



**SIVILAŞTIRILMIŞ PET ŐŐE ATIKLARININ İNCE  
TANELİ ZEMİNLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**Namenur İBİŞ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU**

**2022**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SIVILAŞTIRILMIŞ PET ŞİŞE ATIKLARININ İNCE TANELİ ZEMİNLERİN  
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

(Effects of Liquefied PET Bottle Wastes on Physical Properties of Fine Grained Soil)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Namenur İBİŞ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIİMOĞLU

Erzurum

Eylül, 2022



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
Graduate School of Natural and  
Applied Sciences

**T.C.**  
**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü**  
**TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI**

**SIVILAŞTIRILMIŞ PET ŞİŞE ATIKLARININ İNCE TANELİ ZEMİNLERİN FİZİKSEL  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU danışmanlığında, Namerur İBİŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

|               |                                                                           |                      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Jüri Başkanı: | Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Neşe<br>KURT ALBAYRAK<br>Atatürk Üniversitesi       | Aslı Islak İmzalıdır |
| Danışman:     | Prof. Dr. Ahmet Şahin<br>ZAIMOĞLU<br>Atatürk Üniversitesi                 | Aslı Islak İmzalıdır |
| Jüri Üyesi:   | Dr. Öğr. Üyesi Babak<br>KARİMİ GHALEHJOUGH<br>Erzurum Teknik Üniversitesi | Aslı Islak İmzalıdır |

Enstitü Yönetim  
Kurulunun .../.../.... tarih  
ve ..... sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN**  
**Enstitü Müdürü**

Aslı Islak İmzalıdır

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU* danışmanlığında sunulan “Sıvılaştırılmış Pet Şişe Atıklarının İnce Taneli Zeminlerin Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkileri” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

| Tez Bölümleri                   | Tezin Benzerlik Oranı (%) | Maksimum Oran(%) |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|
| Giriş                           | 7                         | 30               |
| Kuramsal Temeller               | 21                        | 30               |
| Materyal ve Yöntem              | 10                        | 35               |
| Araştırma Bulguları ve Tartışma | 3                         | 20               |
| Sonuçlar ve Öneriler            | 0                         | 20               |
| Tezin Geneli                    | 15                        | 25               |

**Not:** Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

| Tez Yazarı (Öğrenci)       | Tez Danışmanı                  |
|----------------------------|--------------------------------|
| Namenur İBİŞ               | Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU |
| 8.9.2022                   | 8.9.2022                       |
| İmza: Aslı Islak İmzalıdır | İmza: Aslı Islak İmzalıdır     |

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun ....../....../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun ....../....../.... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Gerek deneylerde gerekse bu tezin hazırlanmasında bilgileri ve deneyimleriyle bana her zaman destek olup yardımını asla esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU' na ve Arş. Gör. Fatih ARTUK' a ve çalışmayı destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım. Viskoz sıvı hazırlanmasında yardımları dokunan Sayın Doç. Dr. Meral OLTULU' ya, viskoz sıvının üretim aşaması Bingöl Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarı'nda gerçekleşmiş olup sıvı üretiminde bulunan öğretim elemanı Sayın Doç. Dr. Sibel DUMAN' a ve Öğr. Gör. Hasan POLAT' a teşekkürlerimi sunarım. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Laboratuvarı'nda çalışmalarında yardımları dokunan sevgili dönem arkadaşlarıma ve laboratuvar çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Tüm çalışmam boyunca desteklerini her zaman arkamda hissettiğim benim en büyük destekçilerim kıymetli anneme ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Namenur İBİŞ

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### SIVILAŞTIRILMIŞ PET ŞİŞE ATIKLARININ İNCE TANELİ ZEMİNLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Namenur İBİŞ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

**Amaç:** Dünya’da çevresel sorunlara yol açan milyonlarca adet PET şişe atığı ortaya çıkmaktadır. PET şişe atığı katı formda farklı şekillerde katkı malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Ancak PET şişe atıklarını katı halde değerlendirmek bazı alanlarda (geoteknik, yapı malzemesi) kullanılabilirliklerini sınırlı kılmaktadır. Bu nedenle çalışmada sıvılaştırılmış PET şişe atıklarının, ince taneli zeminin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

**Yöntem:** PET şişe atıkları kimyasal olarak sıvılaştırılıp ince taneli zeminin karışım sıvısına farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilerek katkılı zemin numuneleri üretilmiştir. Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin zemin sınıflarını, serbest basınç mukavemetlerini, farklı donma-çözülme çevrimleri (1, 3, 5, 10 ve 15) sonrası serbest basınç mukavemetlerini belirlemek için Atterberg Limitleri, serbest basınç ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Sıvılaştırılmış pet şişe atığı katkısı doğal zemine 1. konfigürasyon (doğal zemin + sıvı + su), 2. konfigürasyon (doğal zemin + su + sıvı) ve 3. konfigürasyon (doğal zemin + (su + sıvı)) olacak şekilde 3 farklı kombinasyonla ilave edilmiştir.

**Bulgular:** Deneylerden; zemin sınıfının katkı oranlarına göre hemen hemen değişmediği, katkı oranı arttıkça plastik limitin başlangıç değeriyle hemen hemen aynı kaldığı, katkının ekleniş biçiminin zeminin serbest basınç mukavemeti üzerine etkisi olduğu, donma – çözülme deneylerinde çevrim sayısının artmasıyla zeminin serbest basınç mukavemetinin düştüğü, %10 ve %20 katkı oranının donma – çözülme üzerine zemine olumlu sonuç verdiği bulguları elde edilmiştir.

**Sonuç:** Sıvılaştırılmış PET şişe atığının doğal zemin üzerinde %5 oranda eklenmesiyle en iyi taşıma gücüne ulaştığı görülmüştür. Ek olarak donma – çözülme deneylerinde %10 ve %20 oranı zeminde olumlu etki yaratmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sıvılaştırma, atık pet şişe, ince taneli zemin, atık değerlendirme.

Eylül 2022, 64 sayfa

## ABSTRACT

### MS THESIS

#### EFFECTS OF LIQUEFIED PET BOTTLE WASTE ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF FINE GRAINED SOILS

Namenur İBİŞ

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

**Aim:** Nowadays, millions of PET bottle wastes are emerging and causing enviromental problems. PET bottle waste is evaluated as an additive material in different ways in solid form. However, using PET bottle wastes in solid form limits their usability in some areas (geotechnical, building materials). Accordingly, at this study the effect of liquefied PET bottle waste on some physical and mechanical properties of fine-grained soil was investigated.

**Method:** PET bottle wastes have been chemically liquefied and added to the mixing liquid of fine-grained soil at different rates (5%, 10%, 15% and 20%) to produce soil samples with additives. Atterberg Limits, unconfined pressure and freeze-thaw test have been carried out to determine the soil classes, unconfined compressive strengths, unconfined compressive strengths after different freeze-thaw cycles (1, 3, 5, 10 and 15) of soil samples with and without additives. Liquefied PET bottle waste additive can be added to natural soil in 3 different combinations as 1st configuration (natural soil + liquid + water), 2nd configuration (natural soil + water + liquid) and 3rd configuration (natural soil + (water + liquid)) at these three configurations has been examined.

**Results:** From the experiments; The soil class does not change almost according to the additive ratios, the plastic limit remains almost the same as the initial value as the additive ratio increases, the way the additive is added has an effect on the unconfined compressive strength of the soil, the unconfined compressive strength of the soil decreases with the increase in the number of cycles in the freeze-thaw experiments, 10% and 20% It has been found that the additive ratio gives positive results to the floor on freezing - thawing.

**Conclusion:** As a result, it has been observed that liquefied PET bottle waste has the best carrying capacity with the addition of 5% on the natural ground. In addition, 10% and 20% of the freeze-thaw tests have a positive effect on the floor.

**Keywords:** Liquefaction, waste pet bottle, fine-grained soil, waste recycling.

September 2022, 64 pages

## İÇİNDEKİLER

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....                                | i    |
| ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....                 | ii   |
| TEŞEKKÜR .....                                             | iii  |
| ÖZET .....                                                 | iv   |
| ABSTRACT .....                                             | v    |
| TABLolar DİZİNİ.....                                       | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                      | ix   |
| KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ .....                       | xii  |
| GİRİŞ.....                                                 | 1    |
| LİTERATÜR ÖZETLERİ.....                                    | 3    |
| Katı Atık Malzemelerle Zemin İyileştirme .....             | 3    |
| Sıvı Malzemelerle Zemin İyileştirme.....                   | 7    |
| Biyolojik Zemin İyileştirme .....                          | 9    |
| Çeşitli Malzemelerle Zemin İyileştirme.....                | 10   |
| PET ile Diğer Alanlarda Yapılan Bazı Çalışmalar .....      | 12   |
| Kuramsal Temeller.....                                     | 14   |
| Kil Mineralleri.....                                       | 14   |
| Zemin stabilizasyonu .....                                 | 16   |
| Zeminlerin sıkıştırılması (kompaksiyon) .....              | 16   |
| Fiziksel ve kimyasal iyileştirme.....                      | 17   |
| Plastikler ve PET Şişe Atıkları.....                       | 18   |
| MATERYAL ve YÖNTEM .....                                   | 20   |
| Kil.....                                                   | 20   |
| PET Şişe Atıkları .....                                    | 20   |
| Trichloroacetic Acid ve Dichloromethane Kimyasalları ..... | 21   |
| Sıvılaştırılmış Atık PET Şişe Üretimi .....                | 22   |
| Kıvam (Atterberg) deneyleri .....                          | 23   |
| Kompaksiyon deneyi.....                                    | 25   |
| Serbest basınç deneyi .....                                | 25   |
| Donma - çözülme deneyi .....                               | 26   |
| ARAŞTIRMA BULGULARI .....                                  | 28   |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Kıvam Limitleri.....           | 28 |
| Kompaksiyon deneyleri .....    | 31 |
| Serbest basınç deneyleri.....  | 32 |
| Donma – çözülme deneyleri..... | 43 |
| TARTIŞMA VE SONUÇ.....         | 44 |
| KAYNAKLAR.....                 | 46 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                  | 49 |



## TABLÖLAR DİZİNİ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.</b> Doğal Kile Ait Özellikler .....                     | 20 |
| <b>Tablo 2.</b> Kimyasalların Firmadan Alınan Bazı Özellikleri..... | 21 |
| <b>Tablo 3.</b> Kıvam Limitleri Deney Sonuçları .....               | 30 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Kaolinit yapısının şematik diyagramı .....                                                                                                                                                                          | 14 |
| Şekil 2. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı.....                                                                                                                                                                     | 15 |
| Şekil 3. Doğal kil.....                                                                                                                                                                                                      | 20 |
| Şekil 4. Parçalara ayrılan PET şişe atığı .....                                                                                                                                                                              | 21 |
| Şekil 5. (a) Trichloroacetic acid. (b) Dichloromethane.....                                                                                                                                                                  | 21 |
| Şekil 6. Çözücü sıvısının hazırlanma aşamaları.....                                                                                                                                                                          | 22 |
| Şekil 7. (a) Trichloroacetic acid tartılması. (b) Trichloroacetic acid üzerine<br>Dichloromethane eklenmesi. (c) İki kimyasalın 31°C’de karıştırılarak çözücü<br>sıvının elde edilmesi .....                                 | 22 |
| Şekil 8. Sıvılaştırılmış PET şişe atığı .....                                                                                                                                                                                | 23 |
| Şekil 9. Düşen koni penetrometre deney aleti.....                                                                                                                                                                            | 24 |
| Şekil 10. Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti .....                                                                                                                                                                     | 25 |
| Şekil 11. Serbest basınç deney düzeneği.....                                                                                                                                                                                 | 26 |
| Şekil 12. Donma çözülme deney aleti.....                                                                                                                                                                                     | 27 |
| Şekil 13. Su muhtevası – batma miktarı ilişkisi (Doğal kil – K0).....                                                                                                                                                        | 28 |
| Şekil 14. a) %5-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi b) %10-KI su muhtevası –<br>batma miktarı ilişkisi c) %15-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi<br>d) %20-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi.....          | 29 |
| Şekil 15. a) %5-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi b) %10-KII su muhtevası –<br>batma miktarı ilişkisi c) %15-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi<br>d) %20-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi .....     | 29 |
| Şekil 16. a) %5-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi b) %10-KIII su muhtevası –<br>batma miktarı ilişkisi c) %15-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi<br>d) %20-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi ..... | 30 |
| Şekil 17. Zeminlerin sınıflandırılması (K0, KI, KII, KIII) .....                                                                                                                                                             | 31 |
| Şekil 18. Su muhtevası-yoğunluk ilişkisi (K0) .....                                                                                                                                                                          | 31 |
| Şekil 19. Gerilme - deformasyon ilişkisi (K0) .....                                                                                                                                                                          | 32 |
| Şekil 20. a) %5-KI için gerilme - deformasyon ilişkisi b) %10-KI için gerilme -<br>deformasyon ilişkisi c) %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi d) %20 için<br>gerilme - deformasyon ilişkisi .....                       | 32 |
| Şekil 21. Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi .....                                                                                                                                                      | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 22. a)</b> %5-KII için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %10 için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %20 için gerilme - deformasyon ilişkisi .....                                                                                                                                                                                        | 34 |
| <b>Şekil 23.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KII) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 34 |
| <b>Şekil 24. a)</b> %5-KIII için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %10 için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %20 için gerilme - deformasyon ilişkisi .....                                                                                                                                                                                       | 35 |
| <b>Şekil 25.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KIII).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| <b>Şekil 26. a)</b> %5-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %5-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %5-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %5-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>e)</b> %5-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>f)</b> %5-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi.....        | 36 |
| <b>Şekil 27.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 37 |
| <b>Şekil 28. a)</b> %10-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %10-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %10-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %10-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>e)</b> %10-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>f)</b> %10-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi ..... | 38 |
| <b>Şekil 29.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 38 |
| <b>Şekil 30. a)</b> %15-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %15-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %15-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %15-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>e)</b> %15-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>f)</b> %15-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi ..... | 39 |
| <b>Şekil 31.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 40 |
| <b>Şekil 32. a)</b> %20-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>b)</b> %20-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>c)</b> %20-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>d)</b> %20-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>e)</b> %20-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi <b>f)</b> %20-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi ..... | 41 |
| <b>Şekil 33.</b> Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 41 |
| <b>Şekil 34. a)</b> %5 katkılı numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim <b>b)</b> %10 katkılı numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim <b>c)</b> %15 katkılı                                                                                                                                                                                                                                      |    |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim <b>d)</b> %20 katkılı numuneler     |    |
| ile çevrim sayıları arasındaki değişim .....                                         | 42 |
| <b>Şekil 35.</b> Hazırlanan numunelerin donma çözülme kabineye yerleştirilmesi ..... | 43 |



## KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

|               |                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------------------|
| $\phi'$       | : Kayma mukavemeti açısı                                      |
| °C            | : Santigrat derece                                            |
| $\mu\text{m}$ | : Mikrometre                                                  |
| CH            | : Yüksek plastisiteli kil                                     |
| cm            | : Santimetre                                                  |
| DÇ            | : Donma – Çözülme                                             |
| DÇ(1)         | : 1. Donma – Çözülme Çevrimi                                  |
| DÇ(10)        | : 10. Donma – Çözülme Çevrimi                                 |
| DÇ(15)        | : 15. Donma – Çözülme Çevrimi                                 |
| DÇ(3)         | : 3. Donma – Çözülme Çevrimi                                  |
| DÇ(5)         | : 5. Donma – Çözülme Çevrimi                                  |
| $D_r$         | : Rölatif sıkılık                                             |
| gr(veya g)    | : Gram                                                        |
| $I_p$         | : Plastisite indisi                                           |
| k             | : Geçirimsizlik katsayısı                                     |
| K+(su+sıvı)   | : Kil üzerine su ile kimyasal sıvının karıştırılıp eklenmesi  |
| K+sıvı+su     | : Kil üzerine önce kimyasal sıvı sonra su eklenmesi           |
| K+su+sıvı     | : Kil üzerine önce su sonra kimyasal sıvı eklenmesi           |
| K0            | : Doğal (katkısız) numune                                     |
| KI            | : Zeminin K+sıvı+su durumu                                    |
| KII           | : Zeminin K+su+sıvı durumu                                    |
| KIII          | : Zeminin K+(su+sıvı) durumu                                  |
| kPa           | : Kilopaskal                                                  |
| meg           | : Monoetilen Glikol                                           |
| mg            | : Miligram                                                    |
| MH            | : Yüksek plastisiteli silt                                    |
| mm            | : Milimetre                                                   |
| mol           | : Moleküler Ağırlık Birimi                                    |
| PET           | : Polietilen Tereftalat                                       |
| SEM           | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Micrograph) |
| Ss            | : Özgül yüzey                                                 |

|                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| <b>w</b>                   | : Su muhtevası                      |
| <b>w<sub>L</sub></b>       | : Likit limit                       |
| <b>w<sub>opt</sub></b>     | : Optimum su muhtevası              |
| <b>w<sub>P</sub></b>       | : Plastik limit                     |
| <b>γ</b>                   | : Birim hacim ağırlık               |
| <b>γ<sub>kurumax</sub></b> | : Maksimum kuru birim hacim ağırlık |
| <b>ρ</b>                   | : Yoğunluk                          |
| <b>ρ<sub>kurumax</sub></b> | : Maksimum kuru yoğunluk            |



## GİRİŞ

Taşıyıcı eleman olarak kullanılan zemin ortamları mekanik ve fiziksel açıdan her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilir. Tarih boyunca zeminlerin istenilen özellikleri kazanabilmesi amacıyla çok farklı iyileştirme yöntemleri kullanılmıştır. Son yıllarda zemin iyileştirme yöntemlerindeki anlayış hem zemine istenilen özelliklerin kazandırılması hem de çevreye zarar veren ve faydalı alan kullanımını sınırlandıran atıkların kullanılması doğrultusunda gelişmektedir. Bu amaçla literatürde farklı atık malzemelerle zemin iyileştirmesi ile ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Çeşitli oranlarda polipropilen lif katkılı donma çözülme çevrimlerine maruz kalan ince taneli zemin numunelerinin bu katkının zeminin mukavemetine etkisini inceleyen Akbulut ve Zaimoğlu (2019) artan lif içeriğinin zemin numunelerinin serbest basınç mukavemetini artırdığı sonucuna varmıştır. Yüksek plastisiteli kil (CH), düşük plastisiteli kil (CL) ve kötü derecelendirilmiş kum (SP) numunelerine öğütülmüş atık gazbeton katkısı ekleyerek zemin iyileştirme hususunda bir çalışma yapan Alpyürür ve Şenol (2018) atık gazbetonun zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır. 1999 depreminden kalan inşaat yıkıntı atıkları, kireç ve kaolin katkılarını kaolin kiline çeşitli oranlarda ilave edip CBR değerlerinin inceleyen Vural (2018) çalışmasının sonucunda artan katkı oranlarının CBR değerini de artırdığı neticesine varmıştır. Sıvı haldeki melamin formaldehit polimer katkısını kaolin kile su yerine çeşitli oranlarda ekleyip küre tabi tutan Saygılı (2018) kür süresi sonucunda numunelerin dayanımında ciddi artışlar olduğunu ve bu katkının killi zeminlerde zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır. Biyolojik iyileştirme alanında çalışma yapan Lim *et al.* (2020) bir tür mantar olan *Rhizopus oligosporus*'un gevşek kum zeminlerde kesme mukavemetini artırdığı sonucuna varmışlardır. Plastik, cam tozu ve e-atık katkılarını zemin iyileştirmede kullanılabilirliğini araştıran Rai *et al.* (2020) kullandıkları atıkların zemin iyileştirmede iyi bir alternatif olduğu sonucuna varmışlardır. Uçucu kül, polisaj ve kireç kullanarak kil ile numuneler üreten Öntürk (2011) bu katkıların zeminin mukavemetini artırdığı sonucuna varmıştır.

Son yıllarda atık miktarında önemli artış görülen PET şişeler de bu malzemelerden birisidir. PET esaslı katı atıklar, dünyadaki katı atık miktarının ağırlıkça %5-9 ve hacimce %15-20'sini oluşturmaktadır (Sevencan ve Vaizoğlu 2007). Türkiye'de yıllık 165 bin ton pet şişe üretilmektedir, fakat bunun sadece 40 bin tonu geri dönüştürülebilmektedir. Her yıl doğaya karışan 125 bin ton pet şişenin maddi değeri 70 milyon dolardır (Anonim 2007). Literatür incelendiğinde, katı halde PET şişe ve mermer tozu kullanarak beton üzerinde deneyler yapan

Çınar (2016) ürettiği kompozit malzemenin birçok açıdan olumlu sonuçlar verdiğini görmüştür. Asfalt beton karışımına agrega yerine katı halde PET atık kullanan Hassani *et al.* (2005) PET kullanımının 625 ton doğal kaynağı koruduğu sonucuna varmıştır. Çeşitli oranlarda katı haldeki PET atığı sıcak yıkama asfalt karışımına PET atığının asfalt üzerinde mekanik özelliklerine etkisini inceleyen Movilla-Quesada *et al.* (2019) bir dizi deney sonucunda deformasyona karşı dirençte artış olduğunu görmüşlerdir. Gevşek kum ve siltli kil numunelerine atık katı plastik şişe ekleyerek deneyler yapan Farah (2015) deneyler sonucunda kumda içsel sürtünme açısında artış olduğunu kilde ise serbest basınç mukavemetini azalttığını görmüştür. Zukri *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada PET ve PP elyaflarının killi zeminlerin stabilizasyonu için takviye malzemesi olarak başarıyla kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Atık katı plastiğin zemin iyileştirme hususunda çalışma yapan Peddaiah *et al.* (2018) çalışmalarının sonucunda atık plastiklerin bertaraf problemlerine çözüm sunduğu sonucuna varmışlardır. Ilieş *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada killi bir zeminin polietilen atık maddesi ile karıştırılmasının, sıkıştırma özellikleri için yararlı olduğunu, atıkların karıştırıldığı zaman zeminin deformasyonunun azaldığını kanıtlamışlardır. Polimer harç üretmek için atık katı PET kullanan Vidales *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada polimer harç üretmek için doymamış polyester reçinesi (UPER) ve atık PET parçacıkları uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Görüldüğü üzere literatürde PET atıklar zemin iyileştirmesinde, betona katkı malzemesi olarak, asfalt içerisine agrega olarak katı halde birçok çalışmada kullanılırken sıvı halde kullanımını yok denecek kadar azdır. Çalışmada, literatürde geçen atık PET şişelerin veya atık PET ürünlerin zemin iyileştirmede kullanılan katı formuna yeni bir bakış açısı ve çalışma alanı kazandırması hedeflenerek atık PET şişelerin sıvılaştırılarak kullanımı ele alınmıştır.

Bu nedenle çalışmada sıvılaştırılmış PET şişe atıklarının ince taneli zeminin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla sıvılaştırılmış pet şişe atığı doğal kil zemine farklı oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) ilave edilerek kil zeminin kıvam limitleri ve serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. PET şişe atıklarını bu şekilde değerlendirmek hem yeni bir kullanım alanı hem de çevreci bir uygulama olacaktır. Çalışmada seçilmiş olan yöntem literatürde bulunmamakla birlikte malzemeler, karışım oranları, üretim metodu ile literatürde öncü bir çalışma olduğu ve sonraki yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

## LİTERATÜR ÖZETLERİ

### Katı Atık Malzemelerle Zemin İyileştirme

Alpyürür ve Şenol (2018) yaptıkları çalışmada öğütülmüş gazbeton atığının çeşitli zemin tiplerindeki (CH, CL, SP) etkisini incelemişlerdir. Kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneylerini gerçekleştirmişlerdir. %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarda öğütülmüş gazbeton atığı kullanmışlardır. CH zemin numunelerinde öğütülmüş gazbeton atığı miktarı arttıkça likit limit değerinin azaldığını, plastik limit değerinin bir miktar arttığını ve plastisite indisinin önemli oranda azaldığını, ayrıca yine katkı miktarı arttıkça serbest basınç mukavemetinin arttığını, CBR deneyi sonucunda bentonitin belli bir öğütülmüş gazbeton katkısı oranında arttığı, mukavemet artışıyla beraber şişme problemine katkının olumlu etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. CL zemin numunelerinde ise katkı miktarı arttıkça likit ve plastik limitin bir miktar arttığı, plastisite indisinin azaldığı, serbest basınç mukavemetinin belli bir öğütülmüş gazbeton atığı oranına kadar arttığı, CBR deneyi sonucunda belli bir öğütülmüş gazbeton katkısı oranına kadar arttığı sonucuna varmışlardır. SP zemin numunelerinde ise kesme kutusu deneyi sonucunda katkının yaklaşık %13 oranına kadar arttıkça kayma mukavemeti açısının arttığı bundan sonra azaldığı belirlenmiş olup bu malzemenin yüzeysel zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Vural (2018) yaptığı çalışmada 1999 depreminde yıkılan binalara ait inşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmede kullanımını araştırmıştır. İnşaat yıkıntı atığı, kireç ve kaolin karıştırılarak bu karışımların 1, 7 ve 28 günlük CBR değerini ölçmüştür. Zemin olarak ise şişme potansiyeli en yüksek olan kaolin kilini (CH) kullanmıştır. Karışımlarda %5 ve %8 oranlarında kireç, %23 inşaat yıkıntı atığı ve %72 ile %100 arasında kaolin seçmiştir. Karışımlarda 1., 7. ve 28. gün için en düşük CBR değeri 26,3, 28,65 ve 33,13 olarak %3 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin kullanıldığında elde etmiştir. En yüksek CBR değerini ise 33,52, 34,70 ve 34,95 ile %23 yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin kullanıldığında elde etmiştir. En yüksek CBR ve kuru birim hacim ağırlık değerini %14 su muhtevasında %23 inşaat atığı, %5 kireç ve %72 kaolin karışımında elde etmiştir. Atık miktarı ile birinci, yedinci ve yirmi sekizinci günlerdeki CBR arasında sırasıyla 0,99, 0,98 ve 0,90 ile pozitif yönde çok yüksek düzeyde ilişkiler olduğunu, kaolin miktarı ile birinci, yedinci ve yirmi sekizinci günlerdeki CBR değerleri arasında -0,99, -0,98, - 0,90 ile negatif yönde çok yüksek ilişkiler olduğunu ve kireç miktarı ile birinci, yedinci ve yirmi sekizinci günlerdeki CBR değerleri arasında 0.32, 0.27 ve 0.40 ile

pozitif yönde zayıf ilişkiler olduğunu görmüştür. Tüm deneyler sonucunda inşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Rai *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada atık cam tozu, plastik ve e-atık malzemelerinin zemin iyileştirmedeki etkilerini incelemişlerdir. Zemin olarak CH kullanmışlardır. CBR, proktor deneyi ve serbest basınç deneyi yapmışlardır. Deneyler sonucunda e-atık için; proktor deneyinde artan atık içeriği ile beraber maksimum kuru yoğunluğun arttığını, serbest basınç deneyi sonucunda katkı ile beraber serbest basınç mukavemetinin arttığını ve CBR deneyi sonucunda da katkının olumlu etkisi olduğunu görmüştür.

Çabalar vd. (2013) yaptıkları çalışmada kırmataş- kil karışımlarının davranışları ve Gaziantep bölgesinde çevresel kaygılara neden olan atık lastik parçalarıyla karıştırılmış karışımlarının davranışları araştırmışlardır. Kırmataşı zemine ağırlıkça %0, %20, %40, %60 oranlarında atık lastiği ise %2,5, %5, %7,5, %10 ve %15 oranlarında eklemişlerdir. Çalışmada ödometre, direk kesme, geçirimsizlik, kompaksiyon ve CBR taşıma oranı testlerini yapmışlardır. Deneyler sonucunda kil zeminde artan kırmataş miktarıyla içsel sürtünme açısı artarken kohezyonun azaldığını, kırmataş-atık lastik kırpıntısının içsel sürtünme açısıyla atık lastik miktarının ters, kohezyonun ise doğru orantılı olduğunu, ödometre deneyi sonucunda kırmataş miktarı arttıkça boşluklarda azalma eğilimi olduğunu, kil zemine ilave edilen kırmataş katkısının geçirimsizlik katsayısı değerini artırdığını, ilave edilen atık lastik kırpıntıları kırmataş ile hazırlanan karışım zeminlere ait CBR değerlerinin azalmasına neden olduğunu görmüşlerdir.

Zorluer ve Gücek (2016) yaptıkları çalışmada zemin iyileştirmede endüstriyel atıkları kullanmışlardır. Katkı olarak agrega, granit tozu-uçucu kül ve granit tozu-mermer tozu karışımlarını kullanmışlardır. Mermer tozunu %5, %10, %15 oranlarında granit tozunu ise %10, %20 ve %30 oranlarında eklemişlerdir. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler 1 ve 7 günlük küre bırakıldıktan sonra eksenel basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Kürde bekletilen mermer tozu+granit tozu karışimli numunelerin, katkısız şahit numuneye göre sürekli bir dayanım azalmasına sebep olduğunu görmüşlerdir. Kürde bekletilen uçucu kül+granit tozu karışimli numunede ise %5 uçucu kül+%10 granit tozu karışımında maksimum değer elde edilirken diğer karışım oranlarındaki numunelerde ise dayanım azalmaları görmüşlerdir. Araştırma neticesinde atıkların, katkı maddesi olarak yol alt temel tabakalarının iyileştirilmesinde kullanılabileceği ve bununda çevre korunması ve sürdürülebilirlik gibi açılardan faydalı olacağı kanılarına varmışlardır.

Farah (2015) yaptığı çalışmada plastik atıkla donatılandırılmış problemlili zeminlerin performans değerlendirmesini yapmıştır. Zemin olarak Bedis sahil kumu (gevşek kum) ve

Tuzla zemini (yumuşak siltli kil) kullanmıştır. Atık plastik şişeyi zemin kuru ağırlığının %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında eklemiştir. Deneyleri %30 ve %60 rölatif sıklıklarda gerçekleştirmiştir. Bedis kumu için direkt kesme kutusu, CBR testleri, Tuzla zemini için, tek boyutlu kabarma ve konsolidasyon, serbest basınç ve Kaliforniya Taşıma Oranı testleri uygulamıştır. Deney sonuçları takviye malzemesi olarak kullanılan geri dönüşüm plastik su şişe malzemesinin Bedis kumunun maksimum ve kritik içsel sürtünme açılarında artışa neden olduğunu, Bedis kumu için kayma direnci parametrelerinin iyileştirilmesinde optimum plastik atık yüzdesinin %0,75 olduğu ve diğer yandan CBR için optimum plastik atık yüzdesinin %0,5 olduğunu belirlemiştir. Deney sonuçları takviyeli Tuzla zemininin kuru yoğunluğundaki azalma nedeni ile takviyeli zeminin serbest basınç mukavemetinde azalma olduğunu göstermiştir. Aynı zeminde, plastik şişe geri dönüşüm malzemesinin takviyeli zeminin hacim değişikliği davranışını geliştirdiği görülmüştür. Yalnızca %0,75 plastik atık donatılı zeminde, Tuzla zemininin şişme ve sıkışabilirlik özelliklerinde azalma meydana gelmiştir.

Zukri *et al* (2017) yaptıkları çalışmada polietilen tereplat (PET) ve polipropilen (PP) kullanarak Pekin kilinin stabilizasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. PET ve PP oranları %5, %10 ve %20'dir. Serbest basınç deneyi ile kesme kutusu deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarında PET için serbest basınç mukavemeti %10 katkı oranında serbest kesme mukavemetinin de %10 katkı oranında artış olduğunu, PP için hem serbest basınç mukavemetinin hem de serbest kesme mukavemetinin katkı oranındaki artışla beraber arttığını gözlemlemişlerdir.

Peddiaiah *et al* (2018) yaptıkları çalışmada plastik şişe şeritlerinin zemin iyileştirmedeki etkilerini incelemişlerdir. Atık PET şişelerin boyutlarını 15 mm x 15 mm, 15 mm x 25 mm, 15 mm x 35 mm ve oranlarını ise %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 olarak seçmişlerdir. Kompaksiyon, kesme kutusu ve CBR deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Direkt kesme deneyinden hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısının %0,4 oranda iken arttığını, plastik içerik arttıkça kesme mukavemeti parametrelerinin azaldığını, en yüksek değerlerin %0,4 plastik içeriğinde 15 mm x 15 mm boyutlarında elde edildiğini görmüşlerdir. CBR deneyinden; boyut arttıkça CBR değerinin azaldığını görmüşlerdir. Plastik şeritlerle donatılan zeminin mühendislik özelliklerinin %0,4 katkı oranında 15 mm x 15 mm boyutlarda elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Ilies *et al* (2017) yaptıkları çalışmada zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek için polietilen atık materyallerini kullanmışlardır. Polietilen atık malzemeyi %2, %4, %6 ve %8 oranlarında eklemiştir. Kompaksiyon ve Ödometre deneylerini yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde gerilmeye karşı efektif gerilmede en verimli katkı %4 oranında olmuştur. Katkılı

zeminle doğal zemin karşılaştırıldığında boşluk oranı katkı oranıyla beraber yaklaşık %20 oranında artmıştır. En büyük artışın %6 ile %8 katkı oranında olduğu gözlemlenmiştir.

Louzada *and* Casagrande (2016) yaptıkları çalışmada PET şişe parçacıklarının kil zemine eklenmesi ile zeminin mekanik davranışlarını incelemiştir. PET şişe parçacıkları 1 mm boyutundadır. PET parçacıkları kil zeminin ağırlıkça %3 ve %5'i oranlarında eklemiştir. Standart kompaksiyon ve 3 eksenli basınç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Başlangıç optimum su muhtevası değeri %25,8 ve kuru birim hacim ağırlığı  $1,55 \text{ gr/cm}^3$  olan zeminin %3 ve % 5 katkı oranlarında sırasıyla optimum su muhtevasının %22,3 ve %24 olduğunu kuru birim hacim ağırlığının ise başlangıçta  $1,55 \text{ g/cm}^3$  , %3 katkıda  $1,55 \text{ g/cm}^3$  ve %5 katkı  $1,52 \text{ g/cm}^3$  olduğunu görmüşlerdir. Başlangıçta 25 kPa olan kohezyonun %3 katkıda %14, %5 katkıda ise %25,3 arttığını, başlangıç içsel sürtünme açısının  $27,1^\circ$ 'den %3 katkı için  $31,4^\circ$ 'ye ve %5 katkı için  $30,5^\circ$ 'ye arttığını görmüşlerdir.

Botero *et al* (2015) yaptıkları çalışmada PET ile donatılanmış silt zeminin (MH) gerilme-deformasyon davranışını incelemiştir. PET'leri fiber formunda (50 mm uzunluğunda 15 mm çapında) kullanmışlardır ve zemine ağırlıkça %0,1, %0,3, %0,6, %1 oranında eklemiştir. Gerilme-deformasyon davranışını incelemek için 3 eksenli basınç deneyi yapmışlardır. Takviyesiz numuneler %0-10' luk deformasyon aralığında takviyeli zemin numunelerine göre daha yüksek zemin direnci sunduğunu, %10-15 deformasyon aralığında ise donatısız zeminin plastik davranış sergilediğini ve kırılmaya ulaşana kadar zeminin direncinin artmadığını gözlemlenmiştir. Öte yandan takviyeli numunelerin tüm deformasyon aralıkları için artan bir gerilme deformasyon davranışı sergilediğini ve lif içeriğinin arttıkça bu durumun daha da belirgin hale geldiğini görmüşlerdir. Fakat %0,6 ve %1 lif içeriğiyle üretilen numunelerin %10'a yakın deformasyon değerleriyle daha büyük direnç artışı sergilediği sonucuna varmışlardır.

Singh *and* Mittal (2019) yaptıkları çalışmada plastik atıkların zemin stabilizasyonunda kullanımını araştırmışlardır. Plastik atıkları kuru zemin ağırlığının %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında eklemiştir. Plastik atıkları 5 mm x 3 mm olacak şekilde şeritler halinde kesmişlerdir. Zemin olarak ise ML (düşük plastisiteli silt) kullanmışlardır. Deneyler sonucunda plastik atık katkısının zeminin maksimum kuru yoğunluğunu, optimum su muhtevasını ve serbest basınç mukavemetini artırdığını görmüşlerdir. %0,5 ile %1 katkı oranında serbest basınç mukavemetinin katkısız zemine kıyasla %3 ile %13 oranında arttığını, maksimum kuru yoğunluğunun %0,5 ile %1 katkı oranlarında katkısız zemine kıyasla %0,06 ile %0,23 oranlarında arttığını, optimum su muhtevasının %0,5 ile %1,5 oranları için katkısız zemine kıyasla %3 ile %13 oranlarında arttığını gözlemlenmiştir.

Salimi *and* Ghazavi (2019) yaptıkları çalışmada geri dönüştürülmüş atık plastik levhaları kullanarak zemin ve şev stabilizasyonunu incelemişlerdir. Zemin örneği olarak SP zemin sınıfını kullanmışlardır. Katkı olarak atık şeklinde toplanan su şişelerini küçük parçalara bölmüşlerdir ve ardından eriterek yeniden plastik levha elde etmişlerdir. Geri dönüştürülmüş plastik levhanın kalınlığı 0,4 mm'dir. Bu yöntemin daha ucuz bir yol olduğu kanısına varmışlardır. Ardından geri dönüştürülmüş plastik levhaları 5 cm çapından daha küçük olacak şekilde yuvarlak formda kesmişlerdir. Şev stabilizasyonu için ise 0,4 mm ve 1 cm kalınlıklarında geri dönüştürülmüş plastik levha kullanmışlardır. Deneylerden, numunelerdeki plastik levha sayısı arttıkça ve daha düşük sınır basıncı altında kesildiği zaman kumun mühendislik özelliklerindeki iyileşmenin daha efektif olduğunu görmüşlerdir. Şev stabilizasyonu analizi için ABAQUS programını kullanmışlardır. Sayısal analizden, plastik levhaların zeminde kullanılmasının, plastik levhaların yüksek çekme mukavemetinden dolayı şevin güvenlik faktörünü arttırdığını ve bunun da mukavemet direncini ve şevin stabilitesini arttırdığını elde etmişlerdir. Plastik levhaların sayısının artmasının 0,4 mm ve 1 cm kalınlığındaki plastik levhaların her ikisiyle güçlendirilmiş durumlarda güvenlik faktörünü önemli ölçüde değiştirmedeğini gözlemlemişlerdir.

Mishra *and* Gupta (2018) yaptıkları çalışmada rastgele dağıtılmış PET fiberlerin uçucu kül ile kombinasyonunu temel zeminlerinin alt tabakalarında kullanımını incelemişlerdir. Kullandıkları zemin CL sınıfına aittir. PET fiber 0,2-0,25 mm çapında 20-25 mm uzunluğundadır. PET fiberleri zeminin ağırlıkça %0, %0,4, %0,8, %1,2, %1,6 oranlarında uçucu külü ise %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında kullanmışlardır. Kombinasyonlar ise (sırasıyla PET + uçucu kül olmak üzere); %0+%0, %0,4+%5, %0,8+%10, %1,2+%15, %1,6+%20 şeklindedir. Likit limit deneyi sonucunda oranlar arttıkça likit limit değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Plastik limit deneyi sonucunda oranlar arttıkça plastik limit değeri de artmıştır. Rötire limiti değerlerinin de oranlar arttıkça artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerlerinin PET içeriği arttıkça azaldığını görmüşlerdir. Kesme gerilmelerinde oranlar arttıkça artış meydana gelmiştir. Kohezyon ve içsel sürtünme açılarının da oranlardaki artışla beraber artış görülmüştür. CBR sonuçlarında ise maksimum CBR değerlerinin %1,2 PET + %15 uçucu kül kombinasyonunda olduğu sonucuna varmışlardır. Hemen hemen tüm deneylerde daha olumlu sonuç veren kombinasyonun %1,2 PET + %15 uçucu kül olduğu kanısına varmışlardır.

### **Sıvı Malzemelerle Zemin İyileştirme**

Saygılı (2018) yaptığı çalışmada sıvı melamin formaldehit katkısının kaolin kili üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sıvı polimeri %3, %6, %9 ve %12 oranlarında örneklerle

optimum su muhtevasını geçmeyecek şekilde eklemiştir. Hazırladığı polimer katkılı örnekleri 3, 7, 14 ve 28 boyunca küre tabii tutmuştur. Deneyler sonucunda sıvı polimer katkısı ile zeminde dayanım artışı olduğunu ve 28 günlük kür süresi sonunda dayanımın 5 kata kadar ulaştığı sonucuna varmıştır. Ayrıca %9 ve %12 oranlarının 28 günlük süre sonunda dayanım değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu, optimum karışım oranının %9 olduğunu önermiştir. Kullanılan katkının sıvı ve yüksek akışkanlıkta olmasının uygulamada zorluk yaşatmayacak etken olduğu kanısına varmıştır. Sıvı haldeki melamin formaldehit katkısının mevcut iyileştirme metotlarına bir alternatif olduğu sonucuna varmıştır.

Türköz vd. (2010) yaptıkları çalışmada problemlili kil zeminlerin magnezyum klorür solüsyonu ile kil zeminlerin şişme potansiyeli ve dispersibilite karakteristikleri üzerindeki etkisini ele almışlardır. Magnezyum klorür katkısını %0, %1, %3, %5, %7, %10 oranlarda eklemiştir. Çalışma sonucunda, problemlili kil zeminlerin iyileştirilmesinde magnezyum klorür solüsyonun kullanılabileceği ve özellikle %7 katkı oranından sonra etkin bir iyileştirme sağladığını görmüşlerdir.

Joshi and Gonnade (2020) yaptıkları çalışmada Hindistan'ın siyah yumuşak zeminin stabilizasyonunda düşük alkali sıvı sodyum silikat katkısının kullanılabilirliğini ayrıca normal Portland çimentosu ile sıvı sodyum silikat karışımının iyileştirilmiş zeminin mühendislik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Portland çimentosu sabit oranlı olup %3 iken sıvı sodyum silikatı zeminin kuru ağırlığının %1, 2, 3, 5 ve 7'si oranlarında kullanmışlardır. Ürettikleri numuneleri 4, 7, 14 ve 28 günlük kürlere tabii tutmuşlardır. Deneyler sonucunda plastisite indisinin, serbest şişme indisinin ve su içeriğinin sabit %3 çimento ile sıvı sodyum silikatın oranındaki artışla beraber azaldığını, zemin stabilizasyonunda %3 çimento + %3 sıvı sodyum silikat kombinasyonunun en iyi sonuçları verdiğini, %3 çimento ile %1, 2 ve 3 sıvı sodyum silikat kombinasyonlarından zeminde mukavemet artışı ile şişmede azalma olduğunu, %3 çimento + %5 ve 7 sıvı sodyum silikat kombinasyonlarının ise şişmedeki artışlar nedeniyle uygun oranlar olmadığını görmüşlerdir. Kür süresinin 4 günden 28 güne doğru mukavemette artışa sebep olduğunu sonuç olarak da sıvı sodyum silikatın zemin iyileştirmede kullanılabilir olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kolay et. al. (2016) yaptıkları çalışmada sıvı polimerin ince taneli zeminler üzerine etkisini incelemişlerdir. CH ve MH olmak üzere 2 çeşit zemin kullanmışlardır. Sıvı polimeri her iki zeminin kuru ağırlığının %2, 3, 4 ve 5'i oranlarında kullanmışlardır. Hazırladıkları numuneleri açık ve kuru ortamda 7, 14 ve 28 günlük kürlere tabii tutmuşlardır. Ardından bu numuneleri serbest basınç deneyi ile kırmışlardır. Serbest basınç deneyleri sonucunda sıvı polimerin hem açık hem kuru ortamda kürlenmiş numunelerin serbest basınç mukavemetini

artırdığını görmüşlerdir. Ayrıca CBR deneyi sonucunda katkının CH için CBR değerini %14, MH için ise CBR değerini %304 oranında artırdığı sonucuna varmışlardır.

Işık (2019) yaptığı çalışmada yüksek plastisiteli bentonit kili ile düşük plastisiteli kaolin kilinin mukavemet ve donma-çözülme davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, killere belirli yüzdelerde (%5, %10, %15, %20) poliüretan, epoksi, reçine ve stiren akrilik ilave edip katkılı numuneler elde etmiştir. Elde ettiği katkılı numuneler üzerinde serbest basınç ve donma çözülme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyleri 1 ve 7 gün kürde bekletilen numuneler üzerinde yapmıştır. Deneyler sonucunda, poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkılarının düşük ve yüksek plastisiteli killerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu görmüştür.

### **Biyolojik Zemin İyileştirme**

Lim *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada *Rhizopus Oligosporus* mantarının kum zeminlerde iyileştirme için kullanmışlardır. Kesme kutusu deneyi yapmıştır. Kullandığı kum zemin gevşek kum zemindir. Deneylerin sonucunda katkı dozu %5,24 iken, su içeriği %5 iken, 1 günlük kür süresinde maksimum serbest basınç mukavemetini yakalamıştır. 3 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemetinin düştüğünü gözlemlemiştir. Biyolojik iyileştirmeye bir örnek olan bu çalışmada iyileştirilmiş kum zeminin iyileştirilmeyen kum zemine göre daha yüksek kesme mukavemetine sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Akoğuz (2014) yaptığı çalışmada *Bacillus Arenosi* bakterisini kullanarak kum zeminin iyileştirilmesini araştırmıştır. Bakteri inkübasyonu sonucunda kültür ortamında kalsit oluşumlarını incelemek üzere 4 farklı pH derecesinde (6,0, 7,0, 8,0, 9,0) sıvı besiyerlerine bakteri inkübe etmiştir. 72 saat sonunda  $\text{CaCl}_2$  stok çözeltisi eklemiştir. Çökelti miktarlarını karşılaştırdığı zaman en iyi sonucun pH 8,0'deki kültür ortamı olduğunu görmüştür. En az çökeltinin pH 6,0'da olduğunu gözlemlemiştir. SEM analizleri ile taneler arasında ve tane yüzeylerinde oluşan kimyasal yapıları incelemiştir ve tüm pH değerlerinde kalsit oluşumuna rastlamıştır. Numunelerin yüzey analizleri sonucunda en iyi sonucu pH 8,0'da santrifüj ile çökeltilen pelletin zemine uygulanması ile elde etmiştir. Bu uygulama sonucunda tanelerin yüzeyleri kaplanmış, taneler arası boşluklar dolmuş ve tanelerin birbirlerine tutunmuş olduğunu görmüştür. Diğer uygulamalarda ise yüzeylerde ve taneler arasında yapılara rastlanmış ancak çok iyi sonuçlar alamamıştır. XRD ve EDS analizleri ile kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan yapıların kalsit olduğunu gözlemlemiştir. Analizler sonucunda *Bacillus Arenosi* bakterisi kullanılarak zeminlerin iyileştirilmesinin mümkün olduğunu görmüştür.

## Çeşitli Malzemelerle Zemin İyileştirme

Öntürk (2011) yaptığı çalışmada uçucu kül, polisaj ve kireç kullanarak zemin iyileştirme üzerine araştırma yapmıştır. Kireci ve uçucu kül miktarını %15 oranında sabit tutup polisaj malzemesini %10, %15 ve %20 oranlarında ilave etmiştir. Her malzemeyi özgül ağırlık deneyine, zemin sınıflandırma deneyine ve kompaksiyon deneylerine tabii tutmuştur. Kompaksiyon deneyleri sonuçlarına göre en iyi sonucu veren zemin numunesi üzerine CBR deneyini yapıp yeni zeminin taşıma kapasitesini bulmuştur. Likit limiti %53,58, plastik limiti %30,36 ve plastisite indisi 23,22 olan kaolin kilinin zemin sınıfını CH olarak belirlemiştir. Polisaj malzemesi çok kaygan yapıda olduğu için plastik limit deneyi ve dolayısıyla plastisite indisini bulamamıştır. Likit limiti %39,8 olarak bulunan polisajın zemin sınıflandırmasını yapamamıştır. Deneyler sonucunda en yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri olan 12,38 kN/m<sup>3</sup>, %15 kireç + %15 uçucu kül + %50 kaolin + %20 polisaj katkılı zemin numunesinden elde etmiştir. Fakat CBR sonuçlarına bakılınca en yüksek taşıma oranı olan 14,86 değerini %15 kireç + %15 uçucu kül + %55 kaolin + %15 polisaj katkılı zemin numunesinden elde etmiştir. Bu çalışma sonunda sözü geçen katkıların zemin iyileştirmede olumlu etki yarattığı sonucuna varmıştır.

Zaimoğlu (2009) yaptığı çalışmada %0,25, %0,5, %0,75, %1, %1,25, %1,5 ve %2 oranlarında polipropilen lif katkının ince taneli zemin numuneleri üzerindeki donma çözülme çevrimleri sonrasında mukavemetine etkisini incelemiştir. 7 gün boyunca %70 rölatif neme sahip 21 °C'deki nem odasında bekletilen numuneler bu süre sonunda aralarına suya doymun keçe tamponlar konularak -23 °C'deki donma kabinine 24 saatliğine yerleştirilmiştir. Ardından %100 rölatif neme sahip 21 °C'deki nem odasına 23 saatliğine yerleştirmiştir. Bu döngü 1 çevrimdir ve numuneler toplamda 12 çevrime tabii tutulmuştur. Ayrıca numunelerdeki kütle kayıpları da incelenmiştir. Deneylerin sonucunda en dikkat çekici sonucun %0,75 katkılı numuneler olduğu görülmüştür. %0,75 katkılı numunelerin katkısız numunelerden neredeyse %50 daha az kütle kaybına sahip olduğu, artan lif içeriğinin serbest basınç mukavemetini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Batman (2015) yaptığı çalışmada öğütülmüş kuvars kumunun kil zeminin mukavemetine etkisini araştırmıştır. Zemin olarak kırmızı ve yeşil kil kullanmıştır. Kuvars kumunu ise her iki kil zemine de ağırlıkça %10, %20, %30 ve %50 oranlarında ilave etmiştir. Hem yeşil hem de kırmızı kilin zemin sınıfını deneyler sonucunda CH olarak bulmuştur. Genel olarak öğütülmüş kuvars kumu oranı arttıkça kil zeminlerde optimum su muhtevasında, kıvam limitlerinde ve şişme basınçlarının azalma olduğunu görmüştür. Serbest basınç mukavemetlerinde ise %10 katkılı kırmızı kil hariç diğerlerinde katkı oranı arttıkça düşüş

gözlemlemiştir. İçsel sürtünme açıları katkı oranı ile beraber arttığını görmüştür. Deneyler sonucunda öğütülmüş kuvars kumu katkısının genel olarak kil zeminlerde geoteknik açıdan bazı özelliklerinin iyileştirmede kullanılabileceği sonucuna varmıştır.

Çalik vd. (2019) yaptıkları çalışmada polipropilen lif ile rastgele donatılandırılan CH kilinin donma-çözülme çevrimlerinde serbest basınç mukavemetini araştırmışlardır. Uzunlukları 3 mm, 6 mm ve 12 mm olan, donatılı zeminin toplam kuru ağırlığının %0,15, %0,2, %0,25'i oranlarında eklenen polipropilen lifler kullanmışlardır. Her bir polipropilen lif uzunluğu için aynı oran kullanılmıştır. Donatılı numuneleri 1, 3, 5 ve 10 çevrim sayılı donma-çözülme tabi tutmuşlardır. 6 saat -20 °C'de donma 6 saat 25 °C'de çözülme olacak şekilde bir çevrimi belirlemiştir. %0,15 ve %0,2 oranında polipropilen lifle donatılan numunelerde 1-3-5 çevrim sayılarında donma-çözülme dayanımının genelde azaldığını, %0,25 polipropilen lif ilave edilen numunelerde 10 çevrimde donma-çözülme dayanımında artış meydana geldiğini gözlemlemiştir. Polipropilen lif boyunun uzun olmasının (12 mm) yüksek çevrimlerde donma-çözülme dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu görmüşlerdir. Genel olarak kil zemin için donatılı numunelerde donatısız numunelere göre çevrim sayısının artması ile donma-çözülme dayanımının azaldığını gözlemlemiştir. Serbest basınç deneylerinden polipropilen lif uzunluğu arttıkça her bir donma-çözülme çevriminde başlangıç elastisite modülünde genellikle bir azalma olduğunu belirlemiştir.

Özdemir (2019) yaptığı çalışmada doğal/sentetik lif ve uçucu kül katkılı killerin bazı geoteknik özelliklerini araştırmıştır. Doğal zeminin sınıfı CH olup katkılar %0,5, %1, %1,5 oranlarında ve 2 mm ile 5 mm uzunluklarındadır. Katkı olarak saman, kendir ve monolif polyester iplik kullanılmıştır. Ek olarak %1 lif katkılı numunelere %10 uçucu kül ilave etmiştir. Katkılı kil numunelerinin kıvam, kompaksiyon, serbest basınç ve donma-çözülme deneylerini gerçekleştirmiştir. 2 mm ve 5 mm uzunluğundaki saman, kendir ve monolif polyester iplik katkılı numunelerin tamamında lif yüzdesinde meydana gelen artışla serbest basınç mukavemetlerinin arttığını gözlemlemiştir. %1 lif katkılı kil numunelere %10 uçucu kül katmış, 7 gün küre tabi tutulan numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapmıştır. Uçucu küllü, lif ilaveli killerin serbest basınç mukavemetlerinin lif ilavesiz olanlara göre daha yüksek olduğunu görmüştür. Donma çözülme deneylerinden en az etkilenen numunelerin kendir katkılı numuneler olduğu sonucuna varmıştır. Kendir katkılı numunelerin likit limitlerinin ve serbest basınç mukavemetlerinin de diğer lif katkılarına göre daha yüksek oluşu ile kendirin özellikle soğuk iklim bölgelerinde donma çözülmenin etkilerinin azaltılması amacıyla alternatif bir malzeme olarak değerlendirilebileceğini ifade etmiştir.

## PET ile Diğer Alanlarda Yapılan Bazı Çalışmalar

Çınar (2016) yaptığı çalışmada atık PET (Polietilen teraftalat) şişeler ve mermer tozu kullanılarak kompozit malzeme üretimi hedeflemiştir. Bu sayede hem bu atıklardan kaynaklanan kirlilik azaltılacak hem de mermer tozunun düşük maliyeti, yanmazlık ve yüksek mekanik özellikleri, PET' in özellikleri ile birleştirilerek daha yüksek özelliklere sahip ancak daha düşük maliyetli yeni bir malzeme üretimi yapacaktır. Bu amaçla, PET atıklarından elde edilen parçacıkları, mermer tozu ile vidalı bir karıştırıcıda (ekstruder) karıştırarak kompozit malzeme üretilmesi ve bu malzemenin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kompozit malzemenin yanmaya karşı olan direnci yapılan test sonuçlarında incelendiğinde, mermer oranının artması ile malzemenin yanmazlık özelliklerinde önemli bir gelişme olduğunu gözlemlemiştir.

Hassani *et al* (2005) yaptıkları çalışmada asfalt beton karışımında agrega yerine PET atık kullanımını inceleyerek PET atıkların çevreye olumsuz etkilerini azalmaya çalışmışlardır. Çalışmada Marshall stabilitesi, akış, kararlılık-akış oranı ve yoğunluk parametrelerine odaklanmışlardır. %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında atık PET malzemeyi asfalt beton karışımına agrega yerine eklemişlerdir. Elek boyutlarını ise 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 0,15 mm ve 0,075 mm olarak seçmişlerdir. Asfalt beton karışımında agrega yerine geçen atık PET ile elde edilen karışıma plastifalt adını vermişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda hacimce %20 iri agreganın (2,36 ve 4,75 mm) PET granüler (asfalt karışımının toplam ağırlığının %5'i) ile değiştirilmesi, plastifalt karışımlarının birim ağırlığında %2,8'lik azalma ile sonuçlandığını görmüşlerdir. Agreganın %5 PET ikamesi ile plastifaltın etkin kullanımının, yol endüstrisi için bir zorluk olan diğer plastifalt karışımlarına kıyasla daha düşük akışlı daha yüksek bir Marshall oranını ve en düşük stabilite azalması ile sonuçlandığını bulmuşlardır. PET kullanımı 625 ton doğal kaynağı koruduğu sonucuna varmışlardır.

Movilla-Quesada *et al* (2019) yaptıkları çalışmada sıcak yıkama asfalt karışıma PET atık ekleyerek katkının asfalt üzerine etkilerini incelemişlerdir. Binder tabakasının ağırlıkça %0, %6, %10, %14, %18 ve %22 oranlarında PET eklemişlerdir. Elek çaplarını ise 10 mm, 5 mm, 2,36 mm ve 0,63 mm olarak seçmişlerdir. PET parçalar ise 0,63 mm ile 10 mm arasında boyuttadır. Marshall stabilitesi ve akışı için 5°C ve 22°C sıcaklıklarını kullanmışlardır. Deneyler sonucunda bu polimerik katkının geleneksel bir asfalt beton karışımına kıyasla kalıcı deformasyonlara ve yorulmaya karşı dirençte bir artışa ek olarak daha fazla stabilite sağladığını görmüşlerdir.

Vidales *et al* (2014) yaptıkları çalışmada polimerik reçine ve atık PET şişeden elde edilen parçacıklar kullanarak polimer harç elde etme üzerine araştırma yapmışlardır. Polimer

harç içerisinde ilk grupta %95, %90, %85, %80 oranlarında kum, %5, %10, %15, %20 oranlarında doymamış polyester reçinesi kullanmışlardır. İkinci grupta ise %83, %80, %78, %75 oranlarında kum, %15, %15, %20, %20 oranlarında doymamış polyester reçinesi ve %2, %5, %2, %5 oranlarında pet parçaları eklemişlerdir. Elde edilen polimer harca PET parçaların eklenmesi yeni malzemenin mekanik ve yapısal özelliklerini bir miktar zayıflattığını, reçine içeriğindeki artışın ise kumun daha iyi ıslanmasını ve fazlar arasındaki bağlantıyı iyileştirdiğini böylece daha kompakt malzeme elde edildiğini görmüşlerdir.

İnkaya (2016) yaptığı çalışmada plastik atıkların karayolunda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deneylerde plastik atığı iki şekilde kullanmıştır. İlkinde toz haline getirilmiş PET kırığını sıcak asfalt karışımında bitüm yerine kullanmıştır, diğerinde ise granül hale getirdiği siyah poşet atığıdır. PET kırıklarını bitüme ağırlıkça %1,21, %1,61, %2,41, %2,81 oranlarında ilave edip Marshall numuneleri hazırlamıştır. Deney sonucunda %1,61 oranında eklenen PET kırığının en yüksek Marshall dayanımını verdiğini görmüştür. Diğer atık olan granül hale getirdiği siyah poşet atığının deneyleri sonucunda ise en iyi sonucun 20 gr için elde edildiğini görmüştür. Deneyler sonucunda PET ile hazırlanan numunelerde Marshall dayanım değerleri artarken akma değerlerinin de teknik şartname sınırları içinde kaldığını, daha az bitümle dayanım değerlerinin elde edildiğini ve dolayısıyla atık plastiklerin bağlayıcı malzemesi olarak bitümlü karışımlarda değerlendirilebileceği kanaatine varmıştır. Bitüm yerine atık plastik kullanılırsa bitüm maliyetinin %32 azalacağı ve 23.13253 ton atık plastiğin doğayı hiç kirletmeden ekonomiye girdi olarak ekleneceği sonucuna varmıştır. Ayrıca atık malzemelerin depolanma ve çevre kirliliğine sebep olmaması için işlenme maliyeti de ortadan kalkacağını belirtilmiştir.

Özel vd (2011) yaptıkları çalışmada betonda fiber katkı olarak polietilen tereftalatın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada s/ç oranının sabit olarak tutup (0.55) ve iki farklı çimento tipi kullanılarak hazırlanmış olduğu karışımlara, hacim oranı olarak PET ve PPF (polipropilen fiber) ikamesinin betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisini incelemişlerdir. PET üç farklı oranda (300, 600, 900 gr/m<sup>3</sup>) kullanırken PPF önerilen en büyük değer olan 600 gr/m<sup>3</sup> olarak kullanmışlardır. Betonda fiber katkı olarak kullanılan PET'in kullanım miktarında ve PPF'li betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinde şahit betonlara göre azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Atık PET ilavesi ile elde edilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerindeki azalmalar, PPF'li betonlardaki azalmalara göre daha az değerlerdedir. Atık PET'lerin bu özellikler açısından kullanılabilir olduğunu, PET'lerin çevreye verdiği zararını azaltmak, geri dönüşüm maliyetini azaltmak ve beton maliyeti düşürmek için beton imalatlarında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

## Kuramsal Temeller

### Kil Mineralleri

Kil mineralleri, kayaç yapıcı bazı minerallerin kimyasal bir şekilde ayrışmasından oluşan kristalleşmiş malzemelerdir. Kollodial boyutta ( $\text{çap} < 1\mu$ ) kristal forma sahiptirler ve yalnızca mikroskop yardımıyla izlenebilirler. Dörtüzlü (tetrahedral), silika levhalarıyla sekizyüzlü veya alümina levhalar şeklinde esas olarak 2 adet kristal levhası vardır. Kristal kafesteki değişik bağlanma şekilleri ve farklı metalik iyonların bir araya gelmesiyle her biri farklı yapıda kil mineralleri oluşmaktadır. (Holtz, 2015)

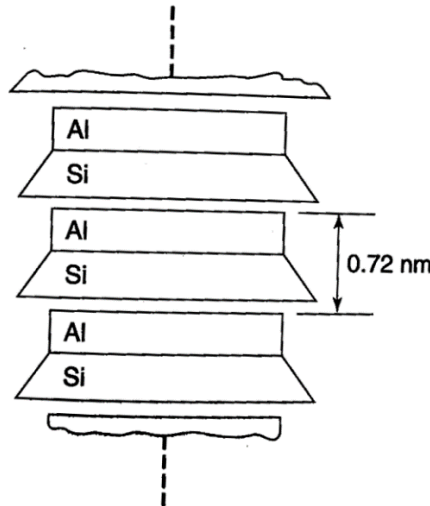
Dörtüzlü levha esas olarak köşelerde 4 oksijen atomunun bir silika atomunu çevrelemesiyle oluşan dörtüzlü silika birimlerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Sekizyüzlü levha esas olarak altı tane oksijen ya da hidroksilin alüminyum, magnezyum, demir ya da diğer metalik atomlarla çevrenmesiyle meydana gelen sekizyüzlü birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

Tüm kil mineralleri belirli tür katyona sahip sekizyüzlü ve dörtüzlü yapıda, değişik şekillerde ve belirli bir sistemde birbirine bağlanan 2 temel levhadan meydana gelmektedir. Bu 2 temel levha yapısındaki değişimler, farklı kil mineraller türlerinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Burada kil zeminlerde yaygın olarak bulunan sadece birkaç mineralin tanımlanması verilecektir.

#### 1:1 Kil mineralleri

*Kaolinit-serpantin* minerallerinden *kaolinit* 13 farklı mineral içermektedir. Gruptaki mineraller 1 dörtüzlü ve 1 sekizyüzlü levhasının yinelenen tabakalarından meydana gelir. Kaolinit 1:1 minerali olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1).

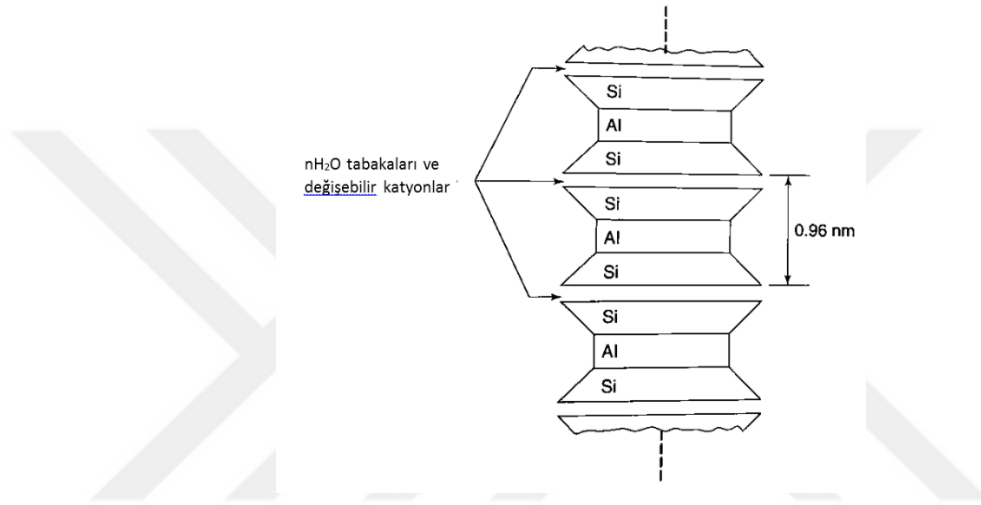


**Şekil 1.** Kaolinit yapısının şematik diyagramı (Lambe, 1953)

Silika levhasının uçlarındaki O atomlarıyla sekizyüzlü levhadaki O bağlanarak 1:1 katmanını oluştururlar. Bir kaolinit kristali 0.72 nanomikron kalınlığındaki birçok katmandan oluşmaktadır.

### 2:1 Kil mineralleri

2:1 mineralleri kırktan fazla mineral içeren grubu meydana getirmektedir. Biyotit ve muskovit bu gruptaki en çok tanınan iki minareldir. Gruptaki tüm mineraller 2 dörtyüzlü veya silika levhası ile aralarında 1 sekizyüzlü veya gipsit levhasının bir araya gelmesiyle meydana gelir (Şekil 2). (Holtz, 2015)



Şekil 2. Montmorillonit yapısının şematik diyagramı (Lambe, 1953)

Montmorillonit kilinde tek bir katman oluşturmak için, dörtyüzlülerin uçlarında O ve OH<sup>-</sup> 'ler sekizyüzlü plakalarla paylaşılmaktadır. 2:1 katmanının kalınlığı yaklaşık olarak 0,96 nanometredir. Montmorillonit içeren zeminlerin su içeriği değiştikçe (fazlaştıkça) şişmeye karşı hassasiyeti artmaktadır. Bu tür zeminlerde meydana gelen şişme basıncı zemin üzerindeki hafif yapılarda olumsuz etkiler oluşturmaktadır. (Holtz, 2015)

*Bentonit*, ticari bir kil olup geoteknik mühendisliğinde şişme özelliğinden dolayı birçok uygulamada kullanılmaktadır.

İllitin oluşum süreci, potasyum iyonunun çokça bulunma zorunluluğu dışında smektitlerinkine benzemektedir. Ana mineraller genellikle mika yönünden zengin magmatik ve metamorfik kayalardan oluşmuşlardır. İllitler, kil zeminlerin çok yaygın olarak bilinen bir bileşenidir. (Holtz, 2015)

*Vermikülit* de sadece katmanlar arasında iki tane su tabakası bulunması dışında montmorillonite benzer yapıya sahip ve yaygın olarak bulunan bir diğer 2:1 mineralidir. Ara

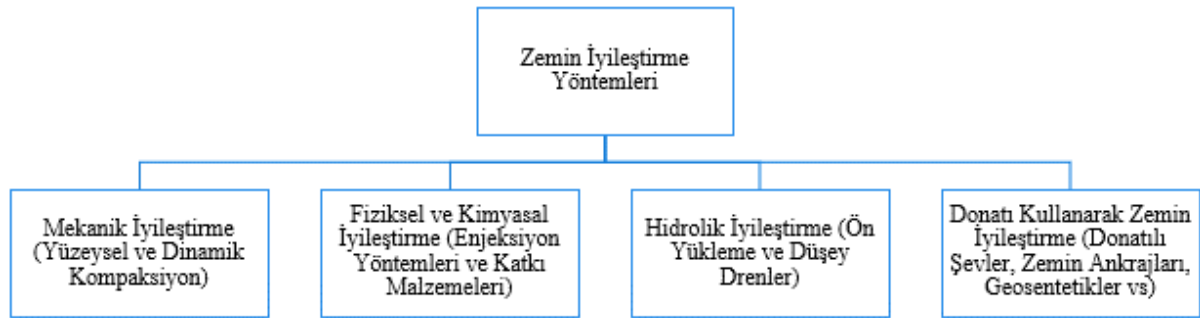
tabakalardaki suyun dışarı çıkması için yüksek ısıda kurutulduğunda ortaya çıkan “genleşen, şişen” vermikülit çok iyi bir yalıtım malzemesi olmaktadır. (Holtz, 2015)

### ***Diğer kil mineralleri***

Her ne kadar birçok minerali içeren bir gruba sahip olsa da kil zeminler içinde yaygın olarak bulunan bir diğer minerali de *klorit* tir. *Atapulgit* levhalı bir yapı yerine zincirli yapıya, dolayısıyla da iğnemsî ya da çubuksu bir görünüme sahiptir. *Allofan* bir fillosilikat olmasından dolayı genellikle bir kil minerali olarak tanımlanmaktadır. Bazı özel ayrışma şartlarında (özellikle volkanik kökenli zeminlerde) allofanlar, kil zeminlerin önemli bir bileşeni haline gelmektedir. (Holtz, 2015)

### **Zemin stabilizasyonu**

Binalar, yollar, köprüler, barajlar vb. yapılar için çoğu zaman zemin özellikleri, bu yapıların temellerinin desteklenmesi için uygun olmayabilir. Bu gibi durumlarda istenilen özellikteki temel zemin ortamlarını elde etmek için birçok yöntem kullanılarak hedeflenen mekanik ve fiziksel özellikler sağlanabilir. Bu duruma kısaca “Zeminlerin Stabilizasyonu-İyileştirilmesi” denir. Bu sayede oturma değerlerinin azaltılması, kayma direncinin ve taşıma kapasitesinin artırılması, göçmeye karşı emniyet faktörünün artırılması, şişme ve büzülme değerlerinin azaltılması vb. iyileştirmeler sağlanmaktadır. Bu amaçla; sıkıştırma-kompaksiyon, vibroflotasyon, ön yükleme, kum ve fitil-wick drenler, karışımlar ile stabilizasyon, jet enjeksiyonu, derin karıştırma, taş kolon vb. teknikler kullanılmaktadır. (Orhan, 2019)



Bu yöntemlerden konumuzla alakalı olan kompaksiyon ile fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemlerinden olan katkı malzemeleri ile stabilizasyon konularına değinilecektir.

### **Zeminlerin sıkıştırılması (kompaksiyon)**

Kompaksiyonun esas amacının zeminlerinin sıklık derecesini artırmak suretiyle mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi olduğu bilinmektedir. Sıkıştırılmış zeminlerin özellikleri sıkıştırma derecesi, kompaksiyon yöntemi, sıkıştırma su muhtevası vb. faktörlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

### ***Sıkıştırılmış zeminlerin özellikleri (kohezyonsuz)***

Sıkıştırma işlemi ayrık daneli zeminlerde sıkılık yüzdesini değiştirerek kayma mukavemetini olumlu yönde etkilemektedir. Daneli zeminlerin kompaksiyon özelliklerinin su muhtevassından çok fazla etkilenmediği bilinmektedir.

### ***Sıkıştırılmış zeminlerin özellikleri (kohezyonlu)***

Zeminlerdeki kompaksiyon işlemi su muhtevası ve sıkıştırma enerjisine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Bu işlem sonucunda sıkıştırılan zeminlerde dane iç yapısı etkilendiği gibi bazı fiziksel ve kimyasal etkileşimlerden dolayı önemli farklılıklar gözlenebilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde su içeriği ve kompaksiyon yöntemi zeminin tane iç yapısını etkileyebilmektedir. Bu etki düşük su içeriklerinde ( $w_{opt}$ ) sıkıştırılan zeminde tanelerin birbirlerine nazaran eğimli olduğu ve taneler arasında kenar-yüzey etkileşiminin olduğu buna karşılık yüksek su içeriklerinde ( $>w_{opt}$ ) tanelerin birbirlerine paralel olduğu gözlenmektedir (Özaydın, 2005). Kuru yoğunluk, su içeriği, kompaksiyon enerjisi ve zemin türü sıkışmayı etkileyen en önemli faktörlerdendir (Holtz *et al.*, 2015).

### **Fiziksel ve kimyasal iyileştirme**

#### ***Enjeksiyon yöntemleri ile zemin iyileştirme***

Enjeksiyon, zemin ya da zemin ile yapı arasında bulunan boşluklara enjeksiyon sıvısının belirli basınç ile gönderilmesi sonucunda bazı mühendislik özelliklerinin stabilizasyonu işlemidir (Balkıs 2009). Enjeksiyon işlemi ile zeminin dayanımını artırmak, geçirgenliğini azaltmak, mekanik özelliklerini iyileştirmek, zemin taşıma gücünü artırmak vb. iyileştirmeler yapılabilmektedir.

Enjeksiyon yöntemleri, enjeksiyon malzemesinin zemin ve kaya ortamına nüfuz etme biçimlerine göre emdirme, çatlatma, kompaksiyon ve jet enjeksiyonu olarak 4 grupta incelenebilir.

#### ***Katkı malzemeleri kullanılarak yapılan zemin iyileştirmesi***

Bu yöntemde zemine çimento, kireç gibi granüler malzeme veya kimyasal bileşikler katılarak zeminin iyileştirmesi sağlanmakta ve dayanımın artırılması, deformasyonun azaltılması, hacimsel stabilite sağlanması, geçirimsizliğin azaltılması gibi iyileştirmeler için tercih edilmektedir.

Çalışma kapsamında kimyasal katkıları ile zemin stabilizasyonu üzerinde durulacaktır. Kimyasal katkıları olarak sodyum klorür (NaCl), kalsiyum klorür (CaCl), Sodyum hidroksit

(NaOH), magnezyum klorür (MgCl) gibi kimyasal katkıları ve geosentetik katkıları sıralanabilir. Bunlara ek olarak zemin iyileştirme kapsamında farklı katkıları da kullanılmaktadır.

- Uçucu kül, termik santrallerin bacalarında tutulan endüstriyel atıktır. Uçucu kül puzolanik özelliğinden dolayı zemin stabilizasyon işlemlerinde sıkça tercih edilmektedir.
- Çimento, uzun yıllardır zemin iyileştirmesinde kullanılan bir malzemedir. Çimentonun pahalı olması nedeniyle alternatif maddeler çimento yerine zemin iyileştirilmesinde kullanılması için literatürde birçok çalışma yapılmaktadır.
- Zemin iyileştirmelerinde bitüm, suyun zararlarına karşı konulmasında ve zemin tanelerini bağlayıcı yönde etki etmektedir. Bitüm ince taneli zeminlerde tanelerin yüzeylerini sararak sudan dolayı kıvamının değişmesini engelleyici bir etki oluştururken ayırık taneli zeminlerde kohezyon oluşmasına neden olmaktadır (Demiröz ve Karaduman, 2009).

### **Plastikler ve PET Şişe Atıkları**

Plastik, oldukça geniş ve birçok uygulamada tercih edilen sentetik ya da yarı sentetik malzemeyi ifade eden genel bir kavramdır. Kıyafetlerde, otomobillerde, oyuncaklarda, televizyonlarda, bilgisayarlarda, CD'lerde, diş fırçasında ve daha birçok hayatımızı kolaylaştıran malzemelerde plastikler kullanılmaktadır.

Plastikleri 2 temel polimer grubunda ele alabiliriz:

- Termoplastikler: Isıya maruz kaldığında erimekte ve soğutulduğunda yeniden sert bir hal almaktadır. (PAGEV)

Bunlar;

- ✓ Akrilonitrilbütadienstiren – ABS
- ✓ Polikarbonat– PC
- ✓ Polietilen – PE
- ✓ Polietilen tereftalat– PET
- ✓ Polivinilklorür– PVC
- ✓ Polimetilmetakrilat– PMMA
- ✓ Polipropilen– PP
- ✓ Polistiren– PS
- ✓ Genişletilmiş Polistiren– EPS

- Termosetler: Şekil verildikten sonra yeniden eritilemezler. (PAGEV)

Bunlar;

- ✓ Epoxıda (EP)
- ✓ Phenol-formaldehde (PF)
- ✓ Polüretan (PUR)
- ✓ Politetrafloroetilen– PTFE
- ✓ Doymamış polyester reçineleri (UP)

Türkiye’ de 2008 yılındaki plastik ambalaj miktarı yaklaşık 500.000 t olmuştur. Bu miktarın yaklaşık %40’ı dönüştürülmüştür. Fakat bahsedilen oranların artması geri kazanılan atıkların uygun şekilde değerlendirilmesi ve kullanım alanlarının artmasıyla mümkün olacaktır.

Önemli miktarda geri dönüştürülebilen PET, Avrupa Birliği kanunlarına göre PET’ler plastiklerle ilgili geri dönüşüm hedeflerinin karşılanmasında ve enerji geri kazanımı için yakılarak önemli rol oynamaktadır.

Ulusal Tüketici Plastik Geri Dönüşüm Raporu’nda (2002) Polietilen Tereftalat’ın geri dönüşüm hızı 1994 yılında yüzde otuz sekizken, 2002 yılında yüzde yirmiye gerilediği ifade edilmektedir. Bu durum Yüksek Yoğunluklu Polietilen’de (High Density Polyethylene) aynı yıllar için yüzde on ikiden yüzde yirmi dörde çıkmıştır (Sevencan, 2007).

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Kil

Çalışmada kullanılan kil Erzurum' un Kuzeydoğusunda yer alan Oltu ilçesinden temin edilmiştir. Araziden alınan kil malzemesi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda kurutulup, danelendikten sonra temel fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Kullanılan doğal kile ait görsel Şekil 3'te, özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Doğal kil

Tablo 1. Doğal Kile Ait Özellikler

| Özellik                                  | Değer |
|------------------------------------------|-------|
| Likit Limit (%)                          | 77    |
| Plastik Limit (%)                        | 31    |
| Plastisite İndisi (%)                    | 46    |
| Optimum Su İçeriği (%)*                  | 21    |
| Maksimum Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )* | 1,55  |
| Zemin Sınıfı**                           | CH    |

\*Standart proktor ; \*\*USCS

### PET Şişe Atıkları

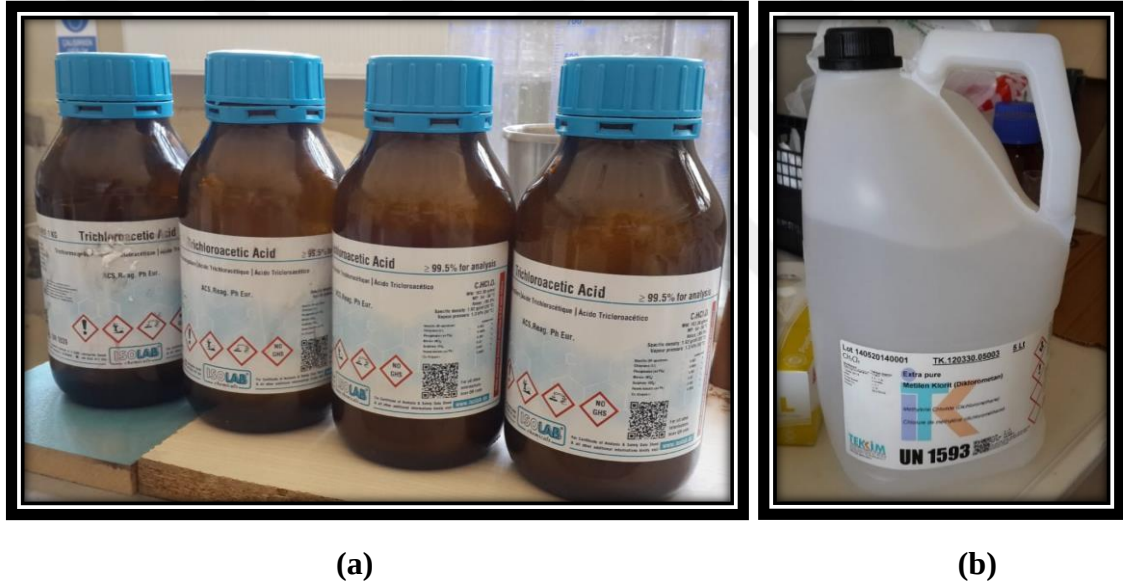
Çalışmada kullanılan PET şişe atıkları farklı yerlerden atık olarak toplanmış ve laboratuvarında küçük parçacıklara ayrılmıştır (Şekil 4).



**Şekil 4.** Parçalara ayrılan PET şişe atığı

### Trichloroacetic Acid ve Dichloromethane Kimyasalları

Çalışmada kullanılan trichloroacetic acid ve dichloromethane kimyasalları özel bir firmadan temin edilmiştir. Kimyasallara ait görüntüler Şekil 5a-b’de, temin edilen firmadan alınan bazı özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.



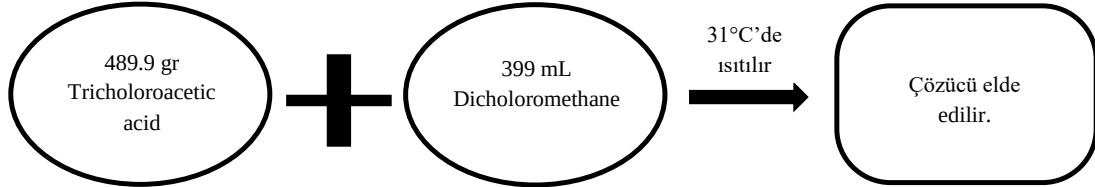
**Şekil 5.** (a) Trichloroacetic acid. (b) Dichloromethane.

**Tablo 2.** Kimyasalların Firmadan Alınan Bazı Özellikleri

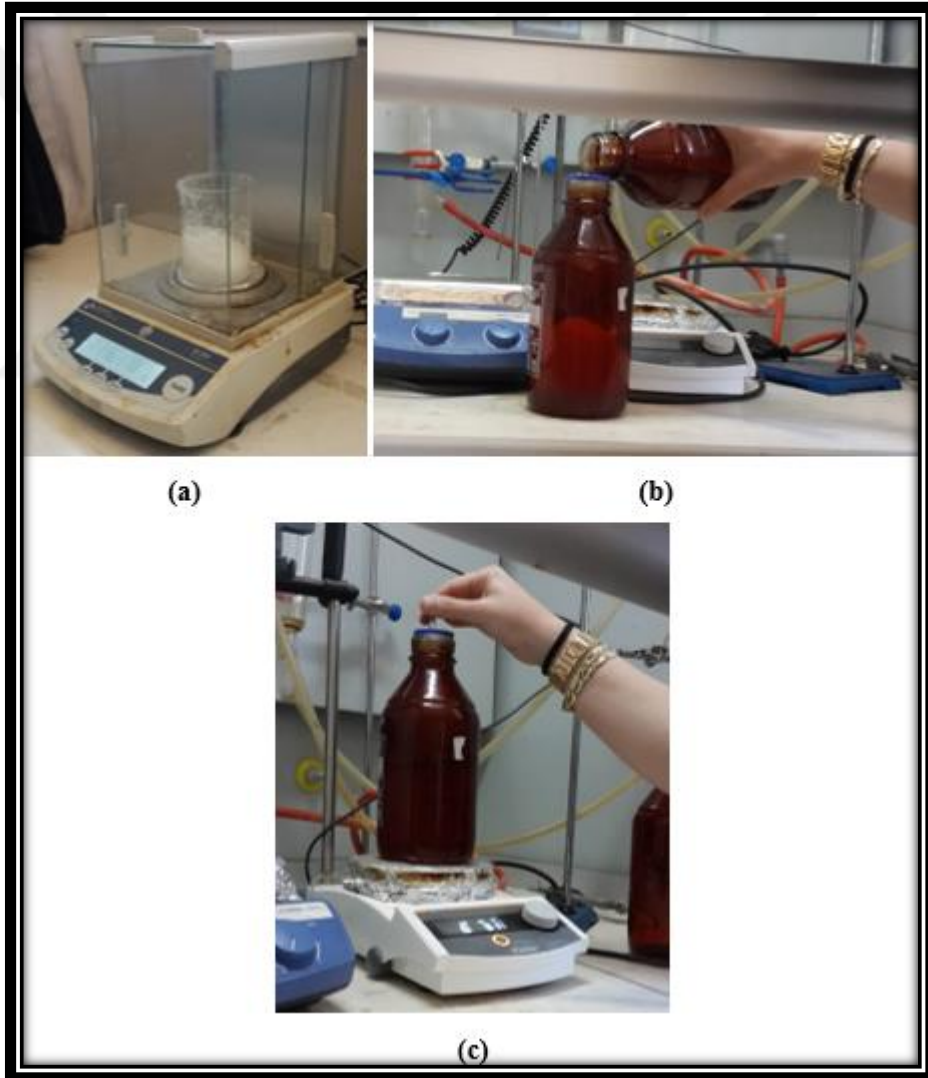
| Ürün Adı                                              | Kimyasal Formül | CAS No. | Formül Ağırlığı/ Yoğunluk    | Asidimetrik          | Saflık        | Görünüş       |
|-------------------------------------------------------|-----------------|---------|------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
| Trichloroacetic Acid, for analysis ACS, Reag. Ph Eur. | $C_2HCl_3O_2$   | 76-03-9 | 163,38 g/mol                 | $\geq 99,5\%$        | -----         | -----         |
| Dichloromethane, Extra püre                           | $CH_2Cl_2$      | 75-09-2 | 1,31-1,33 gr/cm <sup>3</sup> | $\leq 0,0005$ meq/gr | $\geq 99,5\%$ | Clear /Berrak |

## Sıvılaştırılmış Atık PET Şişe Üretimi

Sıvılaştırılmış atık PET şişe üretimi Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. PET şişe atıklarından sıvılaştırılmış atık PET elde etmek için 489,9 gr Trichloroacetic acid ve 399 mL Dichloromethane kimyasalları 31°C'de ısıtılıp PET şişeyi çözebilen bir çözücü sıvı hazırlanmıştır. Çözücü sıvının üretim sürecine ait aşamalar Şekil 6'da ilgili görseller ise Şekil 7a-b-c'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Çözücü sıvısının hazırlanma aşamaları



Şekil 7. (a) Trichloroacetic acid tartılması. (b) Trichloroacetic acid üzerine Dichloromethane eklenmesi. (c) İki kimyasalın 31°C'de karıştırılarak çözücü sıvının elde edilmesi

Çözücü sıvının hazırlanmasının ardından bu çözücü sıvı içerisine parçalara ayrılmış 135 gr atık PET şişe ilave edilip PET şişe parçacıklarının çözücü sıvı içinde tamamen çözünmesi gerçekleşmiştir. Böylece sıvılaştırılmış PET şişe atık elde edilmiştir (Şekil 8).



**Şekil 8.** Sıvılaştırılmış PET şişe atığı

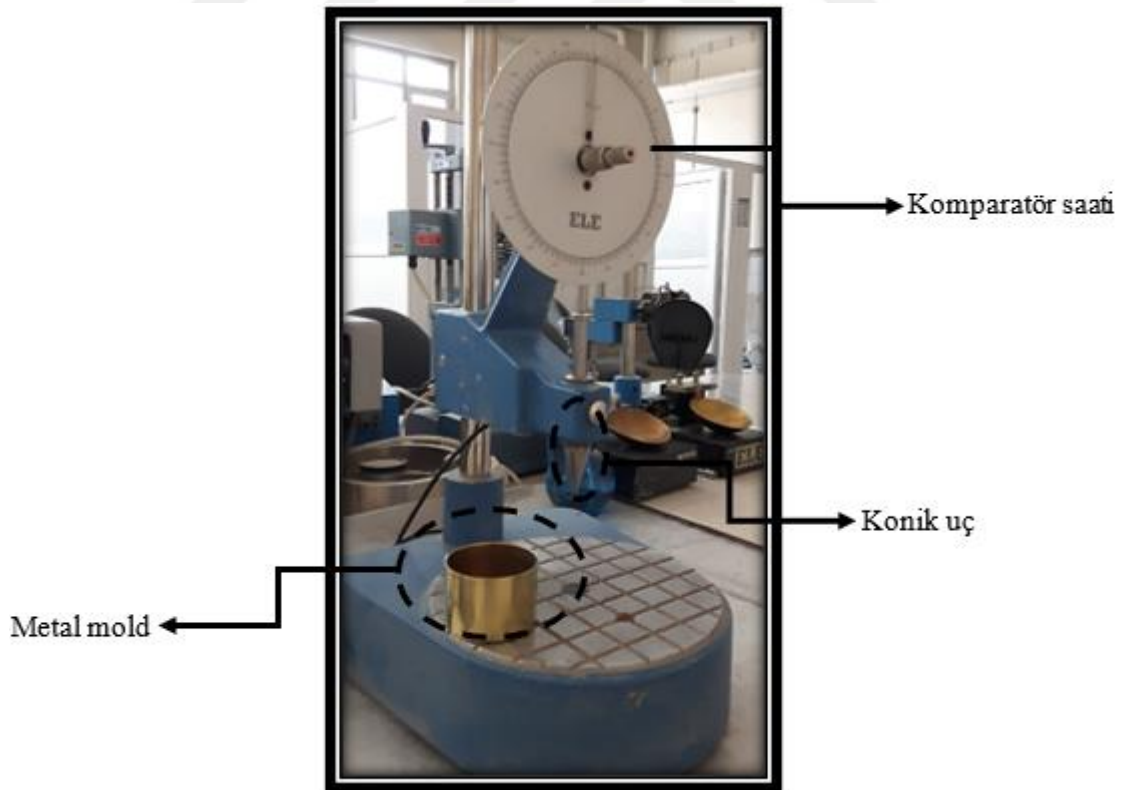
### **Kıvam (Atterberg) deneyleri**

Kıvam (Atterberg) limit deneyleri TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Zeminin likit limiti düşen koni penetrasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Deney için 40 nolu (425  $\mu$ m) elekten elenen kil zeminden bir miktar porselen pota içerisine koyulmuş ve damıtık su ilave edilerek homojen bir hamur durumuna gelene kadar, palet bıçağıyla iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan numune metal deney kabına sıkıca yerleştirildikten sonra yüzeyi çelik cetvelle düzeltilmiş ve penetrometre tabanına konulmuştur. Konik uç zeminin yüzeyini belirsizce çizecek seviyeye indirilip komparatör saati sıfır okuması yapıldıktan sonra  $5 \pm 1$  saniye süre ile konik ucun numuneye batması beklenmiştir. Süre sonunda son komparatör saati okuması yapılmış ve iki okuma arasındaki fark koni penetrasyon değeri olarak kaydedilmiştir. Kaptaki zemin numunesinden koni deliği civarından bir miktar alınıp su muhtevası belirlenmiştir. Bu işlemler, farklı su içerikleri için 6-7 kez tekrar edilmiş ve batma miktarı-su muhtevası ilişkisi çizilerek 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası zeminin likit limitini ( $w_L$ ) olarak belirlenmiştir.

Plastik limit tayini için 40 nolu (425  $\mu$ m) elekten elenen kil zeminden bir miktar alınıp homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilecek kadar plâstik olana kadar, cam plâka üzerinde, damıtık su ile iyice karıştırılmıştır. Küre halindeki numune, 3 mm çapında

silindirik bir çubuk şeklini alana kadar cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanıp kılcal çatlaklar oluştuğu anda numunenin su muhtevası plastik limit ( $w_p$ ) olarak belirlenmiştir. Bu işlem 3-4 kez tekrar edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Likit limit ile plastik limitin farkı plastisite indisi ( $I_p$ ) olarak kaydedilir. Elde edilen bu değerler ile zeminin sınıfı plastisite kartı yardımıyla bulunur.

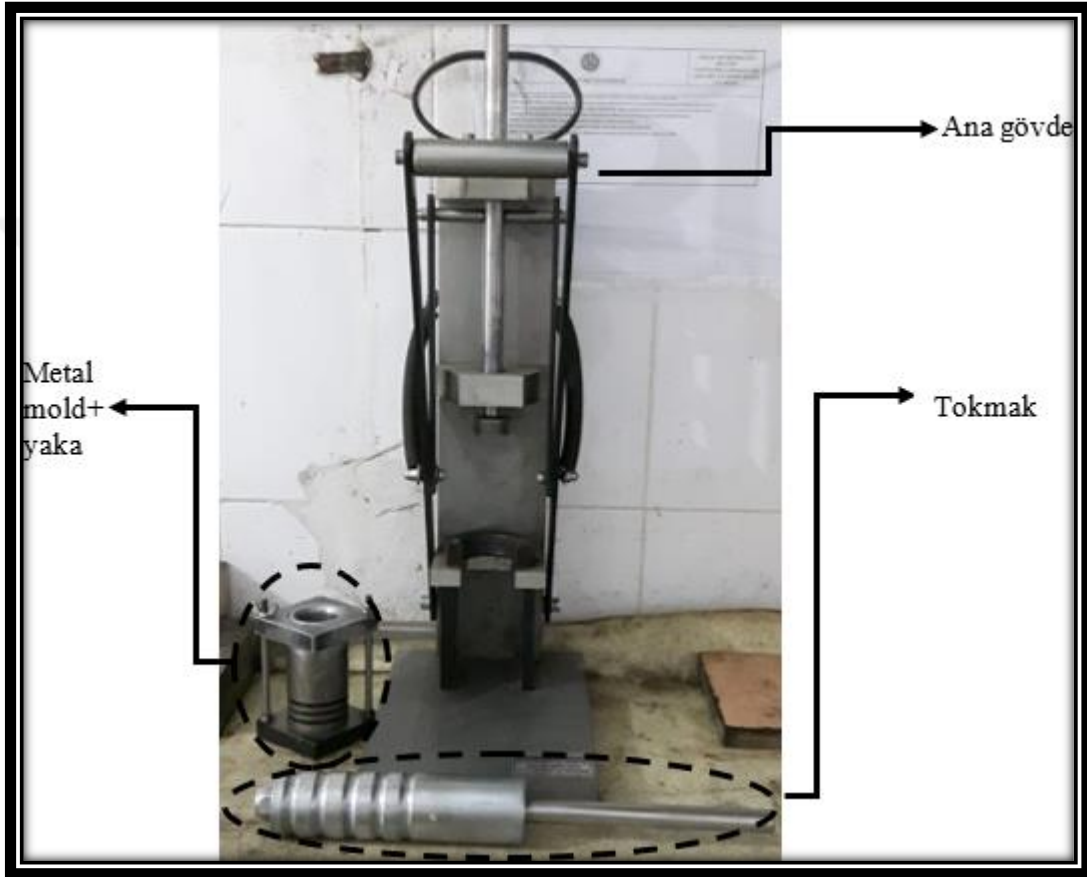
Kıvam limitleri deney numuneleri dört konfigürasyonda hazırlanmıştır. Konfigürasyon-0 (K0)' da katı haldeki doğal kil içerisine su ilave edilmiştir. Konfigürasyon-I (KI)' de katı haldeki doğal kil içerisine farklı oranlarda (karışım sıvısının %5, %10, %15 ve %20) sıvılaştırılmış pet şişe atığı ilave edilip daha sonra su ilave edilmiştir. Konfigürasyon-II (KII)' de katı haldeki doğal kil içerisine su ilave edilip daha sonra sıvılaştırılmış pet şişe atığı ilave edilmiştir. Konfigürasyon-III (KIII)' te ise sıvılaştırılmış pet şişe atığı üzerine su ilave edilip karıştırıldıktan sonra katı haldeki doğal kil içerisine ilave edilmiştir. Her bir konfigürasyon için su muhtevası – batma miktarı ilişkisi çizilerek likit limit değeri ile plastik limit deneylerinden plastik limit değeri belirlenmiştir. Numuneler hazırlanırken homojen hale gelinceye kadar karıştırılma işlemi yapılmış ve pet şişe atığının etkisinin daha iyi gözlenebilmesi için damıtık su kullanılmıştır. Düşen koni penetrometre deney aletine ait görsel Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Düşen koni penetrometre deney aleti

### Kompaksiyon deneyi

Tez kapsamında kompaksiyon deneyi için Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti kullanılmış ve deneyler USBR-5510 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ana gövde, tokmak ve metal yakalı molddan oluşan (Şekil 10) deney ekipmanları ile zeminin sıkıştırılması amacıyla Harvard minyatür kompaksiyon deneyi yapılmaktadır. Sıvı malzemelerle karıştırılan kuru haldeki doğal kil malzemesi molda 5 tabaka halinde serilip her bir tabakaya 10 vuruş olacak şekilde sıkıştırılarak numune elde edilir.



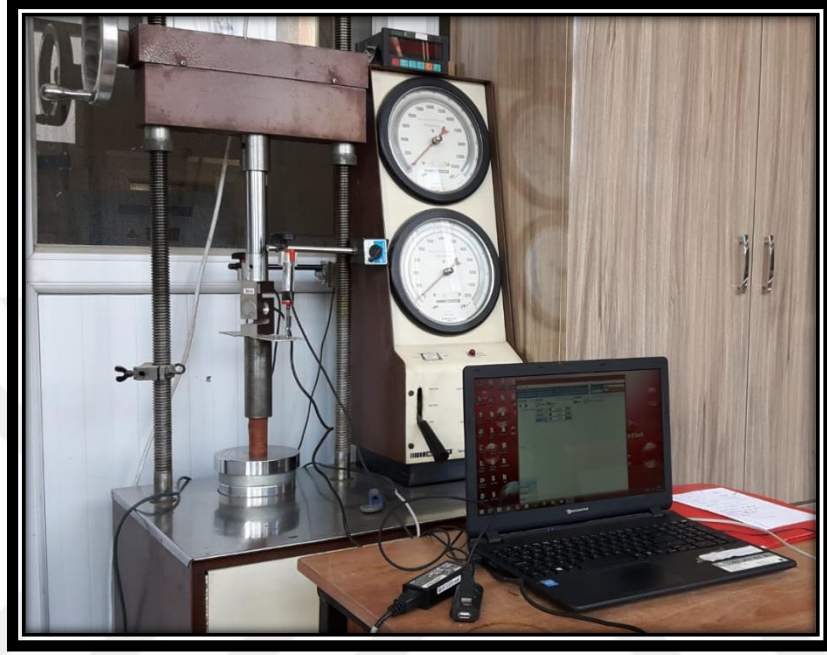
Şekil 10. Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti

Harvard minyatür kompaksiyon deneyi K0 konfigürasyonu için yapılmış ve doğal zemine ait kuru birim hacim ağırlık – optimum su muhtevası ilişkisini gösteren grafik çizilmiştir.

### Serbest basınç deneyi

Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti ile optimum su muhtevasında üretilen 33 mm çapında ve 71 mm yüksekliğindeki silindirik numuneler TS 1900-2 standardına uygun olarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney hızı 0,8 mm/dk olarak seçilmiş ve göçme elde edilene kadar sürdürülmüştür.

Serbest basınç deneyi K0'dan elde edilen optimum su muhtevasına farklı oranlarda sıvılaştırılmış PET şişe atığı (%5, %10, %15, %20) ilave edilerek hazırlanan KI, KII ve KIII konfigürasyonları için tekrar edilmiştir. Her bir deney için 3' er adet numune üzerinde deney yapılmış ve değerlendirmelerde ortalamaları kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 11'de gösterilmiştir. Katkısız ve katkılı hazırlanmış her bir deney için üçer adet numune kullanılmış ve serbest basınç dayanımı olarak ortalama değerleri kullanılmıştır.



**Şekil 11.** Serbest basınç deney düzeneği

### **Donma - çözülme deneyi**

Tez kapsamında hazırlanan KI, KII ve KIII numunelerinden en yüksek serbest basınç mukavemetini veren konfigürasyon numuneleri üzerinde donma çözülme deneyi yapılmıştır. Harvard minyatür kompaksiyon deney aleti ile optimum su muhtevasında üretilen 33 mm çapında ve 71 mm yüksekliğindeki silindirik numuneler donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur (Akbulut ve Zaimoğlu, 2019). Donma çözülme deneyi; boyutları 110 cm x 55 cm x 55 cm olan, minimum -25°C maksimum +60°C olarak programlanabilen, tam otomatik donma çözülme kabininde gerçekleştirilmiştir (Akbulut ve Zaimoğlu, 2019). Numuneler 6 saati -20°C'de donma, 6 saati +23°C'de çözülme olmak üzere bir çevrimi 12 saat süren 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrimlere tabii tutulmuştur. Tüm numuneler hazırlandıktan sonra streç film ile sarılıp numunelerin su kaybı minimuma indirilmiş ve hiçbir numune çevrimini tamamlamadan donma çözülme kabininden çıkarılmamıştır.

Donma çözölme her bir deney için 3 adet numune üzerinde yapılmış ve değeriendirmelerde ortalamaları kullanılmıştır. Donma çözölme deney aleti Şekil 12’de gösterilmiştir.

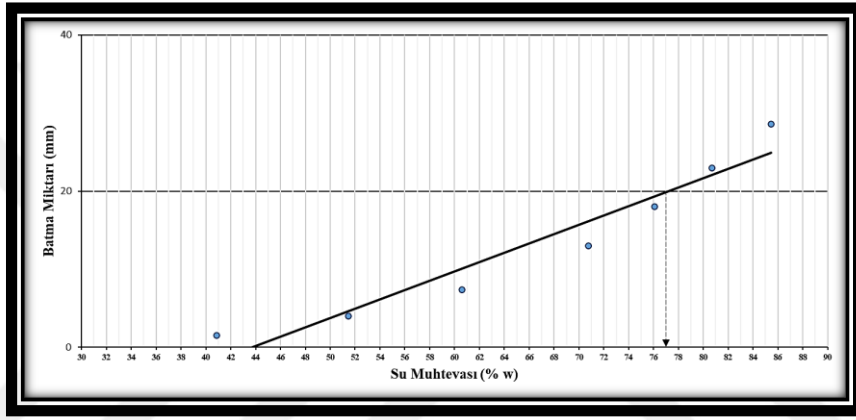


Şekil 12. Donma çözölme deney aleti

## ARAŞTIRMA BULGULARI

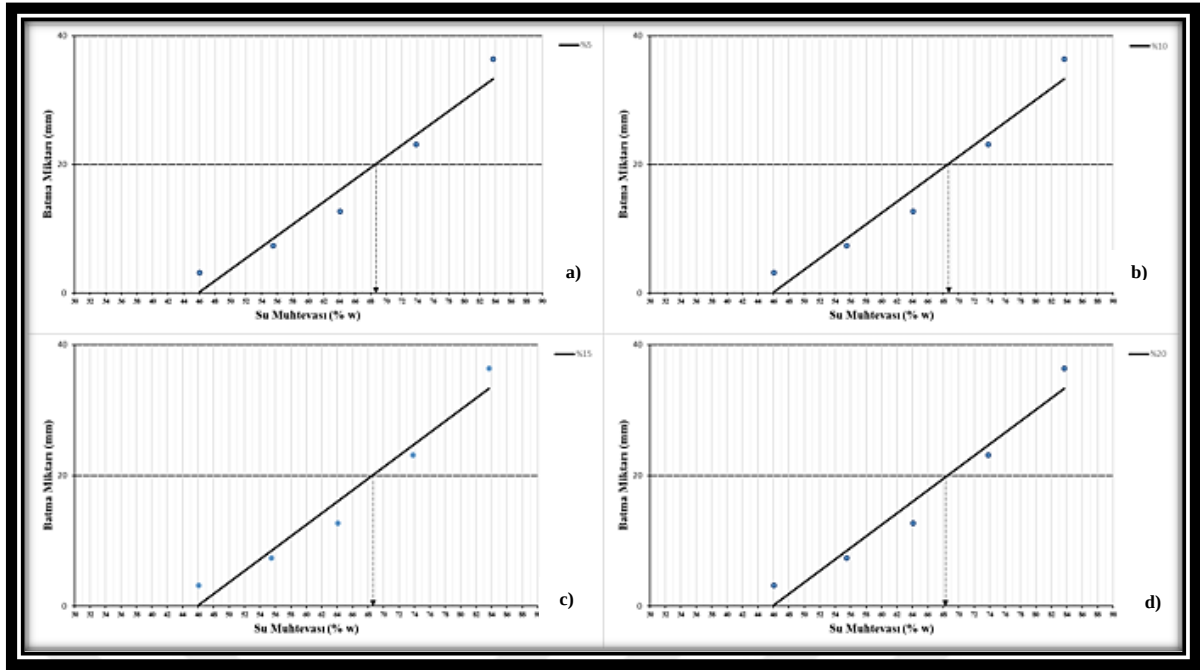
### Kıvam Limitleri

Düşen koni penetrometre deneyleri sonucunda K0, KI, KII ve KIII konfigürasyonları için elde edilen veriler kullanılarak çizilen su muhtevası-batma miktarı ilişkileri sırasıyla Şekil 13-14-15-16-17’ de gösterilmiştir. Su muhtevası-batma miktarı ilişkilerinden yararlanılarak belirlenen likit limit değerleri ile plastik limit deneyleri sonucunda belirlenen plastik limit değerleri Tablo 3’te toplu olarak verilmiştir.



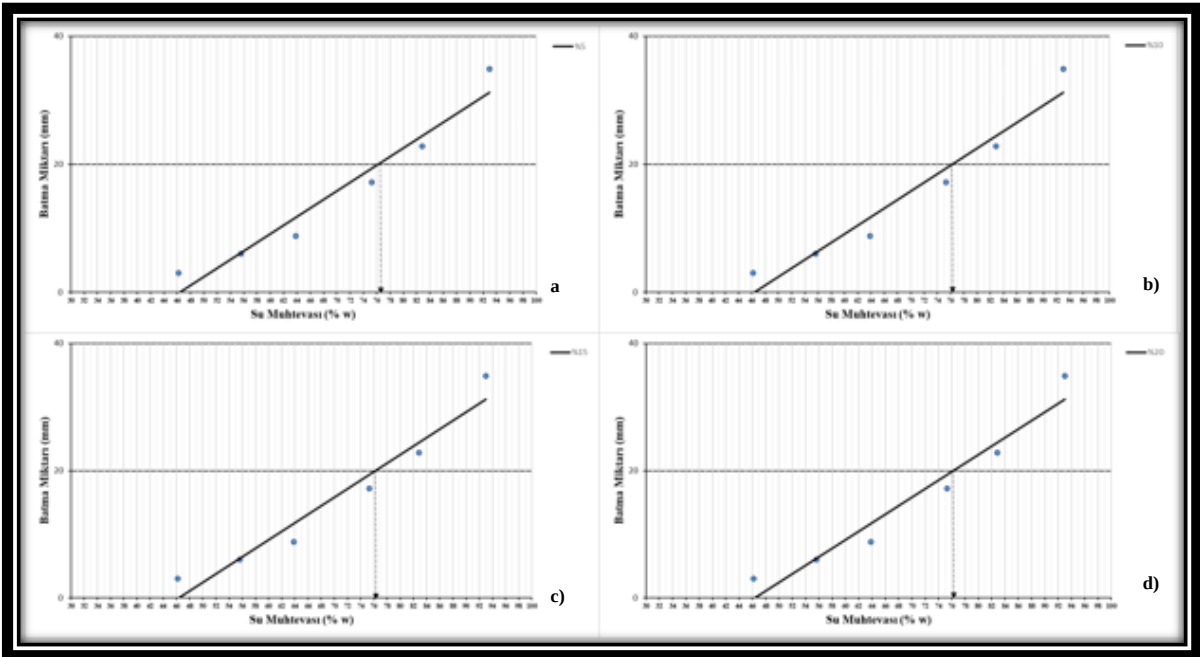
**Şekil 13.** Su muhtevası – batma miktarı ilişkisi (Doğal kil – K0)

Şekil 1’ te verilen grafikten batma miktarı 20 mm’ye karşılık gelen su muhtevası değerinin %77 olduğu görülmektedir. Bu değer doğal (katkısız) kilin likit limit ( $w_L$ ) değeridir. Plastik limit deney verilerine göre doğal (katkısız) kilin plastik limit ( $w_P$ ) değeri %31’dir. Doğal (katkısız) kilin Plastisite İndisi ( $I_P = w_L - w_P$ ) %46’dır.



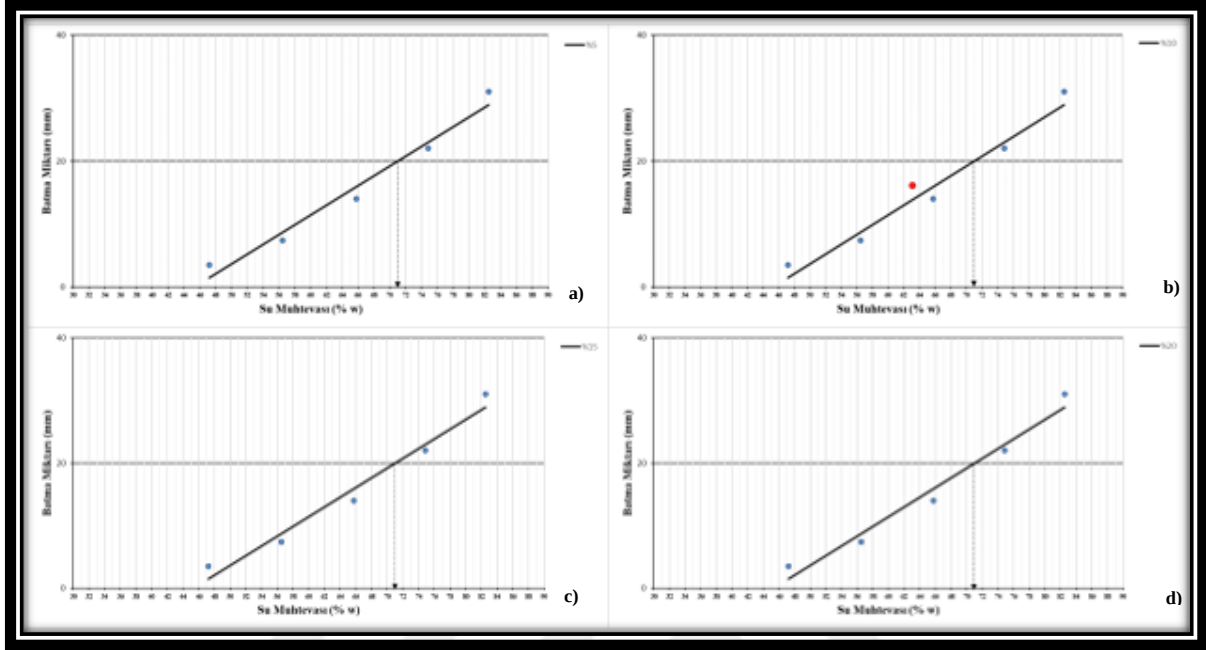
**Şekil 14. a) %5-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi b) %10-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi c) %15-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi d) %20-KI su muhtevası – batma miktarı ilişkisi**

Şekil 14’te verilen grafiklerden batma miktarı 20 mm’ye karşılık gelen su muhtevası değerlerinin ( $w_L$ ) %5, %10, %15 ve %20 sıvılaştırılmış PET şişe sıvısı için sırasıyla %69, %69, %69 ve %68 olduğu, plastik deney verilerine göre plastik limit ( $w_P$ ) değerleri ise sırasıyla %25, %31, %32 ve %33 olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 15. a) %5-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi b) %10-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi c) %15-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi d) %20-KII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi**

Şekil 15'te verilen grafiklerden batma miktarı 20 mm'ye karşılık gelen su muhtevası değerlerinin ( $w_L$ ) %5, 10, 15 ve 20 sıvılaştırılmış PET şişe sıvısı için sırasıyla %77, %76, %76 ve %76 olduğu, plastik deney verilerine göre plastik limit ( $w_p$ ) değerleri ise sırasıyla %36, %26, 37 ve %34 olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 16. a)** %5-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi **b)** %10-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi **c)** %15-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi **d)** %20-KIII su muhtevası – batma miktarı ilişkisi

Şekil 16'da verilen grafiklerden batma miktarı 20 mm'ye karşılık gelen su muhtevası değerlerinin ( $w_L$ ) %5, 10, 15 ve 20 sıvılaştırılmış PET şişe sıvısı için tüm değerler için %71 olduğu, plastik deney verilerine göre plastik limit ( $w_p$ ) değerleri ise sırasıyla %28, %33, 33 ve %31 olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 3. Kıvam Limitleri Deney Sonuçları (K0, K1, K2, K3)**

|            | K0           |              |           |       | K1           |              |           |       | K2           |              |           |       | K3           |              |           |       |
|------------|--------------|--------------|-----------|-------|--------------|--------------|-----------|-------|--------------|--------------|-----------|-------|--------------|--------------|-----------|-------|
|            | $w_L$<br>(%) | $w_p$<br>(%) | IP<br>(%) | Sınıf | $w_L$<br>(%) | $w_p$<br>(%) | IP<br>(%) | Sınıf | $w_L$<br>(%) | $w_p$<br>(%) | IP<br>(%) | Sınıf | $w_L$<br>(%) | $w_p$<br>(%) | IP<br>(%) | Sınıf |
| <b>%0</b>  | 77           | 31           | 46        | CH    | 77           | 31           | 46        | CH    | 77           | 31           | 46        | CH    | 77           | 31           | 46        | CH    |
| <b>%5</b>  | 68           | 25           | 43        | CH    | 77           | 36           | 41        | MH    | 71           | 28           | 43        | CH    | 71           | 28           | 43        | CH    |
| <b>%10</b> | 69           | 31           | 38        | CH    | 76           | 26           | 50        | CH    | 71           | 33           | 38        | CH    | 71           | 33           | 38        | CH    |
| <b>%15</b> | 69           | 32           | 37        | CH    | 76           | 37           | 39        | MH    | 71           | 33           | 38        | CH    | 71           | 33           | 38        | CH    |
| <b>%20</b> | 68           | 33           | 35        | MH    | 76           | 34           | 42        | CH    | 71           | 31           | 40        | CH    | 71           | 31           | 40        | CH    |

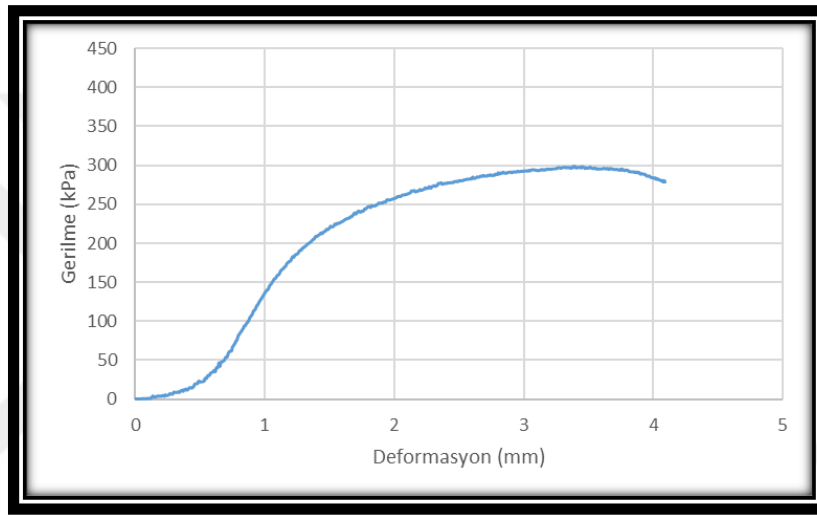
Tablo 3'te verilen değerler kullanılarak tüm konfigürasyonlar için sıvılaştırılmış pet şişe atığının kil üzerindeki etkisini belirlemek için zemin sınıfları belirlenmiştir. Zeminlerin sınıfını gösteren plastisite kartı Şekil 17'de gösterilmiştir.



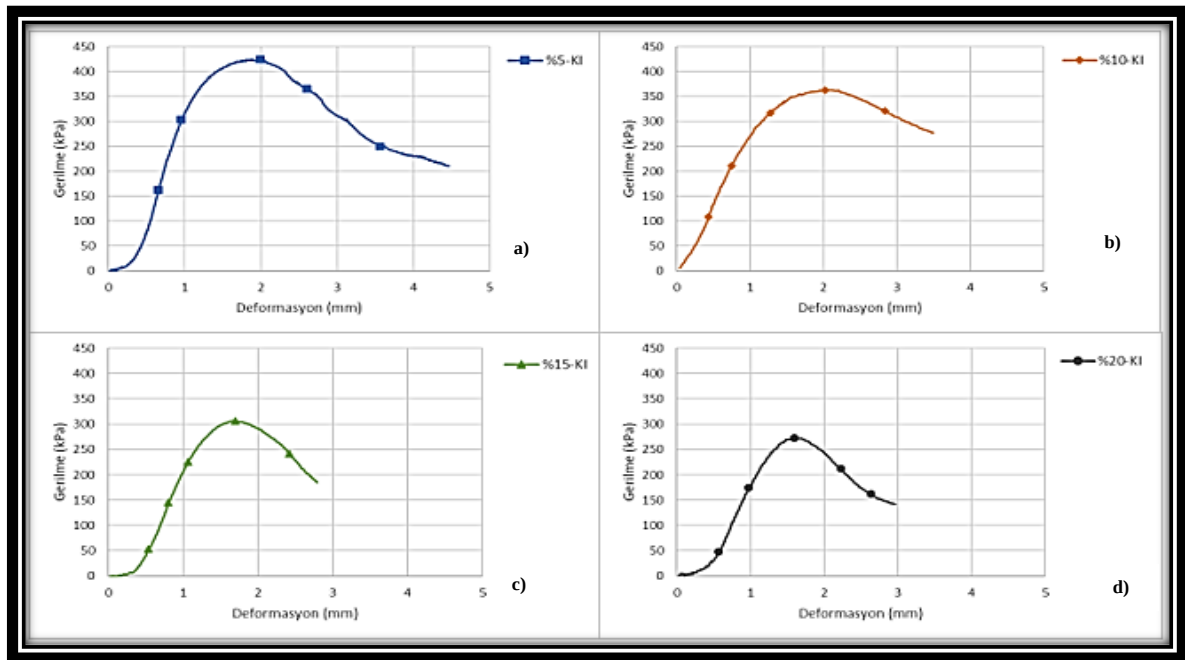
Şekil 18 ‘den katkısız zeminin (K0) optimum su muhtevası %21 ve maksimum kuru yoğunluğu  $1,5 \text{ gr/cm}^3$  olarak belirlenmiştir. Belirlenen maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası, sıvılaştırılmış PET şişe katkısı zemin içerisine düşük yüzdelerde ilave edildiği için, katkılı numuneler içinde kullanılmıştır.

### Serbest basınç deneyleri

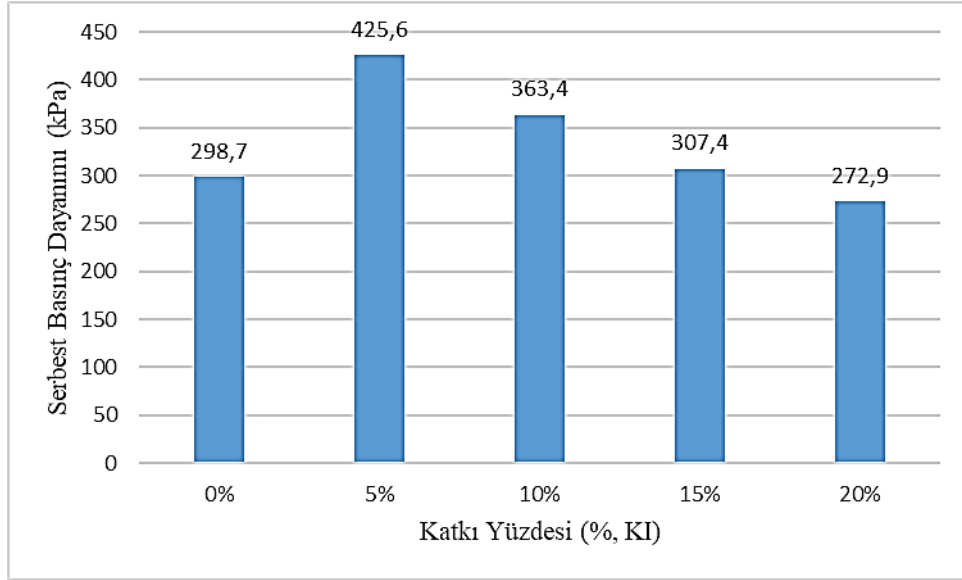
Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak K0 ve KI, konfigürasyonları için çizilen gerilme – deformasyon ilişkileri sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20’de, bu ilişkilerden yararlanılarak elde edilen her bir numuneye ait maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 21’ de gösterilmiştir.



Şekil 19. Gerilme - deformasyon ilişkisi (K0)



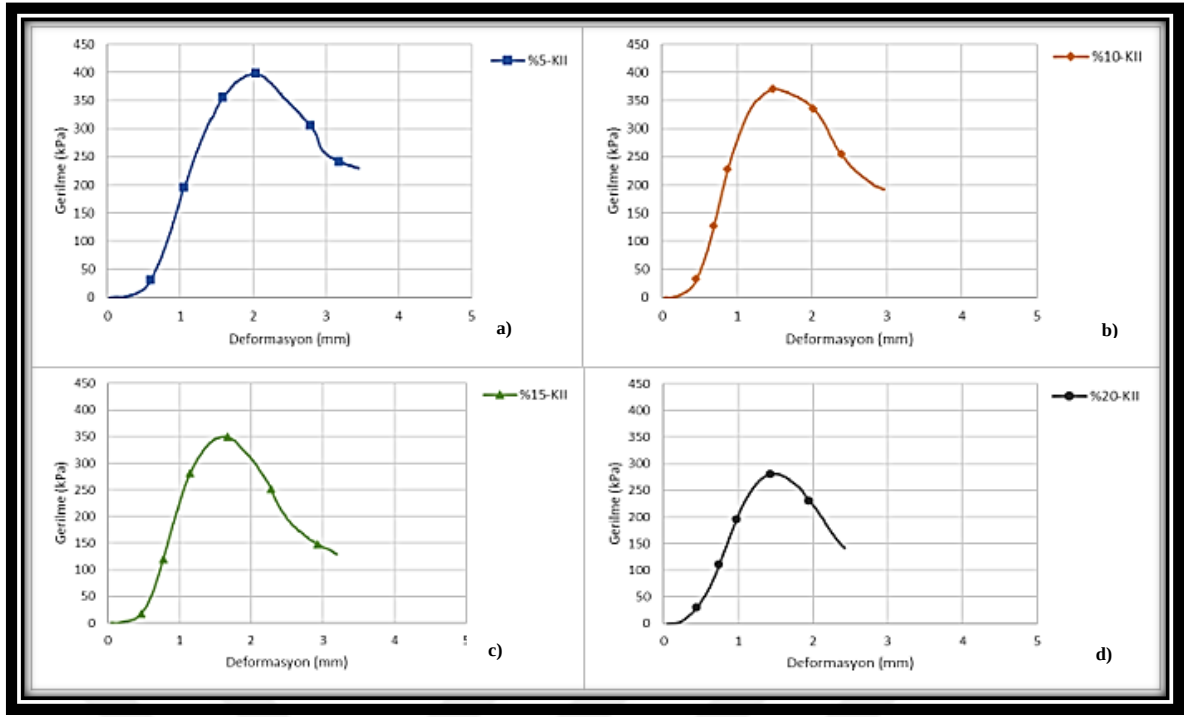
Şekil 20. a) %5-KI için gerilme - deformasyon ilişkisi b) %10-KI için gerilme - deformasyon ilişkisi c) %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi d) %20 için gerilme - deformasyon ilişkisi



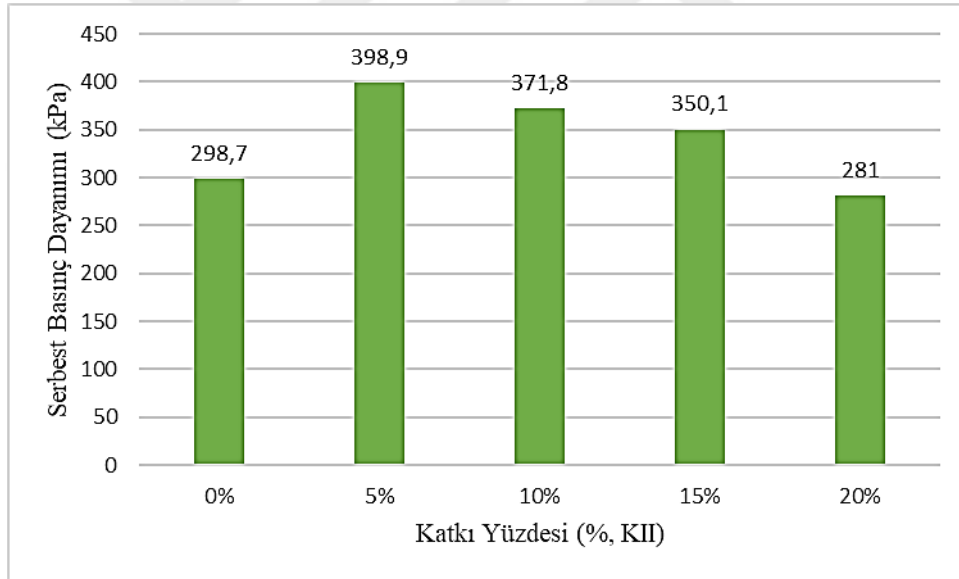
**Şekil 21.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KI)

Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21 birlikte değerlendirildiğinde sıvılaştırılmış PET şişe atığının genel olarak zemin numunelerinin maksimum serbest basınç dayanımı değerini katkısız numuneye göre artırdığı ancak atığın yüzdesinin artması ile maksimum serbest basınç dayanım değerini azaldığı görülmektedir. %5 katkılı numunenin maksimum gerilmesi katkısız numunenin maksimum serbest basınç dayanımına göre %42,5 arttığı ve en yüksek serbest basınç dayanımı bu katkı oranında gerçekleştiği görülmektedir.

Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak KII konfigürasyonları için çizilen gerilme – deformasyon ilişkisi Şekil 22’de, bu ilişkiden yararlanılarak elde edilen her bir numuneye ait maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 23’ te gösterilmiştir.



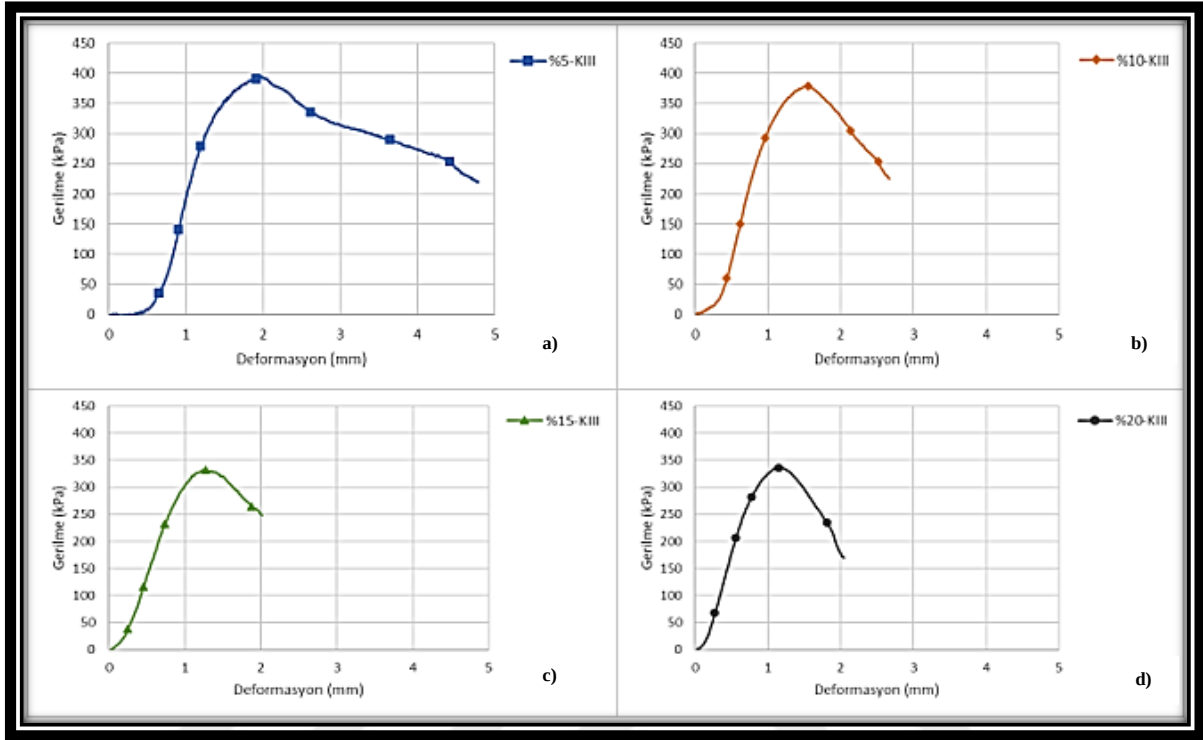
**Şekil 22. a) %5-KII için gerilme - deformasyon ilişkisi b) %10 için gerilme - deformasyon ilişkisi c) %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi d) %20 için gerilme - deformasyon ilişkisi**



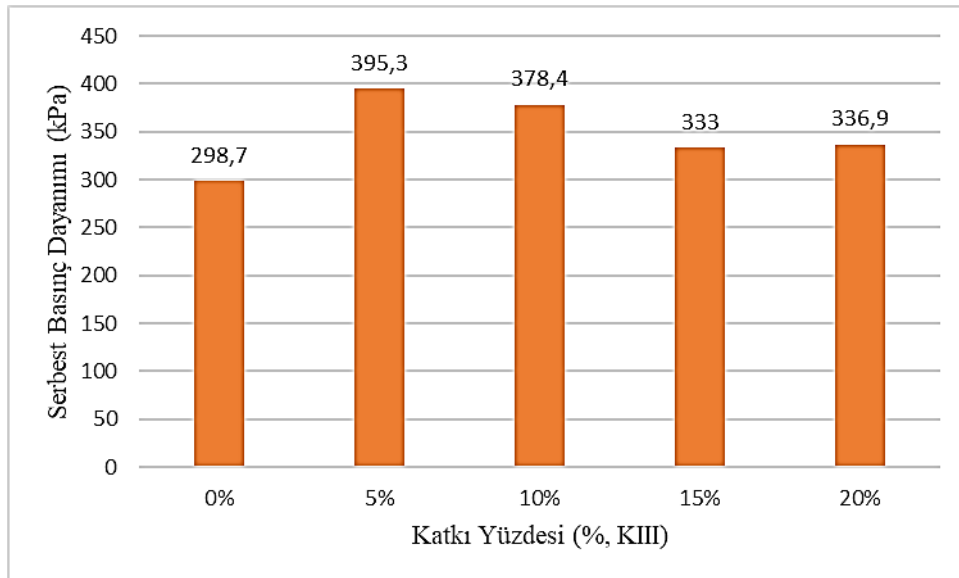
**Şekil 23. Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KII)**

Şekil 22 ve Şekil 23 birlikte incelendiğinde sıvılaştırılmış PET şişe atığının genel olarak zeminin maksimum serbest basınç dayanımı değerini katkısız numuneye göre artırdığı ancak atığın yüzdesinin artması ile maksimum serbest basınç dayanımı değerini azaltıcı yönde etki ettiği anlaşılmaktadır. %5 katkılı numunenin maksimum serbest basınç dayanımı katkısız numunenin maksimum gerilmesine göre %33,5 artış gösterdiği ve en yüksek serbest basınç dayanımının bu katkı oranında gerçekleştiği görülmektedir.

Serbest basınç deneyleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak KIII konfigürasyonları için çizilen gerilme – deformasyon ilişkisi Şekil 24’te gösterilmiştir. Bu ilişkiden yararlanılarak elde edilen her bir numuneye ait maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 25’ te gösterilmiştir.



**Şekil 24.** a) %5-KIII için gerilme - deformasyon ilişkisi b) %10 için gerilme - deformasyon ilişkisi c) %15 için gerilme - deformasyon ilişkisi d) %20 için gerilme - deformasyon ilişkisi



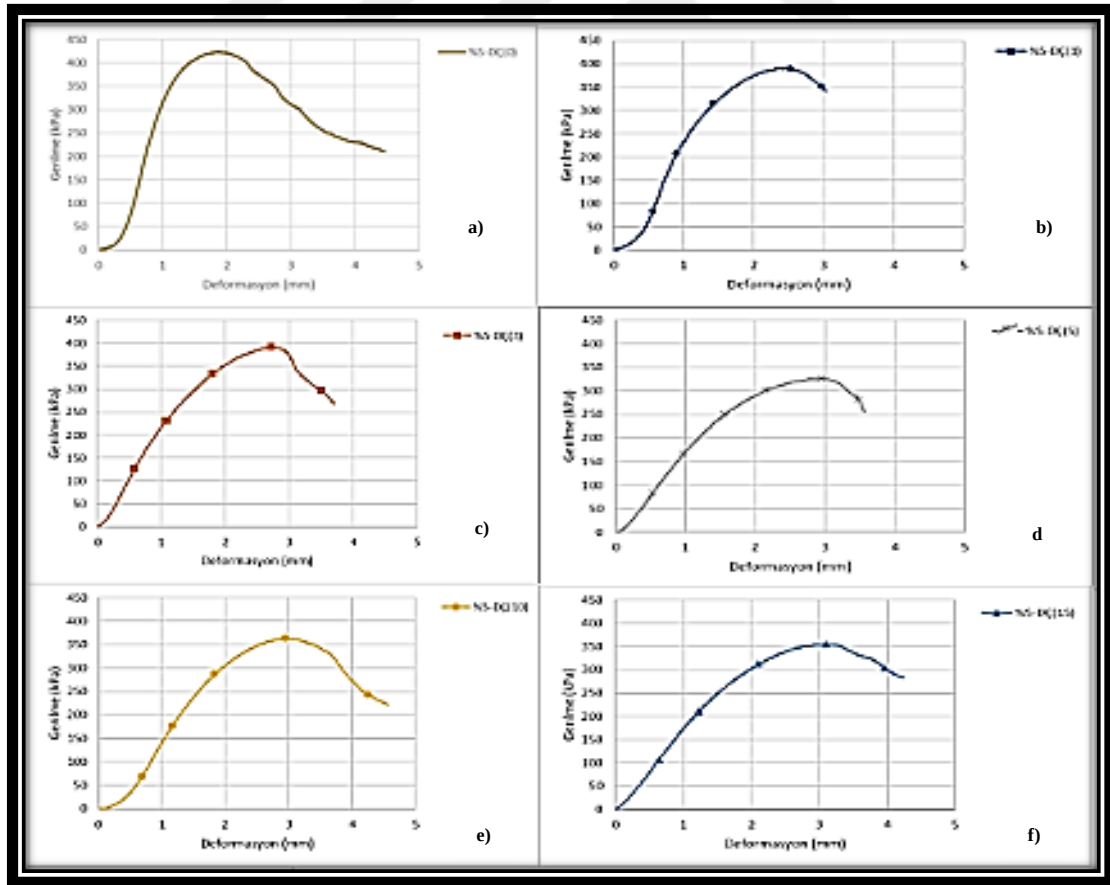
**Şekil 25.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KIII)

Şekil 24 ve Şekil 25 birlikte değerlendirildiğinde sıvılaştırılmış PET şişe atığının genel olarak katkısız numuneye göre zeminin maksimum gerilme değerini artırdığı ancak atığın yüzdesinin artması ile maksimum gerilme değerini azaltıcı yönde etki ettiği anlaşılmaktadır.

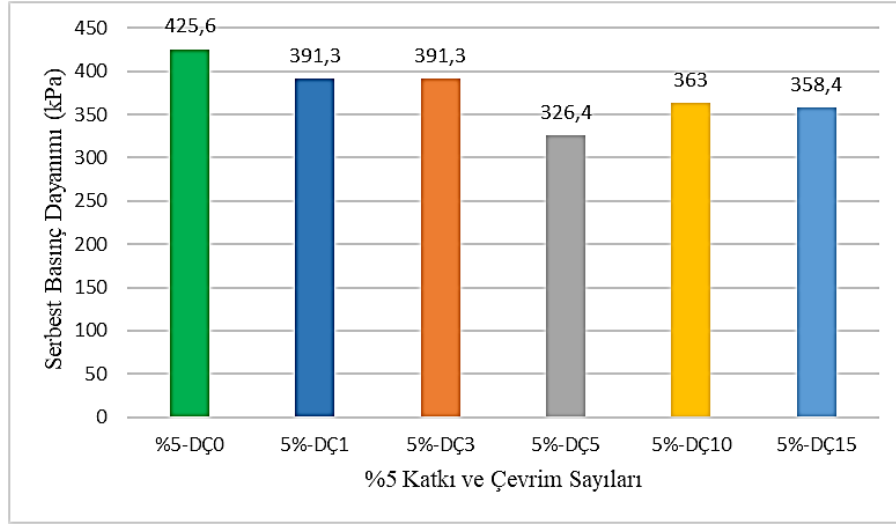
%5 katkılı numunenin maksimum gerilmesi katkısız numunenin maksimum gerilmesine göre %32,3 artış gösterdiği ve en yüksek gerilmenin bu katkı oranında gerçekleştiği görülmektedir.

Tüm konfigürasyonlarda sıvılaştırılmış PET şişe atığının %5 oranında kullanılması zemin numunesinin maksimum serbest basınç dayanımı değerini KI' de 425,6 kPa, KII' de 398,9kPa ve KIII' de 395,3 kPa ya kadar yükseltmiştir. Sıvılaştırılmış PET şişe atığının %20 oranında kullanılmasının maksimum serbest basınç dayanımı değerinde en az artışa sebep olduğu görülmektedir.

Sıvılaştırılmış PET şişe atığı ilave edilmesi ile maksimum gerilme değerini en çok artırdığı KI konfigürasyonu olduğundan donma-çözülme deneyleri bu konfigürasyon için yapılmıştır. Donma-çözülme deneyi sonucunda sıvılaştırılmış PET şişe atığının %5, %10, %15 ve %20 oranları için 1, 3, 5, 10 ve 15 donma-çözülme çevrimleri sonunda numuneler serbest basınç deneyi sonuçları kullanılarak çizilen Gerilme-Deformasyon ilişkileri çizilmiştir. KI-%5 için her bir donma-çözülme çevrimi için çizilen Gerilme - deformasyon ilişkileri Şekil 26' da bu ilişkiden faydalanılarak çizilen Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 27' de gösterilmiştir.



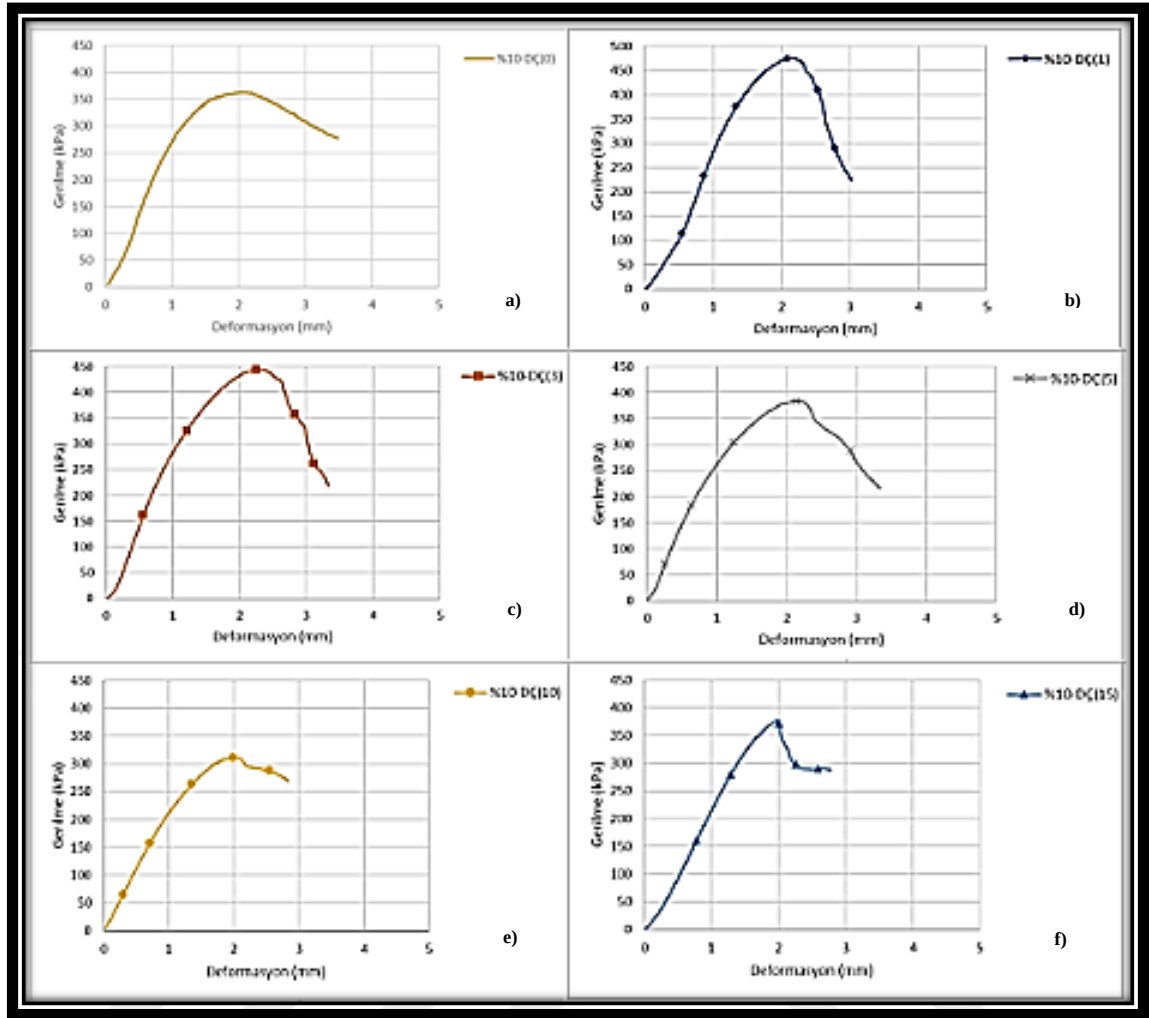
**Şekil 26.** a) %5-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi b) %5-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi c) %5-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi d) %5-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi e) %5-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi f) %5-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi



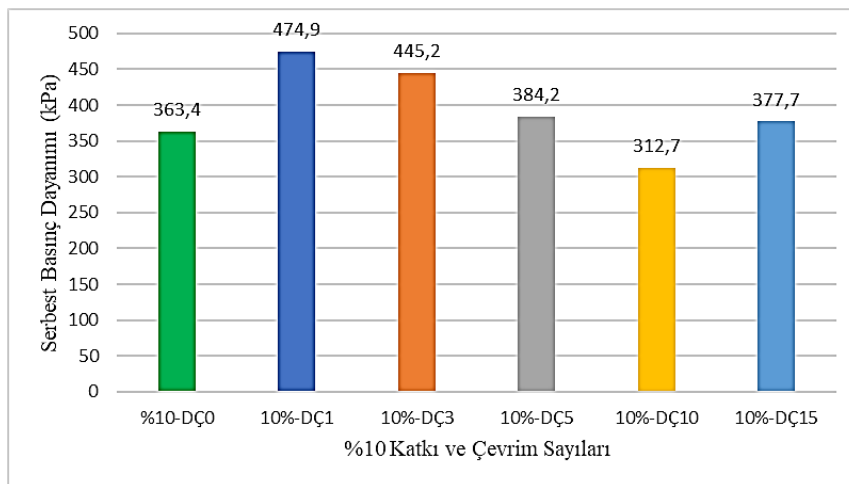
**Şekil 27.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KI-%5; 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrim sonrası)

Şekil 26 ve Şekil 27 incelendiğinde donma- çözülme çevrim sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç bize sıvılaştırılmış PET şişe atığının donma-çözölmeye karşı olumlu etkisini göstermektedir.

KI-%10 için her bir donma-çözölme çevrimi için çizilen Gerilme-Deformasyon ilişkileri Şekil 28’ de bu ilişkiden faydalanılarak çizilen Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 29’ da gösterilmiştir.



**Şekil 28.** a) %10-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi b) %10-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi c) %10-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi d) %10-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi e) %10-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi f) %10-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi

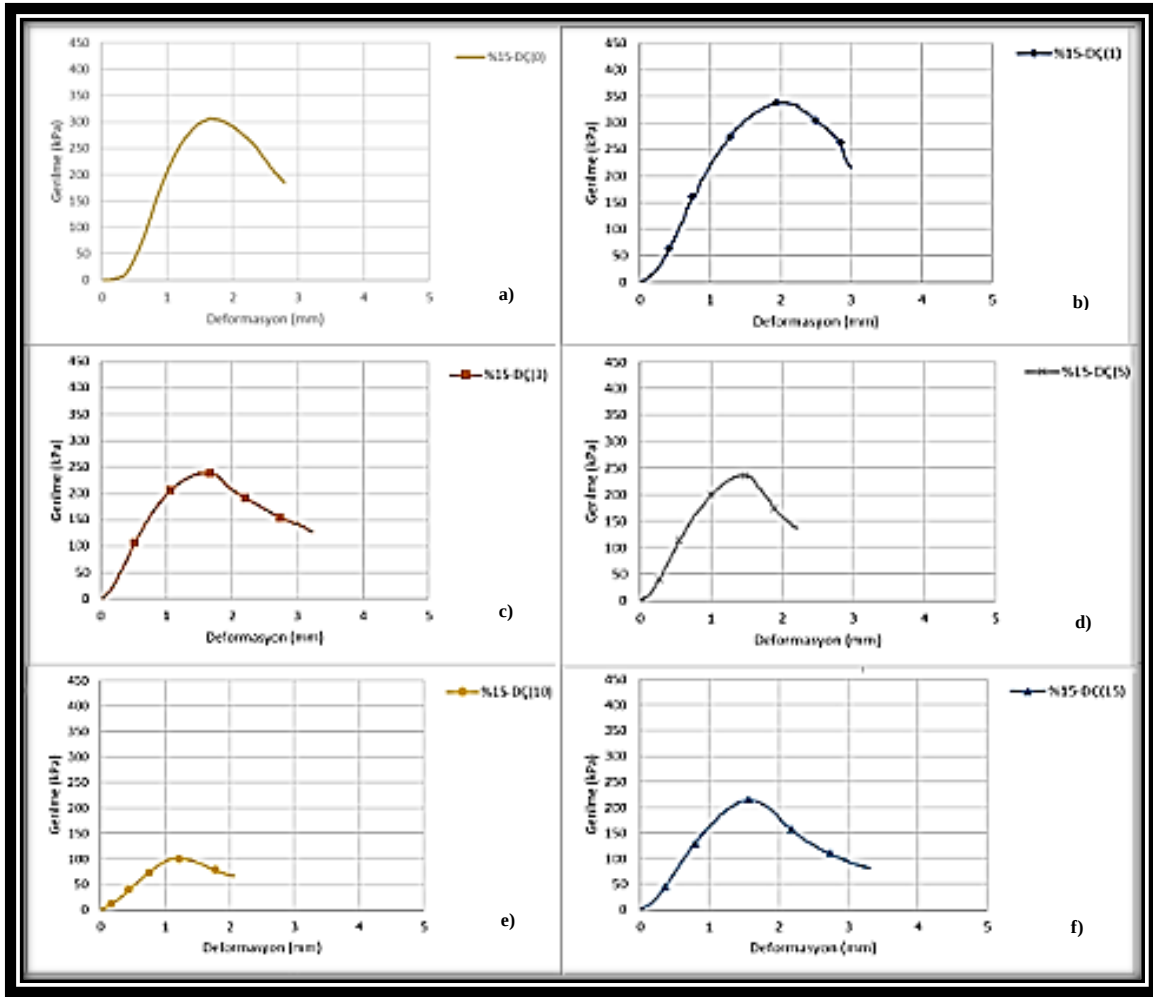


**Şekil 29.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KI-%10; 0,1, 3, 5, 10 ve 15 çevrim sonrası)

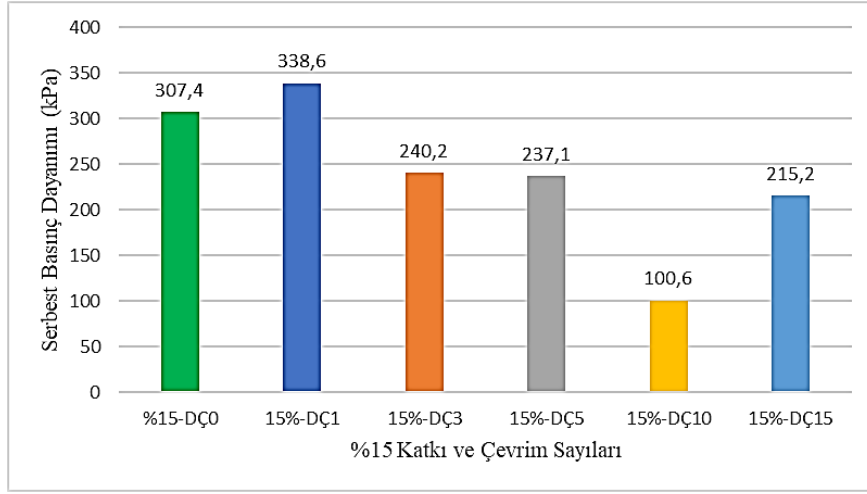
Şekil 28 ve Şekil 29 incelendiğinde donma- çözülme çevrim sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetinin azaldığı görülmekle birlikte 10 çevrim haricinde serbest basınç

mukavemetinin katkısız numunenin mukavemetinden daha yüksek olduğu da dikkatten kaçırılmamalıdır. Bu sonuç bize sıvılaştırılmış PET şişe atığının donma-çözölmeye karşı olumlu etkisini göstermektedir.

KI-%15 için her bir donma-çözölmeye çevrimi için çizilen Gerilme-Deformasyon ilişkileri Şekil 30’ da bu ilişkiden faydalanılarak çizilen Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 31’ de gösterilmiştir.



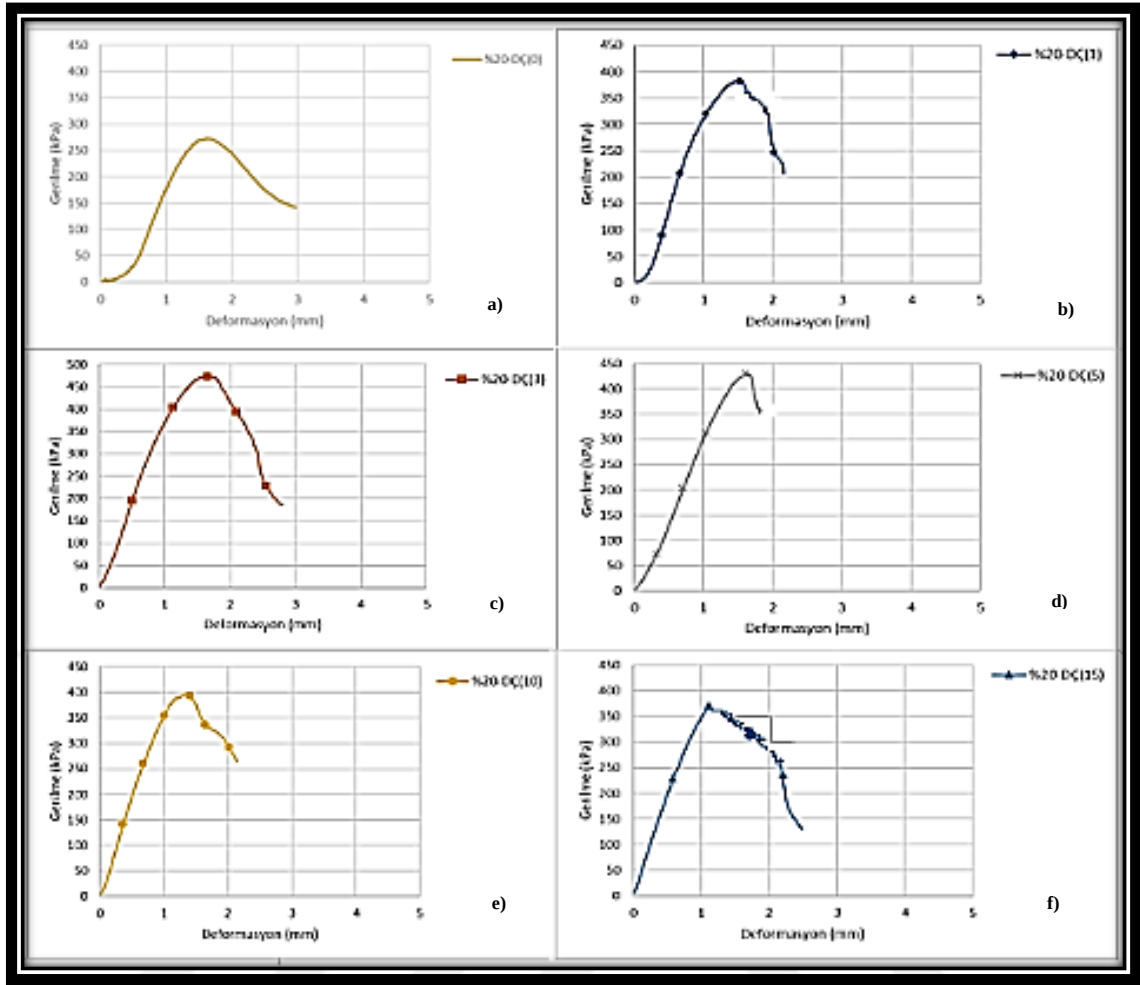
**Şekil 30. a) %15-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi b) %15-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi c) %15-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi d) %15-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi e) %15-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi f) %15-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi**



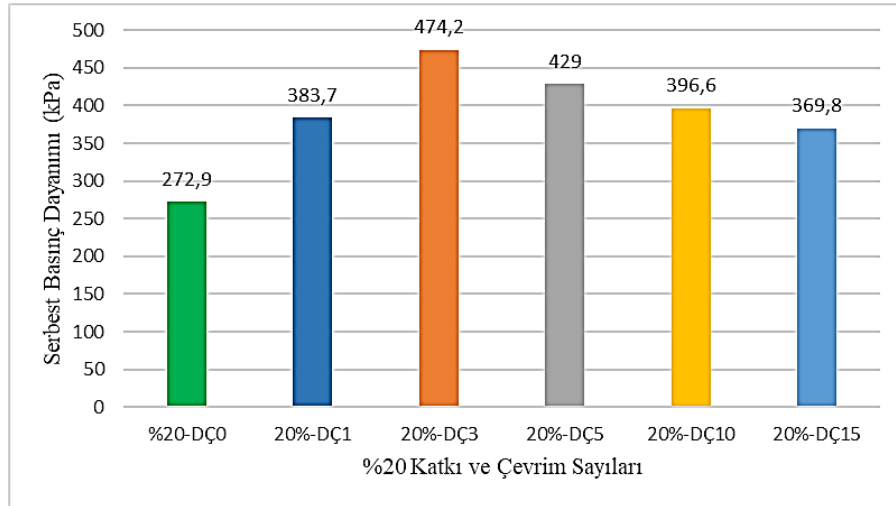
**Şekil 31.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KI-%15; 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrim sonrası)

Şekil 30 ve Şekil 31 incelendiğinde donma- çözülme çevrim sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetinin azaldığı görülmekle birlikte yalnızca 1 çevrimde serbest basınç mukavemetinin katkısız numunenin mukavemetinden daha yüksek olduğu da dikkatten kaçırılmamalıdır. Bu sonuç bize sıvılaştırılmış PET şişe atığının donma-çözölmeye karşı olumlu etkisini göstermektedir.

KI-%20 için her bir donma-çözölme çevrimi için çizilen Gerilme-Deformasyon ilişkileri Şekil 32’ de bu ilişkiden faydalanılarak çizilen Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi Şekil 33’ te gösterilmiştir.



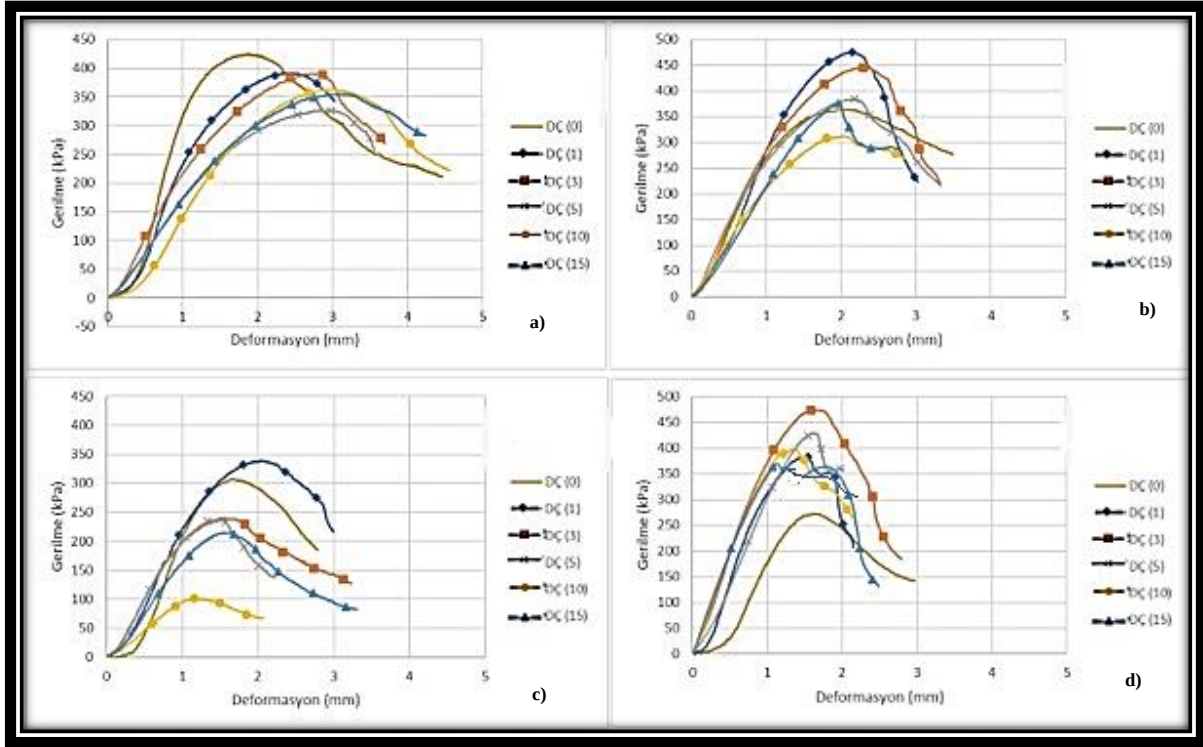
**Şekil 32.** a) %20-KI 0. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi b) %20-KI 1. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi c) %20-KI 3. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi d) %20-KI 5. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi e) %20-KI 10. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi f) %20-KI 15. çevrim sonrası gerilme-deformasyon ilişkisi



**Şekil 33.** Maksimum serbest basınç mukavemeti-katkı oranı ilişkisi (KI-%20; 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 çevrim sonrası)

Şekil 32 ve Şekil 33 incelendiğinde donma- çözülme çevrim sayısı arttıkça serbest basınç mukavemetinin çoğunlukla arttığı görülmekle birlikte 3 çevrimde serbest basınç

mukavemetinin katkısız numunenin mukavemetinden ve diğer çevrimlerden elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksek olduğu da dikkatten kaçırılmamalıdır. Bu sonuç bize sıvılaştırılmış PET şişe atığının donma-çözölmeye karşı olumlu etkisini göstermektedir. Şekil 34'te ise katkı oranları ile çevrim sayıları arasındaki ilişkilerin grafikleri toplu olarak görölmektedir.



**Şekil 34. a)** %5 katkıli numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim **b)** %10 katkıli numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim **c)** %15 katkıli numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim **d)** %20 katkıli numuneler ile çevrim sayıları arasındaki değişim

Şekil 34 incelendiğinde, %5 katkıli donma-çözölmeye çevrimlerinde çevrim sayıları arttıkça aynı deformasyonda zeminin maksimum gerilmesinin azaldığını fakat en düşük maksimum gerilmenin 5. çevrimde elde edildiği, %10 katkıli donma-çözölmeye çevrimlerinde çevrim sayıları arttıkça aynı deformasyonda zeminin maksimum gerilmesinin azaldığını fakat en düşük maksimum gerilmenin 10. çevrimde elde edildiği, %15 katkıli donma-çözölmeye çevrimlerinde çevrim sayıları arttıkça aynı deformasyonda zeminin maksimum gerilmesinin azaldığını fakat en düşük maksimum gerilmenin 10. çevrimde elde edildiği, %20 katkıli donma-çözölmeye çevrimlerinde çevrim sayıları arttıkça aynı deformasyonda zeminin maksimum gerilmesinin genel olarak azaldığını en düşük maksimum gerilmenin 1. çevrimde en yüksek maksimum gerilmenin ise 3. çevrimde elde edildiği gözlemlenmiştir.

### **Donma – çözölme deneyleri**

Harvard minyatör kompaksiyonundan elde edilen her bir konfigürasyona ait numunelerin serbest basınç mukavemetleri incelenmiş ve en yüksek değeri veren konfigürasyon (KI) numuneleri donma – çözölme deneyine tabii tutulmuştur. Donma – çözölme çevrim sayısı literatür verileri dikkate alınarak 0, 1, 3, 5, 10 ve 15 olarak belirlenmiştir. Her bir çevrimde numuneler donma - çözölme kabininde 12 saat süre ile bekletilmiştir. Çevrimini tamamlayan numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler alüminyum folyo ile kaplanıp donma çözölme kabinine konulmuştur (Şekil 35).



**Şekil 35.** Hazırlanan numunelerin donma çözölme kabinine yerleştirilmesi

## TARTIŞMA VE SONUÇ

- Doğal kilin likit limiti %77, plastik limiti ise %31 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden doğal kilin CH sınıfı zemin olduğu bulunmuştur.
- Katkılı kıvam deneylerinde 1.konfigürasyon (KI) sonucunda likit limitin tüm katkı oranları için düştüğü, plastik limitin ise sadece %5 katkı oranında düştüğü diğer oranlar için ise doğal zemininkiyle hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir. 2.konfigürasyon (KII) sonucunda likit limitin tüm katkı oranları için doğal zemininkiyle neredeyse aynı olduğu, plastik limitin ise sadece %10 katkı oranında düştüğü diğer oranlar için az miktar arttığı görülmüştür. 3. ve son konfigürasyon (KIII) sonucunda ise likit limitin tüm katkı oranları için düştüğü, plastik limitin ise sadece %5 katkı oranında düştüğü diğer oranlar için doğal zemininkiyle hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.
- Zemin davranışı %5 ve %15 oranları için KII' de, %20 oranı için ise KI' de bir miktar değişmiş ve zemin sınıfı MH olmuştur.
- Zemin davranışında değişim meydana gelmesi katkının ekleniş biçiminin zemin üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda katkının oranı da etki etmektedir. Zemin davranışının değişmesine özellikle plastik limitteki değişimin neden olduğu görülmektedir.
- Doğal zeminin optimum su muhtevası %21 olarak bulunmuştur.
- Katkısız (K0) serbest basınç deneyi sonucunda doğal zeminin maksimum serbest basınç dayanımı 298,70 kPa olarak bulunmuştur. Katkılı zeminlerin serbest basınç deney sonunda elde edilen maksimum serbest basınç dayanımı değerleri (KIII hariç) %20 katkı oranlarında düşmüş, diğer katkı oranları ve konfigürasyonlarının tümünde artmıştır.
- Deneylerden elde edilen sonuç tablolarına göre katkı malzemesi zeminin maksimum gerilmesine katkısı olumlu yönde olmuştur. Her konfigürasyon kendi içinde değerlendirildiği zaman ise katkı oranı artışı, zeminin maksimum serbest basınç dayanımında azalmaya yol açtığı görülmüştür. Bu durumda katkı miktarı arttıkça zeminin maksimum serbest basınç dayanımının düştüğü sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca katkı malzemesinin zemine ekleniş biçiminin de sonuçları etkilediği görülmektedir.

- Donma – çözülme deneyleri sonucunda sonuçların karşılaştırıldığı grafiklerden (Şekil 34) de görüleceği üzere;

%5 katkılı numunelerde çevrim sayısı arttıkça numunelerin serbest basınç dayanımı değeri genel olarak düşmüştür.

%10 katkılı numunelerde 1., 3. ve 5. çevrimlerde numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri donma çözülme tabii tutulmayan %10 katkılı numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinden fazlayken 10. ve 15. çevrimlerde daha düşüktür. %10 katkılı durumda numunenin donma-çözülme karşı olumlu sonuç verdiği kanısına varılabilir.

%15 katkılı numunelerde tüm çevrimlerde donma çözülme tabii tutulmayan %15 katkılı numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinden daha düşüktür.

%20 katkılı numunelerde tüm çevrimlerde numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri, donma çözülme tabii tutulmayan %20 katkılı numunelerin maksimum serbest basınç dayanımı değerlerinden fazladır. Aynı %10 katkıda olduğu gibi %20 katkı miktarında da donma çözülme karşı olumlu bir sonuç elde edilmiştir.

Her bir katkı oranı için çevrim sayılarını kendi aralarında karşılaştıracak olursak genel olarak çevrim sayısı arttıkça numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri düşmüştür.

- Yapılan tüm deneyleri incelediğimizde katkının, zemin üzerine genel ve sık olarak olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Burada önemli olan katkının miktarı, ekleniş biçimi ve donma çözülme çevrimleridir. Donma çözülme haricinde genel olarak %5 katkı oranı zemin üzerinde dayanımı artıran miktar olmuştur. Donma çözülmede ise %20 ve %10 katkı oranı zemin üzerinde dayanım artıran miktarlar olmuştur.
- Literatürde pek çok çalışmada pet şişenin katı olarak zemin stabilizasyonunda katkı olarak kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada katkı malzememiz atık pet şişenin sıvı halde kullanımınıdır. Sıvı halde kullanım daha önce çalışılmamış bir konu olduğu için literatüre kazandırılan yeni ve farklı bir çalışma olmuştur. Ayrıca donma çözülmede zemin üzerinde olumlu sonuç sağlaması da donma çözülme maruz kalan zeminler üzerinde umut vadetmektedir. Bunların yanı sıra pet atıklar yüz yıllarca doğada çözülmeden kalmaktadır ve dünyamızı ciddi derecede kirletip dünyamıza zarar vermektedir. Katı atıkların depolanma yöntemlerinden birisi olarak bu çalışmada kullanıldığı şekilde pet atıkların sıvılaştırılması eklenebilecektir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş., 2019. Effect of Aspect Ratio On The Freezing-Thawing of A CH Clay. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(1), 66-74.
- Akoğuz, H., 2014. Kum Zeminlerin Biyolojik İyileştirilmesinde Bacillus Arenosi Bakterisinin Kullanabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alpyürür, M., Şenol, A., 2018. Yüzeysel Zemin İyileştirmesinde Yeni Bir Malzeme Olarak Atık Gazbeton Kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(2), 168-178.
- Anonim, 2007. Aralık Bülteni, www.tepro.com.tr.
- Balkıs, A. P., 2009 Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirmesi, 3. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Batman, A., 2015. Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., Ovanda-Shelley, E., 2015. Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). Geotextiles and Geomembranes, 43(2015), 363-369.
- Çabalar, A. F., Akbulut, N., Aydın, A., 2013. Gaziantep'teki Kil Zeminlerin Kırmataş ile İyileştirilmesi ve Atık Lastik-Kırmataş Üzerine Bir Çalışma. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 1-14.
- Çalık, Y., Akbulut, R. K., Zaimoğlu, A. Ş., Yetimoğlu, T., 2019. Polipropilen Lif ile Rastgele Donatılandırılan Bir CH Kil Zeminin Donma-Çözülme Çevrimlerinde Serbest Basınç Dayanımının Araştırılması. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(2), 911-921.
- Çınar, M. E., 2016. Atık PET ve Mermer Tozunun Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Demiröz, A., Karaduman, M., 2009. Zemin İyileştirme Metotları. Selçuk Üniversitesi Selçuk-Teknik Dergisi, 3(8), 176-192.
- Farah, R. E., 2015. Performance Evaluation of Problematic Soils Reinforced with Plastic Wastes. Master of Science in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa.
- Hassani, A., Ganjidoust, H., Maghanaki, A. A., 2005. Use of Plastic Waste (Poly-Ethylene Terephthalate) in Asphalt Concrete Mixture as Aggregate Replacement. Waste Management & Research, 4(23), 322-327.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., 2015. Kil Mineralleri. Geoteknik Mühendisliğine Giriş, Çeviri Ed.: Prof. Dr. Ayfer Erken. Nobel Yayınevi, Ankara, 123-134.
- Ilies, N., Farcaş, V., Mureşan, O., Gherman, M., Chiorean, V., 2017. Soil Improvement with Polyethylene Waste Materials in order to Improve Mechanical Parameters. Section Hydrogeology, Engineering Geology and Geotechnics, 17(1), 751-758.

- Işık, M. A., Killerin Mukavemet ve Donma-Çözülme Davranışlarına Reçinelerin Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- İnkaya, N., 2016. Atık Plastiklerin Karayolunda Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Joshi, S. V., Gonnade, E. M., 2020. Stabilization of Expansive Soil Using Chemical Stabilizer with Cement. *Helix*. 10(1), 105-108.
- Kolay, P. K., Dhakal, B., Kumar, S., Puri, V. K., 2016. Effect of Liquid Acrylic Polymer on Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Int. J. Of Geosynth and Ground Eng.* 2(29), 1-9.
- Lim, A., Atmaja, P. C., Rustiani, S., 2020. Bio-mediated Soil Improvement of Loose Sand with Fungi. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2020), 180-187.
- Louzada, N. S. L., Casagrande M. D. T., 2016. Study of the Mechanical Behavior of a Clayey Soil with the Insertion of Polyethylene Terephthalate Flakes. *Geo-Chicago 2016 GSP* 271, 885-892.
- Mishra, B., Gupta, M. K., 2018. Use of Randomly Oriented Polyethylene Terephthalate (PET) Fiber in Combination with Fly Ash in Subgrade of Flexible Pavement. *Construction and Building Materials*, 190(2018), 95-107.
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C. And Olavar, J., 2019. Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness of Hot Asphalt Mixtures. *Hindawi Advances in Civil Engineering*. 6 pages.
- Orhan, M., 2019. Zemin Stabilizasyonu. *Geoteknik Mühendisliği ve Temel İnşaatı*. Gazi Kitabevi, Ankara, 541-542.
- Özaydın, K., 2005. Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği*. Birsan Yayınevi, İstanbul, 226-241.
- Özel, C., Filiz, M., Sevinç, A., Kıran, C., 2011. Betonda Fiber Katkı Olarak Polietilen Tereftalatın Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *SDU International Technologic Science*, 3(2), 17-28.
- Özdemir, B., 2019. Doğal/Sentetik Lif ve Uçucu Kül Katkılı Killerin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Öntürk, K., 2011. Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Peddaiah, S., Burman, A., Sreedeeep, S., 2018. Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(10).
- Rai, A. K., Singh, G., Tiwari, A. K., 2020. Comparative Study of Soil Stabilization with Glass Powder, Plastic and e-waste: A Review. *Materials Today: Proceedings*. 32(4), 771-776.
- Salimi, K., Ghazavi, M., 2019. Soil Reinforcement and Slope Stabilisation Using Recycled Waste Plastic Sheets, *Geomechanics and Geoengineering an International Journal*, DOI:10.1080/17486025.2019.1683620.
- Saygılı, A., 2018. Kaolen Türü Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Melamin Formaldehit Sıvı Polimeri Kullanarak İyileştirilmesi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 133-139.
- Sevencan, F., Vaizoğlu, S. A., 2007. PET ve Geri Dönüşümü. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 6(4), 307-312.

- Singh, K., Mittal, A., 2019. Soil Stabilisation Using Plastic Waste. Recycled Waste Materials, (32), 91-96.
- TS 1900-1. 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini.
- TS 1900-2. 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini.
- Türköz, M., Savaş, H., Tosun, H., 2010. Problemlili Kil Zeminlerin Magnezyum Klorür Solüsyonu ile İyileştirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(1), 233-242.
- USBR-5510. 1989. Performing Laboratory Compaction of Soils-Harvard Miniature United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Vidales, J., Hernandez, N., Lopez, J., Flores, E., Hernandez, L., 2014. Polymer Mostars Prepared Using a Polymeric Resin and Particles Pbtained from Waste PET Bottle. Construction and Building Materials, 65(2014), 376-383.
- Vural,İ., 2018. İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 7(1), 1-6.
- Zaimoğlu, A. Ş., 2009. Freezing-Thawing Behavior of Fine-Grained Soils Reinforced With Polypropylene Fibers. Cold Regions Science and Technology, 60(2010), 63-65.
- Zorluer, İ., Gücek, S., 2016. Zemin İyileştirmede Endüstriyel Atıkların Dayanıma Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2016), 244-248.
- Zukri, A., Nazir, R. and Mender, F. N., 2017. An Experimental Study on Stabilization of Pekan Clay Using Polyethylene and Polypropylene. American Institute of Physics, 030002(2017), 1-6.

## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler              |                                                                       |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Adı Soyadı:</b>            | Namenur İBİŞ                                                          |
| <b>Doğum tarihi:</b>          |                                                                       |
| <b>Doğum Yeri:</b>            |                                                                       |
| <b>Uyruğu:</b>                |                                                                       |
| <b>Adres:</b>                 |                                                                       |
| <b>Tel:</b>                   |                                                                       |
| <b>E-mail:</b>                |                                                                       |
| Eğitim                        |                                                                       |
| <b>Lise:</b>                  | Nenehatun Kız Anadolu Lisesi                                          |
| <b>Lisans:</b>                | Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü |
| <b>Yüksek lisans:</b>         | Atatürk Üniversitesi, Geoteknik Anabilim Dalı (2022)                  |
| <b>Doktora:</b>               | -                                                                     |
| Yabancı Dil Bilgisi           |                                                                       |
| <b>İngilizce:</b>             |                                                                       |
| Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar |                                                                       |
|                               |                                                                       |
| Tezden Üretilmiş Yayınlar     |                                                                       |
|                               |                                                                       |