

## YANAL DOĞRULTULU KOMPaksiYON PROBU GELİŞTİRİLMESİ

### DEVELOPMENT OF A COMPACTION PROBE ALONG LATERAL DIRECTION

Muhammed Sefa UCUN<sup>1</sup>, Rana Gizem YALINIZ<sup>2</sup>, Burak EVİRGEN<sup>3</sup>

#### ÖZET

Yetersiz taşıma kapasitesi, aşırı oturma davranışı ve sıvılaşma potansiyeli gibi sorunların gözlemlendiği zeminlerde iyileştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Zeminin mekanik ve geoteknik parametrelerinin iyileştirilmesi için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında mekanik iyileştirme yöntemlerine alternatif olması planlanan özgün yanal tokmaktama yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, standart bir sondaj kuyusuna iletilen prop sayesinde yanal doğrultuda zemin sıklığının artırılması prensibine dayanmaktadır. Eksantrik krank mili, merkezi dağıtıcı, kanat bağlantı elemanları, tokmaktama kanadı, ana iskelet, delici uç ve koruyucu kumaştan oluşan bu prop, dönme hareketini krank mili yardımıyla tokmaktama hareketine dönüştürmektedir. Üç farklı rölatif sıklık değerindeki kumlu zeminde, merkezden merkeze delgi çapının 3, 4 ve 5 katı aralıklarla iyileştirme yapıldıktan sonra, büyük ölçekli plaka yükleme deneyleri ve kum konisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taşıma kapasitesi ve zemin sıklığındaki değişimler sunulmuştur. Delgi çapının 3 katı aralıklarla iyileştirme sonrası %30 rölatif sıklığa sahip zeminde rölatif sıklık %60 değerlerine yükselmiş ve zemin yüzeyindeki taşıma kapasitesinde 6 kata kadar artışlar gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanal kompaksiyon, Mekanik zemin iyileştirme, Rölatif sıklık, Taşıma kapasitesi, Plaka yükleme deneyi

#### ABSTRACT

Soil improvement methods are required in soil where problems such as low bearing capacity, excessive settlement and liquefaction potential. Several soil improvement methods are used to improve geotechnical parameters of soil. In this study, a novel lateral tamping method was presented as an alternative to mechanical improvement methods. The method is based on the principle of increasing soil density in lateral direction via a probe which pushed into standard borehole. The tamping probe converts the cyclic motion into tamping action along the lateral direction with the help of crankshaft and it consist of these parts; eccentric crankshaft, central distributor, vane fasteners, tamping vanes, main frame, drill bit and protective fabric. After improvement at intervals of 3, 4 and 5 times the diameter of drilling from center to center, the large scaled plate loading tests and sand cone tests were performed on sandy soils with three different relative density values. The change in bearing capacity and relative density values of soil were presented. Due to lateral tamping with the intervals of 3 times the drilling diameter, 30% of increment was achieved in relative density compared to the pre-improvement cases, plus enhancement up to 6 times in terms of soil bearing capacity.

<sup>1</sup> İnşaat Yüksek Mühendisi, ucunmsefa@gmail.com (Sorumlu yazar)

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, gizem.yaliniz@gmail.com

<sup>3</sup> Doçent Doktor, Eskişehir Teknik Üniversitesi, burakevirgen@eskisehir.edu.tr

**Keywords:** *Lateral compaction, Mechanical soil stabilization, Relative density, Bearing capacity, Plate loading test*

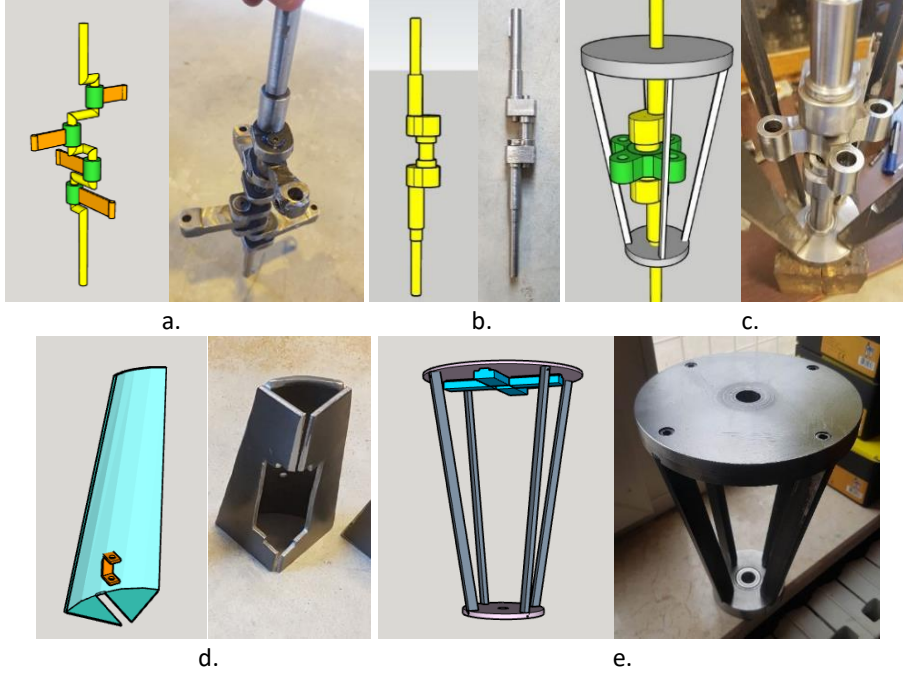
## 1. GİRİŞ

Artan nüfusa bağlı olarak gelişme gösteren yapılaşma sürecine karşın, imara açık olan bölgelerdeki zeminlerin yeterli taşıma gücüne sahip olmaması ve oturma seviyelerinde görülen ciddi artışlar sebebiyle zemin iyileştirmeye daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle gevşek, organik ve dolgu zeminlerde yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu durumlarda iyileştirme kaçınılmaz hale gelmektedir. İyileştirme işleminde genel amaç; mevcut gevşek veya yumuşak zeminin boşluk oranının azaltılmasıyla birlikte zeminin birim hacim ağırlığının artırılmasıdır. İyileştirme işlemi kimyasal veya mekanik olabilir. Kimyasal zemin iyileştirmede zemine kireç, uçucu kül, çimento veya bitüm karıştırılarak zeminin plastisitesi azaltılıp daha stabil hale getirilmektedir. Mekanik iyileştirmede ise dinamik kompaksiyon, vibrokompaksiyon, vibroflotasyon gibi yöntemler mevcuttur (Ucun, 2023). Kompaksiyon; zemin özelliklerini arttırmak amacıyla mekanik enerji uygulanması sonucunda zemindeki boşlukların azaltılıp danelerin birbirine yaklaştırılması prensibini içerir. Bu sayede, zemindeki oturma potansiyeli azaltılmakta, zeminin dayanımı artırılmakta ve zemindeki hacmin azalması sebebiyle içeriğindeki su kaybına bağlı büzülme davranışı da azalmaktadır (Bowles, 1984). Araziye silindirlerle yapılan mekanik stabilizasyon sürecinde yüksek hacimde kazı-dolgu gerekmekte ve sadece yüzeysel iyileştirme sağlanmaktadır (Scott vd., 2021). Halihazırda sektörde kullanılagelen vibrasyonlu özel proplar ise tecrübe gerektirmesinin yanı sıra devasa güç ünitelerine ihtiyaç duymaktadır (Nagula vd., 2021; Gao vd., 2020; Sugianto vd., 2020). 15-40 ton ağırlığa sahip geniş tabana sahip çelik ağırlıkların 10-30 m yükseklikten düşürülmesi neticesinde uygulanan dinamik kompaksiyon da gürültü ve sarsıntı oluşturması sebebiyle şehir içinde kullanılamamakta ve ani boşluk suyu basıncı artışı gibi ikincil etkileri bulunmaktadır (Moon vd., 2019; Tarawneh vd., 2017; Feng vd., 2015). Dolayısıyla diğer zemin iyileştirme uygulamalarında olduğu gibi mekanik etkiye bağlı iyileştirme yapılan yöntemler de kullanılan ekipman ve sınır koşulları dahilinde belirli zeminlerde sadece etkili derinliklere kadar uygulanabilmektedir. Bu çalışmada ise yanal doğrultuda iyileştirme sağlayan özgün bir mekanik zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir.

## 2. PROP ÜRETİM AŞAMALARI

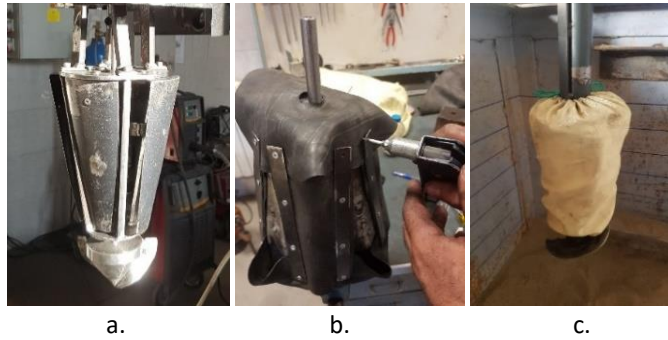
Konik formda üretilen ve hareketli kanatlar içeren yanal probun ana unsurunu oluşturan krank milinin dönmesiyle tetiklenen plakaların ileri geri hareketinin çalışabilirliğini test etmek amacıyla ilk olarak probun üç boyutlu konsept prototipinin PLA (polilaktik asit) ve PETG (polietilen tereftalat glikol) filamentleri ile üç boyutlu yazıcıdan çıktıları alınmıştır. Prop tasarımındaki parçaların ayrı ayrı SketchUp programı ile çizimleri yapıldıktan sonra uygun baskı kalitesi, basım sıcaklığı ve katman detayları seçilerek çıktılar tamamlanmıştır. Bahsi geçen prototip sayesinde uygulama sırasında öngörülemeyen problemler çözülmüştür. Sonraki aşamada çelikten üretilen ve “Yanal Kompaksiyon Amaçlı Eksantrik Tokmıklama Probu” başlığıyla patent başvurusu yapılan buluşa ilişkin detaylar aşağıda açıklanmıştır (Evirgen vd., 2023). Krank mili (sarı), motor veya sondaj makinesi ile verilen dönme hareketini yanal harekete çeviren ve bu sayede kanatların zemini sıkıştırmasını sağlayan çelikten mamul ana unsurdur (Şekil 1.a-b). Milin üst ucu sondaj makinesine, alt ucu ise delici uca uygun bağlantı detayına sahiptir. Deneysel uygulamada kullanılan toplam mil boyu 40 cm olmakla birlikte dış merkezli çıkıntılarının her biri merkezden 16 mm uzaklıktadır. Krank mili bakım için sökülebilir şekilde vidalı üretilmiştir. Kanat sayısına göre dört veya tek çıkıntılı tasarımlara monte edilmesi suretiyle dönme hareketine izin veren rulman veya yüzükler (yeşil), iç kısımdaki eksantrik mil ile koordineli biçimde hareket ettirilmektedir. Bir ucundan yüzüklere sabitlenmiş kanat bağlantı elemanları (turuncu) mil ile prop kanatları arasındaki mesafeyi ayarlamakta ve yanal hareket miktarı belirlerken, diğer ucundaki pim yuvası sayesinde tokmıklama kanatlarındaki kulaklara bağlanmaktadır. Probu dış yüzeyi konik formda olduğu için kanat bağlantı elemanlarının uzunluğu ve kanat iç yüzeyindeki konumu değişkenlik göstermektedir. Her bir kanat için dört çıkıntı bulunan mil tasarımında karşılıklı kanatlar aynı anda açılırken, merkezi dağıtıcı (Şekil 1.c) bulunan tek çıkıntılı tasarımda kanatlar sıralı açılıp kapanmaktadır. Kapalı konumdayken probun dış yüzeyine sıfır şekilde konik form oluşturan çeyrek daire formundaki çelik tokmıklama kanatları (turkuaz), delgi sırasında zeminde açılan kuyunun iç yüzeylerine vurarak yatay doğrultuda dinamik kompaksiyon sağlamaktadır (Şekil 1.d). Bu sayede, gevşek zemini sıkıştıran çelik plakalar rölatif yoğunluğu arttırarak zeminde iyileştirme sağlamaktadır. 90°'lik yanal doğrultularda simetrik konumlandırılan dört adet eş tokmıklama kanadı, konik formu sağlamak amacıyla yatayla 10° açı yapmakta ve her doğrultuda toplam 32 mm hareket payına sahiptir. Kanatların iç yüzeyinde uygun konumlarda krank bağlantı elemanlarının

sabitleneceği kulaklar (turuncu) bulunmaktadır. Krank mili ile kanatları uygun konumda tutan ve kanatların hareketini sağlayan rayları (mavi) içeren çelik ana iskelet Şekil 1.e'de verilmiştir.



Şekil 1. Yanal kompaksiyon probu bileşenleri; a. Dört çıkıntılı krank mili, b. Tek çıkıntılı krank mili, c. Merkezi dağıtıcı, d. Kanat detayları ve e. Ana iskelet

Ana iskeletin yüksekliği 23 cm iken, sırasıyla üst ve alt ve disklerin çapları 16 ve 8 cm'dir. Krankın çıkarılıp takılabilmesi için alt ve üst disklere direkler için yuvalar yapılmış bu yuvalara geçirilen direkler vidalarla sabitlenmiştir. Hem zeminde delgiyi sağlamak hem de delgi sırasında gevşeyen zemini tokmaktama kanatlarının önüne iletmek için probun alt ucuna helezon formundaki delici uç yerleştirilmiştir (Şekil 2.a). Krank parçalarının arasına zemin kaçmasını engellemek ve kanatları bir arada tutarak stabil bir hareket sağlamak için açık kısımlara öncelikle şambrel sabitlenmiş (Şekil 2.b) ve üzerine piyasadaki en sağlam kumaş olan aramid kumaştan dikilen özel çadır geçirilmiştir (Şekil 2.c).



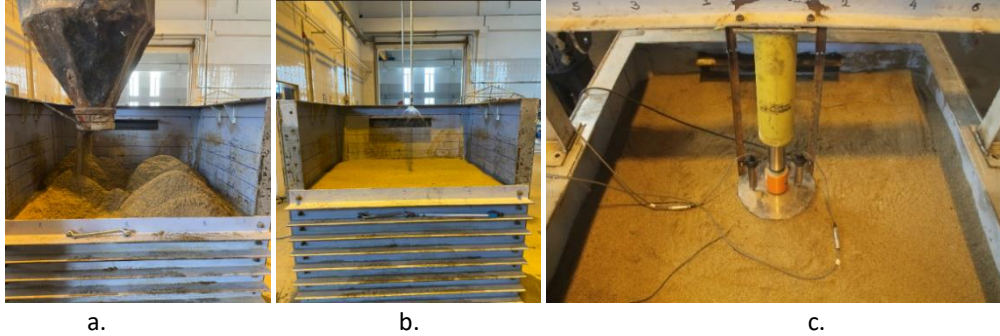
Şekil 2. Genel prop görünümü; a. Çelik tasarım, b. Şambrel monteli prop ve c. Aramid kumaş geçirilmiş prop

Prop üretim sürecinde iyi derecelenmiş kum (SW), düşük plastisiteli kil (CL) ve kötü derecelenmiş kum (SP) tipi zeminlerde denemeler yapılmıştır. SW tipi zemin içerisinde iri çakıllar bulunması, killi zeminde ise kanat yüzeylerine kil yapışması sebebiyle verimli delgi sağlanamamıştır. Dinamik kompaksiyon uygulamalarında önerildiği üzere yaklaşık %10 su içeren SP tipi zeminde istenen kuyu oluşturulmuş ve efektif sıkıştırmanın yapılabildiği görülmüştür. İlk üretilen probun krank boyutları ve ray-kanat birleşimleri zayıf olduğu için kumlu zemin içerisinde artan yanar toprak basınçlarına karşı koyamadığından kanatlarda doğrultu bozukluğu ve buna bağlı olarak raydan çıkma ile eğilmeler meydana gelmiştir. İkinci üretim probun krank milinde ve kanat-krank bağlantı elemanlarında daha kalın parçalar kullanılmış, kanatlardaki doğrultu sapma problemi ray elemanlarda silindir rulman kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır. Ancak yine krank milinin birleşim noktalarında kırılmalar görülmesi sebebiyle dört çıkıntılı krank mili konsepti değiştirilerek tek çıkıntılı krank

mili içeren üçüncü prop üretimine geçilmiştir. Ayrıca "T" ray sistemi kaldırılıp kanatlara plakalar kaynaklanarak (Şekil 1.d-sağ), ana iskelet sistemindeki kılavuz lamalar üzerinde istenen yönde kasılma olmadan hareket sağlanmıştır. Bu üretimde krank mili bir tur attığında her bir kanadın ayrı ayrı açılması sağlanmış böylece motora ve kranka fazla yük binmeden dört doğrultuda 50 cm derinlikte yanal yönde iyileştirme yapılabilmektedir.

### 3. DENEYSEL MODELLEME

Deneme çalışmalarında gözlemlendiği üzere kötü derecelenmiş kumda (SP) en verimli delgi sağlandığı için deneylerde, tek tip gradasyona sahip ve %99,4 oranında silis kumu içeren bu zemin kullanılmıştır. Gerçekleştirilen elek analizi sonucu üniformluk katsayısı ( $C_u$ ) 1,88 hesaplanırken, eğrilik katsayısı ( $C_c$ ) 1,25 bulunmuştur. Dane özgül ağırlığı ise 2,65'tir. Kesme kutusu deneylerine göre kuru numunelerde içsel sürtünme açısı yaklaşık  $35^\circ$  hesaplanırken, nemli numunelerde  $30^\circ$  civarında olduğu görülmüştür. Deneyler sırasında öngörülen üç farklı rölatif sıklık (%30, %50 ve %70) değerlerine ulaşmak için hacmi bilinen bir kaptaki kuru yağmurlama yöntemiyle yapılan denemeler sonucunda zemin düşü yükseklikleri 45 cm, 60 cm ve 75 cm olarak belirlenmiş ve Şekil 3.a'daki tremi hunisi yardımıyla zemin yerleştirilmiştir. Homojen sulamayı sağlamak için yangın söndürme sistemlerinde kullanılan "sprinkler" deney düzeneğinin orta kısmına U profil yardımıyla sabitlenmiş ve 4,8 lt/dk debi sağlayan su pompası kullanılmıştır (Şekil 3.b). Yüklemeyle ilgili oluşan gerilmelerin deney kutusu sınırlarından etkilenmesini önlemek amacıyla literatürdeki çalışmalarda yükleme plakası ile deney hücresi genişliği ve zemin yüksekliği arasında kritik oranlar verilmiştir. Buna göre plaka yükleme deneyi sırasında kullanılan dairesel plaka çapının 30 cm seçilmesi durumunda 150 cm birim hücre boyutuna sahip deney hücresi yeterli olmaktadır (Pokharel, 2010; Abu-Farsakh vd., 2016; Goud vd., 2020; Tafreshi vd., 2021). Plaka yükleme deney düzeneğinde zemin yüzeyinden düşey yükü sağlamak üzere 30 ton kapasiteli hidrolik piston ve yük hücresi ile plakanın üstünden veri alan 50 mm kapasiteli iki adet deformasyon ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.c).



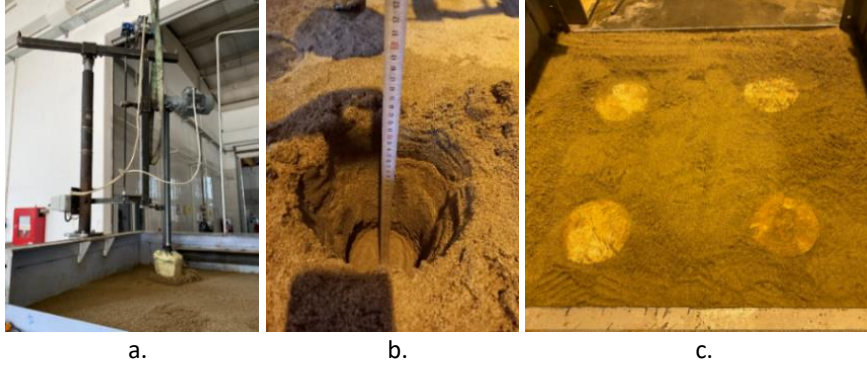
Şekil 3. a. Kuru yağmurlama, b. Su ile yağmurlama ve c. Deney düzeneği ekipmanları

Deney hücresi içerisinde tokmaktama probunun aşağı-yukarı ve sağ-sol hareketinin sağlanabilmesi için çok fonksiyonlu özel bir delgi vinci geliştirilerek (Şekil 4.a), merkezden merkeze 3D, 4D ve 5D aralıkları ( $D=20$  cm, prop çapı) sağlayacak şekilde 60 cm, 80 cm ve 100 cm mesafelerde, 80 devir/dk dönme hızı ve 40 mm/dk düşey doğrultuda delgi hızı ile yanal kompaksiyon yapılmıştır. Her deney için dört kez tekrarlanan bu işlem sayesinde, derinliği 50 cm ve üst çapı ortalama 23 cm olan delgi yapılmış ve çalışmada farklı bir değişken istenmediğinden açılan kuyulara rijit ahşap kazıklar yerleştirilmiştir (Şekil 4.b-c). Önerilen eksantrik tokmaktama probuyla yapılan delgiler sonucunda açılan kuyulara normal şartlarda arazide granüler dolgu veya beton-betonarme kolon teşkil edilebilecektir. Ancak, rölatif sıklık ve iyileştirme aralığının incelendiği bu süreçte farklı bir değişkenin etkisini engellemek üzere kuyulara standart ahşap kazık yerleştirilmesine karar verilmiştir. Tüm aşamalar %30, %50 ve %70 sıklık değerlerinde 3D, 4D ve 5D iyileştirme aralıkları için tekrarlanarak toplamda 36 adet yanal tokmaktama kolonu oluşturulmuş ve nihayetinde 12 adet büyük ölçekli plaka yükleme deneyi tamamlanmıştır.

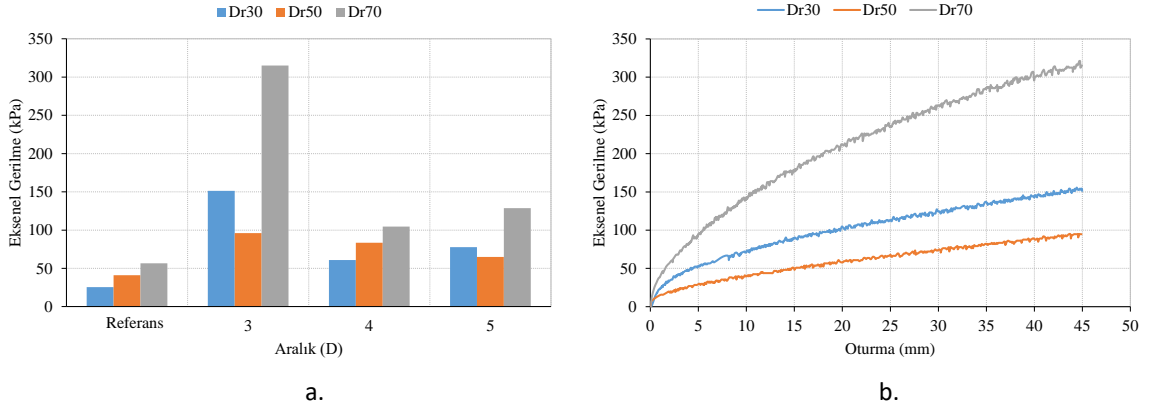
### 4. DENEY SONUÇLARI

Çalışma kapsamında zemin iyileştirme öncesi ve sonrasında kum konisi deneyleri yapılmış ve iyileştirme içermeyen referans deneylere kıyasla elde edilen sonuçlara göre Tablo 1'de görüldüğü üzere uygulama aralıkları 3D olan %30 başlangıç rölatif sıklığına sahip zeminde yaklaşık %30 sıklık artışı gözlemlenmiştir. Plaka yükleme deneyleri sonucunda 45 mm oturmaya karşı gelen gerilme değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. Söz

konusu oturma mertebesinde %30, %50 ve %70 sıklık değerleri için yapılan referans deneylerinde yüzeyde sırasıyla 25,44 kPa, 40,99 kPa ve 56,53 kPa eksenel gerilme değerleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre sıklık artışıyla birlikte aynı oturma seviyesi için yaklaşık doğrusal bir eğilimle eksenel gerilmenin arttığı görülmüştür. İyileştirme sonrasında tüm durumlarda yaklaşık %60 ile %490 gibi ciddi seviyelerde taşıma kapasitesi artışı gözlenmiştir. İlgili oturma seviyesindeki en yüksek taşıma kapasitesine 315,16 kPa değeriyle kendi referans durumuna kıyasla 5,58 katlık bir artışla %70 başlangıç sıklığında 3D mesafedeki iyileştirme neticesinde ulaşılmıştır. En efektif veriler 3D aralıklı uygulamalarda meydana gelirken, 4D ve 5D aralıklı uygulamalarda etkinin azaldığı ve birbirine yakın sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. %50 rölatif sıklıkta ise nispeten düşük değerlere ulaşılmıştır (Şekil 5b). Plaka yükleme deney sonuçları irdelenirken, iyileştirme yapıldıktan sonra açılan kuyulara ahşap kazıkların yerleştirildiği unutulmamalıdır.



Şekil 4. İyileştirme aşamaları; a. Delgi işlemi, b. Delgi sonrası oluşan kuyu ve c. Ahşap kazıklar



Şekil 5. a. Plaka yükleme deneylerinde 45 mm oturma seviyesine karşılık gelen gerilme değerleri ve b. 3D uygulama aralığı için elde edilen eksenel gerilme – oturma eğrileri

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, mevcut haliyle üniform kumlu siğ zemindeki iyileştirme uygulamalarında kullanılabilirliği kanıtlanmış, boyut ve kesitleri artırıldığında ise derin uygulamalarda kullanım imkanı bulunan yanal doğrultuda dinamik kompaksiyon sağlayabilen özgün bir kompaksiyon probu tasarlanıp üretilmiştir. Söz konusu prop ile kısmen su içeren kötü derecelenmiş silis kumunda iyileştirme yapıldıktan sonra açılan kuyulara ahşap kazıklar yerleştirilerek büyük ölçekli plaka yükleme deneyleri tamamlanmıştır. Üç farklı rölatif sıklık ve üç farklı uygulama aralığında yapılan deney sonuçları doğrultusunda taşıma kapasitesinde yaklaşık 6 katlık artış sağlaması bakımından en efektif uygulama aralığı 3D olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 3D aralıklarla iyileştirme sonrası, %30 rölatif sıklığa sahip zeminde yaklaşık %30 rölatif sıklık artışı görülmüştür. Hem plaka yükleme deney sonuçları hem de kum konisi sonuçları açısından %30 ve %70 sıklıklarda daha verimli sonuçlar elde edilmesine rağmen %50 sıklıkta daha düşük iyileştirme seviyelerine ulaşılabilmektedir. Bu durumun, kullanılan kumun dane yapısı, yüzey pürüzlülüğü ve su içeriği gibi etkenlerin içsel sürtünme açısı, kilitleme etkisi üzerindeki etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışma sürecinde, hızlı, uygulaması kolay,

çevre dostu mekanik bir zemin iyileştirme yöntemi tüm detayları ile ortaya konularak literatüre yeni ve özgün bir mekanik zemin iyileştirme yöntemi kazandırılmış ve proba dair patent başvuruları yapılmıştır.

Tablo 1. İyileştirme öncesi ve sonrası rölatif sıklık değerleri

Deney tipi	Rölatif Sıklık (%)		Artış miktarı (%)
	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	
Dr30_3D	31,54	61,80	30,27
Dr30_4D	31,89	59,07	27,18
Dr30_5D	33,54	40,76	7,22
Dr50_3D	51,70	69,07	17,36
Dr50_4D	51,90	62,55	10,65
Dr50_5D	52,42	58,71	6,29
Dr70_3D	70,92	92,84	21,92
Dr70_4D	69,64	85,01	15,37
Dr70_5D	74,43	82,61	8,17
Dr30 ort	32,81	53,88	21,56
Dr50 ort	51,01	63,44	12,43
Dr70 ort	70,61	86,82	16,21

## TEŞEKKÜR

*Bu çalışma TÜBİTAK-1002 Hızlı Destek Programı tarafından kabul edilen 122M098 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.*

## KAYNAKLAR

- Abu-Farsakh, M., Hanandeh, S., Mohammad, L., Chen, Q. (2016), "Performance of geosynthetic reinforced/stabilized paved roads built over soft soil under cyclic plate loads", *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 845-853.
- Bowles, J.E. (1984), "Physical and Geotechnical Properties of Soil", 2. Edition, McGraw-Hill.
- Evirgen, B., Uzun, M. S., Yalınız, R. G., Tuncan, M. (2023), "Yanal Kompaksiyon Amaçlı Eksantrik Tokmaklama Probu (An Eccentric Tamping Probe for Lateral Compaction)", Patent başvurusu.
- Feng, S., Du, F., Shi, Z., Shui, W., Tan, K. (2015), "Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction", *Engineering Geology*, 185, 105-115.
- Gao, C., Du, G., Liu, S., Zhang, D., Zhang, K., Zeng, B. (2020), "Field study on the treatment of collapsible loess using vibratory probe compaction method", *Engineering Geology*, 274, 105715.
- Goud, G. N., Ramu, B., Umashankar, B., Sireesh, S., Madhav, M.R. (2020), "Evaluation of layer coefficient ratios for geogrid-reinforced bases of flexible pavements", *Road Materials and Pavement Design*, 1-12.
- Moon, J., Jung, H.S., Lee, S., Kang S., (2019), "Ground improvement using dynamic compaction in sabkha deposit", *Applied Sciences*, 9, 2506, doi:10.3390/app9122506.
- Nagula, S.S., Hwang, Y., Dashti, S., Grabe, J. (2021), "Numerical investigation of liquefaction mitigation potential with vibroflotation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, 106736.
- Pokharel, S.K. (2010), "Experimental study on geocell-reinforced bases under static and dynamic loading", Doktora tezi, University of Kansas. 349 sayfa.
- Scott, B., Jaksa, M., Mitchell, P. (2021), "Depth of influence of rolling dynamic compaction", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 174 (2), 84-94.
- Sugianto, A., Tamsir, P.C., Rahardjo, P.P. (2020) "Sand densification using combination of vibroflotation and stone column for coastal reclamation in Lampung, Indonesia", *Lecture Notes in Civil Engineering*, 62, 1359-1366.
- Tafreshi, S.N.M., Omran, M.P., Rahimi, M., Dawson, A. (2021), "Experimental investigation of the behavior of soil reinforced with waste plastic bottles under cyclic loads", *Transportation Geotechnics*, 26, 100455.
- Tarawneh, B., Sbitnev, A., Hakam, Y. (2017), "Lessons learned from 11 million m<sup>2</sup> of dynamic compaction and replacement", *Proceedings of the ICE: Ground Improvement*, 170 (4), 208-217.
- Uzun, M.S. (2023), "Yanal tokmaklama ile zemin iyileştirme", Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir.