



**YANAL TOKMAKLAMA YÖNTEMİ İLE  
ZEMİN İYİLEŞTİRME  
Yüksek Lisans Tezi  
Muhammed Sefa UCUN  
Eskişehir 2023**

# YANAL TOKMAKLAMA YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

**Muhammed Sefa UCUN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak EVİRGEN**

**Eskişehir**

**Eskişehir Teknik Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Haziran 2023**

*Bu tez çalışması TÜBİTAK Komisyonu tarafından kabul edilen 122M098 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.*

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Muhammed Sefa UCUN'nun YANAL TOKMAKLAMA YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME başlıklı çalışması 13/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### Unvan Adı Soyadı

### İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Burak EVİRGEN

Üye

: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

Üye

: Doç. Dr. Eyübhan AVCI

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

13/06/2023

## DANIŞMAN ONAYI

DaniŐmanlıđını yurttuğuğm Yůksek Lisans ۆđrencisi Muhammed Sefa UCUN, YANAL TOKMAKLAMA YŐNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŐTİRME baŐlıklı tez çalıŐmasını tamamlamıŐtır. HazırlamıŐ olduğu tez tarafımca incelenmiŐ ve ۆđrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun gőrůlmüŐtűr.

Tez DaniŐmanı

Dr. ۆđr. Üyesi Burak EVİRGEN

## ÖZET

### YANAL TOKMAKLAMA YÖNTEMİ İLE ZEMİN İYİLEŞTİRME

Muhammed Sefa UCUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Geoteknik Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2023

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak EVİRGEN

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. Tez kapsamında mekanik iyileştirme yöntemlerine alternatif olması planlanan özgün yanal tokmaktama yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, standart bir sondaj kuyusuna iletilen prop sayesinde yanal doğrultuda zemin sıkılığının artırılması prensibine dayanmaktadır.

Çalışmada öncelikle seçilen kötü derecelenmiş kum zeminin (SP) özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında eksantrik krank mili, merkezi dağıtıcı, kanat bağlantı elemanları, tokmaktama kanadı, ana iskelet, delici uç ve koruyucu kumaştan oluşan probun farklı tasarımları yapılmış, üç boyutlu yazıcıdan prototip çıktısı alınmış ve çelikten mamul üretim gerçekleştirilmiştir. Rölatif sıkılığın ve uygulama aralığının etkisini belirlemek amacıyla küp deney hücresi içerisinde büyük ölçekli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Üç farklı rölatif sıkılık 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. Yanal tokmaktama neticesinde iyileştirme öncesine kıyasla %30 seviyesine ulaşan rölatif sıkılık artışı sağlanmasının yanı sıra taşıma kapasitesi açısından 6 kata varan artış elde edilmiştir.

Son olarak arazide çalışabilirliğinin test edilmesi amacıyla eksantrik tokmaktama probu, sondaj makinesine adapte edilmiş ve deneme kuyuları açılmıştır. Sonuç olarak; özgün, uygulaması kolay, hızlı ve çevre dostu mekanik bir zemin iyileştirme yöntemi tüm detayları ile ortaya konmuş ve literatüre kazandırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Yanal dinamik kompaksiyon, Mekanik iyileştirme, Plaka yükleme deneyi, Tokmaktama, Zemin iyileştirme

## ABSTRACT

### SOIL IMPROVEMENT WITH A LATERAL TAMPING METHOD

Muhammed Sefa UCUN

Department of Civil Engineering  
Programme in Geotechnic

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2023

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Burak EVİRGEN

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. Within this thesis, 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.

In this study, firstly, the properties of poorly graded sandy soil (SP) were determined, and various designs of the probe consisting of eccentric crankshaft, central distributor and other components were made, a prototype was printed out from a three-dimensional printer and steel products were produced. Large-scaled experimental studies were conducted in a cube-shaped test-cell to determine the effect of relative density and application spacing. After improvement at intervals of 3, 4 and 5 times the diameter of probe, the large-scaled plate loading tests and sand cone tests were performed on sandy soils with three different relative density values. Due to lateral tamping with 3D intervals, 30% of increment was achieved in relative density compared to the pre-improvement cases, plus an enhancement up to 6 times regarding soil bearing capacity.

Finally, test boreholes were drilled in the field after the eccentric tamping probe had been adapted to the drilling machine. Consequently, an original, easy-to-apply, and nature-friendly mechanical soil improvement method was presented.

**Keywords:** Lateral dynamic compaction, Mechanical stabilization, Plate loading test, Tamping, Ground improvement,

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübelerinden faydalandığım öğrendiğim öğrenirken keyif aldığım, anlayışını ve güler yüzünü esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Burak EVİRGEN'e,

Kendimi geliştirmemde katkısı olan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İnanç ONUR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Eren BALABAN'a, engin bilgisinden faydalandığım Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a,

Deneysel çalışmalarımdeki yardımları için İnş. Müh. Rana Gizem YALINIZ'a, tez sürecimdeki desteklerinden dolayı başta Zülfikar ERTEKİN olmak üzere Eskişehir Teknik Üniversitesi Atölye çalışanlarına ve Hasan ERTEKİN'e,

Eğitimim sürecinde iyi kötü her anımda beni motive eden, destekleyen aileme ve arkadaşlarıma,

BİDEB 2210-A Genel Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında ve tezim kapsamında bursiyeri olduğum "1002-Hızlı Destek Programı" 122M098 numaralı projeyi destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Muhammed Sefa UCUN

## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Muhammed Sefa UCUN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI .....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI .....	III
ÖZET .....	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR .....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
GÖRSELLER DİZİNİ .....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XV
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	11
2.1. Arazi Çalışmaları .....	11
2.2. Deneysel Çalışmalar .....	13
2.3. Teorik Çalışmalar .....	16
2.4. Özel Zemin Kompaksiyon Yöntemleri.....	18
2.5. Patent Taraması .....	22
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	25
3.1. Zemin Özellikleri.....	25
3.2. Tokmaklama Probu Tasarım ve Üretim Süreçleri .....	29
3.2.1. 3D prototip üretimi .....	29
3.2.2. Birinci çelik prop üretimi .....	35
3.2.3. İkinci çelik prop üretimi .....	40
3.2.4. Üçüncü çelik prop üretimi .....	42

3.2.5. Delgi Vinci Üretimi.....	45
3.3. Büyük Ölçekli Denev Düzeneği ve Hazırlık Aşamaları.....	47
3.3.1 Tokmaktama probuyla zemin iyileştirme .....	50
4. BULGULAR.....	54
4.1. Kum Konisi Deneyleri .....	54
4.2. Plaka Yükleme Deneyleri .....	56
4.3. Arazide Yapılan İyileştirme Denemeleri.....	63
5. TARTIŞMA.....	66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKÇA.....	72
ÖZGEÇMİŞ	

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Tablo 3.1.</b> Özgöl ağırlık deney verileri .....	26
<b>Tablo 3.2.</b> Silis kumuna ait geoteknik özellikler.....	27
<b>Tablo 3.3.</b> Deneylerde öngörülen sıklık değerleri için hücre içerisinde her 10 cm kalınlıkta kullanılan kum ve su miktarları .....	49
<b>Tablo 4.1.</b> Referans deneylerine ait kum konisi sonuçları .....	54
<b>Tablo 4.2.</b> Eksantrik tokmaktama probuyla iyileştirme sonrasında zeminin rölatif sıklık değerlerindeki artış.....	55
<b>Tablo 4.3.</b> İyileştirme sonrasında taşıma kapasitesinde referanslara göre artış oranları .....	60
<b>Tablo 4.4.</b> Yüzeydeki gerilmeye kıyasla yüzde cinsinden derinliğe bağlı zemin içi gerilme azalmaları.....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1.</b> İri yuvarlak zemin danelerinin düzeni a. Gevşek halde b. Sıkı halde (Nicholson, 2015) .....	1
<b>Şekil 1.2.</b> Dinamik kompaksiyon uygulama planı.....	8
<b>Şekil 1.3.</b> Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık grafiği.....	10
<b>Şekil 2.1.</b> Dinamik kompaksiyon için zeminlerin gruplandırılması (FHWA, 2017) .....	12
<b>Şekil 2.2.</b> Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen dinamik kompaksiyon mekanizması (Kundu ve Viswanadham, 2015) .....	14
<b>Şekil 2.3.</b> Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen dinamik kompaksiyon modeli .....	15
<b>Şekil 2.4.</b> <i>Gevşek kumda, düz ve konik tabanlı tokmaklar ile uygulanan enerjiye karşılık oluşan krater derinliği (Arslan vd., 2007) .....</i>	16
<b>Şekil 2.5.</b> Dairesel yörüngede hareket ile şevde yanal kompaksiyon modellemesi (Abdizadeh vd., 2020 ve 2021).....	17
<b>Şekil 2.6.</b> Sırasıyla; düz, konkav ve konveks tabanlı tokmakların vuruşu sonucunda zemin danelerinde görülen yer değiştirme davranışları (Wang vd., 2019) .....	18
<b>Şekil 2.7.</b> Hızlı darbe kompaksiyonu; a. granüler zeminlerde kompaksiyon, b. kohezyonlu zeminlerde taş kolon oluşturulması (Dobrzycki ve Rychlewski, 2018) .....	19
<b>Şekil 2.8.</b> Derin güçlü vibrokompaksiyon uygulaması (Papadopoulos ve Eliahu, 2018) .....	21
<b>Şekil 3.1.</b> Silis kumuna ait granülometre eğrisi.....	26
<b>Şekil 3.2.</b> Sırasıyla, kuru ve nemli kum için kesme kutusu deneyinden elde edilen; a-b. Kayma gerilmesi - yatay deplasman grafikleri ve c-d. Kayma zarfları .....	28
<b>Şekil 4.1.</b> Referans deneylerine grafikler; a. Yüzeydeki gerilme-oturma değişimi ve b. Derinliğe bağlı gerilme değişimi.....	57
<b>Şekil 4.2.</b> Plaka yükleme deneylerinden elde edilen yüzeydeki eksenel gerilme- oturma değişimi; a. %30 $D_r$ , b. %50 $D_r$ , c.% 70 $D_r$ ve d. 45 mm oturmaya karşılık gelen yüzey gerilmesi grafiği.....	58
<b>Şekil 4.3.</b> Plaka yükleme deneylerinden elde edilen derinliğe bağlı gerilme değişimi; a. %30 $D_r$ , b. %50 $D_r$ ve c.% 70 $D_r$ .....	61

## GÖRSELLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Görsel 1.1.</b> 7,7 ve 7,6 Maraş depremleri sonucu sınıvlaşma görülen binalar (http-1) .....	2
<b>Görsel 1.2.</b> Patlatma ile zemin iyileştirme (http-2) .....	3
<b>Görsel 1.3.</b> Grid silindirler (http-3) .....	4
<b>Görsel 1.4.</b> Düz silindirli kompaktör (http-4) .....	4
<b>Görsel 1.5.</b> Keçi ayaklı silindirler (http-5) .....	5
<b>Görsel 1.6.</b> Pnömatik tekerli silindirler (http-6) .....	5
<b>Görsel 1.7.</b> Elektrikli mobil kompaktör .....	6
<b>Görsel 1.8.</b> Dinamik kompaksiyon uygulamaları (http-7) .....	7
<b>Görsel 1.9.</b> Dinamik kompaksiyon uygulaması a. Tokmağı taşıyan vinç b. Tokmaktama sonrası oluşan krater c. Kraterin iyi derecelenmiş kumlu zeminle doldurulması (Moon vd. 2019) .....	9
<b>Görsel 3.1.</b> a. Piknometre ile özgül ağırlık deneyi ve b. Kesme kutusu deneyi .....	25
<b>Görsel 3.2.</b> Basım esnasında “Creality Ender 3 V2” tipi 3D yazıcı .....	29
<b>Görsel 3.3.</b> Birinci tokmaktama probuna ait montajlı ve demonte Sketchup çizimleri ile üç boyutlu yazıcı çıktıları .....	33
<b>Görsel 3.4.</b> İkinci tokmaktama probuna ait montajlı ve demonte Sketchup çizimleri .....	34
<b>Görsel 3.5.</b> Üçüncü tokmaktama probuna ait; a. Montajlı ve demonte Sketchup çizimleri ve b. Teknik görünüşleri .....	35
<b>Görsel 3.6.</b> Eksantrik tokmaktama probu üretim aşamaları; a. Krank mili, b. Alt ve üst diskler, c. Sabit çerçeve, d. Tokmaktama kanatları, e. Yanal hareketi kılavuzlayan ray sistemi ve f. Konik delgi aparatı .....	36
<b>Görsel 3.7.</b> Eksantrik tokmaktama probu üretim aşamaları; a. Krank mili, b. Alt ve üst diskler, c. Sabit çerçeve, d. Tokmaktama kanatları, e. Yanal hareketi kılavuzlayan ray sistemi ve f. Konik delgi aparatı .....	37
<b>Görsel 3.8.</b> a. Eksantrik tokmaktama probu metal aksam, b. Boyama sonrası ve c. Özel üretim aramid kumaş geçirilmiş prop .....	37

<b>Görsel 3.9.</b> a-b-c. Ön denemelerde sırasıyla, SP, SW ve CL tipi zeminlerdeki delgiler ve d. Proje sürecinde temin edilen 0,55 kW'lık motor sabitlenen özel delgi vinci.....	39
<b>Görsel 3.10.</b> Delgi sırasında birinci propta karşılaşılan problemler; a. Raydan çıkmış prop kanadı b-c. Kanatlarda eğilmenin görüldüğü krank mili ve kanat birleşim noktaları.....	39
<b>Görsel 3.11.</b> İkinci tasarıma ait prop bileşenleri; a-d. Krank mili parçaları ve krank kulakları .....	40
<b>Görsel 3.12.</b> a. Bağlantı pimleri güçlendirilen tokmaktama kanatları, b. Teleskopik raylar ve c. Silindirik raylar .....	41
<b>Görsel 3.13.</b> İkinci tasarım prop krankında görülen kırılmalar.....	42
<b>Görsel 3.14.</b> Üçüncü tasarıma ait prop bileşenleri; a. Tek kollu krank mili, b. Kamalı birleşim içeren krank kulağı, c. Merkezi dağıtıcı ve d. Monte edilmiş krank mili .....	43
<b>Görsel 3.15.</b> a. Direk kanalları ve b. Rulmanlar.....	43
<b>Görsel 3.16.</b> a. Merkezleme plakaları içeren kanat, b. Tekli krank mili, c. Pimli bağlantı detayı ve d. Monte edilmiş kanat detayı .....	44
<b>Görsel 3.17.</b> a. Proben metal iskeleti, b-c. Kanat araları ve disklere şambrel montajı, d-e. Aramid kumaş montajı ve f. Helezonlu delici uç .....	45
<b>Görsel 3.18.</b> Delgi vinci üretim aşamaları .....	46
<b>Görsel 3.19.</b> Özel üretim delgi vincinin son hali .....	47
<b>Görsel 3.20.</b> a. Kuru yağmurlama sürecince kullanılan kova, b. Farklı düşü yüksekliklerinden yapılan denemeler ve c. Düşü yüksekliği-rölatif sıklık grafiği.....	48
<b>Görsel 3.21.</b> Fıskiye ile sulama sistemi.....	48
<b>Görsel 3.22.</b> a. Hücre içerisine zeminin kuru yağmurlama tekniğiyle yerleştirilmesi ve b. Su ile yağmurlama.....	49
<b>Görsel 3.23.</b> a. D (20 cm) prop çapı olmak üzere 3D, 4D ve 5D aralıklarla iyileştirme uygulanacak noktalar b. Zemin içi gerilme ölçerlerin konumları ve yerleşimi ve b. Plaka yükleme deney düzeneği .....	51
<b>Görsel 3.24.</b> a. Delgi ve yanal iyileştirme aşaması, b. İyileştirme sonrası elde edilen kuyu, c. Köpük dolgu yapılan kuyu ve d. Köpük kalıba uygun işlenen ahşap kütük .....	52

<b>Görsel 3.25.</b> a-b. Yanal tokmaklama süreci, c-d. İyileştirme sonrası açılan kuyu ve e-f. Ahşap kütüklerin yerleştirilmesi .....	52
<b>Görsel 3.26.</b> Tokmaklama probu etki yarıçapının tespiti .....	53
<b>Görsel 4.1.</b> Kum konisi deneyi.....	55
<b>Görsel 4.2.</b> Bazı deney sonu fotoğrafları; a. $D_r30_{ref}$ , b. $D_r30_{3D}$ , c. $D_r50_{4D}$ ve d. $D_r70_{5D}$ .....	62
<b>Görsel 4.3.</b> Sondaj makinesi üzerinde yapılan değişiklikler; a. Prop ve trapez bağlantı plakası, b. Bağlantı detayı ve c. Burgu .....	63
<b>Görsel 4.4.</b> a. Delgi işlemi, b. Boşaltılmış kuyu ve c. Kum dolu kuyu ve prop adapte edilmiş sondaj makinesi .....	64
<b>Görsel 4.5.</b> Arazide açılan deneme kuyuları, a-b. Kumlu zemin, c-d. Gevşetilmiş killi zemin ve e-f. Doğal killi zemin .....	65

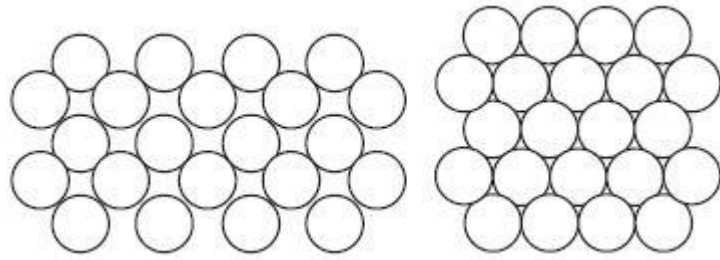
## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

D	: Kanatlar açık halde tokmak yarıçapı
E	: Birim alandaki toplam enerji
N	: Vuruş sayısı
W	: Tokmak ağırlığı
H	: Düşü yüksekliği
P	: Vuruş yapılacak aşama sayısı
D	: Vuruş noktaları arası mesafe
SPT	: Statik penetrasyon deneyi
SPT-N	: Zeminin penetrasyon direnci
CPT	: Koni penetrasyon deneyi
F	: Yay
x	: Uzama/sıkışma miktarı
k	: Yay sabiti
m	: Kütle
g	: Yerçekimi
h	: Yükseklik
PLA	: Poliaktik asit esaslı filament
PETG	: Polietilen tereftalat glikol esaslı filament
FHWA	: Federal Highway Administration (ABD Federal Karayolu İdaresi Yönetmeliği)
Z	: Gerekli iyileştirme derinliği
M	: Tokmak ağırlığı (ton)
n	: Zemine bağlı değişen bir katsayı
$W_b$	: Patlayıcı ağırlığı
C	: Patlayıcı etki yarıçapı denkleminde bir katsayı
R	: Patlayıcı etki yarıçapı
$\gamma$	: Birim hacim ağırlık
$G_s$	: Özgül ağırlık
e	: Boşluk oranı
w	: Su muhtevası

## 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.

Kompaksiyon, zemine mekanik enerji uygulanması sonucu zemindeki boşlukların azaltılıp danelerin birbirine yaklaşmasıdır. Bu sıkıştırmanın amacı zeminin mühendislik özelliklerini arttırmaktır. Bu yöntem, temel taşıma kapasitesi ve şev stabilitesinin artırılmasında, sıvılaşmanın ve geçirgenliğin azaltılmasına katkı sağlar. Bu sayede, zemindeki oturma potansiyeli azaltılmakta, zeminin dayanımı artırılmakta ve zemindeki hacmin azalması sebebiyle içeriğindeki su kaybına bağlı büzülme davranışı da azalmaktadır (Bowles, 1984). Şekil 1.1’de iri daneli bir zemin sıkıştırıldığında zemin danelerinin arasındaki boşlukların azaldığı ve birbirlerine yaklaşarak daha düşük hacimli bir yapı oluşturduğu görülmektedir.



**Şekil 1.1.** İri yuvarlak zemin danelerinin düzeni a. Gevşek halde b. Sıkı halde (Nicholson, 2015)

Birçok depremde olduğu gibi Türkiye’de gerçekleşen 6 Şubat depreminde de görülen sıvılaşma problemi, deprem etkisi altında suya doygun gevşek kumlu - siltli zeminlerde meydana gelmektedir. Zemin sıvılaşma sebebiyle taşıma gücünü

kaybettiğinde; şev stabilitesi göçmeleri, oturma, yan al yayılma gibi sorunlar meydana gelebilmektedir (Görsel 1.1.).



**Görsel 1.1.** 7,7 ve 7,6 Maraş depremleri sonucu sıvılaşma görülen binalar (<http-1>)

Zemin iyileştirme uygulamaları deprem kaynaklı sıvılaşma sorununu azaltabilmektedir. Bu sorun sıvılaşmayı tetikleyen dinamik etki, suya doymuş ortam ve zeminde yeterli sıkılık veya kohezyon bulunmaması neticesinde meydana geldiği için, bu ön şartlardan herhangi birinin varlığını değiştirmek sıvılaşma potansiyelini düşürecektir. Örneğin kompaksiyon ile sıkı bir zemin elde edilebilir ya da zemindeki aşırı su tahliye edilebilir. Dolayısıyla zemin iyileştirme yöntemleri etkili olacaktır. Bir zeminde kompaksiyon derecesini etkileyen faktörler; sıkıştırılan zeminin tipi, sıkıştırma metodu, uygulanan enerji ve zeminin su muhtevasıdır.

**Sıkıştırılan zeminin tipi:** Zemin tipine göre farklı iyileştirme yöntemleri seçilmektedir. Her zemin iyileştirme yöntemi farklı zemin tiplerinde optimum koşullar altında en efektif çözümü sunmaktadır. Örneğin; vibrokompaksiyon yöntemi çakıl ve kum ağırlıklı zeminlerde verimli biçimde kullanılabilirken, ön yükleme metodu ince daneli silt ve kil tipi zeminlerde tercih edilmektedir.

**Sıkıştırma metodu:** Kompaksiyon derecesini etkileyen faktörlerden biri olan sıkıştırma metodu için kullanılagelen birçok seçenek bulunmaktadır. Örneğin; 1930'lerden beri uygulanan patlatma yöntemi sonucunda ortaya çıkan enerjiyle gevşek kumlu zeminler iyileştirilebilmektedir. Zeminde belirlenen derinliklerde, şok etkisi ile dalgalar oluşturularak zemin danelerini birbirine yaklaştırılmaktadır (Görsel 1.2.). Baraj, havaalanı, yol ve liman inşaatlarında 35 m derinliklere kadar iyileştirmede kullanılmaktadır. Hızlı, işçiliği az, ekonomik ve etkili bir yöntemdir. Ancak büyük titreşimler ve deformasyonlar meydana getirdiği için yerleşim yerlerine yakın bölgelerde,

yeraltı yapıları bulunana alanlarda ve gaz boruları gibi hatların geçtiği yerlerde kullanılmamaktadır.



**Görsel 1.2.** Patlatma ile zemin iyileştirme (<http-2>)

Mekanik bir etkiye bağlı olarak yoğunluğun veya sıkılığın artırılması suretiyle zeminin iyileştirilmesi prensibine dayanan uygulamalar; silindirler yardımıyla mekanik stabilizasyon, özel proplarla iyileştirme ve dinamik kompaksiyon yöntemleridir. Zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılan makinelere örnek olarak şunlar verilebilir.

- Grid silindirler
- Demir bandajlı / düz silindirler
- Keçi ayaklı silindirler
- Pnömatik tekerli silindirler
- Titreşimli silindirler
- Kompaktörler

**Grid silindirler:** Zeminle iyi temas kurup daha az yoğurma eylemi gerçekleştiren bu silindirler çelik ızgaralar biçiminde tasarıma sahiptirler. İyi derecelenmiş çakıllı ve aşınmış kaya tipi kaba daneli zeminlerde kullanılmaktadır. 5-24 km/saat hızında sıkıştırma yapan bu araçlara sıkıştırmayı daha efektif hale getirmek için Görsel 1.3.'de görüldüğü gibi beton bloklar eklenebilir. Ağırlıkları 5 ton olmakla birlikte beton bloklarla 15 tona kadar çıkabilmektedir.



**Görsel 1.3.** *Grid silindirler (http-3)*

**Demir bandajlı / düz silindirler:** En yaygın kullanılan sıkıştırma makinesidir (Görsel 1.4.). Çakıllı, kumlu balast zeminlerde ayrıca dolgu yüzeyleri ve asfalt kaplamalarının kompaksiyonunda kullanılır. 400 kPa'a kadar basınç uygulayabilir. Genelde bir veya iki silindir sıkıştırıcıya sahip olurlar ve ağırlıklar 2-10 ton arasında değişir. Nilov vd. (2022) bu makinelerde üçüncü silindir monte edildiği zaman yol üzeri geçiş sayısını azaltarak ayrıca yükün üç farklı silindirde yayılmasıyla birlikte makinenin çalışma ağırlığını düşürüp, motora daha az yük binmesini sağladığından daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.



**Görsel 1.4.** *Düz silindirli kompaktör (http-4)*

**Keçiyaklı Silindirler:** Etkileşim basıncını arttırmaya yarayan keçi ayaklarına benzeyen çıkıntılara sahip bu silindirler (Görsel 1.5.), killi ve siltli kil zeminleri yoğurarak sıkıştırmak için kullanılırlar. Sıkıştırma sonunda pnömatik tekerli silindirler ile zemin yüzeyi ütülenir. Etketif sıkıştırma için gerekli hallerde silindirlerin içi su veya kum ile doldurulabilmektedir.



**Görsel 1.5.** Keçi ayaklı silindirler ([http-5](#))

**Pnömatik tekerli silindirler:** Ağır vagonlarla yüklenen bu silindirler, 4 veya 6 adet lastik tekerin yan yana getirilmesi suretiyle üretilirler. Soğuk dökülmüş bitüm alanlarını veya yumuşak zeminleri sıkıştırmak için kullanılırlar. Kötü derecelenmiş kumlarda ve ince daneleri zeminlerde de efektif olabilmektedir. Ağırlıkları, 6-10 ton aralığında olup ağır vagon yüklemesi ile 25 ton'a kadar çıkabilmektedir.



**Görsel 1.6.** Pnömatik tekerli silindirler ([http-6](#))

**Titreşimli silindirler:** Düz silindirlere benzemekle beraber titreşim oluşturan sisteme sahiptirler. Titreşim sayesinde zemin daneleri arasındaki boşlukların kapanmasını sağlayarak daha efektif ve derin sıkıştırma sağlayan bu silindirler; asfaltlarda, ayrıışmış kaya ve kum, çakıl gibi granüler zeminlerde kullanılır. Ağırlıkları 4-6 ton arasındadır.

**Kompaktörler:** Hafif oldukları için elle kontrol edilebilen kompaktörler (Görsel 1.7.), titreşim ile çalışırlar, kaplamalarda ve çeşitli zemin tiplerinde sıkıştırma sağlayabilir. Dar alanlardaki küçük çaplı kompaksiyon işlemlerinde kullanılır.



**Görsel 1.7.** Elektrikli mobil kompaktör

Karayolu, demiryolu veya havaalanı pisti gibi geniş alanlardaki yüzeysel dolguların optimum su muhtevasında yeterli sayıda pas geçilerek öngörülen rölatif kompaksiyon değerine erişilmesinde genellikle silindirler kullanılmaktadır. Bu araçların kullanımı kolay, güvenli, yapı için düz ve uygun bir zemin oluşturmada etkili olduğu görülmekte, fakat ağır ve kompleks ekipmanların pahalılığı ve ses kirliliği bu araçların kullanımını kısıtlayabilmektedir. Mevcut uygulamalardaki özel proplar titreşim etkisi meydana getirdiği için granüler malzeme ağırlıklı derin tabakalarda iyileştirme sağlamaktadır. Yüksek enerjili darbe etkisine dayanan ve yine granüler zeminlerle dolgularda etkili dinamik kompaksiyon yönteminde ise ağırlıkların zemine serbest düşürülmesi sonucunda zemindeki boşluk oranı azaltılır. Her ne kadar bu yöntemlerin efektif uygulama alanları olsa da olumsuz veya yetersiz tarafları da bulunmaktadır. Silindirlerle yapılan mekanik stabilizasyon yüksek hacimde kazı-dolgu gerektirmekte ve sadece yüzeysel iyileştirmeye izin vermektedir (Scott vd. 2021). Halihazırda sektörde kullanılan vibrasyonlu özel proplar tecrübe gerektirmesinin yanı sıra devasa güç ünitelerine ihtiyaç duymaktadır. Dinamik kompaksiyon ise gürültü ve sarsıntı oluşturması sebebiyle şehir içinde kullanılamamakta ve ani boşluk suyu basıncı artışı gibi ikincil etkileri bulunmaktadır. Dolayısıyla tüm zemin iyileştirme uygulamalarında olduğu gibi mekanik etki sonucunda iyileştirme yapılan yöntemler de kullanılan ekipman ve sınır koşulları dahilinde belirli zeminlerde sadece etkili derinliklere kadar uygulanabilmektedir.

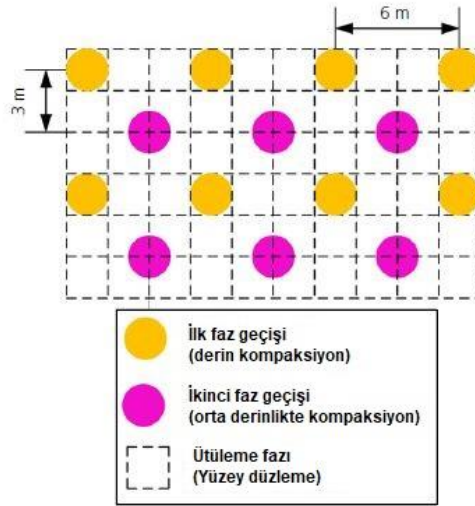
**Dinamik Kompaksiyon:** Tez kapsamında önerilen tokmaktama ile zemin iyileştirme çalışmasına en yakın yöntem Menard ve Broise (1975) tarafından geliştirilen, ucuz, ekonomik ve efektif bir yöntem olan dinamik kompaksiyondur. Bilinen en eski

zemin iyileştirme yöntemi olan dinamik kompaksiyon Romalılar tarafından milattan önce 100 yılında kullanıldığı belirtilirken, güncel kullanımı ise Amerika Birleşik Devletleri'nde 1800'lü yıllara kadar uzanmaktadır (Nicholson, 2015). Dinamik kompaksiyonda genellikle 15 ile 40 ton arasında değişen geniş tabana sahip çelik ağırlıklar, 10 m ile 30 m arasındaki yüksekliklerden düşürülür. Bu yöntem, gevşek kum ve siltli zeminlerde 4,5 m'den 9 m'ye kadar etkilidir. Ağırlığın zemine serbest düşmesiyle zemindeki boşluk oranı azaltılır. Yapı temelleri, yol dolguları, liman ve havaalanı platformlarında uygulanmaktadır (Mei vd. 2021; Moon vd. 2019; Tarawneh vd. 2017; Feng vd. 2013). Düşey doğrultuda iyileştirme sağlanmaktadır.

Dinamik kompaksiyon uygulamasında dışı kalın saca kaplı betonarme dikdörtgen blok şeklindeki ağırlıklar da belirlenen yükseklikten bırakılabilmektedir (Görsel 1.8.). Uygulamada Şekil 1.2.'de görüldüğü gibi birkaç metre aralık bırakılmaktadır. İlk fazda sarı noktalara uygulama yapılırken ikinci fazda bu noktaların arasında kabarma meydana gelen mor noktalara düşürülerek işlem tamamlanır. Bu geçişler arasında ise boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesine izin verilecek kadar beklenmektedir. Her geçiş sonrası oluşan çukurlar, silindirler ile düzeltilmekte ya da içleri granüler malzeme ile doldurulup düzleme geçişi yapılmaktadır. Gerekli kompaksiyon enerjisini tespit etmek için Denklem 1.1'de verilen Menard formülü kullanılmaktadır. Çalışmalarda dinamik kompaksiyonun iyileştirme etkisini test etmek için deformasyon ölçerler, piezometreler, basınç ölçerler, SPT ve CPT penetrasyon deneyleri kullanılır. Zeminlerin belli noktalarına yerleştirilen bu cihazlar ile veriler alınarak kompaksiyon öncesi ve sonrası karşılaştırmalar yapılabilir.



**Görsel 1.8.** Dinamik kompaksiyon uygulamaları (<http-7>)



Şekil 1.2. Dinamik kompaksiyon uygulama planı

$$Z = n\sqrt{MN} \quad (1.1)$$

Burada; “Z”, gerekli iyileştirme derinliği; “M”, tokmak ağırlığı (ton); “H”, düşü yüksekliği; “n” ise zemine bağlı değişen sabit bir katsayıdır kumlu zeminler için 0.3 ve 0.6 arasında değişmektedir.

Moon vd. (2019) bir demiryolu inşaatı için kumlu bir zeminde dinamik kompaksiyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Çapı 4 metre olan 20 tonluk bir ağırlık 15 m yükseklikten zemine bırakılmıştır. Tokmaktama sonucu oluşan kraterler, bir sonraki kompaksiyon sırasında eksantrik yük oluşmaması için iyi derecelenmiş kumlu zemin ile doldurulmuştur (Görsel 1.9.). Uygulama noktaları aralarına basınç ölçerler yerleştirilerek iyileştirme seviyesi ölçülmüştür. Sonuçlara bakıldığında dinamik kompaksiyonun 6-7 m’ye kadar etkili olduğu ancak maksimum artış değerlerinin 4 m derinlikte gerçekleştiği tespit edilirken, bir noktadaki optimum vuruş sayısının 10-15 değerlerinde olduğu görülmüştür. Tokmak etki alanının tokmak çapının 2 katı kadar olduğu belirtilmiştir.



**Görsel 1.9.** Dinamik kompaksiyon uygulaması a. Tokmağı taşıyan vinç b. Tokmaktama sonrası oluşan krater c. Kraterin iyi derecelenmiş kumlu zeminle doldurulması (Moon vd. 2019)

**Sıkıştırma enerjisi:** Sıkıştırma enerjisi hesabı uygulanan yöntemde göre değişmektedir. Örneğin, dinamik kompaksiyonun enerji hesaplamasında Denklem 1.2’de görüldüğü üzere vuruş sayısı, tokmak ağırlığı, düşü yüksekliği etkili olmaktadır.

$$E = \frac{N \times W \times H \times P}{D^2} \quad (1.2)$$

Burada; “E” birim alandaki toplam enerji ( $\text{kJ/m}^2$ ), “N” vuruş sayısı, “W” tokmak ağırlığı (ton), “H” düşü yüksekliği (m), “P” vuruş yapılacak aşama sayısı, “D” vuruş noktaları arasındaki mesafeyi belirtmektedir.

Dinamik kompaksiyon ile benzer etkiye sahip patlatma ile zemin iyileştirmede ise enerjiyi etkileyen faktörler; patlayıcıların ağırlığı, yerleştirilme düzeni, sayısı ve uygulama sekansıdır. Etki çapının tespit edilebileceği formül Denklem 1.3’te verilmiştir (Nicholson, 2015).

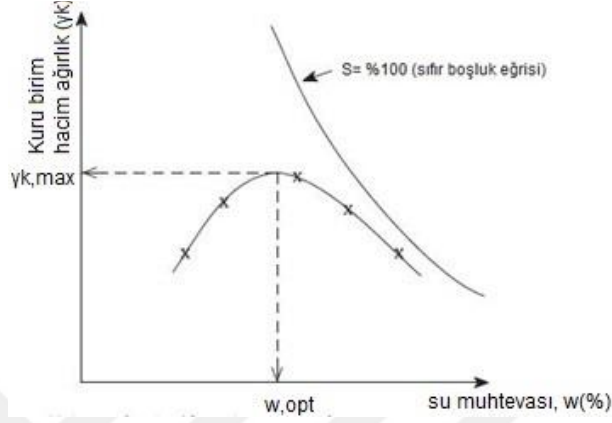
$$W = 164CR^3 \quad (1.3)$$

Burada; “W”, patlayıcı ağırlığı; “C”, ilgili katsayı (yaklaşık 0,0025) ve “R”, etki yarıçapıdır (m).

**Sıkıştırılan zeminin su muhtevası:** Kompaksiyon teorisinde, Şekil 1.3.’teki grafikte görüldüğü gibi su muhtevasının artmasıyla belli bir noktaya kadar sıklığın arttığı ancak bir değerden sonra su eklenmesiyle sıklığın düşeceği görülür. Kuru bir zemine su eklendiğinde kıvamı artar ve yağlanma etkisi görülür, böylece daha kolay sıkıştırılabilir. Bu durum optimum su muhtevası ( $\omega_{opt}$ ) değerine kadar artar ve sonrasında su eklenmeye devam edildiğinde, artık zemin daneleri arasında fazla miktarda su bulunduğunda daneler birbirinden ayrılacak ve sıklık azalacaktır. Denklem 1.4 ile zeminin kuru birim hacim ağırlığı hesaplanabilir.

$$\gamma_k = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{\gamma}{1+\left(\frac{\% \omega}{100}\right)} \quad (1.4)$$

Burada " $\gamma_k$ ", kuru birim hacim ağırlık; " $G_s$ ", özgül ağırlık; " $\gamma_w$ ", suyun birim hacim ağırlığı; "e", boşluk oranı; " $\gamma$ ", birim hacim ağırlık ve " $\omega$ ", su muhtevasıdır.



**Şekil 1.3.** Su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık grafiği

Verilen kompaksiyon çalışmalarına alternatif oluşturacak tez kapsamındaki tokmaklama probu ile yapılan çalışmalarda özgün bir mekanik zemin iyileştirme yöntemi geliştirilerek, yanal doğrultuda dinamik kompaksiyon sağlanmıştır. Bu yöntemde; dinamik kompaksiyondaki gibi devasa ağırlıklar yerine, zeminde açılan kuyuya itilen özel tasarımlı probun çalışma prensibi sayesinde dönme hareketini doğrusal harekete çeviren krank yardımıyla zemin duvarlarına vurması neticesinde kompaksiyon sağlanmaktadır. Tez kapsamında; tokmaklama prop prototipinin 3 boyutlu yazıcıyla çıktısının alınması, atölyede metalden mamul imal edilmesi ve 1,5 m boyutlarındaki küp formundaki deney kutusu içerisinde 3 farklı rölatif sıklığa sahip gevşek kumlu zeminde 3D, 4D ve 5D aralıklarla (D: kanatlar açık halde tokmak çapı) dördü karelaçla açılan kuyuların iyileştirmeye etkisi plaka yükleme ve kum konisi deneyleri ile incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

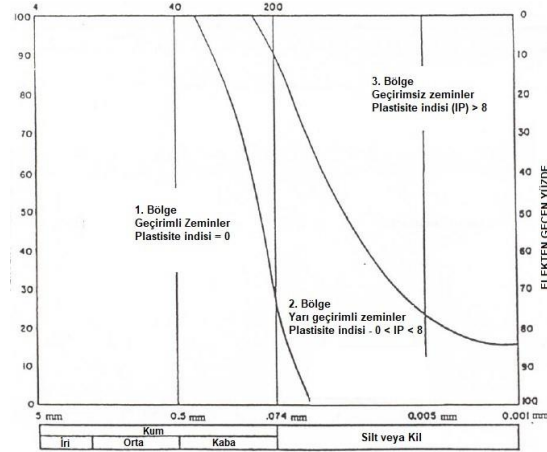
Literatürde direkt olarak yanal doğrultuda iyileştirme sağlayan bir mekanik zemin iyileştirme yöntemiyle karşılaşılmasına rağmen, düşey doğrultudaki dinamik etki veya titreşime bağlı sıkıştırma prensibi ön plana çıkmaktadır. Bu tekniklerde her ne kadar yanal doğrultudaki iyileştirme ikinci planda kalsa da tez kapsamındaki tokmaklama yöntemine en yakın uygulama ve teorik yaklaşım dinamik kompaksiyon yönteminde ele alınmaktadır. Dolayısıyla literatürde dinamik kompaksiyon uygulamalarına yönelik zemin tipi, zemindeki su muhtevası, düşü ağırlığı detayları ve uygulama enerjisi gibi parametrelere odaklanılarak deneysel çalışmada kullanılacak malzeme ve yöntem belirlenmiştir.

Nagaraj ve Miura (2001) tarafından yumuşak killerde dinamik kompaksiyon uygulanması durumunda bazı sorunların meydana gelebileceği belirtilmiştir. Bunlar; doymuş zeminde bulunan mikro hava kabarcıkları sebebiyle kompaksiyon sorunu, tekrarlı vuruşlar sonrası lokal sıvılaşma durumu, zemindeki çatlama sonrası yüksek permeabiliteden dolayı boşluk suyu basıncının hızla sönümlenmesi ve dinamik kompaksiyon ile oluşan S dalgalarının (enine titreşim dalgaları) kesme basıncına sebep olarak zeminde çatlaklar meydana getirmesidir. Ghorbani vd. (2020) suya kısmen doymun killi zeminde dinamik etki sonucu artan kompaksiyon enerjisi ile zeminde su emme potansiyelinin azaldığı ve permeabilitenin arttığını görmüşlerdir. Killi zeminde dinamik etki ile meydana gelen diğer bir durum ise tiksotropik iyileşme yani örselenen zeminin, zamanla konsolide olmasıyla dayanımının artmasıdır. Dolayısıyla, tiksotropik iyileşmenin zamanla oluşmasından dolayı dinamik kompaksiyon ince daneli zeminlerde hızlı iyileştirmeye olanak sağlamazken, tam doymun ince daneli zeminlerde eğer tabaka içerisinde kum bantları varsa aşırı boşluk suyu dağılımı açısından efektif olabilmektedir.

### 2.1. Arazi Çalışmaları

Xu ve Hu (2017)'nin çalışmalarında suya doymun siltli zeminlerde uygulanan dinamik kompaksiyon sonrasında dayanım hızla artarken, siltli kil zemin dayanımının uygulamadan 2-3 gün sonra ilk dayanımdan daha az olduğu ve ancak 14-16 gün sonra dayanımın arttığı vurgulanmıştır. Liu vd. (2008) gerçekleştirdikleri çalışmada yoğunluğu  $1,53 \text{ gr/cm}^3$  ve optimum su muhtevası %26,10 olan killi zeminde dinamik kompaksiyon sonrası 5 m'ye kadar SPT-N değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Dinamik

kompaksiyon sonrasında zemindeki su içeriğinin azaldığı ve böylece zeminin plastik durumdan katı plastik veya katı duruma geçiş yaptığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, ABD Federal Karayolu İdaresi Yönetmeliği (FHWA, 2017) uyarınca su seviyesinin üzerindeki yarı geçirimli ince daneli zeminler biçiminde tanımlanan kil dolgularda iyileştirmeyi sağlamak amacıyla gerekli enerji 250-350 kJ/m<sup>3</sup> iken, kaba daneli geçirimli zeminlerde 200-250 kJ/m<sup>3</sup>'e kadar gerilemektedir. Killi zeminlerde permeabilitenin düşük olmasından dolayı doygun durumda dinamik kompaksiyon uygulaması önerilmemektedir. Şekil 2.1.'de verilen 3. bölgedeki kısmen doygun killi dolgu zeminlerde su içeriği plastik limit değerinin altında ise bir miktar iyileştirme sağlanabilirken, 2. bölgede yer alan yarı geçirimli ince daneli kumlu kil veya siltli zeminlerde plastisite indisi 0 ile 8 arasında olan durumda boşluk suyu basıncının dağılması için dinamik kompaksiyonun belirli aralıklarla uygulanması gerekmektedir. İnce kumlu 1. bölge ise dinamik kompaksiyonun en verimli olduğu bölge olarak tanımlanmakta ve suya doygun olup olmamasına bakılmaksızın iyileştirme sağlanabilmektedir. Bu durum tokmaktama probuyla gerçekleştirilen ön çalışmalarda da kanıtlanmış ve deneysel yöntem en verimli uygulamanın yapılabileceği gevşek ve orta sıkı kuma göre planlanmıştır.



Şekil 2.1. Dinamik kompaksiyon için zeminlerin gruplandırılması (FHWA, 2017)

Dinamik kompaksiyonun iyileştirme etkisini etkileyen parametrelerin; tokmağın ağırlığı ve düşü yüksekliğine bağlı olarak uygulanan enerji seviyesi, dane boyutu, hava koşulu, kompaksiyon noktaları arasındaki mesafe ve yeraltı suyu bulunan bölgelerde aşırı boşluk suyu basıncının azalması için uygulama aşamaları arasında beklenmesi gereken süre olduğu belirtilmiştir (Feng vd., 2015; Tarawneh vd., 2017). Diğer taraftan, yer altı

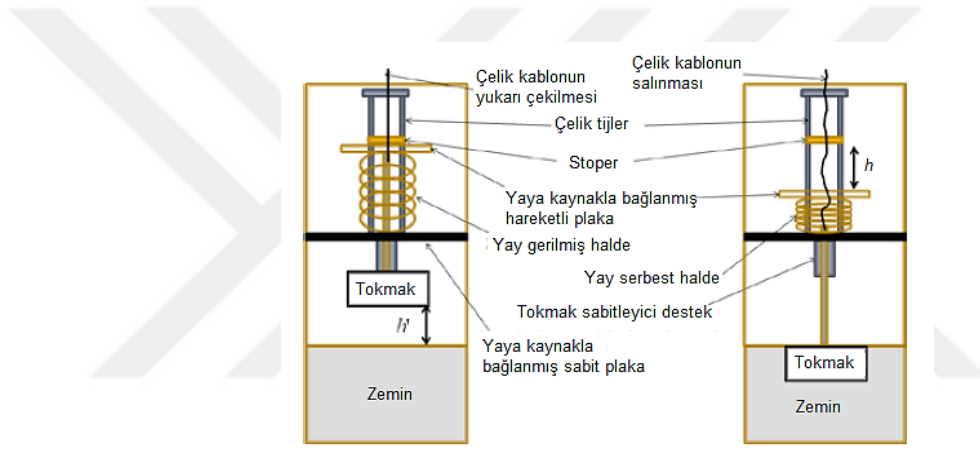
suyunun zemin yüzeyine yakın olduğu bölgelerde kompaksiyon sonucu zeminde aşırı boşluk suyu basıncı artmakta ve sıvılaşmaya bağlı kompaksiyon meydana gelmektedir. Bu durum, dinamik kompaksiyon işlemi zorlaştırmaktadır. Çünkü suyun varlığı kompaksiyon enerjisini dağıtmakta ve daha derin katmanlardaki sıkıştırma enerjisini düşürmektedir (Jia vd., 2021).

Feng vd. (2015a)'nin çökme potansiyeli olan siltli kilin hakim olduğu lös tipi zeminde gerçekleştirdiği dinamik kompaksiyon uygulaması öncesi ve sonrası SPT-N vuruş sayılarına bakıldığında, 3000 kNm'lik enerji uygulanan bölgede efektif iyileştirme derinliği 5 m olurken, 8000 ve 12000 kNm enerjilerin uygulandığı bölgelerde efektif iyileştirme derinliklerinin sırasıyla 8 ve 11 m olduğu tespit edilmiştir. Feng vd. (2015b)'nin gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada 14,5 m derinliğe kadar çakıl ve molozdan oluşan, daha alt tabakalarda ise siltli kil ve siltli kuma rastlanılan bir bölgede, 45 ton ağırlığındaki tokmağın 40,00 m'den bırakılmasıyla 18000 kNm gibi yüksek enerjiye ulaşan dinamik kompaksiyon uygulanmıştır. Uygulamada 5,00 m'ye varan krater çukurları oluşmuş ve bunların içerisine çukur derinliğinin 1/4 ila 1/3'üne 30,00-50,00 cm çaplarında kırma taşlardan meydana gelen dolgu malzemesi eklenerek sıkıştırılmıştır. Bu doldurma işlemi ile dolgu gevşek zeminlerin yerine geçerek daha efektif bir kompaksiyon sağlandığı belirtilmiş ve dinamik yer değiştirme olarak adlandırılmıştır. Yüksek enerjili uygulama ile 24 m derinlikteki tabakalarda dahi iyileştirme sağlanmıştır. Shen vd. (2018) çalışmalarında, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan gevşek kumlu bir zeminde uygulanan dinamik kompaksiyon ile 3 ve 5 m derinlikteki tabakalarda sıvılaşma potansiyelinin %95'ten 0'a düşürüldüğünü tespit etmiştir. Rizzon vd. (2021) yüksek poroziteye sahip killi zeminlerde dinamik kompaksiyon uygulamıştır. Uygulama ile zemindeki boşlukların azalmasıyla CPT parametreleri bir miktar artmış, ancak üç eksenli rijitliğin 49,2 MPa'dan 20,1 MPa'a düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla, dinamik kompaksiyon uygulanan killi zeminin doğal yapısı bozulduğu için üzerine dolgu yükü yerleştirildiğinde daha fazla deformasyon gözleneceğinden bu tip ince taneli zeminlerde dinamik kompaksiyon ile iyileştirme yönteminin tercih edilmemesi gerektiği belirtilmiştir.

## **2.2. Deneysel Çalışmalar**

Kundu ve Viswanadham (2015) çalışmalarında, dinamik kompaksiyon yöntemini laboratuvarında bir düzenekle modellemiştir. İyileştirmede kullanılan 50, 75 ve 100 mm çaplarında ve yarım daire şeklindeki tokmakların kötü derecelenmiş kumlu zeminde

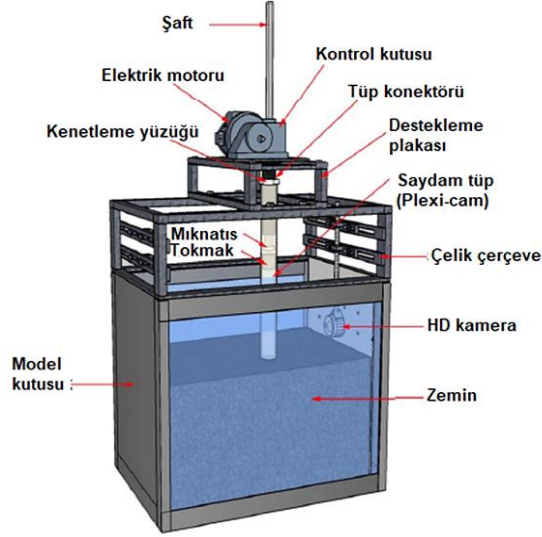
iyileştirme derinliğine etkisi incelenmiştir. Düşük enerjili dinamik kompaksiyonu temel alan deney düzeneğinde Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi çelik kablo, yay, tokmak, yay içerisindeki çubuk ve yardımcı elemanlar bulunmaktadır. Sistem üzerindeki çelik kablodan “h” kadar yukarı çekildiğinde iç kısımdaki çubuk üst taraftaki hareketli plakaya temas etmekte ve tokmak yukarı çekilmektedir. Böylece yay “h” kadar uzamaktadır. Tel serbest bırakıldığında ise hem yayın oluşturduğu kuvvet ( $F=k*h$ ), hem de yerçekimi kuvvetinin ( $m*g*h$ ) bileşkesi ile kompaksiyon gerçekleşmektedir. Deney sonuçlarına göre tokmak çapı arttıkça krater genişliği ve derinliği artmakta ancak iyileştirme derinliği değişmemektedir. Ayrıca kompaksiyon sonucu etki genişliğinin tokmak çapının 2,5 katı olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 2.2.** Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen dinamik kompaksiyon mekanizması (Kundu ve Viswanadham, 2015)

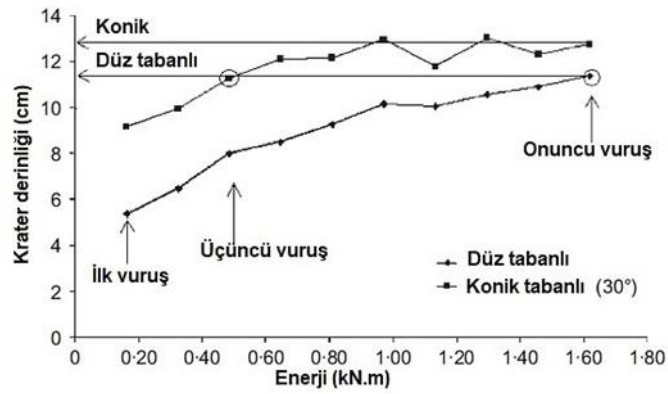
Başka bir çalışmada Hu vd. (2020) vakumlu ön yükleme, elektro-osmosis ve dinamik kompaksiyon yöntemlerini birlikte kullanarak deneysel model üzerinde deniz dibinden taranmış bulamaç zeminde santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir. Model düzenekte 56 x 30 x 30 cm boyutlarında plastik-cam malzemeden dikdörtgen prizma kutu (Şekil 2.3.), vakum pompası, su-hava ayırıcı şişe, sızdırmaz membran, genişliği 1 cm olan plastik düşey drenler, doğru akım güç kaynağı, katot ve anot kullanılmıştır. Dinamik kompaksiyon sisteminde ağırlığı 10 kg, düşü yüksekliği 0,4 m olan yüzük şeklindeki mıknatıslı tokmak kullanılmıştır. Deney aşamalarında dip taraması bulamaç homojen olarak karıştırılmış, numune derinliği 28 cm olacak şekilde kovaya yerleştirilmiş ve kendi ağırlığında konsolide olması için 24 saat beklenmiştir. Deneyde bulamacın iyileştirme seviyesini kontrol için oturma, su deşarjı ve akım yoğunluğu her 2 saatte bir incelenmiştir. Deneyden elde edilen verilere göre dinamik kompaksiyon ile bulamaç arası boşluklar

kapandığı için drenaj yolları kısalmış ve drenlere daha çok su iletimi sağlanmıştır. Dolayısıyla konsolidasyon oturması hızlanmıştır.



Şekil 2.3. Laboratuvar ölçeğinde geliştirilen dinamik kompaksiyon modeli

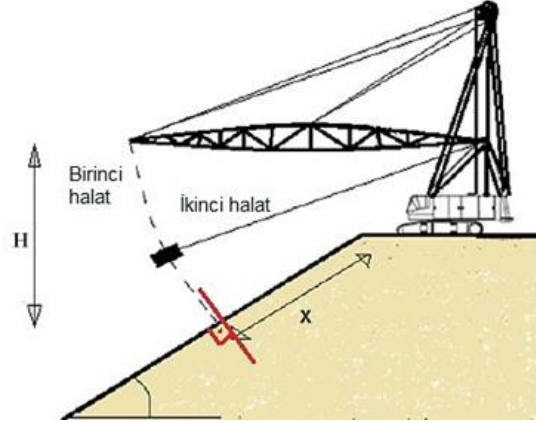
Arslan vd. (2007) gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, konik tabanlı tokmak kullanarak kumlu zemindeki iyileşme seviyesini incelemişlerdir.  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  ve  $40^\circ$  derecelik koni açılarına sahip tokmaklar sırasıyla gevşek, orta sıkı ve sıkı kumlar üzerinde kullanılmıştır. Gevşek kumda düz tabanlı tokmak ile 10 vuruşta maksimum 11,36 cm krater derinliğine ulaşılırken, konik tabanlı tokmak ile sadece 3. vuruşta bu krater derinliği elde edilmiştir (Şekil 2.4.). Dolayısıyla hedef iyileştirmeye ulaşmak için konik tokmak ile tüketilen enerji 2,5 kat daha az olmaktadır. Gevşek kumda iyileştirilen dairesel bölgenin alanına bakıldığında ise konik tokmağın ancak %4'lük bir artış sağladığı görülmüştür. Orta sıkı kumda konik tabanlı tokmak düz tabanlı tokmağa göre krater derinliğini %38, maksimum krater alanını ise %30 oranında arttırmıştır. Sıkı kumda ise krater derinliği %32 artarken krater alanı %5 azalmıştır. Birim hacim ağırlığı düşük olan zeminler yüksek sıkışma potansiyeline sahip olduğundan bu yöntemin gevşek ve orta sıkı zeminler için daha verimli olduğu vurgulanmıştır. Geneli itibariyle konik şekle sahip tokmak daha derin ve geniş alanlı krater oluşturmaktadır.



Şekil 2.4. Gevşek kumda, düz ve konik tabanlı tokmaklar ile uygulanan enerjiye karşılık oluşan krater derinliği (Arslan vd., 2007)

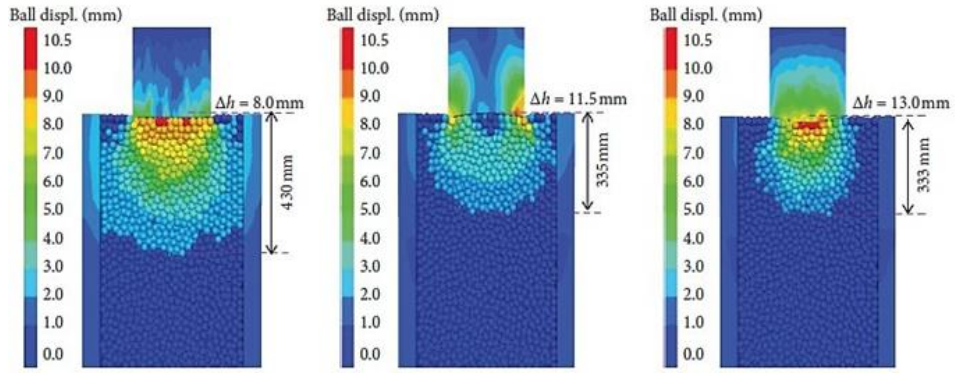
### 2.3. Teorik Çalışmalar

Abdizadeh vd. (2021), dinamik kompaksiyonun kuru kum zemine sahip şevlerde yanal olarak uygulanabileceğini sayısal modellemelerle araştırmıştır. Bu sistemde şev üzerinde iki farklı halat kullanan özel bir vinç yerleştirilmektedir (Şekil 2.5). Birinci halat tokmağı kaldırmakta, ikinci halat ise dairesel bir yörüngede hareket ederek tokmağın eğimli zemin yüzeyine dik olacak şekilde çarpmasını sağlamaktadır. Dinamik kompaksiyon süreci ABAQUS yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelde sırasıyla 15 x 15 x 40 m genişlik, yükseklik ve uzunluk değerlerinin yanı sıra 30°, 45° ve 60°'lik şev açıları kullanılmıştır. Tokmak 25 ton olup, dairesel kesite sahiptir. Şevin üst kenarından itibaren 1,5 m'den 15 m'ye kadar 1,5 m aralıklarla 10 noktada oluşan krater derinliği ve zeminin iyileşme derinliği incelenmiştir. Yapılan modellemelerde şev eğiminin fazla olduğu durumlardaki iyileştirmede, tokmak düşü yüksekliğini arttırmanın, tokmak ağırlığını arttırmaktan daha etkili olduğu görülmüştür. Şevin eğimi az ve uygulama noktası şevin üst kenarına yakın olduğu durumlarda ise zeminde oluşan krater derinliğinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Düz zeminde uygulanan dinamik kompaksiyonda iyileştirme derinliği fazla, ancak iyileştirme yarıçapı az iken yanal dinamik kompaksiyonda aksine iyileştirme derinliği az, yarıçapı ise daha büyüktür. Yine Abdizadeh vd. (2020) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, aynı yöntemin laboratuvar modellemesinde şerit temellerin taşıma kapasitesini oldukça arttırdığı, şev kenarı ile iyileştirme noktası arasındaki mesafe 2,5B kadar olduğunda zeminin en yüksek taşıma kapasitesine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Doğrudan yanal kompaksiyon sağlayan bu yöntemin projede önerilen eksantrik tokmaktama yöntemine uygulama açısından en çok benzerlik gösteren yöntem olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 2.5.** Dairesel yörüngede hareket ile şevde yanal kompaksiyon modellenmesi (Abdizadeh vd., 2020 ve 2021)

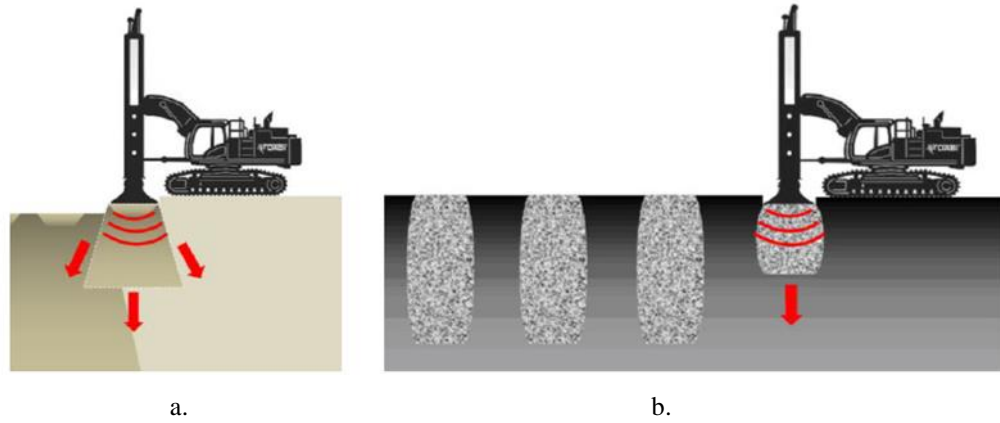
Wang vd. (2019) çalışmalarında dinamik kompaksiyonda kullanılan tokmak ile kaba daneli zeminlerin ilişkisini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiş ve zemin taneciklerinin yer değiştirme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, Şekil 2.6.'da görülen düz tabanlı, konkav (iç bükey) ve konveks (dış bükey) tabana sahip silindir şekilli üç tip tokmak değerlendirilmiştir. Düz tabanlı tokmak zeminde düzgün dağılımlı ve derin gerilme bölgesi oluşturmuştur. Konkav ve konveks tokmaklar düz tokmağa göre zemine daha fazla penetre olmasına rağmen etkilenen derinliğin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca düz tokmak kullanılarak 5, 10 ve 15 mm'lik değişen dane çaplarına sahip zeminlerde yapılan testlerde, parçacık boyutunun artmasına bağlı olarak tokmak ile zemin arasında artan temas kuvveti dolayısıyla etkilenen derinliğin daha fazla olduğu, ancak oluşan krater derinliğinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dış bükey tabanlı tokmak kullanılması durumunda 13 mm ile zemine en fazla penetrasyonun sağlandığı vurgulanmıştır. Bu sonuçtan yola çıkılarak tokmaklama probuna sabitlenen kanatlar dış bükey tasarlanmış ve prop üzerindeki 4 kanat doğrultusunda zeminin Şekil 2.6'te görülen yer değiştirmelere maruz kalacağı öngörülmektedir. Bu sayede probun zeminde ilerlemesi kolaylaşmaktadır.



Şekil 2.6. Sırasıyla; düz, konkav ve konveks tabanlı tokmakların vuruşu sonucunda zemin danelerinde görülen yer değiştirme davranışları (Wang vd., 2019)

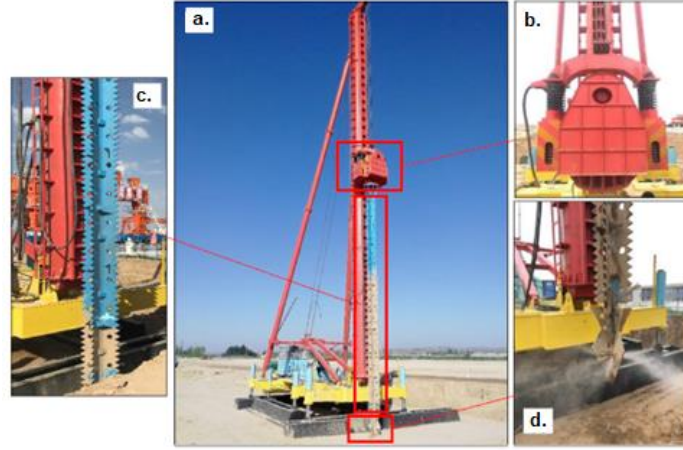
#### 2.4. Özel Zemin Kompaksiyon Yöntemleri

**Hızlı darbe kompaksiyonu:** Farklı bir mekanik sıkıştırma yöntemi olan hızlı darbe kompaksiyonu, granüler ve kohezyonsuz zeminleri 5 m'ye kadar sıkıştırmada etkilidir. 5-12 tonluk ve 1-1,5 m çaplarındaki hidrolik tokmağın belirli bir yükseklikten yine aynı çaptaki örs üzerine hızlı tekrarlı darbeler ile zemine vuruş yapması sağlanmaktadır. Dobrzycki ve Rychlewski (2018) bu yöntemin, seri tokmaktama ile zeminde oluşan öngörülen çaptaki çukur içerisine beton molozlar doldurulup tekrar sıkıştırılmasıyla 3 m'ye kadar taş kolonların oluşturulmasında da kullanılabileceğini, eğer zemin tabakası kalın ise kullanılan tokmak ağırlığı ve düşü yüksekliği artırılarak 5-6 m'lik taş kolonlar oluşturulabileceğini belirtmiştir (Şekil 2.7.). Hızlı darbe kompaksiyonu ile 5 m'lik siltli kum tabakada CPT uç dayanımlarının en az %30 arttırıldığı, rölatif yoğunluk değerlerinin %45'ten %70'e kadar ulaştığı ve oturma değerlerinin ise %50 mertebesinde azaldığı tespit edilmiştir (Mohammed vd., 2013). Allouzi vd. (2018) tarafından 25 mm'lik izin verilebilir oturma limitinde, zamandan ve ek vuruş için yapılacak masraflardan tasarruf etmek amacıyla optimum vuruş sayısı belirlenmiştir. 30 vuruştan sonraki 10 vuruşta zeminin taşıma gücünün ancak 5 kPa arttığı görülmüştür. Dobrzycki vd. (2019) tarafından, hızlı darbe kompaksiyonu ve titreşim silindiri ile zemin iyileştirme uygulamalarında oluşan titreşimin çevre yapılara etkisini ölçmek amacıyla ölçümler yapılmıştır. Titreşim değerlerinin 200 mm/s gibi çevredeki yapılar için kabul edilemeyecek pik titreşim hızına ulaştığı belirtilmiştir. Yapısal sistemde zarar meydana gelmemesi için titreşim hızınının 20-40 mm/s'nin üzerine çıkmaması gerekmektedir (Mayers, 2009).



**Şekil 2.7.** Hızlı darbe kompaksiyonu; a. granüler zeminlerde kompaksiyon, b. kohezyonlu zeminlerde taş kolon oluşturulması (Dobrzycki ve Rychlewski, 2018)

**Rezonans kompaksiyon yöntemi:** Massarch (1991) tarafından geliştirilen rezonans kompaksiyon yönteminde, Görsel 2.1.a'da görüldüğü gibi üst kısmında titreşim kontrollü motoru bulunan özel üretim prop kullanılarak zemin sıkıştırılmaktadır. Prop üzerinde 10 cm çapında dairesel boşluklar vardır (Görsel 2.1.c). Bu deliklerin amacı iç direnci azaltarak prop ve zemin arasında daha iyi temas kurmaktır. Ekipman zemine penetre olurken yüksek frekanslı titreşim kullanılır. Belli derinliğe indirilen probun titreşimi azaltılarak zeminin doğal frekansına eşitlenerek rezonans elde edilir. Böylece prop titreşim enerjisini efektif bir şekilde çevre zemine ileterek sıkıştırma sağlayacaktır. Granüler zeminlerde daha efektif bir yöntemdir. Gao vd. (2020)'nin, çökme potansiyeli olan kumlu lös zeminde uyguladıkları rezonans kompaksiyon yönteminde SPT-N vuruş değerlerinin 0 – 4,5 m arasındaki derinlikte 2 kat arttığı görülmüştür. 1,2 m aralıklarla uygulandığında, 1,4 m aralıklarla uygulanan iyileştirmeye göre CPT koni uç dayanımlarının %50 fazla olduğu tespit edilmiştir. Cheng vd. (2017), gevşek silt ve siltli kum zeminde uygulanan rezonans kompaksiyon uygulamasında 60 gün sonra bölgede yapılan SPT testlerinde N vuruş sayısının, 2,7 kat arttığı uygulama noktasından 1 m uzaklıkta ise 1,25 kat arttığını tespit etmiştir. Dolayısıyla probun etkilediği yarıçap yaklaşık 1 m'dir. En büyük oturma prop yarıçapının iki katı kadarlık bölgede meydana gelmiştir.

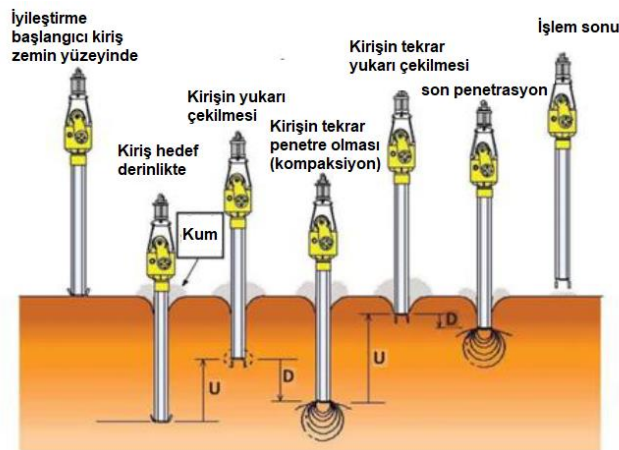


**Görsel 2.1.** a. Titreşimli prob kompaksiyon ekipmanları; b. titreşim cihazı; c. titreşim probu; d. yüksek basınçlı hava jeti ekipmanı (Massarch, 1991)

**Vibroflotasyon ve vibrokompaksiyon yöntemleri:** Sugianto vd. (2020) tarafından 20-30 m derinliklere kadar gevşek siltli kumlu zemine sahip ve yüksek riskli deprem bölgesi olan bir arazide sıvılaşma potansiyeline önlemek amacıyla 25 m derinliğe kadar vibroflotasyon ve taş kolon uygulaması gerçekleştirilmiştir. 4 m aralıklarla taş kolon uygulanırken, taş kolonların merkezine vibroflotasyon uygulanmıştır. Burada taş kolon uygulaması ince daneli malzemeleri sıkıştırmada başarıyken vibroflotasyon ile granüler malzemeler sıkıştırılmıştır. İyileştirme sonucunda CPT koni uç dayanımı ve çevre sürtünmesi parametrelerinin 3 kat arttığı, rölatif sıklığın iyileştirmeden önce %50 iken sonrasında %70'e kadar çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca taş kolonun radyal drenajı ile boşluk suyu çıkışı hızlandırılmıştır böylece; oturma probleminde dirençli, daha sıkı, kayma dayanımı yüksek ve stabil bir zemin elde edilmiştir. Nagula vd. (2021), başlangıçta %46 rölatif sıklığa sahip suya doymun kum zeminler üzerinde vibroflotasyon uygulamasında aşırı boşluk suyu basıncının boşluk oranındaki azalmayı engellediğini ancak zamanla aşırı boşluk suyu basıncının dağılmasıyla zeminin daha sıkı hale geldiğini tespit etmiştir. Bo vd. (2014), aynı durumu vibroflotasyonda zaman etkisi olarak tanımlamıştır. Vibroflotasyon öncesi ve sonrası yapılan sismik analizde normal ve üniform kum zeminlerde sıvılaşma riski ortadan kaldırılırken, ince daneler içeren zeminlerde ise sıvılaşma potansiyelinin tamamen ortadan kaldırılmadığı tespit edilmiştir. Lopez-Querol vd. (2014) vibroflotasyon ile 5 m kalınlığındaki ve 10000 m<sup>2</sup>'lik bir alanda kristal silika kum zeminler üzerinde optimum iyileştirme aralığını ve süresini sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. Ortalama %75 zemin sıklığına ulaşma amacıyla vibroflotasyon uygulanırsa optimum uygulama aralıklarının 1,3 ve 1,5 m ve

optimum iyileştirme süresinin (her noktada 10 saniye titreşim uygulanırsa) yaklaşık 17,5 saat olduğu tespit edilmiştir.

Papadopulos ve Eliahu (2018)'nin uyguladıkları derin güçlü vibrokompaksiyon olarak adlandırılan yöntemde, dört adet kompaksiyon kirişinin uç kısmında açılıp kapanan çelik kanatlar bulunmaktadır (Şekil 2.8.). Hedef derinliğe indirilen kirişlerin ucundaki kanatlar yana doğru açılarak daha büyük bir alanın sıkışmasını sağlamaktadır. Bu yöntem ile zeminin 1,5 – 6,5 m tabakasında, CPT koni uç dayanımlarınının 2,5 kat arttığı tespit edilmiştir. Vibrokompaksiyon ile düşey drenlerin beraber uygulandığı bölgede, düşey drensiz uygulamaya göre belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Duan vd. (2019), arazide vibrokompaksiyon uygulaması sonrası zeminin farklı derinliklerinde piezometre ile ölçümler olarak aşırı boşluk suyu değişimlerini incelemiştir. Vibrokompaksiyon ile zeminde, aşırı boşluk suyu basıncınının 1 saat gibi kısa bir sürede dağıldığı tespit edilmiştir. Böylece zemin iyileştirmesi sonrası yapının inşa hızı artacaktır. Cristovao vd. (2016), ince dane oranı %10'dan az olan kumlu zeminde hedeflenen minimum %70 sıklığa ulaşılması için (üçgensel bölge oluşturacak şekilde) değişen 3,30, 3,50, 3,70, 3,90, 4,10, 4,30 m aralıklarda uygulanan vibrokompaksiyonda, optimum aralığın 3,50 m olduğu tespit edilmiştir. CPT koni uç dayanımı 25-30 MPa olan sıkı kumların olduğu bölgede yapılan iyileştirme sonucu CPT koni dayanımlarınının düştüğü belirlenmiştir. Dolayısıyla sıkı kum türü zeminlerde bu uygulama zemin danelerine hasar vermiş iyileştirme yerine daha olumsuz sonuçlar oluşturmuştur.



Şekil 2.8. Derin güçlü vibrokompaksiyon uygulaması (Papadopulos ve Eliahu, 2018)

**Silindirler kompaksiyon:** Scott vd. (2021) çalışmalarında arazide 8 tonluk dört köşeli darbe silindiri ile dinamik kompaksiyon uygulamasında, zeminde belli

derinliklerde toprak basıncı hücreleri yerleştirerek silindirin etki derinliğini araştırmışlardır. Araştırma yapılan zemin üzerinde 8 ve 16 geçiş yapılmış olup zemin tipi iyi derecelenmiş kumdur (SW). Sensör verilerine göre basınç değerleri 3,85 m'ye kadar alınmış ancak özellikle zeminin üst 2 m'lik tabakasında en büyük basınç değerlerinin elde edildiği vurgulanmıştır.

## 2.5. Patent Taraması

Teze konu tokmaktama probuna ilişkin yapılan aşağıdaki patent taraması neticesinde, mekanik veya dinamik kompaksiyonun konu alındığı ve zemin sıkıştırmasına yönelik farklı tekniklerin sunulduğu patentler görülmektedir. Bu patentlerin tamamında zemin yüzeyinden uygulanan ağırlıkların düşürülmesi, silindirle sıkıştırma veya vibrasyonlu etkiye dayanan düşey doğrultuda iyileştirme yapılmaktadır. Bu tezde geliştirilen ve standart bir sondaj makinesi yardımıyla uygulanan dönme hareketinin krank mili yardımıyla yatay plakalara aktarıldığı ve sondaj kuyusu içerisinde tokmaktama hareketi kullanılarak direkt yanal iyileştirme sağlayan mekanik bir zemin iyileştirme yöntemi ile karşılaşılmamıştır. Bu açıdan özgün bir uygulama olduğu düşünülmektedir.

Motor, silindir ve şanzıman mekanizmasından oluşan ve kendi kendine hareket edebilen küçük boyutlu kompaksiyon silindirini konu edinen bir buluşta, düşey kompaksiyon sağlayan silindir bir eksantrik miline sahiptir ve eksantrik milinin iki ucu döner destek üzerine sabitlenmektedir (Duan ve He, 2007). Tarasov (2009) tarafından geliştirilen buluş, farklı seviyelerdeki iki eş silindir bölümünün yuvarlanarak sırasıyla zemini sıkıştırması suretiyle çalışmaktadır. Buna göre, silindir bölümü ağırlıklarının sıkıştırılmış yüzeye karşı statik etkisinin dinamik etkiye dönüştürülmesi, krank mili etrafındaki silindirin bir bölümünün sabit kalıp diğerinin döndürülmesi ile sağlanmaktadır. Burada yapılan sıkıştırma işlemi yine düşeyde basit bir krank mili etrafındaki silindir bölmeleri ile gerçekleştirilmektedir. Ackermann (2009) tarafından geliştirilen sıkıştırma cihazı, bir shaft mili etrafında dönebilen titreşim tetikleyicilerine sahip bir tambur içermektedir. Tambur en az iki parçadan oluşmakta ve her parçada milinden belirli uzaklıklarda en az iki çift vibrasyon ünitesi bulunmaktadır. Tambur titreşimle zeminin yüzeyini düşey doğrultuda sıkıştırmaktadır. Cheng ve Pan (2009) tarafından geliştirilen buluş, vibrasyonlu silindire aksenal vibrasyon çarkı sağlamaktadır. Temel olarak eksantrik miller, vibrasyon uyarıcı ve vibrasyon çarkı gövdesi içermektedir.

Vibratör, sağ ve sol vibratörlerin titreşim kuvvetini ayrı ayrı etkileyen iki kısma ayrılmaktadır. Mevcut vibrasyonlu silindirlere kıyasla daha derin ve daha iyi kompaksiyon yapmayı hedeflemektedir. Zhou (2012) tarafından, standart kompaksiyon sistemine alternatif bir yöntem olması hedeflenerek güçlü dinamik sıkıştırma ekipmanı geliştirilmiştir. Bu buluşta, makaralı destek çerçevesine adapte edilmiş dönen bir milin her iki yanında eşit sayıda eksantrik tekerlek mile sabitlenmiştir. Tekerleklerin dış tarafında rulmanlar üzerinde tokmak düzeneği monte edilmiştir. Bu ekipman klasik sistemlerde olduğu gibi zemini düşeyde sıkıştırmaktadır. Jiaqi vd. (2012) ağırlıkların düşürülmesi suretiyle uygulanan standart dinamik kompaksiyon vincine, tokmağın otomatik olarak bağlanması veya boşa düşürülmesini sağlayan kanca ekipmanını geliştirmiştir. Otomatik olarak asma ve kancadan çıkarma yeteneğine sahip dinamik sıkıştırma makinesi, manuel kancalama yapan makineye göre oluşabilecek güvenlik tehlikelerini en aza indirmeyi hedeflemiştir. Ayrıca dinamik verimliliği de arttırmaktadır. Zemin sıkıştırma makinesi olan vibrasyonlu silindire yönelik geliştirilen bir diğer buluşta (Edman ve Laugowitz, 2014) zıt yönde uzanan iki paralel eksantrik eksene sahip silindir biçimli vibrasyon ünitesi zemine düşey yönde uygulanacak darbeleri oluşturmak için kullanılmaktadır. Jiang (2017) tarafından geliştirilen buluş; üst ucu çoklu destek çubuğu, alt ucu ise çoklu pres çubuklarıyla yapılandırılmış düşey doğrultulu vurma hareketi yapabilen çene içermektedir. Yuvarlanma özelliğine sahip bir tür tokmak ağırlığından faydalanarak zemini sıkıştırmaktadır. Wang vd. (2017) tarafından geliştirilen ve düşey vibrasyon silindirini konu edinen buluş, her iki tarafında çerçeve bulunan ve çerçeve arasındaki çelik tekerlekler sayesinde vibrasyon işlemini gerçekleştirmektedir. Bu buluş sayesinde sıkıştırma verimliliği artmış ve enerji tasarrufu sağlanmıştır. Bir başka buluşa konu tokmaktama cihazı, krank mili ve çoklu krank detayı içeren bir kompaksiyon olup düşey doğrultuda sıkıştırma sağlamaktadır (Xu, 2018). Krank mili ile bağlantılı tokmak çubuğu, zemin gevşetme plakası, tokmak plakası ve anahtardan oluşmaktadır. Tokmak plakası, tokmak çubuğunun tabanına sabit bir şekilde bağlanmış ve tokmak plakasının üzerine zemin gevşetme plakasını çekmek için elektromıknatıslar sabitlenmiştir.

Tez kapsamında yukarıda bahsi geçen zemin iyileştirme yöntemlerine alternatif oluşturabilecek ve mevcut olumsuzlukları en aza indirgeyerek özellikle yanal doğrultuda iyileştirme sağlayan yeni bir mekanik zemin iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde; harici üniteler, yüksek basınçlı pistonlar veya devasa ağırlıklar gerekmeden kolay işçilik ve ekonomik uygulamaya odaklanılmıştır. Çevre yapılar açısından gürültü

ve titreşim oluşturmayacağı için şehir içi bitişik nizam yapılarda da kolaylıkla kullanılabilir. Basit tasarımı sayesinde standart sondaj makinelerine adapte edilebilen özel tasarım prop kullanımı tercih edilmiştir. Bu avantajlarına ek olarak tokmaktama yöntemi diğer zemin iyileştirme yöntemleri ile koordineli çalışabilecektir. Delgi gerektiren tüm derin zemin iyileştirme uygulamalarında burgu kullanmak yerine eksantrik tokmaktama probunun kullanılması durumunda hem delgi sağlanacak hem de yanal doğrultuda iyileştirme meydana gelecektir.



### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

Tez sürecinde; zemin özelliklerinin belirlendiği temel geoteknik deneyler, prototip tokmaklama probunun üretimi, büyük ölçekli laboratuvar deneyleri ve arazi denemeleri olmak üzere dört aşamalı yöntem süresi izlenmiştir.

#### 3.1. Zemin Özellikleri

Büyük ölçekli deneysel çalışmada ihtiyaç duyulacak işçiliği azaltmak, zemin tipindeki heterojen yapıdan kaynaklanan bilinmezlikleri en aza indirmek ve ön çalışmalardaki killi veya çakıllı zeminlerde karşılaşılan sorunlardan dolayı tek tip dane yapısına sahip kötü derecelenmiş gevşek ve orta sıkı silis kumunun deneysel çalışmalarda kullanılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda ilk aşamada envanterde bulunan silis kumunun özgül ağırlık, gradasyon eğrisi, maksimum ve minimum birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Ayrıca üçüncü aşamada laboratuvar ortamında gerçekleştirilen büyük boyutlu plaka yükleme deneylerinden önce elde edilen üç farklı sıklıkta kuru ve ortalama su muhtevası için yapılan kesme kutusu deneylerinde içsel sürtünme açısı ve kayma mukavemeti belirlenmiştir. Eskişehir Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarında ilgili standartlar uyarınca yapılmıştır (Görsel 3.1.).



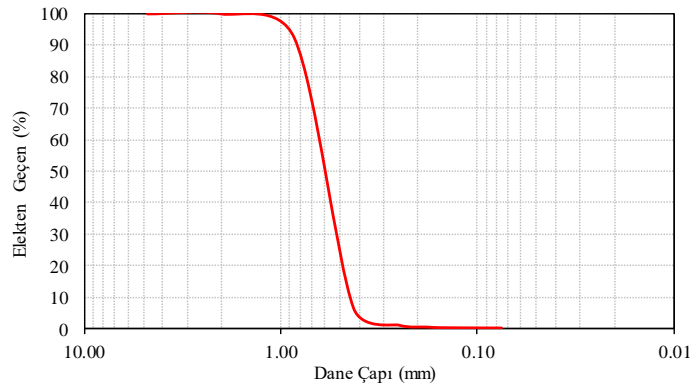
a.

b.

**Görsel 3.1.** a. Piknometre ile özgül ağırlık deneyi ve b. Kesme kutusu deneyi

Projenin kabulünün ardından laboratuvar deneyleri sırasında kullanılan silis kumuna elek analizi (TS EN ISO 17892-4) gerçekleştirilerek Şekil 3.1.'deki gradasyon eğrisi çizilmiştir. Danelerin çoğu 40 nolu eleğin üzerinde kalmıştır. Genel dağılım 1 mm'den küçük ve 0,425 mm'den büyük orta ve iri daneli kumdan oluşmaktadır. Diğer

tarafından sabit hacimli standart proktor kalıbı içerisine gevşek ve sıkı halde yerleştirilen kuru kum hesaplanarak minimum kuru birim hacim ( $\gamma_{\min}$ ) ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları ( $\gamma_{\max}$ ) bulunmuştur. Zeminin özgül ağırlığı ( $G_s$ ) TS EN ISO 17892-3 standardına göre belirlenmiştir. Deneyde kullanılmak üzere 200 g silis kumu 24 saat, 105 °C’de kurutulmuştur. Kurutulmuş numunelerin özgül ağırlıkları belirlenirken 500 ml boyutunda piknometrelerin boş ( $W_1$ ), zemin numunesi dolu ( $W_2$ ) ve su dolu ağırlıkları ( $W_4$ ) alınmıştır. Üç defa tekrarlanan özgül ağırlık deneyleri için her seferinde 50 g zemin numunesi piknometreye doldurulmuş, üzerine üç adımda, daha önceden hava kabarcıkları alınmış distile su eklenmiştir. Her adımda piknometre çalkalanarak vakumlu hava pompası yardımıyla hava kabarcıkları alınmıştır. Kabarcıklar tamamen alındıktan sonra karışım tartılarak piknometre + su + numune ( $W_3$ ) ağırlığı hesaplanmıştır. Neticede zeminin özgül ağırlık Tablo 3.1. de verildiği üzere 2,65 olarak saptanmıştır.



Şekil 3.1. Silis kumuna ait granülometre eğrisi

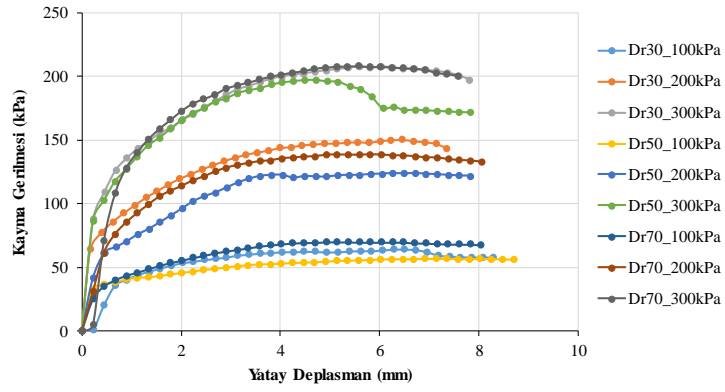
Tablo 3.1. Özgül ağırlık deney verileri

Özgül Ağırlık Deneyi			
Deney No.	1. Deney	2. Deney	3. Deney
Piknometre Kütlesi ( $W_1$ ) (g)	160,89	160,89	160,89
Piknometre + Numune Kütlesi ( $W_2$ ) (g)	210,89	210,89	210,89
Piknometre + Numune + Su Kütlesi ( $W_3$ ) (g)	689,90	690,30	690,44
Su ile Dolu Piknometre Kütlesi ( $W_4$ ) (g)	659,08	659,08	659,08
Numunenin Kütlesi ( $W_2-W_1$ ) (g)	50,00	50,00	50,00
Piknometreyi Dolduran Su Kütlesi ( $W_4-W_1$ ) (g)	498,19	498,19	498,19
Zemine Eklenen Su Kütlesi ( $W_3-W_2$ ) (g)	479,01	479,41	479,55
Numune Hacmi ( $W_4-W_1$ )-( $W_3-W_2$ ) (g)	19,18	18,78	18,64
Zeminin Tane Özgül Ağırlığı ( $g/cm^3$ )	2,61	2,66	2,68
$G_s$ ( $g/cm^3$ )	2,65		

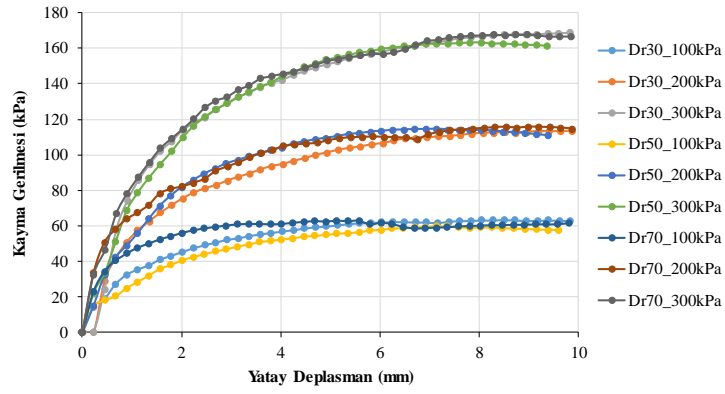
Silis kumunun kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla plaka yükleme deneylerinde kullanılan %30, %50 ve %70 olmak üzere üç farklı rölatif sıklıkta kuru kum ve yine plaka yükleme deneylerinde kum konisinden elde edilen zemin ortalama su muhtevası (%6) içeren numunelerde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır (TS EN ISO 17892-10). Deneyler, 10 cm x 10 cm genişliğe sahip metal içerisinde Görsel 3.1. b.'deki otomatik kesme kutusu cihazında 0,45 mm/dk hız ile yatay hareket altında gerçekleştirilmiştir. Gevşek ve orta sıkı durumdaki üç farklı sıklık, iki farklı su içeriği (kuru ve nemli halde) ile 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilme altında toplam 18 adet kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kayma mukavemetleri için çizdirilen ilgili kayma zarfları Şekil 3.2.'de verilmiştir. İnce malzeme içermeyen kötü derecelenmiş silis kumunda kohezyon ( $c$ ) değeri "0" olduğundan kayma zarfları orijin noktasından başlatılarak doğrusal eşdeğer eğilim çizgisi biçiminde çizdirilen kayma zarflarının eğimi dikkate alınarak içsel sürtünme açısı ( $\emptyset$ ) belirlenmiştir. %30, %50 ve %70 rölatif sıklıklardaki içsel sürtünme açısı değerleri kuru kumda sırasıyla 35,74°, 33,12° ve 35,29° hesaplanırken; aynı sıklık sıralamasıyla %6 su içeren numunelerde 30,10°, 29,56° ve 30,14° bulunmuştur. Üçüncü aşamada yapılan plaka yükleme deneylerindeki yük seviyelerine paralel şekilde seçilen söz konusu normal gerilme mertebelerindeki kesme kutusu sonuçlarına göre rölatif sıklık değişimi içsel sürtünme açısında ciddi bir farklılık oluşturmazken, rölatif sıklıktan bağımsız olarak %6 su içeren numunelerde kuru duruma göre içsel sürtünme açısı değerlerinde ortalama %4,8 azalma meydana gelmiştir. Ayrıca, %50 rölatif sıklık değerinde diğer durumlara göre birkaç derecelik azalma görülmektedir. Projede kullanılan silis kumuna ait geoteknik özellikler Tablo 3.2.'de özetlenmiştir.

**Tablo 3.2.** Silis kumuna ait geoteknik özellikler

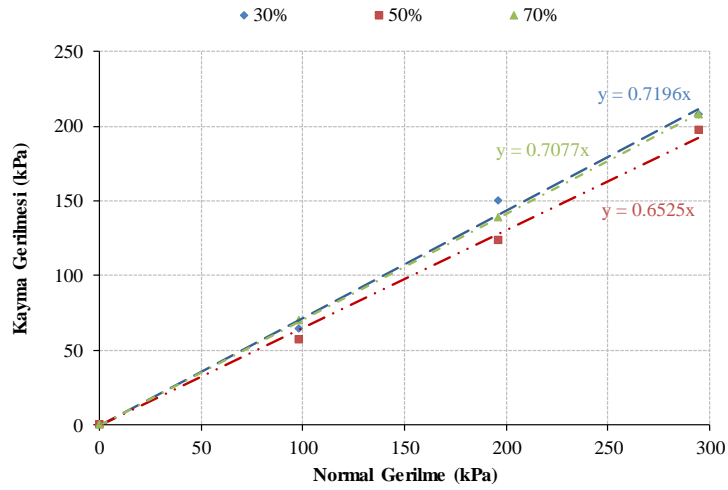
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Özgül ağırlık ( $G_s$ )	2,65	$C_u$	1,88
Çakıl içeriği (%)	0	$C_c$	1,25
Kum içeriği (%)	99,38	$\gamma_{maks}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,06
Silt ve kil içeriği (%)	0,62	$\gamma_{min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,22
$D_{10}$	0,32	$c$ (kPa)	0
$D_{30}$	0,49	$\emptyset$ (°) - kuru	34,72
$D_{60}$	0,6	$\emptyset$ (°) - nemli (%6 su içeriğinde)	29,93



a.

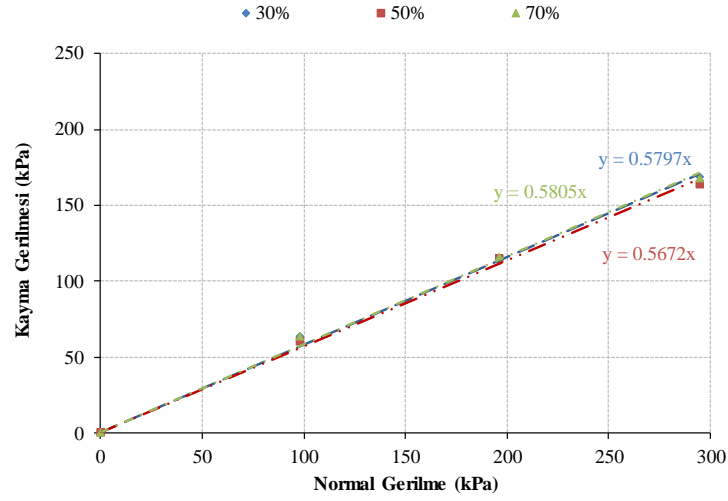


b.



c.

Şekil 3.2. Sırasıyla, kuru ve nemli kum için kesme kutusu deneyinden elde edilen; a-b. Kayma gerilmesi - yatay deplasman grafikleri ve c-d. Kayma zarfları



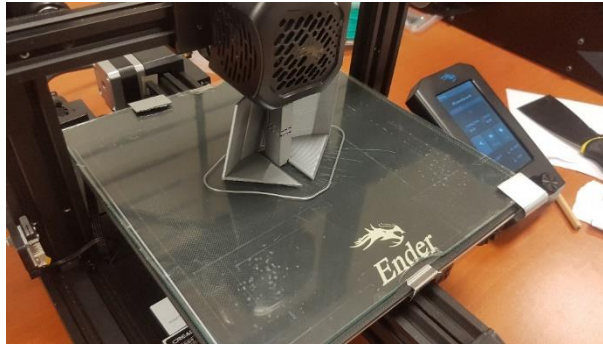
d.

**Şekil 3.2. (Devam)** Sırasıyla, kuru ve nemli kum için kesme kutusu deneyinden elde edilen; a-b. Kayma gerilmesi - yatay deplasman grafikleri ve c-d. Kayma zarfları

## 3.2. Tokmıklama Probu Tasarım ve Üretim Süreçleri

### 3.2.1. 3D prototip üretimi

Tokmıklama probunda krank milinin dönmesiyle tetiklenen plakaların ileri geri hareketinin çalışabilirliğini test etmek ve tasarım-patent başvurusunda kullanılmak amacıyla, probun üç boyutlu konsept prototipi envanerde bulunan “Creality Ender V2” tipi yazıcıda (Görsel 3.2.) PLA (poliaktik asit) ve PETG (polietilen tereftalat glikol) filamentleri ile tüm parçaların üç boyutlu çıktıları alınmıştır. Yazıcı 24 cm x 24 cm x 23 cm boyutlarında çıktı alınmasına olanak sağladığı için parça boyutları bu oranda küçültülerek hazırlanmıştır.



**Görsel 3.2.** Basım esnasında “Creality Ender 3 V2” tipi 3D yazıcı

Eriyik biriktirmeli modelleme (Fused Deposition Modelling) teknolojisini kullanan yazıcıda, X ve Z koordinatlarında hareket eden başlık vasıtasıyla filament eritildikten sonra gerekli yerlere akıtılırken Y eksenindeki hareketi ise tabla yapmaktadır. Açık kaynak kodlu “Cura” yazılımıyla entegre çalışan yazıcıda baskı kalitesi, basım sıcaklığı ve katman detayları gibi özellikleri değiştirilerek ayrıntılı çıktı alma imkanı bulunmaktadır. Prop tasarımındaki parçaların ayrı ayrı çıktıları alınarak birleştirilmiştir. Bahsi geçen prototip sayesinde uygulama sırasında öngörülemeyen problemler çözülmüştür. Aşağıda tokmıklama probunun elemanları ve görevleri sıralanmıştır.

**Eksantrik krank mili:** 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 (Görsel 3.3a). Küçük boyutlu proplar için tek noktali bağlantı amacıyla planlanan kanat sayısı kadar, büyük boyutlu proplarda ise iki noktali bağlantı amacıyla kanat sayısının iki katı kadar aynı yönde dış merkezli çıkıntı gerekmektedir. Krank mili üzerindeki bu çıkıntılara monte edilmesi suretiyle dönme hareketine izin veren rulman veya yüzükler (yeşil), iç kısımdaki eksantrik mil ile koordineli biçimde hareket ettirilmektedir. Yüzüklere sabitlenmiş kanat bağlantı elemanları (turuncu) mil ile prop kanatları arasındaki mesafeyi ayarlamakta ve yanal hareket miktarı belirlenmektedir. Bu krank mili tasarımında karşılıklı kanatlar aynı anda açılmaktadır. Milin üst ucu motor veya sondaj makinesine uygun bağlantı detayı, alt ucu ise delici uca uygun bağlantı detayına sahiptir. Üç boyutlu yazıcıdan alınan prototip prop üzerinde dört adet kanat bulunmaktadır. Dolayısıyla kanat bağlantılarına uygun olacak şekilde krank mili dört adet dış merkezli çıkıntıya sahiptir. Toplam mil boyu 40 cm olmakla birlikte dış merkezli çıkıntılarının her biri merkezden 16 mm uzaklıktadır. Krank mili bakım için çıkarılıp takılabilir şekilde üretilmiştir.

**Kanat bağlantı elemanları:** Krank mili ile tokmıklama kanatları arasındaki hareketli bağlantıyı sağlamak amacıyla çelikten üretilen elemanlardır. Bir ucunda mil üzerindeki dış merkezli çıkıntılara uygun çapta dönme hareketini kısıtlamayacak şekilde konumlandırılmış rulman veya yüzük (yeşil), diğer ucunda ise tokmıklama kanatlarındaki kulaklara bağlantıyı sağlayan pim yuvası bulunan çelik lama profilden mamul elemanlardır (turuncu). Probonun dış yüzeyi konik formda olduğu için kanat bağlantı elemanlarının uzunluğu ve kanat iç yüzeyindeki konumu değişkenlik göstermektedir.

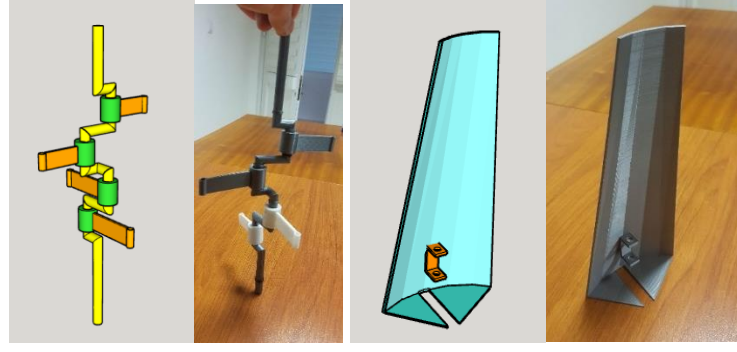
**Tokmıklama kanadı:** Kapalı konumdayken probun dış yüzeyine sıfır şekilde konik form oluşturan çeyrek daire formundaki çelik tokmıklama kanatları (turkuaz),

delgi sırasında zeminde açılan kuyunun iç yüzeylerine vurarak yatay doğrultuda dinamik kompaksiyon sağlamaktadır. Bu sayede, gevşek zemini sıkıştıran çelik plakalar rölatif yoğunluğu arttırarak zeminde iyileştirme sağlamaktadır. Bu tasarımda 90°'lik yanal doğrultularda simetrik konumlandırılan dört adet eş tokmaktama kanadı, konik formu sağlamak amacıyla yatayla 10° açı yapmakta ve her doğrultuda en fazla 16 mm (toplam 32 mm) hareket payına sahiptir. Kanatların iç yüzeyinde uygun konumlarda krank bağlantı elemanlarının sabitleneceği kulaklar bulunmaktadır. Görsel 3.3.b.'deki kanat altında bulunan kanal ise dengeli ileri-geri hareketi sağlayan ray yuvasıdır.

**Ana iskelet:** Çelikten üretim ana iskelet; krank milini merkezleyen alt ve üst disklerin düşeyde eğik çelik çubuklarla (gri) birleştirilmesi suretiyle oluşturulmaktadır. Çubuklar, tokmaktama kanatlarının aralarına gelecek biçimde konumlandırılmakta ve kanatların sınırlarını teşkil etmektedir. Döndürücü motora veya sondaj makinesi montajlanan ana iskelet sabit durmaktadır. Alt ve üst disklerin merkezinde krank milinin geçeceği kadar delikler bulunmakta ve gerekmesi durumunda rahatça dönmeyi sağlamak amacıyla bu deliklere rulman sabitlenmektedir. Ayrıca üst diskin iç kısmına sabitlenen raylar (mavi), tokmaktama kanatları üzerindeki ray yuvasında hareket ederek aksel merkezleme ve limit hareketi sağlamaktadır. Diskler ve çubuklar, krankın çıkarılıp takılabilmesi için vidalarla sabitlenmiştir. Görsel 3.3.c.'deki tasarımda iskelet yüksekliği 23 cm iken, sırasıyla üst ve alt ve disklerin çapları 16 ve 8 cm'dir. Krankın çıkarılıp takılabilmesi için alt diske direkler için yuvalar yapılmış bu yuvalara geçirilen direkler vidalarla tutturulmuştur.

**Delici uç:** Dış yüzeyinde açılı plakalar veya helezon bulunan konik yapıdaki delici uç (Görsel 3.3.d.), hem zeminde delgiyi sağlamakta hem de delgi sırasında gevşeyen zemini tokmaktama kanatlarının önüne iletmektedir. Bu sayede kanatların önüne gelen zemin yanal doğrultudaki dinamik kompaksiyon etkisiyle sıkıştırılabilmektedir.

**Koruyucu çadır kumaşı:** Krank parçalarının arasına zemin kaçmasını engellemek amacıyla probu dıştan tamamen saran kumaştır (şeffaf sarı). Kesilmeye karşı dayanımı yüksek piyasadaki en güçlü kumaş olan aramid kumaştan dikilen çadır, prop üzerine alt diskten geçirilmekte ve üst diske ip yardımıyla boğdurularak sabitlenmektedir (Görsel 3.3.e.).

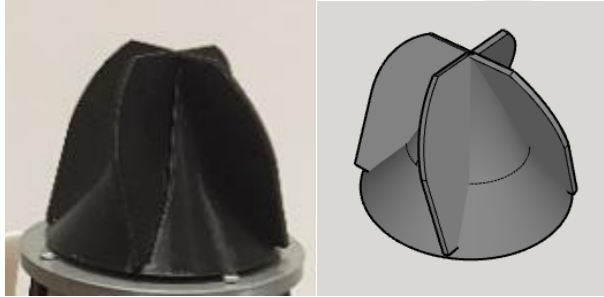


a.

b.

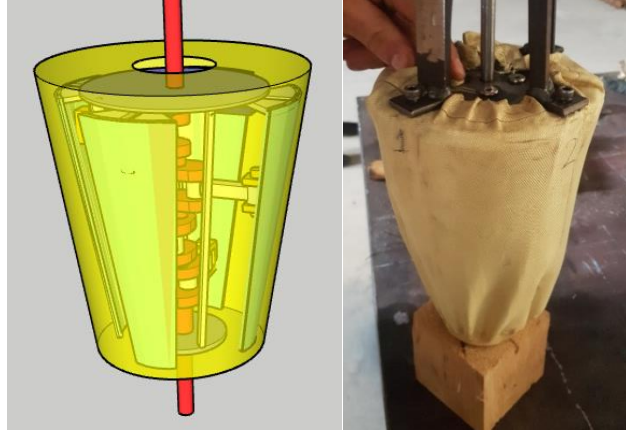


c.



d.

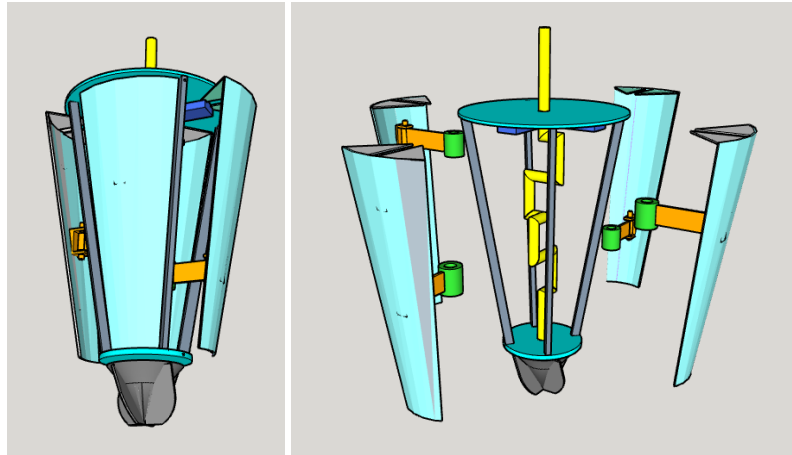
**Görsel 3.3.** Tokmaktama probuna ait detayları içeren Sketchup çizimleri ve üç boyutlu yazıcı çıktıları; a. Eksantrik krank mili, b. Tokmaktama kanatları, c. Ana iskelet, d. Delici uç ve e. Çadır kumaşı



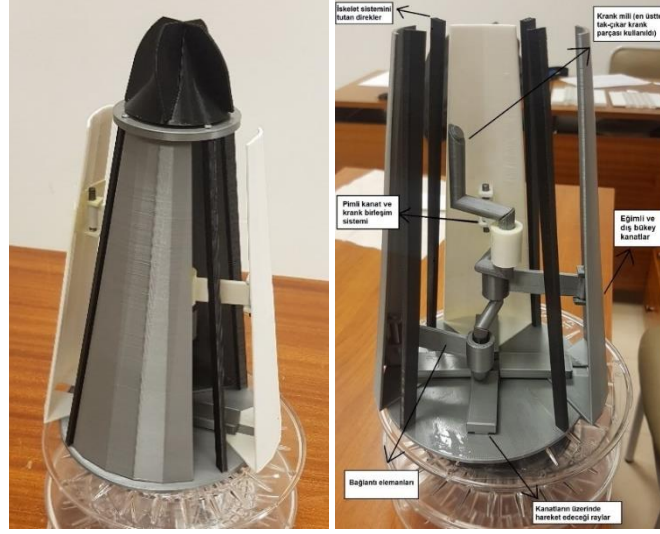
e.

**Görsel 3.3. (Devam)** Tokmamlama probuna ait detayları içeren Sketchup çizimleri ve üç boyutlu yazıcı çıktıları; a. Eksantrik krank mili, b. Tokmamlama kanatları, c. Ana iskelet, d. Delici uç ve e. Çadır kumaşı

Tüm parçaların üç boyutlu çıktısı alındıktan sonra öngörülen modele uygun biçimde Görsel 3.4.’teki gibi bağlantıları yapılmıştır. Çalışabilirliği doğrulanan probun dört ana doğrultuda çeyrek daire formundaki tokmamlama kanatları kuyudaki çevre zemine sürekli dinamik etki oluşturarak yanal kompaksiyon sağlamaktadır. Boyuna kesitte konik formda olan prop, zemin içerisinde ilerlediği sürece çapın genişlemesine bağlı olarak düşey doğrultuda da fazladan bir sıkıştırma potansiyeli sağlamaktadır. Her bir kanat doğrultusunda sırasıyla tek bağlantı noktası bulunan 40 cm krank boyu için tasarım yapılmıştır.

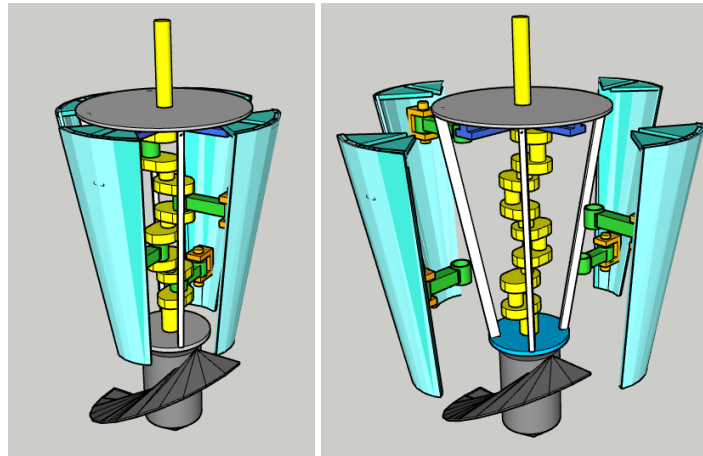


**Görsel 3.3.** Birinci tokmamlama probuna ait montajlı ve demonte Sketchup çizimleri ile üç boyutlu yazıcı çıktıları

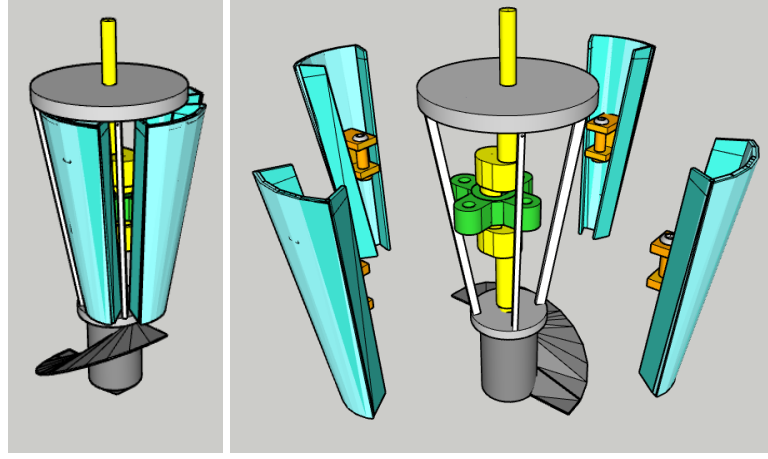


**Görsel 3.4. (Devam)** Birinci tokmıklama probuna ait montajlı ve demonte Sketchup çizimleri ile üç boyutlu yazıcı çıktıları

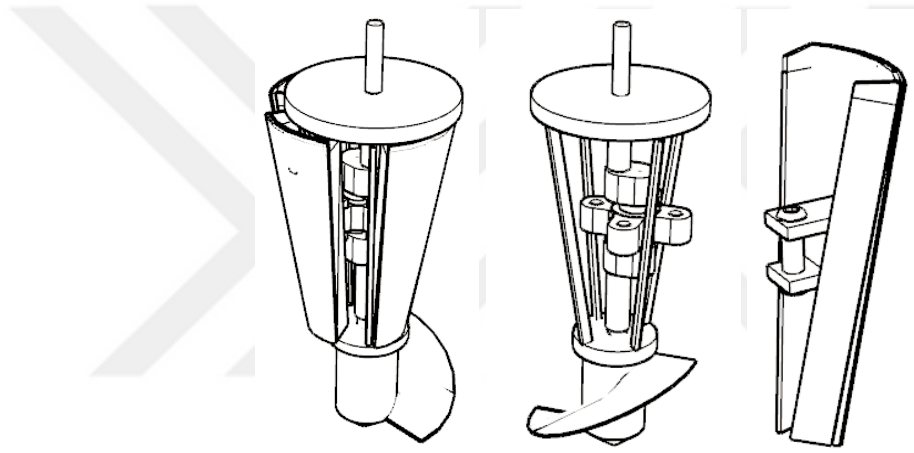
Sonraki bölümlerde yapıma gerekçeleri açıklanan ikinci ve üçüncü tokmıklama proplarına ait üç boyutlu Sketchup çizimleri ve teknik görünüşleri Görsel 3.5. ve 3.6.'da verilmiştir. Tokmıklama probunun ikinci tasarımında daha çok krank mili ve elemanlarının kesitlerini arttırmaya odaklanılmıştır. Üçüncü tasarımda ise merkezde tekli krank mili kullanılarak uygun bağlantılar geliştirilmiş ve merkezi dağıtıcı parça tasarlanmıştır. Bu parça, milin eksantrik kısmına monte edilmek üzere rahatça dönebilmekte ve saat yönü doğrultusunda sırayla teker teker kanatları açıp kapatmaktadır. Böylece önceki tasarımlara göre motora ve metal kesitlere fazla yük binmeden mil bir turu tamamladığında zemini her yönde sıkıştırmaktadır.



**Görsel 3.4.** İkinci tokmıklama probuna ait montajlı ve demonte Sketchup çizimleri



a.



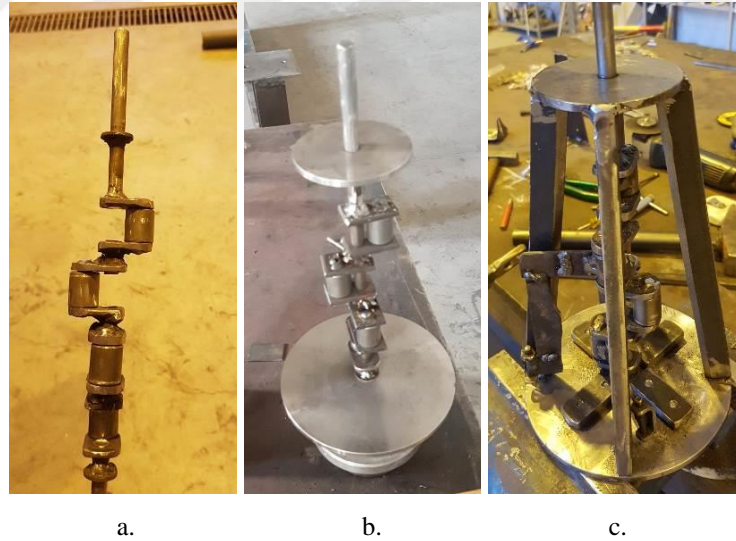
b.

**Görsel 3.5.** Üçüncü tokmaktama probuna ait; a. Montajlı ve demonte Sketchup çizimleri ve b. Teknik görünüşleri

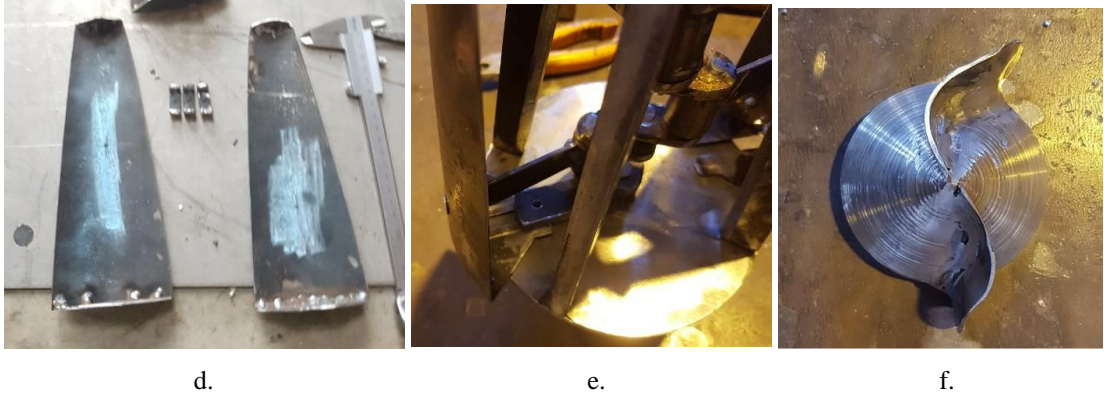
### 3.2.2. Birinci çelik prop üretimi

Ön çalışmalarda tamamlanan çelik probun ilk versiyonunun atölyede üretilmesi aşamasında üç boyutlu tasarıma uygun şekilde 4 ana doğrultuda eksantrik çıkıntılar içeren krank mili üretilmiş ve bu çıkıntılara serbestçe dönebilen yüzükler yerleştirilmiştir (Görsel 3.7.a.). Sisteme dönme hareketini verebilmek ve alt-üst kısımlardan zemin girmesini engellemek amacıyla ana iskeleti oluşturan sabit çerçeveye ihtiyaç duyulmuş ve bu doğrultuda Görsel 3.7.b.'de görüldüğü üzere üst kısma çapı 160 mm ve alt kısma çapı 80 mm olacak şekilde metal diskler yerleştirilmiştir. Çelik çerçeveyi teşkil edebilme için kanatların çalışmasını engellemeyecek biçimde kanat bağlantı elemanlarını oluşturan

dört adet çelik lama küçük diske kaynaklanmış, lamaların diğer uçları büyük diske cıvatalarla sabitlenmiş ve böylece gerekmesi durumunda çelik çerçevenin sökülebilmesi sağlanmıştır (Görsel 3.7.c.) Alt ve üst disk çaplarına uygun biçimde konik formu sağlayabilmesi için 160 mm çapındaki silindir kesilerek Görsel 3.7.d.’deki dış bükey tokmaktama kanatları elde edilmiş ve tokmaktama kanatları krank miline bir ucu pimli bağlantı elemanlarıyla sabitlenmiştir. Plakalardaki gerilme yoğunlaşmalarını önlemek ve yeterli gücü aktarabilmek için bağlantı profilleri dik doğrultuda uzatılarak ataletleri artırılmıştır. Krank mili dönme hareketi yaptığında kanatların aynı ekseninde gidip gelebilmesi için ray sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Büyük diskin alt kısmına 50 mm boyunda 2 mm’lik çıkıntılara sahip “T” şeklinde profiller yerleştirilmiş, kanatların üst diske karşılık gelen taban kısımları uzatılarak bu kanallarda eksenel girip-çıkma hareketi sağlanmıştır (Görsel 3.7.e) Probu alt ucuna çift doğrultulu helezona sahip konik burğu sabitlenmiştir. Bu sayede hem delgi işlemi yapılmakta hem de çıkan zemin yanlara doğru iletilerek tokmaktama kanatlarının önüne aktarılmaktadır (Görsel 3.7.f.). Bu tasarımda karşılıklı ikişer kanat aynı anda açılıp kapanmaktadır.

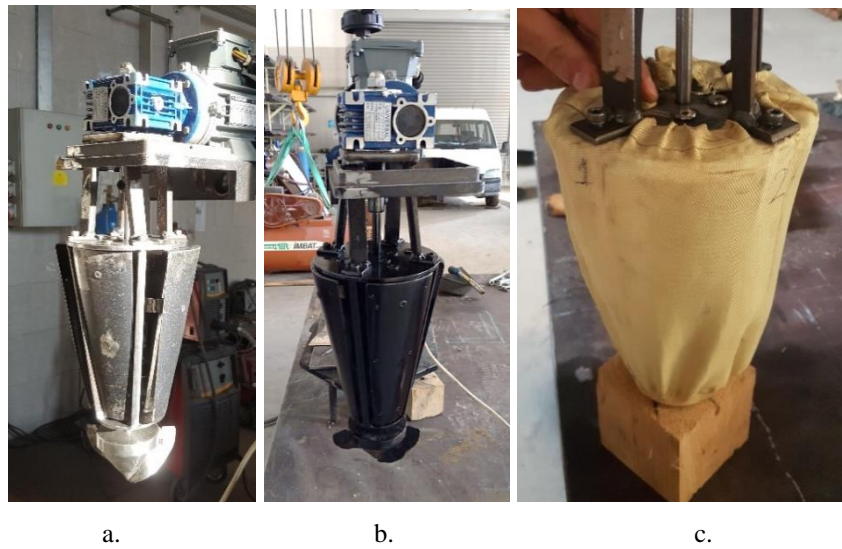


**Görsel 3.6.** Eksantrik tokmaktama probu üretim aşamaları; a. Krank mili, b. Alt ve üst diskler, c. Sabit çerçeve, d. Tokmaktama kanatları, e. Yanal hareketi kılavuzlayan ray sistemi ve f. Konik delgi aparatı



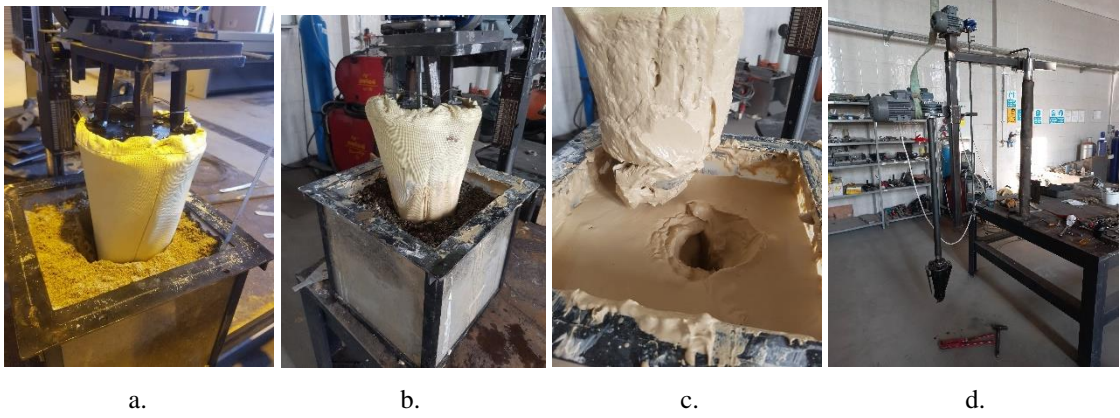
**Görsel 3.7.** Eksantrik tokmamlama probu üretim aşamaları; a. Krank mili, b. Alt ve üst diskler, c. Sabit çerçeve, d. Tokmamlama kanatları, e. Yanal hareketi kılavuzlayan ray sistemi ve f. Konik delgi aparatı

Tüm parçaları montajlandıktan sonra redüktör yuvasına sabitlenen tokmamlama probunun son hali Görsel 3.8.a-b.'de verilmiştir. Söz konusu sistemde motorla hareket verilerek krank milini çevirmek suretiyle karşılıklı tokmamlama kanatlarının eş zamanlı hareketi sağlanmaktadır. Kanatlarını bütünlüğü korumak ve kanat aralarından zeminin prop içerisine girmesini amacıyla probun dış yüzeyi yırtılma-kesilmelere karşı mukavemetli piyasadaki en dayanıklı kumaş olarak bilinen aramid (kevlar) ile kaplanmıştır (Görsel 3.8.c.). İlk denemelerde kumaşın gergin olması, kanat aralarına sıkışması ve bazı elemanlardaki sivri bölgelerden kaynaklanan bazı aşınmalar sebebiyle dikiş bölgelerinde açılmalar meydana gelmiştir. Bu sorunun çözümüne yönelik yeterli hareket payı bırakılarak kumaş cıvata yerine çelik tel ile boğdurulup sıkıştırılmıştır.



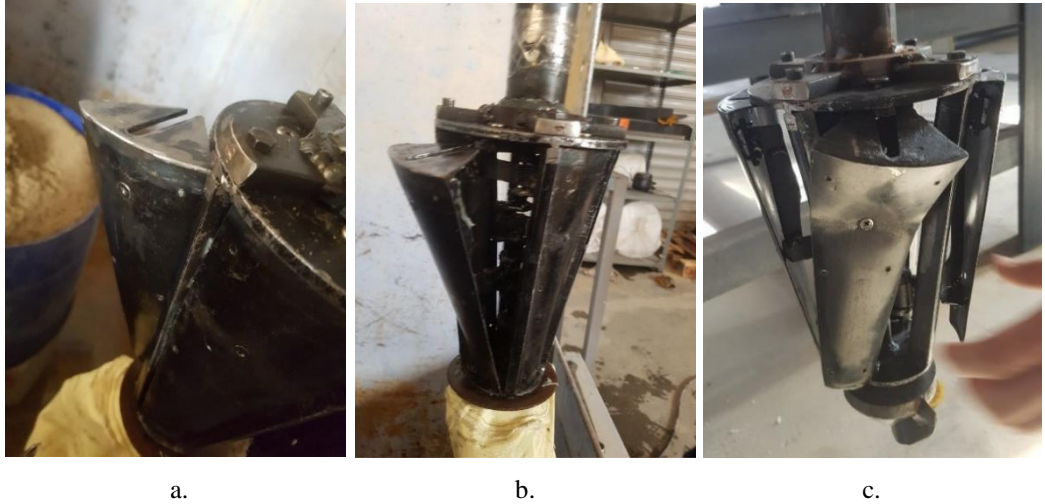
**Görsel 3.8.** a. Eksantrik tokmamlama probu metal aksam, b. Boyama sonrası ve c. Özel üretim aramid kumaş geçirilmiş prop

Ön denemelerdeki 30 cm boyutlarında küp pleksiglas hücre içerisinde farklı zeminlerde yapılan delgi çalışmalarında en efektif delgi ve yanal kompaksiyon yaklaşık %10 oranında kısmen su içeren tek tip-kötü derecelenmiş kumda (SP) elde edilmiştir (Görsel 3.9.a.). İyi derecelenmiş kum zemindeki (SW) çakıl boyutundaki danelerin bulunmasının yanı sıra optimum su muhtevsından %15 daha fazla su içeriğine sahip kil zeminde (CL) de denemeler yapılmıştır. İyi derecelenmiş kum zemindeki çakıl boyutundaki danelerin bulunması sebebiyle kısmen zorlanarak yaklaşık 12,5 cm ilerleme sağlanmış ve probun bu tip zeminlerde de kullanılabilceği görülmüştür (Görsel 3.9.b.). Optimum su muhtevsından %15 daha fazla su içeriğine sahip kil zeminde ise 20 cm penetrasyon sağlamış olmasına rağmen prop çıkarıldığında çukur çapının azaldığı görülmüştür. Ayrıca kumaş yüzeyine yüksek miktarda kil yapışmıştır (Görsel 3.9.c.). Sonuç olarak, farklı zemin tiplerinde yapılan denemelerde en verimli hareket kısmen su içeren SP tipi sağlanmıştır. Her ne kadar zeminlerde ilerlenme sağlansa da 10 Nm tork oluşturan 0,20 kW'lık mevcut motorun yetersiz kalmasından dolayı bazı noktalarda sistem kilitlemiştir. Bu yüzden plaka yükleme deneyleri içeren laboratuvar çalışmaları için motor ve motora monteli redüktör kapasitesinde artış gerektiği tespit edilmiştir. Probu zeminde ilerlemesiyle birlikte artacak efektif gerilme ve buna bağlı yanal toprak basıncı göz önünde bulundurularak kapasitede yaklaşık 6 katlık artış sağlayan 56 Nm tork oluşturan, 74 d/dk ve 0,55 kW'lık motor ve uygun redüktör yani motorun devir-güç ayarını kontrol eden ve dönme hareketinin yönünü değiştiren elemanı proje kapsamında temin edilmiştir. Deney hücresi içerisinde tokmaktama probunun çalıştırılabilmesi için geliştirilip üretilen ve detayları ilerleyen aşamalarda anlatılan özel delgi vinci üzerine sabitlenen mevcut 0,20 kW'lık motor aşağı-yukarı hareketi sağlarken, yeni alınan 0,55 kW'lık motor ise dönme hareketini sağlamaktadır (Görsel 3.9.d.).



**Görsel 3.9.** a-b-c. Ön denemelerde sırasıyla, SP, SW ve CL tipi zeminlerdeki delgiler ve d. Proje sürecinde temin edilen 0,55 kW'lık motor sabitlenen özel delgi vinci

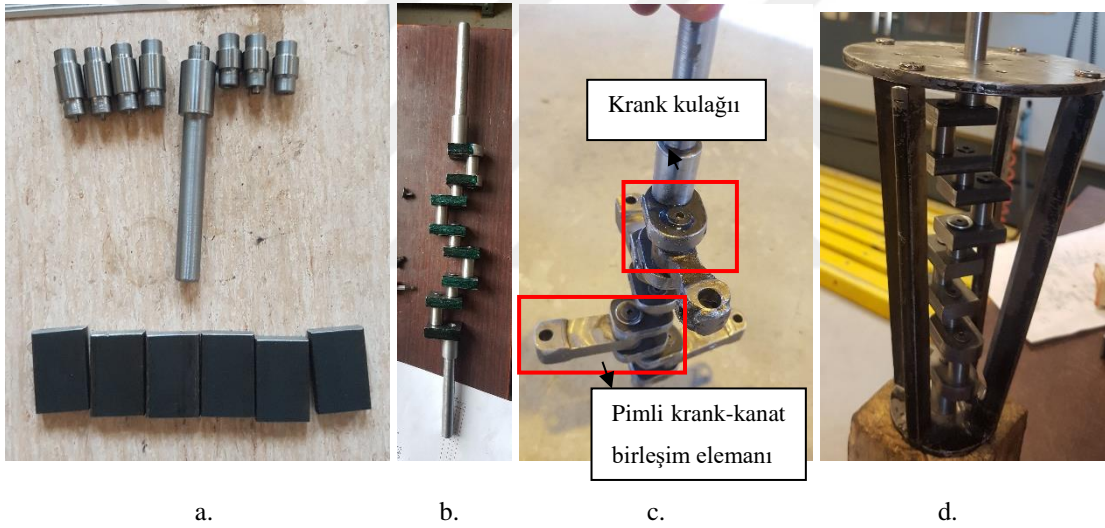
Tez sürecinde ilk üretim prop ile yapılan denemelerde zemin içerisinde 50 cm penetrasyon ve iyileştirme derinliği hedeflenmiştir. Ancak tokmaktama probu yaklaşık 20 cm zemin içerisine girdiğinde kanat üst bölgesinin raydan çıkması (Görsel 3.10.a.) ve krank ile birleşim noktalarında eğilme problemleri ile karşılaşmıştır (Görsel 3.10.b-c.). Söz konusu problemler sebebiyle iskelet sistemi hariç; krank mili, kanatlar, birleşim elemanları ve ray boyutlarının büyütülerek daha mukavemetli prop oluşturulması yönünde çalışmalar yapılmıştır.



**Görsel 3.10.** Delgi sırasında birinci propta karşılaşılan problemler; a. Raydan çıkmış prop kanadı b-c. Kanatlarda eğilmenin görüldüğü krank mili ve kanat birleşim noktaları

### 3.2.3. İkinci çelik prop üretimi

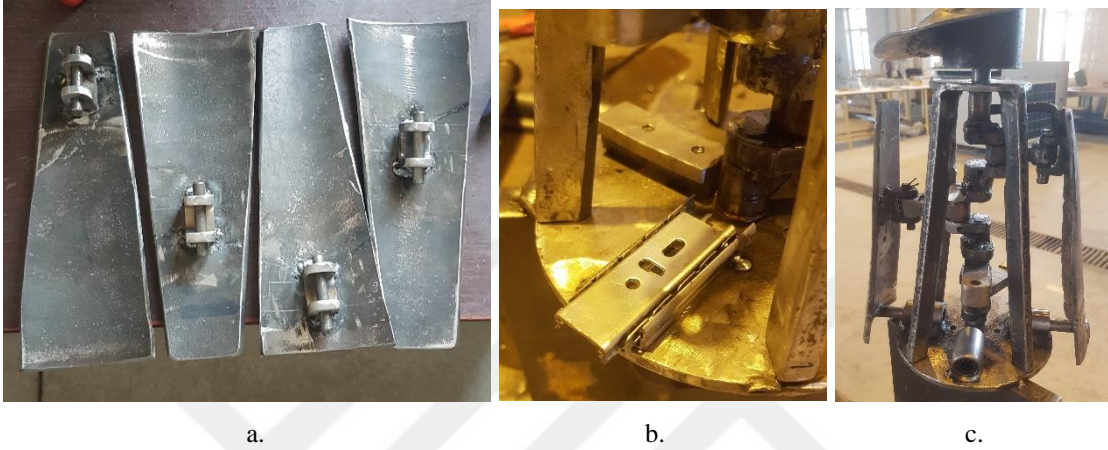
Tokmaktama probunun ilk üretiminde karşılaşılan sorunların giderilmesi amacıyla ikinci üretiminde daha kalın kesitlere sahip mil parçaları ile krank üretimi yapılmıştır (Görsel 3.11.a). İlk tasarımda 10 mm olan krank milinin çapı 15 mm'ye, gerilme birikmesi olabilecek noktalarda ise 20 mm çap değerine çıkarılarak tek tek torna tezgahında işlenmiştir (Görsel 3.11.b). Diğer taraftan, krank kulakları olarak adlandırılan silme lama profiller 5 mm kalınlıktan 10 mm'ye çıkarılmıştır. İlk aşamada cıvata yardımı ile birleştirilen krank millerinde dönme hareketi sonrasında gevşeme meydana geldiği için tüm parçaların hassas birleşimi sonrasında cıvatalar üzerine ayrıca kaynak yapılmıştır. Krank ve kanat bağlantı elemanlarında ise 3 mm saclar yerine 15 mm kalınlığında elemanlar tercih edilmiştir (Görsel 3.11.c-d).



**Görsel 3.11.** İkinci tasarıma ait prop bileşenleri; a-d. Krank mili parçaları ve krank kulakları

Kanat plakaları birinci üretime göre 2 mm'den 5 mm'ye çıkarılarak kanatlarda eğilme problemi büyük ölçüde önlenmiştir (Görsel 3.12.a.). Eğilme gözlenen kanatlarının iç kısımlarına ikinci bağlantı noktaları yerleştirilmiştir ve pimlerdeki deliklere sabitlenmiş kopilyalar yardımı ile bağlantı sağlanmıştır. İlk tasarımda üst diskte bulunan frezede işlenmiş mekanik ray yerine kanatların düz doğrultuda çalışmasını sağlamak için teleskopik raylar (Görsel 3.12.b.) ve silindirik raylar kullanılmıştır (Görsel 3.12.c.). Bunlara ek olarak, kanat kenarlarının iç kısımlarına aksenal mil parçaları kaynaklanarak aksenal doğrultu sağlanmaya çalışılmıştır. Çekmece kenarlarında kullanılan teleskopik ray sistemi rayın zemini yanal doğrultuda itecek kuvvette olmaması sebebiyle aktif

çalışmamıştır. Ayrıca bilyelerin açıkta olması ve içerisine kum kaçma riskinden dolayı bu yöntemden vazgeçilerek içerisinde 4 farklı yönde korumalı bilyeler bulunan 60 mm uzunluğunda 12 mm iç çapında silindir rulman kullanımına karar verilmiştir. Bu rulmanları sabitlemek için 22 mm iç çapa sahip yataklar yapılmış ve içerisine segman yardımıyla sabitlenmiştir. Bu tasarımda 4 kanat aynı anda açılıp kapanmaktadır.



**Görsel 3.12.** a. Bağlantı pimleri güçlendirilen tokmaktama kanatları, b. Teleskopik raylar ve c. Silindirik raylar

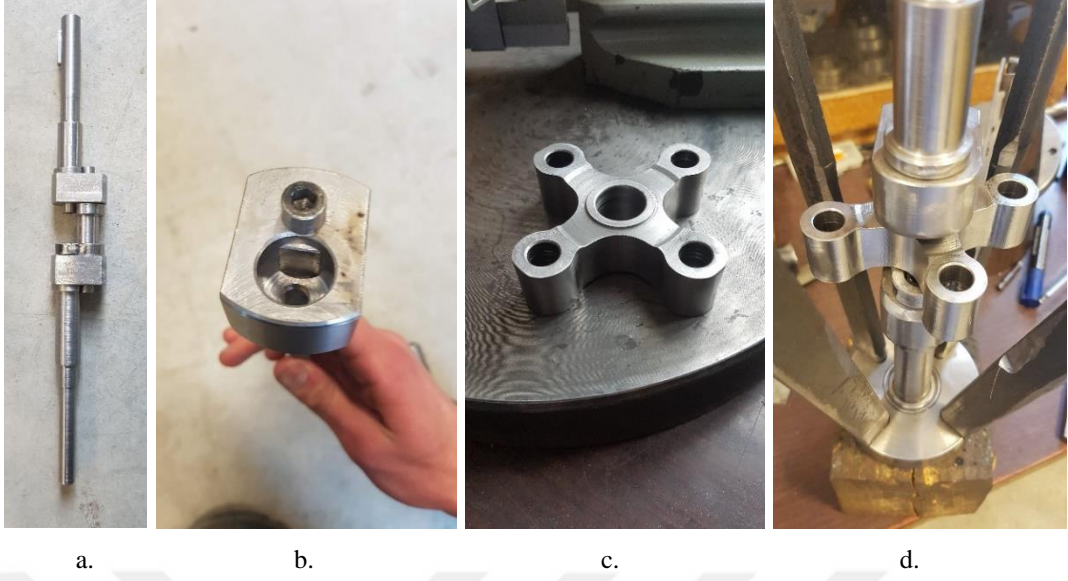
İlk tasarımda, tokmaktama probuyla zemin içerisinde ilerledikçe artan yanal toprak basınçları, krank parçalarında zorlanma ve istenmeyen şekil değiştirmeler oluşturduğu için kanatlar istenilen doğrultuda rahat bir şekilde çalışmıyordu. Bu sebeple, sistemdeki kasıntılar, raydan çıkma ve kanattaki eğilme problemlerinin çözümüne yönelik yapılan geliştirmeler sonucunda ikinci prop ile denemeler yapılmıştır. Ancak tokmaktama kanatlarının boyu uzun olduğu için kanat üst kısımlarında istenen doğrultu ve sabitlik sağlanamamış ve söz konusu rulmanlarla dahi zorlanmaların önüne geçilememiştir. Ayrıca krank milinde Görsel 3.13.'de görülen, yükü ilk aldığı noktada kırılmalar meydana geldiğinden üçüncü versiyon tokmaktama probu üretimi için planlamalara başlanmıştır.



*Görsel 3.13. İkinci tasarım prop krankında görülen kırılmalar*

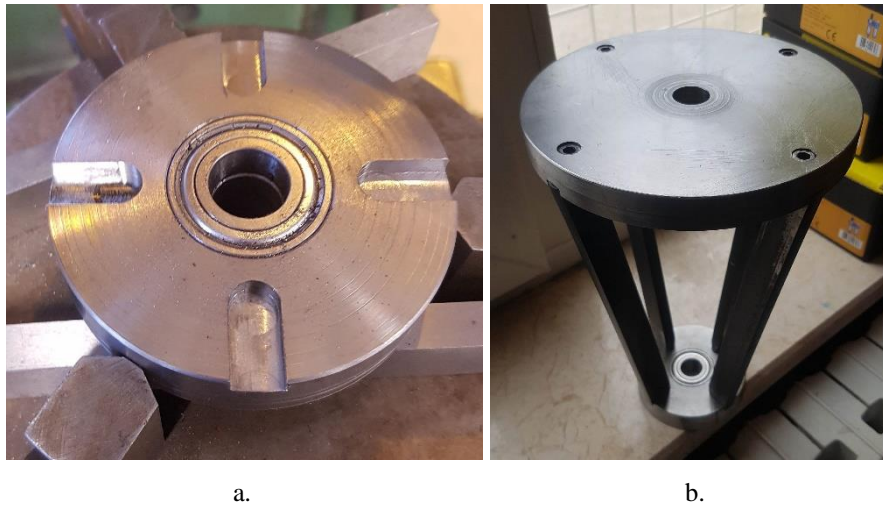
#### **3.2.4. Üçüncü çelik prop üretimi**

İlk iki tasarımda probun dört kanata olması sebebiyle krank kolu üzerinde her bir kanata özel eksantrik çıkıntı yapılmıştır. Ancak laboratuvar ortamındaki deney düzeneğine uygun ölçekli söz konusu tasarımlarda bu çoklu çıkıntılar, millerin birbirine güçlü bağlanamaması neticesinde krank milinde dönmeler ve eksen kaçıklıklarına sebebiyet vermekteydi. Bu sorunların önüne geçmek için üçüncü propta kulak kesitleri artırılmış tek bir eksantrik krank kolu kullanılmasına karar verilmiştir (Görsel 3.14.a.). Bu sayede aynı iskelet boyutları içerisinde 20-22 mm arasında değişen kalın mil parçaları ve 22 mm kalınlıkta krank kulakları kullanılmıştır. Krank milinin tüm parçaları cıvata ile birleştirilmiştir. Millerin birbirine daha sağlam tutunması ve dönme işlemi sırasında gevşememesi için krank kulaklarının içerisinde Görsel 3.14.b’de görülen kama boşlukları ile bağlantı sağlanmıştır. Milin eksantrik kısmına monte edilmek üzere rahatça dönebilen merkezi dağıtıcı tasarlanmıştır (Görsel 3.14.c-d). Bu parça, SolidWorks yazılımı ile çizilerek CNC makinesinde işlenmiştir. Mile montajı ile dönme esnasında aşınmalardan kaçınmak ve kranka zarar gelmesi engellemek amacıyla temas eden alt ve üst kısımlara bakır pul yerleştirilmiştir.



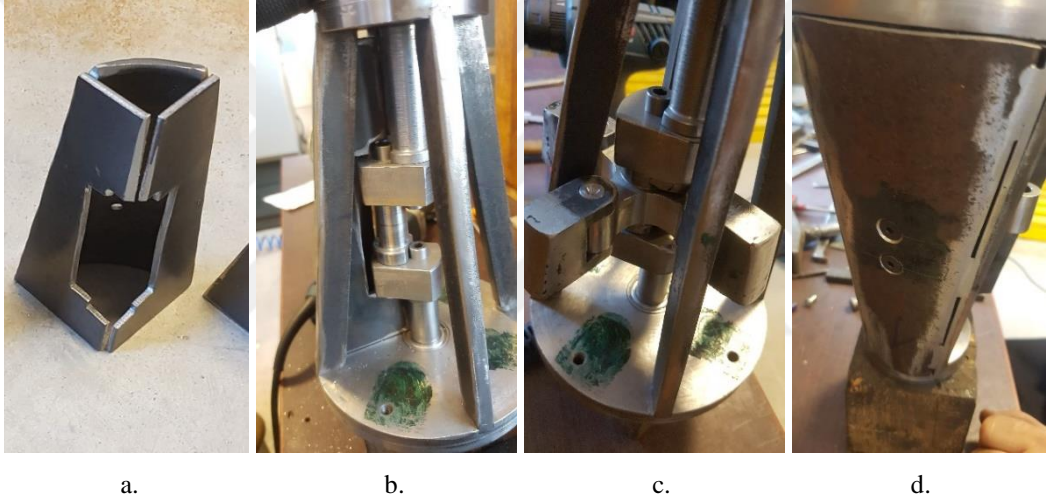
**Görsel 3.14.** Üçüncü tasarıma ait prop bileşenleri; a. Tek kollu krank mili, b. Kamalı birleşim içeren krank kulağı, c. Merkezi dağıtıcı ve d. Monte edilmiş krank mili

Sistemde alt ve üst disklerin kalınlıkları 30 mm'ye çıkarılarak yeniden üretilmiştir. Bu diskler üzerine gövde direk bağlantılarının yerini kolayca tespit etmek ve cıvatalara gelen aşırı kesme azaltmak amacıyla kanallar açılmıştır (Görsel 3.15.a). Kesiti arttırılan gövde direkleri bu boşluklara takılıp, cıvatalar ile sabitlenerek daha stabil bir iskelet elde edilmiştir. Ayrıca önceki üretimlerde krank mili disk merkezlerindeki boşluklar sebebiyle eksende hareket etmiyor ve milde sabitlik sağlanamıyordu. Bu sorun, alt ve üst disklerin merkezlerine rulman yerleştirilerek çözülmüştür (Görsel 3.15.b.)



**Görsel 3.15.** a. Direk kanalları ve b. Rulmanlar

Önceki prop üretimlerinde en çok zorlanılan kısım, kanatların hareketinin düzenli olmaması ve buna bağlı ortaya çıkan eğilme ile raydan sıyrılma problemleriydi. Üçüncü prop üretiminde tasarlanan kanatlara gövde direklerini kılavuz olarak hareket edecek 3 mm kalınlığında açısall sac plakalar kaynaklanmıştır (Görsel 3.16.a.). Bu sac plakalar sayesinde sistem ray elemana gerek duyulmadan kanatların hem alt hem de üst bölgelerde doğrultusu korunarak ve herhangi bir kasılma olmadan hareketi sağlanmıştır. Söz konusu merkezleme plakalarının krank miline çarpmaması için iç kısmı Görsel 3.16.b-c'deki krank dönme alanı göz önüne alınarak kesilmiştir. Bu işlem sonrasında kanatların krank ile bağlanması için parçalar pim yardımıyla bağlantı koluna monte edilerek kanatlara iki vida ile sabitlenmiştir (Görsel 3.16.d.). Ayrıca vidalar, gevşememesi için dış kısımdan kaynak ile sabitlenmiştir.



**Görsel 3.16.** a. Merkezleme plakaları içeren kanat, b. Tekli krank mili, c. Pimli bağlantı detayı ve d. Monte edilmiş kanat detayı

Üçüncü tasarım tokmaktama probunun montajlanmış metal iskeletinin son hali Görsel 3.17.a'da görülmektedir. Önceki üretimlerde prop içerisine kum kaçmaması için sadece aramid kumaş kullanılmıştı. Fakat kumaş yeterince esnek olmadığından güçlendirilse dahi prop hareket halindeyken dikiş yerlerinden yırtılıyordu. Bu yüzden, aramid kumaşa ek tokmaktama hareketinde yırtılmayacak esnek ve sağlam bir malzemeye ihtiyaç duyulmuştur. Çözüm olarak traktörlerin iç lastiğini oluşturan 2 mm kalınlığında esnek şambrel, kanatların açık halinde aralarına yerleşecek şablonu sağlayacak formda kesilmiş ve sac plakalar vasıtasıyla kanat üzerindeki deliklere perçinlenmiştir (Görsel 3.17.b.). Alt ve üst disklerle kanatlar arasındaki boşluklar da benzer şekilde kapatılarak prop içerisine kum kaçması önlenmiş ve aynı zamanda

kanatların birlikteliği sağlanmıştır (Görsel 3.17.c.). Sonrasında ilk tasarımlara kıyasla daha büyük boyutlarda üretilen aramid prop çadırı geçirilerek ip ile boğdurulmuştur (Görsel 3.17.d-e.). Probuun alt ucuna delgiyi kolaylaştırmak amacıyla 110 mm çapına çıkarılmış helezon kısım ile birlikte 140 mm çapta delgi imkanı sağlayan delici helezon uç sabitlenmiştir (Görsel 3.17.f.).

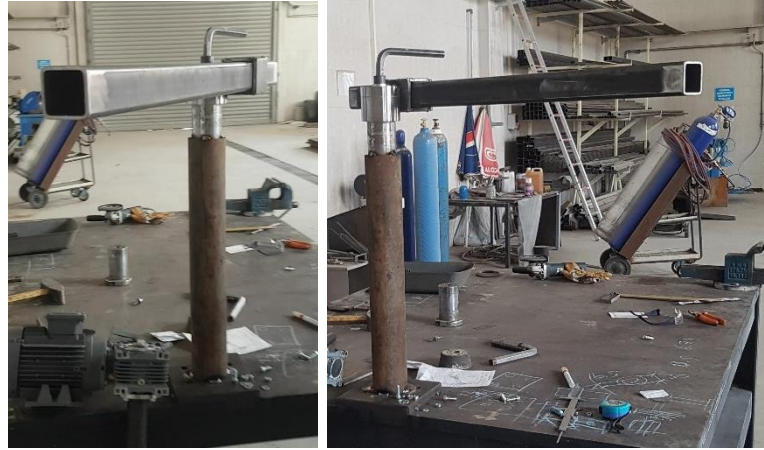


**Görsel 3.17.** a. Probuun metal iskeleti, b-c. Kanat araları ve disklere şambrel montajı, d-e. Aramid kumaş montajı ve f. Helezonlu delici uç

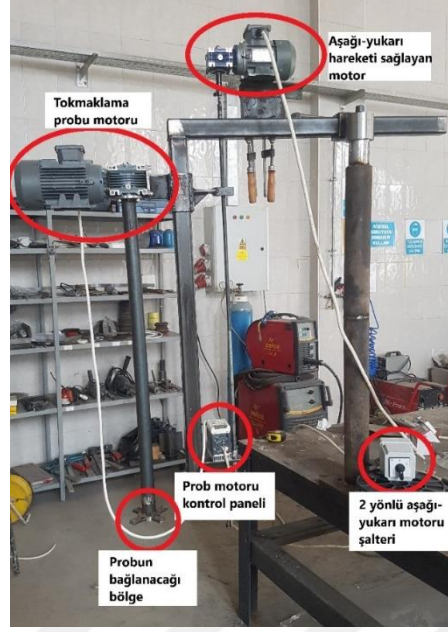
### 3.2.5. Delgi Vinci Üretimi

Deney hücresi içerisinde tokmaktama probunun yukarı-aşağı ve sağ-sol hareketinin sağlanabilmesi için çok fonksiyonlu bir özel delgi vinci geliştirilmesine karar verilmiştir (Görsel 3.18.). Plan görüntüsünde merkezden merkeze 3D, 4D ve 5D aralıkları sağlayacak şekilde 60 cm, 80 cm ve 100 cm mesafelerde delgiler için deney hücresinin

her iki kenarının orta noktasına konumlandırılacak sökülüp takılabilir bu vinç sayesinde rahatlıkla iyileştirme yapılabilmektedir. Vincin sabit boru profilden üretilmiş bayrak direği üzerine kaynaklanan döner kare yuva içerisinden yine kare profil geçirilerek kolun ileri-geri hareketi sağlanmıştır. Buna ek olarak, söz konusu yuva üzerindeki alyan başlı cıvata gevşetilerek maksimum 180° dönme hareketi neticesinde istenilen konuma çevrilebilmektedir. Aşağı yukarı hareketi sağlamak için kol üzerine monte edilen 0,20 kW'lık motor sonsuz cıvatayı tetiklemektedir. Proje kapsamında temin edilen 0,55 kW'lık motor ise dönme hareketini sağlamak üzere 120 cm uzunluğunda ve 6 cm kalınlığında kare profil üzerindeki yatağa sabitlenmiştir. İyileştirme yapılacak noktalardaki delgi sırasında deney hücresinin sınırına çarpmamak için bayrak direği 110 cm'ye çıkarılıp, motor ve prop arasındaki elemanın boyu uzatılmış ve bu sayede motorun 50+30 cm'lik (prop boyu kadar) delgide kutu dışında kalması sağlanmıştır. Dönme hareketi ve net 1 m aşağı-yukarı hareketin otomatik sağlanması amacıyla şalter ve hız kontrol paneli sisteme adapte edilmiştir (Görsel 3.19.). Böylece istenen hızda delgiye başlanıp sonlandırılabilen ve acil durumlarda enerji kesilebilmektedir. Büyük boyutlu deney hücresi içerisindeki iyileştirme süreçlerinde 80 devir/dk dönme hızı ve 40 mm/dk düşey doğrultuda ilerleme hızı kullanılmıştır.



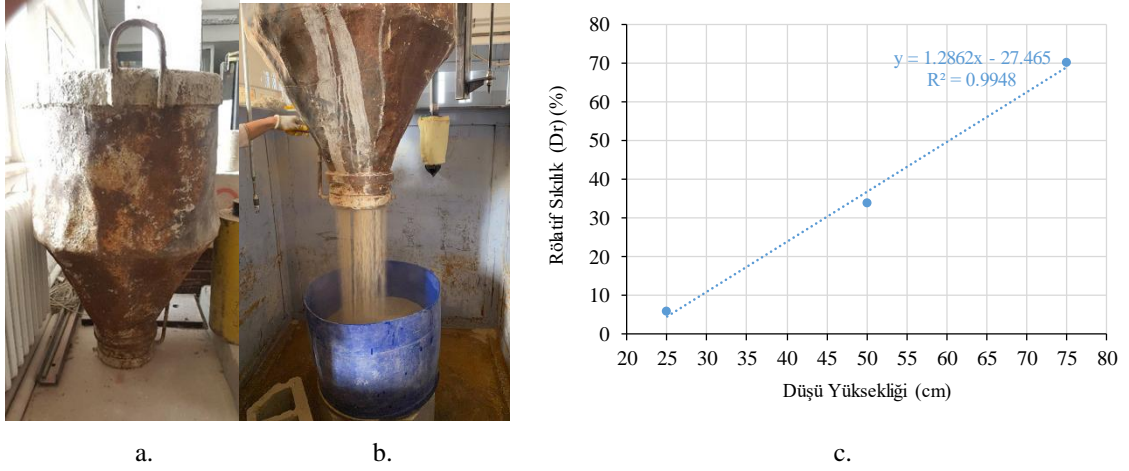
**Görsel 3.18.** Delgi vinci üretim aşamaları



Görsel 3.19. Özel üretim delgi vincinin son hali

### 3.3. Büyük Ölçekli Deney Düzenegi ve Hazırlık Aşamaları

Tezin bu aşamasında, üç farklı sıklıkta silis kumu yerleştirilen deney hücresinde, iyileştirme içermeyen referans zeminlere ek olarak merkezden merkeze 3D (D: kuyu çapı), 4D ve 5D mesafelerde tokmaktama probuyla yanal doğrultuda iyileştirilmiş zeminlere toplam 12 adet plaka yükleme deneyi uygulanmıştır. Yükleme deneylerine geçmeden önce zemin sıklığının belirlenmesi, su beslemesinin sağlanması ve ölçüm ekipmanlarına yönelik çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak deney hücresine zeminin her seferinde öngörülen sıklıklarda yerleştirilebilmesi amacıyla envanterde bulunan kesik koni formundaki kova yardımıyla kuru yağmurlama usulünce farklı yüksekliklerden kuru kum dökülerek denemeler yapılmıştır (Görsel 3.20.a.). Gezer vince takılan kovanın içerisine yerleştirilen 100 kg kuru silis kumu sırasıyla 25, 50 ve 75 cm düşü yükseklikleri sabit tutularak aynı hızlı Görsel 3.20.b.'deki 57 cm çap ve 43 cm yüksekliğe sahip mavi renkli hazne içerisine boşaltılmıştır. Birinci iş paketinde tespit edilen maksimum ve minimum birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınarak, hazne içerisindeki kumun yüksekliğine göre zeminin rölatif sıklık ( $D_r$ ) değerleri hesaplanmış ve düşü yüksekliğine bağlı rölatif sıklık grafiği çizdirilmiştir (Görsel 3.20.c.). Bu grafikten gerekli sıklık değerlerinde kaç cm yükseklikten malzeme boşaltılması gerektiği saptanmıştır. Buna %30, %50 ve %70 değerlerinde gevşek ve orta sıkı zemin elde edebilmek için kuru kumun sırasıyla 45 cm, 60 cm ve 75 cm yükseklikten boşaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



**Görsel 3.20.** a. Kuru yağmurlama sürecince kullanılan kova, b. Farklı düşü yüksekliklerinden yapılan denemeler ve c. Düşü yüksekliği-rölatif sıklık grafiği

Sonraki aşamada, prop ile iyileştirme sonrasında kumlu zeminin kendisini tutabilmesi için %10 su muhtevası içermesi gerektiği belirlenmiştir. Bu amaçla her tabakada standart su içeriğini yakalamak üzere yangın söndürme sistemlerinde kullanılan ve suyu dağıtmaya yarayan fıskiye (sprinkler) ile yağmurlama tekniği geliştirilmiştir (Görsel 3.21.). Böylece, kova ile planlanan sıklık değerinin sağlanmasının yanı sıra 150 x 150 cm boyutlarındaki hücre alanının eşit şekilde sulanması da hedeflenmiştir. Deney hücresinin arka tarafına yerleştirilen “U” şekilli metal su borusu içerisinden polietilen elastik boru geçirilerek bir ucu 4,8 lt/dk sabit debide su sağlayan su pompasına diğer ucu ise fıskiye çıkışına bağlanmıştır. Metal boru hareket ettirebildiği için zemin yüzeyinden her bölgeye kolayca sulama yapılabilmiştir.



**Görsel 3.21.** Fıskiye ile sulama sistemi

150 cm eş boyutlardaki küp şekilli metal deney hücresi her seferde 10 cm yükseklik elde edilecek şekilde sırasıyla zeminin serilmesi ve sulama işlemleri yapılarak, toplamda 120 cm zemin yüksekliği sağlanmıştır (Görsel 3.22.). Beton kovası gerekli miktarda kuru kum ile doldurularak deney hücresinin dört köşesine eşit miktarda ve aynı hızda kum boşaltıldıktan sonra zemin serme işleminde sıklığı bozmayacak şekilde mastarlanmıştır. Her 10 cm zemin seriminin ardından yağmurlama tekniğiyle %10 su muhtevası elde edecek miktarda sulama işlemi yapılmıştır. İstenen sıklık değerleri için gerekli su ve kum miktarları Tablo 3.3.'te verilmiştir. Her ne kadar %10 su eklenmiş olsa da fazla suyun deney hücresinin alt kısmında süzülmesi ve ilgili bölümlerde bahsedildiği üzere referans ile iyileştirilmiş zeminlerdeki tüm kum konisi deneylerinde alınan su muhtevalarının ortalaması dikkate alındığında %6 su içeriğinin elde edildiği görülmüştür.

**Tablo 3.3.** Deneylerde öngörülen sıklık değerleri için hücre içerisinde her 10 cm kalınlıkta kullanılan kum ve su miktarları

Sıklık değeri	Kum miktarı (kg)	Su miktarı (kg)
30%	295	30
50%	308	31
70%	322	32



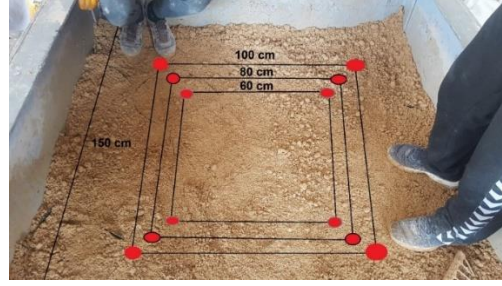
**Görsel 3.22.** a. Hücre içerisine zeminin kuru yağmurlama tekniğiyle yerleştirilmesi ve b. Su ile yağmurlama

Yüklemeye bağlı 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 dairesel plaka çapının 30 cm seçilmesi durumunda 150 m deney hücresi genişliği ve 120 cm zemin yüksekliği

yeterli olmaktadır (Pokharel, 2010; Abu-Farsakh vd., 2016; Goud vd., 2020; Tafreshi vd., 2021). Yine bu çalışmalarda yükleme plakası merkezinde olmak şartıyla zemin içerisine gömülü toprak basıncı hücreleri yerleştirilmiştir. Prop ile 50 cm derinlikte iyileştirme yapılacağı için Görsel 3.23.b-c.'de görüldüğü üzere zemin yüzeyinden itibaren iyileştirilmiş zeminin orta noktası (25 cm) ve alt noktasına (50 cm) gelecek şekilde üst görünüşte merkez noktaya 5 cm çapında 250 kPa kapasiteli zemin içi gerilme ölçerler yerleştirilmiştir. Yükleme sürecinde zemin içerisindeki gerilmelere ek olarak 30 ton kapasiteli yük hücresi yardımıyla yüzeyde oluşan gerilmeler ve plakanın iki tarafına sabitlenen 50 mm kapasiteli iki adet deplasman ölçer (LVDT) vasıtasıyla oturma değerleri eş zamanlı toplanmıştır. İyileştirme öncesi zeminin taşıma gücünü belirten referans plaka yükleme deneylerinin tamamlanmasının ardından propla delgi işlemine geçilmiştir.

### **3.3.1 Tokmaktama probuyla zemin iyileştirme**

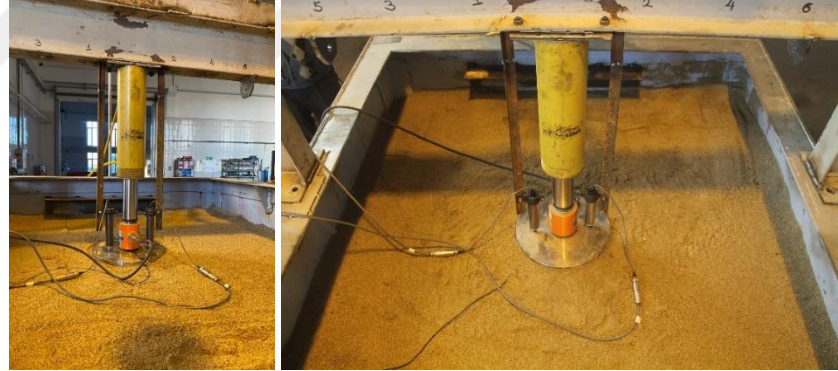
Referans deneyleri tamamlandıktan sonra her bir sıklık değeri için merkezden merkeze çap (D) net 20 cm olmak üzere; 3D, 4D ve 5D aralıklarla (Görsel 3.23.a) tokmaktama probu yardımıyla 50 cm delgi ve aynı anda tokmaktama yapılmak suresiyle yanal doğrultuda mekanik iyileştirme gerçekleştirilmiş ve sonrasında 9 adet plaka yükleme deneyi tamamlanmıştır. Proje kapsamında 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 parametrik kısımda plaka yükleme deneyi yapılmadan önce farklı bir değişkenin etkisini engellemek üzere proje önerisinde belirtildiği gibi kuyulara standart ahşap kazık yerleştirilmesine karar verilmiştir. Açılan kuyuların net boyutlarının belirlenmesi için öncelikle 40 cm derinliğinde bir deneme delgisi yapılmış (Görsel 3.24.a-b.) ve kuyunun içi poliüretan köpük ile doldurulmuştur (Görsel 3.24.c.). 24 saat kurumaya bırakılan köpük kuyudan çıkarılarak kütük şablonu belirlenmiştir. Açık formdaki prop kanatlarıyla uyumlu biçimde açılacak kuyular için taban çapı 16 cm'den başlayıp üst çapı 23 cm'ye ulaşan konik 40 cm ve düz devam eden 10 cm ile toplam 50 cm boyunda 4 adet ahşap kütük torna tezgahında projeye özel işlenmiştir (Görsel 3.24.d).



a.



b.

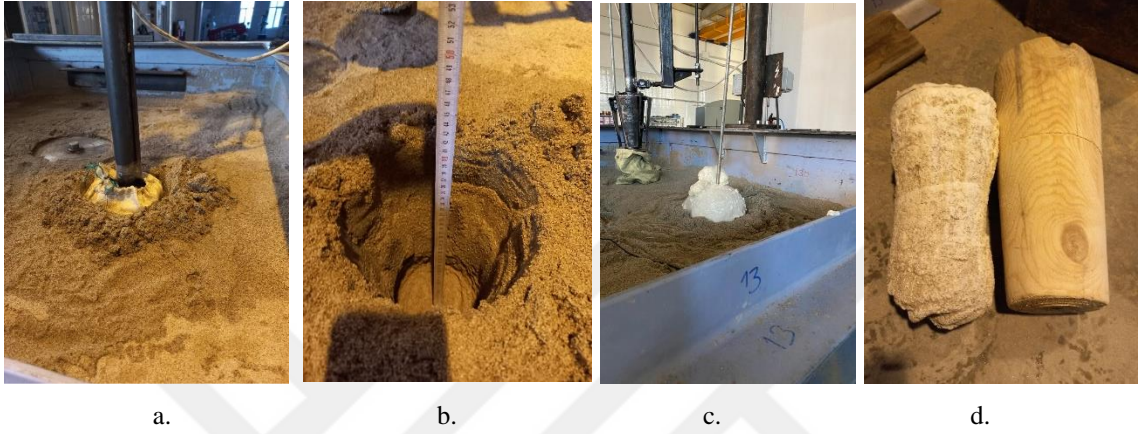


c.

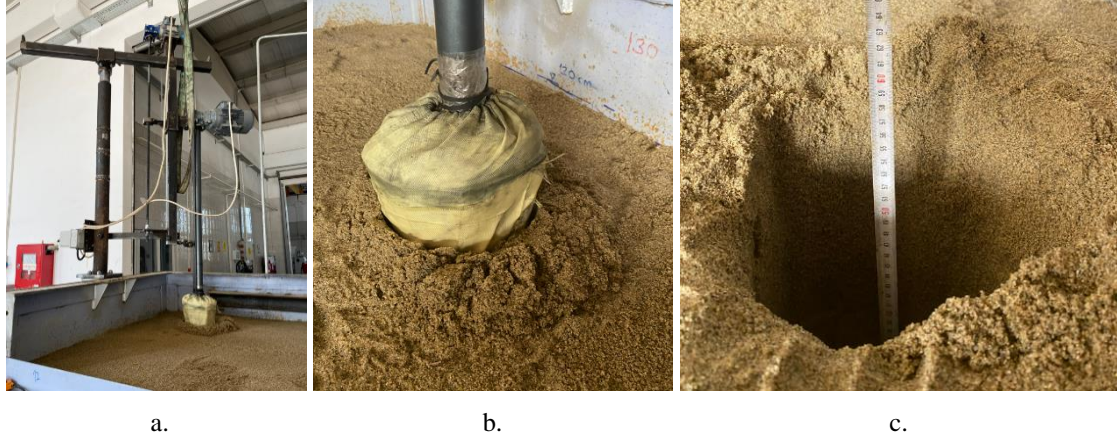
**Görsel 3.23.** a.  $D$  (20 cm) prop çapı olmak üzere 3D, 4D ve 5D aralıklarla iyileştirme uygulanacak noktalar b. Zemin içi gerilme ölçerlerin konumları ve yerleşimi ve b. Plaka yükleme deney düzeneği

Her bir referans deneyi bitiminde boşaltılıp aynı prosedürle 10 cm kademeler halinde hazırlanan zemin numunesi, iyileştirilmiş deneylerde ilk olarak %30 sıklık değeri için deney düzeneği hazırlama aşamaları dikkatlice uygulanarak yapılmıştır. Köşelerden delginin yapılacağı prop konumları belirlendikten sonra 40 mm/dk hızla özel üretim delgi kulesi yardımıyla tokmaklama probunun zemin içerisinde delgi ve aynı anda iyileştirme yapması sağlanmıştır (Görsel 3.25.a-b.). Her deney için dört kez tekrarlanan bu işlem sayesinde, derinliği 50 cm ve üst çapı ortalama 23 cm olmak üzere (Görsel 3.25.c-d) ahşap

kütükler yerleştirilmek suretiyle merkezden merkeze 3D (60 cm) aralıklarla 4 adet yanal tokmaktama kuyusu teşkil edilmiştir (Görsel 3.25.e-f.). 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 9 adet büyük ölçekli plaka yükleme deneyi tamamlanmıştır.



**Görsel 3.24.** a. Delgi ve yanal iyileştirme aşaması, b. İyileştirme sonrası elde edilen kuyu, c. Köpük dolgu yapılan kuyu ve d. Köpük kalıba uygun işlenen ahşap kütük



**Görsel 3.25.** a-b. Yanal tokmaktama süreci, c-d. İyileştirme sonrası açılan kuyu ve e-f. Ahşap kütüklerin yerleştirilmesi



d.

e.

f.

**Görsel 3.26. (Devam)** a-b. Yanal tokmaktama süreci, c-d. İyileştirme sonrası açılan kuyu ve e-f. Ahşap kütüklerin yerleştirilmesi

Probu etki çapının bulunması için farklı delgiler sırasında zemin içerisine 20 cm uzunluğunda metal plakalar saplanmıştır. Prop kanatlarının açık durumunda ulaştığı 11,5 cm yarıçap konumundan itibaren 5'er cm aralıklarla beş adet metal plaka düşey konumda zemine gömülmüştür (Görsel 3.26.). Prop tokmaktama hareketi yaptıkça metal plakalardaki hareket gözlenerek etki yarıçapının 23-25 cm aralığında olduğu tespit edilmiştir.



**Görsel 3.26.** Tokmaktama probu etki yarıçapının tespiti

## 4. BULGULAR

### 4.1. Kum Konisi Deneyleri

Deney hücresine zeminin öngörülen sıklıkta yerleştirilip sulanmasının ardından, yerinde sıklık tayini TS 13872 uyarınca kum konisi deneyi ile hesaplanmıştır (Tablo 4.1.). Tüm referans deneylerinde zemin yerleştirildikten sonra yüzeyden 10-15 cm derinliğinde bir kuyu kazılmış, kuyudan çıkarılan zemin tartılarak içerisinde ikişer adet su muhtevası numunesi alınmıştır. Açılan kuyunun içerisine koninin vanası açılarak yoğunluğu bilinen standart kuru kum boşaltılmıştır (Görsel 4.1.). Bidonda kalan kum ve konide kalan kum miktarı bilinmektedir. Kuyudaki kuru kum toplanıp kuyudan çıkan ıslak numune kuyuya tekrar yerleştirilmiş ve plaka yükleme deneyi için düzenek hazırlanmıştır. Referans deneylerinden elde edilen %34,25, %48,01 ve %67,44 değerlerindeki rölatif sıklıkların çalışmada öngörülen %30, %50 ve %70 ile tutarlı olduğu saptanmıştır.

**Tablo 4.1.** Referans deneylerine ait kum konisi sonuçları

	<b>Dr30-Ref</b>		<b>Dr50-Ref</b>		<b>Dr70-Ref</b>	
Deney Öncesi Kum Miktarı (gr)	6000,00		6000,00		6000,00	
Deney Sonu Kum Miktarı (gr) (Kap içi + koni)	4011,00		4052,00		4337,00	
Çukurdaki Kum Miktarı (gr)	1989,00		1948,00		1663,00	
Std Kumun Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	1,38		1,38		1,38	
Çukurdan Çıkan Yaş Zemin Miktarı (gr)	2240,00		2280,00		1940,00	
Çukur Hacmi (cm <sup>3</sup> )	1441,30		1411,59		1205,07	
Yaş yoğunluk	1,55		1,62		1,61	
<b>Su Muhtevası Değerleri</b>						
Kap No	14	15	1,00	2,00	1,00	numarasız
Dara (gr)	48,70	48,50	66,60	65,30	64,40	65,50
Yaş Numune + Dara (gr)	133,30	131,10	242,90	264,30	232,00	233,40
Kuru Numune + Dara (gr)	128,70	126,80	227,80	249,10	220,70	222,40
Su Muhtevası (%)	5,75	5,49	9,37	8,27	7,23	7,01
Su Muhtevası (%) ortalama	5,62		8,82		7,12	
Zeminin Maksimum Kuru Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	1,54		1,54		1,54	
Çukurdaki Kuru Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,47		1,48		1,50	
Rölatif yoğunluk	34,25		48,01		67,44	



**Görsel 4.1.** Kum konisi deneyi

Gerek iyileştirme öncesi gerekse prop ile iyileştirme sonrasında ahşap takozların yerleştirilmesinin ardından zemindeki sıklık farkını kıyaslayabilmek amacıyla kum konisi deneyleri yapılmıştır. Tablo 4.2.’de görüldüğü üzere eksantrik tokmaktama probu ile yapılan zemin iyileştirme uygulamasına bağlı olarak zeminin sıklık değerlerinde ciddi bir artış saptanmıştır. Deney tipindeki kısaltmalarda, “Dr” ile başlayan ifadeler başlangıç zemin sıklılığını tanımlarken, “3D, 4D ve 5D” ifadeleri net çap 20 cm olmak üzere merkezden merkeze iyileştirme aralığını belirtmektedir. Tüm kum konisi deneylerinin ortalamasına göre %6 su muhtevastaki silis kumunda mevcut şartlar altındaki en fazla rölatif sıklık artışı %30,27 değeriyle 3D aralıklarla teşkil edilen yanal tokmaktama neticesinde %30 başlangıç sıklılığında görülmüştür. Ortalama %30, %50 ve %70 başlangıç sıklılığındaki zeminlere yanal tokmaktama yapıldığında sıklık değerlerinde sırasıyla; %21,07, %12,43 ve %16,21 mertebelerinde artış elde edilmiştir. Uygulama aralığının artmasıyla birlikte doğal olarak tüm durumlardaki sıklık artış oranlarında azalma meydana gelmiştir. %50 başlangıç sıklılığında diğer durumlara kıyasla kısmen daha düşük artış oranları tespit edilmiştir. Bu durumun, referans zeminlerdeki plaka yükleme deneyleri ve kesme kutusu deneyleri ile paralel olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.2.** Eksantrik tokmaktama probuyla iyileştirme sonrasında zeminin rölatif sıklık değerlerindeki artış

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	51,7	69,07	17,36
Dr50_4D	51,9	62,55	10,65
Dr50_5D	52,42	58,71	6,29

**Tablo 4.3. (Devam)** *Eksantrik tokmaktama probuyla iyileştirme sonrasında zeminin rölatif sıklık değerlerindeki artış*

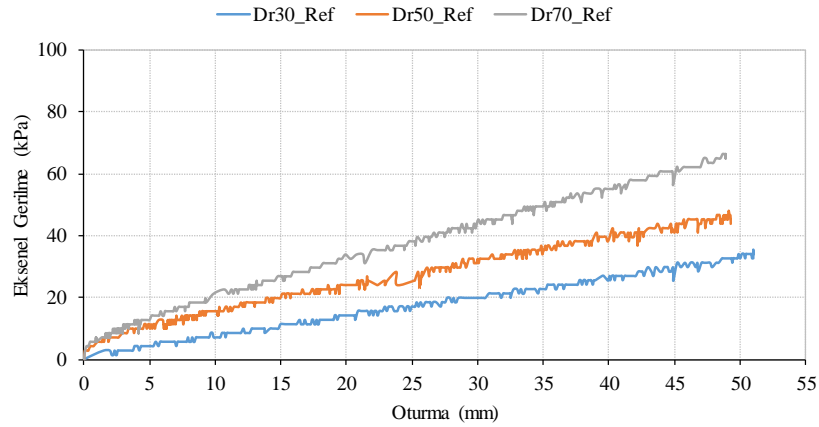
Dr70_3D	70,92	92,84	21,92
Dr70_4D	69,64	85,01	15,37
Dr70_5D	74,43	82,61	8,17
Dr30_ort	32,81	53,88	21,56
Dr50_ort	51,01	63,44	12,43
Dr70_ort	70,61	86,82	16,21

#### 4.2. Plaka Yükleme Deneyleri

Üç farklı sıklık değerindeki referans deneylerinden elde edilen plaka yükleme sonuçlarına ait aksenal gerilme-oturma grafikleri Şekil 4.1.a.'da verilmiştir. Her ne kadar grafiklerde hidrolik pistonu yağ akışını sağlayan manuel güç ünitesinden kaynaklanan kısmi dalgalanmalar görülse de bu durum genel eğilimi değiştirmemektedir. LVDT konumları dolayısıyla her deneyde ulaşılan 45 mm oturma seviyesi baz alındığında %30, %50 ve %70 sıklık değerleri için yüzeyde sırasıyla 25,44 kPa, 40,99 kPa ve 56,53 kPa aksenal gerilme mertebeleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre sıklık artışıyla birlikte aynı oturma seviyesi için yaklaşık doğrusal bir eğilimle aksenal gerilmenin arttığı görülmüştür. Yükleme yapılan noktadan zemin içerisine ilerledikçe azalan gerilme değişimi ise yine sıklık değerlerine bağlı olarak Şekil 4.1.b.'de verilmiştir. Bu noktada, yüzey gerilmesi ile kıyaslandığında %30 ve %70 sıklık değerleri için sırasıyla 25 cm ve 50 cm derinliklerde ortalama %10 ve %60 gerilme azalması seviyelerinde benzer bir davranış elde edilirken, yine yüzeydeki gerilmeye kıyasla %50 sıklık için 25 cm derinlikte %53 ve 50 cm derinlikte %77 oranında bir gerilme azalması tespit edilmiştir. Bu durum, kesme kutusu deneylerinde olduğu gibi %50 sıklık için daha gevşek (%30) ve daha sıkı (%70) yoğunluklardan farklı bir davranış olduğunu doğrulamaktadır. Mevcut şartlar altında 20 cm derinlikten itibaren %30 ve %50 sıklıklardaki zemin içi gerilme değerlerinin benzer olduğu görülmektedir.

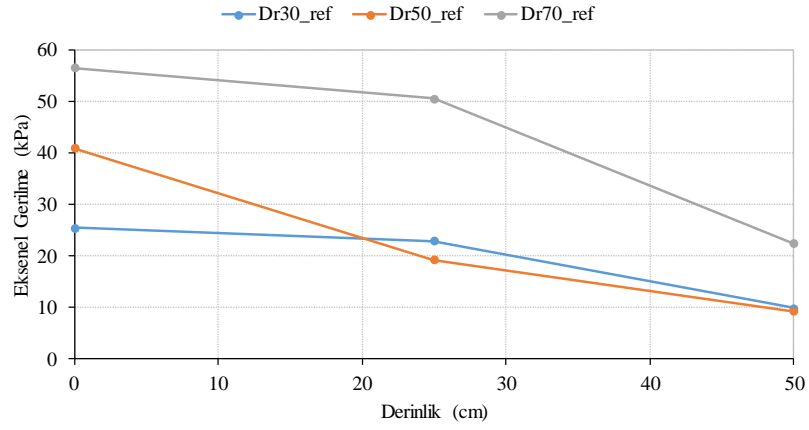
Belirlenen noktalarda tokmaktama probuyla yanal kompaksiyon uygulanıp iyileştirme yapıldıktan sonra ahşap takoz yerleştirilen zeminlerde, referans deneylerindeki düzenek kurularak zeminin taşıma gücünün hesaplanması amacıyla büyük ölçekli plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Bu sayede, sıklık değeri ve delgi mesafesinin iyileştirme tekniği üzerindeki etkisi saptanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen yüzeydeki aksenal gerilmeye bağlı oturma grafikleri aynı koşullar altındaki referans davranışlarıyla birlikte Şekil 4.2.a-c.'de verilirken, 45 mm oturma mertebesine

karşılık gelen yüzeydeki eksenel (düşey) gerilme değerleri Şekil 4.2.d’de sunulmuştur. Mevcut şartlar altında 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 ulaşılırken, referansa kıyasla en yüksek artış 5,94 oranıyla %30 sıklıkta 3D uygulamasında gözlenmiştir. Tablo 4.3.’te verilen her bir durumun referansına göre artış miktarları dikkate alındığında 3D, 4D ve 5D uygulama mesafeleri için sırasıyla ortalama; 4,62, 2,09 ve 2,31 kat kapasite artışı elde edilirken, %30, %50 ve %70 başlangıç sıklığı için ortalama; 3,80, 1,99 ve 3,23 mertebelerinde artış tespit edilmiştir. 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.



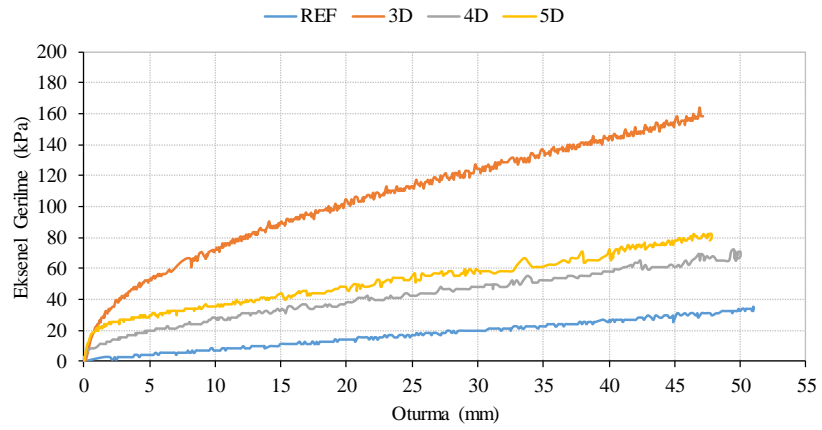
a.

Şekil 4.1. Referans deneylerine grafikler; a. Yüzeydeki gerilme-oturma değişimi ve b. Derinliğe bağlı gerilme değişimi



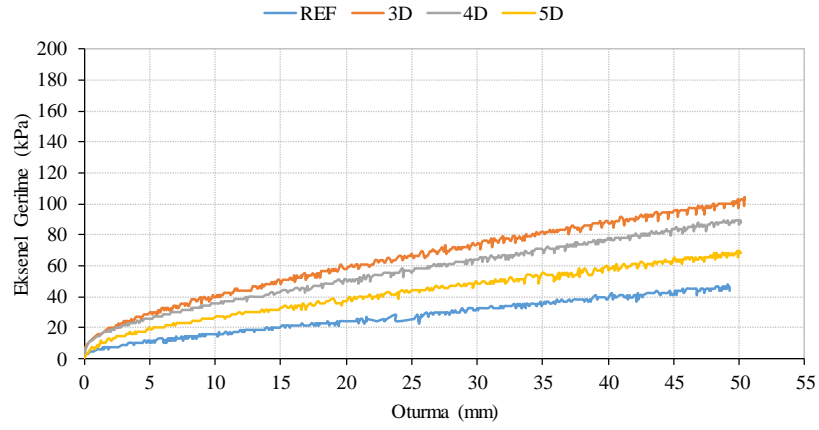
b.

**Şekil 4.1. (Devam)** Referans deneylerine grafikler; a. Yüzeydeki gerilme-oturma değişimi ve b. Derinliğe bağlı gerilme değişimi

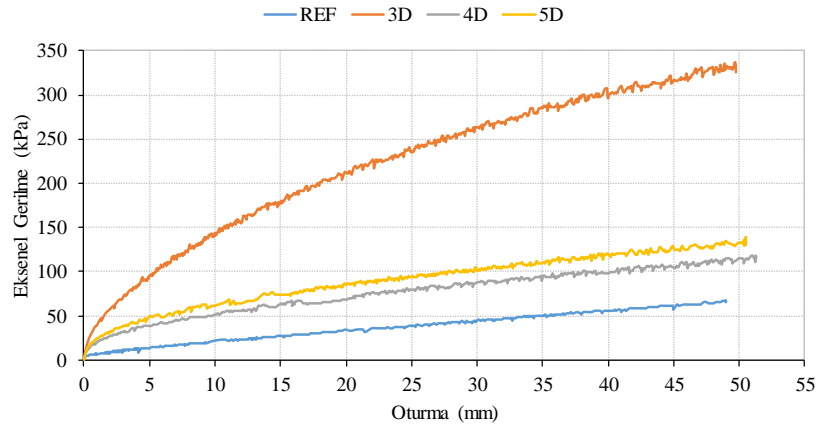


a.

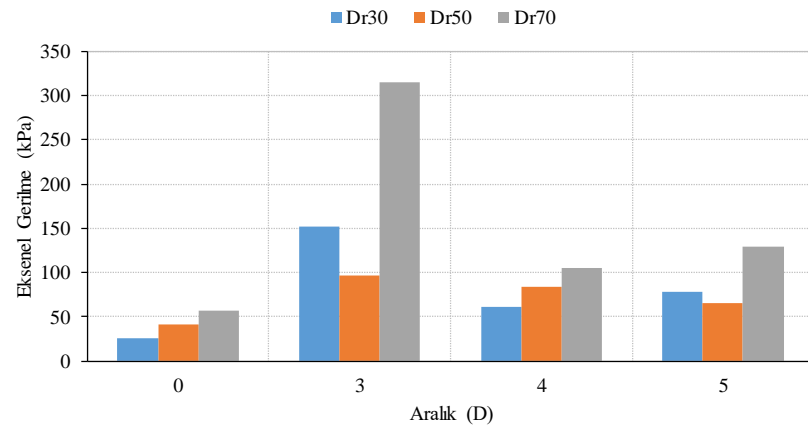
**Şekil 4.2.** Plaka yükleme deneylerinden elde edilen yüzeydeki aksel gerilme-oturma değişimi; a. %30  $D_r$ , b. %50  $D_r$ , c. %70  $D_r$  ve d. 45 mm oturmaya karşılık gelen yüzey gerilmesi grafiği



b.



c.



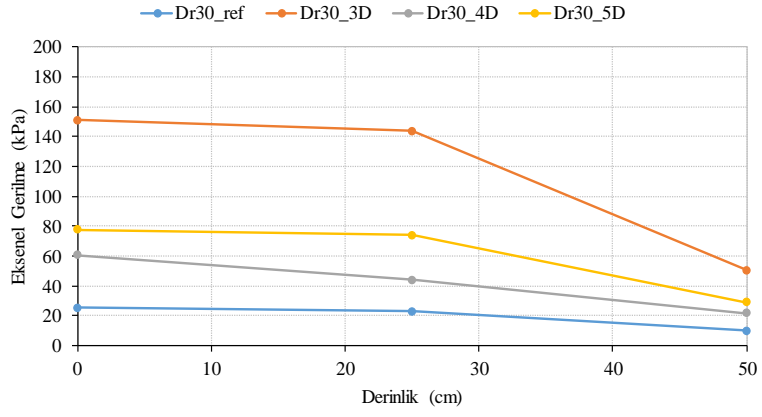
d.

**Şekil 4.2. (Devam)** Plaka yükleme deneylerinden elde edilen yüzeydeki eksenel gerilme-oturma değişimi; a. %30  $D_r$ , b. %50  $D_r$ , c. %70  $D_r$  ve d. 45 mm oturmaya karşılık gelen yüzey gerilmesi grafiği

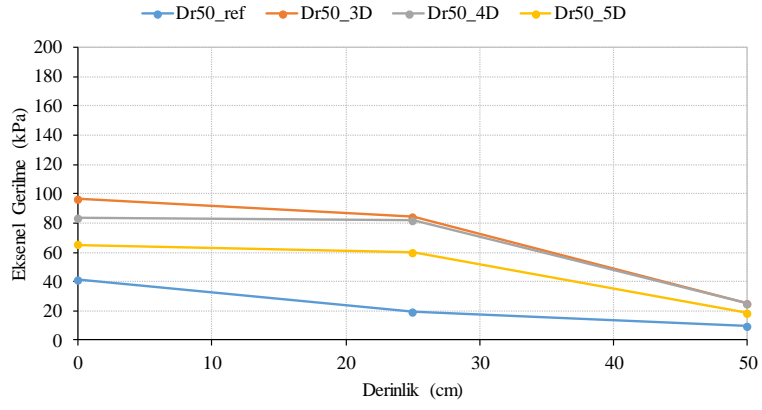
**Tablo 4.3.** İyileştirme sonrasında taşıma kapasitesinde referanslara göre artış oranları

Uygulama Aralığı	Dr30	Dr50	Dr70	Ortalama
3D	5,94	2,34	5,58	4,62
4D	2,39	2,03	1,85	2,09
5D	3,06	1,59	2,28	2,31
Ortalama	3,8	1,99	3,23	

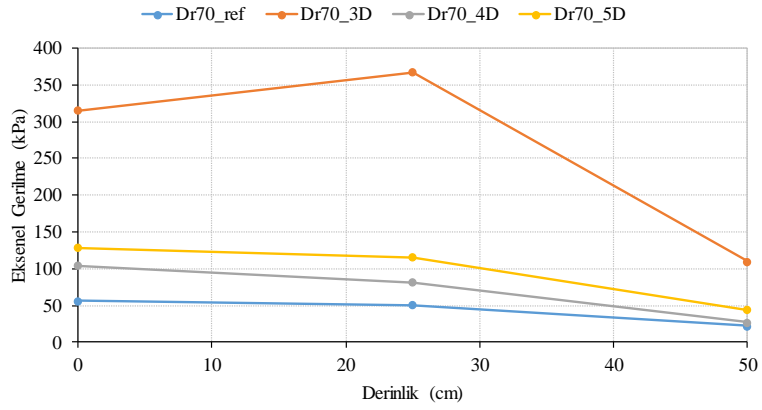
Yükleme yapılan merkez noktadan zemin içerisine ilerledikçe değişen gerilme değerleri yine sıklık değerlerine bağlı olarak Şekil 4.3.'te, yüzeydeki gerilmeye bağlı azalma yüzdeleri ise Tablo 4.4.'te verilmiştir. Tokmıklama probuyla iyileştirilen derinliğin orta noktasına karşılık gelen 25 cm derinlikte yüzeydeki gerilmeye oranla sıklık ve aralık değişkenlerine göre %2,15 ile %52,90 arasında bir azalma elde edilmiştir. Gerilme azalmasının düşük kaldığı uygulamalar yanıl kompaksiyonun daha efektif olduğu durumları göstermektedir. Örneğin 25 cm derinlikteki en etkin uygulama diğer uygulamaların aksine yüzeye kıyasla %16,50 artış ile 367,16 kPa mertebesine ulaşan %70 sıklıktaki 3D aralıklı iyileştirmede sağlanmıştır. Prop ucuna ulaşan 50 cm derinlikte ise artık yanıl kompaksiyon etkisini yitirdiği için %60,89 ile %77,18 seviyelerinde azalma meydana gelmiştir. Düşeydeki gerilme dağılımı dikkate alındığında da %50 sıklık için diğer durumlara kıyasla farklılaşan bir sonuç gözlenmektedir.



a.



b.



c.

**Şekil 4.3.** Plaka yükleme deneylerinden elde edilen derinliğe bağlı gerilme değişimi; a. %30  $D_r$ , b. %50  $D_r$  ve c. %70  $D_r$

**Tablo 4.4.** *Yüzeydeki gerilmeye kıyasla yüzde cinsinden derinliğe bağlı zemin içi gerilme azalmaları*

Uygulama Tipi	25 cm	50 cm
Dr30_Ref	10,04	60,89
Dr30_3D	4,99	66,58
Dr30_4D	27,63	63,98
Dr30_5D	4,51	62,62
Dr50_Ref	52,9	77,18
Dr50_3D	12,41	74,12
Dr50_4D	2,15	69,93
Dr50_5D	7,86	71,53
Dr70_Ref	10,59	60,22
Dr70_3D	16,50*	65,08
Dr70_4D	21,8	74,12
Dr70_5D	9,95	65,49

\* D<sub>r70\_3D</sub> uygulamasında 25 cm derinlikte artış gözlenmiştir.

Bazı deneylere ait plaka yükleme deneyi sonunda elde edilen fotoğraflar Görsel 4.2.'de verilmiştir.



a.

b.



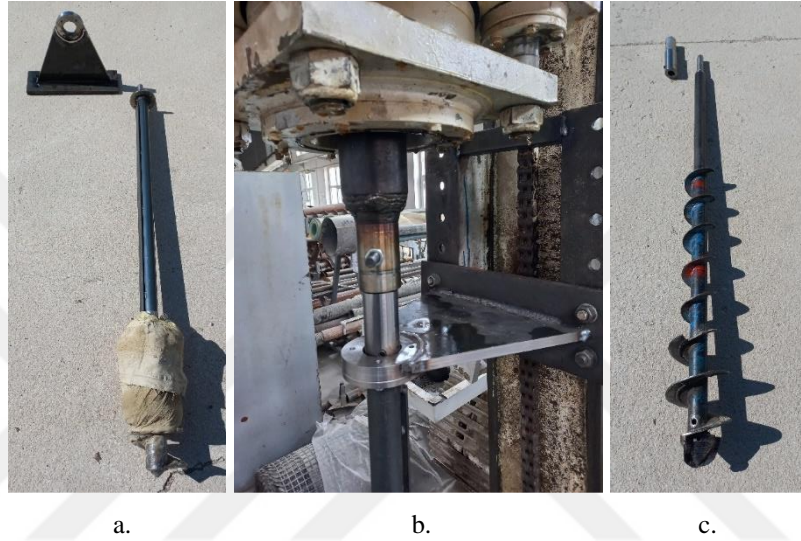
c.

d.

**Görsel 4.2.** *Bazı deney sonu fotoğrafları; a. D<sub>r30\_ref</sub>, b. D<sub>r30\_3D</sub>, c. D<sub>r50\_4D</sub> ve d. D<sub>r70\_5</sub>*

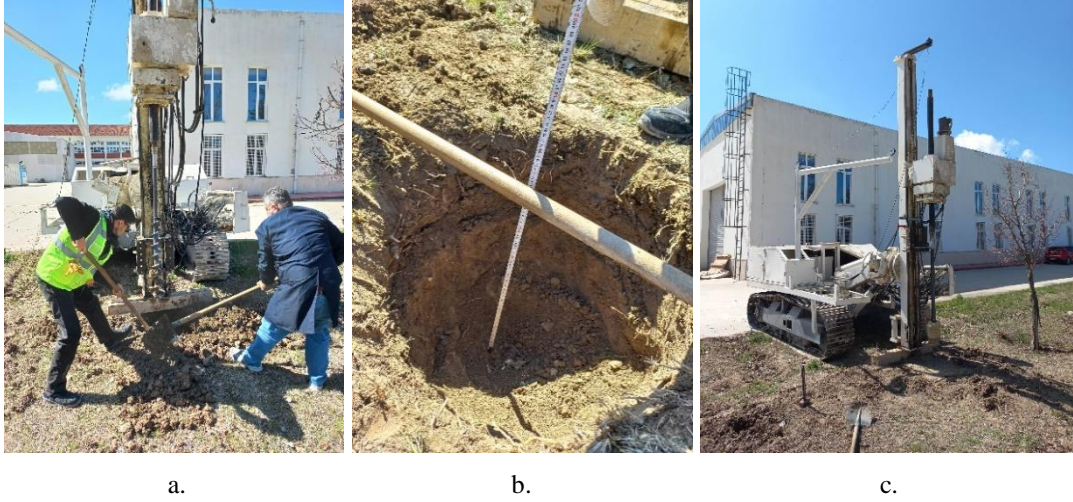
### 4.3. Arazide Yapılan İyileştirme Denemeleri

Laboratuvar deneylerinin tamamlanmasının ardından eksantrik tokmaktama probunun envanterde bulunan sondaj makinesine montaj çalışmalarına geçilmiştir. İlk olarak probu sondaj makinesinin kulesine sabitlemek amacıyla trapez kesitli bağlantı elemanı üretilmiş ve dört adet cıvatayla kule üzerindeki hareketli profillere montajlanmıştır. (Görsel 4.3.)



**Görsel 4.3.** Sondaj makinesi üzerinde yapılan değişiklikler; a. Prop ve trapez bağlantı plakası, b. Bağlantı detayı ve c. Burgu

Kampüs içerisinde arazi uygulamalarının yapıldığı alandaki ilk 10 metrelik zemin profilinde yer yer ince kum çakıl bantları yer alsada yumuşak ve orta katı kıvamda siltli kil bulunmaktadır. 3 m derinlikte ise yer altı su seviyesi yer almaktadır. Ön laboratuvar çalışmalarında tecrübe edildiği üzere killi zeminde probun zorlanacağı düşünülerek yüzeyde çalışılmaya karar verilmiş ve 3 adet kuyuda deneme çalışması yapılmıştır. İlk olarak burgu yardımıyla yakın noktalardan delgi yapıldıktan sonra kürekle boşaltılarak 70 cm çap ve 70 cm derinlikte bir kuyu açılmıştır (Görsel 4.4.a-b.). Kuyu hacmi hesaplandıktan sonra laboratuvar çalışmalarında kullanılan kuru silis kumu dökülerek yine %10 su eklenmiş ve prop ile iyileştirme yapılmıştır (Görsel 4.4.c.).



**Görsel 4.4.** a. Delgi işlemi, b. Boşaltılmış kuyu ve c. Kum dolu kuyu ve prop adapte edilmiş sondaj makinesi

İkinci kuyuda doğal halde bulunan killi zemin gevşetilerek yerinde bırakılmış, üçüncü kuyu ise prop ile direkt olarak killi zeminde hem delgi hem de iyileştirme yapılmaya çalışılmıştır. Eksantrik tokmaklama probu tüm kuyularda 62 devir/dk dönme hızı ve 27 cm/dk delgi hızı ile kullanılmıştır. Nemli silis kumu içeren birinci kuyuda herhangi bir sorunla karşılaşmadan 50 cm derinliğinde 23 cm çapında iyileştirme rahatlıkla tamamlanmıştır (Görsel 4.5.a-b.). Yüze kil yapışmasından dolayı prop çadırında bazı sorunlar gözlene de killi zeminin gevşetildiği, ayrıca ağaç kökleri bulunan ikinci kuyuda da iyileştirme tamamlanarak aynı derinlik ve çapa ulaşılmıştır (Görsel 4.5.c-d.). Doğal killi zeminde ise sadece 20 cm ilerlenmesine rağmen prop ciddi anlamda zorlanmış, çadır ve şambreller yırtılmış, metal uç delicisi krank bağlantısından koparak zemin içerisinde kalmıştır (Görsel 4.5.e-f.). Dolayısıyla, arazide 3 farklı kuyuda yapılan deneme çalışmalarında eksantrik tokmaklama probunun sondaj makinesiyle uyumlu biçimde çalıştığı, kumlu zeminde hızla efektif sonuç alındığı görülmüştür. Gevşetilmiş killi kuyudan elde edilen tecrübe doğrultusunda belirli seviyeye kadar silt-kil içeren düşük su muhtevastaki zeminlerde kullanılabileceği ancak mevcut kesitlerle doğrudan siltli ve killi zeminlerde kullanım imkanı olmadığı belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda ince malzeme oranı değişimine bağlı olarak bu içerik tespit edilebilir. Sondaj makinesine sabitlenen prop boyutları ve buna bağlı olarak kesit detayları büyütülerek daha geniş ve derin iyileştirme kolonları elde edilebilir. Açılan kuyular uygun granüler malzeme veya beton ile doldurularak gerçek boyutlu arazi yükleme testleri yapılabilir. Prop mekanizması içerisine granüler malzeme besleme ünitesi adapte edilebilir.



a.

b.

c.



d.

e.

f.

**Görsel 4.5.** Araziye açılan deneme kuyuları, a-b. Kumlu zemin, c-d. Gevşetilmiş killi zemin ve e-f. Doğal killi zemin

## 5. TARTIŞMA

Bu bölümde tez sürecinde karşılaşılan sorunlar ve sonuçlara dair elde edilen bulgular tartışılmıştır.

Geoteknik mühendisliği alanında daha çok granüler dane ağırlıklı zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan silindirlerle mekanik stabilizasyon, ağırlıkların belirli yüksekliklerden düşürülmesi suretiyle uygulanan dinamik kompaksiyon veya vibrasyon etkisiyle titreşim oluşturan özel proplar içeren yöntemlerin amacı; doğal halde yetersiz taşıma kapasitesine sahip veya aşırı oturmalar görülen zeminlerde parametrelerin iyileştirilmesidir. Söz konusu konvansiyonel yöntemlerde sadece düşey doğrultuda zemin içerisindeki su ve/veya hava fazı uzaklaştırılarak birim hacim ağırlığı ve sıkılığı artırılmakta, geçirgenliği ve boşluk oranı azaltılmaktadır. Ancak yüzeyden düşey doğrultuda uygulanan bu yöntemler, genellikle sığ iyileştirmelerde tercih edilmekte, derin uygulamalarda kullanımı gereken yerlerde ise yüksek kapasiteli ekipman ve ciddi maliyet gerektirmektedir. Proje kapsamında geliştirilen tokmaktama probunda ise standart bir sondaj makinesine adapte edilen özgün metal aksamı ekipman, sondaj makinesi veya motordan gelen dönme hareketini tokmaktama kanatlarına aktararak doğal haldeki granüler dane ağırlıklı zeminde aynı anda delgi ve yanal doğrultulu iyileştirme yapmaktadır. Prop; hızlı, ekonomik ve efektif iyileştirme imkanına sahip olması bakımından mevcut yöntemlere alternatif oluşturmaktadır. Gerek literatürde yapılan çalışmalar gerekse patent taraması neticesinde bu tip bir ekipman ile karşılaşılmadığından tasarım ve patent başvuruları yapılmıştır.

Tez sürecinde temin edilen yüksek kapasiteli motor ile yapılan denemelerde zemin içerisine 50 cm penetrasyon ve iyileştirme derinliği hedeflenmesine rağmen, probun yaklaşık 20 cm zemin içerisine girdiğinde kanat üst bölgesinin raydan çıkması, krank birleşim noktalarında eğilme problemleri, kesitlerin yetersiz kalması ve koruma çadırındaki yırtılmalar gibi sebeplerle probun yeniden tasarlanarak iki kez daha sıfırdan üretimi gerekmiştir. Söz konusu problemler sebebiyle krank mili, kanatlar, birleşim elemanları ve ray boyutlarının büyütülerek daha mukavemetli prop oluşturulması yönünde çalışmalar yapılmış, çoklu ve tek çıkıntılı krank prensibi üzerine iki farklı tasarımın çalışabilirliği kanıtlanmıştır.

Tamamlanan 12 adet büyük ölçekli plaka yükleme deneyleri sırasında yaklaşık 3,4 m<sup>3</sup> hacimli deney hücresi içerisine her seferinde 1,2 m yüksekliğinde zeminin 10'ar cm tabakalar halinde serilerek sulanması ciddi anlamda iş gücü ve zaman gerektirmiştir.

Zemin hazırlama süreçlerini kolaylaştırmak ve aynı şartlarda zemin özelliklerini elde edebilmek amacıyla kuru zeminin sabit yükseklikten yağmurlamayla dökülmesi ve sulamanın sabit debide pompa yardımıyla fıskiye biçiminde sağlanması iş adımlarını bir miktar kolaylaştırmıştır. Her ne kadar tüm adımlarda aynı süreçler takip edilse de %30, %50 ve %70 başlangıç değerlerinde öngörülen zemin sıklıklarında kum konisi deneyleri sonucunda birkaç yüzdellik farklılıklar tespit edilmiştir. Büyük ölçekli bu tarz deneyler için kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu düşünülen söz konusu başlangıç şartlarındaki kısmi farklılıklar göz önüne alınarak iyileştirme sonrası rölatif sıklıklardaki artış miktarları hesaplanmıştır.

Üç farklı rölatif sıklıkta yapılan kesme kutusu deneylerinde olduğu gibi iyileştirme sonrası ve öncesinin karşılaştırıldığı kum konisi ve plaka yükleme deneylerinde de %50 başlangıç rölatif sıklığındaki iyileştirme seviyeleri %30 ve %70 rölatif sıklık değerlerine göre kısmen düşük seviyede kalmıştır. Bu durum, yanal tokmaktama etkisinin hem oldukça gevşek olan %30 başlangıç rölatif sıklığında hem de zaten orta sıklığın üst sınırında yer alan %70 değerinde çok daha etkin olduğunu kanıtlamaktadır. Mevcut şartlar altında kötü derecelenmiş kumun dane yapısı, yüzey pürüzlülüğü ve su içeriği gibi etkenlerin içsel sürtünme açısı, kilitleme etkisi ve dilatansi davranışı üzerindeki etkisinin %30 ve %70 sıklıktaki iyileştirme seviyelerinde daha verimli olduğu düşünülmektedir.

Açık formdaki prop kanatlarıyla uyumlu biçimde açılacak kuyular için taban çapı 16 cm'den başlayıp üst çapı 23 cm'ye ulaşan konik probun mevcut şartlar altındaki etki yarıçapı tek doğrultuda maksimum 25 cm gözlenmiş ve prop üst çapına eş değer bir oranda iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla kanatları açık formda "D" çapına ulaşan tokmaktama probu net "3D" çapında ve 2,25 D<sup>2</sup>'lik alanda iyileştirme sağlamaktadır. Her ne kadar bu sonuç en efektif kolon uygulama aralığının merkezden merkeze 1,5D olması gerektiği gibi bir izlenime yol açsa da zemindeki ciddi sıklık artışı sebebiyle bu kadar yakın aralıklarla tokmaktama probunun uygulanma ihtimali ve gerekliliği bulunmamaktadır. Zira merkezden merkeze 3D aralıklarla iyileştirme neticesinde %30'a varan sıklık artışı ve yüzeyde yaklaşık 6 kata ulaşan taşıma kapasitesi artışı elde edilmiştir.

Zemin yüzeyinden derine inildikçe 25 cm seviyesinde %2 ile %53 oranında gerilme azalması gözlenirken, 50 cm derinlikte etkinliğin yitirilmesi neticesinde %75 mertebelerine ulaşan azalmalar meydana gelmiştir. Bu durumun, yüzeyden 25 cm derinliğin probun orta noktasına denk gelmesi sebebiyle yüksek seviyede iyileştirme

sağlanan bölge içerisinde kaldığı, diğer taraftan 50 cm derinliğin prop uç noktasında bulunması sebebiyle iyileştirmenin etkisini yitirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Arazi deneme çukurlarında yapılan gözlemlerde probun mevcut haliyle su içeren siltli ve killi zeminlerde kullanılması durumunda, kuyu yüzeyindeki zeminin çadıra yapışması sonucunda kesitlerin zorlandığı ve çadırın yırtıldığı tespit edilmiştir. Burgu ile gevşetilmiş killi zeminde ve direkt olarak kumlu zeminde ise herhangi bir zorlukla karşılaşılmadan hızlı ve efektif iyileştirme yapılabilmektedir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Granüler zeminlerin birim hacim ağırlığı ve rölatif sıklığındaki artışa bağlı olarak taşıma kapasitesinin arttırıldığı göz önünde bulundurularak bu tez kapsamında; özgün tokmaktama probu tasarlanıp üretilmiş, laboratuvar ve arazi ortamında testleri yapılmıştır. Büyük ölçekli plaka yükleme deneylerinde başlangıç rölatif sıklığı ve yanal tokmaktama kuyu aralıklarının etkisi değerlendirilmiştir. Tez sürecinde elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Tüm yorum ve değerlendirmeler, tez dahilinde kullanılan malzeme ve yöntemlere ilişkin mevcut şartlar altındaki kısıtlamalara göre yapılmıştır.

- Yeterli su içeriğine sahip, gevşek ve orta sıkı granüler zeminlerde sondaj kuyusu içerisinde istenilen derinlikte aynı anda delgi ve yanal doğrultuda kompaksiyon yapabilen tekli ve çoklu prop tasarımları; eksantrik krank mili, merkezi dağıtıcı, kanat bağlantı elemanları, tokmaktama kanatları, ana iskelet, delici uç ve koruyucu kumaştan oluşmaktadır. Tekli krank tasarımında tek bir merkezi dağıtıcı ile hareket kanatlara aktarılıp sıralı kompaksiyon sağlanırken, çoklu krank tasarımında yine krank mili üzerinden hareket kanatlara aktarılmakta ve istenilen kanat sayısı kadar yönde karşılıklı çalışan kanatlarla kompaksiyon sağlanmaktadır.
- Çalışmalarda özgül ağırlığı, minimum ve maksimum birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,65, 14,22 kN/m<sup>3</sup> ve 15,06 kN/m<sup>3</sup> olan %99,38 oranında kum çapında dane içeren kötü derecelenmiş silis kumu (SP) kullanılmıştır. Kesme kutusu deneyleri sonunda kuru ve %6 nemli durum için içsel sürtünme açısı değerleri 35° ve 30° civarında hesaplanmıştır.
- Laboratuvar deneylerinde ilk olarak 150 cm boyutlara sahip küp deney hücresi içerisinde %30, %50 ve %70 rölatif sıklık ile ortalama %6 su muhtevasında hazırlanan zeminlere plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Referans deneyler olarak adlandırılan ve iyileştirme içermeyen bu deneylerde 45 mm oturma seviyesi için yüzeyde sırasıyla, 25,44 kPa, 40,99 kPa ve 56,53 kPa eksenel gerilme elde edilmiştir. Yüzey gerilmesi ile kıyaslandığında %30 ve %70 sıklık değerleri için sırasıyla 25 cm ve 50 cm derinliklerde ortalama %10 ve %60 gerilme azalması seviyelerinde benzer bir davranış elde edilirken, yine yüzeydeki gerilmeye kıyasla %50 sıklık için 25 cm derinlikte %53 ve 50 cm derinlikte %77 oranında bir gerilme azalması gözlenmiştir.

- Yine 3 farklı rölâtif sıklık (%30, %50 ve %70) ile “D” net 20 cm delgi çapı olmak üzere merkezden merkeze 3D, 4D ve 5D aralıklarla her birinde 4 iyileştirme kolonu içeren toplam 9 adet plaka yükleme deneyi yapılmıştır. Bu süreçte, aynı şartlarda hazırlanan zeminlerde öngörülen noktalarda tokmaktama probuyla toplam 36 adet 50 cm derinliğinde iyileştirme kuyusu açılmıştır. Bu kuyulara normal şartlarda arazide granüler dolgu veya beton-betonarme kolon teşkil edilebilecektir. Ancak, bu süreçte farklı bir değişkenin etkisini engellemek üzere kuyulara standart ahşap kazık yerleştirilmiştir. Plaka yükleme deneyleri sonucunda mevcut şartlar altında iyileştirme yapılan tüm durumlarda yaklaşık %60 ile %490 gibi ciddi seviyelerde taşıma kapasitesi artışı gözlenmiştir. 45 mm oturma seviyesindeki referansa göre artış miktarları dikkate alındığında 3D, 4D ve 5D uygulama mesafeleri için sırasıyla ortalama 4,62, 2,09 ve 2,31 kat kapasite artışı elde edilirken; %30, %50 ve %70 başlangıç sıklığı için ortalama 3,80, 1,99 ve 3,23 mertebelerinde artış tespit edilmiştir. En efektif veriler 3D aralıklı uygulamalarda meydana gelirken, 4D ve 5D aralıklı uygulamalarda etkinin azaldığı ve birbirine yakın sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. %50 rölâtif sıklıkta ise nispeten düşük değerlere ulaşılmıştır. Ayrıca, tokmaktama probuyla iyileştirilen derinliğin orta noktasına karşılık gelen 25 cm derinlikte yüzeydeki gerilmeye oranla sıklık ve aralık değişkenlerine göre %2,15 ile %52,90 arasında bir gerilme azalması elde edilmiştir.
- Ortalama %30, %50 ve %70 başlangıç sıklığındaki zeminlere yanal tokmaktama yapıldığında rölâtif sıklık değerlerinde sırasıyla, %21,07, %12,43 ve %16,21 mertebelerinde artış elde edilmiştir. Uygulama aralığının artmasıyla birlikte doğal olarak tüm durumlardaki sıklık artış oranlarında azalma meydana gelmiştir.
- İyileştirme sırasında probun kanatları açık pozisyonda kendi çapı kadar iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. 23 cm açılan probun kanat sınırından yine 23 cm iyileştirme (maksimum 25 cm) yaptığı göz önünde bulundurulursa en efektif uygulama aralığı çapın 1,5 katı olacaktır. Ancak zemin sıklığı sebebiyle pratikte bu kadar yakın aralıklarla tokmaktama probunun uygulanma ihtimali ve gerekliliği bulunmadığından, merkezden merkeze 3D (D: kolon çapı) aralık önerilmektedir. Bu durumda, kanatların açık alanına göre 2,25 kat, delgi alanına göre 4,56 kat daha fazla iyileştirme alanı sağlamaktadır.

Sonuç olarak hem büyük ölçekli laboratuvar deneylerinde hem de arazi denemelerinde yeterli su içeriğine sahip granüler zeminlerin yanal tokmaktama probu yardımıyla iyileştirilerek, taşıma kapasitesinin ciddi ölçüde arttırılabileceği kanıtlanmıştır. Bu sayede gürültülü ve titreşim oluşturmeyen, yüksek maliyetli ekipman, sistem, bakım-onarım ve yakıt giderlerine ihtiyaç duymayan, bitişik nizam yapılardan en ucra bölgelerdeki uygulamalara kadar kolayca taşınıp standart bir sondaj makinesiyle uygulanabilen bir yöntem geliştirilmiştir. Tüm detaylarıyla yeni bir zemin iyileştirme yöntemi içeren bu projede gelecek çalışmalarda kullanılmak üzere tartışma bölümünde geçen kısımlara ek olarak aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Gelecek çalışmalarda; su jeti, enjeksiyon sistemi, granüler dolgu beslemesi, uç tokmağı için yatay eksantrik mil veya havalı piston eklenmesi hakkında yapılacak değerlendirmelerle yöntem geliştirilebilecektir. Bu sayede, probun zeminlere özgü modüler üst versiyonlarının geliştirilmesi hedeflenmektedir.
- Gevşetilmiş killi kuyudan elde edilen tecrübe doğrultusunda belirli seviyeye kadar silt-kil içeren düşük su muhtevsındaki zeminlerde probun kullanılabileceği ancak mevcut kesitlerle doğrudan siltli ve killi zeminlerde kullanım imkanı olmadığı belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda ince malzeme oranı değişimine bağlı olarak bu limit ince malzeme içeriği tespit edilebilir. Sondaj makinesine sabitlenen prop boyutları ve buna bağlı kesit detayları büyütülerek daha geniş ve derin iyileştirme kolonları elde edilebilir. Açılan kuyular uygun granüler malzeme veya beton ile doldurularak gerçek boyutlu arazi yükleme testleri yapılabilir. Prop mekanizması içerisine granüler malzeme besleme ünitesi adapte edilebilir.
- Zemin tipi, zemin su muhtevası, zemindeki ince malzeme oranı, prop kanat sayısı, devir hızı ve penetrasyon hızı gibi farklı etkenlerin incelendiği akademik çalışmalar sonucunda dinamik kompaksiyonda kullanılagelen enerji hesabında olduğu gibi tokmaktama yöntemiyle zemin iyileştirme metodu için de hesap kriterleri söz konusu olabilecektir.

## KAYNAKÇA

- Abdizadeh, D., Pakbaz, M. S., Nadi B. (2020). Model test study for dynamic compaction in slope on the bearing capacity of the strip footing. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25 (5), 1700-1704.
- Abdizadeh, D., Pakbaz, M. S., Nadi B. (2021). Numerical modeling of lateral dynamic compaction on the slope in dry sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25 (2), 398-403.
- Ackermann, H. P. (2009). Compaction device and method for compaction ground Patent No. US20120301221A1.
- Allouzi, R., Bodour, W., Alkloub, A., Tarawneh, B. (2018). Finite-element model to simulate ground-improvement technique of rapid impact compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 172 (1), 44-52.
- Arslan, H., Baykal, G., Ertas, O. (2007). Influence of tamper weight shape on dynamic compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 11 (2), 61-66.
- 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.
- Cheng, Q., Pan, S. (2009). Directional vibration wheel of vibratory roller. Patent No. CN102021876B.
- Bo, M. W., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Leong, M., Disfani, M. M. (2014). Densification of land reclamation sands by deep vibratory compaction techniques. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 8.
- Bowles, J.E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. 2. Edition, McGraw-Hill.
- Cheng, Y., Zhu, H., Jing, F., Du, G., Yan, C., Liu, Z. (2017). Experimental research of spatial variation of compaction effect on vibratory probe compaction method for ground improvement. *Procedia Engineering*, 189, 466-471.
- Cristovao, A., Figueres, M., Pinto, A., Rosa, P. (2016). Case study: Preliminary field testing as a basis of design for ground improvement using vibrocompaction at Lomé Container Terminal Togo. *Procedia Engineering*, 142, 1451-1459.
- Dobrzycki, P., Ivannikov, A. L., Rybak, J., Shkodkina V. O., Tyulyaeva, Y. (2019). The impact of rapid impulse compaction (RIC) of large non-cohesive material deposits on the surrounding area. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 362 012123.
- Dobrzycki, P., Rychlewski, P. (2018). Site control procedures for applicability and quality of rapid impulse compaction. *MATEC Web of Conferences*, 251.
- Duan, W., Cai, G., Liu, S., Yuan, J., 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.

- Duan, Z., He, L. (2007). Small size self-walking type vibration compaction roller. Patent No. CN100503974C.
- Edman, P., Laugowitz, N. (2014). Vibration excitor for vibrated roller and the construction machinery with the vibration excitor, Patent No. CN104695310B.
- Federal Highway Administration Geotechnical Engineering, (2017). Ground Modification Methods Reference Manual – Volume I, *FHWA-NHI-16-027*, Circular No. 13.
- Feng, S., Du, F., Shi, Z., Shui, W., Tan, K. (2015a). Field study on the reinforcement of collapsible loess using dynamic compaction. *Engineering Geology*, 185, 105-115.
- Feng, S., Shui, W., Tan, K., Gao, L., He, L., (2011), Field Evaluation of Dynamic Compaction on Granular Deposits, *J. Perform. Constr. Facil.*, 2011, 25(3): 241-249, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.19435509.0000160.
- Feng, S., Tan, K., Shui, W. (2015b). Dynamic compaction of ultra-high energy in combination with ground replacement in coastal reclamation areas. *Marine Georesources and Geotechnology*, 33 (2), 109-121.
- 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.
- Ghanbari, E., Hamidi, A., Improvement parameters in dynamic compaction adjacent to the slopes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 233-236.
- Ghorbani, J., Nazem, M., Carter, J.P., (2020). Dynamic compaction of clays: numerical study based on the mechanics of unsaturated soils. *International Journal of Geomechanics*, 20 (10): 04020195.
- 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.
- Hu X., Gao Z., Liu F., Tao Y., Xu D., Du Y., Gou C., Li M. (2020). The optimal combination form of vacuum pre-loading combined with electro-osmosis and with dynamic compaction method on the improvement of dredged slurry. *Marine Georesources & Geotechnology*, <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1820644>.
- Jia, M., Cheng, J., Liu, B., Ma, G. (2021). Model tests of the influence of ground water level on dynamic compaction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80 (4), 3065-3078.
- Jiang, S., (2017). Civil engineering rammer. Patent No. CN207277309U.
- Kundu, S., Viswanadham, B. V. S. (2015). Studies to evaluate the impact of tamper on the depth of improvement in dynamic compaction. *15th Asian Region Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, 2033-2037.

- Li, J., Zhou, C., Xin, G., Long, G., Zhang, W., Li, C., Zhuang, P., Yao, Z. (2022). Study on reinforcement mechanism and reinforcement effect of saturated soil with a weak layer by DC. *Applied Sciences*, 12 (19), 9770.
- Liu, J., Yuan, J., Xiong, Hu., Chen, W., (2008). Dynamic compaction treatment technology research of red clay soil embankment in southern mountains. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 50-57.
- Mayers, A. (2009). Vibration acceptance criteria. *Australian Bulk Handling Review*, 54.
- Mei, Y., Zhang, S., Hu, C., Wang, X., Yuan, Y., Zhao, L., Zhou, D., (2021). Field test study on dynamic compaction in treatment of a deep collapsible loess foundation. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 80, 8059-8073, <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02343-x>.
- Lopez-Querol, S., Peco, J., Arias-Trujillo, J. (2014). Numerical modeling on vibroflotation soil improvement techniques using a densification constitutive law. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 65, 1-10.
- Massarsch, K. R. (1991). Deep soil compaction using vibratory probes. *ASTM Special Technical Publication*, 1089, 297-319.
- Mayers, A. (2009). Vibration acceptance criteria. *Australian Bulk Handling Review*, 54.
- Menard, L. ve Broise, Y. (1975). Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation. *Geotechnique*, 25 (1), 3-18.
- Mohammed, M. M., Roslan, H., Firas, S. (2013). Assessment of rapid impact compaction in ground improvement from in-situ testing. *Journal of Central South University*, 20 (3), 786-790.
- 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.
- Nagaraj, T.S. ve Miura, N. (2001). *Soft Clay Behaviour* (2). Rotterdam: A.A. Balkema.
- 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.
- Nilov, V., Zhulai, V., Tyunin, V., Schienko, A. (2022). Substantiation of the necessity of creating three-drum road rollers. *Transportation Research Procedia*, 63, 2767–2772.
- Peter G. Nicholson, (2015). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann Elsevier.
- Pokharel, S. K. (2010). Experimental study on geocell-reinforced bases under static and dynamic loading. Doktora tezi, *University of Kansas*. 349 sayfa.
- Papadopoulos, S. ve Eliahu, U. (2018). Deep power compaction vibro-compaction testing program at Treasure Island. *Geotechnical Special Publication*, 298, 150-162.

- Rizzon, M. M., Wagner, A. C., Godoy, V. B., Moreira, E. B., Consoli, N. C. (2021). The effect of heavy tamping on structured residual clay site. *Geotechnical and Geological Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01798-9>.
- Rollins, K.M. ve Kim, J., (2010). Dynamic Compaction of Collapsible Soils Based on U.S. Case Histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(9), 1178-1186.
- 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.
- Sękowski, J., Kwiecień, S., Kanty, P. (2018). The influence of dynamic replacement method on the adjacent soil. *International Journal of Civil Engineering*, 16 (10), 1515-1522.,
- Jiaqi, Z. ve Zhengqiang, H., (2012). Dynamic compaction machine capable of automatically hooking and unhooking. Patent No. CN202787213U.
- Shen, M., Martin, J. R., Ku, C., Lu, Y. (2018). A case study of the effect of dynamic compaction on liquefaction of reclaimed ground. *Engineering Geology*, 240, 48-61.
- 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.
- 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.
- Tarawneh, B., Sbitnev, A., Hakam, Y. (2017). Lessons learned from 11 million m<sup>2</sup> of dynamic compaction and replacement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 170 (4), 208-217.
- Tarasov, V. N. (2009). Method for dynamic compaction of soils and materials with rollers (versions) and device for its realization. Patent. No. RU2405881C1.
- TS 13872, Yerde yapılan zemin kontrol deneyleri - Zemin yoğunluğunun ve birim hacim ağırlığının, kum konisi yöntemiyle belirlenmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Bakanlıklar, Ankara, 2019.
- TS EN ISO 17892-3, Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 3: Tane yoğunluğunun belirlenmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Bakanlıklar, Ankara, 2016.
- TS EN ISO 17892-4, Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 4: Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Bakanlıklar, Ankara, 2016.
- TS EN ISO 17892-10, Geoteknik etüt ve deneyler - Zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 10: Doğrudan kesme deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Bakanlıklar, Ankara, 2019.
- Wang J. (2017). A kind of vertical vibration roller, Patent No. CN107059560A.

- Wang, J., Cui, Y., Li, Q. (2019). Hybrid numerical investigation on soil-hammer interaction during dynamic compaction. *Advances in Civil Engineering*, 4563134.
- Wu, S., Wei, Y., Zhang, Y., Cai, H., Du, J., Wang, D., Yan, J., Xiao, J. (2020). Dynamic compaction of a thick soil-stone fill: Dynamic response and strengthening mechanisms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129, 105944.
- Xu, G., (2018). Rammer device. Patent No. CN108487223B.
- Xu, Y., Hu, P. (2017). Dynamic compaction studied by in-situ soil test in Zhengzhou airfield. *AIP Conference Proceedings*, 1890, 040022.
- Zhou, Q., (2012). Power dynamic compaction tool. Patent No. CN102535314B.
- Yao, Z., Zhou, C., Lin, Q., Yao, Kai., Satchithanathan, U., Lee, F. H., Tang, A. M., Jiang, H., Pan, Y., Wang, S. (2022). Effect of dynamic compaction by multi-poining tamping on the densification of sandy soil. *Computers and Geotechnics*, 151, 104949.
- http-1:** <https://www.mynet.com>, (Eriřim tarihi: 13.05.2023)
- http-2:** <https://www.civildigital.com>, (Eriřim tarihi: 14.05.2023)
- http-3:** <https://www.allaboutcivil.org>, (Eriřim tarihi:13.05.2023)
- http-4:** <https://www.fastpulseplanthire.co.za>, (Eriřim tarihi: 13.05.2023)
- http-5:** <https://santiyede.com>, (Eriřim tarihi: 13.05.2023)
- http-6:** <https://allaboutcivil.org/>, (Eriřim tarihi: 13.05.2023)
- http-7:** <https://www.ceyrekmuhendis.com>, (Eriřim tarihi:14.05.2023)

## ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0003-0718-5792

Adı Soyadı: Muhammed Sefa Uçun

Yabancı dil: İngilizce

### Eğitim Geçmişi

- Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü – 3,85 / 4,00  
2020
- Isparta Özel Öbek Boğaziçi Anadolu Lisesi – 2016

### Mesleki Geçmiş

- 07.2018, Metro Mühendislik LTD. TİC. ŞTİ. – Yapı Stajı – Yemekhane inşaatı
- 09.2019, Evrensel Yol – 1923 İnşaat İş Ortaklığı – Isparta-Burdur 14 km’lik yol inşaatı – Ulaştırma Stajı
- 01.2020, Süleyman Demirel Üniversitesi Ulaştırma Laboratuvarı – Ulaştırma Stajı

### Yayınları ve Bilimsel Faaliyetleri

- Evirgen, B., Kara, H. O., Uçun M. S., Gültekin, A. A., Tos, M., Öztürk, V. (2023). “The Effect of the Geometrical Properties of Geocell Reinforcements between a Two-Layered Road Structure under Overload Conditions”, *Studies in Construction Materials (Gönderildi)*.
- Uçun M. S., Yalınız, R. G., Evirgen, B. “Development of a Compaction Probe along Lateral Direction”, 9th. Geotechnical Symposium, 22-24 November 2023, Istanbul, Turkey (Kabul edildi).

### Ulusal ve Uluslararası Projeler

- “Eksantrik Tokmaktama ile Zemin İyileştirme” TÜBİTAK 1002 – Hızlı Destek Programı, 122M098 (15.04.2022- 15.02.2023), Bursiyer, tamamlandı.

#### Burslar

- Etkinlik Destekleri ve Eğitim Bursları Müdürlüđü, TÜBİTAK 2210-A Genel Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı, 01.03.2021-28.02.2023.

#### Patentler

- Evirgen B., Uzun M.S., Yalınız R.G., Tuncan M., “Yanal Kompaksiyon Amaçlı Eksantrik Tokmaktama Probu”, Ulusal Patent Bařvurusu, 2023.
- Evirgen B., Uzun M.S., Yalınız R.G., Tuncan M., “An Eccentric Tamping Probe for Lateral Compaction”, International Patent Application, 2023.

#### Mesleki Birlik/Dernek/Kuruluř yelikleri

- Zemin Mekaniđi ve Geoteknik Mühendisliği Derneđi