



**DİNAMİK KONİ PENETROMETRE İLE
ZEMİNLERİN BAZI MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

Metehan Alp MEMİŞ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İnan KESKİN**

**DİNAMİK KONİ PENETROMETRE İLE ZEMİNLERİN BAZI
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ**

Metehan Alp MEMİŞ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İnan KESKİN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
OCAK 2024**

Metehan Alp MEMİŞ tarafından hazırlanan “DİNAMİK KONİ PENETROMETRE İLE ZEMİNLERİN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İnan KESKİN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından **Oy Birliği** ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/01/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İnan KESKİN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Ali ATEŐ (BAİBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim YUMRUTAŐ (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, **Yüksek Lisans** derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Metehan Alp MEMİŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİNAMİK KONİ PENETROMETRE İLE ZEMİNLERİN BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN TAHMİNİ

Metehan Alp MEMİŞ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İnan KESKİN

Ocak 2024, 80 sayfa

Bu çalışma ile Dinamik Koni Penetrasyon testi (DCP) ile zeminlerin çeşitli mühendislik özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanılmıştır. Bu kapsamda, DCP testi, Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), Serbest Basınç, Deneyi, Direkt Kesme Deneyi, Kompaksiyon Deneyi ve Bender Element Test deneyleri yapılarak elde edilen veriler üzerine ilişkilendirme planlanmıştır. DCP cihazının taşınabilir, ekonomik ve basit çalışma prensiplerine sahip olması saha ölçümlerini kolaylıkla gerçekleştirme imkanı sunmakta olup bu özellikleriyle geoteknik mühendisliğinde çekici bir kullanım potansiyeline sahiptir. Bu nedenle de DCP testi, zeminlerin yerinde özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılacak bir test niteliğindedir. Özellikle gevşek veya suya doymun kumlu zeminlerde bozulmamış zemin numuneleri elde etmenin zor olduğu durumlarda DCP testi, zeminlerin mühendislik özelliklerini tahmin etmek için etkili bir araç olarak kullanılabilir. Literatürde DCP testinin zeminlerin mukavemet ve sıkışabilirlik özelliklerini belirleme konusunda geniş bir çalışma bulunsa da dinamik özelliklerin belirlenmesine

yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, DCP deney verileri kullanılarak zeminlerin mukavemet ve dinamik parametrelerinin tahmin edilmesine yönelik eşitliklerin geliştirilmesi hedeflemiştir. Farklı zemin özelliklerine sahip yapıların benzer deprem koşullarında farklı davranışlar sergilemesi nedeniyle zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Ancak, bu parametrelerin belirlenmesi genellikle yüksek maliyetli deneyler ve cihazlar gerektirdiği için zorluklar yaşanmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın odak noktası, DCP'nin mukavemet ve dinamik parametre tahminindeki kullanılabilirliğini artırmak ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktır. Çalışmanın sonuçlarının, geoteknik mühendisliğinde zemin özelliklerinin değerlendirilmesinde pratik bir yaklaşım sunacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler : Dinamik koni penetrometre, zemin dinamik karakteristikleri, serbest basınç deneyi

Bilim Kodu 91105

ABSTRACT

Master Thesis

ESTIMATION OF SOME ENGINEERING PROPERTIES OF SOILS BY DYNAMIC CONE PENETROMETER

Metehan Alp MEMIS

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Inan KESKIN

January 2024, 80 pages

This study aims to determine the relationships between various engineering properties of soils through the Dynamic Cone Penetration test (DCP). In this context, correlation is planned based on data obtained from DCP tests, California Bearing Ratio (CBR) tests, Unconfined Compression Test, Direct Shear Test, Compaction Test, and Bender Element Test. The portability, economic feasibility, and simple operational principles of the DCP device facilitate field measurements, making it an attractive tool in geotechnical engineering. For this reason, the DCP test is a test that can be widely used to evaluate the in-situ properties of soils. Especially in cases where obtaining undisturbed soil samples in loose or water-saturated sandy soils is challenging, the DCP test can be effectively used to predict the engineering properties of soils. Although there is extensive work in the literature on the DCP test to determine the strength and compressibility properties of soils, studies on determining the dynamic properties are limited. This study aims to develop equations for predicting the strength and dynamic parameters of soils using DCP test data. Determining the dynamic properties of soils is crucial due to the different behaviors exhibited by structures with

different soil properties under similar seismic conditions. However, the determination of these parameters often faces challenges due to the high costs associated with experiments and devices. In this context, the focus of the study is to enhance the usability of DCP in predicting strength and dynamic parameters, providing a cost-effective solution. The results of the study are anticipated to offer a practical approach in evaluating soil properties in geotechnical engineering.

Key Word : Dynamic cone penetrometer, soil dynamic characteristics, unconfined compression test

Science Code : 91105

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, engin bilgi ve tecrübeleriyle beni destekleyen, tezin her aşamasında yanımda olan, bilgisinden, tecrübesinden, deneyimlerinden, kaynaklarından ve ileri görüşünden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. İnan KESKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme, annem Yasemin MEMİŞ'e ve kardeşim Bilgehan Alp MEMİŞ'e, maddi ve manevi desteklerini üzerimden bir an olsun esirgemedikleri için sonsuz bir minnettarlıkla teşekkür ederim. Onların sevgi dolu desteği, bu tez çalışmasının her aşamasında beni motive etti ve başarılı olmamı sağladı. Ailem, her zaman yanımda oldular ve bu süreçte beni cesaretlendirip ilham verdiler. Onların varlığı, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasında önemli bir etken oldu. Teşekkürlerimi ifade etmek için kelimeler yetersiz kalıyor, ama onlara minnettarlığımı ve sevgimi en içten duygularıyla sunuyorum.

Ayrıca, tez çalışmamın tamamlanmasında ve yazılmasında babam Ali MEMİŞ'in de büyük bir rolü oldu. Babamın vefat etmiş olmasına rağmen, onun sevgi, destek ve öğütleri her zaman yanımda oldu. Onun adını burada anarak, bu tezi ona ithaf ediyorum ve onun hatırasını yaşatmaya devam ediyorum.

Sevgili arkadaşım, bilgisayar mühendisi Şevval ULUS'a, tez çalışmamın kapsamında ve tez yazım aşamalarında her daim yanımda olduğu için minnettarlığımı ifade etmek istiyorum. Şevval, sadece mesleki bilgisi ve desteğiyle değil, aynı zamanda samimiyeti ve arkadaşlığıyla da bu süreci daha anlamlı kıldı. Onun destekleri sayesinde bu zorlu yolculukta daha güçlüydüm ve başarıya ulaşabildim. Kendisine olan teşekkür borcumu en içten duygularıyla ifade ediyorum.

Bu tez, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce **KBÜBAP-23-YL-089** Proje numarasıyla desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Kuramsal Temeller ve Araştırma Konusuyla İlişkili Literatür Derlemesi.....	4
BÖLÜM 2.....	17
ÇALIŞMA METEDOLOJİSİ	17
2.1. GİRİŞ	17
2.1. Deneyleerde Kullanılan Zeminlerin Temin Edildiği Lokasyonlar	21
2.1.2. Deneyleerde kullanılan Zeminlerin Özellikleri.....	25
2.2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR	27
2.2.2. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleeri	27
2.2.3. Tane Boyu Dağılım Analizleri	30
2.2.3 Elek Analizi Deneylee.....	32
2.2.4. Kompaksiyon Deneylee	33
2.2.5. CBR Deneylee	35
2.2.6. UCS Deneylee	37
2.2.7. DCP Deneylee	40
2.2.8. Bender Element Test Deneylee	42
2.2.9. Kesme Kutusu Deneylee.....	43

	<u>Sayfa</u>
2.2.10. Regresyon Analizleri	45
BÖLÜM 3	48
DCP İLE ZEMİNLERİN BAZI ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER	48
3.1. DCP-CBR İLİŞKİSİ	49
3.2. DCP - q_u İlişkisi	52
3.3. DCP-c İlişkisi	55
3.4. DCP-IP İlişkisi.....	58
3.5. DCP-Gmax İlişkisi.....	61
3.6. DCP-Vs İlişkisi.....	64
3.7. DCP- Φ İlişkisi	667
BÖLÜM 4.....	70
SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Proje Akış Şeması.....	4
Şekil 1.2. Düşü sayısı ile batma derinliğinin değişimini gösteren bir grafik.....	8
Şekil 2.1. Dinamik konik penetrasyon deney cihazı	18
Şekil 2.2. Çalışma kapsamında planlanan deneyler.	19
Şekil 2.3. Deneylerde Kullanılan Zeminlerin Temin Edildiği Lokasyonlar.....	22
Şekil 2.4a. Likit Limit Düşen Koni Yöntemi	28
Şekil 2.4b. Likit Limit Etüvde Kurutulma İşlemi.	28
Şekil 2.5. Plastik Limit Şekil Verme İşlemi.	29
Şekil 2.6a. Hidrometre Deney Düzeneği.	31
Şekil 2.6b. Hidrometre Numune Karıştırıcı.....	31
Şekil 2.7. Elek Seti	33
Şekil 2.8. Standart Proctor Deney Seti	35
Şekil 2.9a. Hazırlanmış CBR Numunesi	37
Şekil 2.9b. Laboratuvarında CBR Deneyi.....	37
Şekil 2.10a. UCS Deneyi Yapım Aşaması	39
Şekil 2.10b. UCS Deneyi Sonrası Kırılan Numuneler	39
Şekil 2.11a. DCP Deney Aleti	41
Şekil 2.11b. Araziden DCP deney uygulama görüntüsü	41
Şekil 2.12a. B.E.T Deneyi Yapım Aşaması	42
Şekil 2.12b. Deney Sonuç Ekranı	42
Şekil 2.13. Kesme Kutusu Deney Aleti.....	45
Şekil 3.1. CBR-DCP mm/düşüş	52
Şekil 3.2. qu-DCP mm/düşüş	55
Şekil 3.3. c-DCP mm/düşüş	58
Şekil 3.4. IP-DCP mm/düşüş	61
Şekil 3.5. Gmax-DCP mm/düşüş	64
Şekil 3.6. Vs-DCP mm-düşüş	66
Şekil 3.7. Φ – DCP mm/düşüş	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Projede planlanan test türleri ve Standartları ile Deney Sayıları	21
Çizelge 2.2. Deney kapsamında kullanılan lokasyonların yeri ve genel özellikleri....	23
Çizelge 2.3. Deneylerde kullanılan Zeminlerin özellikleri.....	26
Çizelge 2.4. Kompaksiyon Deney Özellikleri	34
Çizelge 3.1. Optimal DPI Hesaplamaları	49
Çizelge 3.2. CBR-DCP mm/düşüş.....	50
Çizelge 3.3. DCP - Serbest Basınç (qu) İlişkisi.....	52
Çizelge 3.4. DCP-c İlişkisi	55
Çizelge 3.5. DCP – IP İlişkisi.....	58
Çizelge 3.6. DCP-Gmax İlişkisi	62
Çizelge 3.7. DCP-Vs İlişkisi.....	64
Çizelge 3.8. DCP- Φ İlişkisi	67
Çizelge 4.1. Regresyon Analizi	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Mpa : Mega Pascal
kN : kilonewton
w : su içeriği
% : yüzde
 γ_k : kuru birim hacim ağırlık
 γ_{kmax} : maksimum kuru birim hacim ağırlık
wopt : optimum su içeriği
c : kohezyon
 \emptyset : içsel sürtünme açısı
 ΔH : aksenal boy değişimi

KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
TS : Türk Standardı
DCP : Dinamik Koni Penetrometre
LL : Likit Limit
PL : Plastik Limit
IP : Plastisite İndisi
CBR : Kaliforniya Taşıma Gücü
UCS : Serbest Basınç Deneyi
DPI : Dinamik Penetrasyon İndeksi
PSD : Tane Boyu Dağılım

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Zemin, inşaat mühendisliği ve geoteknik mühendislik alanlarında büyük bir öneme sahip olan doğal bir malzemedir. İnşaat projelerinin temelini oluşturan zemin, yapıların dayanıklılığı, güvenliği ve uzun ömürlülüğü için kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, zeminin özelliklerini doğru bir şekilde belirlemek, geoteknik mühendisliğin temel amaçlarından birini oluşturur. Zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, yapı tasarımından inşasına ve son performansına kadar tüm aşamalarda kritik bir rol oynar. Doğru zemin verileri, yapı mühendislerinin güvenli ve verimli bir şekilde yapı inşa etmelerine yardımcı olur. Bu nedenle, zeminin özelliklerinin belirlenmesi süreci büyük bir öneme sahiptir ve bu sürecin doğru bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir.

Zeminin özelliklerini belirleme yöntemleri genellikle laboratuvar deneyleri ve saha deneyleri olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Laboratuvar deneyleri, zemin numunelerinin belirli koşullarda test edilmesini sağlar. Bu deneyler, zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için standart bir yol sunar. Ancak, laboratuvar deneyleri, zemin numunelerinin alınması, taşınması ve hazırlanması gibi zaman ve emek gerektiren işlemleri içerir. Ayrıca, laboratuvar deneyleri, zeminin doğal heterojenliği ve anizotropisi gibi faktörleri tam olarak yansıtmayabilir. Saha deneyleri ise, zeminin doğal ortamında test edilmesine olanak tanır. Bu deneyler, zeminin gerçek davranışını daha iyi yansıtır ve laboratuvar deneylerine göre daha hızlı ve ekonomik bir seçenek sunar. Ancak, saha deneyleri, özel ekipman gerektirebilir ve çevresel faktörlerden veya operatör hatalarından etkilenebilir.

Bazı zemin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilen DCP deney cihazı, zeminlerin dayanımı ve davranışı hakkında önemli bilgiler sağlayan kullanımı oldukça kolay bir test cihazı olup bir çok zemin özelliğinin belirlenmesinde uzun yıllardan beri kullanılmaktadır [1–4]. Temel olarak bu cihaz, zemin üzerine bırakılan sabit bir yük ile koninin zeminde yapacağı penetrasyon miktarının ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu çalışma, zemin özelliklerini belirleme sürecinde kullanılan bir araç olarak öne çıkan Dinamik Konik Penetrasyon (DCP) deney cihazına odaklanmakta olup çalışmanın temel amacı, DCP ile zeminlerin çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri ile bazı dinamik özelliklerini tahmin etmektir. DCP deney cihazı, bir dizi avantaja sahiptir. İlk olarak, basit çalışma prensibi sayesinde operatörlerin özel eğitim almasını gerektirmez. Bu, bu cihazın geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından kullanılabilmesini sağlar ve mühendislik projelerinde yaygın bir şekilde uygulanabilirliğini artırır. İkinci olarak, DCP deney cihazı ekonomik bir seçenektir, bu da her türlü bütçeye uygunluğunu vurgular. Üçüncü olarak, az bakım gerektirir ve dayanıklı bir cihaz olarak uzun ömürlüdür. Bu da maliyetleri düşürür ve cihazın uzun süreli kullanımını mümkün kılar. Son olarak, DCP deney cihazı kolay taşınabilir özelliklere sahiptir, bu da istenilen herhangi bir yerde zemin özelliklerini hızlı ve tekrarlı bir şekilde ölçme olanağı sağlar. Bu, saha çalışmaları için son derece önemlidir çünkü zemin özelliklerinin yerinde ve farklı lokasyonlarda belirlenmesi gerekebilir.

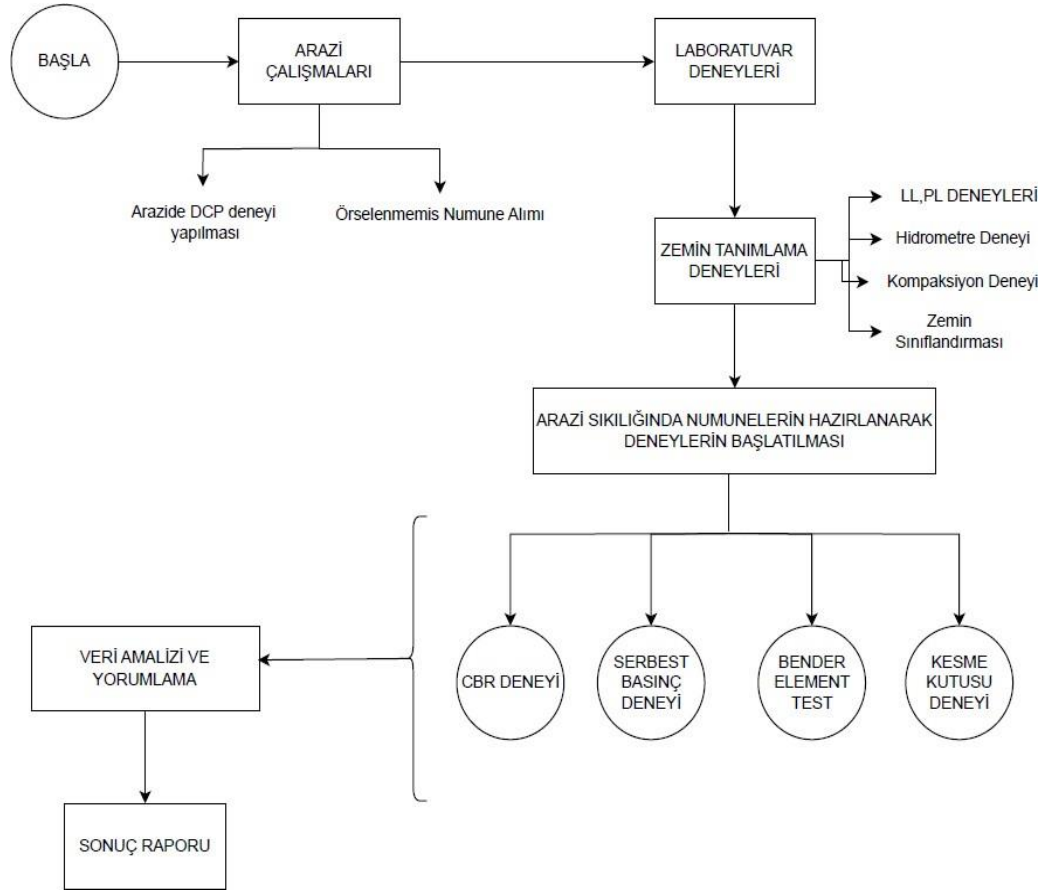
Çalışma kapsamında, mevcut literatürde bulunan çeşitli eşitliklerin DCP deneyi sonuçlarıyla ne kadar uyumlu olduğu değerlendirilerek en uygun eşitlikleri belirlemeyi hedeflemekle birlikte ek olarak belirlenmesi oldukça meşakatli olan bazı zemin dinamik özelliklerinin tahminine de yoğunlaşmaktadır. Zeminin dinamik özellikleri, deprem gibi dinamik yükler altında zeminin davranışını belirleyen kritik faktörlerdir. Özellikle deprem bölgelerinde yapı inşası için zeminin dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, binaların depreme karşı dayanıklılığını artırabilir ve felaketlerin etkilerini azaltabilir.

Diğer yandan, zemin dayanım parametreleri, bir zeminin taşıma kapasitesini ve yapıların temel taşıyıcılarına karşı direncini yansıtan kritik faktörlerdir. Bu parametrelerin doğru tahmini, inşaat mühendislerine zeminle ilgili güvenilir bilgiler sunar ve yapıların güvenliği için kritik bir öneme sahiptir. Zeminin dinamik özelliklerini ve dayanım parametrelerini tahmin etmek için farklı eşitlikler ve yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışma, hangi eşitliklerin DCP deneyi sonuçlarına en iyi şekilde uyduğunu belirleyerek mühendislerin daha doğru tahminler yapmalarına yardımcı olacaktır.

Bu çalışmanın ana hipotezleri veya soruları şunlardır:

1. DCP deneyi, zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir mi?
2. DCP ile belirlenecek zemin özellikleri için hangi eşitlikler kullanılmalıdır?
3. DCP ile elde edilecek zeminin dinamik mukavemet özellikleri güvenilir midir?
4. DCP ile elde edilecek zemin mukavemet özellikleri güvenilir midir?
5. DCP ile elde edilecek CBR (California Bearing Ratio) değeri özellikleri güvenilir midir?

Bu soruların yanıtları, DCP deneyinin zemin mühendisliği alanındaki rolünü daha iyi anlamamıza ve bu değerli aracın kullanımının daha yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır. Çalışmanın kısa bir özeti Şekil 1.1'de verilen proje akış şeması ile yapılmaya çalışılmış olup bu akış şeması, projenin temel bileşenlerini ve ilişkilerini ana hatlarıyla ortaya koymaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amacı, zeminlerin mühendislik özelliklerinin hızlı ve güvenilir yöntemlerle tespitine katkı sağlamaktır. Tez kapsamında ele alınacak konular, literatür taraması, analiz, modelleme ve sonuçların değerlendirilmesi adımlarıyla derinlemesine ele alınmaktadır.



Şekil 1.1 Proje Akış Şeması.

1.2. KURAMSAL TEMELLER VE ARAŞTIRMA KONUSUYLA İLİŞKİLİ LİTERATÜR DERLEMESİ

Mühendislikte, yol yapımı ve bakımı gibi projelerde, yol taban ve taban altı malzemelerinin seçimi ve tasarımı çok önemlidir. Bu malzemeler, yolun ekonomik ve yapısal performansını etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, bu malzemelerin özellikleri, dayanıklılığı ve uygunluğu hakkında bilgi sahibi olmak için çeşitli test ve analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanları

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi ve Dinamik Koni Penetrometre (DCP) Deneyidir [5–8].

CBR Deneyi, 1929 yılında Kaliforniya Karayolları Dairesi tarafından karayolu altyapılarında kullanılacak zeminlerin taşıma kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş bir penetrasyon direnci deneyidir [9–11]. Bu deney, karayolu, havaalanı, kaldırım ve baraj gibi birçok mühendislik alanında taban ve taban altı malzemesinin elastisite modülü ve mukavemetini araştırmak için kullanılır. Bu deneyde, uygun su içeriğindeki ve maksimum yoğunluktaki sıkıştırılmış zemin örneği, standart bir piston ile belirli bir hızda nüfuz ettirilir. Pistonun zemine girmesi için gerekli olan kuvvet ölçülür ve bu kuvvet, standart bir kum zemine uygulanan kuvvet ile karşılaştırılarak bir taşıma gücü oranı elde edilir [12,13]. Bu orana CBR değeri denir. CBR değeri, zeminin su içeriğine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bu nedenle, zeminin optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluğu, Proktor Deneyi ile belirlenmelidir. CBR değeri, yol tabakalarının taşıma dayanımını ölçmek ve yol tasarımını yapmak için gerekli bir parametredir. Ancak, bu deneyin bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar ise şu şekilde sıralanabilir:

1. Bu deney, laboratuvar ortamında yapılması gereken bir deneydir. Bu nedenle, arazide alınan zemin örneklerinin laboratuvara taşınması, hazırlanması, sıkıştırılması, ıslatılması ve nüfuz ettirilmesi gibi birçok işlem gerektirir. Bu işlemler, hem zaman hem de maliyet açısından kayıplara neden olur.
2. Bu deney, zemin örneğinin ıslatılması için en az 4 gün beklenmesini gerektirir. Bu da, deney sonucunun elde edilmesi için uzun bir süre kaybına neden olur.
3. Bu deney, yerinde ölçüm yapılmasını sağlayacak bir yöntem değildir. Bu nedenle, arazide sıkıştırılmış zemin tabakalarının taşıma kapasitesinin belirlenmesi için CBR değerlerine ulaşmak zorlaşır.

DCP Deneyi, 1950'li yıllarda Güney Afrika'da geliştirilmiş bir arazi deneyidir. Bu deney, zeminin gücünü ve toprağın tasarım yükünü belirlemek adına kullanılır

[3,4,14–16]. Bu deneyde, kalibre edilmiş konik uçlu bir çelik çubuk, zemine belirli bir yük altında vurularak zemine sokulur. Zemindeki batma miktarı ölçülerek zeminin dayanabileceği yükün taşıma kapasitesi bulunur. Bu taşıma kapasitesi, CBR değeri ile ilişkilendirilerek zeminin sınıflandırılması yapılır. DCP Deneyi, CBR Deneyine göre bazı avantajlar sunar. Bu avantajları ise şu şekilde sıralayabiliriz [17–19]:

1. Bu deney, arazide, yerinde ve hızlı bir şekilde yapılabilen bir deneydir. Bu nedenle, laboratuara taşıma, hazırlama, sıkıştırma, ıslatma ve nüfuz ettirme gibi işlemlere gerek kalmaz. Bu da, hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlar.
2. Bu deney, sığ derinlikteki yol kaplama işleri için alt tabaka malzemelerinin dayanımlarının yerinde belirlenmesini mümkün kılar. Bu da, yol tasarımı ve bakımı için önemli bir veri sağlar.
3. Bu deney, zeminin farklı derinliklerindeki değişimleri gözlemlemeyi sağlar. Bu da, zeminin heterojenliği ve anizotropisi hakkında bilgi verir.

Sonuç olarak, mühendislikte, yol taban ve taban altlarının ekonomik ve yapısal yönlerindeki performansını arttırmak adına alt sınıf malzemelerinin incelenmesiyle tasarım çalışması yapılması gerekir. Bu amaçla, CBR Deneyi ve DCP Deneyi gibi çeşitli test ve analiz yöntemleri kullanılır. Bu yöntemler, zeminin taşıma kapasitesi, mukavemeti, elastisite modülü, su içeriği, yoğunluğu gibi özelliklerini belirlemeyi sağlar [20–23]. Bu özellikler, yol tasarımı ve bakımı için gerekli parametrelerdir.

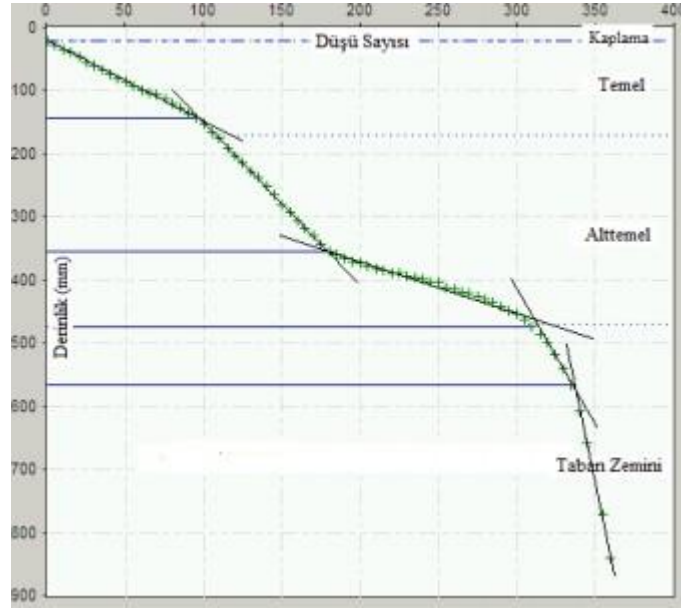
Ancak, bu yöntemler arasında bazı farklılıklar ve avantajlar vardır. CBR Deneyi, laboratuvar ortamında yapılması gereken, uzun süreli ve maliyetli bir deneydir. DCP Deneyi ise, arazide, yerinde ve hızlı bir şekilde yapılabilen, kısa süreli ve ekonomik bir deneydir. Bu nedenle, son yıllarda DCP Deneyi, CBR Deneyine göre daha kullanışlı bir yöntem haline gelmiştir.

CBR deneyi, zeminlerin taşıma kapasitesini ölçmek için hem laboratuvar ortamında hem de sahada uygulanan bir yöntemdir. Laboratuvar ortamında, zemin numuneleri önceden

sıkıştırılarak hazırlanır ve standart bir kalıp içerisinde test edilir. Sahada ise, zemin yüzeyi ya da açılan bir çukur içinde düzleştirilerek deney yapılır. Deneyde, zemin içine 49,63 mm çaplı bir piston 1,27 mm/dk hızla batırılır ve zeminin gösterdiği direnç ölçülür. Bu direnç, standart bir kırma taş numunesinin aynı derinlikteki direncine oranlanarak CBR değeri olarak ifade edilir. CBR değeri, 2,5 mm ve 5 mm derinliklerde hesaplanır. Tasarım aşamasında genellikle 2,5 mm derinliğindeki CBR değeri esas alınır. Eğer 5 mm derinliğindeki CBR değeri 2,5 mm derinliğinden büyükse, deney tekrar edilir. Yeni deneyde de aynı durum oluşursa, daha büyük olan CBR değeri kullanılır [24–27].

DCP cihazı, zeminin yerinde taşıma kapasitesini belirlemek için geliştirilmiş bir araçtır. İlk kez Güney Afrika’da kullanılmıştır. Sonrasında İngiltere, Yeni Zelanda, ABD ve Avustralya gibi ülkelerde de yol üst tabakalarının ve taban zemininin yerinde mühendislik özelliklerini saptamak için kullanılmıştır [1,14,28,29]. DCP cihazı, taşınması, maliyeti, bakımı ve kullanımı kolay bir alettir. DCP cihazı ile toplanan veriler ve analizleri de basittir. CBR testinde, üst yapının dayanımını ölçmek için tabakalar kaldırılmalıdır. DCP testinde ise, zeminin dayanımı test edilen derinliğe kadar olan tabakaların direnci ile belirlenebilir. DCP testi, sert zeminlerde, özellikle büyük kaya dolguları, asfalt ve beton kaplamalar gibi yerlerde uygulanmamalıdır. Çünkü bu tür zeminlerde darbe sırasında kaymalar meydana gelir ve sonuçlar doğru olmaz. Sert zeminlerin incelenmesi gerektiğinde, bu bölgelerde matkap ile tabaka derinliklerine kadar delinmesi daha doğru sonuçlar verir.

DCP testi ile elde edilen batma indeksi (BI) değeri, üst yapı katmanlarının dayanımları hakkında bilgi verir [30–32]. Üst yapı tabakalarının kalınlıkları, derinliğin ordinatta, düşüş sayısının apsiste olduğu bir grafik yardımıyla belirlenir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Düşü sayısı ile batma derinliğinin değişimini gösteren bir grafik [33].

Sıkıştırılmış zeminlerde, laboratuvar ve arazi çalışmaları sırasında zeminlerin taşıma kapasitesi iki farklı yöntemle belirlenir. Zeminin taşıma gücü oranı genellikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyi ile yaygın bir şekilde belirlenir. Bu deney, özellikle ulaşımda yer alan alt dolgu zeminlerinin taşıma kapasitesini değerlendirmek için sıkça kullanılır. CBR deneyine alternatif olarak, özellikle arazi koşullarında yol ve alt temel uygulamalarındaki dolgu malzemelerinin yapısal özelliklerini yerinde ve hızlı bir şekilde belirlemek amacıyla Dinamik Koni Penetrometre (DCP) deneyi de kullanılmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre, dolgu malzemelerinin yapısal özelliklerini değerlendirmek için DCP değerleri genellikle CBR oranıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda, farklı zemin türlerinde sıkıştırılmış zeminler için CBR oranı ile DCP değerleri arasında ampririk bir ilişki kurulması için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, dolgu malzemelerinin taşıma kapasitesini belirleme sürecinde DCP'nin etkili bir alternatif olabileceğini ve elde edilen DCP değerlerinin, CBR oranlarıyla ilişkilendirilerek daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanıyabileceğini ortaya koymaktadır.

Kleyn'in yaptığı saha araştırmaları [34], Norveç'teki çakıl tabanlı düşük hacimli yollar üzerinde odaklanmıştır. Bu çalışmaların temel amacı, taban tabakasının kararlılığının yol tabakasının performansı üzerinde kritik bir etkisi olup olmadığını belirlemek ve bu bağlamda önemli kriterler geliştirmektir. Özellikle çakıl tabanlı yol tabakaları için Dinamik Koni Penetrometre (DCP) ve Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) arasında bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişki, çakıl tabanlı yolların dayanıklılığını değerlendirmek ve yol performansını ölçmek için etkili bir yöntem sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Kleyn'in çalışmaları, çakıl tabanlı yolların tasarımında ve bakımında karar verme süreçlerine önemli bir katkı sunmaktadır.

$$\text{Log CBR} = 2.62 - 1.27 \log (\text{DCP}) \quad [34]$$

Smith ve Pratt'in yaptığı çalışmada [35], 30 derecelik koni ve 9.08 kg ağırlığındaki çekicinin 508 mm yüksekliğinden düşürülmesiyle gerçekleştirilen Dinamik Koni Penetrometre (DCP) testi ile killi malzemeler için yerinde yapılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testleri arasında bir korelasyon geliştirilmiştir. Bu korelasyon, killi malzemelerin taşıma kapasitelerini belirlemede DCP ve CBR test sonuçları arasında güçlü bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Smith ve Pratt, yaptıkları gözlemlerle DCP sonuçlarının yerinde yapılan CBR testleri kadar kabul edilebilir olduğunu belirtmişler ve ayrıca DCP testlerinde değişiklik katsayısının, aynı yerde yerinde yapılan CBR testlerinden daha küçük olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu durum, DCP'nin killi malzemelerin taşıma kapasitesini değerlendirmede daha güvenilir ve tutarlı bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

$$\text{Log CBR} = 2.56 - 1.15 \log (\text{DCP}) \quad [35]$$

Livneh ve Ishai'nin çalışması [36], çeşitli yol tabaka malzemelerini temsil eden doğal ve sıkıştırılmış katmanlar üzerinde Dinamik Koni Penetrometre (DCP) ve yerinde Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) testlerinin uygulanmasıyla ilgili bir araştırmayı

içermektedir. Yapılan bu testler sonucunda elde edilen DCP ve CBR değerleri arasında yüksek bir korelasyon denkleminde ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, farklı yol tabaka malzemelerinin taşıma kapasitelerini belirlemede DCP ve CBR testlerinin birbirleriyle güçlü bir ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Livneh ve Ishai'nin çalışması, bu test yöntemlerinin çeşitli yol yapıları için güvenilir birer araç olduğunu ve bu değerler arasındaki yüksek korelasyonun bu yöntemlerin tutarlılığını vurguladığını ortaya koymaktadır.

$$\text{LogCBR}=2.2 -0.71\log (\text{DCP})1.5 \quad [36]$$

Livneh'in çalışması [36], yol alt tabakalarının değerlendirilmesinde kullanılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) ve Dinamik Koni Penetrometre (DCP) testleri doğrultusunda yapılan alan çalışmalarını incelemektedir. Bu çalışma, dünyanın çeşitli coğrafi bölgelerinde gerçekleştirilen testlerin, elde edilen ampirik değerler üzerinde farklılıklara neden olduğunu vurgulamaktadır. Yol alt tabakalarının taşıma kapasitesini belirlemede kullanılan bu iki önemli testin, coğrafi bölge farklılıklarına bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya koyduğu Livneh tarafından belirtilmiştir. Bu durum, yol alt tabakalarının mühendislik özelliklerini değerlendirirken coğrafi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

Harrison'ın çalışması [37], su içeriği ve yoğunluğu kontrol altında tutulan zeminin kayma direncini ölçmek için kullanılan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) deneyinin yanı sıra, yeni yolların tasarımı sırasında olası çevresel tehlikelerin güçlendirilmesini amaçlamaktadır. Harrison, bu güçlendirmenin, yol tasarımının ömrü boyunca karşılaşılabileceği çeşitli koşulları ele almayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, yerinde CBR deneyinin önerilmiş olmasına rağmen, uygulanması için numunenin doygun durumda olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak, arazi koşullarında zemine yerinde CBR uygulamanın pratik olmadığı ve genellikle zor olduğu gerçeğiyle karşılaşılabılır. Harrison, bu zorluğun üstesinden gelmek ve pratik bir çözüm sunmak adına Dinamik Koni Penetrometre (DCP) ve CBR arasındaki doğrusal log-log ilişkisini teorik olarak

açıklamıştır. Bu teorik açıklama, standart CBR kalıplarında hazırlanan kil, iyi dereceli kum ve iyi dereceli çakıl örnekleri üzerinde gerçekleştirilen 72 çift DCP ve CBR testi ile desteklenmiştir. Harrison ve ekibi, elde ettikleri verileri kullanarak korelasyon denklemleri sunmuş ve regresyon analizi sonuçlarını değerlendirmiştir. Ayrıca, log-log modeli üzerinden yapılan regresyon analizinin, ters modele göre daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca, nem içeriği ve kuru yoğunluğun CBR-DCP korelasyonunda önemli etkilere sahip olduğu ve ıslatma etkisinin kalibrasyon üzerinde etkili olmadığı belirtilmiştir. Harrison'ın çalışması, zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirirken dikkate alınması gereken pratik ve teorik önemli bilgiler sunmaktadır.

Truebe ve diğerleri [38], ABD'de düşük hacimli olan orman hizmet yollarının gücünü değerlendirmek amacıyla Dinamik Koni Penetrometre (DCP) kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, agrega yüzeyi ve alt sınıf için DCP ve yerinde CBR arasında bir korelasyon ortaya konmuştur. Ayrıca, DCP'nin malzeme dayanımı özelliklerini hızla değerlendirmek için faydalı bir test yöntemi olduğuna dikkat çekilmiştir. Bu araştırma, orman hizmet yollarının dayanıklılığını anlamak ve güçlendirmek amacıyla gerçekleştirilen değerlendirme çalışmalarına katkıda bulunmaktadır. Truebe ve diğer araştırmacılar, DCP'nin malzeme dayanımını hızla belirleme yeteneğinin, yol yapım projelerinde verimliliği artırabileceğini vurgulamışlardır. Bu çalışma, orman yollarının altyapısının sağlamlığını değerlendirmek ve iyileştirmek isteyen mühendislik uzmanları için önemli bilgiler sunmaktadır.

Al-Refeai ve Al Suhaibani [17], ince ve iri daneli çeşitli zemin tipleri üzerine yapılan laboratuvar çalışmalarına dayanarak, Dinamik Koni Penetrasyon (DCP) endeksi ile California Taşıma Oranı (CBR) arasında benzersiz modeller geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, DCP'nin CBR değerlerini yüksek doğrulukla tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu araştırma, farklı zemin tipleri için özelleştirilmiş modellerin oluşturulmasıyla, DCP'nin CBR tahminlerindeki doğruluğunu vurgulamaktadır. Al-Refeai ve Al Suhaibani'nin geliştirdiği bu benzersiz

modeller, yol mühendisliği ve altyapı planlaması açısından değerli bir katkı sağlamaktadır. DCP'nin, farklı zemin özelliklerine sahip alanlarda taşıma kapasitesini tahmin etme konusundaki potansiyelini ortaya koymak, mühendislik projelerinde daha etkili kararlar alınmasına yardımcı olabilir.

Gabr ve diğerleri [39], yol tabakalarının tehlike durumlarını değerlendirmek amacıyla dinamik koni penetrometre cihazını kullanma konusunu araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara dayanarak, DCP sonuçlarına göre yol tabakasının tehlike seviyelerini değerlendirmek için bir model geliştirmişlerdir. Bu model, yol güvenliği ve bakımı açısından risk analizi yapılmasına yönelik değerli bir araç olabilir. Ayrıca, Gabr ve diğer araştırmacılar, laboratuvar ve saha çalışmaları üzerinden DCP ve CBR arasında bir korelasyon geliştirmişlerdir. Bu korelasyon, yol tabakalarının taşıma kapasitesini belirleme konusunda farklı test yöntemleri arasında sağlam bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında doğru değerlendirmelerin yapılmasına ve altyapı projelerinin güvenliğinin artırılmasına katkıda bulunabilir.

Chen ve diğerleri [40], DCP testi ile elde edilen verilerden katman modüllerini hesaplamak amacıyla hızlandırılmış tabaka testlerinde kullanılan iki test döşemesi üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çerçevede, 60'tan fazla DCP testi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. DCP'nin katman modüllerine etkisi özel bir odak noktası olmuş ve bu etki, testlerin güvenilirliği açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca, elde edilen DCP sonuçları, CBR değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, farklı zemin özelliklerine sahip katmanların taşıma kapasiteleri üzerindeki etkilerini anlamak adına önemli bir analiz sunmuştur. Yapılan çalışma, DCP ve CBR arasında güçlü bir korelasyon denklemi geliştirmiş ve bu iki test yönteminin birbirini tamamlayıcı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlar, altyapı projelerinde katman modülleri üzerine daha güvenilir değerlendirmeler yapılmasına olanak tanıyabilir.

$$\text{LogCBR} = 2.465 - 1.12 \log (DCP) \quad [37]$$

Mohammadi ve diğeri [4], yaptıkları çalışmada, DCP'nin elastiklik modülü ile CBR değerlerini güvenilir bir şekilde tahmin edebileceğini ortaya koymuşlardır. Özellikle, DCP'nin sıkıştırılmış zeminlerin taban katmanlarının ve dolguların yerinde sertlik özelliklerini değerlendirmek için etkili bir araç olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan laboratuvar testleri, düşük dereceli kumlar ve kil siltleri üzerinde odaklanmış ve bu zemin türlerinde DCP'nin performansını değerlendirmiştir. Testler, nem içerikleri ve kuru yoğunlukları değiştirilerek yapılmış, böylece farklı zemin koşullarının DCP'nin tahmin yetenekleri üzerindeki etkisi anlaşılmıştır. Bu çalışma, DCP'nin farklı zemin koşullarında güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini ve yerinde sertlik özelliklerini değerlendirmek için değerli bir araç olabileceğini vurgulamıştır.

Booth ve diğeri [41], yaptıkları çalışmada, laboratuvar CBR değerlerini kumlu, hafif çakıllı, siltli ve çok sert kumlu zemin tiplerine ait testlerde elde edilen korelasyon denklemlerini inceledikten sonra, DCP'nin CBR korelasyonlarının geçerliliği konusunda bazı endişelerini dile getirmişlerdir. Yapılan bu karşılaştırmalar, özellikle farklı zemin tiplerinde elde edilen CBR değerleri ile DCP sonuçları arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Bu çalışma, özellikle kumlu, hafif çakıllı, siltli ve çok sert kumlu zeminlerde elde edilen laboratuvar CBR değerlerini DCP sonuçlarına bağlayan korelasyon denklemlerinin geçerliliğini sorgulamıştır. Bu endişeler, DCP'nin farklı zemin tiplerinde CBR değerlerini tahmin etmede ne kadar etkili olduğunu anlama çabası olarak öne çıkmaktadır. Bu tür bir değerlendirme, zemin tiplerine bağlı olarak DCP'nin performansını anlamak ve uygun bir şekilde kullanmak için önemlidir.

Yıldırım'ın çalışması [42], Kaliforniya taşıma oranını belirlemede kıvam limitleri ve elek analizleri gibi zemin indeks deneyleri ile zeminin kompaksiyon parametreleri arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası gibi zeminin kompaksiyon özellikleri ile Kaliforniya taşıma oranı arasında olası korelasyonları belirlemek için

basit ve çoklu regresyon analizleri uygulanmıştır. Yıldırım'ın çalışması, zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri ile Kaliforniya taşıma oranı arasındaki ilişkileri daha derinlemesine anlamak amacıyla yapılan bir çaba olarak öne çıkmaktadır. Bu analizler, zeminin taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri anlamak ve mühendislik tasarımlarında daha doğru tahminler yapabilmek için önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Elde edilen korelasyonlar, zeminin Kaliforniya taşıma oranını tahmin etme konusunda mühendislik uygulamalarında kullanılabilir bir temel sağlamaktadır.

$$CBR=18,318*\gamma_{kmax}-24,23 \quad [38]$$

$$CBR=0,4801*W_{opt}+15,52 \quad [17]$$

$$CBR=0,2353*GC+3,0798 \quad [37]$$

$$CBR=18,508-0,1805*FC \quad [39]$$

$$CBR=0,219*GC+0,04*SC+4,386*\gamma_{kmax}-0,128*W_{opt}-6,639*FC+1,93 \quad [43]$$

Taşkıran'ın araştırması [44], CBR üzerindeki tane dağılımının etkisini belirlemeye odaklanmış ve bu etkiyi değerlendirmek için dereceleme sabitini en etkili parametre olarak rapor etmiştir. Ayrıca, zeminin kuru birim hacim ağırlığının CBR değeri üzerinde büyük bir etkisi olduğunu vurgulamıştır. Plastisite indisi, likit limit değeri, optimum su muhtevası ve elekten geçen malzeme yüzdesi gibi faktörlerin de CBR değerini etkilediğini belirtmiştir. Taşkıran'ın çalışması, önerilen korelasyon denklemlerinin kesin CBR sonuçları sağlamadığını bildirmiştir. CBR deneyinin, farklı zemin türlerinde zeminin kıvam limitleri, dane boyutu karakteristikleri ve kompaksiyon parametreleriyle değerlendirildiğinde, birçok araştırmacının bu parametrelerden bir ya da ikisini baz aldığını ifade etmiştir. Bu nedenle, zemin özelliklerini büyük ölçüde etkileyen parametrelerin değerlendirilmemesi durumunda elde edilen korelasyonların anlamsız olabileceğini vurgulamıştır.

Nugroho ve diğerlerinin [45], ince daneli zemin türleri üzerine yaptığı çalışma, çoklu regresyon analizleri kullanarak zeminin taşıma gücünü değerlendirmeyi amaçlamıştır.

Elek analizi, likit limit, plastisite indisi ve kompaksiyon parametreleri arasındaki ilişkileri inceleyerek, γ_{kmax} (maksimum kuru birim hacim ağırlığı) ve W_{opt} (optimum su muhtevası) değerleriyle zeminin taşıma gücünü belirlemeye yönelik farklı korelasyonlar elde etmiştir. Bu analizler, zeminin fiziksel özellikleri ile taşıma kapasitesi arasındaki bağlantıları anlamak için önemli bir temel oluşturmuştur.

$$CBR=0,011*FC+0,606*LL-4,413*PI+3,370*W_{opt}-2,147*\gamma_{kmax}-10,783 \quad [4]$$

$$CBR=0,335*FC-0,529*LL-2,627*PI+3,807*W_{opt}-25,746 \quad [40]$$

$$CBR=0,088*LL-1,979*PI+3,80*W_{opt} -25,909 \quad [46]$$

Farklı zemin türleri, araştırma birimleri ve araştırmacılar, belirli CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerleri ile ilişkilendirmek amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu bağlamda, zemin parametreleri ile CBR sonuçları arasındaki ilişkiler, araştırmacılar tarafından detaylı bir şekilde incelenmiş ve geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, zeminin taşıma kapasitesini anlamak ve belirli zemin özellikleri arasındaki bağlantıları kurmak için önemli veriler sunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Karabük Üniversitesi'ne ait olan araziden alınan zemin örnekleriyle DCP, CBR, Serbest Basınç Deneyi, Bender Element Test, Kesme Kutusu Deneyi ve Plastisite İndisi testleri arasındaki korelasyonu belirlemek ve yeni bir formülasyon üretmektir. Bu çalışma için, arazide DCP testi yapılmıştır. Daha sonra, araziden alınan zemin numunesi örnekleri, laboratuvarında sıkıştırılmış zemin tabakaları haline getirilmiştir. Bu zemin tabakalarının taşıma kapasitelerinin belirlenmesine yönelik olarak, elek analizi, kıvam limitleri, kompaksiyon deneyi, serbest basınç deneyi, Kaliforniya taşıma gücü oranı, bender element testi, kesme kutusu ve dinamik koni penetrometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler, Karabük Üniversitesi'ne ait laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, zeminlerin çakıl-kum-ince tane yüzdeleri, likit limit, plastisite indisi, kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, CBR, DCP, UCS, Vs, Gmax, kohezyon ve içsel sürtünme açıları değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler, basit ve çoklu regresyon analizleri ile

değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, zemin tabakalarının taşıma kapasitesi ile fiziksel özellikleri arasındaki ilişki varlığı, regresyon denklemleri ile araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

ÇALIŞMA METEDOLOJİSİ

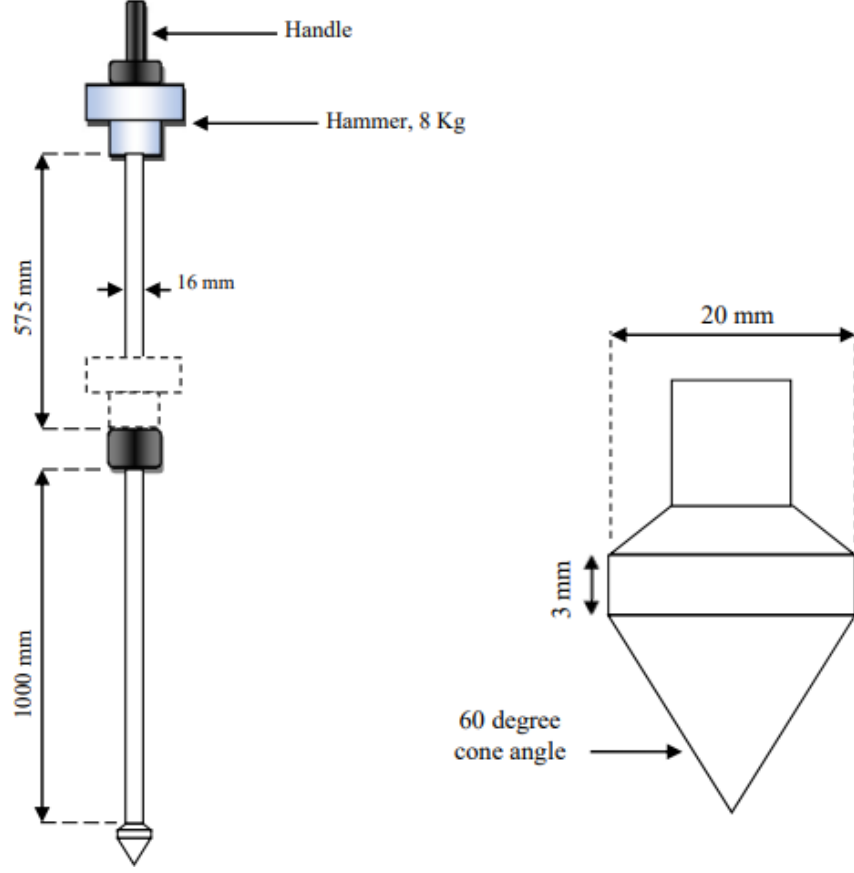
2.1. GİRİŞ

DCP (Dinamik Koni Penetrometresi), sahada taşınabilir ve tekrarlı ölçümlere imkân tanıyan pratik bir cihazdır. Ayrıca, basit çalışma prensibine sahip olması ve maliyetinin düşük olması, bu cihazı geniş bir kullanım alanına taşımaktadır. DCP, 5 temel bölümden oluşmaktadır ve bunu Şekil 2.1’de görselleştirebiliriz ve bu temel bölümleri şu şekilde açıklayabiliriz:

1. 8 kg Ağırlığındaki Düşen Kütle (DCP Çekici): Cihazın temel parçasını oluşturan düşen kütle, zemin penetrasyonunu sağlamak için kullanılır.
2. Üst Çubuk (575 mm Sabit Yükseklik): Çekicinin sabit bir yükseklikten serbest düşmesini sağlayan üst çubuk, düşme sırasında etkileşimi düzenler.
3. Alt Çubuk (60° Konik Uçlu ve 20 mm Çapında): Zemin penetrasyonunu gerçekleştiren konik uçlu alt çubuk, zeminin direncini ölçmek için kullanılır.
4. Cetvel (Cm ve Mm Ölçekli): Batma derinliklerini okumak için kullanılan cetvel, ölçümleri hassas bir şekilde kaydetmek amacıyla ölçeklendirilmiştir.
5. Tutma Aparatı: DCP'nin sabitlenmesini ve kullanımını kolaylaştıran tutma aparatı, deneyin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

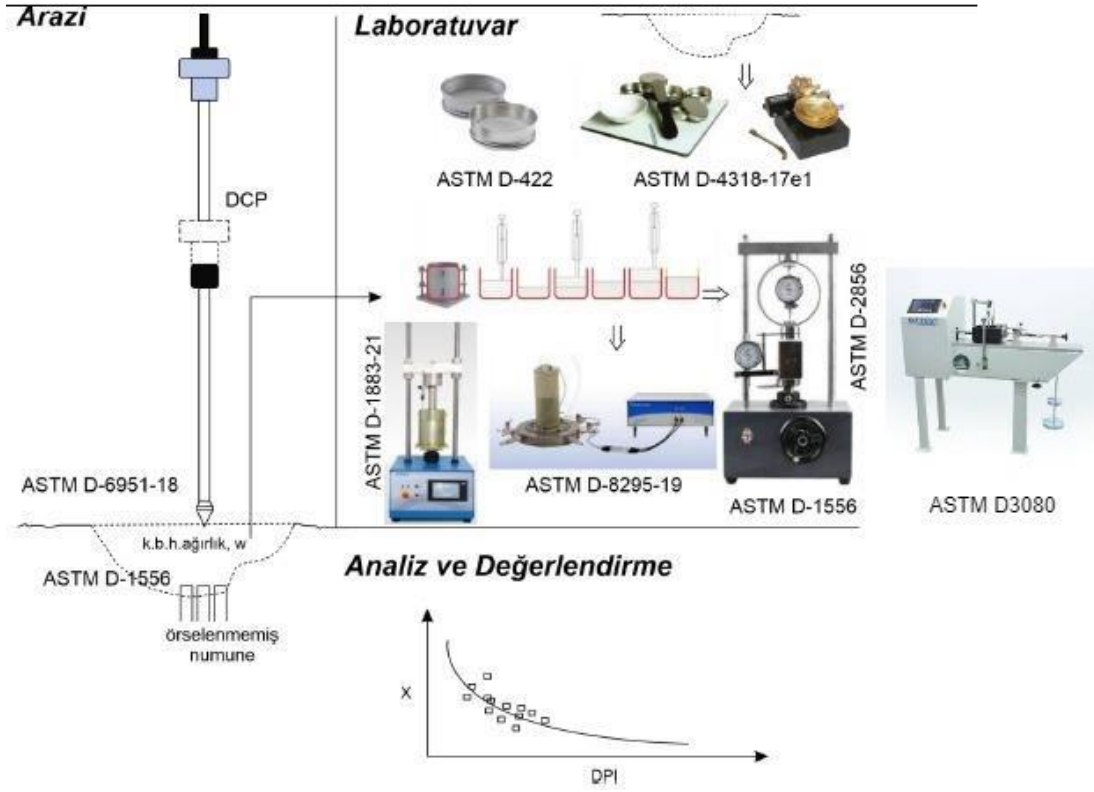
DCP testi sırasında okumalar genellikle 5 veya 10 düşme sonrasında yapılır ve düşme sayısı, konik ucun zemin tabakalarına olan penetrasyonuna bağlı olarak değişir. Çekiç, belirli bir yükseklikten serbest bırakıldığında dinamik bir etki oluşturarak konik ucu zemine batırır. Her düşme sonrasında veya istenilen düşü sayısından sonra cetvel okuması yapılır ve bu okumalar kaydedilir. Granüler temellerde genellikle 5-10 düşme sonrasında okumalar yapılırken, daha zayıf alt temel ve taban zeminlerinde 1-2 düşürme ile uygun okumalar elde edilebilmektedir. Yumuşak zemin tabakaları için

genellikle 1 düşme yeterli iken, normal zemin tabakaları için 5 düşme ve çok dirençli zemin tabakaları için 10 düşme önerilmektedir.



Şekil 2.1 Dinamik konik penetrasyon deney cihazı [47].

Bu çalışmada DCP testleri, ASTM D 6951-18 standart yöntemine uygun olarak yapılacaktır. DCP testi tamamlandığında istenilen derinlikte penetrasyon gerçekleşmiş olacak ve her düşüşe karşılık gelen toplam batma derinlikleri kaydedilecektir. Bu bilgilerle batma indeksi ($DPI = \text{mm/düşüş}$) hesaplanacak ve saha çalışmaları tamamlanacaktır. Çalışma Şekil 2.2’de özetlendiği gibi Arazi çalışması, Laboratuvar çalışması ve DCP ile zemin özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi kapsayacak Analiz ve değerlendirme olmak üzere üç ana kapsamdan oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Çalışma kapsamında planlanan deneyler.

Arazi Çalışması

Bu aşamada, çalışmanın ilk bölümü olarak belirlenen arazi çalışması gerçekleştirilecektir. Seçilen farklı zemin lokasyonlarında, ASTM D 6951-18 standart prosedürüne uygun olarak DCP deneyleri yapılacaktır. Bu deneylerin temel amacı, Dinamik Penetrasyon İndeksi (DPI) değerlerini belirlemektir. DCP testlerinin tamamlanmasının ardından, deney lokasyonlarında ASTM D1556'ya uygun numune örnekleri alınarak zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve su içeriği belirlenecektir. Ardından elde edilen örnekler, saha koşullarını tam anlamıyla yansıtabilmek adına laboratuvara taşınacaktır. Ayrıca, yerinde örselenmemiş örnekler alınarak, laboratuvar deneyleri için hazırlık süreci başlatılacaktır.

Laboratuvar Çalışması

Bu bölümde, arazide yapılan deneylerden elde edilen verilere dayanarak laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilecektir. İlk olarak, incelenen zeminin tane boyutu dağılımı ASTM D422 standardına göre belirlenecek ve ASTM D4318-17e1 kıvam sınırları tanımlanacaktır. Zemin sınıflaması, arazideki deney sonuçlarına göre yapılacak ve

örnekler sıkıştırılarak deney numuneleri hazırlanacaktır. Ayrıca, hidrometre deneyi için ASTM D422 standardı kullanılacaktır. Bu deney, zeminlerin tane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır.

Sahadan alınan örselenmemiş örnekler, laboratuvar deneyleri için işlenecek ve bu süreçte Bender Element Testi için ASTM D4428 standardı kullanılacaktır. Bender Element Testi, zeminlerin dinamik elastik özelliklerini değerlendirmek için önemlidir, bu nedenle laboratuvar çalışmalarında bu test gerçekleştirilecektir. Ayrıca, laboratuvarda gerçekleştirilecek deneyler arasında Kesme Kutusu Deneyi de yer alacaktır. Kesme kutusu deneyi için ASTM D3080 standardı kullanılacak ve bu deney, zeminlerin kesme direncini belirlemek amacıyla yapılacaktır. Sonrasında, zeminlerin dinamik mukavemet özelliklerini belirlemek üzere ASTM D1556'ya uygun olarak Serbest Basınç Deneyi, Üç Eksenli Basınç Deneyi (ASTM D2850), CBR deneyi (ASTM D1883-21) gibi deneyler gerçekleştirilecek ve zeminlerin dinamik mukavemet özellikleri kapsamlı bir şekilde belirlenecektir. Bu deneysel çalışmalar, zeminlerin mühendislik özelliklerini daha iyi anlamak ve gelecekteki inşaat projeleri için önemli bilgiler sağlamak amacıyla yürütülmektedir.

Analiz ve Değerlendirme (DCP ve Zemin Özellikleri İlişkisinin Belirlenmesi)

Çalışmanın son aşamasında, zeminlerin mukavemet ve dinamik mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerin sonuçlarıyla DCP indeksi arasındaki ilişki incelenecektir. Bu aşamada, basit ve çoklu regresyon analizi kullanılarak CBR, serbest basınç dayanımı, Maksimum Dinamik Kayma Modülü (Gmax), Dinamik Kayma Modül Oranı (G/Gmax) ve Sönüm Oranı (D) belirlenmesinde DCP'nin kullanılabilirliği araştırılacaktır. En az 30 farklı lokasyonda yapılan arazi ölçümleri ile elde edilen Batma İndeksi parametreleri, deney numunelerinin hazırlanması için kullanılacak ve zeminlerin statik ve dinamik özellikleri tespit edilecektir. Çalışmada, zemin özellikleri ile DCP indeksi arasındaki ilişkinin anlaşılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, Bender Element Test deneyi ile elde edilen dinamik zemin özellikleri, DCP testi sonuçları ile ilişkilendirilerek kapsamlı bir analiz gerçekleştirilecektir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen test türleri ve Standartlarını ile uygulanan toplam numune sayısı Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen test türleri ve Standartları ile deney sayıları.

Test Tipi	Kullanılacak Standart	Deney Sayısı
Tane boyu dağılım (PSD)	ASTM D 422	30
Atterberg limit testleri	ASTM D 4318	30
USCS zemin sınıflama	ASTM D 2487	30
Standard kompaksiyon deneyi	ASTM D1883-21	30
California Bearing Ratio (CBR)	ASTM D1883-21	60
Kesme Kutusu Deneyi	ASTM D3080	30
Hidrometre Deneyi	ASTM D422	30
Serbest basınç deneyi (UCS)	ASTM D 2166	90
Dinamik Koni Penetrometre Deneyi	ASTM D6951 – ASTM D5778	30
Bender Element Test Deneyi	ASTM D5540	60

2.1.1 Deneylerde Kullanılan Zeminlerin Temin Edildiği Lokasyonlar

Çalışmanın kapsamında, toplamda 30 farklı lokasyondan zemin örnekleri alınmıştır. Bu lokasyonlar seçilirken dikkate alınan faktörler, çalışmanın güvenilirliğini ve temsil gücünü artırmayı amaçlamaktadır. Zemin örnekleri alınan lokasyonların seçiminde, bölgenin coğrafi ve jeolojik özellikleri, arazi kullanımı, iklim koşulları ve özellikle araştırmanın ana odak noktalarından biri olan dinamik koni penetrometre (DCP) deneylerinin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ön planda tutulmuştur.

Zemin örnekleri alınırken, her bir lokasyonun temsil ettiği zemin tipinin çeşitliliği göz önüne alınmıştır. Bu çeşitlilik, elde edilecek verilerin geniş bir perspektifte değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, örneklerin alındığı bölgelerin coğrafi dağılımı, analiz sonuçlarının bölgesel özellikler açısından genel bir perspektif sunmasına katkı sağlamaktadır.

Şekil 2.3, zeminlerin temin edildiği lokasyonları görsel bir şekilde sunmaktadır. Bu şematik gösterim, her bir lokasyonun coğrafi konumu ve örnek alınan bölgelerin dağılımını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Lokasyonlardaki çeşitliliği görselleştirmek, çalışmanın zemin örneklerini geniş bir perspektifte ele aldığını ve analizlerin kapsamlı bir temel üzerine oturduğunu vurgular.



Şekil 2.3 Deneylerde Kullanılan Zeminlerin Temin Edildiği Lokasyonlar.

Çizelge 2.2., deney kapsamında kullanılan lokasyonların coğrafi konumlarını ve genel zemin özelliklerini içermektedir. Bu çizelge, her bir lokasyonun belirli coğrafi koordinatlarını, örnek alınan zeminlerin temsil ettiği genel özellikleri ve çalışmanın odaklandığı parametreleri sağlamaktadır. Lokasyonların coğrafi dağılımı, çalışmanın bölgesel çeşitliliği nasıl kapsadığını ve analizlerin geniş bir zemin yelpazesinde gerçekleştirildiğini görsel bir şekilde ifade etmektedir. Bu çizelge, deneylerde kullanılan zeminlerin temin edildiği bölgelerin genel bir bakışını sunarak, araştırmanın zemin örneklerini farklı coğrafi kontektlerde değerlendirdiğini vurgular. Ayrıca, bu coğrafi çeşitlilik, elde edilen verilerin genel bir zemin karakterizasyonu üzerinden daha kapsamlı bir anlam kazanmasına olanak tanımaktadır.

Çizelge 2.2. Deney kapsamında kullanılan lokasyonların yeri ve genel zemin özellikleri.

Lokasyon No	(Enlem, Boylam)	Yeri ve Genel Zemin Sınıfı
1	41.206994, 32.659616	CH (Yüksek plastisiteli inorganik killer, yağlı killer)
2	41.206899, 32.659327	ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
3	41.206770, 32.659021	ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
4	41.206648, 32.658723	ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
5	41.205956, 32.658055	MH (İnorganik siltler, diyatomeleli veya mikalı ince kumlu veya siltli zeminler)
6	41.205773, 32.658073	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
7	41.205657, 32.658299	ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
8	41.205454, 32.658109	MH (İnorganik siltler, diyatomeleli veya mikalı ince kumlu veya siltli zeminler)
9	41.205263, 32.658308	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
10	41.205202, 32.657992	MH (İnorganik siltler, diyatomeleli veya mikalı ince kumlu veya siltli zeminler)
11	41.205191, 32.658284	ML-OL (Organik siltler ve düşük plastisiteli organik silt-kil karışımları)
12	41.204994, 32.658121	ML (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
13	41.204777, 32.657860	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
14	41.204478, 32.657941	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)

15	41.204655, 32.658464	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
16	41.204342, 32.658194	ML-OL (İnorganik silt ve çok ince kumlar)
17	41.204166, 32.657914	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
18	41.203928, 32.657535	ML-OL (Organik siltler ve düşük plastisiteli organik silt-kil karışımları)
19	41.203806, 32.657174	MH-OH (Orta-yüksek plastisiteli organik killer)
20	41.204193, 32.659330	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
22	41.204254, 32.659601	ML-OL (Organik siltler ve düşük plastisiteli organik silt-kil karışımları)
23	41.204553, 32.659845	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
24	41.205381, 32.660846	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)
25	41.205279, 32.661063	ML-OL (Organik siltler ve düşük plastisiteli organik silt-kil karışımları)
26	41.205489, 32.661351	ML-OL (Organik siltler ve düşük plastisiteli organik silt-kil karışımları)
27	41.205890, 32.661423	MH-OH (Orta-yüksek plastisiteli organik killer)
28	41.206053, 32.662118	MH-OH (Orta-yüksek plastisiteli organik killer)
29	41.206752, 32.661117	CH (Yüksek plastisiteli inorganik killer, yağlı killer)
30	41.206670, 32.661640	CL (Düşük-orta plastisiteli inorganik killer)

2.1.2. Deneyleerde Kullanılan Zeminlerin Özellikleri

Tez kapsamında incelenen zemin örnekleri, çeşitli jeolojik ve topografik özelliklere sahip 30 farklı lokasyondan temin edilmiştir. Her bir lokasyon, proje hedeflerini temsil eden çeşitli zemin sınıflarına ait örnekleri içermektedir. Zemin sınıfları belirlenirken, özellikle inşaat mühendisliği uygulamalarında sıkça karşılaşılan farklı geoteknik karakteristiklere dikkat edilmiştir.

Örnekleme sürecinde, zeminlerin temsil ettiği bölgenin coğrafi ve iklimsel özellikleri göz önüne alınmıştır. Lokasyon seçiminde, zemin özelliklerinin heterojenliğini temsil etmek adına farklı jeolojik formasyonlara ve yüzey topografyalarına öncelik verilmiştir. Ayrıca, her bir örneğin dinamik koni penetrometre (DCP) ölçümleri için uygunluğu ve temsil ettiği zemin sınıfının çeşitliliği gözetilmiştir. DCP ölçümleri, saha çalışmalarının önemli bir parçasını oluşturmuş ve zeminin taşıma gücü ile ilgili önemli veriler sağlamıştır. Elde edilen arazi DCP değerleri, zeminin yüzeydeki mukavemetini belirlemek için kullanılmış ve bu değerler, laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırılmıştır.

Laboratuvar çalışmalarında, optimum su içeriğine göre hazırlanan numuneler üzerinde bir dizi zemin deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler arasında kompaksiyon, elek analizi, likit limit, plastik limit, hidrometre deneyi, serbest basınç deneyi, Kaliforniya taşıma gücü deneyi ve kesme kutusu deneyi bulunmaktadır. Her bir deney, zeminin mühendislik özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sağlamak amacıyla yapılmıştır.

Bu zemin özellikleri, inşaat mühendisliği projelerinde zeminin taşıma kapasitesi, su tutma kapasitesi ve diğer mühendislik parametreleri açısından değerlendirilmesine önemli katkılarda bulunacaktır. Tezin bu bölümü, örnek alınan zeminlerin seçim kriterlerini ve saha çalışmalarının metodolojisini anlatarak, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve temsil edilme yeteneğini vurgulamaktadır.

Çizelge 1.3. Deneyleerde kullanılan Zeminlerin Özellikleri.

Lokasyon	Zemin Sınıfı	Maksimum kuru birim hacim Ağırlık kg/m ³	Optimum su içeriği	Arazi su içeriği	Arazi DPI Değeri	IP
1. Lokasyon	CH	1800	13,77	11,86	9,3	32
2. Lokasyon	ML	1780	21,5	12,48	11,8	3
3. Lokasyon	ML	1780	21,5	16,93	25	8,56
4. Lokasyon	ML	1575	24	7,78	12	3,3
5. Lokasyon	MH	1610	18,5	6,89	3,8	15
6. Lokasyon	CL	1700	22,5	6,35	14,5	23,91
7. Lokasyon	ML	1800	26	7,54	11,5	8,3
8. Lokasyon	MH	2000	32	17,11	18	15,15
9. Lokasyon	CL	2200	24	9,52	12	9,45
10. Lokasyon	MH	2175	27	13,52	3,5	22
11. Lokasyon	ML-OL	2250	23	11,24	18,5	12,27
12. Lokasyon	ML	2490	24	14,76	12	6
13. Lokasyon	CL	1900	9,3	15,82	9,3	22
14. Lokasyon	CL	2200	17	9,34	3,3	21
15. Lokasyon	CL	2250	26	8,21	3,8	20,75
16. Lokasyon	ML-OL	1500	25	7,79	26	7,38
17. Lokasyon	CL	1500	35	8,92	25	20,39
18. Lokasyon	ML-OL	1400	32	14,23	24	11,03
19. Lokasyon	MH-OH	1850	27	10,68	25	13
20. Lokasyon	CL	1900	26	12,43	24,5	22,53
21. Lokasyon	CL	3000	14	11,01	44,85	11,35

22. Lokasyon	ML-OL	1400	22,5	12,97	26,2	5,75
23. Lokasyon	CL	1800	22,5	15,46	15	22,19
24. Lokasyon	CL	1850	25	13,15	11,2	21,3
25. Lokasyon	ML-OL	2200	25	8,65	17,7	8,8
26. Lokasyon	ML-OL	2300	22	13,88	19,5	10,53
27. Lokasyon	MH-OH	2200	20	10,11	18	21,69
28. Lokasyon	MH-OH	2300	17	12,09	17,5	30,14
29. Lokasyon	CH	1700	27	15,03	12,3	32
30. Lokasyon	CL	1700	28	9,98	13	22,17

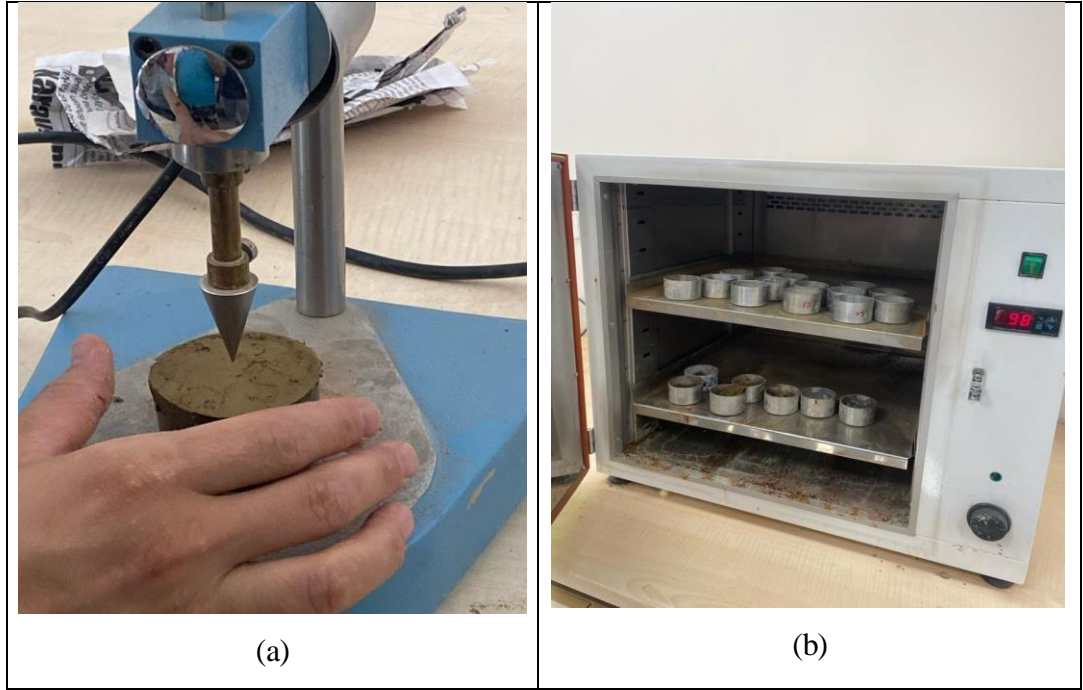
2.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.2.1. Likit Limit ve Plastik Limit Deneyleri

Likit limit, ince daneli zemin ve su karışımının akıcı bir sıvı halden plastik hale dönüştüğü belirli bir su içeriği seviyesini temsil eder. Likit limit deneyi, Casagrande ve Düşen Koni Penetrasyon Yöntemi olarak bilinen iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Düşen Koni Penetrasyon Yöntemi tercih edilmiştir.

Casagrande Yöntemi'nde, 40 numaralı elekten geçirilmiş ve etüvde kurutulmuş zemin belirli bir su miktarı eklenerek homojen bir karışım elde edilir. Bu karışım, bir pirinç kabın içine konular ve en kalın yerinin 1 cm olacak şekilde düzenlenir. Özel bir kaşıkla ortasında bir yarı oluşturulur. Ayarlanabilir bir kol, belirli bir hızda dönen bir aletle donatılarak yarık üzerinden belirli bir yükseklikten düşürülür. Kabın lastik tabana düşürülmesiyle başlayan deneyde, yarık uzunluğu yaklaşık 13 mm olduğunda deney sona erer. Deney en az 4 kez tekrarlanır ve her seferinde 25'ten küçük ve 25'ten büyük vuruşlara denk gelen iki ölçüm alınır. Sonunda, 25 düşüşe karşılık gelen su içeriği ölçülür [48]. Düşen Koni Yöntemi'nde ise LL standart bir koninin zemine batması ilkesine dayanır (Şekil 2. 4.a), Deney için zemin 40 numaralı elekten geçirilir ve etüvde kurutulur. Kurutulan zemine belirli bir su miktarı eklenerek karıştırılır ve standart bir

kaba konular konik ucun serbest düşem sonrasında 5 saniyede belirli bir su içeriğine sahip zemine batması beklenir (Şekil 2.4a). Bu işlem, farklı su içerikleri için tekrarlanır. Batma miktarları mikrometre ile ölçülür (Şekil 2.4a) ve 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su içeriğinin belirlenebilmesi için bir miktar zemin etüve gönderilir (Şekil 2.4b). Bu yöntemler, zeminin plastik halden sıvı hale geçişini belirleyerek zemin mekaniği analizleri için temel veriler sağlar.



Şekil 2.4 Likit Limit Düşen Koni deney cihazı (a), su içeriği belirleme işlemi (b).

Plastik limit, zeminin plastik halden yarı-kurudur haline geçtiği belirli bir su içeriği seviyesini ifade eder. Plastik limitin belirlenmesi için kullanılan deney, ağırlıklı olarak Casagrande Metodu olarak bilinir. Bu metodun temel amacı, zeminin belirli bir su içeriği seviyesindeki geçiş noktasını belirleyerek plastik limiti saptamaktır.

Plastik limit deneyi genellikle şu adımları içerir:

1. Örnek Hazırlığı: Deney için örnek, 40 numaralı elekten geçirilip elenerek temizlenir. Ardından, belirli bir miktar su eklenerek homojen bir karışım elde edilir.

2. Rulo Şekillendirme: Hazırlanan karışım, belirli bir su içeriği ile işlenebilir bir plastik kıvama gelene kadar masada rulo şeklinde yoğrulur. Bu adım, zeminin plastik hale geçişini sağlamak için su içeriğinin homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olur.
3. Şekil Verme: Elde edilen karışım, bir çubuk veya benzeri bir alet kullanılarak belirli bir şekle sokulur. Bu işlem, zeminin belirli bir su içeriğindeki plastik kıvamını belirlemek için yapılır (Şekil 2.5).
4. Yarı-Kuru Durumun Belirlenmesi: Şekil verilen zemin, belirli bir şekli koruyabildiği, ancak elle sıkıldığında parçalandığı durum belirlenir. Bu durum, zeminin plastik halden yarı-kuru hale geçtiği plastik limiti temsil eder.
5. Ölçüm: Plastik limit, bu işlemler sırasında zeminin su içeriği ölçülerek belirlenir. Bu su içeriği, zeminin plastik halden yarı-kuru hale geçtiği kritik noktayı temsil eder.

Plastik limit deneyi, zeminin su içeriğine bağlı olarak fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir adımdır. Bu bilgi, zeminin mühendislik özelliklerini anlamak ve tasarım süreçlerinde kullanmak için temel bir veri sağlar. Yapılan çalışmada her bir lokasyon için kompaksiyon deneyinde bulunan optimum su içeriklerine göre yapılmıştır.



Şekil 2.5 Plastik Limit Şekil Verme İşlemi.

2.2.2. Tane Boyu Dağılım Analizleri

Tane boyu analizi süreçlerinde önemli bir yer tutan hidrometre deneyi, 0,075 mm'den küçük tane boyuna sahip malzemelerin ayrıştırılmasında kullanılır. Bu deney, elek analizi ile ayrıştırılmayan ince taneli malzemelerin özellikle kil ve silt fraksiyonlarını belirlemek amacıyla uygulanır. Zemin taneciklerinin özgül ağırlıklarının eşit olduğu kabul edilir ve yer çekimi etkisi altında, büyük taneciklerin küçük olanlara göre daha hızlı çöktüğü bilinir. Hidrometre deneyi, bu prensibe dayanarak malzemelerin tane boyutlarını belirleme ve dağılımlarını analiz etme amacı taşır.

Deney sürecinde, öncelikle numunenin içerisindeki malzemelerin özgül ağırlıkları göz önüne alınır. Ardından, deneyde kullanılacak olan hidrometre düzenlemesi yapılır. Deneyin başlangıcında, su içerisinde asılı duran hidrometre, numune içerisinde çöken taneleri ölçmek üzere kullanılır. Bu süreçte çöken tanelerin çapları hesaplanarak, tane boyu dağılım eğrisi oluşturulur.

Elde edilen tane boyu dağılım eğrisi, numunenin içerdiği kil ve silt yüzdesini belirleme konusunda kritik bilgiler sağlar. Bu sayede, zemin özellikleri daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılabilir ve kullanıcılar, zeminlerin mühendislik açısından önemli özellikleri hakkında daha fazla bilgi edinir. Hidrometre deneyi, özellikle ince taneli malzemelerin karakterizasyonu ve zemin mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği hakkında önemli bilgiler sunar [49].

Deneyin Yapılışı:

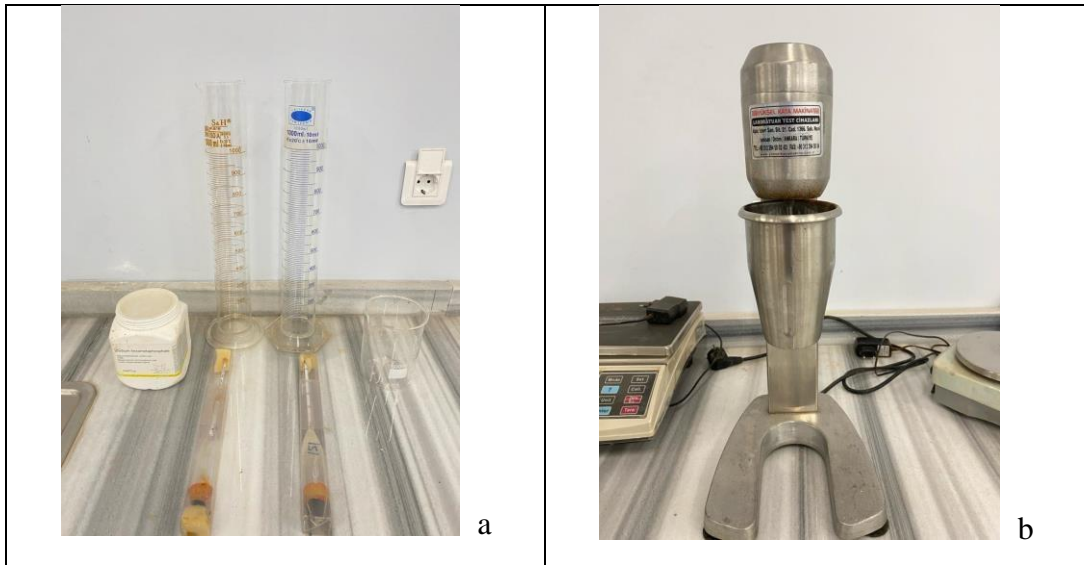
1. Örnek Hazırlığı:

1. Zemin örnekleri, sahadan toplanarak temizlenir ve büyük parçalardan arındırılır.
2. Ardından, örnekler 2 mm'lik bir elekten geçirilerek homojen hale getirilir.

2. Hidrometre Hazırlığı:

1. Hidrometre, özel bir silindir içerisinde temiz su içinde asılı duran bir cihazdır (Şekil 2.6 a).

2. Hidrometre seçimi, zemin örneğinin beklenen su içeriğine uygun olarak yapılmalıdır.
3. **Deney Prosedürü:**
 1. Zemin örneği, belirli bir miktar temiz su ile karıştırılır. Bu karışım, özel bir karıştırma kabında homojen hale getirilir (Şekil 2.6 b).
 2. Hazırlanan karışım, hidrometre silindrine dikkatlice doldurulur. Hidrometre, su içerisinde serbest bir şekilde asılı durmalıdır.
 3. Hidrometre üzerindeki ölçek, zemin suyu içeriği hakkında bilgi sağlar.
4. **Ölçüm ve Kayıt:**
 1. Hidrometre, su içinde asılı dururken, özel bir zaman aralığında suyun sıcaklığına ve yoğunluğuna bağlı olarak belirli bir derinliğe kadar su içerisinde çözülür.
 2. Belirlenen süre sonunda, hidrometre üzerinde okunan değer kaydedilir.
5. **Çalışma Kapsamında:**
 1. Bu çalışmada, 30 farklı lokasyondan alınan zemin örnekleri üzerinde hidrometre deneyleri gerçekleştirilmiştir.
 2. Elde edilen veriler, zeminlerin su tutma kapasitelerini ve su içeriklerini belirlemek için kullanılmıştır.
 3. Her bir lokasyon için yapılan hidrometre deneylerinin sonuçları, zemin özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlamıştır.



Şekil 2.6 Hidrometre Deney Düzenegi (a) Hidrometre Numune Karıştırıcı (b).

2.2.3 Elek Analizi Deneyi

Elek analizi, zemin numunelerindeki tane boyutlarını belirlemek için kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Zemin özelliklerinin belirlenmesi ve mühendislik uygulamaları için önemli veri sağlamak amacıyla bu deney yapılmaktadır. Elek analizi, zemin numunesini farklı boyutlardaki eleklerden geçirerek tane boyutu dağılımını belirlemeyi sağlar.

Elek analizi deneyi, ASTM D6913 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilir. Bu standartlar, deneyin standartlaştırılmış bir şekilde yapılmasını ve sonuçların karşılaştırılabilir olmasını sağlamak için geliştirilmiştir. ASTM D6913, zemin numunelerinin hazırlanması, eleklerin kullanılması, deney süreci ve sonuçların raporlanması gibi konuları kapsar.

Tez kapsamında, coğrafi çeşitliliği temsil eden 30 farklı lokasyondan seçilen zemin numuneleri, her biri 1 kilogram ağırlığında olacak şekilde titizlikle toplanmıştır. Bu numuneler, laboratuvar ortamında uygun koşullarda kurutulmuş, öğütülmüş ve homojen bir kıvama getirilmiştir. Deneyde kullanılan elek seti, ASTM standartlarına uygun olarak seçilmiş ve temizlenmiştir. Her bir elek, belirli bir tane boyutunu sınıflandırmak üzere uygun çapta seçilmiştir (Şekil 2.7).

Her bir zemin numunesi, belirlenen çaplardaki eleklerden geçirilmiş ve parçacıklar tane boyutlarına göre ayrıştırılmıştır. Elekler arasında yapılan sallanma işlemi, numunelerin homojen dağılımını sağlamıştır. Eleklerden geçen numune fraksiyonları, her bir lokasyon için ayrı ayrı tartılarak ağırlık analizi yapılmıştır. Bu ağırlık ölçümleri, zemin numunesinin tane boyutu dağılımını belirlemek üzere temel alınmıştır. Elde edilen veriler, her bir lokasyonun tane boyutu dağılım eğrisini oluşturmak için detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Tane boyutu analiz sonuçları, coğrafi lokasyonlara göre ayrı ayrı raporlanarak tez içerisine eklenmiştir.



Şekil 2.7 Elek Seti.

2.2.4. Kompaksiyon Deneyi

Zeminin tabaka halinde düzenlenerek, silindirleme, vibrasyon ve tokmıklama gibi işlemlerle sıkıştırılması, mühendislik uygulamalarında önemli bir aşama olan kompaksiyon sürecini oluşturur. Bu süreçte, zemin taneleri daha sıkı bir şekilde yerleşerek, boşluk oranını azaltır, böylece zeminin taşıma gücü artar.

Kompaksiyonun sağladığı avantajlar arasında zeminin taşıma kapasitesinin artırılması, geçirimsizliğinin azaltılması, kararlı bir yapı kazandırılması ve su alımının azaltılarak hacim değişikliklerinin minimize edilmesi bulunmaktadır. Ayrıca, zeminin sabit veya hareketli dinamik yükler altında meydana gelebilecek oturmaların azaltılması da kompaksiyonun önemli bir etkisidir.

Kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen kompaksiyon deneyi, genellikle Standart Proctor ve Modifiye Proctor olmak üzere iki farklı yöntemle uygulanmaktadır. Her iki deneyin aynı uygulamaya sahip olmasına rağmen, Standart Proctor ve Modifiye Proctor deneylerinin birbirinden farklı düşüş yüksekliği, kalıp hacmi ve çekiç ağırlıkları ile yapılmaktadır Çizele 2.4'de gösterilmiştir.

Bu iki deney yöntemi, zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde ve inşaat projelerinde kullanılacak en uygun sıkıştırma şartlarının tespitinde kritik bir rol oynamaktadır.

Çizelge 2.4 Kompaksiyon deney özellikleri [50].

Standar Proktor Testi	Modifiye Proktor Testi
30 cm düşme yüksekliği	45 cm düşme yüksekliği
2,5 kg çekiç kütlesi	4,5 kg çekiç kütlesi
25 düşme/katman	25 düşme/katman
3 katman	5 katman
Mold Hacmi (1/30) * (0.3048) ³ metreküp	Mold Hacmi (1/30) * (0.3048) ³ metreküp
Enerji $12.375 \times 0.30480.3048 /$ 0.4535920.453592	Enerji $56,250 \times 0.30480.3048 /$ 0.4535920.453592

Bu tez kapsamında Standart Proctor deneyi yapıldığından yalnızca bu deney anlatılmıştır. Standart Proctor deneyi, zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Bu çalışmada, her biri farklı coğrafi lokasyonlardan seçilen 30 temsilci zemin numunesi, özel tasarım silindir kap içinde gerçekleştirilen Standart Proctor deneyine tabi tutulmuştur. Her bir numune, iç çapı 102 mm, yüksekliği 117 mm ve iç hacmi 943 cm³ olan bu standart kap içinde, takıp çıkarılabilen alt tabakası ve 5 cm yüksekliğindeki yakasıyla homojen bir şekilde sıkıştırılmıştır (Şekil 2.8).

Deney numuneleri, belirlenen standart çaplardaki eleklerden geçirilerek, parçacıklar tane boyutlarına göre ayrılmış ve ardından belirli bir sıkıştırma protokolüne uygun olarak silindir kap içine üç katman halinde yerleştirilmiştir. Her bir katman, 30.5 cm yüksekliğinde ve 2.5 kg ağırlığındaki tokmakla 25 vuruş şeklinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, kapın üst kısmı çıkarılmış ve metal cetvel yardımıyla numunenin düzeltilmesi sağlanmıştır.

Fazla zemin yüksekliği 6 mm'yi geçmemesine özen gösterilerek, numune ve kap birlikte tekrar tartılmıştır. Kabın içindeki numune, kriko yardımıyla çıkartılarak, su içeriği artırılarak en az beş farklı değer elde edilinceye kadar bu işlem tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak her bir lokasyon için ayrı ayrı kompaksiyon grafiği çizilmiş ve optimum su içeriği belirlenmiştir. Bu deneyler, TS 1900-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir ve zeminin sıkıştırılabilirlik özellikleri üzerine önemli bilgiler sağlamaktadır [48,50].



Şekil 2.8 Standart Proctor Deney Seti.

2.2.5. CBR Deneyi

CBR deneyi, karayolu ve havaalanı kaplamalarının projelendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir penetrasyon deneyidir. Bu deney, hem laboratuvar ortamında hem de sahada uygulanabilir. Tipik olarak, sıkıştırılmış zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda gerçekleştirilirken, sahada ise zemin yüzeyinde veya kazılmış çukur içerisinde düz bir yüzeyde gerçekleştirilebilir [51].

Laboratuvarında, Standart Proktor ve Modifiye Proktor deneyleri sonucunda bulunan optimum su içeriği ile belirlenen 6 kg'lık zemin numunesi, 6 inç (152 cm) çapındaki kalıpta sıkıştırılır. Zemin numunesi, sahada statik gerilmeye maruz kalacağı yük altında 96 saat (4 gün) boyunca su banyosunda bekletilir. Ardından, numuneye özel bir pistonun belirli bir penetrasyon hızında (1,27 mm/dak) ilerleyerek 2,54 mm ve 5,08 mm penetrasyon derinliğine kadar batması için gerekli basınca karşı gösterdiği dayanım ölçülür. CBR deneyi, kil ile başlayarak ince çakıla kadar her tür zemin üzerinde uygulanabilen bir penetrasyon deneyidir. Deney sonucunda elde edilen taşıma gücü oranına CBR denir. Bu değer, her malzeme için aynı olmayıp, zeminin su içeriği ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir.

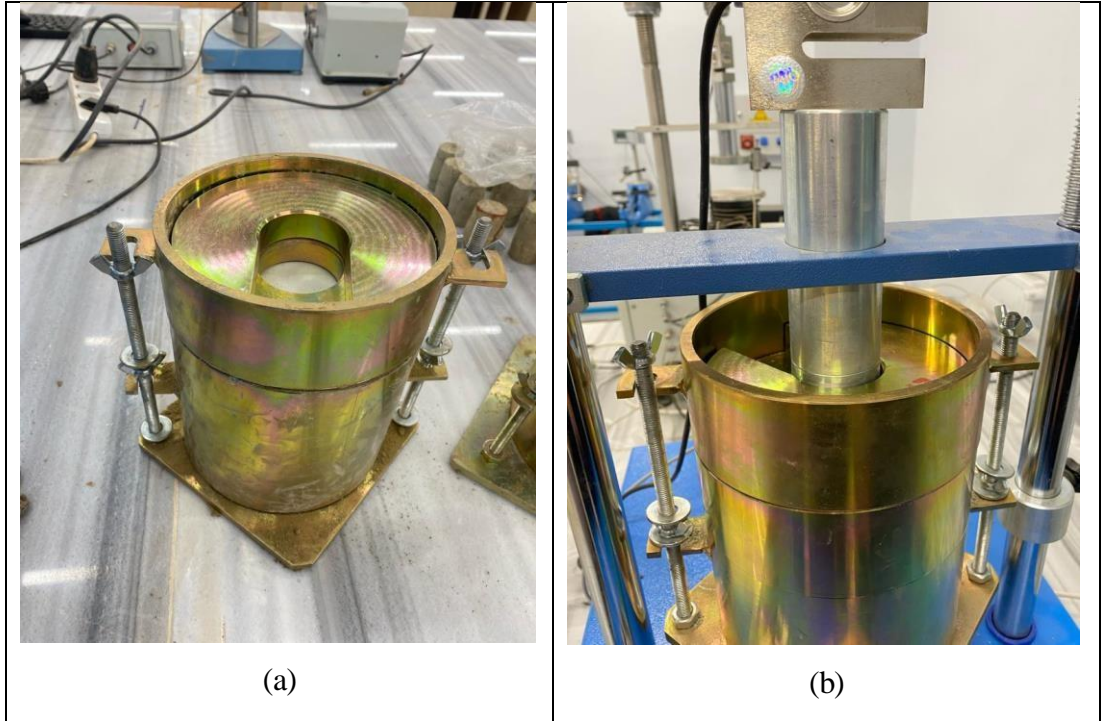
CBR değerini etkileyen en önemli faktörler zeminin cinsi (gradasyon), su içeriği ve kuru birim ağırlıktır. Optimum su içeriğinden az su içeriğinde sıkıştırılan malzeme, su banyosu sırasında daha fazla su emerek şişme potansiyeli arttığından düşük taşıma gücü elde eder. Optimum su içeriğinde sıkıştırılan malzemenin suya karşı şişme potansiyeli genellikle sabit kalır. Ancak, optimum su içeriğinden fazla su içeriği ile sıkıştırılan malzeme, suya karşı dirençli olabilir ancak yüke karşı dirençli olmayabilir. Bu nedenle, optimum su içeriğinde sıkıştırılan malzeme hem suya hem de yüke karşı dayanıklıdır.

Genellikle, 2.54 mm (0.1 inç) penetrasyona karşılık gelen CBR değeri taşıma oranı olarak kabul edilir. Eğer 5.08 mm (0.2 inç) penetrasyona karşılık gelen basınç değeri, 2.54 mm (0.1 inç) penetrasyona karşılık gelen değerden büyükse, deney tekrarlanmalıdır (Şekil 2.12). Tekrarlanan deneyde aynı sonuç elde edilirse, 5.08 mm (0.2 inç) penetrasyona karşılık gelen CBR değeri taşıma oranı olarak alınır. Numunenin yüzey pürüzlülüğü veya gevşeklik durumlarına bağlı olarak bilgisayar programları aracılığıyla düzeltmeler yapılır. Eğer eğri lineer değilse, çizginin lineer kısmı uzatılır. Bu değerler, standart olarak kabul edilen iyi derecelenmiş kırma taş malzemesi için aynı penetrasyonda bulunan basınç değerlerine (Ls) oranlanarak, o malzemenin CBR değeri belirlenir (Eşitlik 1, Eşitlik 2). [51].

$$CBR = \frac{\text{Düzeltilmiş Basınç}}{\text{Satandart Basınç}} * 100 E \quad \text{Eşitlik 1}$$

$$2.50 \text{ mm penetrasyondaki CBR} = \frac{L_{2.5}}{LS_{70.3}} * 100 \quad \text{Eşitlik 2}$$

Tez kapsamında CBR deneyleri, maksimum kuru birim hacim optimum su içeriğinde göz önünde bulundurularak hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.9a, Şekil 2.9b).



Şekil 2.9 Hazırlanmış CBR Numunesi (a), Laboratuvarda CBR Deneyi (b).

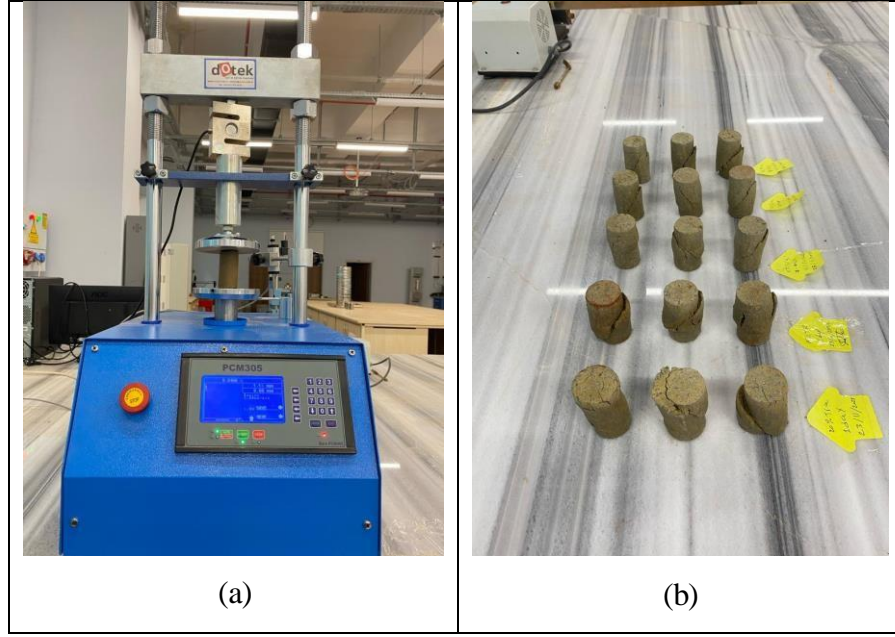
2.2.6. UCS Deneyi

Kompaksiyon deneyi sonucunda belirlenen optimum su içerikleri kullanılarak numuneler hazırlanmaktadır [52]. Bu deneyin temel amacı, herhangi bir arazide yüklemeye maruz kalan zeminlerin gerilmelere karşı gösterdiği deformasyonları belirlemektir. Numuneler öncelikle laboratuvar ortamında deneye tabi tutulur ve serbest basınç aleti kullanılarak maksimum serbest basınç mukavemet değerleri

belirlenir. Serbest Basınç Deneyi (UCS), zeminin serbest durumda maruz kaldığı basınca karşı direncini değerlendirmek amacıyla kullanılan kritik bir laboratuvar deneyidir. Bu deney, zeminin taşıma kapasitesini, dayanımını ve deformasyon karakteristiklerini belirlemek için yaygın olarak uygulanmaktadır.

Bu deney, silindirik zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetini belirlemek ve deformasyon-yük değişimini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmektedir [50]. Numuneye sadece eksenel yönde yük uygulanarak, zaman içinde artan yük altında numune boyundaki kısalma ölçülmekte ve bu süreçte gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri, numunenin serbest basınç mukavemetini temsil etmektedir. Numune boyunun çap oranı, kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıklarının kesişmemesi için 2 veya daha fazla olarak seçilmelidir. Bu deney, kendini tutabilen zeminlerde, özellikle kum zeminlerde değil, killi zeminler üzerinde uygulanmaktadır. Çalışmamızda, kil-kum karışımı numuneler üzerinde bu deney gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilemediğinden dolayı hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemeti belirlenmektedir.

Deneye başlarken, numune silindirik çelik bir kabın içinden çıkarılır ve ilk boyu ölçülür. Daha sonra, deney aygıtının alt tablasına orta merkezde yerleştirilir. Deney aygıtı çalıştırılarak numunenin üst tablaya hafifçe temas etmesi sağlanır Şekil (2.10 a). Yük ve akma değerleri sıfırlanır, yükleme hızı ayarlanır. Bu çalışmada yükleme hızı 1 mm/dk olarak belirlenmiştir ve bu hız, kırılmanın gözle görülür olduğu ve kırılma düzleminin net bir şekilde görüldüğü bir süre içinde kırılmayı sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Kırılma noktasında yüklemeler önce artar, ardından maksimum değer sabit kalır ve diğer yük okuma değerleri düşmeye başladığında deney durdurulur. Numunenin son boyu ve kırılma açısı ölçülerek TS 1900-2 standardına uygun bir şekilde kaydedilir (Şekil 2.10 b).



Şekil 2.10 UCS Deney Cihazı (a), UCS Deneyi Sonrası Kırılan Numuneler (b).

Serbest basınç mukavemeti, zeminin serbest durumda maruz kaldığı basınca karşı gösterdiği dayanımı ifade eder. Genellikle basınç biriminde (kilopascal - kPa) ölçülür.

Aşağıdaki formüller sayesinde serbest basınç dayanımı bulunur.

$$UCS=P/A$$

Burada,

1. UCS , serbest basınç mukavemeti,
2. P , maksimum yük,
3. A , numune kesit alanıdır.

Kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıklarının kesişmemesi için numune boyunun çap oranı belirlenmelidir. Genellikle 2 veya daha fazla olarak seçilir.

$$\text{Çap Oranı}=D/H$$

Burada,

1. D , numunenin çapı,
2. H , numunenin yüksekliğidir.

Deformasyon-boy değişimi oranı, numune üzerine uygulanan yükün artışına karşı gerçekleşen deformasyonu ifade eder.

$\Delta L/L$

Burada,

1. ΔL , deformasyon,
2. L , başlangıç numune boyudur.

Bu formüller, serbest basınç deneyinin temel hesaplamalarını içermektedir.

2.2.7. DCP Deneyi

DCP, basit çalışma prensibi, ekonomik olması, az bakım gerektirmesi, kolay taşınabilir olması ve sahada tekrarlı ölçümlere imkân sağlaması itibarıyla oldukça kullanışlı bir cihazdır. Yerinde yapılan CBR testinde, dayanımı belirlenecek üstyapı tabakasının üzerindeki tabakaların kaldırılması gerekmektedir. DCP testinde ise buna ihtiyaç yoktur ve bir kere yapıldığında test edilen derinlik boyunca tüm tabakaların dayanımları belirlenebilir. Ancak, DCP testi asfalt veya beton kaplamaların dayanımının belirlenmesinde uygun değildir. Bu tabakaların inceleneceği kesimde varsa, uygun bir matkapla bu tabakaların derinlikleri boyunca delinmelidir [40].

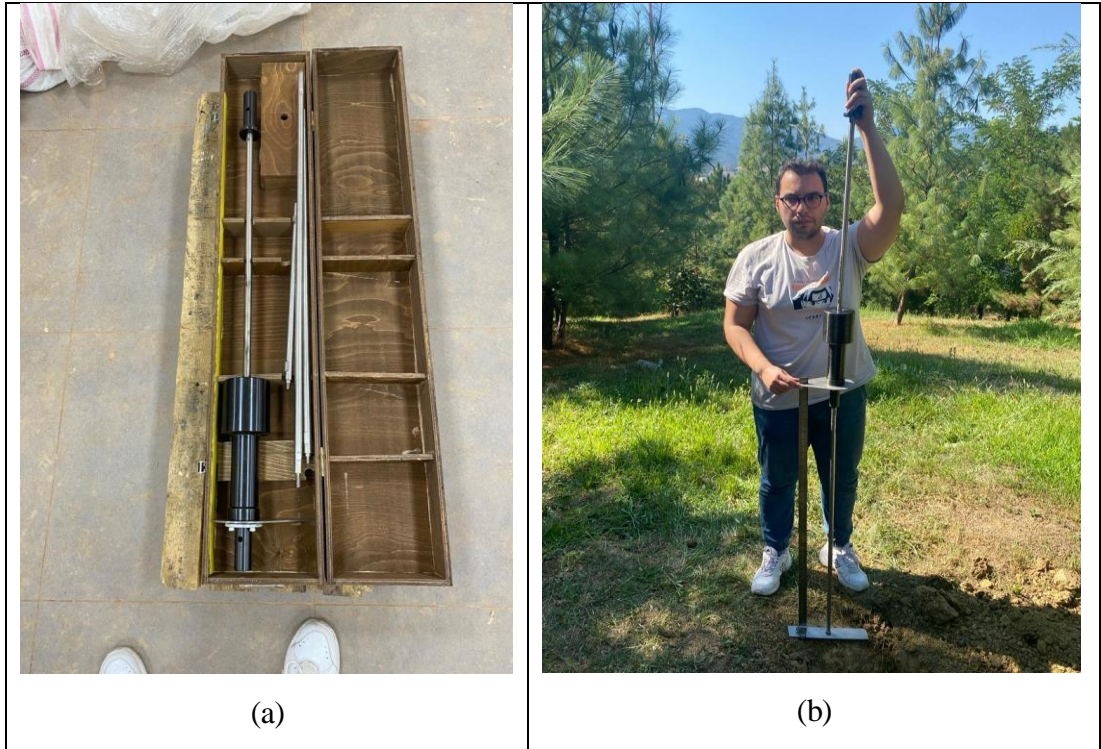
DCP test cihazı, 8 kg ağırlığındaki düşen kütle (DCP çekici), çekicinin 575 mm sabit yükseklikten serbest düşmesine olanak sağlayan üst çubuk, ucunda 60 derece'lik konik uç bulunan ve 20 mm çapındaki alt çubuk, batma derinliklerinin okunacağı cm ve mm ölçeklerine ayrılmış cetvel ve tutma aparatından oluşmaktadır (Şekil 2.11a).

DCP testi yapılırken cihaz, test edilecek kesimde (asfalt veya beton kaplama tabakası varsa, bu tabakalar uygun bir matkap ile derinlikleri boyunca delinmelidir) ölçüm noktasına yerleştirilir ve ilk cetvel okuması (sıfır okuması) yapılarak kaydedilir. Çekiç, tutma aparatına kadar kaldırılır (575 mm yüksekliğe) ve serbest bırakılır. Bu şekilde bir düşüş yapılır ve konik uç zemine batmış olur. Her düşüş sonrasında veya istenilen düşüş adedinden sonra cetvel okuması yapılarak okumalar kaydedilir (Şekil 2.11b). Test, alt çubuk uzunluğu boyunca, yani 1 metre derinliğe kadar olan tabakaları test

etmeye imkân verir. Eğer istenilirse ilave çubuklar takılarak daha derindeki tabakalar da test edilebilir.

DCP testi ile elde edilen batma indeksi (BI) değeri, üstyapı tabakalarının dayanımları hakkında bilgi veren en önemli saha verilerindedir. Bu test sonuçları, diğer dayanım ölçen cihazların test sonuçları ile ilişkilendirilerek tabaka modüllerinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, tekrarlanan DCP testleriyle üstyapı tabakalarının sıkışma dereceleri ve üniformluğu belirlenebilir. DCP testi, çizilen grafiklerde derinlik boyunca batma indeksinin değişiminden yararlanılarak tabaka kalınlıklarını belirlemede de oldukça etkili bir test yöntemidir [33].

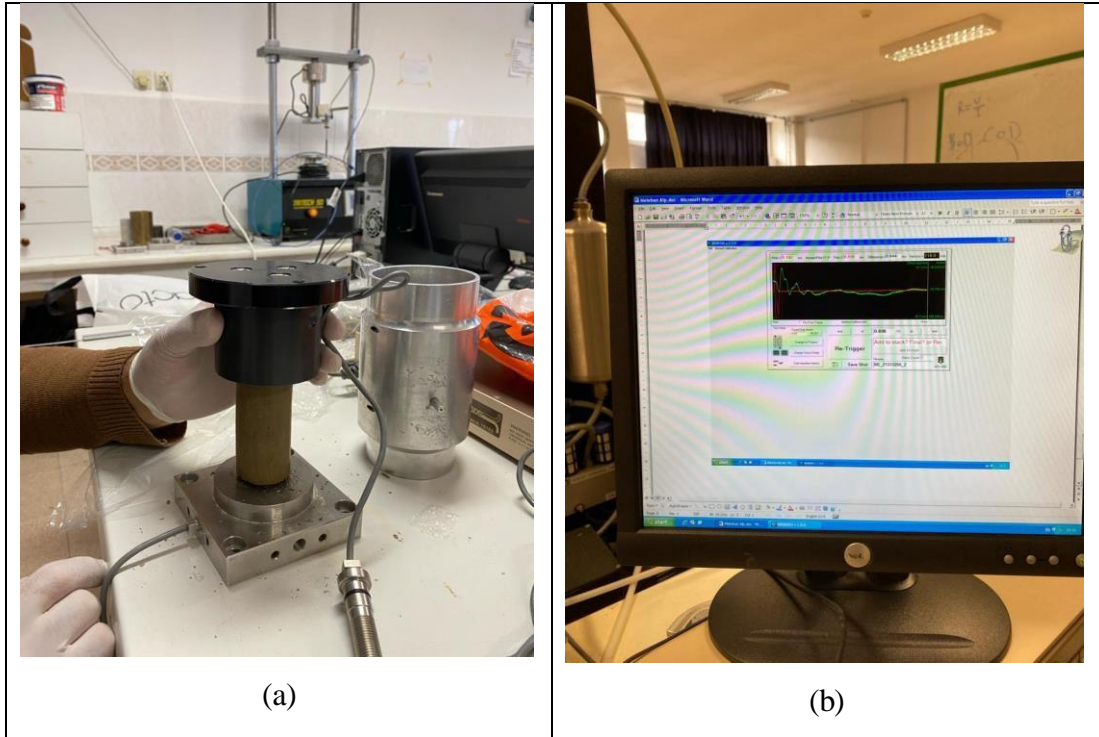
Tez kapsamında, DCP testini 30 farklı lokasyon için ayrı ayrı uyguladık. Bu testler, yerinde üstyapı tabakalarının dayanımları, sıkışma dereceleri ve üniformluğu hakkında kapsamlı veri setleri sağlamaktadır. DCP testi sonuçları, tezimde analiz ve değerlendirme aşamalarında önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2.11 DCP Deney Aleti (a), Araziden DCP deney uygulama görüntüsü (b).

2.2.8. Bender Element Test Deneyi

Zemin sertliği genellikle triaksial deneylerle ölçölür, ancak küçük deformasyonlarda G_{max} ölçümünde zorluklar ortaya çıkabilir. Bu nedenle, lokal deformasyon test cihazları kullanılarak daha hassas sonuçlar elde edilmeye çalışılır. Dinamikler ve dalga yayılımı, küçük kayma deformasyon değerlerini daha hassas bir şekilde belirlemek adına önemlidir. G_{max} 'ı ölçmek için rezonans sütun deneyi ve bender element testi kullanılmaktadır. Bender element tekniği, Shirley ve Hampton [53] tarafından önerilmiş ve triaksial deney, odometre deneyi gibi testlerde başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada, her bir lokasyondan ikişer adet olmak üzere bender element testi uygulanmıştır (Şekil 2.12a, Şekil 2.12b). Bu deneyde, bender elementleri olarak adlandırılan piezoelektrik transdüserler kullanılarak bir zemin numunesi içindeki kayma dalgalarının yayılması ölçölür. Test, toprağın rijitlik ve sönüm özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlar ve çeşitli jeoteknik ve deprem mühendisliği uygulamaları için esastır. Bu çalışma kapsamında, 30 farklı lokasyondan elde edilen numunler üzerinde ikişer adet bender element testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.12 B.E.T Deneyi Yapım Aşaması (a), Deney Sonuç Ekranı (b).

Bender Element Testi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve farklı zemin tipleri ve karışımlarındaki uygulamaları araştırmıştır. Örneğin, doymun kum-ince karışımlarının küçük deformasyon kayma modülü üzerine bir çalışma, modülün önemli ölçüde ince içeriğine, başlangıç etkili sıkıştırma basıncına ve boşluk oranına bağlı olduğunu bulmuştur. Test sonuçları, kum-ince karışımların kayma modülü için modifiye bir model ve değerlendirme yöntemi önerisine yol açmıştır [54].

Başka bir çalışma, Bender Element Testi kullanarak kil-kum karışımlarının kayma modülüne odaklanmıştır. Bu çalışma, modülün kil içeriği azaldıkça ve etkili sıkıştırma basıncı arttıkça artma eğiliminde olduğunu bulmuştur. Bu çalışma, kum içeriği ve karışımlardaki kum tanelerinin fiziksel özellikleri ile küçük deformasyon kayma modülünün değişimi konusunda değerli görüşler sağlamıştır [55].

Ayrıca, Bender Element Testi, kumun farklı oranlarında karıştırıldığı bir dizi kaolinit ile yapılan küçük kayma modülü analizinde kullanılmıştır. Sonuçlar, küçük kayma modülünün kil içeriği azaldıkça ve etkili sıkıştırma basıncı arttıkça artma eğiliminde olduğunu göstermiştir [56].

Bender Element testinde bir proptan zemine mekanik kayma dalgası iletirken, diğerinden ise bu dalga elektrik sinyaline dönüştürülür. Böylelikle kayma modülünü hesaplamak için kullanılacak kayma dalgası hızı belirlenir. Elde edilen V_s ile amprik denklemler kullanılarak zemin kayma modülü belirlenebilmektedir. Son dönemlerde Bender Element testi, zemin mühendisliği ve geoteknik analizlerde, özellikle zemin mekaniği alanındaki dinamik araştırmalarda önemli bir rol oynamaktadır [57].

2.2.9. Kesme Kutusu Deneyi

Kesme kutusu deneyi, zemin örneklerini kesme etkisine maruz bırakarak, bu örneklerin kayma direnci ve kayma açısını belirleme amacını taşımaktadır. Bu deney genellikle kumlu zeminler üzerinde gerçekleştirilse de, bizim çalışmamız özellikle kum-kil karışımı içeren zeminlere odaklanmaktadır.

Deneyin temel yöntemi, zemin örneğinin dikdörtgen veya dairesel kesitli iki parçadan oluşan sert bir kutuya yerleştirilmesidir. Kutunun üst kısmı sabit tutulurken, alt kısma uygulanan kesme kuvveti etkisiyle zemin, yatay bir düzlem boyunca kayma eğilimine zorlanır. Çalışmamızda kullanılan kesme kutusu cihazı 6 cm * 6 cm dikdörtgen kesitli olup, Şekil 2.13'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır.

Zemin numunesi, çelik kutu içine en az üç adet olacak şekilde yerleştirilir. Numuneler, düz yüzeyli bir spatula kullanılarak düzeltilir. Deney düzeneğine, en altta gözenekli bir levha, ardından poroz taş olacak şekilde numune itici ile yerleştirilir. Üzerine sırayla poroz taş ve gözenekli levha yerleştirilir. Deney düzeneği hücreye oturtularak üstüne bir başlık konulur ve kuvvet halkası bağlanır.

Deney programı açılarak tüm veriler sıfırlanır. İlk olarak, 2 kg'lık yük kola asılarak deney gerçekleştirilir. Numune kesme hızı ayarlanır ve deneye başlanır. Grafiklerde deformasyon belli bir süre artış gösterirken, sonrasında bir düşüş meydana gelir ve deney sonlandırılır. Aynı işlem, 4 kg ve 8 kg için de tekrarlanır. Üç deneyin tamamlanmasının ardından içsel sürtünme açısı ve kohezyon, TS 1900-2 standardına uygun olarak belirlenir.



Şekil 2.13 Kesme Kutusu Deney Aleti.

2.2.10 Regresyon Analizleri

Regresyon analizi, mevcut verileri kullanarak bir olayın sebep-sonuç ilişkisini tahmin etmeye yönelik bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntem, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi inceleyerek doğrusal bir eğri oluşturur. Analiz sonucunda değişkenler arasındaki bağlantı anlaşıldığında, bu ilişkiyi temel alarak olayın olası sonuçları tahmin edilebilir hale gelir.

$$Y_i = a + \beta X_i + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad [58]$$

Bu denklemde, Y bağımlı değişkeni, X bağımsız değişkenine bağlı olarak ifade edilmektedir. Denklemde geçen terimler şu şekildedir:

Y_i: Bağımlı (sonuç) değişkenin i. gözlem değeri.

X_i: Bağımsız (sebep) değişkenin i. gözlem değeri.

1. α (alfa): Kesişim katsayısı veya regresyon sabiti. X=0 olduğunda regresyon doğrusunun Y eksenini kestiği değeri ifade eder.
2. B (beta): Regresyon katsayısı. X'in birimindeki 1 birimlik değişikliğe karşılık Y'de meydana gelecek değişmeyi ifade eder. Aynı zamanda regresyon doğrusunun eğimidir.
3. ε (epsilon): Hata terimi. Bağımlı değişkendeki değişimin model tarafından açıklanamayan kısmını gösterir. Hata teriminin ortalaması sıfırdır ve varyansı σ^2 olan normal dağılım gösterdiği varsayılır.

Katsayılar olan α ve B, regresyon doğrusunun şeklini belirlerken, hata terimi ε ise modelin bağımlı değişkendeki gözlemlenen değerlerle ne kadar iyi uyum sağladığını ölçer. Regresyon analizi ile bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında bir bağlantı var mıdır? Eğer bir bağlantı var ise bu bağlantının kuvveti nedir? Değişkenler arasında ne tür bir bağlantı vardır? Bağımlı değişkene ait ilerideki değerleri tahmin etmek mümkün müdür ve nasıl tahmin edilir? Özel bir değişken ya da değişkenlerin diğer değişken ya

da değişkenler üzerindeki etkisi nedir ve nasıl etkilenir sorularına cevap bulmaya çalışılır.

Basit Regresyon Analizi

Basit regresyon analizi, bir bağımlı değişkenin bir bağımsız değişken ile ilişkisini sayısal olarak ifade edebilen analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi ile bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi temsil eden bir doğru formülü bulunmaktadır. Regresyon analizinde amaç, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi ortaya çıkarmaktır. Bu doğrunun elde edilmesi ise en küçük kareler yöntemi ile yapılmaktadır. Basit regresyon formülünü hesaplamak için en küçük kareler yöntemi kullanılır. Basit regresyon formülü şöyledir:

$$y=\beta_0+\beta_1x+\epsilon \quad [59]$$

Burada:

1. y bağımlı değişkeni,
2. x bağımsız değişkeni,
3. β_0 kesme noktası,
4. β_1 eğim,
5. ϵ hata terimidir.

Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında bir ilişkinin var olması için sebep-sonuç ilişkisi gerekli değildir. İlişkinin kaynağı belki de iki değişkenin ortak bir değişkenle ilişkili olmasından kaynaklanıyordur ya da ilişki rastlantısal olarak ortaya çıkmıştır. Regresyon analizi değişkenler arasındaki ilişkinin niteliği ve gücü ile ilgilidir.

Çoklu Regresyon Analizi

Çoklu regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi inceleyen bir analiz metodudur. Bu analiz türünde, bağımsız değişkenler aynı anda bağımlı değişkendeki varyasyonu açıklar. Hesaplama ve yorumlama açısından basit regresyon analizi ile benzerlik gösterir. Çoklu regresyon katsayısı, bağımlı değişkenle birlikte değerlendirilen bağımsız değişkenler arasındaki değişimlerin korelasyonunu ifade eder.

$$y = \alpha + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \epsilon$$

Şeklinde verilir. Burada α sabit terim, b_i 'ler tahmin edilecek regresyon katsayıları ve ϵ ise hata terimidir.

BÖLÜM 3

DCP İLE ZEMİNLERİN BAZI ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Bu çalışma kapsamında, her bir lokasyon için öncelikle arazide Dinamik Koni Penetrometre deneyi, laboratuvarında ise kompaksiyon deneyi, elek analizi deneyi, su içeriğinin belirlenmesi, likit limit ve plastik limit deneyleri, hidrometre deneyi, serbest basınç deneyi, Kaliforniya taşıma gücü deneyi, bender element test deneyi ve kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplamda 30 ayrı lokasyon için yapılan bu deneyler, zeminlerin çeşitli mühendislik özellikleri üzerinde detaylı bir analiz sağlamıştır.

Özellikle zemin indeks özellikleri deneyleri sonucunda elde edilen elek analizi sonuçlarıyla, zemindeki çakıl (G)-kum (S)-ince (F) yüzdeleri belirlenmiş ve kıvam limitleri deneyleri ile zeminin sıvı durumu olan likit limit ile zeminin plastik olarak davrandığı su içeriği olan plastisite indisi hesaplanmıştır. Ayrıca, zeminin kompaksiyon parametrelerinden olan kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği, elde edilmiştir. Kompaksiyon sonuçlarına göre sıkıştırılan zeminler üzerinde DCP, CBR, UCS, Bender Element Test ve Kesme Kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen 30 lokasyona ait deney sonuçları tablolar halinde her bölüm de gösterilmiştir. Daha sonra ise bu veriler üzerinde basit ve çoklu regresyon analizleri uygulanarak yeni formülasyonlar geliştirilmiştir. Bu formülasyonlar, zeminin tane boyutu karakteristikleri, kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri ve dinamik koni penetrometre ile zeminin taşıma gücü oranı olan CBR arasındaki ilişkiyi incelemek üzere kullanılmıştır. Bu sayede, elde edilen denklemler aracılığıyla zeminin genel mühendislik özellikleri ve taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiler daha detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur.

3.1. DCP-CBR İLİŞKİSİ

Bu bölümde, Dinamik Konik Penetrometre (DCP) ve California Taşıma Gücü (CBR) arasındaki ilişki incelenmiştir. DCP, zeminin taşıma kapasitesini belirlemede kritik bir araç olarak kabul edilmekte ve bu çalışmada, her bir lokasyondaki numunelerin DCP sonuçlarına odaklanılmıştır.

Çizelge 3.2'de sunulan Dinamik Penetrometre İndisi (DPI), Çizelge 3.1'de verilen 1.2 ve 1.3 denklemlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. DPI, Dinamik Konik Penetrometre (DCP) tarafından ölçülen zeminin dinamik direncini temsil eder. Bu endeks, 1.2 ve 1.3 denklemlerinin matematiksel kombinasyonu ile elde edilmiş, zeminin dinamik özelliklerini daha ayrıntılı bir şekilde yansıtan bir parametre olarak karşımıza çıkmıştır.

Çizelge 3.1 Optimal DPI Hesaplamaları [60].

Denklem 1.1	$DPI = \frac{D_2 - D_{\text{başlangıç okuması}}}{2 \text{ düşü}}$
Denklem 1.2	$DPI = \frac{D_7 - D_3}{5 \text{ düşü}}$
Denklem 1.3	$DPI = \frac{D_{12} - D_8}{5 \text{ düşü}}$

Bu hesaplama, DCP deneylerinin sonuçlarına dayanmaktadır ve zeminin yapısal özellikleri ile ilişkili olan DPI, 1.2 ve 1.3 denklemlerinin bir aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Dinamik Penetrometre İndisi, zeminin dinamik özelliklerini ölçmek ve bu özelliklerin zeminin yerinde dayanımlarını belirlemede kullanılan tahribatsız, güvenilir, etkili ve hızlı bir test methodu olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, DPI ile zeminin dinamik davranışı arasında bir korelasyon bulunması önemli bir bilgi sağlayacaktır.

Çizelge 3.1'de sunulan DPI değerleri, zeminin direnç özelliklerini temsil eden penetrometre tarafından ölçülen delme derinliği (mm) üzerinden elde edilmiştir.

Bu değerler, farklı zemin tiplerinin dayanımı ve mühendislik özelliklerini anlamak adına kapsamlı bir analize tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.2 DCP ve CBR İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklem)	CBR (2.540)
Lokasyon 1	9,3	25
Lokasyon 2	11,8	10
Lokasyon 3	25	14
Lokasyon 4	12	4
Lokasyon 5	3,8	18,6
Lokasyon 6	14,5	17,5
Lokasyon 7	11,5	19,1
Lokasyon 8	18	10
Lokasyon 9	12	9
Lokasyon 10	3,5	17
Lokasyon 11	18,5	6
Lokasyon 12	12	11,7
Lokasyon 13	9,3	18
Lokasyon 14	3,3	41
Lokasyon 15	3,8	24
Lokasyon 16	26	12
Lokasyon 17	25	10
Lokasyon 18	24	14
Lokasyon 19	25	11
Lokasyon 20	24,5	13
Lokasyon 21	44,85	15
Lokasyon 22	26,2	17
Lokasyon 23	15	22
Lokasyon 24	11,2	21
Lokasyon 25	17,7	25

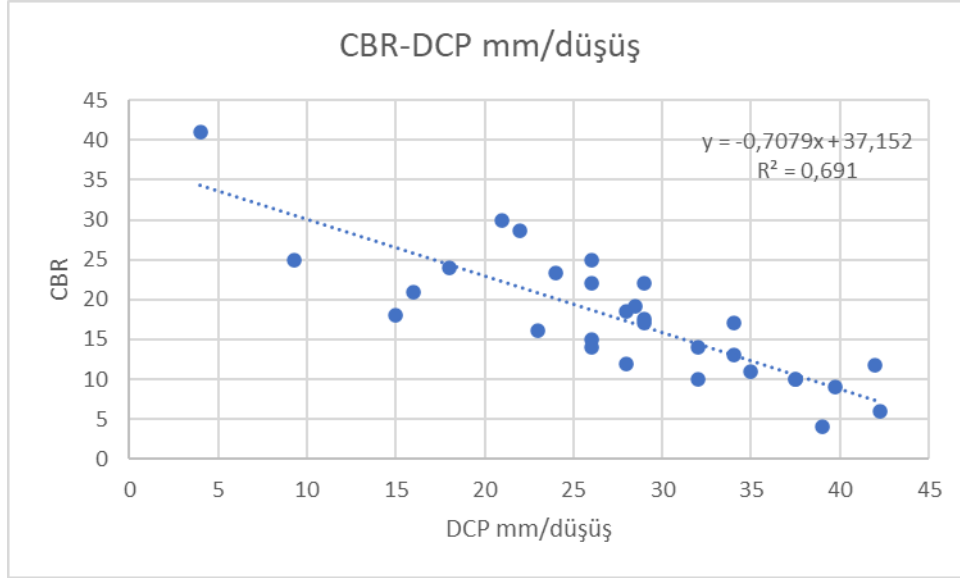
Lokasyon 26	19,5	23,3
Lokasyon 27	18	30
Lokasyon 28	17,5	16,1
Lokasyon 29	12,3	28,7
Lokasyon 30	13	22

Dinamik koni penetrometre deneyi sonuçlarına dayanarak, DPI (Dinamik Koni Penetrometre İndisi) değerini bağımsız bir değişken olarak alarak ve CBR (California Bearing Ratio) değerini bağımlı bir değişken olarak ele alarak basit regresyon analizi yapılmı ve regresyon grafi Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu analizde elde edilen regresyon denklemi, zeminin taşıma kapasitesi ile zemindeki batma indeksi arasındaki ilişkiyi ortaya koymak üzere geliştirilmiştir. Ortaya çıkan veriler, CBR ve DCP mm/düşüş arasında negatif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle, DCP mm/düşüş arttıkça, CBR değeri azalmaktadır.

Elde edilen regresyon denklemi şu matematiksel formülle ifade edilmektedir:

$$y=-0.7079x+37.152$$

Bu denklemde, y CBR'yi, x ise DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Analizin başarısını değerlendirmek adına kullanılan R^2 değeri ise 0.691 olarak elde edilmiştir. R^2 değeri, modelin verileri ne kadar iyi açıkladığını belirtir ve bu durumda modelin toplam veri setinin %69.1'ini başarılı bir şekilde açıkladığı anlamına gelir. Yüksek R^2 değeri, regresyon modelinin zeminin taşıma kapasitesini tahmin etmede güçlü ve uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede, grafikte görüldüğü üzere, elde edilen regresyon modeli, zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirmede etkili bir araç olarak kullanılabilir bir tahmin modeli sunmaktadır.



Şekil 3.1 CBR-DCP mm/düşüş.

3.2. DCP - QU İLİŞKİSİ

DCP, zeminin dayanma kapasitesini belirlemede kullanılan bir araçtır ve bu ilişki, zeminin dinamik özellikleri ile serbest basınç arasındaki bağlantıyı anlamamıza yardımcı olacaktır. Çizelge 3.3'de sunulan verilere dayanarak, DCP deneylerinden elde edilen dinamik penetrasyon değerleri ile serbest basınç değerleri arasında bir ilişki kurduk. Bu değerler, zeminin taşıma kapasitesini ve serbest basınç altındaki davranışını anlamak için kullanılmıştır.

Özellikle, Çizelge 3.3'de belirtilen lokasyonlarda yapılarak bulunan DPI değerleri ile bu lokasyonlarda ölçülen serbest basınç değerleri arasındaki karşılaştırmalar gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar, zeminin dinamik özellikleri ile serbest basınç altındaki davranış arasında potansiyel bir ilişkinin varlığını anlamamıza yardımcı olacaktır.

Çizelge 3.3 DCP - Serbest Basınç (qu) İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklemleri)	UCS N/mm ²
Lokasyon 1	9,3	785

Lokasyon 2	37,5	214,6
Lokasyon 3	32	301,44
Lokasyon 4	39	50,47
Lokasyon 5	28	201,25
Lokasyon 6	29	225,07
Lokasyon 7	28,5	150,91
Lokasyon 8	37,5	160,22
Lokasyon 9	39,75	184,25
Lokasyon 10	34	455,25
Lokasyon 11	42,25	119,24
Lokasyon 12	42	170,27
Lokasyon 13	15	375,49
Lokasyon 14	4	1289,87
Lokasyon 15	18	483,18
Lokasyon 16	28	347,75
Lokasyon 17	32	372,26
Lokasyon 18	26	241,27
Lokasyon 19	35	306,86
Lokasyon 20	34	241,15
Lokasyon 21	26	246,87
Lokasyon 22	29	392,11
Lokasyon 23	29	169,06
Lokasyon 24	16	600,77
Lokasyon 25	26	273,26
Lokasyon 26	24	173,85
Lokasyon 27	21	295,56
Lokasyon 28	23	175,94
Lokasyon 29	22	257,91
Lokasyon 30	26	243,43

Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile serbest basınç değerleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Elde edilen verilerin analizi, DCP'nin zeminin taşıma kapasitesini tahmin etmedeki potansiyel etkinliği ve serbest basınç altındaki

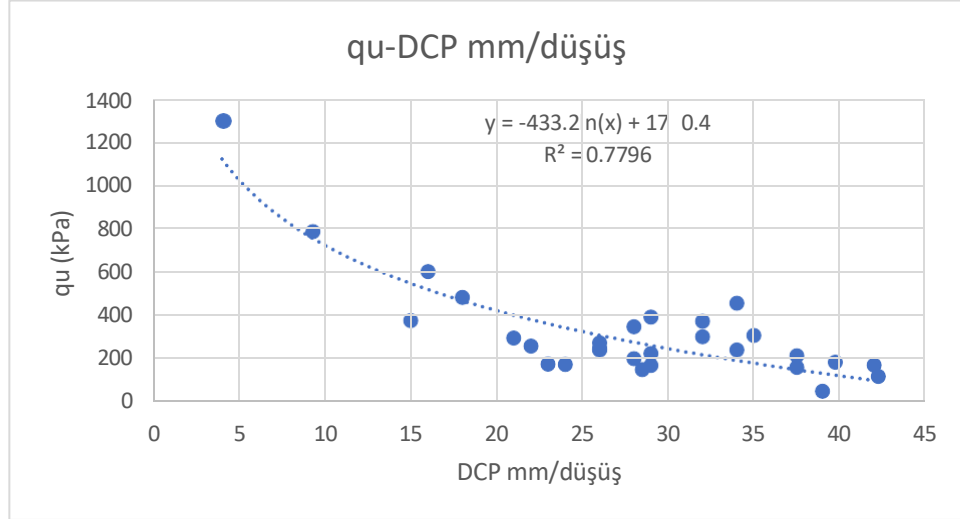
davranışını anlamak için nasıl kullanılabilceği konusunda önemli bilgiler sağlamaktadır.

Şekil 3.2'de sunulan analiz, q_u -DCP mm/düşüş ilişkisi üzerine odaklanmış ve q_u (kPa) ile DCP mm/düşüş arasındaki ilişkiyi açıklamak üzere yapılan regresyon analizini göstermektedir. Grafikteki mavi noktalar, veri setini temsil ederken, kesikli çizgi bu veri noktalarına en iyi uyan regresyon modelini göstermektedir. Elde edilen regresyon denklemi şu matematiksel formülle ifade edilmektedir:

$$y = -433.2 \ln(x) + 1720.4$$

Bu denklemde, y q_u 'yu (kPa) ve x ise DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Regresyon modelinin başarısını değerlendirmek amacıyla elde edilen R^2 değeri ise 0.7796'dır. Bu değer, modelin verilerin varyansının %77.96'sını başarılı bir şekilde açıkladığını gösterir.

Grafik üzerindeki eğim, DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte q_u 'nun (kPa) azaldığını göstermektedir. Bu durum, DCP mm/düşüş ile q_u (kPa) arasında negatif bir korelasyon olduğunu işaret etmektedir. Bu negatif ilişki, doğal logaritmik bir fonksiyonla ifade edilmekte olup, bu analitik ifade q_u -DCP ilişkisini daha anlamaya yönelik bir açıklama sunmaktadır. Bu sonuçlar, zeminin taşıma kapasitesini değerlendirmek için DCP değerlerinin etkili bir öngörü aracı olarak kullanılabilirliğini vurgularken, aynı zamanda q_u 'nun (kPa) tahmininde doğal logaritmik bir modele duyarlılığı ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2 qu-DCP mm/düşüş.

3.3. DCP-C İLİŞKİSİ

Dinamik Konik Penetrometre (DCP) ile zeminin kohezyon özellikleri arasındaki ilişki, zemin mekaniği ve taşıma kapasitesi analizinde önemli bir noktadır. DCP, zeminin direnç özelliklerini belirlemede kullanılan bir araç olup, bu çalışmada elde edilen DCP değerleri ile zeminin kohezyon özellikleri arasındaki muhtemel bağlantıyı anlamaya odaklanılmıştır.

DCP değerleri, zeminin dinamik direncini yansıtan ve penetrasyon esnasında ölçülen değerlerdir. Zeminin kohezyonu ise, zemin partiküllerini bir arada tutan ve kayma direncini belirleyen önemli bir özelliktir.

Çizelge 3.4, bu bağlamda elde edilen verilere dayanarak DPI değerleri ile zeminin kohezyon özellikleri arasındaki ilişkiyi detaylandırmaktadır.

Çizelge 3.4 DCP-c İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklem)	Kohezyon / Kpa (c)
Lokasyon 1	9,3	28

Lokasyon 2	37,5	18,63
Lokasyon 3	32	26,28
Lokasyon 4	39	10,78
Lokasyon 5	28	15
Lokasyon 6	29	31,97
Lokasyon 7	28,5	19,6
Lokasyon 8	37,5	17
Lokasyon 9	39,75	21
Lokasyon 10	34	19,61
Lokasyon 11	42,25	16
Lokasyon 12	42	24
Lokasyon 13	15	21
Lokasyon 14	4	52
Lokasyon 15	18	25
Lokasyon 16	28	17,65
Lokasyon 17	32	22,55
Lokasyon 18	26	20
Lokasyon 19	35	13,72
Lokasyon 20	34	22,16
Lokasyon 21	26	28
Lokasyon 22	29	24,51
Lokasyon 23	29	17,65
Lokasyon 24	16	37,26
Lokasyon 25	26	20
Lokasyon 26	24	17,65
Lokasyon 27	21	31,18
Lokasyon 28	23	24,09
Lokasyon 29	22	23,74
Lokasyon 30	26	33,53

Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile kohezyon özellikleri arasındaki potansiyel ilişkiyi sunmaktadır. Bu veriler, DCP'nin zeminin kohezyonunu

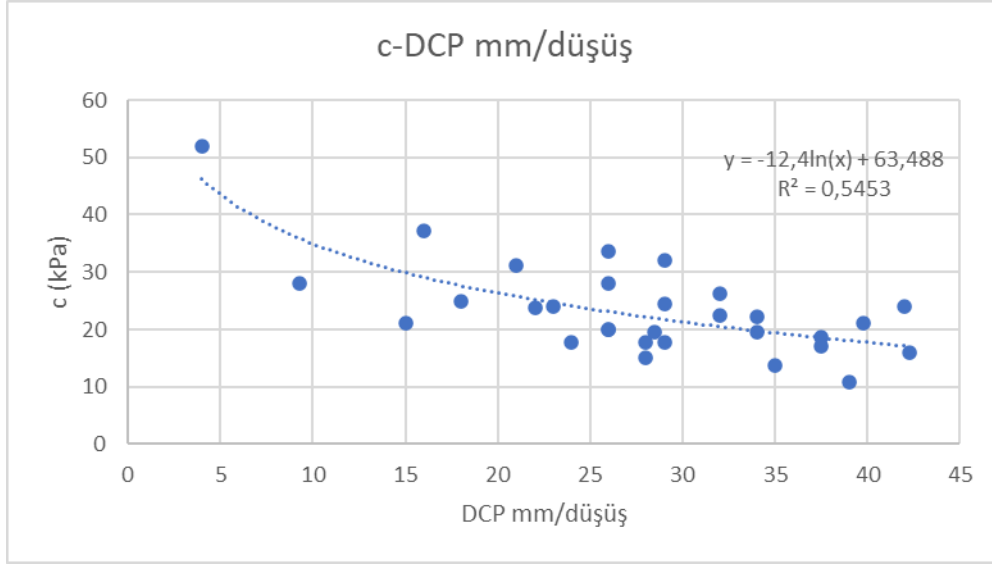
tahminlemedeki etkinliğini ve zeminin kohezyon özelliklerini belirlemede sağladığı önemli bilgileri vurgulamaktadır.

Şekil 3.3'te sunulan analiz, DCP mm/düşüş ile c (kPa) arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde incelemekte olup, veri setini temsil eden mavi renkteki noktalar ve bu verilere en iyi uyan regresyon modelini gösteren kesikli çizgi aracılığıyla ifade edilmektedir. Elde edilen regresyon denklemi ise şu matematiksel formülle ifade edilmektedir:

$$y = -12.4 \ln(x) + 63.488$$

Bu denklemde, y c 'yi (kPa) ve x ise DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Regresyon modelinin başarısını değerlendirmek amacıyla hesaplanan R^2 değeri 0.5453 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin verilerin varyansının %54.53'ünü başarılı bir şekilde açıkladığını gösterir.

Grafik üzerindeki eğim, c -DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte c (kPa) değerinin azaldığını göstermektedir. Bu durum, bu iki değişken arasında negatif bir korelasyon olduğunu işaret etmektedir. Ayrıca, elde edilen R^2 değeri 0.5453 olduğundan, modelin verileri oldukça iyi açıkladığını söyleyebiliriz. Ancak, R^2 değerinin 1'e yakın olmaması, modelin mükemmel olmadığını ve belirli değişkenlerin etkileşimini tam olarak açıklayamadığını göstermektedir. Bu noktada, modelin kapsamını ve sınırlamalarını anlamak, gelecekteki araştırmalara yönelik daha fazla perspektif sunabilir.



Şekil 3.3 c-DCP mm/düşüş.

3.4. DCP-IP İLİŞKİSİ

Dinamik Konik Penetrometre (DCP) ile zeminin Plastisite İndisi (IP) arasındaki ilişki, zeminin plastik özelliklerini değerlendirmek açısından önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır. DCP, zeminin taşıma kapasitesini belirlemede kullanılan bir araç olup, bu bölümde elde edilen DCP değerleri ile zeminin plastisite indisine olan muhtemel etkileşimi anlamaya odaklanılmıştır.

Plastisite İndisi (IP), zeminin plastik davranışını belirleyen bir ölçüttür. Zeminin plastik özellikleri, inşaat ve temel tasarımı açısından kritik öneme sahiptir ve IP değeri, zeminin plastik olma eğilimini gösterir. Çizelge 3.5, elde edilen verilere dayanarak DPI değerleri ile zeminin Plastisite İndisi arasındaki ilişkiyi detaylandırmaktadır.

Çizelge 3.5 DCP – IP İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklem)	LL %	PL %	IP %
Lokasyon 1	9,3	65,00	33,00	32,00

Lokasyon 2	37,5	19,00	16,00	3,00
Lokasyon 3	32	38,00	29,44	8,56
Lokasyon 4	39	30,00	26,70	3,30
Lokasyon 5	28	51,00	36,00	15,00
Lokasyon 6	29	39,00	15,09	23,91
Lokasyon 7	28,5	35,00	26,70	8,30
Lokasyon 8	37,5	52,00	36,85	15,15
Lokasyon 9	39,75	29,00	19,55	9,45
Lokasyon 10	34	57,00	35,00	22,00
Lokasyon 11	42,25	45	32,73	12,27
Lokasyon 12	42	34	28	6,00
Lokasyon 13	15	38	16	22,00
Lokasyon 14	4	33	12	21,00
Lokasyon 15	18	40	19,25	20,75
Lokasyon 16	28	34	26,62	7,38
Lokasyon 17	32	37,5	17,11	20,39
Lokasyon 18	26	45	33,97	11,03
Lokasyon 19	35	51	38	13,00
Lokasyon 20	34	34,9	12,37	22,53
Lokasyon 21	26	36	24,65	11,35
Lokasyon 22	29	42,5	36,75	5,75
Lokasyon 23	29	36	13,81	22,19
Lokasyon 24	16	37,5	16,2	21,30
Lokasyon 25	26	41	32,2	8,80
Lokasyon 26	24	45	34,47	10,53
Lokasyon 27	21	51	29,31	21,69
Lokasyon 28	23	55	24,86	30,14
Lokasyon 29	22	55	23	32,00
Lokasyon 30	26	38	15,83	22,17

Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile Plastisite İndisi arasındaki olası ilişkiyi göstermektedir. DCP'nin zeminin plastik özelliklerini değerlendirmedeki

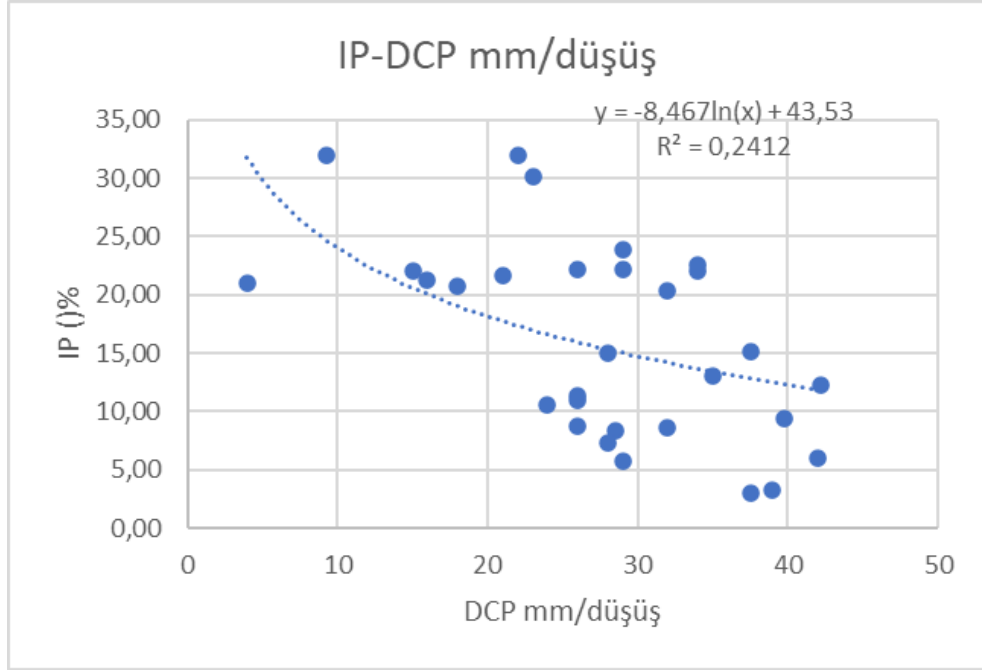
etkinliğini ve IP değerlerini tahminlemedeki potansiyelini vurgulayan bu veriler, inşaat mühendisliği uygulamaları için önemli bir bilgi kaynağını temsil etmektedir.

Şekil 3.4, DCP mm/düşüş ile IP (%) arasındaki kompleks ilişkiyi görselleştirmekte ve bu bağlamdaki veri setini mavi renkteki noktalar ve bu noktalara en iyi uyan regresyon modelini temsil eden kesikli çizgi ile sunmaktadır. Elde edilen regresyon denklemi, bu ilişkiyi ifade eden matematiksel bir formülle şu şekildedir:

$$y=-8.467\ln(x)+43.53$$

Bu denklemde, y IP'yi (%) ve x DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, grafikte DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte IP (%) değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, DCP mm/düşüş ve IP (%) arasında negatif bir korelasyon olduğunu işaret etmektedir. Ancak, regresyon modelinin başarı oranını değerlendirmek adına hesaplanan R^2 değeri 0.2412 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin verilerin varyansının sadece %24.12'sini başarılı bir şekilde açıkladığını gösterir. R^2 değerinin düşük olması, modelin verilere çok iyi uyum sağlamadığını ve bu ilişkinin karmaşıklığını tam olarak açıklayamadığını işaret etmektedir.

Grafik ve regresyon denklemi, DCP mm/düşüş ile IP (%) arasındaki karmaşık ilişkinin anlaşılmasına bir katkı sağlamakta, ancak düşük R^2 değeri, bu ilişkinin tamamen açıklanmasının zorluğuna dikkat çekmektedir. Bu nedenle, gelecekteki araştırmalar, bu iki değişken arasındaki etkileşimleri daha detaylı bir şekilde ele alarak, daha kapsamlı bir anlayış geliştirmeyi hedefleyebilir.



Şekil 3.4 IP-DCP mm/düşüş.

3.5. DCP-Gmax İLİŞKİSİ

Dinamik Konik Penetrometre (DCP) ile Maksimum Dinamik Kesme Modülü (Gmax) arasındaki ilişki, zeminin dinamik özelliklerini anlamak ve taşıma kapasitesini değerlendirmek açısından önemli bir alanı kapsamaktadır. DCP, zeminin direnç özelliklerini belirlemede kullanılan bir araç olup, bu bölümde elde edilen DCP değerleri ile Maksimum Dinamik Kesme Modülü arasındaki muhtemel etkileşimi değerlendirildi.

Maksimum Dinamik Kesme Modülü (Gmax), zeminin dinamik davranışını belirleyen önemli bir parametredir. Zeminin elastik davranışını ve titreşimlere karşı direncini gösteren Gmax değeri, mühendislik projeleri için kritik bir öneme sahiptir.

Çizelge 3.6, elde edilen verilere dayanarak DPI değerleri ile Maksimum Dinamik Kesme Modülü arasındaki ilişkiyi detaylandırmaktadır.

Çizelge 3.6 DCP-Gmax İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklem)	Gmax (MPa)
Lokasyon 1	9,3	128,75
Lokasyon 2	37,5	16,83
Lokasyon 3	32	19,51
Lokasyon 4	39	31,82
Lokasyon 5	28	43,32
Lokasyon 6	29	13,44
Lokasyon 7	28,5	11,91
Lokasyon 8	37,5	10,54
Lokasyon 9	39,75	15,66
Lokasyon 10	34	35,44
Lokasyon 11	42,25	34,35
Lokasyon 12	42	78,01
Lokasyon 13	15	49,60
Lokasyon 14	4	309,38
Lokasyon 15	18	60,96
Lokasyon 16	28	35,90
Lokasyon 17	32	15,42
Lokasyon 18	26	24,91
Lokasyon 19	35	71,07
Lokasyon 20	34	60,44
Lokasyon 21	26	70,18
Lokasyon 22	29	36,27
Lokasyon 23	29	53,97
Lokasyon 24	16	150,90
Lokasyon 25	26	35,85
Lokasyon 26	24	90,90
Lokasyon 27	21	46,26
Lokasyon 28	23	78,17

Lokasyon 29	22	125,26
Lokasyon 30	26	61,99

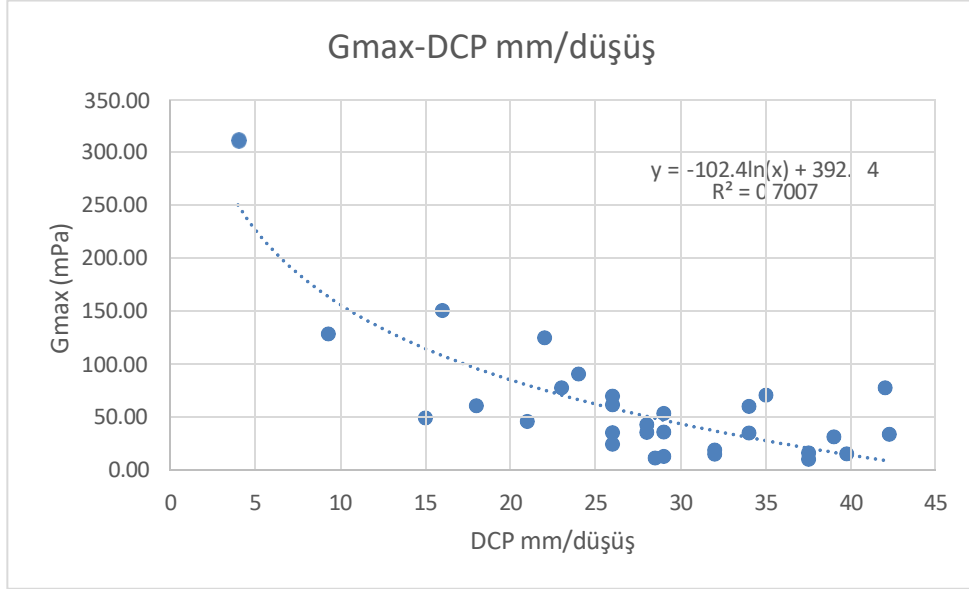
Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile Maksimum Dinamik Kesme Modülü arasındaki potansiyel ilişkiyi göstermektedir.

DCP'nin, zeminin dinamik özelliklerini ve Maksimum Dinamik Kesme Modülü'nü tahminlemedeki etkinliğini anlamamıza yardımcı olan bu veriler, mühendislik uygulamalarında zeminin davranışını daha iyi değerlendirmemize olanak tanımaktadır.

Şekil 3.5, DCP mm/düşüş ile Gmax (%) arasındaki önemli ilişkiyi ele alarak, bu bağlamdaki veri setini mavi renkteki noktalar ve bu noktalara en iyi uyan regresyon modelini temsil eden kesikli çizgi ile sunmaktadır. Elde edilen regresyon denklemi şu matematiksel formülü içermektedir:

$$y=-102.4\ln(x)+392.24$$

Bu denklemde, y Gmax'yi (%) ve x DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, grafikte DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte Gmax (%) değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, Gmax (kPa) ve DCP mm/düşüş arasında anlamlı bir negatif korelasyon olduğunu işaret etmektedir. Regresyon modelinin başarı oranını değerlendirmek adına hesaplanan R^2 değeri 0.7007 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin verilerin varyansının %70.07'sini başarılı bir regresyon bulunmuştur. Ancak, gelecekteki araştırmalarda, Gmax (%) ve DCP mm/düşüş arasındaki bu ilişkinin daha derinlemesine incelenmesi, etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve modelin sınırlamalarının anlaşılması için detaylı bir analiz yapılması, daha kapsamlı bir anlayışın oluşturulmasına katkı sağlayabilir.



Şekil 3.5 Gmax-DCP mm/düşüş.

3.6. DCP-Vs İLİŞKİSİ

Zeminin kayma dalgası hızı (V_s), zeminin elastik özelliklerini belirleyen önemli bir parametredir. Bu değer, zeminin ses dalgalarını iletim hızını temsil eder ve mühendislik projeleri için önemlidir. Çizelge 3.7, elde edilen verilere dayanarak DPI değerleri ile zeminin kayma dalgası hızı arasındaki ilişkiyi detaylandırmaktadır.

Çizelge 3.7 DCP-Vs İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklemleri)	VS
Lokasyon 1	9,3	267,45
Lokasyon 2	37,5	97,25
Lokasyon 3	32	104,68
Lokasyon 4	39	142,13
Lokasyon 5	28	164,03
Lokasyon 6	29	88,93
Lokasyon 7	28,5	81,33

Lokasyon 8	37,5	72,6
Lokasyon 9	39,75	84,38
Lokasyon 10	34	127,65
Lokasyon 11	42,25	123,55
Lokasyon 12	42	177
Lokasyon 13	15	161,57
Lokasyon 14	4	375
Lokasyon 15	18	164,6
Lokasyon 16	28	154,7
Lokasyon 17	32	101,4
Lokasyon 18	26	133,4
Lokasyon 19	35	196
Lokasyon 20	34	178,35
Lokasyon 21	26	152,95
Lokasyon 22	29	160,95
Lokasyon 23	29	173,15
Lokasyon 24	16	285,6
Lokasyon 25	26	127,65
Lokasyon 26	24	198,8
Lokasyon 27	21	145
Lokasyon 28	23	184,35
Lokasyon 29	22	271,45
Lokasyon 30	26	190,95

Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile kayma dalgası hızı arasındaki olası ilişkiyi göstermektedir. DCP'nin zeminin dinamik özelliklerini ve kayma dalgası hızını tahminlemedeki etkinliğini anlamamıza yardımcı olan bu veriler, mühendislik uygulamalarında zeminin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmemize olanak tanımaktadır.

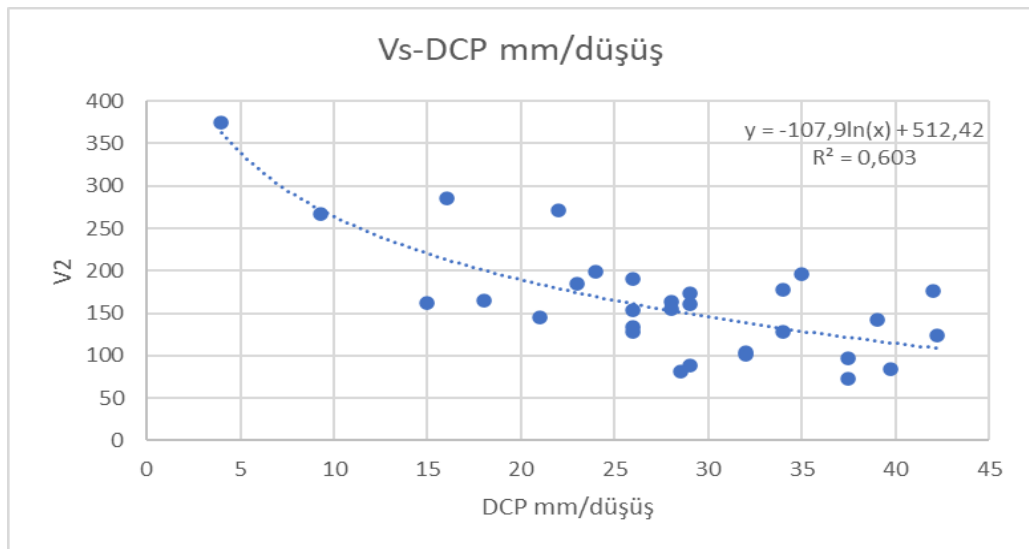
Şekil 3.6, DCP mm/düşüş ile Vs arasındaki karmaşık ilişkiyi inceleyerek, bu bağlamdaki veri setini mavi renkteki noktalar ve bu noktalara en iyi uyan regresyon

modelini temsil eden kesikli çizgi ile sunmaktadır. Elde edilen regresyon denklemi, bu ilişkiyi matematiksel bir formülle şu şekilde ifade etmektedir:

$$y = -107.9 \ln(x) + 512.42$$

Bu denklemde, y Vs'yi (m/s) ve x DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, grafikte DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte Vs'nin (m/s) azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, Vs (m/s) ve DCP mm/düşüş arasında anlamlı bir negatif korelasyon olduğunu işaret etmektedir.

Regresyon modelinin başarı oranını değerlendirmek adına hesaplanan R^2 değeri 0.603 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin verilerin varyansının %60.3'ünü başarılı bir şekilde açıkladığını gösterir. Bu, modelin verilere orta derece uyum sağladığını ve Vs (m/s) ile DCP mm/düşüş arasındaki ilişkiyi açıklamada etkili olduğunu gösterir. Bu sonuçlar, zeminin sismik dalga hızının DCP testi kullanılarak tahmin edilebileceği fikrini desteklemekte ve sismik tasarım süreçlerinde bu tahminin önemini vurgulamaktadır. Ancak, R^2 değerinin orta düzeyde olması, modelin verilerle tam uyumlu olmadığını gösterir. Bu durumu anlamak ve daha kapsamlı bir anlayış geliştirmek adına gelecekteki araştırmalarda, Vs (m/s) ve DCP mm/düşüş arasındaki bu kompleks ilişkinin daha detaylı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir.



Şekil 3.6 Vs-DCP mm-düşüş.

3.7. DCP- Φ İLİŞKİSİ

İçsel sürtünme açısı, zeminin kayma direncini belirleyen önemli bir parametredir. Bu açı, zemin partiküllerinin birbirine karşı olan direncini ve zeminin kayma davranışını ifade eder. Çizelge 3.8, elde edilen verilere dayanarak DPI değerleri ile zeminin içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkiyi detaylandırmaktadır.

Çizelge 3.8 DCP- Φ İlişkisi.

Lokasyonlar	Arazi (DPI 1.2 ve 1.3 Denklem)	İçsel Sürtünme Açısı (Φ)
Lokasyon 1	9,3	11
Lokasyon 2	37,5	2,5
Lokasyon 3	32	3,4
Lokasyon 4	39	2,7
Lokasyon 5	28	4,9
Lokasyon 6	29	6
Lokasyon 7	28,5	5,8
Lokasyon 8	37,5	4,6
Lokasyon 9	39,75	5,7
Lokasyon 10	34	10
Lokasyon 11	42,25	6,6
Lokasyon 12	42	5,6
Lokasyon 13	15	8,4
Lokasyon 14	4	16
Lokasyon 15	18	13,2
Lokasyon 16	28	9,1
Lokasyon 17	32	9
Lokasyon 18	26	9,9
Lokasyon 19	35	6,9
Lokasyon 20	34	5

Lokasyon 21	26	8,3
Lokasyon 22	29	7,2
Lokasyon 23	29	9,2
Lokasyon 24	16	14,7
Lokasyon 25	26	7,9
Lokasyon 26	24	11
Lokasyon 27	21	9,7
Lokasyon 28	23	11,8
Lokasyon 29	22	7,9
Lokasyon 30	26	10,1

Bu Çizelge, zeminin dinamik penetrasyon değerleri ile içsel sürtünme açısı arasındaki olası ilişkiyi göstermektedir. DCP'nin, zeminin içsel sürtünme açısını tahminlemedeki etkinliğini anlamamıza yardımcı olan bu veriler, mühendislik uygulamalarında zeminin kayma direncini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmemize olanak tanımaktadır.

Şekil 3.7, DCP mm/düşüş ile Φ (Phi) arasındaki karmaşık ilişkiyi detaylı bir şekilde inceleyerek, bu bağlamdaki veri setini mavi renkteki noktalar ve bu noktalara en iyi uyum sağlayan regresyon modelini temsil eden kesikli çizgi ile sunmaktadır. Verilen regresyon denklemi şu matematiksel formülle ifade edilmektedir:

$$y = -0.2788 \ln(x) + 15.875$$

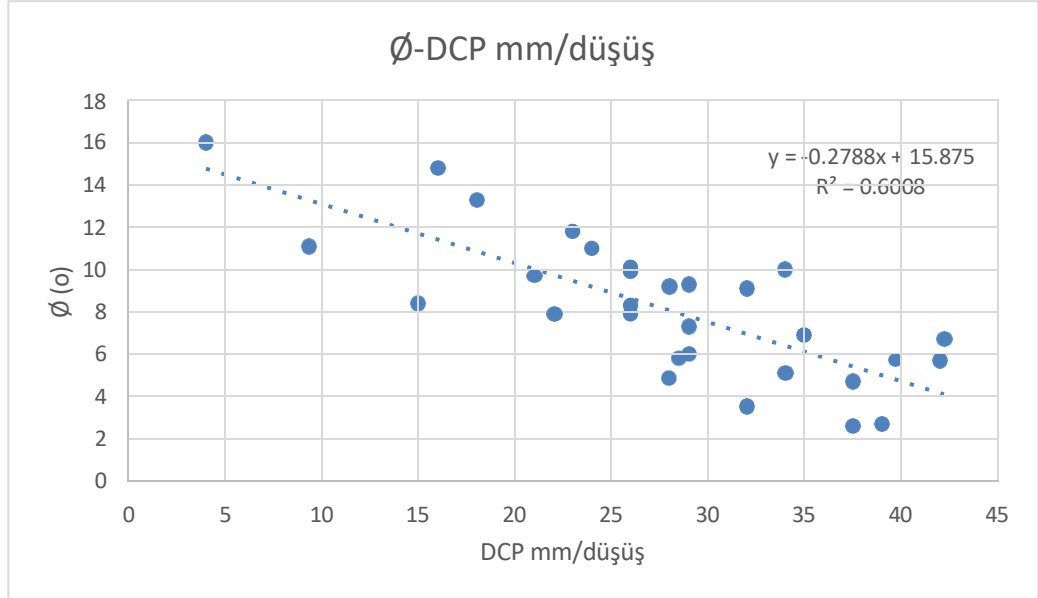
Bu denklemde, y Φ 'yi (Phi) ve x DCP mm/düşüşü temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, grafikte DCP mm/düşüşünün artmasıyla birlikte Φ 'nin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, iki değişken arasında negatif bir doğrusal ilişki olduğunu gösterir.

Regresyon modelinin başarı oranını değerlendirmek adına hesaplanan R^2 değeri 0.6008 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin verilerin varyansının %60.08'ini başarılı bir şekilde açıkladığını gösterir. Bu, modelin verilere orta derece uyum sağladığını ve DCP mm/düşüş ile Φ arasındaki ilişkinin açıklanmasında etkili

olduğunu gösterir. Ayrıca, elde edilen R^2 değeri, negatif korelasyonun anlamlı olduğunu işaret etmektedir.

DCP mm/düşüş değeri, zeminin sıkıştırılabilirliğini ifade eden bir parametre olarak, Φ değeri ise zeminin sürtünme açısını gösteren bir parametre olarak bilinir. Bu iki parametre, zeminin mukavemetini etkiler. DCP mm/düşüş değerleri, zeminin sertliğini gösterir; düşük değerler sert zemini, yüksek değerler ise yumuşak zemini ifade eder. Grafikte gözlemlenen DCP mm/düşüş değerleri 0 ile 45 arasında değişmektedir, bu da zeminin orta sertlikte olduğunu göstermektedir. Bu zemin tipi, kum veya silt gibi malzemeler içerebilir.

Bu kapsamlı analiz, DCP mm/düşüş ile Φ arasındaki kompleks ilişkinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve zeminin mühendislik özelliklerini değerlendirme konusunda önemli bir bilgi sunmaktadır. Ancak, daha derinlemesine anlayış ve kapsamlı bir yorum için gelecekte daha detaylı araştırmalar gerekebilir.



Şekil 3.7 Φ – DCP mm/düşüş.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Bu araştırma, toplamda 30 farklı lokasyonda uygulanan dinamik koni penetrometre (DCP) deneylerini içermektedir. Arazide elde edilen bu DCP deney sonuçlarından türetilen zemin örnekleri, laboratuvar ortamında kapsamlı bir analitik sürece tabi tutulmuştur. Bu süreç, çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri içeren detaylı bir analiz serisini içermekte olup, bunlar arasında kompaksiyon, arazi su içeriği, elek analizi, likit limit, plastik limit, plastisite indisi tahmini, hidrometre deneyi, serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi ve Kaliforniya taşıma gücü deneyleri bulunmaktadır.

Elde edilen deney sonuçları üzerine kurulan regresyon analizi, zemin mekaniği özellikleri ile DCP değerleri arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla kullanılmıştır. Bu analitik yöntem, her bir ilişkinin istatistiksel güvenilirliğini belirlemek amacıyla R^2 değerlerini ortaya koymaktadır. Aşağıda, her bir grafik için türetilen regresyon denklemleri ve bu denklemlerin R^2 değerleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır, bu da elde edilen ilişkilerin belirginliği ve güçlü yanlarını değerlendirme imkanı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de toplu şekilde gösterilmiştir.

1. DCP-CBR İlişkisi:

DCP (Dinamik Koni Penetrometresi) değeri, zeminin taşıma gücünü ölçmek için kullanılan bir parametredir. CBR (Kaliforniya Taşıma Gücü) değeri ise, zeminin standart bir silindire karşılaştırıldığında ne kadar dirençli olduğunu gösteren bir indekstir. Bu iki değer arasında, $y=-0,7079x+37,152$ denklemi ile ifade edilen negatif bir lineer ilişki vardır. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, CBR değeri azalır. Bu analiz, DCP değerinin CBR değerini tahmin etmek için etkili bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, R^2 değerinin 0,691 olması, bu tahminin oldukça güvenilir olduğunu ve verilerin %69,1’ini açıkladığını göstermektedir.

2. DCP - q_u İlişkisi:

q_u (serbest basınç dayanımı) değeri, zeminin üçgen şeklindeki bir yük altında ne kadar dayanıklı olduğunu gösteren bir parametredir. Bu değer, zeminin mukavemetini belirlemek için önemlidir. DCP değeri ile q_u değeri arasında, $y = -433,2 \ln(x) + 1720,4$ denklemi ile gösterilen negatif bir doğal logaritmik ilişki bulunmaktadır. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, q_u değeri azalır. Ancak, bu azalma orantılı değil, logaritmik bir şekildedir. Yüksek R^2 değeri (0,7796), bu ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve verilerin %77,96'sını açıkladığını göstermektedir. Bu da, DCP değerinin üçgen basınç dayanımını tahmin etmede etkili bir araç olduğunu kanıtlamaktadır.

3. DCP-c İlişkisi:

c (kohezyon) değeri, zeminin kendi içindeki yapışma kuvvetini gösteren bir parametredir. Bu değer, zeminin stabilitesini ve kayma eğilimini belirlemek için kullanılır. DCP değeri ile c değeri arasında, $y = -12,4 \ln(x) + 63,488$ denklemi ile ifade edilen negatif bir doğal logaritmik ilişki tespit edilmiştir. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, c değeri azalır. Ancak, bu azalma orantılı değil, logaritmik bir şekildedir. R^2 değeri (0,5453), bu ilişkinin belirgin bir şekilde açıklanabilir olduğunu ancak bazı varyasyonları içerdiğini göstermektedir. Bu da, DCP değerinin kohezyonu tahmin etmede yararlı olabileceğini ancak tam olarak güvenilir olmadığını düşündürmektedir.

4. DCP-IP İlişkisi:

IP (plastik indeks) değeri, zeminin plastisitesini gösteren bir parametredir. Plastisite, zeminin şekil değiştirebilme ve esneklik özelliğidir. DCP değeri ile IP değeri arasında, $y = -8,467 \ln(x) + 43,53$ denklemi ile gösterilen negatif bir doğal logaritmik ilişki vardır. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, IP değeri azalır. Ancak, bu azalma orantılı değil, logaritmik bir şekildedir. Düşük R^2 değeri (0,2412), bu ilişkinin daha zayıf bir bağlantı içerdiğini ve verilerin

sadece %24,12'sini açıkladığını göstermektedir. Bu da, DCP değerinin plastik indeksi tahmin etmede pek etkili olmadığını düşündürmektedir.

5. DCP-Gmax İlişkisi:

Gmax (maksimum kesme modülü) değeri, zeminin küçük deformasyonlara karşı gösterdiği elastik davranışı gösteren bir parametredir. Bu değer, zeminin dinamik davranışını ve sismik performansını belirlemek için kullanılır. DCP değeri ile Gmax değeri arasında, $y=-102,4\ln(x)+392,24$ denklemi ile ifade edilen negatif bir doğal logaritmik ilişki bulunmaktadır. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, Gmax değeri azalır. Ancak, bu azalma orantılı değil, logaritmik bir şekildedir. Yüksek R^2 değeri (0,7007), bu ilişkinin güvenilir bir şekilde açıklanabilir olduğunu ve verilerin %70,07'sini açıkladığını göstermektedir. Bu da, DCP değerinin maksimum kesme modülünü tahmin etmede etkili bir araç olduğunu kanıtlamaktadır.

6. DCP-Vs İlişkisi:

Vs (dalgave hızı) değeri, zemindeki elastik dalgaların yayılma hızını gösteren bir parametredir. Bu değer, zeminin sismik dalga yayılımını ve dinamik davranışını belirlemek için kullanılır. DCP değeri ile Vs değeri arasında, $y=-107,9\ln(x)+512,42$ denklemi ile gösterilen negatif bir doğal logaritmik ilişki vardır. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, Vs değeri azalır. Ancak, bu azalma orantılı değil, logaritmik bir şekildedir. R^2 değeri (0,603), bu ilişkinin belirli koşullarda daha dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu da, DCP değerinin dalgave hızını tahmin etmede yararlı olabileceğini ancak tam olarak güvenilir olmadığını düşündürmektedir.

7. DCP- Φ İlişkisi:

Φ (içsel sürtünme açısı) değeri, zeminin kendi içindeki sürtünme kuvvetini gösteren bir parametredir. Bu değer, zeminin kayma mukavemetini ve stabilitesini belirlemek için kullanılır. DCP değeri ile Φ değeri arasında,

$y=-0,2788x+15,875$ denklemi ile ifade edilen negatif bir lineer ilişki tespit edilmiştir. Bu demektir ki, DCP değeri arttıkça, Φ değeri azalır. Bu azalma orantılı bir şekildedir. R^2 değeri (0,6008), bu ilişkinin belirgin bir şekilde açıklanabilir olduğunu ve verilerin %60,08'ini açıkladığını göstermektedir. Bu da, DCP değerinin içsel sürtünme açısını tahmin etmede yararlı bir araç olduğunu düşündürmektedir.

Çizelge 4.1 Regresyon Analizi.

No	İlişki	Regresyon Denklemi	R^2 Değeri
1	DCP-CBR İlişkisi	$y=-0,7079x+37,152$	0,691
2	DCP - q_u İlişkisi	$y=-433,2\ln(x)+1720,4$	0,7796
3	DCP-c İlişkisi	$y=-12,4\ln(x)+63,488$	0,5453
4	DCP-IP İlişkisi	$y=-8,467\ln(x)+43,53$	0,2412
5	DCP-Gmax İlişkisi	$y=-102,4\ln(x)+392,24$	0,7007
6	DCP- V_s İlişkisi	$y=-107,9\ln(x)+512,42$	0,603
7	DCP- Φ İlişkisi	$y=-0,2788x+15,875$	0,6008

Analiz sonuçları, dinamik koni penetrometre (DCP) deneyi ile zeminlerin CBR, serbest basınç dayanımı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile kayma modülü ve kayma dalga hızı parametrelerinin etkili bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, DCP'nin zemin ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında güvenilir bir ölçüm aracı olarak kullanılabilirliğini kesin bir şekilde ortaya koymamakla birlikte elde edilen yüksek R^2 değerleri, DCP'nin bu tahminlerde yüksek derecede istatistiksel anlamlılık taşıdığını göstermektedir. Bu bağlamda, DCP'nin zemin karakterizasyonunda kilit bir rol oynayabileceği ve mühendislik tasarımlarında güvenilir bir rehberlik sağlayabileceği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu araştırma, geoteknik mühendisliği alanında pratik uygulamalara yönelik sağlam bir temel sunarak, DCP'nin mühendislik uygulamalarında önemli bir etki sağlama potansiyelini vurgulamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Burnham, T. and Johnson, D., "IN SITU FOUNDATION CHARACTERIZATION USING THE DYNAMIC CONE PENETROMETER. FINAL REPORT", (1993).
2. Enayatpour, S., Puppala, A. J., and Vasudevan, H., "Dynamic Cone Penetrometer to Evaluate Unconfined Compressive Strength of Stabilized Soils", *Site And Geomaterial Characterization, GeoShanghai International Conference 2006*, Shanghai, China, 285–292 (2006).
3. Mejías-Santiago, M., García, L., and Edwards, L., "Assessment of Material Strength Using Dynamic Cone Penetrometer Test for Pavement Applications", *Airfield And Highway Pavements 2015, Airfield and Highway Pavements 2015*, Miami, Florida, 837–848 (2015).
4. Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H., and Khamehchiyan, M., "Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils", *Engineering Geology*, 101 (3–4): 195–203 (2008).
5. Abu-Farsakh, M. Y., Alshibli, K., Nazzal, M., and Seyman, E., "Assessment of in-situ test technology for construction control of base courses and embankments.", *Louisiana Transportation Research Center*, (2004).
6. Abu-Farsakh, M. Y., Nazzal, M. D., Alshibli, K., and Seyman, E., "Application of Dynamic Cone Penetrometer in Pavement Construction Control", *Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board*, 1913 (1): 53–61 (2005).
7. George, V., Rao, N. Ch., and Shivashankar, R., "PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades", *International Journal Of Pavement Engineering*, 10 (3): 189–199 (2009).
8. Wu, S. and Sargand, S., "Use of Dynamic Cone Penetrometer in Subgrade and Base Acceptance", (2007).

9. Franco, C. A. and Lee, K. W., "An Improved California Bearing Ratio Test Procedure", (1987).
10. Liu, Y., Nan, L., Li, G., Wu, D., Chen, S., and Li, K., "Application Strategy of CBR Test in Highway Engineering", *Journal Of World Architecture*, 7 (3): 32–37 (2023).
11. Kumar, P., Dilip, D. M., and Babu, G. L., "Critical appraisal of correlations between CBR and subgrade modulus", *Journal Of The Indian Roads Congress*, 75 (1): (2014).
12. Paik, K., Salgado, R., Lee, J., and Kim, B., "Behavior of Open- and Closed-Ended Piles Driven Into Sands", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 129 (4): 296–306 (2003).
13. Meyerhof, G. G. and Ranjan, G., "The Bearing Capacity of Rigid Piles Under Inclined Loads in Sand. III: Pile Groups", *Canadian Geotechnical Journal*, 10 (3): 428–438 (1973).
14. Kleyn, E. G., Maree, J. H., and Savage, P. F., "Application of a portable pavement dynamic cone penetrometer to determine in situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa", *The European Symposium On Penetration Testing, Amsterdam, Netherlands*, 277–282 (1982).
15. Kleyn, E. G. and Savage, P. F., "Application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements", (1982).
16. Parker, F., Hammons, M., and Hall, J., "Development of an automated dynamic cone penetrometer for evaluating soils and pavement materials", (1998).
17. Al-Refeai, T. and Al-Suhaibani, A., "Prediction of CBR Using Dynamic Cone Penetrometer", *Journal Of King Saud University - Engineering Sciences*, 9 (2): 191–203 (1997).
18. Thach Nguyen, B. and Mohajerani, A., "Determination of CBR for fine-grained soils using a dynamic lightweight cone penetrometer", *International Journal Of Pavement Engineering*, 16 (2): 180–189 (2015).
19. Kameistu, P., Priadi, E., and Widodo, S., "Correlation Of Based Soil Carrying Capacity Results Of Cone Penetration Test, Dynamic Cone Penetrometer (Dcp), Plate Bearing Test, And Hand Penetrometer", *Jurnal Teknik Sipil*, 23 (3): 318–328 (2023).

20. Abdella, D., Abebe, T., and Quezon, E. T., "Regression analysis of index properties of soil as strength determinant for California bearing ratio (CBR)", *Gsj*, 5 (6): 1 (2017).
21. Al-Busaltan, S. and Shaban, A. M., "Determining field bearing resistance of subgrade soils using physical characteristics", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 745 (1): 012143 (2020).
22. Putri, E. E., Rao, N., and Mannan, M. A., "Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test", *Journal Of Civil Engineering Research*, 2 (1): 34–40 (2012).
23. Lee, C., Kim, K.-S., Woo, W., and Lee, W., "Soil Stiffness Gauge (SSG) and Dynamic Cone Penetrometer (DCP) tests for estimating engineering properties of weathered sandy soils in Korea", *Engineering Geology*, 169: 91–99 (2014).
24. Ling, T.-C., Nor, H. Md., Hainin, Mohd. R., and Chik, A. A., "Laboratory performance of crumb rubber concrete block pavement", *International Journal Of Pavement Engineering*, 10 (5): 361–374 (2009).
25. Sas, W. and Gluchowski, A., "Application of cyclic CBR test to approximation of subgrade displacement in road pavement", *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 12 (1): (2013).
26. Molenaar, A. A. A., "Repeated load CBR testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials", (2008).
27. Rashidian, V., Naeini, S. A., and Mirzакhanlari, M., "Laboratory testing and numerical modelling on bearing capacity of geotextile-reinforced granular soils", *International Journal Of Geotechnical Engineering*, 12 (3): 241–251 (2018).
28. Kleyн, E. G., Van Heerden, M., and Rossouw, A. J., "An investigation to determine the structural capacity and rehabilitation utilization of a road pavement using the pavement Dynamic Cone Penetrometer", *Proceedings Of The International Symposium On Bearing Capacity Of Roads And Airfields, Trondheim, June 23-25, 1982.*, (1982).
29. Ese, D., Myre, J., Noss, P., and Vaernes, E., "The use of dynamic cone penetrometer (DCP) for road strengthening design in Norway", *4th International Conference, Bearing Capacity Of Roads And AirfieldsFHWA, U Of Minnesota, Army Corps Of Engineers, NRC Canada, FAA*, 1: (1994).

30. Omiya, M., Kishimoto, K., and Nakano, T., "Evaluation of the interfacial strength of layered structures by indentation method", (2008).
31. Kitamura, M. and Hirose, T., "Strength determination of rocks by using indentation tests with a spherical indenter", *Journal Of Structural Geology*, 98: 1–11 (2017).
32. Kahraman, S., Fener, M., and Kozman, E., "Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness index", *Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy*, 112 (5): 331–339 (2012).
33. UZ, V. E. and SALTAN, M., "GRANÜLER YOL TABAKALARININ YERİNDE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ: DİNAMİK KONİ PENETROMETRE (DCP) TESTİ", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4 (2): 70–88 (2012).
34. Kleyn, E. G., "The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)", *Transvaal Provincial Administration*, (1975).
35. Smith, R. B. and Pratt, D. N., "A field study of in situ California bearing ratio and dynamic cone penetrometer testing for road subgrade investigations", *Australian Road Research*, 13 (4): (1983).
36. Livneh, M. and Ishai, I., "Pavement and material evaluation by a dynamic cone penetrometer", *Proc., Sixth International Conference On The Structural Design Of Asphalt Pavement*, 1: 665–674 (1987).
37. Harison, J. A., "Correlation of CBR and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils", *Australian Road Research*, 16 (2): (1986).
38. Truebe, M. A. and Evans, G. L., "Lowell Test Road: Helping Improve Road Surfacing Design", .
39. Gabr, M. A., Hopkins, K., Coonse, J., and Hearne, T., "DCP Criteria for Performance Evaluation of Pavement Layers", *Journal Of Performance Of Constructed Facilities*, 14 (4): 141–148 (2000).
40. Chen, D.-H., Wang, J.-N., and Bilyeu, J., "Application of Dynamic Cone Penetrometer in Evaluation of Base and Subgrade Layers", *Transportation Research Record*, 1764 (1): 1–10 (2001).
41. Hamid, A., "THE DYNAMIC CONE PENETRATION TEST: A REVIEW OF ITS CORRELATIONS AND APPLICATIONS", (2015).

42. Yildirim, B. (2009). Kaliforniya Taşıma Oranının Regesyon Analizleri ve Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi. *Nigde Unviersity*.
43. Booth, J., Keeton, G. P., & Gosling, R. C. (2008). Some observations on determining CBR and the use of stiffness as an alternative. In *Advances in Transportation Geotechnics* (pp. 715-720). CRC Press.
44. "Prediction of California Bearing Ratio (CBR) of Fine Grained Soils by AI Methods - ScienceDirect", https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997810000189?casa_token=KCSiwMFdTVgAAAAA:cmhPHvjH2wP-5ZZ-GZwvWz-y8aFy3GykZLyUxR4dPgFTVcb2xsR5IMdi8EDcCe4GiOctP-WthIc (2024).
45. "[PDF] Value Estimation Of California Bearing Ratio From Hand Cone Penetrometer Test For Pekanbaru Soils | Semantic Scholar", <https://www.semanticscholar.org/paper/Value-Estimation-Of-California-Bearing-Ratio-From-Nugroho-Yusa/fa2f130237a3d7d0832eb42ab3c2ee09668c48c8> (2024).
46. Jersey, S. R., Tingle, J. S., Norwood, G. J., Kwon, J., and Wayne, M., "Full-Scale Evaluation of Geogrid-Reinforced Thin Flexible Pavements", *Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board*, 2310 (1): 61–71 (2012).
47. Vakili, A. H., Salimi, M., and Shamsi, M., "Application of the dynamic cone penetrometer test for determining the geotechnical characteristics of marl soils treated by lime", *Helion*, 7 (9): (2021).
48. Enst, T. S., "İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE ZEMİN LÂBORATUVAR DENEYLERİ - BÖLÜM 1: FİZİKSEL ÖZELLİKLERİN TAYİNİ", (2006).
49. Bayraç, İ. S., "Mekânsal regresyon yöntemleri kullanarak zemin parametrelerinin belirlenmesi Eskişehir ili örneği", Master's Thesis, *Eskişehir Teknik Üniversitesi*, (2019).
50. ATAYŞEN, E. Ö., "GERİLME VE ISLANMA KOŞULLARININ ÇEŞİTLİ ZEMİNLERİN HAFIZASINDA SAKLANABİLİRLİĞİ", PhD Thesis, (2020).
51. Şeker, V., "Sıkıştırılmış zeminlerin kaliforniya taşıma oranının (CBR) basit indeks özellikler kullanarak tahmin edilmesi", Master's Thesis, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, .

52. Durmaz, M., "Killi Zeminlerin Kireç ile Stabilizasyonunun Deneysel Çalışması ve Sonuçların İstatistiksel Değerlendirilmesi", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (18): 973–980 (2020).
53. Shirley, D. J. and Hampton, L. D., "Shear-wave measurements in laboratory sediments", *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, 63 (2): 607–613 (1978).
54. "Study on the Small Strain Shear Modulus of Saturated Sand-Fines Mixtures by Bender Element Test | Semantic Scholar", <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-on-the-small-strain-shear-modulus-of-mixtures-Ruan-Miao/59f0114f5dd6026d06f2b152556f70abcc120e33> (2023).
55. University of Gaziantep, Civil Engineering Department, Turkey, Cabalar, A. F., Khalaf, M. M., University of Gaziantep, Civil Engineering Department, Turkey, Karabash, Z., and University of Mosul, College of Engineering, Dams and water resources Department Mosul, Iraq, "Shear modules of claysand mixtures using bender element test", *Acta Geotechnica Slovenica*, 15 (1): 3–15 (2018).
56. Sadeghzadegan, R., Naeini, S., and Mirzaii, A., "Determination of Small Shear Modulus of Clayey Sand Using Bender Element Test", *World Academy Of Science, Engineering And Technology, International Journal Of Environmental, Chemical, Ecological, Geological And Geophysical Engineering*, (2017).
57. "Analysis of Bender Element Test Interpretation Using the Discrete Element Method | Semantic Scholar", <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-bender-element-test-interpretation-the-O%E2%80%99Donovan-O%E2%80%99Sullivan/6d2b2c341c424a7377ff31bb26dab0fcfc34bd22> (2023).
58. Aytekin, M. (2000). *Deneysel zemin mekaniği*. Akademi Yayınevi.
59. Pimentel, X., "AN INTRODUCTION TO GEOTECHNICAL ENGINEERING Second Edition", .
60. Sowers, G. and Hedges, C., "Dynamic cone for shallow in-situ penetration testing", Vane Shear and Cone Penetration Resistance Testing of In-Situ Soils, *ASTM International*, (1966).

ÖZGEÇMİŞ

Metehan Alp MEMİŞ, İlk ve orta öğrenimini Giresun'da tamamladıktan sonra, 2016 yılında Karabük Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2021 yılında lisans eğitimini başarıyla tamamladıktan hemen sonra, Karabük Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve burada çeşitli uluslararası bildiriler ve makaleler yayınladı. Aynı dönemde Karabük'te çeşitli inşaat firmalarında mühendis olarak görev aldı. Halen, 2024 yılı itibariyle Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına devam etmektedir.