

HİDROLİK OLARAK YERLEŞTİRİLMİŞ KUM DOLGULARIN VİBRO KOMPAKSİYON YÖNTEMİ İLE SIKIŞTIRILMASI

COMPACTION OF HYDRAULIC PLACED SAND USING THE VIBRO COMPACTION METHOD

Ahmet DİNÇ¹, Aykut ŞENOL², Servan OĞUZ³

ÖZET

Vibro kompaksiyon uygulamalarında, doğru dolgu malzemesinin seçimi ve uygun parametre ve yöntemler 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 çalışmada, Karayıpler’de inşaatı halen devam etmekte olan bir limanın genişletilmesi ve onarım işleri kapsamındaki hidrolik olarak yerleştirilmiş kum dolgunun, vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi ele alınmıştır. Sıvılaşmaya karşı oturma alanı 13.500 m²’yi bulan ve toplam yaklaşık 130.000 m³ gevşek olarak taranmış hidrolik dolgu kumun, minimum %65 rölatif sıklığa kadar vibro kompaksiyon yöntemi ile sıkıştırıldığı bir projenin vaka çalışmasından oluşmaktadır. Çalışmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin hacmi başına harcanan enerji miktarı, CPT koni uç direnci ve vibro kompaksiyon uygulama süresi ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: vibro kompaksiyon, hidrolik dolgular, kompaksiyon enerjisi, vibroflotasyon, sıvılaşma, koni penetrasyon testi (CPT)

ABSTRACT

In Vibro compaction applications, the project criteria can be met adequately by choosing the suitable fill material and compacting using appropriate parameters and methods. In cases where the strength and deformation parameters of cohesionless (fine grain ratio <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. In this

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi (Geoteknik) & Endüstri Mühendisi, KASKTAŞ | Kayar Kalıp Altyapı Sondaj Kazık ve Tecrit A.Ş., ahmet.dinc@kasktas.com.tr (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, senol@itu.edu.tr

³ İnşaat Mühendisi, KASKTAŞ | Kayar Kalıp Altyapı Sondaj Kazık ve Tecrit A.Ş., servan.oguz@kasktas.com.tr

study, the expansion of a port under construction in the Caribbean and the improvement of hydraulically placed sand fill within the scope of improvement work by the Vibro compaction method are discussed. It consists of a case study of a project in which approximately 130.000 m³ of loosely dredged hydraulic fill sand with a seating area of 13.500 m² against liquefaction was compacted to a minimum of 65% relative density by using the Vibro compaction method. In the study, the relationship between the amount of energy consumed per unit of soil volume, the CPT cone tip resistance, the production time of the Vibro compaction method, and the actual improvement rate was investigated and the results were discussed.

Keywords: *vibro compaction, hydraulic fills, compaction energy, vibroflotation, liquefaction, cone penetration test (CPT)*

1. GİRİŞ

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. Arazi ıslahı işlemi sırasında oluşan gevşek granüller kum birikintilerine 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.

Bu çalışmada, Karayipler’de yer alan mevcut rıhtım alanı ile 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 sunulmaktadır.

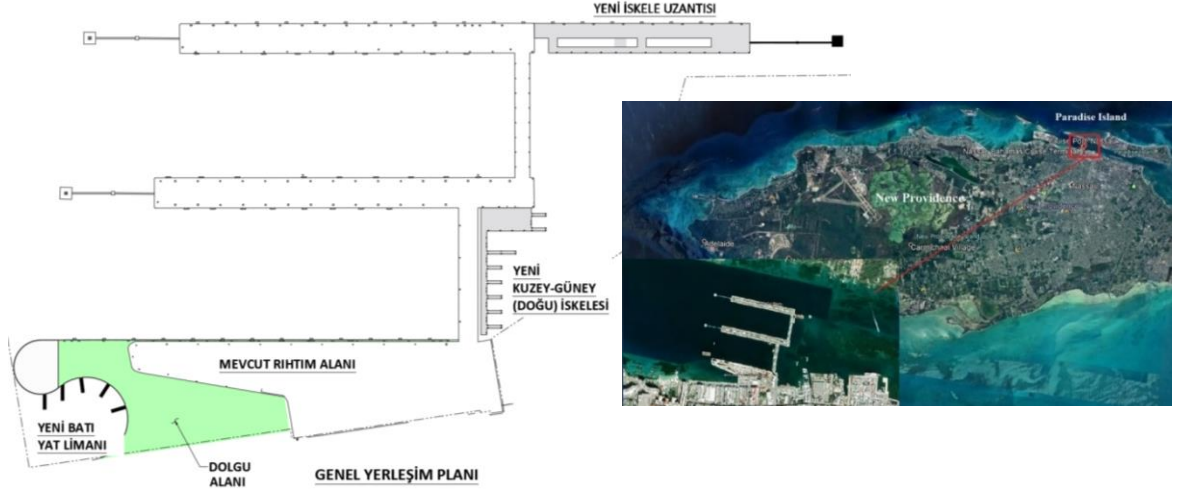
2. PROJE DETAYLARI

Proje sahası, Karayipler’de yer alan mevcut bir limanın genişletilmesi ve onarım işlerini kapsamaktadır. Liman, birçok gemi tarafından konaklama 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 deniz tabanı tarama işlemlerini içermektedir. Vaka çalışmasının yapıldığı proje sahasının konumu ve genel yerleşim planı Şekil 1’de gösterilmektedir.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar özetlenecek olursa;

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

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



Şekil 1. Proje sahasının konumu ve genel yerleşim planı

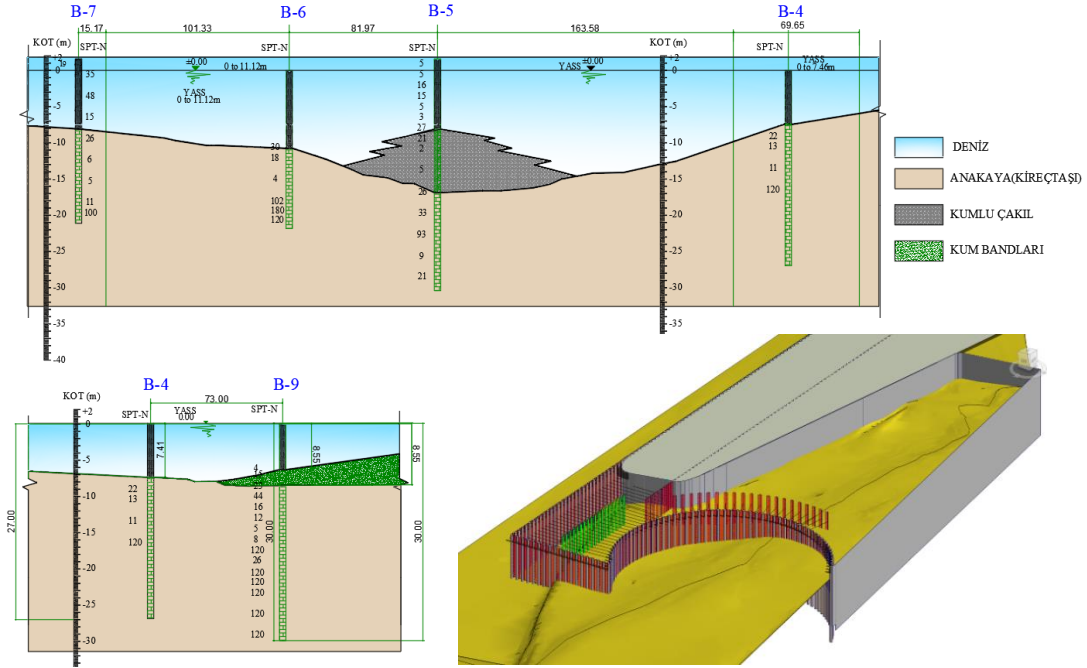
2.1. İnceleme Alanı Hakkında Genel Jeolojik Bilgiler ve Zemin Profili

Proje sahasındaki ön zemin araştırmaları kapsamında, Şekil 2'deki sondaj yerleşim planında gösterildiği gibi toplam beş adet sondaj yapılmıştır. 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 Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Sondaj yerleşim planı ENKA (2021)

Mevcut sondajlara ait idealize zemin profili ve deniz tabanını gösteren yapı bilgi modeli Şekil 3'de verilmektedir. Karada yapılan sondajlarda, yeraltı suyu kotları tipik olarak bitişik limandaki deniz seviyesi ile aynıdır. Yeraltı suyu, gelgit dalgalanmaları, fırtına dalgalanmaları ve diğer hava olayları ile ilgili olarak dönemsel olarak değişkenlik gösterebileceği bilinmektedir.



Şekil 3. İdealize zemin profili ve proje sahasının Yapı Bilgi Modeli

2.3. Proje Kapsamında Yapılan Deniz Tabanı Taraması Çalışmaları

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. Proje sahasında önce hidrolik dolgu kumun ağırlığı altında meydana gelen yatay yüklerin taşınabilmesi için çelik boru kazık ve palplanj kombinasyonundan oluşan kombi-duvar sisteminin ön yüzü teşkil edilmiş, daha sonra deniz tabanından taranan malzeme kıyı ve yüzer boru hatları vasıtasıyla, dolgu sahasına hidrolik olarak yerleştirilmiştir. Hidrolik dolgunun yerleştirilmesinin ardından vibro kompaksiyon uygulaması tamamlanmıştır. Proje kapsamında, dört bölgede deniz tabanı tarama çalışması, bir bölgede hidrolik dolgunun vibro kompaksiyon yöntemi ile iyileştirilmesi 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’de gösterilmektedir. Yaklaşık 60.000 m³ malzeme fazla taranmıştır. Dolgu sahası, daha önce taranan 130.000 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 malzeme hacmi, 190.000 m³’dür. İslah sahasının batı tarafında, proses suyu kombi duvardan tahliye edilmiştir. Kombi duvarın dışına, bulanıklığı azaltmak için çift sıra silt perdeleri yerleştirilmiştir. Tüm sahada yerleştirilen silt perdelerinin konumu Şekil 4’de gösterilmektedir.



Şekil 4. Islah ve deniz tabanı tarama sahaları yerleşim planı ve proje sahasının fotoğrafları

Proje alanında, her bir deniz tabanı tarama sahasındaki zemin verisi örnekleri incelenerek, uygun olmayan malzeme taranmamıştır. Bu nedenle, tüm taranan dolgu malzemesi islah alanına pompalanmıştır. Uygun olmayan malzemenin ve fazla taranan dolgu malzemesini geçici olarak depolamak için, mevcut rıhtımın güney-batı tarafında tarama faaliyetinden önce seddeler oluşturulmuştur.

2.5. Dolgu Kalitesinin Değerlendirilmesi

Dolgu kalitesinin değerlendirilmesi için iki yöntem kullanılmıştır. Birinci değerlendirme yönteminde; Brown (1977), tarafından geliştirilen bağıntı yardımıyla, zemin dane boyutuna göre vibro kompaksiyon uygulamasının seçilen sıkıştırma yöntemine için uygunluğu belirlenmiştir.

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

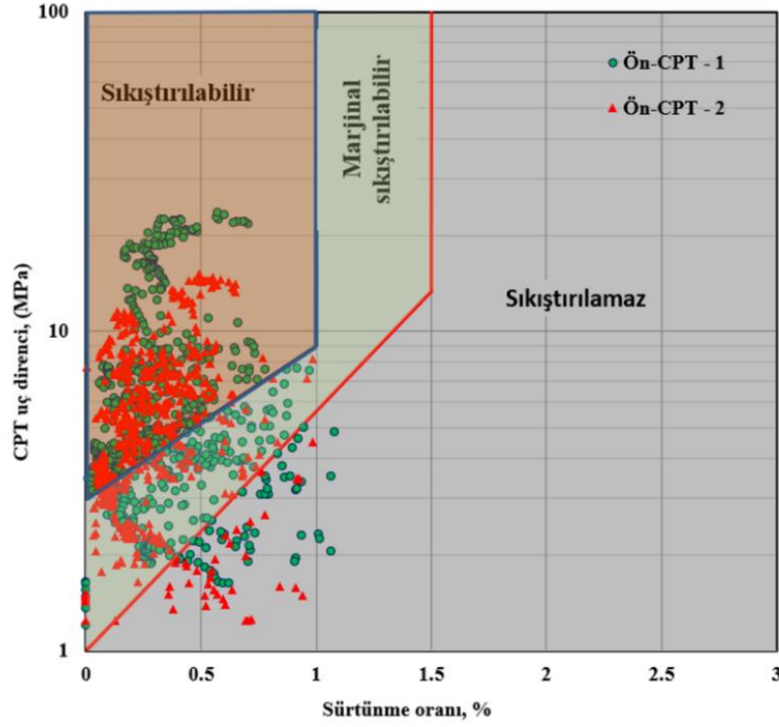
Burada; D_{50} : Zeminin %50'sinin geçtiği dane çapıdır, D_{20} : Zeminin %20'sinin geçtiği dane çapıdır, D_{10} : Zeminin %10'sinin geçtiği dane çapıdır. Küçük uygunluk sayıları yöntemi, dolgu tabakasının (zeminin) vibro kompaksiyon yöntemiyle iyileştirilmesine karar vermekte kullanılan, kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Uygunluk sayılarının $SN=1-30$ aralığında olduğu zeminlerde, vibro kompaksiyon uygulamasının uygun olduğu belirtilmektedir. Uygunluk sayıları (SN) yöntemine göre yapılan ön değerlendirmede, dolgu kalitesi iyi olarak değerlendirilmiş ve vibro kompaksiyon tekniğinin, bu dolgu sahası için uygun zemin iyileştirme yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dolgu sahasından alınan 13

numune üzerinde gerçekleştirilen elek analizi sonuçları ve uygunluk sayıları (SN) Tablo 1. özetlenmiştir.

Tablo 1. 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		

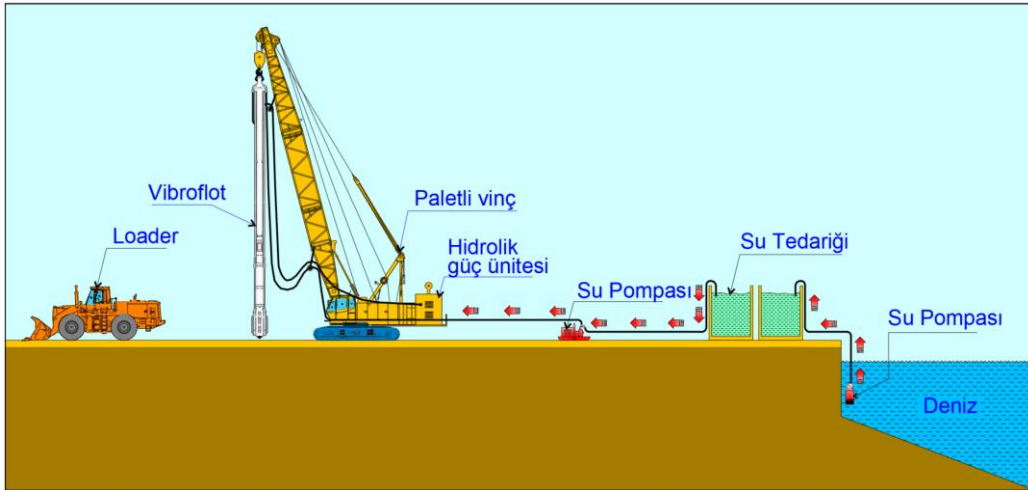
İkinci değerlendirme yönteminde, hidrolik dolgu kumun doğal mühendislik özelliklerini tespit edilmesi amacıyla, proje sahasını temsil edecek şekilde, dolgu sahanın merkezinde iki adet ön-CPT yapılmıştır. Dolgu sahasında gerçekleştirilen iki adet ön-CPT sonuçları ve (Massarsch, 1991) tarafından önerilen ve koni uç direncinin, sürtünme oranının bir fonksiyonu olarak verildiği grafik yardımıyla dolgu kalitesi değerlendirilmiştir. Vibro kompaksiyon ile sıkıştırma uygulamalarında uygun zemin koşulları, sürtünme oranının (Rf) %1'i aşmadığı ve uç direncinin (qc) > 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). 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 qc (koni uç direnci) ve Rf (sürtünme oranı) değerleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, Şekil 5'de sunulmuştur.



Şekil 5. CPT uç direncine bağlı olarak dolgunun sıkıştırılabilirlik değerlendirmesi

3. VİBRO KOMPAKSİYON UYGULAMASI

Vibro kompaksiyon sisteminin kurulumu, şematik olarak Şekil 8'de anlatılmaktadır. 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 kullanılmıştır. Vibroflot paletli vinç yardımıyla hareket ettirilerek uygulama noktalarına yanaştırılmıştır. Vibroflota hidrolik gücü, sisteme bağlı hidrolik güç ünitesi sağlamaktadır. Vibro kompaksiyon uygulamasında, sıkıştırma boyunca sistemin kum ile sürekli geri beslenmiştir. Sistemi oluşturan ana unsurlar Şekil 6'da şematik olarak anlatılmaktadır.



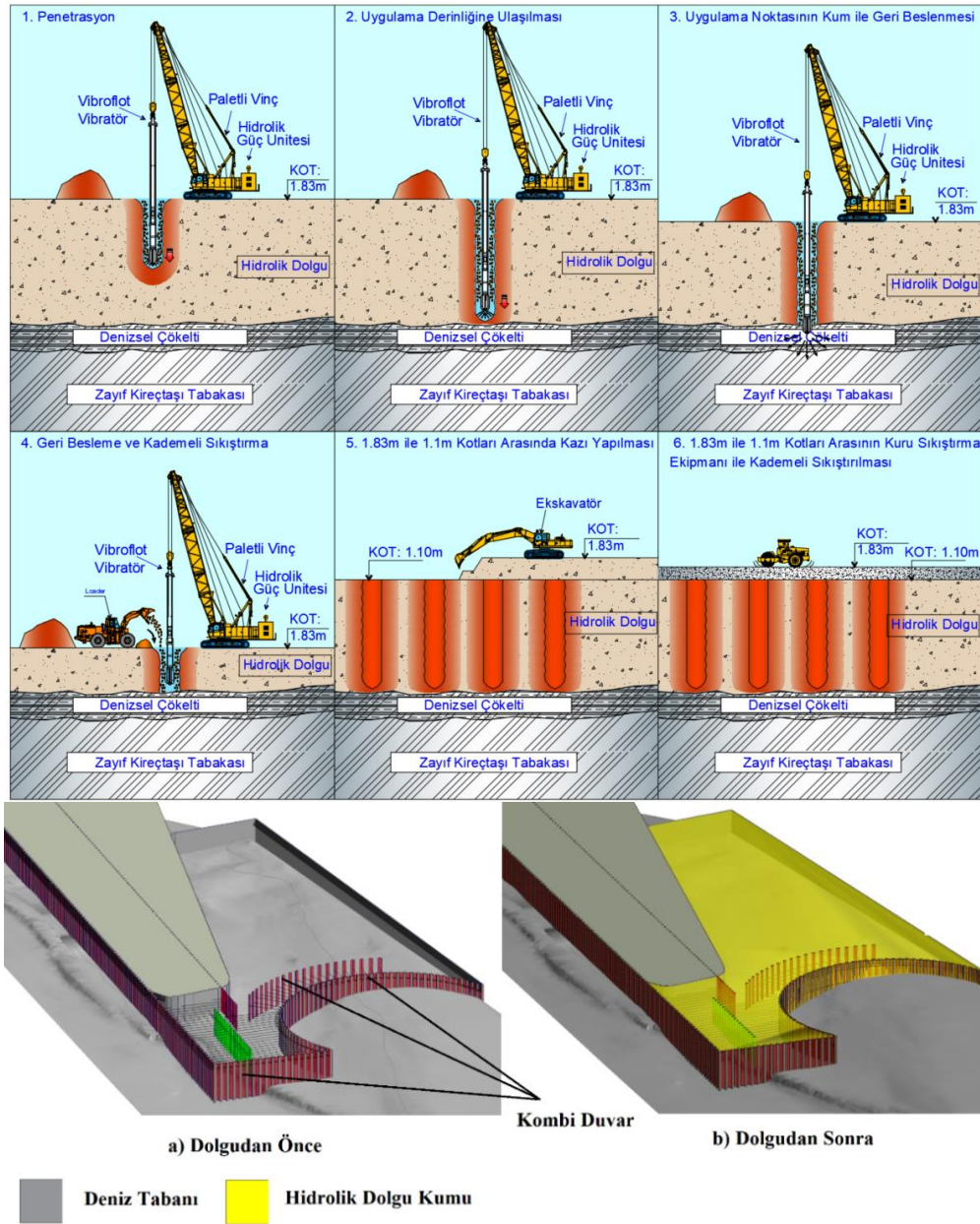
Şekil 6. Vibro kompaksiyon kurulumu (KASKTAŞ, 2021)

Vibro kompaksiyon uygulamasında kullanılan vibroflot'un teknik özellikleri Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Uygulamada kullanılan vibroflotun teknik özellikleri

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

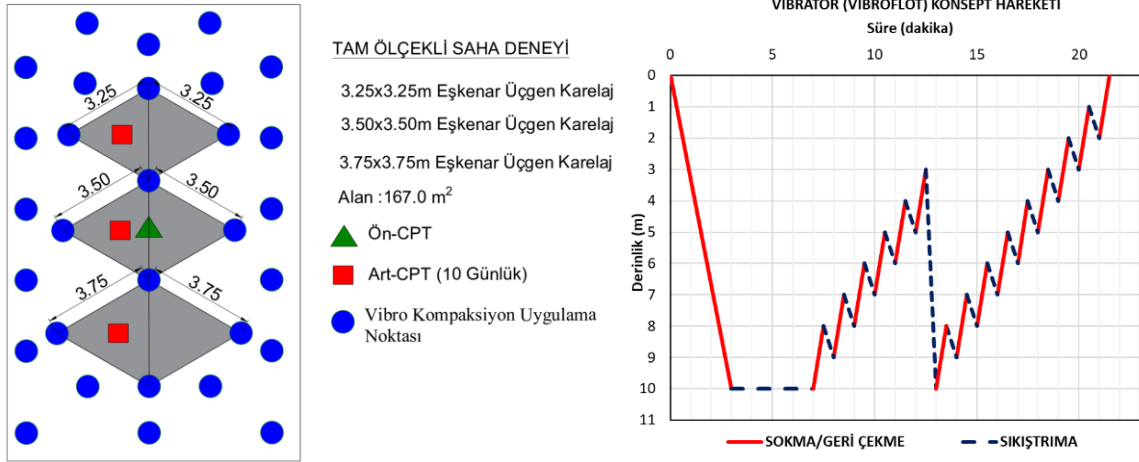
Vibro kompaksiyon uygulamasında izlenen uygulama adımları, idealize zemin profili ve proje sahasına ait yapı bilgi modeli Şekilde 7'de özetlenmiştir



Şekil 7. Proje kapsamında izlenen uygulama adımları ve sahanın 3D görünümü

3.1. Tam Ölçekli Saha Deneyi

Seçilen uygulama parametrelerinin doğrulanması amacıyla uygulamaya başlamadan önce tam ölçekli parametre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney alanında, 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. Vibro kompaksiyon uygulamasından önce, test alanının merkezinde bir adet ön-CPT deneyi yapılmıştır. Vibro kompaksiyon uygulamasının tamamlanmasından 10 gün sonra, Şekil 8’de gösterilen noktalarda, art-CPT deneyi yapılarak, uygulama yönteminin etkinliği araştırılmıştır. Deney alanında, vibro kompaksiyon uygulamasında çift pas (geçiş) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney alanında kullanılan çift paslı (geçiş) vibro kompaksiyon uygulama yöntemi Şekil 8’de verilmektedir.



Şekil 8. Tam ölçekli saha deneyi yerleşim planı ve uygulama prosedürü

Tam Ölçekli Saha Deneyinin 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.

3.2. Sıkıştırma Enerjisi

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

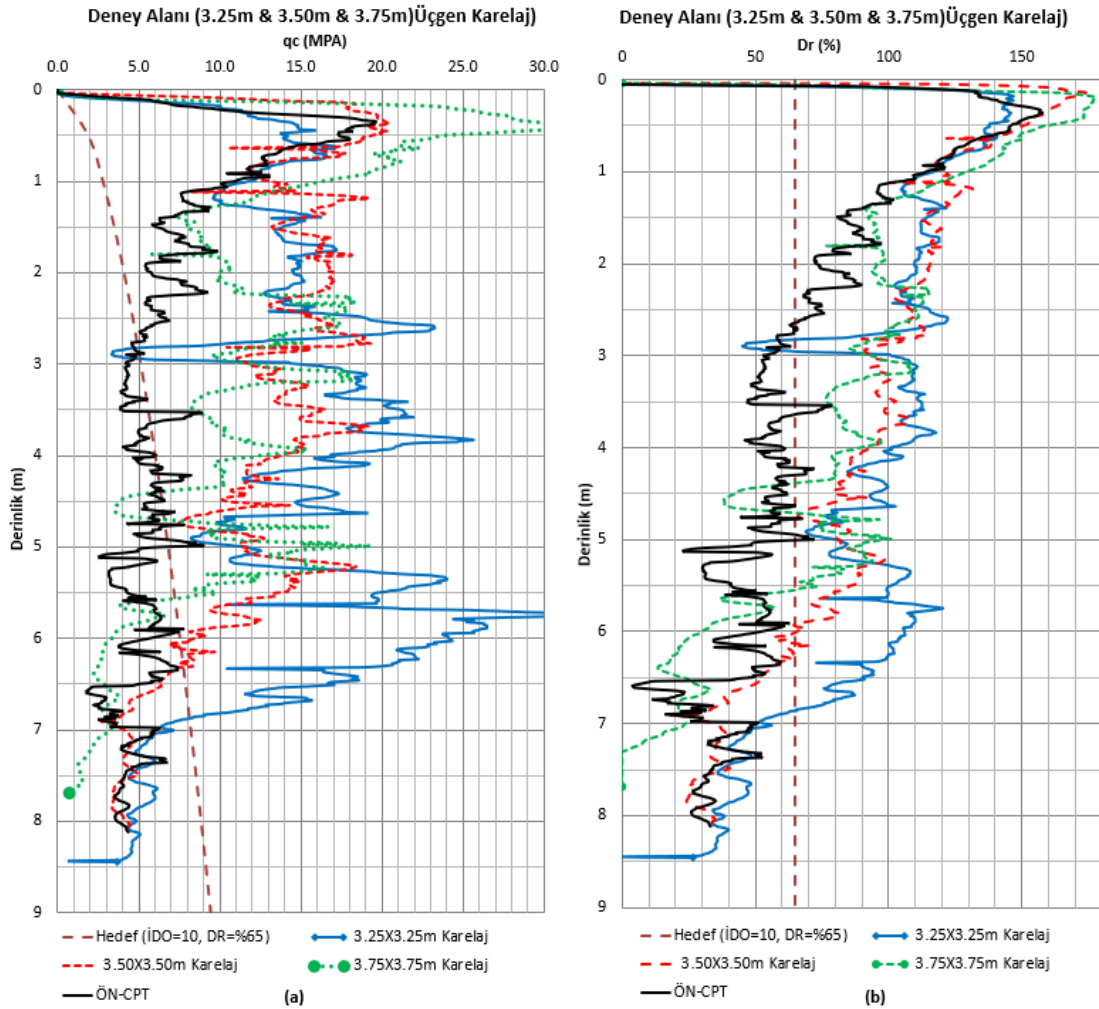
$$\text{Enerji} = \text{Güç} \times \Delta t \quad \& \quad \text{Güç} = \frac{P \times Q}{600 \times \eta_g} \quad (2)$$

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 alınmıştır), Δt : Sıkıştırma süresi (sn).

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

$$D_r = \frac{1}{c_2} \ln \left(\frac{q_c}{c_0(\sigma')^{c_1}} \right) \times 100 \quad (3)$$

σ' : Efektif gerilme, birimi kPa, q_c : Koni uç direnci, birimi kPa, $C_0=181$, $C_1=0.55$, $C_2=2.61$, Hidrolik olarak yerleştirilen dolgu kumun başlangıç mühendislik özelliklerinin saptanması ve sıkıştırmadan önceki koni uç direncinin tespit edilmesi amacıyla Şekil 8'de gösterilen ön CPT noktasında, dolgu taban kotuna kadar CPT yapılmıştır. Ön ve art CPT'lerden elde edilen, koni uç direncinin derinlik ile değişimi, her bir karelej için Şekil 9a'de verilmektedir. 3.25, 3.50 ve 3.75 karelej için gerçekleştirilen art-CPT sonuçları incelendiğinde, yerleşim aralığının artmasıyla ile koni uç direncinin arttığı tespit edilmiştir. Art CPT sonuçları ve Baldi ve diğ. (1986) tarafından geliştirilen bağıntı kullanılarak, rölatif sıkılığın (D_r) derinlik ile değişimi Şekil 9b'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 9. Koni penetrasyon test sonuçları

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 ortalama rölatif sıklık kriterlerini sağlamış ve koni uç direncinde ortalama %65 ile %124 arasında artış elde edilmiştir. Farklı yerleşim aralığı kullanılarak gerçekleştirilen tam ölçekli saha deneyinin sonuçları Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Tam ölçekli saha deneyi sonuçları

Yerleşim Aralığı (m)	Yerleşim Alanı (m ²)	Ortalama Sıkıştırma Süresi (dakika)	Ortalama Derinlik (m)	Ortalama Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m)	Ortalama Sıkıştırma Enerjisi (kJoule/m ³)	Ort. qc (MPa) (Ön)	qc (MPa) (Art)	Δqc (MPa)	Δqc (%)
3.25	4.57	14.13	8.80	10071	2201.85	6.20	13.87	7.67	124%
3.50	5.30	13.28	8.50	9777	1843.09	6.20	11.87	5.67	91%
3.75	6.09	13.54	8.00	10579	1737.38	6.20	10.21	4.01	65%

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. Elde edilen bağıl sıklık değerlerinin derinlik boyunca ortalaması alındığında, %65 bağıl sıklığın üzerinde olduğu anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR

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 deneyinin detayları ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır. Eşkenar üçgene yerleşimi ile üç farklı yerleşim aralığı gerçekleştirilen çift pas (geçiş) vibro kompaksiyon uygulamasında, yerleşim aralığı artmasıyla koni uç direncinin düştüğü görülmüştür. Sıkıştırma enerjinin sırasıyla 2201.85, 1843.09 ve 1737.38 kJoule/m³ uygulanmasıyla, ortalama koni uç direncinde sırasıyla, 7.67, 5.67 ve 4.01 MPa artış elde edilmiştir. Araştırmada, vibro kompaksiyon yöntemi ile birim zemin hacmi başına harcanan enerji miktarı, CPT uç direnci ile gerçek iyileşme miktarı arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuçları sunulmuştur. Vibro kompaksiyon yöntemi ve uygulama prosedürü belirlenirken, zemin üst kotundan itibaren yaklaşık ilk 3.00 m’lik zemin tabakası, %65 rölatif sıklığın üzerinde olduğu ve zemini danelerinin daha gevşek bir forma geçmesinin önlenmesi için bu tabaka, tek geçiş ile sıkıştırılmıştır. Vibro kompaksiyon uygulamalarında, iyileştirme oranı ile birim zemin başına harcanan enerji miktarı arasındaki ilişkinin doğru olarak ele alınması kalite kontrol ve tasarım sürecinin verimliliğini arttıracak için, büyük çaplı zemin iyileştirme projelerde maliyet, kalite kontrol ve iş programı açısından avantaj sağlayacağına inanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar ile tasarım ve kalite kontrol sürecine önemli katkılar sunulacağına inanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- 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.
- Brown, R. E. (1977). Vibroflotation compaction of cohesionless soils. ASCE J Geotech Eng Div, 103(12).
- ENKA. (2021). Method Statement for Dredging and Reclamation Works.
- Gokalp, A. (2006). Energy-based evaluation of vibration compaction. Pollack Periodica.
- KASKTAŞ. (2021). Evaluation Report of Vibro-Compaction Trials.
- Massarsch, K. R. (1991). Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes. In Deep Foundation Improvements: Design, Construction, and Testing. ASTM International.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya katkılarından dolayı çalışanı olduğum; KASKTAŞ Kayar Kalıp Altyapı Sondaj Kazık ve Tecrit A.Ş.'ye ve ENKA İnşaat ve Sanayi A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
Cc	Sıkışma indisi	D_{10}	Danelerin %10'sinin küçük olduğu dane boyutu
CPT	Koni penetrasyon deneyi	D_{20}	Danelerin %20'sinin küçük olduğu dane boyutu
Cu	Üniformluk katsayısı	D_{50}	Danelerin %50'inin küçük olduğu dane boyutu
P	Güç	Rf	CPT sürtünme oranı
Q	Hidrolik debi	c'	Zeminin efektif kohezyonu
SN	Uygunluk Sayısı	cu	Drenajsız kayma dayanımı
SPT	Standart Penetrasyon deneyi	qc	CPT uç (koni) direnci
η_g	Vibroflot verimlilik katsayısı	γ_s	Zeminin birim hacim ağırlığı
Dr	Rölatif sıklık	σ'	Efektif gerilme cinsinden zemin örtü yükü