN VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİNİN ENERJİ TABANLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Aykut ŞENOL**
İTÜ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üy. Ece BAYAT**
İTÜ

Prof. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Teslim Tarihi :27 Aralık 2021
Savunma Tarihi :18 Ocak 2022





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans hayatım ve tez yazım süresince gösterdiği anlayış ve sabrı için değerli hocam, tez danışmanım Prof. Dr. Aykut ŞENOL'a en derin şükranlarımı sunarım. Bilgisi, tecrübesi, güler yüzü ve yanımda olduğunu her daim hissettirerek, bu zorlu süreci en iyi şekilde tamamlamamı sağladığı için teşekkür ederim.

Bu araştırma kapsamında teknik ve pratik bilgisi ile bana teknik danışmanlık ve mentorluk yaparak, bu süreçte karşılaştığım zorlukların üzerinden gelmemi sağlayan İnş. Yük. Müh. Alp GÖKALP'a en içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Tez kapsamında gerekli olan tüm doküman ve verilerden faydalanmama izin veren ve bu yolda her türlü desteği sağladığı için çalışanı olduğum KASKTAŞ Kayar Kalıp Altyapı Sondaj Kazık ve Tecrit A.Ş.'ye ve ENKA İnşaat ve Sanayi A.Ş.'ye, değerli bilgi ve fikirlerini benden hiçbir zaman esirgemeyen İnş. Müh. Mehmet Çağrı ERTÜRK, Dr. İnş. Yük. Müh. Rasin DÜZCEER'e ve İnş. Yük. Müh. Şenol ADATEPE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin şantiye ayağında, saha deneylerinin ve vibro kompaksiyon uygulamasının en iyi şekilde gerçekleştirilmesini sağlayan, Jeo. Müh. Erdin ARAT, İnş. Müh. Servan OĞUZ'a, İnş. Müh. Berk SEKİ'ye, Jeo. ve Fot. Müh. Ertan ŞAHİN'e, ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Tez süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kardeşim, İnş. Müh. Eşref DİNÇ'e ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Bu tez onlara ithaf edilmiştir. Onların desteği, sevgisi, sabrı ve bana olan inancı olmasaydı asla başaramazdım.

Ocak 2022

Ahmet Dinç
İnşaat ve Endüstri Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
2. VİBRATÖRLÜ ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	5
2.1 Genel	5
2.2 Taş Kolon	6
2.3 Vibro Kompaksiyon	7
3. VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİ	25
3.1 Genel	27
3.2 Sıkıştırma Vibratörü	32
3.3 Sıkıştırma Metodu	34
3.4 Sıkıştırma Mekanizması	35
3.4.1 Sıkıştırma enerjisinin iletilmesi	38
3.4.2 Sıkıştırma sonucunda yatay toprak basıncında meydana gelen artış	38
3.5 Uygulama Noktaları Arasındaki Mesafe	39
3.6 Sıkıştırma Frekansı	40
3.7 Vibratör Penetrasyonu ve Geri Çekmesi	42
3.8 Sıkıştırma Süresi	43
3.9 Vibro Kompaksiyon Tasarım Metodu.....	43
3.9.1 İnce dane oranı düşük kumlarda uygulamaları	48
3.10 Sıvılaşma ve Vibro Kompaksiyon.....	53
3.11 Kalite Kontrol Kriterleri	56
3.12 Koni Penetrasyon Deneyi (CPT).....	60
3.12.1 Hesaplanan parametreler	61
3.12.2 Rölatif sıkılık (Dr).....	62
4. VAKA ANALİZİ.....	63
4.1 İnceleme Alanı	63
4.2 Proje Hakkında Genel Bilgiler	63
4.3 İnceleme Alanı Hakkında Genel Jeolojik Bilgiler ve Zemin Profili	64
4.4 Kombi Duvar Sistemi	68
4.4.1 PDA-DLT deneyleri.....	70
4.5 Proje Kapsamında Yapılan Deniz Tabanı Taraması Çalışmaları	70

4.5.1 Deniz tabanı tarama işlerinde kullanılan ekipmanlar	71
4.5.2 Tarama kontrollü CSD	72
4.5.3 Boru hattı.....	73
4.5.4 Kesici emici tarak (CSD) gemisi kayıtları	73
4.6 Hidrolik Dolgu Kum Malzemesi ile Arazi Islahı	74
4.6.1 Islah alanının doldurulması	75
4.6.1.1 Boru hatlarının kurulumu	75
4.6.1.2 Silt perdeleri	75
4.6.1.3 Bulanıklık izleme	77
4.6.2 Hidrolik dolgu üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri.....	77
4.7 Vibro Kompaksiyon Uygulaması	78
4.7.1 Dolgu kalitesinin değerlendirilmesi	81
4.8 Tam Ölçekli Saha Deneyleri	83
4.8.1 Sıkıştırma Enerjisi	87
4.8.2 Deney alanı-1 (TA-1).....	91
4.8.3 Deney alanı-2 (TA-2).....	96
4.8.4 Deney alanı-3 (TA-3).....	101
4.8.5 Deney alanı-4 (TA-4).....	106
4.8.6 Deney alanı-5 (TA-5).....	111
4.8.7 Deney alanı-6 (TA-6).....	116
4.8.8 Deney alanı-7 (TA-7).....	121
4.9 İdealize Zemin Profili ve Zemin Parametreleri	125
4.10 Oturma Değerlendirmesi	127
4.11 Sıvılaşma Değerlendirmesi.....	127
4.12 Tam Ölçekli Saha Deneylerinin Genel Değerlendirmesi	128
4.12.1 Sıkıştırma enerjisi ile doldurulan kum miktarı arasındaki ilişki	129
4.12.2 Yerleşim alanı/aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki	130
4.12.3 Yerleşim alanı/aralığı ile $Art-q_c$ arasındaki ilişki	132
4.12.4 Sıkıştırma enerjisi ile Δq_c arasındaki ilişki	134
4.12.5 Vibro kompaksiyon süresi ile Δq_c arasındaki ilişki.....	135
4.13 İyileştirme Sonrası Kombi Duvar Sisteminin Analiz Sonuçları.....	136
4.14 Zamana Bağlı İyileşme Oranının Değerlendirilmesi.....	139
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	143
KAYNAKLAR.....	147
EKLER.....	153
ÖZGEÇMİŞ.....	157

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AASHTO	: American Society of State Highway and Transportation Official
BPT	: Becker Penetration Test
BS	: British Standards
CBR	: California Bearing Ratio
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
CSD	: Cutter Suction Dredger
DDM	: Doğrudan Yoğunluk Ölçüm Deneyi
DLT	: Dinamik Yük Deneyi
DMT	: Dilatometre Deneyi
DGPS	: Differential Global Positioning System
EN	: European Norm
RTK	: Real-Time Kinematic Positioning
LSCPT	: Yanal Gerilme Koni Penetrasyon Deneyi
LT	: Yük Deneyi
MPT	: Menard Presiyometre Deneyi
MRC	: Müller Rezonans Sıkıştırma
NTU	: Nefelometrik Bulanıklık Birimi
PDA	: Kazık Çakım Analizi
PMT	: Presiyometre Deneyi
SN	: Uygunluk Sayısı
SPT	: Standard Penetrasyon Deneyi
TA	: Deney alanı
UCS	: Tek Eksenli Basınç Deneyi Dayanım Değeri



SEMBOLLER

A	: Tek bir kolonun etki alanı/birim hücre alanı
A_c	: Kolon kesit alanı
A_c/A	: Düzeltilmiş alan yerdeğiştirme oranı
A_s	: Yerleşim alanı
a_{max}	: Maksimum yer ivmesi
a_r	: Alan yerdeğiştirme oranı
a_v	: Vibrasyonun amplitüdü
B_q	: Boşluk suyu basıncı katsayısı
c'	: Zeminin efektif kohezyonu
c_u	: Drenajsız kayma dayanımı
CRR	: Devirsel direnç oranı
CSR	: Devirsel gerilme oranı
D	: Kolon çapı
D_{10}	: Danelerin %10'unun küçük olduğu dane boyutu
D_{20}	: Danelerin %20'sinin küçük olduğu dane boyutu
D_{50}	: Danelerin %50'sinin küçük olduğu dane boyutu
D_{60}	: Danelerin %60'ının küçük olduğu dane boyutu
D_r	: Rölatif sıkılık
D_{ri}	: İyileştirme öncesi bağıl sıkılık
D_{rf}	: İyileştirme sonrası bağıl sıkılık
D_v	: Vibratörün çapı
E_c	: Sıkıştırma enerjisi
E_{50}	: %50 nihai gerilme mertebesindeki sekant deformasyon modülü
E_{oed}	: Odometrik deformasyon modülü
E_s	: İyileşme öncesi zeminin deformasyon modülü
E_{sf}	: İyileştirilmiş zeminin deformasyon modülü
e	: Boşluk oranı
e_0	: İyileştirme öncesi boşluk oranı
e_1	: İyileştirme sonrası boşluk oranı
F_m	: Merkezkaç kuvveti
F_r	: Geotekstil halkasal çekme kuvveti
FC	: İnce malzeme oranı (<0.075 mm)
f_t	: Düzeltilmiş çevre sürtünmesi
G	: Kayma deformasyon modülü
GS	: Güvenlik sayısı
K_0	: İyileşme öncesi sükunetteki yanıl toprak basıncı katsayısı
K_{0f}	: İyileştirilmiş zeminin sükunetteki yanıl toprak basıncı katsayısı
k	: Geçirimsilik (permeabilite) katsayısı
M	: Eksantrik kütle
M_d	: Deprem moment büyüklüğü
M_s	: Zeminin odometrik modülü

M_v	: Eksantrik kütle
N	: 30 cm penetrasyon için darbe sayısı
N_1	: Örtü yükü düzeltmesi yapılmış SPT değeri
$(N_1)_{60}$	: %60 enerji oranı ve örtü yükü düzeltmesi yapılmış SPT değeri
N_f	: İyileştirme sonrası hedeflenen SPT direnci
N_i	: İyileşme öncesi SPT direnci
n	: Porozite
P	: Güç
Q	: Hidrolik debi
q	: Sürşarj yükü
q_c	: CPT uç (koni) direnci
q_{ci}	: iyileştirme öncesi CPT uç (koni) direnci
q_{cf}	: iyileştirme sonrası CPT uç (koni) direnci
q_t	: Düzeltilmiş toplam koni uç direnci
R_f	: CPT sürtünme oranı
r	: Kolon yarıçapı
r_d	: Derinlik azaltma faktörü
SN	: Uygunluk katsayısı
s	: Kolonlar arası merkezden merkeze mesafe
t_c	: Kompaksiyon süresi
u	: Boşluk suyu basıncı
V_s	: Kayma dalgası hızı
V_T	: Doldurulan kum hacmi
W_P	: Plastik limit
W_L	: Likit limit
I_P	: Plastisite indeksi
γ_d	: Dolgunun birim hacim ağırlığı
γ_s	: Zeminin birim hacim ağırlığı
Δe	: Boşluk oranındaki artış
ΔN	: SPT direncindeki artış
Δq_c	: CPT uç (koni) direncindeki artış
$\Delta \sigma$	: Düşey gerilme artışı
σ_1	: Büyük asal gerilme
σ_3	: Küçük asal gerilme
σ_{v0}	: Toplam gerilme cinsinden zemin örtü yükü
σ_{v0}'	: Efektif gerilme cinsinden zemin örtü yükü
ϕ_s	: Zeminin kayma direnci açısı
ϕ_s'	: Zeminin efektif kayma direnci açısı
τ	: Kayma gerilmesi
τ_s	: Zeminin taşıdığı kayma gerilmesi
ψ	: Azaltma faktörü
ω	: Rotasyon hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Literatürde bildirilen bazı çalışmalar	8
Çizelge 2.2 : Vibro kompaksiyon uygulamasının özeti (çakıllı kum dolgu).....	15
Çizelge 2.3 : CPT'lerden elde edilen koni uç dirençlerindeki artış ve buna karşılık gelen kümülatif sıkıştırma enerjisi.....	16
Çizelge 3.1 : Uygulamada kullanılan vibratörlerin özellikleri (Kirsch ve Kirsch, 2016)	30
Çizelge 3.2 : Suya doymuş kumların fiziksel özellikleri (Kirsch ve Kirsch, 2016)...	46
Çizelge 3.3 : Tasarım amacıyla SPT-N'nin q_c değerine, derinlik, rölatif sıkılık ve doymuluktan bağımsız olarak çevrilmesi (Schmertmann, 1970)	52
Çizelge 3.4 : Sıvılaşıma potansiyelinin değerlendirilmesi için kumda sıkıştırma sonuçlarını ölçmek için uygun deney yöntemleri (Idriss ve Youd, 1997)	57
Çizelge 3.5 : Granüller zeminlerin uygunluk sayısına (SN) göre derecesi (Brown, 1977)	59
Çizelge 3.6 : CPT verilerinden Dr hesaplama için geliştirilen korelasyonlar. (Eslami ve diğ, 2019).....	62
Çizelge 4.1 : Zemin/Kaya parametreleri.....	66
Çizelge 4.2 : Laboratuvar deney sonuçları (ENCO International Ltd., 2019).....	68
Çizelge 4.3 : Tarama ve ıslah işlerinde kullanılan ekipmanlar.....	69
Çizelge 4.4 : Uygulamada kullanılan vibroflotun teknik özellikleri	78
Çizelge 4.5 : Elek analizi sonuçları	79
Çizelge 4.6 : Tam ölçekli saha deneyleri.....	85
Çizelge 4.7 : Çeşitli zeminlerin sıkıştırılabilmesi için uygulanan enerji yönergeleri (Lukas, 1986).....	88
Çizelge 4.8 : Deney alanı-1 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	93
Çizelge 4.9 : Deney alanı-2 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	98
Çizelge 4.10 : Deney alanı-3 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	103
Çizelge 4.11 : Deney alanı-4 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	108
Çizelge 4.12 : Deney alanı-5 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	113
Çizelge 4.13 : Deney alanı-6 Vibro kompaksiyon uygulama özeti	118
Çizelge 4.14 : Tam ölçekli saha deneylerinin sonuçları	124
Çizelge 4.15 : Zemin/Kaya parametreleri.....	126



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Farklı zemin dane boyutlarına uygulanabilen zemin iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981) Güncelleme:(Nicholson, 2004).	2
Şekil 2.1 : Vibro kompaksiyon ve taş kolon yöntemlerinin uygulanabildiği zeminlerin gradasyon özellikleri (Priebe, 1998).	6
Şekil 2.2 : Sıkıştırmadan önceki CPT sonuçları (a), sıkıştırmadan en az 4 gün sonraki CPT sonuçları (b).	10
Şekil 2.3 : MRC yönteminde zamana bağlı iyileşme miktarı (a), Vibro kompaksiyon yönteminde zamana bağlı iyileşme miktarı (b).	12
Şekil 3.1 : Vibro kompaksiyona uygun zemin sınıflandırması (Degen, 1997).	26
Şekil 3.2 : Vibratörün tipik kesiti (Kirsch ve Kirsch, 2016).	28
Şekil 3.3 : Yatay düzlemde vibratör ve vibratör ivmesinin oluşma prensibi (Kirsch ve Kirsch, 2016).	29
Şekil 3.4 : Vibro kompaksiyon uygulaması (KASKTAŞ, 2021a).	31
Şekil 3.5 : Vibratörlere örnekler (soldan sağa: terra prob, vibro-rod ve Y-prob). (Massarsch ve Fellenius, 2015a).	32
Şekil 3.6 : Vibro kanat ekipmanı ve sıkıştırma sondası: (a) vibro kanat makinesi; (b) vibro kanatlı çubuk (Massarsch ve Fellenius, 2015a).	33
Şekil 3.7 : Vibratörden zemine enerji transferini artırmak için açıklıklara sahip esnek vibratör: (a) MRC sıkıştırma ekipmanı, (b) MRC vibratör. (Massarsch ve Fellenius, 2015a).	34
Şekil 3.8 : Granüller zeminlerin vibrasyon etkisi altındaki davranışı (Rodger, 1979).	37
Şekil 3.9 : Vibratör penetrasyonu ve sıkıştırma sırasında zemin titreşim hızı (Massarsch ve Fellenius, 2015a).	41
Şekil 3.10 : Değişken frekans konseptini kullanan derin titreşimli sıkıştırma prensibi (Massarsch ve Fellenius, 2015b).	42
Şekil 3.11 : Kumların dane boyutu dağılım eğrileri (Kirsch ve Kirsch, 2016).	44
Şekil 3.12 : Kumlarda kayma gerilmesi (ε_v = Hacimsel şekil değiştirme) (Kirsch ve Kirsch, 2016).	45
Şekil 3.13 : Tipik bir Vibro kompaksiyon deney çalışması örneği (Moseley ve Priebe, 1993).	47
Şekil 3.14 : Kum kazıkların kare ve üçgen düzende yerleşimi.	48
Şekil 3.15 : Vibro kompaksiyonun zemin sıkılığına etkisi.	49
Şekil 3.16 : Rölatif sıkılık ve kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Schmertmann, 1978).	50
Şekil 3.17 : q_c - ϕ' - σ_{v0} arasındaki ilişki (Robertson ve Campanella, 1983).	51
Şekil 3.18 : Kum üzerindeki yapıların tasarımı için karşılıklı bağımlılıklar (Kirsch ve Kirsch, 2016).	53
Şekil 3.19 : SPT-(N_1) ₆₀ değerlerine bağlı olarak sıvılaşma direnci (Seed ve diğ, 1985).	55

Şekil 3.20 : CPT verilerinden CRR hesaplama grafiği (Idriss ve Youd, 1997).....	56
Şekil 3.21 : CPT verilerine dayalı derin sıkıştırma için zemin sınıflandırması (Massarsch, 1991).	59
Şekil 3.22 : Koni penetrasyon deneyi gerçekleştirme prosedürü (Eslami ve diğ, 2019).	61
Şekil 4.1 : Vaka analizinin yapıldığı proje sahası.....	63
Şekil 4.2 : Proje sahasının genel yerleşim planı.	64
Şekil 4.3 : Sondaj planı (ENCO International Ltd., 2019).	65
Şekil 4.4 : İdealize zemin profili.....	67
Şekil 4.5 : Kombi duvar yerleşim planı ve kombi duvar çakma işleri (ENKA, 2021a).	69
Şekil 4.6 : PDA-DLT deneyi yapılan kazıkların konumu (ENKA, 2021a).	70
Şekil 4.7 : Islah ve deniz tabanı tarama sahaları yerleşim planı.	69
Şekil 4.8 : CSD kesici emici tarayıcı (ENKA, 2021b).	72
Şekil 4.9 : Geçici sedde tipik kesiti.....	75
Şekil 4.10 : Silt perdelerinin konumu.	76
Şekil 4.11 : Silt perdesi (solda) ve çalışma prensibi.	76
Şekil 4.12 : Silt perdesi.	77
Şekil 4.13 : Vibro kompaksiyon kurulumu (KASKTAŞ, 2021a).	79
Şekil 4.14 : Proje kapsamında izlenen uygulama adımları ve sahanın 3D görünümü (KASKTAŞ, 2021b).	80
Şekil 4.15 : CPT uç direncine bağlı olarak dolgunun sıkıştırılabilirlik değerlendirmesi.	83
Şekil 4.16 : Genel yerleşim planı.....	84
Şekil 4.17 : TA-1 ve TA-2 tek paslı (geçiş) Vibro kompaksiyon yöntemi.....	86
Şekil 4.18 : TA-3, TA-4, TA-5, TA-6 ve TA-7 çift paslı (geçiş) Vibro kompaksiyon yöntemi.	87
Şekil 4.19 : %65 Rölatif sıklık ve %10 ince dane içeriği için hesaplanan koni uç direncinin derinlik ile değişimi.	90
Şekil 4.20 : Deney alanı-1 genel yerleşim planı.	89
Şekil 4.21 : Deney alanı-1 ön-CPT sonucu.....	92
Şekil 4.22 : Deney alanı-1 art-CPT sonuçları.	94
Şekil 4.23 : Deney alanı-1 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.....	95
Şekil 4.24 : Deney alanı-2 genel yerleşim planı.	96
Şekil 4.25 : Deney alanı-2 ön-CPT sonucu.....	97
Şekil 4.26 : Deney alanı-2 art-CPT sonuçları.	99
Şekil 4.27 : Deney alanı-2 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.....	100
Şekil 4.28 : Deney alanı-3 genel yerleşim planı.	99
Şekil 4.29 : Deney alanı-3 ön-CPT sonucu.....	102
Şekil 4.30 : Deney alanı-3 art-CPT sonuçları.	104
Şekil 4.31 : Deney alanı-3 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.....	105
Şekil 4.32 : Deney alanı-4 genel yerleşim planı.	106
Şekil 4.33 : Deney alanı-4 ön-CPT sonucu.....	107
Şekil 4.34 : Deney alanı-4 art-CPT sonuçları.	109
Şekil 4.35 : Deney alanı-4 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.....	110
Şekil 4.36 : Deney alanı-5 genel yerleşim planı.	111
Şekil 4.37 : Deney alanı-5 ön-CPT sonucu.....	112
Şekil 4.38 : Deney alanı-5 art-CPT sonuçları.	114
Şekil 4.39 : Deney alanı-5 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.....	115
Şekil 4.40 : Deney alanı-6 genel yerleşim planı.	116

Şekil 4.41 : Deney alanı-6 ön-CPT sonucu.	117
Şekil 4.42 : Deney alanı-6 art-CPT sonuçları.	119
Şekil 4.43 : Deney alanı-6 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.	120
Şekil 4.44 : Deney alanı-7 genel yerleşim planı.	121
Şekil 4.45 : Deney alanı-7 ön-CPT ve art-CPT sonuçları.	122
Şekil 4.46 : Deney alanı-7 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.	123
Şekil 4.47 : İdealize zemin profili.	126
Şekil 4.48 : Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından hesaplanan nihai oturma.	127
Şekil 4.49 : Sıvılaşma değerlendirmesi.	128
Şekil 4.50 : Uygulanan sıkıştırma enerji ile kum miktarı arasındaki ilişki.	130
Şekil 4.51 : Yerleşim alanı ile Δq_c arasındaki ilişki.	131
Şekil 4.52 : Yerleşim aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki.	132
Şekil 4.53 : Yerleşim alanı ile art-qc arasındaki ilişki.	133
Şekil 4.54 : Yerleşim alanı ile art-qc arasındaki ilişki.	134
Şekil 4.55 : Yerleşim aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki.	135
Şekil 4.56 : Vibro kompaksiyon süresi ile Δq_c arasındaki ilişki.	136
Şekil 4.57 : En derin bölge için idealize zemin profili.	137
Şekil 4.58 : Yatay deplasman u_x	137
Şekil 4.59 : Yatay deplasman u_y	138
Şekil 4.60 : Çelik çakma kazıklarda meydana gelen yatay deplasman (u_x).	138
Şekil 4.61 : Sistemin toptan göçmeye karşı güvenlik tahkiki.	139
Şekil 4.62 : TA-4 art-CPT noktası (40 günlük).	140
Şekil 4.63 : TA-3, 40 günlük CPT sonuçları.	141



DERİN VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİNİN ENERJİ TABANLI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Hidrolik dolgular genellikle havaalanları, limanlar, endüstriyel tesisler ve yollar gibi büyük altyapı projeleri için arazi oluşturmak veya geri kazanmak için kullanılır. Hidrolik dolgu malzemesinin kalitesi ve yapım yöntemi, nihai durumda oluşturulacak ıslah alanının kalitesi ve mühendislik özellikleri için büyük önem taşımaktadır. Vibro kompaksiyon uygulamalarında, doğru dolgu malzemesinin seçimi ve uygun parametreler kullanılarak yapılan sıkıştırma ile proje kriterleri yeterli biçimde karşılanabilmektedir. Kohezyonsuz (ince dane oranı $< \%15$) zeminlerin mukavemet ve deformasyon parametrelerinin yetersiz kaldığı durumlarda, vibro kompaksiyon yöntemi hem sığ hem de derin temellere uygulanabilen uygun ve ekonomik bir zemin iyileştirme yöntemidir.

Bu tez çalışması kapsamında, hidrolik kum dolguların vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi ele alınmıştır. Sıvılaşmaya karşı oturma alanı 13.500 m^2 'yi bulan ve toplam yaklaşık 130.000 m^3 gevşek taranmış hidrolik dolgu kumun minimum $\%65$ rölatif sıkılığa kadar vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırıldığı bir projeden oluşmaktadır. Araştırmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin başına harcanan enerji miktarı, koni uç direnci, yerleşim aralığı/alanı, pas (geçiş) sayısı ve vibro kompaksiyon uygulama süresi ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki ele alınmış ve sonuçları sunulmuştur. Geoteknik literatüründeki araştırmalar incelendiğinde, vibro kompaksiyon uygulamalarının enerji tabanlı olarak ele alındığı sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bu çalışmada birim zemin başına verilen enerji miktarı ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Elde edilen sonuçların tasarım ve kalite kontrol sürecine önemli katkılar sunacağı planlanmıştır.

Proje sahasında ilk olarak hidrolik kum dolgunun kendi ağırlığı altında meydana gelen yatay yüklerin taşınabilmesi için kombi-duvar sisteminin ön yüzü teşkil edilmiş, daha sonra hidrolik dolgu kum sahaya yerleştirilmiş ve son aşamada, vibro kompaksiyon uygulaması yapılmıştır. Kullanılan hidrolik dolgu malzemesi, dört bölgede yapılan deniz tabanı tarama çalışması ile temin edilmiş ve boru hatları vasıtasıyla dolgu sahasına yerleştirilmiştir. Sahada kullanılan dolgu malzeme kalitesinin değerlendirilmesi için çeşitli laboratuvar ve saha deneyleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Vibro kompaksiyon uygulama parametrelerini belirlenmesi amacıyla tam ölçekli parametre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 7 bölgede gerçekleştirilen deneylerde, 1. ve 2. deney alanlarında vibro kompaksiyon uygulaması farklı yerleşim aralığı kullanılarak tek pas (geçiş) ile, 3., 4., 5., 6. ve 7. deney alanlarında vibro kompaksiyon uygulaması farklı yerleşim aralıkları kullanılarak çift pas (geçiş) ile gerçekleştirilmiştir. TA-1 ve TA-2'de tek pas ile gerçekleştirilen vibro kompaksiyon uygulaması, hedeflenen koni uç direnci ve rölatif sıkılık kriterini sağlayamamıştır. Çift pas prosedürü kullanılarak yapılan uygulamaların tamamı hedef koni uç direnci ve rölatif sıkılık kriterlerini sağlamış ve koni uç direncinde ortalama $\%65$ ile $\%268$

arasında artış elde edilmiştir. Tüm deney alanlarında, vibro kompaksiyon uygulamasından önce ve sonra toplam 16 adet CPT yapılmıştır

Plaxis 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, vibro kompaksiyon uygulamasından sonra hidrolik dolgu tabakasında, 60 kPa yük altında maksimum 2.5 mm oturma hesaplanmıştır. İyileştirmeden sonra, dolgu sahasındaki en kritik kesitin sonlu elemanlar modeli kurularak analizi yapılmıştır. Kombi duvar sisteminde oluşacak maksimum yatay deplasman 4.97 mm olarak hesaplanmıştır. Sistemin toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 3.05 olarak hesaplanmıştır. Vibro kompaksiyon uygulamasından önce ve sonra yapılan CPT sonuçları kullanılarak, hidrolik dolgu kumun sıvılaşma potansiyeli araştırılmıştır. İyileştirmeden önce, 3.50 m ile 8.50 m arasındaki derinlikte sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 1.0'in altında olduğu tespit edilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasından sonra, tüm derinlik boyunca sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı, 1.0'in üzerinde elde edilmiştir.



ENERGY-BASED EVALUATION OF DEEP VIBRO COMPACTION METHOD

SUMMARY

The hydraulic fills are often used to create the reclamation areas for large infrastructure projects; such as airports, seaports, industrial plants, and roads. The quality of a hydraulic fill material and its construction method are having a great importance for the quality and the engineering properties of reclamation area to be created in the final state. The vibro compaction method can adequately meet the project criteria by selecting the appropriate fill material and the compaction with relevant parameters. In cases where the strength and strain parameters of the cohesionless (fine grain < 15%) soils are insufficient, the vibro compaction method is a suitable and economical soil improvement method that can be applied to both shallow and deep foundations.

Within the scope of the thesis, the improvement of a hydraulic sand fill by the vibro-compaction method is discussed. It consists of a case study of a project in which approximately 130,000 m³ of loose dredged hydraulic fill sand material with a seating area of 13,500 m² against the liquefaction was compacted to a minimum of 65% relative density by using the vibro compaction method. In the research, the relationship among the amount of compaction energy consumed per unit volume, the cone tip resistance, the grid spacing/area, number of passes, the vibro compaction production time, and the actual improvement amount with the vibro compaction method is discussed and the results are presented. In terms of the geotechnical literature information, it is seen that there are a limited number of studies in which vibro compaction methods were evaluated on an energy-based basis. Therefore, within the scope of the thesis, the relationship between the amount of energy given per unit of soil volume and the actual amount of improvement has been focused. It is believed that the significant contributions would be made to the design and quality control process.

At the project site, the front side of the combi-wall system was firstly formed in order to carry the horizontal loads under the weight of the hydraulic filling sand, then the hydraulic fill sand material was placed on the site. Finally the vibro compaction application was completed. The hydraulic fill material was supplied by the dredging work carried out in four regions and was placed in the reclamation area via pipelines. In order to evaluate the quality of the fill material used in the site, various laboratory and field tests were carried out and the results were evaluated.

The full-scale parameter tests were carried out to determine the vibro compaction application parameters. The tests were carried out in 7 different regions in total, vibro compaction application in the first and second test areas were performed with a single pass using different grid spacing, and vibro compaction application in the third, fourth, fifth, sixth, and seventh test areas using different grid spacing were performed with a double pass. The vibro compaction application performed with a single pass in TA-1 and TA-2 could not meet the targeted cone tip resistance and relative density criteria. All of the production made using the double pass procedure met the target cone tip

resistance and relative density criteria, and an average increase in the cone tip resistance was obtained between 65% and 268%. A total of 16 CPTs were performed in all test areas before and after the vibro compaction applications.

Using the Plaxis 2D finite element software, a maximum settlement of 2.5 mm was calculated under the 60 kPa loads in the hydraulic fill after the vibro compaction application. The finite element model of the most critical section in the reclamation area was established and analyzed. The maximum horizontal displacement that will occur in the combi wall system is calculated at 4.97 mm. The factor of safety against wholesale collapse is calculated as 3.05 for the system. The liquefaction potential of hydraulic fill sand was investigated by using CPT results before and after vibro compaction application. Before the remediation, the factor of safety against liquefaction at depths between 3.50 m and 8.50 m was determined to be less than 1.0. After vibro compaction application, the factor of safety against liquefaction over the entire depth was obtained above 1.0.



1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliği projelerinde zeminin, üst yapı yüklerini toplam ve farklı oturmalar olmadan güvenle taşıması beklenir. Dünyada yapılaşmanın artması, insan ihtiyaçlarının artması ve çeşitlenmesi nedeniyle sağlam zeminler (ve/veya kayalar) üzerine inşaat yapmak her zaman mümkün olmamaktadır. Zeminin istenen mühendislik özelliklerine sahip olmaması durumunda genelde ya temel sistemi değiştirilir ya da mevcut zemine bir takım mekanik işlemler uygulanarak veya zemine bir takım katkı malzemeleri eklenerek zeminin istenen mühendislik özelliklerine ulaşması sağlanır. Buradaki temel amaç, zemin boşluklarının mekanik ekipmanlar ve yöntemler kullanarak azaltılması veya zeminin içinde bulunan boşlukların çeşitli malzemeler ile doldurularak zeminin şekil değiştirme kabiliyetinin kısıtlanmasıdır. Elverişsiz durumdaki zemini, gelen yükleri taşıyabilecek duruma getirebilmek amacıyla uygulanan bu yöntemlerle, zayıf durumdaki zeminin taşıma gücünün artırılması, toplam ve farklı oturmaların azaltılması amaçlanmaktadır.

Genellikle iyileştirilmesi hedeflenen özellikler arasında şunlar yer alır:

- Oturmaları önlemek için sıkıştırılabilirliğin azaltılması
- Stabilizeyi, taşıma kapasitesini veya dayanıklılığı iyileştirmek için taşıma gücünü artırmak
- Yeraltı suyu akışını kısıtlamak için geçirgenliği azaltmak
- Drenajı sağlamak için geçirgenliği artırmak
- (Deprem kaynaklı) sıvılaşma potansiyelini azaltmak
- Borulanmaya karşı mukavemetinin artırılması

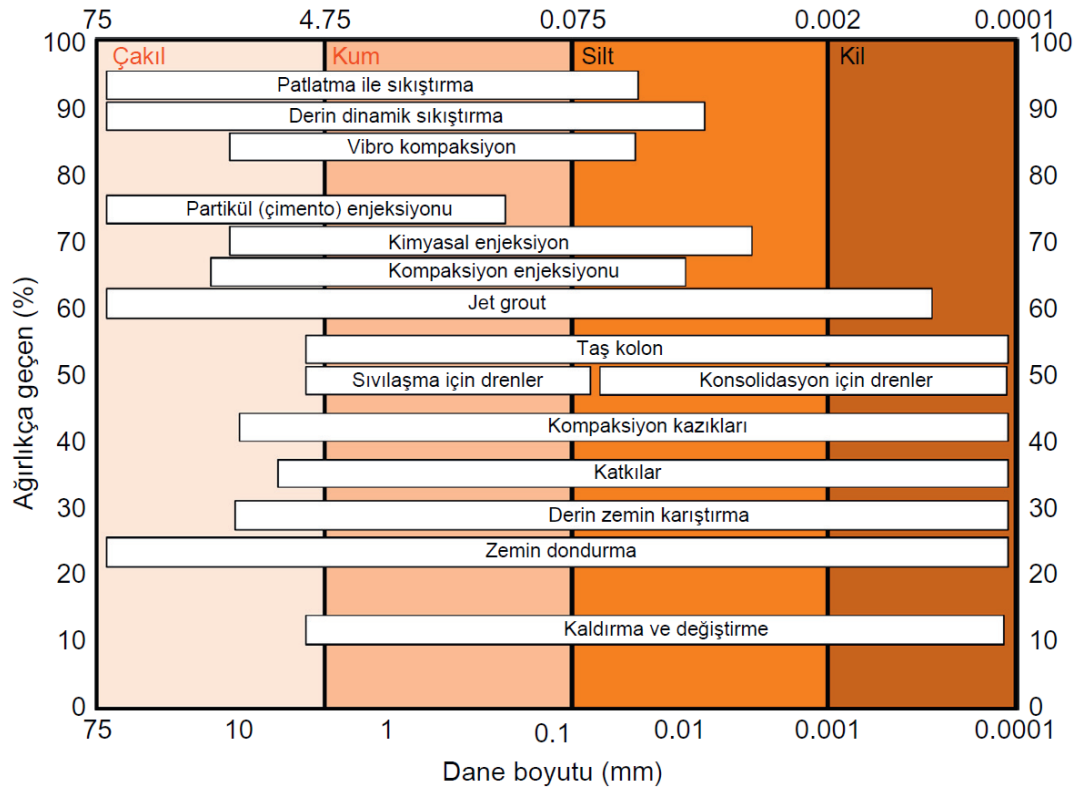
Dünyada en sık kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda sıralanmıştır;

- Kimyasal Enjeksiyon
- Geotekstil ve Geosentetikler ile Güçlendirme
- Patlatma
- Jet Enjeksiyonu
- Kompaksiyon Enjeksiyonu
- Dinamik Kompaksiyon (Ağırlık Düşürme)
- Vibro Kompaksiyon (Vibroflotasyon)

- Derin Karıştırma
- Ön Yükleme
- Kum Kazıklar-Düşey Drenler
- Taş Kolonlar

Geoteknik mühendisliği yönünden problemlili olan zemin türleri için yukarıda sıralanan zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi veya birkaçı birlikte uygulanabilir ancak tüm bu yöntemlerin benzer zemin koşullarında kullanılması mümkün değildir.

Uygun zemin iyileştirme yöntemleri yalnızca belirli zemin türleri ve/veya dane boyutları için geçerlidir. Genel bir fikir vermek adına, (Mitchell, 1981) tarafından önerilen ve (Nicholson, 2004) tarafından geliştirilen, zemin dane boyutuna bağlı olarak, farklı zemin iyileştirme yöntemleri grafiksel olarak Şekil 1.1’de sunulmuştur. Bu basit şekil, zemin iyileştirme yöntemlerinin zemin tipine ve dane boyutuna bağlı olarak uygulanabilirliğini göstermektedir.



Şekil 1.1 : Farklı zemin dane boyutlarına uygulanabilen zemin iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981) Güncelleme:(Nicholson, 2004).

Tasarımcının yukarıda sıralanan yöntemlerden hangisine karar vereceği, zemin koşulları, üst yapı yükleri, projenin bütçesi, ekipman tedarik imkanları ve tecrübe gibi birçok faktöre bağlıdır. Bununla birlikte, gelişen teknoloji ve ihtiyaçlar birlikte yapı ağırlıkları artmakta, elverişsiz zemin koşullarına sahip alanlarda inşaat yapma

zorunluluğu da artmaktadır. Bu da derin temel sistemlerine olan eğilimin artmasına sebebiyet vermektedir. Genellikle aynı projenin derin temel sistemi ile tasarlanması, zemin iyileştirme alternatifine göre çok daha pahalı olmaktadır. Girdi maliyetlerinin yüksek olduğu inşaat projelerinde, derin temel sistemleri seçilmeden önce projeye uygun olan zemin iyileştirme yöntemlerinden biri veya birkaçı bir arada kullanılarak yüzeysel temel imkânı değerlendirildiğinde maliyetlerde ciddi tasarruf yapılabildiği görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında, hidrolik kum dolguların vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi ele alınacaktır. Sıvılaşmaya karşı oturma alanı 13.500 m^2 'yi bulan ve toplam yaklaşık 130.000 m^3 gevşek taranmış hidrolik dolgu kumun minimum %65 rölatif sıkılığa kadar vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırıldığı bir projesinin vaka çalışmasından oluşmaktadır. Çalışmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin hacmi başına harcanan enerji miktarı, koni uç direnci, yerleşim aralığı/alanı, pas(geçiş) sayısı ve vibro kompaksiyon süresi ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki ele alınmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Projede izlenen kalite kontrol programı, deniz tabanı tarama çalışmaları, hidrolik dolgu kumun özellikleri; proje sahasında çelik çakma boru kazıklar üzerinde gerçekleştirilen PDA/DLT deneyleri ve vibro kompaksiyon çalışmalarının detayları hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır. Çalışmada hidrolik dolgu kumun iyileştirilmeden önceki mühendislik özellikleri CPT ve laboratuvar deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Hidrolik dolgu kumun fiziksel özellikleri ve iyileştirme çalışmalarının detayları sunulmakta ve kalite kontrol deneylerinin sonuçları tartışılmıştır. Hidrolik dolgunun özellikleri yapılan elek analizi sonuçlarına göre incelenmiş olup seçilen sıkıştırma yöntemine uygunluğu araştırılmıştır. Tam ölçekli saha deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak geri analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

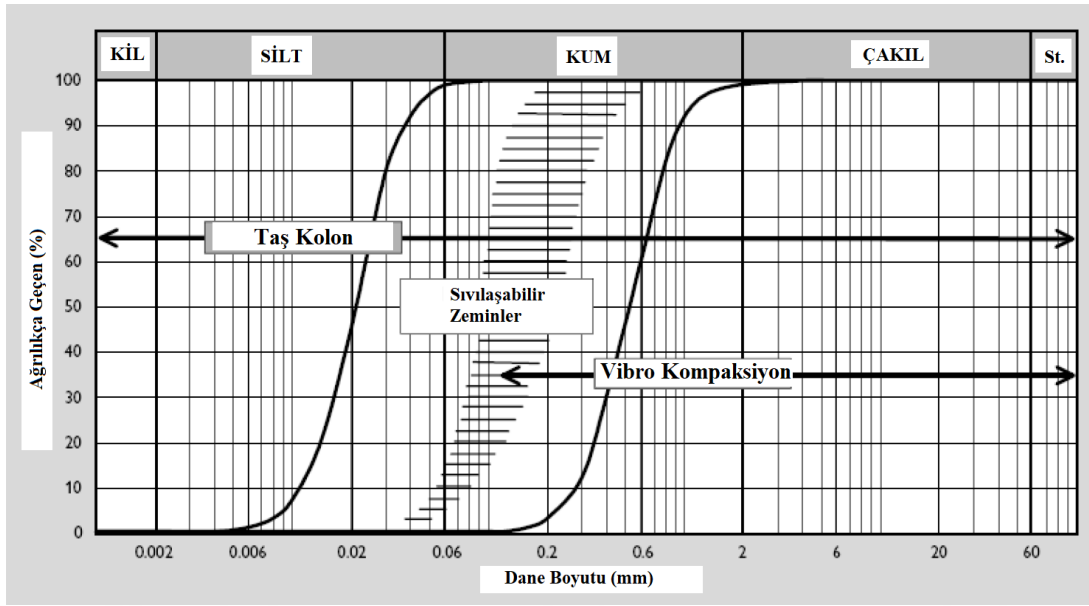


2. VİBRATÖRLÜ ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

2.1 Genel

Yaklaşık 70 yılı aşkın süredir kullanılan vibratörlü sıkıştırma yöntemleri gerek ekonomik gerekse de uygulama kolaylığı nedeniyle günümüzde en çok kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri arasında yer almaktadır. Vibratörlü zemin iyileştirme yöntemlerinde özellikle aşırı yük mertebelerine ulaşmayan alanlarda, örneğin liman dolgularında, karayolu ve demiryolu dolgularında, tank çitlikleri, hava alanları gibi yapılarda, gerek genel stabilizenin sağlanabilmesi gerekse de toplam ve farklı oturumların ve oturma sürelerinin kontrol altına alınabilmesi için kullanılan en yaygın ve uygun yöntemlerdir (Erol ve diğ, 2016).

Vibratörlü zemin iyileştirme sistemleri, kullanılan metodoloji ve ekipmanlar benzer olsa da zemin türüne göre iki kategoride değerlendirilir; Kohezyonsuz zeminlerde: Vibro kompaksiyon ve kohezyolu zeminlerde: Taş kolonlar (Vibro-yerdeğiştirme) (Erol ve diğ, 2016). Bu iki sistemin tasarım kriterleri ve iyileştirme metotları birbirinden tamamen farklıdır. Vibro kompaksiyon yönteminde zemin bir vibratör (vibroflot) yardımıyla, zeminin rezonans frekansına yakın veya daha yüksek frekansta titreşim dalgaları iletilerek, zeminin sıvılaşması ve danelerin daha sıkı bir formda tekrar bir araya gelmesi sağlanır, böylece tüm zemin kütlesi homojen olarak iyileştirilir. Taş kolon yönteminde ise, zemin içerisine vibratör (vibroflot) yardımıyla oluşturulan boşluğa, mıcır ve çakıl gibi granüler malzeme doldurularak rijit kolonlar oluşturulur, kolonlar arasında kalan zeminde ise kayda değer bir iyileşme olmamaktadır. Şekil 2.1’de vibro-kompaksiyon ve taş kolon yöntemlerini uygulanabildiği zeminlerin gradasyon özellikleri ve sıvılaşmaya duyarlı bant genişliği gösterilmektedir. Taş kolon yöntemi, hemen hemen tüm zeminlerde uygulanabilmektedir. Vibro kompaksiyon yöntemi, kumlu ve çakıllı zeminlerde uygulanabilmesine karşın, yöntemin en verimli kullanılabildiği zemin türleri, ince dane oranı %15’den düşük temiz kumlardır.



Şekil 2.1 : Vibro kompaksiyon ve taş kolon yöntemlerinin uygulanabildiği zeminlerin gradasyon özellikleri (Priebe, 1998).

2.2 Taş Kolon

Taş kolon (Vibro-yer değiştirme) yöntemi (ıslak yöntem), kohezyonlu (silt ve kil) zeminlerde, titreşimli bir vibratörün (vibroflot) yüksek su jeti ve yatay titreşim dalgaları yardımıyla oluşturulan boşluğun içine kırmataş doldurularak rijit kolonlar oluşturulmasıdır. Vibratör, burun ve yan jetlerinden püskürtülen su ve/veya hava yardımıyla zemine sokulur. Titreşim ve su jetinin birleşiminden kaynaklanan aşırı boşluk suyu basıncı ve yüksek ivmelerden kaynaklanan dinamik kararsızlık, zemin direncini azaltır. Bu, vibratörün kendi ağırlığı altında zeminde ilerlemesini sağlar. Hedef derinliğe ulaşıldığında, oluşturulan boşluk aşağıdan yukarıya doğru granüler malzeme ile doldurulur. Vibratör yavaşça, genellikle 50 cm aralıklarla geri çekilirken, çakıl boyutundaki dolgu deliğin yüzeyinden dibine kadar beslenir. Vibratör, tasarlanan ve önceden belirlenmiş bir süre boyunca veya belirli bir güç tüketimine ulaşılan kadar her aralıkta kademeli olarak tutulur. Uygulama bittikten sonra, çalışma platformu kuru sıkıştırma ekipmanları düzeltilir.

Geniş bir alanı ıslah etmek için, taş kolon, genellikle merkezden merkeze 2.50 ila 3.50 m aralığında eşkenar üçgen veya kare yerleşim şeklinde uygulanır. Yerleşim aralığı ve tipi, hedeflenen iyileştirme kriterine, zemin gradasyonuna, vibratör özelliklerine ve uygulama yöntemine bağlıdır (Asalemi, 2006). Tasarım ve ekipman hakkında daha fazla ayrıntı için (Barksdale ve Bachus, 1983), (Greenwood ve Kirsch, 1983),

(Mitchell ve Huber, 1985), (Greenwood, 1991), (Satizabal, 1995), (Baez, 1997), (Kirsch ve Kirsch, 2016), (Kurt, 2013), (Düzceer ve Gokalp, 2002a, 2007, 2009) gibi çok sayıda çalışmaya başvurulabilir.

2.3 Vibro Kompaksiyon

Vibro kompaksiyon (aynı zamanda vibroflotasyon olarak da adlandırılır) yöntemi ince dane oranı %15'den düşük olan temiz kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması için geliştirilmiş bir derin zemin iyileştirme yöntemidir. Yatay titreşim dalgaları oluşturmak için tasarlanmış bir vibratör kullanarak gerçekleştirilir. Yöntem, Steuermann ve Degen tarafından 1934'te Almanya'da geliştirilmiştir (Asalemi, 2006). Gerekli olan ana makine ekipmanları; bir vibratör (vibroflot), uzatma boruları, bir vinç, bir su pompası ve bir hava kompresörüdür. Vibroflot olarak da adlandırılan vibratör, hedef derinliğe kadar zemine sokulur ve daha sonra oluşturulan boşluğa dolgu malzemesi eklenirken yavaşça geri çekilir. Vibratör geri çekilirken, çevredeki zeminin sıkıştırabilmesi için aralıklarla durdurulur. Uygulama yöntemleri ile ilgili detaylar Bölüm 3'de anlatılmaktadır.

Derin zemin iyileştirme yöntemleri arasında yer alan vibro kompaksiyon yöntemi için literatür çalışması yapılmış olup, bu çalışmalardan birkaçı aşağıda özetlenmiştir. İleriki bölümlerde vibro kompaksiyon uygulamalarına genişçe yer verilerek, literatürde yer alan bazı çalışmalara değinilecektir. Literatür araştırması sonucunda çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan vaka çalışmaları Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Özetlenen bu çalışmalardan bazıları bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Mecsi ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada, hidrolik dolgu kumun vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi ele alınmaktadır. 181.000 m² alanı kaplayan toplamda yaklaşık bir milyon metreküp hidrolik dolgu kumu, minimum %70 rölatif sıkılığa kadar vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmiştir. Çalışmada, hidrolik dolgu kumun iyileştirilmeden önceki mühendislik özellikleri CPT sonuçlarına göre belirlenmiştir. Çalışmada, hidrolik dolgu kumun fiziksel özellikleri ve iyileştirme çalışmalarının detayları sunulmakta ve kalite kontrol deneylerinin sonuçları tartışılmaktadır. Proje kapsamında iyileştirme işleminden önce ve sonra detaylı zemin etüt çalışmaları yapılmıştır.

Çizelge 2.1 : Literatürde bildirilen bazı çalışmalar.

No.	Vibratör Tipi	Ort. Derinlik (m)	İnce Dane Oranı (%)	Uygulanan Frekans (Hz)	Uygulama Süresi (Dakika)	Aralık (S), Yerleşim Tipi (m)	Ort. Başlangıç Koni Direnci (MPa)	Ort. Nihai Koni Direnci (MPa)	Ort. Nihai Koni Direnci	Referans
1	Tri Star	11.50	-	20	12	2.30x2.30, Üçgen	4	2	-50%	(Brown, 1989)
	Tri Star	11.50	-	13	14	1.75x1.75, Üçgen	4-5	4-10	100%	
2	-	3.00-12.00	<10	50	-	2.00x2.00 & 3.00x3.00, Üçgen	10	35	350%	(Gokalp, 2006)
3	-	10.00	-	25	12	2.00x2.00, Üçgen	5	15	300%	(Massarsch ve diğ, 2019)
4	Phoenix Machine	10.00-16.00	-	25	6 (dakika/metre)	1.80x1.80-2.10x2.10-2.40x2.40-3.00x3.00, Üçgen	-	-		(Hitchman, 1989)
5	MS100 & MS200	12.00	<15	23-25	-	5.00x5.00, Üçgen	5	20	400%	(Bo ve diğ, 2014)
6	V32 & S300	12.00	<15	23-25	-	3.20x3.20, Üçgen	12	20	167%	
7	MS100 HF	14.00	-	14-16	15	4.20x3.60, Dikdörtgen	5	10	200%	(Massarsch ve Fellenius, 2017)
8	Tri Star	10.00-11.00	<10	25	12	3.50x3.50, Üçgen	5	15	300%	(Massarsch ve diğ, 2020)
9	S-Type	8.00	-	30	-	3.00x3.00, Kare	8	18	225%	(Bałachowski ve Kurek, 2014)
10	MS100	10.00	<10	14-16	15	4.20x3.60, Dikdörtgen 3.30x3.30,	5	10	200%	(Massarsch ve Fellenius, 2002)
11	V23	56.00	-	60	-	4.20x4.20 (11.00 to 18.00 m ²), Kare	2-7	10-25	100%	(Degen, 1997)
12	S700	18.00-	<15	-	-	3.50x3.50, Üçgen	10	35	350%	(De-yong ve diğ, 2019)
13	S700	20.00	<15	-	-	3.75x3.75, Üçgen	10	35	350%	
14	S700		<15	-	-	4.00x4.00, Üçgen	10	35	350%	
15	The Vibro-Wing	20.00	-	20	28	Tekli Nokta	2	8	400%	(Duan ve diğ, 2019)

Hidrolik dolgu kumun özellikleri yapılan elek analizi sonuçlarına göre incelenmiş olup, seçilen sıkıştırma (kompaksiyon) yöntemine uygunluğu araştırılmıştır.

Hidrolik dolgu kumun başlangıç elek analizi sonuçları;

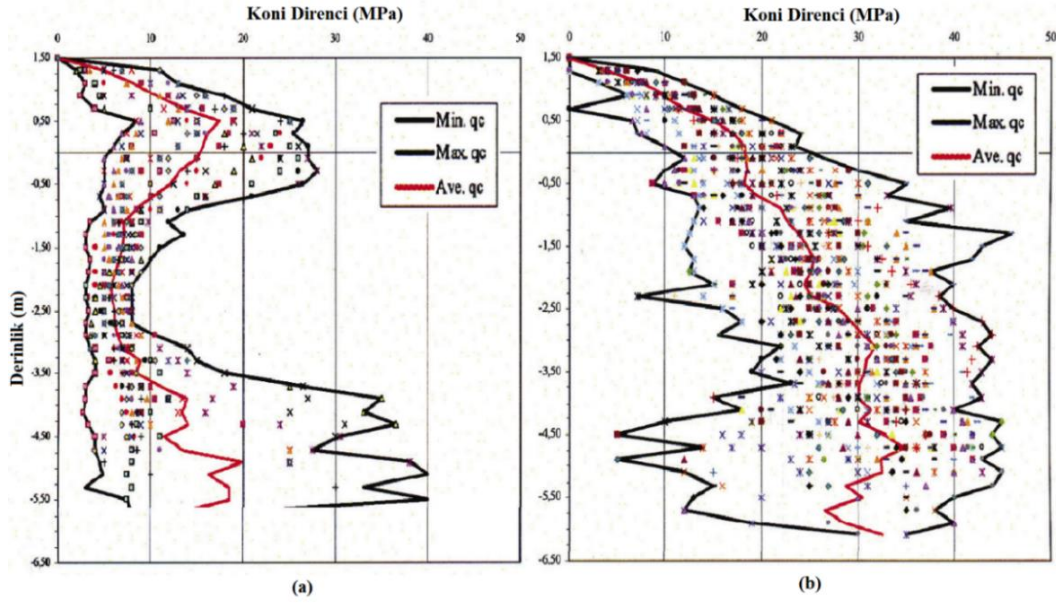
- ASTM 200 numaralı elekten geçen ağırlıkça yüzde: Max. %10,
- ASTM 5" açıklığa sahip elekten geçen ağırlıkça yüzde: %100,
- D50: 0.13 - 0.50 mm olarak belirlenmiştir.

Kalınlığı 3.00 ile 12.00 m arasında değişen hidrolik dolgu tabakları, mevcut deniz taban seviyesinin 1.00 m altına kadar en az %70 rölatif sıkılığa kadar sıkıştırılacak şekilde uygulanmıştır. Uygulamada kullanılan vibroflotun özellikleri;

- Güç=100 kW
- Maksimum çalışma hızı= 3000 rpm (50Hz)
- Maksimum merkezkaç kuvveti= 400 kN

Bu vaka çalışmasında, proje kapsamında yapılan deniz tabanı taraması çalışmaları ve kullanılan hidrolik dolgu kumun özellikleri hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır. Yazarlar, tarama işlerinin yürütülmesi için kesici emişli tarakların kullanıldığını ve taranan malzemelerin yüzer ve kara boru hatları boyunca ıslah alanlarına pompalandığını belirtmektedir. Kum malzemesinin yeterli yerleşimini sağlamak; özellikle siltli ve killi malzemenin ıslah alanlarından akmasına izin vermek için dolgu alanlarının çeşitli noktalarına boru hatları ve su çıkış sistemlerinin nasıl yerleştirildiği anlatılmaktadır.

Vibro kompaksiyon uygulama noktalarının birbirine olan mesafeleri 2.00m ile 3.00m olan eşkenar üçgen yerleşim ile gerçekleştirilmiş ve iyileştirme öncesinde gerçekleştirilen CPT deney sonuçlarına göre hidrolik dolgu kumun elek analizi sonuçlarına bağlı olarak sıkıştırma enerjisi uygulanmıştır. İyileştirme tamamlandıktan sonra aynı bölgede belirlenmiş, toplam 36 CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Hidrolik dolgu kumun derinliği boyunca ortalama koni direncinin, q_c değerinin 12.1 ile 35.1 MPa arasında değiştiği ve ortalama 23.9 MPa değerinde olduğu ve iyileştirilmiş hidrolik dolgu kumun ortalama rölatif sıkılığın belirtilen minimum kriterleri aştığı tespit edilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasından önce ve sonra yapılan CPT deney sonuçları Şekil 2.2'de özetlenmektedir.



Şekil 2.2 : Sıkıştırmadan önceki CPT sonuçları (a), sıkıştırmadan en az 4 gün sonraki CPT sonuçları (b).

Elde edilen sonuçlar;

- Vibro kompaksiyon uygulaması, maksimum 3000 rpm (50Hz) çalışma hızına sahip 100 kW'lık bir titreşimli vibratör ile eşkenar üçgen yerleşim ile gerçekleştirilmiştir.
- Kalite kontrol deney sonuçlarına göre; sıkıştırılmış hidrolik dolgu kumun ortalama rölatif sıkılığının belirtilen minimum rölatif sıkılık olan %70'ı değerini aştığı sonucuna varılmış, aynı zamanda ölçülen rölatif sıkılık değerlerinin benzer zeminler için elde edilen değerlerle uyumlu olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca vibro kompaksiyon yöntemi ile koni direncinin (qc) 1 ila 4 kat artırılabilceği de gözlenmiştir.
- Sıkıştırma enerjisi ve buna karşılık gelen koni direncindeki artış, Δqc farklı zemin türleri için incelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur.

Bo ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada, koni penetrasyon deneylerinin vibro kompaksiyon noktalarında ve vibro kompaksiyon noktalarından çeşitli mesafelerde gerçekleştirildiği bir deney alanında koni penetrasyon deney (CPT) ekipmanı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Çalışmada, uygulama noktasından çeşitli mesafelerde sıkıştırma çalışmalarının etkinliğini doğrulamak için CPT ile saha deneyleri yapılmış ve CPT deneyine dayalı olarak MRC (Müller Rezonans Sıkıştırma) ve vibro kompaksiyon yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır.

Arazi ıslah çalışmaları için granüler kum dolgusu, deniz tabanının taranması ile temin edilmiş ve treyler, emmeli taraklar veya çamur dubaları ile ıslah alanına taşınmıştır. Arazi ıslah çalışmaları için granüler kum dolgusu, yeniden taşıma çukurlarına yerleştirilmiş, kesici emişli taraklar vasıtasıyla veya doğrudan römork emişli taraklardan arazi ıslah sahası içinde biriktirilmiştir.

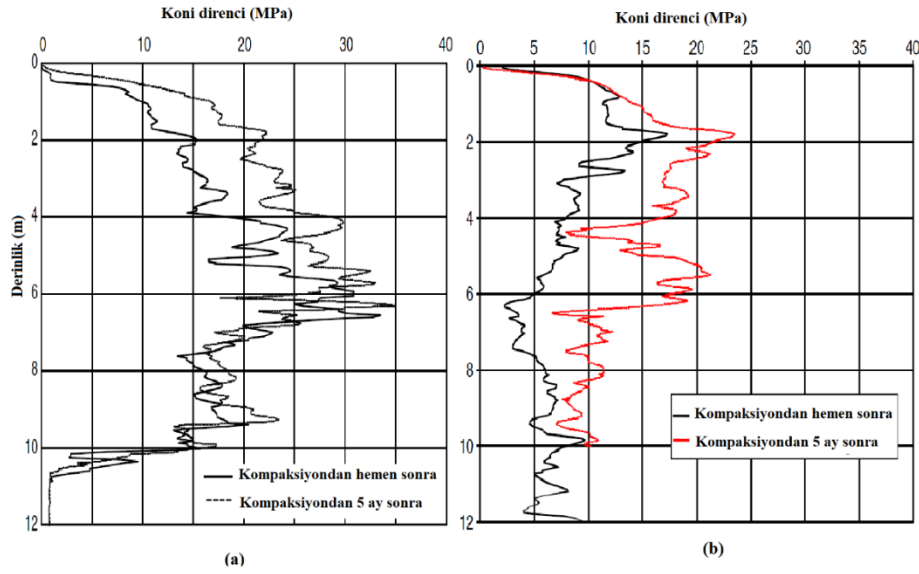
Vibro kompaksiyon işleminden önce yapılan CPT deneyleri, hidrolik dolgu kumun deniz tabanından taranıp proje sahasına hidrolik olarak yerleştirilmesinden dolayı, 5 ile 7 MPa arasında bir uç direncine sahip olduğunu CPT deneyleri ile saptanmıştır. Projede kapsamında hidrolik olarak yerleştirilen zemin, ince dane oranı %10'dan az olan deniz kumlarından belirtilmiştir.

114 hektarlık bir alan, 7.00-10.00 m kalınlıktaki gevşek kum dolgularının derin sıkıştırma yöntemleriyle iyileştirilmiştir. Dinamik sıkıştırma, Müller rezonans sıkıştırma (MRC) ve vibro kompaksiyon olmak üzere iki tür derin sıkıştırma tekniği uygulanmıştır. Sıkıştırma gereksinimlerini karşılamak için, pist alanı için 15 MPa'lık bir koni direnç değeri belirlenmiş ve taksi yolları için sırasıyla %75 ve %70'lik rölatif sıklılırlara eşdeğer olan 15 MPa'lık ve 12 MPa'lık uç dirençleri belirlenmiştir.

Çalışmada, MRC ve vibro kompaksiyon yöntemleri, sıkıştırılan dolgu tabaklarının zamana bağlı olarak iyileşme oranını tespit etmek için iki deney alanında, sıkıştırmadan hemen sonra ve 5 ay sonra yapılan CPT sonuçları şekil 2.3'de sunulmuştur. Grafiklerden görüleceği üzere, MRC yönteminde zamana bağlı olarak belirgin bir iyileşme sağlanamadığı, buna karşılık vibro kompaksiyon yönteminde zamanla belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar;

- MRC yönteminde, yüksek kapasiteli bir vibratör (MS-200) ile daha geniş bir alan iyileştirilebilirken, daha düşük kapasiteli bir vibratör (MS-100) ile daha dar bir alanın iyileştiği sonucuna ulaşılmıştır.
- MRC yönteminde; CPT koni direnci, 1.50-6.00 metre derinliği hariç, tüm derinlik boyunca 10 MPa'dan daha düşük elde edilmiştir. Zemin profilinde yaklaşık 4.00 metre derinlikten sonra, koni direncinin ortalama 15 MPa'ın değerine ulaştığı saptanmıştır.
- Profilin st kısmında (1.50-2.50 m derinlik), MRC (Müller Rezonans Sıkıştırma) tekniğinin negatif tepki verdiği gözlemlenmiştir. Yazarlar bu durumun, bu tabakadaki mevcut sıkı kumun, sıkıştırma sırasında genleşme etkisi ile daha gevşek bir yerleşim düzenine geçtiği sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.3 : MRC yönteminde zamana bağlı iyileşme miktarı (a), Vibro kompaksiyon yönteminde zamana bağlı iyileşme miktarı (b).

- Dolgunun doğal frekansı sıkıştırılmamış durumda yaklaşık 12 Hz olarak bulunmuş, bu sonuca göre, MRC çalışmalarının frekansı 20-25 Hz gibi daha yüksek frekanslara ayarlanarak danelerin arasındaki sürtünme direncinin sıkıştırma sırasında en aza indirilmesi amaçlanmıştır.
- MRC tipi sistem için sıkıştırma derecesi; vibratör kapasitesine, vibratör noktalarının kareajına, sıkıştırma süresine ve uygulanan sıkıştırma enerjisine bağlı olduğu, daha yakın mesafe ile daha iyi zemin sıkıştırması elde edilebileceği açıklanmaktadır. MRC yönteminde, zemin kütlesini homojen bir şekilde sıkıştırdığı ve sondaya olan mesafe ile koni uç direncinin değişiminin önemsiz olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- MRC yöntemiyle yapılan sıkıştırma uygulamasından 5 ay sonra tekrarlanan CPT deneylerinde, tüm derinlik için sıkıştırmadan sonra artık boşluk suyu basıncının dağılması nedeniyle zamanla iyileşme oranının arttığı değerlendirilmiştir. İyileşme oranının zamanla artmasının, kum tabakasının yaklaşık 0-6m'lik derinliği boyunca önemli olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak, bu derinlikteki kum tabakasının, başlangıçta daha gevşek bir durumda olması, daha derinde bulunan daha sert kum birikintilerine kıyasla sıkıştırılmasının daha kolay olması olarak belirtilmektedir.
- Bununla birlikte, hidrolik dolgu tabakanın ilk 6.00 metrelik bölümünde ölçülen beş aylık koni direncinin, MRC yöntemi ile yapılan sıkıştırmadan hemen sonra yapılan CPT deneylerinden elde edilen koni uç dirençlerinden daha düşük

olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni olarak, mukavemet azalması üzerindeki genleşme etkisinin, yaşlanma etkisinden (iyileşme oranının zamanla artması) belirgin şekilde daha baskın olması sonucuna ulaşılmışlardır.

- Yazarlar; Vibro kompaksiyon yöntemi için sıkıştırmanın derecesinin, büyük ölçüde ekipmanın tipine, vibratörlerin aralığına, sıkıştırma süresine ve elde edilen amperin büyüklüğüne bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Uygulama noktalarının birbirine olan mesafelerinin azalmasıyla, tüm zemin kütlesinin sıkışma olasılığının ters orantılı olarak artacağını vurgulamaktadırlar. Karelajın gerekenden daha geniş tutulması durumunda, merkez noktasında bazı gevşek bölgelerin bulunabileceği belirtilmektedir.
- V32 tipi vibratör ile 15 MPa'lık bir koni direnci elde etmek için 2.50-3.00 m'lik eşkenar üçgen karelaj'ın gerekli olduğu belirlenmiştir. 12 MPa'lık bir koni direnci elde etmek için, V32 vibratör ile 3.00 ile 3.20 m'lik eşkenar üçgen karelaj'ın gerekli olduğu saptanmıştır. S300 vibratör için, hedeflenen koni direncine ulaşmak için 2.40 ile 2.60 m arasında üçgen yerleşim aralığının gerekli olduğu belirlenmiştir.
- Vibro kompaksiyon yönteminde yaşlanma etkisinin (iyileşme oranında zamanla meydana gelen artış) MRC yöntemine kıyasla daha dominant olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bunun nedeni olarak, su jeti ile püskürtülen suyun kum daneleri arasındaki boşlukları daha fazla arttırması ve zamanla boşluklardaki suyun azalarak bu bölgedeki kum danelerinin daha sıkı bir formda tekrar yerleşmesi olarak açıklanmaktadır.
- MRC tekniğinde; vibratör tipi, aralığı ve sıkıştırma süresinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, seçilen frekansın da verimli bir sıkıştırma elde etmek için önemli bir faktör olduğu vurgulanmaktadır. Seçilen frekansın, zeminin rezonans frekansına yakın olması gerektiği belirtilmektedir.
- Titreşim dalgalarının, üst dolgu tabakasında bulunan yoğun kum tabakasının gevşemesine neden olduğu, bu nedenle MRC tekniğinin, dolgunun üst tabakasında negatif etki yaptığı belirtilmiştir.

Vibro kompaksiyon yönteminin, bu zemin ıslah projesi için MRC yöntemine kıyasla daha avantajlı bir teknik olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, titreşimli zemin iyileştirme yöntemlerin performansının tamamen projeye özel olduğu ve diğer projeler için geçerli olmadığı vurgulanmaktadır. Çünkü benimsenen titreşim tekniğinin performansının; kumun cinsi, ıslah tekniği, ince dane oranı, dolgudaki deniz

kabuğu içeriği, personel deneyimi, sıkıştırma frekansı ve su jeti gibi çok sayıda faktöre bağlı olduğunun altı çizilmektedir.

Gokalp (2006) tarafından yapılan çalışmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin başına harcanan enerji miktarı, koni uç direnci ve çevre sürtünmesi ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki ele alınmaktadır. Çalışma, sıvılaşmaya karşı toplam yaklaşık bir milyon metreküp gevşek taranmış hidrolik dolgu kumun vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırıldığı bir zemin iyileştirme projesinin vaka çalışmasından oluşmaktadır. Projede izlenen kalite kontrol programı da dâhil olmak üzere, deniz tabanı tarama çalışmaları, hidrolik dolgu kumun özellikleri ve vibro kompaksiyon çalışmalarının uygulama detayları hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır.

Tarama işleri kapsamında, 1998-99 yıllarında yapılan vibrocore ve koni penetrasyon deney sonuçlarına göre taranan kumlu malzemelerin projede hidrolik dolgu malzemesi olarak kullanılması kabul edilmiş ve onaylanmıştır. Taranan malzemeler, yüzer ve kara tabanlı boru hatları boyunca ıslah alanlarına pompalanmıştır. Uygun olmayan ve fazla malzemeyi taramak ve açık denize boşaltmak için Emme Hazneli Tarak Gemisi kullanılmıştır.

Zemin inceleme programı kapsamında; önerilen sahada 13 koni penetrasyon deneyi (CPT), 65 adet derinlikleri 28 ile 100 m arasında değişen standart penetrasyon deneyleri (SPT) ve su altı zemin örnekleme, 20 adet vibrocore deneyinden oluşmaktadır. Hidrolik dolgu kumun özellikleri aşağıdaki özetlenmektedir;

Ağırlıkça ASTM elek no. 200 elekten geçen malzeme maksimum %10;

5" açıklığa sahip ASTM eleğinden geçen ağırlıkça yüzde: %100;

D50: 0.13 – 0.50 mm

ASTM E-11'e göre elek analiz deneyleri, her 20.000 m³ hidrolik dolgu kumu için beş numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elek analizinin sonuçlarına göre; dolgunun, kötü derecelenmiş kum (SP) olduğunu belirlenmiştir. Dolgu malzemesinin ortalama üniformluk katsayısı, Cu ve süreklilik katsayısı, Cc'nin sırasıyla 2.70 ile 4.30 ve 0.52 ile 1.20 arasında değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir.

Hidrolik dolgu kumun vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmasının uygunluğunu saptamak için (Brown, 1977) tarafından önerilen yaklaşım kullanılarak ve uygunluk sayısının (S_N) 11.7 ile 23.8 arasında değişmekte olduğu ve ortalama 19.5 olduğu belirlenmiştir.

Deney alanında yapılacak vibro kompaksiyon çalışmaları için maksimum 3000 rpm (50Hz) çalışma hızına ve 400 kN maksimum merkezkaç kuvvetine sahip 100 kW'lık bir titreşimli vibratör seçilmiştir. Sıkıştırma uygulaması, 2.50 metrelik üçgen karelej yerleşimi şeklinde uygulanmıştır.

Deney alanında, iyileştirmeden sonra iki set üç CPT yapılmıştır. CPT noktaları; biri eşkenar üçgen karelajın ortasında, biri ortasında ve biri üçgen karelej kenarlarının dörtte birinde olacak şekilde, vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 4 gün sonra gerçekleştirilmiştir.

Projede izlenen kalite kontrol programı kapsamında, birincil kalite kontrol olarak yöntemi olarak, boşluk suyu basıncı ölçümü (CPT) ile birlikte statik koni penetrasyon deneyi kullanılmıştır. Her bir CPT deneyinin belirtilen sıkıştırma kriterlerine uygunluğu doğrulamak için her 1.600 m² iyileştirilmiş alan için bir adet olacak şekilde uygulanmıştır. Bu nedenle, toplam 114 adet CPT yapılmıştır.

Vibro kompaksiyon sonrasında zemin özelliklerinde meydana gelen değişim değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre koni uç direncinde anlamlı artışlar olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, toplam ve ortalama uygulanan sıkıştırma enerjisi, toplam sıkıştırma süresi, sıkıştırma öncesi ve sonrası ortalama koni uç direnci değerleri birlikte sunulmaktadır. Koni uç dirençlerinde %50 ile %280 arasında artışlar belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan vibro kompaksiyon uygulamasından elde edilen sonuçlar Çizelge 2.2'de özetlenmektedir.

Çizelge 2.2 : Vibro kompaksiyon uygulamasının özeti (çakıllı kum dolgu).

Alan	Toplam Uygulanan Enerji (kJoule)	Ortalama Uygulanan Enerji (kJoule/m)	Toplam Süre (dakika)	Ortalama Uç Direnci Önce (MPa)	Ortalama Uç Direnci Sonra (MPa)	Δq_c (%)
1	17 055	1.915	8.6	17.5	26.1	50
2	26 552	3.190	13.9	12.1	23.7	95
3	17 408	1.910	11.3	6.4	24.6	280

Koni uç direncindeki artışa karşı uygulanan kümülatif sıkıştırma enerjisi, silt, kum ve çakıllı kum olmak üzere üç zemin türü için Çizelge 2.3'de özetlenmektedir.

Çizelge 2.3 : CPT'lerden elde edilen koni uç dirençlerindeki artış ve buna karşılık gelen kümülatif sıkıştırma enerjisi.

Zemin Tipi	Uygulanan Enerjisi (kW/m)	Ortalama Uç Direnci Önce (MPa)	Ortalama Uç Direnci Sonra (MPa)	Δq_c (MPa)	Δq_c (%)
Silt	31.7 -33.0	1.0- 1.9	9.5 -20.2	9.2 - 18.8	450-1500
Kum	28.8 -39.5	4.8-11.0	11.2 -40.7	6.5 - 33.9	70 - 555
Çakıllı Kum	28.4-44.3	6.6 - 23.4	17.9-35.0	3.76-22.3	17 -275

Elde Edilen Bulgular;

- Min. Sıkıştırma enerjisi ile vibro kompaksiyon uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiştir. Metre başına 750 kJoule; maksimum çalışma hızı 3000 rpm (50 Hz) ve karşılık gelen maksimum merkezkaç kuvveti 400 kN olan 100 kW'lık bir vibroflot ile uygulanmıştır.
- Kalite kontrol sonuçlarına göre; sıkıştırılmış hidrolik dolgu kumun ortalama rölatif sıkılığının belirtilen minimum rölatif sıkılık olan %70 değerini aştığı sonucuna varılmış, aynı zamanda ölçülen sıkılık değerlerinin literatürde elde edilen değerlerle uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca koni direncinin (q_c) 1 ile 4 arasında bir faktör kadar artırılabilceği de saptanmıştır.
- Sıkıştırma sürecinin ince silt ve kil tabakalarından bile olumsuz etkileyebileceği vurgulanmaktadır. Bu nedenle, zemin tabakalanmasının tam olarak tespit edilebilmesi için CPT dâhil detaylı bir zemin araştırması yapılması tavsiye edilmektedir.
- Tarama çalışmaları farklı tip taraklarla yapıldığından ve taranan malzemenin yerleştirilmesi için kullanılan yöntemlerin de farklı olmasından dolayı hidrolik dolgu kumun homojen bir yerleşime sahip olmadığı belirtilmektedir.

Massarsch ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada yazarlar; titreşimli sıkıştırmanın kumlu bir dolgu tabakası üzerindeki etkisini, farklı türde arazi deney yöntemleri kullanılarak incelemişlerdir. Yazarlar, vibro kompaksiyon uygulamasından sonra farklı zaman aralıklarında zemin kayma mukavemeti ve yatay toprak basıncındaki değişikliği belirlemeyi amaçlamışlardır. Farklı arazi deney yöntemleriyle ölçülen yatay toprak basıncının, titreşimli sıkıştırmaya bağlı olarak önemli ve kalıcı bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Sıkıştırılmış kumun aşırı konsolidasyon oranı, farklı

yöntemler kullanılarak, yatay toprak basıncındaki artışa dayalı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tanjant modülü yönteminin, zemin mukavemeti ve aşırı konsolidasyon oranındaki artış dikkate alınarak, sıkıştırılmış zeminin oturmasını değerlendirmek için güçlü bir yöntem olduğu vurgulanarak, arazi deneylerinden türetilen modüllerin, literatürde bildirilen verilerle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Yazarlar, yatay toprak basıncındaki artışları doğrudan veya dolaylı olarak ölçebilen farklı arazi deneylerinin sonuçlarını tartışmaktadır. Çalışmada, iyileştirmeden sonra farklı zaman aralıklarında titreşimli sıkıştırmanın zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerine ve özellikle sıkıştırmayı takiben yatay toprak basıncındaki değişime odaklanmaktadır.

Vaka çalışması, sıvılaşmaya duyarlı bir sahada titreşimli sıkıştırmanın etkisini incelemek için birbirine paralel birkaç saha deneyi kullanılması açısından diğer vaka çalışmalarından ayrılmaktadır. Titreşimli sıkıştırma özel bir yöntemle (rezonans sıkıştırma) gerçekleştirilmesine rağmen, araştırmalardan elde edilen sonuçların genel geçerliliğe sahip olduğuna ve diğer sıkıştırma yöntemlerine uygulanabilir olduğuna vurgu yapılmaktadır. Çalışmanın, aşağıdaki arazi deneylerinin sonuçlarını karşılaştırmak için önemli bir fırsat sunduğu belirtilmektedir: (1) standart penetrasyon deneyi (SPT), (2) boşluk suyu basınç ölçümü (CPT) ile koni penetrasyon deneyi, (3) dilatometre deneyi (DMT) ve (4) yanal gerilim koni deneyi (LSCPT). Projenin yürütülmesi sırasında (1988), bu arazi yöntemlerinin birçoğunun hem ekipman hem de deney yürütme açısından yeni olduğu ve deney verilerinin yorumlanmasıyla ilgili bilginin hala sınırlı olduğunun altı çizilmektedir. Bununla birlikte yazarlar, 30 yıllık deneyimin sağladığı avantajla, titreşimli sıkıştırmanın etkileri ve özellikle yatay gerilmedeki değişiklikler hakkında yeni bilgiler elde edilebileceğini belirtmektedirler. Vaka çalışmasına konu olan proje, Kanada, British Columbia'daki Annacis Channel yakınlarında bir üretim depolama binası ve bir filo bakım binasının inşasını içermektedir. Zemin iyileştirme çalışması Şubat 1988'de gerçekleştirilmiş ve kum tabakasının 11 m derinliğe kadar sıkıştırılmasını gerektiği tespit edilmiştir. Güçlü bir depremde zeminin sıvılaşma potansiyeli nedeniyle, yazarlar bu bölgedeki binaların büyük hasar görebileceğini değerlendirmiştir. Böylece, Fraser Nehri'ne doğru eğimli alanın yatay yüklere karşı stabilizesini artırmak için şantiye ve Annacis Kanalı arasındaki 230 m uzunluğunda, 3.00 ila 4.50 m genişliğindeki bir alan, vibro kompaksiyon ile iyileştirilmiştir.

Vibro kompaksiyonun (rezonans sıkıştırma yöntemi) doğal bir zemin birikintisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Zemin birikintisi, yaklaşık 6.00 ile 10.00 m derinliklerdeki kumdan oluşmakta ve derinlik boyunca yer yer, siltli ve killi kum tabalarından oluşmaktadır. Rezonans sıkıştırmanın ilk aşamasında, vibratörü çevreleyen zeminin sıvılaştığı gözlemlenmiş ve yer yüzeyine yeraltı suyu çıkışı gözlemlendiği belirtilmektedir.

Farklı tipte arazi deneyleri (SPT, CPT, DMT ve LSCPT) yapılmıştır. Titreşimli sıkıştırmanın bir sonucu olarak, ölçülen tüm zemin parametreleri (koni uç direnci, çevre sürtünmesi, yatay gerilme indisi) arttığı saptanmıştır. Bu çalışmanın önemli bir yönü; koni gerilmesindeki beklenen artışa ek olarak, titreşimli sıkıştırmanın (ek malzeme eklenmeden) yatay gerilme üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Çevre sürtünmesi (CPT), yatay gerilme (LSCPT) ve yatay gerilim indeksi (DMT) ölçümleri, sıkıştırma sonucunda önemli bir artış olduğunu göstermektedir.

Bir titreşimli sıkıştırma yönteminin (rezonans sıkıştırma) sonuçları çalışılmış olsa da, sıkıştırma etkisinin tüm titreşimli sıkıştırma yöntemleri için büyük ölçüde aynı olduğuna vurgulanmıştır; zemin sıkıştırılır ve aşırı konsolide hale gelir ve sonuç olarak yatay gerilmeler artar.

Massarsch ve Fellenius (2017) tarafından yapılan çalışmada yazarlar, Rezonans sıkıştırma yöntemi ile 14.00 m kalınlığında kum dolgusunun sıkıştırıldığı bir vaka çalışmasını ele almaktadır. Rezonans sıkıştırma yönteminin (ekipman ve yöntem) yürütülmesi ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Bu yöntemde, vibratör, kütlesini en aza indirmek için büyük açıklıklara sahip, amaca yönelik olarak tasarlanmış bir vibratörün üzerine monte edilmiştir. Burada vibratör kütlesini azaltarak, sıkıştırma verimliliğini arttırmak amaçlanmıştır.

Vibratör-sonda-zemin sistemi, sistem frekansında çalıştırıldığında ortaya çıkan titreşim amplifikasyonunun etkisi ile sıkıştırma etkinliğini arttıracak ve sıkıştırma süresini önemli ölçüde azaltacak belirtilmiştir. Yazarlar, oturma ölçümleri ve koni penetrasyon deneyleri (CPT) açısından sıkıştırmanın etkisinin ölçüldüğü saha deneylerinin sonuçları sunarak yöntemin etkinliği ispatlanmayı amaçlamışlardır. Koni direnci ve çevre sürtünmesindeki artış, sıkıştırmanın ardından 2 gün ve 7 gün sonra ölçülmüş ve sonuçları sunulmuştur. Derin titreşimli sıkıştırmanın önemli bir yönü olarak, yatay toprak basıncında kalıcı bir artış ve sıkıştırma sonrasında çevre sürtünmesindeki artış olarak belirtilmektedir. CPT deney sonuçlarına göre; oturma analizleri için gerekli olan modül sayısı ve ön konsolidasyon gerilmesi, tanjant modül

yöntemine göre belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar sunularak yöntemin etkinliği değerlendirilmiştir.

López-Querol ve diğ. (2014) tarafından bildirilen çalışmada, kumlu zeminlerde uygulanan vibratörlü zemin iyileştirme yönteminin optimize edilmiş bir tasarımını elde etmeye yardımcı olması için sayısal bir model sunulmaktadır. Cuéllar (1977) tarafından geliştirilen endokronik tabanlı yoğunluk yasası, eksenel simetriye sahip problemler için formüle edilmiş bir sonlu elemanlar yazılımında uygulanmıştır.

Bu çalışmada tek bir delik ve etrafındaki zemin modellenmiştir. Simetri eksen, farklı derinliklerde anlık titreşimlerin olabileceği deliğe yerleştirilmiştir. Gerilme dalgalarının, inceleme alanına gerçekçi olmayan yansımaları önlemek amacıyla, sayısal alanın sınırlarını belirleyen ancak gerçek saha durumlarında zeminle çevrili olan sınır koşulları oluşturulmuştur. Problem eksenel simetriyi temsil etmek için silindirik koordinatlarda formüle edilmiş, sonlu eleman kodu, daha önce depremlerden sonra kumlu zeminlerin yerleşimlerini yeniden oluşturmak için başarıyla kullanılan bir genelleştirilmiş sıkıştırma bünye denklemi ile oluşturulmuştur.

Bu araştırmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Kullanılan bünye denklemi yalnızca depremler için değil, aynı zamanda bu özel zemin iyileştirme tekniğinde, indüklenen titreşimler gibi daha yüksek frekanslı yüklemeler için de geçerli olduğu belirtilmiştir. Elde edilen sonuçların hem laboratuvarında hem de sahada yapılan vaka çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir.
- Birbirine 3.00 ile 4.00 m mesafede olan delikler arasında çok küçük bir sıkışma olduğu tespit edilmiştir. Boşluklar arasındaki mesafe daha yakın hale geldikçe sıkışma miktarında daha fazla artış olacağı tespit edilmiştir.
- Kum zeminde ortalama %75 rölatif sıkılık elde etmek için optimal olarak, 1.30-1.50 m aralığında pratik bir yatay mesafenin gerekli olduğu saptanmıştır.

Massarsch ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, rezonans sıkıştırma yöntemi kullanılarak granüller zeminlerin titreşimli sıkıştırılması ele alınmıştır. Rezonans sıkıştırma yönteminin uygulandığı bu vaka çalışmasında, killi silt tabakasının sıkıştırma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Titreşimli sıkıştırma sırasında, yer yüzeyine yayılan su ile gözlenen sıkıştırma sondasına bitişik zeminin sıvılaştığı gözlemlenmiştir. Titreşim ölçümleri kullanılarak sıvılaşma nedeniyle kayma mukavemetindeki kayıp somutlaştırılmaya çalışılmıştır.

Koni penetrasyon deneyleri, sıkıştırmadan önce ve birkaç hafta sonra gerçekleştirilmiş ve koni uç direnci ve ayrıca çevre sürtünmesinde önemli bir artışlar gözlemlenmiştir. Bu çalışmada Rezonans sıkıştırma yöntemi, doğal durumdaki kumun üzerinde bulunan 3.00 m kalınlığında bir killi silt tabakasını örten, granüller yüzeysel dolgu tabakasından oluşan bir çökeltiyi iyileştirmek için uygulanmıştır. Yeraltı su seviyesi, yer yüzeyinin yaklaşık 2.00 m altında tespit edilmiştir. Rezonans sıkıştırma, 12.00 m uzunluğunda bir Tri-Star vibratör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma frekansı yaklaşık 13 Hz olarak uygulanmıştır. Rezonans sıkıştırma sırasında, sıkıştırma sondasını çevreleyen zemin kütlesinin sıvılaşması sağlanmış ve zemin danelerinin daha sıkı bir formda tekrar bir araya gelmesi sağlanmıştır.

Yazarlar, titreşim ölçümlerinin, sıvılaştırma sürecini ve kademeli olarak yeniden konsolidasyonu doğruladığını belirtmektedirler. Sıkıştırma etkisi, sıkıştırmadan önce, 67 ve 82 gün sonra SPT ve CPT ölçümleriyle araştırılmıştır. Koni uç dirençlerinde 2 ila 5 kat arasında artış elde edilmiştir. Bununla birlikte, yatay toprak basıncındaki değişiklikleri yansıtan uç direncinde de aynı derecede artışlar gerçekleştiği tespit edilmiştir. Düşük geçirgenliğe sahip tabakaların sıvılaşma üzerindeki etkisini, genellikle homojen zemin tabakaları varsayan geleneksel tasarım prosedürleri ile değerlendirmenin zor olduğu vurgulanmaktadır.

Düşük geçirgenliğe sahip zemin tabakaları, düşük geçirgenlik tabakası arasına sıkıştırılmış gevşek ve orta sıkılıktaki kum tabakalarında aşırı boşluk suyunun gelişimini etkilediği belirtilmektedir. Rezonans sıkıştırma yönteminin, tabakalı zeminlerin sıvılaşma potansiyelini araştırmak için tam ölçekli bir deney yöntemi olarak kullanma potansiyeline sahip olduğu belirtilmektedir. Sıvılaşmanın, düşük geçirgenliğe sahip tabakalar arasına sıkıştırılmış gevşek kum tabakalarının drenaj koşulları tarafından yüksek derecede kontrol edilebileceği vurgulanmaktadır. Sıkıştırılmamış zeminde rezonans deneyleri gerçekleştirerek ve zeminin titreşim tepkisini, titreşimli uygulamadan sonraki titreşim dalgaları ile karşılaştırılarak, gerçekleştirilebileceği açıklanmıştır. Böyle bir yaklaşımın, yalnızca SPT ve CPT verilerine dayanan deneysel sıvılaştırma analizlerine değerli bilgiler katacağı vurgulanmaktadır.

Balachowski ve Kurek (2014), tarafından yapılan çalışmada, Gdynia Limanı yakınında bir dizi bina inşaatına ait zemin iyileştirme çalışmaları ve izlenen kalite kontrol programının detayları anlatılmaktadır. Yapı temellerini altında yer alan, heterojen zemin koşulları bazı çamur bantları ve değişken kalınlıktaki kum dolguları içeren

Holosen kumunun, istenen mühendislik özelliklerine ulaşabilmesi için iyileştirilmesine karar verilmiştir. Tam doymuş koşullarda titreşimin etkisi altında, gevşek kum parçacıklarının, zemin kütleindeki yatay gerilmenin eşzamanlı artışıyla birlikte daha sıkı bir duruma gelmesi amaçlanmıştır.

Yeraltı su seviyesi, yer yüzeyinin yaklaşık 1.00 m altında tespit edilmiştir. Yüzeysel tabakların bazı kısımları hidrolik olarak yerleştirilmiş dolgulardan oluşmaktadır. Yer yüzeyinin yakınında bulunan sıkı kum tabakasının altında, silt veya çamur görünümüne sahip orta sıkı ile gevşek durumda bir kum tabakası bulunduğu belirtilmektedir. Gevşek durumdaki kumlu dolgu tabakası vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmiştir. 120 kW güce, 30 Hz frekansa ve yaklaşık 20 mm titreşim genliğine sahip S-tipi vibratör kullanılmıştır.

İyileştirme süreci boyunca platform kotunun sabit tutulması için, çalışma alanı granüller dolgu malzemesi ile sürekli olarak beslenmiştir. Sıkıştırma, 3.00×3.00 m kare yerleşim düzeni ile gerçekleştirilmiştir. Vibratör yerleştirme ve ardışık sıkıştırma aşamaları sırasında ne su ne de hava kullanılmıştır. Sıkıştırılan alan yaklaşık olarak 7000 m^2 dir.

Çalışmalar sırasında tipik parametreler kaydedilmiştir ve detayları anlatılmıştır. Zeminin titreşimli sıkışmasına bağlı olarak zemin yüzeyinde oturmalar gözlemlenmiş, sıkıştırılmış alan içinde 44 cm'ye kadar yüzeysel oturmalar ölçülmüştür. Dolgu malzemesi tüketimi, titreşimli sıkıştırmanın her noktasında izlenerek kaydedilmiştir. İyileştirme sırasında güç kullanımı kaydedilerek, her bir titreşimli sıkıştırma profiline kaydedilmiştir. Kabul kriteri olarak, iyileştirmeden sonra, Odometrik deformasyon modülü kullanılmış ve 80 MPA olarak belirlenmiştir.

Kalite kontrol programı kapsamında, iyileştirmeden önce ve sonra CPT ve DMT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kontrol deneyleri, çalışmaların tamamlanmasından 3 haftayı aşkın bir süre sonra vibro kompaksiyon noktalarının ortasında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, vibro kompaksiyon'dan önce ve sonra zemin özelliklerini karşılaştırmak yapılmıştır.

Elde edilen bulgular;

Sıkıştırılmış kumlu zeminde koni direnci, yanıl gerilme indisi I_c ve dilatometre modülünde önemli artışlar gözlemlenmiştir. İyileştirilmiş kumdaki koni direncinde ortalama 2.5 kat artış olduğu tespit edilmiştir. Sıkıştırılmış kumda, dilatometre modülünün, sıkıştırılmamış kuma göre 7 kat daha yüksek olduğu ölçülmüştür.

Marjinal olarak sıkıştırılabilen veya sıkıştırılmamış tabakaların CPT ve DMT ile kolayca tespit edilebileceği vurgulanmaktadır. Sınıflandırma çizelgeleri ve zemin tipi davranış indisi I_c kullanılarak zemin türü, zemin iyileştirmesinde daha iyi, daha kapsamlı ve normalleştirilmiş bir yaklaşım sağlayacağı önerilmektedir. Debats ve Scharff (2009) tarafından önerilen prosedürün başarıyla test edildiği belirtilmektedir. Burada, zeminin özellikleri ve derinliği ne olursa olsun I_c 'ye dayalı genel iyileştirme faktörünün belirlenebileceği vurgulanmaktadır.

İyileştirme oranının, zemin davranış tipi indeksi ile yani ince dane içeriği ile azaldığı tespit edilmiştir. DMT deneylerine zemin davranış tipi yaklaşımı getirmeye yönelik ilk girişimler, vibro kompaksiyon kontrolünde de uygulanmıştır.

Massarsch ve Fellenius (2014) tarafından yapılan çalışmada yazarlar, genel kabul görmüş bir kavram olan teğet modülü yöntemine dayalı olarak, oturmaların nasıl tahmin edilebileceğini açıklamışlardır. Oturma analizi için deformasyon parametrelerinin CPT sonuçlarından nasıl belirlenebileceğine dair bir yöntem sunmaktadırlar. Yazarlar bu yaklaşımın avantajı olarak, tasarımın nicel bilgilere dayalı olabilmesi, bunun da sıkıştırma işleminden önce ve sonra oturmaların değerlendirilmesini mümkün kılması olarak açıklamaktadırlar. Bu nedenle, sıkıştırma kriterleri, sıkışma indeksi gibi belirsiz bir şekilde tanımlanmış zemin özellikleri yerine CPT sonuçlarına dayandırılabilmesi vurgulanmaktadır.

Yazarlar; çoğu zemin sıkıştırma projesinde, kritik tasarım hedefinin toplam ve farklı oturmalar olduğunu ve oturma analizlerinin çoğu kez oldukça güvenilir olmayan aşırı basitleştirilmiş ampirik yöntemlere dayandığını belirterek, oturma analizleri ile ilgili belirsizliklerin genellikle sayısal yöntem seçimine değil, analizde kullanılacak uygun zemin parametrelerinin (deformasyon modülü değerleri) seçimine bağlı olduğunu vurgulamaktadır.

Zemin sıkıştırma projelerinde, tasarım açısından kritik öğelerin genellikle toplam ve farklı oturmalar olduğu, granüller zeminlerdeki birçok temel projesi için potansiyel olarak uygun maliyetli ve teknik olarak esnek bir çözüm olduğu belirtilmektedir. Granüller zeminlerde, oturma analizlerinde kullanılmak üzere zemin sıkıştırılabilirliğini belirlemek için laboratuvar deneyleri için örselenmemiş numuneleri elde etmemenin genellikle mümkün olmadığı belirtilerek, bu çalışmada önerilen yöntemle, modül sayısını gerilme ayarlı koni direnci ölçümlerine dayanarak tahmin etmenin mümkün olacağı belirtilmektedir.

Zemin sıkışmasının önemli, ancak genellikle ihmal edilen bir sonucunun, yatay efektif gerilmedeki artış olduğunu belirten yazarlar, zeminin sıkıştırılmasından sonra çevre sürtünmesi ölçümlerinin genellikle sıkıştırma öncesine göre birkaç kat daha yüksek olduğu vurgulanmaktadır. Yatay efektif gerilimdeki bu artışın, sıkıştırmanın neden olduğu aşırı konsolidasyon etkisinin, sıkıştırma öncesi ve sonrası çevre sürtünmesinin oranı ile ölçülebileceğini gösterdiği değerlendirilmiştir. Gevşek kum ve siltlerin sıvılaşma duyarlılığını değerlendirirken benzer bir yaklaşımın mümkün olduğu vurgulanmaktadır.

Massarsch ve Fellenius (2002) tarafından yapılan çalışmada yazarlar, derin titreşimli sıkıştırmanın, zeminin kayma mukavemeti ve sıkılığı üzerindeki etkilerini ve ayrıca kaba daneli zeminlerde ortaya çıkan gerilme koşullarının değişimini tartışmaktadırlar. Zemin sıkıştırma projelerinin tasarımı ve kalite kontrolü için koni penetrasyon deneyinin kullanımı da bu makale kapsamında ele alınmıştır.

Titreşimli sıkıştırma kullanılarak yaklaşık 10 m kalınlığındaki kum dolgusunun sıkıştırıldığı bu vaka çalışmasında, zemin koşulları sıkıştırmadan önce ve sıkıştırmadan 2 ve 7 gün sonra koni penetrasyon deney sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Sıkıştırma abakları yardımıyla, sıkıştırılacak dolgunun sıkıştırılabilirliği ile ilgili bilgiler tartışılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, sıkıştırılabilirlikte bir düşüş (modül sayısında artış) gösteren zeminlerde, koni direncinde önemli artışlar meydana geldiği belirtilmektedir. Çevre sürtünmesinin orantılı olarak arttığı ve sürtünme oranının değişmediği gözlemlenmiştir. Boşluk suyu basıncında, vibro kompaksiyondan sonra beklenenin aksine değişim gözlemlenmemiştir. Aşırı konsolidasyon oranında en az beş katlık bir artışa karşılık yatay toprak basıncının yaklaşık iki katına çıktığı sonucu elde edilmiştir.

Sıkıştırmaya bağlı olarak zemin yüzeyinde gözlenen oturma miktarı, 0.55-0.75 m olarak ölçülmüş ve yaklaşık %5-7'lik bir hacim azalması meydana geldiği saptanmıştır. Janbu yöntemine dayalı oturma hesaplamalarının sonuçları, analizlerde ön konsolidasyon etkisinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Yazarlar; oturma analizinin yalnızca sıkıştırma etkisine (modül sayısındaki artış) dayalı olsaydı, oturma azalması, sıkıştırılmamış dolgunun yaklaşık %40'ı olacağını vurgulayarak, ön konsolidasyon etkisi dahil edildiğinde, bu azalmanın %70 olarak hesaplandığını belirtmektedirler.



3. VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİ

Kompaksiyon işlemi temelde yüzeysel ve derin kompaksiyon olmak üzere ikiye ayrılır. Yüzeysel kompaksiyon 1.50 metre derinliğe kadar yapılan sıkıştırma işlemidir. Daha derin kum birikintilerinin sıkıştırılması gerektiğinde, vibratörler (vibroflot) kullanılarak derin sıkıştırma uygulanır. Yüzey kompaktörlerinin ve titreşimli çekiçlerin aksine, vibratörler zemini yatay titreşim dalgaları ile karıştırır (Kirsch ve Kirsch, 2016). Bu işlem sonucunda gevşek durumdaki zemin daneleri arasındaki sürtünme direnci azaltılarak veya tamamen ortadan kaldırılarak zemin danelerinin daha sıkı bir formda tekrar bir araya gelmesi (yerleşmesi) sağlanır.

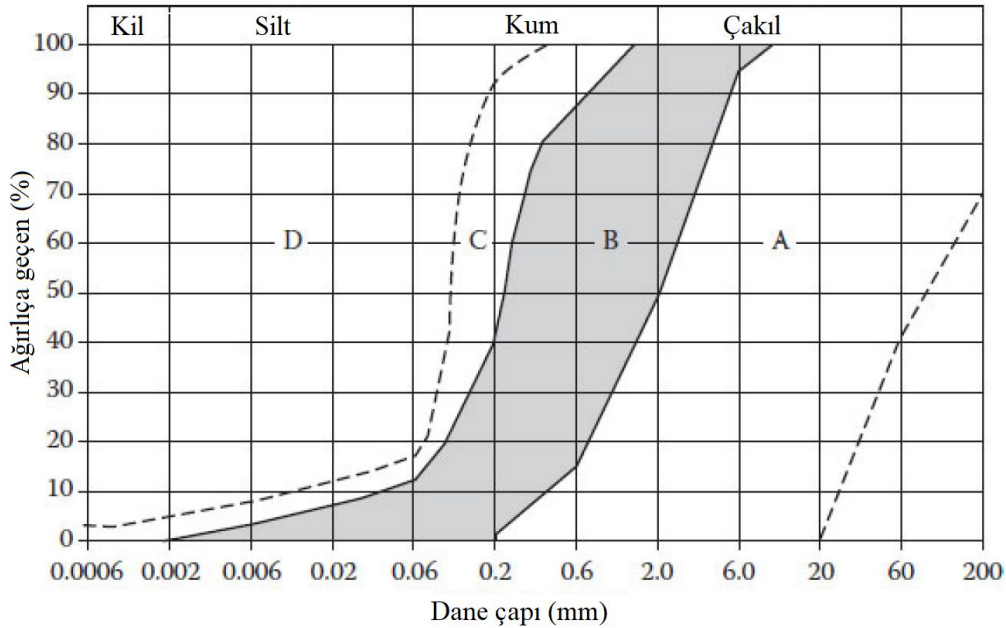
Vibro kompaksiyon (Vibroflotasyon) yöntemi ince dane oranı %15'den düşük olan temiz, kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılması için geliştirilmiş derin zemin iyileştirme yöntemidir. Vibro kompaksiyon, elektrikli veya hidrolik bir vibratör (vibroflot) kullanarak zeminin iyileştirilmesini sağlayan derin zemin iyileştirme tekniğidir. Vibro kompaksiyon yöntemi (D'Appolonia, 1954)'nın "Loose sands—Their compaction by vibroflotation" adlı makalesini yayınlamasından sonra tam olarak tanınmaya başlanmıştır. Yöntem, zemin taşıma gücünü arttırmak ve önerilen tasarım yükleri için izin verilen farklı oturma miktarlarını azaltmak için kullanılmaktadır.

Vibro kompaksiyon, Rezonans sıkıştırma ve Vibroflotasyon tanımlarının literatürde ve uygulamada birbirinin yerine kullanıldığı görülmektedir. Nihai konsept, zemin daneleri arasındaki sürtünme kuvvetinin yatay titreşim kuvvetleri vasıtasıyla azaltılarak veya tamamen ortadan kaldırılması ile zemin danelerin daha sıkı bir formda tekrar bir araya gelmesinin (yerleşmesinin) sağlanmasıdır.

Arazi ıslahı işlemi sırasında oluşan gevşek granüller kum birikintileri; sismik kuvvetler uygulandığında, bu tabakalar sıvılaşmaya karşı savunmasız kalırlar. Bu gevşek granüller kum dolguları, statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü kaybına ve/veya oturmaların izin verilebilir sınırları aşmasına sebebiyet verebilir. Bu tür problemleri ortadan kaldırmak için, gevşek durumdaki daneli zeminlerin, mühendislik özelliklerini geliştirmek için yoğunlaştırılmaları (sıkıştırılmaları) gerekir. Derin sıkıştırma, birçok arazi ıslah projesinde gevşek kum dolgu birikintilerini iyileştirmenin çoğu zaman tek yolu olmaktadır. Doğal kum birikintileri ve yapay olarak yerleştirilmiş

kum dolgularının, yerleştirme yöntemine veya doğasına, jeolojik geçmişine ve kum danelerinin ayırt edici özelliklerine (mineralojik köken, boyut, şekil, sertlik ve pürüzlülük) bağlı olarak temel özelliklerinde önemli bir değişiklik gösterdiği bilinmektedir.

Şekil 3.1’de vibro kompaksiyon için uygun ve geniş kabul görmüş gradasyon aralığı göstermektedir. Şekil 3.1’de görüleceği üzere, ince dane içeriğindeki potansiyel artış, sıkıştırma sürecini olumsuz olarak etkilemektedir (Kirsch ve Kirsch, 2016). Gradasyon özellikleri “B” bölgesi içerisinde kalan ve ince dane içeriği %15’u geçemeyen zeminler vibro kompaksiyon uygulaması için en ideal zeminler olarak gösterilmektedir. Dane dağılımı “A” bölgesi içerisinde kalan zeminler sıkıştırılabilir olmakla birlikte, geçirimsizlik katsayısının $k=10^0$ cm/sn’ye yaklaştığı durumlarda su kayıpları, danelerin geçirgenliğine paralel olarak artmakta ve vibratörün zemin içerisinde ilerlemesi engellemektedir. Dane özellikleri “C” bölgesi içerisinde kalan zeminlerde yöntem uygulanabilir ancak gerekli sıkıştırmanın sağlanabilmesi için uzun sıkıştırma sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1 : Vibro kompaksiyona uygun zemin sınıflandırması (Degen, 1997).

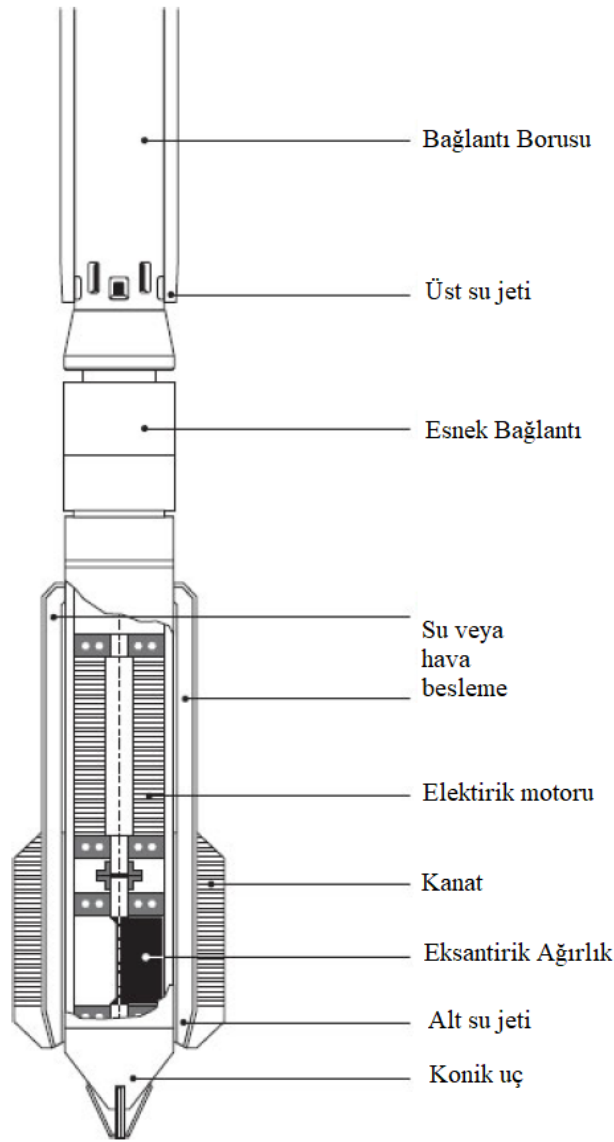
Ayrıca geçirimsizlik katsayısının, $k=10^{-5}$ cm/sn’den daha düşük olması durumunda vibratör ilerleme hızı düşecek ve sıkıştırma verimliliği önemli ölçüde yavaşlayacaktır. Dane özellikleri “D” bölgesi içerisinde kalan zeminler için yöntem uygulanabilir değildir. Bu bölge içerisinde kalan zeminler için Taş Kolon Yöntemi seçilmelidir.

3.1 Genel

Zeminlerin derinlik boyunca sıkıştırılmasında kullanılan vibratörlerin çapları 300 mm ile 500 mm arasında değişmektedir. Çelik tüplerden oluşan vibratörler, tabanında eksantrik bir kütle ve üstünde bu kütleminin bağlı olduğu bir motordan oluşmaktadır (Erol ve diğ, 2016). Vibratörlerin ağırlıkları 1500 kg ile 4500 kg arasında, boyları 3.00 m ile 4.50 m arasında değişmektedir. Vibratörler harekete geçtiğinde, eksantrik ağırlık kendi düşey eksenini etrafında döner ve vibro kompaksiyon yöntemi için gerekli olan yatay titreşim dalgalarına neden olur. Dinamik yatay kuvvetler (merkezkaç kuvvetleri) vibratörün boru şeklindeki muhafazası yoluyla çevreleyen zemine doğrudan uygulanarak zemin parçacıklarının, vibratörün merkezinden dışarıya doğru ötelenmesine neden olur. Vibratörün oluşturduğu yatay merkezkaç kuvvetlerinin büyüklüğü derinlik boyunca sabittir (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Vibratörler, genellikle vincin arkasına bir karşı ağırlık olarak monte edilen bir jeneratör veya güç ünitesi ile çalışan elektrikli veya hidrolik motorlardan oluşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan vibratör motorlarının güç değerleri, 50 kW ile 180 kW arasında değişmekte ve 360 kW'a kadar çıkmaktadır. Yapısal nedenlerle iki veya daha fazla parçaya ayrılabilen eksantrik ağırlığın dönüş hızı, akımın frekansı ve elektrik motorunun polaritesi ile belirlenen, elektrikle çalışan makinelerde gerçekleşir (Kirsch ve Kirsch, 2016). Örneğin, dönme hızı 40 Hz olan güç kaynağı, tekli veya çift kutuplu sürüşüne bağlı olarak sırasıyla 2400 rpm veya 1200 rpm dönüş hareketiyle sonuçlanmaktadır. 50 Hz'de çalışırken, dönme hızı sırasıyla 3000 veya 1500 rpm olmaktadır. Uygulamada yaygın olarak kullanılan vibratörün tipik kesiti Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

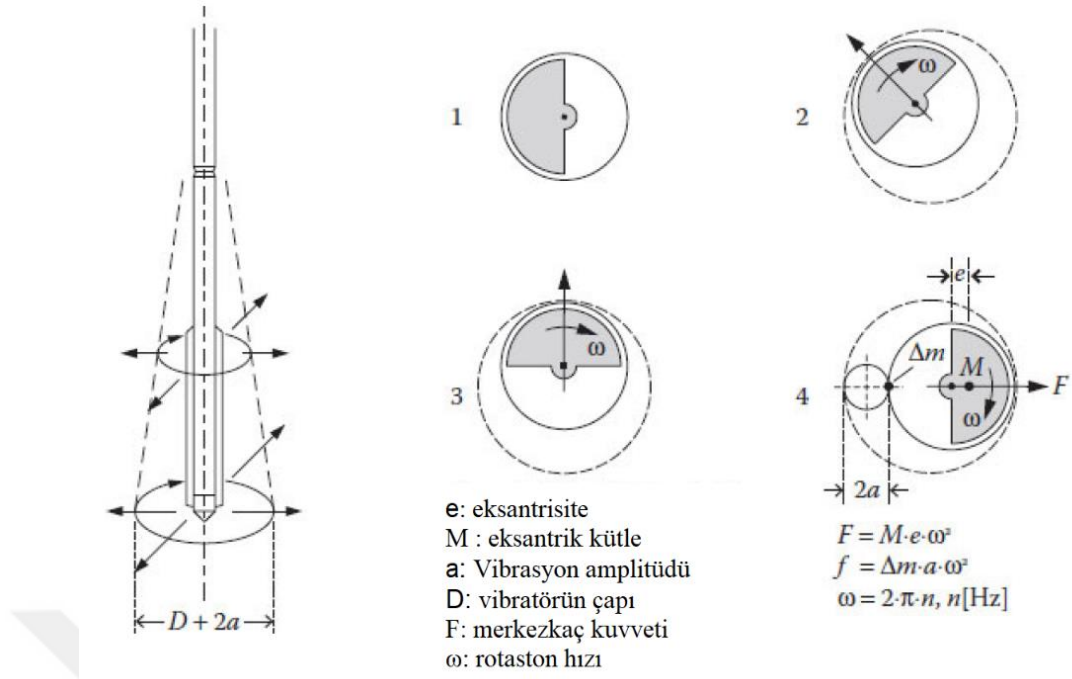
Şekil 3.3'de görüleceği üzere, vibratörün yatay düzlemdeki salınımının eni $2a_v$, vibratörün uzunluğu boyunca doğrusal olarak dağıtılmaktadır. Vibratörün yaptığı salınım, vibratörün bağıntı ünitesinin üstünde sıfır olurken ve alt konik ucunda maksimum değere ulaşmaktadır. Salınımın maksimum olduğu uç nokta da ivme değeri ($a \cdot \omega^2$) maksimum değere ulaşmaktadır. Bu değer 50 g mertebelerine kadar çıkabilmektedir (Erol ve diğ, 2016). Burada; ω : rotasyon hızı ve a . Vibrasyonun amplitüdü'dür.



Şekil 3.2 : Vibratörün tipik kesiti (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Eksantrik kütle (M) dönme sırasında oluşturduğu merkezkaç kuvveti F_m , ($F_m = M \cdot e \cdot \omega^2$) vibratörün temas halinde olduğu zemine merkezkaç kuvveti uygulayarak zemini daneleri arasındaki kuvvetin kopmasında ve danelerin daha sıkı bir formda tekrar bir araya yerleşmesine neden olmaktadır.

Merkezkaç kuvveti F_m , daha küçük vibratörler için 150 kN ve en ağır derinlik vibratörleri için 700 kN'den arasında değişmektedir. Makine normal çalışma koşullarında olduğunda, zemin ve salınım (osilasyon) genlikleri tarafından sınırlandırılır ve sabit merkezkaç kuvvetine rağmen yüzey ivmeleri çok daha az olmaktadır (Kirsch ve Kirsch, 2016). Vibratörün çalışma prensibi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Yatay düzlemde vibratör ve vibratör ivmesinin oluşma prensibi (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Vibratör tasarımında en önemli husus, uygulama süresince zeminde etkili olacak bir titreşim ivmesinin sağlanabilmesidir. Vibrasyon amplitüdü (ivmesi), vibratör ile zemin arasındaki etkileşime bağlıdır. Bu etkileşim farklı zemin-saha koşullarında ve uygulama derinliği boyunca değişiklik gösterebilmektedir. Bundan dolayı sıkıştırma uygulaması sırasında vibratörün performansını takip etmek ve sıkışmanın istenen düzeyde gerçekleşip gerçekleşmediğini takip edebilmek için vibratöre bazı parçalar yerleştirilir (Erol ve diğ, 2016). Bu ekipmanlar uygulama süresince,

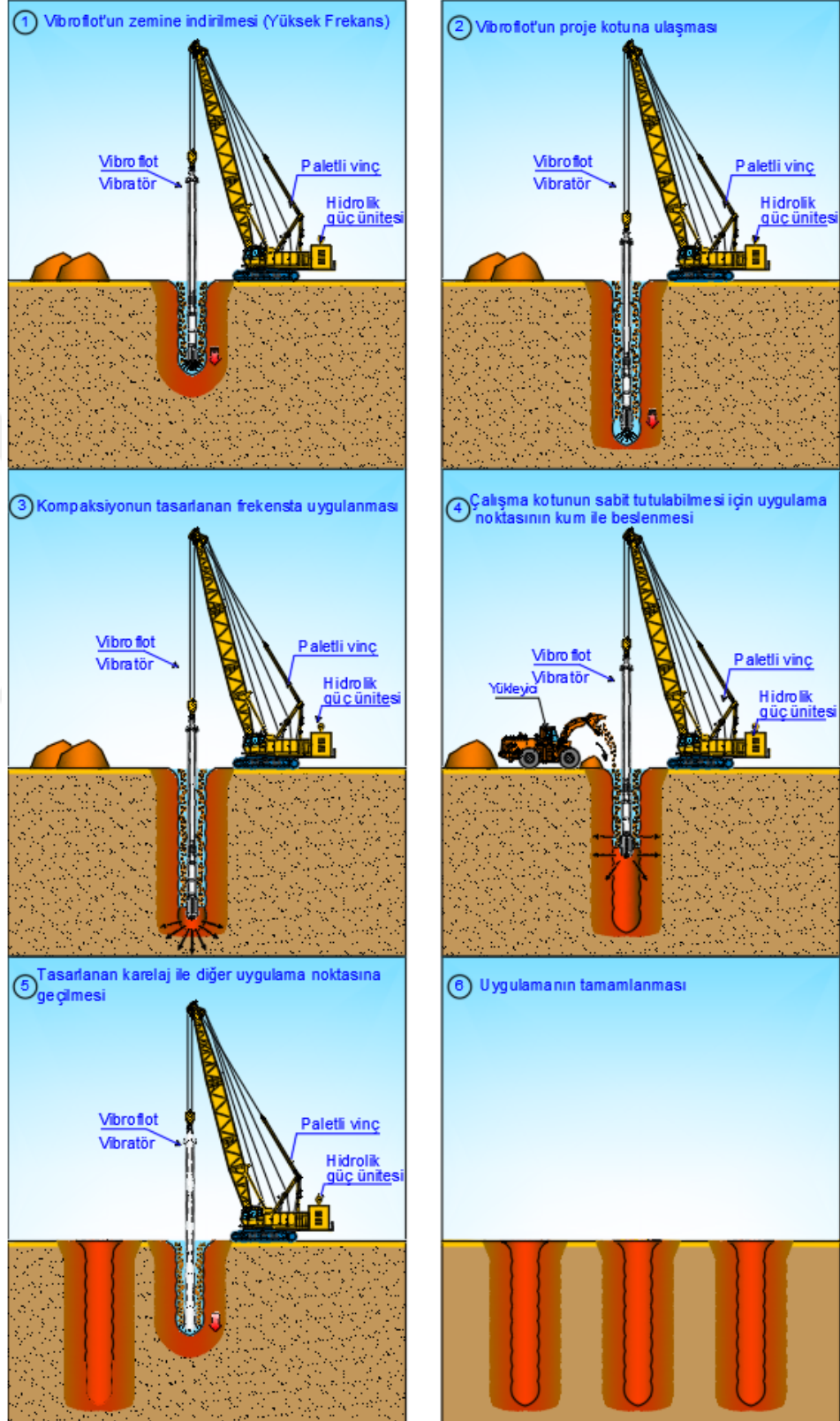
- Vibratörün derinliği
- Motorun hidrolik basıncını ve motorda oluşan akımın şiddeti (amperi)
- Çalışma frekansı
- Su ve hava basıncı

Sürekli kaydedilip takip edilmelidir. Böylelikle, değişken zemin koşullarında, bu parametreler izlenerek, uygulama parametrelerine anlık olarak müdahale edilebilir. Çizelge 3.1’de günümüzde yaygın olarak kullanılan vibratörlerin özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Uygulamada kullanılan vibratörlerin özellikleri (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Uygulayıcı	Makine Tipi	Çap (mm)	Güç (kW)	Operasyon Frekansı (Hz)	Santrifüj Kuvveti (kN)	2xAmplitüd (mm)	Özellik
Betterground	B12	292	94	50	170	9	hyd, v
	B27	354	140	30	270	24	el or hyd, c
	B41	390	210	30	410	42	el, c
	B54	460	360	30	842	54	el, c
Keller Grup	MB1670	315	70	50-60	157-226	7	el, v
	LB20100	315	100	60	201	5	el, v
	S340/34	421	120	30	340	29	el, c
	S700	490	290	25-38	742-690	3	el, v
Bauer Grup	N-Alpha	259	60	60	130	6	hyd, v
	TR17	298	96	≤ 53	≤ 193	12	hyd, v
	TR75	406	224	≤ 33	≤ 313	21	hyd, v
	VL18	N/A	113	50	181	N/A	hyd
PTC Fayat Group	VL40	N/A	135	30	145	N/A	hyd
	VL40S	N/A	180	40	258	N/A	hyd
	VL110	N/A	202	28	353	N/A	hyd
Balfour Beatty Groun Engineering	HD130	310	98	50-60	140-202	16	hyd, v
	HD150	310	130	50-60	200-288	22	hyd, v
	HD300	310	120	30-36	175-252	28	hyd, v
	HD400	400	215	30-35	310-426	34	hyd, v
Beijing Vibro	BJ426-75	426	75	30	270	14	el, c
	BJ402S-180	402	180	30	380	22	el, c

Vibro kompaksiyon sistemini oluşturan ana unsurlar: bir adet vibratör (vibroflot), paletli vinç, hidrolik güç ünitesi ve su tedarik sistemidir. Şekil 3.4’de tipik bir vibro kompaksiyon uygulama yöntemi şematik olarak anlatılmaktadır.

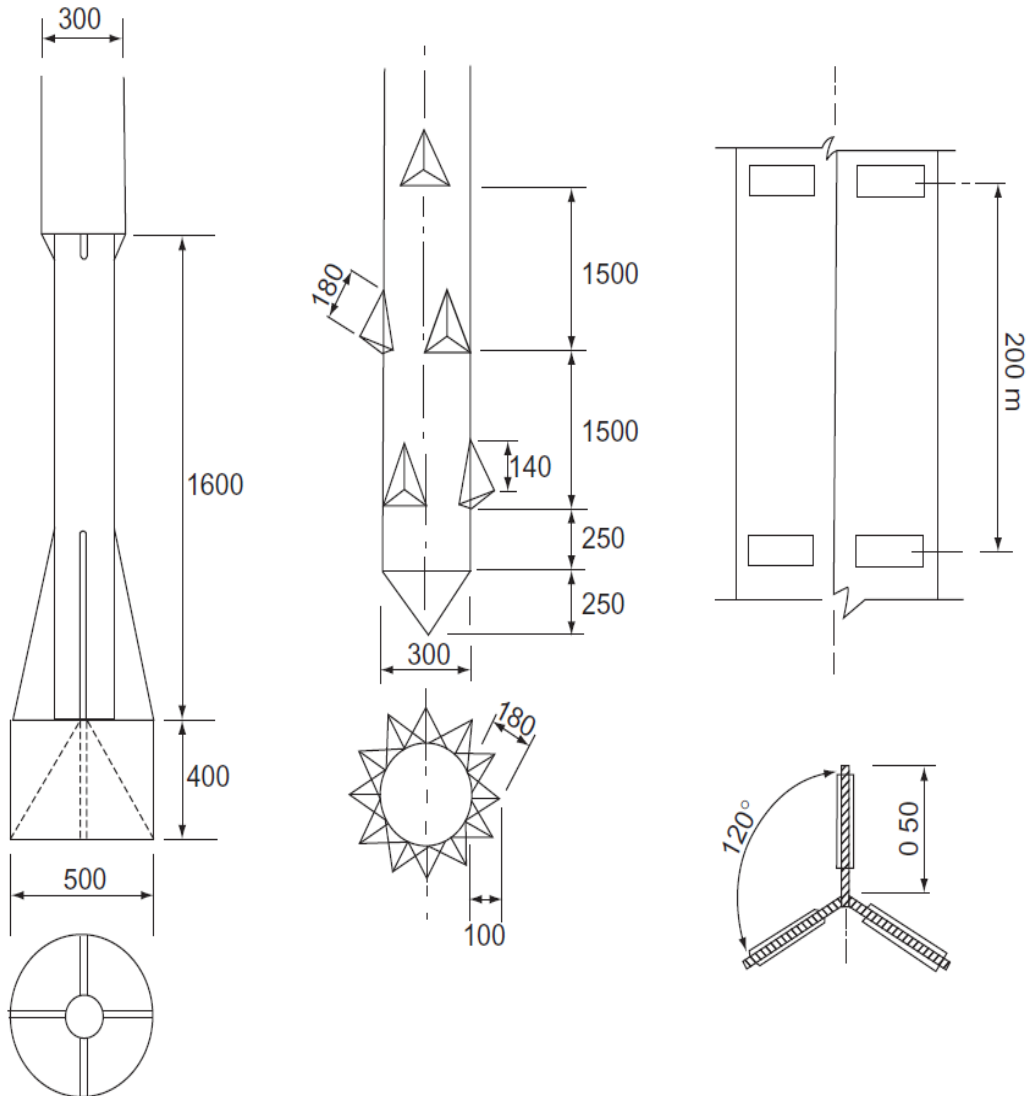


Şekil 3.4 : Vibro kompaksiyon uygulaması (KASKTAŞ, 2021a).

3.2 Sıkıştırma Vibratörü

Sıkıştırma vibratörü, titreşimli sıkıştırma sisteminin en önemli bileşenidir. Vibratör, üst ucuna takılan ağır, dikey olarak salınan bir vibratör yardımıyla zemine yerleştirilir. Geleneksel (H-profil) borular veya kazık profillerinden daha sofistike, amaca yönelik üretilmiş sondalara (Terra sondası, vibro-prob ve Y-sondası) kadar farklı tipte sıkıştırma sondaları geliştirilmiştir (Şekil 3.5).

Titreşimli vibratörler başlangıçta Japonya'da kısa nervürlerle sağlanan ince bir sıkıştırma aracı olarak geliştirilmiştir. Y-probu, 120°'lik bir açıyla birbirine kaynaklanmış üç çelik bıçaktan oluşmaktadır (Massarsch ve Fellenius, 2015a).



Şekil 3.5 : Vibratörlere örnekler (soldan sağa: terra prob, vibro-rod ve Y-prob).
(Massarsch ve Fellenius, 2015a).

Vibro çubuk sisteminin İsveç'te geliştirilmiş bir diğer tipi olan kanatlı vibratörler Şekil 3.6'te gösterilmiştir. Bu sistemlerde düşey çubuk 15.00 metre uzunluğundadır. Düşey çubuk üzerinde 0.50 metre aralıklarla monte edilmiş 0.80 m ile 1.00 m uzunluğunda radyal bıçaklar mevcuttur. Bu yöntemin en büyük dezavantajı olarak, sıkıştırılmış zeminden vibratörün geri alınmasında yaşanan zorluklar olduğu bilinmektedir.

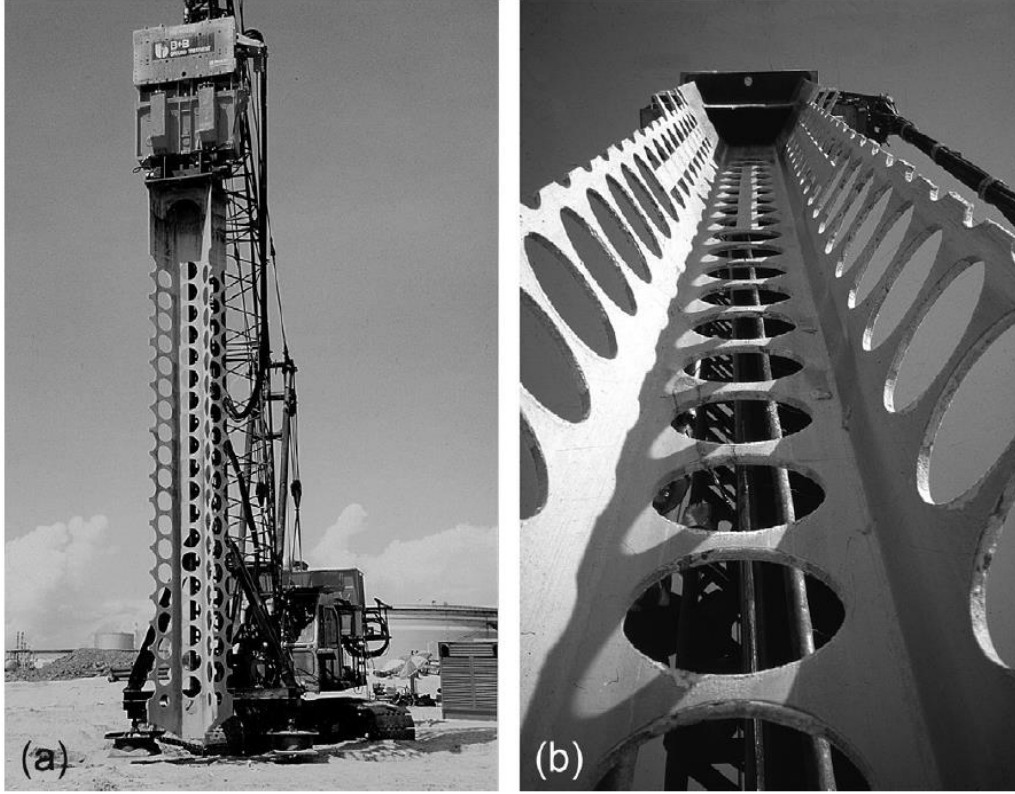


Şekil 3.6 : Vibro kanat ekipmanı ve sıkıştırma sondası: (a) vibro kanat makinesi; (b) vibro kanatlı çubuk (Massarsch ve Fellenius, 2015a).

Kapsamlı saha deneyleri ve elde edilen tecrübeler ışığında, çift Y şeklindeki vibratörlerin sıkıştırma verimliliği açısından en iyi geometriye sahip olduğu bilinmektedir (Massarsch ve Fellenius, 2015a). Sıkıştırma sondasının yanındaki etki alanı, çubuklar veya Y-şekilli sondaların oluşturduğu dairesel etki alanının tersine, şekil olarak dikdörtgene yakın ve artmaktadır.

Şekil 3.7'de gösterilen çift Y şeklindeki rezonans sıkıştırma sisteminde, vibratörün ağırlığını azaltmak ve sıkıştırılacak zemin ile vibratör yüzey alanı arasındaki teması artırmak için dairesel boşluklar ile bırakılmıştır. Bu boşlukların amacı, vibratörün ağırlığını ve rijitliğini azaltmak, üretilen enerjinin çevredeki zemine aktarımını kolaylaştırmaktır. Böylelikle vibratörün ağırlığı ve rijitliği azaltılarak, titreşim

sırasında daha büyük yer değiştirme genliği oluşturarak, üretilen sıkıştırma enerjisinin daha verimli kullanılması sağlanmaktadır.



şekil 3.7 : Vibratörden zemine enerji transferini artırmak için açıklıklara sahip esnek vibratör: (a) MRC sıkıştırma ekipmanı, (b) MRC vibratör. (Massarsch ve Fellenius, 2015a).

(Massarsch ve Fellenius, 2015a), sıkıştırma sondalarının, sert zemin katmanlarına nüfuzu kolaylaştırmak için su jeti ekipmanı ile birlikte de kullanılabileceğini belirtmiştir. Su jetinin, özellikle doymamış veya kısmen suya doymuş zemin birikintilerinde, zeminin sıkıştırılmasında pozitif etkilere sahip olduğu bilinmektedir.

3.3 Sıkıştırma Metodu

Vibratörlerin ağrılıları 15–45 kN'dur, uzunlukları 2.00 m ile 6.00 m arasında değişmekte ve genellikle bir vinç yardımı ile kullanılmaktadır. Titreşimli ünitenin yanında ve ucunda su veya hava jetleri yer almaktadır. Sıkıştırma süreci temel olarak aşağıdaki aşamalara ayrılabilir:

- Vibratörün gövdesinde yer alan su jetleri yüksek debide ve vibratör ise yüksek frekansta çalıştırılarak, vibratörün kendi ağırlığı altında uygulama derinliğine

kadar batması sağlanır. Vibratörün uygulama derinliğine indirilmesi sırasında zemininde belirgin bir sıkışma gerçekleşmez.

- Sıkıştırma vibratörü tasarlanan frekansta (genellikle yüksek frekans), kademeli olarak yukarı doğru çekilir. Tasarlanan düşey aralıklarla ve frekansta, titreşime izin vermek için vibratör kısa bir süre (yaklaşık 30 ile 120 saniye) durdurulur ve zeminin daha sıkı bir yerleşim düzene geçmesi sağlanır. Eğer ikinci kademe sıkıştırma (çift pas) yapılacaksa, vibratör yüksek frekansta uygulama derinliğine kadar tekrar sokulur ve tasarlanan frekansta zemin kademeli olarak tekrar sıkıştırılır.

Tek bir vibratörün etrafındaki sıkıştırma bölgesi ve dolayısıyla gerekli sıkıştırma aralığı, alt zeminin yapısına ve kullanılan vibratör tipine göre 2.00 ile 5.00 m arasında değişen bir yarıçapta değişmektedir. Çoğu sıkıştırma tekniğinde, gerekli sıkıştırma oranını sağlamak için optimum yerleşim aralığı, sıkıştırma frekansı ve düşey titreşim aralığını belirlemek için tam ölçekli saha deneyleri yapılması gereklidir. Bunun temel nedeni, sıkıştırılacak zeminin doğal durumdaki mühendislik özelliklerinin sahaya özel olmasıdır.

3.4 Sıkıştırma Mekanizması

Sıkıştırma prosedürü, vibro kompaksiyonun önemli bir unsurudur. Teknik ve ekonomik sonuçları önemli ölçüde etkileyebilir. Bununla birlikte, uygulamada, bu yön pek fazla dikkate alınmamaktadır. Sıkıştırma işlemi aşağıdaki parametrelerin seçilmesini gerektirir:

- Yerleşim aralığı
- Titreşim frekansı
- Vibratör penetrasyonu ve ekstraksiyonu
- Sıkıştırma süresi ve bekleme süreleri
- Geçiş sayısı

Kum danelerine, zeminin rezonans frekansına yakın veya daha yüksek frekansta titreşim dalgaları iletilir. Zemin danelerine uygulanan titreşim dalgaları, danelerin arasındaki sürtünme kuvvetini düşürür (veya tamamen ortadan kaldırır). Böylece serbest haldeki zemin daneleri sıkıştırma sırasında daha sıkı bir formda yeniden yerleşir ve hacim azalması meydana gelir. Ortaya çıkan hacim azalmasının derecesi,

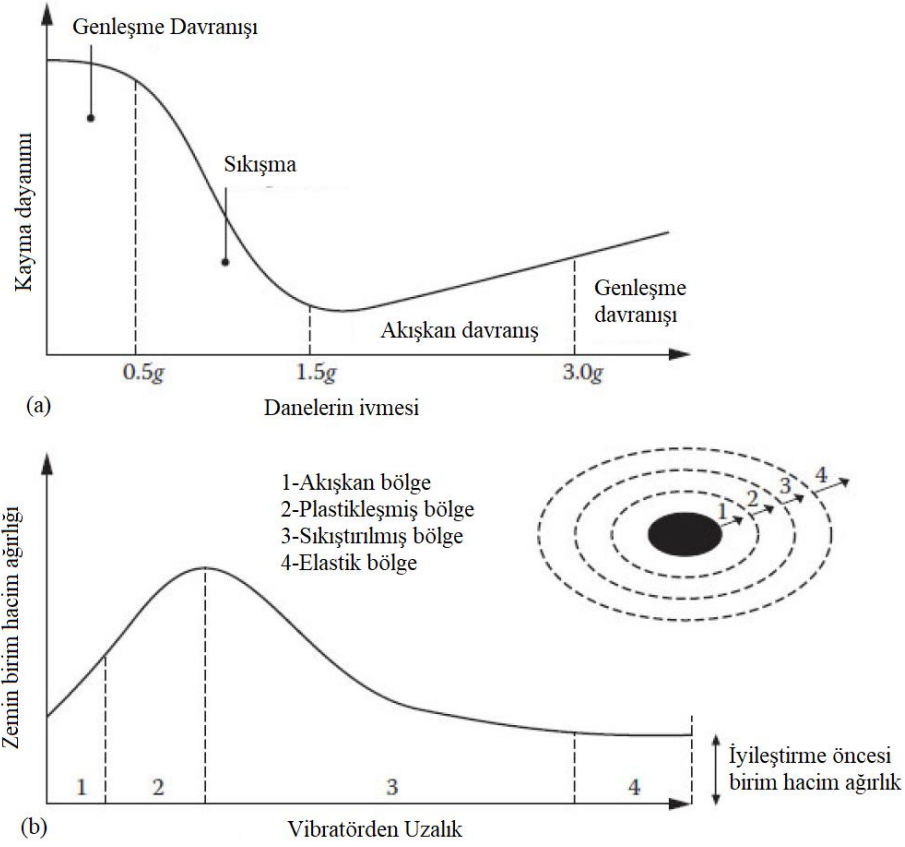
titreşimlerin özelliklerine, zemin özelliklerine ve sıkıştırma işleminin süresine bağlıdır.

Yüzey sıkıştırıcıların ve titreşimli çekiçlerin aksine, derinlik vibratörleri yatay titreşimlerle zemin danelerini karıştırır. Vibratörden artan radyal mesafe ile zemin titreşimleri, zemin daneleri arasında etkiyen kuvvetler tarafından zayıflatılır. Bu nedenle sıkıştırma, ancak zeminin artık sürtünme direncinin üstesinden gelerek, sürtünme teması kesildiği anda mümkün hale gelmektedir. Ancak o zaman zemin parçacıkları, daha düşük potansiyel enerji, yani gevşekten daha sıkı bir forma doğru kendilerini yeniden düzenleyeceklerdir. Zemin daneleri arasındaki bu sürtünme direncini kırmak için yeterince yüksek bir minimum dinamik kuvvet gereklidir. Minimum dinamik kuvveti oluşturan, zemine iletilen merkezkaç kuvveti ile sağlanmaktadır.

Daneli zeminlerin yapısının stabilizesinin, 0.5 g'dan daha büyük bir kritik ivmeye ulaşıldığında dinamik gerilimler tarafından tahrip edildiği bulunmuştur. Vibratörün oluşturduğu ivmenin artması ile birlikte kumun kayma mukavemetinin, minimum 1.50 g'a ulaşana kadar azaldığı belirlenmiştir (Rodger, 1979). Bu noktadan sonra zemin sıvılaşmakta ve ivmenin daha da artması ile birlikte zeminde genleşmeye davranışı görülmektedir. Şekil 3.8a, zeminin kayma dayanımı ile uygulanan ivme arasındaki idealleştirilmiş ilişkiyi göstermektedir.

Akışkan davranış aşamasında, zeminin kayma dayanımı azalır ancak tamamen ortadan kaldırılmaz. Bu nedenle, titreşimler sönümlenmiş olsa da parçacık temaslarının sürekli olarak kesildiği ve yeniden yapıldığı bu bölgeden iletilebilir. Vibratörden iletilen ivme, kaynağından uzaklaştıkça azaldığından, vibratörü çevreleyen birkaç dairesel yoğunluk bölgesi Şekil 3.8b'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Su altında olan zeminlerde akışkanlaşma, esas olarak, titreşimlerin neden olduğu boşluk suyu basıncı artış hızının, zemin parçacıklar arasında etkili olan temas gerilmelerini aştığında meydana gelir. Kuru zeminlerde su jeti hareketiyle veya ivmenin yukarı yönlü dikey bileşeni yerçekimini aştığında da meydana gelir. Modern vibratörler rahatlıkla 10 g'ı aşan ivme üretebildikleri için, vibratörün yakınında normal olarak iki etkinin bir kombinasyonu olarak akışkanlaşma indüklenir (Kirsch ve Kirsch, 2016). Doğrudan kuru zeminlerde vibratör tarafından üretilen ivmenin etkisiyle, zeminde oluşan karasız durum, akışkanlaşma olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.8 : Granüller zeminlerin vibrasyon etkisi altındaki davranışı (Rodger, 1979).

Kirsch ve Kirsch (2016), minimum kayma mukavemeti ile karakterize edilen akışkanlaştırılmış bölgenin, zeminin titreşimlerin iletkenliğinin bir ölçüsü olduğunu ve dolayısıyla titreşimli işlemin etki yarıçapından sorumlu olduğunu belirtmektedir. Geçiş bölgesinde veya plastik bölgede, dinamik kuvvetlerin zemini akışkanlaştırmak için yeterli büyüklükte olmadığını ancak zemin parçacıklarını birbirlerine daha sıkı bir formda tekrar bir araya getirecek kadar güçlü olduğunu belirtmiştir.

Sıkıştırmayı etkileyen temel vibratör özellikleri; uygulanan salınımların frekansı, genliği, hızlanması ve denge dışı kuvvetlerdir. Son olarak, titreşimin süresi de elde edilen sıkıştırma derecesini üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Vibro kompaksiyon sürecini etkileyen zemin özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Başlangıç birim hacim ağırlığı
- Dane boyutu ve dağılımı
- Dane şekli
- Zeminin özgül ağırlığı
- Örtü yükü gerilmesi
- Zeminin Geçirimliliği

3.4.1 Sıkıştırma enerjisinin iletilmesi

Sıkıştırma vibratörleri (vibroflot) zemini, yaklaşık 1000-4000 kN arasında değişen merkezkaç kuvveti uygulayabilirler. Optimum ve üniform bir sıkışmanın sağlanabilmesi için uygulanan sıkıştırma enerjisinin hem şaft boyunca hem de vibratörün tabanına, doğru oranda aktarılması gereklidir. Literatürde: vibro kompaksiyon yöntemi ile zemine uygulanan sıkıştırma enerji arasındaki ilişkiyi (Gokalp, 2006; Greenwood, 1991; Greenwood ve Kirsch, 1983; Mecsi ve diğ., 2005) ele almışlardır. Bu çalışmaların dışında literatürde bu konuda yapılmış pek fazla çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu araştırma kapsamında, vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırma enerji ile ilgili çalışmalar ileriki bölümde daha detaylı olarak ele alınacaktır.

3.4.2 Sıkıştırma sonucunda yatay toprak basıncında meydana gelen artış

Titreşimli sıkıştırmanın neden olduğu yatay gerilmedeki değişiklik, önemli bir etkidir, ancak literatürde bildirilen çalışmalarda pek fazla dikkate alınmadığı görülmektedir, ancak yine de statik veya döngüsel yüklemeye maruz kaldığında sıkıştırılmış kumun performansını etkilediği unutulmamalıdır. Howie ve diğ. (2000) zemin iyileştirmesinin, zeminde meydana getirdiği yatay toprak basıncındaki değişikliğe ve rölatif sıkılıkta meydana gelen değişiklikleri saha deneyleri ile karakterize ederek incelemişlerdir. Nguyen ve diğ. (2014) vibro kompaksiyon uygulamasından sonra, yatay efektif gerilmelerin önemli ölçüde arttığını gösteren çalışmalar yapmıştır. Ayrıca, Asalemi (2006) tarafından yapılan kapsamlı çalışmanın sonuçlarına göre, vibro kompaksiyon ile üretilen titreşim dalgalarının bir sonucu olarak yatay toprak basıncında önemli değişikliklerin meydana geldiğini göstermektedir. Titreşimli sıkıştırma sonucunda, yapılan çalışmalarda yatay toprak basıncındaki artış pek fazla dikkate alınmamakla beraber Massarsch ve Fellenius (2002), tarafından belirtildiği gibi sıkıştırma işleminden sonra yatay toprak basıncında önemli artışlar meydana gelmektedir. Çevre sürtünmesi (f) CPT verilerinden yaklaşık elde edilebilir.

$$f = K_0 \sigma'_v \tan(\phi'_a) \quad (3.1)$$

Burada, σ'_v , efektif örtü yükü gerilmesi, K_0 , sükûnette yatay toprak basıncı katsayısı ve ϕ'_a , efektif kayma direnci açısı ve CPT verilerinden elde edilebilir.

Sıkıştırmadan önceki ve sonraki çevre sürtünmesi arasındaki oran, f_{s1} / f_{s0} aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{f_{s1}}{f_{s0}} = \frac{K_{01}\sigma'_{v1}\tan(\phi'_{a1})}{K_{00}\sigma'_{v0}\tan(\phi'_{a0})} \quad (3.2)$$

Burada, f_{s0} sıkıştırmadan önceki çevre sürtünmesi, f_{s1} sıkıştırmadan sonraki çevre sürtünmesi, K_{00} sıkıştırmadan önceki sükûnetteki yatay toprak basıncı katsayısı, K_{01} sıkıştırmadan sonraki sükûnetteki yatay toprak basıncı katsayısı, σ'_{v0} sıkıştırmadan önceki efektif örtü yükü gerilmesi, σ'_{v1} , sıkıştırmadan sonraki efektif örtü yükü gerilmesi.

Efektif örtü yükü gerilmesinin, sıkıştırmadan önce ve sonra değişmediğini varsayarsak eşitlik Denklem 3.3'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{f_{s1}}{f_{s0}} = \frac{K_{01}\tan(\phi'_{a1})}{K_{00}\tan(\phi'_{a0})} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te görüleceği üzere K_{01}/K_{00} oranının yatay toprak basıncı katsayısının, çevre sürtünmesinin ve zeminin kayma direnci açısının değişmesinden doğrudan etkilendiğini görülmektedir (Massarsch ve Fellenius, 2015a). Yatay gerilmeler, sıkıştırılmış zemin içinde önemli ölçüde değişebilir. En yüksek yatay gerilmelerin sıkıştırma noktalarına yakın olması ve mesafe arttıkça azalması beklenir.

3.5 Uygulama Noktaları Arasındaki Mesafe

Uygulamada genellikle sıkıştırma noktalarının yerleşimi, vibro kompaksiyonun etkinliğini ve verimliliğini arttırmak için eşkenar üçgen karelej uygulanır. Bunun nedeni, yaygın olarak kullanılan vibratörlerin içinde, Y-prob hariç diğer tüm sıkıştırma vibratörlerinin etki alanlarının dairesel olmasıdır. Y-prob'un sıkıştırma sırasında yarattığı etki alanı ise dikdörtgen şeklindedir.

Sıkıştırma noktaları arasındaki mesafenin seçilmesinde sahanın geometrisi, sıkıştırma makinesinin sahaya erişimi ve sıkıştırma geçişlerinin sayısı gibi pratik hususlara göre seçilmesi gerektiğini unutmamak gereklidir. Uygulamalardan elde edilen tecrübeler doğrultusunda, sıkıştırma işlemin tek pas (geçiş) ile değil, çift pas (geçiş) ile

yapılmasının, vibro kompaksiyon işleminin daha homojen yapılmasını sağladığı tespit edilmiştir.

Massarsch ve Fellenius (2015a)'a göre neredeyse dikdörtgen bir etki alanına sahip olan çift Y şeklinde bir sıkıştırma sondası kullanarak, gerekli sıkıştırma noktalarının sayısını yaklaşık %13 oranında azaltan dikdörtgen karelej modeli'nin kullanılabileceğini belirtmektedir. Sıkıştırılacak zemin birikintisinde geçirimsiz silt veya kil tabakaları bulunduğu bu hususun özellikle önemli olduğu belirtilmektedir. Geçirimsiz katmanlar suyun dikey akışını engellediğinden veya azalttığından ve dolayısıyla depremler sırasında aşırı boşluk suyu basıncının dağılımını etkilediğinden, bu tür zemin birikintileri genellikle ara zemin katmanlarında sıvılaşmayı artırmaya eğilimlidir. Benzer bir durum gevşek suya doymuş zemin birikintilerinin titreşimli sıkıştırılması sırasında meydana gelir ve bu durum sıkıştırma verimliliğini düşürür. Bununla birlikte, sıkıştırma iki geçişte gerçekleştirilirse, sonda ilk geçiş sırasında drenaj kanalları oluşturacak ve bu da ikinci geçişte daha verimli sıkıştırma ile sonuçlanacaktır.

Sıkıştırma noktaları arasındaki mesafe; sıkıştırma öncesi Geoteknik saha koşulları, gerekli sıkıştırma derecesi, vibratörün boyutu (etki alanı) ve vibratör kapasitesi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Kirsch ve Kirsch, 2016). Daha uzun süreli daha geniş bir aralık yerine, daha kısa bir sıkıştırma süresi olan daha küçük bir aralık kullanmak genellikle avantajlı olmaktadır. Ayrıca bunun, zemin birikintisinin daha homojen bir şekilde sıkışmasını sağlayacağı bilinmektedir.

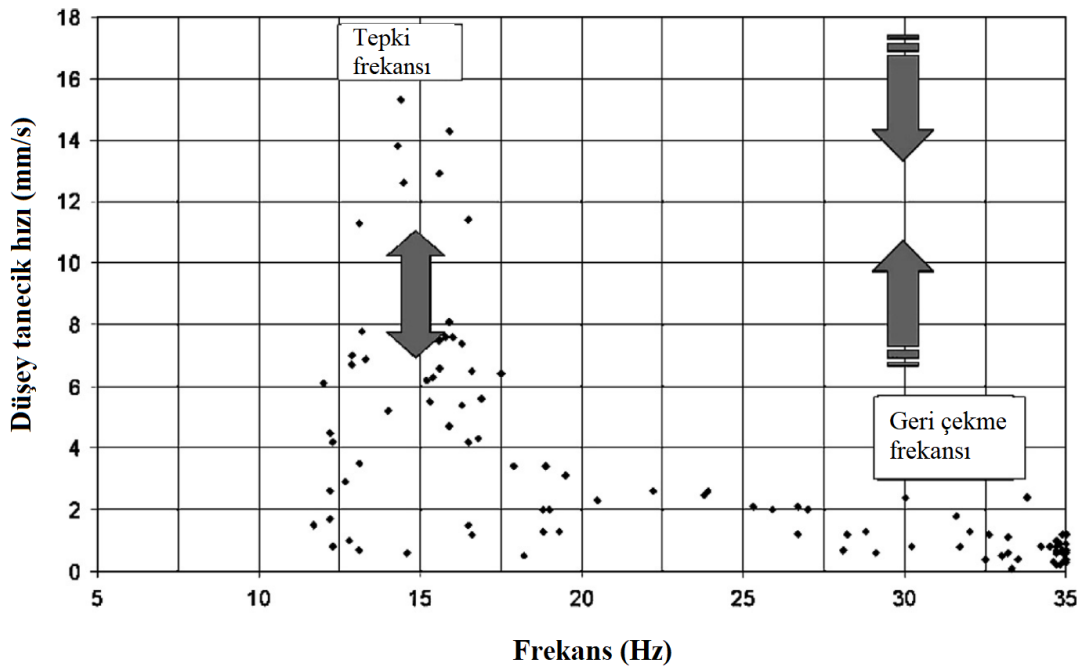
3.6 Sıkıştırma Frekansı

Titreşim frekansı, özellikle su jeti kullanılmayan Müller Rezonans Kompaksiyon (MRC) uygulamasının en önemli parametrelerinden birisidir. Vibratör, kompaksiyon işlemi sırasında rahat indirilebilmesi ve geri çekilebilmesi sırasında vibratör boyunca shaft direncinin minimum olması gereklidir. Bu da zemin danelerine gerekli minimum titreşim frekansının verilebilmesi ile mümkündür. (Massarsch ve Fellenius, 2015a)'ün yaptığı çalışmalara göre vibratörün rahat hareketi için gerekli olan minimum titreşim frekansı 30 Hz olarak belirtilmiştir.

Vibro kompaksiyon uygulaması sırasında uygulanan titreşim enerjinin çoğu, vibratörün shaftı boyunca ısıya dönüşür ve çok az enerji zemin gövdesine ulaşır. Sıkıştırma aşamasında temel amaç, vibratör tarafından üretilen enerjiyi dikey olarak

salınan vibratör ile birlikte mümkün olan en verimli şekilde vibratörü çevreleyen zemine aktarmaktır; bu vibratör zeminle rezonans içinde titreştirildiğinde elde edilir ve genellikle yaklaşık 15–20 Hz’dir (Massarsch ve Fellenius, 2015a). Bu frekans değeri rezonans sıkıştırma yöntemi için geçerlidir. Su jeti kullanılan diğer vibro kompaksiyon uygulamalarında daha yüksek frekanslarında, daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, her zemin birikintisinin rezonans frekansının, sahaya özel ve farklılık gösterebileceği unutulmamalıdır.

Vibratör-zemin sistemi arasındaki rezonans, vibratör ve zemin çok az veya hiç göreceli deplasman meydana gelmeden fazla hareket ettikçe yer titreşimlerinin artmasına yol açar, bu da zemine titreşim enerjisinin verimli aktarımını sağlar. Bu durumda, vibratör penetrasyonunun yavaşlayacağını veya tamamen duracağı unutulmamalıdır. Şekil 3.9, sıkıştırma sondasından 4.00 m mesafede bir titreşim sensörü (jeofon) ile ölçülen zemin yüzeyindeki dikey titreşim hızını göstermektedir. Görüleceği üzere, sıkıştırma frekansının 15 Hz’de olarak uygulandığı zaman aralığında, zemin danelerinin maksimum potansiyel enerjiye ve dane hızına ulaştığını, yani zeminin sıvılaştığını göstermektedir. Daha yüksek veya daha düşük frekanslarda maksimum dane hızının yaklaşık 8 kat daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, zeminin rezonans frekansında sıkıştırılmasının verimliliğini net şekilde ortaya koymaktadır.

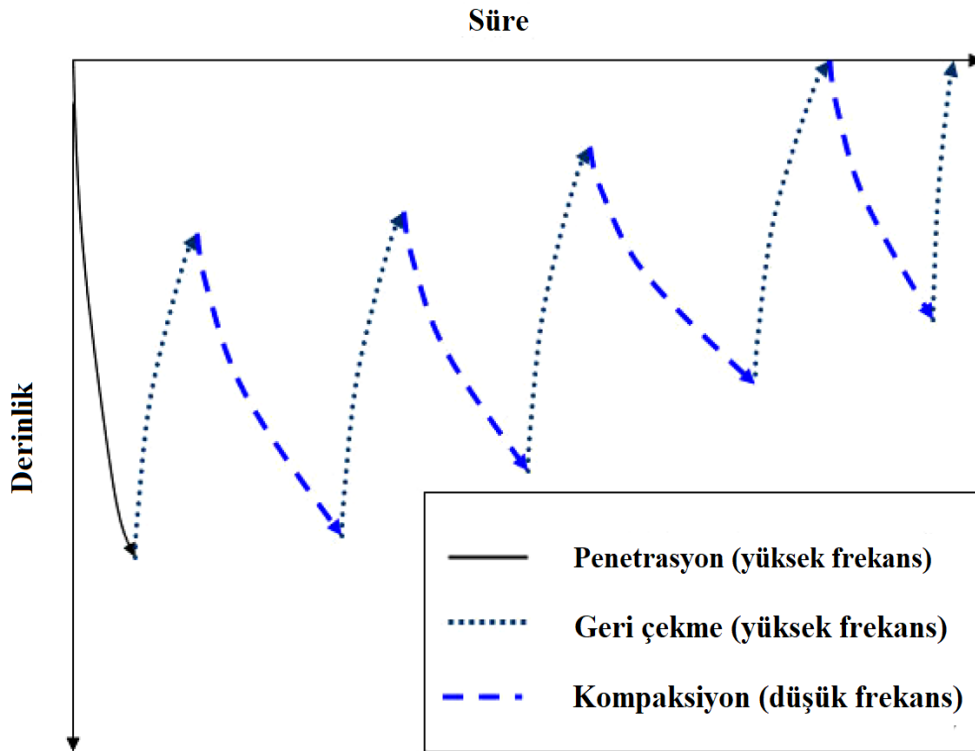


Şekil 3.9 : Vibratör penetrasyonu ve sıkıştırma sırasında zemin titreşim hızı (Massarsch ve Fellenius 2015a).

3.7 Vibratör Penetrasyonu ve Geri Çekmesi

Massarsch ve Fellenius (2015a)'a göre derin titreşimli sıkıştırma, üç ana aşamadan oluşan ve tekrarlayan bir süreçtir: sıkıştırma sondasının gerekli derinliğe kadar sokulması, zeminin sıkıştırılması ve sıkıştırma sondasının geri çıkarılması. Değişken frekans kullanan titreşimli sıkıştırma işleminin temel adımları Şekil 3.10'da gösterilmektedir.

En verimli sıkıştırma işlemi, vibratörün yüksek titreşim frekansında mümkün olduğunca hızlı bir şekilde gerekli derinliğe indirmek, ardından rezonans frekansında (veya rezonans frekansına yakın frekanslarda) zeminin sıkıştırılması ve son olarak vibratörü yüksek frekansta çıkarmaktır. Tüm sıkıştırma işlemi tek bir frekansta gerçekleştirilirse sıkıştırma işlemi daha az verimli olacaktır. Çok yüksek bir frekansın uygulanması durumunda, titreşim enerjisinin çoğu vibratör şaftı boyunca ısıya dönüştürülecektir ve titreşim frekansı sistem rezonans frekansına yakınsa, vibratör penetrasyonu yavaş olacaktır.



Şekil 3.10 : Değişken frekans konseptini kullanan derin titreşimli sıkıştırma prensibi (Massarsch ve Fellenius, 2015b).

Ayrıca, vibratör rezonans frekansında çıkarılırsa, geri çekme kuvveti yüksek olacak ve sıkıştırma etkisi azalacaktır. Su jeti ile gerçekleştirilen vibro kompaksiyon

uygulamalarında, penetrasyon ve geri çekme aşamalarında vibratör maksimum frekansta, su jeti maksimum debide çalıştırılarak bu adımların minimum sürede gerçekleştirilmesi sağlanır.

3.8 Sıkıştırma Süresi

Sıkıştırma süresi, her noktada üniform bir sıkışmanın sağlanabilmesi için önemli bir parametredir. Sıkıştırma süresi; zemin özellikleri, dane şekli, dane boyutu, ince dane oranı, gerekli sıkıştırma derecesi ve zemine aktarılmak istenen sıkıştırma enerjisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Optimum sıkıştırma süresinin bulunabilmesi için proje sahasında farklı uygulama parametreleri ile deneyleri gerçekleştirmek gereklidir. Böylece hem projede istenen sıkıştırma oranı üniform olarak elde edilebilir hem de vibro kompaksiyon maliyetini önemli ölçüde düşürülebilir.

Sıkıştırma aşamasında, birinci ve ikinci sıkıştırma geçişi sırasındaki vibratör penetrasyon hızının, sıkıştırma öncesi ve sonrası penetrasyon deneyleri ile karşılaştırılmasında, optimum sıkıştırma prosedürü daha güvenilir bir şekilde oluşturulabilir. Çoğu durumda, birinci ve ikinci geçişte aynı sıkıştırma süresi uygulanır. Bununla birlikte, ikinci geçiş sırasında sıkıştırma süresinin değiştirilmesi avantajlı olabilir. İlk geçiş sırasında, sahanın tamamında tek tip bir sıkıştırma prosedürü uygulanmalıdır. İkinci geçiş sırasında, gözlenen vibratör penetrasyon hızına bağlı olarak sıkıştırma süresi her noktada değiştirilmelidir (Massarsch ve Fellenius, 2015a). Sıkıştırma süresinin doğru olarak belirlenebilmesi için tam zamanlı veri kayıt sisteminde elde edilen veriler kullanılarak optimum sıkıştırma enerjinin hesaplanması gereklidir. Literatürde bu konuda yapılmış sınırlı çalışma olması nedeniyle bu ilişki ileriki bölümlerde ele alınacaktır.

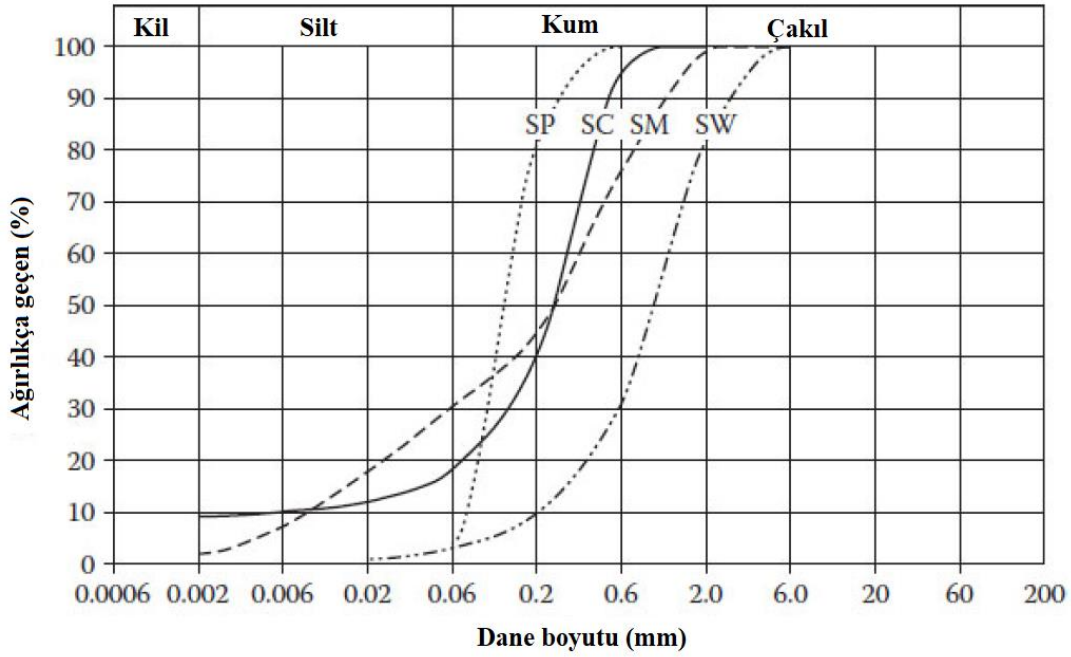
3.9 Vibro Kompaksiyon Tasarım Metodu

Granüller zeminler, yük altındaki davranışlarını belirleyen ayırt edici özellikler ile karakteriz edilir. Titreşimli derin sıkıştırma, temelde kumun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine odaklanır. Kum birikintisinin mekanik özellikleri, parçacıkların boyutu, şekli ve yüzeyi gibi dane özelliklerinden de etkilenir. Kumda, tüm parçacıklar herhangi bir bağ veya kohezyon olmaksızın birbirleriyle temas halindedir. (Greenwood ve Kirsch, 1983), Göreli boşluk miktarıyla ölçülen dane paketlemesi, kumun temel mekanik özellikleri olan mukavemeti ve sıkıştırılabilirliğini

etkilemektedir. İki farklı oran, porozite (n) ve boşluk oranı (e), sırasıyla toplam hacim, V ve zemin hacmi, V_s ile ilişkili olarak boşlukların hacmini ($V - V_s$) tanımlar. Denklem 3.4 bu ilişkiyi açıklamaktadır.

$$\begin{aligned} n &= \frac{(V-V_s)}{V} & e &= \frac{(V-V_s)}{V_s} \\ n &= \frac{e}{(1+e)} & e &= \frac{n}{(1-n)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Kumların dane boyutu dağılım eğrileri Şekil 3.11’de verilmektedir. SW, iyi derecelenmiş, temiz kum, ince dane oranı $<5\%$. SP, kötü derecelenmiş, temiz kum, ince dane oranı $<5\%$. SM, siltli kum, ince dane oranı $>12\%$. ve SC, killi kum, ince dane oranı $>12\%$.

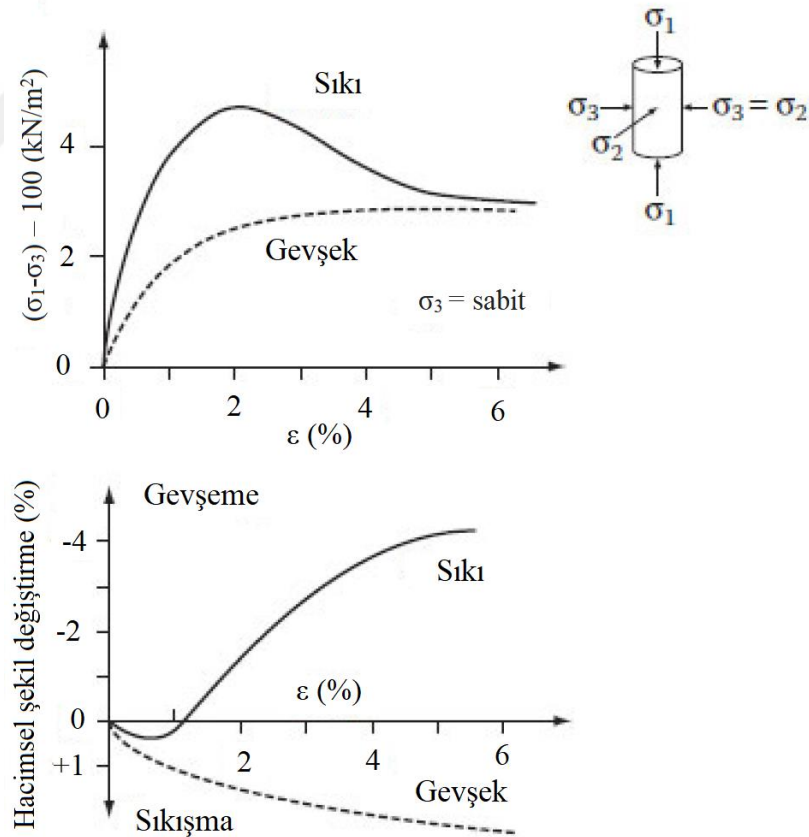


Şekil 3.11 : Kumların dane boyutu dağılım eğrileri (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Eşit çapta küresel danelerden oluşan idealize bir kum malzemesi, $n_{min} = 0.259$ ve $n_{max} = 0.476$ arasında bir poroziteye veya $e_{min} = 0.352$ ve $e_{max} = 0.924$ boşluk oranlarına sahip iki uç düzenlemede istiflenebilir. Bu sınırlar, kum birikintisinin en yoğun ve en gevşek istiflenme durumunu belirtir (Kirsch ve Kirsch, 2016). Diğer tüm ara durumlar, kumun sıkılıkları (D) veya rölatif sıkılıkları (Dr) ile karakterize edilir.

$$D = \frac{n_{max}-n}{n_{max}-n_{min}}, \quad Dr = \frac{e_{max}-e}{e_{max}-e_{min}} \quad (3.5)$$

(Kirsch ve Kirsch, 2016); bir kum birikintisinin rijitliğinin, hâkim gerilme seviyesine bağlı olduğunu ve genellikle derinlik ve rölatif sıklık ile arttığını vurgulamaktadır. Belirli bir eşiğin ötesinde, daneli bir zemin üzerinde etkili olan tüm ilave gerilmelere, danelerinin yeniden düzenlenmesi ve geri döndürülemez (plastik) bir deformasyon eşlik eder. Zeminin boşaltılması (yükün azaltılması), gerilmenin azalmasına yol açar ve danelerin yeniden düzenlenmesine gerek kalmadan ve önemli ölçüde azaltılmış ters (elastik) deformasyonlarla gerçekleşir. Danelerin yeniden düzenlenmesi, daneler arasındaki temas kuvvetlerinin üstesinden gelinmesini gerektirdiğinden, bu süreç suyun yağlama etkisi ve titreşimlerle sağlanır. Şekil 3.12'den görülebileceği gibi, çok sıkı kum, kayma gerilmeleri altında genleşme eğilimindedir, bu etki dilatasyon olarak adlandırılmaktadır. Coulomb'un sürtünme teorisinden, aktarılabilir kesme kuvvetinin, temas yüzeyine etki eden normal kuvvetin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Bu durum, hacim arttığında veya kesme bölgesinde genleşme kısıtlandığında gerekli kesme kuvvetlerinin arttığını göstermektedir (Kirsch ve Kirsch, 2016).



Şekil 3.12 : Kumlarda kayma gerilmesi (ε = düzlemsel şekil değiştirme ε_v = Hacimsel şekil değiştirme) (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Genel olarak, doğal ve insan yapımı kum birikintilerinin sıkılığını, orta sıkı bir mertebeye yükseltmek, hemen hemen tüm Geoteknik problemler için büyük ekonomik fayda sağlamaktadır. Bu nedenle kum üzerindeki yapıların tasarımı genellikle aşağıdaki özelliklerden biri veya birkaçıyla ilgilidir:

- Deformasyon modülünü artırarak toplam ve farklı oturmanın azaltılması
- Kayma mukavemetini artırarak taşıma kapasitesinin artırılması
- Sıkılığını artırarak sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve/veya geçirgenliğin azaltılması

Vibro kompaksiyon ile tasarımda öncelikle kumun/hidrolik dolgunun doğal durumdaki fiziksel özelliklerini gösteren parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Mevcut durum parametrelerinden rölatif sıkılık (D_r), boşluk oranı (e_0), SPT direnci (N_i) veya CPT uç direnci (q_{ci}) gibi parametrelerin birkaçı veya tamamı tespit edilerek mevcut durumun doğru olarak tespit edilmesi, uygulama parametrelerinin ve karelağın doğru olarak belirlenmesi için gereklidir (Erol ve diğ., 2016). Daha sonra projenin gerekliliklerine göre hedeflenen minimum parametreler belirlenmelidir. Başlangıç ve hedeflenen parametreler belirlendikten sonra, artış oranlarını elde edebilmek için gerekli olan sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma frekansı, uygulama derinliği, uygulama karelağı gibi parametrelere karar verilmelidir. Çizelge 3.2, tasarım için gerekli olan önemli mühendislik özellikler olan deformasyon modülü, kayma mukavemeti açısı ve geçirgenlik gibi nihai olarak kum sıkılığını etkileyen ana parametreleri göstermektedir.

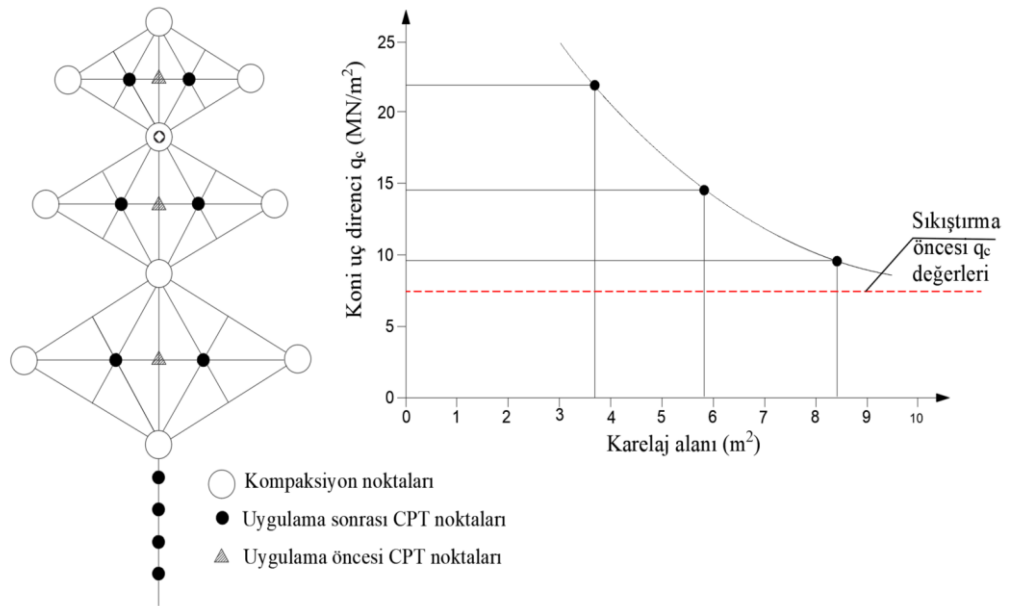
Çizelge 3.2 : Suya doygun kumların fiziksel özellikleri (Kirsch ve Kirsch, 2016).

	Çok Gevşek	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı	Çok Sıkı
Rölatif sıkılık, D_r (%)	<15	15-35	35-65	65-85	85-100
N_{SPT} (darbe/30cm)	<4	4-10	10-30	30-50	>50
CPT q_c (MPa)	<5	5-8	8-15	15-20	>20
N_{DPH} (darbe/10cm)	<5	5-10	10-15	15-20	>20
Birim hacim ağırlığı, γ (MN/m ³) (ıslak-suya doygun)	<14	14-16	16-18	18-20	>20
Odometrik deformasyon modülü E_{oed} (MPa)	15-30	30-50	50-80	80-100	>100
Efektif kayma direnci açısı ϕ'_s (°)	>30	30-32.5	32.5-35	35-37.5	>37.5
Kayma dalgası hızı, V_s (m/sn)		<150	220	350	450

Küçük ölçekli projelerde, vibro kompaksiyon çalışmasının tasarımı yüklenicinin deneyimine dayalı olarak belirlenebilir. Ancak büyük ölçekli projelerde, uygulamaya başlamadan önce uygulama parametrelerinin belirlenebilmesi için farklı parametre ve prosedürler ile ön parametre deneylerinin yapılması tavsiye edilir. Örnek bir deney çalışması için tipik bir vibro kompaksiyon vibratörü yerleşimi Şekil 3.13'te verilmiştir.

Deney, koni penetrasyon deney ekipmanı kullanılarak gerçekleştirilen sıkıştırma öncesi ve sonrası deneylerle birlikte, uygulama noktaları arasında üç set olarak gerçekleştirilmiştir. Bu örnekte, toplam 10 noktada deney amaçlı vibro kompaksiyon uygulaması yapılmıştır. Çalışmada, 3 noktada sıkıştırma öncesinde, 6 noktada da sıkıştırma sonrasında olmak üzere toplam 9 adet CPT deneyi yapılmıştır. İncelenen zemin üzerinden yapılan CPT deneyleri ile bu zemine ait uç direncine karşılık gelen yerleşim alanı grafiği çizilmiştir. Elde edilen iyileştirme oranı, Şekil 3.13'de gösterildiği gibi tasarımı optimize etmek için kullanılabilir.

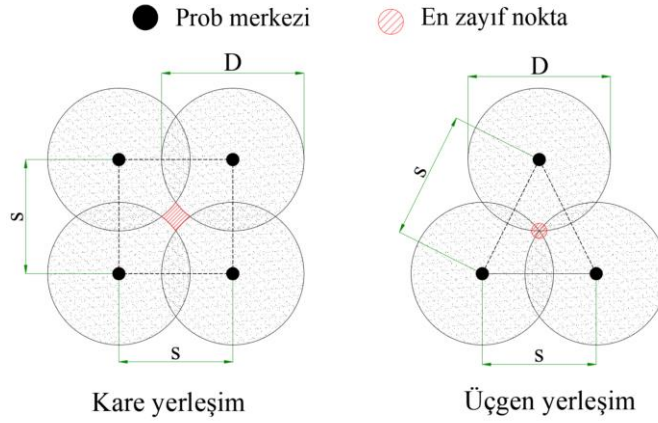
Vibro kompaksiyon çalışmasının teknik başarısı, belirli bir sıkıştırma hedefine karşı elde edilen ve genellikle koni penetrasyon deneylerinin sonuçlarından elde edilen sıkıştırma oranı ile ölçülür. Sıkıştırma, standart penetrasyon deneyleri veya koni penetrasyon deneyleri kullanılarak kolayca kontrol edilebilir. Sıkıştırma öncesi ve sonrası deneyler arasında karşılaştırmalar yapılabilir ve her durumda aynı uygulama parametreleri kullanılmalıdır. Moseley ve Kirsch (2004), sıkıştırılan zemin, hedeflenen sıkıştırma derecesi, kullanılan vibratör tipi ve uygulama hızlarının tümü, vibro kompaksiyon vibratörlerin aralıkları üzerinde bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir. Sıkıştırma noktası başına iyileştirilen alanlar genellikle 6 ile 20 m² arasında değişmektedir. Son on yıldaki vibratörlerin gelişimi ile daha az sayıda uygulama noktası ile daha büyük hacimler sıkıştırılabilmektedir.



Şekil 3.13 : Tipik bir Vibro kompaksiyon deney çalışması örneği (Moseley ve Priebe, 1993).

3.9.1 İnce dane oranı düşük kumlarda uygulamaları

Bu bölüm anlatılan hesaplar, temiz veya ince dane oranı düşük olan kumlarda (US 200 numaralı elekten geçen veya dane çapı <0.074 mm) %15'den daha az olan zeminler için geliştirilmiştir. Kum kazıların tipik olarak kare ve üçgen yerleşimde gösterimi Şekil 3.14'te verilmektedir.



Şekil 3.14 : Kum kazıkların kare ve üçgen düzende yerleşimi.

Kare yerleşim için alan yer değiştirme oranı “ a_r ” hesabı denklem 3.6a verilmektedir:

$$a_r = A_c/A = A_c/s^2 \quad (A_c = \pi D^2/4 \text{ ve } A = s^2) \quad (3.6a)$$

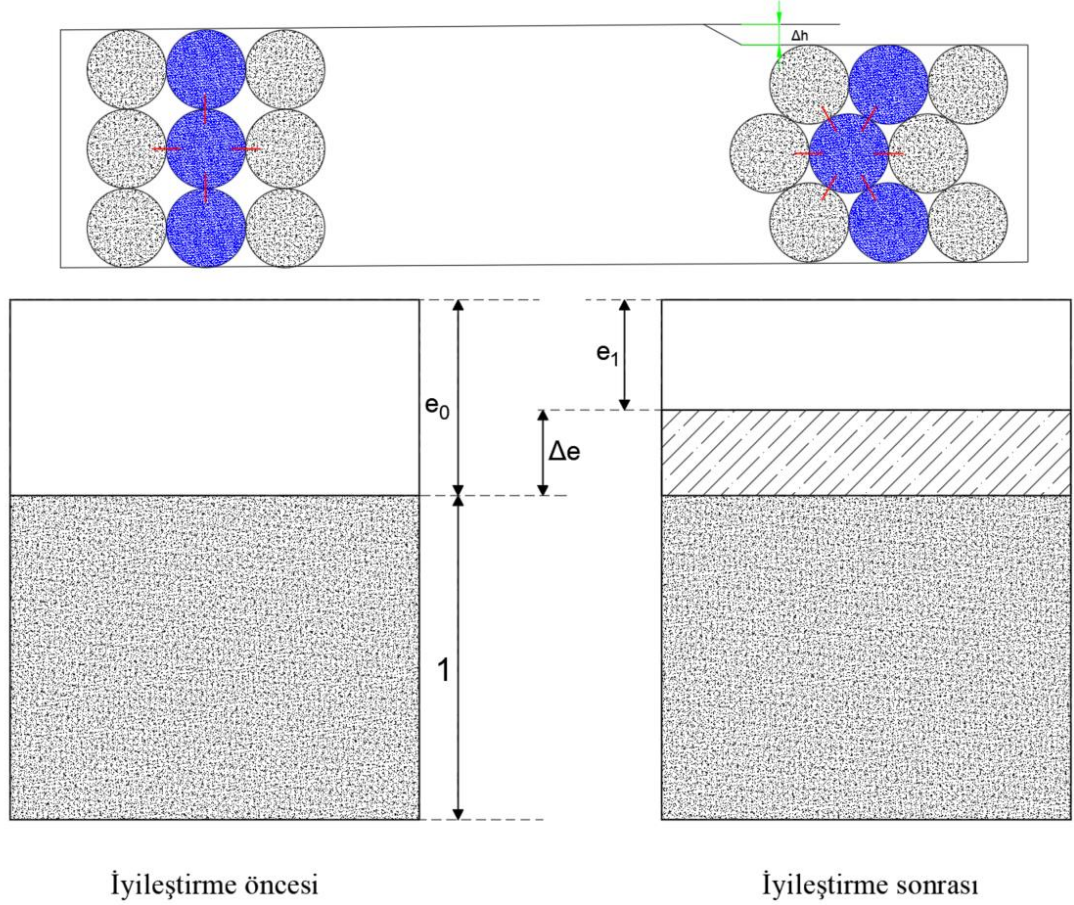
Üçgen yerleşim için alan yer değiştirme oranı “ a_r ” hesabı denklem 3.6b verilmektedir:

$$a_r = A_c/A = 2A_c/(\sqrt{3}s^2) = 1.15 A_c/s^2 \quad (A_c = \pi D^2/4 \text{ ve } A = D^2(\sqrt{3}/4)) \quad (3.6b)$$

A_c : kum kazığının alanı ($A_c = \pi D^2/4$); A : tek bir kum kazığının etkin olduğu zemin alanı;
 D : kum kazığının çapı ve s : kazıklar arasındaki merkezden-merkeze mesafedir.
Sıkıştırma süreci Şekil 3.15'te özetlenmektedir.

Vibro kompaksiyon uygulamasından sonra Δe hacminde zemin kütlesi, vibro kompaksiyondan $1+e_0$ hacmine sahip olan zemin içerisine yerleştirilmiştir. Sıkıştırmadan önce e_0 boşluk oranına sahip zemin, sıkıştırmadan sonra e_1 boşluk oranına ulaşmaktadır. Alan yer değiştirme oranının (a_r) boşluk oranı cinsinden ifadesi Denklem 3.7'de verilmektedir (Erol ve diğ, 2016).

$$a_r = \Delta e/(1+e_0) = (e_0 - e_1) / (1+e_0) \quad (3.7)$$

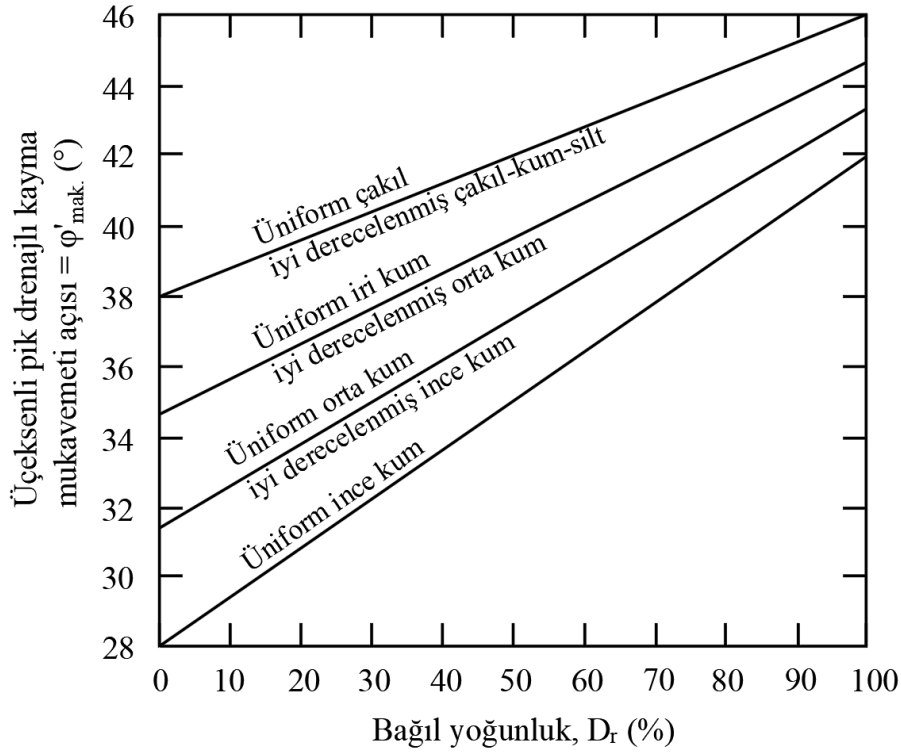


Şekil 3.15 : Vibro kompaksiyonun zemin sıkılığına etkisi.

Literatürde birçok araştırmacı, kumlu zeminlerin davranışını çeşitli statik ve dinamik saha deneyleri ile incelemiş ve özellikle koni penetrasyon deneyi (CPT) ve standart penetrasyon deneyi (SPT) gibi deney sonuçları zeminin iyileştirmeden önceki ve sonraki mühendislik özellikleri ile alakalı korelasyonlar geliştirmiştir.

Vibro kompaksiyon yönteminde zemine ait rölatif sıkılık, sıkıştırılabilirlik, kayma mukavemeti açısı gibi özellikler ile alakalı yaygın ve kabul görmüş korelasyonlar ele alınacaktır. Bununla birlikte, bu çizelgelerin ve grafiklerin (Şekil 3.16 ve 3.17, Çizelge 3.3) kullanımı, herhangi bir özel durumda uygulanabilirliklerinin dikkatli bir şekilde doğrulanmasını ve yorumlanmasının gerektiği unutulmamalıdır.

Şekil 3.16'de Schmertmann (1978) tarafından önerilen abakta, kumun dane dağılımı özellikleri kullanılarak, rölatif sıkılık (D_r) ile pik drenajlı kayma mukavemeti açısı (ϕ') arasındaki ilişki ortaya konmaktadır. (Schmertmann, 1978) tarafından ortaya konan bu ilişki için efektif gerilme mertebesi yaklaşık $\sigma'_{v0} = 150$ kPa mertebesindeki durumlar için geçerlidir.



Şekil 3.16 : Rölatif sıkılık ve kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Schmertmann, 1978).

Robertson ve Campanella (1983) tarafından kumlu zeminler için geliştirilen koni direnci (q_c) ile efektif örtü yükü gerilmesi arasındaki ilişkiyi gösteren abak Şekil 3.17'de verilmektedir.

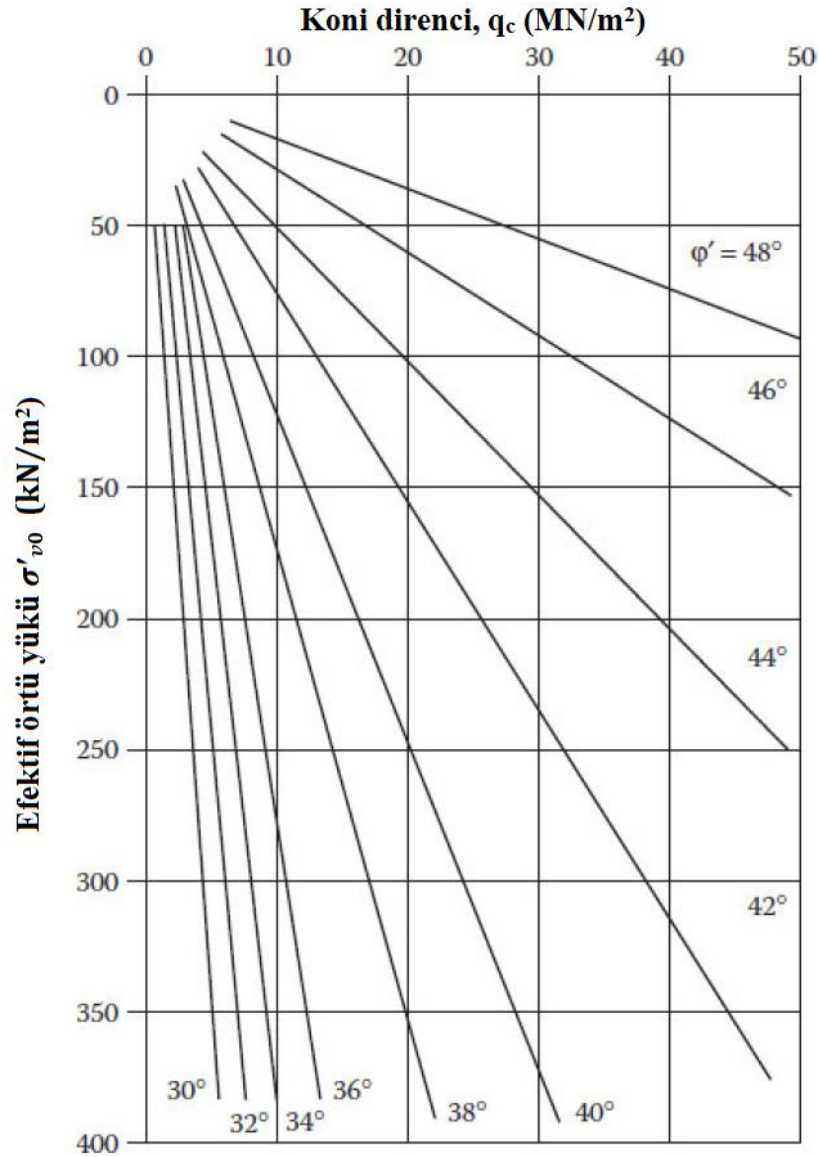
Genişliği 1.50 metreden daha küçük olan yüzeysel temeller için oturma, taşıma gücünden daha öncelikli bir kriterdir. Daneli zeminlerde oturma miktarının sahada ölçülmesi, laboratuvarında bozulmamış numuneler üzerinde deformasyon modülünün tespit edilmesinin getirdiği zorluklar nedeniyle çok önemlidir. Bunun yanında, daneli zeminlerin deformasyon modüllerinin sahada penetrasyon deneyleri ile tespit edilmesi, gerilme düzeyi, gerilme tarihçesi, drenaj koşulları ve dane karakteristiği düşünüldüğü zaman çok kompleks bir işlemdir.

Lunne ve Christophersen (1983) tarafından mormal konsolide, çimentosuz ve ağırlıklı olarak silisli kumlar için odometrik deformasyon modülü (M) hesaplamak için geliştirilen bağıntılar Denklem 3.8'de verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 M_s &= 4 \cdot q_c & q_c < 10 \text{ MPa} \\
 M_s &= 2 \cdot q_c + 20 \text{ (MPa)} & 10 \text{ MPa} < q_c < 50 \text{ MPa} \\
 M_s &= 120 \text{ MPa} & q_c > 50 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Aşırı konsolide kumlar için, aynı araştırmacılar kaba bir yaklaşım olarak şunları önermektedir:

$$\begin{aligned} M_s &= 5 \cdot q_c & q_c < 50 \text{ MPa} \\ M_s &= 250 \cdot q_c & q_c > 50 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.9)$$



Şekil 3.17 : q_c - ϕ' - σ_{v0} arasındaki ilişki (Robertson ve Campanella, 1983).

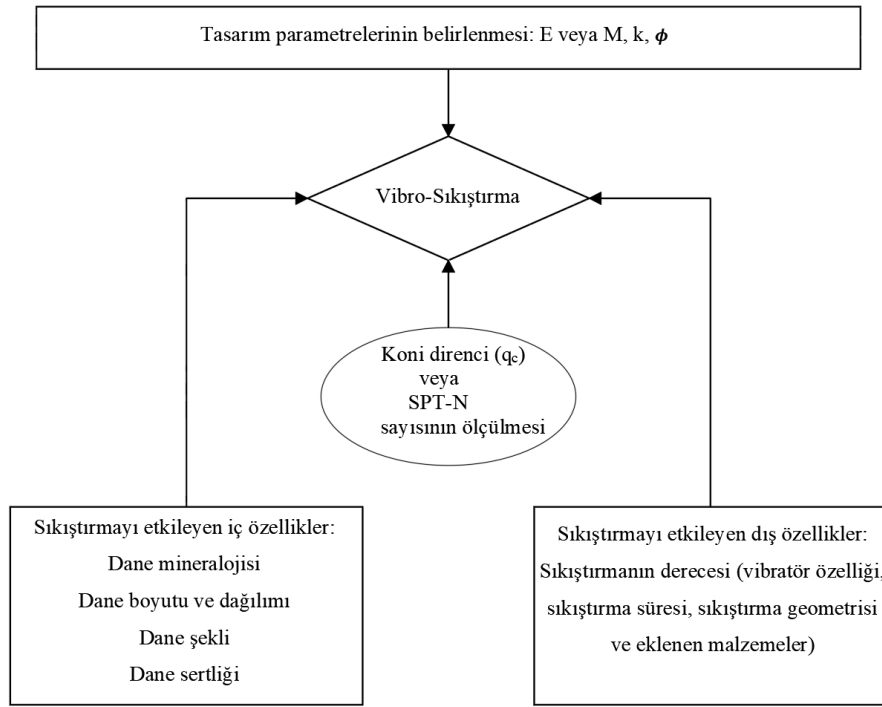
Projede, SPT sonuçlarının değerlendirildiği veya belirtildiği durumlarda Çizelge 3.3, SPT-N vuruş sayılarının, eşdeğer koni direncine (q_c) çevrilmesi için faydalı bir kılavuz verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Tasarım amacıyla SPT-N'nin q_c değerine, derinlik, rölatif sıkılık ve doygunluktan bağımsız olarak çevrilmesi (Schmertmann, 1970).

Zemin tipi	q_c (kg/cm ²)/N _{SPT} (vuruş/30 cm)
Silt, kumlu silt ve az kohezyonlu siltli kum karışımları	2
Temiz, ince ile orta kumlar ve az siltli kumlar	3.5
İri kumlar ve az çakıllı kumlar	5
Kumlu çakıllar ve çakıllar	6

Sahada ölçülen penetrasyon dirençleri ile rölatif sıkılık arasındaki korelasyonlar, silika kumları söz konusu olduğunda tasarım için iyi araçlar sağlar. Bununla birlikte, yüksek karbonat içeriğine sahip kumlar söz konusu olduğunda özel dikkat gereklidir. Karbonat içeriği %70'in altında olan kireçli zeminler genellikle kireçsiz zeminlere benzer şekilde davranır. Daha yüksek karbonat içerikleriyle karşılaşıldığında, bu zeminler genellikle %100'e kadar CaCO₃ içerir ve mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi çok daha zordur. Kaba danelerin tümü, koni penetrasyonu sırasında dane kırılmasına maruz kalan kabuk parçacıklarından elde edilir ve buna ek olarak, yer altı su tablasının üstündeki yüksek koni penetrasyon dirençleri, çoğunlukla kurak ülkelerde meydana gelen bir fenomen olan yağış nedeniyle parçacık sementasyonunun sonucudur (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Daha yüksek taşıma güçleri elde etmek ve oturmaları sınırlandırmak için granüler zeminlerin boşluk oranını düşürmeye yönelik olağan uygulamalara ek olarak, vibro kompaksiyon yöntemleri çok çeşitli geoteknik sorunları çözmek için uygundur. İstinat yapılarının tasarımı için, üzerlerine etki eden yatay toprak basıncını azaltmak için titreşimli sıkıştırma kullanılabilir. Yöntem; yük taşıma kapasitelerini artırmak için kazıkların ve kesonların altında ve çevresinde de kullanılabilir ve yöntem aynı zamanda açık denizde de etkin bir şekilde uygulanabildiğinden, limanların inşası ve benzeri işlerde özellikle önemlidir (Kirsch ve Kirsch, 2016). Şekil 3.18'deki akış şeması, kumun sıkılığını etkileyen zemine özgü (iç) özellikleri, etkilenebilecekleri dış ölçülerle birlikte vermektedir. Rölatif sıkılık, tasarım için gerekli diğer parametrelerin çoğunu oluşturmak için yerinde ölçülmesi gereken kumun temel mühendislik özelliğini temsil eder.



Şekil 3.18 : Kum üzerindeki yapıların tasarımı için karşılıklı bağımlılıklar (Kirsch ve Kirsch, 2016).

3.10 Sıvılaşma ve Vibro Kompaksiyon

Suya doymun gevşek durumdaki kohezyonsuz zeminler dinamik yükler altında (deprem), boşluk suyu basınçlarının aşırı mertebelere çıkmasına, efektif gerilmelerin çok küçük değerlere inmesi ve zemin kayma direncini kısmen veya tamamen kaybetmesine ve bir sıvı gibi davranmasına neden olmaktadır. Zeminlerin bu davranış biçimine “sıvılaşma” denilmektedir. Sıvılaşma esas olarak doymuş, kohezyonsuz, ince ve orta daneli zeminlerde meydana gelir. Dinamik yükler altında drenaj engellenirse, boşluk suyu basıncı (u), örtü yükü gerilmesine eşit olana kadar artacaktır ve sonuçta efektif gerilme “ σ' ” sıfır olana kadar devam edecektir. Bu noktada kum, kayma mukavemetini tamamen kaybedecek ve bir sıvı gibi hareket edecektir.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.10)$$

Burada; σ' : efektif gerilme, σ : toplam gerilme, u : boşluk suyu basıncı

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için basitleştirilmiş prosedür ilk olarak Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilmiş ve daha sonra periyodik olarak düzeltilmiş ve yeni gelişmeler ve bulgularla güncellenmiştir. Bu prosedür, 15 m'yi

geçmeyen nispeten sığ derinliklerde Holosen alüvyonu veya akarsu çökeltileri üzerinde düz veya hafif eğimli alanlar ile ilgilenir. Prosedür, bir sismik olayından kaynaklanacak döngüsel gerilme oranını (CSR) tanımlar ve deprem sırasında zeminin hareket ettirebildiği sıvılaşma direnci olarak da adlandırılan döngüsel direnç oranı (CRR) ile karşılaştırır. Bu oran Denklem 3.11’de verilmektedir.

$$GS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.11)$$

Burada; CRR: devirsel direnç oranı, CSR: devirsel gerilme oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem 3.12’den hesaplanmaktadır.

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (3.12)$$

Burada; σ_{v0} ve σ'_{v0} : incelenen derinlikte toplam ve efektif düşey gerilmedir. a_{max} : zeminde oluşan maksimum ivme değeri, g: yer çekimi ivmesi, r_d : derinlik azaltma faktörü olup Denklem 3.13’den hesaplanabilmektedir.

$$r_d \begin{cases} z < 9.15 \text{ m için} & 1.0 - 0.00765z \\ 9.15 \text{ m} < z < 23 \text{ m için} & 1.7174 - 0.0267z \end{cases} \quad (3.13)$$

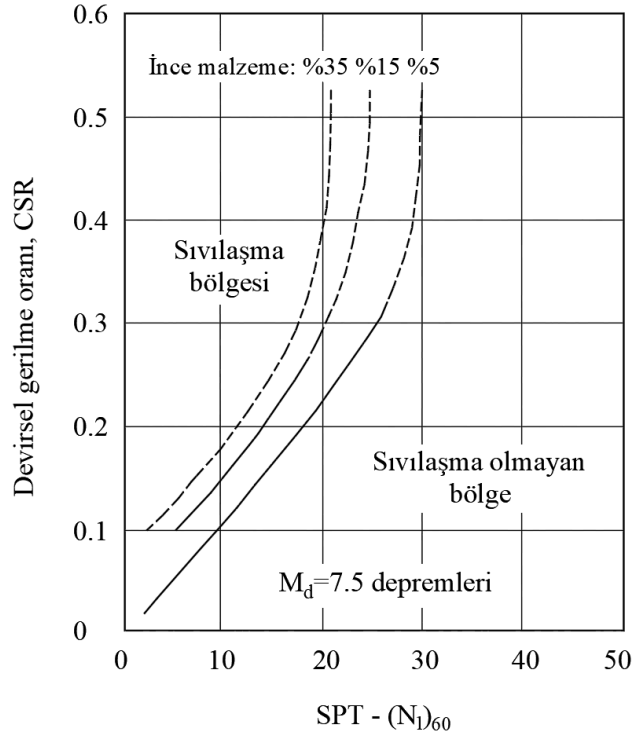
z: incelenen derinliktir ve birimi metredir.

Burada, devirsel direnç oranı (CRR) CPT uç direnci q_c veya SPT-N değerleri ile tayin edilmektedir. Devirsel gerilme oranı (CSR) ile zeminin devirsel direnç oranını (CRR) temsil eden düzeltilmiş SPT-N değerleri $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki Şekil 3.19’de verilmektedir.

Burada; $(N_1)_{60}$: Örtü yükü düzeltilmesi yapılmış SPT-N değerleri, FC: İnce dane oranı (Dane boyutu < 0.074 mm küçük olan kil-silt yüzdesi), M_d : Depremin moment büyüklüğüdür. Şekil 3.19’da görüleceği üzere, eğer incelenen kum biriminde $(N_1)_{60}$ değerleri ile devirsel gerilme oranı (CSR)’nın temsil ettiği bölge, belirtilen sınırların solunda kalıyorsa sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı > 1 ’dir. Yani sıvılaşma riski yoktur. Eğer bu bölge belirtilen sınırların sağında ise sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı < 1 ’dir ve sıvılaşma potansiyeli vardır ve önlem alınmalıdır. Eğer bu bölge, belirtilen

sınırların üzerinde ise, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı = 1 demektir. Diğer bir deyişle üç grafikte belirtilen sınırlar GS=1 durumunu temsil etmektedir.

Sıvılaşmaya karşı önlem olarak vibro kompaksiyon yöntemi uygulanacak ise, abakta belirtilen CSR değeri sabit kalmak kaydıyla, belirtilen sınırların soluna geçebilmek için gerekli olan en küçük $(N_1)_{60}$ değeri saptanarak, hedeflenen iyileşme değeri saptanmış olacaktır. Vibro kompaksiyon uygulamasından sonra yapılacak SPT deneyleri ile hedeflenen değerin üzerine çıkılıp çıkılmadığı belirlenebilir.



Şekil 3.19 : SPT-(N₁)₆₀ değerlerine bağlı olarak sıvılaşma direnci (Seed ve diğ, 1985).

Deprem esnasında zeminde ve vibro kompaksiyon kolonlarında kayma deformasyonları oluşacağından, zemin tarafından taşınan kayma gerilmesinin (τ_s) toplam kayma gerilmesine (τ) oranı denklem 3.14'deki gibi hesaplanabilmektedir (Erol ve diğ, 2016).

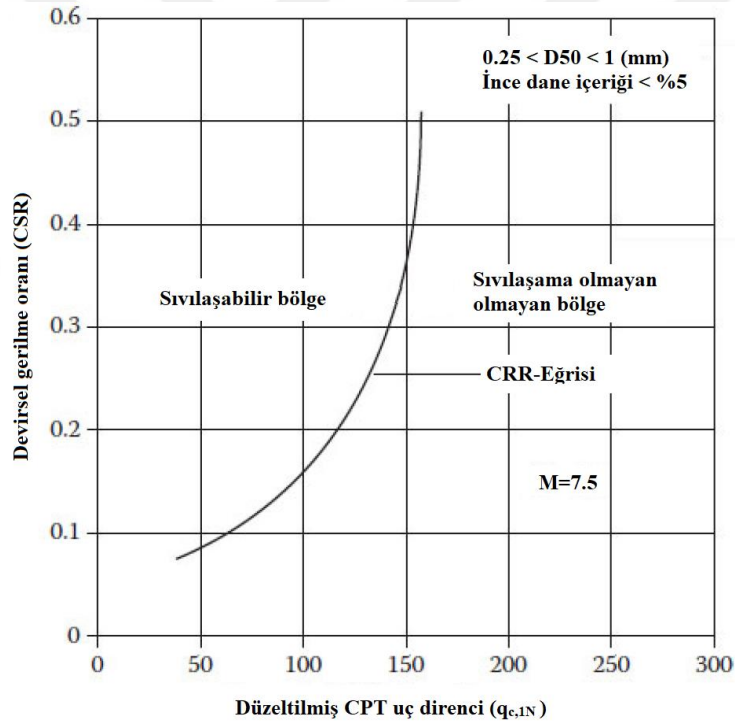
$$(\tau_s/\tau) = \frac{1}{G_r \left[a_r + \frac{1}{G_r} (1 - a_r) \right]} \quad (3.14)$$

Burada, G_r : modül oranıdır. Modül oranı, rijit kolon kayma deformasyon modülünün (G_c) doğal zeminin kayma deformasyon modülüne (G_s) oranı olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 3.20’de, SPT-N verileri için hazırlanan grafiğe benzer olarak ampirik verilerden geliştirilen, ancak düzeltilmiş CPT uç direnci $q_{c,1N}$ ve CSR arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu abak ince dane içeriği %5’in altında olan temiz kumlar için CRR eğrilerini gösterir ve 7.5 büyüklüğünde bir deprem için geçerlidir. Ölçülen koni penetrasyon direncinin q_c normalizasyonu, efektif örtü yükü gerilmesi (σ'_{v0}) için düzeltilerek elde edilir. Örtü yükü düzeltilmesi yapılmış uç direnci denklem 3.15’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$q_{c,1N} = C_q \cdot \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \quad (3.15)$$

Burada, $C_q = (p_a / \sigma'_{v0})^n$ ve $p_a=100$ kPa ve n değeri temiz kumlar için 0.5, kil için 1 değerini almakta arada kalan zemin türleri için 0.5-1.0 arasında bir değer almaktadır.



Şekil 3.20 : CPT verilerinden CRR hesaplama grafiği (Idriss ve Youd, 1997).

3.11 Kalite Kontrol Kriterleri

Vibro kompaksiyon projesinin tasarımı yapıldıktan sonra, hedeflenen kriterlerin sağlandığının güvence altına alınabilmesi için proje gerekliliklerine göre uygun bir kalite kontrol programı oluşturulmalı ve titizlikle takip edilmelidir. Zemin iyileştirmesinin gerekli kalitesini doğrulamak için koni penetrasyon deneyi gibi

yerinde deneyler yapılabilir. Diğer yöntemler ile ilgili detaylar, Avrupa Standardı (BS EN 14731, 2005; EN 14731, 2005)'da açıklanmaktadır.

Buradaki temel hedef, uygulama parametrelerinin her bir uygulama noktasında doğru olarak yapıldığının güvence altına almaktır. Vibro kompaksiyon yönteminde, uygulama noktaları taş kolon yönteminde olduğu gibi çakıl ve mıcır ile beslenmediğinden doğal zemindeki oturma miktarları iyileşme oranının bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Uygulama noktaları kum malzemesi ile beslendiğinden vibro kompaksiyon noktasına doldurulan kum miktarı mutlaka kayıt altına alınmalıdır. Bunun yanında, vibro kompaksiyon uygulamasında için su yönetimi çok önemli bir konudur, normalde başka bir işleme tabi tutulmadan önce çalışma pozisyonundan uzağa yerleştirilmiş çökeltme havuzlarına yönlendirilmesi gerekir. Benzer şekilde, dolgu malzemesinin çalışma alanına iyi organize edilmiş bir şekilde taşınması ve gerektiğinde yerinde stoklanması önem arz etmektedir. Eklenen malzemenin sürekli ölçümü, sıkıştırma öncesinde ve sonrasında saha çalışma seviyesi ölçümleriyle birlikte, uygulamadan sonra sıkıştırmanın başarısının değerlendirilmesine yardımcı olacaktır.

Vibro kompaksiyon projelerinde kullanılan, SPT, CPT, Menard presiyometre deneyi (MPT), kayma dalgası hızı ölçümü (Vs), tam ölçekli yük deneyi (LT) ve DDM gibi sıkıştırma uygulamasının etkinliğinin ölçümü için uygun deney yöntemleri, kendine özgü avantajları veya dezavantajları ile birlikte Çizelge 3.4'te listelenmiştir. Özel durumlarda ve özel bilgi mevcut olduğunda, diğer yerinde saha deneyleri de kullanılabilir.

Çizelge 3.4 : Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için kumda sıkıştırma sonuçlarını ölçmek için uygun deney yöntemleri (Idriss ve Youd, 1997).

Deney Tipi	Ulaşılabilir Veri	Tekrarlanabilirlik	Derinlik	İndeks veya Özellik Ölçümü	Numune Alımı	Zemin Değişkenliği Tespit Edebilme	Maliyet
SPT	Bol	Orta	Derin	İndeks	Evet	İyi	Düşük
BPT	Seyrek	Kötü	Derin	İndeks	Hayır	Kötü	Düşük
CPT	Bol	Çok Kötü	Derin	İndeks	Hayır	Çok İyi	Düşük
MPT	Seyrek	Kötü	Orta Derinlik	Özellik	Hayır	Kötü	Orta
Vs	Limitli	İyi	Derin	Özellik	Hayır	Kötü	Düşük
LT	Limitli	Çok İyi	Sığ	Özellik	Hayır	Çok Kötü	Yüksek
DDM	Limitli	Kötü	Sığ	Özellik	Evet	Çok İyi	Çok Yüksek

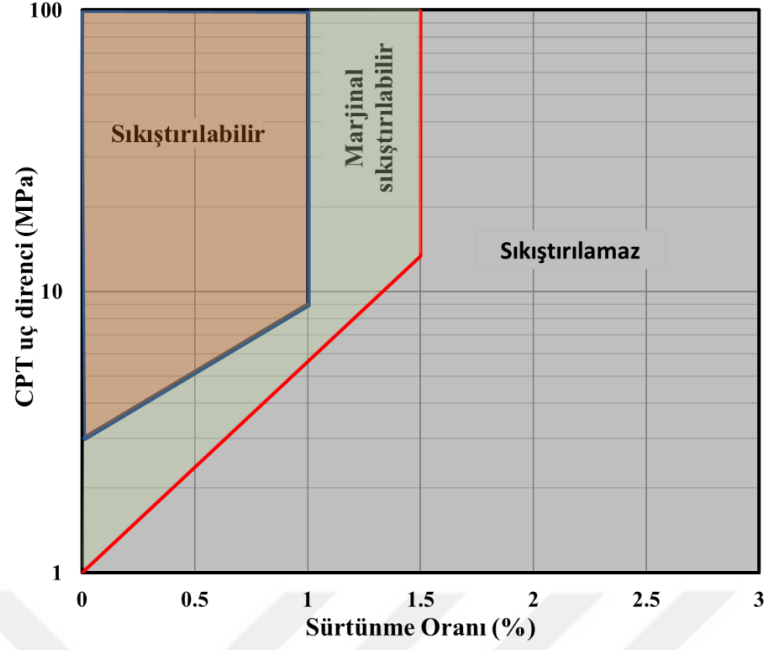
Not: SPT, standart penetrasyon deneyi; BPT, Becker penetrasyon deneyi; CPT, koni penetrasyon deneyi; MPT, Menard presiyometre deneyi; Vs, kayma dalgası hızı ölçümü; LT, yükleme deneyi; DDM, direkt yoğunluk ölçüm deneyi.

Ayrıca, herhangi bir sıkıştırma sonrası deney başlamadan önce, sıkıştırılmış zemindeki titreşim hareketinin yarattığı tüm boşluk suyu basıncı artışlarının tamamen dağılmasına izin verilmesi çok önemlidir. Zemindeki aşırı boşluk suyu basıncının tamamen rahatlaması, normalde sıkıştırmadan yaklaşık bir hafta sonra meydana gelmektedir. Şüphe duyulması durumunda, daha uzun bir süre beklemek veya boşluk suyu basıncının zaman içindeki gelişimini doğrudan ölçmek daha iyi olacaktır. Sıkıştırma sonrası deney üzerinde herhangi bir olumsuz etkiden kaçınmak için, aynı anda hiçbir sıkıştırma çalışmasının yapılmaması, deney alanı çevresinde yaklaşık, 30 m yarıçapına sahip bir bölge için bu kritere uyulması önerilmektedir (Kirsch ve Kirsch, 2016).

Vibro kompaksiyon uygulamasında en çok kullanılan kalite kontrol yöntemlerin başında koni penetrasyon deneyi (CPT) gelmektedir. Şekil 3.21’de Massarsch (1991) tarafından önerilen ve koni uç direncinin, sürtünme oranının bir fonksiyonu olarak verildiği grafik vibro kompaksiyon uygulamasının, sıkıştırılabilir sınırlarını göstermektedir. Sıkıştırma kriteri, sıklıkla derinlik düzeltmesi (örtü yükü gerilmesi) yapılmamış haliyle ifade edilmektedir.

Vibro kompaksiyon ile sıkıştırma uygulamalarında uygun zemin koşulları, sürtünme oranının (R_f) %1’i aşmadığı ve uç direncinin (q_c) > 3 MPa olduğu zeminler olarak tanımlanmaktadır. Marjinal sıkışmanın sağlanabildiği zeminler, sürtünme oranı %1.0 - %1.5 olan uç direncinin 1-3 MPa aralığında olan zeminlerdir (Massarsch, 1991). Bununla birlikte, SPT verileri için kullanılan örtü yükü gerilmesi düzeltmesinin, CPT verileri için uygulanması gereklidir. Koni gerilmelerinin gerilme düzeyine göre ayarlanmadığı durumlarda, koni verilerinin gerilme seviyeleri dikkate alınmadan tüm derinlik boyunca uygulanması, zemin birikintisinin üst katmanlarının aşırı sıkıştırılmasına ve daha derin katmanların gevşek kalmasına neden olabilir.

Erol ve diğ. (2016), vibro kompaksiyon uygulamalarında zeminlerin geçirgenlik özellikleri uygulama hızını ve kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Vibratörün rahat ilerleyebilmesi için geçirimsizlik katsayısının $k = 10^{-5}$ m/sn’den daha büyük olması, ayrıca aşırı su kayıpları yüzünden vibratörün ilerlemesinin yavaşlamaması için geçirimsizlik katsayısının $k = 10^{-2}$ m/sn’den daha küçük olması gerektiğini vurgulanmaktadır.



Şekil 3.21 : CPT verilerine dayalı derin sıkıştırma için zemin sınıflandırması (Massarsch, 1991).

Brown (1977) tarafından geliştirilen bir diğer yaklaşımla, zemin dane boyutuna göre vibro kompaksiyon uygulamasının uygunluğu için bir bağıntı önerilmektedir.

$$SN = 1.7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}} \quad (3.16)$$

Burada; D_{50} : Zeminin %50'sinin geçtiği dane çapıdır, D_{20} : Zeminin %20'sinin geçtiği dane çapıdır, D_{10} : Zeminin %10'sinin geçtiği dane çapıdır. Küçük uygunluk sayıları yöntemi, dolgu tabakasının (zeminin) vibro kompaksiyon yöntemiyle iyileştirilmesine karar vermekte kullanılan, kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Uygunluk sayılarının $SN=1-30$ aralığında olduğu zeminlerde, vibro kompaksiyon uygulamasının uygun olduğu belirtilmektedir. Uygunluk sayısına göre (SN) zeminlerin uygunluk derecesi Çizelge 3.5'te özetlenmektedir.

Çizelge 3.5 : Granüller zeminlerin uygunluk sayısına (SN) göre derecesi (Brown, 1977).

Uygunluk Sayısı (SN) Aralığı	Uygunluk Derecesi
1-10	Çok iyi
10-20	İyi
20-30	Orta
30-50	Kalitesiz
> 50	Uygun değil

3.12 Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)

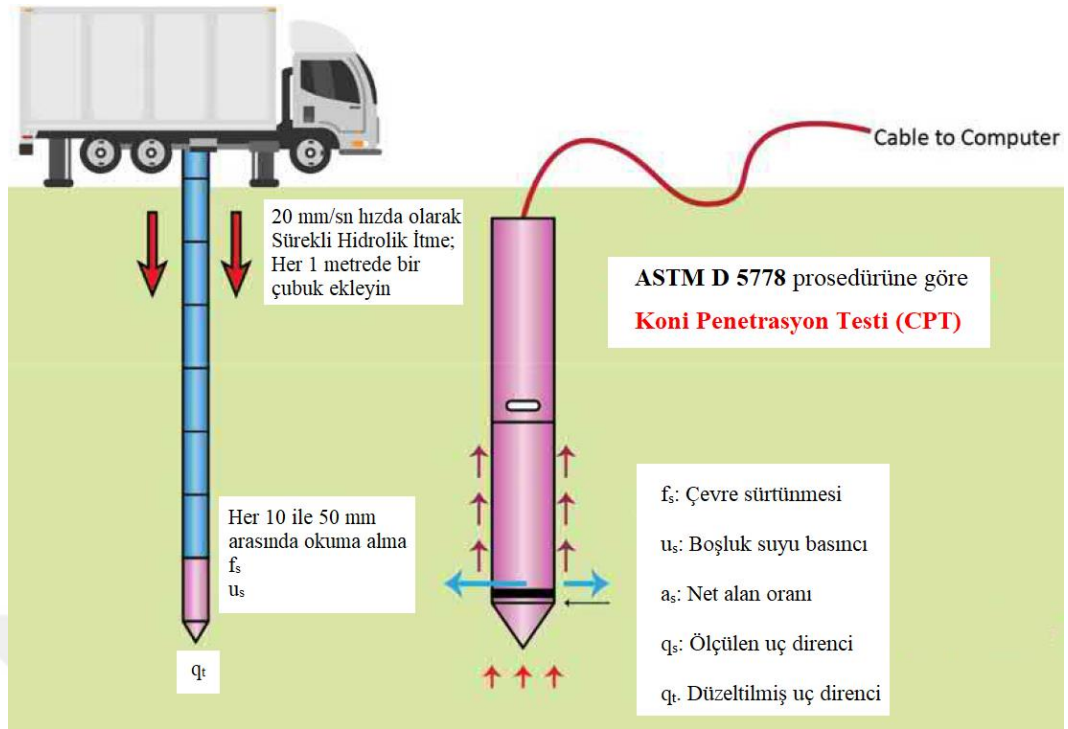
Kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş numunelerin elde edilmesiyle ilgili zorlukların bir sonucu olarak, vibro kompaksiyon uygulamalarında en yaygın kullanılan kalite kontrol yöntemi koni penetrasyon deneyidir. Bundan dolayı kalite kontrol yöntemleri içerisinde, bu deney yöntem daha detaylı olarak ele alınacaktır.

Koni penetrasyon deneyinde zeminin mühendislik özellikleri doğrudan ölçülemediği için, laboratuvar kalibrasyon odası deneyleri kullanılarak, CPT ölçümlerinin zemin tipi ve mühendislik özellikleri (birim ağırlık, rölatif sıkılık ve modül dahil) ile ampirik korelasyonlar geliştirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu deneyler, tüm prosedür (numune hazırlama, konsolidasyon ve koni penetrasyonu dahil) laboratuvarında yürütüldüğü ve kolaylıkla izlenebildiği ve kontrol edilebildiği için CPT tabanlı korelasyonlar ve kalibrasyonlar geliştirmek için en güvenilir ve kesin deneysel verileri sağlamaktadır. Diğer yerinde deneyler arasında CPT'nin öne çıkmasının başlıca nedenleri aşağıdaki gibidir (Mitchell, 1988):

- CPT basit ve nispeten ekonomiktir.
- Geniş bir deneyime dayalı bilgi mevcuttur ve derinlikli sürekli kayıtlar alınır.
- Sonuçlar hem deneysel hem de analitik temellerde yorumlanabilir.
- Penetrometre noktası ve sürtünme manşonu ile çeşitli farklı sensörler birleştirilebilir.

60° derecelik bir tepe açısına sahip 10 cm² yüzey alanına sahip bir koni genellikle standart olarak kabul edilir. Konik noktanın üzerinde bulunan sürtünme manşonu standart 150 cm² alana sahiptir. Koni penetrometre, 20 mm/s'lik standart bir hızla itilir (Eslami ve diğ, 2019). Koni penetrometreyi zemine sürmek için standart 1.00 m uzunluğunda çubuklar kullanılır. Standart çubuklar, koni ile aynı dış çapa, yani 35.7 mm'ye sahiptir. Veri toplama sistemleri tarafından ölçülen zemin direnci daha sonra kablolar aracılığıyla kamyonun içinde bulunan bilgisayarlara aktarılır ve burada veriler dijital formatlara dönüştürülür.

Ortak iki CPT ölçümü, koni uç direnci, qc ve çevre sürtünmesi, fs'dir. Koni uç direnci, öngörülen alan üzerindeki dikey kuvvetin oranıdır. Şekil 3.22'de (ASTM D5778-20, 2020)'e göre Koni penetrasyon deneyi gerçekleştirme prosedürü özetlenmektedir.



Şekil 3.22 : Koni penetrasyon deneyi gerçekleştirme prosedürü (Eslami ve diğ, 2019).

3.12.1 Hesaplanan parametreler

CPT kayıtlarının zemin profili oluşturma; zemin mukavemet ve dayanım parametrelerinin tahmin edilmesi, kazık kapasitesinin belirlenmesi gibi farklı amaçlar için kullanılması için, ölçülen birincil CPT verilerine dayalı olarak bazı ikincil parametreler hesaplanır. Yaygın olarak kullanılan parametrelerden bazıları şunlardır:

Düzeltilmiş koni uç direnci (q_t) (Boşluk suyu basıncı düzeltilmesi yapılmış):

Koninin arkasındaki açıkta kalan yüzeyin eşit olmayan alanları üzerindeki su basıncının etkisi nedeniyle, ölçülen q_c , gerçek toplam gerilmeyi temsil etmez. Özellikle yumuşak killerde bu zorluğun üstesinden gelmek için, q_c aşağıdaki ilişki kullanılarak düzeltilmelidir (Baligh ve diğ, 1981; Campanella ve diğ, 1982).

$$q_t = q_c + u_s(1 - a) \quad (3.17)$$

Burada; q_t : düzeltilmiş toplam koni uç direnci, q_c : ölçülen toplam koni uç direnci, u_s : ölçülen boşluk suyu basıncı, a : net alan oranı

Düzeltilmiş çevre sürtünmesi (f_t) (Boşluk suyu basıncı düzeltilmesi yapılmış):

Bu parametre yalnızca, sürtünme çubuğunun her iki ucunda boşluk suyu basıncı ölçüldüğünde geçerlidir.

Sürtünme oranı (R_f); Denklem (3.18)'de gösterildiği gibi ve yüzde olarak ifade edilir.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (3.18)$$

Boşluk suyu basıncı katsayısı: (B_q)

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (3.19)$$

Burada; Δu = boşluk suyu basıncı ($u-u_0$), u_0 = Hidrostatik boşluk suyu basıncı ve σ_{v0} = toplam örtü yükü gerilmesi

3.12.2 Rölatif sıkılık (D_r)

Yerinde sıkılık deneyinin (sadece sıg derinlikte ölçülebilir) kullanımının sınırlamaları nedeniyle, D_r 'yi ampirik korelasyonlara dayalı olarak değerlendirmek için CPT verilerinin kullanılması gereklidir. Bu bağlamda, CPT verisinden rölatif sıkılığın elde edilmesi için geliştirilmiş bazı önemli korelasyonlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : CPT verilerinden D_r hesaplama için geliştirilen korelasyonlar (Eslami ve diğ, 2019).

Referans	Önerilen korelasyon	Notlar
(Baldi ve diğ, 1986)	$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{q_c}{C_0 (\sigma'_v)^{0.55}} \right)$	C_0 and C_2 : zemin sabitleri, $C_0 = 157$ ve $C_2 = 2.41$ normal konsolide
(Jamiolkowski ve diğ, 2001)	$D_r = 26.8 \ln \frac{q_c / p_a}{(\sigma'_v / p_a)^{0.5}} - b_x ;$	q_c and σ'_v 'nin birimi kPa 'dır
	$D_r^2 = \frac{Q_{cn}}{305 Q_c Q_{OCR}};$	$\begin{cases} b_x = 52.5 \text{ Yüksek sıkıştırılabilir kumlar} \\ b_x = 67.5 \text{ Orta sıkıştırılabilir kumlar} \\ b_x = 82.5 \text{ Düşük sıkıştırılabilir kumlar} \end{cases}$
(Kulhawy ve Mayne, 1990)	$Q_{cn} = \frac{q_t / p_a}{\sqrt{\sigma'_v / p_a}}$	Q_c =sıkıştırılabilirlik faktörü (yüksek için 0.91, orta için 1.0 ve düşük için 1.09).
		Q_{OCR} =Aşırı kondolidasyon faktörü $OCR^{0.18}$
(Mayne, 2007)	$D_r = 100 \left[0.268 \ln \left(\frac{q_t}{\frac{p_a}{\sqrt{\sigma'_v / p_a}}} \right) - 0.675 \right]$	

Vibro kompaksiyon uygulamalarında kabul kriteri, yaygın olarak rölatif sıkılıktır. Bundan dolayı; CPT verileri, zeminin ince dane içeriği ve yukarıda verilen bağıntılardan biri kullanılarak, belirtilen rölatif sıkılık değeri için koni uç direncinin derinlik ile değişimi belirlenebilir. Bu araştırma kapsamında, Baldi ve diğ. (1989) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

4. VAKA ANALİZİ

4.1 İnceleme Alanı

Proje sahası, Karayipler’de yer alan mevcut bir limanın genişletilmesi ve onarım işlerini kapsamaktadır. Liman, birçok gemi tarafından barınma ve depolama için kullanılmaktadır ve çok sayıda yolcu gemisi tarafından düzenli olarak ziyaret edilmektedir. Proje sınırları; mevcut tüm iskeleleri, rıhtımları, bağlantı yapılarını, dolfin yapılarını, arazi ıslahı için çevreleyen suları ve tarama işlemlerini içermektedir. Vaka çalışmasının yapıldığı proje sahasının fotoğrafı Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

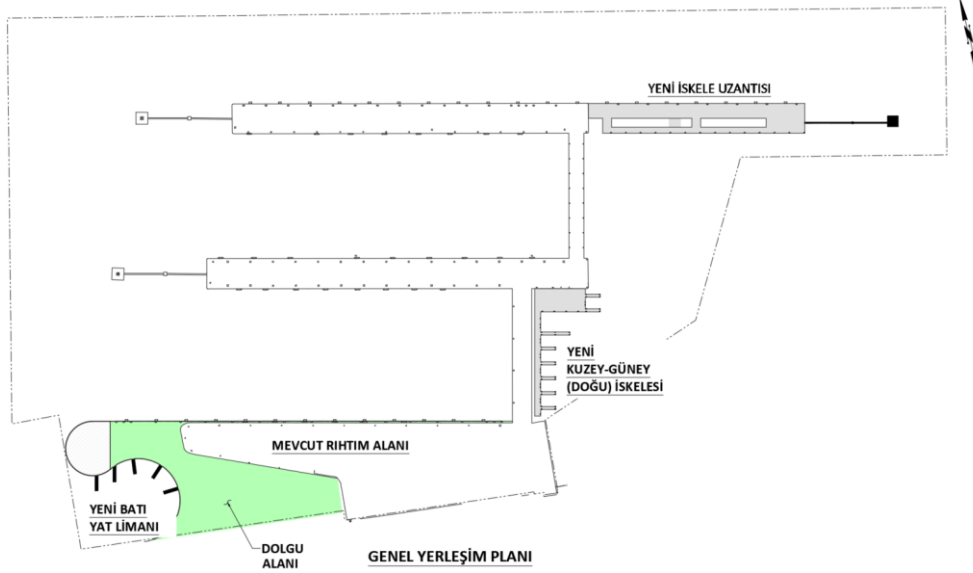


Şekil 4.1 : Vaka analizinin yapıldığı proje sahası.

4.2 Proje Hakkında Genel Bilgiler

Proje; en kuzeydeki mevcut kruvaziyer gemi iskelesinin doğusunda bulunan ve 250 metre uzunluğunda bir iskele uzantısının inşaatı ve limanın güney ucunda, iskele yapısı ile sahil şeridi arasındaki rıhtım alanının hidrolik dolgu kumu ile doldurularak, geri kazandırılmasından oluşmaktadır. Değişiklikler, mevcut iskelesinin doğusunda bulunan ve kruvaziyer iskelelerine erişim sağlayan kuzey-güney iskelesinin genişletilmesini de içermektedir.

Bu çalışmada, mevcut rıhtım alanı ve sahil şeridi arasında kalan bölgenin geri kazandırılması için yapılan deniz tabanı tarama çalışmaları, hidrolik olarak yerleştirilen, hidrolik dolgu kumun üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar ve saha deneyleri ile vibro kompaksiyon uygulamasına ait bilgiler sunulacaktır. Projenin gelen yerleşim planı ve dolgu sahası Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Proje sahasının genel yerleşim planı.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar:

- i. Oasis ve Epic sınıfı yolcu gemilerin limana yanaşabilmeleri için deniz tabanı taraması çalışmaları (4 bölgede),
- ii. Kruvaziyer iskele yapısının iyileştirilmesi ve genişletilmesi,
- iii. Batı yat limanına ve kruvaziyer iskelesi arasında kalan bölgenin hidrolik dolgu kumu ile doldurulması ve vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi.

Yukarıda sıralanan çalışmalar, yeni yapıların inşasının yanı sıra, mevcut iskele yapısının arkaya bağlanan bir kombi duvar sistemi (boru şeklindeki kazık+palplanş kombinasyonu) ile onarımını gerektirmektedir.

4.3 İnceleme Alanı Hakkında Genel Jeolojik Bilgiler ve Zemin Profili

Proje sahasının bulunduğu alan, çarpışan Kuzey Amerika ve Karayip levhalarının oluşturduğu ve bu bölgede bir dizi alçak ada ile sonuçlanan bir karbonat platformları zincirinden oluşmaktadır. Florida Boğazlarının oluşumuyla ilgili olarak, yüzeye yakın kaya birimleri, tipik olarak deniz birikintileri ve mercan kaplamasıyla üst üste gelen

tortul karbonat kaya türleridir (kireçtaşları). Kireçtaşının üst katmanları genellikle ince tabakalı, zayıf, yıpranmış kaya, kum mercikleri, kırık mercan ve kabuklardan oluşmaktadır.

Proje sahası, önemli sismik olaylarla bilinen Karayip Sismik bölgesinin kuzeyinde yer almaktadır. Proje sahasının bulunduğu adada deprem sırasında oluşacak en büyük yer ivmesinin 0.1 g olacağı belirtilmiştir.

Proje sahasındaki ön zemin araştırmaları kapsamında, Şekil 4.3'teki sondaj yerleşim planında gösterildiği gibi toplam beş adet sondajından oluşmaktadır. Bu sondajlardan B-5 ve B-7 karada, B-4, B-6 ve B-9 nolu sondajları denizde gerçekleştirilmiştir. Zemin ve kaya koşullarının örneklenmesi, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve NQ kaya karotlama ile gerçekleştirilmiştir. Sondaj yerleşim planı ve laboratuvar deney sonuçları aşağıda özetlenmektedir.



Şekil 4.3 : Sondaj planı (ENCO International Ltd., 2019).

Karada yapılan sondajlarda (B-5 ve B-7) karşılaşılan katmanlar, bu sondaj bölgelerinde 10.00 metre derinliğe kadar dolgu olarak yorumlanmıştır. Bu dolgu katmanları tipik olarak iri- orta daneli kumlardan ve eser miktarda ince malzeme içeren çakıl bantlarından oluşmaktadır. Bu dolgu tabakasına ait standart penetrasyon deneyi (SPT-N) değerleri, 5 ile 24 arasında değişmektedir.

Denizde yapılan sondajlarda (B-4, B-6 ve B 9) 7.50 ile 10.50 metre arasında değişen su derinlikleriyle karşılaşılmıştır. Bu bölgelerde daha önce tarama yapıldığı bilinmektedir. B-9 sondajında, kalınlığı 2.00 ile 2.50 metre arasında değişen, çökelmiş kumlarla karşılaşılmıştır. Karşılaşılan deniz çökelleri, çeşitli miktarlarda kabuk parçaları ile birlikte iri daneli kumdan oluşmaktadır. Bu tabakalar içindeki SPT-N değerleri 4 ile 15 arasında değişmektedir.

Deniz çökellerinin altında ve diğer sondajlardaki çamur bandının hemen altında yumuşak kalkerli kireçtaşı ana kayasına rastlanmıştır. Yüzeye yakın kireçtaşı ana kayası tipik olarak ince tabakalı, çatlaklı kalkerli kireçtaşından ve kabuk parçaları içeren iri daneli kum mercceklerinden oluşmaktadır. SPT deneylerinde kireçtaşı parçaları olarak örneklenirken, sondaj aletleri ile yapılan gözlemler, kalkerin katmanlar halinde tabakalaştığını göstermiştir. Genel olarak, kireçtaşı katmanları arasındaki kum mercceklerinin kalınlığının derinlikle azaldığı saptanmıştır.

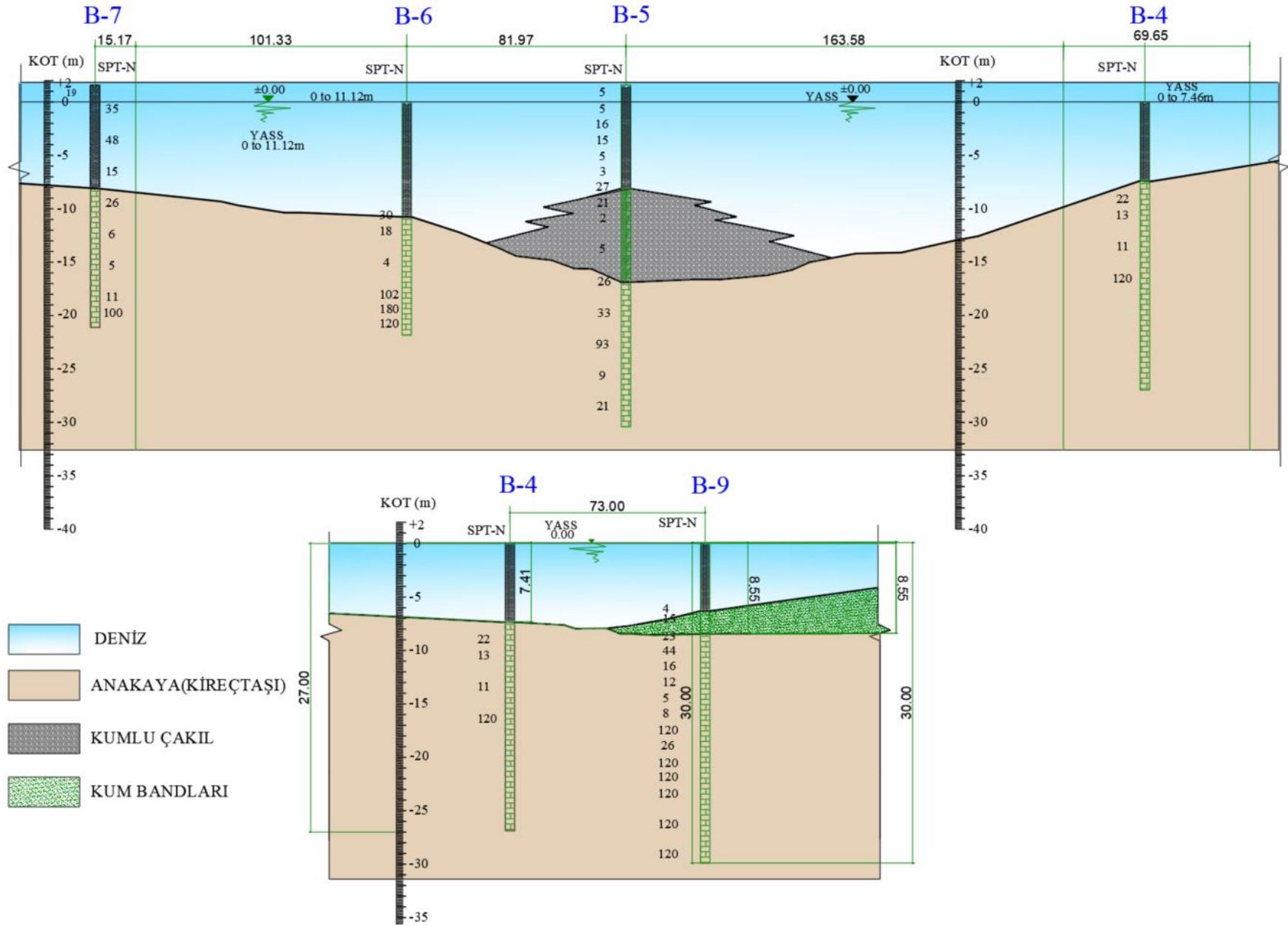
-18.30 metre ile -22.50 metre arasındaki derinliklerde, eklem aralığının önemli ölçüde azaldığı ve daha yüksek SPT değerlerine neden olduğu anlaşılmakta ve SPT-N değerlerinin 6 ile 100 vuruş arasında değiştiği görülmektedir. -22.50 metrelerin altında, SPT-N değerleri, 33 ile 100 arasında değişkenlik göstermektedir. Örneklemenin NQ kaya karotlama teknikleri kullanılarak yapıldığı derinliklerde (-18.30 ve -22.50 metrelerin altında), örnek kalite oranının %33 ile %83 arasında değiştiği görülmektedir. Kaya kalitesi (RQD) değerleri tipik olarak düşük ve %0 ile %25 arasında değişmektedir.

Mevcut sondajlar ait idealize zemin profili Şekil 4.4'te verilmektedir. Sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları Çizelge 4.2'de özetlenmektedir. Karada yapılan sondajlarda, yeraltı suyu kotları tipik olarak bitişik limandaki su seviyesi ile tutarlıdır. Yeraltı suyu, gelgit dalgalanmaları, fırtına dalgalanmaları ve diğer hava olayları ile ilgili olarak dönemsel olarak değişkenlik gösterebileceği bilinmektedir. Yapılan saha araştırmaları sonucunda elde edilen zemin/kaya parametreleri Çizelge 4.1'de ve laboratuvar test sonuçları Çizelge 4.2'de özetlenmektedir. Çizelge 4.1'de verilen zemin/kaya parametreleri, çelik çakma kazıkların tasarımı için belirlenmiş ve kullanılmıştır.

Çizelge 4.1 : Zemin/Kaya parametreleri.

Tabaka	p-y Eğrisi	ϕ' (derece)	c' veya c_u (kPa)	γ' (kN/m ³)
Dolgu	YASS üzerindeki Kum Tabakası	30	0	17.60
Dolgu	YASS altındaki Kum Tabakası	30	0	7.70
Denizsel Çökelti	YASS üzerindeki Kum Tabakası	30	0	7.70
Yumuşak Kireçtaşı (-24.5 kotunun üzerinde)	Ayrışmış Kaya	NA	550	8.95
Yumuşak Kireçtaşı (-24.5 kotunun üzerinde)	Gözenekli Kireçtaşı	NA	2413	8.95

NA: Uygun Değil



Şekil 4.4 : İdealize zemin profili.

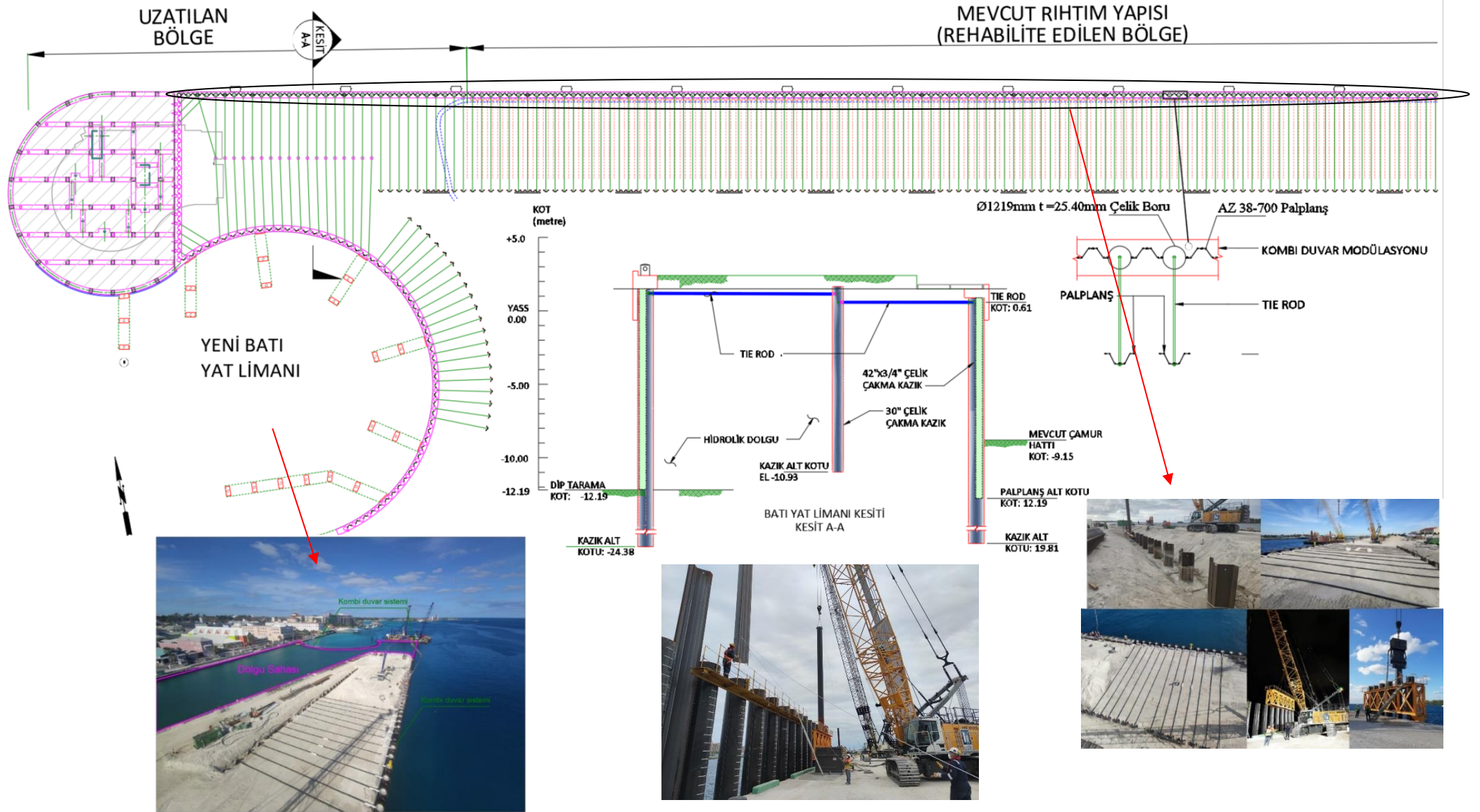
Çizelge 4.2 : Laboratuvar deney sonuçları (ENCO International Ltd., 2019).

	Derinlik (m)	Tabaka	W_P	W_L	I_P	Kum (%)	Silt/Kil (%)
B-1	14	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	87	13
B-1	17	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	77	23
B-1	25	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	92	8
B-1	29	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	88	12
B-2	10	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	94	6
B-2	11	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	92	8
B-2	16	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	86	14
B-2	29	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	94	6
B-3	10	Denizsel çökelti	NP	NP	NP	84	16
B-3	13	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	85	15
B-3	23	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	94	6
B-4	12	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	92	8
B-4	16	Ana Kaya/Kum Lensleri	NP	NP	NP	79	21

Not: NP Plastik olmayan

4.4 Kombi Duvar Sistemi

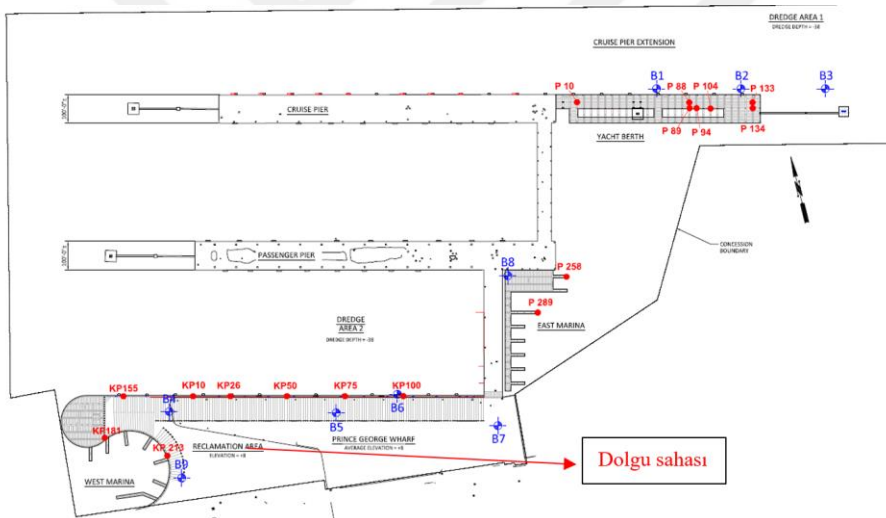
Liman yenileme ve genişletme projesi kapsamında, mevcut iskele ve sahil şeridi arasındaki bölgenin deniz tabanı taranarak elde edilen hidrolik dolgu malzemesi ile doldurulup, sıkıştırılabilmesi ve mevcut iskelenin genişletilebilmesi için Şekil 4.5'te görüldüğü gibi çelik kazıklar ve palplanşlardan oluşan bir destekleme sistemi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Uygulanan destekleme sisteminde, yatay kuvvetler Şekil 4.5'te görüleceği üzere çelik bağlantı çubukları (Tie-Rod) vasıtasıyla taşınmaktadır. Kombi duvar sistemi, hidrolik dolgu ve vibro kompaksiyon işlemlerinden önce tamamlanmıştır.



Şekil 4.5 : Kombi duvar yerleşim planı ve kombi duvar çakma işleri (ENKA, 2021a).

4.4.1 PDA-DLT deneyleri

Proje sahasında önce hidrolik dolgu kumun ağırlığı altında meydana gelen yatay yüklerin taşınabilmesi için kombi-duvar sisteminin ön yüzü teşkil edilmiş daha sonra vibro kompaksiyon uygulaması tamamlanmıştır. Kombi duvar sisteminin oluşturan çelik çakma kazıkların tasarım yüklerinin doğrulanması amacıyla dolgu sahasında 8, toplamda 17 adet çelik çakma boru kazığa, tasarım yüklerinin doğrulanması amacıyla PDA (Kazık Çakım Analizi) ve DLT (Dinamik Yük Deneyi) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde, kazıkların, teknik şartnamede belirtilen kriterleri sağladığı ve tasarım yüklerini güvenle taşıdığı görülmüştür. Hidrolik dolgu kumu, kombi duvar sistemi ile oluşturulan bu hücrenin içerisine yerleştirildiği için PDA ve DLT deneyleri dolgunun yerleştirilmesinden önce tamamlanmış ve sistemin güvenliği olduğu belirlenmiştir. Deney kazıklarının genel yerleşim planı üzerindeki konumları Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : PDA-DLT deneyi yapılan kazıkların konumu (ENKA, 2021a).

4.5 Proje Kapsamında Yapılan Deniz Tabanı Taraması Çalışmaları

Proje kapsamında, dört bölgede deniz tabanı tarama çalışması, bir bölgede hidrolik dolgu çalışması yapılmıştır. Deniz tabanı taraması yapılan bölgelerin alt kotları ve taranan hacimler sırasıyla;

- Deniz tabanı tarama sahası-1: -11.60 metre (-38 feet), 106197 m³ (138900 yd³)
- Deniz tabanı tarama sahası-2: -11.60 metre (-38 feet), 6499 m³ (8500 yd³)
- Deniz tabanı tarama sahası-3: -6.40 metre (-21 feet), 13915 m³ (18200 yd³)
- Deniz tabanı tarama sahası-4: -11.60 metre (-38 feet), 918 m³ (1200 yd³)

Toplamda, yaklaşık 127530 m³ (166800 yd³) malzeme deniz tabanı taranarak dolgu sahasına boru hatları vasıtasıyla taşınmıştır. Deniz tabanı tarama sahaları Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Taranan dolgu malzemesi boru hatları vasıtasıyla ıslah alanına pompalanmıştır. Yaklaşık 60000 m³ malzeme fazla taranmıştır. Dolgu sahası, daha önce taranan 130000 m³ malzeme ile doldurulduğu için fazla taranan malzeme, dolgu sahasına taşınmış ve akabinde kara araçları vasıtasıyla proje sahasından tahliye edilmiştir. Fazla taranan malzeme ile birlikte toplam taranan hacim miktarı, 190000 m³’dür.



Şekil 4.7 : İslah ve deniz tabanı tarama sahaları yerleşim planı.

4.5.1 Deniz tabanı tarama işlerinde kullanılan ekipmanlar

Tarama ve ıslah işlerinde kullanılan ekipmanlar Çizelge 4.3’te verilmektedir. Yumuşak kireçtaşı malzemesi kesici taraklar vasıtasıyla parçalanıp eleklerden geçirilerek, ıslah alanına hidrolik olarak yerleştirilmiştir.

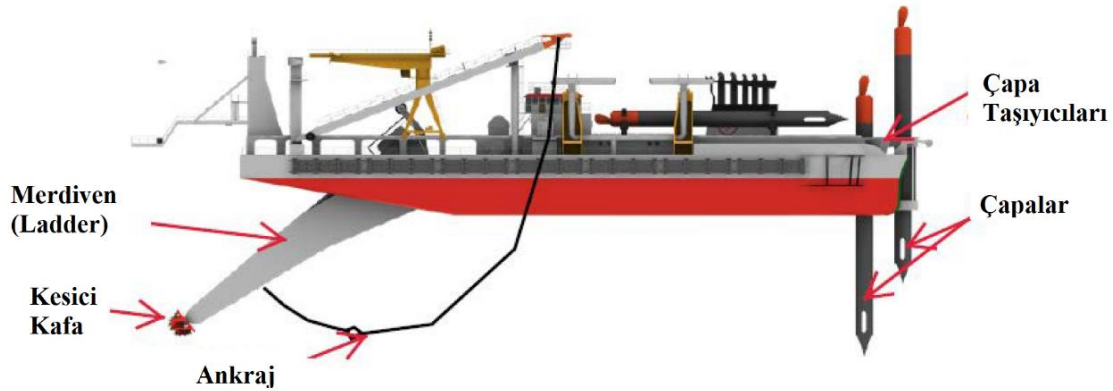
Çizelge 4.3 : Tarama ve ıslah işlerinde kullanılan ekipmanlar.

No.	Tip	Adet
1	Kesici Emici Tarayıcı (Cutter Suction Dredger-CSD)	1
2	Römorkör	1
3	Araştırma (Survey) Botu	1
4	Yüzer Boru Hattı	1
5	Kara Tabanlı Boru Hattı	1
6	Buldozer	2
7	Ekskavatör	1
8	Loder	1
9	Vanalar, Hızlı Kalplinler	Değişken
10	Yük Mavnaları	1
11	Paletli/Mobil Vinç	1
12	Multicat	1

Tarama işlerinde kullanılan Kesici Emici Tarayıcının (CSD) çalışma mekanizması ve ana parçaları Şekil 4.8’de şematik olarak anlatılmaktadır. Kesici merdiven, ana gövdeye yatay bir menteşe ile bağlanmıştır ve merdiven, kaldırma halatlarından sarkmaktadır. Bu çelikten imal edilmiş yapı, uç kısmına monte edilmiş kesici kafa vasıtasıyla kesme kuvvetlerini ana gövdeye iletmektedir. Merdiven kaldırma halatları, kesici kafanın dikey olarak konumlandırılmasını sağlamaktadır. Kesici kafa kendi mili etrafında dönmekte ve tipik olarak sökülebilir dişlere sahip altı bıçağa sahiptir. Diş tipi, taranacak zemin veya kayanın özelliklerine bağlıdır.

Tarama sırasında, CSD arkada bir çapa sistemi ve önde iki yan ankraj ile yatay olarak konumlandırılmaktadır. Çapa sisteminin üç işlevi vardır;

- i. Tarak gemisinin etrafında dönebileceği sabit bir nokta sağlamak için.
- ii. Kesici kafayı tarak gemisinin uzun doğrultusunda ileriye doğru hareket ettirmek için.
- iii. Rüzgâr, dalga, akıntı ve kesme kuvvetlerini deniz tabanına aktarmak için.



Şekil 4.8 : CSD kesici emici tarayıcı (ENKA, 2021b).

4.5.2 Tarama kontrollü CSD

CSD için deniz tarama kontrolü, aşağıdaki sistemler ve ekipmanlar aracılığıyla sağlanmaktadır:

- Konumlandırma Sistemi
- Kesici İşletim Sistemi

Tarama kontrolü, tarak gemisinin konumlandırma sistemine dayanır. Bu amaçla, gerçek gemi ve kesici kafa konumlarını belirlemek için DGPS (Diferansiyel Küresel Konumlandırma Sistemi) /RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik Konumlandırma) sistemi, Gyro pusulası ve gelgit güncellemeleri dâhil olmak üzere çeşitli sistemler kullanılır.

Bu sonuçlar, taranacak alana göre, tarak gemisinin hareketlerini izlemek için seyir ekranlarında görüntülenir.

Ekranda görüntülenen bilgiler şunları içerir:

- Tarama alanı ve tarama profiline göre gemi ve kesici kafanın konumu.
- Batimetrik veriler.
- Taranacak olan katman kalınlığını gösteren diferansiyel çizelge.
- Orijinal deniz dibi seviyesini ve tasarım seviyesini işaretleyen, tarama alanının boyuna ve çapraz profilleri.

Kesici işletim sistemi, gemiye göre kesici kafanın konumunu belirleyen ve açılı dönüştürücüler içeren bir sistemdir. Bu, konumlandırma sistemi ve tarama kontrol bilgisayarları için mevcut olan kesici kafanın rölatif X, Y ve Z koordinatlarını sağlar.

Tarama kontrol bilgisayarı, kesici kafanın tarama seviyesi ve pompa ayarları dâhil olmak üzere çoklu tarama işlemlerini kontrol eder. Konumlandırma bilgisayarı ile tarama kontrol bilgisayarı arasındaki ara yüz, tarama öncesi araştırma bilgisinden ve tasarım gereksinimlerinden sisteme yüklenen önceden tanımlanmış seviyelerin, tarama işleminin kontrolünü sağlamaya yarar.

4.5.3 Boru hattı

Taranan malzemenin ıslah alanına hidrolik olarak yerleştirilebilmesi için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmıştır:

- Yüzer boru hattı: yaklaşık 400 m uzunluğunda, 12.00 m ve 18.00 m uzunluklarında, 900mm iç çapa sahip, kilitli çelik erkek-dişi kaplinlerle veya cıvatalı olarak birbirine monte edilmiştir. Potansiyel olarak 800mm veya 900mm iç çapa sahip flanşlı kauçuk hortumlar da mobilize edilmiştir.
- Sahil boru hattı: yaklaşık 1000 m uzunluğunda, iç çapı 900 mm olan 12.00 m veya 6.00 m'lik boru kesitlerinde ve birbirine cıvatalı olarak monte edilmiştir.
- Boşaltma alanında kıyı boru hattının farklı kollarının yapımı için hidrolik valfler ve güç üniteleri, dirsekler vb.
- Yedek tarama ekipmanı parçaları
- Yedek parça ekipmanı
- Boşaltma alanı için ofis ve depolama üniteleri

4.5.4 Kesici emici tarak (CSD) gemisi kayıtları

CSD'nın günlük olarak kaydettiği ve raporladığı veriler şunlardır;

- Çalışma saatleri
- Çalışma alanı
- Tahmini taranan hacim
- 5 dakikalık tolerans ile etkinlik günlüğü
- Günlük taranan bölümünün planı
- Aşağıdakiler için gecikme raporları:
 - Hafriyat ve atık
 - Gemi trafiği
 - İslah alanı için gecikmeler
 - Operasyon sırasında karşılaşılabilecek olumsuz fiziksel koşullar, yapay engeller veya diğer durumlar.

4.6 Hidrolik Dolgu Kum Malzemesi ile Arazi İslahı

Arazi ıslahı genellikle deniz tabanı, nehir yatağı veya diğer alçak arazinin yüksekliğini arttırma (doldurma) veya hendeklerle çevrili sulu bir alandan suyu pompalayarak (polder) yeni arazi oluşturma süreci olarak tanımlanır (van't Hoff ve van der Kolff, 2012). Doldurma yoluyla arazi ıslahı kuru zemin hareketi ile gerçekleştirilebileceği gibi, aynı zamanda hidrolik dolgu ile de gerçekleştirilebilir. Hidrolik dolgu, aşağıdaki ardışık faaliyetlerle yeni arazi oluşturulması olarak tanımlanır. Hidrolik kum dolguları ile arazi ıslahı için (Düzceer ve Gokalp, 2002b), (Gokalp ve Düzceer, 2003, 2005);

- i. Yüzer ekipmanlar (taraklar) ile malzeme alanı veya tarama alanındaki dolgu malzemesinin taranması;
- ii. Dolgu malzemesinin tarama alanından ıslah alanına tarak, mavna veya boru hattı ile taşınması;
- iii. Dolgu malzemesinin ıslah alanına dolgu malzemesi ve (proses) suyu karışımı olarak yerleştirilmesi.

Proje alanında, her bir deniz tabanı tarama sahasındaki zemin verisi örnekleri incelenerek, uygun olmayan malzeme taranmamıştır. Bu nedenle, tüm taranan dolgu malzemesi ıslah alanına pompalanmıştır. Uygun olmayan malzemenin ve fazla taranan dolgu malzemesini geçici olarak depolamak için, mevcut rıhtımın güney-batı tarafında tarama faaliyetinden önce sedde oluşturulmuştur. Sedde'nin duvarlarının inşası için gerekli olan kireçtaşı malzemesi dışarıdan temin edilmiş ve set duvarının çevresi tarama çalışmalarına başlanmadan önce tamamlanmıştır.

4.6.1 İslah alanının doldurulması

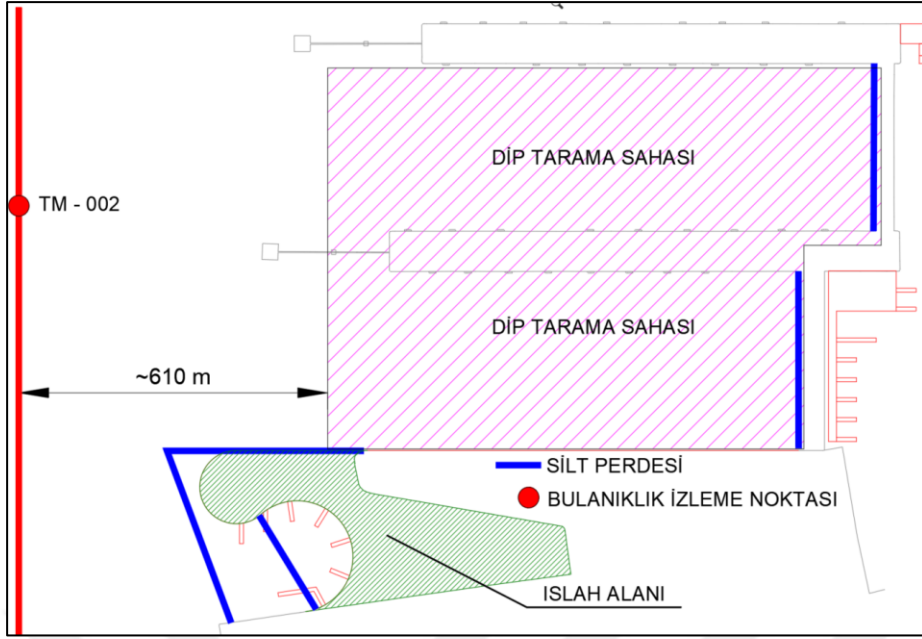
Vibro kompaksiyon uygulaması sırasında taranan malzemeyi içeride tutmak, ıslak malzemenin ve suyun dışarıya sızmasını önlemek için, ıslah alanının çevresine ilave muhafaza bentleri kurulmuştur. Bentler; ekskavatörler, buldozerler ve ıslah alanında geri kazanılmış malzeme kullanılarak, kuru hafriyat ekipmanı kullanılarak inşa edilmiştir.

4.6.1.1 Boru hatlarının kurulumu

Sahil şeridi boyunca kurulan boru hattı tipik olarak civata ve somunlarla bağlanan 12.00 m uzunluğunda sert, flanşlı çelik elemanlardan oluşmaktadır. Flanşlar arasındaki contalar sızdırmaz bir bağlantıyı sağlamak için kullanılmıştır. Boruların çapı 900 mm ve boru hattının, güzergâhın şeklini takip etmesini sağlamak için bir dizi daha kısa uzunluktaki boru ve dirsek kullanılmıştır. Boşaltma sırasında, boru hattının uç noktasını uzatmak için alternatif tipte borular kullanılmıştır: Tipik olarak 18.00 m uzunluğunda hızlı bağlantı boruları kullanılmıştır.

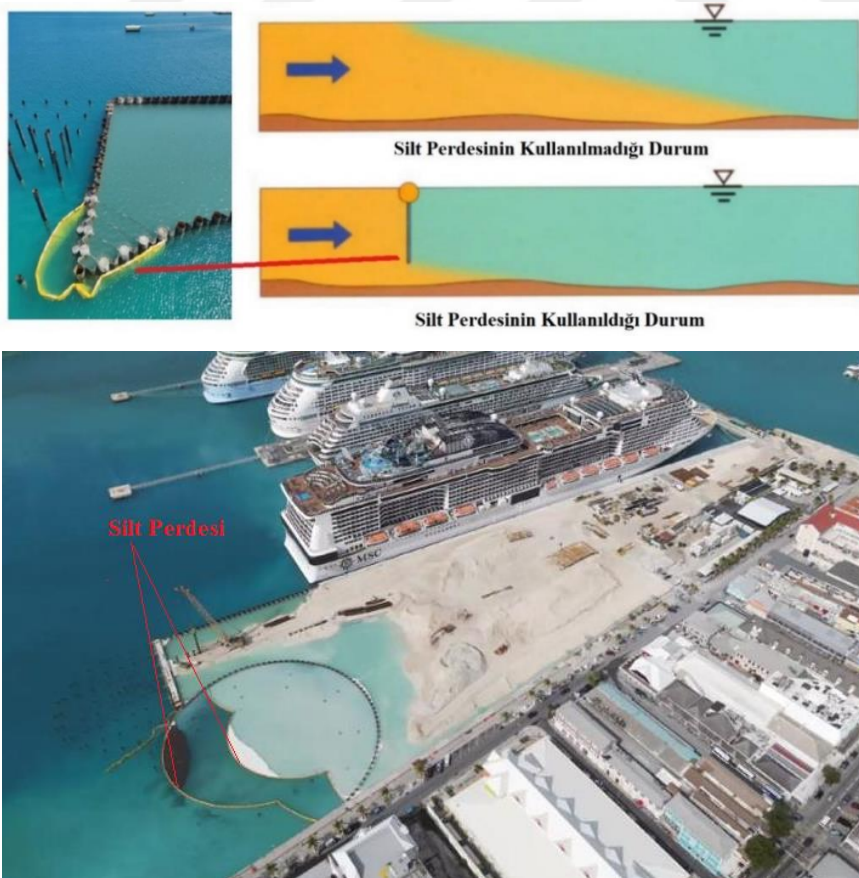
4.6.1.2 Silt perdeleri

Kıyı boru hatları vasıtasıyla, taranan malzeme tahliye alanına pompalanmıştır. Islah sahasının batı tarafında, proses suyu kombi duvardan tahliye edilmiştir. Kombi duvarın dışına, bulanıklığı azaltmak için çift sıra silt perdesi yerleştirilmiştir. Tüm sahada yerleştirilen silt perdelerinin konumu Şekil 4.10’da gösterilmektedir.



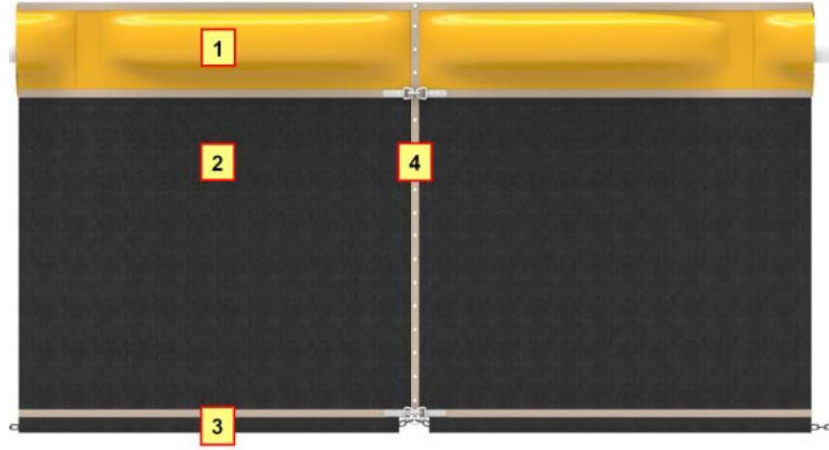
Şekil 4.10 : Silt perdelerinin konumu.

Silt perdesinin çalışma prensibi Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de özetlenmektedir. Görüleceği üzere silt perdesi, ince daneli zeminin önünde bir bariyer görevi göstererek, bulanıklığı büyük ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 4.11 : Silt perdesi (solda) ve çalışma prensibi.

Silt perdesi aşağıdaki şekil 4.12’de gösterildiğı gibi 4 ana bileşenden oluşmaktadır:



şekil 4.12 : Silt perdesi.

- i. Yüzdürme ve esneklik sağlamak için birkaç parça strafor içeren yüzer cep.
- ii. Silt bariyeri görevi gören geotekstil perde.
- iii. Perdeyi dikey konumda tutmak için alt kısmındaki balast zinciri.
- iv. Sürekli bir bariyer oluşturmak için prangalar kullanarak oluşturulmuş, silt perdesinin iki parçası arasındaki bağılantılar.

4.6.1.3 Bulanıklık izleme

Bulanıklık seviyelerinin, tarama faaliyetlerinin yapıldığı alanlardan 610 metre (2000ft) uzaklıkta 29 NTU değerini geçmemesi için üç noktada bulanıklık değerleri, günlük olarak takip edilmiştir. Bulanıklık değerleri, denize indirilen ve bir bulanıklık sensörü ile donatılmış çok parametrelili bir ölçüm prob’u kullanılarak veya analiz edilen konumdan bir su numunesi alınarak, yerinde Nefelometrik Bulanıklık Birimleri (NTU) cinsinden ölçülmüş ve günlük olarak raporlanmıştır.

4.6.2 Hidrolik dolgu üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri

Hidrolik dolgu kumun fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi ve seçilen iyileştirme yöntemine uygunluğunun tespit edilebilmesi amacıyla, tüm dolgu sahasını temsil edecek sıklıkta numuneler alınmış ve bu numuneler üzerine çeşitli deneyler yapılmıştır. Hidrolik dolgu kumundan alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler şöyledir;

- Elek Analizi & Hidrometre Deneyi = 13 adet (ASTM C136 / C136M-19, 2019; ASTM D6913-04, 2009)
- Standart Proktor Deneyi = 2 adet (AASHTO T99, 2011; ASTM D698, 2012)
- CBR Deneyi = 2 adet (ASTM D1883-16, 2016)

4.7 Vibro Kompaksiyon Uygulaması

Vibro kompaksiyon sisteminin kurulumu, şematik olarak Şekil 4.13'te anlatılmaktadır. Vibratör (Vibroflot) su jeti, su tedarikini vibroflota bağlı 90 m³/saat kapasiteye sahip hidrolik pompa vasıtasıyla sağlamaktadır. Su jeti, penetrasyon aşamasında maksimum kapasitede (~90 m³/saat) ve sıkıştırma aşamasında ise yaklaşık ~45 m³/saat kapasite ile çalıştırılmaktadır. Vibroflot paletli vinç yardımıyla hareket ettirilerek uygulama noktalarına yanaştırılmaktadır.

Vibro kompaksiyon uygulamasında kullanılacak vibroflotun teknik özellikleri Çizelge 4.4'de verilmektedir.

Çizelge 4.4 : Uygulamada kullanılan vibroflotun teknik özellikleri.

Hidrolik Güç	180/245	kW/HP
Eksantrik moment	4	kg.m
Operasyon frekansı	40/2400	Hz/rpm
Merkezkaç kuvveti	258	kN
Hidrolik debi	300	L/dakika
Maksimum basınç	360	bar
Toplam ağırlık	2750	kg

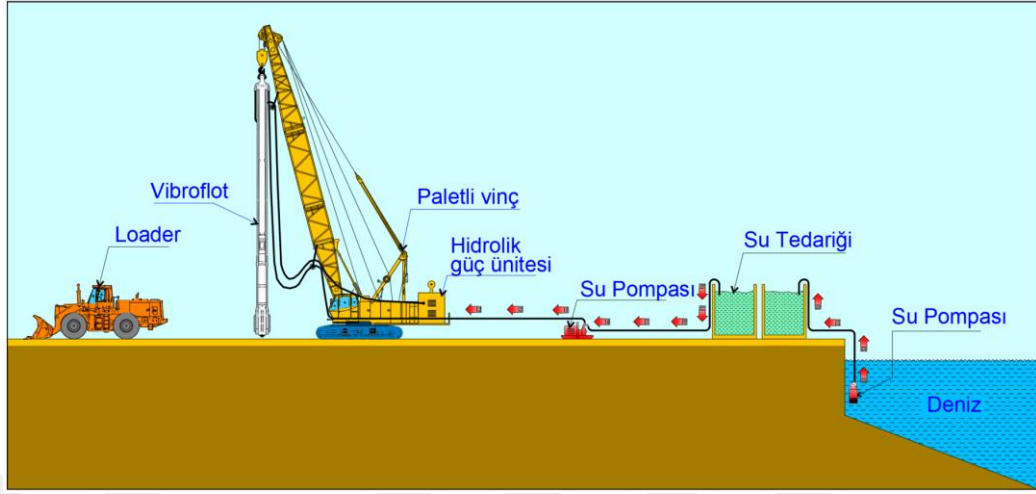
Vibroflota hidrolik gücü, sisteme bağlı hidrolik güç ünitesi sağlamaktadır. Vibro kompaksiyon uygulamasında, sıkıştırma boyunca sistemin kum ile sürekli geri beslenmesi gereklidir. Sistemi oluşturan ana unsurlar aşağıdaki şekilde şematik olarak anlatılmaktadır.

Vibro Kompaksiyon Kayıtları

Her vibro kompaksiyon noktası için hazırlanan rapor, aşağıdaki bilgileri içermektedir;

- Vibro kompaksiyon imalat noktasının numarası ve koordinatı,
- Uygulama tarihi,
- Her bir penetrasyon kademesinin süresi ve toplam uygulama süresi,
- Vibroflot basıncı,

- Penetrasyon Derinliği,
- Gecikmeler ve olağan dışı zemin koşullarının ayrıntıları.

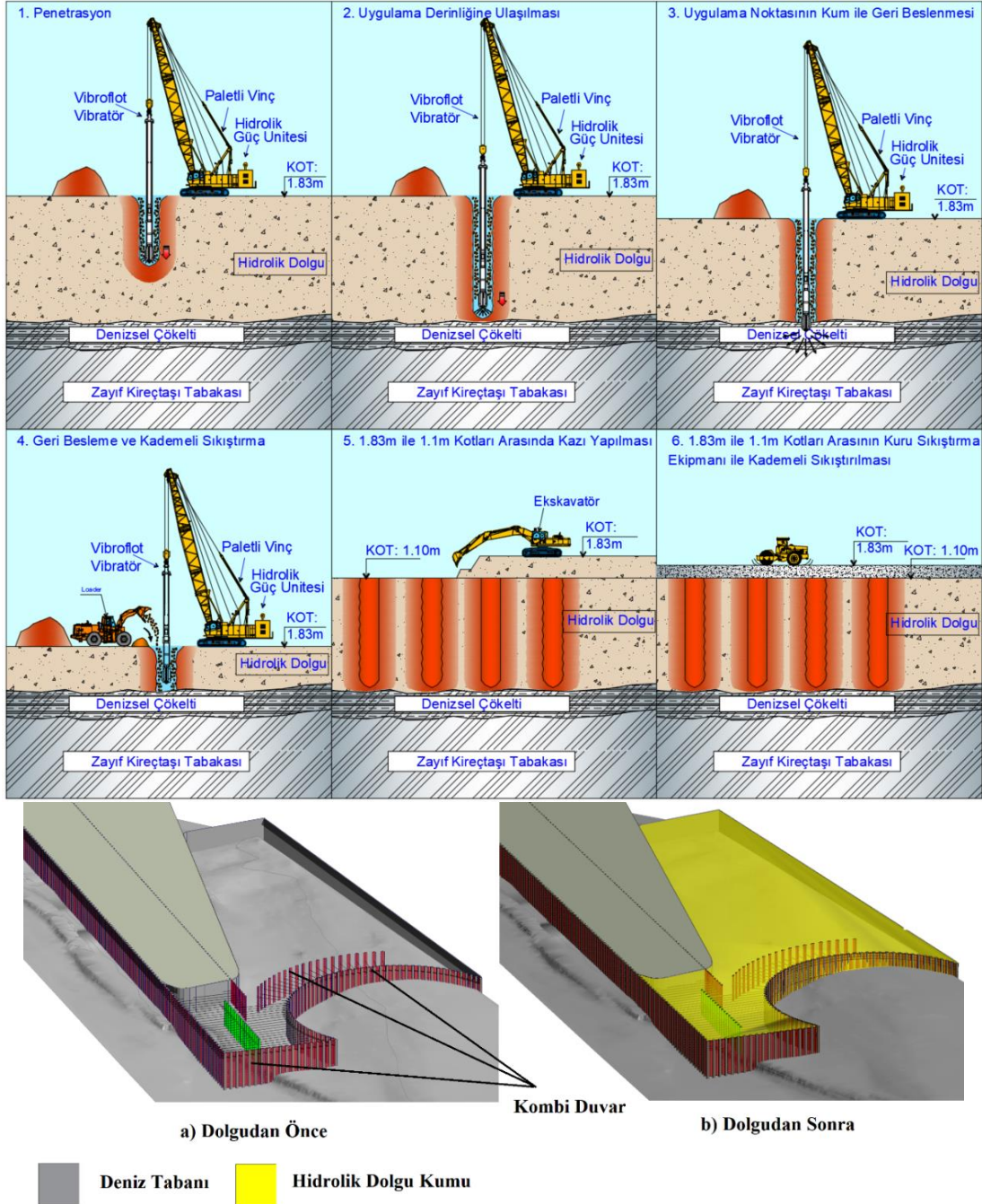


Şekil 4.13 : Vibro kompaksiyon kurulumu (KASKTAŞ, 2021a).

Uygulama Sıralaması;

- Saha, +1.83m (+6.00ft.) kotundaki platform seviyesine kadar tesviye edilmiş ve uygulama noktalarının koordinatları işaretlenir.
- Vincin ucuna asılı olarak tutulan vibratör (vibroflot), imalatı yapılacak vibro kompaksiyon noktasının üzerine yerleştirilmiştir. Vibroflot; kendi ağırlığı altında ve su jeti yardımıyla, esas olarak vibroflotun titreşiminin yardımıyla, belirlenen tasarım derinliğine veya sağlam zemin tabakasına sokulur.
- Vibroflotu çevreleyen halkada, basınç altında su bulunması nedeniyle deliğin etrafındaki zeminin çökmesi engellenir. Tasarım derinliğine ulaşıldığında veya vibroflot refüye ulaştığında geri çekilir. Refü, iki yolla tanımlanmıştır; vibroflotun hidrolik basıncının, optimum çalışma basıncını aşması durumunda ve/veya penetrasyon hızının 0.30 m/dakikanın altına düşmesi durumu. Bu durumlardan hangisi önce gerçekleşirse, refü kabul edilmektedir.
- Tasarım derinliğine ulaşıldığında veya vibroflot refü verdiğinde, uygun dolgu malzemesi üstten eklenir, vibroflot kademeli olarak geri çekilirken gevşek hidrolik dolgu kumu istenen seviyeye kadar sıkıştırılır.
- Sıkıştırma işlemi sırasında, sıkıştırma verilerini kaydetmek ve kontrol altında tutmak için özel bir elektronik bilgi toplama ünitesi kullanılmıştır. (Hidrolik basınç, hidrolik debi, derinlik ve zaman)

Vibro kompaksiyon uygulaması tamamlandıktan sonra, +1.83m (+6.00ft.) ile 1.07m (+3.50 ft.) kotları arasındaki geçici çalışma platformu (dolgu malzemesi) kazılır. Daha sonra; gergi çubukları (tie-rod) bağlanır ve +3.50 ft. Kotundaki saha, + 6.00 ft. kotuna kadar mekanik yöntemlerle ve uygun dolgu malzemesi ile geri doldurulur ve kuru sıkıştırma ekipmanları sıkıştırılır. Şekil 4.14'te proje kapsamında izlenen uygulama adımları detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 4.14 : Proje kapsamında izlenen uygulama adımları ve sahanın 3D görünümü (KASKTAŞ, 2021b).

4.7.1 Dolgu kalitesinin değerlendirilmesi

Dolgu kalitesinin değerlendirilmesi için iki yöntem kullanılmıştır. Bunlar;

1. Stok sahasından, elek analizi için alınan numunelerin Brown (1977) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak uygunluk sayılarının (SN) belirlenmesi.
2. Proje sahasında gerçekleştirilen Ön-CPT sonuçları ve (Massarsch, 1991) tarafından önerilen ve koni uç direncinin, sürtünme oranının bir fonksiyonu olarak verildiği grafik yardımıyla dolgu kalitesinin seçilen sıkıştırma yöntemine uygunluğunun değerlendirilmesi.

Stok sahasından alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen elek analizi sonuçlarına göre hesaplanan uygunluk sayıları Çizelge 4.5'te özetlenmektedir.

Çizelge 4.5 : Elek analizi sonuçları.

NUMUNE NO.	Cu	Cc	% Geçen, Dane Çapı	Dane Çapı (D)	Dane Çapı (D ²)	Uygunluk Sayısı (SN)	Değerlendirme
1	7.33	1.00	D10	0.28	0.08	7.24	Çok İyi
			D20	0.50	0.25		
			D50	1.47	2.16		
2	6.69	0.35	D10	0.12	0.01	16.16	İyi
			D20	0.25	0.06		
			D50	0.78	0.61		
3	3.12	1.09	D10	0.26	0.07	9.48	Çok İyi
			D20	0.33	0.11		
			D50	0.65	0.42		
4	10.50	0.76	D10	0.29	0.08	6.84	Çok İyi
			D20	0.54	0.29		
			D50	1.85	3.42		
5	11.11	0.66	D10	0.27	0.07	7.41	Çok İyi
			D20	0.48	0.23		
			D50	1.80	3.24		
6	5.26	0.80	D10	0.18	0.03	11.89	İyi
			D20	0.29	0.08		
			D50	0.70	0.49		
7	34.62	0.27	D10	0.27	0.07	7.38	Çok İyi
			D20	0.45	0.20		
			D50	3.90	15.21		
8	13.33	0.24	D10	0.18	0.03	11.43	İyi
			D20	0.29	0.08		
			D50	1.10	1.21		
9	40.00	0.23	D10	0.25	0.06	7.82	Çok İyi
			D20	0.45	0.20		
			D50	3.50	12.25		
10	10.50	0.76	D10	0.30	0.09	6.64	Çok İyi
			D20	0.55	0.30		
			D50	1.90	3.61		
11	11.11	0.66	D10	0.26	0.07	7.61	Çok İyi
			D20	0.48	0.23		
			D50	1.80	3.24		
12	5.26	0.80	D10	0.19	0.04	11.49	İyi
			D20	0.29	0.08		
			D50	0.70	0.49		
13	11.41	0.87	D10	0.10	0.01	19.69	İyi
			D20	0.19	0.04		
			D50	0.68	0.46		

Uygunluk sayıları (SN) yöntemine göre yapılan ön değerlendirmede (Çizelge 3.5'e bkz.), dolgu kalitesi iyi olarak değerlendirilmiş ve vibro kompaksiyon tekniğinin, bu dolgu sahası için uygun zemin iyileştirme yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Stok sahasından alınan iki numune üzerinde gerçekleştirilen CBR deneyi sonuçlarına göre, dolgunun başlangıç CBR değerleri ortalaması %15 olarak bulunmuştur.

Stok sahasında gerçekleştirilen CBR deneylerinin sayısı az olduğu için 130.000 m³ hacme sahip dolguyu temsil edemeyeceği ve nihai değerlendirmenin CPT sonuçlarına göre yapılmasının daha sağlıklı olacağı değerlendirilmiştir.

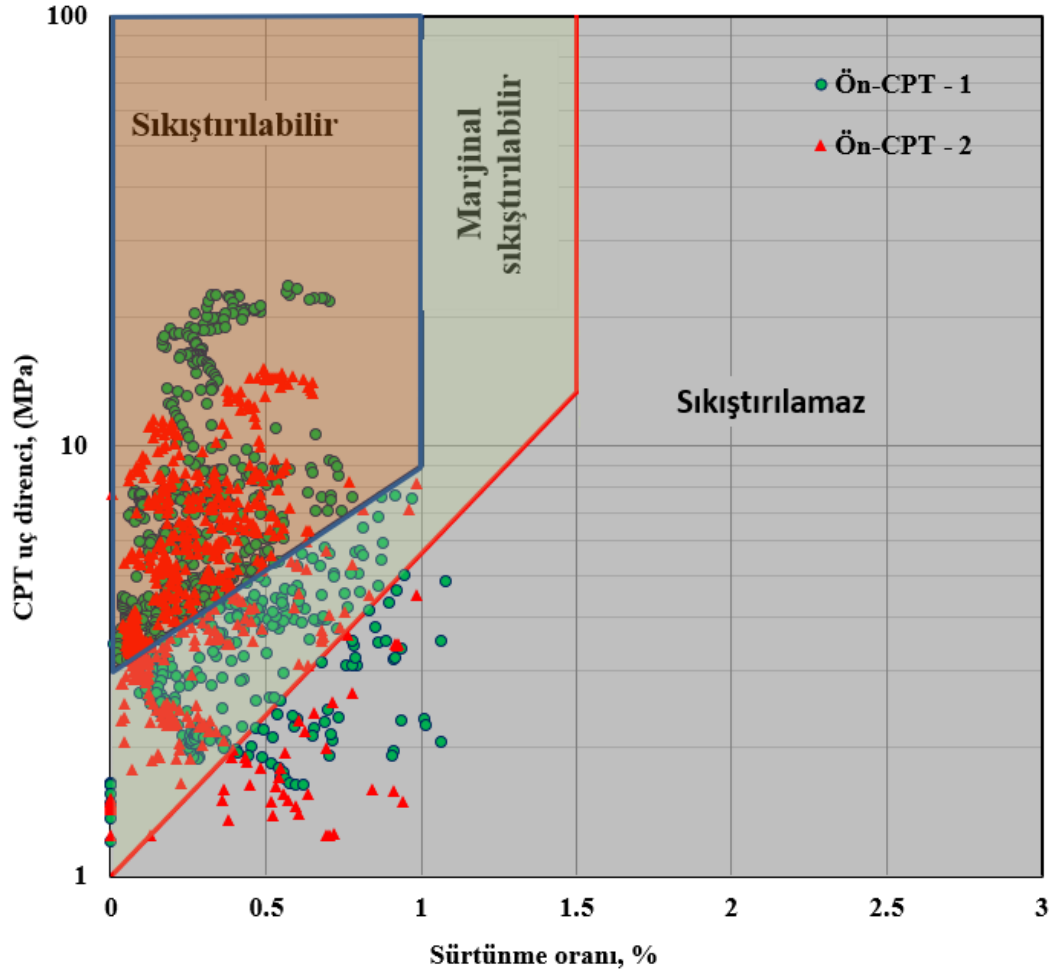
Stok sahasından alınan iki numune üzerinde gerçekleştirilen Standart Proktor deneyi sonuçlarına, hidrolik dolgu kumun kuru birim hacim ağırlığı ortalama 18.50 kN/m³, optimum su muhtevası %11,0 olarak bulunmuştur.

Stok sahasındaki dolgunun yerleştirilmesi sırasında, içerisindeki ince daneli malzemenin üniform olarak dağılmasının kritik olduğu göz önüne alındığında, nihai değerlendirmenin dolgunun ıslah alanına yerleştirilmesinden sonra gerçekleştirilen Ön-CPT deneyleri ile yapılmasının daha doğru sonuçlar vereceği değerlendirilmiştir.

Hidrolik dolgu kumun doğal mühendislik özelliklerini tespit edilmesi amacıyla, proje sahasını temsil edecek şekilde, dolgu sahanın merkezinde iki adet Ön-CPT yapılmıştır.

Dolgu sahasında gerçekleştirilen iki adet Ön-CPT sonuçları ve (Massarsch, 1991) tarafından önerilen koni uç direncinin, sürtünme oranının bir fonksiyonu olarak verildiği grafik yardımıyla dolgu kalitesi değerlendirilmiştir. Vibro kompaksiyon ile sıkıştırma uygulamalarında uygun zemin koşulları, sürtünme oranının (R_f) %1'i aşmadığı ve uç direncinin (q_c) > 3 MPa olduğu zeminler olarak tanımlanmaktadır. Marjinal sıkışmanın sağlanabildiği zeminler, sürtünme oranı %1.0 - %1.5 olan uç direncinin 1-3 MPa aralığında olan zeminlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, her 1.0cm'de alınan verilerin %90'ı sıkıştırılabilir veya marjinal olarak sıkıştırılabilir olduğu hesaplanmış ve vibro kompaksiyon yönteminin iyileştirme yöntemi olarak kullanılması uygun olarak değerlendirilmiştir.

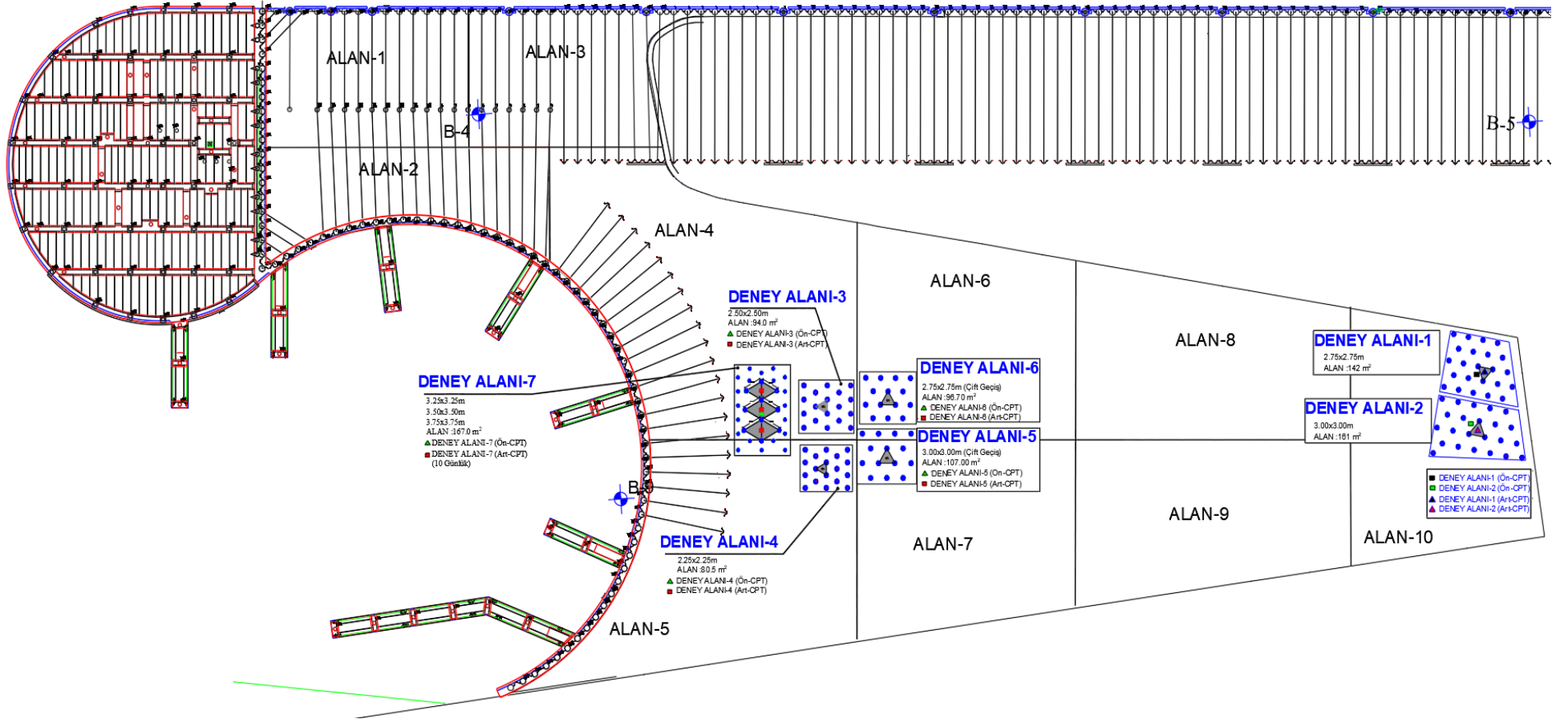
Her 1.00 cm derinlik için hesaplanan q_c (koni uç direnci) ve R_f (sürtünme oranı) değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 4.15'te sunulmaktadır.



Şekil 4.15 : CPT uç direncine bağlı olarak dolgunun sıkıştırılabilirlik değerlendirilmesi.

4.8 Tam Ölçekli Saha Deneyleri

Seçilen uygulama parametrelerinin doğrulanması amacıyla uygulamaya başlamadan önce tam ölçekli parametre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konumları Şekil 4.16'da verilen 1. ve 2. deney alanlarında vibro kompaksiyon uygulaması farklı yerleşim aralığı kullanılarak tek pas (geçiş) ile, 3., 4., 5., 6. ve 7. deney alanlarında vibro kompaksiyon uygulaması farklı karelajlar kullanılarak çift pas (geçiş) ile gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, imalatların en uygun ve optimum karelaj, aralık ve sıkıştırma enerjisi ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Deney alanlarının genel yerleşim planı üzerindeki dağılımları Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16 : Genel yerleşim planı.

Tam ölçekli saha deneylerinin detayları Çizelge 4.6’da özetlenmektedir.

Çizelge 4.6 : Tam ölçekli saha deneyleri.

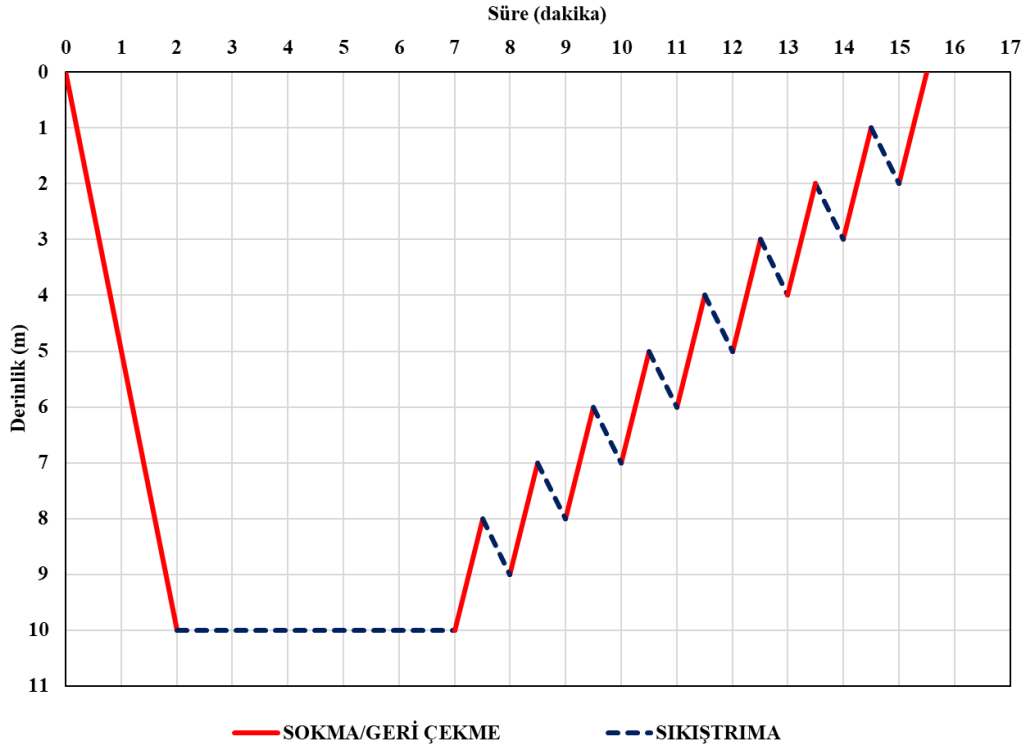
Deney Alanı	Yerleşim Aralığı (m)	Yerleşim Düzeni (m)	Pas (Geçiş) Sayısı	Ortalama Derinlik (m)
1	2.75	Üçgen	Tek Pas	7.55
2	3.00	Üçgen	Tek Pas	7.00
3	2.50	Üçgen	Çift Pas	8.50
4	2.25	Üçgen	Çift Pas	6.50
5	3.00	Üçgen	Çift Pas	7.10
6	2.75	Üçgen	Çift Pas	8.50
	3.25	Üçgen	Çift Pas	8.80
7	3.50	Üçgen	Çift Pas	8.50
	3.75	Üçgen	Çift Pas	8.00

Tam Ölçekli Saha Deneylerinin Amacı;

- Tasarım aşamasında öngörülen farklı uygulama parametreleri ile sağlanan iyileşme miktarlarının belirlenmesi,
- Her bir parametre deneyi ile elde edilen iyileşme ile teknik şartnamede istenen minimum kriterlerin karşılaştırılması sonrasında en uygun uygulama parametrelerinin belirlenmesi,
- Penetrasyon ve geri çekme aşamalarında vibroflot derinliğinin fonksiyonu olarak, sıkıştırma parametrelerinin ve zemine aktarılan sıkıştırma enerjisinin dokümanite edilmesi,
- Vibro kompaksiyon uygulaması için iş sıralamasının belirlenmesi.

Parametre deneyleri, tek ve çift pas (geçiş) olmak üzere iki farklı uygulama yöntemi izlenerek gerçekleştirilmiştir. Deney alanı-1 ve Deney alanı-2 için tek paslı (geçiş) Vibro kompaksiyon uygulama yöntemi Şekil 4.17’de verilmektedir.

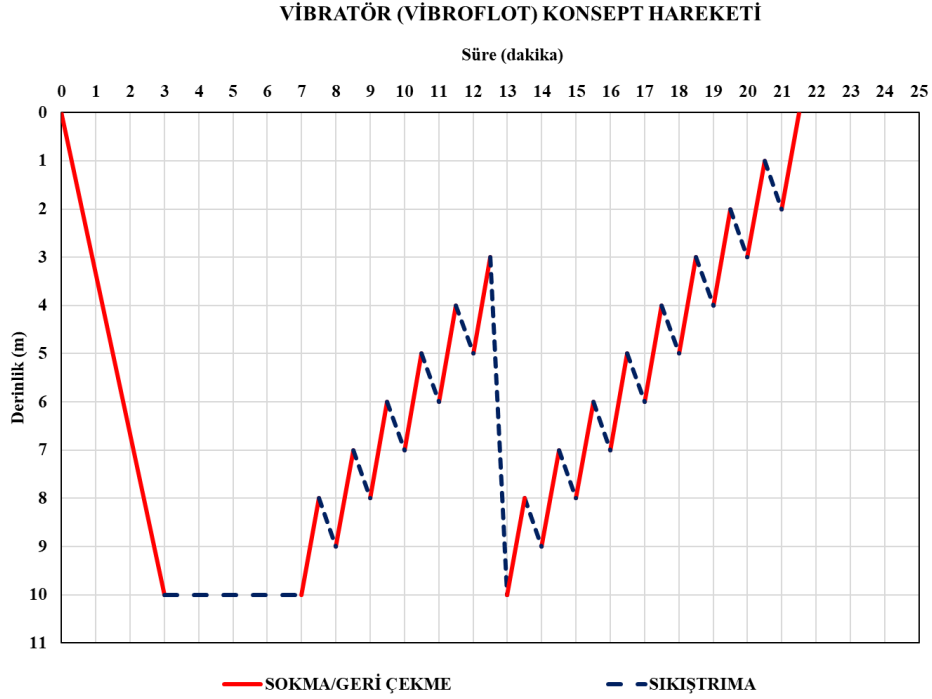
VİBRATÖR (VİBROFLOT) KONSEPT HAREKETİ



Şekil 4.17 : TA-1 ve TA-2 tek paslı (geçiş) Vibro kompaksiyon yöntemi.

Deney alanı 3, 4, 5, 6 ve 7 için çift paslı (geçiş) vibro kompaksiyon uygulama yöntemi Şekil 4.18’de verilmektedir.

Deney bölgelerinde yapılan ön CPT deneylerinde zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 3.00 m derinliğe kadar, ağır tonajlı makine-ekipmanların hareketleri nedeniyle CPT uç direnç değerlerinin 15 MPa’ın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle en üstteki 3.00 m’lik zemin tabakasının tek paslı (geçiş) vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılması gerektiği değerlendirilmiştir. Yapılan parametre deneylerinde, rölatif sıkılığı (D_R) oldukça yüksek olan en üstteki 1.50-3.00 m’lik kısımda, vibro kompaksiyon uygulamasının olumsuz etki yaptığı ve bu sıkı kum tabakalarının gevşemesine ve koni uç direncinin azalmasında neden olduğu saptanmıştır. Bundan dolayı uygulama prosedürü belirlenirken yukarıda belirtilen hususlar birlikte değerlendirilerek, mevcut durumda çok sıkı durumda olan hidrolik dolgu kumun, ilk 1.00-3.00 metrelik tabakasının tek pas ile sıkıştırılması gerektiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.18 : TA-3, TA-4, TA-5, TA-6 ve TA-7 çift paslı (geçiş) Vibro kompaksiyon yöntemi.

4.8.1 Sıkıştırma Enerjisi

Derin dinamik sıkıştırmada olduğu gibi, vibro kompaksiyon uygulamasında da hem zemini sıkıştırmak hem de yatay toprak basıncını arttırılarak zemin iyileştirir. Sıkıştırma sırasında zemine aktarılan birim enerji miktarı; uygulanan hidrolik basınca, üretilen hidrolik debiye, uygulama süresine, uygulama derinliğine ve karelaja bağlıdır. Green ve Mitchell (2004), vibro kompaksiyon uygulamasında, zemine aktarılan sıkıştırma enerjisi, zemin özelliklerinin sürekli olarak değiştiği, nispeten uzun bir zaman diliminde verilir. Vibroflot hemen çevreleyen zeminde sıvılaşma başladığında, vibroflottan sıvılaştırılmamış dış zemine çok az enerji aktarılır, bu süre zarfında aktarılan enerjinin çoğu zaten sıvılaşmış zeminde titreşimleri indükleyerek harcandığını belirtmiştir.

Green ve Mitchell (2010); Derin dinamik sıkıştırma, vibro kompaksiyon ve Patlatma ile sıkıştırma kullanarak birim hacimdeki temiz, gevşek kumu sıkıştırmak için gereken mekanik enerjiyi tahmin etmek için basit hesaplamalar sunmaktadır. Hesaplanan sıkıştırma enerjileri, temelde zeminin deprem sırasında sıvılaşmaya başlayabilmesi için gerekli minimum enerjiye dayanmaktadır. Yazarların, dinamik sıkıştırma yöntemi için hesaplamış olduğu sıkıştırma enerjileri sırasıyla aşağıda verilmiştir;

- Deprem Sıvılaşması: 0.03 - 0.192 kJ/m³
- Patlayıcı ile Sıkıştırma: 22 - 100 kJ/m³
- Derin Dinamik Sıkıştırma: 200 - 250 kJ/m (BİT)
- Vibro Kompaksiyon: 1362 - 1665 kJ/m³

Vibro kompaksiyonun, sıvılaşmaya neden olabilmesi için zeminin sıvılaşması için gerekli olan enerjisinden daha fazla enerjinin zemine iletilmesi gereklidir. Bu ek enerjinin büyük bir kısmı, zemin danelerinin daha sıkı bir zemin kütleline çarpmak için kullanır. Yani üretilen enerjinin büyük bir kısmı vibroflotun şaftı boyunca ısı enerjisine dönüşür.

Çizelge 4.7’de Lukas (1986) tarafından, çeşitli zemin türleri için birim zemin kütlelerini sıkıştırmak için gerekli enerji miktarları verilmiştir. Sıkıştırma enerjilerine bakıldığında zaman, dane boyutunun (ince/kaba daneli) gerekli minimum sıkıştırma enerjini doğrudan etkilediği ve dane boyutu ile sıkıştırma enerjisi arasında ters orantı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7 : Çeşitli zeminlerin sıkıştırılabilirliği için uygulanan enerji yönergeleri (Lukas, 1986).

Zemin Tipi	Birim Hacim Başına Uygulanan Enerji (kJ/m ³)	Standart Proktor Enerjisine Oranı (%)
Yüksek geçirgenliğe sahip iri daneli zeminler	200 - 250	33 - 41
Su tablasının üzerinde yarı geçirgen ince taneli zeminler ve kil dolgular	250 - 350	41 - 60
Katı atık sahaları	600 - 1100	100 - 180
Not: Standart Proktor enerjisi 600 kJ/m ³ ’ye eşittir		

Vibro kompaksiyon uygulamasının etkinliğinin ölçülebilmesi ve değerlendirilebilmesi için uygulama parametreleri tam zamanlı elektronik bilgi toplama ünitesi yardımıyla kaydedilmiştir. Elde edilen veriler ve aşağıda verilen temel hidrolik denklemler kullanılarak, sıkıştırma enerji derinlik boyunca hassas olarak hesaplanmıştır.

$$Güç = \frac{P \times Q}{600\eta_g} \quad (4.1)$$

$$Enerji = Güç \times \Delta t \quad (4.2)$$

Güç: kg/cm², Enerji: kJoule, Q: Hidrolik Debi (lt/dakika), P: Vibroflot çalışma Basıncı (Bar), η_g : Vibroflot verimlilik katsayısı yani, mekanik iş yapmak için mevcut olan motor tarafından tüketilen elektrik gücünün bir kısmı (0.90-0.95 alınabilir), Δt : Sıkıştırma süresi (sn).

Hesaplanan toplam enerji miktarının değerlendirilebilmesi için toplam enerji miktarı uygulama derinliğine ve yerleşim alanına bölünerek, kJoule/m³ olarak hesaplanmıştır. Proje kapsamında deniz tabanından taranan ve hidrolik olarak yerleştirilen dolgu kumun derinlik boyunca minimum rölatif sıkılık (D_r) değerinin %65 kriterini sağlaması proje teknik şartnamede belirtilmiş ve istenilen sıkılığın sağlandığının CPT yapılarak gösterilmesi istenmiştir.

Hedeflenen rölatif sıkılık değerinin, örtü yükü düzeltilmesi yapılmış, eşdeğer koni uç direncine dönüştürülmesi için (Baldi ve diğ., 1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılmıştır.

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{q_c}{C_0(\sigma')^{C_1}} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

σ' : Efektif gerilme, birimi kPa, q_c : Koni uç direnci, birimi kPa.

Normal Konsolide (NC), Sıkıştırmadan önce:

$$C_0=157, C_1=0.55, C_2=2.41$$

Aşırı Konsolide (OC), Sıkıştırmadan sonra:

$$C_0=181, C_1=0.55, C_2=2.61, \sigma'_{ort}=0.8\sigma'_{v0} \text{ alınabilir.}$$

Yukarıdaki prosedür, temiz kumlu zeminler (yani, ince dane içeriği %5'in altında olanlar) için CPT q_c kabul kriterlerini sağlar. Baldi ve diğ. (1986) ince dane içeriğinin %5 ile %23 arasında değiştiği, hidrolik olarak ıslah alanına yerleştirilen zeminler için, hedef q_c , daha yüksek ince dane içeriğini (FC) hesaba katmak için Δq_c miktarı kadar azaltılabileceğini belirtmektedir.

$$\Delta q_c = \frac{P_a \times \Delta q_{c1N}}{C_Q} \quad (4.4)$$

$$\Delta q_{c1N} = 60 \quad FC \geq \%35$$

$$\Delta q_{c1N} = 0 \quad FC \leq \%5$$

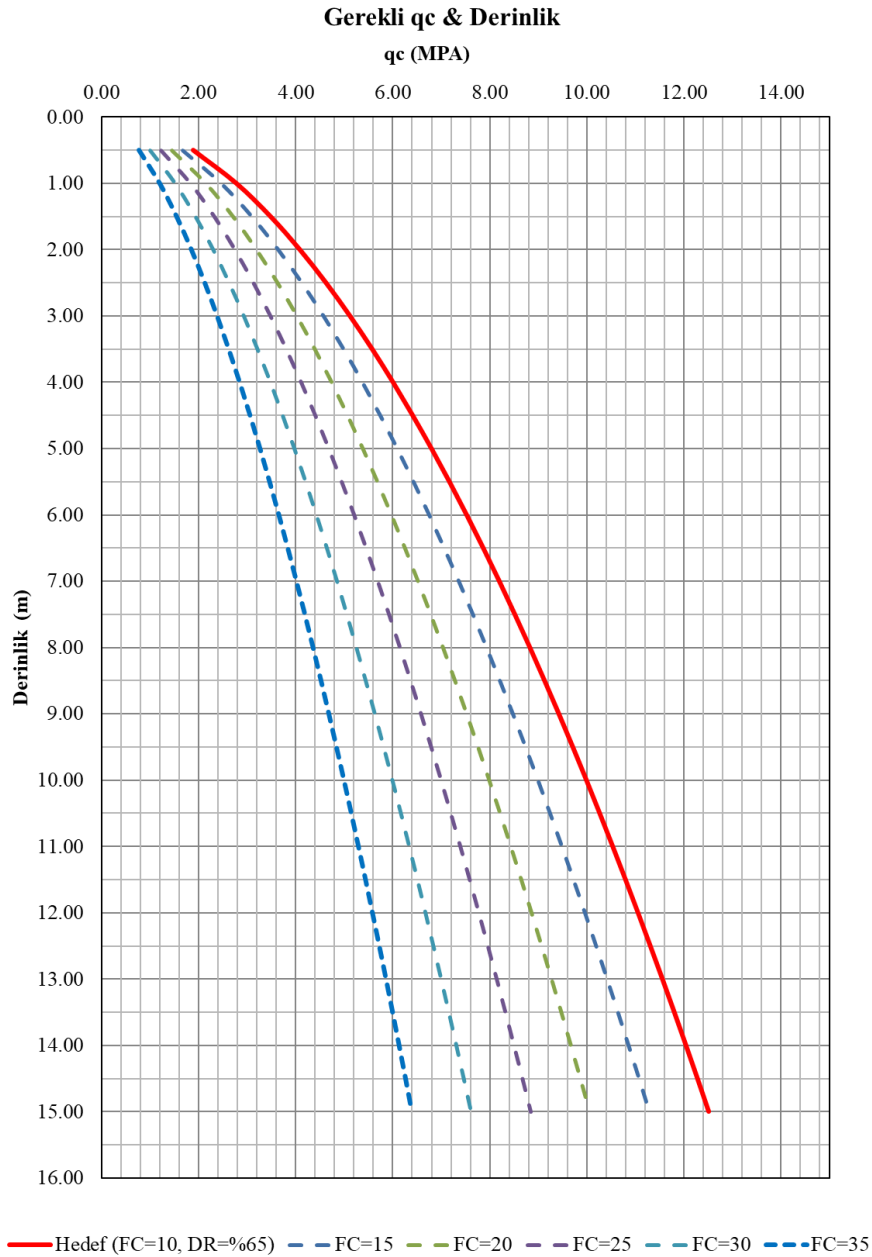
$$\Delta q_{c1N} = 2 (FC-5) \quad \%5 < FC < \%35$$

$$C_Q = (P_a / \sigma'_{v0})^{0.5} \quad (4.5)$$

$P_a=1 \text{ atm } (\sim 100 \text{ kPa})$

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgu malzemesi sıkıştırmadan sonra aşırı konsolide durumda olduğu için, hesaplarda aşırı konsolide zeminler için hesaplanan katsayılar kullanılmıştır.

Hidrolik dolgu kumundan alınan elek analizi sonuçları temel alınarak, hedef uç direnci (q_c) eğrisi için ince dane oranı %10 olarak dikkate alınmıştır. Hedef koni uç direnci (q_c) eğrisinin derinlik değişimi Şekil 4.19’da verilmiştir.

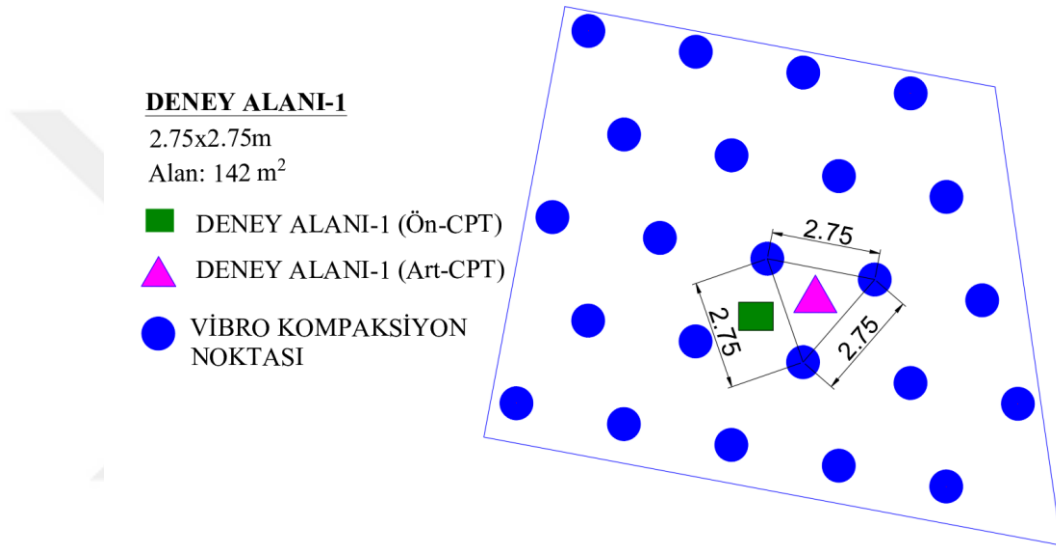


*FC=İnce Dane Oranı (%)

Şekil 4.19 : %65 Rölatif sıkılık ve %10 ince dane içeriği için hesaplanan koni uç direncinin derinlik ile değişimi.

4.8.2 Deney alanı-1 (TA-1)

Deney alanı-1’de 2.75x2.75m eşkenar üçgen karelaj ile toplam 23 noktada, tek pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla, Şekil 4.20’de gösterildiği gibi 1 adet ön CPT yapılmıştır. Vibro kompaksiyon uygulaması tek pas (geçiş) ile gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 gün ve 10 gün sonra, üçgen karelajın ortasında art CPT’ler yapılmıştır.



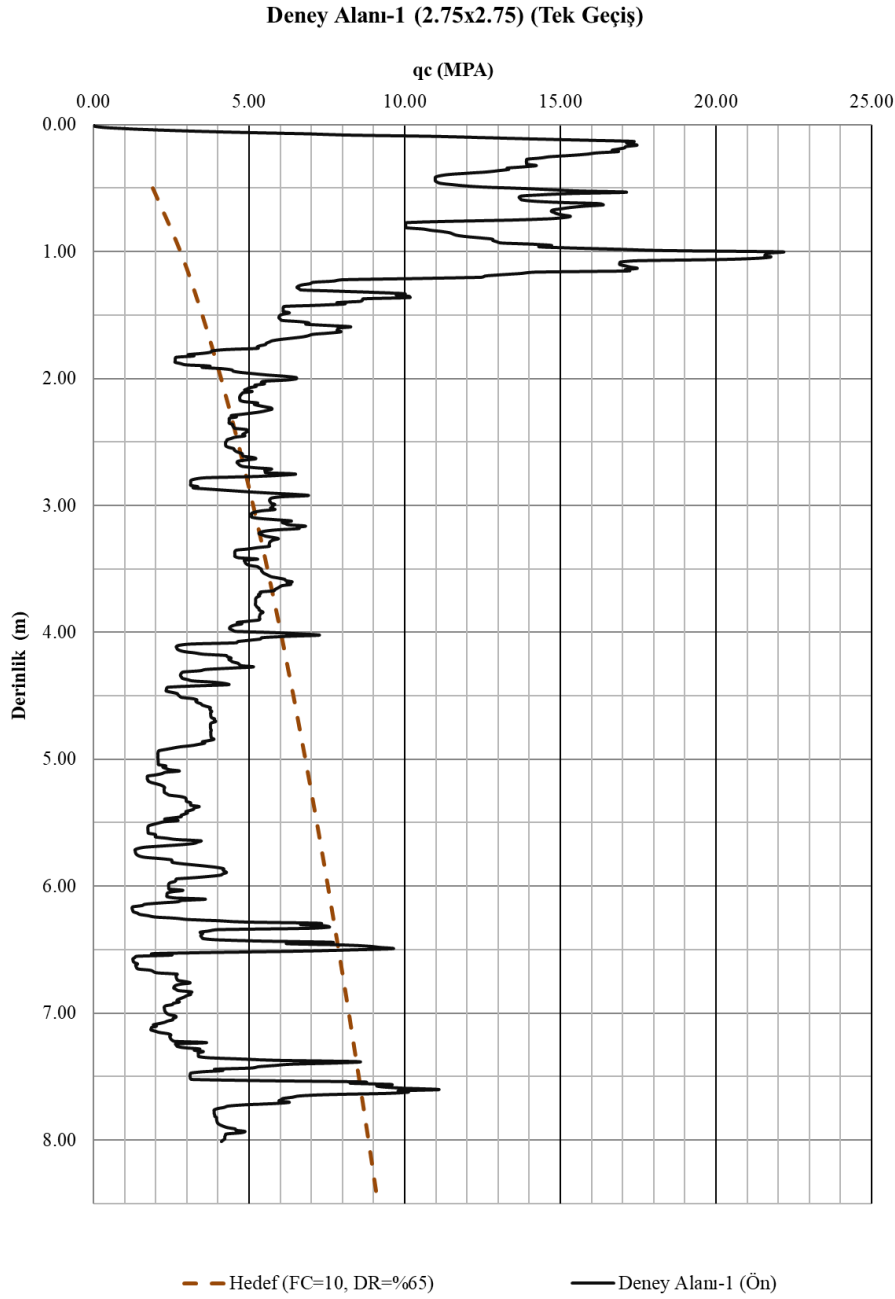
Şekil 4.20 : Deney alanı-1 genel yerleşim planı.

Ön-CPT sonuçları:

Hidrolik dolgu kumun iyileştirilmeden önceki başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi maksadıyla Şekil 4.20’de gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT deneyinden elde edilen uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.21’de verilmektedir.

Ön CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 1.50 metre derinliğe kadar dolgunun 10-15 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağır tonajlı makine-ekipman hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 1.50 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilebilir. Özellikle, 4.00-10.00 metre derinlikte ortalama uç direncinin 2.5 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 4.00 metre derinliğin altındaki hidrolik

dolgu kumun, hedef uç direncinin oldukça altında kaldığı ve sıkıştırma enerjisinin bu bölgeye göre belirlenmesinin gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.21 : Deney alanı-1 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon uygulaması:

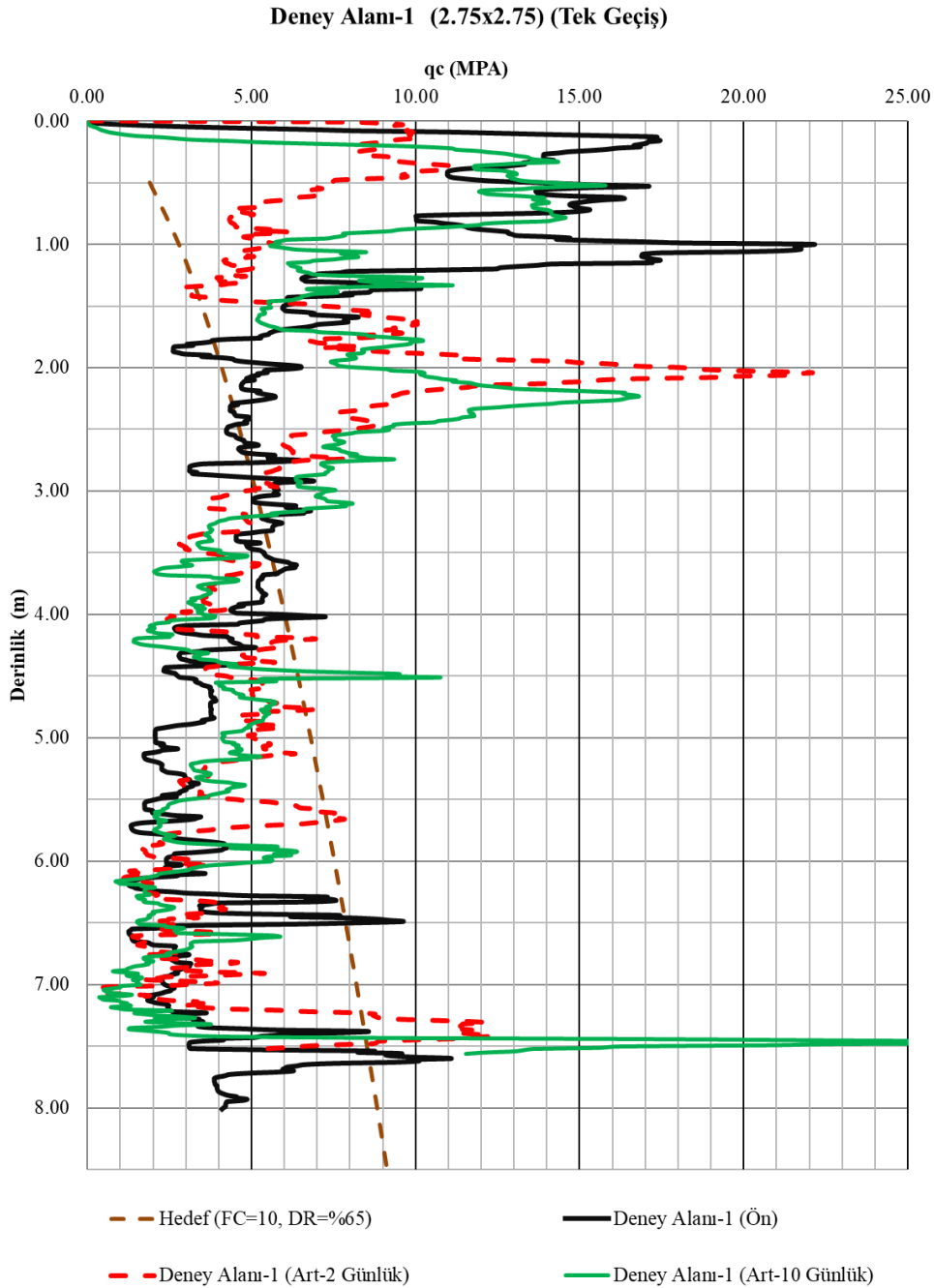
Deney alanı-1’de toplam 23 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir uygulama noktasına ait uygulama parametreleri; sıkıştırma noktasına doldurulan kumun hacmi ve hesaplanan sıkıştırma enerjisi Çizelge 4.8’de özetlenmektedir.

Çizelge 4.8 : Deney alanı-1 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

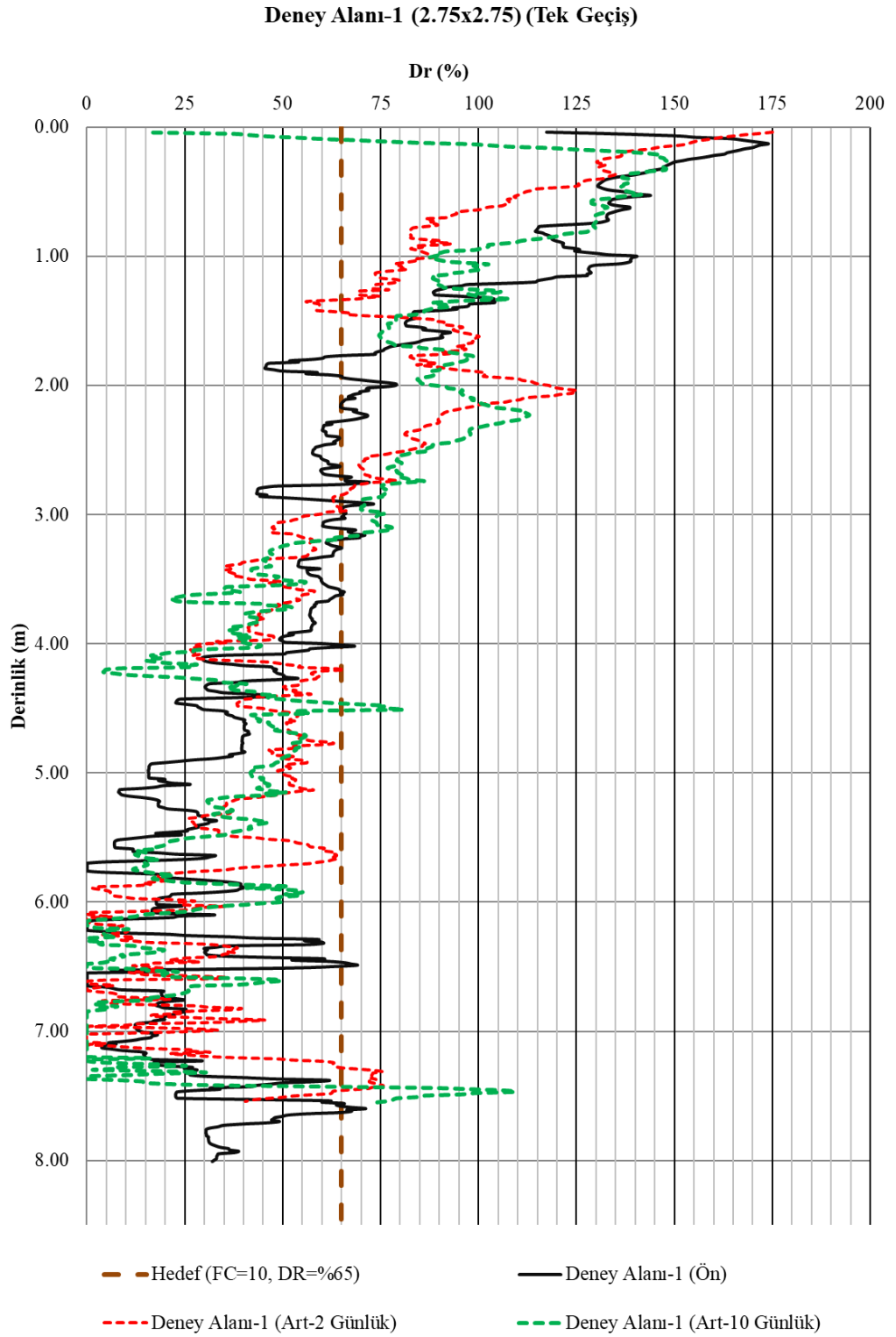
V. K.	Tarih	P _{ave}	Q _{ave}	Süre (sn)		Δt	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm ²)	(lt/dak..)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m ³)	(m ³ /m)	(m)	(m ²)	(kJoule/m ³)	(dak.)
TT24	17.09.2021	189.33	300.00	108.00	570.00	462.00	99.65	46037.11	7.71	5975.11	6.00	0.78	2.75	3.27	1824.65	7.70
TT25	17.09.2021	189.33	300.00	142.00	596.00	454.00	98.63	44777.44	7.44	6022.87	6.00	0.81	2.75	3.27	1839.24	7.57
TT26	17.09.2021	192.63	300.00	134.00	618.00	484.00	101.38	49070.24	7.34	6689.06	6.00	0.82	2.75	3.27	2042.67	8.07
TT27	17.09.2021	189.14	300.00	186.00	616.00	430.00	99.55	42804.41	7.85	5455.73	6.00	0.76	2.75	3.27	1666.05	7.17
TT28	17.09.2021	194.63	300.00	170.00	608.00	438.00	102.44	44868.39	8.75	5131.46	6.00	0.69	2.75	3.27	1567.02	7.30
TT29	17.09.2021	189.98	300.00	122.00	590.00	468.00	99.99	46795.18	7.59	6169.38	6.00	0.79	2.75	3.27	1883.98	7.80
TT30	17.09.2021	190.12	300.00	120.00	562.00	442.00	100.14	44261.52	7.43	5957.14	6.00	0.81	2.75	3.27	1819.16	7.37
TT31	17.09.2021	192.71	300.00	110.00	602.00	492.00	101.43	49902.82	7.51	6621.98	6.00	0.80	2.75	3.27	2022.19	8.20
TT32	17.09.2021	190.96	300.00	114.00	602.00	488.00	100.51	49047.75	7.65	6468.33	6.00	0.78	2.75	3.27	1975.27	8.13
TT33	17.09.2021	189.85	300.00	104.00	554.00	450.00	99.92	44963.99	7.82	5753.60	6.00	0.77	2.75	3.27	1757.01	7.50
TT34	17.09.2021	189.96	300.00	118.00	548.00	430.00	99.98	42991.98	7.71	5580.42	6.00	0.78	2.75	3.27	1704.12	7.17
TT35	17.09.2021	191.11	300.00	128.00	574.00	446.00	100.58	44860.00	7.50	5985.30	4.00	0.53	2.75	3.27	1827.76	7.43
TT36	17.09.2021	187.24	300.00	146.00	592.00	446.00	98.55	43952.95	7.73	5710.82	4.00	0.52	2.75	3.27	1743.94	7.43
TT37	17.09.2021	190.54	300.00	136.00	578.00	442.00	100.28	44325.19	8.36	5308.17	6.00	0.72	2.75	3.27	1620.98	7.37
TT38	17.09.2021	191.55	300.00	150.00	674.00	524.00	100.82	52827.70	8.80	6006.65	6.00	0.68	2.75	3.27	1834.28	8.73
TT39	17.09.2021	193.68	300.00	118.00	586.00	468.00	101.94	47706.92	7.51	6356.96	6.00	0.80	2.75	3.27	1941.26	7.80
TT40	17.09.2021	188.68	300.00	144.00	550.00	406.00	99.30	40317.53	7.71	5233.11	6.00	0.78	2.75	3.27	1598.06	6.77
TT41	17.09.2021	182.79	300.00	152.00	594.00	442.00	96.21	42523.53	8.30	5143.96	4.00	0.48	2.75	3.27	1570.84	7.37
TT42	17.09.2021	188.09	300.00	180.00	646.00	466.00	98.99	46130.51	8.82	5233.54	6.00	0.68	2.75	3.27	1598.19	7.77
TT43	17.09.2021	189.47	300.00	150.00	608.00	458.00	99.72	45672.50	7.47	6091.46	6.00	0.80	2.75	3.27	1860.18	7.63
TT44	17.09.2021	189.60	300.00	92.00	512.00	420.00	99.79	41910.93	8.19	5122.23	4.00	0.49	2.75	3.27	1564.20	7.00
TT45	17.09.2021	190.75	300.00	104.00	594.00	490.00	100.40	49194.77	8.56	5750.62	6.00	0.70	2.75	3.27	1756.10	8.17
TT46	17.09.2021	188.79	300.00	252.00	724.00	472.00	99.36	46900.24	8.92	5261.22	6.00	0.67	3.00	3.90	1350.03	7.87

Art-CPT sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT'ler yapılmıştır. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.22'de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, şartnamede belirtilen %65 rölatif sıkılığa karşı gelen hedef koni uç direncini sağlayamadığı ve ilgili deney alanında seçilen uygulama parametrelerinin başarısız olduğu tespit edilmiştir.



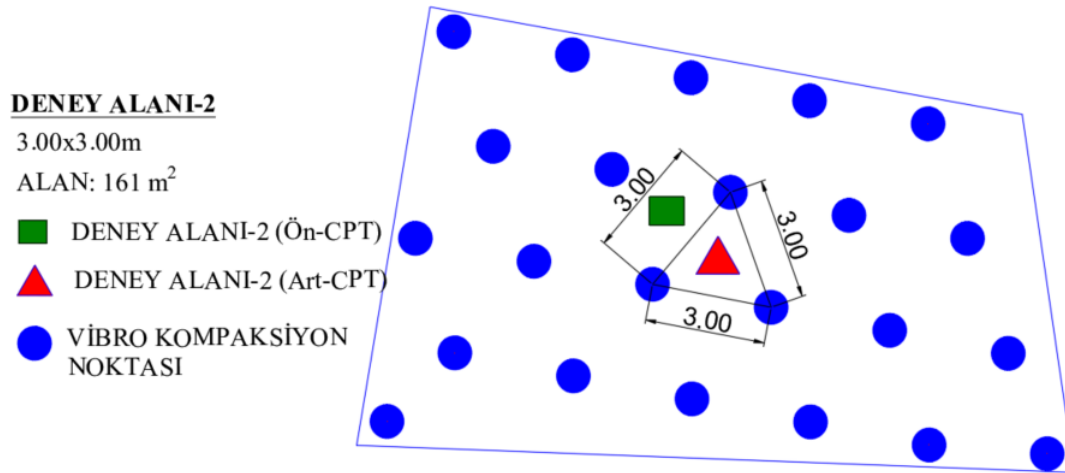
CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.23’de verilmektedir.



Şekil 4.23 : Deney alanı-1 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.

4.8.3 Deney alanı-2 (TA-2)

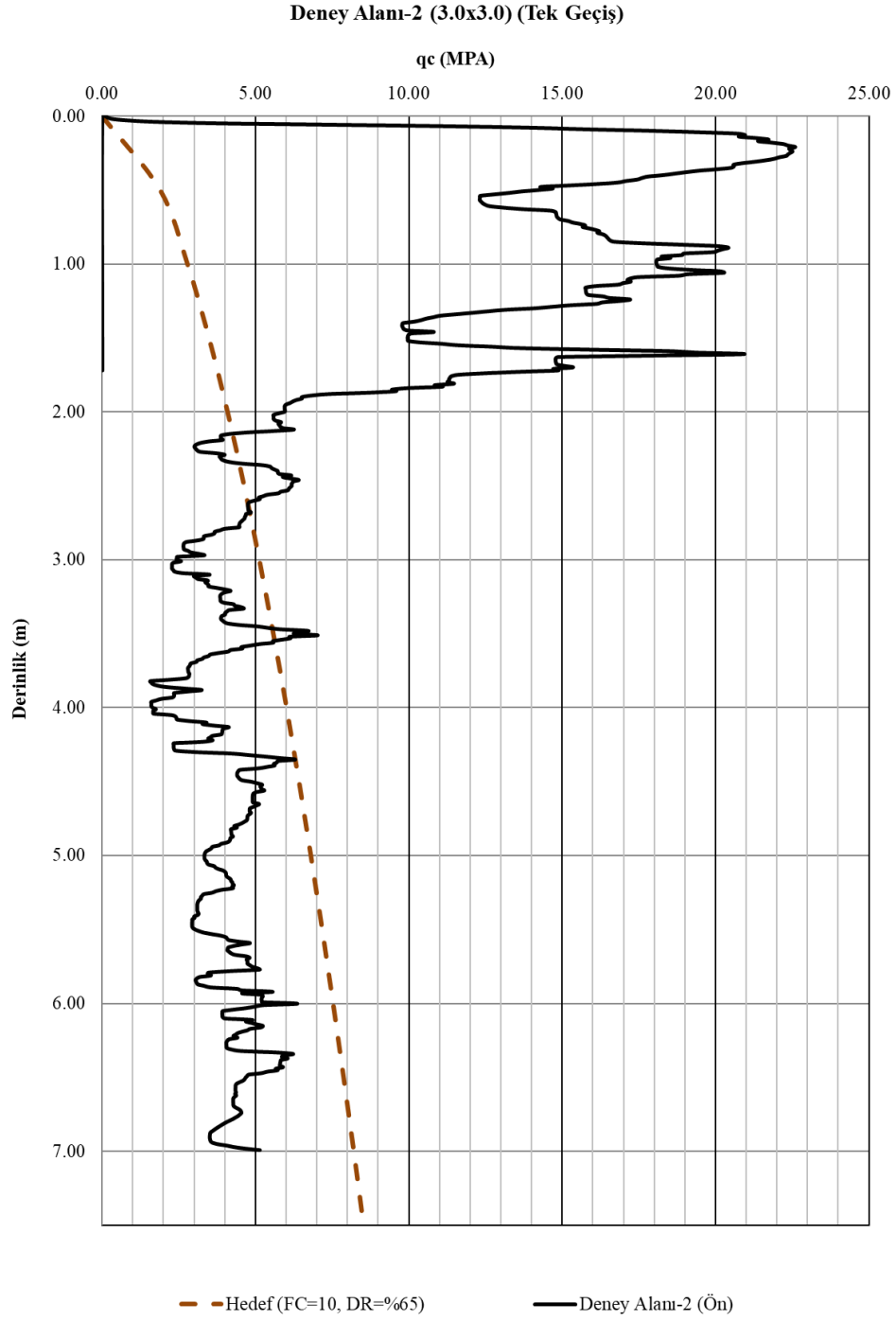
Deney alanı-2’de 3.00x3.00m eşkenar üçgen karelaj ile toplam 23 noktada, tek pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.24’te gösterildiği gibi 1 adet ön CPT yapılmıştır. Vibro kompaksiyon uygulamaları tek pas (geçişle) gerçekleştirilmiş ve uygulamanın tamamlanmasından 2 gün ve 10 gün sonra art CPT’ler yapılmıştır.



Şekil 4.24 : Deney alanı-2 genel yerleşim planı.

Ön-CPT sonuçları:

Hidrolik dolgu kumun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.24’te gösterilen ön CPT noktasında, deniz taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT’lerden elde edilen uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.25’te verilmektedir. Ön-CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 1.50 metre derinliğe kadar dolgunun 10-20 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağıt tonajlı makine-ekipman hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 1.50 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilmiştir. Özellikle, 3.00-7.00 metre derinlikte ortalama uç direncinin 4.0 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 3.00 metre derinliğin altındaki hidrolik dolgu kumun, hedef uç direncinin oldukça altında kaldığı ve sıkıştırma enerjisinin bu bölgeye göre belirlenmesinin gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.25 : Deney alanı-2 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon uygulaması:

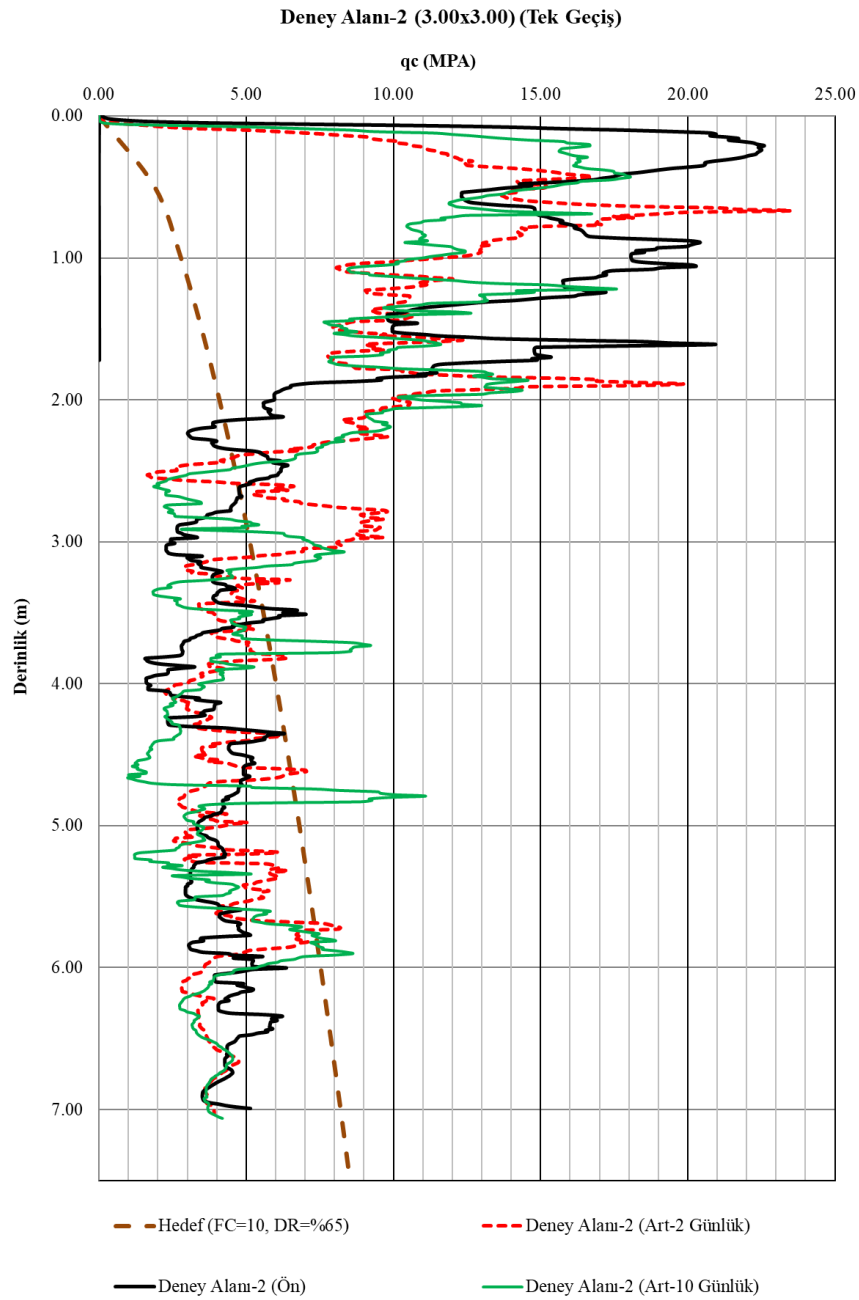
Deney alanı-2’de toplam 23 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir sıkıştırma noktasına ait uygulama parametreleri, sıkıştırma noktasına doldurulan kum miktarı ve hesaplan sıkıştırma enerjisi Çizelge 4.9’da özetlenmektedir.

Çizelge 4.9 : Deney alanı-2 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

V. K.	Tarih	P _{ave}	Q _{ave}	Süre (sn)		At	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm ²)	(lt/dak..)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m ³)	(m ³ /m)	(m)	(m ²)	(kJoule/m ³)	(dak.)
TT1	16.09.2021	186.33	300.00	126.00	666.00	540.00	98.07	52957.32	6.83	7728.96	7.00	1.02	3.00	3.90	1983.25	9.00
TT2	16.09.2021	187.78	300.00	104.00	614.00	510.00	98.83	50403.65	6.32	7979.68	7.00	1.11	3.00	3.90	2047.59	8.50
TT3	16.09.2021	189.71	300.00	126.00	628.00	502.00	99.85	50122.47	6.67	7516.71	6.00	0.90	3.00	3.90	1928.79	8.37
TT4	16.09.2021	191.37	300.00	128.00	618.00	490.00	100.72	49352.65	7.28	6783.10	8.00	1.10	3.00	3.90	1740.55	8.17
TT5	16.09.2021	189.55	300.00	136.00	496.00	360.00	99.76	35913.99	7.46	4817.72	6.00	0.80	3.00	3.90	1236.23	6.00
TT6	16.09.2021	194.33	300.00	106.00	488.00	382.00	102.28	39070.60	7.46	5214.38	6.00	0.80	3.00	3.90	1338.01	6.37
TT7	16.09.2021	200.21	300.00	80.00	486.00	406.00	105.38	42782.90	7.49	5716.73	8.00	1.07	3.00	3.90	1466.91	6.77
TT8	16.09.2021	190.63	300.00	120.00	616.00	496.00	100.33	49763.37	6.83	7290.00	6.00	0.88	3.00	3.90	1870.62	8.27
TT9	16.09.2021	193.88	300.00	112.00	624.00	512.00	102.04	52246.95	6.73	7767.53	6.00	0.89	3.00	3.90	1993.15	8.53
TT10	16.09.2021	192.06	300.00	118.00	590.00	472.00	101.08	47711.60	6.81	6920.36	6.00	0.88	3.00	3.90	1775.76	7.87
TT11	16.09.2021	196.02	300.00	140.00	634.00	494.00	103.17	50964.52	6.83	7436.07	6.00	0.88	3.00	3.90	1908.10	8.23
TT12	16.09.2021	195.27	300.00	140.00	612.00	472.00	102.77	48509.27	7.27	6676.89	8.00	1.10	3.00	3.90	1713.29	7.87
TT13	16.09.2021	192.86	300.00	128.00	626.00	498.00	101.50	50548.95	8.02	6306.67	8.00	1.00	3.00	3.90	1618.29	8.30
TT14	17.09.2021	184.89	300.00	88.00	606.00	518.00	97.31	50406.08	7.00	7204.82	6.00	0.86	3.00	3.90	1848.76	8.63
TT15	17.09.2021	189.27	300.00	130.00	638.00	508.00	99.62	50605.72	7.00	7254.59	6.00	0.86	3.00	3.90	1861.53	8.47
TT16	17.09.2021	186.24	300.00	104.00	630.00	526.00	98.02	51558.43	6.92	7454.79	6.00	0.87	3.00	3.90	1912.90	8.77
TT17	17.09.2021	190.71	300.00	118.00	618.00	500.00	100.38	50187.78	7.15	7023.70	4.00	0.56	3.00	3.90	1802.28	8.33
TT18	17.09.2021	199.68	300.00	168.00	662.00	494.00	105.10	51917.50	7.88	6593.47	6.00	0.76	3.00	3.90	1691.89	8.23
TT19	17.09.2021	185.22	300.00	102.00	612.00	510.00	97.49	49718.31	7.57	6571.82	6.00	0.79	3.00	3.90	1686.33	8.50
TT20	17.09.2021	186.60	300.00	90.00	580.00	490.00	98.21	48123.90	7.13	6753.68	6.00	0.84	3.00	3.90	1732.99	8.17
TT21	17.09.2021	194.66	300.00	102.00	606.00	504.00	102.45	51635.28	7.05	7328.90	6.00	0.85	3.00	3.90	1880.60	8.40
TT22	17.09.2021	193.76	300.00	100.00	610.00	510.00	101.97	52006.44	7.32	7053.60	6.00	0.82	3.00	3.90	1809.96	8.50
TT23	17.09.2021	192.58	300.00	114.00	608.00	494.00	101.36	50071.86	8.01	6255.23	6.00	0.75	3.00	3.90	1605.09	8.23

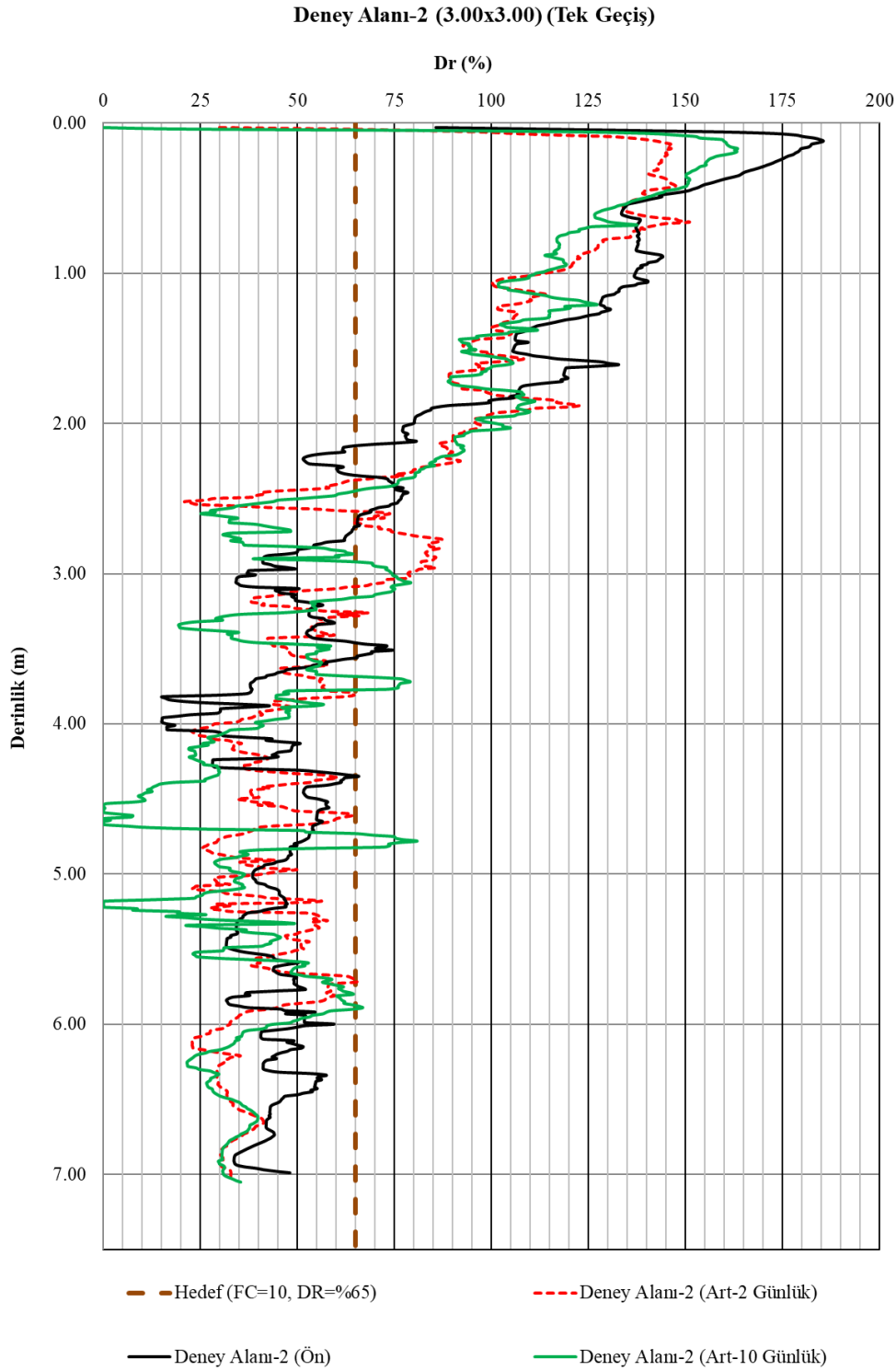
Art-CPT sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.26'da verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, teknik şartnamede belirtilen %65 rölatif sıkılığa karşı gelen, hedef koni uç direncini sağlanamadığı ve kullanılan uygulama prosedürünün başarısız olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.26 : Deney alanı-2 art-CPT sonuçları.

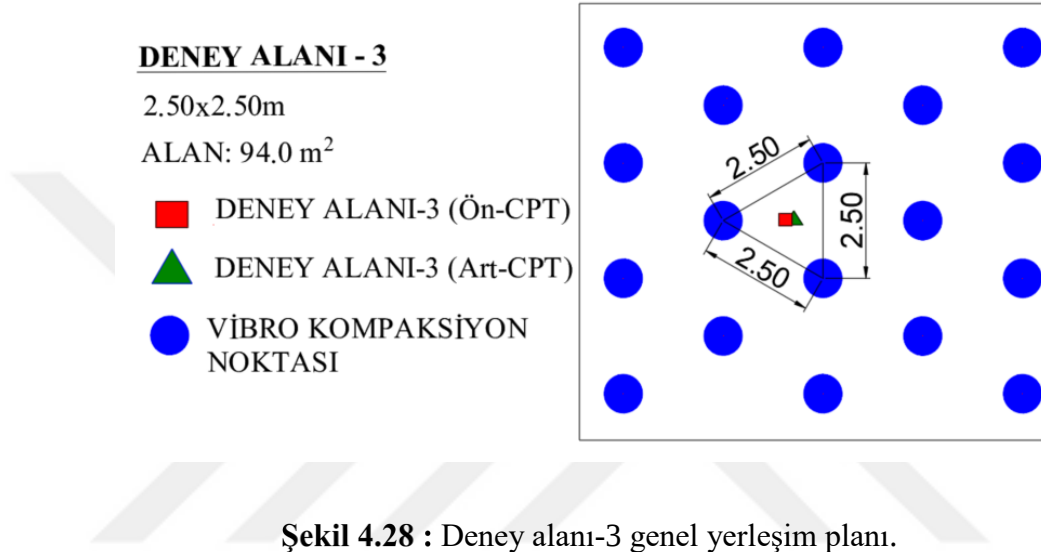
CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.27’de verilmektedir.



Şekil 4.27 : Deney alanı-2 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.

4.8.4 Deney alanı-3 (TA-3)

Deney alanı-3’de 2.50x2.50m eşkenar üçgen karelaj ile toplam 18 noktada, çift pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.28’de gösterildiği gibi 1 adet ön CPT gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulaması çift pas (geçiş) ile gerçekleştirilmiş ve uygulamanın tamamlanmasından 2 gün 10 gün sonra art CPT’ler yapılmıştır.

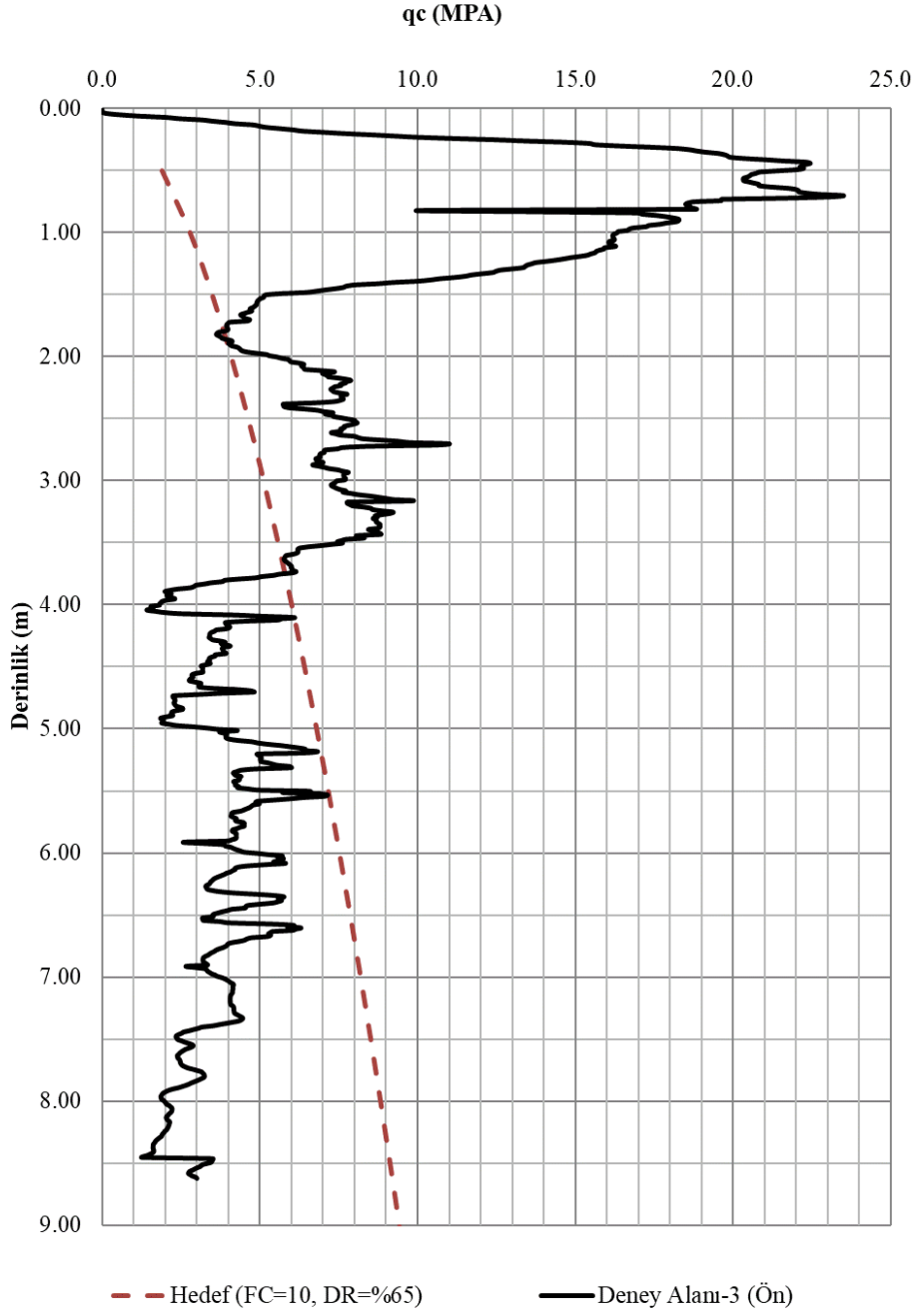


Şekil 4.28 : Deney alanı-3 genel yerleşim planı.

Ön-CPT sonuçları:

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgunun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.28’de gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT deneyinden elde edilen, uç direncini derinlik ile değişimi Şekil 4.29’da verilmektedir. Ön CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 2 metre derinliğe kadar dolgunun 5-20 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağır tonajlı makine-ekipman hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 2.00 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilebilir. Özellikle, 4.00-8.50 metre derinlikte ortalama uç direncinin 3.0 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 4.00 metre derinliğin altındaki hidrolik dolgu kumun, hedef uç direncinin oldukça altında kaldığı ve sıkıştırma enerjisinin bu bölgeye göre belirlenmesinin gerektiği tespit edilmiştir.

Deney Alanı-3 (2.50x2.50) (Çift Geçiş)



Şekil 4.29 : Deney alanı-3 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon uygulaması:

Deney alanı-3'te toplam 18 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir sıkıştırma noktasına ait uygulama parametreleri, sıkıştırma noktalarına doldurulan kum miktarı ve hesaplan sıkıştırma enerjileri Çizelge 4.10'de özetlenmektedir.

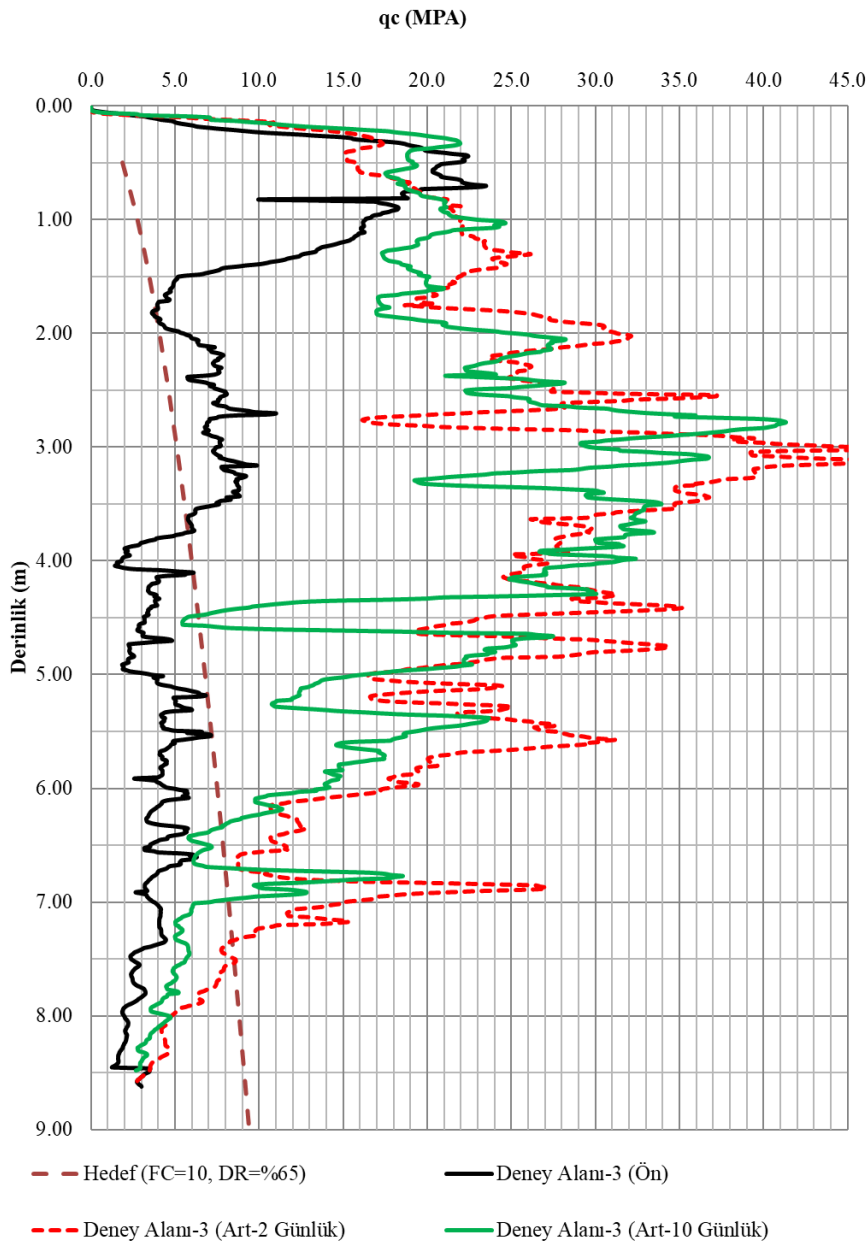
Çizelge 4.10 : Deney alanı-3 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

V. K.	Tarih	Pave	Q _{ave}	Süre (sn)		Δt	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm ²)	(lt/dak..)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m ³)	(m ³ /m)	(m)	(m ²)	(kJoule/m ³)	(dak.)
TT65	23.09.2021	197.09	300.00	142.00	1058.00	890.00	103.73	92319.36	8.39	11013.20	10.00	1.19	2.50	2.71	4521.13	15.20
TT66	23.09.2021	202.63	300.00	150.00	1155.00	976.00	106.65	104086.55	7.91	13165.22	8.00	1.01	2.50	2.71	5404.57	16.67
TT67	23.09.2021	197.50	300.00	180.00	1544.00	1326.00	103.95	137836.39	7.63	18073.16	14.00	1.83	2.50	2.71	7419.38	22.65
TT68	23.09.2021	199.37	300.00	128.00	1073.00	918.00	104.93	96329.04	7.77	12431.38	12.00	1.54	2.50	2.71	5103.32	15.68
TT69	23.09.2021	201.03	300.00	160.00	1212.00	1022.00	105.81	108135.22	8.03	13472.26	12.00	1.49	2.50	2.71	5530.62	17.46
TT70	23.09.2021	203.60	300.00	132.00	1052.00	894.00	107.16	95800.06	8.01	11966.35	12.00	1.50	2.50	2.71	4912.42	15.27
TT71	23.09.2021	199.45	300.00	200.00	929.00	706.00	104.98	74112.44	8.21	9036.78	8.00	0.97	2.50	2.71	3709.77	12.06
TT72	23.09.2021	200.72	300.00	150.00	1448.00	1262.00	105.64	133317.94	7.96	16754.79	14.00	1.76	2.50	2.71	6878.16	21.56
TT73	23.09.2021	200.31	300.00	150.00	1310.00	1128.00	105.43	118923.11	8.33	14286.32	12.00	1.44	2.50	2.71	5864.81	19.27
TT74	23.09.2021	204.12	300.00	212.00	1263.00	1020.00	107.43	109582.59	8.05	13619.27	8.00	0.99	2.50	2.71	5590.97	17.43
TT75	23.09.2021	200.57	300.00	145.00	905.00	737.00	105.56	77799.42	8.63	8965.69	10.00	1.16	2.50	2.71	3680.59	12.59
TT76	23.09.2021	201.39	300.00	186.00	1259.00	1042.00	106.00	110449.28	8.33	13266.52	8.00	0.96	2.50	2.71	5446.16	17.80
TT77	23.09.2021	198.12	300.00	178.00	1546.00	1330.00	104.28	138685.90	8.45	16414.52	12.00	1.42	2.50	2.71	6738.48	22.72
TT78	23.09.2021	203.62	300.00	184.00	1226.00	1012.00	107.17	108456.61	8.53	12695.16	10.00	1.17	2.50	2.71	5211.61	17.29
TT79	23.09.2021	199.06	300.00	164.00	1079.00	888.00	104.77	93034.59	8.60	10799.04	10.00	1.16	2.50	2.71	4433.21	15.17
TT80	23.09.2021	193.39	300.00	174.00	1376.00	1168.00	101.78	118883.03	9.16	12983.09	14.00	1.53	2.50	2.71	5329.81	19.95
TT81	23.09.2021	196.57	300.00	150.00	1282.00	1100.00	103.46	113803.32	8.70	13085.82	8.00	0.92	2.50	2.71	5371.98	18.79
TT82	23.09.2021	196.61	300.00	160.00	1249.00	1058.00	103.48	109481.16	8.97	12193.01	14.00	1.56	2.50	2.71	5005.47	18.07

Art-CPT sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT'ler gerçekleştirilmiştir. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.30'de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, teknik şartnamede belirtilen %65 rölatif sıkılığa karşı gelen, hedef koni uç direncinin sağlandığı ve kullanılan uygulama prosedürünün başarılı olduğu tespit edilmiştir.

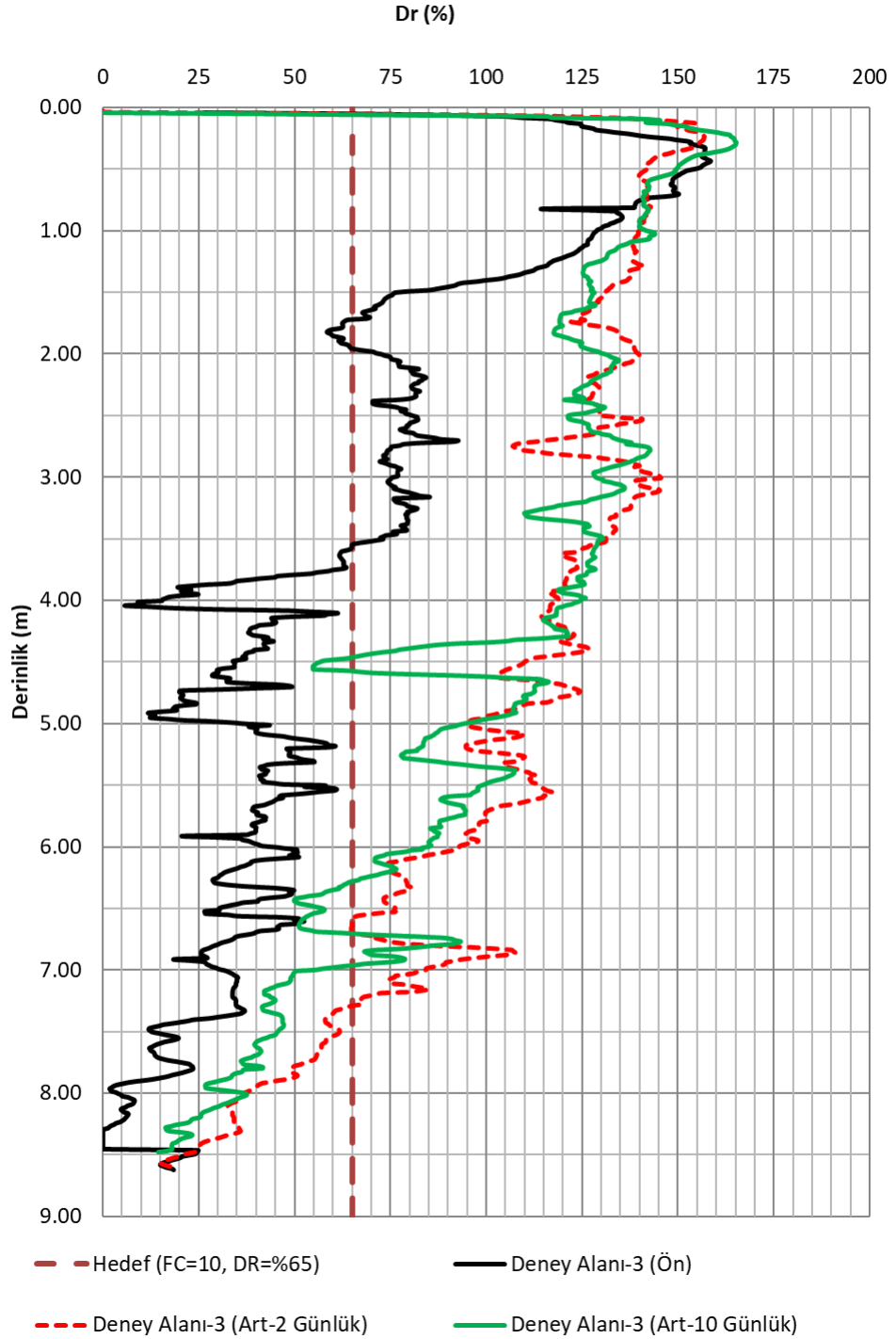
Deney Alanı-3 (2.50x2.50) (Çift Geçiş)



Şekil 4.30 : Deney alanı-3 art-CPT sonuçları.

Art-CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığıın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.31’te verilmektedir.

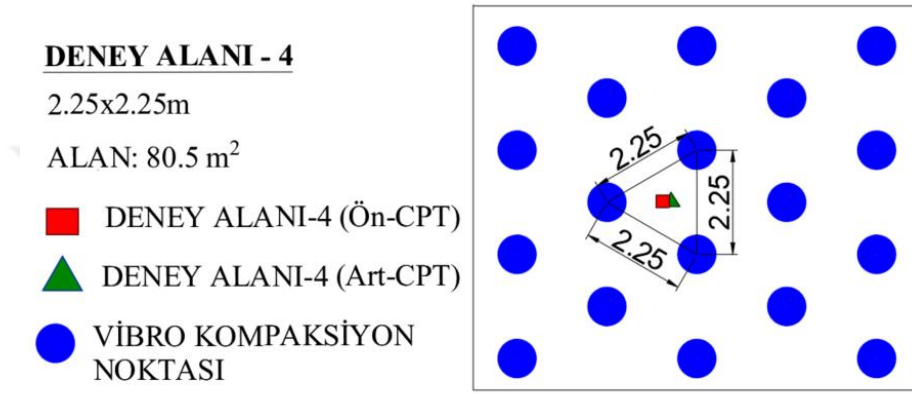
Deney Alanı-3 (2.50x2.50) (Çift Geçiş)



Şekil 4.31 : Deney alanı-3 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.

4.8.5 Deney alanı-4 (TA-4)

Deney alanı-3’de 2.25x2.25 m eşkenar üçgen yerleşim düzeni ile toplam 18 noktada, çift pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.32’te gösterildiği gibi 1 adet ön CPT gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma uygulaması çift pas ile gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 gün 10 gün sonra, üçgen karelajın ortasında art CPT’ler yapılmıştır.

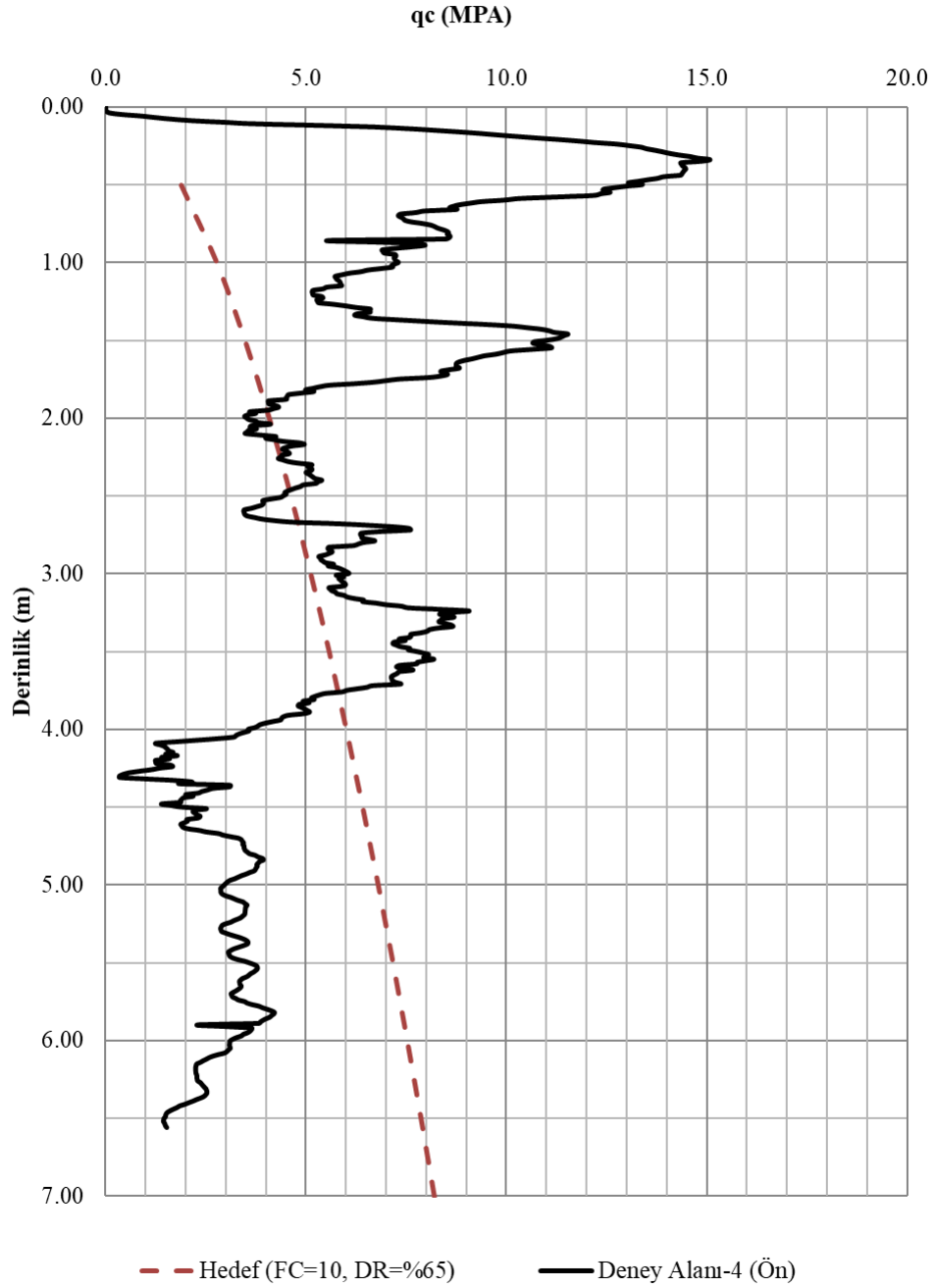


Şekil 4.32 : Deney alanı-4 genel yerleşim planı.

Ön-CPT sonuçları:

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgunun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi maksadıyla Şekil 4.32’de gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT’den elde edilen uç direncini derinlik ile değişimi Şekil 4.33’de verilmektedir. Ön CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 2.00 metre derinliğe kadar dolgunun 2-12 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağır tonajlı makine hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 2.00 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilebilir. Özellikle, 400-6.50 metre derinlikte ortalama uç direncinin 1.5 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 2.50 metre derinliğin altındaki hidrolik dolgu kumun, hedef uç direncinin oldukça altında kaldığı ve sıkıştırma enerjisinin bu bölgeye göre belirlenmesinin gerektiği tespit edilmiştir.

Deney Alanı-4 (2.25x2.25) (Çift Geçiş)



Şekil 4.33 : Deney alanı-4 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon uygulaması:

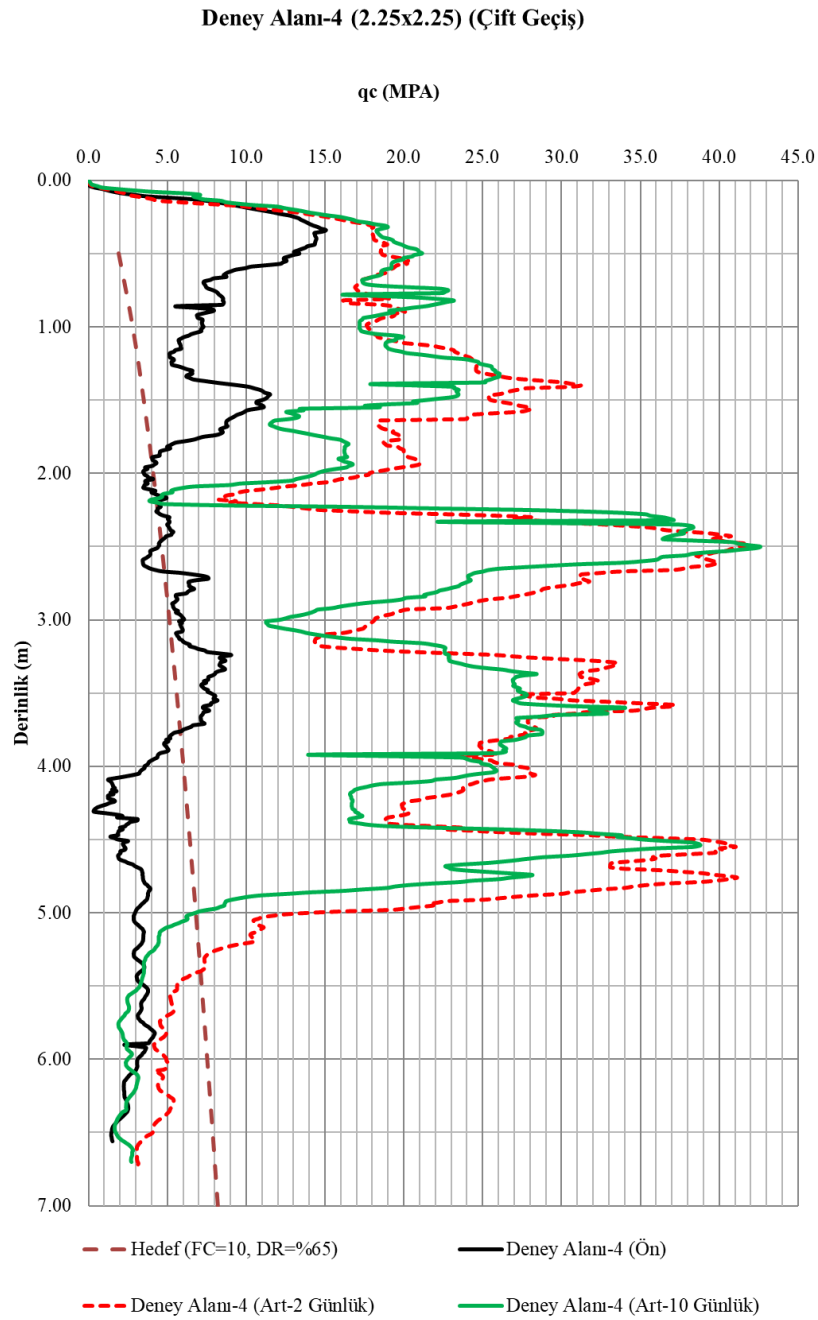
Deney alanı-4'de toplam 18 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir sıkıştırma noktasına ait uygulama parametreleri, sıkıştırma noktalarına doldurulan kum miktarı ve hesaplan sıkıştırma enerjileri Çizelge 4.11'de özetlenmektedir.

Çizelge 4.11 : Deney alanı-4 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

V. K.	Tarih	Pave	Qave	Süre (sn)		At	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm2)	(lt/dak.)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m3)	(m3/m)	(m)	(m2)	(kJoule/m3)	(dak.)
TT47	22.09.2021	179.00	300.00	104.00	924.00	820.00	94.21	65047.30	6.31	10327.63	8.00	1.27	2.25	2.19	4711.23	13.67
TT48	22.09.2021	193.52	300.00	346.00	1806.00	1460.00	101.85	178927.78	6.29	21484.46	13.00	2.07	2.25	2.19	9800.74	24.33
TT49	22.09.2021	197.68	300.00	276.00	1506.00	1230.00	104.04	141627.21	6.60	16132.27	14.00	2.12	2.25	2.19	7359.19	20.50
TT50	23.09.2021	196.35	300.00	168.00	1112.00	944.00	103.34	82141.46	6.54	12576.67	12.00	1.83	2.25	2.19	5737.19	15.73
TT51	22.09.2021	193.09	300.00	346.00	1568.00	1222.00	101.62	139645.75	6.31	15513.93	12.00	1.90	2.25	2.19	7077.11	20.37
TT52	22.09.2021	194.29	300.00	106.00	996.00	890.00	102.26	76629.41	6.59	11639.21	10.00	1.52	2.25	2.19	5309.55	14.83
TT53	23.09.2021	198.35	300.00	256.00	1196.00	940.00	104.39	82626.50	6.52	12696.69	9.00	1.38	2.25	2.19	5791.95	15.67
TT54	22.09.2021	192.51	300.00	310.00	1750.00	1440.00	101.32	158977.79	6.50	19636.59	13.00	2.00	2.25	2.19	8957.79	24.00
TT55	23.09.2021	201.38	300.00	194.00	1084.00	890.00	105.99	79425.43	6.78	11737.88	12.00	1.77	2.25	2.19	5354.56	14.83
TT56	22.09.2021	200.24	300.00	756.00	3364.00	2608.00	105.39	467493.25	6.52	29631.71	14.00	2.15	2.25	2.19	13517.33	43.47
TT57	22.09.2021	192.87	300.00	168.00	950.00	782.00	101.51	66837.58	7.06	9487.27	10.00	1.42	2.25	2.19	4327.89	13.03
TT58	23.09.2021	205.96	300.00	250.00	1228.00	978.00	108.40	89266.17	6.70	13333.26	11.00	1.64	2.25	2.19	6082.34	16.30
TT59	22.09.2021	185.92	300.00	174.00	1084.00	910.00	97.86	74978.67	6.82	11015.47	8.00	1.17	2.25	2.19	5025.01	15.17
TT60	23.09.2021	197.74	300.00	216.00	1306.00	1090.00	104.07	95517.82	6.93	13762.58	10.00	1.44	2.25	2.19	6278.19	18.17
TT61	22.09.2021	195.90	300.00	486.00	2276.00	1790.00	103.10	236058.56	6.87	21445.92	14.00	2.04	2.25	2.19	9783.16	29.83
TT62	22.09.2021	187.17	300.00	142.00	1034.00	892.00	98.51	73988.54	7.71	9604.28	8.00	1.04	2.25	2.19	4381.26	14.87
TT63	22.09.2021	180.39	300.00	140.00	1168.00	1028.00	94.94	82181.22	7.33	11230.71	10.00	1.36	2.25	2.19	5123.20	17.13
TT64	22.09.2021	189.25	300.00	150.00	1052.00	902.00	99.60	75647.30	7.09	10675.20	10.00	1.41	2.25	2.19	4869.79	15.03

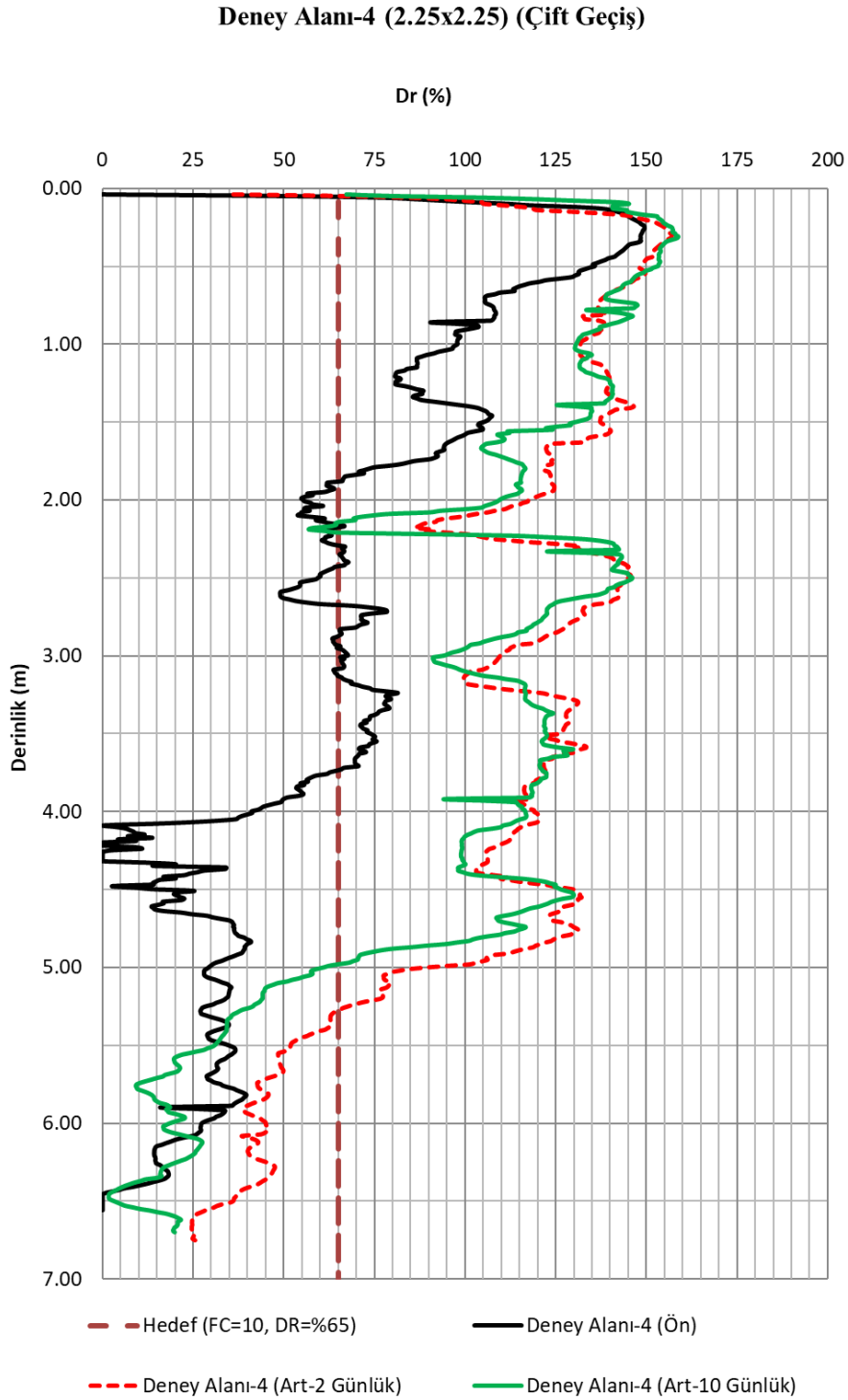
Art-CPT Sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT'ler gerçekleştirilmiştir. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.34'de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, teknik şartnamede belirtilen %65 rölatif sıkılığa karşı gelen, hedef koni uç direncinin sağlandığı ve kullanılan uygulama prosedürünün başarılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.34 : Deney alanı-4 art-CPT sonuçları.

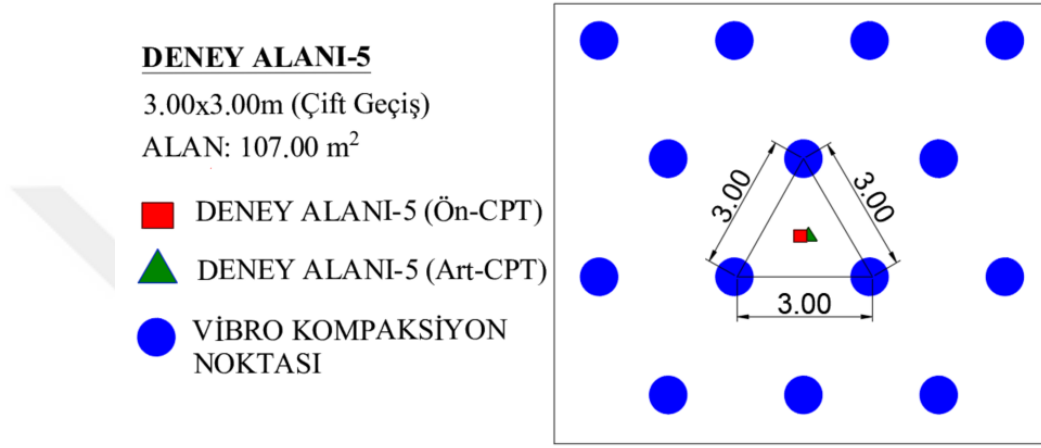
Art CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığın (D_r) derinlik ile değişimi Şekil 4.35’de verilmektedir.



Şekil 4.35 : Deney alanı-4 rölatif sıkılığın (D_r) derinlik ile değişimi.

4.8.6 Deney alanı-5 (TA-5)

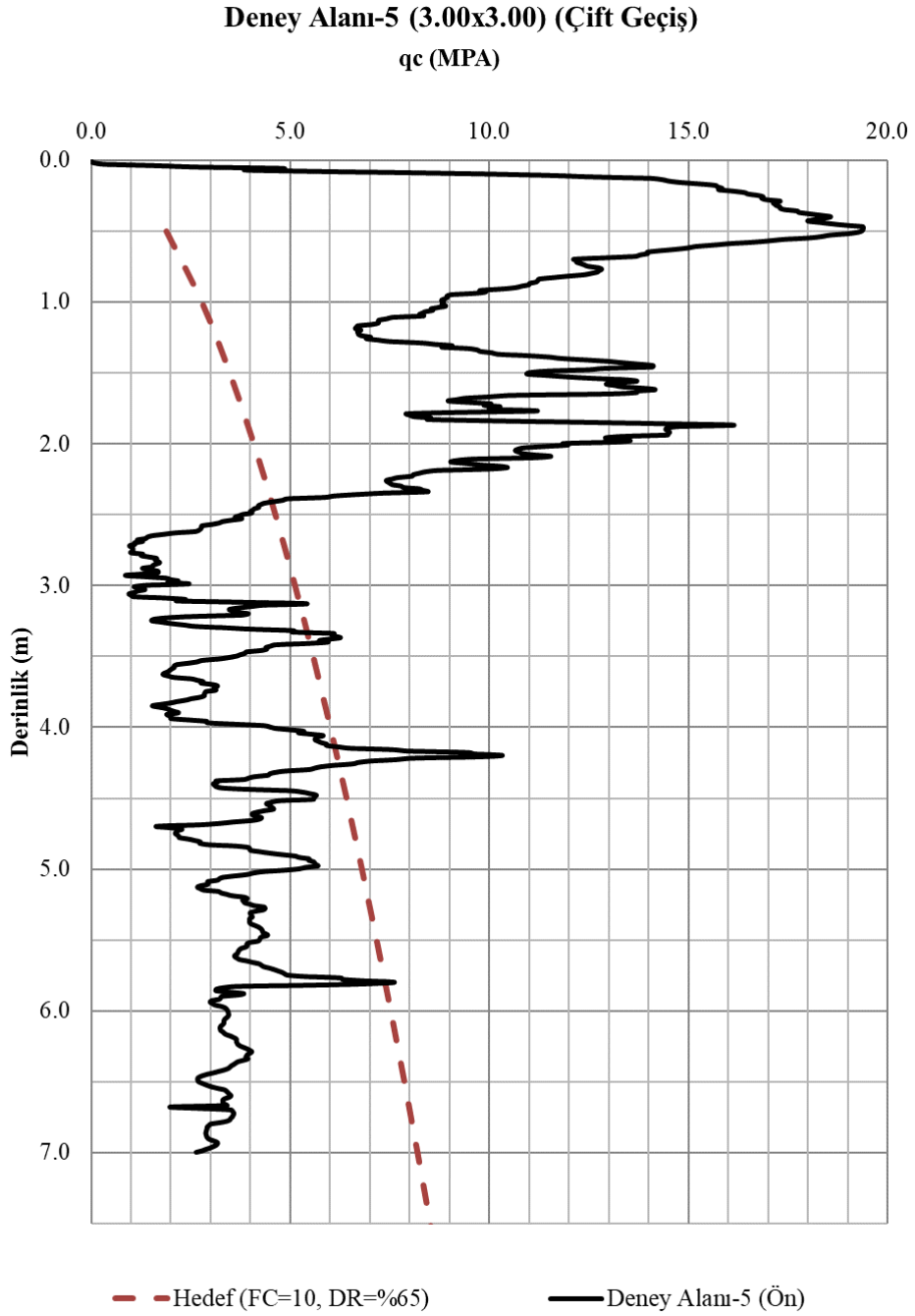
Deney alanı-5’de 3.00x3.00m üçgen yerleşim düzeni ile toplam 14 noktada, çift pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.36’da gösterildiği gibi 1 adet ön CPT gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma uygulaması çift pas (geçiş) ile gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 gün 10 gün sonra art CPT’ler yapılmıştır.



Şekil 4.36 : Deney alanı-5 genel yerleşim planı.

Ön-CPT Sonuçları:

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgunun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi maksadıyla Şekil 4.36’da gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT’den elde edilen koni uç direncini derinlik ile değişimi Şekil 4.37’de verilmektedir. Ön-CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 2.50 metre derinliğe kadar dolgunun 5-18 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağır tonajlı makine-ekipman hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 2.50 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilebilir. Özellikle, 2.50-7.00 metre derinlikte ortalama uç direncinin 3.0 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 2.50 metre derinliğin altındaki hidrolik dolgu kumun hedef uç direncinin altında kaldığı ve daha fazla sıkıştırma enerjini uygulanması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.37 : Deney alanı-5 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon uygulaması:

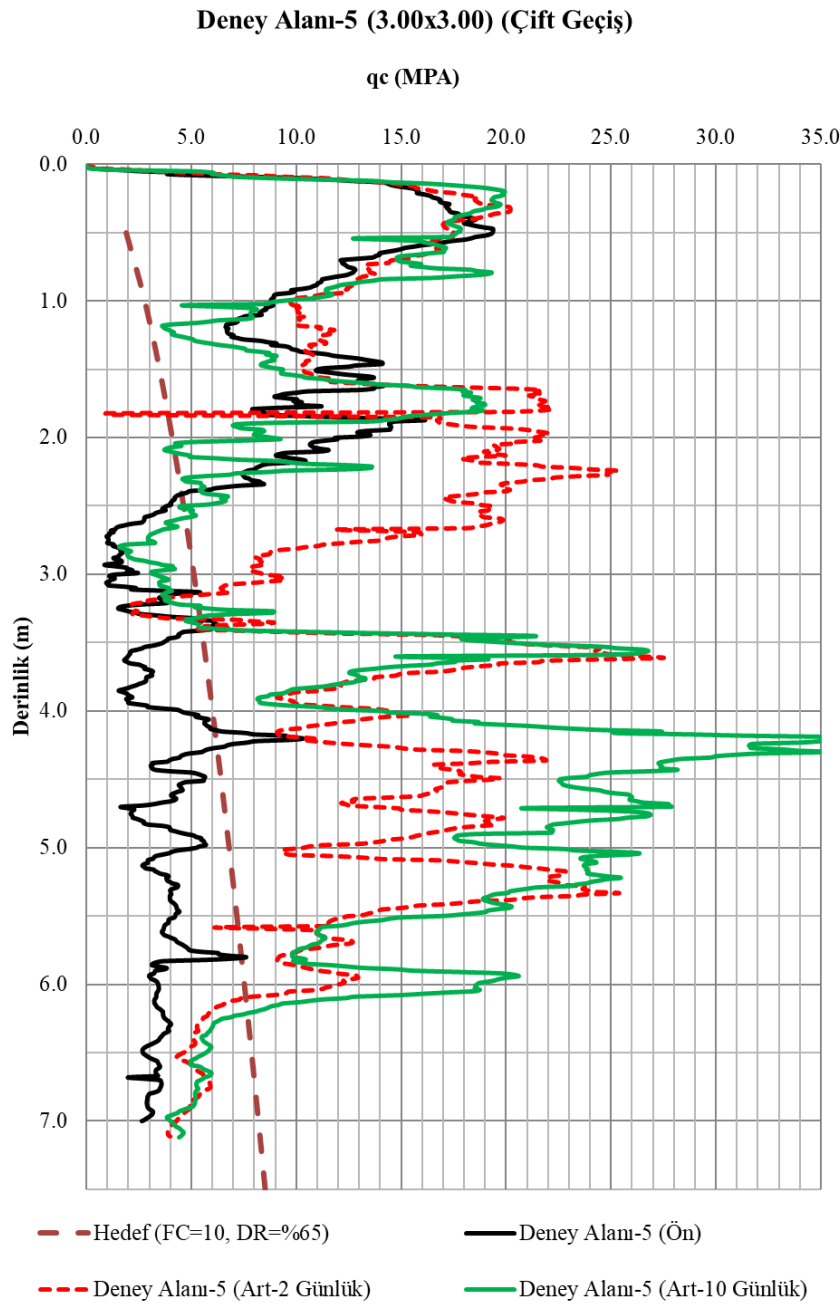
Deney alanı-4'te toplam 14 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir sıkıştırma noktasına ait uygulama parametreleri, sıkıştırma noktalarına doldurulan kum miktarı ve hesaplan sıkıştırma enerjileri Çizelge 4.12'de özetlenmektedir.

Çizelge 4.12 : Deney alanı-5 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

V. K.	Tarih	P _{ave}	Q _{ave}	Süre (sn)		Δt	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm ²)	(lt/dak.)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m ³)	(m ³ /m)	(m)	(m ²)	(kJoule/m ³)	(dak.)
TT83	7.10.2021	197.80	300.00	212.00	946.00	734.00	104.10	81149.59	7.03	11543.33	12.00	1.71	3.00	3.90	2962.02	12.23
TT84	7.10.2021	195.12	300.00	130.00	1098.00	968.00	102.70	89500.33	6.63	13499.30	12.00	1.81	3.00	3.90	3463.92	16.13
TT85	7.10.2021	197.76	300.00	194.00	1206.00	1012.00	104.09	105471.71	6.67	15812.85	12.00	1.80	3.00	3.90	4057.58	16.87
TT86	7.10.2021	197.57	300.00	124.00	1030.00	906.00	103.99	83557.93	7.24	11541.15	12.00	1.66	3.00	3.90	2961.46	15.10
TT87	7.10.2021	204.03	300.00	160.00	1008.00	848.00	107.38	84889.29	6.98	12161.79	12.00	1.72	3.00	3.90	3120.72	14.13
TT88	7.10.2021	197.78	300.00	185.00	1084.00	899.00	104.09	98194.74	7.87	12477.10	12.00	1.52	3.00	3.90	3201.62	14.98
TT89	7.10.2021	196.49	300.00	162.00	894.00	732.00	103.42	77024.17	6.95	11082.61	10.00	1.44	3.00	3.90	2843.80	12.20
TT90	7.10.2021	196.68	300.00	180.00	1110.00	930.00	103.82	96619.41	7.82	12355.42	12.00	1.53	3.00	3.90	3170.40	15.50
TT91	7.10.2021	195.33	300.00	126.00	1242.00	1116.00	102.80	114778.04	7.48	15344.66	12.00	1.60	3.00	3.90	3937.44	18.60
TT92	7.10.2021	195.13	300.00	234.00	978.00	744.00	102.70	84104.28	7.45	11289.17	10.00	1.34	3.00	3.90	2896.80	12.40
TT93	7.10.2021	191.90	300.00	190.00	866.00	676.00	101.00	74268.39	7.86	9448.90	12.00	1.53	3.00	3.90	2424.59	11.27
TT94	7.10.2021	198.57	300.00	218.00	950.00	950.00	104.51	78419.10	8.49	9236.64	10.00	1.18	3.00	3.90	2370.12	12.20
TT95	7.10.2021	199.20	300.00	114.00	886.00	886.00	104.84	77097.14	7.93	9722.21	12.00	1.51	3.00	3.90	2494.72	12.87
TT96	7.10.2021	195.13	300.00	216.00	1104.00	888.00	102.70	98052.31	7.82	12538.66	14.00	1.79	3.00	3.90	3217.42	14.80

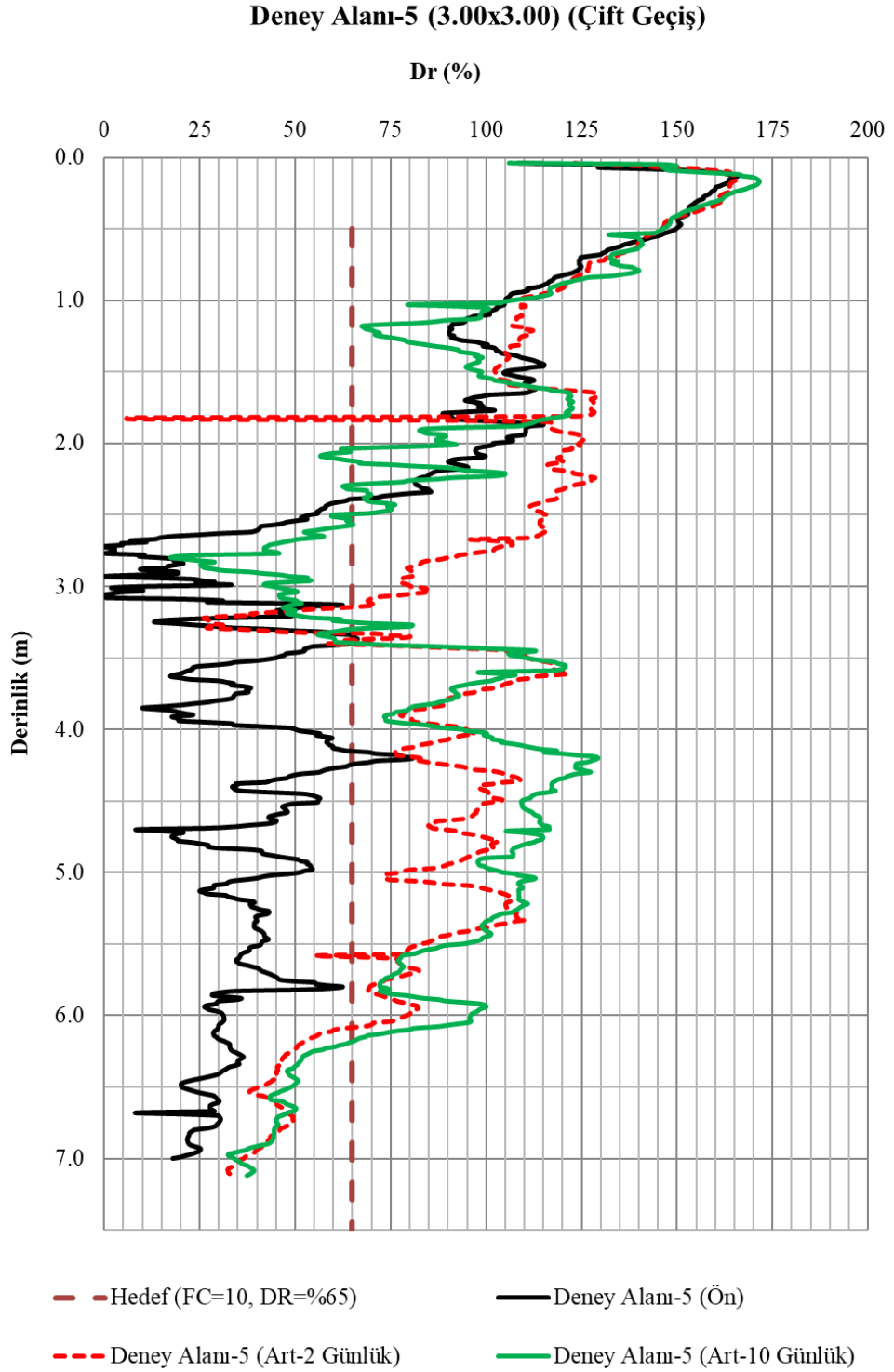
Art-CPT Sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.38’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan uygulama prosedürün başarılı olduğu, art koni uç direncinin, hedef kriteri sağlandığı, uygulanan sıkıştırma parametrelerin ve prosedürün başarılı olduğu tespit edilmiştir



Şekil 4.38 : Deney alanı-5 art-CPT sonuçları.

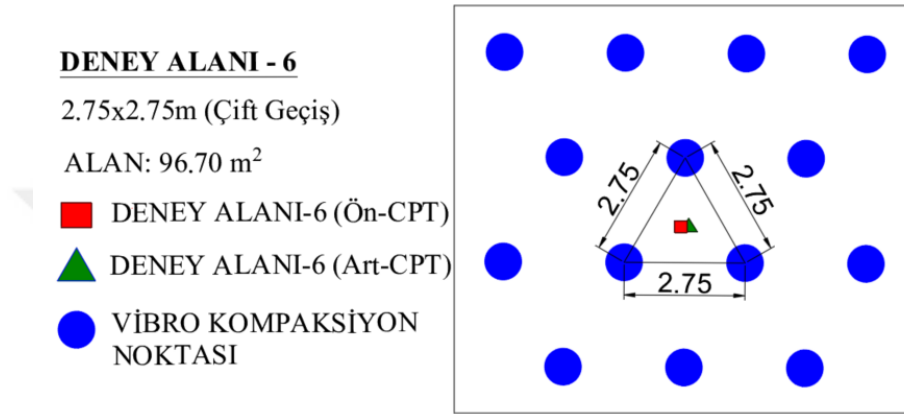
Art-CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak elde edilen rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.39’de verilmektedir.



Şekil 4.39 : Deney alanı-5 rölatif sıklığın (Dr) derinlik ile değişimi.

4.8.7 Deney alanı-6 (TA-6)

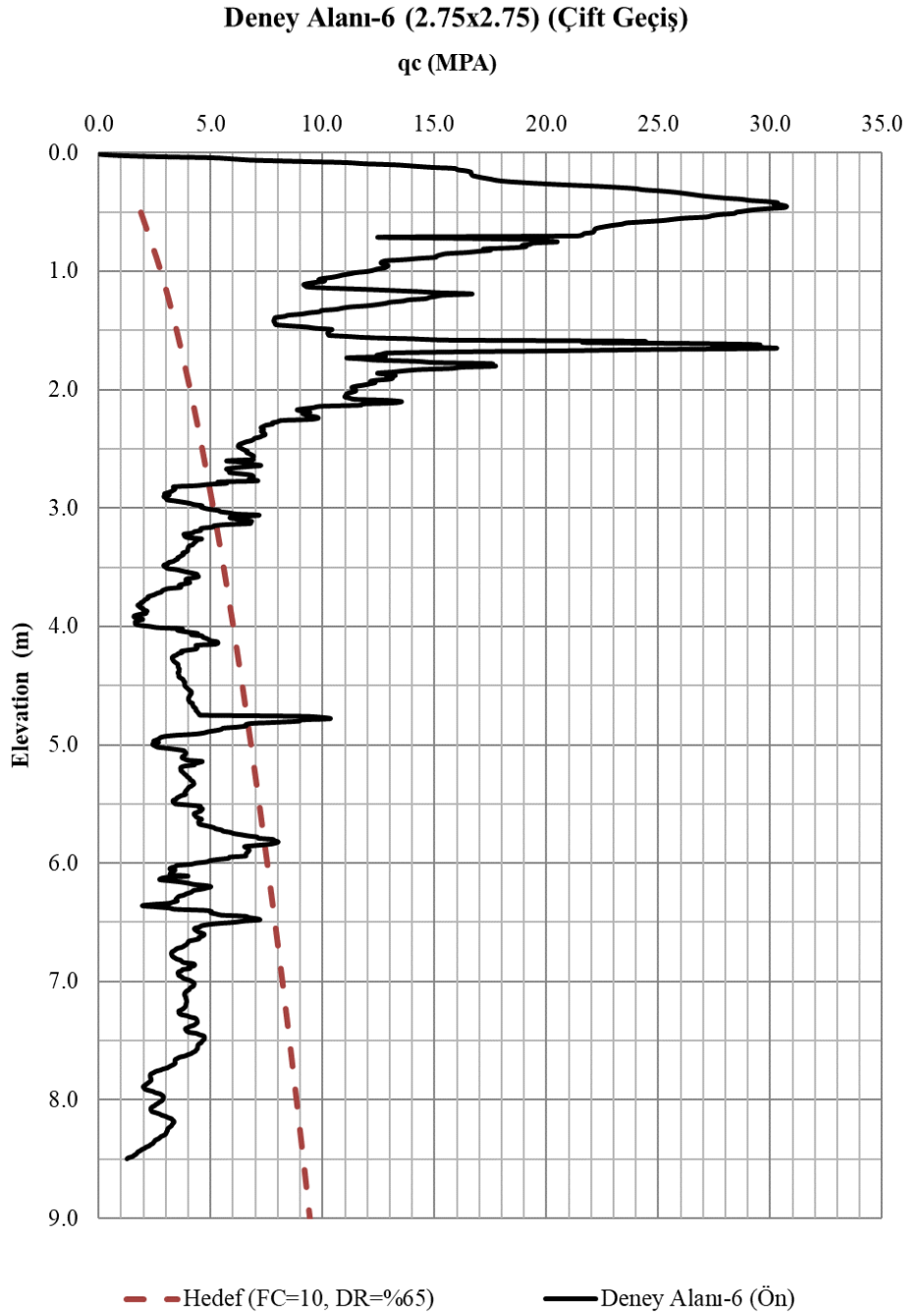
Deney alanı-6'de 2.75x2.75 m eşkenar üçgen karelaj ile toplam 14 noktada, çift pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.40'da gösterildiği gibi 1 adet ön CPT gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma uygulaması çift pas (geçişle) gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 gün 10 gün sonra art CPT deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.40 : Deney alanı-6 genel yerleşim planı.

Ön-CPT Sonuçları:

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgunun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi maksadıyla Şekil 4.39'da gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön CPT'den elde edilen uç direncini derinlik ile değişimi Şekil 4.41'de verilmektedir. Ön CPT sonuçlarına göre, çalışma kotundan 3.00 metre derinliğe kadar dolgunun 5-30 MPa uç direncine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, çalışma kotunun ağır tonajlı makine hareketi ile sürekli aktif olması ve zamanla bu 3.00 metrelik tabakanın sıkışması olarak değerlendirilebilir. Özellikle, 3.00-8.50 metre derinlikte ortalama uç direncinin 3.5 MPa mertebelerinde olduğu görülmektedir. Deney prosedürleri belirlenirken, özellikle 3.00 metre derinliğin altındaki hidrolik dolgu kumun hedef uç direncinin altında kaldığı ve daha fazla sıkıştırma enerjini uygulanması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.41 : Deney alanı-6 ön-CPT sonucu.

Vibro kompaksiyon İmalatı:

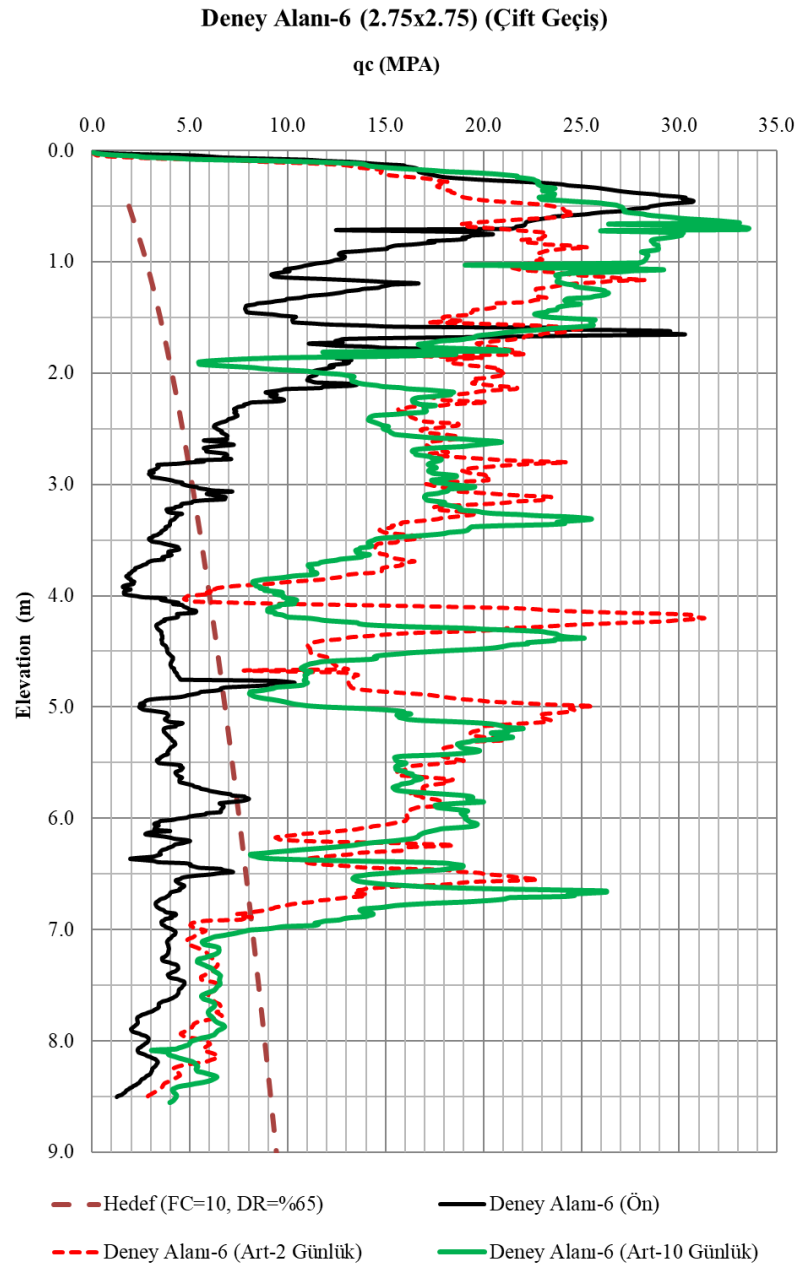
Deney alanı-4'te toplam 14 adet noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Her bir sıkıştırma noktasına ait uygulama parametreleri, sıkıştırma noktalarına doldurulan kum miktarı ve hesaplan sıkıştırma enerjileri Çizelge 4.13'te özetlenmektedir.

Çizelge 4.13 : Deney alanı-6 Vibro kompaksiyon uygulama özeti.

V. K.	Tarih	Pave	Qave	Süre (sn)		Δt	Güç	T.Enerji	Derinlik	E/m	Doldurulan Kum Hacmi	Kum Hacmi	Yerleşim Aralığı	Yerleşim Alanı	E/m	Sıkıştırma Süresi
No		(kg/cm ²)	(lt/dak..)	Başlangıç	Bitiş	(sn)	(kW)	(kJoule)	(m)	(kJoule/m)	(m ³)	(m ³ /m)	(m)	(m ²)	(kJoule/m ³)	(dak.)
TT97	7.10.2021	197.24	300.00	108.00	814.00	706.00	103.81	62564.70	8.01	7810.82	10.00	1.25	2.75	3.27	2385.23	11.77
TT98	7.10.2021	193.69	300.00	110.00	860.00	750.00	101.94	72499.86	7.92	9154.02	10.00	1.26	2.75	3.27	2795.41	12.50
TT99	6.10.2021	203.12	300.00	180.00	1040.00	860.00	106.91	91424.87	8.40	10883.91	12.00	1.43	2.75	3.27	3323.68	14.33
TT100	6.10.2021	193.62	300.00	188.00	1018.00	830.00	101.90	85512.90	8.64	9897.33	8.00	0.93	2.75	3.27	3022.40	13.83
TT101	7.10.2021	197.94	300.00	244.00	992.00	748.00	104.18	84065.55	8.38	10031.69	12.00	1.43	2.75	3.27	3063.43	12.47
TT102	7.10.2021	195.29	300.00	245.00	1030.00	785.00	102.78	88872.89	8.53	10418.86	10.00	1.17	2.75	3.27	3181.66	13.08
TT103	6.10.2021	196.64	300.00	170.00	1526.00	1356.00	103.49	140043.30	9.09	15406.30	16.00	1.76	2.75	3.27	4704.71	22.60
TT104	6.10.2021	191.18	300.00	158.00	1546.00	1388.00	100.62	140560.57	8.84	15900.52	14.00	1.58	2.75	3.27	4855.63	23.13
TT105	7.10.2021	200.91	300.00	245.00	1206.00	961.00	105.74	110457.71	8.94	12355.45	12.00	1.34	2.75	3.27	3773.05	16.02
TT106	6.10.2021	184.58	300.00	160.00	1146.00	986.00	97.15	95659.51	8.89	10760.35	6.00	0.67	2.75	3.27	3285.95	16.43
TT107	6.10.2021	194.35	300.00	260.00	1106.00	846.00	102.29	96604.19	8.97	10769.70	16.00	1.78	2.75	3.27	3288.80	14.10
TT108	6.10.2021	191.35	300.00	240.00	1578.00	1338.00	100.71	142539.97	9.20	15493.48	16.00	1.74	2.75	3.27	4731.33	22.30
TT109	6.10.2021	187.71	300.00	240.00	1498.00	1258.00	98.80	132079.18	9.05	14594.38	14.00	1.55	2.75	3.27	4456.77	20.97
TT110	6.10.2021	193.27	300.00	270.00	1670.00	1400.00	101.72	153571.06	9.33	16459.92	14.00	1.50	2.75	3.27	5026.45	23.33

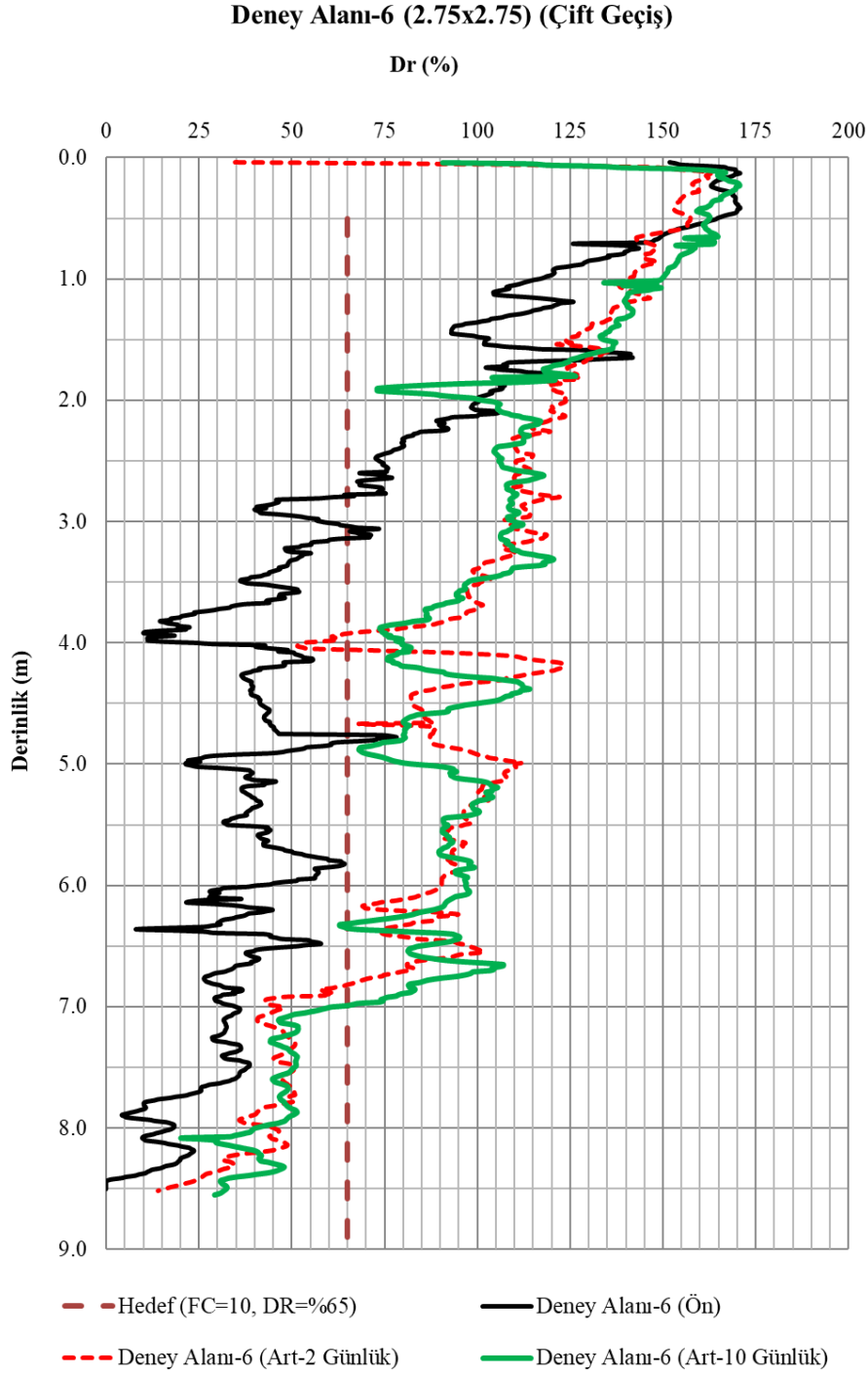
Art-CPT Sonuçları:

Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 2 ve 10 gün sonra, gerçekleşen iyileşme oranının tespit edilmesi amacıyla, art CPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Art CPT sonuçlarından elde edilen koni uç direncinin derinlik ile değişimi Şekil 4.42’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan uygulama prosedürünün başarılı olduğu, art koni uç direncinin, hedef kriteri sağlandığı, uygulanan sıkıştırma parametrelerin ve prosedürün başarılı olduğu tespit edilmiştir



Şekil 4.42 : Deney alanı-6 art-CPT sonuçları.

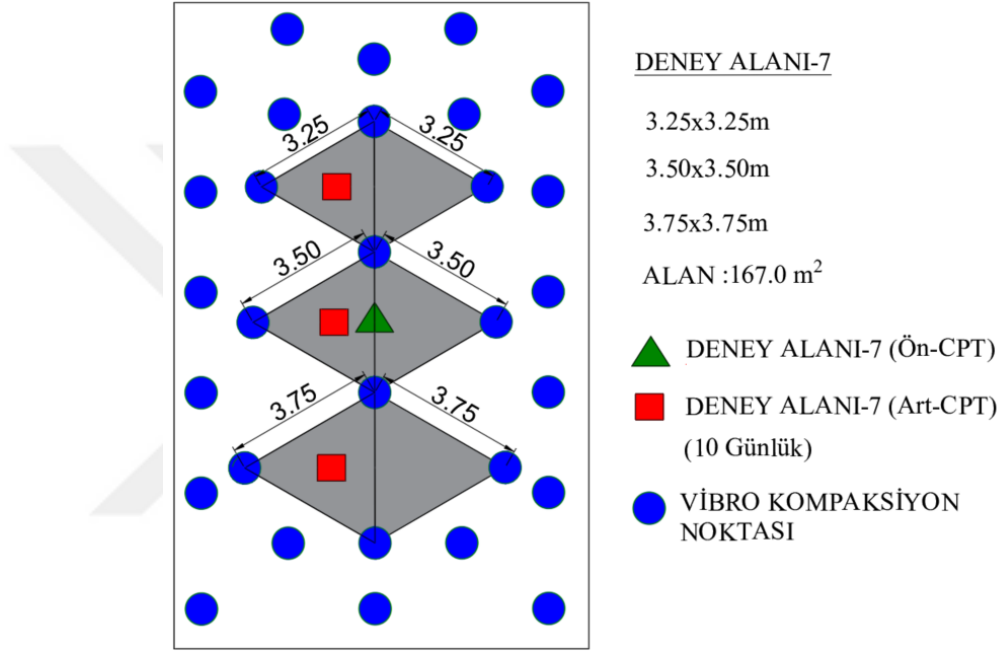
Art- PT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.43'te verilmektedir.



Şekil 4.43 : Deney alanı-6 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.

4.8.8 Deney alanı-7 (TA-7)

Deney alanı-7’de 3.25x3.25m, 3.50x3.50m ve 3.75x3.75m eşkenar üçgen karelaj ile toplam 30 noktada, çift pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölgedeki hidrolik dolgu kumun sıkıştırmadan önceki mühendislik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 4.44’te gösterildiği gibi 1 adet ön CPT gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma uygulaması çift pas (geçişle) gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 10 gün sonra Art-CPT deneyleri yapılmıştır.

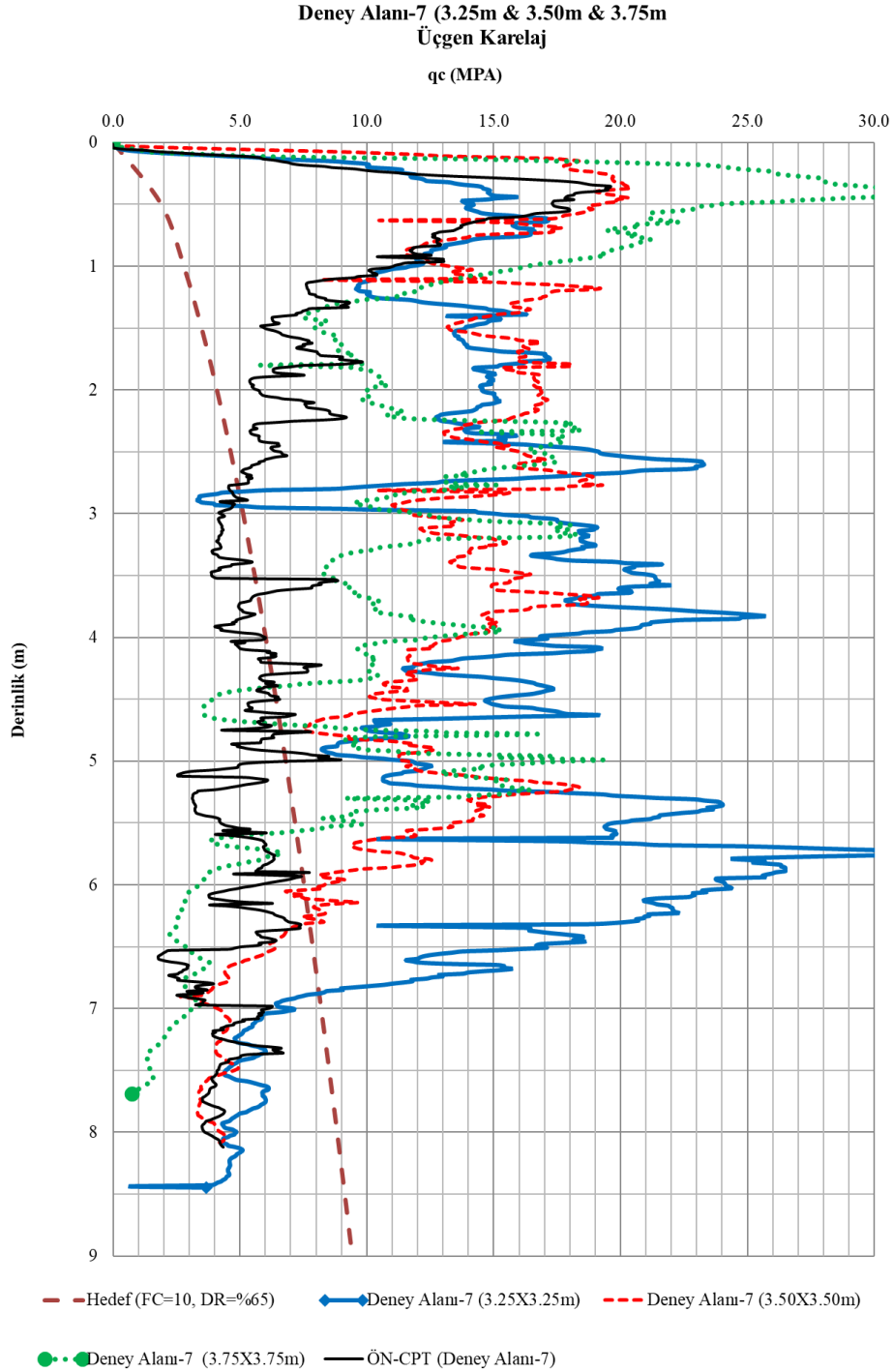


Şekil 4.44 : Deney alanı-7 genel yerleşim planı.

Ön & Art CPT Sonuçları:

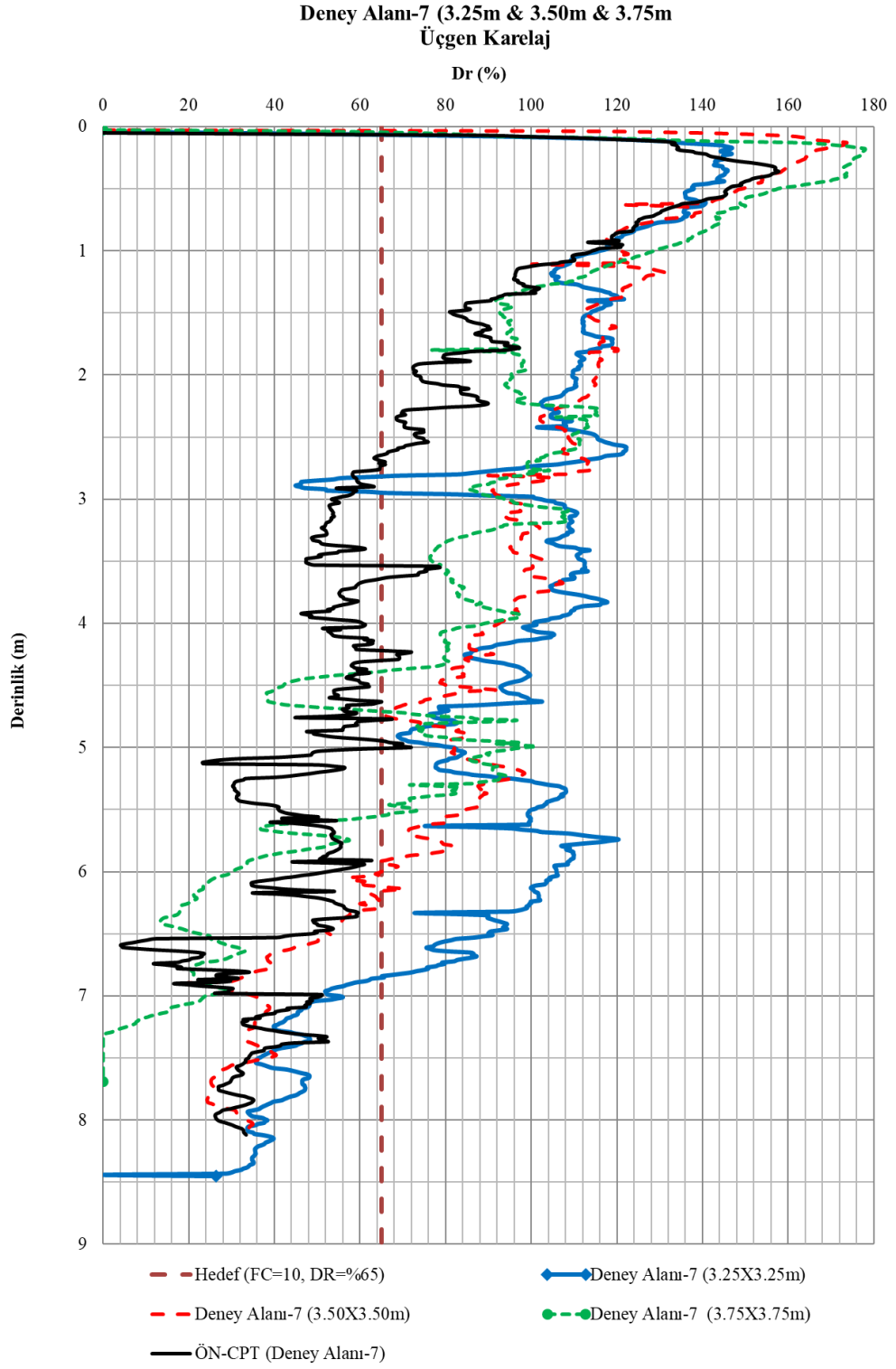
Deney alanı-7’de gerçekleştirilen tam ölçekli saha deneyini ana amacı, elde edilecek sonuçların, diğer bölgelerden elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirmektir. Böylelikle 2.25, 2.50, 2.75, 3.25, 3.50 ve 3.75 eşkenar üçgen karelaj ile gerçekleştirilen vibro kompaksiyon uygulamalarının etkinliğinin birlikte değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Hidrolik olarak yerleştirilen dolgu kumun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi maksadıyla Şekil 4.44’de gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön ve art CPT’lerden elde edilen uç direncini derinlik ile değişimi, her bir karelaj için Şekil 4.45’de verilmektedir. 3.25, 3.50 ve 3.75 karelaj için gerçekleştirilen Art-CPT sonuçları incelendiğinde, yerleşim aralığı ile koni uç direncindeki artış

arasındaki ilişki net şekilde tespit edilmiştir. İleriki bölümlerde, elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek, yerleşim aralığı ile koni uç direncindeki artış arasındaki ilişki daha detaylı olarak ele alınacaktır.



Şekil 4.45 : Deney alanı-7 ön-CPT ve art-CPT sonuçları.

Art CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi Şekil 4.46’da verilmektedir.



Şekil 4.46 : Deney alanı-7 rölatif sıkılığın (Dr) derinlik ile değişimi.

Yapılan tam ölçekli saha deneylerinin detayları ve sonuçları Çizelge 4.14’te özetlenmektedir.

Çizelge 4.14 : Tam ölçekli saha deneylerinin sonuçları.

Deney alanı	Deney Tarihi	Yerleşim Aralığı (m)	Yerleşim Alanı (m ²)	Yerleşim Düzeni (m)	Pas/Geçiş Sayısı	Ortalama Sıkıştırma Süresi (dakika)	Ortalama Derinlik (m)	Ortalama Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m)	Ortalama Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m ³)	Ort. qc (MPa) (Ön)	qc (MPa) (2 ve 10 Günlük Ortalaması)	Δqc (MPa)	Δqc (%)	*Ön-CPT Sonucu	Art-CPT Sonucu
1	17.09.2021	2.75	3.27	Eşkenar Üçgen	Tek Pas	7.62	7.55	5800	1771.18	5.67	5.64	0.00	0%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlanamadı
2	16.09.2021	3.00	3.90	Eşkenar Üçgen	Tek Pas	8.11	7.00	6854	1758.74	7.13	6.73	0.00	0%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlanamadı
3 (Seçilen)	23.09.2021	2.50	2.71	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	17.54	8.50	14458	5342.21	6.34	20.20	14.09	222%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
4	22.09.2021	2.25	2.19	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	19.27	6.50	14565	6644.23	5.33	19.58	14.27	268%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
5	7.10.2021	3.00	3.90	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	14.63	7.10	12000	3079.20	6.29	13.27	6.99	111%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
6	6.10.2021	2.75	3.27	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	16.92	8.50	12138	3706.65	7.18	15.26	8.09	113%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
	6.12.2021	3.25	4.57	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	14.13	8.80	10071	2201.85	6.20	13.87	7.67	124%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
7	6.12.2021	3.50	5.30	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	13.28	8.50	9777	1843.09	6.20	11.87	5.67	91%	Hedef Eğrini Altında	Hedef Kriter Sağlandı
	6.12.2021	3.75	6.09	Eşkenar Üçgen	Çift Pas	13.54	8.00	10579	1737.38	6.20	10.21	4.01	65%	Hedef Eğrini Altında	Kısmen Sağlandı

4.9 İdealize Zemin Profili ve Zemin Parametreleri

Toplam 7 bölgede, farklı uygulama parametreleri ve yerleşim aralıkları kullanılarak gerçekleştirilen tam ölçekli saha deneyleri neticesinde, tüm dolgu sahasının deney alanı-3'te (2.50x2.50m, eşkenar üçgen karelaaj) uygulanan parametreler ve yerleşim aralığı ile yapılması kararlaştırılmıştır. Bundan dolayı, oturma hesapları, Deney alanı-3'te gerçekleştirilen 10 günlük art CPT sonuçlarına göre yapılmış ve sonuçları sunulmuştur.

Hidrolik dolgu kumun minimum ve maksimum boşluk oranları, hassas olarak gerçekleştirilmiş ve tanımlanmış laboratuvar deneyleri ile belirlenir. Kirsch ve Kirsch (2016), sıklığın en gevşek aşaması, bir silindiri kuru kumla dikkatlice doldurarak elde edilir; en sıkı aşamaya ulaşmak için aynı silindir, titreşimlere ve statik yüklemeye maruz bırakılarak kumla doldurulur. Deney prosedürlerinin kaçınılmaz kusurları ve laboratuvarda elde edilebilecek maksimum sıkıştırmanın bazen sahada vibro kompaksiyon ile elde edilenin altında olması gerçeği, %100'ün üzerinde rölatif sıklığa neden olabileceğini belirtmiştir. Dolgu malzemesi hidrolik olarak yerleştirildiği için hidrolik kumun başlangıç boşluk oranı laboratuvarda koşullarında hesaplanan minimum boşluk oranından daha küçük olmaktadır. Bu durum, hesaplanan rölatif sıklığın %100'ün üzerinde hesaplanmasına neden olmaktadır.

Oturma hesaplarında kullanılacak parametreler için Brinkgreve ve diğ. (2010, 2017) tarafından önerilen korelasyonlar kullanılmıştır. Bu denklemler sırasıyla aşağıda verilmektedir;

$$\gamma_{kuru} = 15 + \frac{4.0 \times RD}{100} \left(\frac{kN}{m^3} \right) \quad (4.6)$$

$$\gamma_{doygun} = 19 + \frac{1.6 \times RD}{100} \left(\frac{kN}{m^3} \right) \quad (4.7)$$

$$E_{50}^{ref} = \frac{60000 \times RD}{100} (kN/m^2) \quad (4.8)$$

$$E_{oed}^{ref} = \frac{60000 \times RD}{100} (kN/m^2) \quad (4.9)$$

$$E_{ur}^{ref} = \frac{180000 \times RD}{100} (kN/m^2) \quad (4.10)$$

$$G_0^{ref} = \frac{180000 \times RD}{100} (kN/m^2) \quad (4.11)$$

$$\varphi' = 28 + \frac{12.5 \times RD}{100} (^\circ) \quad (4.12)$$

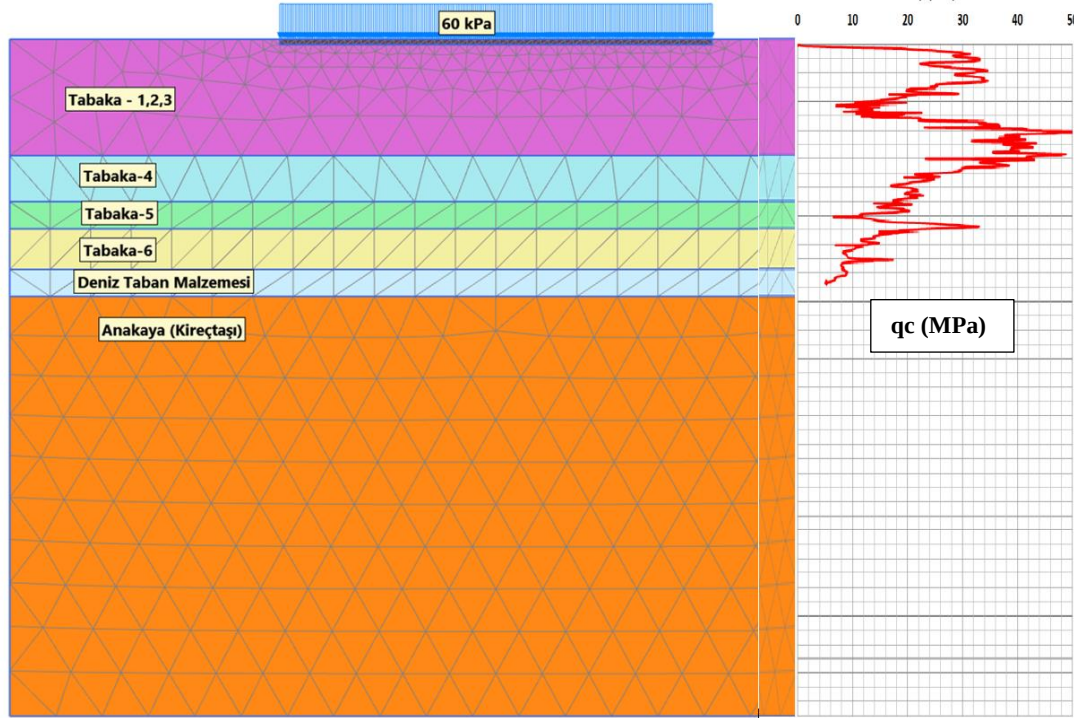
$$\psi = -2 + \frac{12.5 \times RD}{100} (^\circ) \quad (4.13)$$

$$R_f = 1 - \frac{RD}{80} (-) \quad (4.14)$$

Hesaplarda %100'ün üzerinde hesaplanan rölatif sıkılık değerleri, %95 olarak dikkate alınmıştır. Hesaplanan mühendislik parametreleri Çizelge 4.15'te, idealize zemin profili Şekil 4.47'de özetlenmektedir.

Çizelge 4.15 : Zemin/Kaya parametreleri.

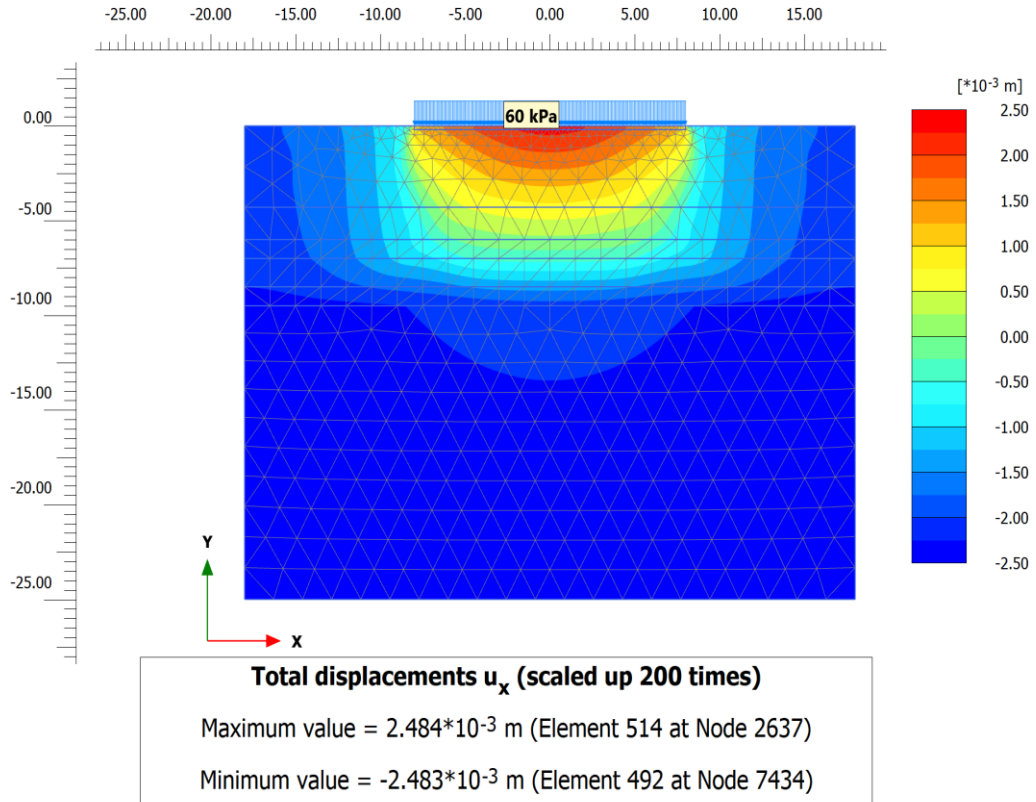
Tabaka	Tabaka Kalınlığı (m)	q _c (MPa)	Dr (%) (hesplanan)	Dr (%) (kabül)	γ _{kuru} (kN/m ³)	γ _{doygun} (kN/m ³)	E ₅₀ (MPa)	E _{oed} (MPa)	E _{ur} (MPa)	G _{ur} (MPa)	c' (kPa)	φ' (°)	m
1.0	1.2	20.0	145.0	95.0	18.8	20.5	57.0	57.0	171.0	124.6	1.0	39.0	0.4
2.0	2.0	23.0	130.0	95.0	18.8	20.5	57.0	57.0	171.0	124.6	1.0	39.0	0.4
3.0	1.1	29.0	120.0	95.0	18.8	20.5	57.0	57.0	171.0	124.6	1.0	39.0	0.4
4.0	1.7	16.0	90.0	90.0	18.6	20.4	54.0	54.0	162.0	121.2	1.0	39.0	0.4
5.0	1.0	11.8	70.0	70.0	17.8	20.1	42.0	42.0	126.0	107.6	1.0	36.0	0.5
6.0	1.5	4.5	38.0	38.0	16.5	19.6	22.8	22.8	68.4	85.8	1.0	32.0	0.6
Deniz Taban	1.0	4.5	38.0	38.0	16.5	19.6	22.8	22.8	68.4	85.8	2.0	32.0	0.6
Malzemesi													
Anakaya (Kireçtaşı)	-	-	-	-	23.0	24.0	250.0	250.0	750.0	2340.0	100.0	26.0	0.8



Şekil 4.47 : İdealize zemin profili.

4.10 Oturma Değerlendirmesi

Oturma hesapları, Çizelge 4.12’de belirtilen parametreler kullanılarak Plaxis sonlu elemanlar yazılımı ile hesaplanmıştır. Oturma hesapları, 60 kPa temel taban gerilmesi dikkate alınarak yapılmıştır. 60 kPa yük altında beklenen oturma miktarı Şekil 4.48’de verilmektedir.



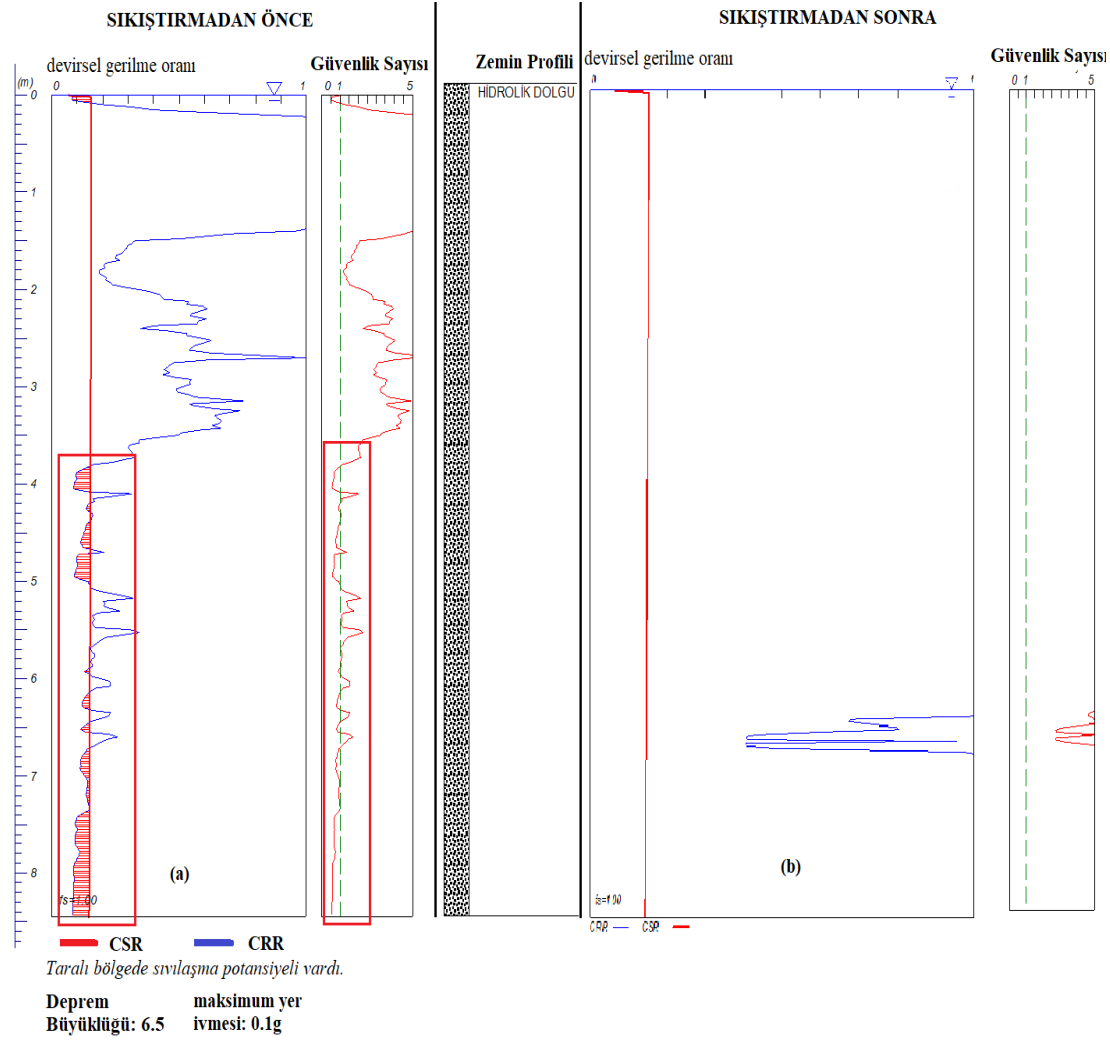
Şekil 4.48 : Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından hesaplanan nihai oturma.

Yapılan oturma hesaplarında, vibro kompaksiyon uygulamasının ardından 60 kPa sürşarj yükü altında altında, toplam 2.48 mm oturma beklenmektedir.

4.11 Sıvılaşma Değerlendirmesi

Hidrolik dolgu kumun, vibro kompaksiyondan önceki ve sonraki sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için uygulamanın yapılacağı prosedür ve yerleşim aralığı olan deney alanı-3’te elde gerçekleştirilen ön CPT ve iyileştirmeden iki gün sonra yapının art CPT sonuçları kullanılmıştır. Şekil 4.49a’da görüleceği gibi 3.50 m ile 8.50 m arasındaki derinlikte sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı 1.0’ın altında olduğu için sıvılaşma potansiyeli vardır. Vibro kompaksiyon uygulamasından sonra, Şekil

4.49b’de görüleceği gibi sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı 1.0’ın üzerinde elde edilmiş ve sıvılaşma potansiyeli ortadan kalkmıştır.



Şekil 4.49 : Sıvılaşma değerlendirme.

4.12 Tam Ölçekli Saha Deneylerinin Genel Değerlendirmesi

Yedi bölgede, farklı uygulama prosedürleri ve yerleşim aralıkları kullanılarak yapılan tam ölçekli saha deneyleri sonuçlarına göre;

- TA-1 ve TA-2’de tek pas ile gerçekleştirilen vibro kompaksiyon uygulaması, hedeflenen koni uç direnci ve rölatif sıkılık kriterini sağlayamamıştır. Yapılan art CPT sonuçlarına göre, tek pas olarak gerçekleştirilen uygulama prosedürü, başarısız olarak değerlendirilmiştir.
- Vibro kompaksiyon uygulamasında, tek pas (geçiş) ile uygulama prosedürünün başarısız olduğu değerlendirilmiş, ardından beş bölgede (TA-3, TA-4, TA-5,

TA-6 ve TA-7), farklı yerleşim aralıkları kullanılarak, çift pas ile vibro kompaksiyon uygulamaları ve CPT'ler yapılmıştır. Art CPT sonuçlarına göre, çift pas prosedürü kullanılarak yapılan uygulamaların tamamı hedef koni uç direnci ve rölatif sıklık kriterlerini sağlamış ve koni uç direncinde ortalama %65 ile %268 arasında artış elde edilmiştir.

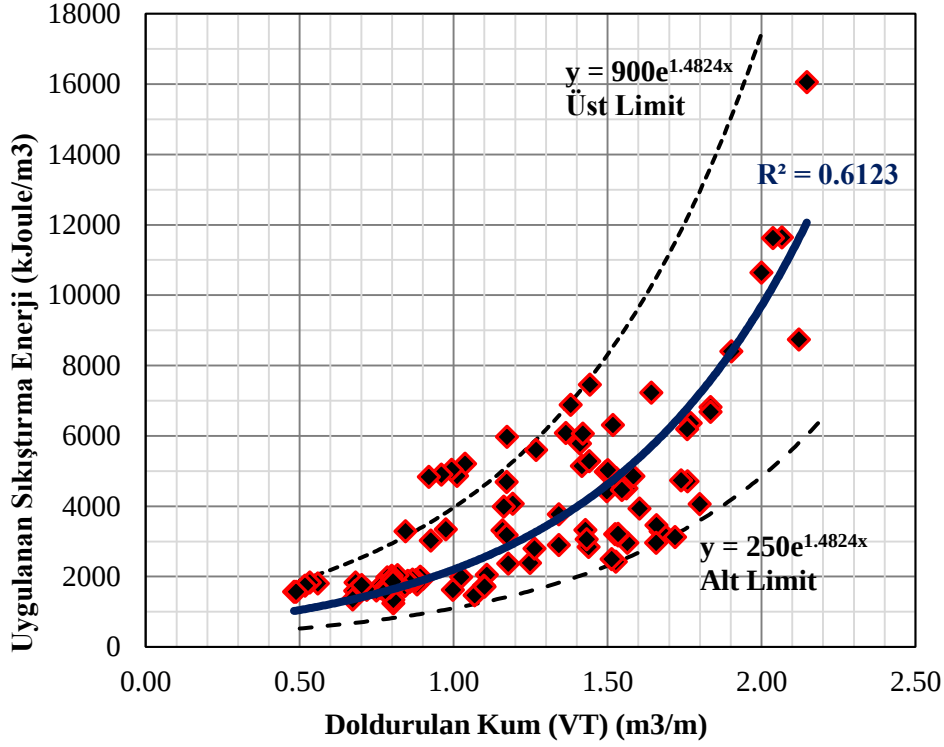
- Vibro kompaksiyon uygulamasından sonra gerçekleştirilen art CPT sonuçlarına göre, hidrolik dolgu tabakasının son 1.00-2.00 metrelik bölümünde, hedef koni uç direncinin altında değerler elde edilmesine karşın, üst katmanlarda, hedef rölatif sıklık olan %65'in çok üzerinde rölatif sıklık değerleri elde edilmiştir. Yapılan oturma hesaplarında, hedef kriterin altında kalan bu tabakalarda meydana gelen nihai oturma miktarları ihmal edilecek düzeyde kalmıştır.

4.12.1 Sıkıştırma enerjisi ile doldurulan kum miktarı arasındaki ilişki

Tam ölçekli saha deneyleri sırasında, tam zamanlı elektronik bilgi toplama ünitesinden elde edilen veriler kullanılarak, her bir vibro kompaksiyon noktası için uygulanan sıkıştırma enerjisi ve tipik parametreler hesaplanmış detayları Bölüm 4.2'de anlatılmıştır.

Sıkıştırma sırasında hassas olarak kayıt edilen veriler kullanılarak, vibro kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırma sırasında her bir metre derinlik için vibro kompaksiyon noktasında doldurulan kum miktarı arasındaki ilişki Şekil 4.50'de ve Denklem 4.15'te verilmektedir.

Şekil 4.50'den görüleceği üzere, sıkıştırma enerjisinin, $\sim 7000 \text{ kJoule/m}^3$ üzerine uygulanması durumunda, kum doldurma hızının parabolik olarak azaldığı ve $\sim 2.10 \text{ m}^3/\text{m}$ 'de asimptota yaklaştığı görülmektedir. Vibro kompaksiyon uygulamalarında, optimum sıkıştırma enerjisinin tespit edilmesi, vibro kompaksiyon uygulama parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Elde edilen bu ilişki ile vibro kompaksiyon uygulaması sırasında, sıkıştırma noktasına doldurulan kum miktarı anlık olarak takip edilerek, uygulamanın etkinliği değerlendirilebilir ve anlık müdellellerde bulunulabilir.



Şekil 4.50 : Uygulanan sıkıştırma enerji ile kum miktarı arasındaki ilişki.

$$E_c = 500xe^{1.4824xV_T} \quad (4.15)$$

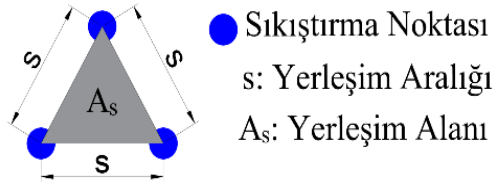
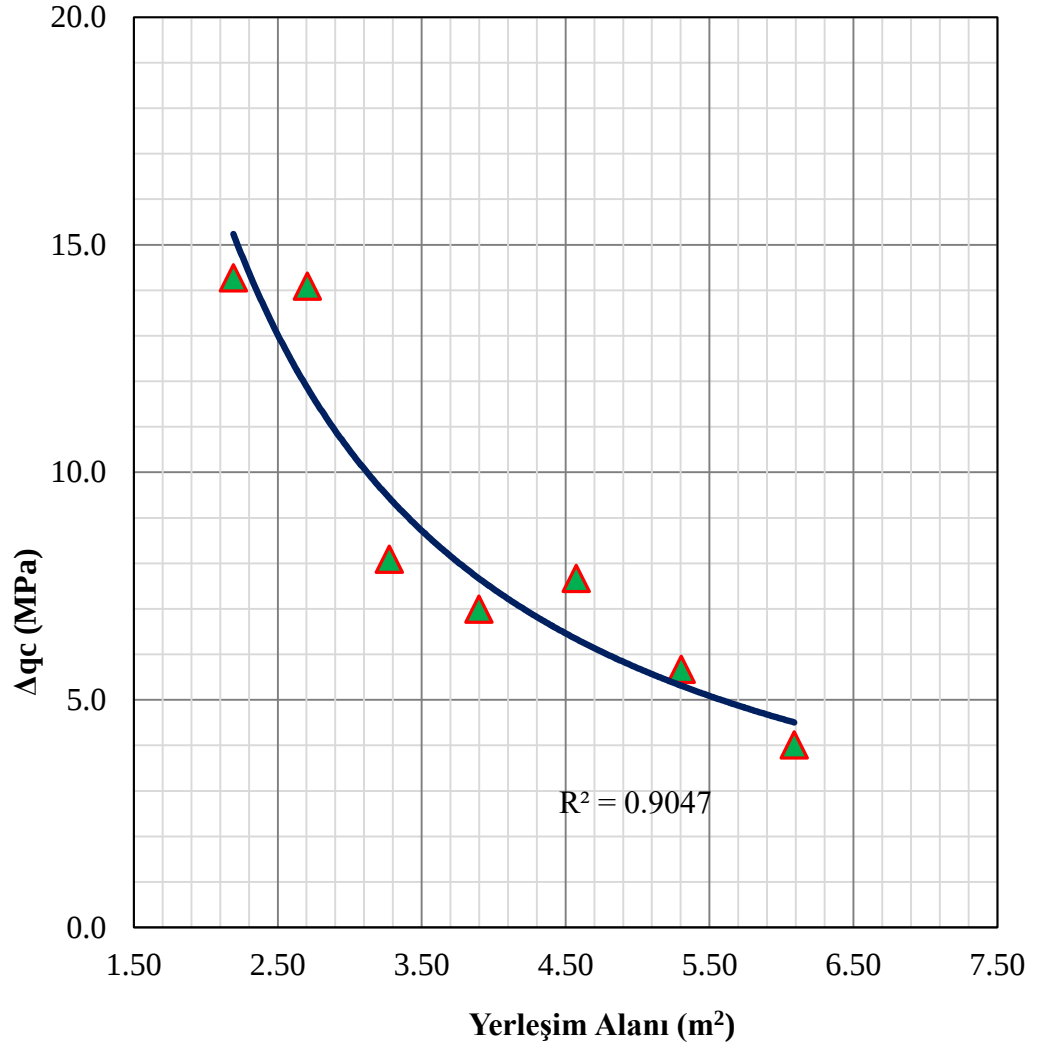
V_T : Doldurulan Kum Miktarı (m^3/m)

E_c : Sıkıştırma Enerjisi ($kJoule/m^3$)

4.12.2 Yerleşim alanı/aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki

Büyük ölçekli projelerde, uygulamaya başlamadan önce uygulama parametrelerinin belirlenebilmesi için farklı uygulama parametreleri kullanılarak bir dizi deney yapılması gereklidir. Yapılacak deneylerin ön tasarım aşamasında, yol gösterici olması amacıyla, TA-3, TA-4, TA-5, TA-6 ve TA-7 kapsamında yapılan vibro kompaksiyon uygulaması verileri ve CPT sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Beş bölgede gerçekleştirilen deneyler kapsamında, toplam 90 noktada vibro kompaksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tüm deney bölgelerinde ön CPT ve art CPT olmak üzere toplam 16 adet CPT yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek, yerleşim alanı ile koni uç direncindeki artış (Δq_c) arasındaki ilişki, tasarımın optimize edilmesi için kullanılabilir. Yerleşim alanı ve koni uç direncindeki artış (Δq_c) arasındaki ilişki Şekil 4.51’de ve Denklem 4.16’da sunulmaktadır. Elde edilen eğri ile deney sonuçları arasında %90.5 oranında ilişki veren korelasyon elde edilmiştir.



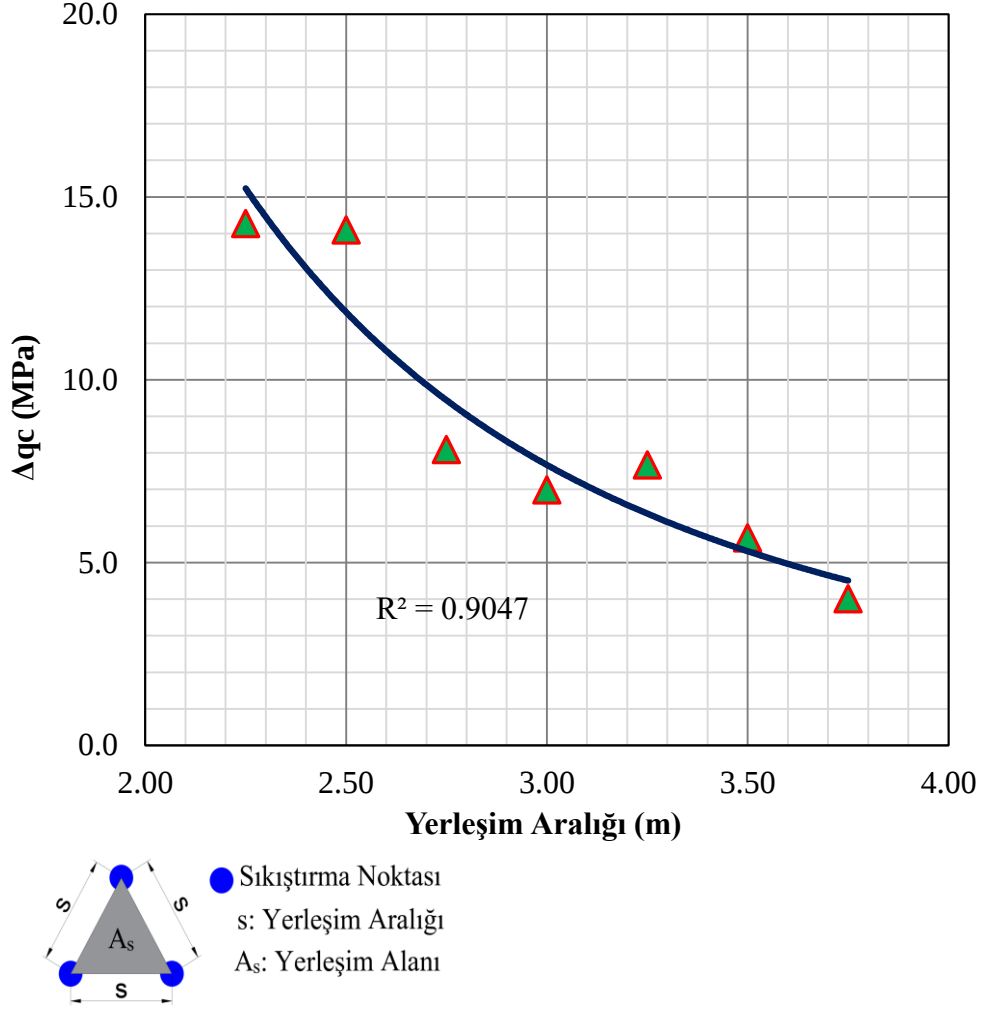
Şekil 4.51 : Yerleşim alanı ile Δq_c arasındaki ilişki.

$$\Delta q_c = 38.85 x A_s^{-1.193} \quad (4.16)$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

A_s : Yerleşim alanı (m²)

Aynı veriler kullanılarak, yerleşim aralığı ve koni uç direncindeki artış (Δq_c) arasındaki ilişki Şekil 4.52’de ve Denklem 4.17’de sunulmaktadır.



Şekil 4.52 : Yerleşim aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki.

$$\Delta q_c = 105.4 \chi_s^{-2.385} \quad (4.17)$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

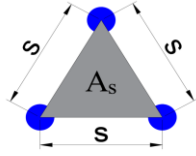
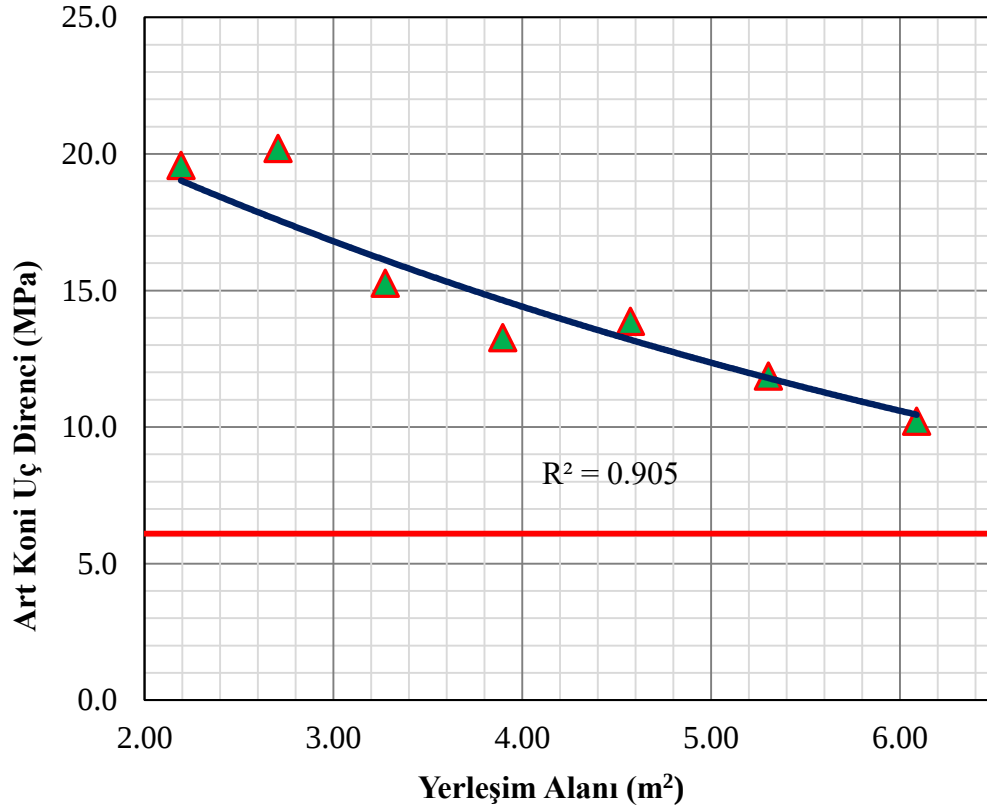
s: Yerleşim aralığı (m)

Yerleşim alanı, yerleşim aralığı kullanılarak hesaplandığı için Şekil 4.51 ve 4.52’de verilen ilişki ve korelasyon temelde aynıdır.

4.12.3 Yerleşim alanı/aralığı ile Art-qc arasındaki ilişki

Vibro kompaksiyon tasarımında, üst yapı yüklerine göre taşıma gücü ve oturma kriterleri belirlenir. Belirlenen kriterlere göre iyileştirilmesi istenen zeminin/dolgunun iyileştirmeden sonraki SPT-N veya CPT uç direnci değerleri belirlenir.

Beş bölgede gerçekleştirilen deneyler neticesinde, art CPT uç direnci ile yerleşim alanı arasında %90.5 oranında korelasyon veren ilişki elde edilmiştir. Yerleşim alanı ile art-CPT uç direnci arasındaki ilişki Şekil 4.53’de ve Denklem 4.18’de verilmektedir.



● Sıkıştırma Noktası
s: Yerleşim Aralığı
A_s: Yerleşim Alanı

— Sıkıştırma öncesi q_c değerleri

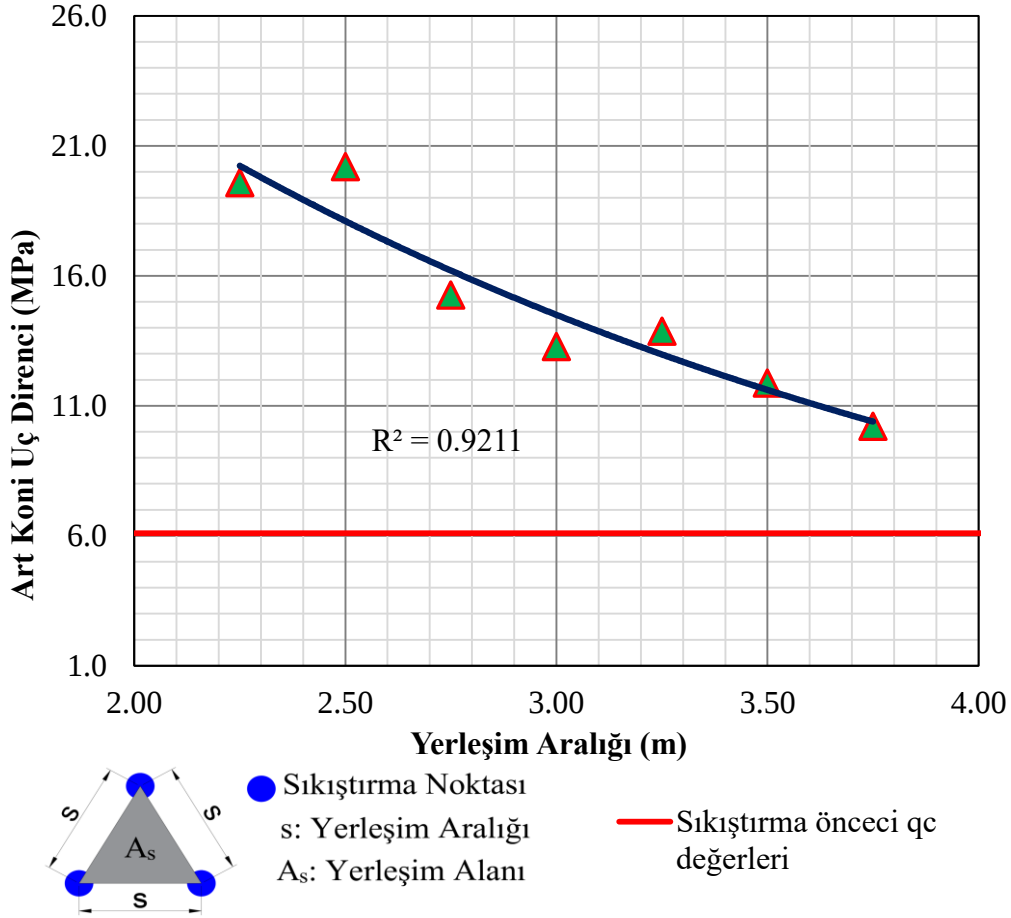
Şekil 4.53 : Yerleşim alanı ile art-q_c arasındaki ilişki.

$$\text{Art}_{q_c} = 26.65 x e^{-0.154 x A_s} \quad (4.18)$$

A_s: Yerleşim alanı (m²)

Hidrolik olarak yerleştirilen dolguların başlangıç koni uç dirençleri 5-7 MPa mertebelerindedir. Hedeflenen taşıma gücü ve oturma miktarları baz alınarak, zeminin sahip olması gereken minimum koni uç direnci belirlenebilir. Belirlenen hedef koni uç direncinin elde edilebilmesi için gerekli olan yerleşim alanı, yukarıda verilen ilişki kullanılarak hesaplanabilir.

Benzer şekilde, yerleşim aralığı ile art CPT uç direnci arasındaki ilişki Şekil 4.54'de ve Denklem 4.19'de verilmektedir. Yerleşim alanı, yerleşim aralığı kullanılarak hesaplandığı için Şekil 4.53 ve 4.54'te verilen ilişki ve korelasyon temelde aynıdır.



Şekil 4.54 : Yerleşim alanı ile art-qc arasındaki ilişki.

$$Art_{qc} = 55 x e^{-0.444xs} \quad (4.19)$$

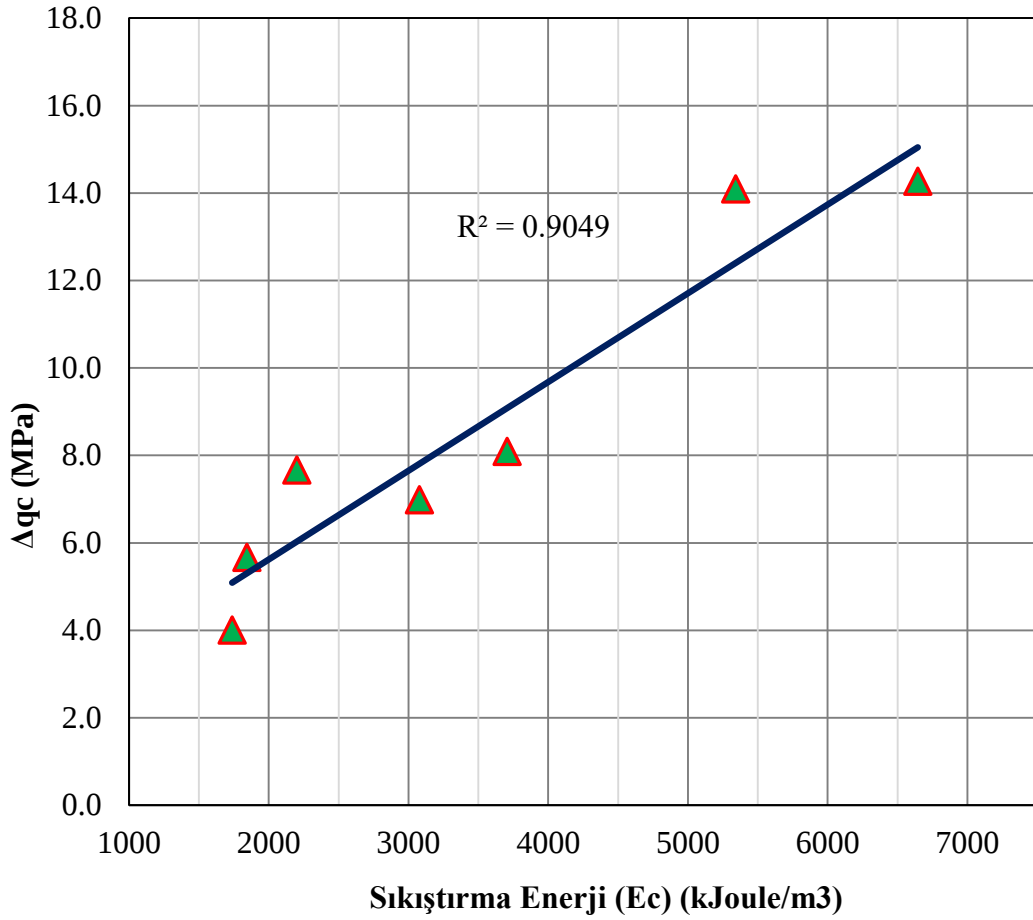
s: Yerleşim aralığı (m)

4.12.4 Sıkıştırma enerjisi ile Δq_c arasındaki ilişki

Vibro kompaksiyon uygulamalarında, uygulama parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi, uygulama süresi ve yerleşim aralığının optimizasyonu için kritik olmaktadır. Hedeflenen iyileşme oranının belirlenmesinin ardından, aşağıda verilen ilişki yardımıyla zemine/dolguya verilmesi gereken sıkıştırma enerjisi hesaplanabilir. Sıkıştırma enerjisi, vibro kompaksiyon uygulama parametreleri kullanılarak hesaplandığı için bu ilişki kullanılarak parametrelerin doğru seçilip seçilmediği değerlendirilebilir. Literatür araştırmaları sonucunda, Gokalp (2006) tarafından yapılan çalışma dışında böyle bir ilişkiye rastlanılmamıştır.

Beş bölgede gerçekleştirilen deneyler neticesinde, koni uç direncindeki artış (Δq_c) ile sıkıştırma enerjisi arasında %90.5 oranında lineer korelasyon elde edilmiştir.

Sıkıştırma enerjisi ile koni uç direncindeki artış (Δq_c) arasındaki ilişki Şekil 4.55’de ve Denklem 4.20’de verilmektedir.



Şekil 4.55 : Yerleşim aralığı ile Δq_c arasındaki ilişki.

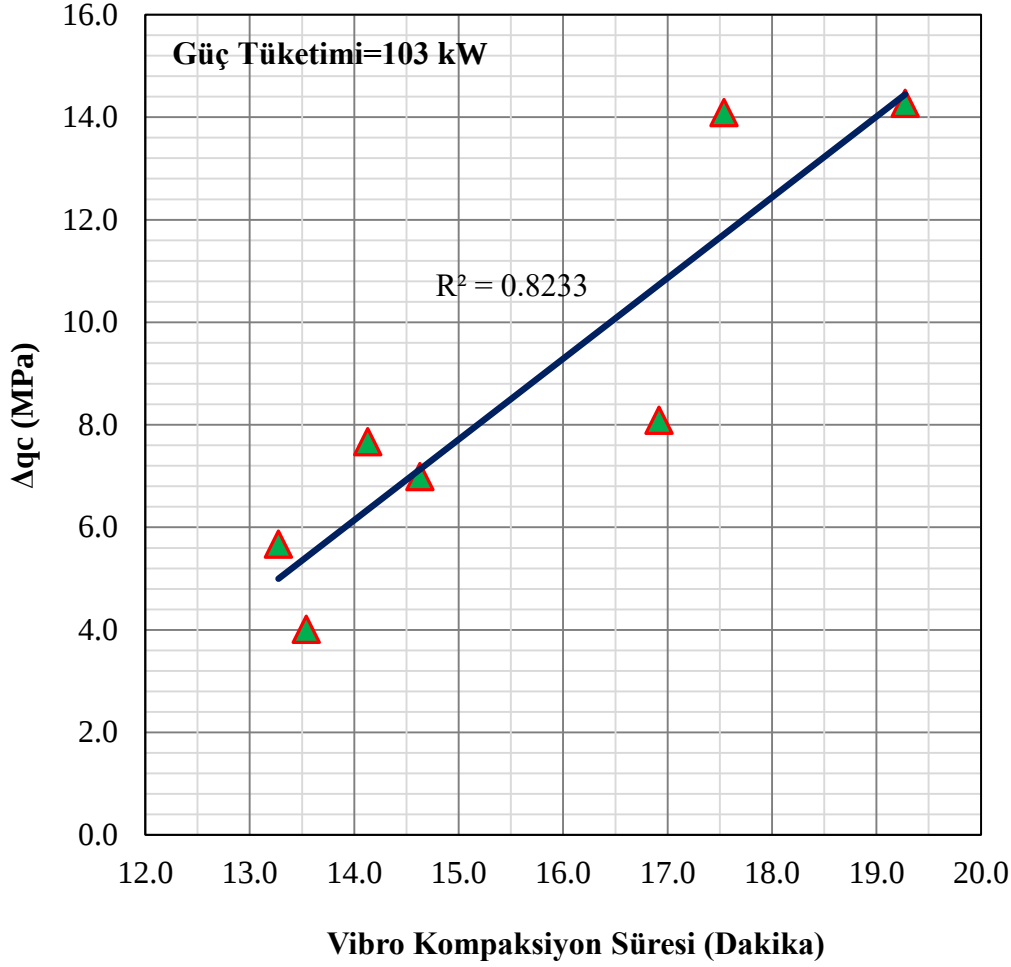
$$\Delta q_c = 0.002 \times E_c + 1.57 \quad (4.20)$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

E_c : Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m³)

4.12.5 Vibro kompaksiyon süresi ile Δq_c arasındaki ilişki

Vibro kompaksiyon ön tasarım aşamasında, tek bir uygulama noktası ve toplam uygulama sürelerinin yaklaşık olarak, doğru olarak hesaplanması gereklidir. Şekil 4.56’da ve Denklem 4.21’de koni uç direncindeki artış ile uygulama süresi arasındaki ilişki verilmektedir. Bu ilişki kullanılarak, koni uç direncinde hedeflenen artış için gerekli olan uygulama süreleri hesaplanabilir.



Şekil 4.56 : Vibro kompaksiyon süresi ile Δq_c arasındaki ilişki.

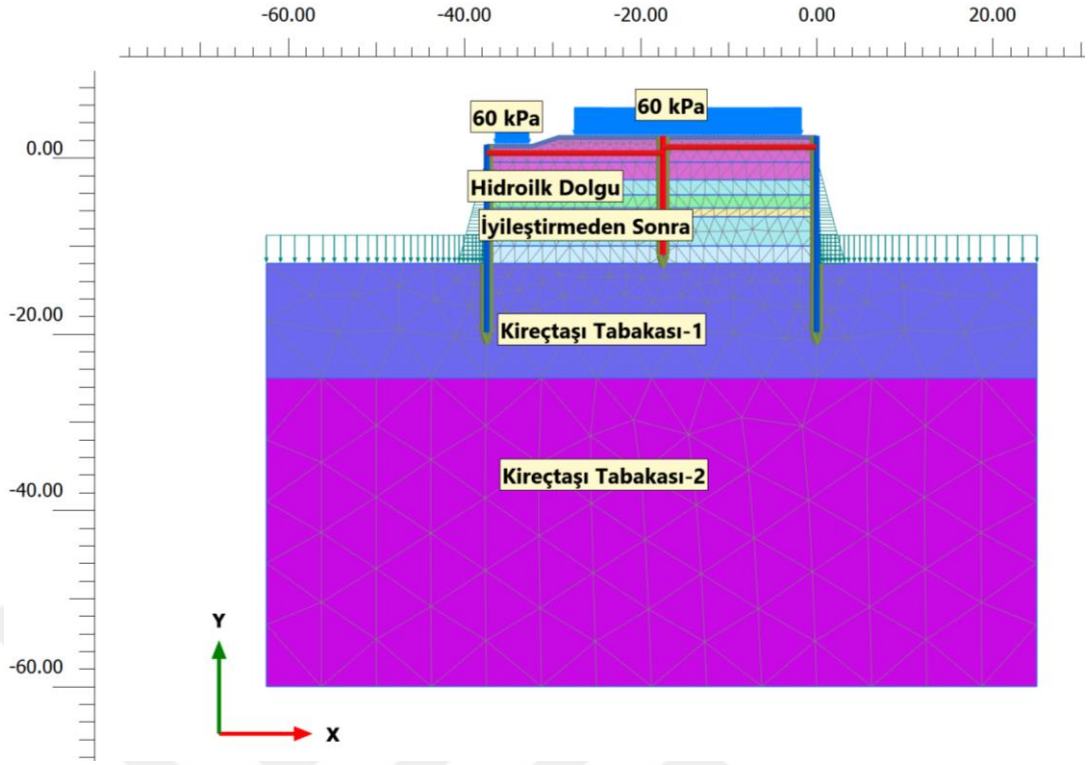
$$\Delta q_c = 1.574x t_c - 15.90 \quad (4.21)$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

t_c : Vibro kompaksiyon süresi (dakika)

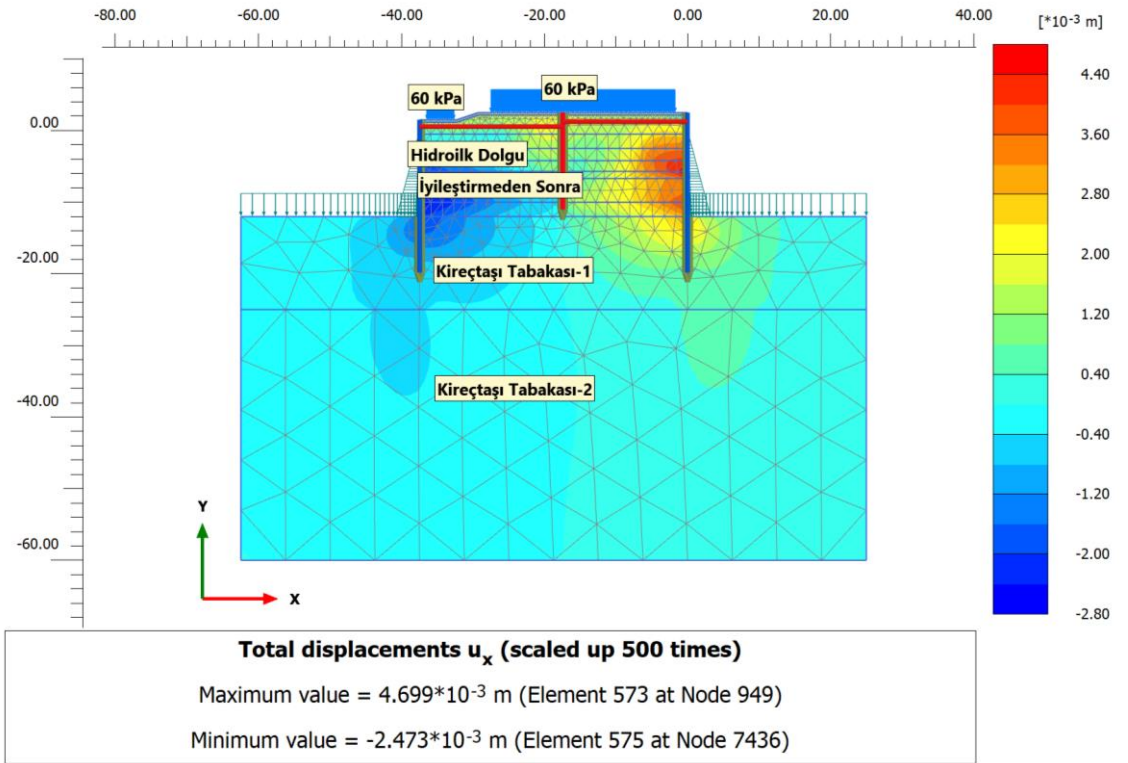
4.13 İyileştirme Sonrası Kombi Duvar Sisteminin Analiz Sonuçları

Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından, en kritik ve hidrolik dolgu kumu kalınlığı en yüksek olan bölgede, kombi duvar sisteminde meydana gelen düşey ve yatay deplasmanların tespit edilmesi amacıyla, bu bölgeye ait en kritik kesitin sonlu elemanlar modeli Plaxis yazılımı kullanılarak kurulmuş ve analizleri yapılmıştır. Bu bölgede gerçekleştirilen art CPT sonuçlarından elde edilen idealize zemin profili Şekil 4.57’de verilmektedir.



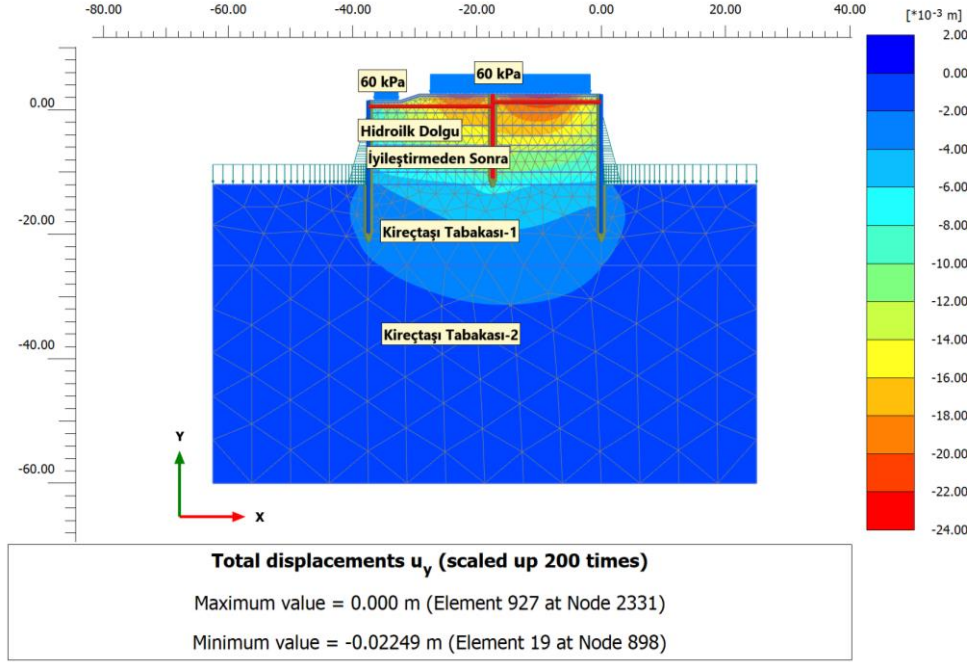
Şekil 4.57 : En derin bölge için idealize zemin profili.

Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından, meydana gelecek toplam yatay deplasman, 4.70 mm olarak hesaplanmış ve Şekil 4.58’da verilmiştir.



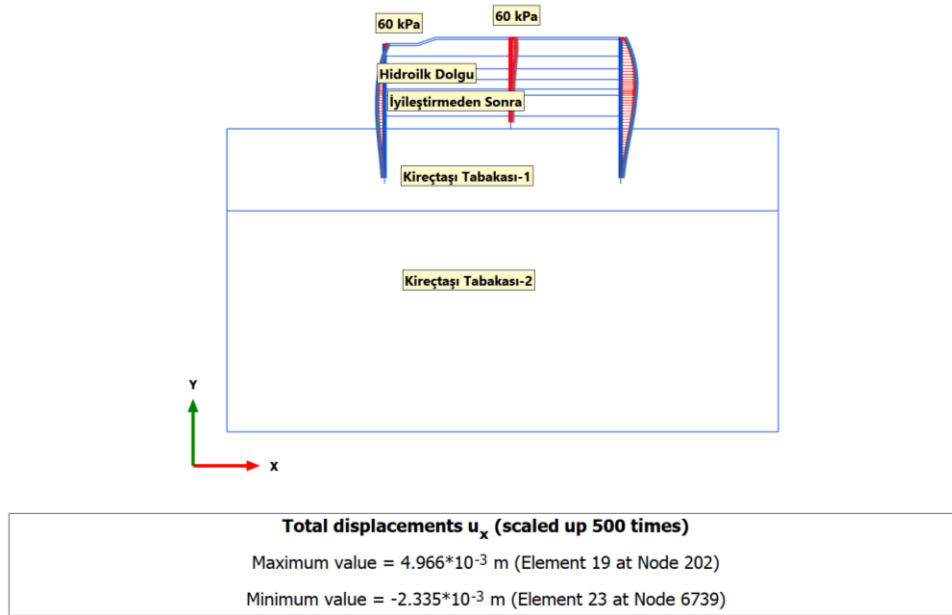
Şekil 4.58 : Yatay deplasman u_x .

Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından, dolgu kalınlığı en derin olan bölgede meydana gelecek düşey oturma miktarı, 2.30 mm olarak hesaplanmış ve Şekil 4.59’de verilmiştir.



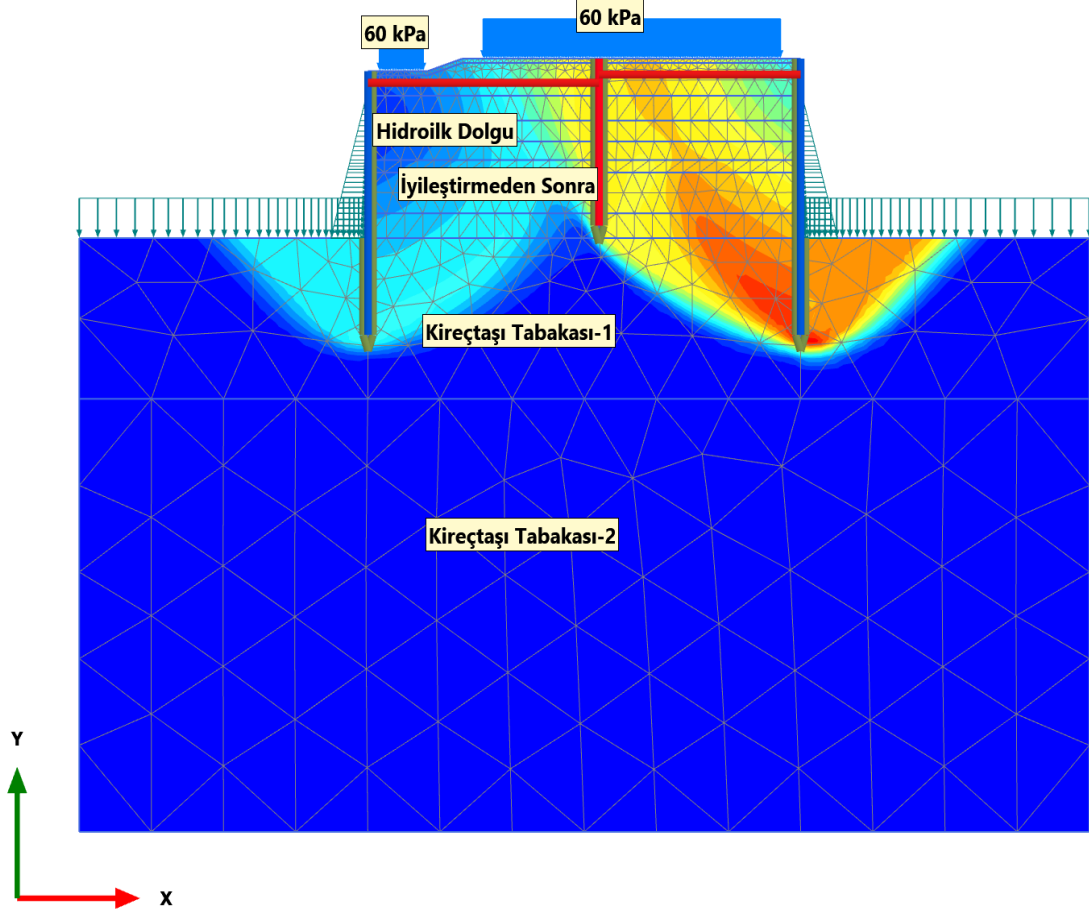
Şekil 4.59 : Yatay deplasman u_y .

Çelik çakma kazıklarda meydana gelecek maksimum yatay deplasman (u_x), 4.97 mm olarak hesaplanmış ve Şekil 4.60’de verilmiştir.



Şekil 4.60 : Çelik çakma kazıklarda meydana gelen yatay deplasman (u_x).

Analizi gerçekleştirilen en kritik kesitin, toptan göçmeye karşı güvenlik tahkiki sonucunda, toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 3.05 olarak hesaplanmış ve kritik göçme zarfları Şekil 4.61’de verilmiştir.



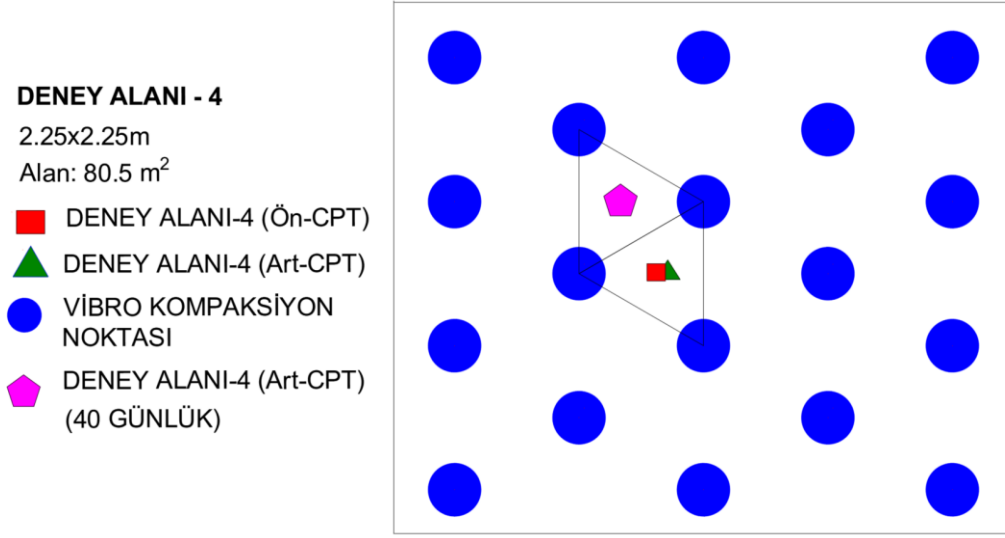
Şekil 4.61 : Sistemin toptan göçmeye karşı güvenlik tahkiki.

Hidrolik olarak yerleştirilen dolgunun, 2.50x2.50 m üçgen karelaç ve çift pas (geçiş) ile gerçekleştirilen vibro kompaksiyon uygulamasının ardından, 60 kPa yük altında gerekli taşıma gücü, toptan göçmemeye karşı güvenlik sayısı, yatay ve düşey deplasman kriterlerinin sağlandığı görülmüştür.

4.14 Zamana Bağlı İyileşme Oranının Değerlendirilmesi

Vibro kompaksiyon uygulamalarında, 10 günlük art CPT sonuçlarında, 2 günlük art CPT sonuçlarına kıyasla bir miktar azalma tespit edilmiştir. 10 Gün sonra gerçekleştirilen CPT koni uç direncindeki bu ufak düşüşlerin ve vibro kompaksiyon uygulamasında, zamana bağlı olarak meydana gelen iyileşme oranının araştırılması

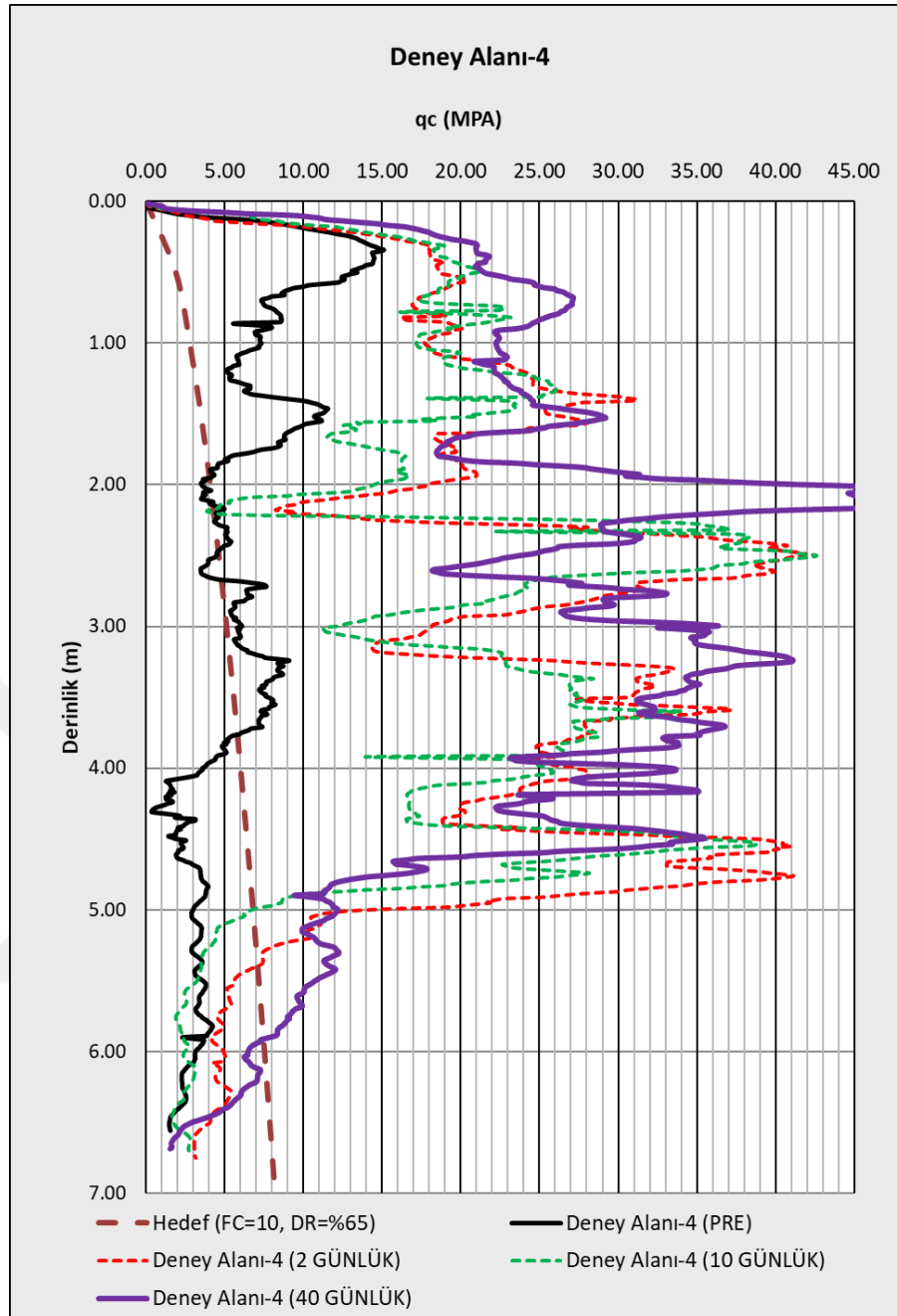
maksadıyla, Deney alanı-4 bölgesinde, uygulamadan 40 gün sonra bir adet art CPT yapılmıştır. 40 günlük CPT deneyinin yapıldığı nokta, Şekil 4.62’de gösterilmektedir.



Şekil 4.62 : TA-4 art-CPT noktası (40 günlük).

10 Günlük CPT koni uç direncinde meydana gelen ufak düşüşün sebebi olarak, 2 ve 10 Günlük CPT’lerin aynı noktada yapılması olarak değerlendirilmiştir. Uygulamadan 2 gün sonra yapılan CPT de, özellikle koni geri çekilirken etrafındaki zemini bir miktar tahrip etmekte ve daha gevşek bir duruma getirdiği için, 10 gün sonra yapılan CPT deneyi yapılırken koni uç direncinin bir miktar düşeceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, deney alanının etrafındaki zemin çok gevşek olduğu için bu bölgenin, deney alanının merkezinden dışarıya doğru zamanla bir miktar gevşeyeceği unutulmamalıdır. Birbirine yakın noktalarda yapılan CPT’lerin birbirini etkilememesi için 40 günlük art CPT, Şekil 4.62’de görüleceği üzere 2 ve 10 günlük CPT noktalarının yapıldığı uygulama gözüne, komşu gözde gerçekleştirilmiştir.

Deney alanı-3’te gerçekleştirilen ön CPT, 2 günlük art CPT, 10 Günlük art CPT ve 40 art CPT’ler birlikte Şekil 4.63’de sunulmaktadır. Koni uç direncinin derinlik ile değişimi incelediğinde, özellikle 5.00 metrenin altındaki sıkışmayan tabakanın, 40 gün sonra toparlandığı ve koni uç direncinde belirgin şekilde artış olduğu tespit edilmiştir. Görüleceği üzere, vibro kompaksiyon uygulamasından 40 gün sonra yapılan art CPT sonuçlarında, koni uç direncinin, 2 ve 10 günlük sonuçlara nazaran net bir şekilde arttığı görülmüştür.



Şekil 4.63 : TA-3, 40 günlük CPT sonuçları.

40 Günlük art CPT sonuçlarına göre, yüksek basınçlı su jeti kullanılarak ile yapılan vibro kompaksiyon uygulamalarında su jeti, başlangıçta zemindeki boşluk suyu basıncını arttırmaktadır. Sıkıştırma uygulamasının tamamlanmasının ardından, boşluk suyu basıncı zamanla azalmaya başlamakta ve zemin daneleri birbirine yaklaşmaktadır. Zemindeki artık boşluk suyu basıncının zamanla azalmasıyla, zemin daneleri daha sıkı bir yerleşim düzenine geçtiği için koni uç direncinin zamanla arttığı değerlendirilmiştir. Zamana bağlı iyileşmenin hızı ve büyüklüğü, zeminin geçirimsizlik katsayısı ve drenaj koşulları gibi birçok faktöre bağlı değişkenlik göstermektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, deniz tabanından kazılarak elde edilen ve ıslah alanına hidrolik olarak yerleştirilen dolgu malzemesinin başlangıç mühendislik özellikleri, deniz tabanı tarama uygulamasına ait detaylar, vibro kompaksiyon uygulamasının detayları, ıslah alanından gerçekleştirilen tam ölçekli saha deneylerinin detayları ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır.

Literatürde bildirilen çalışmalar incelendiğinde, vibro kompaksiyon uygulamalarının enerji tabanlı olarak ele alındığı sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, bu araştırma kapsamında birim zemin başına verilen enerji miktarı ile iyileşme oranı arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile tasarım ve kalite kontrol sürecine önemli katkılar sunulacağına inanılmaktadır. Vibro kompaksiyon uygulamalarında, iyileştirme oranı ile birim zemin başına harcanan enerji miktarı arasındaki ilişkinin doğru olarak ele alınması kalite kontrol ve tasarım sürecinin verimliliğini arttıracığı için büyük çaplı zemin iyileştirme projelerde maliyet, kalite kontrol ve iş programı açısından avantajı sağlayacaktır.

Arazi ıslah çalışmaları için granüller kum dolgu, deniz tabanının kazılması ile elde edilmiş ve boru hatları vasıtasıyla çalışma alanına taşınmıştır. Uygulama parametreleri ve yerleşim aralığının belirlenebilmesi için yedi bölgede farklı uygulama parametreleri ve yerleşim aralığı kullanılarak tam ölçekli saha deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Vibro kompaksiyon uygulamasından önce gerçekleştirilen Koni Penetrasyon deneyleri (CPT) ile hidrolik dolgu kumun başlangıç koni uç dirençlerinin 5 ile 7 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Oturma alanı 13.500 m²'yi bulan, toplam yaklaşık 130.000 m³ gevşek taranmış hidrolik dolgu kumu, minimum %65 rölatif sıkılığa kadar vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılmıştır.

Bu tez sözü edilen projeyi konu alan bir vaka çalışmasından oluşmaktadır. Çalışmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin başına harcanan enerji miktarı, CPT uç direnci ve çevre sürtünmesi ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki ele alınmış ve sonuçları tartışılmıştır. Bu yüksek lisans çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Vibro kompaksiyon uygulamaları, maksimum 2400 rpm (40Hz) çalışma hızına sahip 180 kW'lık güce sahip bir titreşimli vibroflot kullanılarak eşkenar üçgen yerleşim ile gerçekleştirilmiştir. Vibro kompaksiyon uygulamaları, ortalama 103 kW güç kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- İki deney sahasında (TA-1 ve TA-2) gerçekleştirilen tek pas (geçiş) ile vibro kompaksiyon uygulamasından 2 ve 10 gün sonra gerçekleştirilen art CPT sonuçlarına göre, koni uç direncinde artış sağlanamadığı ve uygulamanın başarısız olduğu tespit edilmiştir.
- Beş bölgede (TA-3, 4, 5, 6 ve 7) gerçekleştirilen çift paslı vibro kompaksiyon uygulamasından sonra gerçekleştirilen art CPT sonuçlarına göre, koni uç direncinde %65 ile %268 arasında artış sağlandığı, art CPT koni uç direnci ortalama, 10.21 MPa ile 20.20 MPa değerlerine ulaştığı belirlenmiştir.
- Yapılan uygulamalarda, vibroflotun ilk geçiş sırasında gevşek durumdaki zemin danelerini daha gevşek bir duruma getirdiği, danelerin daha sıkı bir yerleşim düzenine geçmesini, dolayısıyla sıkışmasını sağlayan işlemin, ikinci geçiş sırasında meydana geldiği belirlenmiştir.
- Titreşim dalgalarının, ağır tonajlı araçların hareketi nedeniyle zaten sıkışmış olan üst dolgu tabakasında gevşemeye neden olduğu belirlenmiştir.
- Deniz tabanının kazılması ve hidrolik olarak yerleştirilen dolgu malzemesi içerisinde sıkıştırılması zor olan cepler ve hidrolik kum dolgunun üniformluk durumu, sıkıştırma sürecini ve uygulanması gereken sıkıştırma enerjini doğrudan etkilemektedir.
- Hidrolik dolgu kumun sıvılaşma değerlendirmesi kapsamında, vibro kompaksiyon uygulamasından önce, 3.50 m ile 8.50 m arasındaki derinlikte sıvılaşma riski tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde, vibro kompaksiyon uygulamasından sonra, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı 1.0'ın üzerine çıkmış ve sıvılaşma potansiyeli ortadan kalkmıştır.
- Uygulanan sıkıştırma enerjisi ile vibro kompaksiyon noktalarına doldurulan kum arasında %61 oranında üstel bir ilişki elde edilmiştir. Sıkıştırma enerjisinin, $\sim 7000 \text{ kJoule/m}^3$ üzerine uygulanması durumunda kum tüketim (doldurulan kum) hızının parabolik olarak azaldığı ve $\sim 2.10 \text{ m}^3/\text{m}'$ de asimptota yaklaştığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu ilişki ile vibro kompaksiyon uygulaması sırasında doldurulan kum miktarı anlık olarak takip edilerek,

uygulama parametrelerinde ve vibro kompaksiyon tasarımıda gerekli optimizasyonlar yapılabilir.

$$E_c = 500xe^{1.4824xV_T} \quad (\text{Denklem 4.15'ye bkz.})$$

V_T : Kum Tüketimi (m^3/m)

E_c : Sıkıştırma Enerjisi ($kJoule/m^3$)

- Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilerek, yerleşim alanı/aralığı ile koni uç direncindeki artış (Δqc) arasında %90.5 oranında korelasyon sağlayan ilişki elde edilmiştir. Bu ilişki, ön tasarım aşamasında ve tasarımın optimizasyonu için kullanılarak, maliyet, uygulama süresi ve kalitesinde çok önemli kazanımlar elde edileceği değerlendirilmektedir. Elde edilen ilişki;

$$\Delta qc = 38.85x A_s^{-1.193} \quad (\text{Denklem 4.16'ye bkz.})$$

$$\Delta qc = 105.40xs^{-2.385} \quad (\text{Denklem 4.17'ye bkz.})$$

s: Yerleşim aralığı (m)

Δqc : Koni uç direncindeki artış (MPa)

A_s : Yerleşim alanı (m^2)

- Beş bölgede gerçekleştirilen deneyler neticesinde, art CPT koni uç direnci ile yerleşim alanı/aralığı arasında %90.5 oranında korelasyonu veren ilişki elde edilmiştir. Elde edilen bu ilişki ile ön saha araştırmaları ve bu ilişki birlikte kullanılarak, koni uç direncindeki artış miktarı belirlenip, yerleşim aralığının/alanının doğru şekilde hesaplanabilmesi amaçlanmıştır.

$$Art_{qc} = 26.65 xe^{-0.154xAs} \quad (\text{Denklem 4.18'ye bkz.})$$

$$Art_{qc} = 55 xe^{0.444xs} \quad (\text{Denklem 4. 19'ye bkz.})$$

s: Yerleşim aralığı (m)

A_s : Yerleşim alanı (m^2)

- Vibro kompaksiyon uygulamalarında, uygulama parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi, uygulama süresi ve yerleşim aralığının optimizasyonu için kritik olmaktadır. Elde edilen veriler birlikte analiz edilip değerlendirilerek, sıkıştırma enerjisi ile koni uç direncindeki artış (Δqc) arasında %90 oranında korelasyon veren lineer ilişki elde edilmiştir. Hedeflenen iyileşme oranının belirlenmesinin ardından, verilen ilişki yardımıyla zemine/dolguya verilmesi gereken sıkıştırma enerjisi hesaplanıp, doğru uygulama parametreleri hesaplanabileceği değerlendirilmiştir.

$$\Delta qc = 0.002xE_c + 1.57 \quad (\text{Denklem 4.20'ye bkz.})$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

E_c : Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m³)

Literatürde şimdiye kadar böyle bir çalışma ve ilişki bildirilmediği için bu çalışmanın bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutacağına inanılmaktadır.

- Ön tasarım aşamasında, her bir vibro kompaksiyon noktası için kompaksiyon sürelerinin yaklaşık olarak doğru olarak hesaplanması gereklidir. Koni uç direncinde hedeflenen artış ile kompaksiyon süresi arasında %82 oranında korelasyonu sağlayan lineer ilişki elde edilmiştir. Bu ilişki kullanılarak koni uç direncinde hedeflenen artış için gerekli olan uygulama süreleri hesaplanabilir.

$$\Delta q_c = 1.574xt_c - 15.90 \quad (\text{Denklem 4.21'ye bkz.})$$

Δq_c : Koni uç direncindeki artış (MPa)

t_c : Kompaksiyon Süresi (dakika)

- Vibro kompaksiyon uygulamasının ardından, dolgu kalınlığı en derin olan bölgede meydana gelecek toplam oturma miktarı, 2.50mm, kombi duvar sisteminde oluşacak maksimum yatay deplasman, 4.70 mm olarak hesaplanmıştır. Analizi gerçekleştirilen en kritik kesitin, toptan göçmeye karşı güvenlik tahkiki sonucunda, toptan göçmeye karşı güvenlik sayısı 3.05 olarak hesaplanmıştır.
- Vibro kompaksiyon uygulamalarında, 10 günlük art CPT sonuçlarında, 2 günlük art CPT sonuçlarına kıyasla bir miktar azalma tespit edilmiştir. Uygulamadan 2 gün sonra yapılan Koni Penetrasyon deneyinde, özellikle koni geri çekilirken etrafındaki zemini bir miktar tahrip ettiği ve daha gevşek bir duruma getirdiği için, 10 gün sonra yapılan Koni Penetrasyon deneyinde, koni uç direncinin bir miktar düştüğü değerlendirilmiştir. Ayrıca, deney alanının etrafındaki zemin çok gevşek olduğu için bu bölgenin, deney alanının merkezinden dışarıya doğru zamanla bir miktar gevşeyeceği değerlendirilmiştir.
- Vibro kompaksiyon uygulamasından 40 gün sonra yapılan Koni Penetrasyon deneyinde, koni uç direncinde derinlik boyunca belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle, literatürde bu bağlamda yapılan diğer çalışmaları destekleyen sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- AASHTO T99.** (2011). Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop. *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.*
- Asalemi, A. A.** (2006). *Application of seismic cone for characterization of ground improved by vibro-replacement.* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- ASTM C136 / C136M-19.** (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA,. *ASTM International.*
- ASTM D1883-16.** (2016). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. *Astm International, 04.08.*
- ASTM D5778-20.** (2020). Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. *ASTM International, 04.08.*
- ASTM D6913-04.** (2009). *Standard Test Methods For Particle-Size Distribution (Gradation) Of Soils Using Sieve Analysis (ASTM D6913/D6913M-17).*
- ASTM D698.** (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort. *ASTM International.*
- Baez, S. J.** (1997). *A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns.* (Doctoral dissertation, University of Southern California).
- Balachowski, L., ve Kurek, N.** (2014). Deep Compaction Control of Sandy Soils. *Studia Geotechnica et Mechanica, 36(2), 3–8.*
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., ve Pasqualini, E.** (1986). Interpretation of CPT's and CPTU's. 2nd Part: drained penetration. In: *Proceedings 4th International Geotechnical Seminar, Singapore, pp. 143e156.*
- Baligh, M. M., Azzouz, A. S., Wissa, A. Z. E., Martin, R. T., ve Morrison, M. J.** (1981). The Piezocone Penetrometer. Symposium on Cone Penetration Testing and Experience. *ASCE, Geotechnical Engineering Division, St. Louis, pp. 247e263.*
- Barksdale, R. D., ve Bachus, R. C.** (1983). Design and construction of stone columns, vol. I. (No. *FHWA/RD-83/026; SCEGIT-83-104*). *Turner-Fairbank Highway Research Center.*
- Bo, M. W., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Leong, M., ve Disfani, M. M.** (2014). Densification of Land Reclamation Sands by Deep Vibratory Compaction Techniques. *Journal of Materials in Civil Engineering, 26(8), 06014016.*
- Brinkgreve, R. B. ., Engin, E., ve Engin, H.** (2010). Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands. In: *The 7th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE) at Trondheim, Norway, pp 137–147.*
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., ve M., S.** (2017). *Plaxis 2D manual.* Rotterdam, Netherlands, *Balkema.*
- Brown, D. F.,** (1989). Evaluation of the Tri Star vibrocompaction probe. (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

- Brown, R. E.** (1977). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *ASCE J Geotech Eng Div*, 103(12).
- BS EN 14731.** (2005). *Execution of special geotechnical works. Ground treatment by deep vibration.*
- Campanella, R. G., Gillespie, D., ve Robertson, P. K.** (1982). Pore pressures during cone penetration testing. In: *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, vol. 2, pp. 507e512. *ESOPT-2, Amsterdam.*
- Cuéllar V.** (1977). Simple shear theory for the one- dimensional behavior of dry sand under cyclicloading. *Proceedings of international symposium on dynamical methods in soil and rock mechanics.*
- D'Appolonia, E.** (1954). Loose sands—Their compaction by vibroflotation. In *Symposium on dynamic testing of soils. ASTM International.*
- De-yong, W., Sheng, C., ve Xiao-cong, L.** (2019). Field Test and Inspection of Large Area Hydraulic Sand Ground Improved by Vibro-compaction. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 304, No. 3, p. 032068).* IOP Publishing.
- Debats, J. M., ve Scharff, G.** (2009). Robertson's Soil Behaviour Type Index as a tool to measure the improvement of the ground in Vibro-compaction work. *André Frossard Prize.*
- Degen, W. S.** (1997). 56m deep vibrocompaction at German lignite mining area. In *Ground improvement geosystems Densification and reinforcement: Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Geosystems London, 3-5 June 1997 (pp. 127-133).* Thomas Telford Publishing.
- Duan, W., Cai, G., Liu, S., Yuan, J., ve Puppala, A. J.** (2019). Assessment of ground improvement by vibro-compaction method for liquefiable deposits from in-situ testing data. *International Journal of Civil Engineering*, 17(6), 723-735.
- Düzceer, R., ve Gokalp, A.** (2002a). Akaryakıt tank temellerinin hesaplanan ve ölçülen oturmaları. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi.*
- Düzceer, R., ve Gokalp, A..** (2009). Deniz Terminal Temellerinin Taş Kolonlarla İyileştirilmesi, 5th METU Geotechnical Engineering Symposium and Meeting for Commemoration of Prof. Ismet Ordemir, METU, 23 November 2009, Ankara, Turkey.
- Düzceer, R., ve Gokalp, A.** (2007). Ground Improvement by Vibroreplacement, XIV th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE, 24-27 September 2007, Madrid, Spain.
- Düzceer, R., ve Gokalp, A.** (2002b). Hidrolik dolguların vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırılması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi.*
- EN 14731.** (2005). *Execution of special geotechnical works—ground treatment by deep vibration.*
- ENCO International Ltd.** (2019). *Report of Preliminary Geotechnical Exploration Nassau Cruise Port, Nassau, The Bahamas.*
- ENKA.** (2020). *Method Statement For Piling Works.*
- ENKA.** (2021a). *Evaluation Report of Pile Driving Analysis And Dynamic Load Test.*
- ENKA.** (2021b). *Method Statement for Dredging and Reclamation Works.*
- Erol, A. O., Bayram, Z. Ç., ve Kuruoğlu, Ö.** (2016). Vibro–Zemin İyileştirme Yöntemleri Vibro Sıkıştırma ve Taş Kolonlar. *Yüksel Proje Uluslararası A.Ş.*
- Eslami, A., Moshfeghi, S., Molaabasi, H., ve Eslami, M.** (2019). Piezocone and Cone Penetration Test (CPTu and CPT) Applications in Foundation Engineering.

Butterworth-Heinemann.

- Gokalp, A.** (2006). Energy-based evaluation of vibration compaction. *Pollack Periodica*.
- Gökalp A., ve Düzceer R.** (2005). Vibro Kompaksiyon Yöntemi ile Bir Derin Sıkıştırma Uygulaması, 3rd METU Geotechnical Engineering Symposium and Meeting for Commemoration of Prof. Ismet Ordemir, METU, 23 November 2005, Ankara, Turkey.
- Gökalp A., Düzceer R.** (2003). Vibratory deep compaction of hydraulic fills, XIII th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE, 25-28 August 2003, Prague, The Czech Republic.
- Green, R. A., ve Mitchell, J. K.** (2004). Energy-based evaluation and remediation of liquefiable soils. In *Geotechnical engineering for transportation projects (pp. 1961-1970)*.
- Green, R. A., ve Mitchell, J. K.** (2010). *Comparison of Energies Required to Densify Liquefiable Soil*.
- Greenwood, D. A.** (1991). Vibrational loading used in the construction process. Chapter 10, *Cyclic loading of soils: from theory to design (O'Reilly and Brown, eds.)*, Blackie and Son Ltd. pp. 435-475.
- Greenwood, D. A., ve Kirsch, K.** (1983). Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods. in *Proceedings of Conference on Advances in Piling and Ground Treatment for Foundations*, Institution of Civil Engineers, pp. 7-45.
- Hitchman, R.** (1989). *An evaluation of the Phoenix machine: a new apparatus for the in situ densification of soil*. (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Howie, J. A., C., D., Asalemi, A. A., ve Campanella, R. G.** (2000). Combinations of in situ tests for control of ground modification in silts and sands. In *Innovations and applications in geotechnical site characterization*, 181–198.
- Idriss, I. M., ve Youd, T. L.** (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Held in Salt Lake City, Utah on January 5-6, 1996 (No. NCEER-97-0022)*. Brigham Young University. Dept. of Civil and Environmental Engineering.
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C. F., ve Manassero, M.** (2001). Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. In: *CC Ladd Symposium. October, MIT, Cambridge, Mass.*
- KASKTAŞ.** (2021a). *Evaluation Report of Vibro-Compaction Trials*.
- KASKTAŞ.** (2021b). *Method Statement for Vibro Compaction Works*.
- Kirsch, K., ve Kirsch, F.** (2016). *Ground improvement by deep vibratory methods*. CRC Press.
- Kulhawy, F. H., ve Mayne, P. W.** (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. (No. EPRI-EL-6800). Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group.
- Kurt, E.** (2013). “Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Deneylerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması”, MSc, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- López-Querol, S., Peco, J., ve Arias-Trujillo, J.** (2014). Numerical modeling on vibroflotation soil improvement techniques using a densification constitutive law. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, 1–10.
- Lukas, R. G.** (1986). Dynamic compaction for highway construction. *Volume I:*

- design and construction guidelines. Final report (No. FHWA/RD-86/133).*
- Lunne, T. ve Christophersen, H. P.** (1983). Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands. *Proceedings of the Offshore Technology Conference, Richardson, Texas, Paper No. 4464.*
- Massarsch, K.R. ve Fellenius, B. H.** (2014). Use of CPT for design , monitoring , and performance verification of compaction projects. *Cpt14*, 1187–1200.
- Massarsch, K. R., ve Fellenius, B. H.** (2015a). Deep vibratory compaction of granular soils. In *Elsevier Geo-Engineering Book Series (Vol. 3, pp. 539-561).* Elsevier. Elsevier Ltd.
- Massarsch, K. R., ve Fellenius, B. H.** (2015b). Deep vibratory compaction of granular soils. In *Elsevier Geo-Engineering Book Series (Vol. 3, pp. 539-561).* Elsevier.
- Massarsch, K. R., Wersäll, C., ve Fellenius, B. H.** (2020). Liquefaction induced by deep vertical vibratory compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 1-12.
- Massarsch, K. R., Wersäll, C., ve Fellenius, B. H.** (2019). Liquefaction induced by deep vertical vibratory compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, August*, 1–12.
- Massarsch, K. R.** (1991). Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes. In *Deep Foundation Improvements: Design, Construction, and Testing.* ASTM International.
- Massarsch, K. R. ve Fellenius, B. H.** (2002). Vibratory compaction of coarse-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 695–709.
- Massarsch, K. R., Fellenius, B. H., ve M. ASCE.** (2019). Evaluation of Vibratory Compaction by In Situ Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(12), 05019012.
- Massarsch, K. R., ve Fellenius, B. H.** (2017). Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 170(3), 149–158.
- Mayne, P. W.** (2007). Cone penetration testing (Vol. 368). *Transportation Research Board.*
- Mecsi, J., Gökalp, A., ve Düzceer, R.** (2005). Densification of hydraulic fills by vibroflotation technique. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnology in Harmony with the Global Environment*, 3, 1521–1524.
- Mitchell, J.K.** (1981). State of the art – soil improvement. In: *Proceedings of the 10th ICSMFE. Stockholm, vol. 4, pp. 509–565.*
- Mitchell, J. K.** (1988). New developments in penetration tests and equipment. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing, vol. 1, pp. 245e261. ISOPT-1, Disney world.*
- Mitchell, J. K., ve Huber, T. R.** (1985). Performance of a stone column foundation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), 205-223.
- Moseley, M. P., ve Kirsch, K.** (2004). *Ground Improvement.* CRC Press.
- Moseley, M. P., ve Priebe, H. J.** (1993). *“Vibrotechniques” Ground Improvement.* Blackie Academic & Professional, CRC Press, Inc.
- Nguyen, T. V., Shao, L., Gingery, J., ve Robertson, P.** (2014). Proposed modification to CPT-based liquefaction method for post-vibratory ground improvement. In *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability (pp. 1120-1132).*
- Nicholson, P. G.** (2004). Soil improvement and ground modification methods.

Butterworth-Heinemann.

- Priebe, H. J. (1998).** Vibro replacement to prevent earthquake induced liquefaction. *Ground engineering*, 31(9), 30-33.
- Robertson, P.K., ve Campanella, R. G. (1983).** Interpretation of cone penetration test: Part I: Sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 20 (4): 718-33.
- Rodger, A. A. (1979).** “*Vibrocompaction of Granular Soils*”, *Cementation Research Limited, Internal Report No: R7/79.*
- Satizabal, J. I. B. (1995).** *A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns.* (Doctoral dissertation, University of Southern California).
- Schmertmann, J. H. (1970).** Static cone to compute static settlement over sand. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Schmertmann, J. H. (1978).** Guidelines for cone penetration test: performance and design. (No. FHWA-TS-78-209). *United States. Federal Highway Administration.*
- Seed, H. B., ve Idriss, I. M. (1971).** Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., ve Chung, R. M. (1985).** Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of geotechnical engineering*, 111(12), 1425-1445.
- van’t Hoff, J., ve van der Kolff, A. N. (Eds.). (2012).** *Hydraulic fill manual: for dredging and reclamation works (Vol. 244).* CRC press.



EKLER

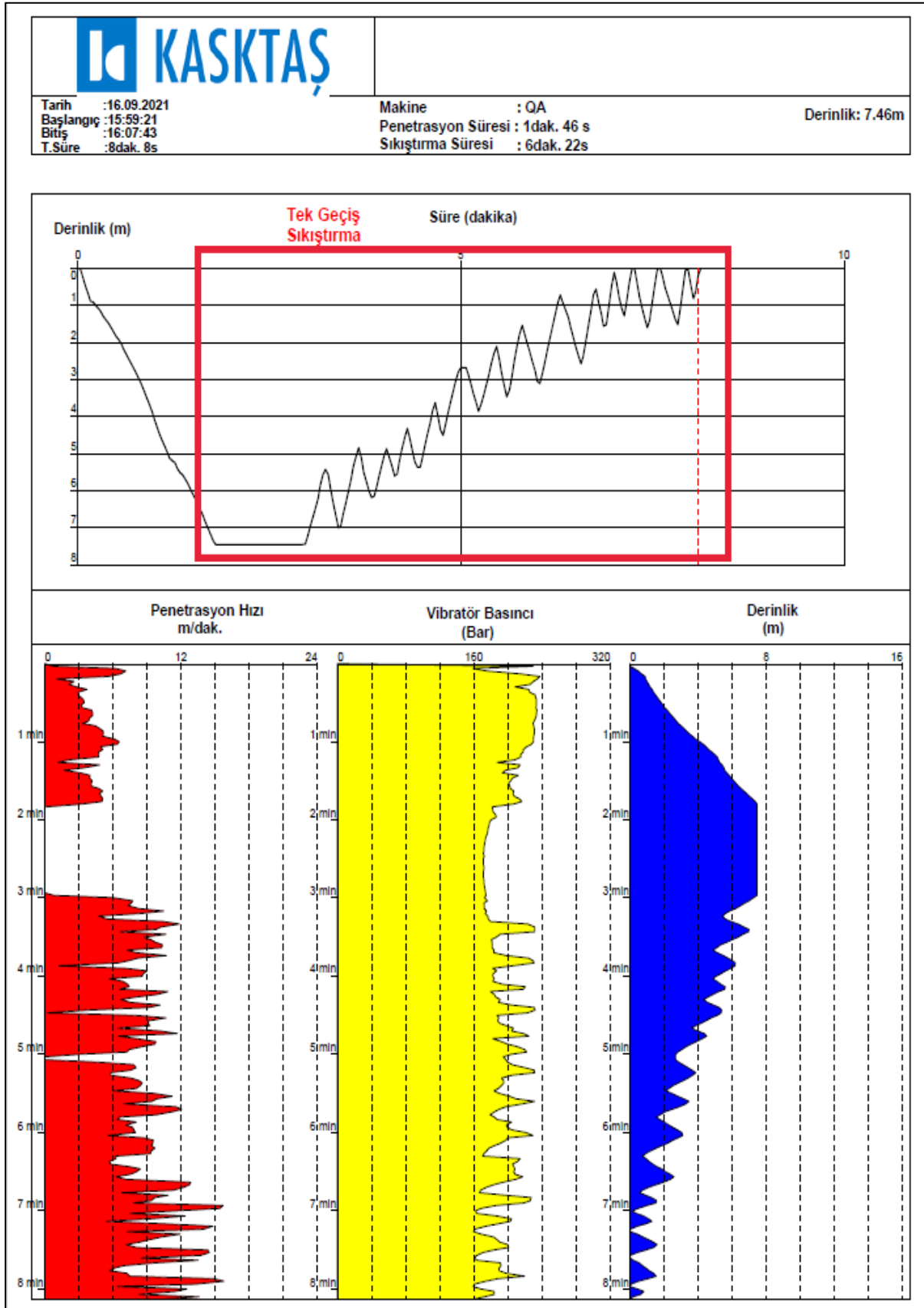
EK A: Tek pas (geçiş) örnek Vibro kompaksiyon imalat föyü

EK B: Çift pas (geçiş) örnek Vibro kompaksiyon imalat föyü

EK C: Proje Sahasının BIM Modeli

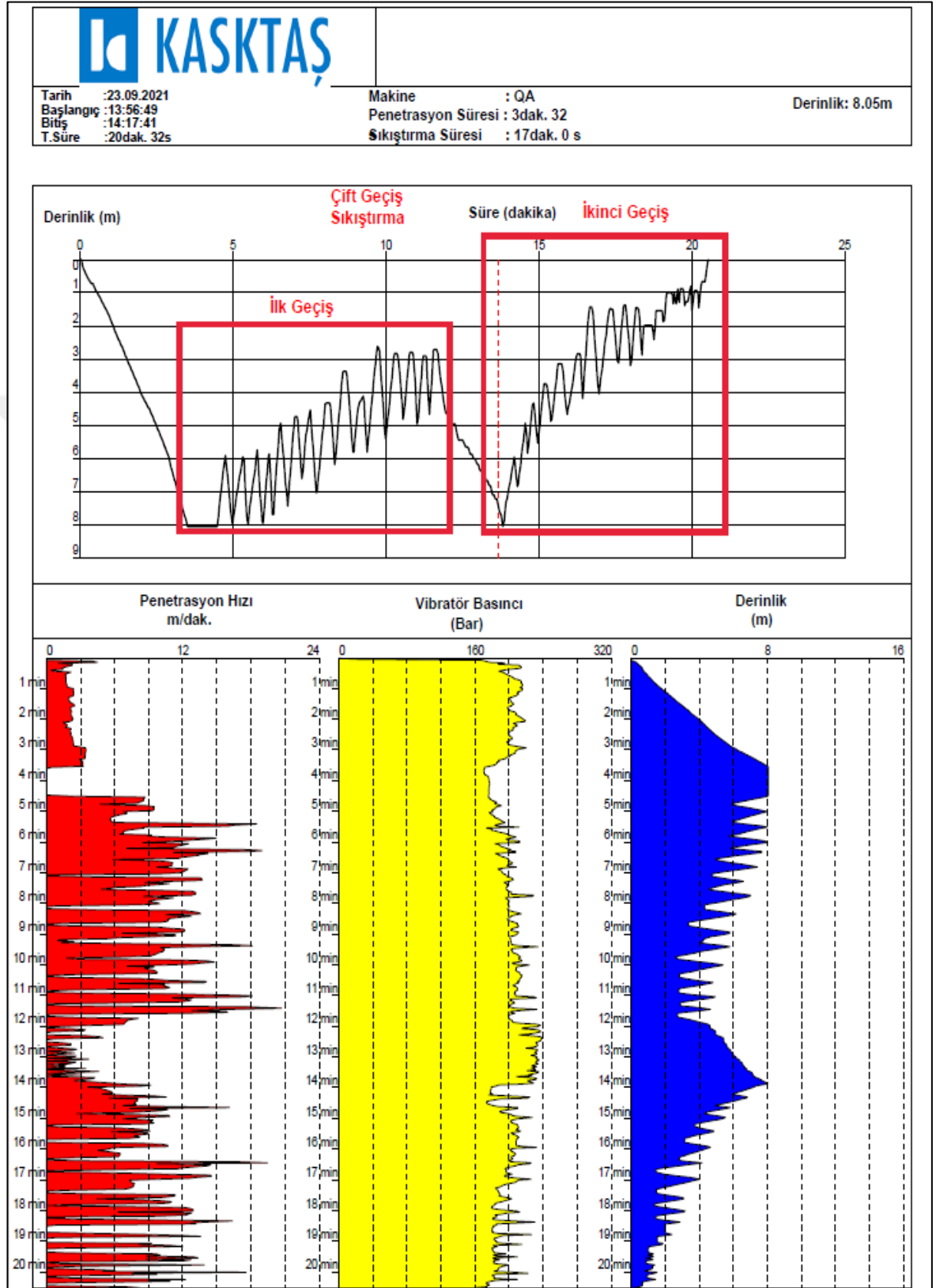


EK A



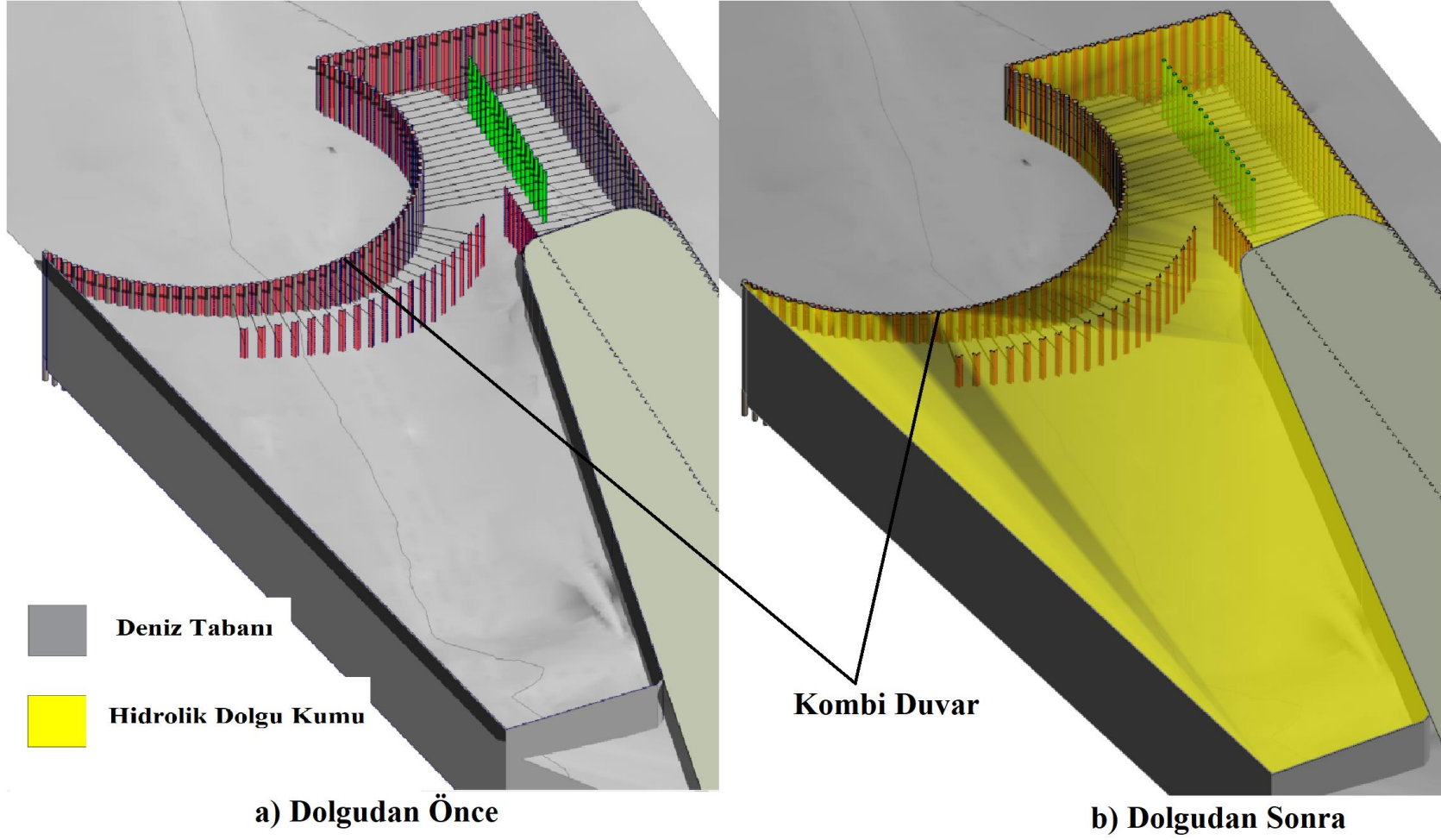
Şekil A: Tek pas (geçiş) örnek Vibro kompaksiyon imalat föyü.

EK B



Şekil A: Tek pas (geçiş) örnek Vibro kompaksiyon imalat föyü.

EK C



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet DİNÇ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Lisans** : 2019, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü (Çift Ana Dal)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Kocaeli Üniversitesi, 2017-2018 dönemi, İnşaat Mühendisliği bölümünü, bölüm birincisi olarak tamamlamıştır.
- Teknik Ofis Tasarım Mühendisi, KASKTAŞ A.Ş. (2019 – Devam Ediyor)