

YAT LİMANI ÇEKEK SAHASINDA DİNAMİK SIKIŞTIRMA İLE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

GROUND IMPROVEMENT WITH DYNAMIC COMPACTION AT A BOAT YARD SITE

Lale ÖNER¹, Ece KURT BAL², Kemal ÖNDER ÇETİN³

ÖZET

Bu çalışmada, marina sahası kaplama betonu üzerinde hareket halinde olacak 220 ton ve 560 ton ağırlıklarındaki gezici yat kaldırma sistemleri (travel lift) altında oluşabilecek farklı ve aşırı oturma problemlerinin minimize edilmesi amacıyla efektif bir çözüm olarak tercih edilen dinamik sıkıştırma yöntemi konu edilmiştir. Saha geneli zemin profili; 4,0 m kalınlığındaki killi, siltli ve bloklu dolgu tabakası altında 14,5 m derinliğe kadar devam eden çok yumuşak-yumuşak kil (CL) ara tabakalı siltli, çakıllı, çok gevşek-gevşek kum (SC) tabakasından ve devamında ise 50-55 m derinliğe kadar siltli, kumlu, orta katı-çok katı kil birimlerden oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 3,0-5,0 m derinliklerindedir. Hangar yapıları altında tekil temellerden yumuşak kil birimlere kadar etkiyen gerilme değerlerinden dolayı Darbeli Kırmataş Kolon elemanları ile zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Bununla birlikte sahanın genelinde yer alan kontrolsüz yerleşimli dolgu tabakasında homojen bir kabuk yapısı oluşturmak için ise dinamik sıkıştırma yöntemi tercih edilmiştir. Sıkıştırma işlemi FHWA’de yer alan tasarım kriterlerine göre; 2,3 m çapındaki 10 ton’luk dairesel ağırlığın 10 m yükseklikten 10 kez düşürülmesi ile 3,0 m kare yerleşim şeklinde uygulanmıştır. Dinamik sıkıştırma işlemi sonrası oluşan krater derinlikleri ve kot ölçümleri ile saha genelinde oluşan hacimsel sıkışmanın mertebesi belirlenmiştir. İyileştirmenin etkinliği ise uygulama öncesinde ve sonrasında yapılan saha deneyleri ile değerlendirilmiştir. Maksimum sıkılaştırma derinliğinin 5,0 m olduğu ve bu kesimde zemin mukavemet ve rijitliklerinde sırası ile % 100 ve % 60 mertebelerinde iyileşme elde edildiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik sıkıştırma, zemin iyileştirme, oturma, saha testleri, hacimsel sıkışma

ABSTRACT

Dynamic compaction as a soil improvement solution was used effectively to minimize the estimated excessive and differential settlements under 220-560 ton travel lifts foundation

¹ İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Denizcilik San. Tic. Ltd. Şti., loner@sentezinsaat.com.tr (Sorumlu)

² İnş. Yük. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat Denizcilik San. Tic. Ltd. Şti., ekurt@sentezinsaat.com.tr

³ Prof. Dr., ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, ocetin@metu.edu.tr

at a marina site. The soil profile consists of a 4.0 m thick random scattered clayey silty and blocky fill layers, followed by interchanging very soft to soft clay (CL), and silty, gravelly, very loose to loose sand (SC) layers extending to depths of 14.5 m. Below this layer, silty, sandy, medium stiff to very stiff clay layers extending to 50-55 m depths are encountered. Groundwater table was located at a depth of 3.0-5.0 m. The soft clay layers were improved with Geopier rigid column elements, where foundation stresses were high. However, with the intent of forming a homogeneous crust, and improve random fill layers, dynamic compaction solution was preferred. Based on FHWA recommendations, site was compacted by dropping 10 times a 10-ton pounder from 10 m height. Square grid spacing was designed as 3.0 m, and pounder diameter as 2.3 m. After each set of dynamic compaction rounds, crater depths were measured. Also, after the end of dynamic compaction improvement, following the leveling works, the final elevation of the site was mapped, and the final volumetric compressions due to improvement were estimated. The pre- and post-improvement in situ tests documented the efficiency of the overall improvement scheme. The maximum depth of compaction was estimated as 5.0 m, along with the improvements in shear strength and stiffness by 100 % and 60 %, respectively.

Keywords: *Dynamic compaction, settlement, soil improvement, in-situ tests, volumetric compaction*

1. GİRİŞ

Dinamik sıkıştırma yöntemi; belirli yükseklikten ağırlık düşürülmesi prensibine dayanan, bu sayede zemin danelerinin yer değiştirmesini sağlayarak, heterojen dolguların ve büyük moloz yığınlarına sahip dolguların sıkıştırılmasında kullanılan etkin bir zemin iyileştirme yöntemidir. Dinamik sıkıştırma uygulamasında amaçlanan; temel zemininin daha sıkı ve homojen bir tabakaya dönüştürülerek özellikle yüklerin yoğun olduğu bölgelerde (kolon temel altları vb.) daha dayanımlı ve rijit bir zemin davranışının elde edilmesidir. Ayrıca bu yöntem; ıslah edilmiş alanlarda ve atık sahalarında oluşacak ani oturma ve farklı oturma problemlerinin önlenmesinde de kullanılmaktadır.

Yöntem; çoğunlukla demir veya beton bir kütlenin belirlenen bir yükseklikten düşürülerek zemin yüzeyinde yüksek enerjili bir darbenin tekrarlı olarak uygulanmasını hedeflemektedir. Dinamik sıkıştırmanın uygulanabilirliğini ve verimliliğini çeşitli parametreler etkilemekle birlikte bunlardan en önemlileri; zemin tipi ve tabakaları, yeraltı su seviyesi, sıkıştırma ekipmanı ve karelaaj olarak sayılabilir.

Proje sahasında istenilen iyileştirmenin ve iyileştirme derinliğinin sağlanması için hedeflenen potansiyel enerjinin tespiti (ağırlık ve düşüş yüksekliği), tekrar sayısı ve karelaajın seçimi tasarım adımlarını oluşturmaktadır. İyileştirme derinliği, ağırlık ve düşüş yüksekliğine bağlı ilişki şu şekildedir;

$$D = n \times \sqrt{W \times H} \quad (1)$$

İlgili bağıntıya göre; D= iyileştirme derinliği (m); W= tokmak ağırlığı (ton); H= düşüş yüksekliği (m) ve n= ampirik katsayı olup, bu değer zemin tipi ve doygunluk derecesine bağlı olarak 0,35 ile 0,5 arasında değişmektedir (Lukas, 1995).

Tasarımda gerekli iyileştirmeyi elde etmek için sıkıştırma esnasında zeminde sıkılaşmayı sağlayan enerji miktarı aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır;

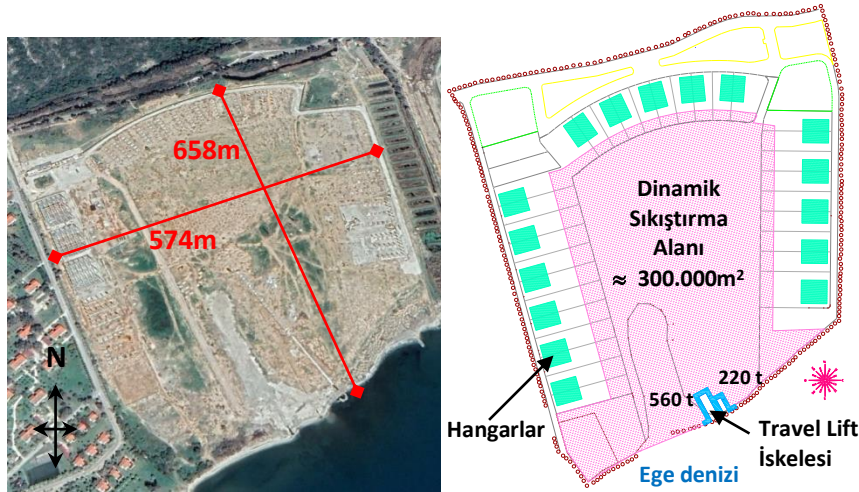
$$UE = \frac{(N \times W \times H \times P)}{karela^2} \quad (2)$$

Uygulanan enerji miktarı (UE) için verilen bağıntıda; N= her bir noktadaki düşüş sayısını, W= ağırlığı (ton), H= düşüş yüksekliğini (m) ve P= pas sayısını göstermektedir. Uygulamada düşürme aralığı genellikle düşürülen ağırlığın genişliğinin veya çapının %1 ile %2 katı olacak şekilde seçilebilir (Patel, 2019).

Dinamik sıkıştırma uygulaması sırasında zeminde büyük bir titreşim oluşmakta ve çevredeki mevcut yapıların bu titreşimden olumsuz yönde etkilenebilmesi söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle yöntemin en sık uygulandığı alanlar geniş ve yapıların az bulunduğu açık sahalardır. Buradaki önemli nokta; uygulama esnasında ağırlığın düşürüldüğü noktalara 150 m'den daha yakın mesafede olan yapıların, titreşime karşı hassasiyetlerinin değerlendirilmesi ve gözlemlenmesi ve uygulama kararı alınırsa yapılardaki mevcut hasar durumunun (çatlakların) tespit edilip kayıt altına alınmasıdır. Çalışılan sahada mevcut yapıların titreşime hassasiyeti değerlendirilmiş ve gözlenmiş olmakla birlikte, bu hususun tartışılması sayfa sınırlamaları sebebiyle kapsam dışı bırakılmıştır.

2. ÇALIŞMA SAHASI VE İDEALİZE ZEMİN PROFİLİ

Muğla ili Milas ilçesi Ören mahallesinde yaklaşık 300.000 m² alanda inşaatı yapılacak yat limanı çekek sahası; kara yapıları (32 adet hangar), deniz yapıları ve gezici yat kaldırma iskelesi (220 tonluk ve 560 tonluk travel-liftler için) olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Avrupa'nın en büyük yat limanı çekek yeri olması hedeflenen projeye ait plan Şekil 1'de gösterilmiştir.

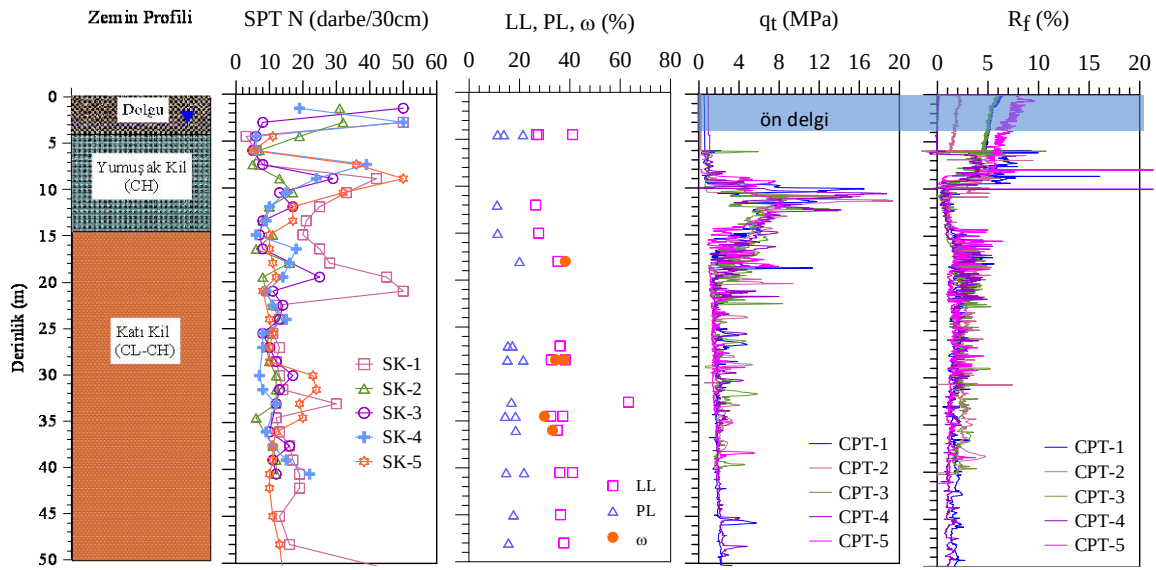


Şekil 1. Proje planı

Sahanın zemin profilinin belirlenmesine yönelik olarak detaylı saha araştırmaları planlanmış, bu kapsamda saha penetrasyon testleri yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır. Alınan bu örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Zemin profilini, 4,0 m kalınlığında gelişmiş güzel yerleşmiş killi silt ve bloklu dolgu tabakası, bu tabaka altında 14,5 derinliğe kadar devam eden geçişli olarak yer alan yumuşak kil (CL) ve silt, çakıllı çok gevşek-gevşek kum (SC) tabakası oluşturmaktadır. Bu tabaka altında ise 50-55 m derinliğe kadar siltli, kumlu, orta katı-çok katı kil tabakası yer almaktadır. Yeraltı su seviyesinin 3,0-5,0 m derinliklerde olduğu belirlenmiştir.

Çalışma sonuçları standart penetrasyon deneylerinden elde edilen SPT N değerleri, koni penetrasyon deneylerinden elde edilen koni uç direnci (q_t) ile sürtünme oranı (R_f) ve laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen likit limit (LL), plastik limit (PL) ve su içeriği (ω)'nin derinlik ile değişimi olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



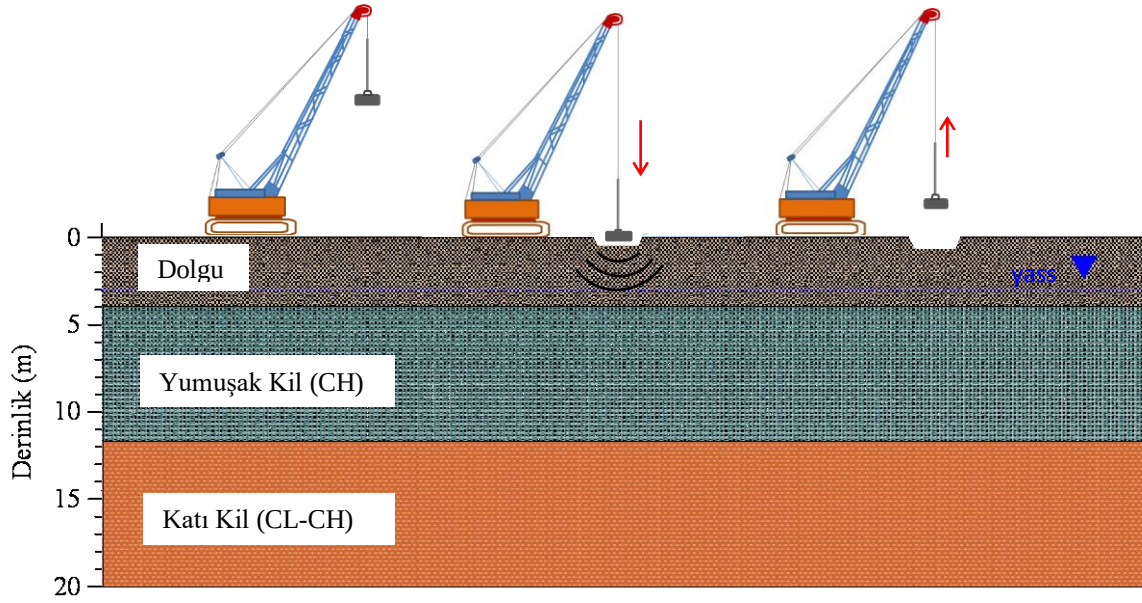
Şekil 2. İdealize zemin profili, saha ve laboratuvar test sonuçları

Bu bildiri kapsamına kara tarafında yer alan zemin iyileştirme çalışmaları ve dolgu tabakasının sıkıştırılması konu edilmiştir. Temel gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerde bulunan kontrolsüz killi silt, bloklu dolgu ve yumuşak kil tabakaları Impact® Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) elemanları ile iyileştirilmiştir. Bununla birlikte 220 tonluk ve 560 tonluk gezici kaldırma sistemlerinin (travel lift) çalışacağı geniş alanlarda homojen bir tabakanın oluşturulması ve kontrolsüz dolgu tabakasının iyileştirilmesi için dinamik sıkıştırması yöntemi tercih edilmiştir.

3. DİNAMİK SIKIŞTIRMA UYGULAMASI

Gezici yat vinç elemanlarının 4,0 m kalınlığındaki dolgu tabakası üzerinde yer alan kaplama betonunun üzerinde gezmesi planlanmıştır. Bu tabaka silt, kil ve blok içeren karmaşık bir yapıdadır. Travel lift temel yükleri 80 ton mertebelerinde olup, bu yükler altında bu tabakada 4,0 cm'den fazla elastik fark oturmalarının oluşması hesaplanmıştır. Bu fark oturmaların azaltılması amacıyla dinamik sıkıştırma uygulaması tasarlanmıştır. Dolgu tabakasının kalınlığına bağlı olarak iyileştirme derinliği 5,0 m olarak belirlenmiştir. FHWA standartları ve saha gözlemleri esas alınarak sıkışma için 10 m yükseklikten 10 tonluk bir kütlenin 10 kez düşürülmesi kararlaştırılmıştır. Tasarımda 2,3 m çapındaki kütle kullanılarak, düşüşler 3,0 m aralıkla kare patern şeklinde uygulanmıştır. Uygulanan sıkışma

enerjisi 1000 kNm’dir. Kullanılan ekipmanlar ve uygulama noktalarının şematik gösterimi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 3. Dinamik sıkıştırma uygulamasının şematik gösterimi



Şekil 4. Uygulama noktalarının yerleşimi ve kullanılan ekipmanlar

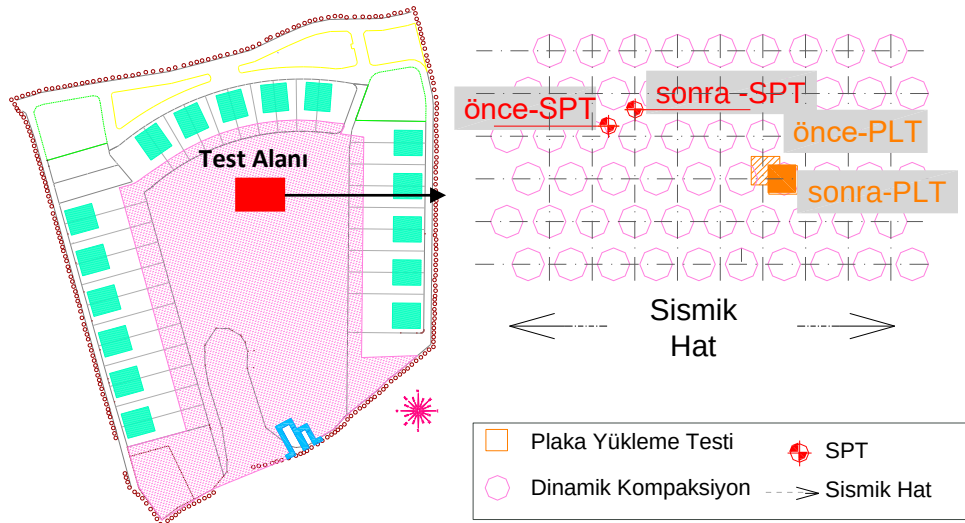
Uygulama sırasında düşüş yüksekliği ve noktası kontrol edilmiş, sonrasında oluşan krater derinlikleri ise ölçülerek raporlanmıştır. Sahada dinamik sıkıştırma uygulamasına ait görüntüler Şekil 5’te gösterilmiştir. Krater derinlikleri 25-30 cm arasında ölçülmüş olup, ortalamada maksimum krater derinliği 27 cm için hacimsel sıkışma değerinin % 2-3 olduğu tespit edilmiştir. Sonrasında, oluşan kraterler 0-38 mm granüler malzeme ile doldurularak saha nihai kotuna tesviye edilmiştir.



Şekil 5. Sahada dinamik sıkıştırma uygulaması

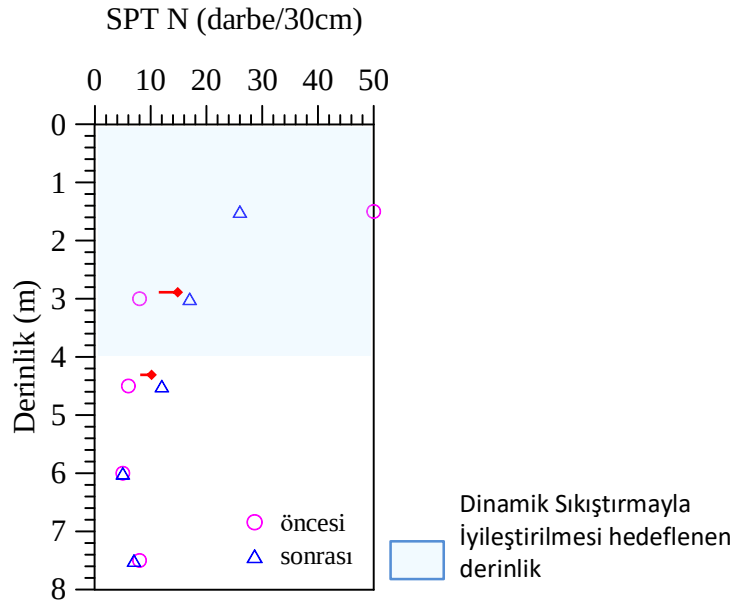
4. ZEMİN İYİLEŞTİRME TEST PROGRAMI

4,0 m kalınlığındaki dolgu tabakasındaki sıkılaştırmanın tespit edilmesi amacıyla oluşturulan zemin iyileştirme test programı kapsamında iyileştirme öncesi ve sonrası saha deneyleri yapılmıştır. Deney kapsamı; iyileştirme öncesi ve sonrası uygulanan standart penetrasyon testleri (SPT), kayma dalgası hızı testleri ve plaka yükleme testlerini içermektedir. Şekil 6'da SPT ve plaka yükleme testlerinin yerleşimi ile sismik testlerin serim yönleri gösterilmiştir.



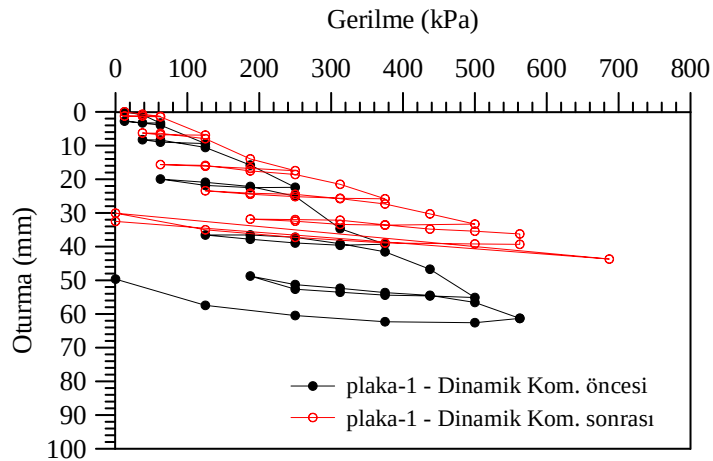
Şekil 6. Test yerleşimi

Şekil 7'de iyileştirme öncesi ve sonrası SPT N darbe sayıları gösterilmiştir. Standard penetrasyon deneyleri sırasında ortalama verimi % 55 olarak kabul edilebilecek otomatik şahmerdan kullanılmış ve deneyler ASTM D1586 ile uyumlu ekipman ile ve tarifli prosedür izlenerek tamamlanmıştır. SPT N darbe sayıları incelendiğinde iyileştirmenin etkinliği yüzeyden 5,0 m derinliğe kadar kademeli azalarak devam ettiği görülmüştür. Etkin derinlik içinde SPT N değerlerinde % 100'e varan mertebelerde artışlar rapor edilmiştir. Dinamik sıkıştırma sonrası yine ilk 5,0 m etkin iyileştirme derinliği içinde ölçülen kayma dalgası hızı değerlerinde ise yaklaşık % 50 mertebelerinde artış olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. Dinamik sıkıştırma ile iyileştirilmiş zeminde iyileştirme öncesi ve sonrası SPT değerleri

560 tonluk gezici yat kaldırma sisteminin tekerlek yükünden kaynaklı zemine gelen gerilme değerinin sahadaki davranışını kontrol etmek amacıyla; dinamik sıkıştırma uygulaması öncesinde ve sonrasında 2,0m x 2,0m x 1,0m boyutlarında beton blok üzerine 200 ton yük uygulanarak plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Plaka yükleme deneyinde belirlenen gerilme değerine ulaşana kadar kademeli olarak yükleme yapılmış ve ardından boşaltma aşamasına geçilmiştir. Her yük kademesinde plakada oturma ölçümü alınmıştır. Dinamik sıkıştırma uygulaması öncesi ve sonrasına ait gerilme – oturma grafiği Şekil 8’de gösterilmiştir. Dinamik sıkıştırma öncesinde 16 MPa olarak elde edilen kompozit elastik modül değerinin, Rocscience Settle 3D programı kullanılarak yapılan geri analize göre uygulama sonrasında % 60 artarak 26 MPa değerlerine ulaştığı görülmüştür.



Şekil 8. Dinamik sıkıştırma uygulaması öncesi ve sonrası plaka yükleme deneyi gerilme oturma grafiği

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Muğla ilinde teşkili planlanan yat çekek yeri sahasının zemin özelliklerine ve zeminin iyileştirme performansına ilişkin sonuçlar değerlendirilmiştir. Dinamik sıkıştırma ile 300.000 m² alandaki 4 m kalınlığındaki siltli, killi, bloklu dolgu tabakasının iyileştirilmesi yapılmış olup, homojen bir kabuk tabakası oluşturularak elastik oturmaların ve sıvılaşma potansiyelinin azaltılması sağlanmıştır. Sıkıştırma etkinliğinin araştırılmasına yönelik olarak standart penetrasyon testleri (SPT), plaka yükleme deneyleri ve kayma dalgası hız deneyleri yapılmıştır. Dinamik sıkıştırma ile yapılan iyileştirmenin etkinlik derinliği litertürle de uyumlu şekilde 5,0 m olarak belirlenmiştir. Sahadaki ilk beş metrenin hacimsel sıkılaşması ölçüm sonuçları, öncesi-sonrası SPT ve V_s ölçümleri ile de teyid edilecek şekilde % 2-3 mertebelerinde hesaplanmış, bu sıkılaşma sonrası mukavemet ve rijitlikte sırası ile % 100 ve % 60 artış sağlandığı görülmüştür. Araştırma sonuçları, dinamik sıkıştırma uygulamasının geniş ve açık dolgu sahalarında efektif bir iyileştirme yöntemi olduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Akhtar, S. (2018), "Dynamic Compaction".
 ASTM D1586 (2018), "Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils".
 El-Reedy, M. A. (2017), "Onshore Structural Design Calculations".
 Lukas, R. G. (1995), "Dynamic Compaction", FHWA-SA-95-037.
 Patel, A. (2019), "Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions".

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D	İyileştirme Derinliği	SPT	Standart Penetrasyon Testi
W	Tokmak Ağırlığı	CL	Düşük Plastisiteli Kil
H	Düşüş Yüksekliği	SC	Kumlu Kil
n	Ampirik Katsayı	R_f	Sürtünme Oranı
AE	Enerji miktarı	ω	Su İçeriği
N	Her bir noktadaki düşüş sayısı	P	Pas sayısı
LL	Likit Limit	q_t	Uç direnci
PL	Plastik Limit		